

第Ⅱ編 新技術評価事例編

本編は、適用基準を道路橋示方書とする道路橋の設計・施工を行うにあたって、鋼およびコンクリートの道路橋に関して近年検討事例のある新しい技術を例として、具体的な道路橋示方書の求められる性能が満足されることを評価するために、各技術に特有の事項で道路橋示方書の規定だけでは性能評価が困難な設計項目に着目して検証にあたっての課題と評価方法の例を示したものである。

事例にある同じ技術や工法のみならず、事例には取り上げていない技術や工法に対しても性能評価を行うにあたっての着目点や留意点、評価計画立案にあたっての観点などの多くは共通する部分があるためこれらの事例を参考にすることでより充実した性能評価につながるものと考えられる。

なお、ここで例示した照査方法や照査項目によって全ての橋の条件において当該技術が所要の性能が満足されるとみなせるものではなく、あくまで様々な新技術、新工法について個別に道路橋示方書などの技術基準との適合性の観点で性能評価を行う場合のその方法論の例示としてとりまとめたものであることに注意が必要である。

1 コンクリート橋

1.1 外ケーブル構造

1.1.1 概要

外ケーブル構造は、一般に、ケーブルシステム、定着部、偏向部の3要素で構成され、その設計においては、構成要素それぞれの性能照査に加え、外ケーブル構造の適用に伴う特性変化を考慮した全体構造に対する性能照査を実施することになる。橋梁の性能に影響を与える外ケーブル構造の特性及び荷重・劣化作用は図-1.1.1.1に示すとおりであり、従来の内ケーブル構造に比べて同等以上の安全性や耐久性を確保するためには、設計時において、これらに十分配慮する必要がある。

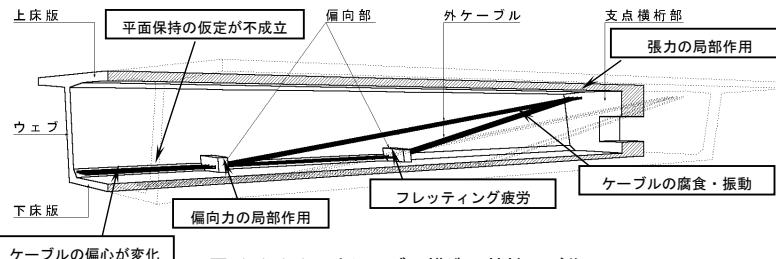


図-1.1.1.1 外ケーブル構造の特性及び作用

このような外ケーブル構造の特性や作用が各部材に与える構造的な影響については、これまで多くの研究があり、そこで得られた知見が道路橋示方書や各種公的機関から発刊されたマニュアル類の内容に反映されている。例えば、設計の基本事項や主げたの安全性照査については、道路橋示方書III18.5に示されており、さらに、定着部及び偏向部の安全性照査や外ケーブルの防食仕様・疲労対策等の具体については、関連するマニュアル類により補完されている。

このため、多くの場合、道路橋示方書をはじめとする既存の設計基準を準用した慣用的な検証が可能であるが、外ケーブル構造は設計の自由度が高く、様々な構造形式への適用が可能な反面、細部仕様が多岐に渡るため、橋梁の構造によっては、慣用法を適用する上で前提条件を満足せず、その準用に疑義が生じる場合がある。このような場合には、橋梁の構造特性に応じて直接的方法(实物大試験)や間接的方法(FEM解析等)による検証を適宜実施し、性能を評価する必要がある。

既存の設計基準に示された慣用的な検証方法や構造細目を準用することに疑義が生じるおそれのある外ケーブル構造の事例を以下に示す。

- ① PC鋼材が部材の外側に配置されることによる構造的な影響が顕著に現れ、外ケーブルを内ケーブルとみなして取り扱う等の方法では、照査結果の信頼性が問題となる構造
- ② プレストレス力が定着部及び偏向部を介して主げたに伝達されることに起因するプレストレス分布の断面内での不均等や局所的な乱れが、設計上問題となる構造
- ③ 定着部あるいは偏向部の部材形状や荷重作用が複雑で、ケーブル張力や偏向腹圧力の作用に伴う局部応力の発生、破壊時の挙動を把握することが困難な構造
- ④ 外ケーブルの耐久性を損なう環境外力やフレッティング等の各作用に対し、これまでの実績に基づいて定められた規定や構造細目を準用して対処することが困難な構造

1.1.2 技術評価の観点と方向性

外ケーブル構造を適用した橋梁が道路橋に要求される性能を満足することを確認するにあたっては、道路橋示方書の準用に疑義が生じる構造や関連基準に示されたみなし規定に従わない構造において、以下に示す観点からの技術評価が必要とされる場合がある。

また、既存の関連基準を準用することで概ね所定の性能を確保できると判断されることから本編で取り上げていないその他の外ケーブル構造の特性や作用についても、設計及び施工に関する技術的課題として留意する必要がある。

■主げたの安全性に関する観点

項目No	技術評価の観点	橋梁の性能に影響を与える外ケーブル構造の特性及び作用	想定する状態	道路橋の要求性能
種別	性能項目			
1-1	道示を準用してプレストレスの広がりを考慮することに疑義が生じる場合の検証	◆横析や隔壁、あるいは突起を介して主析にプレストレスが伝達されるため、定着部および偏向部周辺において応力の乱れが発生する場合がある。	有害なひび割れの発生	安全性(供用時)
1-2	①外ケーブル構造としての特性が顕著となる構造で外ケーブルを内ケーブルとみなして道示を準用することに疑義が生じる場合の検証 ②破壊部位の特定が困難で、線形解析による断面力を用いて安全性を照査することに疑義が生じる場合の検証	◆ケーブルの張力増加が小さくなるため、同じプレストレスが導入された内ケーブル構造に比べ曲げ耐力が低下する。 ◆部材の変形に伴いケーブルの偏心が小さくなるため、曲げ耐力が低下する。	曲げ破壊	安全性(断面破壊)
1-3	プレキャストセグメント橋に全外ケーブル構造を適用する場合のせん断破壊に対する検証	◆斜めせん断ひび割れが発生した時に外ケーブルが引張弦材として機能しない。	せん断破壊	

■定着部及び偏向部の安全性に関する観点

項目No	技術評価の観点	橋梁の性能に影響を与える外ケーブル構造の特性及び作用	想定する状態	道路橋の要求性能
種別	性能項目			
2-1	梁や版に置き換えた簡易モデルにより断面力を算定することが困難な場合の検証	◆定着部あるいは偏向部として機能させる支点横けたや隔壁に大きな断面力が発生する。	有害なひび割れの発生	安全性(供用時)
2-2	部材形状や荷重の集中作用が複雑な場合の検証	◆定着部となる支点横けたあるいは中間突起にケーブルの緊張力が直接作用し、大きな局部応力が発生する。		
2-3	ひび割れの発生をできるだけ制限することが望ましい場合の照査方法と許容応力度の設定	◆偏向部横けた(隔壁)にケーブルの偏向分力が作用し、局部的な応力が発生する。		
2-4	①道示の準用のみでは終局耐力を算定することが困難な場合の検証 ②破壊過程を想定することが困難で、既存の耐力算定式を準用することに疑義が生じる場合の検証	◆外ケーブル張力の集中作用により局部的な破壊が生じるおそれがある。 ◆突起定着の場合、周辺部材(床版、ウェブ)の破壊に対する配慮が必要となる。	曲げ／せん断破壊	安全性(断面破壊)

■外ケーブルの耐久性に関する観点

道路橋の要求性能		想定する状態	橋梁の性能に影響を与える外ケーブル構造の特性及び作用	技術評価の観点	項目No
種別	性能項目				
耐久性 (腐食)	経年的な劣化により供用性、安全性が損なわれないと (道示Ⅲ5.1)	鋼材腐食に伴う引張・疲労強度の低下	◆水分や酸素等、環境外力の作用により外ケーブルが腐食するおそれがある。	ケーブルが外部環境に置かれる場合の防食方法の選定及び性能評価	3-1
耐久性 (疲労)	疲労、振動の影響により構造物の安全性が損なわれないと (道示Ⅲ2.1)	ケーブルの共振による疲労 フレッチング疲労破断	◆外ケーブルが振動の影響を受ける。 ◆偏向部においてPC鋼材にフレッチングや附加曲げが生じる。	供用中に発生する振動の定量的評価と対応策 外ケーブルの許容応力度や最小曲げ半径等に関するみなし規定に従わない場合の疲労耐久性的検証	3-2

■その他設計・施工上の留意点

道路橋の要求性能		着目する部位	想定する状態	設計・施工に関する技術的課題	対応策(例示)
種別	性能項目				
安全性 (供用時)	供用性を低下させないために必要な構造物の安全性を確保すること (道示Ⅲ2.1)	主げた	有害なひび割れの発生	◆プレストレスの減少過程における部材のクリープ・乾燥収縮の影響が内ケーブルと異なる。 ◆ひび割れが発生した時の分散性が悪くなる(ひび割れ幅が大きくなる)。 ◆曲げが正負交番作用する部分で外ケーブルを集中して偏向させると部材縁でひび割れが生じやすい。	◆応力度算定においてプレストレス力を適切に評価する。 ①内力評価法(道示Ⅲ18.5.1解説) ②外力評価法 ③部材評価法(道示Ⅲ18.5.1解説) ◆内ケーブルに比べ部材の曲げひずみの影響が小さいため、クリープ・乾燥収縮による応力度の減少量が小さく、みかけのレラクセーション率が大きくなる影響を考慮する。 ◆道示Ⅲ6.5(引張鉄筋)に従う。 ◆偏向部を分散して配置する。 ◆施工性、経済性を著しく損なうことを理由にケーブルを集中して偏向させる場合にはモーメントシフトを考慮して部材応力度を照査する。
施工品質の確保	使用目的との適合性や構造物の安全性を確保するために確実な施工を行える性能を有すること (道示Ⅰ1.5)	ケーブル／保護管	-	◆被覆鋼材や保護管を用いる場合、施工中に樹脂の損傷や変質が生じるおそれがある。	◆保管方法、断面内への搬入方法等、施工条件を考慮して防食の仕様を決定する。
		ケーブル／偏向管	-	◆偏向管の据え付け精度が悪いとPC鋼材に局所的な折れが生じる。	◆偏向管の形状に配慮する(ティアボロ管等)。
		定着部／偏向部	-	◆定着部や偏向部の配筋が密となりコンクリートの充填性が悪くなる。	◆コンクリートのスランプおよび打設方法を想定して配筋を計画する。
維持管理の容易さ	供用中の日常点検、材料の状態の調査、補修作業が容易に行えること (道示Ⅰ1.5)	ケーブル	-	◆ケーブルが将来的に交換あるいは追加できる。	◆交換を前提とする場合、桁端の作業スペースの確保に配慮し交換可能な外ケーブル仕様を採用する。 ◆ケーブルが追加できるよう予備孔を設置する。

(1) 主げたの安全性

1-1) プレストレスの分布に対する検証

■関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書Ⅲ18.5.2 設計一般]

(2) 外ケーブルの定着部及び偏向部は、ケーブル張力を主げたへ円滑に伝達できる構造とするものとする。

[道路橋示方書Ⅲ6.6.7 PC鋼材の定着]

(1) 定着具の位置は、部材に所定のプレストレスを導入できるように、また、部材に有害なひび割れが生じないように選ぶものとする。
(3) 部材の中間に定着具を設ける場合は、活荷重による応力変動の大きな点から十分離れた断面の断面図心に近い位置か、圧縮部のコンクリートに定着するのがよい。

(1)、(3) 定着具近くの断面では、プレストレス力の局部集中等の影響による応力の乱れがあって、定着具付近からはなれた断面の応力分布とは異なるので注意する必要がある。プレストレス力の広がりの角度 β については、実験結果によるとほぼ45°前後といわれているが、安全をみて $\tan\beta=2/3$ すなわち $\beta=33^{\circ}40'$ とするのが望ましい。· · ·

■技術的課題

外ケーブルを突起等により主げた部材に直接定着するような構造や広幅員一室箱げたのようにウェブ間隔が広い構造では、プレストレスの導入に伴う主げたや横げたの面外変形等に起因して、定着部に近い設計断面におけるプレストレスの分布が道路橋示方書に基づく仮定よりも危険側となる場合がある。

■性能評価の対応策

定着部近傍における主げた断面内のプレストレス分布状態をFEM解析により確認し、解析結果に基づいて外ケーブルの有効本数を設定する、あるいは、直接、断面応力度を照査することにより、架設時や設計荷重作用時の安全性を検証する。

【解説】

外ケーブルが部材厚の厚い横げたや隔壁に定着される場合、定着位置からのプレストレス力の広がりは、実際の定着位置から最も近いウェブやフランジに定着位置があるものと仮定し、道路橋示方書Ⅲ6.6.7の解説を準用して算定できる¹⁻¹⁻¹⁾。

これに対し、中間支点横げたの両側に外ケーブルがたすきがけの状態で定着される構造において、橋体全幅が広い、張出し床版長が大きい、中間横げた厚が小さい等の条件に該当する場合には、横げた区間内で有効に伝達されると仮定した中間支点付近のプレストレスが実態と異なる可能性がある。このような場合の対応策として、FEM解析等により分布状態を確認し、設計上の有効本数を設定する方法がある¹⁻¹⁻¹⁾。

一方、片持張出し工法のように架設途中のブロック打継目におけるプレストレスの分布状態が問題となる構造では、外ケーブルを架設ケーブルとして用いると、突起定着近傍の応力の乱れに伴い直近のブロック打継目において上床版先端のプレストレスが不足する場合がある。このため、プレストレスに関するせん断遅れ(シェアラグ)現象をFEM解析で確認し、内ケーブルを併用する等の対策により、上床版先端の応力状態を改善した事例がある。

[参考文献]

1-1-1)(社)プレストレストコンクリート技術協会:外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法設計施工規準、I共通編7.4(4), 平成17年6月

1-2) 曲げ破壊に対する検証

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書Ⅲ18.5.2 設計一般】

(1) 外ケーブル構造は、・・・・外ケーブル構造の特性を考慮して設計するものとする。

1) 部材断面の応力度及び耐力の照査方法について

i) 外ケーブルを内ケーブルとみなして取り扱う方法

終局荷重作用時における破壊に対する安全度の照査に用いる破壊抵抗曲げモーメントの算出については・・・次のいずれかの方法で算出する。

a) 終局荷重作用時における外ケーブルの応力度が、設計荷重作用時における応力度から増加しないと仮定するか、あるいは載荷試験の結果等を参考に、この増加量を仮定して4.2.4(2)の規定により算出する。これまでの実績では、この増加量を100N/mm²程度として設計に見込んでいる例が多い。

b) 外ケーブルを付着しないPC鋼材とみなして4.2.4(2)の規定により算出する。

【道路橋示方書Ⅲ4.1 総則】

(2) 設計荷重作用時及び終局荷重作用時の構造部材の照査に用いる断面力の算定は、棒部材を用いた線形解析に基づくものとする。・・・・

■技術的課題

① 外ケーブルを内ケーブルとみなして破壊抵抗曲げモーメントを算出するにあたり、外ケーブルの配置条件によっては、終局荷重作用時におけるケーブルの応力度をこれまでの実績に基づいて仮定することに疑義が生じる場合がある。

② 終局に至るまでの部材の剛性低下や軸線の移動に伴い作用する断面力が大きく変化し、破壊部位の特定が困難な場合は、線形解析に基づく終局荷重作用時の照査に疑義が生じる。

■性能評価の対応策

① 終局荷重作用時における外ケーブル応力度の増加量を、既存の簡易算定式を用いて仮定することにより、破壊抵抗曲げモーメントを算定する。

② 終局荷重作用時の挙動が不明確な場合や外ケーブル張力の荷重載荷に伴う変動を精度良く推定することが主げたの安全性を検証する上で重要と判断される場合には、外ケーブルを独立した部材としてモデル化し、材料および幾何学的非線形性を付与した複合非線形解析を実施することにより、曲げ破壊に対する安全性を検証する。

【解説】

① 破壊抵抗曲げモーメントを算定する際に用いる外ケーブルの応力度は、有効高さや定着間距離、外ケーブル比率、偏向部の設置箇所等に応じて橋梁毎に異なるため、これらの諸条件を反映し得る方法を用いて設定する必要がある。例えば、種々の制約により標準的でない高が確保できず外ケーブルの有効高さが小さい場合、複数径間に渡って連続して配置される(定着間距離が長い)場合、中間支点上を跨いで途中定着される場合(張出し架設工法)等においては、載荷に伴う外ケーブルの応力増加が小さい傾向にあり、さらに、外ケーブル比率の高い構造では、こ

のような特性の破壊抵抗曲げモーメントに与える影響が大きくなるので注意が必要である。

終局荷重作用時における外ケーブル応力度の増加量については、その簡易算定法が諸外国の設計基準や国内の研究で提示されており¹⁻²⁻¹⁾、例えば、複合非線形解析を用いた各種変数の感度分析とケーススタディに基づいて提案された方法^{1-2-2),1-2-3)}では、外ケーブルの有効高さと定着間距離の比率に応じた増加応力度を与える。

② 斜張橋やエクストラドーズド橋に外ケーブルを併用した構造や、外ケーブルのみでプレストレスを与える構造(全外ケーブル構造)をプレキャストセグメント橋に適用する等において、終局荷重作用時の挙動を事前に予測することが困難な場合には、終局に至るまでの部材剛性の低下やセグメント継目部の目地開き、ケーブル偏心量の変化等を考慮することが可能な複合非線形解析により安全性を検証する方法がある。

既往の解析事例¹⁻²⁻⁴⁾では、解析モデルに死荷重および活荷重に相当する荷重を漸増載荷して、載荷に伴う外ケーブルの張力増加や偏心量変化を逐次考慮した応答値を算定し、各設計断面のいずれかが終局ひずみに達したときの荷重倍率と道路橋示方書で規定される荷重係数の大小関係により、曲げ破壊に対する安全性を照査している。

【参考文献】

- 1-2-1) (社)土木学会:PC構造物の現状の問題点とその対策(コンクリート技術シリーズ52), pp.53-74,
2003-6
1-2-2) 小坂他:外ケーブルを用いたPC橋の終局曲げ挙動に関する研究, 土木学会論文集No.613/V-42,
pp.147-164, 1990-2
1-2-3) (社)プレストレストコンクリート技術協会:外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法設
計施工規準, II外ケーブル構造編6.1.2(3), 平成17年6月
1-2-4) 例えば、佐藤他:外ケーブルを併用した新強首橋の設計, プレストレストコンクリートVol.41
No.5, pp.31-37, 1999-9

1-3)せん断破壊に対する検証

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書III18.5.2 設計一般】

(1) 外ケーブル構造は、・・・・外ケーブル構造の特性を考慮して設計するものとする。

4) せん断力及びねじりモーメントに対する照査について

外ケーブル構造のせん断力やねじりモーメントに対する照査は、内ケーブル構造と同様に
4.3及び4.4の規定に従ってよい。ただし、外ケーブルは、・・・・トラス理論におけるモデル
の引張弦材とみなしてはならない。

■技術的課題

プレキャストセグメント橋に全外ケーブル構造を適用する場合、部材内の引張鋼材が不連
続となるため、トラス状の耐荷機構を前提としたせん断に関する耐力算定式の適用に疑義が
生じる。

■性能評価の対応策

セグメント継目部のせん断伝達耐力が、軸方向鋼材の連続した構造と同等以上であること
を確認した上で、継目部以外の断面におけるせん断耐力をトラス理論に基づいて算定する。

【解説】

プレキャストセグメント橋におけるセグメント継目部のせん断伝達耐力については、接合キ
ーの耐力と終局荷重作用時に圧縮域となるウェブの摩擦抵抗の和として算定する方法がある
1-3-1)。部材内の引張鋼材が不連続な場合においても、この方法により継目部の安全性を確認する
ことを前提として、継目部以外の断面における斜引張せん断耐力を従来のトラス理論を適用し
て算定できる可能性がある¹⁻³⁻²⁾。

単純化した構造を対象とした既往の研究¹⁻³⁻³⁾においても、道路橋示方書を準用した斜引張せん
断耐力は実験値に比べて安全側の値であることが確認されているが、連結された構造の中間支点
部のように大きな曲げとせん断の作用を同時に受ける部位では、曲げ破壊に対してせん断破壊
が先行する脆性的な破壊性状を示した実験事例¹⁻³⁻⁴⁾もあるので、終局荷重作用時のセグメント
目地の開きを抑制しウェブの圧縮域を十分確保し得るプレストレスの導入等、所要のせん断耐
力を確保するための対策を講じる必要がある。

【参考文献】

- 1-3-1) (社)プレストレストコンクリート技術協会:外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法設
計施工規準, IIIプレキャストセグメント工法編8.3(1), 平成17年6月
1-3-2) (社)プレストレストコンクリート技術協会:外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法設
計施工規準, IIIプレキャストセグメント工法編6.2.3(1), 平成17年6月
1-3-3) 西川他:外ケーブルを適用したPC桁の曲げ・せん断挙動に関する研究, プレストレストコン
クリートVol.42, No.5, pp.25-36, 2000-9
1-3-4) 大塚他:外ケーブルを用いたプレキャストセグメント桁の中間支点におけるせん断耐力の評
価に関する研究, 橋梁と基礎Vol.40, No.2, pp.39-48, 2006-2

(2) 定着部及び偏向部の安全性

2-1) 設計断面力の算定

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書III10.4 支点横げた及び隔壁の設計】

- (1) 支点横げた及び隔壁の断面力は、支点や部材の結合条件等に応じた解析理論及び解析モデルを設定して算出するものとする。
 (2) 支点横げた及び隔壁の断面力の算出は、はり理論によってよい。

■技術的課題

定着部や偏向部は、壁状部材や突起状部材で構成され、これらが主げたで拘束されている複雑な立体構造を有しているため、梁や版に置き換えた簡易モデルにより断面力を算定する場合には、解析結果に相応の誤差を含んでいるおそれがある。

■性能評価の対応策

慣用的な断面力の算定にあたっては、これを用いた断面応力度や引張力がFEM等の高度解析結果に比べて同等あるいは安全側であることが明確にされている構造条件の範囲で実施することにより、精度を担保する。

【解説】

53

定着部や偏向部は、外ケーブルの張力を主げたに円滑に伝達するため、主構造として本来存在する十分剛な横げたや隔壁の一部にその機能を持たせることが多いが、主げたの断面形状、架設工法の制約(例えば外ケーブルを多用した張出し架設工法やプレキャストセグメント工法との組合せ等)により、その構造が多岐に渡るため、簡易法による断面力の算定にあたってはその適用性に十分配慮する必要がある。

表-1.1.2.1は、定着部及び偏向部の構造を主げたの拘束面数で分類し、各構造に対する慣用的な断面力算定方法^{2-1-1,2-1-2)}を例示したものである。拘束面数が多い場合(3~4面)では、簡易モデルによる断面力を用いて応力度を算定する事例が多いが、形状が複雑あるいは開口の影響が無視できない場合にはFEM解析による応力照査が併行される場合もある。一方、拘束面数が少ない場合(1~2面)には、着目部位を抽出し独立した構造体として扱う簡易モデルでは周辺部材への力学的な影響(局部応力)の把握が困難なため、実挙動に近い解析応答値(FEM解析等)により安全性が検証される場合が多い。

【参考文献】

2-1-1)(財)高速道路技術センター：外ケーブルを用いたPC橋梁の設計マニュアル、平成8年8月

2-1-2)(社)日本道路協会：コンクリート道路橋設計便覧、平成6年2月

表-1.1.2.1 定着部及び偏向部の断面力算定方法(例)

種別	4面拘束	3面拘束	2面拘束	1面拘束	
概要図 (箱げたの例)					
断面力の算定 (解析モデル)	定着部 梁モデル 格子モデル ²⁻¹⁻¹⁾ 平板モデル 2D-FEM解析(シェル要素)	偏向部 梁モデル及び局部引張力の簡易算定式 ²⁻¹⁻¹⁾ 2D-FEM解析(シェル要素)	梁モデル 格子モデル 平板モデル 2D-FEM解析(シェル要素)	コベル 内ケーブル突起定着部の簡易設計法 ²⁻¹⁻²⁾	コベル 内ケーブル突起定着部の簡易設計法 ²⁻¹⁻²⁾
モデル化の概要	定着部 				
	偏向部 				

2-2) 局部応力に対する検証

■関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書Ⅲ18.5.3 構造細目]

(I) 外ケーブルの定着部及び偏向部は、ケーブルの張力及びケーブルが偏向することにより生じる局部応力に対して、鉄筋あるいはPC鋼材によって補強するものとする。

■技術的課題

定着部あるいは偏向部の部材形状や荷重の作用が複雑な場合には、慣用的な局部応力の算定やその補強設計に疑義が生じる。

■性能評価の対応策

引張応力の分布状態を簡易解析で推定することが困難な場合や、大きな局部応力の作用に伴うひび割れの発生が懸念される場合には、当該部位とその周辺の拘束部材を含めた再現性の高い立体モデルでFEM解析を実施することにより、安全性を検証する。

【解説】

外ケーブル構造は、比較的大容量のケーブルシステムが用いられるため、プレストレス力や偏向腹圧力の集中作用により、定着部や偏向部に大きな局部応力が発生する。このため、定着具前面や偏向管周辺に発生する支圧応力や割裂応力、部材隅角部の主引張応力等の局所的な作用に対して、部材に有害なひび割れが生じないよう十分な補強鉄筋を配置する必要があるが、1つの部位で定着部や偏向管が多段・多列配置される場合や近傍に開口部等の断面変化が存在する場合には、応力状態が複雑となり、既存の文献^{2-2-1～2-2-3)}等に示されている簡易手法を参考にした局部の照査が困難となる。

外ケーブル構造においては、定着部や偏向部を介してプレストレス力が橋体に伝達されるため、ケーブルの定着あるいは偏向位置から応力分布が一様になるまでの区間で生じる応力集中が問題となる場合が多い。このため、FEM解析では、全体構造から検証対象エリアを切り出し、実構造を比較的忠実に再現した部分モデルが多用されている。

【検証事例-2】

【参考文献】

2-2-1) (社)日本道路協会:コンクリート道路橋設計便覧、平成6年2月

2-2-2) 猪俣著:プレストレストコンクリートの設計および施工、技報堂出版、1961

2-2-3) F・レオンハルト他著:レオンハルトのコンクリート講座②続・鉄筋コンクリートの設計、鹿島出版会、昭和59年

2-3) ひび割れの制御

■関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書Ⅲ3.3 鉄筋の許容応力度]

鉄筋コンクリート構造及びプレストレストコンクリート構造に対する鉄筋の許容応力度は、直径32mm以下の鉄筋に対して表-3.3.1の値とする。

表-3.3.1 鉄筋の許容応力度 (N/mm²)

		鉄筋の種類	SR235	SD295A SD295B	SD345
応力度、部材の種類					
引張応力度	1) 活荷重及び衝撃以外の主荷重	80	100	100	
	2)

1) この値は、既往の構造物に生じたひび割れ幅と設計上の鉄筋応力度との関係等から、コンクリート表面のひび割れ幅が0.2mm程度となる鉄筋応力度を示したものである。

■技術的課題

定着部あるいは偏向部が鉄筋コンクリート構造であっても、ひび割れの発生をできるだけ制限することが望ましい場合には、道路橋示方書の規定を準用するだけでは目標とする状態を満足できない可能性がある。

■性能評価の対応策

部材の全断面が有効と仮定してコンクリートの引張応力を算定し、これを適切に制限することにより、ひび割れの発生を抑制する。

【解説】

外ケーブルの配置本数が多く張力や偏向荷重作用の錯綜、あるいは開口部や突起形状を有していて比較的大きな局部応力が発生するような定着・偏向構造では、鉄筋コンクリート構造であってもひび割れの発生をできるだけ制限することが望ましい。定着部や偏向部は、通常、作用する外ケーブル張力のプレストレス成分が活荷重等の作用に伴う増分に比べて卓越するため、道路橋示方書を準用し、鉄筋コンクリート構造として設計する場合には、プレストレス力を主荷重としてコンクリートの圧縮応力度及び鉄筋の引張応力度が照査される。これに対して、ひび割れの発生をできるだけ制限することを目標とする場合には、FEM解析のように、全断面が有効と仮定してコンクリートの引張応力度を算定し、ひび割れの発生を制限することが可能な水準以下であることを照査するとともに、コンクリートに作用する引張力をすべて鉄筋が負担すると仮定して補強鉄筋を配置する方法がある。この方法では、算定されるコンクリート及び鉄筋の引張応力度が実態と異なる見かけの値であり、これらに対する仮想の応力制限により間接的に安全性を担保することになるため、既往の研究において有害なひび割れの生じないことが確認されている範囲でコンクリート及び鉄筋の許容引張応力度を設定する必要がある。

【検証事例-3】

【参考文献】

2-3-1) 高速道路技術セミナー:PC橋の耐久性向上に関する設計・施工マニュアル、資料編-1, H13.10

2-3-2) 角谷他:PC橋設計への非線形有限要素解析の適用に関する研究、プレストレストコンクリート Vol.46, No.6, 2004

2-4) 破壊安全性に対する検証

■関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書Ⅲ4.6 押抜きせん断に関する照査]

- (1) 厚さの薄い部材に面外から集中荷重が作用する場合は、コンクリートの押抜きせん断破壊についての安全を確認するものとする。
(3) 設計荷重作用時のコンクリートの押抜きせん断応力度は、表-3.2.7 に規定する許容押抜きせん断応力度以下であることを照査するものとする。

[道路橋示方書Ⅲ18.3.2 設計一般]

- (1) ディープビームは、タイドアーチ的な耐荷機構を考慮して設計を行うものとする。
(3) 曲げモーメントに対しては、……4.2 の規定により設計してよい。……
(3) ただし、設計荷重作用時における部材断面に生じる平均せん断応力度は、表-4.3.1 の値をこえないことが望ましい。

[道路橋示方書Ⅲ18.4.2 設計一般]

- (1) コーベルは、トラス状の耐荷機構を考慮して設計を行うものとする。
(3) コーベルの主引張鋼材量は、……トラスとして算出してよい。
(3) ただし、設計荷重作用時における部材断面に生じる平均せん断応力度は、表-4.3.1 の値をこえないことが望ましい。

■技術的課題

- ① 道路橋示方書の準用のみでは、想定し得る各種の破壊モードに対して部材耐力を適切に算定することが困難な場合がある。
② 部材の形状や支持条件が複雑で荷重作用が複合するような構造では、補強鋼材の降伏からコンクリートの圧壊に至るまでの破壊過程を想定することが困難で、既存の耐力算定式を適用することに疑義が生じる場合がある。

■性能評価の対応策

- ① 押抜きせん断破壊あるいは純せん断破壊等、道路橋示方書の準用が困難な照査項目については、既存の関連基準を準用してこれらの破壊に対する耐力を算定することにより、終局荷重作用時の安全性を照査する。
②-1) 終局荷重作用時の力学的特性が、弾性域から大きく逸脱しない範囲内にとどまるることを照査することにより破壊に対して安全であるとみなす。
②-2) 非線形 FEM 解析あるいは実験により破壊に対する安全性を検証する。

【解説】

- ① 定着部及び偏向部の終局状態は、形状寸法や載荷条件ばかりでなく、床版あるいはウェブによる周辺拘束度(拘束面数)の影響を受け、表-1.1.2.2 に示すような種々の形態が想定される。これらの中で、定着部の押抜きせん断破壊や純せん断破壊のように、道路橋示方書では設計荷重作用時の各種せん断応力度が許容値以下であれば所定の安全性を満足するとみなされるもの

については、コンクリート標準示方書²⁻⁴⁻¹⁾を準用して耐力を算定することにより、終局荷重作用時の破壊安全性を検証できる可能性がある。

②-1) 終局荷重作用時において定着部や偏向部が概ね弾性域内で挙動することを照査する場合の指標として、補強鋼材が降伏に達した時点を終局限界とする、あるいは、破壊を制御する上で重要な部位に対して適切な安全率を考慮した許容応力度を適用する等がある。

②-2) 突起構造のように周辺の主げた部材による拘束度が小さくなると、定着部、偏向部とともにせん断伝達や曲げ伝達の作用が集中し、周辺部材が先行して破壊する可能性があるため、留意する必要がある。このような破壊形態を含め、事前の線形解析において複数箇所で部材耐力(材料強度)を越える断面力(応力)が発生する等、弾性的な挙動から破壊過程を推定することが困難な場合には、以下の方法により安全性を検証できる可能性がある。

a) 非線形 FEM 解析による検証

FEM 解析に補強鋼材を要素として取り込み、各材料の非線形性を考慮した構成則を与えることにより、ひび割れ発生あるいは鋼材降伏後の力学的挙動の推定が可能となる。このような非線形解析は、ひび割れ幅や破壊耐力の推定において有効なツールとなるが、使用する構成則や理論が多数存在し、さらにこれらの解析パラメータにより出力結果が大きく変動するため、その活用にあたっては、高度な専門知識と工学的判断が必要とされる。このため、実務上の検証において適用された事例は少ないが、各種の構成則やひび割れモデルが適切であることを前提として、これまで実験による確認が困難であった定着部等の破壊耐力を合理的に推定する手法として活用できる可能性がある²⁻⁴⁻²⁾。

b) 実験による検証

過去に安全性が実証されていない大容量の外ケーブルを用いる、あるいは複雑な荷重伝達機構を有している等、解析のみによる安全性の検証に十分な信頼性が確保できない場合には、実験により性能を確認する方法がある。実験の目的は、「定着具や偏向装置近傍の局部破壊に対する検証」と「周辺部材を含めた全体破壊に対する検証」とに大別されるが、いずれについても、耐荷性能が定着具や偏向装置からの荷重伝達機構や部材の拘束条件に大きく依存するため、実物大試験²⁻⁴⁻³⁾に拠る場合が多い。

縮小モデルによる供試体試験は、実物大試験に伴う規模や危険性に対するリスクを回避しながら破壊メカニズムを直接確認する手段として有効であるが、定着部や偏向部を対象とした既往の事例は少ない。このため、実施にあたっては、寸法効果の影響を十分検討し、実物大モデルと縮小モデルの相関を確認した上で性能の有無を評価する必要がある。

【検証事例-4】

【参考文献】

- 2-4-1) (社)土木学会：コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，6.3 せん断に対する安全性の検討，2002-3
2-4-2) (社)プレストレストコンクリート技術協会：PC 定着部の破壊解析に基づく性能設計，平成 16 年 9 月
2-4-3) (財)高速道路技術センター：PC 橋の耐久性向上に関する設計・施工マニュアル，資料編-1，平成 13 年 10 月

表-1.1.2.2 定着部及び偏向部で想定される破壊モード

種別		概要	破壊モードが想定される部位および概念図	
			定着部	偏向部
曲げ 破壊	曲げ引張破壊	プレストレス力により定着部、偏向部および周辺部材に曲げひびわれが作用すると、部材引張線に曲げひびわれは中立軸付近まで到達する。十分な引張鋼材が配置されていない場合は、さらなる荷重増加によって、圧縮コンクリートが終局ひずみに達する以前に引張鋼材が終局ひずみに達し、引張鋼材の破断により部材の終局状態となる。	<ul style="list-style-type: none"> 十分な補強鋼材が配置されていない定着部 	<ul style="list-style-type: none"> 十分な補強鋼材が配置されていない偏向部（橋軸直角方向曲げ）
	曲げ圧縮破壊	プレストレス力により定着部、偏向部および周辺部材に曲げひびわれが作用すると、部材引張線に曲げひびわれは中立軸付近まで到達する。過大に引張鋼材が配置されている場合は、さらなる荷重増加によって、引張鋼材が終局ひずみに達する以前に圧縮コンクリートが終局ひずみに達し、コンクリートの圧縮破壊により部材の終局状態となる。	<ul style="list-style-type: none"> 釣り合い鉄筋量以上の補強鋼材が配置されている定着部 	<ul style="list-style-type: none"> 釣り合い鉄筋量以上の補強鋼材が配置されている偏向部（橋軸直角方向曲げ）
せん 断 破 壊	純せん断破壊	定着部と周辺部材の界面において、プレストレス力による作用せん断力が界面におけるせん断伝達耐力を上回ると、せん断力を伝達できず、部材の終局状態となる。	<ul style="list-style-type: none"> 定着部の周辺部材との界面 	
	斜め引張破壊	プレストレス力による作用せん断力が卓越する部材においては、斜めひびわれ発生後にせん断補強鋼材によってせん断力が負担され、トラス的な耐荷機構へと移行していく。さらなる荷重増加によって、トラスにおける引張材としてのせん断補強鋼材が降伏し、部材の終局状態となる。		<ul style="list-style-type: none"> 十分な補強鋼材が配置されていない隔壁形式またはリブ形式の偏向部
せん 断 破 壊	斜め圧縮破壊	プレストレス力による作用せん断力が卓越する部位においては、斜めひびわれ発生後にせん断補強鋼材によってせん断力が負担され、トラス的な耐荷機構へと移行していく。引張鋼材やせん断補強鋼材が十分に配置される場合は、さらなる荷重増加によって、せん断補強鋼材が降伏する以前に圧縮斜材としてのコンクリートが終局ひずみに達し、部材の終局状態となる。		<ul style="list-style-type: none"> 部材厚の薄い隔壁形式またはリブ形式の偏向部
	押し抜きせん断破壊	スラブなどの面部材にプレストレス力による局部的な荷重が作用する場合、荷重域周辺部から円錐形状またはピラミッド形状の形をなししたコーンを形成するように破壊する。	<ul style="list-style-type: none"> 部材厚の薄い定着部 	<ul style="list-style-type: none"> 突起形式の偏向部
その他の破壊	引張破壊	軸引張力を受ける部材において、コンクリートの引張強度以上の引張力が作用するとびわれが発生し、全引張力を引張鋼材で負担することとなる。さらなる荷重増加によって、引張鋼材が終局ひずみに達し、引張鋼材の破断により部材の終局状態となる。	<ul style="list-style-type: none"> 圧縮力が作用していない部位における中間定着部 	<ul style="list-style-type: none"> 十分な補強鋼材が配置されてない偏向部の外ケーブル近傍(偏向力作用位置後方)
	割裂破壊	プレストレスによりコンクリート部材に圧縮力が作用する場合、その圧縮力の方向と直交する方向には引張応力が作用する。コンクリートの引張強度以上の引張力が作用するとびわれが発生し、引張力の方向に十分な引張鋼材を配置している場合は全引張力を引張鋼材で負担することとなる。引張鉄筋が配置されない場合や十分な鋼材量が配置されない場合では、作用引張力を負担できず部材の終局状態となる。	<ul style="list-style-type: none"> 十分な補強鋼材が配置されていない定着部(定着背面) 	<ul style="list-style-type: none"> 十分な補強鋼材が配置されてない偏向部(偏向力作用位置前側)

3) 外ケーブルシステムの耐久性

3-1) 外ケーブルの防食及び振動対策

■関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書Ⅲ18.5.3 構造細目]

(4) 外ケーブルは、防食に対して十分配慮するとともに、振動に対して配慮するものとする。

■技術的課題

- ① 開断面構造への適用やけた高範囲外での配置等、ケーブルが外部環境に置かれる場合には、箱詰め内部での配置が大多数を占める過去の実績に基づいて防食方法を選定することに疑義が生じる。
- ② 供用中に発生する振動を考慮して疲労耐久性を定量的に検証することが困難である。

■性能評価の対応策

- ① 外ケーブルが外部環境下で配置される構造においては、大気、水分、紫外線等の劣化作用に応じて、所定の耐久性が確保できる防食方法を採用する。
- ② 外ケーブルが主げたの振動と共振する可能性を適切な方法により判定するとともに、共振するおそれのある場合には制振装置を設ける等の措置を施すことにより、疲労耐久性を低下させる振動の影響を排除する。

【解説】

① ケーブルシステムの耐久性を検証するためには、システムに作用する環境外力と腐食プロセスを想定し、用いる防食材料の遮断性および性能持続性(材料劣化)が所要の耐腐食性能を満足することを確認する必要があるが、個々の防食材料に関する「品質規格」と「鋼材腐食因子の遮断性能」や「橋梁構造の一部として用いられた状態での劣化特性(有機系材料)」との関係が必ずしも明確でないため、設計耐用期間内の状態を定量的に評価することが困難な場合が多い。

このことから、外部環境下に置かれるケーブルは、表-1.1.2.3に示すような適用実績を有する個々の防食方法を二重あるいは三重に組み合わせてフェールセーフを付与するとともに、環境条件への適合性、大偏心構造等の類似条件下における適用実績³⁻¹⁻¹⁾との整合性、維持管理の容易さ等が、十分に検討されていることを前提として、所定の耐久性を有しているとみなせる可能性がある。

表-1.1.2.3 代表的な防食方法

防食方法	P C鋼材の被覆			保護管及び内部充填		
	防食材料			保護管(ポリエチレン、塩化ビニール等)		
		エポキシ樹脂	ポリエチレン	亜鉛メッキ	セメント系	樹脂系
概要図						

- ② 外ケーブルの自由長部が車両の走行等に起因する主げたの振動と共振すると、PC鋼材に繰り返し曲げ応力が作用し、疲労耐久性を低下させる要因となるおそれがある。

外ケーブルの共振については、ケーブル自由長部の固有振動数が主げたの最低次たわみ振動数に対し10~20%程度異なっていればその可能性は小さいと判定する方法³⁻¹⁻²⁾がある。

【参考文献】

- 3-1-1) (社)プレストレスコンクリート技術協会: PC斜張橋・エクストラドーズド橋設計施工規準 (案) 資料編 pp.119-126, 平成12年11月
- 3-1-2) (社)プレストレスコンクリート技術協会: 外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法設計施工規準, II外ケーブル構造編9.7, 平成17年6月

3-2) 外ケーブルの疲労耐久性に関する検証

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書Ⅲ18.5.2 設計一般】

(1) 外ケーブル構造は、外ケーブル構造の特性を考慮して設計するものとする。

2) 外ケーブルの許容応力度について

外ケーブルに用いるPC鋼材の許容引張応力度は、活荷重応力の発生頻度、二次応力の影響及び応力の不均一性を考慮して定めることが望ましいが、一般には3.4に規定する値を用いてよい。

【道路橋示方書Ⅲ18.5.3 構造細目】

- (2) 外ケーブルの定着部及び偏向部は、ケーブルに局部的な曲げが生じない構造とする。
- (3) 外ケーブルの偏向部におけるPC鋼材の曲げ半径は、PC鋼材に生じる二次応力及び疲労の影響等を考慮して定めるものとする。

■技術的課題

既往の研究や実績に基づいて定められた偏向部におけるPC鋼材の最小曲げ半径や構造細目に従わない場合には、道路橋示方書に規定されるPC鋼材の許容引張応力度を用いることで十分な疲労耐久性を有しているとみなすことに疑義が生じる。

■性能評価の対応策

実大供試体を用いた疲労試験を実施することにより疲労耐久性を検証する。

道路橋示方書をはじめとする既存の関連基準では、国内外の研究成果に基づいて偏向部の最小曲げ半径や構造細目、PC鋼材の許容引張応力度等が規定されており、これに準拠することで所定の疲労耐久性を有しているとみなされるため、これらに従わない場合には、別途、外ケーブルの疲労耐久性を検証する必要がある。

これまでに実施されたフレッティング疲労試験では、実際の橋梁構造を想定して、偏向角度、偏向構造、ケーブルシステムのマルチ構成や防食構造、PC鋼材の応力条件(下限値および振幅)等の試験条件が設定されている。

なお、活荷重応力の発生頻度を適切に評価できる場合には、疲労試験結果に基づいて提案されているPC鋼材の設計疲労強度式³⁻²⁻¹⁾を用いて疲労耐久性を検証できる可能性がある。この場合、ケーブルの仕様、曲げ半径や角度等の偏向条件等が疲労強度式の適用条件から逸脱していないことが検証の前提となる。

[検証事例-5]

【解説】

外ケーブル構造では、一般に、内ケーブル構造に比べ1/2～1/3の小さな半径でケーブルが偏向されるため、フレッティング作用によりPC鋼材の疲労強度が低下する場合がある。フレッティングは、束ねられたPC鋼線同士が点接触した状態で応力変動に伴う微小な相対滑りが繰り返し作用し、摩耗や亀裂が生じる現象であるため、鋼線の種別や構成、下限応力度、偏向角度、ケーブルの曲げ半径等の因子により、疲労強度への影響度が異なる。このため、普遍的な照査式による検証が困難であり、一般に、表-1.1.2.4に示すような、設計上の配慮や構造細目により疲労対策が講じられている。

表-1.1.2.4 偏向部のフレッティング疲労対策例

項目	経験的対処事例	
設計上の配慮	PC鋼材の許容引張応力度 $\sigma_{pa}=0.6 \sigma_{pu}$ (σ_{pu} :引張強度) [道示Ⅲ.3.4]	
	最小曲げ半径 R=3.0m以上 (19S15.2)	
	偏向角度14°(既往の疲労試験における実績値)以下	
構造細目	保護管	PC鋼材の長期接触作用に対して破損が生じない材料を選定 ⇒高密度ポリエチレン(PE)、ポリプロピレン(PP)、塩化ビニール(PVC)等
	偏向管	ケーブルの配置誤差等により局部的な曲げが生じない構造を採用 ⇒ディアボロ管、ベルマウス加工管
	鋼材の保護	保護管内のセメントグラウト充填 樹脂被覆PC鋼材の使用

1.1.3 検証事例

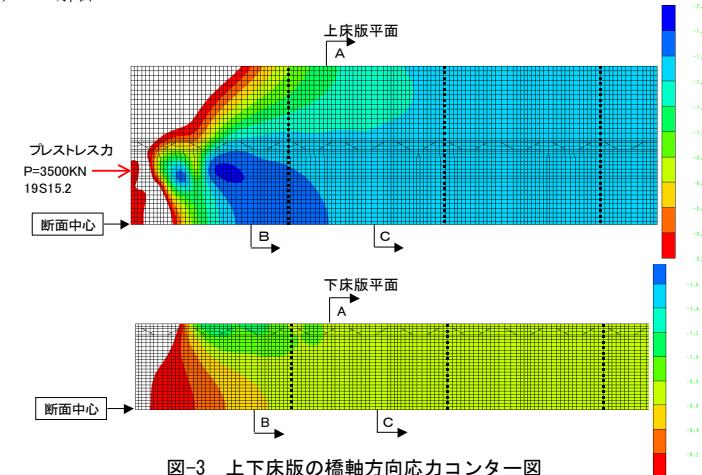
検証事例-1 FEM 解析によるプレストレス分布状況の確認			
要求性能	主げたの安全性	関連規定	道路橋示方書Ⅲ 6.6.7、Ⅲ 18.5.2
検証目的	外ケーブルが突起構造で定着される場合にプレストレスの分布が断面内で不均一となる特性を考慮して、施工時の安全性を確認した検証事例。		
検証方法	実験による検証・解析による検証・道路橋示方書の準用		
検証方針	FEM 解析により、施工途中における主げた断面内のプレストレス分布を確認。		
検証内容	<p>(1) 検証概要 張出し架設工法により施工される橋梁(波形鋼板ウェブ橋)を対象とし、施工途中で導入される外ケーブルによるプレストレス分布を FEM 解析により確認することにより、施工時における主げたの安全性を検証する。解析対象とした断面構造を図-1 に示す。</p> <p>図-1 検討断面</p> <p>外ケーブルによるプレストレスの分布は、上下床版の各部位について、定着点からプレストレスが有効とみなせる位置までの距離(有効伝達長)を道路橋示方書Ⅲ 6.6.7(1)を準用して算定し、同位置での FEM 解析結果との対比により評価する。</p> <p>1-1) 道路橋示方書によるプレストレス力の有効伝達長 プレストレス力の有効伝達長は、広がり角度を $\beta = 33^\circ 40'$ として算定する。また、有効伝達長は、主桁上縁の片持ち床版先端、中間床版中央、及び主桁下縁の下床版中央に対してそれぞれ算定する(図-2)。</p> <p>図-2 道路橋示方書に準拠したプレストレス力の有効伝達長の算定方法</p>		

各部位における有効伝達長を表-1 に示す。

表-1 各部位の有効伝達長

着目部材	位置	有効長(m)
上床版	張出し床版	A: 上縁先端 5.795
	中間床版	B: 上縁中央 3.434
下床版	C: 下縁中央	7.263

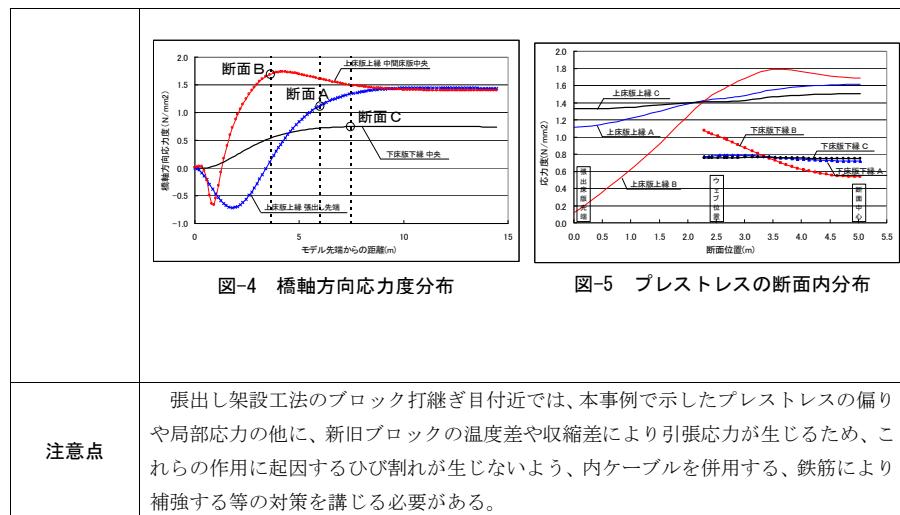
1-2) FEM 解析



(2) 検証結果

図-4 に示すとおり、主げた断面のプレストレスの橋軸方向分布は、上床版中央及び下床版中央において道路橋示方書に基づく有効伝達位置(それぞれ B 及び C)で概ね一定となっているのに対し、片持ち床版先端では、断面 A において拡散過程があり、プレストレスが十分伝達されていない結果が得られた。このような傾向は、外ケーブルが主げた断面の中央寄りに突起定着されることによりシェアラグの影響が現れたものと推察される。

図-5 は有効伝達位置 A~C におけるプレストレスの断面内分布を示したものであり、特に、定着位置から比較的近い B から A の範囲で、上床版の張出し先端部でのプレストレスが他の部位に比べて不均一な状態が顕著となっている。このように、外ケーブルの定着付近における応力状態が設計上問題となる場合には FEM 解析を実施することにより、プレストレスの分布を適切に評価できる可能性がある。



注意点

張出し架設工法のブロック打継ぎ目付近では、本事例で示したプレストレスの偏りや局部応力の他に、新旧ブロックの温度差や収縮差により引張応力が生じるため、これらの作用に起因するひび割れが生じないよう、内ケーブルを併用する、鉄筋により補強する等の対策を講じる必要がある。

		検証事例-2	FEM 解析による定着部及び偏向部の安全性照査
	要求性能	定着部及び偏向部の安全性	関連規定 道路橋示方書Ⅲ18.5.3(1)
検証目的	定着部や偏向部は、外ケーブル張力の集中作用、比較的複雑な構造形状及び周辺部材の拘束等により局部応力が発生しやすいため、施工および供用中の応力分布状態をFEM 解析により確認した検証事例。		
検証方法	実験による検証 · 解析による検証 · 道路橋示方書の準用		
	定着部及び偏向部の FEM 解析にあたっては、以下の事項に留意。		
(1) 荷重載荷と境界条件	<p>① 荷重を外ケーブル張力に限定して FEM 解析を行う場合には、解析で考慮されていない荷重の複合作用を考慮して解析結果を適切に評価する。</p> <p>② 切出しほのモデルの仮想の拘束に伴う付加曲げの影響を考慮する。</p> <p>③ 主構造としての挙動も加味して定着部や偏向部の応力状態を評価する。</p>		
検証方針	<p>(2) モデルの実物再現性</p> <p>① 定着部の切欠きや点検・ケーブル通過孔等の断面欠損を忠実に再現してモデル化する。</p> <p>② 外ケーブルの定着具近傍に発生する局部応力を検証する場合には、定着具のモデル化や載荷方法を適切に選定する。</p>		
	(1)荷重載荷と境界条件の設定事例		
	1-1)プレストレス力の載荷		
検証内容	<p>外ケーブルの定着部材に与える影響を検証するにあたり、部分切出しほのモデルに外ケーブルによるプレストレス力のみを載荷する場合がある。図-1 は、中間支点横げたに着目して設定したモデルにプレストレスの軸力成分を載荷した事例を、外ケーブルが片面のみに定着された場合(CASE-1)と両面に定着された場合(CASE-2)それぞれについて示したものである。</p> <p>CASE-1</p> <p>CASE-2</p>		
	CASE-1		
	CASE-2		
	図-1 プレストレス力載荷事例		
	CASE-2 では、モデル全域に圧縮応力が作用する実挙動を再現するため、境界条件として補償荷重を与えており、図示したような事例では、プレストレス力の作用により、横げた本体ばかりでなく定着背面側の上床版やウェブに局部的な引張応力が発生		

する解析結果が得られるが、実際には内ケーブルのプレストレス力やその他の外力が複合して作用しているので、別法による全体構造系の解析や床版や横げた個々の部材設計で算出された応力との重ね合わせにより、局部応力の照査やこれに対する補強設計が実施されている。

1-2)柱頭部の解析

図-2は、種々の荷重作用により、複雑な応力状態となることが予想されたラーメン構造の柱頭部をモデル化した事例である。外ケーブルによるプレストレス力ばかりでなく解析領域内の主たる荷重作用を再現するとともに、領域の外部から伝達される荷重についても、全体構造系の解析で求めた断面力をモデル端部の境界条件として与えている。

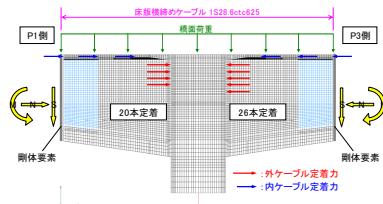


図-2 柱頭部解析における荷重載荷事例

示した事例のように、想定される荷重作用を極力反映させて解析を行うことにより検証の信頼性は高まるが、FEM解析においてすべての荷重作用を網羅することは实用上困難であるため、通常は、無視した荷重作用が有害なひび割れの発生に与える影響を別法により追加で検討する場合が多い。

例えば、支点横げた等のマッシブな部材では、セメントの水和熱に起因する温度応力の影響が比較的大きいため、別途、これを各種の解析により確認し、外ケーブル定着との複合作用として検証されている。

1-3)仮想拘束に伴う付加曲げの影響

偏向部の解析においては、本来の支点がない支間部から対象領域を抽出しモデル化することになるため、モデルの拘束条件によっては、解析結果が実際の挙動と大きく異なる場合がある。

図-3は、切出しモデルの両端を固定して外ケーブルの偏向力を作用させた場合に全体構造系では生じ得ない断面力が発生する事例を示したものである。このような場合には、仮想の拘束に伴う付加曲げの影響により、偏向部近傍の橋軸方向応力を正しく評価できないので、その影響を補正する、橋軸直角方向の応力についてのみ着目する、あるいは、付加曲げが生じないような拘束条件に変更する等の対処が講じられる。

また、全体構造系において大きな断面力が作用する位置(例えば支間中央や支点附近)に偏向部を設ける場合には、図-2で示した柱頭部の解析事例と同様、モデル端に適切な拘束条件と断面力を与えることにより、主構造としての挙動も加味して偏向部の応力状態が評価できる。

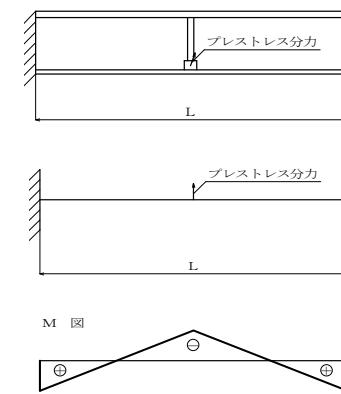


図-3 モデルの仮想拘束に伴う付加曲げ

(2)モデル化の事例

2-1)部材のモデル化

定着部や偏向部においては、プレストレス力の集中作用により、加力点近傍、断面急変部、開口部で大きな局部応力が発生しやすい。特に断面急変部や開口部では、コンクリートの乾燥収縮等に伴う内部応力も付加され、有害なひび割れ発生の誘因となる。このため、FEM解析では、定着部の切欠きや点検孔・外ケーブル通過孔等の断面欠損を忠実に再現してモデル化される場合が多い。

表-1は、横げた定着部、突起定着部、偏向部の各部位を細密にモデル化した事例と解析に関する一般的な留意点を整理したものである。

将来的な外ケーブルの追加配置が可能なよう予備孔が設けられる場合には、断面欠損としてモデル化に反映させるばかりでなく、追加のプレストレス力を荷重として見込んだ事例もある。

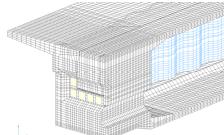
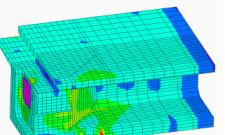
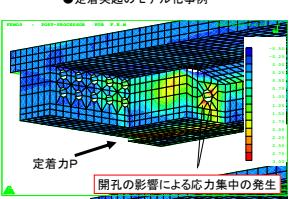
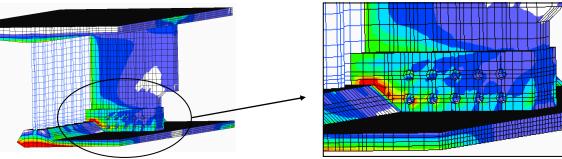
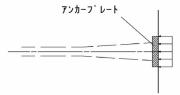
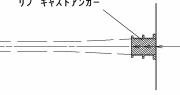
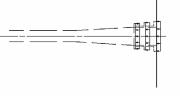
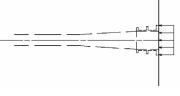
表-1 開口部や断面欠損を再現したモデル化の事例		
定着部	支点横桁	<ul style="list-style-type: none"> ◆緊張端に定着部の切欠き処理が施されている場合には、実部材厚の減少に伴う応力増加や切り欠き周辺の応力集中が生じる可能性がある。 ◆定着部周辺に検査口等の比較的大きな開孔がある場合、開口部周辺に応力集中が生じる可能性がある。 ◆端部横桁の前面等に下床版検査口を設ける場合には、横げた厚や検査口までの距離、外ケーブル本数等の条件によっては、開口周辺に応力集中が生じる可能性がある。 <p>●定着部の切欠きのモデル化事例</p>  <p>●下床版開口部のモデル化事例</p> 
	中間突起	<ul style="list-style-type: none"> ◆外ケーブルの偏向管等による開孔がある場合には、開孔周辺に応力が集中する可能性がある。 <p>●定着突起のモデル化事例</p>  <p>定着力P 開孔の影響による応力集中の発生</p>
	偏向部	<ul style="list-style-type: none"> ◆偏向管による開孔は、それによって拘束される体積が構造体に占める割合が大きければ大きいほど解析結果に与える影響も大きくなる。 ◆偏向部は比較的スレンダーナな構造であり、偏向力が大きい場合には開口部や断面急変部周辺で応力の乱れが顕著に現れる。 <p>●偏向部のモデル化事例</p> 
2-2)定着具のモデル化と偏向力の載荷		
<p>外ケーブルの定着具近傍に発生する局部応力を検証する場合には、用いる定着具の形状によりプレストレス力の伝達機構が異なるため、解析目的に応じて定着具のモデル化や載荷方法が選定されている。表-2は、外ケーブル定着具のタイプ毎にモデル化の事例を示したものである。なお、定着具近傍の局部領域については、定着工法毎に保証する範囲や補強方法等の保証条件が定められているため、FEM 解析では、保証領域外での応答値を評価する場合が多い。</p> <p>偏向力については、通常、ケーブル湾曲部に作用する腹圧力を要素毎の節点荷重に置き換えて載荷されるが、外ケーブルが三次元的な配置形状を有する場合には、鉛直方向だけではなく水平方向の作用力も適宜、考慮されている。</p>		

表-2 定着具のモデル化事例		
定着方式	モデル化の概要	模式図
アンカープレート方式	アンカープレートをプレート要素(剛体)等でモデル化し、定着面に面分布荷重を載荷することが多い。	
リブキャストアンカー方式	①リブキャストアンカーを剛体としてモデル化し、荷重を載荷する。実構造が忠実に再現できる。	
	②リブキャストアンカーをモデル化せず、各リブ位置に荷重を分散して載荷する。	
	③定着体表面に面荷重として載荷する。載荷位置付近の再現性は低い。	
注意点	<p>RC部材にひび割れが生じると、ひび割れ近傍の要素に作用している応力が再配分され、ひび割れ発生前の弾性域とは異なった応力状態となる。このため、比較的大きな部材縁引張応力を許容し、局部的な部材の剛性低下が構造全体の応力分布に影響を与えるような場合には、非線形性を考慮した解析を行う必要がある。</p> <p>一般に、定着部や偏向部が供用中のひび割れの発生を極力抑えるよう設計されれば、弾性体に近い挙動を示し顕著な非線形性は現れない。例えば、FEM解析による引張応力をコンクリートの引張強度程度に制限しておけば、解析値と実測値が概ね一致することが既往の実験により確認されている(検証事例-3参照)。</p>	

検証事例-3	FEM 解析を用いた安全性照査における応力制限値の設定						
要求性能	定着部及び偏向部の安全性		関連規定	道路橋示方書Ⅲ.3.3			
検証目的	部材に有害なひび割れが発生しないことが確認されている範囲内でコンクリート及び鉄筋に対する引張応力度の制限値を適切に設定する必要がある。 FEM 解析を用いた照査により、仮想に設けた応力制限により間接的に安全性を検証した事例。						
検証方法	実験による検証 · 解析による検証 · 道路橋示方書の準用						
検証方針	(1) 既往の実物大試験で得られた知見に基づき、コンクリート及び鉄筋の引張応力度を制限する。 (2) 実施した応力照査が道路橋示方書を準用した場合と同等以上の安全性を担保していることを非線形解析により確認。						
検証内容	(1) 実物大試験で確認された応力制限値とひび割れの関係 外ケーブルを中間突起定着する構造は、定着部本体ばかりでなく定着部近傍の主げたに比較的大きな局部応力が発生するため、これを採用するにあたり、実物大の供試体を用いた試験によりひび割れや破壊に対する安全性を確認した事例 ¹⁾ がある。表-1は、既往の試験結果を事前の FEM 解析で用いられた応力制限値と試験時のひび割れ発生状況の関係に着目して整理したものである。						

表-1 実物大試験で確認された応力制限値とひび割れ幅の関係

事例 No.	外ケーブル		設計時応力制限値 (FEM解析: σ/mm^2) プレストレス導入時(0.7Pu)		実験結果		
	種類	緊張力 (kN)	コンクリート (目安値)	鉄筋	コンクリートひびみ	鉄筋ひびみ	ひび割れの発生状況
1	19S15.2	プレストレス導入時 3430(0.7Pu) 終局荷重作用時 4210(0.86Pu)	3.0	120	FEM解析値と実測値は概ね一致	ひびみ履歴はほぼ線形、ひびみ幅もコンクリートと同程度(50~100 μ)	ひび割れ発生なし
2	27S15.2	プレストレス導入時 4900(0.7Pu) 終局荷重作用時 5880(0.86Pu)	2.0 中空鋼管により補強 4.0 鉄筋のみで補強	120	定着突起上方側の実測値がFEM解析値より大きくなる傾向あり	— 0.86Pu載荷時に0.04mmの微細ひび割れ発生	—
3	19S15.2	プレストレス導入時 3530(0.7Pu)	3.0	100	FEM解析値と実測値は概ね一致	— 0.7Pu載荷時に0.04mmの微細ひび割れ発生、その後の継続計測により、鉄筋応力およびひび割れの増大なし	—
4	19S15.2	プレストレス導入時 3780(0.9Py) 終局荷重作用時 4200(1.0Py)	3.0	100	— 定着補強筋、突起補強筋とともに設計値と実測値は精度良好一致	突起下面に微細ひび割れ発生 0.7Pu時~0.06mm 0.9Py時~0.10mm (2日放置)	—
5	27S15.2	プレストレス導入時 4900(0.7Pu)	5.0	120	コンクリート表面のひび割れ発生ひびみは100 μ 程度で応力換算すると2.8N/mm ²	0.7Pu載荷時最大0.27mm 発生位置は解析どおり一致 ※実設計では19S15.2を使用ひびみ460 μ)	—

これらの実験結果から、設計時におけるコンクリートの引張応力度の制限値と実際のひび割れ発生状況との間には相関のあることが認められており、このような知見を参考にして、コンクリートの引張応力度を 3.0N/mm^2 程度に制限して設計(FEM 解析)された事例が多い。また、鉄筋の応力制限値についても、既往の実験及び施工実績により、ひび割れ幅の抑制効果が確認されている $100\sim120\text{N/mm}^2$ の範囲で設定される場合が多い。

以上のような実験結果に基づく応力制限値の設定事例を、道路橋示方書の PC 及び RC 部材に関する規定と対比して表-2 に示す。

表-2 死荷重作用時の応力制限事例

項目	道示Ⅲ PC 部材	定着・偏向部 RC 部材	道示Ⅲ RC 部材
目標とする状態	ひび割れを発生させない	ひび割れの発生をできるだけ制限する	有害でない範囲でひび割れ幅を制限する
計算の仮定	全断面有効	全断面有効	コンクリートの引張域無視
引張応力 制限値	コンクリート 鉄筋	引張応力の発生を許容しない —	曲げひび割れ強度 $\sim 3.0\text{N/mm}^2$ 程度 $100\sim120\text{N/mm}^2$ 程度 100N/mm^2
ひび割れ幅との 関係	0mm	0~0.1mm(実績値)	0.2mm(想定値)

(2) 解析的手法による応力制限値の検証

全断面有効と仮定して設計された RC 部材における「コンクリートや鉄筋の引張応力度」と「ひび割れ抑制効果」の関係を、以下に示す道路橋示方書の RC 規定を基準とした安全指数の概念を導入して定量化することにより、応力制限の有効性を確認する。

安全指数 $I = \text{有害なひび割れに対する抵抗力 } R_{cr} / \text{設計断面力 } F$
R_{cr} : 鉄筋の引張応力度が道路橋示方書の許容値 ($\sigma_{sa}=100\text{N/mm}^2$) に達したときの作用力

- 参考文献
- 1) 高速道路技術センター：PC 橋の耐久性向上に関する設計・施工マニュアル、資料編-1、平成 13 年 10 月
 - 2) 角谷他：PC 橋設計への非線形有限要素解析の適用に関する研究、プレストレスコンクリート Vol.46、No.6、2004

- 注意点
- (1) 実大試験の供試体は、コンクリートの設計基準強度がいずれも 40N/mm^2 、プレストレス導入時の圧縮強度が $27\sim31\text{N/mm}^2$ の範囲であるため、設計条件がこれらと異なる場合には、コンクリートの応力制限値も適宜見直す必要がある。
 - (2) ここで示した解析的手法は、あくまでも、ひび割れ発生後の鉄筋応力度を指標とした応力制限値と安全性の関係を簡易モデルで試算した事例であり、実橋において応力照査の妥当性を確認する場合には、実構造をそのままモデル化し、適切な構成則を用いた非線形 FEM 解析を実施する必要がある。

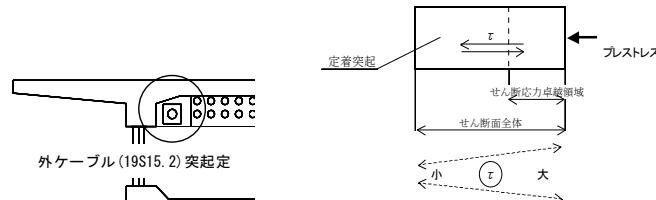
検証事例-4	外ケーブル定着突起部のせん断破壊に対する照査																																										
要求性能	定着部の安全性	関連規定	一																																								
検証目的	箱げた内部に設けた外ケーブルの定着突起部が、外ケーブル張力の作用に伴うせん断破壊に対して安全であることを確認した検証事例。																																										
検証方法	実験による検証 ・ 解析による検証 ・ 道路橋示方書の準用																																										
検証方針	定着突起部と上床版及びウェブとの接合面について、FEM 解析により設計せん断力を、コンクリート標準示方書[構造性能照査編]を準用することにより設計せん断伝達耐力をそれぞれ算定。																																										
(1)検証概要	<p>図-1 に示すような波形鋼板ウェブ橋の外ケーブル定着部について、以下に示す方法により、終局荷重作用時における主げたとのずれせん断破壊に対する安全性を検証する。</p> <p>① 外ケーブルは 19S15.2(SWPR7B)を用いるものとし、定着部に作用する終局荷重として外ケーブルの破断荷重($P_u = 4900\text{kN}$)を想定する。</p> <p>② せん断に対する照査は、せん断抵抗面全体及びせん断応力が卓越する定着位置近傍の範囲(500mm)の各々について行う(図-2)。</p> <p>③ 設計せん断力は、FEM 解析で得られる上床版とコンクリートウェブ各接合面におけるせん断応力度に要素面積を乗じることにより算定する(図-3)。</p> <p>④ 接合面の設計せん断伝達耐力は、コンクリート標準示方書に示されている設計せん断伝達耐力式(6.3.17)及び係数値(表-1)を引用して算定する。</p>																																										
検証内容																																											
	図-1 突起定着構造の概要		図-2 せん断応力の分布																																								
	表-1 せん断伝達耐力の算定に用いる諸条件																																										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>f_{cd}</th><th>コンクリートの設計圧縮強度 (N/mm²)</th><th>30.8</th><th>材料係数 $\gamma_c = 1.3$</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>f_{yd}</td><td>鉄筋の降伏強度 (N/mm²)</td><td>345</td><td>材料係数 $\gamma_s = 1.0$</td></tr> <tr> <td>μ</td><td>接合面の平均摩擦係数</td><td>0.45</td><td>標準示方書の引用値</td></tr> <tr> <td>b</td><td>面形状を表す係数</td><td>0.50</td><td>打継面相当値</td></tr> <tr> <td>θ</td><td>せん断面と鉄筋がなす角度</td><td>90°</td><td></td></tr> <tr> <td>γ_b</td><td>部材係数</td><td>1.3</td><td></td></tr> <tr> <td>σ_{nd}</td><td>せん断面に垂直に作用する平均応力度 (N/mm²)</td><td></td><td>FEM解析により算定</td></tr> <tr> <td>p</td><td>せん断面における鉄筋比 A_s/A_c</td><td></td><td>図-4に拠る</td></tr> <tr> <td>A_c</td><td>せん断面の面積</td><td></td><td>図-3に拠る</td></tr> <tr> <td>V_k</td><td>せん断キーによるせん断耐力</td><td></td><td>なし</td></tr> </tbody> </table>			f_{cd}	コンクリートの設計圧縮強度 (N/mm ²)	30.8	材料係数 $\gamma_c = 1.3$	f_{yd}	鉄筋の降伏強度 (N/mm ²)	345	材料係数 $\gamma_s = 1.0$	μ	接合面の平均摩擦係数	0.45	標準示方書の引用値	b	面形状を表す係数	0.50	打継面相当値	θ	せん断面と鉄筋がなす角度	90°		γ_b	部材係数	1.3		σ_{nd}	せん断面に垂直に作用する平均応力度 (N/mm ²)		FEM解析により算定	p	せん断面における鉄筋比 A_s/A_c		図-4に拠る	A_c	せん断面の面積		図-3に拠る	V_k	せん断キーによるせん断耐力		なし
f_{cd}	コンクリートの設計圧縮強度 (N/mm ²)	30.8	材料係数 $\gamma_c = 1.3$																																								
f_{yd}	鉄筋の降伏強度 (N/mm ²)	345	材料係数 $\gamma_s = 1.0$																																								
μ	接合面の平均摩擦係数	0.45	標準示方書の引用値																																								
b	面形状を表す係数	0.50	打継面相当値																																								
θ	せん断面と鉄筋がなす角度	90°																																									
γ_b	部材係数	1.3																																									
σ_{nd}	せん断面に垂直に作用する平均応力度 (N/mm ²)		FEM解析により算定																																								
p	せん断面における鉄筋比 A_s/A_c		図-4に拠る																																								
A_c	せん断面の面積		図-3に拠る																																								
V_k	せん断キーによるせん断耐力		なし																																								

図-1 突起定着構造の概

図-2 せん断応力の分布

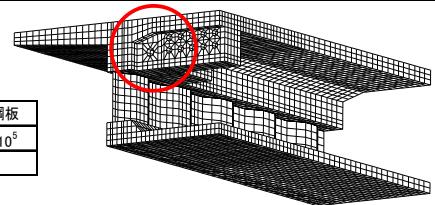
表-1 せん断伝達耐力の算定に用いる諸条件

f_{cd}	コンクリートの設計圧縮強度 (N/mm ²)	30.8	材料係数 $\gamma_c = 1.3$
f_{yd}	鉄筋の降伏強度 (N/mm ²)	345	材料係数 $\gamma_s = 1.0$
μ	接合面の平均摩擦係数	0.45	標準示方書の引用値
b	面形状を表す係数	0.50	打継面相当値
θ	せん断面と鉄筋がなす角度	90°	
γ_b	部材係数	1.3	
σ_{nd}	せん断面に垂直に作用する平均応力度 (N/mm ²)	FEM解析により算定	
p	せん断面における鉄筋比 A_s/A_c	図-4に掲る	
A_c	せん断面の面積	図-3に掲る	
V_k	せん断キーによるせん断耐力	なし	

FEM解析モード

【橋軸直角方向対称 1/2 モデル】

材料定数	コンクリート	波形鋼板
弾性係数(N/mm ²)	3.1×10^4	2.0×10^5
ポアソン比	0.2	0.3



ウェブとの接合

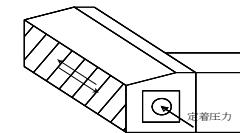
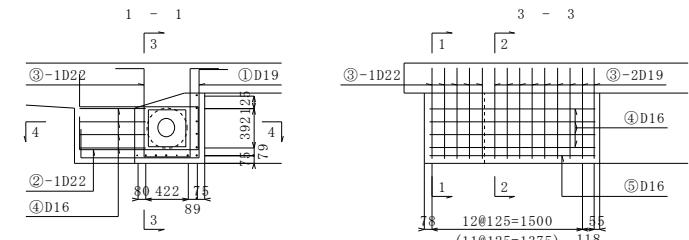


図-3 設計せん断力の算定



2 -

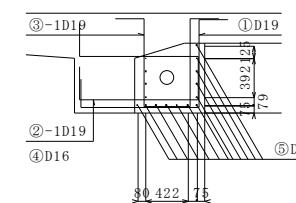


図-4 サル・断面の補強鉄筋

(2) 解析結果の評価

本事例では、いずれの接合面及び範囲においても、設計せん断伝達耐力が設計せん断力を上回る結果が得られたため、せん断破壊に対して安全であると評価した。

注意

本事例で示した終局荷重、設計せん断力の算定方法、設計せん断伝達耐力に関する各変数や部分安全係数等については、あくまでも一例であり、定着部の構造や補強方法、接合面に作用する応力状態(曲げの影響)等に応じて、適宜設定する必要がある。

検証事例-5	実大実験による外ケーブルのフレッティング疲労特性の確認		
要求性能	外ケーブルの疲労耐久性	関連規定	道路橋示方書Ⅲ18.5
検証目的	偏向部のフレッティング作用を考慮して、外ケーブル(PC鋼材)の疲労耐久性を実験により確認した検証事例。		
検証方法	実験による検証・解析による検証・道路橋示方書の準用		
検証方針	偏向部におけるフレッティング作用は、鋼線の種別や構成、下限応力度、偏向角度、ケーブルの曲げ半径等の因子によりPC鋼材の疲労強度への影響度が異なるため、実大のフレッティング疲労試験により確認。		
検証内容	<p>表-1 は、実大供試体を用いて外ケーブルのフレッティング疲労特性を確認した事例を示したものである。いずれの試験も外ケーブルとして使用頻度の高いマルチケーブルシステム(19S15.2)を対象としており、偏向部の曲げ配置半径(3.0m)や角度(14°)、試験時の下限応力度(引張強度の60%)は、海外の規定や過去の実績を参考にして設定されている。また、デビエータブロックを試験体の配置方法と直交する方向に一定の変位振幅を与えることにより、軸方向ひずみの変動を生じさせている。</p> <p>表-1 にはPC鋼より線の素線が初めて破断した時点(初破断)の載荷回数を示しており、米国の疲労寿命に関する評価基準に基づいて、全素線数(7本より×19本)の2%及び5%が破断したときの載荷回数も合わせて確認されている。</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin-top: 10px;"> <p>■米国PTI規格による斜張ケーブルの疲労性能評価項目</p> <ul style="list-style-type: none"> ①200万回の繰返し載荷で全素線本数の2%破断以下であること ②疲労試験後の静的載荷試験で規格引張荷重の95%の引張力を載荷し、ケーブルおよび定着体に異常がないこと </div> <p>表-1 中の事例No.3を除く各試験では、疲労試験後に未破断のPC鋼より線を抜き取り、引張試験を実施している。これにより、全素線が破断していないケースでは、引張強度や伸びの低下は生じていないことが確認されている。一方、素線の一部に破断が生じたケースでは、未破断であっても疲労亀裂に起因する強度低下が認められることから、初破断あるいは2%～5%の破断率で疲労寿命を評価することの妥当性を示唆した事例もある¹⁾。</p>		

表-1 フレッティング作用を考慮した疲労試験の事例 ^{1～4)}						
事例No.	ケーブルの種別・構成	偏向部の構造			応力振幅(N/mm ²)	試験結果
		偏向管	保護管(緩衝材)	グラウト充填		
1	裸PC鋼材(19S15.2)	鋼管	PE管	有り(W/C=45%)	20	1000万回で破断せず
				無し	50	115万回で初破断
2	エポキシ樹脂被覆PC鋼材(19S15.2)	鋼管	PE管	無し	50	69万回で初破断
3	ポリエチレン系樹脂被覆PC鋼材(19S15.2)	鋼管	PE管	有り(高強度55N/mm ²)	50	147万回で初破断
				スパイラル補強PE管(環状支承体付き)	50	300万回で破断せず
4	裸PC鋼材(19S15.2)	ステンレス製フレキシブル管	スパイラル補強PE管(ゴム緩衝材付き)	有り	70	276万回で初破断
				50	300万回で破断せず	
			スパイラル補強PE管(ゴム緩衝材付き)	70	251万回で初破断	

参考文献

- 新井他：大容量PC鋼より線の曲げ配置部におけるフレッティング疲労特性、土木学会論文集No.627/V-44、pp.205-222、1999.8
- 高速道路技術センター：PC橋の耐久性向上に関する設計・施工マニュアル資料編-4、2001.10
- 齊藤他：大偏心外ケーブルPC橋におけるケーブルのフレッティング疲労試験、第8回シンポジウム論文集、pp.131-136、1998.10
- 黒輪他：ディビエーター部におけるスパイラル補強PE管を使用した外ケーブルのフレッティング疲労特性、プレストレストコンクリートVol.46、No.3、pp.46-55、2004.5

注意点

既往の実大疲労試験に照らして安全性を照査する場合には、実構造で採用する偏向角度、偏向構造、ケーブルシステムのマルチ構成や防食構造、設計で想定した応力状態(下限値および振幅)等が、参考とする実大試験と整合していることが前提となる。

1.2 合理化床版構造

1.2.1 概要

(1) 概要

床版は、活荷重を直接支持とともにこれが繰返し載荷される部材であり、非常に過酷な条件下に置かれた構造部材である。また、主桁と剛結された構造の場合は、床版としての機能に加えて、主桁断面を構成する一部としての機能も有している重要な部材である。

我が国では、鋼橋、コンクリート橋とも古くからRC(鉄筋コンクリート)床版が採用されており、現在でも主として床版支間の小さい場合に用いられている。また、ひび割れ発生の防止や床版の長支間化を目的として、床版の支間方向にプレストレスを導入したPC床版は、昭和30年代から昭和40年代前半に採用が始まっており、最近の輪荷重走行試験などにより、その耐久性の高さが確認されている。

道路橋示方書では、はじめは鋼橋を対象として、昭和31年鋼道路橋設計示方書から本格的にコンクリート床版の設計規準が整備され始めた。また、コンクリート橋においては、鋼橋の規準をもとに、主桁と床版の支持条件の違いなどを考慮し部分的に修正して規準が定められている。ところが昭和40年代に入って、当時の規準により建設されたRC床版に多くの損傷が認められた。そこでこれを期に、RC床版の損傷メカニズムに対する研究が進められ、その後、車両重量や交通量の増大に伴い、最小床版厚の引き上げ、鉄筋許容値の引き下げ、設計断面力の割り増しなど順に設計規準が見直されて現在に至っている。

道路橋示方書の床版に対する基本的な要求性能は、設定された活荷重に対して、有害な変形が生じないことと疲労耐久性であり、これらが満足できればどのような床版構造でも採用可能である。

しかしながら、例えばまなし規定である設計断面力の算出式は、床版支間長に対する適用範囲が定められており、これを越えるものは算出式を使用してよいという保証がなされていない。よって実際には、適用範囲を超えた長支間を有する床版などは、計画あるいは採用されにくいのが現状である。

本章は、コンクリート道路橋のコスト縮減および耐久性の向上を目的とした研究の一つとして、床版構造の合理化について検討を行い、道路橋示方書の床版に対する要求性能を明確にしたうえで、新しい床版構造が道路橋示方書と同等以上の性能を確保できるように、その検証方法の一例を示すものである。

(2) 適用の範囲

本ガイドラインは、主桁の主方向にプレストレスを導入したプレストレストコンクリート橋における床版のうち、床版支間方向にプレストレスを導入したプレストレストコンクリート床版（以下、PC床版）の設計に適用する。

(3) 対象とする床版構造

広幅員の床版を有する主桁断面について、従来構造の場合の例を図-1.2.1.1に示す。図-1.2.1.1は、全幅17.8mに対して床版支間が道路橋示方書の断面力算出式適用範囲内になるように設定した主桁断面であり、2室箱桁となる。

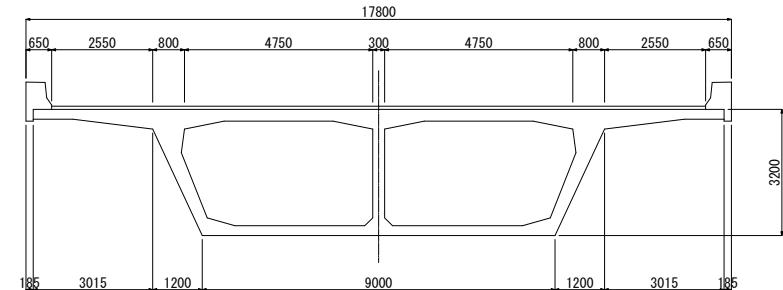


図-1.2.1.1 2室箱桁（道路橋示方書算出式の適用範囲内に床版支間を設定した場

これに対して、最近コンクリート橋の新しい床版構造の事例として、下記に示す構造が試みられている。

①活荷重断面力算出式の適用範囲を超えた長支間床版を有するPC箱桁

②リブ、ストラット付き床版構造

これらの構造の主桁断面例を図-1.2.1.2～1.2.1.4に示す。図-1.2.1.2は、2室箱桁の中ウェブを削除し床版支間を長くして1室箱桁としたものである（例は中間床版長8.2m。適用範囲は6mまで）。また、同じ1室箱桁の床版を水平のリブで支持したものが図-1.2.1.3であり、張出し床版部をストラットによって支持したものが図-1.2.1.4である。

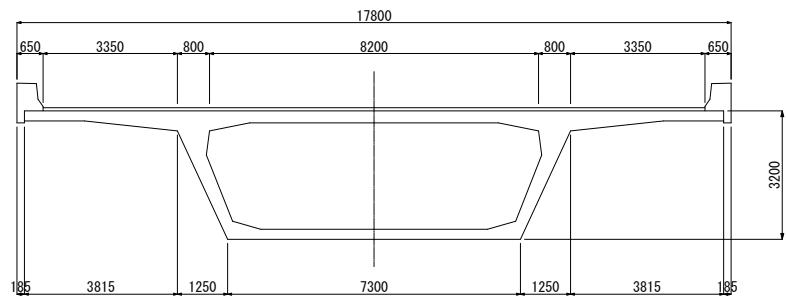


図-1.2.1.2 広幅員一室箱桁の例（道路橋示方書算出式の適用範囲を超えた

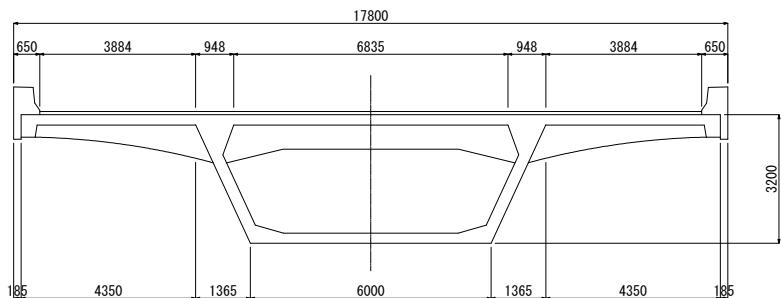


図-1.2.1.3 リブ付き床版箱桁の例

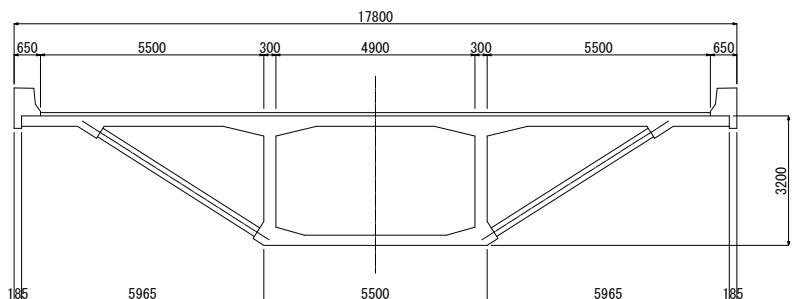


図-1.2.1.4 ストラット付き床版箱桁の例

これらの主桁断面にはいずれも以下に示す長所が挙げられる。

- ・ウェブ数を減らすこと、下床版幅を減らすことができ、上部工重量を低減できる。
- ・下床版幅を狭くすることができるため、橋脚幅を縮小できる。
- ・施工の煩雑なウェブを減らすことによる施工性の向上。

しかしながら、これらの床版構造は、道路橋示方書のみを準用して設計が可能かどうか不明確な項目が多い。よって、本ガイドラインでは、以下の3種類の床版構造を対象に、検討を行うものとする。

- ①広幅員一室箱桁構造
- ②リブ付き床版構造
- ③ストラット付き床版構造

(4) 床版構造の要求性能

道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編において、コンクリートの桁で支持された床版を適用対象として、以下に示す要求性能が規定されている。

(道路橋示方書Ⅲ 7.2 設計一般 より)

(1)床版の設計においては、直接支持する活荷重などの影響に対して安全なようにするほか、以下の1)及び2)の規定を満足するものとする。

- 1)活荷重等に対して、疲労耐久性を損なう有害な変形を生じないようにするものとする。
- 2)自動車の繰返し通行に対して、疲労耐久性が損なわれないようにするものとする。

この他、コンクリート構造物としての材料耐久性（道路橋示方書Ⅲ 5.1）、維持管理の容易性および施工品質の確保（道路橋示方書Ⅲ 1.5）に関する要求性能を考慮すると、コンクリート床版に対する要求性能は、各々の要求性能に対して表-1.2.1.1に示す検証項目が挙げられる。すなわち、表-1.2.1.1に示す項目が適切に検証できれば、コンクリート床版の要求性能を満足できることとなり、新しい形式の床版構造でも採用が可能になるものと考えられる。

表-1.2.1.1 コンクリート床版の要求性能と検証項目

床版の要求性能		検証項目	
種別	性能項目		
構造の安全性	耐荷力性能 直接支持する活荷重等の影響に対して安全な構造であること (道示Ⅲ 7.2)	設計荷重作用時の照査	曲げモーメントに対する応力度の照査 せん断力に対する応力度の照査
		終局荷重作用時の照査	曲げ耐荷力の照査 押抜きせん断耐荷力の照査
		橋梁構造の構成部材としての耐荷力性能照査	主桁の一部として床版に作用する断面力に対する耐荷力の照査 地震や風、車両の衝突等の水平荷重に対する耐荷力の保有
		施工時の照査	各施工段階における応力度照査
耐久性 (疲労)	疲労耐久性 自動車の繰返し通行に対して疲労耐久性が損なわれない構造であること (道示Ⅲ 7.2)	損傷メカニズムの明確化	輪荷重走行試験による耐久性の確認（実績のある床版形式との相対比較）
		損傷を考慮した耐久性照査	点検による維持管理と補修
			コンクリート床版の品質確保
耐久性 (経年劣化)	材料耐久性 材料の経年的な劣化による影響を考慮すること (道示Ⅲ 5.1)	劣化による機能低下の防止	コンクリート品質の確保
			鉄筋のかぶり確保、PC鋼材の確実な防錆などを考慮した構造詳細
使用目的との適合性	活荷重に対して疲労耐久性を損なう有害な変形が生じない構造であること (道示Ⅲ 7.2)	支持桁の構成部材や床版と主桁との接合構造に対する疲労耐久性	荷重伝達機能の確保 鉛直曲げ剛性の確保
		床版の有害な変形に対する照査	活荷重たわみの照査
		コンクリートのひび割れに対する影響照査	ひび割れ幅の照査
維持管理の容易性	点検及び補修・復旧が容易である構造であること (道示Ⅰ 1.5)	床版下面のひび割れ損傷の進行度把握	点検要領の構築
施工品質の確保	所定の品質を確保できるようなコンクリートの施工方法であること (道示Ⅰ 1.5)	コンクリートの施工品質の確保	確立された施工法に準じた施工の実施
		鉄筋の施工品質の確保	
		PC鋼材の施工品質の確保	

1.2.2 広幅員一室箱桁構造

(1) 主な技術概要

道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編において、コンクリートの桁で支持された床版を適用対象として、以下に示す要求性能が規定されている。

[道路橋示方書Ⅲ7.2 設計一般]

- (1) 床版の設計においては、直接支持する活荷重などの影響に対して安全なようにするほか、以下の1)及び2)の規定を満足するものとする。
 - 1)活荷重等に対して、疲労耐久性を損なう有害な変形を生じないようにするものとする。
 - 2)自動車の繰返し通行に対して、疲労耐久性が損なわれないようにするものとする。
- (2) 7.3から7.5によるプレストレストコンクリート床版及び設計基準強度 $24N/mm^2$ 以上のコンクリートを用いた鉄筋コンクリート床版は、(1)を満足するとみなしてよい。

上記(2)のみなし仕様は、「7.3 床版の厚さ」、「7.4 床版の設計曲げモーメント」、「7.5 構造細目」に示されており、これらを満足すれば(1)の要求性能を満足するとみなされる。

ここで、「7.4 床版の設計曲げモーメント」の道路橋示方書の記述を以下に示す。

[道路橋示方書Ⅲ7.4.1 一般]

- (1) 床版の設計曲げモーメントは、支持形式、床版支間方向と車両進行方向、鋼材の配置方向及び床版の形式を考慮して算出するものとする。
- (2) 辺長比が $1:2$ 以上の床版で、7.4.2及び7.4.3の規定による場合は、(1)を満足するとみなしてよい。

そして、「7.4.2 床版の設計曲げモーメント」において、T荷重による床版の単位幅あたりの設計曲げモーメント算出式が規定されている（表-1.2.2.1）。この算出式は、床版支間長に適用範囲を設けて定められており、PC箱桁の場合、連続版（中間床版）で6m以内、片持ち版（張出し床版）で3m以内である。従来のPC箱桁は、この適用範囲内で床版支間を設定し、表-1.2.2.1の算出式を用いて設計曲げモーメントを算出するのが一般的であった。よって、例えば全幅17.8mのように広幅員になっても、図-1.2.2.1に示すような2室箱桁として計画すれば道路橋示方書のみなし仕様を用いて設計を行うことが可能である。

本節で対象とする広幅員一室箱桁構造とは、上述の設計曲げモーメント算出式の適用範囲を超える床版支間を有した構造である。全幅17.8mの場合の一例を示すと、図-1.2.2.2のように一室箱桁構造とすることはできる。しかしながらこの例では、中間床版の支間長が8.2mとなり、適用範囲6mを超えたものとなる。

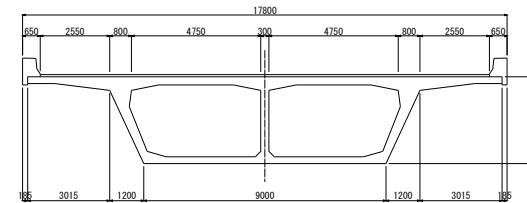


図-1.2.2.1 2室箱桁（道路橋示方書断面力算出式の適用範囲）

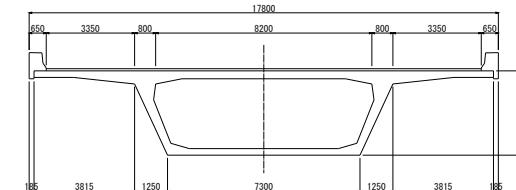


図-1.2.2.2 広幅員一室箱桁

表-1.2.2.1 道路橋示方書Ⅲに規定される床版の設計曲げモーメ

表-7.4.1 T荷重（衝撃を含む）による床版の単位幅（1m）あたりの設計曲げモーメント

版の区分	曲げモーメント種類	構成材 床版の支間の 支持形式	支間曲げモーメント		車両進行方向に直角		車両進行方向に平行	
			支間	方向	支間方向	直角方向	支間方向	直角方向
連続版	支間曲げモーメント	RC	$0 \leq l \leq 4$	$+ (0.12l + 0.07)P$	$+ (0.10l + 0.04)P$	$+ (0.22l + 0.08)P$	$+ (0.06l + 0.06)P$	
		PC	$0 \leq l \leq 6$					
連続版	支間曲げモーメント	RC	$0 \leq l \leq 4$	$+ (単純版の80\%)$	$+ (単純版の80\%)$	$+ (単純版の80\%)$	$+ (単純版の80\%)$	
		PC	$0 \leq l \leq 6$					
片持版	支点曲げモーメント	RC	$0 \leq l \leq 4$	$- (0.15l + 0.125)P$	—	— (単純版の80%)	—	
		PC	$0 \leq l \leq 6$					
片持版	支点曲げモーメント	RC	$0 \leq l \leq 1.5$	$- P \cdot l$				
		PC	$0 \leq l \leq 1.5$	$1.30l + 0.25$	—	$-(0.7l + 0.22)P$	—	
先端付近モーメント	RC	$1.5 \leq l \leq 3.0$	$-(0.6l - 0.22)P$	—	$-(0.15l + 0.13)P$	—	$+(0.16l + 0.07)P$	
		PC	$0 \leq l \leq 3.0$					

ここに、RC：鉄筋コンクリート床版

PC：プレストレストコンクリート床版

l ：7.4.3に規定するT荷重に対する床版の支間（m）

P ：共通編2.2.2に示すT荷重の片側荷重（100kN）

（注）床版支間の方向は、図-7.3.1による。

(2) 技術評価の観点と方向性

本節で取り扱う広幅員一室箱桁構造は、床版の支持形式等は従来のPC箱桁と同様である。よって本構造の技術評価を行う場合、以下の3タイプの観点から考える必要がある。

1)道路橋示方書における設計曲げモーメント算出式の適用範囲を超える場合の設計手法

2)床版支間が従来より大きくなることに対する構造安全性、耐久性および使用性

3)全幅が広幅員となることに対する構造安全性、耐久性および使用性

これらの観点から考えられる技術的課題と対応策を次項より記す。

表-1.2.2.2 広幅員一室箱桁構造の問題認識と対応策一覧

技術評価の観点	着目する部位	対応する要求性能	問題認識		対応策	検証事例	備考
			項目	内容			
道示における設計曲げモーメント算出式の適用範囲を超える場合の設計手法	床版	・構造安全性 ・疲労耐久性 ・使用目的との適合性	1-1) 床版の設計断面力の算出方法	適用支間を超える場合、道示の算出式を用いた設計が適切であるという保証は無いため、適用支間を超える場合の活荷重による設計曲げモーメントの算出方法が、設計手法上の課題となる。	床版の支持条件を適切に再現できる3次元FEM解析を用いて、道示算出式設定時と同条件の活荷重を載荷し、断面力を算出する。	検証事例-1	
床版支間が従来より大きくなることに対する構造安全性、耐久性および使用性	床版	・構造安全性 ・疲労耐久性 ・使用目的との適合性	2-1) 床版の最小全厚	道示における最小全厚の算定式は、床版支間の関数として設定されているが、適用支間は定められていない。しかしながら最小全厚は、各年代における実構造の損傷をもとに見直しが図られ、現行に至っていることを考慮すると、従来の床版支間より大きな床版支間に適用してよいかどうかは明確ではない。	適切な手法で算出された断面力をもとに床版に発生する応力度を算出し、これを指標として最小厚を設定する。	検証事例-2	
	床版	・疲労耐久性 ・使用目的との適合性	2-2) コンクリート応力度の許容値	道示における床版応力の許容値は、ひび割れにより損傷するのを防ぐために引張応力を生じさせないこととしている。この規定により設計されたこれまでのPC床版は、実橋においても高い耐久性が確認されているが、床版支間が大きくなつた場合に同じ許容値で問題無いかどうかが課題となる。	床版支間が大きくなつても、適切な断面力算出と床版厚の設定を行えば、現行道示の規定を準用してフルプレストレスに抑えることすれば、従来PC床版と同じレベルの耐久性を確保できるものと考えられる、	道示の準用	
	床版	・疲労耐久性 ・使用目的との適合性	2-3) 鉄筋応力度の許容値	鉄筋許容値についても床版支間が大きくなることで問題はないか課題となる。	適切な断面力算出と床版厚の設定を行えば、現行道示を準用することで、従来PC床版と同等と見せれるものと考えられる。	道示の準用	
	床版	・疲労耐久性	2-4) 床版の疲労耐久性	道示ではみなし仕様を規定し、それに準じた床版の設計により疲労耐久性を担保しているのが多くの現状である。そしてPC床版については、実橋においても著しい損傷の報告はこれまでに無く、また、輪荷重走行試験においても高い耐久性が確認されている。しかしながら、床版支間がこれまでの実績より大きくなり、みなし仕様がそのまま準用できない場合の疲労耐久性について、検証方法が課題となる。	断面力と床版厚を適切に設定し、床版応力度をフルプレストレスに抑えてひび割れを発生させないようにすれば、道示のみなし仕様により設計された従来PC床版と同等レベルと考えることができる。	道示の準用 検証事例-1 検証事例-2	
全幅が広幅員となることに対する構造安全性、耐久性および使用性	床版とウェブの接合部	・使用目的との適合性	接合部の荷重伝達機能 ・鉛直曲げ剛性の確保(最小全厚の確保) ・活荷重によるたわみ	床版とウェブの接合部であるハンチ部分の応力度に問題は無いか。ハンチを大きくする必要は無いか。	ハンチ部の応力度は、上述のFEM解析による手法を用いれば直接確認できる。また、有害な引張応力が発生しないようなハンチ寸法を設定する。		
	床版			適切な床版厚の設置により確保できるが、上述同様最小厚の設定方法が課題となる。	適切な最小全厚を設定することにより、従来PC床版と同様の鉛直曲げ剛性を確保できる。	検証事例-2	
	床版			支間が大きくなった場合に問題は無いか。	FEM解析を用いて、活荷重によるたわみを確認する(床版支間が大きくなつても、コンクリート系床版は剛性が大きく、活荷重によるたわみは小さく問題にならないものと考えられる)。		
全幅が広幅員となることに対する構造安全性、耐久性および使用性	主桁	・使用目的との適合性	3-1) 主桁の有効幅	道示算出式の適用支間内で構成されたPC箱桁であれば(例えば全幅10mの一室箱桁)、全幅を有効幅としてもほぼ問題はないが、床版支間が大きくなる場合は配慮が必要である。	道示を準用し、有効幅を設定する。または、FEM解析により、橋軸方向応力分布を確認して設定する手法も考えられる。	道示の準用	
	主桁	・構造安全性 ・使用目的との適合性	3-2) プレストレスの伝達	主桁の有効幅同様、広幅員の場合は主方向プレストレスの伝達状況についても留意する必要がある。	道示を準用する。また、FEM解析により確認する手法も考えられる。	道示の準用	
	床版	・構造安全性 ・疲労耐久性 ・使用目的との適合性	3-3) 床版横縫めPC鋼材のプレストレス力	広幅員になるとともに床版横縫め鋼材長も長くなり、標準幅員の場合と比べ摩擦によるプレストレスのロスが大きくなることが懸念される。	実際の配置形状、長さを考慮して緊張力計算を行い、設計計算に反映させる。	道示の準用	
	床版	・疲労耐久性 ・使用目的との適合性	3-4) 段階施工を行う場合の打継目に対する留意点	新旧打継ぎ目に発生する収縮を拘束する引張応力が、広幅員になると大きくなることが懸念される。	温度応力解析の実施により、必要であれば補強を行う。		

1) 道路橋示方書における設計曲げモーメント算出式の適用範囲を超える場合の設計手法

1-1) 床版の設計断面力の算出方法

■関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書Ⅲ7.4.2 床版の設計曲げモーメント]

(1) B活荷重で設計する橋においては、T荷重（衝撃を含む）による床版の単位幅（1m）あたりの設計曲げモーメントは、表-7.4.1に示す式で算定するものとする。ただし、……割り増し係数を乗じた値とする。

表-7.4.1 T荷重（衝撃を含む）による床版の単位幅（1m）あたりの設計曲げモーメント

床版の区分 支間曲げモーメント	構造 支間曲げモーメント	床版の支間の範囲			
		車両進行方向に直角	車両進行方向に平行	支間方向直角方向	支間方向直角方向
単純版	RC	0≤I≤4	+ (0.12I + 0.07P)	+ (0.10I + 0.04P)	+ (0.22I + 0.08P)
	PC	0≤I≤6			+ (0.06I + 0.06P)
連続版	RC	0≤I≤4	+ (単純版の80%)	+ (単純版の80%)	+ (単純版の80%)
	PC	0≤I≤6			+ (単純版の80%)
片持版	RC	0≤I≤4	- (0.15I + 0.125P)	—	- (単純版の80%)
	PC	0≤I≤6			—
片持版	RC	0.5≤I≤1.5	-P + J	—	—
	PC	0.5≤I≤1.5	1.30I + 0.25	—	- (0.7I + 0.22P)
片持版	RC	1.5 < I ≤ 3.0	- (0.6I - 0.22P)	—	—
	PC	0.5≤I≤3.0	—	+ (0.15I + 0.13P)	+ (0.16I + 0.07P)

ここに、RC：鉄筋コンクリート床版
PC：プレストレストコンクリート床版
 I ：7.4.1に規定する床版の支間(m)
 P ：共通版2.2.2に示すT荷重の片側荷重(100kN)

(注)床版支間の方向は、図-7.3.1による。

(1) 表-7.4.1は、表中に示す床版支間の範囲内で適用できるT荷重による設計曲げモーメントの計算式を示したものである。ここで、連続版の支点曲げモーメントについては、支持げたの拘束条件がコンクリート橋と鋼橋では異なるため、この影響を考慮している。表-7.4.1の連続版の支点部を除く計算式は、等方性無限単純版と等方性無限片持版を対象に、平成2年道路橋示方書まで用いられてきたT-20荷重に衝撃の影響を考慮して載荷し、解析により得られた理論値に対して10~20%の安全をみた計算式に基づいている。この余裕量は、解析を行ったときの仮定と実際の構造との違いや床版を施工するときに生じる床版厚や配筋の誤差等を考慮したものである。……

■技術的課題

本節で対象とする広幅員床版は、床版支間が表-7.4.1の道路橋示方書式の適用支間を超えるものである。この場合、道路橋示方書の算出式を用いた設計が適切であるという保証は無いため、適用支間を超える場合の活荷重による設計曲げモーメントの算出方法が、設計手法上の課題である。

■性能評価の対応策

【解説】

上述のように、道路橋示方書の設計曲げモーメント算出式は、図-1.2.2.3に示すモデルを用いて、図-1.2.2.4のようにT荷重を載荷させて得た理論値から導かれている。よって、床版支間が大きくなても、床版の支持条件を適切に再現できるモデルが設定できれば、道路橋示方書と条件を合わせた荷重を載荷させることにより道路橋示方書のみなし規定と同レベルの断面力が得られるものと考えられる。そして、支持条件を適切に再現できるモデルとして、例えば図-1.2.2.5に示すような3次元FEM解析が考えられる。

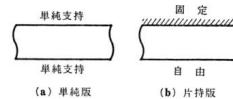


図-解 6.1.1 計算の対象とした1方向版の支持条件

図-1.2.2.3 理論値の算出モデル

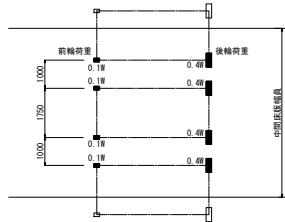


図-1.2.2.4 T荷重の載荷例

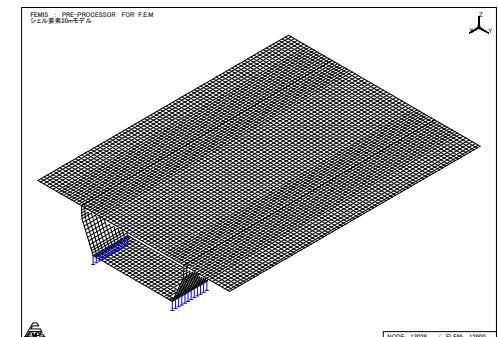


図-1.2.2.5 シェル要素によるFEM解析モデル

道路橋示方書における設計曲げモーメント算出式は、昭和39年発刊の鋼道路橋設計示方書に最初に規定され、その後昭和53年に発刊された道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編においてPC床版の算出式が初めて設定された。これは、昭和48年道路橋示方書Ⅱの算出式を基に、連続版6m以下、片持ち版3m以下を適用支間として設定されたものであり、床版支間がこの範囲内であれば、道路橋示方書により保証されたみなし仕様の算出式を用いた断面力により設計を行って問題は無いものとされている。

[検証事例-1]

2) 床版支間が従来より大きくなることに対する構造安全性、耐久性および使用性

2-1) 床版の最小全厚

■関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書Ⅲ7.3.2 プレストレストコンクリート床版]

- (1) プレストレストコンクリート床版の厚さは、安全性、耐久性及び施工性を有するよう決定するものとする。
- (3) 車道部分の床版の最小全厚は、次の規定によるものとする。なお、片持版の最小全厚とは、支持げたのウエブの前面における厚さをいう。
- 1) 車道部分の床版の全厚は、いかなる部分も 160mm を下まわらないものとする。
- 2) 片持版の床版先端の厚さは、1)の規定によるほか、表-7.3.1 の片持版の最小全厚の 50%以上とするものとする。
- 3) 床版の 1 方向のみにプレストレスを導入する場合の車道部分の最小全厚は、1)及び2)の規定によるほか、表-7.3.2 の値とするものとする。

表-7.3.2 床版の 1 方向のみにプレストレスを導入する場合の車道部分の最小全厚
(mm)

床版の支間の方向 (注) プレストレスを導入する方向	車両進行方向に直角	車両進行方向に平行
床版の支間の方向に平行	表-7.3.1の床版の支間の 方向が車両進行方向に直 角な場合の値の90%	表-7.3.1の床版の支間の 方向が車両進行方向に平 行な場合の値の65%
床版の支間の方向に直角	表-7.3.1の床版の支間の 方向が車両進行方向に直 角な場合の値	表-7.3.1の床版の支間の 方向が車両進行方向に平 行な場合の値

(柱)床版の支間の方向は図-7.3.1による。

昭和 40 年頃鉄筋コンクリート床版の損傷が問題となったため、規定の最小全厚が引き上げられている。その後も、設計活荷重の増加や交通量の増大に伴い、最小全厚の見直しが図られている。

床版の応力度を指標とした最小全厚を設定する方法として、以下の手順が考えられる。

- ①適用支間内であれば、みなし仕様として規定された道路橋示方書の算出式を用いた断面力と最小厚により設計された床版は、安全性、耐久性ともに保証されている。
- ②これらを用いて、床版の曲げ応力度を算出し、これをひとつの指標とする。
- ③適用支間を超える場合の床版の断面力を、前述の方法などを用いて適切に算出する。
- ④ ③の断面力を用いた床版の曲げ応力度が、②の応力度と同程度になるように床版厚を設定し、これを最小厚とする。

[検証事例-2]

【参考文献】

- 2-1-1) 石崎、松井：2 主構 1 衍形式道路橋の RC 床版の最小厚規定について、土木学会第 50 回年次学術講演会、平成 7 年 9 月

■技術的課題

道路橋示方書における最小全厚の算定式は、床版支間の関数として設定されている。この算定式には適用支間は定められていないが、大きな床版支間の場合に適用すると、床版厚が従来と比べ大きくなり不合理な構造となる。よって床版支間が大きくなった場合の適切な最小全厚の設定が課題となる。

■性能評価の対応策

道路橋示方書の最小厚は、床版の曲げ引張応力をある限度内に抑えるように規定されている。よって、床版支間が大きい場合でも、床版の曲げ引張応力が従来床版と同等となる床版厚を設定し、これを最小全厚とする方法が考えられる。

【解説】

床版のコンクリートに生じる曲げ引張応力をある限界内におさえて、有害なひび割れ発生の危険をできるだけ少なくするために、鉄筋の許容応力度や床版の最小厚が規定されている。²⁻¹⁻¹⁾

鉄筋コンクリート床版の最小全厚は、昭和 31 年の鋼道路橋設計示方書で初めて規定されたが、

2-2) コンクリート応力度の許容値

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書Ⅲ.3.2 コンクリートの許容応力度】

(2) プレストレストコンクリート構造に対するコンクリートの許容引張応力度は、表-3.2.3の値とする。
また、従荷重及び従荷重に相当する特殊荷重を・・・・適切に定めなければならない。

表-3.2.3 プレストレストコンクリート構造に対する許容引張応力度(N/mm²)

応力度の種類		コンクリートの設計基準強度			
		30	40	50	60
曲げ引張応力度	1) プレストッシング直後	1.2	1.5	1.8	2.0
	2) 活荷重及び衝撃以外の主荷重	0	0	0	0
	3) 床版	0	0	0	0
	4) プレキヤストセグメント橋におけるセグメント継ぎ目	0	0	0	0
	5) その他の場合	1.2	1.5	1.8	2.0
	6) 軸引張応力度	0	0	0	0

(2) 従来からプレストレストコンクリート構造は、部材断面にある程度の引張応力が生じることを許容し、6.5に規定する引張鉄筋を配置することにより、じん性に富んだ部材を設計することにしている。ただし、ある程度プレストレスを多めに導入しておくことにより、ひび割れに対する安全度を高めるため許容引張応力度を小さめに定めている。

表-3.2.3の2)は、・・・・である。また、表-3.2.3の3)は、床版がひび割れにより損傷するのを防ぐためにプレストレスの方向に引張応力を生じさせないための規定であり、床版を設計する場合の規定である。・・・・

■技術的課題

床版支間が大きくなる場合、コンクリート応力度の許容値が従来通りで問題ないか、疑義が生じる。

■性能評価の対応策

上述の1-1)、2-1)による適切な断面力算出と床版厚の設定を行い、現行道路橋示方書の規定通り床版に引張応力を発生させないようにすれば、従来PC床版と同等の耐久性を確保できるものと考えられる。

【解説】

現行道路橋示方書では、PC床版においてプレストレスの導入方向に引張応力を発生させないよう規定することにより、床版にひび割れを発生させないようにし、高い耐久性を確保するためのみなし仕様としている。そしてこの規定により設計されたこれまでのPC床版は、実橋においても高い耐久性が確認されている。よって、床版支間が大きくなつても、上述の1-1)、2-1)による適切な断面力算出と床版厚の設定を行えば、現行道路橋示方書の条件と同レベルとなり、フルプレストレスに抑えることにより従来PC床版と同等の耐久性を確保できるものと考えられる。

2-3) 鉄筋応力度の許容値

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書Ⅲ.3.3 鉄筋の許容応力度】

鉄筋コンクリート構造及びプレストレストコンクリート構造に対する鉄筋の許容応力度は、直径32mm以下の鉄筋に対して表-3.3.1の値とする。

表-3.3.1 鉄筋の許容引張応力度(N/mm²)

応力度、部材の種類	鉄筋の種類		
	SR235	SD295A SD295B	SD345
1) 活荷重および衝撃以外の主荷重	80	100	100
2) 荷重の組合せに衝突荷重又は地震の影響を考慮しない場合の許容応力度の基本値	140	180	180
3) 荷重の組合せに衝突荷重又は地震の影響を考慮する場合の許容応力度の基本値	140	180	200
4) 鉄筋の重ね縫手長又は定着長を算出する場合の許容応力度の基本値	140	180	200
5) 圧縮応力度	140	180	200

2) 荷重の組合せに・・・・定めたものである。ここで、床版及び支間長10m以下の床版橋の場合は、活荷重による応力変動幅が大きく、しかも繰返し荷重が多いことから、一般の部材に比べて非常に苛酷な荷重状態にさらされており、有害なひび割れが発生する可能性が高いと考えられる。さらに、このようなひび割れが荷重の繰返し載荷により大きくなり、コンクリートのはく離等に進展するのを避けるために、鉄筋の許容応力度を一般の部材に対して規定した値より低減した。さらにこの観点から、鉄筋コンクリート床版の鉄筋については、140N/mm²の許容応力度に対し20N/mm²程度余裕を持たせるのが望ましい。

■技術的課題

床版支間が大きくなつた場合、現行道路橋示方書の許容値で問題ないか、応力の余裕量をさらに大きくする必要は無いか、疑義が生じる。

■性能評価の対応策

鉄筋の許容応力度についても2-2)と同様に、上述の1-1)、2-1)による適切な断面力算出と床版厚の設定を行えば、現行道路橋示方書を準用することで従来PC床版と同等と見なせるものと考えられる。

【解説】

PC床版は、床版の支間方向にプレストレスが導入されるが、PC箱桁橋においては主桁方向(床版支間直角方向)にもプレストレスが導入されている。しかしながら床版支間直角方向の設計については、安全側の解釈として主方向のプレストレスを考慮せずにRC部材として設計を行っており、上述の鉄筋許容値を用いている。

我が国における鉄筋の許容値は、昭和初期から材料の引張強度と降伏点をもとに設定され、昭和39年に「鉄筋コンクリート用棒鋼」としてJIS化されたのをきっかけに、許容値も引き上げら

れ、昭和43年には床版部材としての許容値が設定された。この際に繰返し荷重を受ける疲労部材としての考慮がなされ、許容値の低減が図られている。そして平成2年の道路橋示方書において、さらなる床版の疲労損傷が考慮され、現行道路橋示方書規定である「 140N/mm^2 に対して 20N/mm^2 程度の余裕をもたせる」という考えが示された。以下に、この許容応力度の値がどの程度の位置付けにあるか、ひび割れ幅の観点から確認を行う。

コンクリート標準示方書の表-8.3.2 に従い、一般的の環境として $\text{Wa}=0.005\text{C}$ と考え、 $\sigma_{sa}=120\text{ N/mm}^2$ とした場合のひび割れ幅を算出し、許容ひび割れ幅との比較を行う。

「コンクリート標準示方書」設計編 2007²⁻³⁻¹⁾ の許容ひび割れ幅算出式

$$W = 1.1 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \times \{4c + 0.7(c_s - \varphi)\} \times [\sigma_{se}/E_s + \varepsilon'_{csd}] \cdots \text{式(7.4.1)}$$

k_1 : 鋼材の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響係数 異形鉄筋=1.0

k_2 : コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響係数 $k_2 = \{15/(f_c' + 20)\} + 0.7$

f_c' : コンクリートの設計圧縮強度(N/mm^2)

k_3 : 引張鋼材の段数の影響を表す係数 $k_3 = 5(n+2)/(7n+8)$ 床版の場合 $n=1.0$

n : 引張鋼材の段数

c : 引張鋼材の純かぶり(mm)

c_s : 鋼材の中心間隔(mm)

φ : 鋼材系(mm)

σ_{se} : 鋼材位置のコンクリート応力度が0の状態から鉄筋応力度の増加量(N/mm^2)

E_s : 鋼材の弾性係数(N/mm^2) (20×10^5)

ε'_{csd} : コンクリートの収縮及びクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値

コンクリート示方書より (150×10^{-6})

この時、一般的なPC箱桁で使用されるコンクリート $f_{ck}=40\text{N/mm}^2$ 、純かぶり $C=35\text{mm}$ と下記の条件で考え、鉄筋の引張応力度 $\sigma_{se}=120\text{N/mm}^2$ で制限した場合、ひび割れ幅は表-1.2.2.1 に示す値となる。

表-1.2.2.1 ひび割れ幅算出結果

case	k_1	k_2	k_3	C (mm)	c_s (mm)	$\varphi(\text{mm})$	σ_{se} (N/mm^2)	W (mm)	$\text{Wa}=0.005\text{C}$ (mm)
1	1.0	0.95	1.0	35	125	16	120	0.170	0.175
2	n	n	n	n	n	19	n	0.168	0.175
3	n	n	n	n	n	22	n	0.166	0.175

表-1.2.2.1 より、床版鉄筋の許容値を $\sigma_{se}=120\text{N/mm}^2$ 程度に制限すれば、「コンクリート標準示方書」に示される鋼材の腐食の進行を制御できるひび割れ幅以内とすることができる、耐久性上の問題は無いものと考えられる。

参考文献

2-3-1) 土木学会:「コンクリート標準示方書」設計編 2007 年制定

2-4) 床版の疲労耐久性

■ 関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書III.3.2 コンクリートの許容応力度】

(2) プレストレストコンクリート構造に対するコンクリートの許容引張応力度は、表-3.2.3 の値とする。
また、従荷重及び従荷重に相当する特殊荷重を……適切に定めなければならない。

表-3.2.3 プレストレストコンクリート構造に対する許容引張応力度(N/mm^2)

応力度の種類	コンクリートの設計基準強度				
	30	40	50	60	
曲げ引張応力度	1) プレストッシング直後	1.2	1.5	1.8	2.0
	2) 従荷重及び衝撃以外の主荷重	0	0	0	0
	3) 床版	0	0	0	0
	4) プレキャストセグメント橋におけるセグメント接ぎ目	0	0	0	0
	5) その他の場合	1.2	1.5	1.8	2.0
	6) 軸引張応力度	0	0	0	0

【道路橋示方書III.3.3 鉄筋の許容応力度】

鉄筋コンクリート構造及びプレストレストコンクリート構造に対する鉄筋の許容応力度は、直径 32mm 以下の鉄筋に対して表-3.3.1 の値とする。

表-3.3.1 鉄筋の許容引張応力度(N/mm^2)

応力度、部材の種類	鉄筋の種類		
	SR235	SD295A SD295B	SD345
1) 活荷重および衝撃以外の主荷重	80	100	100
2) 荷重の組合せに衝突荷重又は地震の影響を考慮しない場合の許容応力度の基本値	一般の部材	140	180
	床版及び支間長10m以下の床版橋	140	140
3) 荷重の組合せに衝突荷重又は地震の影響を考慮する場合の許容応力度の基本値	140	180	200
	4) 鉄筋の重ね縫手又は定着長を算出する場合の許容応力度の基本値	140	180
5) 圧縮応力度	140	180	200

【道路橋示方書III.7.3.2 プレストレストコンクリート床版】

(3) 車道部分の床版の最小全厚は、……。

1) 車道部分の床版の全厚は、……。

2) 片持版の床版先端の厚さは、……。

3) 床版の1方向のみにプレストレスを導入する場合の車道部分の最小全厚は、……表-7.3.2 の値とするものとする。

表-7.3.2 床版の1方向のみにプレストレスを導入する場合の車道部分の最小全厚
(mm)

床版の支間の方向 (注) プレストレスを導入する方向	車両進行方向に直角	車両進行方向に平行
床版の支間の方向に平行	表-7.3.1の床版の支間の方向が車両進行方向に直角な場合の値の90%	表-7.3.1の床版の支間の方向が車両進行方向に平行な場合の値の65%
床版の支間の方向に直角	表-7.3.1の床版の支間の方向が車両進行方向に直角な場合の値	表-7.3.1の床版の支間の方向が車両進行方向に平行な場合の値

(柱) 床版の支間の方向は図-7.3.1による。

【道路橋示方書Ⅲ7.4.2 床版の設計曲げモーメント】

(1) B活荷重で設計する橋においては、T荷重（衝撃を含む）による床版の単位幅（1m）あたりの設計曲げモーメントは、表-7.4.1に示す式で算定するものとする。ただし、……割り増し係数を乗じた値とする。

表-7.4.1 T荷重（衝撃を含む）による床版の単位幅（1m）あたりの設計曲げモーメント

版の区分 の種類	曲げモーメントの種類	構造適用範囲	車両進行方向に直角			車両進行方向に平行		
			支間	支間	支間	支間	支間	支間
単支間曲げモーメント版	RC	0 ≤ I ≤ 4	+ (0.12I + 0.07P)	+ (0.10I + 0.04P)	+ (0.22I + 0.08P)	+ (0.06I + 0.06P)		
	PC	0 ≤ I ≤ 6						
連続支間曲げモーメント版	RC	0 ≤ I ≤ 4	+ (単純版の80%)	+ (単純版の80%)	+ (単純版の80%)	+ (単純版の80%)		
	PC	0 ≤ I ≤ 6						
連続支点曲げモーメント版	RC	0 ≤ I ≤ 4	- (0.15I + 0.125P)		- (単純版の80%)			
	PC	0 ≤ I ≤ 6						
片持版	RC	0 ≤ I ≤ 1.5	- P · I					
	PC	0 ≤ I ≤ 1.5	1.30I + 0.25		- (0.7I + 0.22P)			
版	RC	1.5 < I ≤ 3.0	- (0.6I - 0.22P)					
	PC	0 ≤ I ≤ 1.5		+ (0.15I + 0.13P)		+ (0.16I + 0.07P)		

ここに、RC：鉄筋コンクリート床版

PC：プレストレストコンクリート床版

I : 7.4.3に規定するT荷重に対する床版の支間(m)

P : 共通偏2.2.2に示すT荷重の片側荷重(100kN)

(注)床版支間の方向は、図-7.3.1による。

する床版について、上述の1-1)や2-1)、2-2)、2-3)において性能評価の対応策や考え方を示した。これらの対応策を講じることにより、床版支間が大きい場合においても、従来のコンクリート床版を道路橋示方書により設計を行う場合と同等レベルの床版と考えることができる。よって、1-1)や2-1)、2-2)、2-3)等の手法による検証を行うことにより、疲労耐久性は確保できるものと考えられる。

[検証事例-1][検証事例-2]

【参考文献】

2-4-1) 矢部、川畠、佐々木、内田、宮崎、西川：バーシャルプレストレスを導入したPC床版の輪荷重走行実験、土木学会第1回鋼橋床版シンポジウム、1998年11月

■技術的課題

床版支間がこれまでの実績より大きくなり、みなし仕様がそのまま準用できない場合の疲労耐久性について、検証方法が課題となる。

■性能評価の対応策

断面力と床版厚を適切に設定し、床版応力度をフルプレストレスに抑えてひび割れを発生させないようにすれば、道路橋示方書のみなし仕様により設計された従来PC床版と同等レベルと考えることができる。すなわち、1-1)や2-1)、2-2)、2-3)等の手法による検証を行うことにより、疲労耐久性は確保できるものと考えられる。

【解説】

従来のコンクリート床版は、道路橋示方書Ⅲ7.3および7.4に示されるみなし規定を用いて床版厚の設定や断面力の算出を行い、道路橋示方書Ⅲ3.2および3.3の許容値に抑えるべく設計を行っているのが大半である。これらのみなし規定は、実橋のRC床版の損傷事例などをもとに改訂を重ねたものであり、特にこれらみなし規定に準じて設計されたPC床版については、実橋においても著しい損傷の報告はこれまでに無く、また、輪荷重走行試験においても高い耐久性が確認されている²⁻⁴⁻¹⁾。コンクリート床版の破壊メカニズムは、複雑であり設計計算による疲労耐久性の照査は困難であるため、道路橋示方書のみなし規定を用いることは床版の疲労耐久性を担保する一つの方法である。

床版の断面力算出において、道路橋示方書のみなし規定の適用範囲を超える広幅員の支間を有

2-5) 使用目的との適合性

■ 関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書Ⅲ3.2 コンクリートの許容応力度】

(2) プレストレストコンクリート構造に対するコンクリートの許容引張応力度は、表-3.2.3 の値とする。

また、従荷重及び從荷重に相当する特殊荷重を・・・適切に定めなければならない。

表-3.2.3 プレストレストコンクリート構造に対する許容引張応力度(N/mm²)

応力度の種類	コンクリートの設計基準強度	30	40	50	60
		1.2	1.5	1.8	2.0
1) プレストレッシング直後					
2) 従荷重及び衝撃以外の主荷重	0	0	0	0	
3) 床版	0	0	0	0	
主荷重及び主荷重に相当する特殊荷重	4) プレキャストセグメント橋におけるセグメント繋ぎ目	0	0	0	0
	5) その他の場合	1.2	1.5	1.8	2.0
6) 軸引張応力度		0	0	0	0

【道路橋示方書Ⅶ.3.2 プレストレストコンクリート床版】

(1) プレストレストコンクリート床版の厚さは、安全性、耐久性及び施工性を有するように決定するものとする。

(3) 車道部分の床版の最小全厚は、次の規定によるものとする。なお、片持版の最小全厚とは、支持げたのウエブの前面における厚さをいう。

- 1) 車道部分の床版の全厚は、いかなる部分も 160mm を下まわらないものとする。
- 2) 片持版の床版先端の厚さは、1)の規定によるほか、表-7.3.1 の片持版の最小全厚の 50% 以上とするものとする。
- 3) 床版の 1 方向のみにプレストレスを導入する場合の車道部分の最小全厚は、1)及び 2)の規定によるほか、表-7.3.2 の値とするものとする。

表-7.3.2 床版の 1 方向のみにプレストレスを導入する場合の車道部分の最小全厚
(mm)

床版の支間の方向 (注) プレストレスを導入する方向	車両進行方向に直角	車両進行方向に平行
	表-7.3.1の床版の支間の方向が車両進行方向に直角な場合の90%	表-7.3.1の床版の支間の方向が車両進行方向に平行な場合の65%
床版の支間の方向に平行		
床版の支間の方向に直角	表-7.3.1の床版の支間の方向が車両進行方向に直角な場合の値	表-7.3.1の床版の支間の方向が車両進行方向に平行な場合の値

(柱) 床版の支間の方向は図-7.3.1による。

■ 性能評価の対応策

①に対して

床版とウエブの接合部であるハンチ部の応力度を検証する。

②に対して

適切な最小全厚を確保する。

③に対して

床版支間が大きくなった場合の活荷重たわみを検証する。

【解説】

①接合部の荷重伝達機能について

道路橋示方書式の適用支間内であれば、現行道路橋示方書の算出式を用いた断面力より応力を算出し、道路橋示方書の許容値以内（フルプレストレス）となるようにハンチ寸法を設定する。これに対して、適用支間を超えた場合の断面力算出方法が課題となるが、1-1)に示すFEM 解析による手法を用いれば、ハンチ部の応力度を直接確認できる。床版支間が大きくなり、従来ハンチ寸法では発生応力度が厳しくなることも考えられるが、この場合は、応力を抑えられる適切なハンチ寸法を設定することで対処する。

②鉛直曲げ剛性の確保について

道路橋示方書式の適用支間内であれば、現行道路橋示方書の最小厚規定を満足することにより、鉛直曲げ剛性は確保される。これに対して、適用支間を超えた場合の最小厚規定が明確でないが、2-1)により、適切な最小全厚を設定することにより、従来 PC 床版と同等の鉛直曲げ剛性を確保できるものと考えられる。

③活荷重によるたわみについて

コンクリート床版の活荷重によるたわみは小さく、従来の床版支間では問題とはならない。床版支間が大きくなった場合でも、1-1)に示す FEM 解析を用いれば、活荷重によるたわみを確認することができる（床版支間が大きくなても、コンクリート系床版は剛性が大きく、活荷重によるたわみは小さく問題にならないものと考えられる）。

■ 技術的課題

床版に対する使用目的との適合性については、次の 3 項目についての検証が必要となる。

- ①接合部の荷重伝達機能
- ②鉛直曲げ剛性の確保：最小全厚の確保
- ③活荷重によるたわみ

3) 全幅が広幅員となることに対する構造安全性、耐久性および使用性

3-1) 主桁の有効幅

■ 関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書Ⅲ4.2.2 有効断面]

(3) 曲げモーメントに対する圧縮フランジの片側有効幅は、式(4.2.1)により算出するものとする。

1) 主げた、支点横げた（直接支持されたけた）

$$\lambda = 1/8 + b_s$$

ただし、連続版及び単純版の場合 $\lambda \leq l_b / 2$

片持版の場合 $\lambda \leq l_c$

(3) 図-解4.2.1に示すように、圧縮フランジの軸方向圧縮応力度を、簡略的に一様に分布するものとみなせる幅 b_λ が有効幅である。ここでは、表現を統一するために、片側有効幅 λ について規定した。したがって、計算にあたっては、 $b_\lambda=2\lambda+b_w$ の値が用いられる。 ……

■技術的課題

床版支間が大きくなる場合は全幅も広幅員となる傾向があり、曲げモーメントに対する主桁の有効幅に対して配慮が必要である。

■性能評価の対応策

上述の1-1)に示すようなFEM解析を用いて有効幅を確認する。

3-2) プレストレスの伝達

■ 関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書Ⅲ6.6.7 PC鋼材の定着]

(1) 定着具の位置は、部材に所定のプレストレスを導入できるように、また、部材に有害なひび割れが生じないように選ぶものとする。

(3) 部材の中間に定着具を設ける場合は、活荷重による応力変動の大きな点から十分離れた断面の断面図心に近い位置か、圧縮部のコンクリートに定着するのがよい。

(1), (3) 定着具近くの断面では、実験結果によるとほぼ 45° 前後といわれているが、安全をみて $\tan \beta = 2/3$ すなわち $\beta = 33^\circ 40'$ とするのが望ましい。

したがって、図-解6.6.11に示すようなPC鋼材が1本の場合は定着位置と設計断面の距離は、 $\{p / (\tan(\beta - \alpha)) + 3/4(b_t - b_w)\}$ としてよい ……これらを考慮して、定着位置からプレストレスが有効に作用する断面までの距離は $(h + b_f) / 2$ としてよい。……

■技術的課題

主桁の有効幅同様、広幅員の場合は主方向プレストレスの伝達状況についても留意する必要がある。

■性能評価の対応策

道路橋示方書Ⅲ6.6.7に従い、プレストレスが有効となる断面までの距離を算出する。あるいは、FEM解析を用いて主桁断面内のプレストレス分布を確認する。

【解説】

曲げモーメントが作用する部材では、せん断遅れ現象により軸方向圧縮応力度の分布は一様とならず、幅員が大きくなるに従って顕著となる。このため、道路橋示方書Ⅲ4.2.2(3)において曲げモーメントに対する圧縮フランジの有効幅の算出法が規定されている。

これまでの実績では、道路橋示方書算出式の適用支間内で構成されたPC箱桁であれば（例えば全幅10mの一室箱桁）、全幅を有効幅としてもほぼ問題ない。しかしながら床版支間が大きくなる場合は全幅も広幅員となる傾向があり、有効幅に対しての配慮が必要となる。

有効幅の算出は、道路橋示方書Ⅲ4.2.2(3)に従うことも考えられるが、道路橋示方書算出式の適用範囲を超える支間の場合に、道路橋示方書Ⅲ4.2.2(3)の適用が妥当であるかは不明確である。よって、上述の1-1)に示すようなFEM解析を用いて有効幅を確認することが考えられる。FEMモデルに主桁自重などの等分布荷重を載荷させ、上床版に発生する橋軸方向応力度分布を確認することにより有効幅を設定することができる。

【解説】

広幅員一室箱桁において、ウエブ近傍のみにPC鋼材が定着される場合、定着部の近傍位置ではプレストレス力が有効に伝達されない区域が存在する。例えば、片持ち張出し架設における直近のブロック継目で、張出し床版長が長い場合の張出し先端付近、ウエブ間隔が広い場合の床版中央付近などである。

プレストレスが有効となる断面までの距離は、一般には、道路橋示方書Ⅲ6.6.7に準じて算出すればよい。しかしながら、片持ち張出し架設の場合などでは、道路橋示方書Ⅲ6.6.7により算出した距離が必要以上に長くなり、不合理な設計となる可能性がある（主桁上縁引張に対して上床版近傍が有効となればよく、道路橋示方書Ⅲ6.6.7による算出値より短い）。また逆に、張出し床版が長い場合においては、ブロック継ぎ目において床版端部にプレストレスが分布しない可能性もある。よって、これらが懸念される場合は、FEM解析を用いてプレストレスによるせん断遅れ現象を確認し、実際の主桁断面内のプレストレス分布により有効となる距離を設定するか、あるいは直接応力度を検証する手法が考えられる。

※1.1 外ケーブル構造 1.1.2 1-1)の項を参照。

3-3) 床版横縫め PC 鋼材のプレストレス力

■ 関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書 I 2.2.4 プレストレス力]

[道路橋示方書 I 2.2.4 プレストレス力]

(5) プレストレス直後のプレストレス力は、PC 鋼材の引張端に与えた引張力に、次の影響を考慮して算出する。

- 1) コンクリートの弾性変形
- 2) PC 鋼材とシースの摩擦係数
- 3) 定着具におけるセット

(5) 2) 摩擦による PC 鋼材引張力の減少は、影響についても考慮する必要がある。

PC 鋼材とシースの摩擦の影響を考慮した PC 鋼材の引張力は、PC 鋼材及びシースの種類、配置の形状等により、異なるものである。一般に PC 鋼材の図心線の角変化と PC 鋼材の長さを考慮して式(解 2.2.3)により算出することができる。

$$P_x = P_i \cdot e^{-(\mu \alpha + \lambda x)}$$

■技術的課題

広幅員になるとともに床版横縫め鋼材長も長くなる。このため、標準幅員の場合と比べ、摩擦による緊張力のロスが大きくなることが懸念される。

■性能評価の対応策

道路橋示方書 III 2.2.4 に準じて緊張力の算出を行う。摩擦による減少が大きくなる場合には、導入するプレストレスそのものを大きくするか、摩擦減少そのものを極力小さくするよう検討する。

【解説】

摩擦による減少が大きくなる場合には、以下の対処法が考えられる。

- ①床版両端からの両引き緊張とする。
- ②PC 鋼材の容量を上げる。
- ③PC 鋼材の配置間隔を小さくする。
- ④角変化ができるだけ小さくなるような形状を検討し、角変化による摩擦減少を小さくする。
これらの対応策について、以下の点に留意する必要がある。
- ⑤の場合、配置間隔を小さくすると定着具の最小間隔を満足しない場合があるため、各定着工法に応じた最小間隔を確認する必要がある。
- ⑥の場合、緊張力のロスを小さくできても、プレストレスの偏心による応力度の効率が悪くなる可能性があり、留意をする必要がある。

3-4) 段階施工を行う場合の打継目に対する留意点

■ 関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書 III 19.6 コンクリート工]

(7) 打継目

3) 打継目については、温度応力及び乾燥収縮によるひび割れが発生しないように考慮するものとする。

(8) マスコンクリート

セメントの水和熱に起因する温度応力によりひび割れが懸念される場合は、材料、打込み方法、養生方法等について検討を行い、構造物の機能上有害となるひび割れの発生を防止するものとする。

(7) 3) 打継目には、水和熱による温度応力、外気温の影響による温度応力、乾燥収縮等によりひび割れが生じるおそれがある。したがって、新旧コンクリートの温度差が小さくなるように施工しなければならない。また、打継目付近には、スターラップあるいは配力鉄筋等を他の部分と比較して密に配置する等の処置を講じる必要がある。

(8) セメントの水和熱に起因する温度応力によるひび割れを防止又は制御するために、材料及び配合の適切な選定、打継目の位置、打込み時間の間隔の選定、型わくの材料や構造、コンクリートの冷却、養生方法の選定等の検討が必要である。………

なお、温度応力に関する具体的な制御手法については、「ひび割れ制御指針」(日本コンクリート工学協会)、「コンクリート標準示方書施工編」(土木学会)を準用するとよい。

■技術的課題

広幅員になると旧ブロック側の拘束力が大きくなり、新ブロック側に発生する引張応力が大きくなることが懸念される。また、広幅員一室箱桁の場合、下床版幅も大きくなることが考えられる。下床版は、圧縮応力の厳しい断面では厚さが大きくなるため、打継ぎ目の温度応力がさらに大きくなる可能性があり、留意が必要である。

【解説】

[コンクリート道路橋設計便覧 10.3.14 用心鉄筋]に打継目の補強方法として以下の記述がある。

[コンクリート道路橋設計便覧 10.3.14 用心鉄筋]

(2) 打継目付近の用心鉄筋

主げたを分割施工する場合や柱や壁を打ち継ぐ場合には、新旧コンクリートの温度差や乾燥収縮などの影響により、打継面に垂直なひび割れが新コンクリートに発生しやすいものである。このひび割れを有害でない程度に抑えるために打継ぎ面に平行な用心鉄筋を以下に示すように配置するのが望ましい。

- 1) 一段目の鉄筋は打継目にできるだけ近く 5cm~7.5cm 程度の位置に配置する。
- 2) 鉄筋は直径 13mm 以上の異形鉄筋を 10cm~15cm 程度以下の間隔で打継面から 50cm 程度までの範囲で配置する。

3) 打継面から 50cm 以内において、コンクリートの表面付近に配置する鉄筋量は、スターラップあるいは帶鉄筋と合計して部材の断面積の 0.2%以上とするのが望ましい。

標準的な幅員であれば、設計便覧に示されるように打継ぎ目から 50cm 程度の床版横方向鉄筋を密に配置することで十分対処可能である。しかしながら、広幅員になると旧ブロック側の拘束力が大きくなり、新ブロック側の引張応力が大きくなることが懸念される。また、下床版幅、下床版厚が大きい場合、マスコンクリートとなりセメントの水和熱に起因する温度応力によるひび割れが発生する可能性もある。よって、温度応力解析を行い、適切な補強鉄筋を配置することにより、ひび割れを制御するのが対応策のひとつとして考えられる。

温度応力解析は、実施工ステップや材齢を考慮した FEM モデルによる逐次解析を行うとより厳密に引張応力を算出するのが可能となるが、コンクリートの配合、型枠、養生方法・期間などの入力条件により結果が異なるため、実施工に即した条件設定が重要である。

(3) 検証事例

検証事例-1	3 次元 FEM 解析を用いた広幅員一室箱桁の活荷重による断面力の算出方法					
要求性能	構造の安全性、使用性、疲労耐久性	関連規定	道路橋示方書Ⅲ7.4.2			
検証目的	道路橋示方書断面力算出式の適用範囲を超える支間において、適切な床版設計断面力の算出方法を設定した検証事例。					
検証方法	実験による検証・解析による検証・道路橋示方書の準用					
検証方針	3 次元 FEM 解析により断面力を算出。					
(1) 検討対象主桁断面						
図-1 検討対象主桁断面図						
中間床版の支間長が 7.3m であり、連続版の適用範囲 6.0m を超えている。						
(2) 解析モデル						
・ シェル要素による 3 次元 FEM 解析モデル						
図-2 3 次元 FEM 解析モデル						

- 板厚および剛域

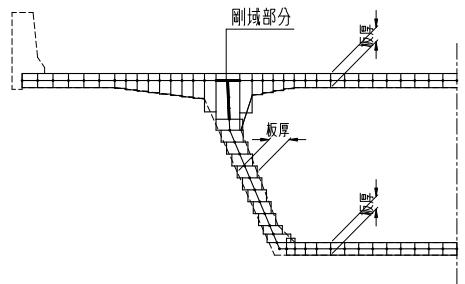


図-3 板厚及び剛域の設定

要素の板厚は、各節点での板厚を平均したものとし、剛域は道路橋示方書Ⅲ14.2に従い設定する。

(3) 活荷重の載荷方法

- 活荷重強度

T荷重とする。

(一輪あたり $P=100kN$)

- FEMモデルへの載荷方法

舗装厚と床版図心までの分布を考慮する（図-4）

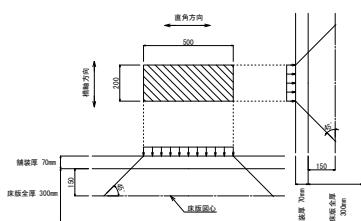


図-4 T荷重の分布

- 活荷重の載荷ケース

道路橋示方書に従い、橋軸方向には一列（FEMモデルの中央）、横方向には台数に制限がないものとして、各着目断面に最も不利になるようにT荷重を載荷する。

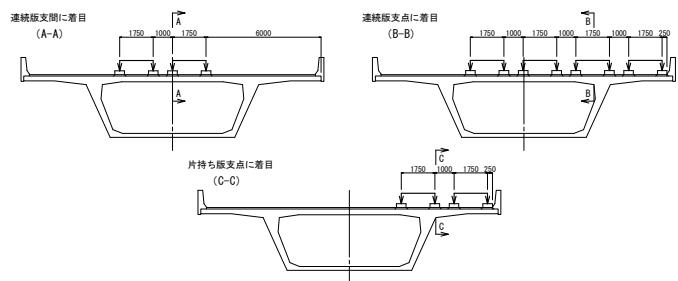


図-5 活荷重の載荷ケース

(4) 断面力算出結果

断面力算出結果を表-1に示す。FEM解析によって得られた断面力に対して、道路橋示方書Ⅲ2.2.3に示される床版支間に応じた衝撃の影響を考慮し、さらに割増し係数を乗じて設計断面力とする。割増し係数は、モデル化や荷重載荷方法の差を考慮したものである。

表-1 断面力算出結果

	単位	連続版支間	連続版支点	片持ち版支点
FEM解析より得た曲げモーメント M_1	kN·m/m	33.9	-89.2	-69.2
床版支間	m	7.300	7.300	2.705
衝撃係数 i	—	0.349	0.349	0.379
割増し係数 α	—	1.2	1.2	1.2
設計曲げモーメント $M = M_1 \times (1+i) \times \alpha$	kN·m/m	54.9	-144.4	-114.6

FEM解析は、汎用性のある解析ツールが多く開発され、従来と比べ簡単に扱えるようになってきたものの、モデル化によって結果に差異が生じることもあり、十分留意する必要がある。以下に、考えられる留意事項を列挙する。

① モデルの種類

→ シェルモデルとソリッドモデルがあり、より実構造に近いのはソリッドモデルであるが、モデル作成に手間を要する。シェルモデルは、ソリッドモデルに比べモデル作成は容易であるが、部材間の結合条件などに留意が必要となる。

② メッシュ分割

→ メッシュの分割数、大きさなどに結果が左右される。適切で無駄のないメッシュ分割を行う必要がある。

③ モデルの長さ

→ 道路橋示方書算出式のモデルは無限長であるが、FEMモデルは、得られる解に問題の無い範囲で、できるだけ短いモデル長とするのが望ましい。

④ 支持条件

→ PC箱桁をモデル化するため、下端の支持条件によっても得られる値が異なる可能性がある。

注意点

検証事例-2	床版の最小全厚の設定方法					
要求性能	構造の安全性、使用目的との適合性	関連規定	道路橋示方書Ⅲ7.3			
検証目的	床版支間が道路橋示方書断面力算出式の適用支間を超えた場合について、床版の最小全厚についての検証事例。					
検証方法	実験による検証・解析による検証・道路橋示方書の準用					
検証方針	3次元FEM解析を用いた断面力と床版の応力度により最小全厚を設定。					
検証内容	<p>広幅員PC箱桁は、床版の支間方向にプレストレスが導入された一方向PC床版であるため、支間方向については有害なひび割れは生じない。ただし、支間直角方向（橋軸方向）についてはRC構造となるため、ここで床版厚が規定される。</p> <p>床版支間直角方向（橋軸方向）について、活荷重による断面力と全断面有効とした場合の床版応力度について試算を行う。</p> <p>支間は、道路橋示方書式の適用範囲である4.0m、6.0mおよび適用範囲外の8.0mとする。L=8.0mにおいては、最小厚、設計曲げモーメントとも道路橋示方書式を延長して用いた場合と、FEM解析値の20%割増し値を用いた場合とにおいて比較を行う。</p>					
注意点	本事例で算出する最小全厚とは、床版に有害なひび割れを発生させないような床版厚の最小値である。実際の床版厚の設定には、この最小全厚を確保するとともに、鋼材のかぶり・あき、床版横縫め鋼材や主方向鋼材の外径および定着寸法、鉄筋の配置などを考慮して設定する必要がある。					

表-1 床版厚と設計断面力、応力度の試算

床版支間 L	4.0 m (M:道示)	6.0 m (M:道示)	8.0 m (M:道示)	8.0 m (M:FEM×1.2)
最小厚 d	0.207 m	0.261 m	0.315 m	0.267 m (※)
設計断面力 M	35.2 kN·m	51.2 kN·m	67.2 kN·m	53.8 kN·m
全断面有効の場合の断面性能 Z	0.00714 m ³	0.01135 m ³	0.01654 m ³	0.0126 m ³
コンクリート引張応力度 σ_c=M/Z	-4.9 N/mm ²	-4.5 N/mm ²	-4.1 N/mm ²	-4.5 N/mm ²

L=8.0mの場合、道路橋示方書の最小厚規定に従えば31.5cm必要となる。ここで、L=8.0mのFEM解析値に対してコンクリート引張応力度をL=6.0mと同じとした場合の床版厚を求めるとき26.7cmとなり、最小厚規定を準用した場合より小さくなる（表-1の右端欄（※））。この算出方法は、あくまでコンクリート応力度を指標としたものであるが、これと同等な検討を行うことで、道路橋示方書と同等レベルの床版厚を確保できるものと考えられる。以上より、床版支間が大きくなつても、適切な断面力を設定できればコンクリート応力度を指標とした床版厚の設定が可能であると考えられる。

1.2.3 リブ付き床版構造

(1) 主な技術概要

1.2.2(1)に示すように、道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編では、コンクリートのけたで支持された床版を適用対象として要求性能が規定されており、そのまんなし仕様として活荷重による床版の設計曲げモーメント算出式が規定されている。この算出式は、長辺比が1:2以上の床版で、連続版の支点部では支持桁と床版が剛結された構造であり、連続版の支点部を除く計算式では等方性無限単純版と等方性無限片持版の支持条件を対象としている。そして、解析により得られた理論値に対し安全率を見込んだまんなし仕様の設計曲げモーメント式としている。しかしながら、リブ付き床版構造は、図-1.2.3.1に示すように剛性の高い主桁ウェブで連続的に支持され、そしてウェブに直交する方向に一定間隔でリブを配置し床版を支持しているため、床版の支持条件や主たる断面力が発生する方向や支間長が明確でなくなる。

従って、本節で対象とするリブ付き床版構造は、道路橋示方書による床版断面力算出時の前提となる支持条件が異なるものであり、道路橋示方書式をそのまま使用することに疑義が生じる。

また、リブ付き床版構造は広幅員となる傾向があるが、広幅員となることによる技術的課題については1.2.2 広幅員一室箱桁構造に準ずることとする。

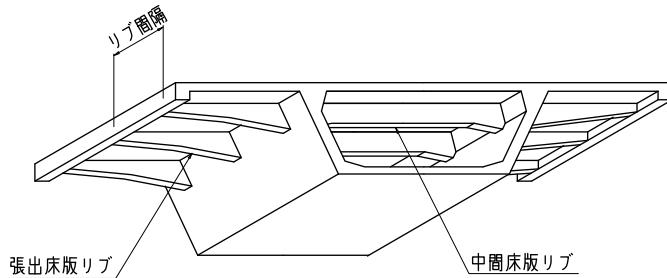


図-1.2.3.1 リブ付き床版箱桁の概要図

(2) 技術評価の観点と方向性

本節で取り扱うリブ付き床版構造は、床版の支持条件が通常のPC箱桁とは大きく異なる。よって本構造の技術評価を行う場合、以下の3タイプの観点から考える必要がある。

- ①床版の設計曲げモーメント算出式が道路橋示方書式を適用出来ない場合の設計手法
- ②床版の支持条件が異なることに対する構造安全性、耐久性、使用性
- ③リブを配置することで生じる主桁の構成部材としての構造安全性、耐久性、使用性

これらの観点から考えられる床版、リブ、リブ接合部および主桁構成部材としての影響について技術的課題とその対応策を次頁より記す。

表-1.2.3.1 リブ付き床版構造の問題認識と対応策一覧(その1)

技術評価の観点	着目する部位	対応する要求性能	問題認識		対応策	検証事例
			項目	内容		
道示における設計曲げモーメント算出式を適用出来ないことに対する課題	床版	・構造安全性 ・疲労耐久性 ・使用目的との適合性	1-1-1) リブで支持された床版の設計断面力の算出方法	リブによって支持された床版構造は、支持条件が道示式の前提条件と異なることや、主たる断面力が発生する方向や支間長が明確でなくなることから、床版の支持条件に応じた設計曲げモーメントの算出手法が設計手法上の課題となる。	床版支持条件が異なっても、床版の支持条件を適切に再現できるモデルを設定し、荷重条件を同一にして理論値を算出すれば、道示のみなし仕様と同レベルの断面力が得られるものと考えられる。	検証事例-1
	リブ	・構造安全性 ・使用目的との適合性	2-1-1) リブの構造・形状選定	リブは梁部材として床版を支持し、床版と共に荷重を支える構造のため、リブの配置間隔・配置形状・剛性の違いによって床版に発生する断面力が大きく異なると考えられること、床版支間方向にリブ直上とリブ間の床版応力度に違いも生じてくることから、その配置形状をどのように選定していくのが課題となる。	リブは梁部材として床版を支持し、床版と共に荷重を支える構造であり、そのリブの配置間隔・配置形状・剛性の違いによって、床版の断面力が大きく異なる。リブの配置間隔およびリブの形状寸法(部材幅、部材高さ)を適切に設定する必要がある。	検証事例-2
床版の支持条件が従来と異なることに対する課題	床版	・構造安全性 ・疲労耐久性 ・使用目的との適合性	1-2-1) 床版の最小全厚	リブによって支持された床版構造は、支持条件が道示の前提条件と異なることや、主たる断面力が発生する方向や支間長が明確でないため、床版支持条件が異なる場合の最小全厚の設定が課題となる。	道示の最小厚が、床版の曲げ引張応力を抑えるように規定されていることから、床版の応力度を指標として、床版厚を設定する方法が考えられる。	広幅員一室箱桁の検証事例-2
	床版	・疲労耐久性 ・使用目的との適合性	1-2-2) 床版のコンクリート応力度の許容値	リブによって支持された床版構造は、支持条件が道示の前提条件と異なることや、主たる断面力が発生する方向や支間長が明確でないため、床版支持条件が異なる場合のコンクリート応力度の許容値設定が課題となる。	床版支持条件が異なった場合でも、適切な断面力算出と床版厚の設定を行えば、現行道示の規定を準用してフルプレストレスに抑えることとすれば、従来PC床版と同じレベルの耐久性を確保できるものと考えられる。	道示の準用
	床版	・疲労耐久性 ・使用目的との適合性	1-2-3) 床版の鉄筋応力度の許容値	リブによって支持された床版構造は、支持条件が道示の前提条件と異なることや、主たる断面力が発生する方向や支間長が明確でないため、床版支持条件が異なる場合の鉄筋応力度の許容値設定が課題となる。	適切な断面力算出と床版厚の設定を行えば、現行道示に示す鉄筋の許容応力度の値を準用することで、従来PC床版と同等と見なせるものと考えられる。	道示の準用
	床版	・疲労耐久性	1-2-4) 床版の疲労耐久性	リブによって支持された床版構造は、支持条件が道示の前提条件と異なるため、床版厚を変化させた場合に大型の自動車による影響、たわみおよび振動の変形による二次応力の発生が懸念される。よって、これまでのみなし仕様がそのまま準用できない場合、疲労耐久性についてその検証方法が課題となる。	適切な断面力算出手法、床版の最小全厚、コンクリートおよび鉄筋の許容応力度の検証を行うことにより、疲労耐久性は確保できるものと考えられる。	道示の準用 検証事例-1 広幅員一室箱桁の検証事例-2
リブと床版、リブとウェブの接合部	床版	・使用目的との適合性	接合部の荷重伝達機能	リブと床版、リブとウェブの接合部の荷重伝達機構を確保するための補強方法の確認が課題となる。	接合部の応力度は、FEM解析による手法を用いれば直接確認できる。また、ウェブ厚さの見直しや補強リブの設置により対処可能である。	
			1-2-5) 使用目的との適合性	鉛直曲げ剛性の確保(最小全厚の確保)	適切な最小全厚を設定することにより、従来PC床版と同様の鉛直曲げ剛性を確保できる。また、解析によりリブの応力度を制御し、有害なひび割れが発生しないことを確認する必要がある。	広幅員一室箱桁の検証事例-2
			活荷重によるたわみ	リブと床版、リブとウェブの活荷重によるたわみ量の確認が課題となる。	FEM解析を用いて、活荷重によるたわみを確認する(床版支間が大きくなつても、リブで支えられたコンクリート床版は剛性が大きく、活荷重によるたわみは問題にならない程度まで小さくなるものと考えられる)。	

表-1.2.3.2 リブ付き床版構造の問題認識と対応策一覧(その2)

技術評価の観点	着目する部位	対応する要求性能	問題認識		対応策	検証事例
			項目	内容		
床版の支持条件が従来と異なることに対する課題	リブ	・構造安全性 ・疲労耐久性 ・使用目的との適合性	2-2-1) リブの設計断面力の算出方法	リブの配置間隔・配置形状・剛性の違いによって、床版及びリブに生じる断面力が大きく異なり、またウエブや下床版もリブからの断面力の影響を受けることから、単純な箱桁ラーメン構造と見なすことが出来ず、リブに生じる断面力の算出方法が設計上の課題となる。	リブを適切に再現できるモデルを設定し、荷重条件を同一にして理論値を算出すれば、床版部材と同様にリブ部材に発生する断面力を直接確認することが出来る。	検証事例-1
	リブ	・疲労耐久性 ・使用目的との適合性	2-2-2) リブに発生する応力度の制限	リブに発生するコンクリート応力度をどの部材の制限値に準じ、どの程度に制御のかが課題となる。また、曲げに対する検討だけでなく、せん断に対する補強方法も道示の梁部材としての設計手法に準じても問題ないか課題となる。	リブは、床版を支える梁部材と考えられるため、道示に示す梁部材の曲げ応力度の許容値以内に抑えられればよいと考えられ、また、せん断力に対する補強方法も道示に示す梁部材として適切に取り扱うことで、性能が確保されると考えられる。	道示の準用検証事例-3
	リブ	・疲労耐久性	2-2-3) リブの疲労耐久性	リブ付き床版は、リブによって床版を直接支持する部材であり将来の取り替えが困難であること、また、床版を支える部材であることが前提条件であるために床版に先行して破壊することを避けるべき部材と考えられることから、十分な疲労耐久性を有しているかの検証方法が課題となる。	リブに発生する応力度を床版応力度程度に抑えることによって、リブ付き床版の疲労耐久性は確保出来るものと考えられる。	道示の準用
	リブと床版の接合部	・構造安全性 ・使用目的との適合性	3-1-1) リブ接合部の構造	リブは、床版を支える梁部材であり、リブ接合部は床版との一体化が図れる構造である必要があることから「梁とスラブ」との接合部位と考え、道示に規定されたその構造細目に準じても問題ないか課題となる。	接合部には局部的な応力を発生させないように、その接合構造に配慮した設計が必要である。	道示の準用検証事例-2
	リブと床版の接合部	・構造安全性 ・疲労耐久性 ・使用目的との適合性	3-1-2) リブ接合部の応力度	リブと床版、リブとウエブ部における接合部では、リブからの伝達される断面力によって局部的な引張応力度が発生する恐れがあるが、発生応力度の算出方法や補強方法が不明確であり、課題となる。	FEM解析によってコンクリートに有害なひび割れが発生しない応力度に抑え、ひび割れを制御する鉄筋を配置する事によって、道示で要求している接合部の耐久性を確保できるものと考えられる。	道示の準用検証事例-2
	リブと床版の接合部	・疲労耐久性	3-1-3) リブ接合部の疲労耐久性	リブ接合部は、リブにより床版を直接支持する部材であるため、耐久性に十分配慮する必要がある。どのような検証によって、十分な疲労耐久性を有していると言えるのかが課題となる。	床版を支えるリブ接合部に発生する鉄筋の引張応力度は、床版部材と同等な考え方をすることで疲労耐久性を確保出来ると考えられる。	道示の準用
リブを配置することで生じる主桁の構成部材としての課題	主桁	・使用目的との適合性	4-1-1) 主桁の有効幅	リブ付き床版構造は、剛性の高いリブが主方向に等間隔で配置されるため、主桁の圧縮フランジ有効幅の考え方方に影響が生じないかが課題として考えられる。	3次元FEMモデルを使用し、床版の曲げ応力度の影響範囲を検討することによって、リブの設置が主桁応力に及ぼす影響を検証する。	検証事例-4
	主桁	・構造安全性 ・使用目的との適合性	4-1-2) プレストレスの伝達	リブを配置することで主方向のプレストレス力が断面方向に分散する可能性も考えられ、その伝達の影響についても確認する必要がある。	道示を準用する。また、FEM解析によりリブ設置によるプレストレスの主方向への影響を確認する手法も考えられる。	道示の準用検証事例-4
	床版	・構造安全性 ・疲労耐久性 ・使用目的との適合性	4-1-3) 床版横締めPC鋼材のプレストレス力	リブを配置することによって床版支間方向の抵抗断面が増え、床版支間方向の弾性変形がリブに拘束されることが考えられることから、横締めプレストレスによる床版応力度の算出に留意する必要がある。	3次元FEMモデルを使用し、床版支間方向にプレストレスを導入しその影響を解析することによって、その関与の度合いを確認出来る。	検証事例-4

1) 床版部材について

1-1) 道路橋示方書における設計曲げモーメント算出式を適用出来ないことに対する課題

1-1-1) リブで支持された床版の設計断面力の算出方法

■ 関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書Ⅲ 7.4.2 床版の設計曲げモーメント]

(1) B 活荷重で設計する橋においては、T 荷重（衝撃を含む）による床版の単位幅（1 m）あたりの設計曲げモーメントは、表-7.4.1 に示す式で算定するものとする。ただし、
割り増し係数を乗じた値とする。

表-7.4.1 T 荷重（衝撃を含む）による床版の単位幅（1m）あたりの設計曲げモーメント
(kN·m/m)

版の区分	曲げモーメント類	構造	床版の支間の方向(注) 曲げモーメントの方向		車両進行方向に直角 支間方向	車両進行方向に平行 支間方向に直角方向	支間方向に直角角方向
			支間曲げモーメント	支点曲げモーメント			
単純版	支間曲げモーメント	RC	$0 \leq J \leq 4$	$+ (0.12J + 0.07)P$	$+ (0.10J + 0.04)P$	$+ (0.22J + 0.08)P$	$+ (0.06J + 0.06)P$
	PC	$0 \leq J \leq 6$					
連続版	支間曲げモーメント	RC	$0 \leq J \leq 4$	$+ (\text{単純版の} 80\%)$	$+ (\text{単純版の} 80\%)$	$+ (\text{単純版の} 80\%)$	$+ (\text{単純版の} 80\%)$
	PC	$0 \leq J \leq 6$					
片持版	支間曲げモーメント	RC	$0 \leq J \leq 4$	$- (0.15J + 0.125)P$	—	$- (\text{単純版の} 80\%)$	—
	PC	$0 \leq J \leq 6$					
先端付近曲げモーメント	RC	$0 \leq J \leq 1.5$	$- P \cdot J$				
	PC	$0 \leq J \leq 1.5$	$1.30J + 0.25$	—	$- (0.7J + 0.22)P$	—	—
		$1.5 < J \leq 3.0$					

ここに、 RC : 鉄筋コンクリート床版

PC : プレレストレストコンクリート床版

J : 7.4.3 に規定するT荷重に対する床版の支間 (m)

P : 共通偏2.2.2 に示すT荷重の片側荷重 (100kN)

(注) 床版支間の方向は、図-7.3.1による。

(1) 表-7.4.1 は、表中の床版支間の範囲内で適用できる T 荷重による設計曲げモーメントの計算式を示したものである。ここで連続版の支点曲げモーメントについては、支持された拘束条件がコンクリート橋と鋼橋では異なるため、この影響を考慮している。表-7.4.1 の連続版・・・・設計曲げモーメントは表-7.4.1 によるものとしてよい。

■ 技術的課題

リブによって支持された床版構造は、支持条件が道路橋示方書式の前提条件と異なることや、主たる断面力が発生する方向や支間長が明確でなくなることから、床版の支持条件に応じた設計曲げモーメントの算出手法が設計手法上の課題となる。

■ 性能評価の対応策

床版支持条件が異なっても、床版の支持条件を適切に再現できるモデルを設定し、荷重条件を同一にして理論値を算出すれば、道路橋示方書のみなし仕様と同レベルの断面力が得られるものと考えられます

【解説】

支持条件を適切に再現できるモデルとして、図-1.2.3.2 に示すような3次元FEM解析が考えられる。3次元FEM解析は、実構造を忠実に再現できるモデルである反面、モデル化によって結果が異なることがあり、十分留意する必要がある。ここでは、リブ付き床版構造に特化した留意事項について以下に列挙する。

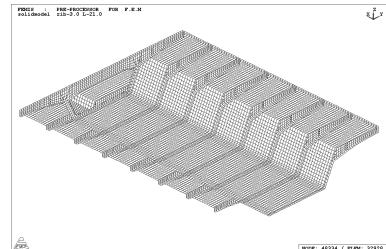


図-1.2.3.2 次元FEM解析モデルの例

①モデルの種類

リブ付き床版箱桁橋の解析モデルは、図

-1.2.3.3 に示すようにソリッドモデルとシェルモデルが考えられる。ソリッドモデルは、実構造を忠実に再現でき、解析精度は高い手法と判断されるが、モデル作成に手間を要する。逆にシェルモデルは、ソリッドモデルに比べればモデル作成は容易であるが、部材間の結合条件やリブ部材をどのようにモデル化するのかなどに留意する必要がある。また、リブ材をシェル要素にすることによって、線支持となるため床版の断面力がリブ直上で過大に評価される。従って、上記の懸念される課題を取り除き、床版やリブそして接合部への応力度を適切に評価出来るモデルとしては、ソリッドモデルが適していると考えられる。^{1-1-1), 1-1-2), 1-1-3)}

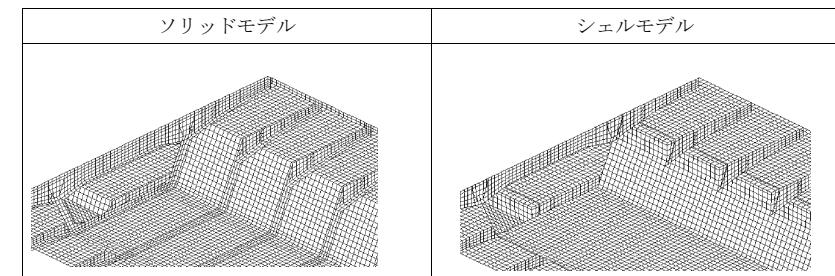


図-1.2.3.3 ソリッドモデルとシェルモデルの例

②その他

メッシュ分割、モデル長の長さ、支持条件等の留意点は 1.2.2 に準ずる。

【検証事例-1】

【参考文献】

- 1-1-1) 岩立、藤島、横山、中山：第二東名高速道路 大平高架橋～リブ付き床版の設計～、プレストレストコンクリート技術協会第10回シンポジウム論文集(2000年10月)
- 1-1-2) 黒岩、後藤、多田、梅田：瀬戸川橋の設計・施工について、プレストレストコンクリート技術協会第10回シンポジウム論文集(2000年10月)
- 1-1-3) 川除、鈴木、徳川、菅野：常滑高架橋の設計・施工、プレストレストコンクリート技術協会第14回シンポジウム論文集(2005年11月)

1-2) 床版の支持条件が従来と異なることに対する課題

1-2-1) 床版の最小全厚

■ 関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書Ⅲ 7.3.2 プレストレストコンクリート床版]

- (1) プレストレストコンクリート床版の厚さは、安全性、耐久性及び施工性を有するよう決定するものとする。
- (2) (3)および(4)による場合は、(1)を満足するとみなしてよい。
- (3) 車道部分の床版の最小全厚は、次の規定によるものとする。なお、片持版の最小全厚とは、支持げたのウエブの前面における厚さをいう。
 - 1) 車道部分の床版の全厚は、いかなる部分も 160mm を下まわらないものとする。
 - 2) 片持版の床版先端の厚さは、1)の規定によるほか、表-7.3.1 の片持版の最小全厚の 50% 以上とするものとする。
 - 3) 床版の 1 方向のみにプレストレスを導入する場合の車道部分の最小全厚は、1)及び 2)の規定によるほか、表-7.3.2 の値とするものとする。

表-7.3.2 床版の 1 方向のみにプレストレスを導入する場合の車道部分の最小全厚 (mm)

床版の支間の方向 プレストレスト (注) を導入する方向	車両進行方向に直角	車両進行方向に平行
床版の支間に方向に平行	表-7.3.1 の床版の支間の 方向が車両進行方向に直 角な場合の値の 90%	表-7.3.1 の床版の支間の 方向が車両進行方向に平 行な場合の値の 65%
床版の支間に方向に直角	表-7.3.1 の床版の支間の 方向が車両進行方向に直 角な場合の値	表-7.3.1 の床版の支間の 方向が車両進行方向に平 行な場合の値

(注) 床版の支間の方向は図-7.3.1 による。

(1) プレストレストコンクリート床版の最小全厚の決定にあたっては、鉄筋コンクリートと同様、実際の挙動を反映できる輪荷重走行試験及び解析により安全性を照査することが望ましい。しかし、プレストレスコンクリート床版は一般的に鉄筋コンクリート床版に比べて疲労耐久性を有するため、疲労耐久性のみに着目すると、最小全厚をかなり小さくすることが可能と判断してしまうおそれがある。

この結果、最小全厚を極端に薄くしてしまうと、・・・・・二次応力の発生が考えられる。また、・・・・クリープ乾燥収縮の影響を受けやすくなる。したがって、・・・・これらを考慮しなければならない。

■ 技術的課題

リブによって支持された床版構造は、支持条件が道路橋示方書の前提条件と異なることや、主たる断面力が発生する方向や支間長が明確でないため、床版支持条件が異なる場合の最小全厚の設定が課題となる。

■ 性能評価の対応策

1.3.2 広幅員一室箱桁 同様、道路橋示方書の最小厚が、床版の曲げ引張応力を抑えるように規定されていることから、床版の応力度を指標として、床版厚を設定する方法が考えられる（1.3.2 広幅員一室箱桁 2-1）の章を参照）。

【解説】

床版の応力度を指標とした最小全厚を設定する方法として、以下の手順が考えられる。

- ①適用支持条件であれば、みなしありとして規定された道路橋示方書の算出式を用いた断面力と最小厚により設計された床版は、安全性、耐久性ともに保証されている。
- ②これらを用いて、床版の曲げ応力度を算出し、これをひとつの指標とする。
- ③床版の支持条件が従来と異なる場合の床版の断面力を、前述の方法などを用いて適切に算出する。
- ④ ③の断面力を用いた床版の曲げ応力度が、②の応力度と同程度になるように床版厚を設定し、これを最小厚とする。

【検証事例-2(広幅員一室箱桁)】

1-2-2) 床版のコンクリート応力度の許容値

■ 関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書Ⅲ 3.2 コンクリートの許容応力度]

(2) プレストレストコンクリート構造に対するコンクリートの許容引張応力度は、表-3.2.3の値とする。
また、従荷重及び従荷重に相当する特殊荷重を・・・適切に定めなければならない。

表-3.2.3 プレストレストコンクリート構造に対する許容引張応力度(N/mm²)

応力度の種類		コンクリートの設計基準強度			
		30	40	50	60
曲げ引張応力度	1) プレストレッシング直後	1.2	1.5	1.8	2.0
	2) 従荷重及び衝撃以外の主荷重	0	0	0	0
	3) 床版	0	0	0	0
	4) プレキャストセグメント橋におけるセグメント継ぎ目	0	0	0	0
	5) その他の場合	1.2	1.5	1.8	2.0
	6) 軸引張応力度	0	0	0	0

(2) 従来からプレストレストコンクリート構造は、部材断面にある程度の引張応力が生じることを許容し、6.5に規定する引張鉄筋を配置することにより、じん性に富んだ部材を設計することをしている。ただし、ある程度プレストレスを多めに導入しておくことにより、ひび割れに対する安全度を高めるため許容引張応力度を小さめに定めている。

表-3.2.3の2)は、・・・である。また、表-3.2.3の3)は、床版がひび割れにより損傷するのを防ぐためにプレストレスの方向に引張応力を生じさせないための規定であり、床版を設計する場合の規定である。・・・

■ 技術的課題

リブによって支持された床版構造は、支持条件が道路橋示方書の前提条件と異なることや、主たる断面力が発生する方向や支間長が明確でないため、床版支持条件が異なる場合のコンクリート応力度の許容値設定が課題となる。

■ 性能評価の対応策

床版支持条件が異なった場合でも、1-1-1)、1-2-1)による適切な断面力算出と床版厚の設定を行い、現行道路橋示方書の規定を準用してフルプレストレスに抑えることとすれば、従来のPC床版と同レベルの耐久性を確保できるものと考えられる。

【解説】

PC床版においてプレストレスの導入方向に引張応力を発生させないよう規定することにより、床版にひび割れを発生させないようにし、高い耐久性を確保するためのみなし仕様としている。したがって、床版支持条件が異なった場合でも、フルプレストレスに抑えることで、従来のPC床版と同レベルの耐久性を確保できるものと考えられる。

1-2-3) 床版の鉄筋応力度の許容値

■ 関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書Ⅲ 3.3 鉄筋の許容応力度]

鉄筋コンクリート構造及びプレストレストコンクリート構造に対する鉄筋の許容応力度は、直径32mm以下の鉄筋に対して表-3.3.1の値とする。

表-3.3.1 鉄筋の許容引張応力度(N/mm²)

応力度、部材の種類	鉄筋の種類		
	SR235	SD295A SD295B	SD345
1) 活荷重および衝撃以外の主荷重	80	100	100
2) 荷重の組合せに衝突荷重又は地震の影響を考慮しない場合の許容応力度の基本値	140	180	180
床版及び支間長10m以下の床版橋	140	140	140
3) 荷重の組合せに衝突荷重又は地震の影響を考慮する場合の許容応力度の基本値	140	180	200
4) 鉄筋の重ね継手長又は定着長を算出する場合の許容応力度の基本値	140	180	200
5) 圧縮応力度	140	180	200

2) 荷重の組合せに衝突又は地震の影響を考慮しない場合の許容応力度は、・・・定めたものである。ここで、床版及び支間長10m以下の床版橋の場合は、活荷重による応力変動幅が大きく、しかも繰返し荷重が多いことから、一般の部材に比べて非常に苛酷な荷重状態にさらされており、有害なひび割れが発生する可能性が高いと考えられる。さらに、このようなひび割れが荷重の繰返し載荷により大きくなり、コンクリートのはく離等に進展するのを避けるために、鉄筋の許容応力度を一般の部材に対して規定した値より低減した。さらにこの観点から、鉄筋コンクリート床版の鉄筋については、140N/mm²の許容応力度に対し20N/mm²程度余裕を持たせるのが望ましい。

■ 技術的課題

リブによって支持された床版構造は、支持条件が道路橋示方書の前提条件と異なることや、主たる断面力が発生する方向や支間長が明確でないため、床版支持条件が異なる場合の鉄筋応力度の許容値設定が課題となる。

■ 性能評価の対応策

鉄筋の許容応力度についても、1-2-2)と同様に、1-1-1)、1-2-1)による適切な断面力算出と床版厚の設定を行い、現行道路橋示方書に示す鉄筋の許容応力度の値を準用すれば、従来のPC床版と同等と見なせるものと考えられる。

【解説】

PC 床版は、床版の支間方向にプレストレスが導入されるが、PC 箱桁橋においては主桁方向（床版支間直角方向）にもプレストレスが導入されている。しかしながら床版支間直角方向の設計については、安全側の解釈として主方向のプレストレスを考慮せずに RC 部材として設計を行っており、上述の鉄筋許容値を用いている。

1.2.2 広幅員一室箱桁構造 2-3) 鉄筋応力度の許容値 と同様、床版鉄筋の許容値を $\sigma_{se}=120\text{N/mm}^2$ 程度に制限すれば、「コンクリート標準示方書」に示される鋼材の腐食の進行を制御できるひび割れ幅以内と/or ことができ、耐久性上の問題は無いものと考えられる。

1-2-4) 床版の疲労耐久性

■ 関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書Ⅲ 7.2 設計一般]

- (1) 床版の設計においては、直接支持する活荷重等の影響に対して安全なようにするほか、以下の 1) 及び 2) の規定を満足するものとする。
- 1) 荷重等に対して、疲労耐久性を損なう有害な変形を生じないようにするものとする。
 - 2) 自動車等の繰返し通行に対して、疲労耐久性が損なわれないようにするものとする。
- (2) 7.3 から 7.5 によるプレストレストコンクリート床版及び設計基準強度 24N/mm^2 以上のコンクリートを用いた鉄筋コンクリート床版は、(1) を満足するとみなしてよい。

(1) 床版が直接支持する活荷重等の影響に対する安全性は、床版の基本的な性能であり、これを満足する他、特に大型の自動車の繰返し通行に対して耐久性を損なわないようにするものとした。

床版の活荷重等の……考慮する必要がある。

床版の有害な変形は、疲労耐久性に大きな影響を及ぼすコンクリート部材のひび割れの発生等のおそれがある。したがって、疲労耐久性を損なうような有害な変形を生じないようにする必要がある。

鉄筋コンクリート床版の……経緯をたどる。

以上のように、コンクリートを主体とする床版の破壊メカニズムは、複雑であり設計計算による疲労耐久性の照査は困難であるが、鉄筋の許容応力度の低減や床版厚の増加、床版支間の制限や……をすることが必要である

(2) プレストレストコンクリート床版及び設計基準強度 24N/mm^2 以上のコンクリートを用いた鉄筋コンクリート床版で、……。これは、最小全厚を満足し、7.4 による設計曲げモーメントにより床版を設計する場合は、活荷重によるせん断破壊に対して十分安全であるため、一般にせん断力に対する検討を省略できるものとしたものである。しかし、施工時に大きな荷重を受ける場合等では、十分な検討をすることが望ましい。

(2) に示す 道路橋示方書Ⅲ 7.3 から 7.5 の題目のみ以下に示す。

7.3 床版厚さ	7.3.1 鉄筋コンクリート床版 7.3.2 プレストレストコンクリート床版
7.4 床版の設計曲げモーメント	7.4.1 一般 7.4.2 床版設計曲げモーメント 7.4.3 床版の支間
7.5 構造細目	7.5.1 床版と支持げたの結合 7.5.2 鉄筋の種類及び配筋 7.5.3 P C 鋼材の配置 7.5.4 片持版端部及び横げた上の床版

■ 技術的課題

リブによって支持された床版構造は、支持条件が道路橋示方書の前提条件と異なるため、床版厚を変化させた場合に大型の自動車による影響、たわみおよび振動の変形による二次応力の発生が懸念される。よって、これまでのみなし仕様がそのまま準用できない場合、疲労耐久性についてその検証方法が課題となる。

■ 性能評価の対応策

1-1-1), 1-2-1) ~1-2-3) による適切な断面力算出手法、床版の最小全厚、コンクリートおよび鉄筋の許容応力度の検証を行うことにより、疲労耐久性は確保できるものと考えられる。

【解説】

コンクリート床版の破壊メカニズムは、複雑であり設計計算による疲労耐久性の照査は困難である。断面力と床版厚を適切に設定し、床版応力度をフルプレストレスに抑えてひび割れを発生させないようにすれば、道路橋示方書のみなし仕様により設計された従来PC床版と同等レベルを考えることができる。よって、道路橋示方書Ⅲ 7.2 (2) のみなし仕様に準じた床版の設計により、疲労耐久性を担保しているのが多くの現状である。

これらのみなし仕様に準じて設計された床版の中でもPC床版については、実橋においても著しい損傷の報告はこれまでに無く、また、輪荷重走行試験においても高い耐久性が確認されている。

|
88
|

[検証事例-1][検証事例-2(広幅員一室箱桁)]

1-2-5) 使用目的との適合性（鉛直曲げ剛性の確保、活荷重によるたわみ）

■ 関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書Ⅲ 7.2 設計一般]

- (1) 床版の設計においては、直接支持する活荷重等の影響に対して安全なようにするほか、以下の1)、2)の規定を満足するものとする。
 - 1) 荷重等に対して、疲労耐久性を損なう有害な変形を生じないようにするものとする。
 - 2) 自動車等の繰返し通行に対して、疲労耐久性が損なわれないようにする。
- (2) 7.3から7.5によるプレストレストコンクリート床版及び設計基準強度 $24N/mm^2$ 以上のコンクリートを用いた鉄筋コンクリート床版は、(1)を満足するとみなしてよい。

(1) 床版が直接支持する活荷重等の影響に対する安全性は、床版の基本的な性能であり、これを満足する他、特に大型の自動車の繰返し通行に対して耐久性を損なわないようにするものとした。

床版の活荷重等の・・・・考慮する必要がある。

床版の有害な変形は、疲労耐久性に大きな影響を及ぼすコンクリート部材のひび割れの発生等のおそれがある。したがって、疲労耐久性を損なうような有害な変形を生じないようにする必要がある。

鉄筋コンクリート床版の・・・・経緯をたどる。

以上のように、コンクリートを主体とする床版の破壊メカニズムは、複雑であり設計計算による疲労耐久性の照査は困難であるが、鉄筋の許容応力度の低減や床版厚の増加、床版支間の制限や・・・・をすることが必要である

- (2) プレストレストコンクリート床版及び設計基準強度 $24N/mm^2$ 以上のコンクリートを用いた鉄筋コンクリート床版で、・・・・。これは、最小全厚を満足し、7.4による設計曲げモーメントにより床版を設計する場合は、活荷重によるせん断破壊に対して十分安全であるため、一般にせん断力に対する検討を省略できるものとしたものである。しかし、施工時に大きな荷重を受ける場合等では、十分な検討をすることが望ましい。

[道路橋示方書Ⅲ 7.3.2 プレストレストコンクリート床版]

- (1) プレストレストコンクリート床版の厚さは、安全性、耐久性および施工性を有するよう決定するものとする。
- (2) (3)及び(4)による場合は、(1)を満足するとみなしてよい。
- (3) 床版部分の床版最小厚は、次の規定によるものとする。なお、・・・・・・。
- 1) 車道部分の床版の全厚は、いかなる部分も 160mm を下まわらないものとする。
- 3) 床版の方向のみにプレストレスを導入する場合の車道部分の最小全厚は 1) 及び 2) の規定によるほか、表-7.3.2 の値とするものとする。

表-7.3.2 床版の1方向のみにプレストレスを導入する場合の車道部分の最小全厚

床版の支間の方向 プレストレスを導入する方向	車両進行方向に直角	車両進行方向に平行
床版の支間に方向に平行	表-7.3.1 の床版の支間の方向が車両進行方向に直角な場合の値の 90%	表-7.3.1 の床版の支間の方向が車両進行方向に平行な場合の値の 65%
床版の支間に方向に直角	表-7.3.1 の床版の支間の方向が車両進行方向に直角な場合の値	表-7.3.1 の床版の支間の方向が車両進行方向に平行な場合の値

(1) プレストレストコンクリート床版の最小厚さの決定に当たっては、鉄筋コンクリート床版と同様、実際の挙動を反映出来る輪荷重走行試験及び解析により安全性を確認することが望ましい。しかし、プレストレスコンクリート床版は一般的に鉄筋コンクリート床版に比べて疲労耐久性を有するため、疲労耐久性のみに着目すると、最小全厚をかなり小さくすることが可能と判断するおそれがある。

[道路橋示方書Ⅲ 7.4.1 一般]

- (1) 床版の設計曲げモーメントは、支持形式、床版支間方向と車両進行方向、鋼材の配置方向及び床版の形式を考慮して算出するものとする。
- (2) 辺長比が 1 : 2 以上の床版で 7.4.2 及び 7.4.3 の規定による場合は、(1)を満足するとみなしてよい。
- (2) 従来の2方向性版といわれていた辺長比 1:2 未満の床版についてはその実例が少ないとから、適用の範囲を辺長比 1:2 以上のいわゆる1方向版について規定した。

■ 技術的課題

リブによって支持された床版構造は、支持条件が道路橋示方書の前提条件と異なるため、リブと床版、リブとウエブとの接合部の荷重伝達機構を確保するための補強方法、鉛直曲げ剛性が確保できる床版の最小全厚の設定方法、および活荷重によるたわみ量の確認が課題となる。

■ 性能評価の対応策

1-2-1) による適切な最小全厚を設定することにより、従来 PC 床版と同様の鉛直曲げ剛性を確保できる。また、① 接合部の荷重伝達機能、② 鉛直曲げ剛性の確保、③ 活荷重によるたわみ 等の検証を行うことにより、使用目的との適合性は確保できるものと考えられる。

【解説】

床版が直接支持する活荷重等の影響に対する安全性は、床版の基本的な性能であり、これを満足する他、とくに大型の自動車の繰り返し通行に対して耐久性を損なわないようにするものとした。**道路橋示方書Ⅲ 7.2** では、プレストレスコンクリート床版及び設計基準強度が $24N/mm^2$ 以上のコンクリートを用いた鉄筋コンクリート床版で、**道路橋示方書Ⅲ 7.3** に規定する床版の厚さを満足し、**道路橋示方書Ⅲ 7.4** による設計曲げモーメントにより床版を設計する場合は、活荷重によるせん断破壊に対して十分安全であるとしている。

これらみなしありに準じて設計された床版の中でも PC 床版については、実橋においても著しい損傷の報告はこれまでに無く、また、輪荷重走行試験においても高い耐久性が確認されている。

また、以下の性能評価の対応策を検証することにより、使用目的との適合性は確保できるものと考えられる。

① 接合部の荷重伝達機能

床版とリブ、床版とウエブ、そしてリブとウエブの接合部の応力度は、1-1-1)に示す FEM 解析による手法を用いれば、直接その応力度を確認できる。リブから伝達される断面力によりウエブ等への応力度の影響も考えられるが、ウエブ厚さの見直しや補強リブの設置により対処することによって荷重伝達機能が確保出来る。

② 鉛直曲げ剛性の確保

1-2-1)により、適切な最小全厚を設定することにより、従来 PC 床版と同様の鉛直曲げ剛性を確保できる。また、リブ部材のひび割れによって床版全体の鉛直曲げ剛性が低下することも考えられるため、解析によりリブの応力度を制御し、有害なひび割れが発生しないことを確認する必要がある。

③ 活荷重によるたわみ

1-1-1)に示す FEM 解析を用いて、活荷重によるたわみを確認する。(床版支間が大きくなつてもリブで支えられたコンクリート床版は剛性が大きく、活荷重によるたわみは問題にならない程度まで小さくなると考えられる。

[検証事例-2(広幅員一室箱桁)]

2) リブ部材について

2-1) 道路橋示方書における設計曲げモーメント算出式を適用出来ないことに対する課題

2-1-1) リブの構造・形状選定

■ 関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書III 6.3 構造及び部材寸法]

- (1) ウエブ、横げた及び隔壁の厚さは、鉄筋、PC鋼材（シースを含む）及びPC鋼材の定着具が無理なく配置でき、所定のかぶりが十分にとれるものとする。また、コンクリートの打込みが困難とならないようにするものとする。
- (2) 部材の接合部等応力が集中しやすい部位は、応力の伝達が円滑に行われる形状とするものとする。
- (3) (4) 及び(5)による場合は(1)を、(6)及び(7)による場合は(2)を満足するとみなしてよい。
- (4) ウエブの厚さは表-6.3.1の値以上とする。

表-6.3.1 ウエブの最小厚さ (mm)

けたの種類	ウエブ最小厚さ
場所打ち鉄筋コンクリートげた	250
場所打ちプレストレストコンクリートげた	140
プレキャストげた	130

- (5) 横げた及び隔壁の最小厚さは200mmとするものとする。
 - (6) ウエブ及びフランジの厚さを変化させる場合には、1/5よりゆるい傾斜とすることが望ましい。
 - (7) 部材の部材等の応力等が集中しやすい部位には、ハンチを設けるものとする。
- (7) ラーメン部材の接合部や、検査、配管のための開口部等の応力集中を引き起こすと予想される箇所には、ハンチ部を設けることを原則とする。
- また、箱げた等で、ウエブとフランジの厚さが大きく異なるような場合は、その接合部付近に、温度変化、乾燥収縮、クリープ等により、ひび割れが発生する所以があるので、相互に接合する部材の厚さが著しく不均等にならないように、部材間の厚さのつり合いについても注意する必要がある。

[道路橋示方書III 7.5 構造細目]

[道路橋示方書III 7.5.1 床版と支持げたの結合]

- (1) 床版と支持げたとの結合部は、応力が円滑に伝わるような構造とするものとする。
- (2) (3)から(5)による場合は、(1)を満足するとみなしてよい。
- (3) 床版には、支持げた上でハンチを設けるものとする。
- (4) 床版のハンチの傾斜は、1:3よりゆるやかにするのが望ましい。1:3よりきつい場合は、図-7.5.1に示すように1:3までの厚さを床版として有効な断面とみなすものとする。

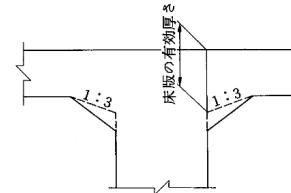


図-7.5.1 ハンチ部の床版の有効高さ

- (5) ハンチには、その内側に沿って鉄筋を配置することを原則とするものとする。ハンチに沿う鉄筋の直径は13mm以上とする。（図-6.6.6参照）

(3) 床版のハンチは、床版と支持げたに応力をなめらかに伝えるために設けるものである。

■ 技術的課題

リブは梁部材として床版を支持し、床版と共に荷重を支える構造のため、リブの配置間隔、そして配置形状・剛性の違いによって床版に発生する断面力が大きく異なると考えられる。また、床版支間方向にリブ直上とリブ間の床版応力度に違いも生じてくる。よって、その配置形状をどのように選定していくのかが課題となる。

■ 性能評価の対応策

リブは梁部材として床版を支持し、床版と共に荷重を支持する構造であり、そのリブの配置間隔、配置形状・剛性の違いによって、床版の断面力が大きく異なる。リブの配置間隔およびリブの形状寸法（部材幅、部材高さ）を適切に設定する必要がある。

【解説】

リブの配置間隔およびリブの形状寸法（部材幅、部材高さ）を設定する際の検討項目として、以下が考えられる。

- ・床版に発生する応力度を 1-2-2)、1-2-3)に示す程度に抑える。
- ・リブ直上とリブ間の床版応力度に大きな差が生じないよう、同等程度に抑える。
- ・リブ自体にも有害なひび割れが発生しないように所定の応力度に抑えるか、鉄筋により補強する。
- ・リブからウエブ等に伝達される応力度を有害なひび割れが発生しないように所定の応力度に抑える。

また、リブ付き床版は、床版に作用する荷重がリブを介してウエブにも伝達されるためウエブにも大きな断面力が伝達されることから、図-1.2.3.4 のような支持構造が考えられる。²⁻¹⁻¹⁾

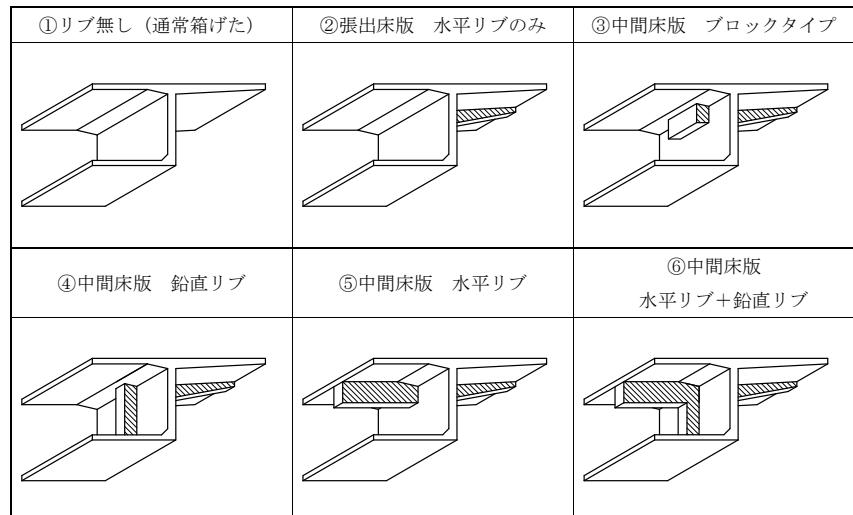


図-1.2.3.4 リブ支持構造の事例

実際に施工された橋梁として、図-1.2.3.5 に示すように床版支間内の補強リブや、ウエブ内側に補強リブを設置した事例がある。^{2-1-1)、2-1-2)、2-1-3)、2-1-4)}

古川高架橋	大平高架橋
<ul style="list-style-type: none"> ・張出床版：リブ付き床版 ・中間床版：水平リブ+鉛直リブ ・リブピッチ：ctc2600 ・リブ厚：B=350 ・プレキャストセグメント工法 	<ul style="list-style-type: none"> ・張出床版：リブ付き床版 ・中間床版：水平リブ（等高） ・リブピッチ：ctc4000 ・リブ厚：B=300 ・押し出し架設
瀬戸川橋	花倉高架橋
<ul style="list-style-type: none"> ・張出床版：リブ付き床版 ・中間床版：ブロックタイプ ・リブピッチ：ctc3000 ・リブ厚：B=300、ブロック：600x800x1700 ・片持ち架設+固定支保工架設 	<ul style="list-style-type: none"> ・張出床版：リブ付き床版 ・中間床版：水平リブ（等高） ・リブピッチ：ctc3250 ・リブ厚：B=500 ・片持ち架設、2室箱桁橋

図-1.2.3.5 実橋におけるリブ構造の事例

【検証事例-2】

【参考文献】

- 2-1-1) 岩立、藤島、横山、中山：第二東名高速道路 大平高架橋～リブ付き床版の設計～、プレストレストコンクリート技術協会第10回シンポジウム論文集(2000年10月)
- 2-1-2) 黒岩、後藤、多田、梅田：瀬戸川橋の設計・施工について、プレストレストコンクリート技術協会第10回シンポジウム論文集(2000年10月)
- 2-1-3) 池田、太田、室田、春日：古川高架橋（工場製プレキャスト）の設計、プレストレストコンクリート技術協会第10回シンポジウム論文集(2000年10月)
- 2-1-4) 中塚、青木、千国、油野：リブ付き床版構造を採用した PC 箱桁橋の設計 -第二東名高速道路花倉高架橋（下り）、プレストレストコンクリート技術協会第15回シンポジウム論文集(2006年10月)

2-2) 床版の支持条件が従来と異なることに対する課題

2-2-1) リブの設計断面力の算出方法

■ 関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書III 10.3 構造解析]

(4) 横方向の設計

- 1) 下フランジ及びウエブの断面力は、箱げたをウエブ及び上下フランジにより構成されるラーメン構造とみなして算出してよい。
- 2) 傾斜ウエブ及び補強リブを有する箱げた橋における下フランジ及びウエブの断面力は、ウエブの傾斜及び補強リブの影響を考慮して求めてよい。

(4) 1) 下フランジ及びウエブの断面力は、図-解 10.3.3 に示すように、橋軸方向に 1m の奥行きを有する箱形ラーメン構造にモデル化して算出しても、実用上十分な精度の解が得られるので、一般にこの方法によって求めてよいとした。

この場合、活荷重による曲げモーメントは、上フランジについては、表-7.4.1 により求めるものとする。また、ウエブ及び下フランジについては、・・・・最も不利となる組合せを考慮するものとする。また、上フランジにプレストレスを導入する場合は、プレストレス力による不静定力の影響を考慮するものとする。

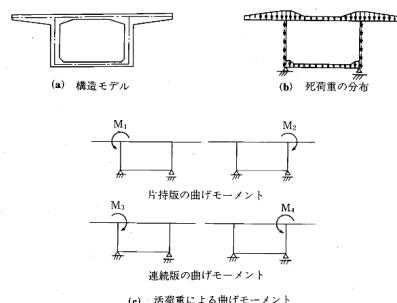


図-解 10.3.3 下フランジ及びウエブの曲げモーメント

■ 技術的課題

リブの配置間隔、配置形状・剛性の違いによって、床版及びリブに生じる断面力が大きく異なる。さらにウエブや下床版もリブからの断面力の影響を受けることから、単純な箱桁ラーメン構造と見なすことが出来ない。よって、リブに生じる断面力も床版同様にその算出方法が設計上の課題となる。

■ 性能評価の対応策

リブの配置・形状が異なっても、リブを適切に再現できるモデルを設定し、荷重条件を同一にして理論値を算出すれば、床版部材と同様にリブ部材に発生する断面力を直接確認することが出来る。

【解説】

リブ配置、リブ形状、床版の支持条件、そして各部材との結合条件を適切に再現できるモデルとして、図-1.2.3.6 に示すような 3 次元 FEM 解析が考えられる。

3 次元 FEM 解析は、実構造を忠実に再現できるモデルである反面、モデル化によって結果が異なることがある、十分留意する必要がある。

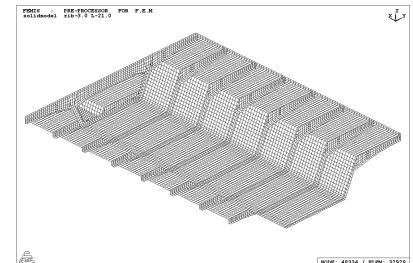


図-1.2.3.6 3 次元 FEM 解析モデルの例

【検証事例-1】

2-2-2) リブに発生する応力度の制限

■ 関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書Ⅲ 3.2 コンクリートの許容応力度]

(2) プレストレストコンクリート構造に対するコンクリートの許容引張応力度は、表-3.2.3 の値とする。

また、従荷重及び從荷重に相当する特殊荷重を・・・適切に定めなければならない。

表-3.2.3 プレストレストコンクリート構造に対する許容引張応力度 (N/mm²)

コンクリートの設計基準強度		30	40	50	60
応力度の種類					
曲げ引張応力度	1) プレストレッシング直後	1.2	1.5	1.8	2.0
	2) 活荷重及び衝撃以外の主荷重	0	0	0	0
	主荷重及び主荷重に相当する特殊荷重	0	0	0	0
	3) 床版	0	0	0	0
	4) プレキャストセグメント橋におけるセグメントの継ぎ目	0	0	0	0
	5) その他の場合	1.2	1.5	1.8	2.0
6) 軸引張応力度		0	0	0	0

[道路橋示方書Ⅲ 3.3 鉄筋の許容応力度]

鉄筋コンクリート構造及びプレストレストコンクリート構造に対する鉄筋の許容応力度は、直径32mm以下の鉄筋に対して表-3.3.1の値となる。

表-3.3.1 鉄筋の許容応力度 (N/mm²)

鉄筋の種類		SR235	SD295A SD295B	SD345
応力度、部材の種類				
引張応力度	1) 活荷重及び衝撃以外の主荷重	80	100	100
	2) 活荷重の組合せに衝突荷重又は地震の影響を考慮しない場合の許容応力度の基本値	一般部材	140	180
	床版及び支間長10m以下の床版橋		140	140
	3) 荷重の組合せに衝突荷重又は地震の影響を考慮する場合の許容応力度の基本値		140	180
	4) 鉄筋の重ね継ぎ手長又は定着長を算出する場合の鉄筋応力度の基本値		140	180
	5) 圧縮応力度		140	180

[道路橋示方書Ⅲ 4.1 総則]

(1) 部材の照査は、(2)の規定にしたがって断面力を算出し、4.2から4.6の規定にしたがって行うものとする。

(1) 従来、荷重に対する部材の設計計算は、安全度を確保できる部材断面及び必要鋼材量を算出する規定となっていた。これに対して、本改訂では、部材が荷重に対して所要の性能を有するか否かの照査を行うという規定に定めている。すなわち、曲げモーメント、軸方向力、せん断力、ねじりモーメントといった断面力に対して、設計荷重作用時には2.2(2)に規定する荷重の組合せにより部材断面に生じる鉄筋やコンクリートの応力度が許容応力度以下であることを照査することにより、また、終局荷重作用時には2.2.(3)に規定する荷重組合せにより部材断面に作用する設計断面力が断面耐力以下であることを照査することにより、所要の性能を満足するものとみなせるとしたものである。

ここで、設計荷重作用時の照査は、鉄筋コンクリート構造及びプレストレストコンクリート構造に応じて、表-解4.1.1に示すようにコンクリート応力度、鉄筋応力度等の項目に対して行う。また、終局荷重作用時の照査は、全ての部材の構造区分について、表-解4.1.1に示す項目に対して行う。

表-解4.1.1 コンクリート上部構造の荷重に対する構造部材の主な照査項目

荷重状態及び断面力の種類	鉄筋コンクリート構造	プレストレストコンクリート構造
設計荷重作用時	曲げモーメント又は軸方向力 コンクリート縫応力度 △許容圧縮応力度 軸方向鉄筋応力度 △許容圧縮、引張応力度	コンクリート縫応力度 △許容圧縮、引張応力度 P C 鋼材応力度 △許容引張応力度 (軸方向鉄筋応力度 △許容引張応力度)
	せん断力又はねじりモーメント 斜引張鉄筋応力度 △許容引張応力度 (コンクリートせん断応力度 △負担せん断応力度)	コンクリート斜引張応力度 △許容斜引張応力度
終局荷重作用時	曲げモーメント又は軸方向力 設計断面力△断面耐力 (破壊抵抗曲げモーメント)	設計断面力△断面耐力 (破壊抵抗曲げモーメント)
	せん断力又はねじりモーメント 設計断面力△断面耐力 (ウェブコンクリートの圧壊に対する断面耐力) 設計断面力△斜引張破壊に対する断面耐力	設計断面力△斜引張破壊に対する断面耐力

[道路橋示方書Ⅲ 7.2 設計一般]

- 1) 床版の設計においては、直接支持する活荷重等の影響に対して安全なようにするほか、以下の1)及び2)の規定を満足するものとする。
 - 2) 活荷重等に対して、疲労耐久性を損なう有害な変形を生じないようにするものとする。
 - 2) 自動車等の繰返し通行に対して、疲労耐久性が損なわれないようにするものとする。
- 2) 7.3から7.5によるプレストレストコンクリート床版及び設計基準強度24N/mm²以上のコンクリートを用いた鉄筋コンクリート床版は、(1)を満足するとみなしてよい。

■ 技術的課題

道路橋示方書でも「梁部材」と「床版部材」ではその許容値の設定が異なるように、リブに発生するコンクリート応力度をどの部材の制限値に準じ、どの程度に制御するのかが課題となる。

リブの構造種別	リブに発生する応力度の課題
R C 構造	鉄筋引張応力はどの部材の制限値に準じるのか 鉄筋量等の構造細目もどの部材の制限値に準じるのか
P C 構造	引張応力度をどの部材の制限値に準じるのか。

そして、曲げに対する検討だけでなく、せん断に対する補強方法も道路橋示方書の梁部材としての設計手法に準じても問題ないか課題となる。

■ 性能評価の対応策

リブは、床版を支える梁部材と考えられるため、道路橋示方書に示す梁部材の曲げ応力度の許容値以内に抑えられればよいと考えられる。また、せん断力に対する補強方法も道路橋示方書に示す梁部材として適切に取り扱うことで、性能が確保されると考えられる。

【解説】

道路橋示方書の関連する記述として、以下の内容を準用する方法も考えられる。

〔道路橋示方書Ⅲ 3.2 (2) プレストレストコンクリートの許容引張応力度〕に関して

道路橋示方書におけるPC床版の許容応力度はフルプレストレスであり、床版がひび割れにより損傷するのを防ぐためにプレストレスの方向に引張応力を生じさせないこととしている。そのため、リブをPC床版部材として取り扱う場合の許容応力引張度は1-2-2)に準じることとなるが、PC梁として考えた場合、その他部材と考えられることからコンクリートの許容引張応力度は、道路橋示方書Ⅲ表-3.2.3に示す値となる。

〔道路橋示方書Ⅲ 3.3 鉄筋の許容引張応力度〕では

リブをRC構造とした場合の筋の許容曲げ引張応力度は、道路橋示方書Ⅲ表-3.3.1準じる。この時一般部材の $\sigma_{sa}=180N/mm^2$ に準じるか、それとも床版の一部と考え $\sigma_{sa}=140N/mm^2$ の許容応力度に対し $20N/mm^2$ 程度余裕を持たせるのが望ましいか選定する必要がある。

〔道路橋示方書Ⅲ 7.2 設計一般〕では

道路橋示方書での通常PC床版では、7.3に規定する床版の厚さを満足し、7.4の規定による設計曲げモーメントにより床版を設計する場合は、せん断力に対する照査を省略できるとしている。

これらの内容を理解した上で、適切な許容値の設定を行う必要がある。

2-2-3) リブの疲労耐久性

■ 関連する道路橋示方書の規定

〔道路橋示方書Ⅲ 4.2.1 一般〕

- (1) 曲げモーメント又は軸方向力が作用する部材の設計荷重作用時の照査は、4.2.3の規定により行うものとする。
- (2) 曲げモーメント又は軸方向力が作用する部材の終局荷重作用時の照査は、4.2.4の規定により行うものとする。

〔道路橋示方書Ⅲ 4.3.1 一般〕

- (1) せん断力が作用する部材の設計荷重作用時の照査は、4.3.3の規定により行うものとする。
- (2) せん断力が作用する部材の終局荷重作用時の照査は、4.3.4の規定により行うものとする。

〔道路橋示方書Ⅲ 6.3 構造及び部材寸法〕

- (1) ウエブ、横げた及び隔壁の厚さは、鉄筋、P C鋼材（シースを含む）及びP C鋼材の定着具が無理なく配置でき、所定のかぶりが十分にとれるものとする。また、コンクリートの打込みが困難とならないようにするものとする。
- (2) 部材の接合部等応力が集中しやすい部位は、応力の伝達が円滑に行われる形状とするものとする。

〔道路橋示方書Ⅲ 6.4 最小鋼材量〕

- (1) 部材には、所要のじん性を確保する鋼材を配置するものとする。
- (2) 部材には、乾燥収縮や温度勾配等により、有害なひび割れが発生しないように鋼材を配置するものとする。
- (3) 各部材の鋼材は、4章の規定に基づき設計計算上必要とされる鋼材を配置する。

〔道路橋示方書Ⅲ 6.5 プレストレストコンクリート構造の引張鉄筋〕

- (1) プレストレストコンクリート構造では、計算上想定しないひび割れが生じた場合でも、その幅の拡大や集中を防ぐとともに、所要のじん性を確保するものとする。

[道路橋示方書Ⅲ 7.2 設計一般]

- (1) 床版の設計においては、直接支持する活荷重等の影響に対して安全なようにするほか、以下の1)及び2)の規定を満足するものとする。
 - 3) 活荷重等に対して、疲労耐久性を損なう有害な変形を生じないようにするものとする。
 - 4) 自動車等の繰返し通行に対して、疲労耐久性が損なわれないようにするものとする。
- (2) 7.3から7.5によるプレストレストコンクリート床版及び設計基準強度 $24N/mm^2$ 以上のコンクリートを用いた鉄筋コンクリート床版は、(1)を満足するとみなしてよい。

■ 技術的課題

リブ付き床版は、リブによって床版を直接支持する部材であることや、将来の取り替えが困難であることから、耐久性に十分配慮する必要がある。また、床版を支える部材であることが前提条件であるため、床版に先行して破壊することを避けるべき部材と考えられる。そのため、十分な疲労耐久性を有しているかの検証方法が課題となる。

■ 性能評価の対応策

リブ付き床版は、リブによって床版を支える部材であることが設計の前提条件であることから、床版より先にリブが先行して破壊しない構造が必要となる。リブに発生する応力度を床版応力度程度に抑えることによって、リブ付き床版の疲労耐久性は確保出来るものと考えられる。

【解説】

リブは、配置間隔とリブ形状を適切に設定し、求められた断面力より、部材の応力度を道路橋示方書に示す許容値内に抑え、有害なひび割れを発生させないようにすれば、道路橋示方書のみなし仕様により設計された床版および梁部材と同等レベルと考えられる。

道路橋示方書の関連する記述として、以下の内容を準用する方法も考えられる。

① 床版部材の一部と考えた場合 [道路橋示方書Ⅲ 7.2 設計一般]

コンクリート床版の破壊メカニズムは複雑であり設計計算による疲労耐久性の照査は困難であるため、**道路橋示方書Ⅲ 7.2 (2)** のみなし仕様に準じた床版の設計に準じることにより、疲労耐久性を担保していると考えることができる。

② 床版を支える梁部材として考えた場合 [道路橋示方書Ⅲ 4.2、4.3]

床版を支える梁部材としての記述は特に定められていないため、**[道路橋示方書Ⅲ 4.2、4.3]** に従って部材の照査を行い、構造細目 **[道路橋示方書Ⅲ 6.3~6.6]** に示す規定に従うことでの梁部材としての疲労耐久性を担保すると考えることができる。

3) リブと床版の接合部について

- 3-1) 床版の支持条件が従来と異なることに対する課題
 - 3-1-1) リブ接合部の構造

■ 関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書Ⅲ 7.5 構造細目]

[道路橋示方書Ⅲ 7.5.1 床版と支持げたの結合]

- (1) 床版と支持げたとの結合部は、応力が円滑に伝わるような構造とするものとする。
- (2) (3)から(5)による場合は、(1)を満足するとみなしてよい。
- (3) 床版には、支持げた上でハンチを設けるものとする。
- (4) 床版のハンチの傾斜は、1:3よりゆるやかにするのが望ましい。1:3よりきつい場合は、図-7.5.1に示すように1:3までの厚さを床版として有効な断面とみなすものとする。

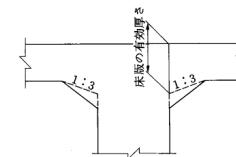


図-7.5.1 ハンチ部の床版の有効高さ

- (5) ハンチには、その内側に沿って鉄筋を配置することを原則とするものとする。ハンチに沿う鉄筋の直径は13mm以上とする。(図-6.6.6 参照)

[道路橋示方書Ⅲ 11.3 けたと床版の結合]

- (1) けたと床版間のずれ止めは、結合面に生じるせん断力に対して安全となるようにするものとする。
- (2) (3)から(8)による場合は、(1)を満足するとみなしてよい。
- (5) けたと床版の結合面におけるせん断応力度は、式(11.3.2)により算出するものとする。なお、けたと床版の温度差の影響によるせん断応力度は、必要に応じて考慮するものとする。

$$\tau b = S \cdot Q / b \cdot I \quad \dots \text{式}(11.3.2)$$

- (6) ずれ止め鉄筋の直径は、13mm以上とするものとする。
- (7) ずれ止め鉄筋の中心間隔は100mm以上、かつ500mm以下とするものとする。
- (8) ずれ止め鉄筋の鉄筋量は、けたと床版の結合面の面積の0.2%以上とするものとする。なお、プレキャストしたのスターラップやフランジの鉄筋等をずれ止めとみなしてもよい。

■ 技術的課題

リブは、床版を支える梁部材であり、リブ接合部は床版との一体化が図れる構造である必要がある。よって、リブ接合部は「梁とスラブ」との接合部位と考え、道路橋示方書に規定されたその構造細目に準じても問題ないか課題となる。

■ 性能評価の対応策

接合部には局部的な応力を発生させないように、その接合構造に配慮した設計が必要である。

【解説】

リブ接合部は、「リブと床版」、「リブとウエブ」に分けられる。

リブと床版の接合部は、基本的には「梁とスラブ」の接合となるため、**道路橋示方書Ⅲ 7.5.1** 及び **道路橋示方書Ⅲ 11.3** に示す接合部の規定に準用することと、**道路橋示方書Ⅲ 6.3~6.6** に示す構造細目の規定の準用することによって、一体化していると見なしてもよいと考えられる。

また、リブとウエブの接合部は、張出床版リブからの力の伝達によって、ウエブにその断面力が伝達し、ウエブ内側に局部的な大きな引張応力度が作用する可能性があるため、「リブと床版」の接合と同様に、その接合構造に配慮した設計が必要である。床版支間内の補強リブや、ウエブ内側に補強リブを設置した事例（2-1-1）参照）もあるため、それらを参考にするとよい。

【検証事例-2】

3-1-2) リブ接合部の応力度

■ 関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書Ⅲ 3.3 鉄筋の許容応力度]

鉄筋コンクリート構造及びプレストレストコンクリート構造に対する鉄筋の許容応力度は、直径 32mm 以下の鉄筋に対して表-3.3.1 の値となる。

表-3.3.1 鉄筋の許容応力度 (N/mm²)

応力度、部材の種類		鉄筋の種類	SR235	SD295A SD295B	SD345
引張応力度	1) 活荷重及ぶ衝撃以外の主荷重		80	100	100
	2) 活荷重の組合せに衝突荷重又は地震の影響を考慮しない場合の許容応力度の基本値	一般部材	140	180	180
	3) 荷重の組合せに衝突荷重又は地震の影響を考慮する場合の許容応力度の基本値	床版及び支間長10m以下の床版橋	140	140	140
	4) 鉄筋の重ね継ぎ手長又は定着長を算出する場合の鉄筋応力度の基本値		140	180	200
	5) 圧縮応力度		140	180	200

[道路橋示方書Ⅲ 7.5 構造細目]

[道路橋示方書Ⅲ 7.5.1 床版と支持げたの結合]

- (1) 床版と支持げたとの結合部は、応力が円滑に伝わるような構造とするものとする。
- (2) (3)から(5)による場合は、(1)を満足するとみなしてよい。
- (3) 床版には、支持げた上でハンチを設けるものとする。
- (4) 床版のハンチの傾斜は、1:3 よりゆるやかにするのが望ましい。1:3 よりきつい場合は、図-7.5.1 に示すように 1:3 までの厚さを床版として有効な断面とみなすものとする。

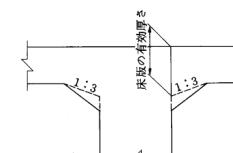


図-7.5.1 ハンチ部の床版の有効高さ

- (5) ハンチには、その内側に沿って鉄筋を配置することを原則とするものとする。ハンチに沿う鉄筋の直径は 13mm 以上とする。（図-6.6.6 参照）

■ 技術的課題

リブと床版、そしてリブとウエブ部における接合部では、リブからの伝達される断面力によって局部的な引張応力度が発生する恐れがある。しかしながら、発生応力度の算出方法や補強方法が不明確であり、課題となる。

■ 性能評価の対応策

リブと床版、そして特にリブとウエブ部における接合部では、局部的な引張応力度が発生する恐れがある。従って、FEM解析によってコンクリートに有害なひび割れが発生しない応力度に抑え、ひび割れを制御する鉄筋を配置する事によって、道路橋示方書で要求している接合部の耐久性を確保できるものと考えられる。

【解説】

リブと床版の接合部は、局部的な引張応力度が発生しないように、**道路橋示方書Ⅲ 7.5.1 床版と支持げたの結合**を参照すると共に、**道路橋示方書Ⅲ 6.3～6.6**に示す構造細目の規定の準用する。

そして、リブの結合に発生する鉄筋応力度の制限値は、以下の内容を準用する方法も考えられる。

[道路橋示方書Ⅲ 3.3 表-3.3.1]

リブ接合部は通常 RC 構造となるため、鉄筋応力度を**道路橋示方書Ⅲ 表-3.3.1**に示す許容応力度以内に抑える。この時、リブ接合部の鉄筋引張応力度は、**道路橋示方書Ⅲ 表-3.3.1**に示す一般部材の $\sigma_{sa}=180N/mm^2$ に準じるか、それとも床版の一部と考え $\sigma_{sa}=140N/mm^2$ の許容応力度に対し $20N/mm^2$ 程度余裕を持たせるか選定する必要がある。

[検証事例-2]

3-1-3) リブ接合部の疲労耐久性

■ 関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書Ⅲ 6.3 構造及び部材寸法】

- (3) ウエブ、横けた及び隔壁の厚さは、鉄筋、PC 鋼材（シースを含む）及び PC 鋼材の定着具が無理なく配置でき、所定のかぶりが十分に与れるものとする。また、コンクリートの打込みが困難とならないようとするものとする。
- (4) 部材の接合部等応力が集中しやすい部位は、応力の伝達が円滑に行われる形状とするものとする。

【道路橋示方書Ⅲ 6.4 最小鋼材量】

- (4) 部材には、所要のじん性を確保する鋼材を配置するものとする。
- (5) 部材には、乾燥収縮や温度勾配等により、有害なひび割れが発生しないように鋼材を配置するものとする。
- (6) 各部材の鋼材は、4章の規定に基づき設計計算上必要とされる鋼材を配置する。

【道路橋示方書Ⅲ 7.2 設計一般】

- (1) 床版の設計においては、直接支持する活荷重等の影響に対して安全なようにするほか、以下の 1)、2) の規定を満足するものとする。
 - 5) 荷重等に対して、疲労耐久性を損なう有害な変形を生じないようにするものとする。
 - 6) 自動車等の繰返し通行に対して、疲労耐久性が損なわれないようにする。
- (2) 7.3 から 7.5 によるプレストレストコンクリート床版及び設計基準強度 $24N/mm^2$ 以上のコンクリートを用いた鉄筋コンクリート床版は、(1)を満足するとみなしてよい。

【道路橋示方書Ⅲ 11.3 けたと床版の結合】

- (1) けたと床版間のずれ止めは、結合面に生じるせん断力に対して安全となるようにするものとする。
- (2) (3)から(8)による場合は、(1)を満足するとみなしてよい。
- (5) けたと床版の結合面におけるせん断応力度は、式(11.3.2)により算出するものとする。なお、けたと床版の温度差の影響によるせん断応力度は、必要に応じて考慮するものとする。

$$\tau b = S \cdot Q / b \cdot I \quad \cdots \text{式}(11.3.2)$$
- (6) ずれ止め鉄筋の直径は、13mm 以上とするものとする。
- (7) ずれ止め鉄筋の中心間隔は 100mm 以上、かつ 500mm 以下とするものとする。
- (8) ずれ止め鉄筋の鉄筋量は、けたと床版の結合面の面積の 0.2% 以上とするものとする。なお、プレキャストげたのスターラップやフランジの鉄筋等をずれ止めとみなしてもよい。

■ 技術的課題

リブ接合部は、リブにより床版を直接支持する部材であるため、耐久性に十分配慮する必要がある。どのような検証によって、十分な疲労耐久性を有していると言えるのかが課題となる。

■ 性能評価の対応策

床版を支えるリブ接合部に発生する鉄筋の引張応力度は、床版部材と同等な考え方をすることで疲労耐久性を確保出来ると考えられる。

【解説】

リブ接合部は、リブにより床版を支持する接合部材であるため、耐久性に十分配慮する必要がある。道路橋示方書では、直接、輪荷重の影響を受ける床版の応力度を、通常の部材とは異なる許容値に制限することで、疲労耐久性を確保している。同じように考えれば、床版を支えるリブ自体の許容値も床版に準じた値で抑えることで疲労耐久性を確保出来ると考えられる。

道路橋示方書の関連する記述として、以下の内容を準用する方法も考えられる。

【道路橋示方書Ⅲ3.3】

リブ接合部の鉄筋の許容引張応力度を床版鉄筋の許容応力度に制御する。

【道路橋示方書Ⅲ6.3～6.6、11.3】

道路橋示方書Ⅲ 6.3～6.6 に示す構造細目の規定に従うこと、また、道路橋示方書Ⅲ 11.3 に示すけたと床版の結合の規定に従う。

4) その他の構造

4-1) リブを配置することで生じる主桁の構成部材としての課題

4-1-1) 主桁の有効幅

■ 関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書Ⅲ 4.2.2 有効断面】

(3) 曲げモーメントに対する圧縮フランジの片側有効幅は、式(4.2.1)により算出するものとする。

1) 主げた（直接支持されたけた）

$$\lambda = L/8 + bs$$

ただし、連続版及び単純版の場合 $\lambda \leq Lb/2$

片持ち版の場合

$$\lambda \leq Lc$$

} 式(4.2.1)

(4) 軸方向力に対する圧縮フランジの片側有効幅は、式(4.2.2)により算出するものとする。

1) 主げた（直接支持されたけた）

連続版及び単純版の場合 $\lambda = Lb/2$

片持ち版の場合 $\lambda = Lc$

} 式(4.2.2)

■ 技術的課題

リブ付き床版構造は、剛性の高いリブが主方向に等間隔で配置されるため、主桁の圧縮フランジ有効幅の考え方へ影響が生じないかが課題として考えられる。

■ 性能評価の対応策

3次元 FEM 解析を用いることで、リブの配置が主桁応力度に及ぼす影響を確認する。

【解説】

リブ付き床版は、剛性の高いリブが主方向に等間隔で配置されているため、

- ① 主桁の有効幅の考え方へ影響が生じないか
- ② 主方向の抵抗断面にリブが寄与しないか

が課題として考えられる。

リブ付き床版とした場合の主桁の有効幅は道路橋示方書では特に定められていないが、リブを配置することによって一般に張出し床版長が長くなることから、通常の PC 箱桁橋と同様に、道路橋示方書Ⅲ 4.2.2 を準用する方法が考えられる。この時、リブの配置間隔、剛性の影響、PC 鋼材定着位置、エッジビームの有無や張出床版長の影響も主桁の有効断面に影響する事が懸念されるため、そのモデル化には留意する必要がある。

4-1-2) プレストレスの伝達

■ 関連する道路橋示方書の規定

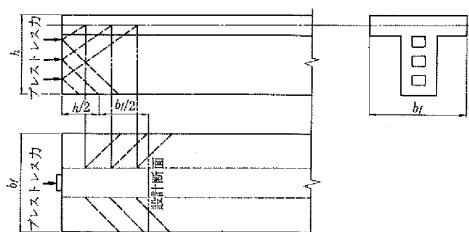
【道路橋示方書Ⅲ 6.6 鋼材の配置】

【道路橋示方書Ⅲ 6.6.7 PC鋼材の定着】

- (1) 定着具の位置は、部材の所定のプレストレスを導入できるように、また、部材に有害なひび割れが生じないように選ぶものとする。
- (2) (3)から(5)による場合は、(1)を満足するものとみなしてよい。
- (3) 部材の中間に定着具を設ける場合は、活荷重による応力変動の大きな点から十分離れた断面の断面図心に近い位置か、圧縮部のコンクリートに定着するのがよい。
- (4) 定着具は、けたのウエブに設けるものとする。ただし、やむを得ず上フランジ、下フランジ又はウエブ側面に沿わせて定着する場合は、6.6.8の規定により補強するものとする。
- (5) 数多くの定着具を同一断面に配置する場合は、定着具の数、引張力の大きさ、各定着具の必要最小間隔等を考慮して、定着部のコンクリートの断面形状及び寸法を定めるものとする。

(1)、(3) 定着部近くの断面では、 $\beta = 33^\circ 40'$ とするのが望ましい。

したがって、図-解 6.6.11 に示すような $\cdots \cdots$ 定着角度等により異なる。一般には、数本あるいはそれ以上の PC 鋼材が定着されることが多く、プレストレス力の広がりは互いに重なり合うほか、定着具の大きさ及びウエブ厚等によって変化する。これらを考慮して、定着位置からプレストレスが有効に作用する断面までの距離は $(h + b_f)/2$ としてよい。(図-解 6.6.12)。



ここに、
 h : けた高 (mm)
 b_f : 上フランジ幅 (mm)

図-解 6.6.12 数本で PC 鋼材が定着される場合の設計断面

■ 技術的課題

リブを配置することで主方向のプレストレス力が断面方向に分散する可能性も考えられ、その伝達の影響についても確認する必要がある。

■ 性能評価の対応策

広幅員を有する主桁形状であっても 3 次元 FEM モデルを使用し、プレストレスの影響範囲を解析することによって、プレストレス伝達効果を検証する。

【解説】

リブ付き床版とした場合、リブを配置することによって一般に張出し床版長が長くなるが、プレストレスが主桁へ影響する有効範囲は、通常の PC 箱桁橋と同様に道路橋示方書Ⅲ 6.6.7 を準用する方法が考えられる。

また、3 次元 FEM 解析を実施することによって、リブ設置によるプレストレスの主方向への影響も直接確認することもできる。

【検証事例-4】

4-1-3) 床版横締め PC 鋼材のプレストレス力

■ 関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書 I 2.2.4 プレストレス】

- (1) 構造物にプレストレスを導入する場合には、これを適切に考慮するものとする。
- (2) プレストレス力は、プレストレッシング直後のプレストレス力及び有効プレストリース力に区分して、それぞれ適切に考慮するものとする。
- (5) プレストレッシング直後のプレストレス力は、PC 鋼材の引張端に与えた引張力に、次の影響を考慮して算出する。
 - 1) コンクリートの弾性変形
 - 2) PC 鋼材とシースとの摩擦
 - 3) 定着具におけるセット
- (6) 有効プレストレス力は、(5)の規定により算出するプレストレッシング直後のプレストレス力に、次の影響を考慮して算出する。
 - 1) コンクリートのクリープ
この場合に考慮する持続荷重は、プレストレッシング直後のプレストレス力及び死荷重とする。
 - 2) コンクリートの乾燥収縮
 - 3) PC 鋼材のリラクセーション

■ 技術的課題

リブを配置することによって床版支間方向の抵抗断面が増えること、床版支間方向の弾性変形がリブに拘束されることが考えられる。よって横締めプレストレスによる床版応力度の算出に留意する必要がある。

■ 性能評価の対応策

リブの設置による床版プレストレスの影響や拘束効果の確認は、4-1-1)、4-1-2) と同様に 3 次元FEMモデルを使用し、床版支間方向にプレストレスを導入しその影響を解析することによって、その関与の度合いを確認出来る。

【解説】

リブ付き床版とした場合、リブがどの程度、床版横締めプレストレスに影響を及ぼすのか、道路橋示方書では特に定められていない。しかし、リブも床版部材断面の一部と考え、通常の箱桁橋と同様に、道路橋示方書 I 2.2.4 に準用してプレストレスを計算する方法が一般的である。

[検証事例-4]

(3) 検証事例

検証事例-1	3 次元 FEM 解析を用いた活荷重による断面力の算出方法		
要求性能	構造の安全性、使用目的との適合性	関連規定	道路橋示方書 III 7.4.2
検証目的	道路橋示方書断面力算出式設定時の支持条件と異なる床版の支持形式であるリブ付き床版において、設計断面力を FEM 解析により算出した検証事例。		
検証方法	実験による検証 · 解析による検証 · 道路橋示方書の準用		
検証方針	3 次元 FEM 解析により断面力を算出。		

(1) 3 次元 FEM 解析モデル

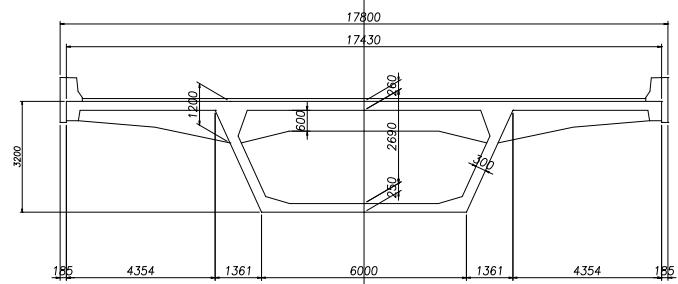


図-1 検討対象主桁断面

検証内容

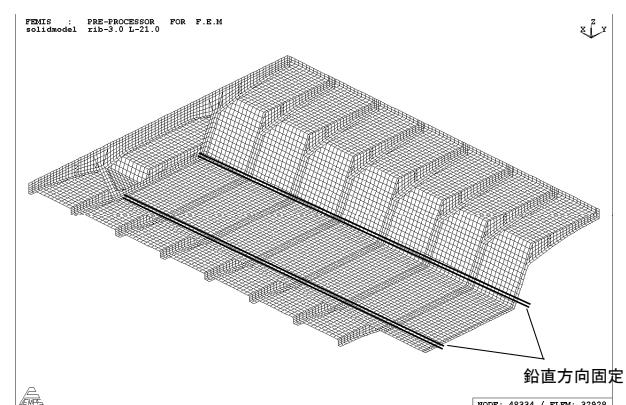
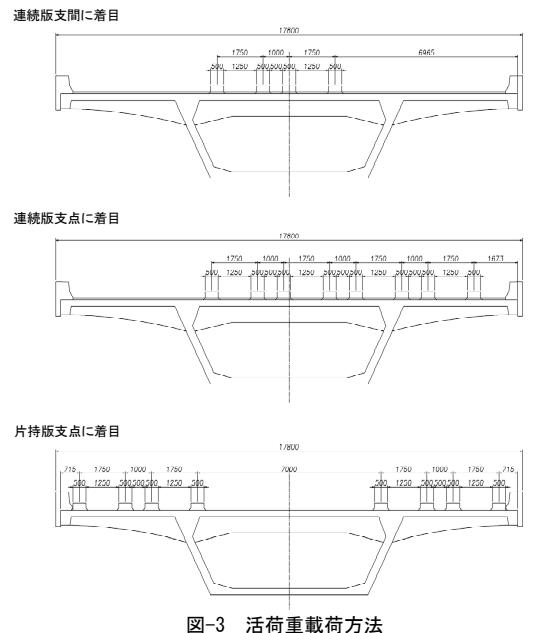


図-2 3 次元 FEM モデル（ソリッドモデル）

(2) 活荷重の載荷方法

- ・各着目断面に対して最も不利になるように T 荷重を載荷させる。
- ・舗装厚内での 45 度分布を考慮した荷重を床版上面に作用させる。
- ・T 荷重をリブ間とリブ直上の断面に載荷するケースをそれぞれ行う。



(3)床版応力度算出結果

表-1 床版応力度算出結果

①連続版支間		②連続版支点		③片持ち版支点	
リブ上	床版	リブ上	床版	リブ上	床版
	N/mm ²				N/mm ²
自重	-0.01	0.08	自重	-0.62	-0.15
橋面	-0.52	0.02	橋面	-0.45	-0.06
床版横縫め	4.73	3.78	床版横縫め	4.43	3.44
活荷重	2.54	-0.29	活荷重	-2.27	-0.47
死荷重時	4.20	3.88	死荷重時	3.36	3.23
設計荷重時	6.74	3.58	設計荷重時	1.09	2.76
リブ間	床版	リブ間	床版	リブ間	床版
	N/mm ²				N/mm ²
自重	0.02	0.25	自重	-0.69	0.19
橋面	-0.53	0.01	橋面	-0.52	-0.13
プレストレス	3.80	3.02	プレストレス	3.60	3.87
床版横縫め	6.33	5.03	床版横縫め	6.00	6.45
活荷重	3.21	-2.28	活荷重	-3.79	3.89
死荷重時	5.82	5.29	死荷重時	4.79	6.51
設計荷重時	9.03	3.01	設計荷重時	1.00	10.40

- ・ 活荷重による応力度は、衝撃の影響および割り増し係数1.2を考慮している。
- ・ 床版応力がフルプレストレスになるように床版横縫め間隔を設定する。

FEM解析は、汎用性のある解析ツールが多く開発され、従来と比べ簡単に扱えるようになってきたものの、モデル化によって結果に差異が生じることもあり、十分留意する必要がある。以下に考えられる留意事項を列挙する。

① モデルの種類

→ シェルモデルとソリッドモデルがあり、より実構造に近いのはソリッドモデルであるが、モデル作成に手間を要する。シェルモデルは、ソリッドモデルに比べモデル作成は容易であるが、部材間の結合条件などに留意が必要となる。

② メッシュ分割

→ メッシュの分割数、大きさなどに結果が左右される。適切で無駄のないメッシュ分割を行う必要がある。

③ モデルの長さ

→ 道路橋示方書算出式のモデルは無限長であるが、FEMモデルは、得られる解に問題の無い範囲で、できるだけ短いモデル長とするのが望ましい。

④ 支持条件

→ PC箱桁をモデル化するため、下端の支持条件によっても得られる値が異なる可能性がある。

⑤ 活荷重載荷方法

→ リブ直上とリブ間では床版断面力が異なるため、着目する位置によって橋軸方向の載荷位置も変化させる必要がある。

注意点

検証事例-2	リブの形状寸法と配置間隔の設定方法		
要求性能	構造の安全性、使用目的との適合性	関連規定	
検証目的	現在の道路橋示方書では、リブ付き床版に関する記述は無く、リブ間隔、リブ形状についての規定は無い。しかしながら、リブは梁部材として床版を支持し、床版とともに荷重を支える構造のため、リブの配置間隔、配置形状および剛性の違いによって、床版に発生する断面力及びリブ直上とリブ間の床版応力度が大きく異なる。 FEM 解析により形状寸法と配置間隔を検証した事例。		
検証方法	実験による検証・解析による検証・道路橋示方書の準用		
検証方針	3次元 FEM 解析を用いて主桁応力へ及ぼす影響を確認。		
参考文献	1) 中塚、青木、千国、油野：リブ付き床版構造を採用したPC箱桁橋の設計 -第二 東名高速道路 花倉高架橋（下り）、プレストレストコンクリート技術協会第15回シンポジウム論文集(2006年10月)		
注意点	<p>3次元立体 FEM 解析では、道路橋示方書式では評価出来ないリブ付き床版の効果を確認出来る。しかし、広幅員一室箱桁とは異なりリブ直上とリブ間では断面力の発生が異なるため、リブに発生する断面力にも着目した活荷重載荷方法を検討する必要がある。</p> <p>また、下記の留意事項も含めながら形状を決定する必要がある。</p> <p>① 施工性 リブ間隔は、床版だけの設計に着目するのではなく、片持架設のブロック割りやコンクリートの打ち込みやすさなど、施工性と関連しながら計画を進める必要がある。</p> <p>② リブ間隔の設定 リブ間隔が小さいと施工性に劣り、床版の合理的設計が出来ない。またリブ間隔が大きすぎるとリブ及び床版に大きな断面力が発生し、橋軸方向にも支配的な断面力が発生する場合もある。従って、床版およびリブに発生する応力度バランスを考慮しながら計画を進める必要がある。</p> <p>③ 中間床版リブ形状の決定 2-1-1)の解説に示す様に、中間床版リブ形状はさまざまな形状が考えられる。過去の事例を参考にするなど、その形状決定には留意する必要がある。</p>		

検証事例-3	リブ本体の設計手法																																																																																	
要求性能	構造の安全性、使用目的との適合性	関連規定																																																																																
検証目的	リブ付き床版におけるリブ本体の断面力を FEM 解析により算出した検証事例。																																																																																	
検証方法	実験による検証・解析による検証・道路橋示方書の準用																																																																																	
検証方針	3次元 FEM 解析を用いた断面力（応力度）よりリブの設計を実施。																																																																																	
	検証事例-1 に示す 3次元 FEM 解析モデルを用いて、リブに発生する応力度を直接検証する。荷重条件等は検証事例-1 の床版の設計事例と同じである。																																																																																	
	表-1 床版応力度計算結果																																																																																	
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="3">検証内容</th> <th colspan="2">①連続版支間</th> <th colspan="2">②連続版支点</th> <th colspan="2">③片持ち版支点</th> </tr> <tr> <th colspan="2">リブ上 N/mm²</th> <th colspan="2">リブ上 N/mm²</th> <th colspan="2">リブ上 N/mm²</th> </tr> <tr> <th>リブ</th> <th>上縁 下縁</th> <th>リブ</th> <th>上縁 下縁</th> <th>リブ</th> <th>上縁 下縁</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>自重</td> <td>0.08</td> <td>0.36</td> <td>自重</td> <td>-0.15</td> <td>0.93</td> <td>自重</td> <td>-0.04</td> <td>1.86</td> </tr> <tr> <td></td> <td>橋面</td> <td>0.02</td> <td>1.21</td> <td>橋面</td> <td>-0.06</td> <td>0.11</td> <td>橋面</td> <td>-0.01</td> <td>2.49</td> </tr> <tr> <td></td> <td>床版横縫め</td> <td>3.78</td> <td>1.63</td> <td>床版横縫め</td> <td>3.44</td> <td>0.24</td> <td>床版横縫め</td> <td>3.41</td> <td>-2.48</td> </tr> <tr> <td></td> <td>活荷重</td> <td>-0.29</td> <td>-4.51</td> <td>活荷重</td> <td>-0.47</td> <td>4.94</td> <td>活荷重</td> <td>-0.07</td> <td>6.44</td> </tr> <tr> <td></td> <td>死荷重時</td> <td>3.88</td> <td>3.20</td> <td>死荷重時</td> <td>3.23</td> <td>1.28</td> <td>死荷重時</td> <td>3.36</td> <td>1.88</td> </tr> <tr> <td></td> <td>設計荷重時</td> <td>3.58</td> <td>-1.31</td> <td>設計荷重時</td> <td>2.76</td> <td>6.22</td> <td>設計荷重時</td> <td>3.30</td> <td>8.32</td> </tr> </tbody> </table>			検証内容	①連続版支間		②連続版支点		③片持ち版支点		リブ上 N/mm ²		リブ上 N/mm ²		リブ上 N/mm ²		リブ	上縁 下縁	リブ	上縁 下縁	リブ	上縁 下縁		自重	0.08	0.36	自重	-0.15	0.93	自重	-0.04	1.86		橋面	0.02	1.21	橋面	-0.06	0.11	橋面	-0.01	2.49		床版横縫め	3.78	1.63	床版横縫め	3.44	0.24	床版横縫め	3.41	-2.48		活荷重	-0.29	-4.51	活荷重	-0.47	4.94	活荷重	-0.07	6.44		死荷重時	3.88	3.20	死荷重時	3.23	1.28	死荷重時	3.36	1.88		設計荷重時	3.58	-1.31	設計荷重時	2.76	6.22	設計荷重時	3.30	8.32
検証内容	①連続版支間		②連続版支点		③片持ち版支点																																																																													
	リブ上 N/mm ²		リブ上 N/mm ²		リブ上 N/mm ²																																																																													
	リブ	上縁 下縁	リブ	上縁 下縁	リブ	上縁 下縁																																																																												
	自重	0.08	0.36	自重	-0.15	0.93	自重	-0.04	1.86																																																																									
	橋面	0.02	1.21	橋面	-0.06	0.11	橋面	-0.01	2.49																																																																									
	床版横縫め	3.78	1.63	床版横縫め	3.44	0.24	床版横縫め	3.41	-2.48																																																																									
	活荷重	-0.29	-4.51	活荷重	-0.47	4.94	活荷重	-0.07	6.44																																																																									
	死荷重時	3.88	3.20	死荷重時	3.23	1.28	死荷重時	3.36	1.88																																																																									
	設計荷重時	3.58	-1.31	設計荷重時	2.76	6.22	設計荷重時	3.30	8.32																																																																									
	<p>上記の例は、リブを PC 構造として引張応力度を許容値以内 ($\sigma_c > -1.5 \text{N/mm}^2$) に抑えた例である。</p>																																																																																	
注意点	<p>本例で示した解析事例はあくまでも一例であり、リブの構造種別 (PC か RC か)、リブに発生する応力度の制限値等を考慮の上、解析を実施する必要がある。</p> <p>※検証事例-1(3次元 FEM 解析を用いた床版の活荷重による断面力の算出方法)の注意点に同じ。</p>																																																																																	

検証事例-4	リブの配置が主桁応力へ及ぼす影響の確認		
要求性能	構造の安全性、使用目的との適合性	関連規定	
検証目的	リブ付き床版構造は、剛性の高いリブが主方向に等間隔で配置される。主桁の設計における抵抗断面の考え方について検証した事例。		
検証方法	実験による検証・解析による検証・道路橋示方書の準用		
検証方針	3次元FEM解析を用いて主桁応力へ及ぼす影響を確認。		
	下記のFEMモデルを用いて、自重およびプレストレスによる応力度と、棒解析による値との比較を行う。		
検証内容	<p>図-1 3次元FEMモデル</p> <p>プレストレスは導入直後応力度を用い節点に集中荷重として載荷</p> <p>CASE1・・・上縁から 500mm CASE2・・・下床版厚中心</p> <p>$\sigma_{pt} = 1035.0 \text{ N/mm}^2$ $AP = 1664.4 \text{ mm}^2 (12S15.2)$ $P = 1722654 \text{ N}$</p> <p>主方向応力度は、自重、プレストレスとも棒解析とほぼ同様の値を示し、リブの配置が主桁応力に及ぼす影響は少ないことが分かった。よって、リブ付き床版箱桁の主方向の設計には、リブを考慮しない断面性能を用いて問題はないものと考えられる。</p>		
注意点	<p>本例で示した解析事例はあくまでも一例であり、PC鋼材定着位置、エッジビームの有無や張出床版長の影響が予想される形状については、適宜設定する必要がある。</p> <p>また、検証事例-1に示した解析モデルとは支承支持条件が異なるため注意が必要となる。</p>		

1.2.4 ストラット付き床版構造

(1) 主な技術概要

1.2.2(1)に示すように、道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編において、コンクリートのけたで支持された床版を適用対象として要求性能が規定されており、そのみなし仕様として、活荷重による床版の設計曲げモーメント算出式が規定されている。この算出式は、長辺比が1:2以上の床版で、連続版の支点部では支持桁と床版が剛結された構造とし、連続版の支点部を除く計算式では等方性無限単純版と等方性無限片持版の支持条件を対象としており、解析により得られた理論値に対し安全率を見込んだみなし仕様で算出されている。しかしながら、ストラット付き床版構造は、図-1.2.4.1に示すように主桁ウェブとストラットにより床版を支持する構造のため、従来構造の床版の支持条件や主たる断面力が発生する方向や支間長が明確でなくなる。

本節で対象とするストラット付き床版構造は、道路橋示方書による床版断面力算出時の前提となる支持条件が異なるものであり、道路橋示方書式をそのまま使用することに疑義が生じる。

ストラット付き床版構造は広幅員となる傾向があるが、広幅員となることによる技術的課題については1.2.2 広幅員一室箱桁に準ずることとする。

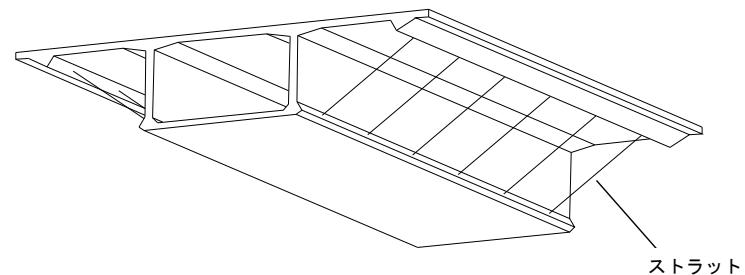


図-1.2.4.1 ストラット付き床版箱桁の概要図

(2) 技術評価の観点と方向性

本節で取り扱うストラット付き床版構造は、床版の支持条件が通常のPC箱桁とは大きく異なる。よって本構造の技術評価を行う場合、以下の2タイプの観点から考える必要がある。

①床版の設計曲げモーメント算出式が道路橋示方書式を適用出来ない場合の設計手法

②床版の支持条件が異なることに対する構造安全性、耐久性、使用性

これらの観点から考えられる床版、ストラットおよびストラット接合部の技術的課題について以下に記す。

表-1.2.4.1 ストラット付き床版構造の問題認識と対応策一覧

技術評価の観点	着目する部位	対応する要求性能	問題認識		対応策	検証事例	
			項目	内容			
道示における設計曲げモーメント算出式の適用範囲を超える場合の設計手法	床版	・構造安全性 ・疲労耐久性 ・使用目的との適合性	1-1-1) ストラットで支持された床版の設計断面力の算出方法	ストラット付き床版は、床版の支持条件が道示式設定時の前提条件と異なり、また、主たる断面力が発生する方向や支間長が明確でないため、本構造の床版の支持条件に応じた設計曲げモーメントの算出方法について検証が必要である。	床版の支持条件を適切に再現できるモデルを設定し、荷重条件を同一にして理論値を算出すれば、道示のみなし仕様と同レベルの断面力が得られるものと考えられる。	検証事例-1	
道示の断面力算出方法を適用できない場合の設計手法	ストラット	・構造安全性 ・使用目的との適合性	2-1-1) ストラットの材質、形状選定	ストラットの材料は、鋼製やコンクリート製の実績があるが、鋼製ストラットは、将来において塗装の塗り替え作業が困難であるため防錆対策の検証が必要となり、コンクリート製ストラットは、施工時の荷役設備、将来のコンクリートの劣化および剥落防止の検証が必要である。	ストラットの材質は、コンクリート製や鋼製などが考えられる。コンクリート製の場合、材料劣化および剥落防止に留意する必要があり、鋼製の場合、防錆対策に留意する必要がある。	検証事例-3	
床版支間が従来と異なることに対する課題	床版	・構造安全性 ・疲労耐久性 ・使用目的との適合性	1-2-1) 床版の最小全厚	床版支持条件が異なる場合の最小全厚の設定について検証が必要である。	床版の最小厚は、道示において床版の曲げ引張応力を抑えるように規定されていることから、床版の応力度を指標として、床版厚を設定する方法が考えられる。	広幅員一室箱桁の検証事例-2	
	床版	・疲労耐久性 ・使用目的との適合性	1-2-2) 床版のコンクリート応力度の許容値	床版支持条件が異なる場合のコンクリート応力度の許容値の設定について検証が必要である。	道路橋示方書の前提と相違しているかどうかを検証することで、従来PC床版と同等の性能を有することを確認して道路橋示方書の規定を準用できるか判断する。	道示の準用	
	床版	・疲労耐久性 ・使用目的との適合性	1-2-3) 床版の鉄筋応力度の許容値	床版支持条件が異なる場合の鉄筋応力度の許容値の設定について検証が必要である。	道路橋示方書の前提と相違しているかどうかを検証することで、従来PC床版と同等の性能を有することを確認して道路橋示方書の規定を準用できるか判断する。	道示の準用	
	床版	・疲労耐久性	1-2-4) 床版の疲労耐久性	床版厚を変化させた場合、大型の自動車による影響、たわみおよび振動の変形による二次応力の発生が懸念される。よって、これまでの、みなし仕様がそのまま準用できない場合、疲労耐久性について、その検証が必要である。	道路橋示方書の前提と相違しているかどうかを検証することで、従来PC床版と同等の性能を有することを確認して道路橋示方書の規定を準用できるか判断する。	道示の準用 検証事例-1 検証事例-2 広幅員一室箱桁の検証事例-2	
	床版	・使用目的との適合性	1-2-5) 使用目的との適合性	1-2-5) 鉛直曲げ剛性の確保	ストラットに支持された張出し床版は、支持条件および床版支間が従来の床版と異なるため、鉛直曲げ剛性が確保できる床版の最小全厚の設定方法の検証が必要である。	適切な最小全厚を設定することにより、従来PC床版と同様の鉛直曲げ剛性を確保できる。	広幅員一室箱桁の検証事例-2
	床版			活荷重によるたわみ	従来のコンクリート床版では問題とならない範囲であることが明白である活荷重のたわみ算出方法の検証が必要である。	FEM解析を用いて、活荷重によるたわみを確認する(床版支間が大きくなつても、コンクリート系床版は剛性が大きく、活荷重によるたわみは問題にならない程小さいものと考えられる)。	検証事例-1
	ストラット	・構造安全性 ・疲労耐久性 ・使用目的との適合性	2-2-1) ストラットの設計断面力の算出方法	ストラットによりウェブや下床版も影響を受けるため、単純な箱桁ラーメン構造と見なすことが出来ない。また、ストラット接合部の構造がストラットの断面力に影響するため、床版同様にストラット部材の設計断面力を算出する場合の、設計手法上の検証が必要である。	床版の支持条件を適切に再現できるモデルを設定し、荷重条件を同一にして理論値を算出すればよいと考えられる。	検証事例-1	
	ストラット	・疲労耐久性 ・使用目的との適合性	2-2-2) ストラットに発生する応力度の制限	ストラット部材は、主として圧縮部材となる場合が多いため、座屈に対する検討も必要となる。また、接合方法によっては、引張応力を発生させないように配置することも必要となり、ストラットに発生する応力の制限に対する検証が必要である。	ストラット部材を、床版を支える柱部材として照査を行う。	道示の準用	
	ストラット	・疲労耐久性	2-2-3) ストラットの疲労耐久性	ストラットは、床版を直接支持する部材であることや、将来の維持管理が困難であることから、耐久性に十分配慮する必要がある。また、床版を支える部材であるため、床版に先行して破壊することを避けるべき部材と考えられることから、十分な疲労耐久性を有しているかの検証が必要である。	ストラット本体は、軸圧縮力が卓越する部材であるため、軸圧縮力の変動レベルをチェックすることで疲労耐久性を確認できると考えられる	検証事例-4 検証事例-5	
	ストラットと床版の接合部	・構造安全性 ・使用目的との適合性	3-1-1) ストラット接合部の支持構造	取付け部の形状の違いによって、床版に発生する断面力が大きく異なるため、適切な接合部形状の設定の検証が必要である。	ストラット取付け部の形状には、個別に突起を設けた突起タイプとはりを連続させたエッジビームタイプが考えられる。	検証事例-6	
	ストラットと床版の接合部	・構造安全性 ・使用目的との適合性	3-1-2) ストラット接合部の支持位置	ストラットの橋軸方向間隔によっては、床版に過大な補強が必要となる場合があるため、適切なストラットの支持位置の設定の検証が必要である。	ストラットの橋軸直角方向の接合位置は、床版に発生する正負の曲げモーメントのバランスを考慮して決定することが望ましい。また、橋軸方向間隔は、床版に発生する応力によって定まる。		
	ストラットと床版の接合部	・疲労耐久性	3-1-3) ストラット接合部の疲労耐久性	ストラット接合部は、ストラットにより床版を直接支持する部材であるため、耐久性に十分配慮する必要がある。よって、これらが十分な疲労耐久性を有しているかの検証が必要である。	ストラット接合部はすべての荷重状態で引張応力を発生させないと考えられる。また、この部位は、補強鉄筋が多く配置されているため、コンクリートの確実な充填を行うための配慮が必要である。	検証事例-5 検証事例-7 検証事例-8	

1) 床版

1-1) 道路橋示方書における設計曲げモーメント算出式の適用範囲を超える場合の設計手法

1-1-1) ストラットで支持された床版の設計断面力の算出方法

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書Ⅲ7.4.2 床版の設計曲げモーメント】

(1) B 活荷重で設計する橋においては、T 荷重（衝撃を含む）による床版の単位幅（1m）あたりの設計曲げモーメントは、表-7.4.1 に示す式で算定するものとする。ただし、……割り増し係数を乗じた値とする。

表-7.4.1 T 荷重（衝撃を含む）による床版の単位幅（1m）あたりの設計曲げモーメント
(kN·m/m)

床版の区分 曲げモーメントの種類	構造 適用範囲	床版の支間方向(注) 曲げモーメントの方向		車両進行方向に直角	車両進行方向に平行
		支間方向	支間に直角方向	支間に直角方向	支間に直角方向
単純版	RC	0 ≤ I ≤ 4	+ (0.12I + 0.07P)	+ (0.22I + 0.08P)	+ (0.06I + 0.06P)
	PC	0 ≤ I ≤ 6			
連続版	RC	0 ≤ I ≤ 4	+ (単純版の80%)	+ (単純版の80%)	+ (単純版の80%)
	PC	0 ≤ I ≤ 6			
支点曲げモーメント版	RC	0 ≤ I ≤ 4	- (0.15I + 0.125P)	- (単純版の80%)	-
	PC	0 ≤ I ≤ 6			
片持版	RC	0 ≤ I ≤ 1.5	- P · J		
	PC	0 ≤ I ≤ 1.5	1.30J + 0.25	-	- (0.7J + 0.22P)
先端付近曲げモーメント版	RC	1.5 < I ≤ 3.0	- (0.6J - 0.22P)		-
	PC	0 ≤ I ≤ 1.5		+ (0.15I + 0.13P)	+ (0.16I + 0.07P)
ここに、RC : 鉄筋コンクリート床版 PC : プレストレストコンクリート床版 I : 7.4.3 に規定するT荷重に対する床版の支間(m) P : 共通偏2.2.2 に示すT荷重の片側荷重(100kN) (注)床版支間の方向は、図-7.3.1による。					

(1) 表-7.4.1 は、表中の床版支間の範囲内で適用できる T 荷重による設計曲げモーメントの計算式を示したものである。ここで連続版の支点曲げモーメントについては、支持げたの拘束条件がコンクリート橋と鋼橋では異なるため、この影響を考慮している。表-7.4.1 の連続版の支点部を除く計算式は、等方性無限単純版と等方性無限片持版を対象に、平成2年道路橋示方書まで用いられてきたT-20 荷重に衝撃の影響を考慮して載荷し、解析により得られた理論値に対して 10~20%の安全をみた計算式に基づいていている。この余裕量は、解析を行ったときの仮定と実際の構造との違いや床版を施工するときに生じる床版厚や配筋の誤差等を考慮したものである。……

■技術的課題

ストラット付き床版は、床版の支持条件が道路橋示方書式設定時の前提条件と異なる。また、主たる断面力が発生する方向や支間長が明確でない。このため、本構造の床版の支持条件に応じた設計曲げモーメントの算出方法について検証が必要である。

■性能評価の対応策

床版の支持条件を適切に再現できるモデルを設定し、荷重条件を同一にして理論値を算出すれば、道路橋示方書のみなし仕様と同レベルの断面力が得られるものと考えられる。

【解説】

支持条件を適切に再現できるモデルとして、図-1.2.4.2 に示すような 3 次元 FEM 解析が考えられる。FEM 解析のモデル化等に関する留意点は、1.2.2 広幅員一室箱桁の章にて述べた。ここでは、ストラット付き床版構造に特化した留意事項について以下に列挙する。

①モデルの種類

ストラット部材のモデル化は、ソリッド要素とバー要素が考えられる。バー要素はソリッド要素に比べ、モデル作成や寸法の変更が容易である。両者を比較すると、床版との接合部をソリッド要素で忠実にモデル化すれば、バー要素を用いても床版やストラットに発生する応力度はソリッド要素を用いた場合と大差はないものと考えられる。

②支持条件

ストラットは、コンクリート製、鋼製などの事例があり、コンクリート床版との接合には、材料や施工法に応じた構造が採用される。接合方法によっては、床版との結合が剛結合とピン結合の中間程度で解析モデルの結合条件評価が困難となる場合もある。このような場合には、剛結合とピン結合の両方で解析を行い、厳しい方の断面力を用いて設計を行う方法もある。

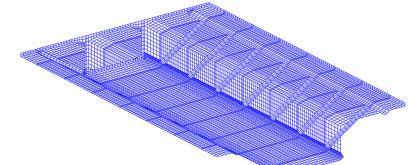


図-1.2.4.2 3次元 FEM 解析モデルの例

[検証事例-1]

1-2) 床版の支持条件が従来と異なることに対する課題

1-2-1) 床版の最小全厚

■関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書Ⅲ7.3.2 プレストレストコンクリート床版]

- (1) プレストレストコンクリート床版の厚さは、安全性、耐久性及び施工性を有するように決定するものとする。
- (2) (3)および(4)による場合は、(1)を満足するとみなしてよい。
- (3) 車道部分の床版の最小全厚は、次の規定によるものとする。なお、片持版の最小全厚とは、支持げたのウエブの前面における厚さをいう。
 - 1) 車道部分の床版の全厚は、いかなる部分も 160mm を下まわらないものとする。
 - 2) 片持版の床版先端の厚さは、1)の規定によるほか、表-7.3.1 の片持版の最小全厚の 50%以上とするものとする。
 - 3) 床版の 1 方向のみにプレストレスを導入する場合の車道部分の最小全厚は、1)及び 2)の規定によるほか、表-7.3.2 の値とするものとする。

表-7.3.2 床版の 1 方向のみにプレストレスを導入する場合の車道部分の最小全厚
(mm)

床版の支間の方向 プレストレスを導入する方向	車両進行方向に直角	車両進行方向に平行
床版の支間に方向に平行	表-7.3.1 の床版の支間の方向が車両進行方向に直角な場合の 90%	表-7.3.1 の床版の支間の方向が車両進行方向に平行な場合の 65%
床版の支間に方向に直角	表-7.3.1 の床版の支間の方向が車両進行方向に直角な場合の値	表-7.3.1 の床版の支間の方向が車両進行方向に平行な場合の値

(注) 床版の支間の方向は図-7.3.1による。

- (4) 歩道部分の床版の最小全厚は 140mm とするものとする。

(1) プレストレストコンクリート床版の最小全厚の決定にあたっては、鉄筋コンクリートと同様、実際の挙動を反映できる輪荷重走行試験及び解析により安全性を照査することが望ましい。しかし、プレストレスコンクリート床版は一般的に鉄筋コンクリート床版に比べて疲労耐久性を有するため、疲労耐久性のみに着目すると、最小全厚をかなり小さくすることが可能と判断してしまうおそれがある。

この結果、最小全厚を極端に薄くしてしまうと、大型の自動車による影響、たわみ及び振動の変形による二次応力の発生が考えられる。また、プレストレスコンクリートの材料のばらつき及び施工条件により、クリープ乾燥収縮の影響を受けやすくなる。したがって、プレストレスコンクリート床版の最小全厚の決定にあたっては、これらを考慮しなければならない。

■技術的課題

ストラットに支持された張出し床版は、支持条件が道路橋示方書の前提条件と異なることや、主たる断面力が発生する方向や支間長が明確でないため、床版支持条件が異なる場合の最小全厚の設定について検証が必要である。

■性能評価の対応策

1.3.2 広幅員一室箱桁同様、床版の最小厚は、道路橋示方書において床版の曲げ引張応力を抑えるように規定されていることから、床版の応力度を指標として、床版厚を設定する方法が考えられる。

【解説】

床版のコンクリートに生じる曲げ引張応力をある限界内におさえて、有害なひび割れ発生の危険をできるだけ少なくするために、鉄筋の許容応力度や床版の最小厚が規定されている。

鉄筋コンクリート床版の最小全厚は、昭和 31 年の鋼道路橋設計示方書で初めて規定されたが、昭和 40 年頃鉄筋コンクリート床版の損傷が問題となったため、規定の最小全厚が引き上げられている。その後も、設計活荷重の増加や交通量の増大に伴い、最小全厚の見直しが図られている。

床版の応力度を指標とした最小全厚を設定する方法として、以下の手順が考えられる。

- ①適用支間内であれば、なし仕様として規定された道路橋示方書の算出式を用いた断面力と最小厚により設計された床版は、安全性、耐久性ともに保証されている。
- ②これらを用いて、床版の曲げ応力度を算出し、これをひとつの指標とする。
- ③適用支間を超える場合の床版の断面力を、前述の方法などを用いて適切に算出する。
- ④ ③の断面力を用いた床版の曲げ応力度が、②の応力度と同程度になるように床版厚を設定し、これを最小厚とする。

[検証事例-2(広幅員一室箱桁)]

1-2-2) 床版のコンクリート応力度の許容値

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書Ⅲ.2 コンクリートの許容応力度】

(2) プレストレストコンクリート構造に対するコンクリートの許容引張応力度は、表-3.2.3の値とする。
また、従荷重及び従荷重に相当する特殊荷重を・・・適切に定めなければならない。

表-3.2.3 プレストレストコンクリート構造に対する許容引張応力度(N/mm²)

応力度の種類		コンクリートの設計基準強度			
		30	40	50	60
曲げ引張応力度	1) プレストレッシング直後	1.2	1.5	1.8	2.0
	2) 活荷重及び衝撃以外の主荷重	0	0	0	0
	3) 床版	0	0	0	0
	4) プレキャストセグメント橋におけるセグメント維ぎ目	0	0	0	0
	5) その他の場合	1.2	1.5	1.8	2.0
	6) 軸引張応力度	0	0	0	0

(2) 従来のプレストレストコンクリート構造は、部材断面にある程度の引張応力が生じることを許容し、6.5に規定する引張鉄筋を配置することにより、じん性に富んだ部材を設計することにしている。ただし、ある程度プレストレスを多めに導入しておくことにより、ひび割れに対する安全度を高めるため許容引張応力度を小さめに定めている。

表-3.2.3の2)は、持続的に作用する荷重に対してコンクリートのひび割れを防ぐため、コンクリートに引張応力を生じないこととしたものである。また、表-3.2.3の3)は、床版がひび割れにより損傷するのを防ぐためにプレストレスの方向に引張応力を生じさせないための規定であり、床版を設計する場合の規定である。・・・・

■技術的課題

ストラットに支持された張出し床版は、支持条件が道路橋示方書の前提条件と異なることや、主たる断面力が発生する方向や支間長が明確でないため、床版支持条件が異なる場合のコンクリート応力度の許容値の設定について検証が必要である。

■性能評価の対応策

道路橋示方書の前提と相違しているかどうかを検証することで、従来PC床版と同等の性能を有することを確認して道路橋示方書の規定を準用できるか判断する。

【解説】

PC床版においてプレストレスの導入方向に引張応力を発生させないよう規定することにより、床版にひび割れを発生させないようにし、高い耐久性を確保するためのみなし仕様としている。よって、床版支持条件が異なった場合でも、1-1-1)、1-2-1)による適切な断面力算出と床版厚の設定を行えば、現行道路橋示方書の規定を準用してフルプレストレスに抑えることとすれば、従来PC床版と同レベルの耐久性を確保できるものと考えられる。

1-2-3) 床版の鉄筋応力度の許容値

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書Ⅲ.3 鉄筋の許容応力度】

鉄筋コンクリート構造及びプレストレストコンクリート構造に対する鉄筋の許容応力度は、直径32mm以下の鉄筋に対して表-3.3.1の値とする。

表-3.3.1 鉄筋の許容引張応力度(N/mm²)

応力度、部材の種類	鉄筋の種類		
	SR235	SD295A SD295B	SD345
1) 活荷重および衝撃以外の主荷重	80	100	100
2) 荷重の組合せに衝突荷重又は地震の影響を考慮しない場合の許容応力度の基本値	一般の部材	140	180
	床版及び支間長10m以下の床版橋	140	140
3) 荷重の組合せに衝突荷重又は地震の影響を考慮する場合の許容応力度の基本値		140	180
4) 鉄筋の重ね継手長又は定着長を算出する場合の許容応力度の基本値		140	180
5) 圧縮応力度		140	180

2) 荷重の組合せに衝突又は地震の影響を考慮しない場合の許容応力度は、3.1(3)の規定により許容応力度を割増すが、その時の基本となる値を示したものである。この値は、荷重の繰返し載荷によりコンクリートのひび割れが拡大し有害なひび割れにならないこと、従荷重および従荷重に相当する特殊荷重が作用した場合でも有害なひび割れが発生しないこと等から定めたものである。ここで、床版及び支間長10m以下の床版橋の場合は、活荷重による応力変動幅が大きく、しかも繰返し荷重が多いことから、一般の部材に比べて非常に苛酷な荷重状態にさらされており、有害なひび割れが発生する可能性が高いと考えられる。さらに、このようなひび割れが荷重の繰返し載荷により大きくなり、コンクリートのはく離等に進展するのを避けるために、鉄筋の許容応力度を一般の部材に対して規定した値より低減した。さらにこの観点から、鉄筋コンクリート床版の鉄筋については、140N/mm²の許容応力度に対し20N/mm²程度余裕を持たせるのが望ましい。

■技術的課題

ストラットに支持された張出し床版は、支持条件が道路橋示方書の前提条件と異なることや、主たる断面力が発生する方向や支間長が明確でないため、床版支持条件が異なる場合の鉄筋応力度の許容値の設定について検証が必要である。

■性能評価の対応策

道路橋示方書の前提と相違しているかどうかを検証することで、従来PC床版と同等の性能を有することを確認して道路橋示方書の規定を準用できるか判断する。

【解説】

鉄筋の許容応力度についても、1-2-1)と同様に、1-1-1)、1-2-1)による適切な断面力算出と床版厚の設定を行い現行道路橋示方書を準用することで、従来PC床版と同等と見なせるものと考えられる。

1-2-4) 床版の疲労耐久性

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書Ⅲ.7.2 設計一般】

(1) 床版の設計においては、直接支持する活荷重の影響に対して安全なようにするほか、以下の1)及び2)の規定を満足するものとする。

1) 活荷重等に対して、疲労耐久性を損なう有害な変形を生じないようにするものとする。

2) 自動車の繰返し通行に対して、疲労耐久性が損なわれないようにするものとする。

鉄筋コンクリート構造及びプレストレストコンクリート構造に対する鉄筋の許容応力度は、直径32mm以下の鉄筋に対して表-3.3.1の値とする。

(1) 床版が直接支持する活荷重等の影響に対する安全性は、床版の基本的な性能であり、これを満足する他、とくに大型の自動車の繰返し通行に対して耐久性を損なわないようとするものとする。・・・・・

床版の有害な変形は、疲労耐久性に大きな影響を及ぼすコンクリート部材のひび割れの発生等のおそれがある。したがって、疲労耐久性を損なうような有害な変形を生じないようにする必要がある。・・・・・

■技術的課題

ストラットに支持された張出し床版は、支持条件が道路橋示方書の前提条件と異なるため、床版厚を変化させた場合、大型の自動車による影響、たわみおよび振動の変形による二次応力の発生が懸念される。よって、これまでの、みなしあ様がそのまま準用できない場合、疲労耐久性について、その検証が必要である。

■性能評価の対応策

道路橋示方書の前提と相違しているかどうかを検証することで、従来PC床版と同等の性能を有することを確認して道路橋示方書の規定を準用できるか判断する。

【解説】

断面力と床版厚を適切に設定し、床版応力度をフルプレストレスに抑えてひび割れを発生させないようにすれば、現行道路橋示方書のみなし仕様により設計された従来PC床版と同等レベルを考えることができる。従来PC床版は、実績と輪荷重走行試験による耐久性の高さは既に確認されており、1-1-1)、1-2-1)～1-2-3)による適切な断面力算出手法、床版の最小全厚、コンクリートおよび鉄筋の許容応力度の検証を行うことにより、疲労耐久性は確保できるものと考えられる。また、ストラット付き床版については、輪荷重走行試験を実施して疲労耐久性を確認した事例もある¹⁻²⁻¹⁾。

【検証事例-1】【検証事例-2】【検証事例-2(広幅員一室箱桁)】

【参考文献】

1-2-1) 長谷、本間、宮越、川崎、新井：橋軸方向施工目地を有するストラット付張出し床版の移動輪荷重走行疲労試験（第二東名高速道路 内牧高架橋）、土木学会第3回道路床版シンポジウム講演論文集、2003.6

1-2-2) 鴻上、本間、長谷、新井：内牧高架橋の張出し床版の移動輪荷重疲労試験、第12回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム、2003.10

1-2-5) 使用目的との適合性（鉛直曲げ剛性の確保、活荷重のたわみ）

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書Ⅲ.7.2 設計一般】

(1) 床版の設計においては、直接支持する活荷重の影響に対して安全なようにするほか、以下の1)及び2)の規定を満足するものとする。

1) 活荷重等に対して、疲労耐久性を損なう有害な変形を生じないようにするものとする。

2) 自動車の繰返し通行に対して、疲労耐久性が損なわれないようにするものとする。

鉄筋コンクリート構造及びプレストレストコンクリート構造に対する鉄筋の許容応力度は、直径32mm以下の鉄筋に対して表-3.3.1の値とする。

(2) 7.3から7.5によるプレストレストコンクリート床版及び設計基準強度24N/mm²以上のコンクリートを用いた鉄筋コンクリート床版は、(1)を満足するとみなしてよい。

(1) 床版が直接支持する活荷重等の影響に対する安全性は、床版の基本的な性能であり、これを満足する他、とくに大型の自動車の繰返し通行に対して耐久性を損なわないようとするものとする。・・・・・

床版の有害な変形は、疲労耐久性に大きな影響を及ぼすコンクリート部材のひび割れの発生等のおそれがある。したがって、疲労耐久性を損なうような有害な変形を生じないようにする必要がある。・・・・・

(2) プレストレストコンクリート床版及び設計基準強度が24N/mm²以上のコンクリートを用いた鉄筋コンクリート床版で、7.3に規定する床版の厚さを満足し、7.4の規定による設計曲げモーメントにより床版を設計する場合は、せん断に対する照査を省略することとした。これは、最小全厚を満足し、7.4の規定による設計曲げモーメントにより床版を設計する場合は、活荷重によるせん断破壊に対して十分安全であるため、一般にせん断力に対する検討を省略できるものとしたものである。しかし、施工時に大きな荷重を受ける場合等では、十分な検討をすることが望ましい。

■技術的課題

ストラットに支持された張出し床版は、支持条件および床版支間が従来の床版と異なるため、鉛直曲げ剛性が確保できる床版の最小全厚の設定方法、および、従来のコンクリート床版では問題とならない範囲であることが明白である活荷重のたわみ算出方法の検証が必要である。

■性能評価の対応策

道路橋示方書の前提と相違しているかどうかを検証することで、従来PC床版と同等の性能を有することを確認して道路橋示方書の規定を準用できるか判断する。

【解説】

1-2-1)による適切な最小全厚を設定することにより、従来PC床版と同様の鉛直曲げ剛性を確保できる。床版の曲げモーメントを評価する3次元FEM解析を用いて、活荷重によるたわみを確認する(床版支間が大きくなても、ストラットで支えられたコンクリート床版は剛性が大きく、活荷重によるたわみは問題にならない程小さいものと考えられる)。

【検証事例-1】【検証事例-2(広幅員一室箱桁)】

2) ストラット

2-1) 道路橋示方書の断面力算出方法を適用できない場合の設計手法

2-1-1) ストラットの材料、形状選定

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書III19.4.1 一般】

- (1) 材料は、設計図等にて指示されたものを使用しなければならない。
- (2) 材料は、所定の特性や品質を確保しているものでなければならない。

(1) コンクリート構造物においては、材料そのものの品質が耐久性に大きく影響する。したがって、設計図等で指示されたものを使用しなければならない。

(2) コンクリート橋を構成する材料は、所定の特性や品質を確保していることが確認されたものでなければならない。新たに開発された新材料を使用する際は、適切な試験、検査により、要求される性能を満足していることを十分に確認した上で使用しなければならない。

■技術的課題

ストラットの材料は、鋼製やコンクリート製の実績があるが、鋼製ストラットは、将来において塗装の塗り替え作業が困難であるため防錆対策の検証が必要となり、コンクリート製ストラットは、施工時の荷役設備、将来のコンクリートの劣化および剥落防止の検証が必要である。

■性能評価の対応策

ストラットの材質は、コンクリート製や鋼製などが考えられる。コンクリート製の場合、材料劣化および剥落防止に留意する必要があり、鋼製の場合、防錆対策に留意する必要がある。

【解説】

ストラットの材料および形状の実績は、

図-1.2.4.3 に示す鋼製の角型、コンクリート製の角型および丸型がある。

材質は、防錆および剥落防止対策のため炭素繊維コンクリートやFRP製の外套管を使用した事例もある。また、接合部の耐久性向上のため、コンクリート製ストラットに水切りスリットを設けた事例²⁻¹⁻¹⁾や、

鋼管ストラットに水切りリングを溶接した事例²⁻¹⁻²⁾もある。

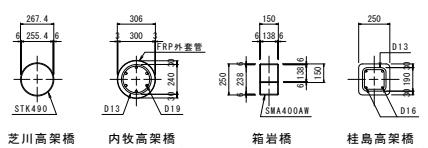


図-1.2.4.3 ストラットの材料および形状の例

[検証事例-3]

【参考文献】

2-1-1) 小宇佐、南山、干村、加邊、藤木、八木：第二名神高速道路錐ヶ瀧橋（上り線）の施工、橋梁と基礎 Vol.41、2007.03

2-1-2) 岡田、香川、管、深谷：宍原第一高架橋の設計・施工、第12回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム、2003.10

2-1-3) 西須、福永、三浦、中島：芝川高架橋の設計・施工報告、第12回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム、2003.10

2-2) 床版の支持条件が従来と異なることに対する課題

2-2-1) ストラットの設計断面力の算出方法

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書III10.3 構造解析】

(4) 横方向の設計

- 1) 下フランジ及びウエブの断面力は、箱げたをウエブ及び上下フランジにより構成されるラーメン構造とみなしてよい。

(4) 1) 下フランジ及びウエブの断面力は、図-解10.3.3に示すように、橋軸方向に1mの奥行きを有する箱形ラーメン構造をモデル化して算出しても、実用上十分な精度の解が得られるので、一般にこの方法によって求めてよい。

この場合、活荷重による曲げモーメントは、上フランジについては、表-7.4.1により求めるものとする。また、ウエブ及び下フランジについては、・・・・最も不利となる組合せを考慮するものとする。また、上フランジにプレストレスを導入する場合は、プレストレス力による不静定力の影響を考慮するものとする。

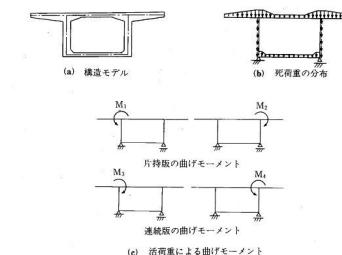


図-解 10.3.3 下フランジ及びウエブの曲げモーメント

■技術的課題

ストラットによりウエブや下床版も影響を受けるため、単純な箱桁ラーメン構造と見なすことが出来ない。また、ストラット接合部の構造がストラットの断面力に影響するため、床版同様にストラット部材の設計断面力を算出する場合の、設計手法上の検証が必要である。

■性能評価の対応策

床版の支持条件を適切に再現できるモデルを設定し、荷重条件を同一にして理論値を算出すればよいと考えられる。

【解説】

支持条件を適切に再現できるモデルとして、1-1-1)に示すような3次元FEM解析が考えられる。そして、FEM解析による手法を用いることで、ストラットの設計断面力、応力度は直接確認することができる。

[検証事例-1]

2-2-2) ストラットに発生する応力度の制限

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書Ⅲ4.1 総則】

- (1) 部材の照査は、(2)の規定にしたがって断面力を算出し、4.2から4.6の規定にしたがって行うものとする。
- (2) 設計荷重作用時及び終局荷重作用時の構造部材の照査に用いる断面力の算定は、棒部材を用いた線形解析に基づくものとする。この場合、部材の曲げ剛性、せん断剛性及びねじり剛性は、コンクリートの全断面を有効とし、鋼材を無視して算出した値を用いてよい。

(1) 従来、荷重に対する部材の設計計算は、安全度を確保できる部材断面及び必要鋼材量を算出する規定となっていた。これに対して、本改訂では、部材が荷重に対して所要の性能を有するか否かの照査を行うという規定に定めている。すなわち、曲げモーメント、軸方向力、せん断力、ねじりモーメントといった断面力に対して、設計荷重作用時には2.2(2)に規定する荷重の組合せにより部材断面に生じる鉄筋やコンクリートの応力度が許容応力度以下であることを照査することにより、また、終局荷重作用時には2.2(3)に規定する荷重組合せにより部材断面に作用する設計断面力が断面耐力以下であることを照査することにより、所要の性能を満足するものとみなせるとしたものである。

ここで、設計荷重作用時の照査は、鉄筋コンクリート構造及びプレストレストコンクリート構造に応じて、表-解4.1.1に示すようにコンクリート応力度、鉄筋応力度等の項目に対して行う。また、終局荷重作用時の照査は、全ての部材の構造区分について、表-解4.1.1に示す項目に対して行う。

表-解4.1.1 コンクリート上部構造の荷重に対する構造部材の主な照査項目

荷重状態及び断面力の種類		鉄筋コンクリート構造	プレストレストコンクリート構造
設計荷重作用時	曲げモーメント又は軸方向力	コンクリート縁応力度 ≤許容圧縮応力度 軸方向鉄筋応力度 ≤許容圧縮、引張応力度	コンクリート縁応力度 ≤許容圧縮、引張応力度 P C 鋼材応力度 (軸方向鉄筋応力度 ≤許容引張応力度)
	せん断力又はねじりモーメント	斜引張鉄筋応力度 ≤許容引張応力度 (コンクリートせん断応力度 ≤負担せん断応力度)	コンクリート斜引張応力度 ≤許容斜引張応力度
終局荷重作用時	曲げモーメント又は軸方向力	設計断面力≤断面耐力（破壊抵抗曲げモーメント）	
	せん断力又はねじりモーメント	設計断面力≤ウェブコンクリートの圧壊に対する断面耐力 設計断面力≤斜引張破壊に対する断面耐力	

■技術的課題

ストラット部材は、主として圧縮部材となる場合が多いため、座屈に対する検討も必要となる。また、接合方法によっては、引張応力を発生させないように配置することも必要となり、ストラットに発生する応力の制限に対する検証が必要である。

■性能評価の対応策

ストラット部材を、床版を支える柱部材として照査を行う。

【解説】

支持条件を適切に再現できるモデルとして考えられる3次元FEM解析等を用いて直接算出したストラットの断面力および応力度について、道路橋示方書Ⅲ4.2から4.6の規定に準拠して照査を行う。ストラット部材は、床版を支える柱部材と見なせることから、座屈に対する検討も必要となるが、その場合の柱境界条件について、実際のストラット接合条件を適切に反映した条件を選択する必要がある。

2-2-3) ストラットの疲労耐久性

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書Ⅲ5.1 一般】

コンクリート部材の設計にあたっては、経年劣化による影響を考慮するものとする。

コンクリート橋の設計にあたっては、経年劣化に対して十分な耐久性が保持できるように配慮しなければならない。とくに、コンクリートの劣化、鉄筋の腐食等に伴う損傷により、所要の性能が損なわれないように耐久性の検討を行うものとする。

コンクリート部材の・・・・設計することが重要である。

なお、本章では、・・・・検討することが望ましい。

また、疲労に対する検討は、一般にコンクリート橋として問題となった事例が少ないとから、4章の規定にしたがって部材の照査を行うことにより、一般的には疲労の検討を省略できるものとしている。しかし、これまでに実績のない構造や斜張橋等の活荷重等による疲労の影響が懸念される場合は、適切にこれを考慮しなければならない。

■技術的課題

ストラットは、床版を直接支持する部材であることや、将来の維持管理が困難であることから、耐久性に十分配慮する必要がある。また、床版を支える部材であることが前提条件であるため、床版に先行して破壊することを避けるべき部材と考えられる。そのため、十分な疲労耐久性を有しているかの検証が必要である。

■性能評価の対応策

ストラット本体は、軸圧縮力が卓越する部材であるため、軸圧縮力の変動レベルをチェックすることで疲労耐久性を確認できると考えられる。

【解説】

ストラット本体の疲労耐久性の確認を、原寸大の試験体による静的破壊試験を行った事例²⁻²⁻¹⁾もある。

【検証事例-4】【検証事例-5】

【参考文献】

2-2-1)西須、福永、三浦、中島：芝川高架橋の設計・施工報告、第12回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム、2003.10

2-2-2)土木学会：2002年制定 コンクリート標準示方書[構造性能照査編]

3) ストラットと床版の接合部

3-1) 床版の支持条件が従来と異なることに対する課題

3-1-1) ストラット接合部の支持構造

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書Ⅲ7.5.1 床版と支持げたの結合】

(1) 床版と支持げたとの結合部は、応力が円滑に伝わるような構造とするものとする。

(2) (3)から(5)による場合は、(1)を満足するとみなしてよい。

(3) 床版には、支持げた上でハンチを設けるものとする。

(4) 床版のハンチの傾斜は、1:3よりゆるやかにするのが望ましい。1:3よりきつい場合は、図-7.5.1に示すように1:3までの厚さを床版として有効な断面とみなすものとする。

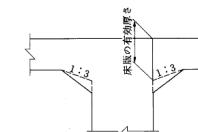


図-7.5.1 ハンチ部の床版の有効高さ

(5) ハンチには、その内側に沿って鉄筋を配置することを原則とするものとする。ハンチに沿う鉄筋の直径は13mm以上とする。(図-6.6.6参照)

(3) 床版のハンチは、床版と支持げたに応力をなめらかに伝えるために設けるものである。

■技術的課題

ストラット取付け部は、床版からの荷重がストラットへスムーズに伝達できる構造である必要があり、突起タイプは床版に対して点支持となり、ストラット直上における上縁引張応力が過大になることが懸念される。これに対して、エッジビームタイプは、床版を線支持することにより床版応力は緩和されるが、エッジビームに引張応力が発生するため、留意を要する。よって、取付け部の形状の違いによって、床版に発生する断面力が大きく異なることとなるため、適切な接合部形状の設定の検証が必要である。

■性能評価の対応策

ストラット取付け部の形状には、個別に突起を設けた突起タイプとはりを連続させたエッジビームタイプが考えられる。

【解説】

ストラット取付け部の形状には、図-1.2.4.4に示すような個別に突起を設けた突起タイプとはりを連続させたエッジビームタイプが考えられる。床版の橋軸直角方向曲げモーメントは、突起タイプのほうが大きくなる傾向があり、エッジビームタイプでは床版応力の制御が可能であるが、突起タイプでは床版応力の制御が困難となる³⁻¹⁻¹⁾。

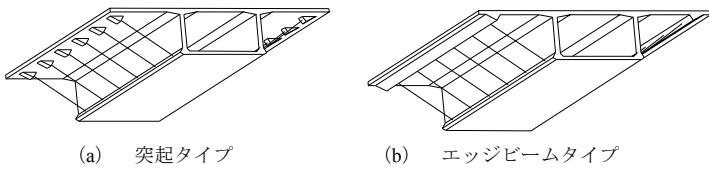


図-1.2.4.4 ストラットと床版の接合形状

3-1-2) ストラット接合部の支持位置

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書Ⅲ7.5.1 床版と支持げたの結合】

- (1) 床版と支持げたとの結合部は、応力が円滑に伝わるような構造とするものとする。
- (2) (3)から(5)による場合は、(1)を満足するとみなしてよい。
- (3) 床版には、支持げた上でハンチを設けるものとする。
- (4) 床版のハンチの傾斜は、1:3よりゆるやかにするのが望ましい。1:3よりきつい場合は、図-7.5.1に示すように1:3までの厚さを床版として有効な断面とみなすものとする。

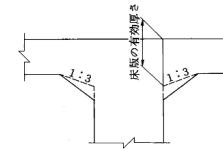


図-7.5.1 ハンチ部の床版の有効高さ

- (5) ハンチには、その内側に沿って鉄筋を配置することを原則とするものとする。ハンチに沿う鉄筋の直径は13mm以上とする。(図-6.6.6参照)
- (3) 床版のハンチは、床版と支持げたに応力をなめらかに伝えるために設けるものである。

■技術的課題

ストラットの橋軸直角方向の支持位置は、床版の先端もしくは中間とすることが考えられる(図-1.2.4.5)。支持位置の設定には、床版に発生する正負の曲げモーメントのバランス、ストラットの取付け角度、排水ます等の取付け位置との取合いなどに留意する必要がある。また、ウエブ途中にストラットを定着する場合は、ウエブ内側に引張応力が発生するため留意する必要がある。この他、ストラットの橋軸方向間隔によっては、床版に過大な補強が必要となる場合があるため、適切なストラットの支持位置の設定の検証が必要である。

■性能評価の対応策

ストラットの橋軸直角方向の接合位置は、床版に発生する正負の曲げモーメントのバランスを考慮して決定することが望ましい。また、橋軸方向間隔は、床版に発生する応力によって定まる。

【参考文献】

- 3-1-1)竹中、中田、五藤：支保工架設による張出し床版にストラットを有する箱桁橋の設計 上川高架橋（下り線）、第15回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム、2006.10

[検証事例-6]

【解説】

ストラットの橋軸直角方向の接合位置としては、床版先端に取付けた場合が多い。ストラット間隔を大きくすることで経済性や施工性は向上するが、床版に発生する応力は当然大きくなるため、床版に過大な補強が必要とならない範囲とする必要がある³⁻¹⁻²⁾。また、片持ち架設工法の場合、ブロック長により、ストラット間隔を決めた事例³⁻¹⁻³⁾もある。

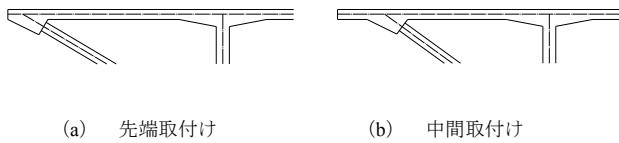


図-1.2.4.5 ストラットと床版の接合形状

【参考文献】

- 3-1-2)竹中、中田、五藤：支保工架設による張出し床版にストラットを有する箱桁橋の設計 上川高架橋（下り線）、第15回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム、2006.10
3-1-3)西須、福永、三浦、中島：芝川高架橋の設計・施工報告、第12回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム、2003.10

3-1-3) ストラット接合部の疲労耐久性

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書Ⅲ5.1 一般】

コンクリート部材の設計にあたっては、経年的な劣化による影響を考慮するものとする。

疲労に対する検討は、一般にコンクリート橋として問題となった事例が少ないとから、4章の規定にしたがって部材の照査を行うことにより、一般的には疲労の検討を省略できるものとしている。しかし、これまでに実績のない構造や斜張橋等の活荷重等による疲労の影響が懸念される場合は、適切にこれを考慮しなければならない。

【道路橋示方書Ⅲ19.9.4 接合】

- (1) プレキャスト部材の接合は、使用する接合材料に最も適する施工方法を検討し、強度、耐久性、水密性等所定の品質が得られるように入念に行わなければならない。

- (1) 接合面は、豆板等の不良なコンクリート部分を、・・・・しなければならない。

なお、コンクリート、セメント系モルタル・・・・シース周辺や型わくのすみずみまで行きわたるように、振動機を用いて十分に締固めを行わなければならない。

■技術的課題

ストラット接合部は、ストラットにより床版を直接支持する部材であるため、耐久性に十分配慮する必要がある。よって、これらが十分な疲労耐久性を有しているかの検証が必要である。

■性能評価の対応策

ストラット接合部はすべての荷重状態で引張応力を発生させないことで高い疲労耐久性を有すると考えられる。また、この部位は、補強鉄筋が多く配置されているため、コンクリートの確実な充填を行うための配慮が必要である。

【解説】

ストラット下端の主桁との接合部は、ストラット構造において重要な部位である。このため、図-1.2.4.6に示すような原寸大の試験体による繰返し載荷試験を行い、疲労耐久性を確認した事例³⁻¹⁻⁴⁾もある。また、コンクリートを確実に充填するために、図-1.2.4.7に示すようにストラット下端のエッジ上部の型枠を透明型枠とした上、振動ディバイスを用いて打設時の充填確認を行った事例³⁻¹⁻⁵⁾もある。



図-1.2.4.6 原寸大の供試体実験の例

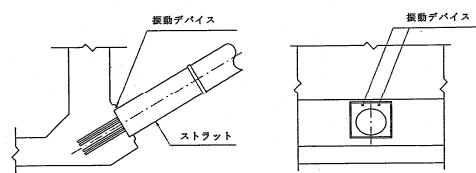


図-1.2.4.7 振動ディバイスを用いた事例

[検証事例-5] [検証事例-7] [検証事例-8]

[参考文献]

- 3-1-4)西須、福永、三浦、中島：芝川高架橋の設計・施工報告、第12回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム、2003.10
- 3-1-5)岡田、香川、管、深谷：宍原第一高架橋の設計・施工、第12回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム、2003.10
- 3-1-6)斎藤、本間、宇佐美、山村：断面を分割架設するストラット付PC箱桁のストラット接合部 第二東名高速道路 内牧高架橋（PC上部工）工事、第15回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム、2006.10

(3) 検証事例

検証事例-1	3次元FEM解析を用いた活荷重による断面力の算出		
要求性能	構造の安全性、使用目的との適合性	関連規定	道路橋示方書Ⅲ7.4.2
検証目的	道路橋示方書における床版の設計曲げモーメント算出式は、床版を2辺単純支持とした等方性の無限単純版あるいは1辺固定・1辺自由の等方性の無限単純版にモデル化して算出した理論値に基づき設定されている。これに対し、ストラット付き床版は、張出し床版と下床版・ウエブがストラットによって支持された構造である。このような道路橋示方書式設定時のモデル化と支持条件が異なる場合の、道路橋示方書式を用いた断面力の妥当性を確認した検証事例。		
検証方法	実験による検証 · 解析による検証 · 道路橋示方書の準用		
検証方針	3次元FEM解析により断面力を算出。		
検証内容	<p>(1)3次元FEM解析による断面力の算出 ・検討対象主桁断面</p> <p>図-1 ストラット付き床版箱桁の例</p> <p>・3次元FEMモデル（ソリッドモデル）</p> <p>図-2 3次元FEMモデル</p>		

	<p>(2)活荷重の載荷方法 ストラット直上、ストラット間にに対して最も不利になるようにT荷重を載荷させる。</p> <p>図-3 活荷重載荷位置</p>
注意点	<p>FEM 解析は、汎用性のある解析ツールが多く開発され、従来と比べ簡単に扱えるようになってきたものの、モデル化によって結果に差異が生じることもあり、十分留意する必要がある。以下に考えられる留意事項を列挙する。</p> <p>①モデルの種類 シェルモデルとソリッドモデルがあり、より実構造に近いのはソリッドモデルであるが、モデル作成に手間を要する。シェルモデルは、ソリッドモデルに比べモデル作成は容易であるが、部材間の結合条件などに留意が必要となる。</p> <p>②メッシュ分割 メッシュの分割数、大きさなどに結果が左右される。適切で無駄のないメッシュ分割を行う必要がある。</p> <p>③モデルの長さ 道路橋示方書算出式のモデルは無限長であるが、FEM モデルは、得られる解に問題の無い範囲で、できるだけ短いモデル長とするのが望ましい。</p> <p>④支持条件 PC 箱桁をモデル化するため、下端の支持条件によっても得られる値が異なる可能性がある。</p>

検証事例-2	ストラット付き床版の輪荷重走行試験の事例		
要求性能	疲労耐久性	関連規定	道路橋示方書 III.7.2
検証目的	ストラット付き床版について、輪荷重走行試験を実施して疲労耐久性を検証した事例。 従来 PC 床版は、実績と輪荷重走行試験により耐久性の高さが既に確認されている。断面力と床版厚を適切に設定し、床版応力度をフルプレストレスに抑えてひび割れを発生させないようにすることで、道路橋示方書のみなし仕様により設計された従来 PC 床版と同等レベルと考えることができる。		
検証方法	実験による検証・解析による検証・道路橋示方書の準用		
検証方針	輪荷重走行試験により疲労耐久性を確認。		
参考文献	1) 長谷、本間、宮越、川崎、新井：橋軸方向施工目地を有するストラット付張出し床版の移動輪荷重走行疲労試験（第二東名高速道路 内牧高架橋），土木学会第3回道路床版シンポジウム講演論文集，2003.6 2) 鴻上、本間、長谷、新井：内牧高架橋の張出し床版の移動輪荷重疲労試験，第12回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム，2003.10		
注意点	参考文献で紹介した実験による検証方法は、床版厚 250mm におけるものであるため、床版厚が極端に薄いなど条件がこれらと異なる場合には、別途実験などによる検証が必要となる。		

検証事例-3	ストラットの材料、形状の事例					
要求性能	疲労耐久性、使用目的との適合性	関連規定	道路橋示方書Ⅲ19.4.1			
検証目的	ストラットの材料および形状の実績は、鋼製の角型、コンクリート製の角型および丸型がある。ストラットは、コンクリートの劣化および剥落防止のため、炭素繊維コンクリートやFRP製の外套管を使用した事例もある。また、接合部の耐久性向上のため、コンクリート製ストラットに水切りスリットを設けた事例や、鋼管ストラットに水切りリングを溶接した事例もある。					
検証方法	<input checked="" type="checkbox"/> 実験による検証 · <input type="checkbox"/> 解析による検証 · <input type="checkbox"/> 道路橋示方書の準用					
検証方針	使用事例					
(1)ストラット材料・形状事例	ストラットの材料および形状の事例を表-1に示す。					
表-1 ストラットの実績						
検証内容	橋名	材質	仕様	断面形状/寸法	防錆・剥落対策	
	芝川高架橋	鋼製	STK490	円形 φ267.4mm, t=6mm	亜鉛アルミ合金 めつき めつき表面をフッ素塗装	
	内牧高架橋	コンクリート	$\sigma_{ck}=50N/mm^2$ スパン : 18.0cm	円形 φ300mm	FRP外套管(t=3mm) 外套管表面をフッ素塗装 フェルセーフとして炭素繊維ロット	
	宍原高架橋	コンクリート	$\sigma_{ck}=40N/mm^2$ 高流動	円形 φ260mm	FRP外套管(t=3mm) 外套管表面をフッ素塗装	
	桂島高架橋	コンクリート	$\sigma_{ck}=50N/mm^2$ スパン : 8.0cm	矩形 250mm×250mm	繊維補強コンクリート フェルセーフとしてステンレス鉄筋	

芝川高架橋では、施工時の荷役設備を最小限とするため鋼製のストラットを採用している¹⁾。

(2)ストラットに水切りを設けた事例

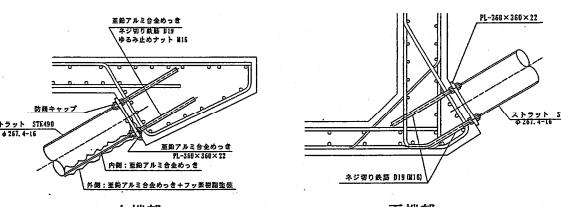
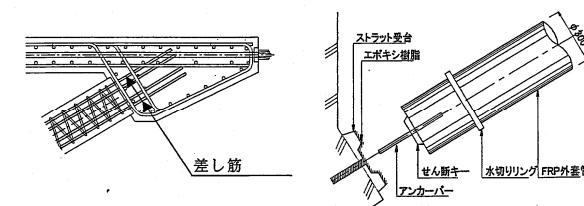
コンクリート製ストラットでは、ストラットに沿って流れる雨水の水切り対策として、本体にスリットを設けて水切りとする構造を採用した事例²⁾もある。また、最初に製作したストラットを使用して水切り機能の確認試験を行い、採用した水切り形状の妥当性を検証している。

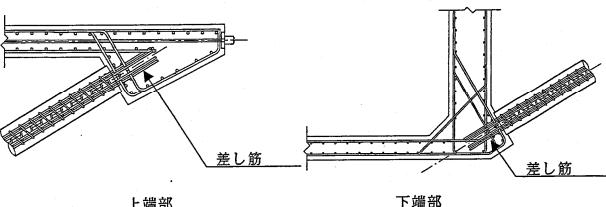
参考文献	1) 西須、福永、三浦、中島：芝川高架橋の設計・施工報告、第12回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム、2003.10
	2) 小宇佐、南山、干村、加邊、藤木、八木：第二名神高速道路錐ヶ瀧橋（上り線）の施工、橋梁と基礎 Vol.41、2007.3
	3) 鴻上、本間、長谷、新井：内牧高架橋の張出し床版の移動輪荷重疲労試験、第12回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム、2003.10
注意点	ストラットに用いる材料および形状は、構造特性、耐久性、経済性および施工性などを考慮し、選定する必要がある。 鋼製で形鋼を用いる場合は円形および矩形どちらを選択しても大きな差異はない。コンクリート製の場合、円形を採用する際には型枠として外套管が必要でありコンクリートは鉛直打設される。矩形では転用可能な型枠を水平に設置して打設が可能であるので、施工性に優れるとともに剥落防止の繊維混入コンクリートの使用も容易となる。

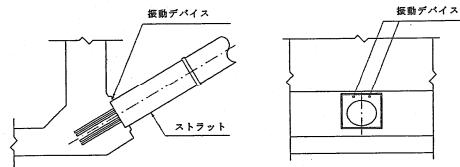
検証事例-4	ストラットに発生する変動応力度		
要求性能	耐久性(疲労), 使用目的との適合性	関連規定	道路橋示方書Ⅲ5.1
検証目的	ストラット本体は軸圧縮力が卓越する部材であるが、発生する応力度は活荷重の影響により変動し、また繰り返し載荷される。この変動応力度が疲労に対して問題がないことを解析により検証した事例。		
検証方法	実験による検証・解析による検証・道路橋示方書の準用		
検証方針	コンクリート製の場合のストラットの変動応力を算出し、コンクリートの疲労強度以下であることを確認。		
	<p>検証事例-1に示すFEM解析を用いて算出したストラットに発生する最大・最小断面力を以下に示す。</p> <p>CASE-1: 軸力最小時の断面力 (=死荷重時) $N = 213(\text{kN})$, $M = 5(\text{kN}\cdot\text{m})$</p> <p>CASE-2: 軸力最大時の断面力 (=設計荷重時) $N = 542(\text{kN})$, $M = 3(\text{kN}\cdot\text{m})$</p> <p>CASE-1は、活荷重が作用していない死荷重状態の場合であり、CASE-2は図-1に示すようなストラット直上にT荷重が載荷された状態である。</p>		
検証内容	<p>各ケースにおけるストラットの応力度は下記の通りとなる。</p> <p>ストラット寸法 $\square 250 \times 250 \rightarrow A=0.0625\text{m}^2$, $Z=0.0026\text{m}^3$</p> <p>CASE-1: $\sigma = (213/0.0625 \pm 5/0.0026) \times 10^{-3} = 5.3\text{N/mm}^2$, 1.5N/mm^2</p> <p>CASE-2: $\sigma = (542/0.0625 \pm 3/0.0026) \times 10^{-3} = 9.8\text{N/mm}^2$, 7.5N/mm^2</p> <p>よって変動応力度は $\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 9.8 - 1.5 = 8.3\text{N/mm}^2$</p> <p>ここでコンクリートの疲労強度については、コンクリート標準示方書の式(3.2.7)を参考に算出する¹⁾。</p> $f_{rd} = k_{lf} \cdot f_d \cdot (1 - \sigma_p/f_d) \cdot (1 - \log N/K) \quad (3.2.7)$ <p>ここに、</p> <p>f_{rd}: コンクリートの設計疲労強度 (N/mm^2)</p> <p>f_d: コンクリートの設計圧縮強度 $\rightarrow f'_cd = 50 / 1.3 = 38.5 \text{ N/mm}^2$</p> <p>$k_{lf}$: 圧縮および曲げ圧縮の場合 $\rightarrow k_{lf} = 0.85$</p>		

	<p>σ_p : 永久荷重によるコンクリートの応力度 → 上記 CASE-1 の大きい方 $\sigma_p = 5.3 \text{ N/mm}^2$</p> <p>N : 疲労寿命 → 2×10^6 とする</p> <p>K : その他一般の部材 → K=17</p> <p>設計疲労強度 $f_{rd} = 0.85 \cdot 38.5 \cdot (1 - 5.3/38.5) \cdot (1 - \log(2 \times 10^6)/17)$ $= 17.8 \text{ N/mm}^2$</p> <p>以上より, $\sigma_{max} - \sigma_{min} = 8.3 \text{ N/mm}^2 < f_{rd} = 17.8 \text{ N/mm}^2$ となり, 変動応力は設計疲労強度の半分程度である。</p> <p>本事例は, 疲労寿命を 2×10^6 回とした場合の検討結果であるが, 対象断面のように張出し床版をストラットで支えた構造の場合,</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ストラットの軸力が最大になるのは, ストラット直上のラインにT荷重が載荷した場合であり、ストラット間隔にかかわらず概ね変動応力レベルは同程度である。 ・死荷重状態でストラットには圧縮力が作用しており、圧縮状態での応力変動となる。 <p>上記を考慮した場合、本事例の対象断面程度の幅員までであれば、疲労耐久性に問題はないものと考えられる。</p>
参考文献	1) 土木学会 : 2002 年制定 コンクリート標準示方書[構造性能照査編]
注意点	<p>本事例は、疲労寿命を 2×10^6 回とした場合の検討であり、設計疲労強度に対して変動応力が十分小さいレベルであることを示したものである。よって、交通量が著しく多い路線などでは、疲労寿命についての検討が必要である。</p> <p>また水中や絶えず湿潤状態にあるコンクリートの場合、圧縮疲労強度は低下するため、ストラットに雨水が常にかかるような配慮が必要である。</p>

検証事例-5	ストラットの疲労耐久性確認試験		
要求性能	疲労耐久性	関連規定	道路橋示方書Ⅲ5.1
検証目的	ストラット本体は、軸圧縮力が卓越する部材であるため、軸圧縮力の変動レベルをチェックすることで疲労耐久性を確認できると考えられる。原寸大の試験体を用いた静的破壊試験により、疲労耐久性を確認した検証事例。		
検証方法	実験による検証・解析による検証・道路橋示方書の準用		
検証方針	原寸大のストラット供試体の疲労耐久性を静的破壊試験により確認。		
参考文献	1) 西須、福永、三浦、中島：芝川高架橋の設計・施工報告、第12回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム、2003.10		
注意点	参考文献で紹介した実験による検証方法は、鋼製ストラット(STK490, φ267.4mm, t=6mm)におけるものであるため、ストラットの材質、形状など条件がこれらと異なる場合には、別途実験などにより検証が必要となる。		

検証事例-7	ストラット接合部の構造の事例		
要求性能	構造安全性、使用目的との適合性	関連規定	道路橋示方書Ⅲ5.1, 19.9.4
検証目的	ストラット接合部は、構造上重要な部位であるため、十分な検討が必要である。コンクリート製ストラットの場合、差し筋により床版および主げたに接合されるが、プレキャストセグメントの場合、その方法が困難であることから、コンクリートせん断キーと端面の摩擦により接合する構造とした事例もある。		
検証方法	実験による検証・解析による検証・道路橋示方書の準用		
検証方針	ストラット接合部の構造事例。		
検証内容	<ul style="list-style-type: none"> ストラット直下に応力集中の少ないベースプレート+アンカー筋タイプを採用した例(図-1)。 		
	<p>図-1 鋼管ストラット接合部の例</p> <ul style="list-style-type: none"> 主げたの下端接合部がプレキャストセグメントである場合、差し筋による接合が困難となるため、コンクリートせん断キーと端面の摩擦により接合する構造¹⁾とした例(図-2)。 		

	<ul style="list-style-type: none"> 主げたが現場打ちにて施工される場合の、上端部および下端部ともに差し筋により接合する構造の例（図-3）。  <p>図-3 コンクリートストラット接合部</p>
参考文献	<p>1) 斎藤, 本間, 宇佐美, 山村 : 断面を分割架設するストラット付PC箱桁のストラット接合部 第二東名高速道路 内牧高架橋（PC上部工）工事, 第15回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム, 2006.10</p>
注意点	<p>ストラット下端と主げたとの接合部は、特に雨水が廻ることが考えられるため、劣化防止に配慮する必要がある。そのため、アンカーバーを炭素繊維ロッドとした事例や埋め込み鉄筋にエポキシ塗装を施した事例もある。</p>

	<p>検証事例-8 ストラット接合部のコンクリート充填確認の事例</p> <table border="1"> <tr> <td>要求性能</td><td>構造安全性, 使用目的との適合性</td><td>関連規定</td><td>道路橋示方書Ⅲ5.1, 19.9.4</td></tr> </table>	要求性能	構造安全性, 使用目的との適合性	関連規定	道路橋示方書Ⅲ5.1, 19.9.4
要求性能	構造安全性, 使用目的との適合性	関連規定	道路橋示方書Ⅲ5.1, 19.9.4		
検証目的	<p>ストラット接合部のコンクリート充填性を実験により検証した事例。 ストラット下端と主桁との接合部は、ストラット構造において重要な部位であり、損傷により床版構造に重大な欠陥を招く恐れがある。また、この部位は、補強鉄筋が多く配置されているが、充填状況が目視出来ないためコンクリートの確実な充填を行うための配慮が必要である。</p>				
検証方法	<p>[実験による検証] • 解析による検証 • 道路橋示方書の準用</p>				
検証方針	ストラット接合部のコンクリート充填性を実験により確認。				
検証内容	<p>ストラット接合部へのコンクリート充填を確実に行うために、ストラット下端のエッジ上部の型枠を透明型枠とした上、振動ディバイスを用いて打設時の充填確認を行った事例¹⁾もある（図-1）。</p>  <p>図-1 振動ディバイス配置図</p>				
参考文献	<p>1) 岡田, 香川, 管, 深谷 : 宍原第一高架橋の設計・施工, 第12回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム, 2003.10</p>				
注意点	<p>振動ディバイス・充填検知システムは、実施工に先立ち主桁下端部の实物大模型を用いて充填確認試験を行った上で、実施工に用いられている。このため、コンクリートの配合など条件が異なる場合には注意が必要となる。</p>				

1.3 プレキャスト桁場所打ち接合構造（スプライス PC 構造）

1.3.1 概要

(1) 概要

PC 橋では、径間長が 25m 程度までは工場製のプレキャスト桁が用いられ、径間長が 25m 以上になると現場で製作するポストテンション桁が多く用いられている。これには、工場製のプレキャスト桁に対する公道運搬の制約が影響している。

図-1.3.1 に示す橋梁は、径間の中間部に工場製プレテンション方式プレキャスト桁、端支点部および中間支点部を場所打ち桁で構成され、ポストテンション方式でプレストレスを導入して接合している「プレキャスト桁場所打ち接合構造」を用いた新しい橋梁形式であり、径間長が 40m~60m の中規模径間に適用できる。本橋梁構造における着目すべき技術は、プレテンション部材とポストテンション部材との接合技術である。

(2) 橋梁形式の概要

プレキャスト部材とポストテンション部材とで構成された構造を図-1.3.2 に示す。プレキャスト部材は、高強度コンクリート（50N/mm² 以上）でプレテンション PC 鋼材によりプレストレスを導入したプレテンション桁である。プレテンション部材とポストテンション部材とは、最終的にポストテンション PC 鋼材によりプレストレスを導入し、一体化する。図-1.3.2 の橋梁例は、プレテンション部材は合成桁、ポストテンション部材は場所打ちの箱桁で構成されている。

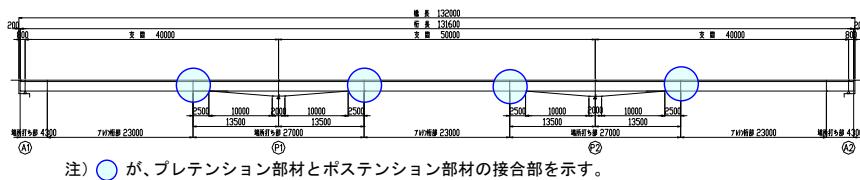


図-1.3.1 プレキャスト桁を用いた PC 構造

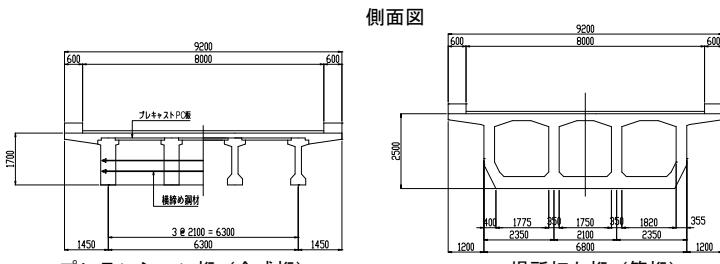


図-1.3.2 本技術を用いた橋梁例

(3) 施工方法

図-1.3.2 に示す橋梁の施工順序を図-1.3.3 に、施工フローを図-1.3.4 に示す。プレテンション桁はクレーン架設または架設架設となり、場所打ち桁は支保工架設となる。本構造では、プレテンション桁と場所打ち桁を場所打ち接合するためにプレテンション桁を先に架設する点が大きな特徴

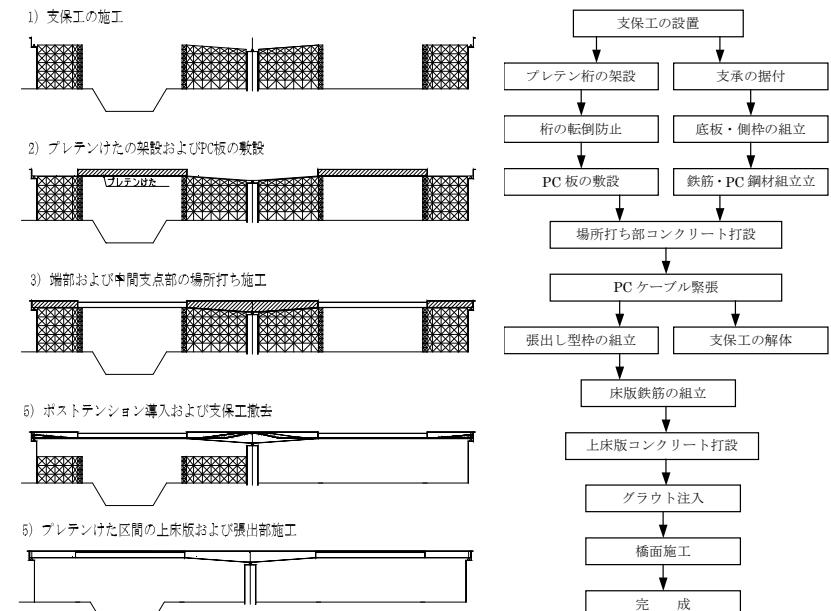


図-1.3.3 施工順序

である。

図-1.3.5 に示す橋梁では、径間中央部のプレキャスト部材に中空床版桁を用いた例である。



図-1.3.5 施工実績

(4) 接合技術

プレテンション桁（合成桁）と場所打ち桁（箱桁）の接合部を図-1.3.6に示す。

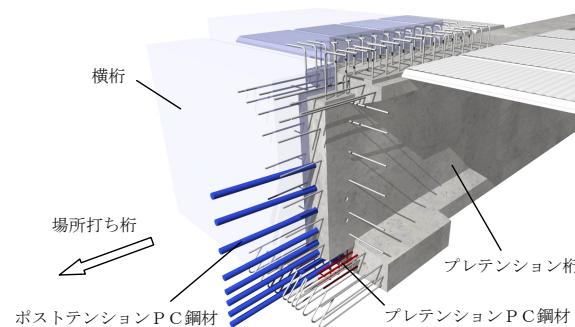


図-1.3.6 接合部

(5) 接合部の構造

- ① ポストテンション PC 鋼材により、プレテンション桁を後施工の場所打ち箱桁と接合する。図-1.3.7に示すとおり、プレテンション桁とポストテンション桁のウエブ厚を擦り付け、連続したポストテンション PC 鋼材の配置に配慮するとともに、桁剛性の連続化も図っている。また、プレテンション PC 鋼材とポストテンション PC 鋼材の配置は、道路橋示方書や PC 工法の規定に従い、PC 鋼材のかぶりや空き、定着体の最小間隔や縁辺距離を確保している。
- ② プレテンション桁の端部は、図-1.3.8に示すとおり場所打ち桁の横桁に突入させ、横桁方向にプレストレスを導入し、周面摩擦力を付加し、接合性能を高めている

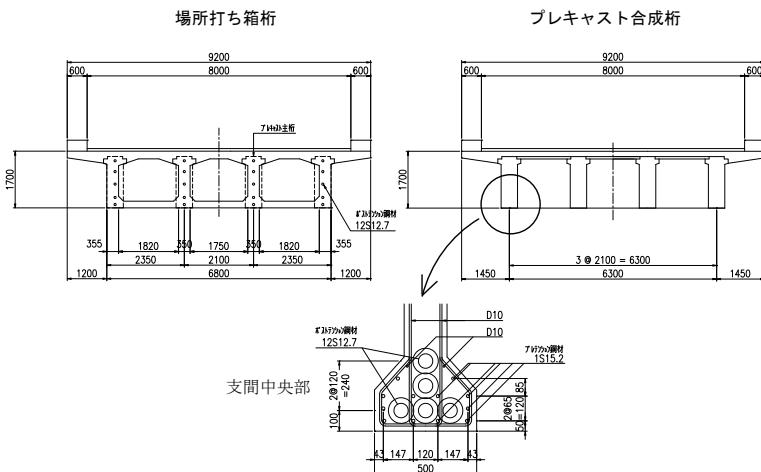


図-1.3.7 PC鋼材配置

- ③ 鉄筋は、プレテンション桁から継手長を突出させることにより、鉄筋の連続性を確保している。
- ④ 接合面は、後打ちコンクリートの付着に配慮し、洗出し等の処理を施す。

接合部の構造を図-1.3.9に示す。ウェット接合で鉄筋やPC鋼材が連続している点では、場所打ち施工の張出し架設や移動支保工等の分割施工で一般的に用いられている接合と同様である。

接合部の外的条件を図-1.3.10に示す。接合部は、プレテンション部材とポストテンション部材で主桁構造が異なるため、基本的に剛性変化を伴い、曲げモーメントのインフレクションポイント付近に位置させることとしている。また、接合する部材の構造や接合に関する本構造に関連した道路橋示方書の規定を表-1.3.1～表-1.3.3にまとめる。

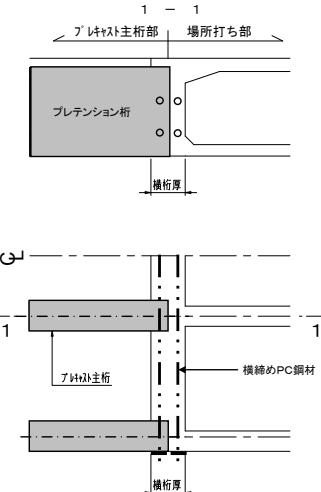


図-1.3.8 接合部の横桁

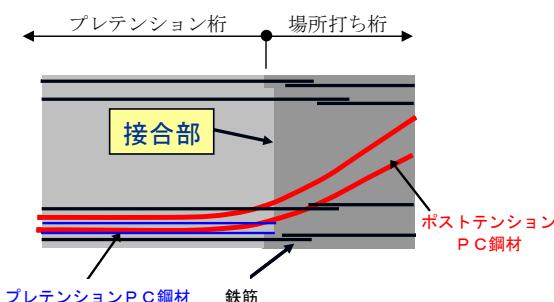


図-1.3.9 接合部の構造

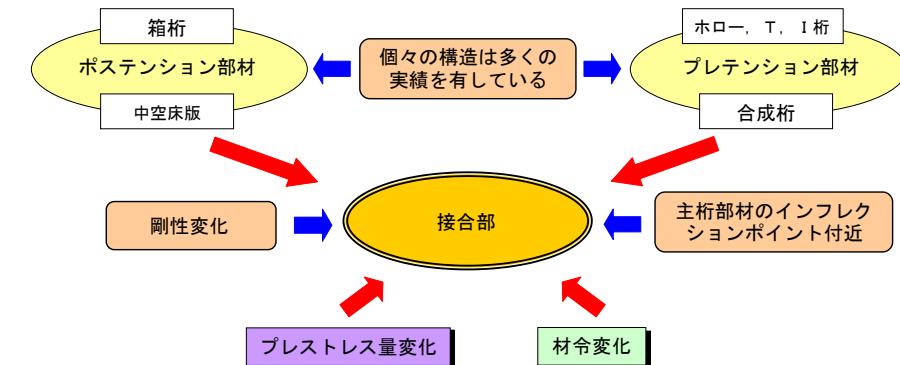


図-1.3.10 接合部の外的条件

表-1.3.1 道路橋示方書Ⅲにおける関連事項 (1)

	構造種類	適用	関係規定	解説要旨	本構造における適用
適用の範囲	床版橋	適宜	相対する2辺が自由で他の2辺が支持される床版橋	道示Ⅲ 8章 床版橋	支間中央部のプレキャストげた区間にHollowげた断面を使用する場合に適用する。
	箱げた橋		断面が箱形をなす橋	道示Ⅲ 10章 箱げた橋	支点付近(端支点及び柱頭部)の構造として使用する。
	合成げた橋		プレキャストコンクリートげたと場所打ち床版とがずれ止めによって結合され、けたと床版とが一体となった合成断面で荷重に抵抗する橋	道示Ⅲ 11章 合成げた橋	支間中央部のプレキャストげた区間に合成げた断面を使用する場合に適用する。
	連続げた	適用	支承により支持され2径間以上連続する橋	道示Ⅲ 12章 連続げた橋	スライスPC橋は一般に2径間以上の橋梁に有効な構造のため適用する必要がある。
	プレキャストセグメント橋	参考	プレキャストセグメント工法により施工する橋	道示Ⅲ 17章 プレキャストセグメント橋	接合部が構造成立上の重要な箇所という点が本構造との共通事項のため参照する。
設計一般	床版橋	適宜	床版橋の各部材寸法は、鉄筋配置やコンクリート打設等の施工が確実に行える寸法とするものとする。	施工の容易な構造とし、寸法等は6章構造細目による。	プレキャストげた部にHollowげた断面を使用した場合に適用する。
	箱げた橋		けた相互のたわみ差によって床版に悪影響をおよぼさない構造とする。		場所打部に多主げた箱断面を使用した場合に適用する。
	合成げた橋	適宜	主げたの支点上には横げた及び隔壁を設ける。	多主げた箱げた橋において、箱げた相互を結合する横げたを設けない場合、橋軸直角方向の剛性が小さくなり荷重分配作用が悪くなり、またけた相互のたわみ差やねじりにより床版に大きな曲げが生じることがある。	場所打箱げた部に適用する。
			主げたには、1支間に1箇所以上の中間横げた及び隔壁を設ける。		場所打げたとプレキャストげたの接合部には、横げたを設けるため、1支間に2箇所となる。
	合成功げた橋	適宜	施工段階ごとの構造系の変化を考慮して設計する。 施工工程を考慮し、各施工段階ごとの応力度及びそれらの合成応力度について照査する。	1. プレストレス導入直後 :けた断面に[直後プレストレス+けた自重] 2. 床版合成時 :けた断面に[有効プレストレス+けた、床版自重] 3. 合成後死荷重作用時 :けた断面に[有効プレストレス+けた、床版自重]+合成断面に[後死荷重] 4. 活荷重作用時 :けた断面に[有効プレストレス+けた、床版自重]が作用+合成断面に[後死荷重+活荷重+クリーフ等の影響]	プレキャストげた部に合成げた断面を使用した場合、左記の検討時期に加え、プレキャストげた架設時、場所打部施工時が加わる。
			プレキャストげたと場所打ち床版におけるコンクリートのクリープ及び乾燥収縮の差を考慮する。	コンクリートのクリープ差と乾燥収縮による平面保持に関する単純桁断面力の算出方法を提示。連続げた橋の場合には、これらを用いて不静定力を算出する。	プレキャストげた部に合成げた断面を使用した場合に適用する。
	連続げた	適用	プレキャストげたの断面形状は、架設時の安全性についても考慮して決定する。	合成げた橋に使用するプレキャストげたは、上フランジ幅が支間に比べ狭いうえにウエブが薄く、横方向の剛性が小さい場合が多いので、架設中の横座屈に対する検討も行って断面形状を決定する必要がある。	プレキャストげた部に合成げた断面を使用した場合に適用する。
			連続げた橋は、施工方法によって施工段階ごとの構造系が変化するので、これを考慮して設計する。	張出し架設工法や移動支保工式架設工法等によって施工される連続げた橋は、構造系が変化したり、材令差による不静定力が生じることがあるので、考慮しなければならない。	スライスPC橋は、段階施工が不可避であり、工場製プレキャストげたと場所打げたとは材令差もあるため、必ず適用する必要はある。
	プレキャストセグメント橋	参考	継目部がない場合のけたとして安全であるとともに、継目部が断面力に対して安全となるようにする。	継目部は、相互のセグメントを確実に接合し、断面力を確実に伝達できる構造とするものとする。	接合部の前後で剛性変化を伴うため、接合部における力(応力)の伝達は重要であり、思想として適用する必要がある。
			施工各段階において、安全性が確保されるようにする。	継目部は、耐久性上の弱点となることのないように配慮するものとする。	一般部と同様の安全性を確保する必要がある。
			継目がないけたとして設計を行うほか、継目部の応力度及び耐力について照査する。	接合面は、主げたの部材軸線に直角に設けるものとする。	支点部の斜角によらず接合部は直角にすることが可能な構造であるため、本規定に従う。



* 接合部に関連する規定

表-1.3.2 道路橋示方書Ⅲにおける関連事項 (2)

	構造種類	適用	関係規定	解説要旨	本構造における適用														
構造解析	床版橋		支持条件や構造形式に応じた解析理論及び解析モデルを用いる。	原則は版理論。ただし、連続床版橋、曲線橋、斜橋等の場合には、格子理論やFEM等により解析。	一般に格子構造解析を使用する。														
			支承条件、斜角等を考慮して版理論により行う。		一般に格子構造解析を使用する。														
			片持床版のある床版橋の構造解析は、片持床版の影響を考慮して行う。	片持床版に作用する荷重や片持床版の剛性の影響を考慮する。	プレキャストげた部にHollowげた断面を使用した場合に適用する。														
			支点反力及び支承線方向の断面力は、支承配置及び斜角の影響を考慮して算出する。	断面力が支承配置及び斜角等によってその分布が変化するため、それらの影響を考慮しなければならない。	プレキャストげた部にHollowげた断面を使用した場合に適用する。														
	Tげた橋		横げたや床版による荷重分配効果を適切に評価できる解析理論及び解析モデルにより行う。	省力化の観点から中間横げたを省略した構造では、主げたへの荷重分配効果や床版へ与える影響について、立体有限要素法等の適切な解析方法によって確認しなければならない。	プレキャストげた部に合成げた断面を使用した場合に適用する。														
			横げたを適切な間隔で設けたTげた橋の断面力は、格子構造理論により算出するものとする。		プレキャストげた部に合成げた断面を使用した場合に適用する。														
			格子構造理論により断面力を算出する場合には、一般に部材のねじり剛性を無視してもよい。	斜角が70°未満の場合及び横げた間隔が広い橋については、ねじりの影響が大きいため、ねじり剛性を考慮して解析し、ねじりに対する検討を行う。	プレキャストげた部に合成げた断面を使用した場合に適用する。														
	箱げた橋		断面形状や幅員と支間の比及び支承条件に応じて、横方向の荷重分配とねじり剛性効果を適切に評価できる解析理論及び解析モデルにより行う。	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">構造特徴</th> <th>解析理論</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>全幅-支間比 0.5以下</td> <td>单一箱げた及び 多重箱げた橋</td> <td>斜角が70°以上 はり理論</td> </tr> <tr> <td></td> <td>斜角が70°以下 格子構造理論</td> <td>格子構造理論</td> </tr> <tr> <td></td> <td>多主げた箱げた橋</td> <td>格子構造理論</td> </tr> <tr> <td>全幅-支間比0.5以上</td> <td></td> <td>格子構造理論</td> </tr> </tbody> </table>	構造特徴		解析理論	全幅-支間比 0.5以下	单一箱げた及び 多重箱げた橋	斜角が70°以上 はり理論		斜角が70°以下 格子構造理論	格子構造理論		多主げた箱げた橋	格子構造理論	全幅-支間比0.5以上		格子構造理論
構造特徴		解析理論																	
全幅-支間比 0.5以下	单一箱げた及び 多重箱げた橋	斜角が70°以上 はり理論																	
	斜角が70°以下 格子構造理論	格子構造理論																	
	多主げた箱げた橋	格子構造理論																	
全幅-支間比0.5以上		格子構造理論																	
単一箱げた橋や多重箱げた橋で幅員と支間の比が0.5未満の場合は、全断面を一つのはりとしたたり理論により断面力を算出すことができる。	適用支間の最小値を40m程度としているため、幅員が20mを超えない状況では、はり理論を適用する。																		
	斜角を有する箱げた橋、多主げた箱げた橋及び幅員と支間の比が0.5以上の多重箱げた橋の場合には、格子構造理論により断面力を算出する。		幅員が20mを超えない状況では、斜角(70度未満)を有する場合に適用する。																
連続げた		下フランジ及びウエブの断面力は、箱げたをわエップ及び下フランジにより構成されるラーメン構造とみなして算出でよい。	橋軸方向に1mの奥行きを有する箱形ラーメン構造にモデル化して算出しても、十分な精度の解が得られる。上フランジは床版の設計に従う。	場所打部の横方向の設計に適用する。															
		プレストレス力、温度の影響、クリープ、乾燥収縮、支点移動による不静定力を考慮するものとする。	複数の固定支承を有する連続げた橋では、温度変化、コンクリートのクリープや乾燥収縮、プレストレス力等による変形が橋軸方向に拘束されることによって不静定力が生じる。このような場合には、橋脚を含めた構造モデルにより解析を行う必要がある。	クリープ、乾燥収縮の影響は、構造系変化、平面保持、プレストレス力の変化等に現れるので、適切にこれらを解析する。															
		複数の固定支承を有する橋は、橋脚を含めた構造モデルにより解析を行う。		本構造は、当面は固定支承を複数有しない構造に適用することを想定しているが、左記に該当する場合は適宜適切な解析を実施する。															
		中間支点上の設計曲げモーメントは、支承幅、げたの高さ、横げた等の影響を考慮する。	中間支点上の曲げモーメントは、はり理論では支点上で尖った分布を示すが、実際のげたでは、支承幅、げたの高さ、横げた等の影響を受けるため、支点上の設計曲げモーメントを式(12.3.1)を用いて計算することができる。	通常橋梁と同様に適用する。															
縫目部の設計	参考	中間支点上の設計曲げモーメントは、式(12.3.1)により算出することができる。		通常橋梁と同様に適用する。															
		縫目部は、相互のセグメントを確実に接合し、断面力を確実に伝達できる構造とするものとする。	縫目部は、橋面上から水は浸透した場合、PC鋼材を腐食させる等の耐久性に関する影響があることから、十分な配慮が必要だ。	接合部の前後で剛性変化を伴うため、接合部における力(応力)の伝達は重要であり、思想として適用する必要がある。															
		接合面は、主げたの部材軸線に直角に設けるものとする。	接合面は、プレストレス力の接合面に沿った分力が極力生じないように、部材軸線に直角に設ける。	接合部のディテールのレベルから、本部位が弱点となるような配慮が必要である。															

* 接合部に関連する規定

表-1.3.3 道路橋示方書Ⅲにおける関連事項 (3)

	構造種類	適用	関係規定	解説要旨	本構造における適用
構造細目	床版橋	適用	断面には温度や乾燥収縮等によって有害なひび割れが生じないように鉄筋を配置するとともに、断面は施工の容易な構造とする	1) 支間方向に配置される引張主鉄筋の直径は13mm以上とし、その中心間隔は200mm以下とする。 2) 版の上側、下側には直径13mm以上の鉄筋を、300mm以下の間隔で配置する。 3) 8.4(4), (5)に部材最小寸法を規定。	場所打ち中空床版断面の採用は考えていない。プレキャストHollowげたでは、本規定は適用できないが、場所打ち部全般に対して適用が可能である。
		不可	斜め床版橋に対しては、作用する断面力に対して有効な鉄筋配置とともに、局部的に発生する応力に対して補強を行うものとする。	版端部の支間軸直角方向と斜角方向の鉄筋配置を、図-8.4.2に規定。	適用可能箇所なし。
		適宜	支間方向のPC鋼材は、断面の単位幅あたりお プレストレス及び偏心量が同一になるように配 置するのが望ましい。	プレストレス及び偏心量が同一でないと、せん断力が発生するので、先のような配置ができない場合は、この影響を考慮する。	プレキャストHollowげたを採用する場合においては特に、桁間せん断力を発生させないという観点から本規定の考え方は重要である。
	箱げた橋	適宜	開口部を設ける場合には、その周辺を補強する。	開口部を設ける場合は、できるだけ応力の小さい位置とし、切断される鉄筋量以上の鉄筋を補強鉄筋として配置する。PC鋼材の定着は開口部から十分離れた位置で行う。	通常橋梁と同様に適用する。
			ウェブの橋軸方向と下フランジ下面の橋軸方 向及び橋軸直角方向には、直径13mm以上の鉄 筋を250mm以下の中心間隔で配置する。	ねじりモーメントに対しても十分な抵抗力を持つ必要があるため、左記の鉄筋を配置し、下フランジとウェブの隅角部にハンチを設け、鉄筋の定着を十分に行う。	通常橋梁と同様に適用する。
		適宜	下フランジの最小厚さは、140mmとする。	上フランジの厚さは7章「床版」、ウェブの厚さは6章「構造細目」の規定を満足しなければならない。	通常橋梁と同様に適用する。
			けたの高変化がある場合は、圧縮力による偏向力とPC鋼材による腹圧力が作用するので、下床版はこれらの力に対して十分な安全性を確保する。	スプライスPC橋では、中間支点部付近において、桁高変化を伴うので、十分な配慮が必要である。	
	合成げた橋	適宜	けたの上フランジの一部を床版に埋め込む場合、結合部の床版は、中間支点としての断面力に対し安全であるとともに、けたと床版の結合構造、合成作用及び施工性に支障をきたさないようにする。	けたの上フランジは、一般に埋め込まなくてよいが、合成作用に直接寄与する箇所なので、施工精度等を考慮すると、支間部の床版厚と同程度するのが望ましい。	プレキャストげた部に合成げた断面を使用した場合に適用する。
			プレキャストPC版を用いる場合には、PC版は場所打ちコンクリートと一緒にするようにする。	けたの上フランジは、一般に埋め込まなくてよいが、合成作用に直接寄与する箇所なので、施工精度等を考慮すると、支間部の床版厚と同程度するのが望ましい。	プレキャストげた部に合成げた断面を使用した場合に適用する。
			けたの上フランジの一部を床版に埋め込む場合、けたの上の床版の最小厚さは150mmとする。	けたの上フランジは、一般に埋め込まなくてよいが、合成作用に直接寄与する箇所なので、施工精度等を考慮すると、支間部の床版厚と同程度するのが望ましい。	プレキャストげた部に合成げた断面を使用した場合に適用する。
		適宜	場所打ちコンクリートと接するプレキャストPC版の上面には、床版の支間方向に凸凹を設けることを標準とする。	一体化させ合成構造とするためには、両者の結合面におけるせん断力の確実な伝達が必要である。	プレキャストげた部に合成げた断面を使用した場合に適用する。
	連続げた	適用	中間支点付近においては、曲げモーメント、せん断力、集中的な支点反力の影響を考慮する。	連続げた橋の中間支点付近は、曲げモーメント及びせん断力が最大となり、かつ集中的な支点反力を受けて応力状態も複雑になる。やはり理論で解析した場合より大きな圧縮力が生じることがあるので、用心鉄筋を配置する必要がある。	通常橋梁と同様に適用する。
		適宜	中間支点付近には、ウェブ及びけた下縁側に用心鉄筋を配置するものとする。	連続げた橋の中間支点付近は、曲げモーメント及びせん断力が最大となり、かつ集中的な支点反力を受けて応力状態も複雑になる。やはり理論で解析した場合より大きな圧縮力が生じることがあるので、用心鉄筋を配置する必要がある。	通常橋梁と同様に適用する。
	連続げた プレキャストげた架設方式連続げた橋の中間支点部	参考	中間支点部の主けたの連結部は、主けたを横げたと確実に結合し、安全性及び耐久性が確保できる構造とする。	1) 横げたには主けたと横げたの結合を確実に行うためにPC鋼材を配置してプレストレスを与えるのが一般的である。 2) 連結鉄筋の重ね継手は、主けたが剛な横げたで橋軸方向に連結されていること等を考慮して、同一断面に集中して配置してよいが、鉄筋に生じる引張応力度を160N/mm ² 以下とすることが望ましい。	接合部の性能項目として適用すべき規定である。
			中間支点部の主けたの連結をRCとする場合、連結鉄筋の重ね継手長は6.6.5に従って算出し、かつ鉄筋径の25倍以上とする。	接合部の場所打ちコンクリート側で鉄筋継手を使用するため、本規定を適用する。	
			中間支点部の主けたの連結をPCとする場合、主けたと床版コンクリートの結合面におけるせん断応力度は11.3(5)によるほか、床版に作用しているプレストレス力を考慮して求める。	接合部の性能項目として適用すべき規定である。	床版部にプレストレスの導入は想定していないため、適用箇所なし。

1.3.2 技術評価の観点と方向性

本構造の要素技術に関連した下記の事項は、**道路橋示方書Ⅲ**によりほぼ網羅されている。

- ① 場所打ち桁：箱桁、中空床版
- ② プレキャスト桁：ホロー桁、T桁、合成桁（PC合成床版タイプ）
- ③ 段階施工を前提とした連続桁構造
- ④ プレキャストブロック工法における接合部構造

以上整理すると、本技術は、接合する両部材がプレキャスト部材でせん断キーを用いるような接合には該当しない。そのため、道路橋示方書にプレテンション部材とポストテンション部材の接合が具体的に規定されていないため、以下の二つの観点から従来の接合技術との相違点を整理し、評価する必要がある。

- ① プレキャスト部材、特にプレテンション部材とポストテンション部材を接合するため、接合部付近でプレストレスの量や分布が変化する。
- ② PC工場等で製作したプレキャスト部材と現地で製作するポストテンション部材を接合するため、接合面でコンクリートの材令が異なる。

これらの観点から考えられる要求性能と課題を表-1.3.4～表-1.3.5にまとめた。

(1) 主げたの安全性

1-1) プレストレス力の算定

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書Ⅲ 6.6.7 PC鋼材の定着】

- (1) 定着具の位置は、部材に所定のプレストレスを導入できるように、また、部材に有害なひび割れが生じないように選ぶものとする。

- (1) プレテンション部材では、PC鋼材はコンクリートとの付着によって定着される。この定着に必要な長さ（定着長）は、Φ15.2までのPC鋼より線の場合その直径の65倍としてよい。なお、せん断応力度を照査する断面が定着長区間にあるときには、その位置でのプレストレス分布を考慮しなければならないが、定着長区間内のプレストレス分布は部材端で0となる二次放物線と考えてよい。

【道路橋示方書Ⅰ 2.2.4 プレストレス力】

- (5) プレストレス直後のプレストレス力は、PC鋼材の引張端に与えた引張力に、次の影響を考慮して算出する。
 - 1) コンクリートの弾性変形
 - 2) PC鋼材とシースの摩擦
 - 3) 定着具におけるセット

- (5) プレストレス直後のプレストレス力の減少はプレテンション方式ではコンクリートの弾性変形を、ポストテンション方式ではコンクリートの弾性変形、PC鋼材とシース摩擦、定着具及びジャッキ内部の摩擦、定着具におけるセットを考慮するものとする。

■技術的課題

- ① 接合部界面のプレテンション部材の端部では、プレストレス力が減少しているため、接合部に対する影響が懸念される。
- ② 後緊張のポストテンションPC鋼材により、プレテンション部材が弾性変形するため、プレテンションPC鋼材のプレストレス力が減少する。

■性能評価の対応策

- ① プレテンション部材の端部におけるPC鋼材のプレストレス減少区間（65φ区間）は、プレストレス力を0～100%の直線変化として評価する。
- ② プレテンションPC鋼材のプレストレス力は、ポストテンションPC鋼材の緊張による部材の弾性変形を考慮して行う。

【解説】

- ① プレテンションPC鋼材のプレストレス減少区間（65φ）は、図-1.3.11に示すとおり、プレテンション部材端で0となる2次放物線の分布となる。この2次放物線の分布区間をプレストレス力が過小評価となるが、容易な0～100%の直線変化に置換し、安全側の算定を行う。

表-1.3.4 要求性能と課題(その1)

道路橋の要求性能		問題認識	想定される状態	橋梁の性能に影響を与える特性及び作用	道示の準用及び前提条件	技術評価の観点	関連項目
種別	性能項目						
使用目的との適合性 (供用時)	<ul style="list-style-type: none"> ・供用性を害するような過大な変位を生じないこと。 ・通行者に不快感を与えるような振動を生じないこと。 (道示III2.1) 	プレテンション部材とボーステンション部材を接合する本接合構造では、接合部近傍でプレストレスの量や分布が変化することや、コンクリートの材齢が異なるため、安全性に疑義がある。	有害なひび割れの発生	<ul style="list-style-type: none"> ・接合部近傍に応力が作用する際に剛性の低い側にひび割れが発生しやすい可能性がある。 ・接合部付近に応力伝達の悪さに起因する応力の局部集中が発生しやすくなる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・道示IIIに準拠した解析手法を用いて断面力を計算する。 ・接合部を跨ぐ横桁を配置して、急激な応力変化を緩和する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・道示IIIに準拠して、プレストレス量を推定することの妥当性 ・道示IIIに準拠して、プレストレスの伝達性能を推定することの妥当性 ・道示IIIに準拠し、各施工時の構造や材齢を考慮して解析することの妥当性 	検証事例-1 検証事例-2 検証事例-3
			コンクリートの引張強度の低下	<ul style="list-style-type: none"> ・一般にコンクリートの打継目は、連続部材と比較して引張強度が低下する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・プレストレスを道示IIIに準拠して算定し、効果的なPC鋼材の配置を行う。 ・適切な補強筋の配置 ・付着力を確保するための打継面処理の実施 	<ul style="list-style-type: none"> ・連続部材に比べ低下すると想定されるコンクリートの引張強度の確認 	検証事例-5
			曲げ破壊	<ul style="list-style-type: none"> ・場所打ち部とプレキャスト部で変形性能が異なるため、通常の設計と実際の曲げモーメント分布が異なる可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・道示IIIに準拠した荷重の組み合わせ、曲げ破壊抵抗モーメントに対して算定する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・道示IIIに準拠した終局荷重時の照査の妥当性 	検証事例-4
安全性 (断面破壊)	断面の破壊によって耐荷性能が失われないこと (道示III2.1)		せん断破壊	<ul style="list-style-type: none"> ・開断面と閉断面が接合されたためせん断流の把握が困難であり、接合部において想定外のせん断力が作用する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・道示IIIにより、せん断力を算出する。 ・接合部断面の左右の応力度に対して検証し、安全側の値に対して配筋する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・道示に準拠した設計であれば、斜角が小さくねじりが卓越した構造でなければ、問題はない。 	—
			耐荷性能の低下	<ul style="list-style-type: none"> ・一般にコンクリートの打継目は、連続部材と比較して耐荷性能が低下する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・プレストレスを道示IIIに準拠して算定し、効果的なPC鋼材の配置を行う。 ・適切な補強筋の配置 ・付着力を確保するための打継面処理の実施 	<ul style="list-style-type: none"> ・連続部材に比べ低下すると想定される耐荷性能の確認 	検証事例-5

表-1.3.5 要求性能と課題(その2)

道路橋の要求性能		問題認識	想定される状態	橋梁の性能に影響を与える特性及び作用	道示の準用及び前提条件	技術評価の観点	関連項目
種別	性能項目						
耐久性	経年的な劣化により供用性、安全性が損なわれないこと (道示III5.1)				・中性化、凍結融解作用、化学的浸食に対する耐久性の検討は、道示III19章等に規定されている材料及び施工の規定に準拠し、一般に検討を省略	・道示に準拠する場合、基本的に性能は満足する。	
	疲労、振動の影響により構造物の安全性が損なわれないこと (道示III2.1)				・道示IIIの許容応力度には、疲労について配慮されており、コンクリート橋では疲労が問題となつことはない。 ・道示IIIの許容応力度を満足するコンクリート橋で振動が問題となつた事例は報告されていない。	・道示に準拠する場合、基本的に性能は満足する。	
	使用目的との適合性や構造物の安全性を確保するために、確実な施工を行える性能を有すること (道示I1.5)				・施工の善し悪しが耐久性に及ぼす影響が大きいことを十分認識し、道示IIIに準拠した構造細目への配慮を設計的に行い、品質を確保する。	・道示に準拠する場合、基本的に性能は満足する。	

② 図-1.3.12に示すとおり、ポストテンションPC鋼材で緊張した場合、プレテンション部材が弾性短縮するため、プレテンションPC鋼材のプレストレス力が減少する。コンクリートの弾性短縮によるプレストレス力の減少量の算出方法は、道路橋示方書に次のように示されており、準拠して算定する。

コンクリートの弾性変形によるPC鋼材の引張応力度の平均減少量は、式(解2.2.1)

及び式(解2.2.2)により算出してよい。

(a) プレテンション方式の場合

$$\Delta \sigma_p = n \cdot \sigma_{cpg} \quad \text{(解2.2.1)}$$

(b) ポストテンション方式の場合

$$\Delta \sigma_p = \frac{1}{2} n \cdot \sigma_{cpg} \cdot \frac{N-1}{N} \quad \text{(解2.2.2)}$$

ここに、 $\Delta \sigma_p$: PC鋼材の引張応力度の減少量 (N/mm^2)

$$n : ヤング係数比 \quad n = \frac{E_p}{E_c}$$

E_p : PC鋼材のヤング係数 (N/mm^2)

E_c : 緊張時の材令におけるコンクリートのヤング係数 (N/mm^2)

σ_{cpg} : PC鋼材緊張によるPC鋼材の図心位置における

コンクリートの応力度 (N/mm^2)

N : PC鋼材の緊張回数 (PC鋼材本数)

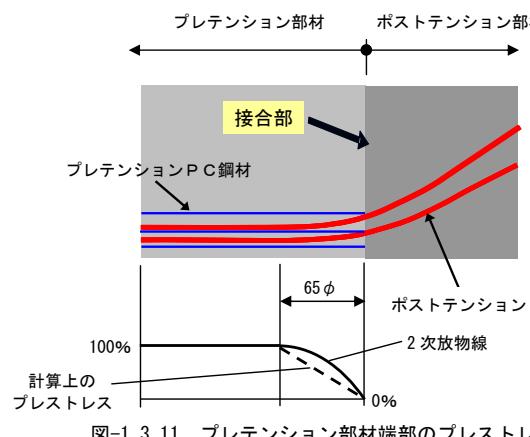


図-1.3.11 プレテンション部材端部のプレストレス

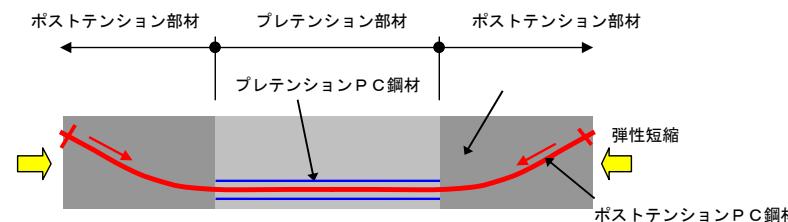


図-1.3.12 弾性短縮によるプレストレス力の減少

[検証事例-1]

1-2) プレストレス力の伝達性状

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書Ⅲ6.6.6 PC鋼材の配置】

- (2) PC鋼材は、コンクリートに局部的な応力が生じたり、鋼材自体に付加応力が生じないように配置するものとする。
- (3) PC鋼材は、部材縁において有害なひび割れが生じないように配置するものとする。

■技術的課題

PC鋼材は、通常コンクリート部材や部材縁に局部的な応力が生じないように配置するが、本接合部では、多主桁構造から箱桁構造に変化するため、部材中のプレストレス力の分布や伝達状況が不明確である。

■性能評価の対応策

道路橋示方書の準拠により、接合部付近の応力度を算定し、接合部の安全性を検証する。さらに、接合部を忠実にモデル化できる高度解析を実施し、直接断面応力度を照査して局部的な応力状態が発生していないことを検証する。

【解説】

本接合部では、図-1.3.13に示すとおり、プレキャスト桁の端部を場所打ち箱桁の横桁に突入させ、主方向にポストテンションPC鋼材によるプレストレスを導入し、一体化している。

接合部では、多主桁構造から横桁を介して箱桁構造に連続した構造となる。そのため、道路橋示方書に準拠した接合部付近の応力度の検証のみならず、各ウェブに配置されたポストテンションPC鋼材のプレストレスの応力分布や伝達状況を3次元ソリッド要素のFEM解析等で確認することは、極めて重要である。

複雑な形状の接合部に対する安全性の検証は、ビーム理論や格子理論で断面力を算定した道路橋示方書準拠の結果とFEM解析等の高度解析の結果を比較した上で、安全性を検証するのが望ましい。

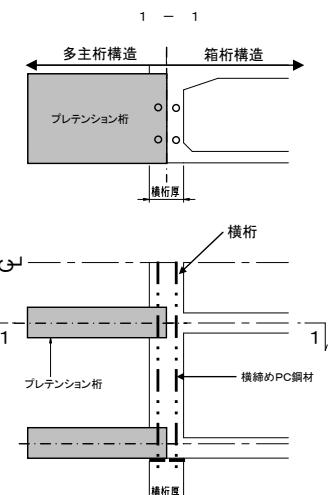


図-1.3.13 接合部の構造

[検証事例-2]

1-3) 部材の材令と構造系変化に対する評価

■関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書 I 2.2.5 コンクリートのクリープ及び乾燥収縮の影響]

- (4) プレストレスの減少量及び不静定力を算出する場合のコンクリートのクリープ係数は、表-2.2.7 の値を標準とする。

表-2.2.7 コンクリートのクリープ係数

持続荷重を載荷するときのコンクリートの材令(日)		4~7	14	28	90	365
クリープ係数	早強ポルトランドセメント使用	2.6	2.3	2.0	1.7	1.2
	普通ポルトランドセメント使用	2.8	2.5	2.2	1.9	1.4

- (5) プレストレスの減少量を算出する場合のコンクリートの乾燥収縮度は、表-2.2.8 の値を標準とする。

表-2.2.8 コンクリートの乾燥収縮度

(普通及び早強ポルトランドセメント使用の場合)

プレストレスを導入するときのコンクリートの材令(日)	4~7	28	90	365
乾燥収縮度	20×10^{-5}	18×10^{-5}	16×10^{-5}	12×10^{-5}

- (7) コンクリートのクリープおよび乾燥収縮の影響により生じる不静定力は、次の規定により算出する。

2) 構造系に変化がある場合

構造物を一度に施工せず、施工中の構造系と施工後の構造系に変化がある場合には、コンクリートのクリープの影響による不静定力は(4)あるいは(6)に規定する値を用いて算出する。なお、この場合に考慮する持続荷重は死荷重、プレストレス力及び乾燥収縮の影響とする。また、……。

- (7) コンクリートのクリープおよび乾燥収縮による変形が拘束される不静定構造物では、この拘束によって不静定力が生じるが、この項はこれらの考え方の基本を示したものである。

2) 構造系に変化がある場合とは、例えば、

- i) プレキャスト桁を架設し、…… 連続桁とする場合
- ii) 片持式架設を行い、…… 連続げたを形成する場合
- iii) 連続げたを1径間ごとに、…… 施工する場合

■技術的課題

本橋梁構造は、プレテンション部材とポストテンション部材を用いるため、材令差が比較的大きい。構造完成迄に構造系が変化するため、断面力にクリープ・乾燥収縮の影響も発生し、接合部に対する影響が懸念される。道路橋示方書では、構造系が変化に関してプレテンション部材とポストテンション部材を組合せた構造例が示されているが、本構造と一致した例がない。

■性能評価の対応策

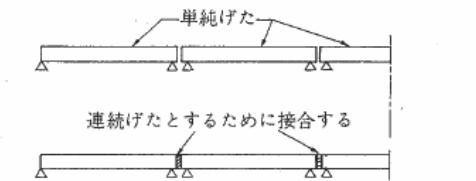
道路橋示方書を準用して、プレテンション部材とポストテンション部材の材令に応じたクリープ係数・乾燥収縮度を算定し、プレストレスや構造系変化を評価し、架設時や設計荷重

時の安全性について検証する。

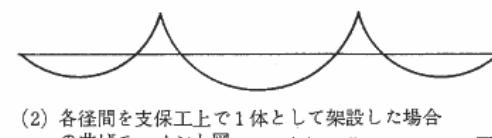
【解説】

構造系が変化した後では、変化する前の構造系におけるクリープ変形が拘束されるため、クリープが進行するとともに、新しく不静定力が発生する。このクリープによる不静定力は、厳密には構造系が変化する時のコンクリート材令から構造系各部のクリープ係数を算定し、持続荷重による断面力を考慮して算出する。

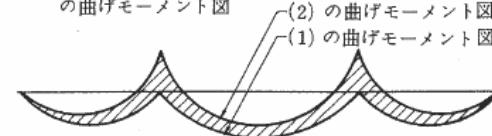
下記に道路橋示方書に示されているプレテンション部材とポストテンション部材を組合せた構造例を示す。



(1) 各径間を単純げたとして架設した場合の曲げモーメント図



(2) 各径間を支保工上で1体として架設した場合の曲げモーメント図



(3) (1) の状態を施工途中で (2) の状態に構造を変更した場合、曲げモーメント図は斜線部の範囲内で変化する。

図-解 2.2.16 単純げたを支点上で結合して連続げたとする場合

[検証事例-3]

(2) 接合部の安全性

2-1) 全体構造に対する接合部の破壊挙動と安全性

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書Ⅲ2.2 設計計算に用いる荷重の組合せ】

- (3) 終局荷重作用時の荷重の組合せは、次のとおりとする。
- 1.3×(死荷重) + 2.5×(活荷重+衝撃)
 - 1.0×(死荷重) + 2.5×(活荷重+衝撃)
 - 1.7×(死荷重+活荷重+衝撃)

(3) 荷重に乗ずる係数については、各荷重のばらつき、施工精度のばらつき等を考慮して、確立論的に定められるべき数値である。

【道路橋示方書Ⅲ2.3 荷重に対する安全性等の照査】

- (1) 構造物の安定性等を確保するために強度、変形及び安定を照査しなければならない。
- (3) (1)を照査するにあたっては、終局荷重作用時に部材に発生する断面力が耐力以下であることを照査しなければならない。
- (3) 終局荷重作用時には2.2.(3)に規定する荷重組合せにより部材断面に作用する設計断面力が断面耐力以下であることを照査することにより、部材の曲げ破壊、せん断破壊、コンクリートの圧壊を防ぎ、構造物の安全性を照査することができる。

【道路橋示方書Ⅳ.2.4 終局荷重作用時の照査】

- (2) 部材断面の破壊抵抗曲げモーメントは、次の規定により算出するものとする。
- 維ひずみは中立軸からの距離に比例する。
 - コンクリートの引張強度は無視する。
 - コンクリートの応力度-ひずみ曲線、図-4.2.2に示したものを用いるものとする。
このときコンクリートの終局ひずみは、表-4.2.2の値を用いるものとする。
 - 鋼材の応力度-ひずみ曲線は、図-4.2.3に示したものを用いるものとする。

■技術的課題

- 本接合部を有する橋梁構造の終局荷重時において、道路橋示方書に示す組合せの終局荷重に対して、安全性が確保されているかどうかが懸念される。
- 本接合部を有する橋梁構造の基本的な破壊抵抗性や破壊挙動を確認する必要がある。

■性能評価の対応策

- 非線形解析の高度解析等を利用することにより、接合部を含め、全体の橋梁構造の部材破壊時における載荷荷重レベルが検証できる。
- 橋梁構造に対して、材料や構造の非線形性が考慮できる高度解析を実施した場合、最も先行して破壊する部位や基本的な破壊挙動が確認できる。

【解説】

本接合部付近では、プレストレス力や部材剛性が微妙に変化している。そのため、橋梁構造の全体に対して、材料や構造の非線形性が考慮できる高度解析等を実施することにより、道路橋示方書に準拠した終局荷重時の安全性の照査よりも、厳密な終局荷重レベルや破壊挙動を検証することが可能である。

道路橋示方書では、部材断面の破壊抵抗曲げモーメント算出時の材料における応力度-ひずみ曲線や終局ひずみを次のように記述している。

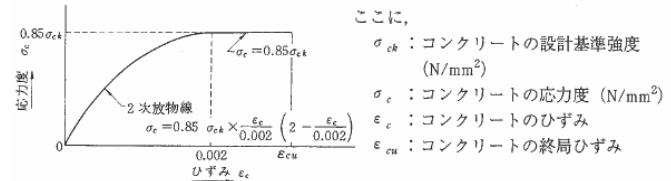
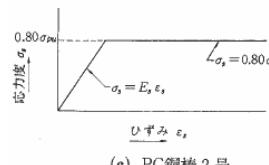
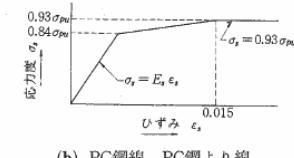
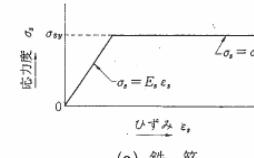


図-4.2.2 破壊抵抗曲げモーメントを算出する場合のコンクリートの応力度-ひずみ曲線

表-4.2.2 コンクリートの終局ひずみ

コンクリートの設計基準強度 σ_{ck} (N/mm^2)	$\sigma_{ck} \leq 50$	$50 < \sigma_{ck} < 60$	$60 \leq \sigma_{ck}$
終局ひずみ ϵ_{cu}	0.0035	0.0035から0.0025の間を直線補間	0.0025



ここに、
 σ_{sy} : 鉄筋の降伏点
 (N/mm^2)
 σ_{pu} : PC鋼材の引張強さ
 (N/mm^2)
 σ_s : 鋼材の応力度
 (N/mm^2)
 E_s : 鋼材のヤング係数
 (N/mm^2)
 ϵ_s : 鋼材のひずみ

図-4.2.3 破壊抵抗曲げモーメントを算出する場合の鋼材の応力度-ひずみ曲線

2-2) 接合部性能の検証

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書Ⅲ17.2 設計一般】

(1) プレキャストセグメント橋は、継目部がない場合のけたとして安全であるとともに、継目部が断面力に対して安全となるようにするものとする。

(2) プレキャストセグメントは、施工各段階において、安全性が確保されるようにするもとする。

【道路橋示方書Ⅲ17.3.1 一般】

(1) 継目部は、相互のセグメントを確実に接合し、断面力を確実に伝達できる構造とするものとする。

(1) プレキャストセグメント橋の安全性は、セグメント継目部の耐荷性能に大きく影響されることから、継目部について、相互のセグメントを確実に接合し、断面力を確実に伝達しなければならないとした。

■技術的課題

道路橋示方書では、プレキャスト部材同士を接合する橋梁構造が示されているが、本接合と合致した特別な接合規定はない。一般に場所打ちコンクリートで接合し、鉄筋が連続する接合では、継目部がない連続部材として設計が行われている。しかし、本構造はプレテンション部材とポストテンション部材の接合であり、コンクリートの材令や強度、プレストレス量が変化するため、接合性能に疑義が生じる。

■性能評価の対応策

道路橋示方書に準拠し、プレテンション部材とポストテンション部材の材令や強度を構造変化を考慮して適切に評価し、架設時や設計荷重時の安全性を検証する。プレテンション部材とポストテンション部材の接合部を再現し、実条件を考慮した試験体に対して、静的繰り返し載荷試験を実施することで、接合部の基本性能を確認することができると考えられる。

【解説】

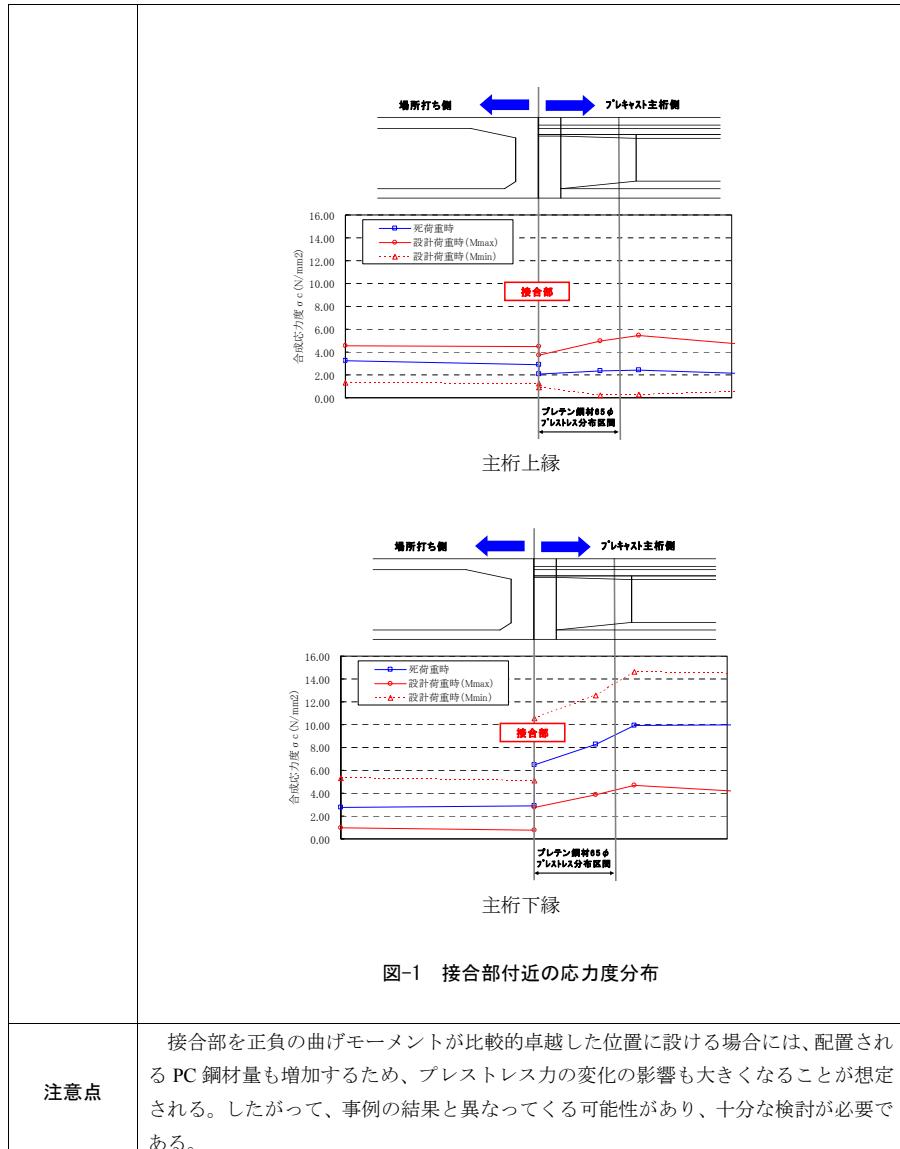
本接合では、基本的には鉄筋やPC鋼材が連続しており、接合性能は高いと考えられる。しかしながら、プレテンション部材とポストテンション部材を接合することにより、接合部で部材剛性、コンクリートの材令や強度、プレストレス力が変化する。安全性が高いと見込まれる構造に対しても、基本的な性能を高度解析や試験体等で検証²⁻²⁻¹⁾しておくことは重要である。

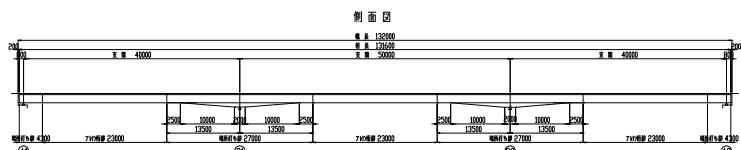
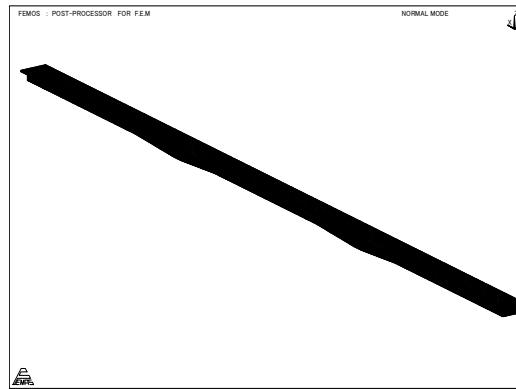
[検証事例-5]

[参考文献]

- 2-2-1) 今村他：スプライス PC 構造に関する実験的研究について、コンクリート工学年次論文集、
Vol. 22, NO.3, 2000

1.3.3 検証事例



		検証事例-2	プレストレスの伝達性状の確認	
	要求性能	使用目的との適合性	関連規定 道路橋示方書Ⅲ6.6.6	
	検証目的	接合部に対するプレストレス力の伝達性状や応力度分布をFEM解析により確認した検証事例。		
	検証方法	実験による検証 · 解析による検証 · 道路橋示方書の準用		
	検証方針	プレテンション合成桁と場所打ち箱桁の上部構造を3次元ソリッド要素で構築し、 ポストテンションPC鋼材によるプレストレス力に対してFEM解析を実施。 プレテンション桁は場所打ち箱桁の横桁に突入していることから、解析モデルは横 桁まで再現。		
	検証内容	(1) 検証概要 ・解析に使用したソフト：FEMLEEGバージョン3.5リリース9 ・使用要素：8節点ソリッド要素（24自由度） ・コンクリートの設計基準強度 プレキャスト桁： $\sigma_{ck}=50\text{N/mm}^2$ PC版： $\sigma_{ck}=50\text{N/mm}^2$ 場所打ち桁： $\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$ 全体構造図を図-1に、FEM解析モデルを図-2に示す。		
		 図-1 全体構造図		
注意点	接合部を正負の曲げモーメントが比較的卓越した位置に設ける場合には、配置されるPC鋼材量も増加するため、プレストレス力の変化の影響も大きくなることが想定される。したがって、事例の結果と異なってくる可能性があり、十分な検討が必要である。			 図-2 3次元FEM解析モデル

(2) モデル化における留意点

主桁を構成する要素グループは以下のとおりである。

- ・プレテンション桁
- ・場所打ち箱桁
- ・PC 板
- ・場所打ち床版

モデル化では、プレテンション桁上の PC 板は実橋を再現し、橋軸方向の不連続性を考慮した上に、主桁と PC 版の境界条件は鉛直方向のみを拘束した。

支承構造は、場所打ち箱桁の端支点ならびに中間支点とともに 2 点支持として、支承面積を考慮した境界条件を設定した。

本解析では、面外方向の変位が発生するような荷重を載荷しないため、断面中央で切斷した 1/2 構造をモデル化することとし、全体モデルと解が等しくなるように橋軸直角方向のみ切斷断面の全節点を拘束した（図-3）。

荷重のプレストレス力は、図-4 に示すとおり、箱桁のウエブならびにプレテンション桁 1 本あたり 12S12.7B を 5 本配置し、初期緊張力を $\sigma_{pi}=1340N/mm^2$ として載荷した。載荷方法は、各ケーブルの定着体と偏向区間にプレストレスを分割した集中荷重を載荷した。

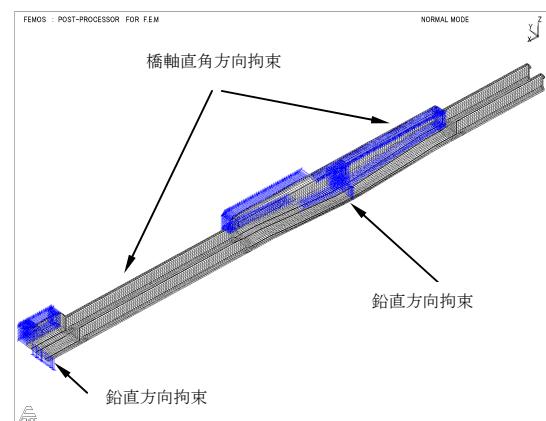


図-3 境界条件

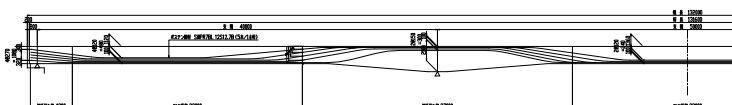


図-4 ポストテンション PC 鋼材配置

(3) 検証結果

接合部付近に着目し、ポストテンション PC 鋼材のプレストレス力による橋軸方向の応力度分布図を示す。主桁上縁を図-5 に、主桁下縁を図-6 に示す。

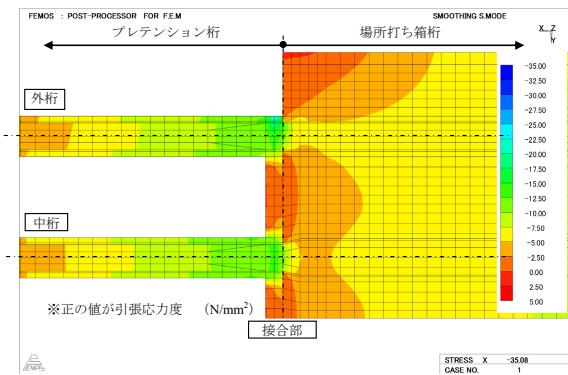


図-5 橋軸方向のプレストレス応力度分布（主桁上縁）

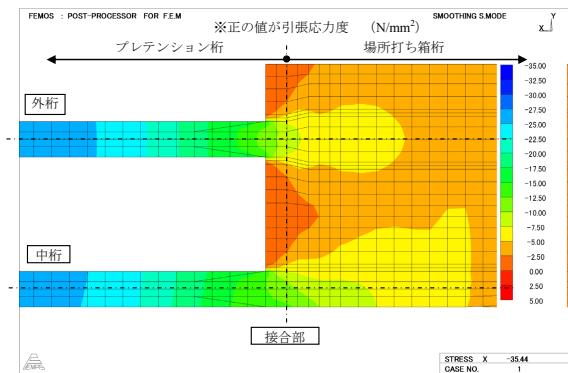


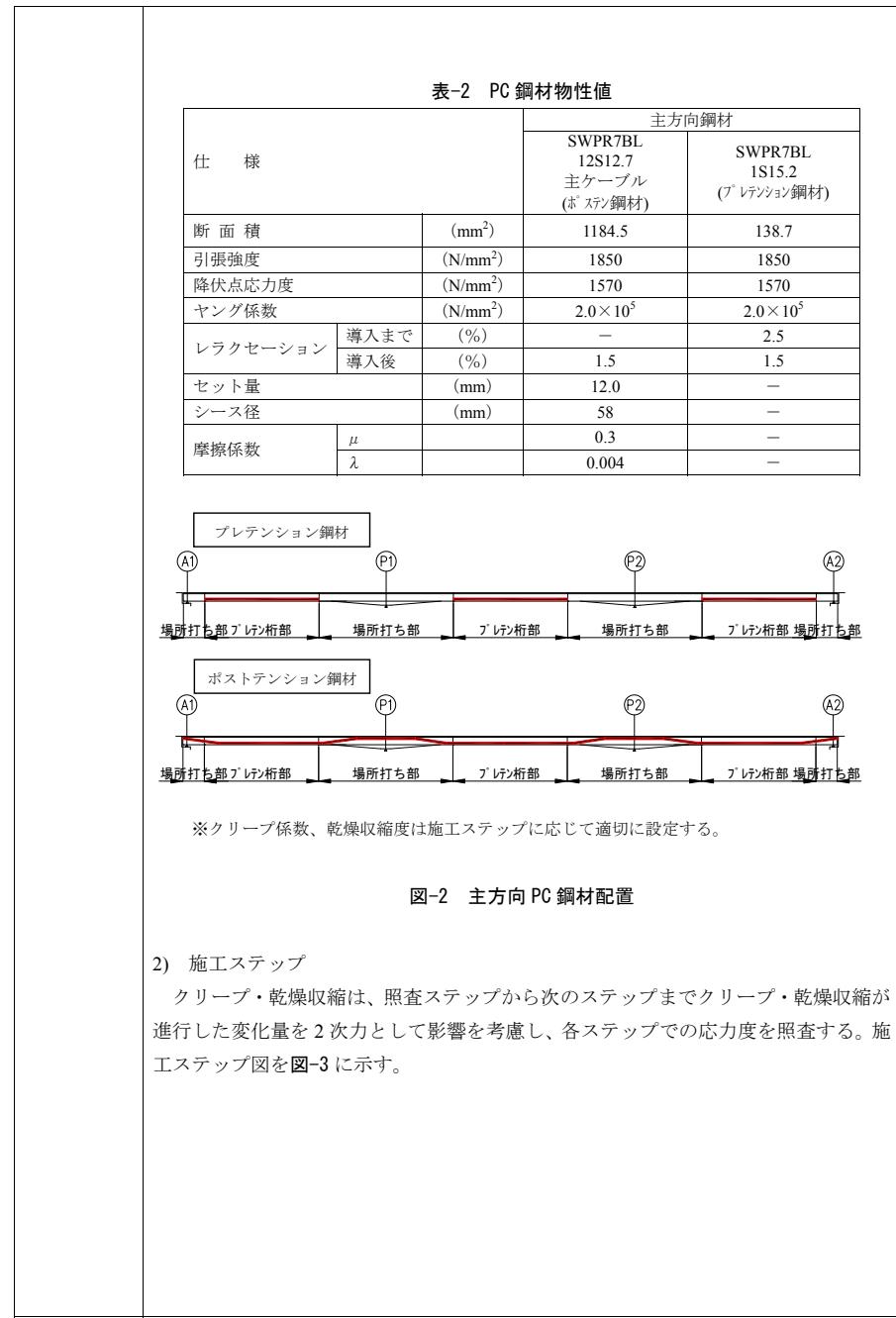
図-6 橋軸方向のプレストレス応力度分布（主桁下縁）

接合部では多主桁構造のプレテンション桁から場所打ち箱桁に部材が変化するため、プレストレス力の応力度分布の乱れが懸念される。本検証例の FEM 解析の結果から、プレストレス力が横桁を介して伝達されていることで、プレテンション桁から場所打ち桁に比較的緩やかにプレストレス力（圧縮応力度）が伝達されていることが分かった。また接合部に局部的な応力度の発生は認められず、安全な接合構造であることが確認された。

注意点

接合部付近のポストテンション PC 鋼材が、接合断面に対して上縁ならびに下縁に片寄って配置された場合、接合部に局部応力が発生する可能性が高くなるため、十分な注意が必要である。

検証事例-3 部材の材令と構造系変化に対する評価方法												
要求性能	使用目的との適合性	関連規定	道路橋示方書 II 2.2.5									
検証目的	プレテンション部材とポストテンション部材の接合部において、材令変化と構造系変化により生じるクリープ・乾燥収縮の影響を道路橋示方書の準用により設定した検証事例。											
検証方法	実験による検証・解析による検証・道路橋示方書の準用											
検証方針	道路橋示方書を準用し、施工工程を考慮した各施工段階毎にクリープ係数と乾燥収縮度の影響を評価。											
検証内容	<p>(1) 検証概要 プレテンション合成桁と場所打ち箱桁の構造を対象とした。</p> <p>1) 材令変化 プレテンション桁とポストテンション桁では材令が異なるため、個々の部材の履歴に対応したクリープ係数および乾燥収縮度を照査日毎に設定する。クリープ係数および乾燥収縮度の変化は、プレストレス力と断面力の算定に影響する。</p> <p>2) 構造系変化の影響 プレキャスト桁とポストテンション桁を用いる構造では、構造系変化が伴うため、構造系変化後に変化前の構造系におけるクリープ変形の拘束による不静定力が発生する。そのため、道路橋示方書 I 2.2.5(コンクリートのクリープ及び乾燥収縮の影響)に準拠し、断面力を算出する際に構造系変化に対して、クリープ・乾燥収縮による変形の影響を考慮する。</p> <p>(2) 検証条件</p> <p>1) 材料</p> <p>表-1 コンクリート物性値 (N/mm²)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>主 桁 (場所打ち部)</th> <th>主 桁 (プレキャスト部)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>設計基準強度</td> <td>40</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>ヤング係数</td> <td>3.10×10^4</td> <td>3.3×10^4</td> </tr> </tbody> </table> <p>図-1 主方向材料特性の違い</p>				主 桁 (場所打ち部)	主 桁 (プレキャスト部)	設計基準強度	40	50	ヤング係数	3.10×10^4	3.3×10^4
	主 桁 (場所打ち部)	主 桁 (プレキャスト部)										
設計基準強度	40	50										
ヤング係数	3.10×10^4	3.3×10^4										



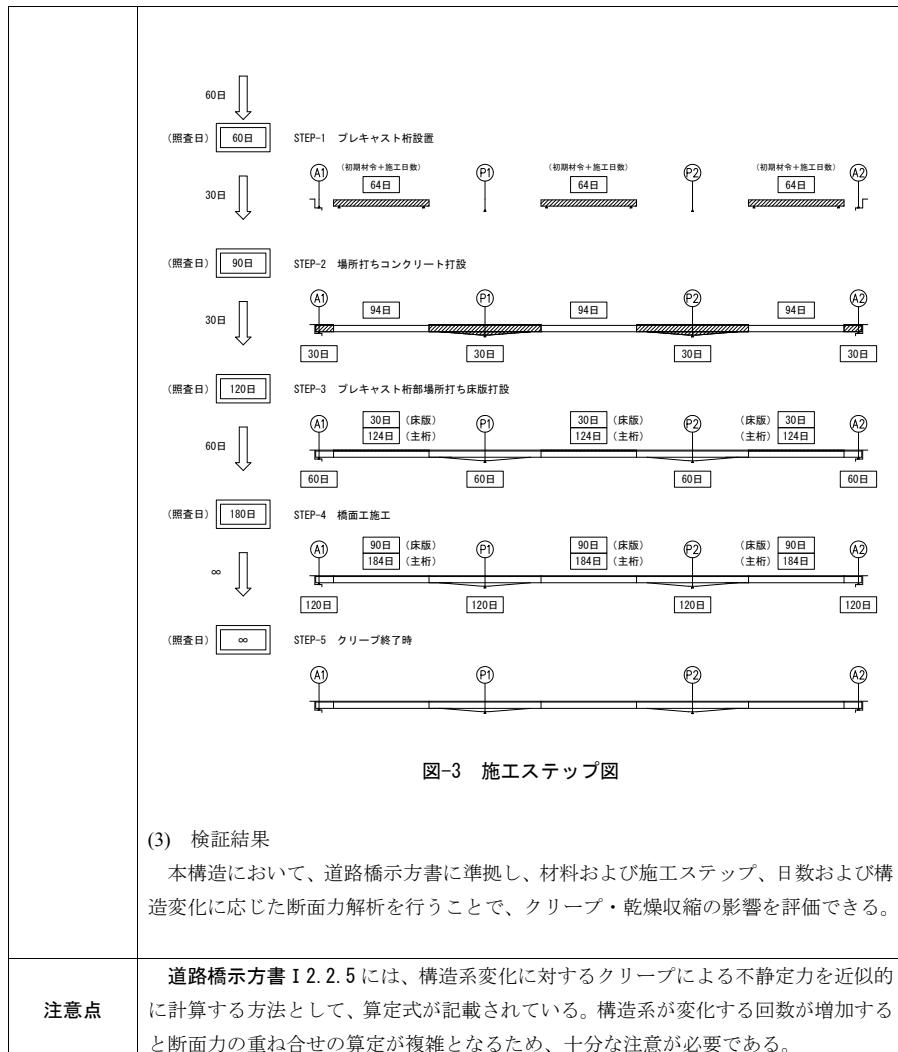
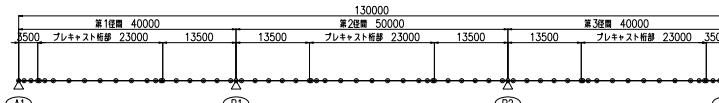
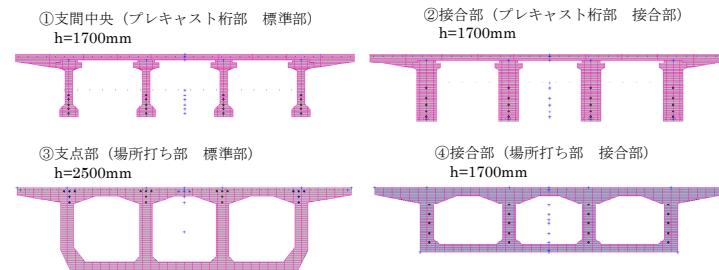


図-3 施工ステップ図

(3) 検証結果

本構造において、道路橋示方書に準拠し、材料および施工ステップ、日数および構造変化に応じた断面力解析を行うことで、クリープ・乾燥収縮の影響を評価できる。

注意点	道路橋示方書 I 2.2.5 には、構造系変化に対するクリープによる不静定力を近似的に計算する方法として、算定式が記載されている。構造系が変化する回数が増加すると断面力の重ね合せの算定が複雑となるため、十分な注意が必要である。
-----	---

検証事例-4	非線形解析による終局荷重状態時の検証		
要求性能	安全性（断面破壊）	関連規定	道路橋示方書III 2.2, 道路橋示方書III 2.3, 道路橋示方書III 4.2.4
検証目的	本接合を有する橋梁構造において、非線形解析を用いて終局荷重状態時の破壊挙動と安全性を検証した事例。		
検証方法	実験による検証 · 解析による検証 · 道路橋示方書の準用		
検証方針	終局限界状態時の検証として、材料非線形性と構造非線形性を考慮するため、定式化にファイバー法を用いた骨組み解析プログラム FRAME 3D (FORUM8) による終局荷重時の材料非線形解析を実施。		
参考文献	<p>(1) 検証概要 モデルは、プレテンション合成桁と場所打ち箱桁の構造である。 着目する検証位置は、①中央径間の接合部と②側径間の接合部の2箇所とする。</p> <ol style="list-style-type: none"> 対象荷重：死荷重+活荷重（衝撃含む）+内ケーブルプレストレス 解析手法：荷重増分法による非線形解析 モデル化：3径間全体骨組みモデル（A1～A2）  <p>図-1 解析モデル</p> <p>4) 材料：コンクリート $\sigma_{ek}=40\text{N/mm}^2$ (場所打ち部) $\sigma_{ck}=50\text{N/mm}^2$ (プレキャスト桁)</p> <p>P C鋼材 SWPR7BL 12S12.7B (ポストテンション鋼材) SWPR7BL 1S15.2B (プレテンション鋼材)</p> <p>5) 断面 (ファイバーモデル)</p>  <p>図-2 断面ファイバーモデル</p>		

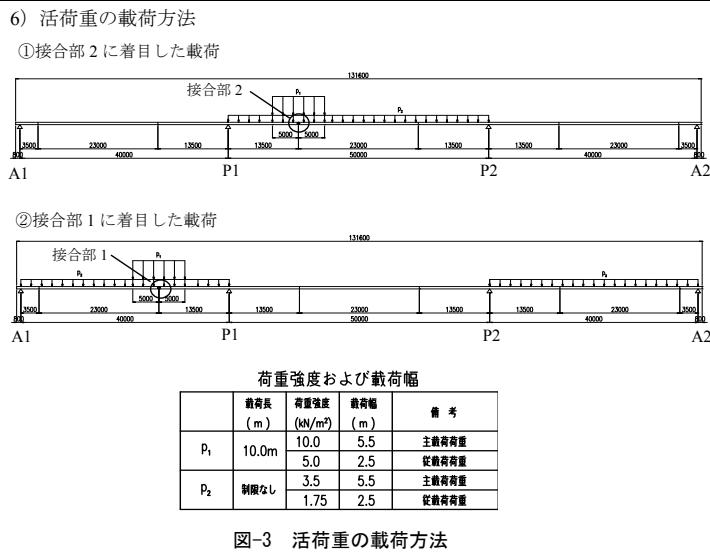


図-3 活荷重の載荷方法

上記の①と②の載荷パターン各々に対し、以下の 2 式を用いた載荷を行う。

- ① P+1.3D+ α (L+i)
- ② P+ α (D+L+i)

①では α は 2.5 以上、②では α は 1.7 以上になるかを確認する。

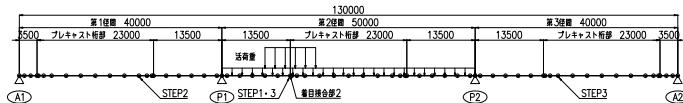
(2) 検証結果

1) 終局荷重状態における破壊形態

各ケースの履歴を以下に示す。

①中央径間 【P+1.3D+ α L】

活荷重：中央径間載荷 着目接合部 2



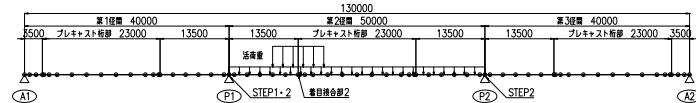
STEP1… $\alpha=5.6$ 着目接合部の箱桁側にて下縁の鋼材が第 1 降伏点を超える。

STEP2… $\alpha=5.9$ 第 1 径間接合部付近のプレテンション桁の部材下縁にてコンクリートの終局歪みを超える。

STEP3… $\alpha=6.5$ 着目接合部（箱桁側）にて上縁のコンクリート歪みが終局歪みを超える。同時に第 3 径間接合部付近のプレテンション桁の部材下縁にてコンクリート歪みが終局歪みを超える。

②中央径間 【P+ α (D+L)】

活荷重：中央径間載荷 着目接合部 2

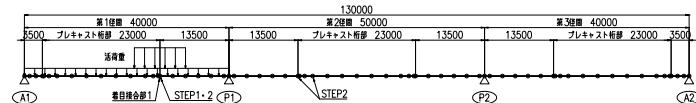


STEP1… $\alpha=2.6$ P1 支点の上縁にて鋼材が第 1 降伏点を超える。

STEP2… $\alpha=2.9$ P1 支点および P2 支点下縁にてコンクリートの終局歪みを超える。以降収束せず、解析が中断した。

③側径間 【P+1.3D+ α L】

活荷重：側径間載荷 着目接合部 1



STEP1… $\alpha=4.4$ 着目接合部の箱桁側にて下縁の鋼材が第 1 降伏点を超える。

STEP2… $\alpha=5.4$ STEP1 で第 1 降伏点を超えた接合部の上縁にてコンクリート歪みが終局を超える。

STEP3… $\alpha=5.5$ STEP2 と同時に中央径間接合部および接合部付近のプレテンション桁の部材下縁にてコンクリートの終局歪みを超える。

④側径間 【P+ α (D+L)】

活荷重：側径間載荷 着目接合部 1



STEP1… $\alpha=2.5$ P1 支点の上縁にて鋼材が第 1 降伏点を超える。

STEP2… $\alpha=2.9$ 着目接合部の上縁および P1 支点下縁にてコンクリートの終局歪みを超える。以降収束せず、解析が中断した。

前述した結果より接合部に不利になるように活荷重を載荷し、解析を行ったが、活荷重を中央径間の接合部 2 に着目したケースでは最初に終局破壊に至るのは接合部ではなく、接合部付近もしくは支点上の部材であった。一方、活荷重を側径間に載荷して接合部 1 に着目したケースでは、接合部 1 のコンクリート歪みが他の部材より先に終局を超え、破壊に至る結果となった。

	<p>2) 終局荷重作用時の安全性の確認</p> <p>終局荷重作用時の断面力係数 αについて、解析結果の一覧を表-1に示す。解析結果より、αは2.9~5.9となり、道路橋示方書の終局荷重時の断面力係数である $\alpha = 1.7$ および $\alpha = 2.5$ をはるかに超えている。そのため、本接合部を有する全体構造が道路橋示方書の示す終局荷重よりも大きい荷重で部材が破壊することが判る。</p>																				
	<p>表-1 終局荷重作用時の断面力係数 α</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">活荷重 載荷位置</th> <th rowspan="2">適用式</th> <th colspan="2">α</th> </tr> <tr> <th>解析結果</th> <th>道示 終局時規定値</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">中央径間</td> <td>P+1.3D+αL</td> <td>5.9</td> <td>2.5</td> </tr> <tr> <td>P+α(D+L)</td> <td>2.9</td> <td>1.7</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">側径間</td> <td>P+1.3D+αL</td> <td>5.4</td> <td>2.5</td> </tr> <tr> <td>P+α(D+L)</td> <td>2.9</td> <td>1.7</td> </tr> </tbody> </table>	活荷重 載荷位置	適用式	α		解析結果	道示 終局時規定値	中央径間	P+1.3D+ α L	5.9	2.5	P+ α (D+L)	2.9	1.7	側径間	P+1.3D+ α L	5.4	2.5	P+ α (D+L)	2.9	1.7
活荷重 載荷位置	適用式			α																	
		解析結果	道示 終局時規定値																		
中央径間	P+1.3D+ α L	5.9	2.5																		
	P+ α (D+L)	2.9	1.7																		
側径間	P+1.3D+ α L	5.4	2.5																		
	P+ α (D+L)	2.9	1.7																		

	検証事例-5 試験体による耐荷力の検証		
要求性能	使用目的との適合性 安全性	関連規定	道路橋示方書Ⅲ17.2, 道路橋示方書Ⅲ17.3.1
検証目的	接合部を再現した実験により、プレテンション部材とポストテンション部材の接合部の耐荷力を検証した事例。		
検証方法	[実験による検証] ・ 解析による検証 ・ 道路橋示方書の準用		
検証方針	<p>試験体を製作し、以下の要素に注意して接合部を再現して静的繰り返し載荷実験を実施。</p> <p>① コンクリート強度(付着強度) プレテンション部材とポストテンション部材では、基本的に強度が異なる。</p> <p>② プレストレス量の変化</p> <p>③ 接合部横桁の拘束効果 横桁には、横縦PC鋼材でプレストレスを導入しており、拘束効果を確認。</p>		
参考文献	1) 今村 他：スプライスPC構造に関する実験的研究について、コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, NO.3, 2000		
注意点	プレテンション部材とポストテンション部材との接合構造において、多主桁と場所打ち箱桁を接合するような構造では、接合部に横縦PC鋼材のプレストレス等で横拘束することが有効であることが、実験結果により確認されている。したがって、接合部の設計において、横縦PC鋼材の配置や横方向鉄筋量等、十分な検討が必要である。		

1.4 新しい桁連結構造

1.4.1 概要

(1) 概要

本構造は、図-1.4.1.1に示すように、プレキャストPC単純桁を中間支点部の床版だけで連結する連続桁構造である。従来の横桁を連結する連結桁（図-1.4.1.2～1.4.1.3）と比較して、上部工の軽量化や施工の省力化などにメリットがあり、海外では新設橋への適用も報告されている（図-1.4.1.4～1.4.1.5）が、国内では都市高速道でのノージョイント化工事としての補修事例（図-1.4.1.6～1.4.1.7）があるだけである。ここでは、新設橋へ適用する際の課題について検討するものである。

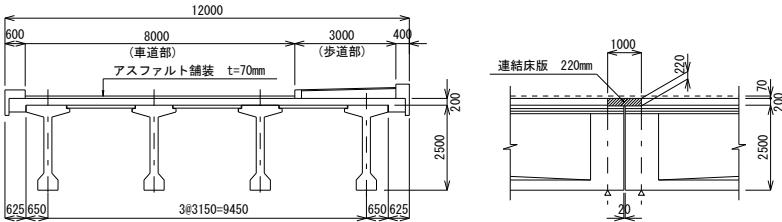


図-1.4.1.1 新しい桁連結構造

以下に、従来の連結桁の構造、海外での新設橋への適用事例および都市高速道でのノージョイント化工事としての補修事例を紹介する。

(2) 従来の連結桁

従来の連結桁の中間支点部構造のイメージを図-1.4.1.2に示す。鉄筋の重ね継手長から決められる2m程度の大きな横桁を介して、正負の曲げモーメントに抵抗する上下縁の鉄筋を配置している。また、同じく詳細図を図-1.4.1.3に示すが、主桁と横桁の一体化のために、横締めPC鋼材を配置しており、複雑な配筋となっている。横桁を介した連結を提案する床版連結にすることで、軽量化と構造の簡素化が図れることが容易に理解できる。

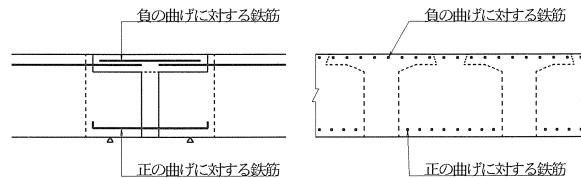


図-1.4.1.2 従来の連結桁 中間支点部のイメージ 1-4-1

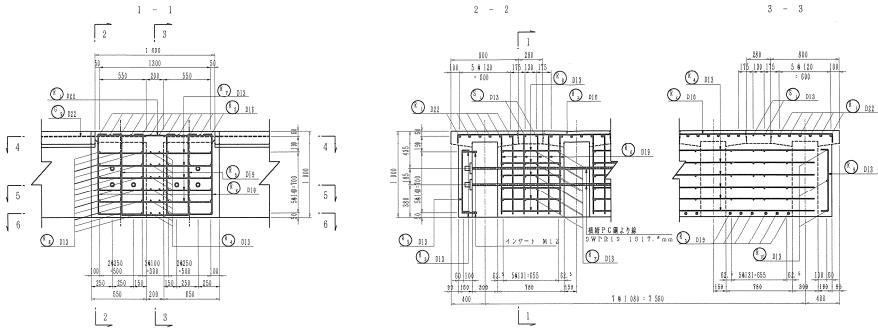


図-1.4.1.3 従来の連結桁 中間支点部詳細図 1-4-1

(3) 適用事例

3-1) 海外での適用事例

海外における新設施工事例には、トルコのプレキャスト単純U断面桁がハンマーHEAD型の橋脚を挟むように床版で連結した事例（図-1.4.1.4）と、バンコクやテキサスのスパンバイスパンで施工されるプレキャストセグメント単純箱桁を床版で連結した事例（図-1.4.1.5）がある。ゴム支承やバッファーアー等により、耐震上の連続化を図っているものと推察されるが、要求性能や設計法に関しては不明である。

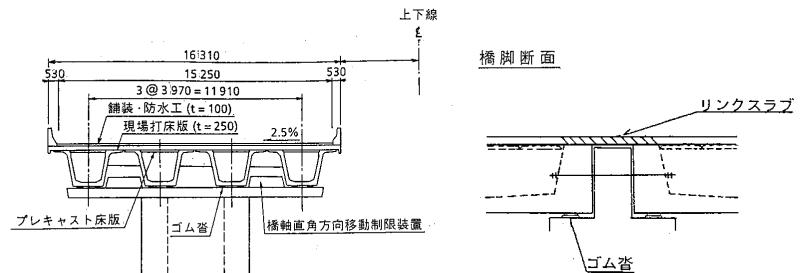


図-1.4.1.4 海外事例（トルコ高速道路橋）¹⁻⁴⁻²⁾

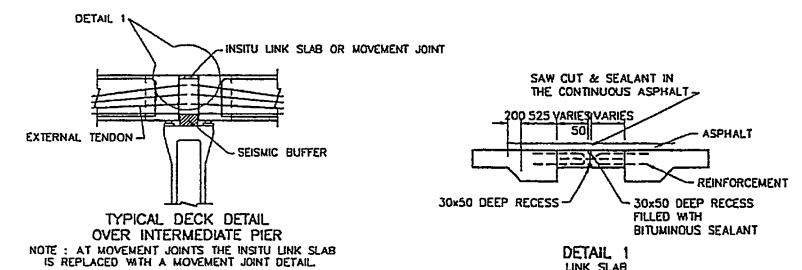


図-1-4-1-5 海外事例（バンコク第2高速道路橋）1-4-3), 1-4-4)

最近では、既設橋の耐震連結としての有用性を報告した文献¹⁻⁴⁻⁵⁾「Seismic Performance of Multispan Bridges Retrofitted with Link Slabs」2002年や、連結床版にECCを適用した文献¹⁻⁴⁻⁶⁾「Performance of Bridge Deck Link Slabs Designed with Ductile Engineered Cementitious Composite」2004年があり、注目されていることが伺われる。

文献¹⁻⁴⁻⁵⁾では、1994年Northridge地震以降、連結床版は、既設の多径間単純桁橋の落橋防止システムとして、耐震連結ケーブルや橋座拡幅に代わる補強手段であると推奨されたこと、また1999年トルコIzmit地震の際に連結床版を採用した32橋の跨道橋が一切落橋しなかったことを紹介している。

文献¹⁻⁴⁻⁶⁾については、ミシガン州運輸局(MDOT)の技術レポートとして設計ガイドライン¹⁻⁴⁻⁷⁾が発刊されており、主桁作用による負の曲げモーメントに対して設計する手法が採られている。概要を1.4.3参考資料にまとめたので参考にされたい。

3-2) 国内での適用事例

国内における事例には、旧阪神高速道路公団や旧首都高速道路公団でPC単純合成桁(図-1.4.1.6~1.4.1.7)のノジョイント化として試験的に採用しており、鋼橋を含めた基準「既設橋梁のノジョイント工法の設計施工手引き(案)道路保全技術センター(平成7年)」¹⁻⁴⁻⁸⁾が発刊されている。

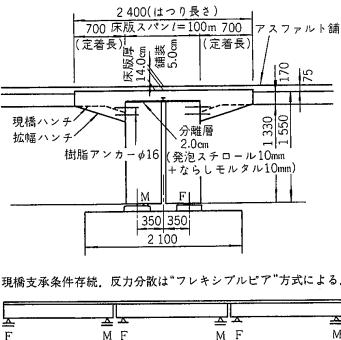


図-1.4.1.6 阪神高速道路大阪堺線¹⁻⁴⁻⁹⁾

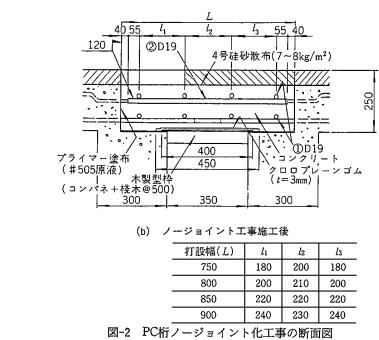


図-1.4.1.7 首都高速道路7号小松川線¹⁻⁴⁻¹⁰⁾

(4) 本構造の適用範囲

前述したように、海外では支間45mの4径間連続PC箱桁橋(橋長約180m)、国内では3~5径間のプレキャスト桁の連結化に実績があり、当面は、最大橋長200m程度までの等スパン、等橋脚高の条件を適用範囲と考え、支間22.1m、橋長138mの6径間連結プレテンションT桁橋および支間36.5m、橋長224mの6径間連結コンボ橋の2ケースの試設計を行い、適用性を確認した。なお、試設計の結果については、1.6.2試設計を参照のこと。

下記に示すとおり、道路橋示方書では本構造を適用範囲外としている。

[道路橋示方書III12.1 適用の範囲]

(解説)

この章は、連続桁橋に特有の事項について規定したものであり、プレキャスト単純桁を架設した後、中間支点部を場所打ちして鉄筋コンクリート構造又はプレストレストコンクリート構造で連結するプレキャスト桁架設方式連続桁橋についても適用する。ただし、伸縮継手部のみをコンクリート床版で連結する形式の橋は、この章の適用範囲外とする。

上記下線部はわかりにくく表現となっているが、**道路橋示方書IIIコンクリート橋編(平成2年2月)10章連続桁橋**では下記に示す表現となっており、下線部の構造は単純桁として設計され、連続桁橋の範疇ではないことを説明しているものと考えられる。ただし、このような床版をどのように設計するかについては規定されていない。

[道路橋示方書III10.1 適用の範囲]

(解説)

なお、この章は、プレキャスト単純TげたまたはIげたを架設した後、中間支点横げたを場所打ちして鉄筋コンクリート構造で連結し、中間支点上は2点支承とする連続げた橋、およびプレキャスト単純げたを架設した後、床版と中間支点横げたを場所打ちしてプレストレストコンクリート構造で連結し、中間支点上を1点支承とする連続げた橋についても適用する。ただし、構造解析は単純げたとして行い伸縮継手部をコンクリート床版で連結する形式の橋は、この章の適用範囲外とする。

ここでは、このような床版(以下、連結床版)の設計手法の一例として、主桁と同様の一次部材と考え、床版および主桁(上部構造)としての要求性能を満たすことを検証した事例を示すものとする。

[参考文献]

- 1-4-1) プレストレスト・コンクリート建設業協会:PC 連結げた橋設計の手引き(案), pp.18, pp.29, 平成 10 年 6 月
- 1-4-2) 高速道路調査会:21 世紀の橋梁技術検討小委員会, 橋梁の単純化に関する調査検討報告書, pp.79-92, 平成 5 年 10 月
- 1-4-3) 高速道路調査会:21 世紀の橋梁技術検討小委員会, 橋梁の単純化に関する調査検討報告書, pp.9-29, 平成 5 年 10 月
- 1-4-4) T.Takebayashi,H.Kitayama: Bangkok Second State Expressway The Use of External Tendons and Dry Joints with Precast Segmental Construction,FIP Symposium Kyoto,Japan,pp.943-950,1993
- 1-4-5) A.Caner,E.Dogan,P.Zia: Seismic Performance of Multisimple-Span Bridges Retrofitted with Link Slabs,Journal of Bridge Engineering,pp.85-93,2002
- 1-4-6) Yun Yong Kim,Gregor Fischer VictoRC.Li: Performannce of Bridge Deck Link Slabs Designed with Ductile Engineered Cementitious Composite,pp.792-801,2004
- 1-4-7) VictoRC.Li,G.Fischer,Y.Kim,M.Lepech,S.Qian,M.Weimann,S.Wang: Durable Link Slabs for Jointless Bridge Decks Based on Strain-Hardening Cementitious composites, MDOT Technical Report RC-1438,pp.1-96,2003
- 1-4-8) 道路保全技術センター：既設橋梁のノージョイント工法の設計施工手引き（案），平成 7 年
- 1-4-9) 中島 拓：伸縮装置，橋梁と基礎, pp.61-80, 1986.8
- 1-4-10) 犬生輝巳, 大塚秀樹, 小林正紀：首都高速 7 号小松川線の全面通行止め補修工事—ノージョイント化工事—, 橋梁と基礎, pp.124-125, 1992.8

1.4.2 技術評価の観点と方向性

本構造は、横桁上で面的に間接支持された版であり、隣接する主桁の曲げ変形に追従する曲げ運動を示す。また、連結床版は RC 構造として設計しており、ひび割れの発生を前提としているものの、有害なひび割れは許容できない。さらに、先行施工された単純桁間に後打ちするため、外的に拘束され、乾燥収縮等によるひび割れが発生しやすい構造もある。したがって、一般の床版のように直接載荷される輪荷重の影響を強く受ける破壊形態とはならないと推察されるものの、耐久性に悪影響を及ぼすような有害なひび割れの発生を抑制するとともに、床版として安全な走行を確保することを目標とする。さらに、地震時の損傷を許容する伸縮装置との差異を明確にするため、あくまでも構造部材としての性能を期待し、レベル 2 地震時においても応急復旧を行わずに供用できることを目標とする。

本構造を採用するにあたっての問題認識を抽出すると下記のとおりである。

- ・ 従来の連結桁は、主桁部と同等以上の剛性を持つ RC 横桁で連結されている。連結床版だけで連結化した場合、一部が極端な変断面構造となり、道路橋示方書の準用に疑義が生じる。連結床版部に過大な断面力が発生したり、従来の連結桁に比べて主桁のたわみが大きくなるなど、供用性が危惧される。
- ・ 主桁に支持された従来の床版と構造が異なるため、疲労耐久性が危惧される。また、床版支間の方向が車両進行方向に平行な場合となるが、橋軸直角方向（配力筋方向）の設計に道路橋示方書を準用することに疑義が生じる。
- ・ 類似構造にインテグラル橋や延長床版等があるが、ひび割れ等の損傷事例が報告されており、施工性、維持管理性が危惧される。また、伸縮装置として考えた場合、路面の平坦性や水密性の確保も必要である。
- ・ 地震時の損傷や落橋など、耐震性が危惧される。

各課題への対応策および検証の手法を表-1.4.2.1 にまとめて示す。

表-1.4.2.1 要求性能と課題

道路橋示方書の要求性能		問題認識	対応策(検証課題)	検証の手法	
床版	使用目的の適合性 【供用性】 道示Ⅲ7.2(1)②) 疲労耐久性を損なう有害な変形を生じない	従来の連結桁は、主桁部と同等以上の剛性を持つRC横桁で連結されている。連結床版だけで連結化した場合、連結床版部に過大な断面力が発生すること、従来の連結桁に比べて主桁のたわみが大きくなることが危惧される。	施工に伴う構造系の変化、プレキャスト桁との材齢差により、連結床版部に過大な断面力が発生することが考えられる。 多径間連続桁となるため、温度変化や収縮の影響により、連結床版部に過大な断面力が発生することが考えられる。 主桁と連結床版との剛性差および図心のずれにより、連結床版部に過大な断面力が発生することが考えられる。	施工順序および各部材の材齢差を適切に考慮する。 温度変化や収縮の影響を適切に考慮する。	道示Ⅲ12.2に準拠
	構造物の安全性 【耐荷力性能】 道示Ⅲ7.2(2) 直接支持の活荷重等の影響に対して安全	主桁に支持された従来の床版と構造が異なるため、疲労耐久性が危惧される。	一般的な桁高のPC桁で活荷重たわみや振動が問題となることはない。また、中間支点の支承回転角を通常より大きく設定する必要があるかどうかを検討する。	道示Ⅲ2.3(4)解説、I 4.1.3解説に準拠	
	耐久性 【疲労耐久性】 道示Ⅲ7.2(1)③) 自動車の繰り返し通行に対して、疲労耐久性が損なわれない	主桁に支持された従来の床版と構造が異なるため、疲労耐久性が危惧される。	連結床版部の曲げ破壊が構造全体の崩壊を誘導することがないか。	道示Ⅲ12.4.2に準拠	
	耐久性 【材料耐久性】 道示Ⅲ5.1 コンクリートの劣化、鉄筋の腐蝕等により性能が損なわれない	類似構造にインテグラー橋や延長床版等があるが、ひび割れ等の損傷事例が報告されており、何らかの耐久性向上策が必要である。	輪荷重により押抜せん断破壊することがないか。	道示Ⅲ7.3に準拠	
	施工品質の確保 【施工性】 道示Ⅲ19.3 設計において前提とされた諸条件等が満足されるように施工	類似構造にインテグラー橋や延長床版等があるが、ひび割れ等の損傷事例が報告されており、何らかの耐久性向上策が必要である。	橋面施工から活荷重載荷までの間に曲げモーメントが交番するため、貫通ひび割れとなる可能性が高い。この点は、従来の中間支点上のRC床版と同様であるが、主桁に支持されていない点が異なる。	道示Ⅲ12.4.2に規定される連結桁の中間支点部における鉄筋の許容応力度(160N/mm ²)ではなく、鉄筋応力度を活荷重の繰り返し載荷を考慮した床版としての許容応力度(120N/mm ²)に抑える。	
	維持管理の容易性 【維持管理性】 道示Ⅰ1.5(1) 点検・調査、補修作業等が容易に行える	類似構造にインテグラー橋や延長床版等があるが、ひび割れ等の損傷事例が報告されており、何らかの耐久性向上策が必要である。	実験等により疲労耐久性を検証する。	道示Ⅲ3.3に準拠	
	構造物の安全性 【耐震性】 道示Ⅴ14.3.2 応急復旧を行わずとも長期的供用性を維持 道示V16.1 想定を超える地震力や変位・変形に対しても落橋しない	地震時の損傷や落橋が危惧される。 ※1	死荷重時における鉄筋応力度を100N/mm ² 以下に抑える。	道示Ⅲ.3に準拠	
上部構造	構造物の安全性 【耐震性】 道示Ⅴ14.3.2 応急復旧を行わずとも長期的供用性を維持 道示V16.1 想定を超える地震力や変位・変形に対しても落橋しない	地震時の損傷や落橋が危惧される。 ※1	劣化因子の進入を防止する。	道示Ⅲ.5.2、6.6.1、道示Ⅰ5.3に準拠	
			ブレキャスト桁の拘束を受けたため、コンクリート硬化直後のひび割れ発生が危惧される。	道示Ⅲ.5.3に準拠	
	構造物の安全性 【耐震性】 道示Ⅴ14.3.2 応急復旧を行わずとも長期的供用性を維持 道示V16.1 想定を超える地震力や変位・変形に対しても落橋しない	地震時の損傷や落橋が危惧される。 ※1	直下に横桁があり、下面から直接目視することはできない。	押抜せん断破壊や全体崩壊といった危険性がないため、伸縮装置と同様な維持管理手法でよく、舗装面のひび割れや橋座部への漏水等により損傷の程度を評価できる。補修についても伸縮装置と同様に部分供用下での施工ができる。	道示Ⅴ16章に準拠
			非線形動態解を行い、レベル2地震時ににおいても耐震性能を確保していることを検証する。	道示Ⅴ2.2に準拠	
			バラベットとの衝突を避けるために、橋台部にはレベル2地震時に必要な遊間を設ける。	道示Ⅴ14.4.1に準拠	

※1：連結床版は、海外において耐震連結としての有効性が確認されているが、現時点では道路橋示方書V16.1が要求する性能までは検証できていない。そこで、中間支点部はかけ違い部として落橋防止システムを構成するものとした。

(1) 供用性の検証

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書Ⅲ4.1 総則】

設計荷重作用時及び終局荷重作用時の構造部材の照査に用いる断面力の算定は、棒部材を用いた線形解析に基づくものとする。この場合、部材の曲げ剛性、せん断剛性及びねじり剛性は、コンクリートの全断面を有効とし、鋼材を無視して算出した値を用いてよい。

【道路橋示方書Ⅲ12.2 設計一般】

連続げたは、施工方法によっては施工段階ごとの構造系が変化するので、これを考慮して設計するものとする。

【道路橋示方書Ⅲ12.3 構造解析】

- (1) 連続げた橋は、プレストレス力、温度の影響、クリープ、乾燥収縮、支点移動による不静定力を考慮するものとする。
- (2) 複数の固定支承を有する連続げた橋は、橋脚を含めた構造モデルにより解析を行うものとする。
- (2) ・・・・・・また、ゴム支承等を用いて複数の支点で弹性支持する連続げた橋では、支承の水平剛性が主げたの断面力に与える影響が無視できない場合があるので、この場合は、これを考慮して構造解析を行うのが望ましい。

■技術的課題

本構造は、主桁と連結床版の剛性が極端に異なる特殊な変断面桁である。ゴム支承等による外的拘束や鉄筋等による内的拘束の影響が懸念される。

■性能評価の対応策

中間支点部の構造を適切にモデル化する。

【解説】

中間支点部の構造を線形2次元骨組解析モデルにて忠実に表現するために、主桁図心と連結床版図心のずれおよび支承・バッファー・橋脚等の水平バネを考慮する。さらに、コンクリート断面内の鉄筋拘束も考慮する。中間支点部の構造は、主桁端部に作用する曲げモーメントを連結床版の軸力と支承等の水平反力からなる偶力で伝達する。したがって、連結床版は軸引張力が卓越した部材となるため、クリープ、乾燥収縮に加えて、温度差および温度変化による影響が無視できない。また、連結床版は、橋面施工から活荷重載荷までの間に曲げモーメントが交番する傾向を示すため、各段階で応力照査を実施することが必要となる。また、全断面剛性の違いに加えて、PC、RCといったひび割れ制御方法の異なる部材を局部的に一体化した構造である。連結床版部を全断面有効として解析した場合に安全側の結果を与えるため、現時点では全断面有効とする。RC剛性とするなどの手法を採用する場合には、十分な検討が必要である。

(2) 疲労耐久性の検証

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書Ⅲ7.2 設計一般】

- (1) 床版の設計においては、・・・・以下1)及び2)の規定を満足するものとする。
 - 1) 活荷重等に対して、疲労耐久性を損なう有害な変形を生じないようにするものとする。
 - 2) 自動車の繰返し通行に対して、疲労耐久性が損なわれないようにするものとする。

【道路橋示方書Ⅲ12.4.2 プレキャストげた架設方式連続げた橋の中間支点部】

- (3) 中間支点部の主げたの連結を鉄筋コンクリート構造とする場合、連結鉄筋の重ね継手長は・・・・鉄筋径の25倍以上とする。

(3) ・・・・連結鉄筋の重ね継手は、支点が2箇所あることや主げたが剛な横げたで橋軸方向に連結されていること等を考慮して、同一断面に集中して配置してもよいが、・・・・鉄筋に生じる引張応力度を160N/mm²以下とすることが望ましい。 ・・・・

■技術的課題

連結床版は、主桁に支持されていない点が従来のRC床版と異なるため、従来のRC床版の疲労試験結果を準用することに疑義が生じる。

■性能評価の対応策

連結床版は、構造の特殊性を考慮して支承等を含めた中間支点部全体をモデル化した疲労試験により疲労耐久性を検証することが望ましい。

【解説】

連結床版は、絶縁材を介して横桁上に置かれた構造であり、輪荷重の直接載荷の影響が大きい従来のRC床版と破壊メカニズムが異なるものと推察され、新設橋梁としての実績がない構造でもあるため、構造特性を考慮した疲労試験により耐久性を検証することが望ましい。また、連結床版は、橋面施工から活荷重載荷までの間に曲げモーメントが交番するため、貫通ひび割れとなる可能性が高く、上縁側ひび割れ幅の増加や床版剛性の低下に対して、この初期貫通ひび割れの存在が大きな影響を及ぼさないことを確認することが必要である。

なお、本構造の疲労耐久性については、過去に行われた類似構造の疲労試験「プレキャスト連結げたの設計法に関する共同研究報告書（平成4年2月土木研究所・PC建協）」²⁻¹⁾によれば、十分实用性があると理解されている。

【参考文献】

- 2-1) 建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室、プレストレスト・コンクリート建設業協会：プレキャスト連結げたの設計法に関する共同研究報告書、pp.68-94、1992.2

(3) 施工性の検証

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書III 19.2 施工一般】

- (1) コンクリート橋の施工は、設計において前提とされた諸条件等が満足されるように行わなければならない。

【道路橋示方書III 19.6 コンクリート工】

(7) 打継目

- 3) 打継目については、温度応力及び乾燥収縮によるひびわれが発生しないように考慮するものとする。

■技術的課題

連結床版はプレキャスト桁の拘束を受けるため、コンクリート硬化直後のひび割れ発生が危惧される。

■性能評価の対応策

膨張材や短繊維の混入、塗装鉄筋やステンレス鉄筋の使用などの耐久性向上策を検討する。

(4) 耐震性の検証

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書V 6.2.2 慣性力】

- (4) 上部構造の慣性力の作用位置は、その重心位置とする。 ·····

【道路橋示方書V 6.2.3 固有周期の算定方法】

- (3) 設計振動単位が、複数の下部構造とそれが支持している上部構造部分からなる場合には、固有周期は ····· により算出してよい。

【道路橋示方書V 14.4.1 上部構造端部の遊間】

- (1) 上部構造端部においては、レベル1地震動及びレベル2地震動に対して、隣接する上部構造どうし、上部構造と橋台又は上部構造と橋脚の段違い部が衝突しないように必要な遊間を設けることを標準とする。 ·····

■技術的課題

- 1) 道路橋示方書では、本構造のように一部が極端な変断面となる場合を想定していない。
2) 径間ごとの位相差あるいは橋台との衝突による連結床版部の破壊が懸念される。

■性能評価の対応策

- 1) 中間支点部の構造を適切に考慮したモデルとする。
2) レベル2地震動に対して、非線形動的解析による照査を行い、径間ごとの位相差あるいは橋台との衝突の有無を確認する。

【解説】

連結床版はRC構造として設計するが、新設PC橋梁としての耐久性を確保するために、耐久性向上対策を講じなければならないものとした。対策としては、膨張コンクリートや有機繊維補強コンクリートとして施工初期段階のひび割れを防止する案、さらに塗装鉄筋やステンレス鉄筋を採用し腐食問題を解消する案が考えられる。いずれも、初期コストは高いものとなるが、LCCを考えた場合には最善の構造となるものと考えられる。米国では、ECC (fiber reinfoRCed Engineered Cementitious Composite)を標準とした事例もある³⁻¹⁾。

【参考文献】

- 3-1) VictoRC.Li,G.Fischer: ReinfoRCed ECC-An Evolution from Materials to Structures, FIB Congress Kyoto,pp.105-122,2002.10

【参考文献】

- 4-1) A.Caner,E.Dogan,P.Zia: Seismic Performance of Multisimple-Span Bridges Retrofitted with Link Slabs,Journal of Bridge Engineering,pp.85-93,2002

1.4.3 参考資料

参考資料一覧を表-1.4.3.1に示す。

表-1.4.3.1 参考資料一覧

資料名			資料内容
資料1	国内外基準例	既設橋梁のノージョイント工法の設計施工手引き (案) 道路保全技術センター(平成7年)および米国 ミシガン州道路局における設計基準の概要	
資料2	試設計	6径間連結プレテンションT桁橋、6径間連結コンポ橋 の試設計概要	

[資料 1] 国内外基準例

(1) 日本と米国における基準の比較

日本と米国における連結床版設計基準の比較を、表-1.4.3.2 及び表-1.4.3.3 に示す。

表-1.4.3.2 国内外基準例 (1)

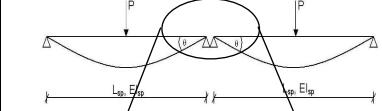
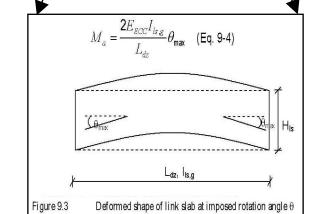
連結床版 設計基準	既設橋梁のノージョイント工法の 設計施工手引き(案) P C 桁床版連結工法の設計 平成7年1月 (財)道路保全技術センター	Durable Link Slabs for Jointless Bridge Decks Based on Strain-Hardening Cementitious Composites November 16, 2003 ミシガン州運輸局(MDOT)
概 要	<ul style="list-style-type: none"> 既設橋梁のノージョイント化設計基準(案)。 原案は、阪神高速道路公団が開発。 P C 桁の床版連結によるノージョイント化は、阪高や首都高等で試験施工されている。 補修工事の基準であるため、既設橋梁の部材を有効的に利用できるような施工方法を採用している。 	<ul style="list-style-type: none"> 単純P C 桁橋の連結床版(リンクスラブ)に関する研究報告書 設計ガイドラインが掲載されている。 床版材料に、高剛性セメント複合材料、ECC (Engineered Cementitious Composite) を使用するのが基本となっている。 ECCは、ミシガン大学により開発された材料。
連結床版 モデル	<ul style="list-style-type: none"> 分離層の橋軸方向長の支持間隔を床版支間とした「固定ぱり」(検討断面は支点部) 床版の剛性は、引張域のコンクリートを無視する。(阪高的事例では全断面有効) 	<ul style="list-style-type: none"> 分離層の橋軸方向長の支持間隔を床版支間とした「単純ぱり」(検討断面は支間中央) 床版の剛性は、全断面有効として算出する。
設計荷重 と断面力	<ul style="list-style-type: none"> 活荷重による、変位(回転・鉛直)の影響 設計に用いる活荷重たわみは、格子解析等の計算結果を用いる。 片側、または両側の支点が回転するケースのうち、断面力の大きいケースで設計する。 下に示す阪高の計算事例では、回転変位と鉛直変位を考慮。 (左右で変位差がある場合) (左右で変位差がある場合) (左右で変位差がある場合) 	<ul style="list-style-type: none"> 活荷重による、回転変位の影響 設計に用いる活荷重たわみには、たわみの許容値(L/800)を用いる。 設計断面位置を支間中央としているため、両支点が回転したケースにて設計する。
温度変化 による 輻力の影響	<ul style="list-style-type: none"> 温度变化による輻力の影響 ただし、反力分散支承方式を採用した場合は、温度の影響を無視できるとしている。 	 <p>Figure 9.1 Simplified geometry and loading of two-span bridge structure.</p> $\theta_{AB} = \frac{\Delta_{AB}}{\Delta} \theta = \frac{\Delta_{AB}}{\Delta} \frac{Pl_A^2}{16EI_p} = \frac{L_A}{800L_B} \cdot \frac{3}{8} = 0.00375 rad. \quad (\text{Eq. 9-2})$  <p>Figure 9.3 Deformed shape of link slab at imposed rotation theta_AB</p> $M_s = \frac{2EI_s I_{xg}}{L_{AB}^2} \theta_{AB} \quad (\text{Eq. 9-4})$

表-1.4.3.3 国内外基準例 (2)

連結床版 設計基準	既設橋梁のノージョイント工法の 設計施工手引き(案) PC桁床版連結工法の設計 平成7年1月 (財)道路保全技術センター	Durable Link Slabs for Jointless Bridge Decks Based on Strain-Hardening Cementitious Composites November 16, 2003 ミシガン州運輸局(MDOT)																				
応力度の 評価	<ul style="list-style-type: none"> 応力度の算出は、コンクリートの引張強度を無視したRC構造として算出する。 阪高の計算事例(全断面有効)によると、コンクリートの圧縮応力度で許容応力度に入っていないが、全断面有効としているため、実際は床版にひび割れが生じて曲げモーメンが小さくなると思われるため、OKとしている。 <p>表4.2 連結RC床版支間の検討結果</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>連結床版支間</th> <th>$t = 1.2\text{ m}$の場合</th> <th>$t = 1.0\text{ m}$の場合</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>連結床版厚</td> <td>$d = 15\text{ cm}$</td> <td>$d = 14\text{ cm}$</td> </tr> <tr> <td>最大曲げモーメント</td> <td>$M = 5.201\text{ t}\cdot\text{m}$</td> <td>$M = 5.102\text{ kg}/\text{cd}$</td> </tr> <tr> <td>鉄筋配筋</td> <td>$D25-150\text{ ctc}$</td> <td>$D22-100\text{ ctc}$</td> </tr> <tr> <td>コンクリート応力</td> <td>$\sigma_c = 121.2\text{ kg}/\text{cd}$</td> <td>$\sigma_c = 154.6\text{ kg}/\text{cd}$</td> </tr> <tr> <td>鉄筋応力</td> <td>$\sigma_s = 1797\text{ kg}/\text{cd}$</td> <td>$\sigma_s = 1798\text{ kg}/\text{cd}$</td> </tr> <tr> <td>許容応力</td> <td>$\sigma_{st} = 100\text{ kg}/\text{cd}$</td> <td>$\sigma_{st} = 1800\text{ kg}/\text{cd}$</td> </tr> </tbody> </table> <p>Figure 9.4 Schematic stress and strain profile in a cross section of link slab for calculation of required longitudinal reinforcement ratio (profile of R/C is shown for comparison)</p>	連結床版支間	$t = 1.2\text{ m}$ の場合	$t = 1.0\text{ m}$ の場合	連結床版厚	$d = 15\text{ cm}$	$d = 14\text{ cm}$	最大曲げモーメント	$M = 5.201\text{ t}\cdot\text{m}$	$M = 5.102\text{ kg}/\text{cd}$	鉄筋配筋	$D25-150\text{ ctc}$	$D22-100\text{ ctc}$	コンクリート応力	$\sigma_c = 121.2\text{ kg}/\text{cd}$	$\sigma_c = 154.6\text{ kg}/\text{cd}$	鉄筋応力	$\sigma_s = 1797\text{ kg}/\text{cd}$	$\sigma_s = 1798\text{ kg}/\text{cd}$	許容応力	$\sigma_{st} = 100\text{ kg}/\text{cd}$	$\sigma_{st} = 1800\text{ kg}/\text{cd}$
連結床版支間	$t = 1.2\text{ m}$ の場合	$t = 1.0\text{ m}$ の場合																				
連結床版厚	$d = 15\text{ cm}$	$d = 14\text{ cm}$																				
最大曲げモーメント	$M = 5.201\text{ t}\cdot\text{m}$	$M = 5.102\text{ kg}/\text{cd}$																				
鉄筋配筋	$D25-150\text{ ctc}$	$D22-100\text{ ctc}$																				
コンクリート応力	$\sigma_c = 121.2\text{ kg}/\text{cd}$	$\sigma_c = 154.6\text{ kg}/\text{cd}$																				
鉄筋応力	$\sigma_s = 1797\text{ kg}/\text{cd}$	$\sigma_s = 1798\text{ kg}/\text{cd}$																				
許容応力	$\sigma_{st} = 100\text{ kg}/\text{cd}$	$\sigma_{st} = 1800\text{ kg}/\text{cd}$																				

(2) ミシガン州道路局 設計基準

「Durable Link Slabs for Jointless Bridge Decks Based on Strain-Hardening Cementitious Composites」MDOT Technical Report, 2003.11 に基づき、米国ミシガン州道路局でのECCを用いた連結床版の設計概要を示す。

1) 設計上の仮定

主桁は連結床版の影響を無視できるものとし、単純ばかりとして設計する。

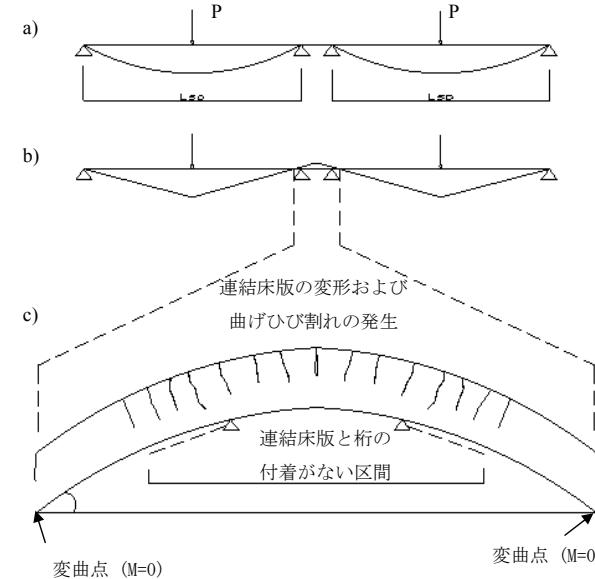


図-1.4.3.1 概念図

乾燥収縮、クリープおよび温度変化によって、連結床版に引張応力が付加されることがあるので、それらを考慮してひび割れ幅の制御を行わなければならない。

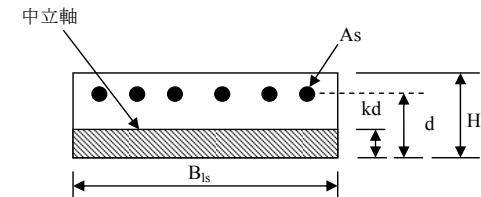


図-1.4.3.2 ひび割れ発生後の連結床版の断面

2) 設計上の基本的な検討項目

設計上想定される回転角(θ)における鉄筋応力度(σ_s)

引張縁での最大ひび割れ幅(w_{max})

3) ECC を用いた連結床版の設計規準

a) ひび割れ幅¹⁾

許容ひび割れ幅(w_{max}): 0.330mm

(設計荷重作用時の RC 床版に対する AASHTO 2002 の規準)

ひび割れ幅が 0.1mm を超える場合、塩化物イオン等の有害な物質の進入による影響について検討しなければならない。

連結床版のひび割れ幅の算出 (AASHTO)

$$\omega = 0.076\beta f_s (d_c A)^{\frac{1}{3}} \{0.001\} \text{ in.}$$

$$\omega = 0.000011\beta f_s (d_c A)^{\frac{1}{3}} \text{ mm}$$

ω - コンクリート面のひび割れ幅

β - (中立軸から引張縁までの距離)/(中立軸から鉄筋図心位置までの距離)

f_s - 鉄筋応力度, ksi (MPa)

d_c - コンクリートのかぶり (コンクリート表面と表面から一番近い鉄筋の図心までの距離), in. (mm)

A - 鉄筋 1 本当たりの有効面積, in² (mm²)

$w < w_{max}$ を満たさなければならない。

b) 応力度の制限値および圧縮強度の最小値

連結床版の鉄筋比は応力度の制限値以下となるように定めなければならない²⁾。

設計上想定される回転角(θ)において、 $\sigma_s < 0.40\sigma_y$ (σ_y - 鉄筋の降伏応力度)

ECC の圧縮強度の最小値 = 4500psi (30MPa) (MDOT ガイドライン、ミシガン州交通局)

c) 乾燥収縮³⁾

乾燥収縮度 (自由収縮) は相対湿度に関連付けられたグラフから決定できる。相対湿度が 75% の時、乾燥収縮度は約 0.1% である。

d) ひずみの制限値⁴⁾

ECC 連結床版のひずみ変形性能(ϵ_{ls})は下式により算出する。(安全係数は 2 とする)

桁端部における床版と桁の付着のない区間は支間長の 5% とする。 $((5\% * L_{sp}) * 2)$ 。

温度変化 = $90^{\circ}\text{F} (\Delta T)$

$$\epsilon_{ls} = \frac{\alpha_T \Delta T \cdot 2L_{sp}}{L_{dz}} + \epsilon_{sh} + \epsilon_{LL}$$

α_T - 鉄筋の温度膨張係数

$L_{dz} - (5\% * L_{sp}) * 2$

ϵ_{sh} - 乾燥収縮ひずみ

ϵ_{LL} - 曲げモーメント (活荷重) によって生じる桁端部の回転角による

リンクスラブの最大引張ひずみ。ここで、隣接支間がある場合、両側の変形を考慮しなければならない。

設計荷重作用時の桁端部の回転角が 0.0015 rad の場合、 ϵ_{LL} は 0.1% 以下となる。

連結床版の剛性を低くするために、連結床版と桁の付着がない区間は、各支間長の 5% とすることが望ましい。

e) 地震荷重による応力度⁵⁾

仮定: 主構造の破壊や落橋はないものとする。

この仮定は、過度の支承変形あるいは伸縮装置の変形は生じないことを意味する。

静的荷重により設計した連結床版に対して耐震設計を行う。

連結床版の鉄筋のみで、床版に発生する断面力にすべて抵抗すると仮定して、鉄筋応力度を算出する。

$\sigma_s < 0.5\sigma_y$ の場合、予備設計は終了とする。 $\sigma_s > 0.5\sigma_y$ の場合、鉄筋量を増やす。

最後に連結床版によって再分配された断面力に対して、橋台、橋脚および主桁の応力度等をチェックする。地震荷重による橋の構造全体の挙動は、応答スペクトル解析あるいは動的解析によって評価できる。

4) 設計手順 (ECC) (文献³⁾参照)

ECC 連結床版の要求性能

- 終局ひずみ変形能力 (セクション 4 に規定する制限値(ϵ_{ls})より小さくはならない)
- 使用材料はひび割れを分散させ、ひび割れ幅を小さくすることができる材料でなくてはならない。ひび割れ幅は $0.004'' (0.10\text{mm})$ 以下、ひび割れ間隔は $0.1'' (2.5\text{mm})$ とする。ここで、規定値は単軸引張テストによるものとする。
- 設計規準強度は $4500\text{psi} (30\text{MPa})$ 以上とする。

$$\epsilon_{ls} = \frac{\alpha_T \Delta T \cdot \beta L_{sp}}{L_{dz}} + \epsilon_{sh} + \epsilon_{LL}$$

β - 構造形式によって決まる定数
ピン-ローラー-ローラー-ピン, 2
ピン-ローラー-ピン-ローラー, 1

手順-1

ECC 連結床版の長さ L_{ls} を決定する。

連結床版と主桁の付着のない区間の長さ L_{dz} を決定する。

L_{ls} : 隣接する支間の各支間長の 7.5%の和

L_{dz} : 各支間長の 5%

手順-2

各支間の桁端部における回転角 θ_{max} を算出する。

設計荷重作用時の許容たわみ量 = Δ_{max} 、 $L_{sp}/800$

MDOT(ミシガン州交通局) 設計規準および AASHTO 設計規準より

$$\theta_{max} = \frac{\Delta_{max}}{\Delta} \theta = \frac{\Delta_{max}}{PL_{sp}^3 / 48EI_{sp}} * \frac{PL_{sp}^2}{16EI_{sp}} = 0.00375 \text{ rad.}$$

手順-3

連結床版の断面 2 次モーメント $I_{ls,g}$ を算出する(全断面有効)。

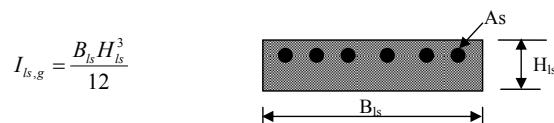


図-1.4.3.3 連結床版の断面

手順-4

桁端部の回転角 (θ_{max}) によって発生する連結床版の曲げモーメント M_a を算出する。

$$M_a = \frac{2E_{ECC}I_{ls,g}}{L_{dz}} \theta_{max}$$

手順-5

連結床版の橋軸方向の必要鉄筋比 ρ を算出する。

ECC は完全弾塑性の材料特性とする。

様々な鉄筋比に対し、鉄筋応力度を $0.4\sigma_y$ に制限して、断面抵抗曲げモーメントを非線形断面解析によって求め、 M_a に対する最適な鉄筋比を決定する。

ひずみ変形性能と圧縮応力度が制限値以下かチェックする。

手順-6

境界面のせん断接合(スタッド)

AASHTO 設計規準によるせん断力を移行する領域のスタッドの設計法を適用できる。

ECC 連結床版と主桁の境界面において、スタッドは支間長の 2.5% の範囲まで配置しなければならない。

手順-7

重ね継手

既設橋の橋軸方向鉄筋は連結床版に設置する鉄筋と境界面で重ね継手により継手してよい。

重ね継手の設計は AASHTO 設計規準を用いてよい。

[参考文献]

- 1) Gergely, P., and Lutz, L.A., 1968, Maximum crack width in reinfoRCed concrete flexural members, Causes, Mechanisms, and Control of Cracking in Concrete, SP-20, ACI, Farmington Hills, MI.
- 2) Caner, A., and Zia, P., Behavior and Design of Link Slab for Jointless Bridge Decks, PCI Journal, May-June 1998, pp.68-80.
- 3) ReseaRCh Report RC-1438, Durable Link Slabs for Jointless Bridge Decks Based on Strain-Hardening Cementitious Composites, VictoRC.Li, G.Fischer, Y.Kim, M.Lepech, S.Qian, M.Weimann and S.Wang, University of Michigan, Ann Arbor, USA.
- 4) Yun Yong Kim, Gregor Fischer, and VictoRC.Li, Performance of Bridge Deck Link Slabs Designed with Ductile Engineered Cementitious Composites, ACI Structural Journal, 2004, pp.792-801.
- 5) Caner.A, Dogan.E and Zia.P, Seismic Performance of Multisimple-Span Bridges Retrofitted with Link Slabs, Journal of Bridge Engineering, Vol.7, No.2, 2002, pp.85-93.

[資料 2] 試設計

本試設計では、支間 22.1m、橋長 138m の 6 径間連結プレテンション T 桁橋（図-1.4.3.4）および支間 36.5m、橋長 224m の 6 径間連結コンポ橋（図-1.4.3.6）の 2 ケースの試設計を行い、新設橋への適用の可能性を確認した。

試設計モデルは、それぞれ図-1.4.3.5 と図-1.4.3.7 に示す実橋データをもとにしているが、検討の簡易化のために、平均支間長を用いた等スパン、平均橋脚高を用いた等橋脚高条件とした。

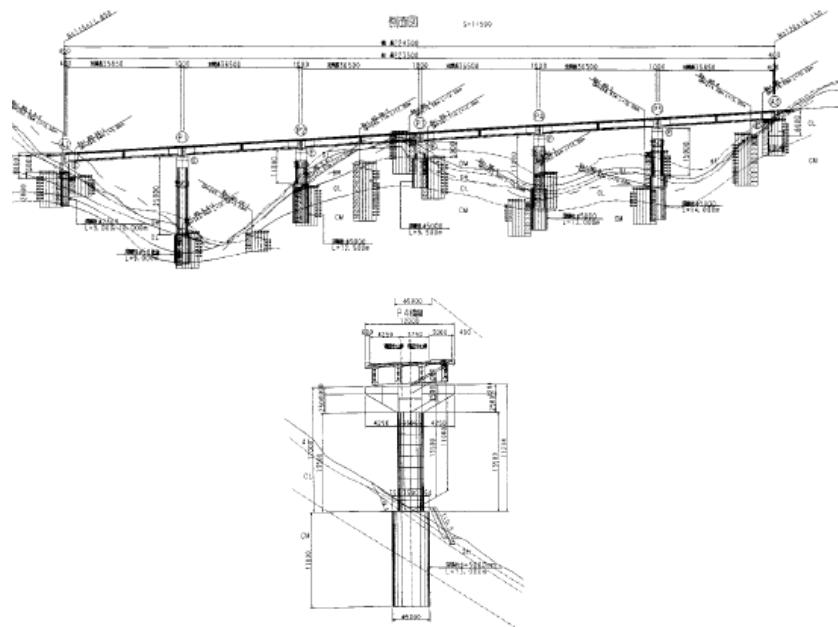
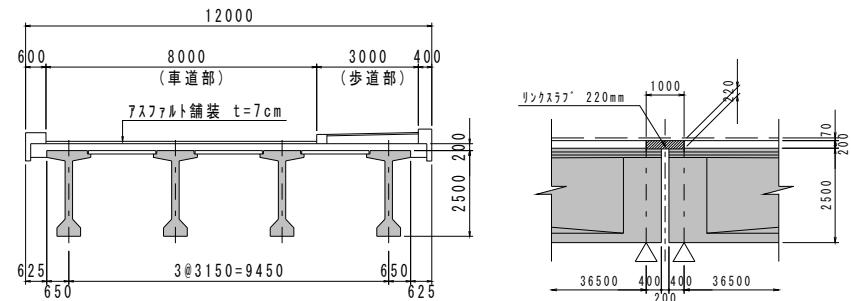
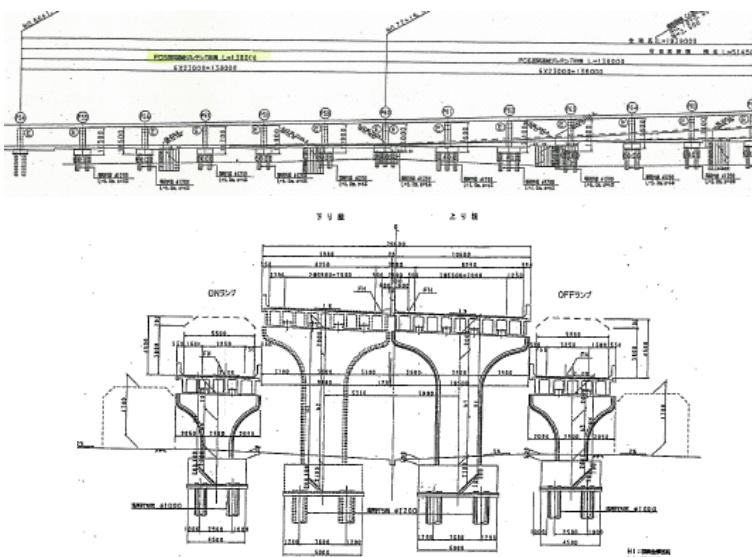
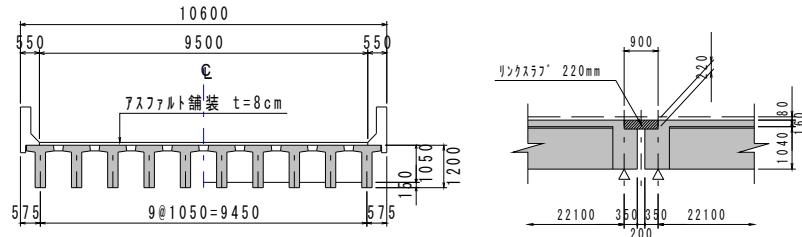


表-1.4.3.4 設計条件

想定対象		試設計モデル1		試設計モデル2			
形式		6径間床版連結プレテンション 方式PCTげた橋		6径間床版連結PCコンポ橋 (プレキャストセグメント工法)			
支間長		6 @ 22.1 m		6 @ 36.5 m			
有効幅員	車道	9.5 m		8.0 m			
	歩道	無し		3.0 m			
PC鋼材 (主げた)	種類	1S15.2BN		12S12.7BL			
	鋼材本数	24 本		5 本			
	断面積	138.7 mm ²		1184.5 mm ²			
ゴム支承 支持条件	水平バネ 鉛直バネ	1,200 kN/m 260,000 kN/m		2,000 kN/m 530,000 kN/m			
	下部工 支持条件	水平バネ 鉛直条件	50,000 kN/m 固定	100,000 kN/m 固定			
主げた高		1.2 m		2.5 m			
主げた本数		10 本		4 本			
主げた間隔		1.05 m		3.15 m			
リンク スラブ	長さ	900 mm		1000 mm			
	厚さ	220 mm		220 mm			
施工材令(日)		主げた	床版横析	リンクスラブ [*]	主げた	床版横析	リンクスラブ [*]
1. 主析製作		0	—	—	0	—	—
2. 場所打ち打設		90	0	0	90	0	0
3. 橋面施工		120	30	30	120	30	30
4. クリープ終了		∞	∞	∞	∞	∞	∞
クリープ係数		主げた	床版横析	リンクスラブ [*]	主げた	床版横析	リンクスラブ [*]
1. 主析製作		0.0	—	—	0.0	—	—
2. 場所打ち打設		1.8	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0
3. 橋面施工		2.0	1.0	1.0	0.8	0.6	0.6
4. クリープ終了		3.0	2.6	2.6	2.0	2.6	2.6
乾燥収縮度(μ)		主げた	床版横析	リンクスラブ [*]	主げた	床版横析	リンクスラブ [*]
1. 主析製作		0	—	—	0	—	—
2. 場所打ち打設		60	0	0	26	0	0
3. 橋面施工		70	30	30	31	18	18
4. クリープ終了		200	200	200	179	200	200

表-1.4.3.5 リンクスラブ断面力の比較(橋梁中心位置)

N : 引張を正

M : 下縁引張を正

試設計モデル1 (プレT桁)	死荷重	活荷重		活荷重時		
		M最大	M最小	死荷重時	M最大	M最小
軸力 N (kN)	76	0	4	76	76	80
曲げモーメント M (kN·m)	24	10	-62	24	34	-38

試設計モデル2 (コンボ桁)	死荷重	活荷重		活荷重時		
		M最大	M最小	死荷重時	M最大	M最小
軸力 N (kN)	199	0	7	199	199	206
曲げモーメント M (kN·m)	10	19	-74	10	29	-64

表-1.4.3.6 リンクスラブ応力度の比較(全断面有効)

試設計モデル1 (プレT桁)	死荷重時		活荷重MAX時		活荷重MIN時	
	上縁	下縁	上縁	下縁	上縁	下縁
スラブ縁応力度 (N/mm ²)	-1.1	3.2	-2.1	4.2	5.1	-3.0
正負主鉄筋応力度 (N/mm ²)	-40	-10	-43	-6	-15	-34

試設計モデル2 (コンボ桁)	死荷重時		活荷重MAX時		活荷重MIN時	
	上縁	下縁	上縁	下縁	上縁	下縁
スラブ縁応力度 (N/mm ²)	0.8	1.2	0.1	1.9	5.1	-1.6
正負主鉄筋応力度 (N/mm ²)	-22	-28	-24	-5	-32	-38

表-1.4.3.7 RC 照査比較

	試設計モデル1		試設計モデル2	
	死荷重時	活荷重時	死荷重時	活荷重時
			M最大	M最小
σ_s (N/mm ²)	66	98	26	48
w (mm)	0.13	0.17	0.14	0.13
wa (mm)	0.15	0.15	0.23	0.20

※ 配力筋は、プレテン：D22@125mm、ポステン：D25@125mmとした。

※ 応力度の組み合わせに温度は考慮していない。

1.4.4 検証事例

検証事例-1	連結床版構造のクリープ・収縮挙動およびひび割れ後の挙動の検証		
要求性能	使用目的の適合性 [供用性]	関連規定	道路橋示方書Ⅲ7.2
検証目的	連結床版構造におけるクリープ・収縮挙動及びひび割れ後の挙動を非線形FEM解析により把握し、線形骨組み解析モデルによる設計の妥当性を検証した事例。		
検証方法	実験による検証 · 解析による検証 · 道路橋示方書の準用		
検証方針	前述「1.4.3 参考資料【資料2】試設計」の試設計モデル1（支間長22.1mの6径間連結プレテンT桁橋）を対象に、2次元線形骨組解析と2次元非線形FEM解析それぞれについて、1)ひび割れが生じないものとしたときの中間支点部のモデル化の妥当性、2)設計荷重時まで全断面有効とし、RC計算で応力度照査する設計手法が安全側の設計となるか、を比較検証。		
検証内容	<p>1. 解析条件</p> <p>(1) 解析ソフト：汎用非線形解析ソフト DIANA Version8.1</p> <p>(2) 解析手法：クリープ・収縮による非線形性および連結床版のひび割れを考慮した2次元非線形FEM解析</p> <p>(3) 考慮した荷重：主桁自重、プレストレス、場所打ち床版荷重、連結床版荷重、橋面荷重、クリープ・収縮および活荷重</p> <p>(4) 解析ステップ：施工順序を考慮したステップ解析</p> <p>(5) クリープ係数・乾燥収縮度：主桁$\Phi=3.0$、$\epsilon=200\mu$ ($t=90$日までに$\Phi=1.8$、$\epsilon=60\mu$)、場所打ち$\Phi=2.6$、$\epsilon=200\mu$、連結床版$\Phi=2.6$、$\epsilon=200\mu$</p> <p>2. 解析モデル</p> <p>(1) 2次元線形骨組解析</p> <p>図-1 中間支点部モデル</p> <p>(2) 2次元非線形FEM解析</p> <p>図-2 モデル</p>		

3. 解析結果

(1) 骨組解析モデル化の妥当性について

橋梁中央の連結床版中央断面の応力度を抽出する。(単位:N/mm², 引張:+)
①と②を比較すると、クリープと乾燥収縮が終了した全死荷重時および活荷重載荷時における結果は、概ね一致しており、線形骨組解析のモデル化が妥当であることが確認できる。

表-1 ①2次元線形骨組解析結果

	主げた	連結床版			
		コンクリート		鉄筋	
		上縁	下縁	上縁	下縁
1)主げた緊張直後		0.0	-17.1		
2)間詰・横げた打設直前		-1.0	-12.2		
3)間詰・横げた打設直後		-2.4	-10.4		
4)リンクスラブ打設直後		-2.4	-10.4	0.0	0.0
5)橋面施工直前		-2.6	-10.0	-1.1	1.5
6)橋面施工直後		-3.9	-8.1	2.6	-2.2
7)全死荷重		-4.1	-6.1	-1.1	3.2
8)活荷重載荷時(min)		-7.6	-1.0	5.1	-3.0
				-15.0	-34.0

表-2 ②2次元非線形FEM解析結果(連結床版の引張強度無限大)

	主げた	連結床版			
		コンクリート		鉄筋	
		上縁	下縁	上縁	下縁
1)主げた緊張直後		-0.5	-15.5		
2)間詰・横げた打設直前		-1.1	-12.5		
3)間詰・横げた打設直後		-2.0	-11.4		
4)リンクスラブ打設直後		-2.0	-11.4	0.0	0.0
5)橋面施工直前		-2.1	-11.2	-0.1	0.3
6)橋面施工直後		-3.4	-9.4	1.8	-1.7
7)全死荷重		-3.8	-7.2	-0.9	3.3
8)活荷重載荷時(min)		-7.6	-1.6	4.9	-3.3
				-15.7	-33.1

表-3 ③2次元非線形FEM解析結果(連結床版の引張強度2.2N/mm²)

	主げた	リンクスラブ			
		コンクリート		鉄筋	
		上縁	下縁	上縁	下縁
1)主げた緊張直後		-0.5	-15.5		
2)間詰・横げた打設直前		-1.1	-12.5		
3)間詰・横げた打設直後		-2.0	-11.4		
4)リンクスラブ打設直後		-2.0	-11.4	0.0	0.0
5)橋面施工直前		-2.1	-11.2	-0.1	0.3
6)橋面施工直後		-3.4	-9.4	1.8	-1.7
7)全死荷重		-3.8	-7.2	-0.9	0.6
8)活荷重載荷時(min)		-7.7	-1.3	1.5	-2.3
				-33.3	6.7
				-23.8	

(2)ひび割れ発生後の挙動について

上記非線形 FEM 解析②、③のコンクリート応力度の経時変化グラフを下記に示す。③のグラフによれば、ひび割れの発生に伴う剛性低下によりその後に載荷される活荷重応答が小さくなることが確認できる。したがって、線形骨組解析による断面力を元に RC 計算で応力照査する設計手法は安全側の結果となる。

②2 次元非線形 FEM 解析結果（連結床版の引張強度無限大）

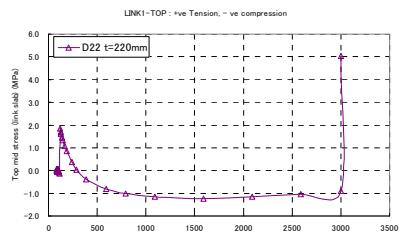


図-3 コンクリート上縁応力

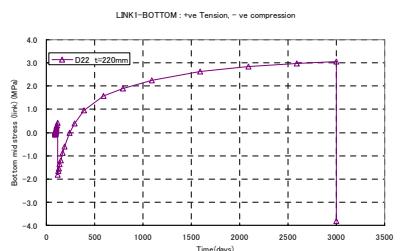


図-4 コンクリート下縁応力

③2 次元非線形 FEM 解析結果（連結床版の引張強度 2.2N/mm^2 ）

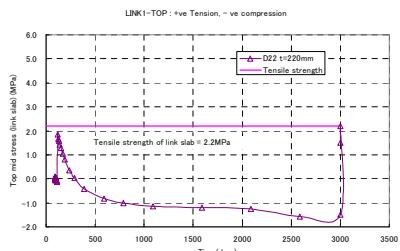


図-5 コンクリート上縁応力

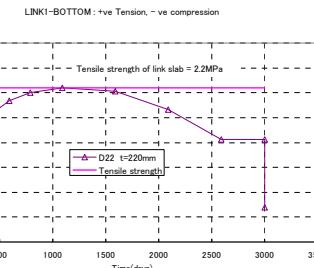


図-6 コンクリート下縁応力

4.まとめ

(1)ひび割れが生じないものとして、2 次元線形骨組解析と 2 次元非線形 FEM 解析の結果を比較した。クリープと乾燥収縮が終了した全死荷重時および活荷重載荷時における結果が概ね一致しており、線形骨組解析のモデル化が妥当であることが確認できた。

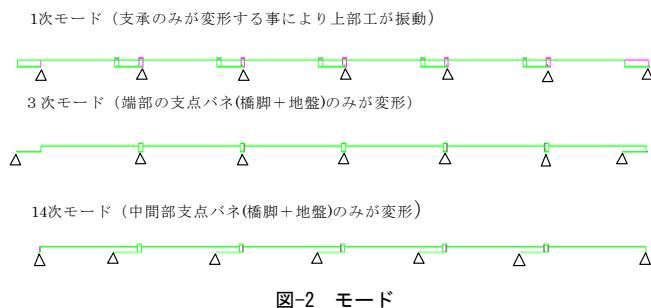
(2)2 次元非線形 FEM 解析にてひび割れ発生後の挙動を検討した。ひび割れの発生に伴う剛性低下によりその後に載荷される活荷重応答が小さくなり、線形骨組解析による断面力を元に RC 計算で応力照査する設計手法は、安全側の結果となることが確認できた。

注意点

経済性を高めるために、2 次元線形骨組解析においてひび割れの発生に伴う剛性低下をあらかじめ考慮してモデル化することも考えられるが、その場合には応答値が小さくなり実際にひび割れが発生する時点が明確にできなくなる可能性がある。よって、剛性低下の有無の影響を適切に評価することが必要である。

検証事例-2	連結床版構造の耐荷挙動および疲労特性の検証		
要求性能	構造物の安全性〔耐荷力性能〕、耐久性〔疲労耐久性〕	関連規定	道路橋示方書Ⅲ7.2
検証目的	床版部のみを連結したプレキャスト連結桁における連結床版構造の耐荷挙動および疲労特性を検証した事例。		
検証方法	実験による検証・解析による検証・道路橋示方書の準用		
検証方針	プレテンション単純T桁橋（桁長20m、支間19.4m、桁高1.0m）にL-20荷重を載荷したときに生じる支点部のたわみ角と等価な荷重状態を再現して、実物大床版連結構造の試験供試体の耐荷挙動および疲労特性を検証。		
参考文献	1) プレキャスト連結桁の設計法に関する共同研究報告書、建設省土木研究所橋梁研究室、1992.2		
注意点	本事例は、主桁としてプレテンションT桁（桁高1m、支間19.4m）を、連結床版として2種類の構造を想定している。構造詳細がこれと異なる場合には、その影響を適切に判断する必要がある。		

検証事例-3		連結床版構造のレベル2地震時挙動の検証																													
要求性能	構造物の安全性〔耐震性〕		関連規定	道路橋示方書V14.3.2																											
検証目的	地震時における連結床版構造の安全性を検証した事例。																														
検証方法	実験による検証・解析による検証・道路橋示方書の準用																														
検証方針	試設計に用いた2次元骨組み解析モデルと同モデルにて動的解析を行い、連結床版構造の安全性を検証。																														
検証内容	<p>1. 解析条件</p> <p>(1) 解析ソフト : Dyna2E</p> <p>(2) 解析種類 : 2次元線形動的解析</p> <p>(3) 解析方法 ① 固有値解析手法 : ハウスホルダー法 ② 動的応答解析手法 : 直接積分法 減衰種類 : レーリー型加振タイプ ③ 基盤加振数値積分手法 : Newmark-β法、$\beta = 1/4$</p> <p>(4) 解析条件 地盤種別 : I種 入力地震動 : レベル2 タイプII地震動 1995年兵庫県南部地震(神戸海洋気象台地盤上) : NS成分 [最大加速度: 812gal] 地震動作用方向 : 橋軸方向(x方向)、積分時間間隔 : 0.002秒</p>																														
特性																															
	<p>材料特性</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>弹性係数 (kN/m²)</th> <th>せん断弾性係数 (kN/m²)</th> <th>減衰定数</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>主桁</td> <td>3.30E+07</td> <td>1.41E+07</td> <td>0.03</td> </tr> <tr> <td>場所打ち</td> <td>2.80E+07</td> <td>1.20E+07</td> <td>0.03</td> </tr> <tr> <td>リンクスラブ</td> <td>2.80E+07</td> <td>1.20E+07</td> <td>0.03</td> </tr> <tr> <td>副材</td> <td>3.30E+07</td> <td>1.41E+07</td> <td>0.03</td> </tr> <tr> <td>支承バネ</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0.02</td> </tr> <tr> <td>点止バネ</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0.10</td> </tr> </tbody> </table>					弹性係数 (kN/m ²)	せん断弾性係数 (kN/m ²)	減衰定数	主桁	3.30E+07	1.41E+07	0.03	場所打ち	2.80E+07	1.20E+07	0.03	リンクスラブ	2.80E+07	1.20E+07	0.03	副材	3.30E+07	1.41E+07	0.03	支承バネ	0	0	0.02	点止バネ	0	0
	弹性係数 (kN/m ²)	せん断弾性係数 (kN/m ²)	減衰定数																												
主桁	3.30E+07	1.41E+07	0.03																												
場所打ち	2.80E+07	1.20E+07	0.03																												
リンクスラブ	2.80E+07	1.20E+07	0.03																												
副材	3.30E+07	1.41E+07	0.03																												
支承バネ	0	0	0.02																												
点止バネ	0	0	0.10																												
<p>図-1 解析モデル</p> <p>2. 解析結果</p> <p>(1) 固有値</p> <p>橋軸方向の有効質量比に着目すると、1、3、14次モードが卓越する。1次モードは支承のみが変形することにより上部工が振動、3次モードは端部の支点バネのみが変形、そして14次モードは中間支点バネのみが変形するという結果となった。また、固有周期は、1次モードで2.64秒、3次モードで0.50秒、14次モードで0.32秒となった。</p>																															



(2)応答変位

下部工条件一定、等スパン割のため、主桁と連結床版に位相差はない。

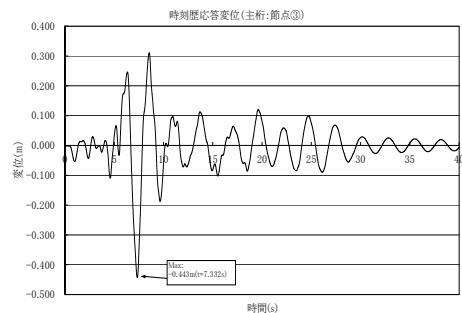


図-3 主桁の時刻歴応答変位

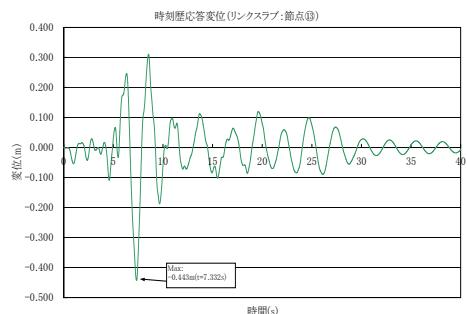


図-4 連結床版の時刻歴応答変位

(3)応答断面力

連結床版 1mあたりの最大応答断面力は下表のとおりで比較的小さいものであった。

表-1 応答断面力

	N(kN)	M(kNm)
正曲げ最大時	7.60	1.05
負曲げ最大時	-10.40	-1.07
軸力最大時（引張）	11.00	1.01
軸力最小時（圧縮）	-11.00	-1.03

3.まとめ

非線形動的解析を行うことで、径間毎に位相差が生じ、連結床版に過大な断面力が発生するかどうかなど、同構造の耐震性を評価できることが確認できた。

注意点

本事例は、主桁を等スパン割り、支承や下部工条件を一定とした検討事例である。上部工のスパン割りや下部工条件によっては、径間毎の位相差が顕著となり、連結床版に過大な断面力応答が発生することも考えられる。上部工条件だけではなく、支承や下部工条件も実状に即した形で適切に考慮する必要がある。

2.1 対傾構及び横構等の一部または全部を省略する構造

2.1.1 概要

鋼橋の対傾構や横構、横げたは、主げた間の荷重分配を適切に行い、橋全体として所要の耐荷性を発揮できる橋の立体的機能を確保するために必要とされてきた部材である。そのため、対傾構や横構の一部または全てを省略する場合には、上記機能が発揮できるよう、i)橋の断面形の保持、ii)剛性の確保、iii)横荷重の支承への円滑な伝達について適切に行われるこことを検証し、橋全体の耐荷性能として、これらを省略せずに設置されてきた場合と同等のレベルで立体的機能が確保されることを確かめる必要がある。

例えば、対傾構や横構、横げたを省略した2主鋼げた構造では、ねじり剛性の低下に伴って耐風安定性に何らかの影響が生じることが考えられる。また、対傾構や横構が省略されることで、それらが分担していた荷重分配機能などが床版に代替えされることになることから、床版にはその影響を考慮しなければならず、耐荷性能、耐久性能とともに床版としての性能以外に主げたとしてどのような性能が満足される必要があるのかについて明確にして、これを満足する必要がある。

鋼橋の設計では、主げた又は主構面に着目した平面構造として設計される場合が多く、この場合立体的挙動に大きく影響する対傾構や横構の有無や位置、構造特性をどのように適切に評価するのかが重要となる。とくに対傾構や横構のような水平荷重への抵抗機構を簡素化すると、格間座屈よりも全体座屈が先行することもあるため、従来の支間と主げた（主構）間隔の寸法比(L/B)を指標とした座屈設計のみならず、全体座屈に対して照査することが必要となる。

また、対傾構や横構、横げたの存在は、仮組立時や架設時の形状を保持しやすくすることで出来型精度など施工品質確保の機能も期待される。このため、これらを省略する場合には、発生応力などの耐荷力性能に関わる観点のみならず、施工品質確保の観点からもその影響を照査して、施工手順の検討や架設精度の管理値の設定など施工品質管理手法にも反映する必要がある。

2.1.2 技術評価の必要性の観点と方向性

対傾構や横構、横げたを省略する場合、道路橋示方書の規定する要求性能を満足するために、特に注意が必要と考えられる項目の例としては、表-2.1.1に示す下記項目が挙げられる。

- (1) 橋の立体的機能の確保
- (2) 床版の安全性・耐久性の確保
- (3) 床版への影響の確認及び橋体の面外剛性の確保
- (4) 座屈耐荷力の確保
- (5) 施工品質の確保

以下では、道路橋示方書の要求性能を満足するために、構造に応じてあらためて技術評価が必要と考えられる項目の例をその評価の方向性とともに示す。

(1) 橋の立体的な機能の確保

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書Ⅱ鋼橋編 7.1一般】

橋の立体的機能を確保するため、対傾構、横構を設けて橋の断面形の保持、橋の剛性の確保、横荷重の支承への円滑な伝達を図る場合には、以下の(1)から(3)までの規定ならびに7.2の規定によるものとする。なお、橋の支点部は、原則として対傾構、橋門構あるいは横げたを設けて床版あるいは上横構に作用する全横荷重を支承に円滑に伝達できる構造とするものとする。· · · · ·

(2) 対傾構及び横構について、その橋の主げた又は主構に適用される章に規定されている場合は、その規定によるものとする。

(3) 対傾構及び横構は、それぞれの構造形式に該当する章の規定を満足するものとする。

【道路橋示方書Ⅱ鋼橋編 10.6.3 横構】

(1) I形断面の鋼げた橋には、横荷重を支承に円滑に伝達するように上横構及び下横構を設けるのを原則とする。

(2) 上路式の鋼げた橋で鋼床版あるいはコンクリート床版とけたとが結合されていて、けたの横倒れ等に耐えられる場合は、上横構を省略することができる。

(3) 支間が25m以下で強固な対傾構がある場合は、下横構を省略することができる。ただし、曲線橋では下横構を省略してはならない。

【道路橋示方書Ⅱ鋼橋編 12.5.2 横構】

(1) トラスの上弦及び下弦にはそれぞれ横構を設けるのを原則とする。

(5) 横構は主トラス弦材応力の一部を分担するほか、中間対傾構の影響による付加応力を受けることがあるので、余裕を見込んだ設計を行うように配慮することが望ましい。

■技術的課題

道路橋示方書では橋の立体的機能を確保するために、対傾構や横構を設けることを原則としている。したがって、対傾構や横構の一部または全てを省略しようとする場合には、床版等をこれらの代替え部材として評価する等して、①橋の断面形の保持、②剛性の確保、③横荷重の支承への円滑な伝達が図られていることを検証することが必要である。また床版は対傾構や横構がある場合とは異なる荷重分担を受け持つこととなるため床版と主げたの両方の機能それにその影響を考慮した耐荷力、耐久性両方の性能が所要の水準で満足されることを確認する必要がある。

■性能評価の対応策

横構を省略した構造を採用する場合には、下記3点について横構を設けた構造と同等の立体的機能が確保されていることを検証する。

① 橋の断面形の保持

横構が省略された構造では、主げた又は主構面が立体的に変形しやすくなるため、平面構造として解釈することの妥当性を確認するか、立体解析により横構省略の影響も考慮できる

解析を行う。

② 剛性の確保

横構が省略された構造では、床版剛性を評価して橋の全体剛性を確保する。また、架設時には床版剛性に期待できないため、主げたと対傾構だけからなる架設系に対する安定性確保について照査し、必要に応じてねじり剛性を確保できるよう部材（恒久または架設時）の追加を検討する。

なお、剛性低下は振動特性に影響を及ぼし、一般には耐風安定性の低下につながるため、例えば、「道路橋耐風設計便覧」（日本道路協会）等を参考にして耐風安定性の検証を行う。

③ 横荷重の支承への円滑な伝達

支間部に作用する横荷重を支点まで伝達しているのは横構や床版である。下横構を省略した場合には、下フランジに作用する横荷重が対傾構を介して上フランジと床版に伝達され、床版の横剛性で中間及び端支点に伝達されるように適切に設計する。このとき別途床版については床版としておよび主げたの一部として所要の性能（耐久性、耐荷力）が満足されることをそれぞれの機能に着目して照査する。

【解説】

橋全体としての構造安全性を確保するためには、橋が全体として立体的に機能できる必要がある。耐震性能や耐風安定性など橋の様々な性能に対しても橋全体として立体的に挙動出来ることが前提となって設計されるのが一般である。道路橋示方書7章「対傾構、横構」では、橋の立体的機能を確保するために対傾構及び横構を設ける場合について規定している。

10章「鋼げた」、12章「トラス」、13章「アーチ」の各章では、橋梁形式ごとに対傾構及び横構に対して必要な性能を満足するとみなせる一つの方法としての標準的な構造や設計上の制約等について規定しており、対傾構及び横構（横げた）の構造の一部または全部を省略したり、これらの規定とは異なるものとする場合には、規定に準じた設計を行った場合に対して同等以上に橋の立体的機能が確保されることを確認することが必要となる。

10章「鋼げた」では、10.6.3で鋼げた構造の横構に対して規定している。10.6.3の(1)、(2)及び(3)項は、「10.6.1 橋全体の立体的機能を確保できる構造」を受けた見なし規定であり、条件付きで下横構の省略を認めているものの、横荷重への抵抗と構造物全体の剛性確保のためには上下横構の設置が原則としている。なお、曲線橋においては、横構を省略すると構造物全体のねじり抵抗が不足し危険となる場合が多いため、横構を省略してはならないと追加している。

12章「トラス」では、12.5.2でトラスを主体とした橋の横構に対して規定している。12.5.2の(1)及び(5)項は、12.5.1の(1)「トラスの設計にあたっては、橋が立体的に機能する構造となるようにするものとする。」を受けた見なし規定であり、横構は単に横荷重に抵抗するための構造であるのみならず、上下両横構が対傾構や橋門構と共に存することによって、橋の耐荷機構を立体的にし、全体座屈に対する安全性を向上させる重要な部材であり、安易に横構を省略するのは好ましくないとしている。

なお、立体骨組み構造における対傾構及び横構に求められる機能は、トラスもアーチも同様に位置づけられるため、13章「アーチ」では、対傾構及び横構に関しては12章「トラス」を参照するものとして規定は省略されている。

一方、近年、少数主桁橋において、対傾構や横構、横げたの一部または全部を省略する構造を

検討する場合がある。このような場合上記のような観点から橋の立体的機能が確保されるなど橋として所要の性能満足することを個別に検証する必要がある。

① 橋の断面形の保持

従来の上路式鋼げた橋は、一般に主げたと横げたを棒要素とした平面骨組み（格子）解析によって設計される。これは、下横構により主げたの水平方向変形が拘束されているため、橋の断面形は保持されるものとみなして扱っても結果に影響しないとの考えによる。

しかし、横構を省略すると、図-2.1.1に示すように、鉛直荷重に対する支間のたわみによって、主げたが面外方向に変位するため、断面形状が維持される構造に比べてねじり剛性が低下する傾向にある。そのため偏載荷重に対して大きなねじり変形が生じるなど平面解析だけで耐荷力性能は適切に評価できない。

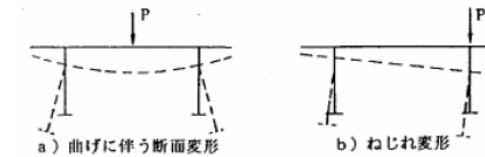


図-2.1.1 荷重による断面変形

また、従来のトラスやアーチなどの立体骨組み構造に対しては、一般に荷重や路面線形に対する小さな非対称性は無視し、主構面を独立した平面構造としてモデル化することも多い。

しかし、横構が省略され主構面が横支持されない場合、非対称性の影響により主構平面が傾いたり、主構面内での平面保持が維持されない挙動が考えられる。

以上のような断面内の変形挙動とその影響を適正に評価するためには、例えば立体FEM解析を行うことも有効である。

【検証事例-1】

② 剛性の確保

上横構を省略し、その代替機能を床版に期待する場合では、床版がない桁のみの状態ではねじり剛性が極めて小さい構造系となる。したがって、架設時に床版のない状態となる場合にはけたの形状保持と横ねじれ座屈に対する安全性確保が重要となる。このような状態の評価について、弾塑性有限変形解析により主げたと対傾構だけからなる構造の降伏荷重を求め、架設時荷重との比により架設時安全率を求め、必要な剛性確保のための仮設材設置範囲を検討した事例がある。

【検証事例-2】

ここで、水平剛性の確保は床版の水平剛性に期待することができるが、床版とけたの定着を確実に行うとともに床版には主げたと同等の耐久性を確保することが前提条件となる。これに対し、床版のせん断抵抗面積をトラス部材に評価した立体骨組み構造や、床版をシェル要素あるいはせん断パネルとして評価した立体骨組み解析により、橋の剛性確保を検証した事例がある。

【検証事例-3】

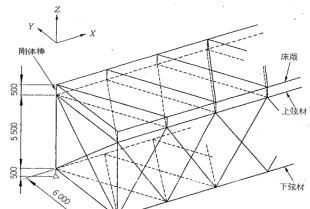
また、剛性の低下は耐風安定性の低下にもつながることもある。そのため、横構が省略された2主桁で支間長が比較的長い場合のように耐風安定性の低下が考えられる場合には、耐風安定性を照査する必要がある。

表-2.1.1 対傾構および横構の簡略化（省略）構造に関する技術評価の必要性の観点と方向性

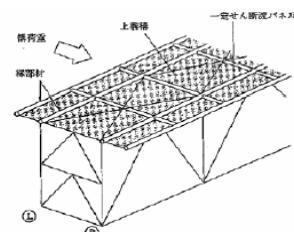
道路橋示方書の要求性能	技術評価の必要性の観点	技術評価の方向性	検証方法	検証事例など
«(A) 使用目的との適合性» 道示I 1.5 ・橋が計画どおり交通に利用できる機能を有すること。				
«(B) 構造物の安全性» 道示I 1.5 ・死荷重、活荷重、地震の影響等の荷重に 対して橋が適切な安全性を有していること。	【立体機能】 橋の断面形の保持を確保	<p>【鋼桁】 ・横構が省略された場合は、平面格子解析では解析 できない変形挙動を評価した安全性を検証する。</p> <p>【トラス、アーチ】 ・横構が省略された場合は、主構だけの平面解析面 で評価出来ない変形挙動を評価した安全性を検証する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・床版や主桁腹板をシェル要素とした立体FEM解析 により設計する。 ・トラスやアーチ橋では、立体骨組み解析により立 体挙動を評価した設計を行う。 	事例1 断面形の保持 (鋼桁)
	【立体機能】 剛性の確保（水平剛性、ねじり剛 性）	<p>【鋼桁】 ・横構が省略された場合は、架設時や床版打設時に は、U型断面やH型断面となり、変形しやすく座屈 耐荷力も低下するため、仮設材の設置を検討し安全 確保を行う。</p> <p>【鋼桁】 ・床版を横構の代替え部材と見なし、床版剛性を主 桁作用に評価することで、全体の水平剛性やねじり 剛性を検証する。</p> <p>【トラス、アーチ】 ・床版側の横構省略に対しては、床版を主構に剛結 することで鋼桁の場合と同様に検証できる。 ・床版の反対側横構の省略に関しては、ラーメン形 式の横構（平面構造）として剛性を検証することも できる。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・桁構造の架設時安定照査は、シェル要素を用いた 立体FEM解析による弾塑性有限変形解析により、 降伏荷重と架設時実荷重との比率により所要安全率 を確保する。 ・所定の安全率が確保できるよう必要に応じて仮設 部材（仮設横構）を追加する。 ・床版の水平剛性を評価した下記に示す立体解析で 得られる変形量により剛性確保を確認する。 【解析手法】 ①床版をトラス骨組へ置換した骨組み解析 ②床版を板要素評価したFEM解析 ③床版を一定せん断流バネル評価した骨組み解析 ・上記手法による解析結果から床版応力度を照査す る。 ・床版と鋼桁の結合構造を照査する。（桁との合成 および横荷重に対するずれ止め機能の検証） ・床版と主桁（主構）との剛結に相応しい、曲げと せん断伝達構造として設計する。 ・綾構構造からラーメン（フィーレンディール）構 造とする場合、綾構構造以上の水平剛性を確認。 	事例2 断面形の保持 (架設時)
	【立体機能】 横荷重の支点への円滑な伝達	<p>【鋼桁】 ・下横構が省略された上路鋼桁では、下フランジに 作用する横荷重が、対傾構、床版、支点部横構を経 由して、支承まで伝達されることを検証する。</p> <p>【トラス、アーチ】 ・横支材と主構弦材からなるラーメン構造により水 平剛性を確保し、横荷重を支点まで伝達することを 検証する。 ・ラーメン構造を形成する弦材および横支材は曲げ 部材として設計する。 ・支点部には強固な対傾構、橋門構を設け、横荷重 を支点に伝達する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・床版と主桁腹板をシェル要素、その他の部材は梁 要素とした立体FEM解析により、横荷重の支承ま での伝達を確認する。 ・床版と主桁は剛結モデルとして解析する。実際に はジベル等を配置して床版と桁との一体化を図る。 ・解析により得られた応力分布により、下フランジ →対傾構部の垂直補剛材→対傾構→床版→支点部横 構→支承までの横荷重伝達を検証する。 ・横支材と弦材によるラーメン構造を期待した設計 をする場合は、トラス橋であってもこれら部材の面 外曲げ剛性を評価した立体骨組み構造解析を行 う。部材設計においても、曲げと軸力を受ける部材とし て道示に従い設計する。 	事例3 剛性の確保

道路橋示方書の要求性能	技術評価の必要性の観点	技術評価の方向性	検証方法	検証事例など
	<p>桁の横倒れ座屈耐荷力の向上</p> <p>床版の安全性・耐久性の確保</p> <p>耐風安定性の確保</p> <p>施工品質の確保</p>	<p>【鋼桁】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・横構が省略された場合は、圧縮フランジに対してはボニートラスのHoltの方法を応用して、U型フレームの所要剛性を確保する。 ・格間座屈の他、全体座屈に対しても座屈耐力を照査する。 <p>【トラス、アーチ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・横構が省略された構造では全体座屈が先行するため、トラス弦材の座屈長は骨組み長ではなく別途有効座屈長を求め座屈耐力を照査する。 <p>・床版を横構の代替え部材と考え、横構省略の場合には、床版剛性を評価した解析により、主桁作用による床版応力を照査する。</p> <p>・鋼桁と床版間の横荷重伝達が円滑に行われるよう、ジベル等を適切に配置する。</p> <p>・中間横桁を省略した構造においては、床版剛性を評価した解析により、荷重分配機能の確保と床版応力を照査を行う。</p> <p>・横構を省略した2主鋼桁では、剛性低下によりL>80m程度では耐風安定性が悪くなる傾向にあるため、必要に応じて動的耐風設計を行う。</p> <p>・対傾構や横構を省略した構造では、地盤立て時や架設時の鋼断面だけでは剛性が小さく変形しやすため、施工段階での変形が最終形状に悪影響を及ぼさないよう施工手順を適切に評価した解析と形状管理を行う。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・横構省略と対傾構構造の簡素化を行う鋼桁では、圧縮フランジの水平剛性確保のために、ボニートラスのHoltの方法を応用して、U型フレームの所要剛性を確保する。 ・横構が省略された鋼桁構造で、支間と主桁間隔の比（L/B）が大きい場合は、薄肉はり格子構造の固有値解析により、有効座屈長を決定し全体座屈耐荷力を検証する。 ・横構が省略されたトラスやアーチ橋では、面外座屈長は全体構造の固有値解析により、有効座屈長を決定し全体座屈耐荷力を検証する。 <ul style="list-style-type: none"> ・床版をシェル要素とした立体FEM解析あるいは床版を一定せん断流パネル評価した立体骨組み解析により、床版の水平曲げを算出し断面照査する。 ・床版と主桁の結合は剛結モデルとするが、床版厚を評価するためにダミー部材を挿入する。 ・主桁と床版間の連結部断面力として算出される曲げせん断力に抵抗できるジベルの配置設計を行う。 ・床版をシェル要素評価、あるいは一定せん断流パネルとして評価し、主桁と一緒に立体解析により、荷重分配機能の確保と併せて床版応力を照査する。 <ul style="list-style-type: none"> ・動的耐風設計に用いるべき架設地点の風の特性値を推定する。 ・耐風設計便覧に従い動的耐風設計の必要性を判定する。 ・動的耐風設計が必要とされた場合は、耐風設計便覧の照査式に耐風性を評価する。 ・耐風性能の改善が必要と判定された場合は、実験や解析により詳細な検討を行い、性能改善を図る。 <ul style="list-style-type: none"> ・施工時の仮設材の設置状況や施工手順に忠実な解析を行い、横構が省略された構造の立体変形挙動を確認し、適切なキャンバー設定あるいは部材仕口形状の決定を行う。 	<p>事例5 座屈耐荷力①</p> <p>事例6 座屈耐荷力②</p> <p>→ 「事例3」参照</p>
<p>« (D) 施工品質の確保» 道示I 1.5 ・使用目的との適合性や構造物の安全性を確保するために確実な施工が行える性能を有すること。 ・施工中の安全性が確保されること。</p> <p>« (E) 維持管理の容易さ» 道示I 1.5 ・供用中の点検や材料状態の調査および補修作業が容易に行えること。</p> <p>« (F) 環境との調和» 道示I 1.5 ・建設地点周辺の社会環境や自然環境に及ぼす影響を軽減あるいは調和させること。 ・周辺環境にふさわしい景観性を有すること。</p> <p>« (G) 経済性» 道示I 1.5 ・ライフサイクルコストを最小化する観点から、建設費だけでなく点検管理や補修等の維持管理を含めた費用がより安価であること。</p>				

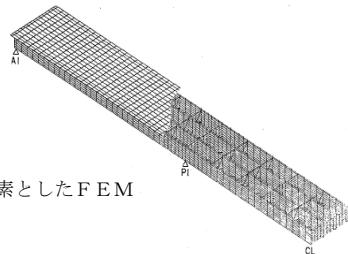
例えば、道路橋耐風設計便覧を適用して、動的耐風設計の必要性を判定（寸法諸元により判定）し、必要とされた場合には照査式により振動発現風速と照査風速を比較し詳細判定する。また、照査式を満足出来ない場合には実験や解析により詳細な動的耐風設計を行う。



床版をトラス骨組み置換



床版をせん断パネル評価



床版をシェル要素としたFEM

図-2.1.2 床版の剛性を考慮する解析モデルの例

③ 横荷重の支承への円滑な伝達の確保

横荷重の支点への円滑な伝達は橋の立体機能のひとつであり、橋がその性能を満足できるためには不可欠な要素である。支承型式の橋では上部構造に作用する横荷重は支承部を介して下部構造へと伝達される。そのため支間部など支点と離れた部位に作用する横荷重は横構や対傾構、床版を解して支点部に作用することとなる。このため横構や対傾構を省略する場合には横構や対傾向が担っていた荷重伝達分を床版が担うことになり、その影響を適切に考慮することが必要である。また対傾構と横構のいずれかのみ省略される場合には、配置された対傾構や横構が床版と協働あるいは分担して横荷重を支点部まで伝達することとなる。このような場合には荷重伝達経路を把握したうえでそれぞれの部材を適切に設計するとともに、橋全体として所要の立体的機能が満足されることを検証することとなる。

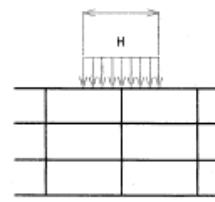


図-2.1.3 下フランジへの風荷重載荷

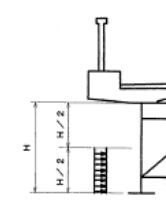


図-2.1.4 風荷重による下フランジ水平曲げ

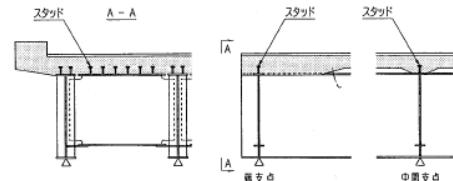


図-2.1.5 床版から支点部横げたへの伝達

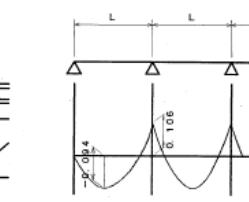


図-2.1.6 支点部横げたから支承への伝達

(2) 床版の安全性・耐久性の確保

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書Ⅱ鋼橋編 7.1一般】

橋の立体的な機能を確保するため、・・・・。

なお、橋の支点部は、原則として対傾構、橋門構あるいは横げたを設けて床版あるいは上横構に作用する全横荷重を支承に円滑に伝達できる構造とする。

【道路橋示方書Ⅱ鋼橋編 8.1.2 設計一般】

(2) 床版は、必要に応じて以下の1)及び2)に示す規定を満足するものとする。

- 1) 床版に主げた間の荷重分配作用を考慮した設計を行う場合には、その影響を適切に評価し、その作用に対して安全なようにするものとする。
- 2) 地震の影響や風荷重等の横荷重に対して床版が抵抗する設計を行う場合には、その影響を適切に評価し、それらに対して安全なようにするものとする。

■技術的課題

横構を省略した場合の床版には、床組作用だけでなく横荷重やねじりにも抵抗できる断面とすることが求められる。加えて主げたの一部として不可欠な部材となるため主げたとしての性能も求められる。

■性能評価の対応策

主げたから床版への横荷重伝達が適切に評価できるモデルを用いて、主げた作用による床版に生じる応力を検証する。

【解説】

横荷重に対する床版の抵抗や主げた作用に起因する床版応力を評価できる解析手法として、床版をシェル要素とした立体FEM解析や床版を一定せん断流パネル要素として扱う立体骨組み解析等が考えられる。

床版をシェル要素とした立体FEM解析例を以下に示す。この場合、主げた棒要素と床版板要素間に仮想部材を設ける等して、床版厚の影響を評価するとよい。

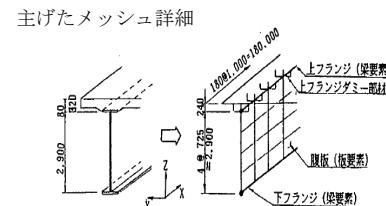
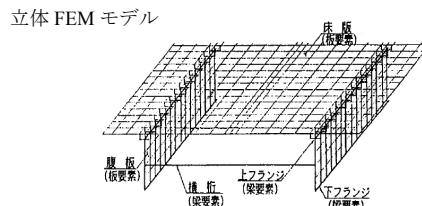


図-2.1.7 床版を含めたFEMモデル

(3) 床版への影響の確認及び橋体の面外剛性の確保

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書Ⅱ鋼橋編 10.6.2 対傾構】

(2) I形断面及びπ形断面の鋼げた橋では、6m以内で、かつ、フランジ幅の30倍をこえない間隔で中間対傾構を設けるものとする。

(3) 床版を3本以上のけたで支持し、かつ、けたの支間が10mをこえる場合は、それらのけたの間には剛な荷重分配横げたを設けるものとする。荷重分配横げたの間隔は20mをこえてはならない。

■技術的課題

道路橋示方書では、対傾構（中間横げた）に関して上記のように規定している。この規定を逸脱して、対傾構（中間横げた）間隔を大きくしたり、省略する場合には、①主げた間の相対たわみや床版への影響、②剛性の確保、③面外力の伝達、④ずれ止め（ジベル）配置、⑤床版の変形、に問題がないことを検証する必要がある。

■性能評価の対応策

対傾構（中間横げた）を簡略化又は省略した構造を採用する場合は、けた及び床版構造の立体制動を明らかにして、主げた間の相対たわみや床版への影響が問題ないことを、主げた及び床版を適切に評価できるモデルを用いて検証する。

【解説】

道路橋示方書Ⅱ鋼橋編10.6.2の規定は、10.6.1「橋全体の立体的機能を確保できる構造」を満足できる一つの方法としての規定であり、(2)はI形断面の鋼げたにおける荷重の過大な集中を緩和し、主げた間の相対たわみを抑制するために中間対傾構を設けることを規定したものである。また、(3)は8.2.4及び8.3.4で定めるコンクリート床版の設計上の仮定から乖離しないように、中間対傾構と一緒に荷重分配横げたを設けるよう規定したものである。

対傾構（中間横げた）を簡略化又は省略した構造を採用する場合、床版への影響の確認及び橋体の面外剛性の確保であり、つぎのような着目で性能を検証することが必要となる。

- ① 主げた間の相対たわみ及び床版への影響
- ② 剛性の確保
- ③ 面外力の伝達
- ④ ジベル配置
- ⑤ 床版変形の影響

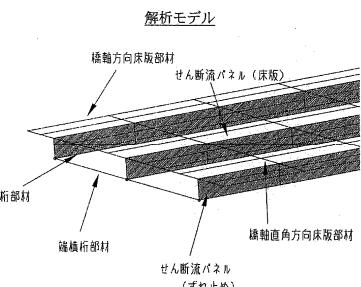


図-2.1.8 解析モデルの例

(4) 座屈耐荷力の確保

■関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書Ⅱ鋼橋編 12.2.3 トラス圧縮部材の有効座屈長]

(4) トラス面外

圧縮部材のトラス面外の有効座屈長は骨組長をとるのを原則とする。ただし、12.5 に規定する横構、対傾構又は橋門構によって横方向に支持される主トラス弦材及び腹材はその支持間隔を有効座屈長としてよい。

[道路橋示方書Ⅱ鋼橋編 12.10 全体座屈に対する照査]

主トラスの支間長に比べてその主構間隔が非常にせまいトラス橋では、全体座屈について適当な方法により照査するものとする。

[道路橋示方書Ⅱ鋼橋編 13.4 アーチの面外座屈]

(1) 主構間隔が支間に比べて小さいアーチ橋は、面外座屈に対して安全であることを照査するものとする。

■技術的課題

従来の構造形式の場合、トラス橋では L/B (支間と主げた間隔比) <20 、アーチ橋では $L/B<30$ 、2 主鉄析橋では $L/B<18$ の範囲では格間座屈が先行するため、全体系の面外座屈に対する照査は不要と考えられている。しかしながら、これらの判断基準は横構や対傾構により格点部が十分に横方向に支持されていることが条件となっているため、横構が省略されたり対傾構が簡略化された構造においては L/B を指標に安易に判定することなく、全体系の面外座屈に対する照査を行う必要がある。

■性能評価の対応策

従来の L/B に基づいた判定によるのみならず、構造個別に有効座屈長を求めて全体系の面外座屈に対する安全性について検証する。

【解説】

主構弦材の面外方向の座屈に対しては、弦材を他の部材がどのように横支持しているかが大きな影響をもつことになる。12.2.3において有効座屈長として骨組長をとることができるとした前提には、主構の格点が横構、対傾構あるいは橋門構によって十分に横支持されていることがある。一方、12.10 では、主トラスの支間長に比べて主構間隔が非常に狭いトラスでは、横構によって連結された圧縮弦材全体が横倒れ座屈を生じるおそれがあるので、それを照査するよう規定している。同様に 13.4 では、アーチ橋においても、幅員がせまく支間が大きい場合には、構造系全体の横倒れ座屈に対する配慮が必要であるとして、照査規定が設けられている。

従来の I 形断面の主げた構造では、対傾構（横桁）間の主げたの横ねじれ座屈（格間座屈）に対する構造安全性の照査が行われ、全体座屈に対しては省略できることが多い。しかし、横構が省略された構造では、ねじり剛性の低下と横げた構造の簡素化とが相まって全体座屈が先行する危険性

が大きいため、とくに、架設時あるいは床版打設前のけた構造に対しては、全体座屈に対する照査が必要となる場合がある。

主構弦材の面外への座屈に対しては、弦材を他の部材がどのように横支持しているかが大きな影響をもつことになる。道路橋示方書の規定は、主構の格点が横構、対傾構あるいは橋門構によって十分に横支持されていることが前提条件となっているため、横構が省略されたトラス弦材の座屈長は、構造全体の骨組みモデルによる線型座屈解析（弾性固有値解析）により各部材の有効座屈長を算出する等して、個別に座屈設計する必要がある。

主構間隔が狭く、長支間のトラス橋では平面形状が非常に細長くなり、横構によって連結された圧縮弦全体が横倒れ座屈を生じるおそれがあるので、これに対する照査が必要である。横構が省略された構造では更に横倒れ座屈が生じやすくなるため照査の必要性はより高いといえる。

幅員が狭く支間が長いアーチ橋では、構造系全体がアーチ面外方向に横倒れ座屈を起こすおそれがある。支間・ライズ比が約 6 以上で、十分な横構、対傾構、橋門構を備えたアーチ橋で、支間・主構間隔比が約 20 以下のアーチ橋では、一般に完成系に対する面外座屈の照査は不要と考えられる。しかし、支間・主構間隔比が約 20 以下のアーチ橋であっても、横構が省略されたアーチ橋では面外剛性が低下するため、面外座屈の照査をすべきである。とくに、中路式アーチ橋については、上路式や下路式と比べて横構や対傾構が少なく配置される場合が多いので注意を要する。

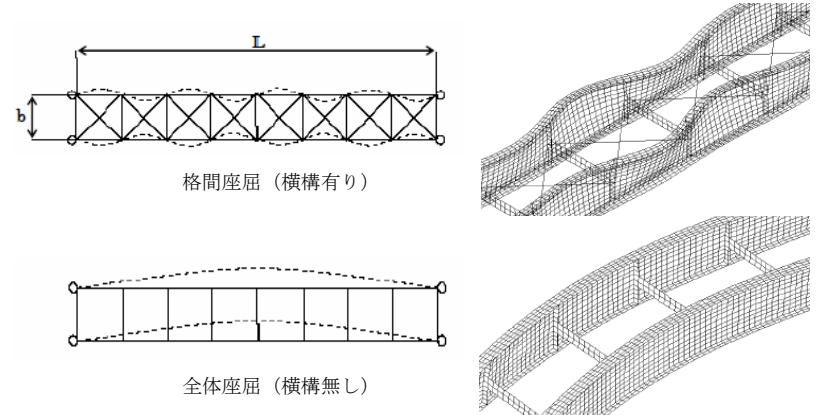


図-2.1.9 格間座屈と全体座屈

従来の横構を有する構造においては、道路橋示方書や設計便覧で示される全体座屈を起さない L/B の上限値を目安に座屈照査を省略できる場合があるが、横構を省略した構造においては全体座屈が先行しやすくなる。これに対しては、「有効座屈長法」による横ねじれ座屈照査によって安全性を確認した事例がある。また構造全体の骨組みモデルによる線形座屈解析（弾性固有値解析）結果から得られる各部材の有効座屈長を用いて、道路橋示方書に準じた座屈設計を行うこともできる。

【検証事例-4、検証事例-5】

また、架設時に床版剛性が期待できないことから、架設条件、荷重を忠実に評価した解析を行い、必要に応じて仮横構を部分的に設置することによって安全性を確保した事例もある。

【検証事例-2】

(5) 施工品質の確保

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書Ⅱ 鋼橋編 17.3.3 組立精度】

- (1) 鋼橋を構成する部材の組立精度は、架設完了後に設計で要求する性能を満足する水準でなければならない。

架設現場では、現場継手を仮組立時と同様に再現すれば、所定の形状が得られるが、架設工法によっては、すべての部材を仮組立時と同じ応力状態にしないこともある。たとえば、支保工なしで架設する曲線げたや、斜角のきつい斜橋の架設においては、主げたのねじれや主げた相互のたわみ差が生じて横げたや対傾構と主げたとのとりあいに食い違いが生じることがある。このような場合には、設計や架設工法を考慮に入れて適切な仮組立方法を選ばなければならない。

■技術的課題

横構は完成系としての機能のみならず、仮組立時の形状決定や架設時の主げた（主構）の位置決めなどに寄与している。横構を省略した場合には、代替部材（治具）や架設順序について検討することが必要である。

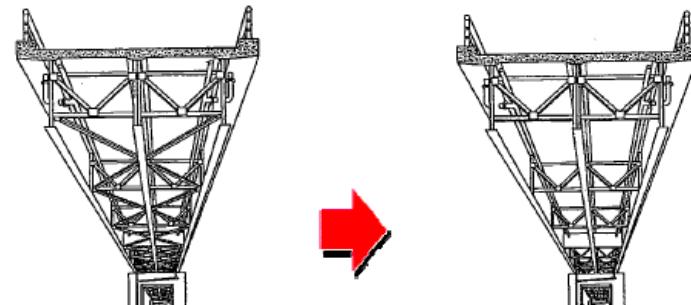
また、横構を省略する場合、けた構造の剛性が低下して変形しやすくなるため、キャンバーや部材仕口形状について架設手順を考慮した設計を行うことが必要となる。これらに不備があると、とくにケーブル架設等の場合には、完成形状に大きく誤差が生じる危険性がある。

■性能評価の対応策

横構を省略する場合、完成系に対する設計だけでなく、施工手順を考慮した形状管理も考慮した上で決定する。

2.1.3 横構省略構造の施工例

- ① 横構を省略した鋼げた橋



下横構有り

下横構省略

図-2.1.10 下横構を省略した例



写真-2.1.1 少数鋼桁での横構省略・横げた簡略化構造

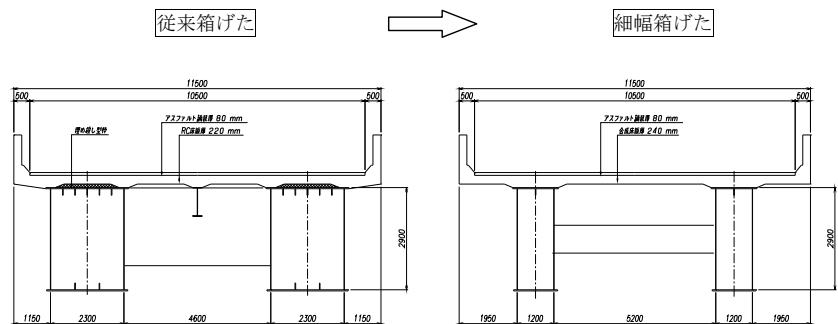


写真-2.1.2 下横構を簡素化した上路トラス（シングルワーレントラス）



写真-2.1.3 上横構、下横構、対傾構を省略した上路トラス

③ 中間横げたを簡略化した箱げた構造



- 162 -

② 横構を省略したアーチ橋

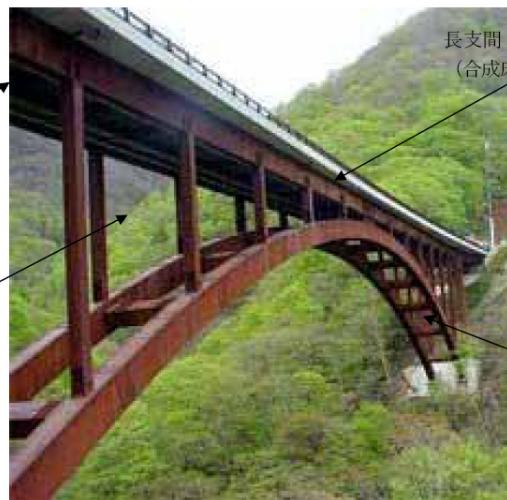


写真-2.1.4 横構を省略したアーチ橋

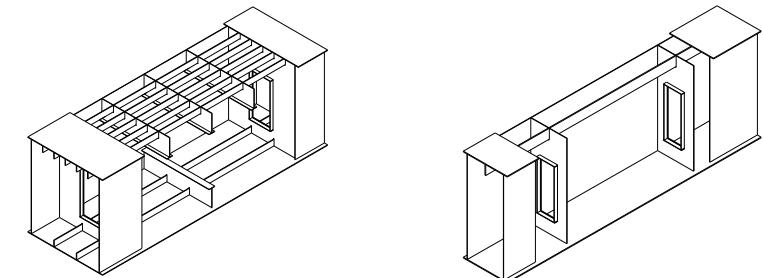


図-2.1.11 中間横げたを簡略化した例



引佐ジャンクション



主げた仮組状況（猿渡川橋）

写真-2.1.5 細幅箱桁での中間横げた簡略化構造

2.1.4 検証事例

検証事例-1 断面形状の保持に関する評価			
要求性能	構造物の安全性（立体機能の確保）	関連規定	道路橋示方書II鋼橋編（7.1）、（10.6.3）
検証目的	横構は横荷重に抵抗するだけでなく主桁や床版と協働して橋断面としては擬似的に閉断面を形成し荷重分配作用に寄与している。これは主桁の断面設計などでは考慮せず安全側となるよう設計されるのが一般であるが、横構の省略は形状保持機能、断面全体の剛性の低下など省略しない場合とは差異が生じる。		
	横構を省略した鉢桁において、床版剛性を有効とした場合に、走行荷重に対してどの程度の断面形状保持機能が確保されているのかを確認した検証事例。		
検証方法	実験による検証・解析による検証・道路橋示方書の準用		
検証方針	床版・腹板をシェル要素、主桁フランジを梁要素、横構・対傾構をトラス要素とした立体FEM解析により部材の変形と応力を算出。 立体FEM解析は横構の有・無と活荷重満載・偏載を組み合わせて4ケース実施。比較対象用に平面格子解析（グリッド）2ケース（満載・偏載）を追加し、6ケースの解析結果の変形と応力を比較検討。		
	1) 大塚、佐藤、竹中、和地：下横構を省略したプレートガーダー橋の提案、橋梁と基礎、1993.11		
注意点	1) 本例では床版剛性の評価として床版をシェル要素とした立体FEM解析を採用しているが、床版部材のモデル化はシェル要素に限定されるものではなく、検証事例-3に示すように、トラス組やせん断パネル評価なども考えられる。 2) 本例では、従来の平面格子解析と床版剛性を評価した立体FEM解析結果を比較している。従来の平面格子解析は床版部材による余剰効果を無視した安全側の解析であるのに対し、立体FEM解析では床版剛性も評価した解析である。実際の挙動は立体FEM解析の結果に近いものに成ると思われるが、両者では余剰効果の扱いに差があり、安全率が異なることに留意する必要がある。		

検証事例-2 断面形の保持（架設時）			
要求性能	構造物の安全性（立体機能）	関連規定	道路橋示方書II鋼橋編（10.6.3）
検証目的	I形断面の鋼桁は架設時や床版打設時においてねじり剛性が低い構造である。このような桁形式では、横構を省略した場合にはねじり剛性が極めて小さな構造となり、桁の形状保持機能が著しく低下するため、架設時の安全性について確認するとともに、必要に応じて仮設材の設置範囲を決定した検証事例。		
	検証方法 実験による検証・解析による検証・道路橋示方書の準用		
検証方針	1) シェル要素を用いた立体FEM解析による弾塑性有限変形解析により降伏荷重を算出し、架設時の実荷重との比率により架設時安全率を検証・確保。 2) 桁構造のFEM解析の代替手法として、薄肉断面はりによる骨組みモデル荷重載荷用オフセット剛部材の追加や部材結合を評価したバネ要素を挿入することで、骨組みモデルによる線形座屈解析を行うことも可能。		
	参考文献 1) 中村、石川、長岡、恒遠：第二黒部谷橋工事報告、クリモト技報、No.48、2003.3 2) 馬場、福岡、森、伊藤：PC床版連続合成2主桁橋「千鳥の沢川橋」の施工、橋梁と基礎、1998.10 3) 端本、坂本、大久保、田中、福田：大津呂川橋の設計と施工、片山技報、No.20、2000		
注意点	上記文献の3例とも、実際の橋梁諸元及び架設時荷重を用いた解析であり、同様な構造形式に対する座屈安定性に関して一般的結果を導けるものではない。実際の橋の設計においては、橋梁諸元や架設条件を反映した個別の解析により、安全性の確保を検証することになる。		

検証事例-3	剛性の確保		
要求性能	構造物の安全性（立体機能）	関連規定	道路橋示方書Ⅱ鋼橋編 (10.6.3)
検証目的	<p>横構を省略した構造では、床版に横構の断面保持機能を分担させることで必要な水平剛性やねじり剛性が確保されることとなる。</p> <p>床版剛性を考慮して評価することでねじり剛性が確保されることを確認した検証事例。</p>		
検証方法	実験による検証・解析による検証・道路橋示方書の準用		
検証方針	<p>1) 床版の剛性を評価できるためのモデル解析手法としては下記が考えられる。</p> <ol style="list-style-type: none"> ① トラス骨組みへ置換した骨組み解析 ② 細分割した板要素を用いたFEM解析 ③ せん断パネル要素とした骨組み解析 <p>2) 上記手法により算出した床版部材断面力（FEMの場合は直接応力度）から床版応力を照査。</p> <p>3) 主桁（主構）との結合構造については、剛結としての解析（上記3手法）で得られる結合部断面力に対し、スタッド等の連結材設計を実施。</p>		
参考文献	<p>1) 尾下、松永、天沼、加藤：下横構省略によるプレートガーダー橋の構造改善策、橋梁と基礎、2004.5</p> <p>2) 市川、尾下：上路トラス橋における上下横構の荷重分担について、横河ブリッジ技報No24、1995.1</p> <p>3) 川尻、梅津、至田：滝下橋の計画・設計、橋梁と基礎、1998.3</p>		
注意点	<p>1) 鋼桁構造の場合、一般的橋梁では横荷重を全て床版に載荷しても床版応力は極端に大きくならないと考えられるが、幅員に対して支間の比率が大きい場合には床版応力が相対的に大きくなるなど個別の確認が必要である。</p> <p>2) 床版に横荷重抵抗させる場合には、主桁（主構）から床版への横荷重伝達構造が重要であり、部分モデルを抽出して詳細構造決定することが必要である。</p> <p>3) トラスやアーチ橋などの立体骨組み構造で横構を省略する場合には、床版が負担する横荷重の分担率が大きく影響するので、実橋に即した分担率を反映した横荷重により床版設計することが必要である。例えば横荷重の1/2を床版が負担するといった単純な仮定では適切な評価とならないことがある。</p> <p>4) 上路トラスにおいて下横構を省略する例のように、立体骨組み構造では鋸げた型式の場合と比べて横構省略による水平方向の剛性の低下が著しくなるため、特に慎重な個別の構造安全性の検証が必要である。</p>		

検証事例-4	横座屈に対する耐荷力の確認		
要求性能	構造物の安全性	関連規定	道路橋示方書Ⅱ鋼橋編 (10.6.3)
検証目的	<p>横構を省略した少数主桁橋では、床版コンクリート打設時や送出し架設時などの施工時に主桁が横ねじれ座屈を起こす危険性がある。また、横構を設けている場合でも、主桁間隔が小さく支間長が大きな場合は、全体横ねじれ座屈の可能性がある。架設中の各段階において構造安定性を照査した検証事例。</p>		
検証方法	実験による検証・解析による検証・道路橋示方書の準用		
検証方針	<p>文献¹⁾では薄肉断面梁格子構造の弾性固有値解析結果から「有効座屈長法」により横ねじれ座屈の照査を行う方法が紹介されている。具体的には、弾性座屈固有値解析により算出される弾性座屈曲げモーメントより、圧縮フランジの座屈長を算出。この座屈長から道路橋示方書の許容曲げ圧縮応力度を算出することで安全性を照査。</p>		
参考文献	<p>1) 尾下里治、水口知樹、江川定利：鋼I桁橋の横ねじれ座屈に関する設計法の提案、橋梁と基礎、pp.2-10、2006.9</p> <p>2) Hasegawa, A., Liyanage, K., Ikeda, T. and Nishino, F.: A concise and explicit formulation of out-of-plane instability of thin-walled members, Proc. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.2, No.1, pp.81-89, 1985.4</p>		
注意点	本理論は曲線部材には適用できないので注意を要する。		

検証事例-5	横座屈に対する耐荷力		
要求性能	構造物の安全性	関連規定	道路橋示方書II鋼橋編(12.10)、(13.4) 鋼道路橋設計便覧
検証目的	<p>トラスやアーチなどの骨組み構造では、L/B (L:支間、B:主構間隔) が一定範囲内では格間座屈が先行するため、格間長に基づく細長比パラメータを用いた柱の耐荷力曲線により座屈設計している。しかしながら、横構や対傾構が省略され全体剛性が低下した構造では全体座屈が先行し、格間長を有効座屈とする仮定は成立しなくなる。</p> <p>钣桁構造では格間の曲げ座屈に対する座屈設計を行っているが、2主桁ではL/B (L:支間、B:主桁間隔) が一定範囲を超えた場合、特に横構が省略された場合は床版が固まる前の架設時においては、L/B 上限に關わらず全体横ねじれ座屈の照査が必要となる。</p> <p>以上のように、横構が省略された構造では L/B の大きさに關わらず全体横ねじれ座屈に対する安全照査が必要と考えられ、その場合の検証法を明確にした事例。</p>		
検証方法	実験による検証・解析による検証・道路橋示方書の準用		
検証方針	<ol style="list-style-type: none"> アーチやトラスなど軸力主体の構造に対しては、構造全体の骨組みモデルによる線形座屈解析（弹性固有値解析）結果から、各部材の有効座屈長を算出し、道路橋示方書に従った部材の座屈設計を実施。 桁構造のFEM解析の代替手法として、薄肉断面はりによる骨組みモデル荷重載荷用オフセット剛部材の追加や部材結合を評価したバネ要素を挿入することで、骨組みモデルによる線形座屈解析を行うことも可能。 		
参考文献	<ol style="list-style-type: none"> 堀田、内藤、西村：鋼2主桁橋梁架設系の横ねじれ座屈強度特性、土木学会論文集、No.612/I-46、1999.1 中川、塙、安田、沼田：鋼2主桁橋の構造特性、神戸製鋼技報、Vol.49、No.2、1999 		
注意点	文献 ¹⁾ では、支間と桁間隔比(L/B)や横桁間隔(A)をパラメータとして、代表的な部材剛度や死荷重強度を用いて解析した結果を比較しており、一般的な傾向としては妥当であるが、実橋に応用する場合には、実剛度や実荷重を用いた解析で確認することが望ましい。		

2.2 架設時開断面構造

2.2.1 概要

架設時開断面構造は、逆π型断面の鋼げたを架設した後で上面にコンクリート床版を施工・合成させて箱断面とする構造である。上フランジを兼ねる床版コンクリートが硬化し、鋼部材との合成断面となるまでは上面を除く3面のみが構造的に有効な開断面状態であり、架設時から開断面となっている鋼箱桁構造に比べるとねじり剛性が低く、架設時には構造的に不安定となりやすい。

開断面構造の鋼げたの架設時の安全性については道路橋示方書には具体的な記述がなく、鋼道路橋設計便覧（以下「設計便覧」という。）に、U型箱桁（オープン箱桁）と台形桁について、合成桁とした場合には、床版コンクリートが硬化して完全な箱型断面を形成するまで、非常に不安定であり注意を要することや、さらに不安定な台形桁については採用にあたっては慎重な配慮が必要との記述がある程度で具体的な架設時安全性の照査法等は示されていない。

また開断面構造とした場合、傾斜腹板を用いた台形断面として床版支間に比べて下フランジ側の幅を小さくする方が経済的に有利となることが多く、この場合には、架設時に桁断面に2次応力が発生することで、矩形断面の場合よりも構造的に不安定となりやすい。

特に手延べ方式での架設時には、仮支点上において下フランジや腹板に作用する応力の分布形状が、通常の鉛直腹板の箱桁とは異なるため、鉛直腹板桁に対する手延べ架設時の座屈照査方法をそのまま適用することでは安全が確保されない場合もある。

以上のような特徴から、開断面箱げた橋の採用にあたっては、架設時の応力状態や座屈モードを正確に把握し、それらに適した座屈安定性の照査を行って架設時の安全性を適切に確保する必要がある。

従来閉断面構造の例 → 架設時開断面構造の例

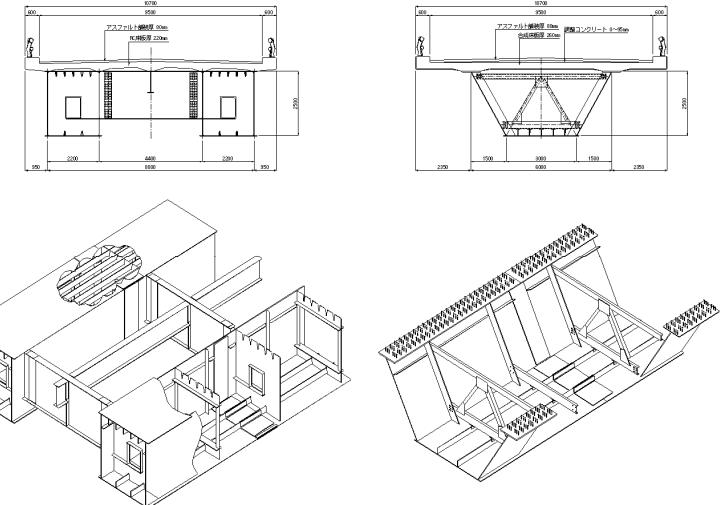


図-2.2.1 従来構造との比較

2.2.2 技術評価の必要性の観点と方向性

架設時開断面構造の採用にあって架設時の安全性に着目して検証すべき技術的課題の例として下記項目等が挙げられる。(表-2.2.1 参照)

- (1) 架設時横ねじれ座屈に関する検討
- (2) 傾斜腹板による付加応力の検討
- (3) 手延べ架設時、仮支持点における傾斜腹板および下フランジの座屈照査

以下では、各項目について技術的課題および所要の架設時安全性などの性能が確保されることを評価する場合の対応策の例を示す。

(1) 架設時における安全性の確保

■関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書 I 共通編 1.5 設計の基本理念]

- (1) 橋の設計にあたっては、使用目的との適合性、構造物の安全性、耐久性、施工品質の確保、維持管理の容易さ、環境との調和、経済性を考慮しなければならない。

■技術的課題

- ① 架設時開断面構造は、架設時において、従来の閉断面構造と比較してねじり剛性が小さいため、横ねじれ座屈を生じやすい。主桁架設後に打設した床版コンクリートが硬化し、床版と主桁とが一体となって、完全な箱断面を構成するまでは非常に不安定とされており、架設時の安全性については十分な配慮が必要となる。
- ② 傾斜腹板をもつ開断面構造の台形桁は、腹板の傾斜によって上フランジに水平方向の曲げが生じるため、矩形のU型箱桁に比べ、さらに不安定となり架設時の安定性については慎重な配慮が必要とされる。

■性能評価の対応策

- ① 架設時開断面構造の架設時安定性について、横ねじれ座屈に対する安全性の照査を行ってこれを確保する。例えば、FEM 解析や載荷実験などによる検証を踏まえて、補強材等を用いて架設時にも閉断面構造に近い構造とすることで必要なねじり剛性を確保する。
- ② 傾斜腹板となる場合に、立体モデル解析等によって 2 次応力を算定し、桁断面に与える影響を把握する。

【解説】

道路橋示方書では、架設時開断面構造についての具体的な規定はないものの、鋼橋編には、4 章「部材の設計」、8 章「床版」、10 章「鋼げた」、11 章「コンクリート床版を有するけた構造」等、同構造に関連した内容の規定があり、これらの規定を参考にして所定の性能を検証することとなる。

一方、鋼道路橋設計便覧（昭和 54 年 2 月）では 3.1.2 「プレートガーダーの形式」のなかで、特殊な形状としての U 形げた及び台形げたの具体的な設計方針が示されている。

表-2.2.1 架設時開断面構造に対する技術評価の着眼点

道路橋示方書の要求性能	問題認識	対応策	検証方法	検証事例など
«(A) 使用目的との適合性» 道示I 1.5 橋が計画どおり交通に利用できる機能を有すること。				
«(D) 施工品質の確保» 道示I 1.5 使用目的との適合性や構造物の安全性を確保するために確実な施工が行える性能および施工中の安全性を有すること。	«架設時安全性» ・各架設段階および完成時における全体構造系の安定性を確認する必要がある。	・架設時開断面となる桁のねじりに対する安全性確保のために、上フランジにせん断剛性を有する部材を配置する必要がある。	・立体モデルによる解析や実験により、せん断剛性部材の曲げ・ねじりに対する補剛効果を照査する。	検証事例-1
«(B) 構造物の安全性» 道示I 1.5 死荷重、活荷重、地震の影響等の荷重に対して橋が適切な安全性を有していること。 道示II 2.3 構造物の安全性を確保するために強度、変形及び安定を照査しなければならない。 道示V 2.1 設計地震動のレベルと橋の重要度に応じて、必要とされる耐震性能を確保すること。	«架設時安全性» ・傾斜ウェブ採用による構造安全性を確保する必要がある。	・傾斜ウェブ構造に起因する水平曲げによるフランジの二次応力を照査する。 ・手延べ架設時における傾斜ウェブの座屈照査を行う。 ・傾斜ウェブとフランジの溶接 溶け込み量を確保する。	・道路橋設計便覧「斜めウェブ二次応力度」による照査。 ・FEM解析。 ・鋼道示(8.2.12)によるスミ肉溶接の場合傾斜角を80度以上とする60度以下は全断面溶け込み溶接とする。	検証事例-2 検証事例-3
«(C) 耐久性» 道示I 1.5 橋に経年的な劣化が生じたとしても使用目的との適合性や構造物の安全性が大きく低下することなく、所用の性能が確保されなければならない。	«立体的機能の確保» ・曲線橋、斜橋あるいは偏心荷重が作用する場合の、安全性の確保・完成時コンクリート床版によって閉断面となる合成箱桁の斜角、曲率半径等の適用性の確認。	・床版およびずれ止めのせん断抵抗力を確保する。 ・斜角、曲率によって生じる断面力に対して閉断面を構成する床版（上フランジ）に作用する応力度を照査する。	・曲げに伴うせん断力の他、ねじりによって生じる床版のせん断力を照査する。	-
«(E) 維持管理» 道示I 1.5 点検が容易であること、補修・復旧が容易であること。				
«(F) 環境との調和» 道示I 1.5 建設地点周辺の社会環境や自然環境に及ぼす影響を軽減あるいは調和させること。				
«(G) 経済性» 道示I 1.5 ライフサイクルコストを最小化する観点から、単に建設費を最小にするのではなく、点検管理や補修等の維持管理を含めた費用がより小さくなるようにする。				

〔鋼道路橋設計便覧 3.1.2 プレートガーダーの形式〕(抜粋)

(j) U型箱げた（またはオープン箱げた）と呼ばれるもので合成げたとして利用されるが、支間長に比べて間隔が小さい場合には、床版コンクリートが硬化して完全な箱型断面を形成するまで非常に不安定であるから注意を要する。このような断面については上フランジの圧縮許容応力度について〔道路橋示方書〕鋼2.2.1の規定を満たすとともに〔道路橋示方書〕鋼8.8.1(2)(5)の規定を準用し、断面の変形を防ぐとともに、上横構を配置し箱げたに近い効果をもたせることによってねじり剛性を高めなければならない。

(k) 台形げたと呼ばれる形式である。鋼床版とし、架設時にすでに完全に閉断面を形成している場合は通常の長方形箱げたと同じように扱われるが、合成げたとする場合にはU型箱げたに比べさらに不安定なものとなり、この形式の採用にあたっては慎重な配慮が必要である。·····

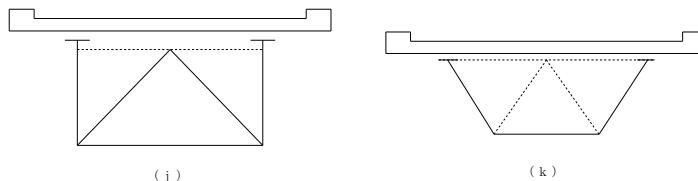


図-3.3 特殊な形状のプレートガーダー

以上の記述のように、架設時開断面構造は、床版が硬化し、完全な箱断面を構成するまでは非常に不安定となる可能性があるため十分な配慮が必要とされる。

① 架設時横ねじれ座屈に対する検討

開断面桁では、閉断面桁と比較して上方の拘束度が弱く、ねじり剛性が小さいため、横ねじれ座屈を生じやすい。また、図-2.2.2左のように、せん断中心位置が下フランジ下方に位置するため構造的に不安定となる。これに対し、上フランジ側の補強材を設置して準閉断面とすると、右図のように安定した構造となる。

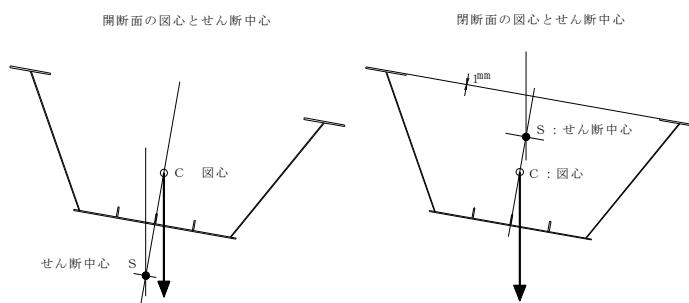


図-2.2.2 閉断面と開断面構造の図心およびせん断中心

例えば、図-2.2.3に一般的な開断面台形桁構造の例を示す。このような腹板の傾斜の大きい開断面桁では条件によっては開断面のままでは死荷重だけでも横ねじれ座屈が生じる場合もある。また曲線桁や張り出しが大きく偏載荷重がかかる桁ではさらに不安定となり、このような場合には何らかの補強を行って架設時に必要なねじり剛性を向上させる必要がある。

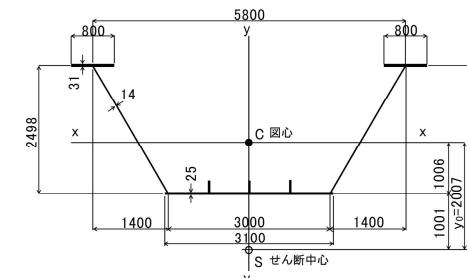


図-2.2.3 開断面構造の例

開断面の補強には仮横構を設置したり鋼コンクリート合成床版を採用してその底鋼板を先行配置しておくことなども考えられる。それらの補剛効果については解析や実験によって検証できるが、補強材の剛性評価は、補強材と主桁との連結方法によって異なるため、連結材や連結方法を適切に考慮した検討を行う必要がある。

[検証事例-1]

② 傾斜腹板による上フランジ付加応力の検討

前述の鋼道路橋設計便覧では、台形桁がU型箱桁に比べさらに不安定となる理由として、腹板の傾斜によって上フランジに水平方向の曲げが生じるためとしている。すなわち、台形断面では矩形断面と異なり、架設時開断面状態で水平方向の拘束がない箇所では、鉛直荷重に対して傾斜腹板の影響により下図に示す水平分力が発生し、これによる面外方向の曲げにより上フランジに2次応力が発生するためであり、この2次応力を算出し、桁断面に与える影響について検討を行う必要がある。

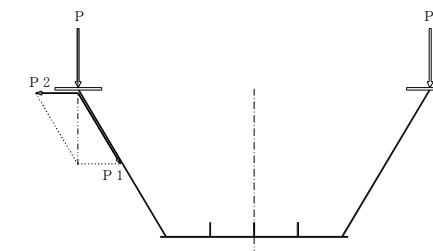


図-2.2.4 傾斜腹板による2次応力

[検証事例-2]

(2) 手延べ架設時、傾斜腹板および下フランジの座屈安全性

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書 I 2.2.16 施工時荷重】

橋の施工時安全性を確保するため、施工方法、施工中の構造を切に考慮して、自重、施工機材、風、地震の影響等に対して必要な検討を行い、施工時荷重を設定するものとする。

■技術的課題

送出し工法においては架設中の構造系が設計上の構造系と異なるため、架設中の応力、変形、局部応力等を検討する必要がある。一般的に用いられている施工便覧に記載されている腹板座屈の照査方法は、通常の鉛直腹板をもつI桁、箱桁を想定したものである。そのため、同照査手法を傾斜腹板に適用する場合、応力の分布状態の違いや、下フランジへの2次応力の影響を考慮する必要がある。

■性能評価の対応策

傾斜腹板に発生する応力分布形状をFEM解析によりもとめ、鉛直腹板との差異を明確にして腹板の座屈照査を行う。また、下フランジについては、傾斜腹板によって発生する橋軸直角方向の2次応力を算出し、それを考慮した座屈照査を行う。

【解説】

送出し工法に関する具体的な記述は、鋼道路橋施工便覧に見られる。

【鋼道路橋施工便覧 3.5.4 送出し工法の注意事項】

送出し工法においては架設中の構造系が設計上の構造系と異なり、また、架設中の支持点が完成系と異なる。したがって設計時から架設中の応力、変形、局部応力等を検討し、また仮設構造物についても応力、変形などを検討する必要がある（付録※「送り出し工法における腹板の照査」参照）

※鋼道路橋施工便覧付録

送出し架設中の仮支持点では、主桁に曲げモーメント、せん断力、ねじりモーメントに加え、仮支持点反力による鉛直力が作用する。とくに、完成時に正の曲げモーメントを受ける断面では、腹板の座屈に対して補強が必要となる。施工便覧では、このような場合の腹板の座屈に対して、その照査方法が付録として記載されている。

しかし、ここに記載されている照査は、通常のI桁、箱桁の鉛直腹板を想定したものであり、傾斜腹板においては、応力の分布状態が異なることが予想される。そのため、無条件に上記照査方法を適用することは出来ない。また、仮支持点の下フランジにおいても主桁作用による圧縮応力の他、傾斜腹板の影響により反力の水平分力による2次応力も発生するため、それを加味した照査が必要と考えられる。

傾斜腹板の影響で、送り出しの仮支持点部には反力の水平方向の分力が生じる。これにより下フランジについては、橋軸方向の圧縮応力に加え橋軸直角方向の応力も作用する2軸圧縮状態になる。

したがって、この応力状態での座屈安全性を照査する必要がある。

また、腹板には、主桁の曲げによる垂直応力及びせん断力に加え、ジャッキ反力による鉛直方向の応力が作用するが、これらの応力分布状態も腹板の傾斜の影響により通常の箱桁、I桁橋の鉛直腹板の応力分布形状と異なることが予想される。そのため、立体モデルによるFEM解析等により、これらの応力分布を明らかにしたうえで、鋼道路橋施工便覧²⁻²⁻¹⁾に示される座屈照査方法の適用の可否を判断する。また、解析により適用が可能と判断された場合でも、座屈照査方法の前提条件を模型実験等により検証する方がよい。

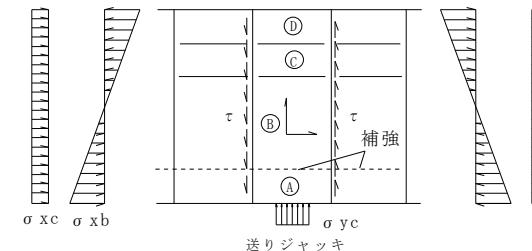
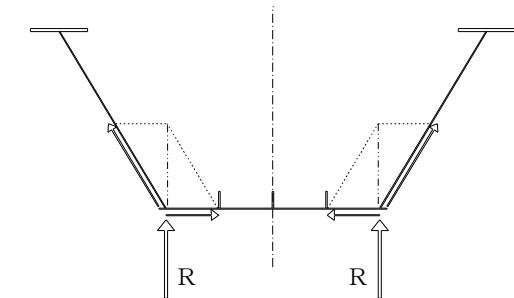


図-2.2.5 腹板の応力²⁻²⁻¹⁾

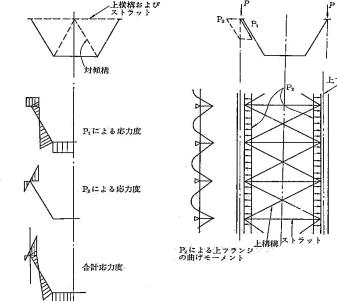
[検証事例-3]

【参考文献】

2-2-1) (社)日本道路協会：鋼道路橋施工便覧、付録1 架設計算における照査例、2. 送り出し、工法による腹板の照査、平成9年2月

2.2.3 検証事例

検証事例-1	架設時横ねじれ座屈に対する検討		
要求性能	構造物の安全性 架設における全体構造の安定性	関連規定	道路橋示方書II鋼橋編 (10.6.3)、(17.7.1)
検証目的	桁が開断面となる架設系は、ねじり剛性が非常に小さく、せん断中心も下フランジ下方にあるため不安定な構造となる。補強材（仮横構、合成床版底鋼板）を用いるなどによりねじり剛性の向上を図る必要があるが、これらの対策により所要の座屈耐荷力が確保され横ねじり座屈に対して安全であることを確認した検証事例。		
検証方法	実験による検証・解析による検証・道路橋示方書の準用		
検証方針	補強材（仮横構、鋼コンクリート合成床版底鋼板、底鋼板と桁との接合構造など）をねじり剛性が評価できるようモデル化し、桁としてのねじり剛性の評価を実施。		
参考文献	1) 小松定夫：薄肉構造物の理論と計算 I、山海堂、p158、S44.11 2) 小松定夫：鋼構造の補剛設計、森北出版、p129-153、1982.6 3) 風早他：福岡高速5号線の場高架橋工事報告 -5径間連続鋼開断面箱桁橋の設計・施工について、横河プリッジ技報No.33、2004.1 (3.4「開断面箱桁合成確認試験」) 4) 日下他：鋼逆π型合成箱桁橋架設系の合成床版底鋼板による補剛効果、JSSC鋼構造論文集vol12、48号、2005.12 (「全体FEM解析」、「準箱桁フレーム解析」) 5) 建設コンサルタント協会近畿支部：鋼複合橋梁の性能照査型設計法確立に向けて、2004 (「合成床版の底鋼板パネルと連結材を含めたモデルでのFEM解析による換算断面定数（板厚）の算出」) 6) 井口他：開断面箱桁用パワースラブ鋼パネルの水平せん断試験：横河プリッジ技報No.34、2005.1 (「定着金具を用いた実寸法パネルでのせん断抵抗性能検証試験」) 7) 高田他：合成床版底板の架設時補強材としての有効性に関する検討、横河プリッジ技報No.28、1999.1		
注意点	1) 実橋の実験におけるねじり剛性の確認は、桁と補剛効果を見込む底鋼板の連結構造、底鋼板の橋軸方向の接合の有無の影響などがねじり剛性に大きく関わってくることが考えられることから、これらの条件を明確にしておくとともに、架設時の各条件と実験条件との整合性について慎重に考慮する必要がある。 2) 解析による検証では、補強材となる鋼コンクリート合成床版の底鋼板および主桁との連結構造のモデル化についてそれぞれの構造特性を適切に反映できるよう注意しなければならない。また床版構造には各種のタイプがあり、底鋼板の板厚、ずれ止め機構、補剛リブの構造や寸法、配置等も異なることから構造を適切に考慮する必要がある。特に底鋼板と主桁を連結した構造の剛性は、底鋼板同士の橋軸方向の接合構造が補剛効果に与える影響は大きく、モデル化にあたり慎重な検討が必要である。 3) 鋼コンクリート合成床版の底鋼板が構造的に橋軸方向に連続しない場合には、底鋼板の各端部に応力集中するなど、床版の応力状態は橋軸方向に一様にならない場合があることに注意が必要である。また薄肉の底鋼板同士の接合構造の連結部としての性能がどの程度見込むことが可能かどうかについては構造によって条件も異なり慎重な判断が必要である。		

検証事例-2	傾斜ウェブ2次応力の検討		
要求性能	構造物の安全性 傾斜ウェブに対する安全性の確保	関連規定	道路橋示方書II鋼橋編 (4.1.1) 鋼道路橋設計便覧 (3.1.2)
検証目的	開断面箱桁において傾斜ウェブとすることで生じる上フランジ2次応力をについて検証した事例。		
検証方法	実験による検証・解析による検証・道路橋示方書の準用		
検証方針	道路橋施工便覧 ¹⁾ に、台形桁の腹板の傾斜による曲げ応力についての記載があり、これを適用する。なお傾斜角度については適用条件として、道路橋示方書T継手の規定から60度以下では全断面溶け込み溶接とする必要があるため60度以上とする。		
検証内容	1) 検証概要 道路橋施工便覧 ¹⁾ に基づいて、作用2次応力を算出する。 2) 検証方法 鋼道路橋設計便覧により、床版合成前の上フランジに作用する水平分力によって生じる2次応力を算出する。RC、PC床版の場合は、ストラットおよび仮横構等を設け、それらの位置を上フランジの固定点として、付加応力を算出する。 合成床版の場合は底鋼板を面内せん部材として用い、ダイヤフラム位置または底鋼板パネル固定金具位置をフランジ固定点とし、付加応力を算出する。 水平分力P2を荷重とし、ストラット取付け部または合成床版底鋼板固定点を支点とする梁で、水平方向曲げモーメントを算出し、フランジに作用する付加応力を算出する。		
3) 試算例	 開断面桁が一般的に用いられる幅員11mの1箱主桁橋の場合、合成床版厚は260mm、フランジ寸法800x25、腹板傾斜1:2.1 フランジ固定間距離3mとすると、架設時床版荷重によるフランジの付加曲げ応力は約6N/mm ² 程度となる。		
参考文献	1) 日本道路協会：道路橋設計便覧、p.108、昭和55年8月		

検証事例-3	手延べ架設時の安全性		
要求性能	手延べ架設時座屈安全性の確保	関連規定	鋼道路橋施工便覧
検証目的	手延べ架設時において、仮支持点となる腹板は傾斜ウェブとしているため、作用応力度分布を明確にし、腹板の座屈耐力について検証する必要があり、また下フランジについても傾斜ウェブによる直角方向の応力が発生するため、2軸応力状態での座屈照査を行う必要がある。		
検証方法	実験による検証・解析による検証・道路橋示方書の準用		
検証方針	架設時、荷重集中点における腹板および下フランジの応力について、傾斜ウェブによる影響を考慮し、座屈照査を実施。腹板については、鋼道路橋施工便覧に示される鉛直ウェブに適用されている照査式の適用が可能か検討。		
参考文献	1) 横山他：雄物川橋工事報告・合成床版を有する開断面箱桁橋の設計、製作と架設について、横河プリッジ技報 No.32、2003.1 2) 日本道路協会：鋼道路橋施工便覧、昭和 60 年 2 月 3) 横山他：雄物川橋工事報告・合成床版を有する開断面箱桁橋の設計、製作と架設について、横河プリッジ技報 No.32、2003.1		
注意点	本検証事例では実験と解析によって「鋼道路橋施工便覧」 ²⁾ に示される腹板座屈の照査方法が準用できるものと判断できた。対象とする構造や傾斜角によつても照査方法の準用可否は異なると考えられることから構造条件、応力条件を適切に考慮して個別の条件に対して検証する必要がある。		

2.3 連続合成桁構造

2.3.1 概要

連続合成桁は、国内では 1950 年代以降に架けられてきた橋梁形式である。この型式では中間支点部付近の負の曲げモーメントを受ける領域におけるコンクリート床版に対して負曲げによる悪影響を生じさせないようにするのが課題となる。初期にはコンクリートにプレストレスを導入することで床版コンクリートを主桁上フランジの一部としても機能させることで合理的な構造とする方法も考えられたが、設計の煩雑さや施工の難しさ、現場工期の長期化等の課題があり、実務上は必ずしも有利な方式とはならなかった。そしてこのような問題点を改善する方策として考え出されたのが「プレストレスしない連続合成桁（図-2.3.1）」であり、昭和 48 年（1973 年）に道路橋示方書（以下「道路橋示方書」という。）にも取り入れられた。^{2-3-1),2-3-2)}

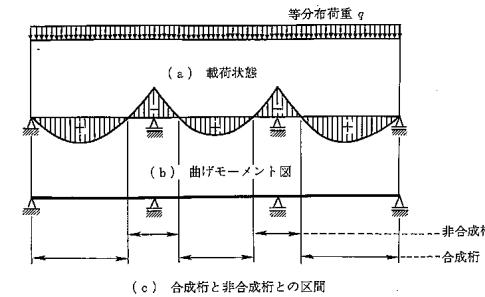


図-2.3.1 プレストレスしない連続合成桁の考え方²⁻³⁻³⁾

道路橋示方書では、II 鋼橋編の「11 章 コンクリート床版を有するけた構造」において合成桁のに関する規定があり、比較的小な支間のコンクリート床版を有する多主桁橋に対してはこれによることで設計が行うことが可能である。しかし、床版が長支間となる場合の連続合成桁については、これによるだけでは所要の性能が得られない場合が想定される。ここでは長支間のコンクリート床版を用いた連続合成桁構造について整理する。

2.3.2 技術評価の必要性の観点と方向性

連続合成桁構造の床版に求められる主桁としての性能とずれ止めの性能に着目すると、道路橋示方書の要求性能を満足させるために検討すべき事項として、表-2.3.1 に示す下記項目等が挙げられる。

- (1) 負の曲げモーメントが生じる部分の床版コンクリートの設計法
- (2) 引抜き力を受けるずれ止めの合理的な配置
- (3) 道路橋示方書の規定の適用範囲外のずれ止めのせん断強度
- (4) 繰り返し荷重を受けるスタッド付き引張フランジの疲労強度
- (5) 床版施工時におけるひび割れ防止対策

表-2.3.1 連続合成桁構造に対する技術評価の必要性の観点と方向性

道路掲示方書の要求性能	技術評価の必要性の観点	技術評価の方向性	検証方法	検証事例
«(B) 構造物の安全性» 道示I 1.5 死荷重、活荷重、地震の影響等の荷重に対しても橋が適切な安全性を有していること。 道示II 2.3 構造物の安全性を確保するために强度、変形及び安定を照査しなければならない。	完成後において負の曲げモーメントを受ける中間支点付近の床版コンクリートには引張力が作用するので、ひびわれに配慮した端部が必要。	橋脚方向にプレストレスを導入する場合は、引張応力を受ける床版コンクリートの断面を有効とする。また橋脚方向にプレストレスを導入しない場合、引張応力を受ける床版コンクリートの断面を無視し（道示II 11.1.2）、有害ひびわれが生じないように鉄筋量を確保したり（道示II 11.1.3）ひびわれ幅の制御を行う。	・道示の準用 ・土木学会等のひび割れ幅算定式の適用 ・実験、解析による検証	検証事例-1
	主桁位置で床版の回転変形拘束される場合、スタッットに引張力が生じる。	ずれ止めの設置により水平せん断力のみならず上揚力を考慮する。 特に長支間床版では、中間横行位置で床版の回転変形拘束されることによってずれ止めに作用する引き抜き力が大きくなるので合理的なずれ止めの配置が必要。	・実験やFEM解析による検証	検証事例-2
	少数主桁ではスタッットに作用する水平せん断力が大きくなる。	プレキャストPC床版や支間長1.0m級の床版などで、スタッット径が2.2mm以下ではひび割れが困難な場合は空や材質を上げる。	・押抜き試験やFEM解析による検証	検証事例-3
	床版施工時において床版コンクリートにひび割れを生じさせない必要がある。	コンクリートの打設順序や水和熱の影響、型枠の設置・撤去並びに施工期間中の乾燥収縮やクリープなどによって生じる引張応力度の照査を行う。	・骨組解析やFEM解析による検証	検証事例-4
	曲線橋や斜橋への適用性。	床版に生じるせん断や引張などの付加応力の照査	・道示II 8.2.11の準用 ・解析による検証	
«(C) 疲労強度» 道示I 1.5 橋に経年的な劣化が生じたとしても使用目的との適合性や構造物の安全性が大きく低下することなく、所用の性能が確保されなければならない。	繰り返し荷重を受けるスタッット付き引張フランジの疲労強度。	フランジに作用する引張力とスタッット自身に作用するせん断力の組合せ作用下でのスタッット溶接部の疲労強度照査を行う。	・疲労試験やFEM解析による検証	検証事例-3
«(D) 施工性» 道示I 1.5 使用目的との適合性や構造物の安全性を確保するために確実な施工が行える性能を有すること。	床版施工時において床版コンクリートにひび割れを生じさせない必要がある。	膨脹材の使用を検討するとともに、適切な表面仕上げや養生を行う。		
«(E) 維持管理» 道示I 1.5 点検が容易であること、補修・復旧が容易であること。	床版腐食時の打ち替え	予め打ち替えに必要な補強材などの設置が可能な構造としておく。		

(1) 負の曲げモーメントが生じる部分の床版コンクリートの設計法

■関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書Ⅱ 鋼橋編 11.2.3 引張力を受ける床版の鉄筋量及び配筋]

- (1) 引張応力を受けるコンクリート床版においては、コンクリートにひびわれが生じることによる影響を考慮して、床版の鉄筋量及び配筋を決定するものとする。
- (2) (3)及び(4)の規定による場合は、(1)を満足するとみなしてよい。
- (3) 引張応力を受けるコンクリート床版の最小鉄筋量は次の規定によるものとする。
- 2) 引張応力を受けるコンクリート床版においてコンクリート断面を無視する設計を行う場合の床版の橋軸方向最小鉄筋量は、コンクリート断面積の 2%とする。この場合、床版断面の鉄筋の周長の総和とコンクリートの断面積の比は $0.0045\text{mm}/\text{mm}^2$ 以上とするのがよい。なお、・・・
- (3) 2) 引張応力を受けるコンクリート床版において、コンクリートの断面を無視する連続合成されたの中間支点付近においては、負の曲げモーメントによる橋軸方向鉄筋の引張ひずみに対応して床版のコンクリートにはひびわれが生じる。・・・これが床版のコンクリートの主げた作用及び床版作用に有害なものであってはならない。

■技術的課題

少数主桁橋のように床版支間長や床版厚が大きい場合、周長率 $0.0045\text{mm}/\text{mm}^2$ を確保することが困難となる場合がある。

■性能評価の対応策

少数主桁橋のように床版支間長や床版厚が大きい場合、引張応力を受ける床版コンクリートに対する周長率による以外に、床版コンクリートのひびわれ発生についてその可能性や発生する場合に生じるひびわれ幅などのひびわれ状況や鉄筋の応力状態などを推定して所要の性能が満足されるかどうかを評価する。

も考えられる。

過去に例のあるものでは、次式で表されるようなひびわれ幅という概念を用いた関係式を用いるものがある。なお、式中の許容ひびわれ幅とは鋼材の腐食に対する安全性の観点から環境条件等に応じて技術資料によっては記されているものの、様々な条件下で移動荷重の影響を受ける床版コンクリートの疲労耐久性に対して統一的な値が確立しているわけではないことに注意が必要である。

$$\text{ひびわれ幅 } w = \text{ひびわれ間隔 } L \times (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \leq \text{許容ひびわれ幅 } w_a$$

ここに、

ε_{sm} : ひびわれ間の鉄筋の平均ひずみ

ε_{cm} : コンクリートの平均ひずみ（文献5）では安全側で 0 としている）

[検証事例-1]

[参考文献]

- 2-3-1) 橋、向山、湊：プレストレスしない連続合成げたの静的実験、土木学会誌、1968.10
- 2-3-2) 橋、近藤、佐伯、日種：プレストレスしない連続合成ゲタの設計法および道路橋への適用性、橋梁と基礎、Vol.3、1969.1
- 2-3-3) 前田、佐伯、日種、梶川：鋼道路橋の合成桁の設計、道路、1972.7
- 2-3-4) K.Roik,R.Bergmann,J.Haensel,G.Hanswille : Verbundkonstruktionen, Bemessung auf der Grundlage des Eurocode 4, Beton-Kalender,1993
- 2-3-5) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕、1996
- 2-3-6) 中薙、安川、稻葉、橋、秋山、佐々木：PC 床版を有する鋼連続合成 2 主桁橋の設計法（上）、橋梁と基礎、Vol.36、2002.2

【解説】

引張応力を受けるコンクリート床版において、コンクリート断面を無視する設計を行う場合の道路橋示方書の主な関連規定は上に示したとおりであり、有害なひびわれ（一般に 0.2mm を超えるものとされている^{2-3-1), 2-3-2), 2-3-3)} の発生を防ぐためには、橋軸方向の最小鉄筋量は 11.2.3 (3) 2) によることでよいとされている。11.2.3 に規定された鉄筋比や周長率は、連続合成桁の縮小部分模型を用いた静的実験で得られたデータ²⁻³⁻¹⁾を基にして、昭和 48 年の道路橋示方書で取り入れられたものである²⁻³⁻³⁾。ここで使用した供試体は、高さ $200\text{mm} \sim 350\text{mm}$ の鋼桁に厚さ $100\text{mm} \sim 150\text{mm}$ のコンクリート床版をジベルで合成したもので、鉄筋は D13, D16, D19 (SD30) を使用している。一方、近年実績が増えている少数主桁橋に代表される合理化橋梁の床版は、その厚さが 300mm 程度と大きく、また鉄筋も D25 まで使用されるなど道路橋示方書の規定の根拠となった供試体と長支間の実橋床版では乖離がある場合がある。

一方、床版コンクリートの耐荷力、耐久性についてはコンクリートにひび割れが生じた場合に想定されるひびわれの挙動が大きく影響すると考えられることから、引張力を受ける床版コンクリートのひび割れに対する定量的な検証を行うことで所要の性能が満足されるかどうかを判断すること

(2) 引抜き力を受けるずれ止めの合理的配置

■関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書 II 鋼橋編 11.5.1 一般]

(3) ずれ止めとしてスタッドを用い、各種荷重の組合せによる鋼げたと床版のコンクリートとの間のせん断力が最も大きくなる場合について照査を行う場合には、・・・。

(3) ・・・。

上記のほか、I 枠の面外変形を横桁や補剛材で拘束する箇所には、大型の遮音壁からの荷重や、偏心した横締めの PC ケーブルのプレストレスあるいは活荷重により、ずれ止めに引抜力や圧縮力が発生するため、必要に応じてスタッド軸方向の応力についても検討しなければならない。

■技術的課題

少数主桁橋のように床版の支間が長くなると、I 枠の面外変形を横構や補剛材で拘束する箇所には、活荷重や横荷重により、従来よりも大きな曲げモーメントが作用し、ずれ止めに設計上無視できない引抜力や圧縮力が生じるため、これらスタッド軸方向の応力、スタッドのせん断耐力の低下及び床版とフランジの剥離等について検証する必要がある。

■性能評価の対応策

スタッドの橋軸方向間隔および橋軸直角方向の本数と配置をパラメータとした種々の実物大部 分模型に対して活荷重や壁高欄などによるフランジの首振り変形に相当する強制変位を与え、その時のスタッドのひずみを計測することにより合理的なスタッド配置を検証する。

【解説】

少数主桁橋のように床版の支間長や張出し長が大きい場合、横桁取付部や補剛材付近などの主桁位置で床版の回転変形を拘束するために、ずれ止めと床版との間に設計上無視できないモーメントが作用することがある。このモーメントはずれ止めの軸方向に引抜力と圧縮力の偶力となって作用する²⁻³⁻⁷⁾ (図-2.3.2)。また、横構の省略によって風や地震などの面外方向力は床版がその殆どを負担することになり、支点近傍にはずれ止めと床版との間に大きな橋軸直角方向の水平せん断力が作用することになる。これらの力は従来の多主桁構造では特に問題とはならなかったが、少数主桁構造の合成桁では無視できないことがあるので注意を要する。

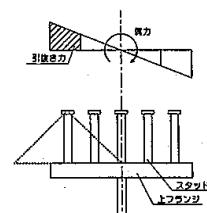


図-2.3.2 スタッド引抜力

上記のような引抜き力を受けるスタッドのせん断耐力は引抜き力に比例して低下するという報告がある²⁻³⁻⁸⁾。またこの引抜き力はスタッドだけでなく、床版コンクリートと上フランジの剥離やスタッド直下の補剛材の溶接などにも影響を及ぼすことになるため、長支間床版の連続合成桁では引抜き力に対して効率よく抵抗できるスタッド配置についての検討が必要である。これらを考慮して、せん断力と引抜き力を受けるスタッドの合理的な配置に対する検証事例がある。

[検証事例-2]

【参考文献】

2-3-7) 坂井、八部、大垣、橋本、友田：合成 2 主桁橋の立体挙動特性に関する研究、構造工学論文集、Vol.41A、1995.3

2-3-8) 小野辺、倉田、松野：「町屋川橋」のプレキャスト床版用スタッドの強度特性に関する解析・実験的検討、石川島播磨技報、2001、橋梁特集号

(3) 道路橋示方書規定範囲外の規格のずれ止めのせん断強度

■関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書II鋼橋編 11.5.8 スタッド]

コンクリート床版と鋼板との合成作用を考慮した設計を行う場合のずれ止めに使用するスタッドは、軸径が 19mm 及び 22mm のものを標準とし、材質、種類、形状、寸法及び許容差について、JIS B 1198「頭付スタッド」を標準としてよい。

合成桁に用いるスタッドは、軸径 19mm 及び 22mm のものを標準とした。・・・

JIS B 1198 に示されるスタッドの化学成分、機械的性質及び形状、寸法は次のとおりである。

表-解 11.5.1 化学成分

材 料	化学成分(%)					
	C	Si	Mn	P	S	Al
シリコンキルド鋼	0.20以下	0.15～0.35	0.30～0.90	0.040以下	0.040以下	—
アルミニキルド鋼	0.20以下	0.10以下	0.30～0.90	0.040以下	0.040以下	0.02以上

表-解 11.5.2 機械的性質

降伏点または0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
235以上	400～550	20以上

表-解 11.5.3 形状、寸法及びその許容差

呼び名	軸径d		頭部直径D		頭部厚T 最小	首下の 丸みr	標準形状および 寸法表示記号
	基準寸法	許容差	基準寸法	許容差			
19	19.0	±0.4	32.0	±0.4	10	2以上	
22	22.0		35.0				

【解説】

道路橋示方書の式(11.5.1)に示されるスタッド許容せん断力式は、1961年に建設省土木研究所で実施された実験データ²⁻³⁻⁹⁾に基づいて設定されたものである。この実験は、材質が SS41 相当、直径が 19mm と 22mm の頭付スタッドについて圧縮強度 30 N/mm² 程度の場所打ちコンクリートを対象として行われている。これらの条件と異なる場合のスタッドの許容せん断力については、新たに押し抜きせん断試験等を行ってその安全性を確認する必要がある。

一方、長支間床版を使用した少数主桁橋では当然のことながら主桁 1 本当たりに作用する水平せん断力が大きくなる。さらに、上記の引抜力や橋軸直角方向の水平力を考慮すると、従来の多主桁橋に対してずれ止めの数が大幅に増えることになり、道路橋示方書で規定された軸径や材質のスタッドでは対応できないことも考えられる。この場合、道路橋示方書の式(11.5.1)は適用できなくなるので、別途許容せん断強度の検討が必要となる。特に、プレキャスト PC 床版や支間長 10m 級の床版を適用する場合には注意を要する。

【参考文献】

2-3-9) 山本、中村：Studd Shear Connector の試験報告、土木研究所報告 109 号の 4、1961.11

■技術的課題

少数主桁橋のように床版の支間が長くなると、主桁 1 本当たりに作用する水平せん断力が大きくなるため、道路橋示方書に規定された規格以外のスタッドを使用する必要が生じるため、それらの性能について検証する必要が生じる。

■性能評価の対応策

道路橋示方書の範囲にはない直径 25mm、材質 SM570 相当の高強度スタッドについて、押抜き試験と解析によって静的強度特性を検証し、せん断耐力式を求める。

(4) 繰り返し荷重を受けるスタッド付き引張フランジの疲労強度

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書 II 鋼橋編 5.3 疲労設計】

鋼橋の設計にあたっては、疲労の影響を考慮するものとする。

・・・・・なお、疲労設計にあたっては、「鋼橋の疲労」(日本道路協会)や「鋼道路橋の疲労設計指針」(日本道路協会)が参考にできる。

■技術的課題

スタッド付フランジに引張応力のみが生じる場合や、スタッドからせん断力のみが生じる場合の継手の疲労強度等級は「鋼道路橋の疲労設計指針¹⁾」で規定されているが、連続合成桁の中間支点付近の上フランジのように、引張応力とスタッドからのせん断力を同時に受ける継手については規定されていない。

■性能評価の対応策

スタッド付フランジについて、フランジへの引張とスタッドへのせん断力を同時に作用させた疲労試験を行い、その疲労強度を検証する。

【解説】

スタッドが溶接された引張フランジの疲労特性についてはこれまで多くの実験が行われており、それらの結果が文献²⁻³⁻¹⁰⁾に反映されている。しかしそれは図-2.3.3に示すように、スタッド付フランジのみに引張力を与えた場合とスタッドのみにせん断力を与えた場合について示されているのみで、図-2.3.4のように引張力とせん断力が同時に作用する場合の疲労強度の評価には適用できない。

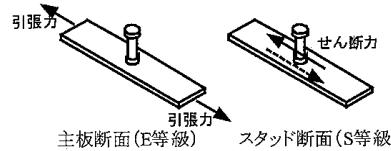


図-2.3.3 スタッド付鋼板の疲労強度等級

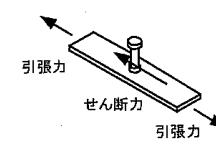


図-2.3.4 組合せ荷重

一方、文献²⁻³⁻¹¹⁾では、スタッドが溶接された引張フランジの疲労強度はスタッドに作用するせん断力の大きさにほぼ比例して低下するという実験結果が報告されている。連続桁の中間支点付近は変動荷重により負の繰り返し曲げモーメントを受けるため、連続桁を合成桁とした場合の中間支点付近の上フランジについても、この実験結果と同様の傾向がみられると思われる。以上の考えに基づき、図-2.3.3のように組合せ荷重が繰り返し作用する場合の疲労強度を検証した事例がある。

[検証事例-3]

【参考文献】

2-3-10) (社) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針、2002.3

2-3-11) 梶川、前田：組合せ荷重下におけるスタッド溶接フランジの疲労強度の評価、土木学会論文集、No.362/I-4、1985

(5) 施工時床版のひびわれ防止

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書 II 鋼橋編 11.2.1 床版コンクリートの設計基準強度】

(2) コンクリート床版のコンクリートの設計基準強度の決定にあたっては、試験練り又は実績等により、施工時に有害なひびわれが生じないことを確認するものとする。

・・・・・また、施工時に有害なひびわれを生じないためには、必要に応じて試験練りを行うなどによる確認を行うとともに、施工時にもひびわれが生じないよう十分な配慮を行うことが必要である。

■技術的課題

施工時にひびわれが生じる要因として、コンクリートの水和熱による温度応力、コンクリートの打設順序の影響、施工中の乾燥収縮やクリープの影響等がある。早強コンクリートを用いて移動式型枠により床版を連続的に施工する場合、これらのひび割れ要因の複合的な影響について検証する必要がある。

■性能評価の対応策

早強コンクリートを使った場所打ちPC床版のFEM温度応力解析を行い、実橋床版の温度計測結果から得られた内部温度履歴と照合してその妥当性を検証した後、床版施工時にコンクリートに生じる応力を推定するとともに、その温度応力に影響を及ぼす各因子についての比較検討結果をもとに効果的なひびわれ抑制対策を抽出する。

【解説】

連続合成桁の負の曲げモーメントを受ける床版については、完成後の有害なひびわれの発生を防ぐために最小鉄筋量の規定やひびわれの発生防止や幅の抑制による対策が講じられる。しかし、これらの対策が有効となるためには、コンクリート床版が設計で意図したとおりに施工され、完成時にはひびわれのない健全な状態にあることが必要である。

設計における検証項目としては、コンクリートの水和熱による温度応力^{2-3-12) 2-3-13)}(図-2.3.5)、コンクリート打設順序の影響(隣接径間施工時の主桁作用によって生じる負の曲げモーメント)、施工期間中の乾燥収縮やクリープ、床版コンクリートと鋼桁との温度差等の各要因による引張応力が挙げられ、必要に応じてそれらの影響を低減するための対策を講じることも求められる。

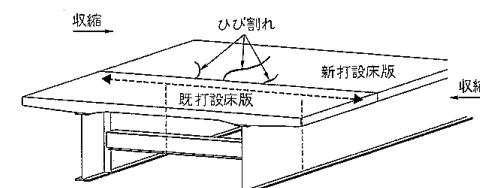


図-2.3.5 温度ひびわれの例

これらのひびわれ要因の中でも、特に影響が大きいのは水和熱による温度応力とコンクリート打設順序である。さらに早強コンクリートを使った移動型枠工法による場合には、その影響が大きくなるので注意を要する。そこで、早強コンクリートを使った場合の水和熱による床版コンクリート引張応力度の低減に対して検証した事例がある。

[検証事例-4]

[参考文献]

- 2-3-12) 安川、倉田、師山、丸山、中村、大浴：場所打ち PC 床版の温度計測と応力評価に関する検討
(上)、橋梁と基礎、Vol.38、2004.3
2-3-13) 稲葉、塩永、津田、嶽下、武藤、室田：場所打ち PC 床版の温度計測と応力評価に関する検討
(下)、橋梁と基礎、Vol.38、2004.4

2.3.3 検証事例

検証事例-1	負の曲げモーメントを受ける床版コンクリートのひびわれの推定		
要求性能	構造物の安全性	関連規定	道路橋示方書 II 鋼橋編 (11.2.3)
検証目的	プレストレスを導入しない連続合成桁の中間支点付近では、負の曲げモーメントによる橋軸方向鉄筋の引張ひずみに対応して床版のコンクリートにはひびわれが生じる。設計で想定されるひびわれの有害性を検証した事例。		
検証方法	実験による検証・解析による検証・道路橋示方書の準用		
検証方針	鋼連続合成 2 主桁橋中間支点部の実物大模型を用いて、PC 床版に供用時の応力状態を再現する実験を行い、実橋で想定されるひびわれの性状を推定し、床版の耐荷力特性に問題がないことを確認。		
参考文献	1) 中薗、安川、稻葉、橋、秋山、佐々木：PC 床版を有する鋼連続合成 2 主桁橋の設計法 (上)、橋梁と基礎、Vol.36、2002.2		
注意点	床版のひびわれ発生はコンクリート強度や鉄筋比など様々な材料や構造の条件によつても異なることから条件に応じた検討が必要である。		

検証事例-2	引抜き力を受けるずれ止めの配置		
要求性能	構造物の安全性	関連規定	道路橋示方書 II 鋼橋編 (11.5.1)
検証目的	引抜き力を受けるずれ止めの合理的な配置方法について検証した事例。		
検証方法	実験による検証・解析による検証・道路橋示方書の準用		
検証方針	スタッドの橋軸方向間隔および橋軸直角方向の本数と配置をパラメータとした種々の実物大部分模型に対して活荷重や壁高欄などによるフランジの首振り変形に相当する強制変位を与え、その時のスタッドのひずみを計測することによりスタッド配置を検証。		
参考文献	1) 中薗、安川、稻葉、坂本、大垣、済藤：PC 床版を有する鋼連続 2 主桁橋の設計法、橋梁と基礎、Vol.36、2002.2		
注意点	1) ここで想定している床版支間は 6m 程度で、その張出し長は 2.5m 程度であり、支間長や張出し長がさらに大きくなる場合は別途検討が必要となる。 2) 横桁位置での補剛材の構造が本試験で実施したものと異なる場合には、主桁位置での床版の回転拘束度にも影響があると考えられるため、別途それらを反映した検討が必要である。		

検証事例-3	繰り返し荷重を受けるスタッド付き引張フランジの疲労強度		
要求性能	疲労耐久性	関連規定	道路橋示方書II鋼橋編 (5.3)
検証目的	連続合成桁の中間支点付近における、スタッドが溶接された上フランジの疲労強度を検証した事例。		
検証方法	実験による検証 ・ 解析による検証 ・ 道路橋示方書の準用		
検証方針	スタッド付き鋼板の板厚とスタッド径をパラメータとしたモデルに対して複合加力疲労試験（スタッドにせん断力、鋼板に引張力を同時に載荷）と立体有限要素法解析を行い、スタッド付き鋼板に対する疲労強度を評価。		
参考文献	1) 鈴木、藤原、平城、舛田、高田、宮地：組合せ応力作用下におけるスタッド付き鋼板の疲労強度、構造工学論文集、Vol.50A、2004.3		
注意点	<p>本検証事例では、連続合成桁の中間支点部上フランジのように引張応力とスタッドからのせん断応力をうける鋼板の疲労強度は、スタッドからのせん断応力が大きくなるほど低下する。</p> <p>1) 本事例は限られたスタッド径と鋼板厚に対するものであり、条件が異なると疲労強度は異なる可能性がある。</p> <p>2) 実橋のスタッドで生じる応力は複雑であり試験体による結果とは異なることが想定される。実績のある条件のものとの相対比較による実橋条件における推定を別途行うなど実挙動と試験条件の相違に注意する必要がある。</p>		

検証事例-4	床版施工時におけるひびわれ防止		
要求性能	構造物の安全性	関連規定	道路橋示方書II鋼橋編 (11.2.1)
検証目的	床版打設後の水和熱によって生じるコンクリートの引張応力度を解析によって推定し、施工時のひびわれ防止策を見出して設計・施工に反映した検証事例。		
検証方法	実験による検証 ・ 解析による検証 ・ 道路橋示方書の準用		
検証方針	場所打ちPC床版のFEM温度応力解析を行い、実橋床版の温度計測結果から得られた内部温度履歴と照合してその妥当性を検証した後、床版施工時にコンクリートに生じる応力を推定するとともに、その温度応力に影響を及ぼす各因子についての比較検討結果をもとに効果的なひびわれ抑制対策を抽出。		
参考文献	<p>1) 安川、倉田、師山、丸山、中村、大浴：場所打ちPC床版の温度計測と応力評価に関する検討(上)、橋梁と基礎、Vol.38、2004.3</p> <p>2) 稲葉、塩永、津田、嶽下、武藤、室田：場所打ちPC床版の温度計測と応力評価に関する検討(下)、橋梁と基礎、Vol.38、2004.4</p>		
注意点	<p>1) 本事例は支間長が6m程度で、厚さ30cm程度の場所打ちPC床版を対象しており、異なる場合は別途それらを反映した検討が必要である。</p> <p>2) コンクリートの示方配合や諸物性値、養生方法などの条件が異なる場合についても別途それらを反映した検討が必要である。</p>		

2.4 鋼桁とRC橋脚の剛結構による複合ラーメン橋

2.4.1 概要

ここで対象とする複合ラーメン橋は、鋼桁とRC橋脚とを剛結したラーメン橋であり、支承を介して上部構造を支持する連続桁橋と比較して次のような特徴がある。

上下部の剛結により上部構造に作用する最大曲げモーメントが低減されるため、上部構造の断面小型化と長支間化が行いやすくなる。また上部構造の重量低減に付随して基礎を含めた下部構造の小型化、支承部がないことによる維持管理負担の軽減、不静定次数が高く耐震性上有利であることなどの特徴がある。

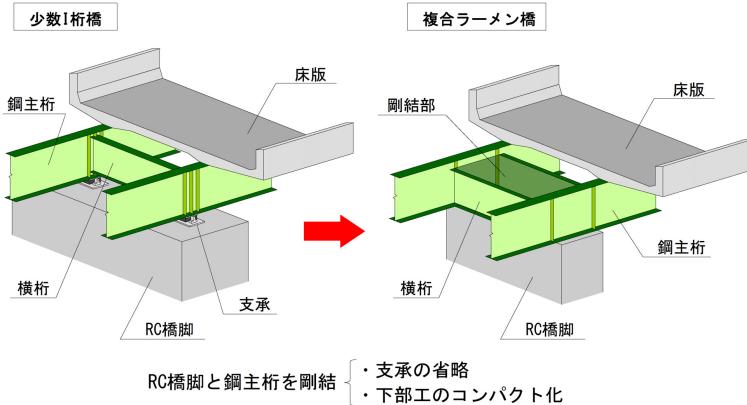


図-2.4.1 鋼桁とRC橋脚の剛結構構造（少数鉢桁採用の場合）



少数鉢桁の複合ラーメン橋
(今別府川橋)



バーシャル箱桁（部分箱桁）の
複合ラーメン橋（下浜駄川橋）



2箱桁の複合ラーメン橋
(横浜青葉 IC)

図-2.4.2 鋼桁とRC橋脚の剛結構によるラーメン橋の施工事例

鋼桁とRC橋脚の剛結方法には様々な形式があり、複合ラーメン橋が初めて採用された阿古耶橋（1990年完成）では、剛結部に生じる引張応力に対して、PC鋼材を用いた剛結構造が採用された。その後、岡豊橋以降では、経済性や施工性の観点から、剛結部の力の伝達機構としてPC鋼材を用いる方式からスタッドジベルを用いた剛結構造に変更された。近年では、鋼少主桁橋への適用および施工性をより改善する目的などから、孔あき鋼板ジベルを用いた剛結構造の採用も増加している。以下に、鋼桁とRC橋脚の剛結構造をその形式から分類して示す。

- (1) 鋼上部工の形式 : 多主鉢桁橋、少数主桁橋、箱桁橋
- (2) 定着形式 : PC定着形式、鉄筋定着形式、下フランジ支圧形式、鋼製柱形式
- (3) 定着部ずれ止め形式 : スタッドジベル、孔あき鋼板（PBL）

これらの形式を組み合わせた実構造における施工事例を以下に示す。

① 鋼多主鉄桁の剛結構構造の事例

表-2.4.1 鋼多主鉄桁の剛結構構造の事例²⁻⁴⁻¹⁾

橋梁形式	阿古耶橋	岡邊橋	親水沢橋
	鋼3径間連続ラーメン5主鉄桁橋	鋼(3+4)径間連続ラーメン4主鉄桁橋	鋼2径間連続ラーメン4主鉄桁橋
剛結部構造図			
構造概要	鋼鉄桁と短柱式RC橋脚	鋼鉄桁と短柱式RC橋脚	鋼鉄桁と壁式RC橋脚
基本方針	鋼鉄桁の中央支点部に箱型断面の鋼鉄横断面を設け、この横断面内にコンクリートを充填し、PC鋼材で後脚と充填コンクリートを緊結することで剛結	RC橋脚の柱部を柱上部フランジ附近まで延長し、主桁および横断面の横断面をRC橋脚内に埋め込み、この部分の鋼部材に溶接したスカットにより剛結	鋼部材をコンクリート部材内に埋め込んで剛結
剛結方法	PC鋼材	スタッドジベル	スタッドジベル
伝達部材	支点部横筋	横筋	主桁
軸力	曲げモーメントとせん断力	横筋または主桁の下フランジからそのままRC橋脚へ圧縮応力として伝達	ダイアフラム、横筋、主桁のウエブなどに溶接されたスタッドによりRC橋脚の主鉄筋に伝達
曲げモーメント	RC鋼材を解して横脚頭部に曲げモーメントとして伝達	支圧板の板面、横筋の下フランジ下面などから横脚コンクリート面上に支圧応力をとして伝達	横脚コンクリート上面に支圧応力をとして伝達
せん断力	RC鋼材を解して横脚頭部に曲げモーメントとして伝達	上フランジ下面、主桁ウエブ、下フランジ上面に設計したスタッドジベルで伝達	上フランジ下面、主桁ウエブ、下フランジ上面に設計したスタッドジベルで伝達
剛結部の部材設計	主桁は鋼断面、接合部はPC断面で抵抗	主桁は鋼断面で、柱(躯体)はRC断面で抵抗	主桁は鋼断面で、柱(躯体)はRC断面で抵抗

② 鋼箱桁の剛結構構造の事例

表-2.4.2 鋼箱桁の剛結構構造の事例²⁻⁴⁻¹⁾

橋梁形式	横浜線IC橋	北千曲川橋	川之江東JCTランプ橋
	鋼7径間連続ラーメン2室箱桁橋	鋼4径間連続ラーメン1室箱桁橋	鋼10径間連続ラーメン1室箱桁橋
剛結部構造図			
構造概要	鋼箱桁と円柱式RC橋脚	鋼箱桁と短柱式RC橋脚	鋼箱桁と短柱式RC橋脚
基本方針	コンクリート横脚の鉄筋をそのまま鋼桁内部まで貫通させ、鋼桁内にコンクリートを充填し、鋼筋を充填させて剛結	コンクリート横脚をそのまま鋼桁内部まで貫通させ、鋼桁内にコンクリートで充填し、スタッドにより下方に施した鋼柱をRC橋脚内に埋め込み、鋼脚外側に溶接したスタッドにより剛結	鋼箱桁隅角内部にコンクリートを充填し、鋼脚より下方に施した鋼柱をRC橋脚内に埋め込み、剛脚外側に溶接したスタッドにより剛結
剛結方法	鉄筋	スタッドジベル	スタッドジベル
伝達部材	支点部横筋	主桁+ダイアフラム	鋼製柱
軸力	曲げモーメントとせん断力	横梁から横梁内部に充填させたコンクリートをダイアフラム、横梁、主桁のウエブなどに溶接されたスタッドによりRC橋脚の主鉄筋に伝達	横梁からそのままでRC橋脚へコンクリートにより伝達
曲げモーメント	横梁からそのままでRC橋脚へコンクリートの経由し、付着力でRC橋脚の主鉄筋に伝達	主桁の板面、横梁の下フランジ下面などから横脚コンクリート面上に支圧応力として伝達	主桁下フランジからそのままRC橋脚へコンクリートの圧縮応力として伝達
せん断力	横梁下フランジに設けたリブ(せん断キー)を介して伝達	支圧板により接合部内のコンクリートに直接伝達	鋼製柱部に設けたスタッドを介してRC橋脚へ伝達
剛結部の部材設計	主桁、横梁は鋼断面にて、柱はRC断面にて抵抗	立体ラーメン解析結果の断面力に対して、鋼桁、鋼製柱断面とRC脚断面それぞれ単独で抵抗のみで抵抗	立体ラーメン解析結果の断面力に対して、鋼桁、鋼製柱断面とRC脚断面それぞれ単独で抵抗のみで抵抗

③ 鋼2主鉄桁の剛結構構造の事例

表-2.4.3 鋼2主鉄桁の剛結構構造の事例²⁻⁴⁻¹⁾

橋梁形式	虹木橋	今別府川橋	鶴川高架橋
	鋼3径間連続ラーメン2主鉄桁橋	鋼3径間連続ラーメン2主鉄桁橋	鋼6径間連続ラーメン2主鉄桁橋
剛結部構造図			
構造概要	鋼鉄桁と壁式RC橋脚	鋼鉄桁と壁式RC橋脚	鋼鉄桁と壁式RC橋脚
基本方針	RC橋脚の柱部を柱上部フランジ附近まで延長し、主桁および横断面の横断面をRC橋脚内に埋め込み、この部分の鋼部材に溶接したスカットにより剛結	鋼部材をコンクリート部材内に埋め込んで剛結	鋼部材を鋼主桁ウエブと横桁で囲む構造とし、横桁間に孔あきダイアフラムと孔あき垂直補助材を配置し、穴あき斜板ジベルによってRC橋脚と剛結される
剛結方法	PC鋼材	スタッドジベル	孔あき鋼板ジベル(バーフォーボンドジベル)
伝達部材	支点部横筋	主桁	主桁および横筋
軸力	曲げモーメントとせん断力	横筋または主桁の下フランジからそのままRC橋脚へ圧縮応力として伝達	主桁下フランジおよび横筋の孔あき垂直補助材、孔あきダイアフラムにより伝達
曲げモーメント	RC鋼材を解して横脚頭部に曲げモーメントとして伝達	横脚ウエブ外面のスタッドを介して伝達	孔あき鋼板ジベル(バーフォーボンドジベル)により伝達
せん断力	RC鋼材を解して横脚頭部に曲げモーメントとして伝達	横脚ウエブ外面のスタッドを介して伝達	孔あきダイアフラムにより伝達
剛結部の部材設計	主桁は鋼断面、接合部はPC断面で抵抗	主桁は鋼断面で、柱(躯体)はRC断面で抵抗	主桁は鋼断面で、柱(躯体)はRC断面で抵抗

鋼桁とRC橋脚部の設計方法は、表-2.4.1～表-2.4.3でも示した連結形式により表-2.4.4及び表-2.4.5のように整理することができる。

表-2.4.4 鉄桁タイプの剛結構構造の力の伝達機構と設計方法²⁻⁴⁻²⁾

連結形式	伝達機構図	伝達部材	伝達機構	M:曲げモーメント	N:軸力	S:せん断力	構造例
PC定着形式		PC鋼棒	PC鋼棒	①引張力 PC鋼棒のスカットジベルから接合部コンクリートへ充着されたPC鋼棒へ伝達	PC鋼棒の緊張力による主桁と横筋のスカットジベルから横筋コンクリートへ伝達		
		PC鋼棒	PC鋼棒	②圧縮力 PC鋼棒の緊張力による主桁と横筋の下フランジから支圧力をとして伝達	主桁および横筋のスカットジベルから横筋コンクリートにせん断力として伝達		
鉄筋定着形式		横筋	横筋	①引張力 横筋版板のスカットジベルから接合部コンクリートへ充着された主鉄筋へ伝達	主桁と横筋下フランジ下面に設置されたスカットジベルから横筋コンクリートにせん断力として伝達		
		横筋	横筋	②圧縮力 主桁と横筋のスカットジベルから横筋コンクリートへ伝達	主桁と横筋下フランジおよび横筋のスカットジベルから横筋コンクリートにせん断力として伝達		

表-2.4.5 箱桁タイプの剛結構造の力の伝達機構と設計方法 2-4-2

連結形式	伝達機構図	伝達部材	伝達機構	M:曲げモーメント	N:軸力	S:せん断力	構造例
鉄筋定着形式		横桁	箱桁 ↓ 横桁 ↓ コンクリート ↓ 鉄筋 ↓ 橋脚	①引張力 横桁から横桁内コンクリートに定着された主筋筋へ伝達 ②圧縮力 主桁下フランジから橋脚コンクリートに支圧として伝達	横桁下フランジから直接コンクリートへ圧縮力をとして伝達	下フランジ下面に設置されたスタッダッジベルから橋脚コンクリートにせん断力として伝達	
下フランジ支圧形式		主桁 + ダイヤラム	箱桁 ↓ ダイヤラム ↓ スタッダッジベル ↓ コンクリート ↓ 鉄筋 ↓ 橋脚	①引張力 ダイヤラム、縦桁に設置されたスタッダッジベルから充てんコンクリートに定着された主筋筋へ伝達 ②圧縮力 主桁下フランジの支圧板から橋脚コンクリートに支圧力として伝達	鋼製隔壁内のダイヤラムのスタッダッジベルから橋脚コンクリートへせん断力として伝達	支圧板および縦桁のスタッダッジベルから橋脚コンクリートへせん断力として伝達	
鋼製柱形式		橋脚柱頭部	箱桁 ↓ 鋼製柱 ↓ スタッダッジベル ↓ コンクリート ↓ 鉄筋 ↓ 橋脚	①引張力 鋼製柱部のスタッダッジベルから接合部コンクリートに定着された主筋筋へ伝達 ②圧縮力 鋼製柱部のスタッダッジベルからコンクリートへせん断力として伝達	鋼製柱部のスタッダッジベルから橋脚コンクリートへせん断力として伝達	鋼製柱部のスタッダッジベルから橋脚コンクリートへせん断力として伝達	

このような鋼桁と RC 橋脚との剛結構造は、鋼とコンクリートという異種材料の組合せでラーメン構造の隅角部を構成するものであり、道路橋示方書（以下 道路橋示方書という。）では、このような構造形式や接合方法に関して規定されていない。

2.4.2 技術評価の必要性の観点と方向性

新技術としての鋼桁と RC 橋脚の剛結構に対する道路橋示方書の要求性能を満足させるための技術的課題として、表-2.4.6 に示す下記項目が挙げられる。

- (1) 鋼桁→剛結部→RC 橋脚への力の伝達機構の把握と部材設計方法
 - (2) 大規模地震時の耐震性能の確保
 - (3) 剛結部のコンクリート充填性の確保

以下では、道路橋示方書の条文や解説をもとに、各項目について技術的課題と性能評価の対応策をまとめる。

表-2.4.6 鋼桁とRC橋脚の剛結構造に対する技術的課題と性能評価の対応策

道路橋示方書の要求性能	技術的課題	性能評価の対応策	検証手法	検証事例など
<p>«(B-1) 構造物の安全性»</p> <p>道示I 1.5 死荷重、活荷重、地震の影響等の荷重に対して橋が適切な安全性を有していること。</p> <p>道示I 2.3 構造物の安全性を確保するために強度、変形及び安定を照査しなければならない。</p> <p>道示V 2.1 設計地震動のレベルと橋の重要度に応じて、必要とされる耐震性能を有すること。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・鋼桁→剛結部→RC橋脚への力の伝達機構の把握と部材設計方法 ・大規模地震時の耐震性能の確保 	<ul style="list-style-type: none"> ・鋼桁→剛結部（接合部材+充填コンクリート）→RC橋脚への力の伝達経路と分担を定量的に明らかにする。 ・上記伝達機構に基づいた部材設計の照査を行う。 ・剛結部を含む上部構造に生じる損傷を抑えるため、主たる塑性化が確実に橋脚に生じることを確認する。 ・塑性化を考慮する部材の履歴挙動の把握と耐力照査を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> ・方法1) FEM解析により検証する。 ・方法2) 載荷実験により検証する。 ・地震時を摸した正負交番載荷実験による終局耐荷力、終局破壊形態の検証。 ・プッシュオーバー解析により、設計で想定した塑性部材の妥当性の確認と非線形時刻歴地震応答解析による照査。 	<p>検証事例-1 検証事例-2</p> <p>検証事例-3 検証事例-4</p>
<p>«(D) 施工性»</p> <p>道示I 1.5 使用目的との適合性や構造物の安全性を確保するために確実な施工が行える性能を有すること。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・剛結部のコンクリート充填性の確保 	<ul style="list-style-type: none"> ・充填性を考慮したコンクリートの配合設計と施工時における打込み、締固め、養生等の作業計画を検討する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・施工試験による検証。 	<p>検証事例-5 検証事例-6</p>

(1) 鋼析→剛結部→RC 橋脚への力の伝達機構の把握と部材設計方法

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書 II 鋼橋編 15.10 隅角部】

隅角部における断面は、横ばりの断面力を柱に円滑に伝達できるように設計するものとする。

なお、隅角部の設計は、フランジ力の伝達機構に留意し応力集中の影響を評価して行うのがよい。

ラーメン隅角部においては、力の方向が急変し、とくに鋼構造は一般に薄肉構造であるため、力の伝達機構が非常に複雑である。したがって、フランジ力の伝達方法、shear lag の影響等、隅角部の設計において支配的となる事柄について、十分な注意が必要である。隅角部の設計において支配的となる事柄に対しては、有限要素解析や実験等によりその影響を評価するのがよい。

■技術的課題

表-2.4.4 と表-2.4.5 で示した各剛結形式ごとの力の伝達機構は概念的なものであり、実際の設計にあたっては、FEM 解析等により RC 橋脚への力の伝達経路と分担を定量的に評価した上で、得られた断面力を用いて、剛結部を構成する主桁、横桁、RC の各断面及びずれ止めを適切に設計する必要がある。

■性能評価の対応策

剛結部の縮小模型を用いた載荷実験や FEM 解析により力の伝達について明らかにするとともにそれらを踏まえた設計方法を検討する。なお過去に類似の剛結構造がある場合は、それらに関する検討結果なども参考にすることで検討の合理化が図れる場合がある。

【解説】

複合ラーメン橋の剛結構造部は、15.10の解説でも記されているとおり、力の伝達機構が複雑となり、さらに異種材料間での力の伝達も生じるため、それらの影響を把握するためには、FEM 解析などの詳細な解析や実験を行うことになる^{2-4-1), 2-4-2)}。また、橋梁の一般的な構成部材は、鋼構造、RC 構造とも平面保持の仮定が成立することが前提とされているため、剛結部のような複雑な応力場においては平面保持の条件などの設計上の前提条件が成立することについても必要に応じて検証し、安全側となるように注意する必要がある。

[検証事例-1] [検証事例-2]

【参考文献】

2-4-1) 前田, 木水, 佐々木, 明橋: 鋼 2 主桁複合ラーメン橋剛結部における設計法の提案と実挙動確認, 構造工学論文集, Vol.48A, 2002-3

2-4-2) 鈴木, 水口, 吉田, 中嶋, 館: 複合ラーメン橋剛結部の一構造と模型実験, 構造工学論文集, Vol.44A, 1998-3

(2) 大規模地震時の耐震性能の確保

■関連する道路橋示方書の規定

【道路橋示方書 V 耐震設計編 5.3 耐震性能 2 に対する橋の限界状態】

(1) 耐震性能 2 に対する橋の限界状態は、塑性化を考慮した部材にのみ塑性変形が生じ、その塑性変形が当該部材の修復が容易に行い得る範囲内で適切に定めるものとする。

(2) 塑性化を考慮する部材としては、確実にエネルギー吸収を図ることができ、かつ速やかに修復を行うことが可能な部材を選定するものとする。

(3) 橋の構造特性を踏まえ、塑性化を考慮する部材を適切に組合わせるとともに、その組合わせに応じて、各部材の限界状態を適切に設定するものとする。

(3) 2) 橋脚と上部構造に塑性化を考慮する場合

・・・・・

なお、ラーメン橋のように上部構造と橋脚が結合されている場合、橋脚頭部断面の曲げ耐力を過度に高めると、それだけ上部構造に伝達される地震力も大きくなる。したがって、確実に橋脚に主たる塑性化を誘導し、上部構造に生じる損傷を抑えるという観点から、橋脚頭部断面の設計に配慮するのがよい。・・・・・ 一方、鋼上部構造に関しては、塑性域での挙動についてはまだ明確にされていない点も多いことから、副次的な塑性化を考慮する場合にも、許容できる塑性化の程度については十分な検討を行う必要がある。

■技術的課題

複合ラーメン橋では、鋼上部構造の塑性域での挙動についてまだ解明されていない点も多いこと等を考慮し、耐震性能 2 を満足させるためには、RC 橋脚頭部断面に主たる塑性化を誘導することが望ましい。

■性能評価の対応策

類似の剛結構造がある場合は、既往の検討結果を参照し、無い場合は、載荷実験により、終局状態や履歴挙動から主たる塑性化が橋脚頭部断面に生じることを確認する。

【解説】

5.3の解説でも記されているとおり、鋼上部工では塑性域の挙動が明確にされていない点も多い。そのため、耐震性能2としては、RC橋脚頭部断面に主たる塑性化を誘導し、剛結部および鋼上部工は弾性域にとどめるよう設計するのが一般には望ましいとされる。設計した剛結構造において期待したとおりの破壊形態が発生することを検証するため、剛結部の縮小模型を対象とし、地震時を模擬した正負交番載荷試験を実施し、終局状態から主たる塑性化領域を確認した事例がある^{2-4-3), 2-4-4)}。

[検証事例-3] [検証事例-4]

【参考文献】

2-4-3) 前田, 木水, 佐々木, 明橋: 鋼 2 主桁複合ラーメン橋剛結部における設計法の提案と実挙動確認, 構造工学論文集, Vol.48A, 2002-3

2-4-4) 鈴木, 水口, 吉田, 中嶋, 館: 複合ラーメン橋剛結部の一構造と模型実験, 構造工学論文集, Vol.44A, 1998-3

(3) 剛結部のコンクリート充填性の確保

■関連する道路橋示方書の規定

[道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編 19.6 コンクリート工]

- (5) 締固め
 - 2) コンクリートの締固めにあたっては、コンクリートが鉄筋の周囲及び型わくのすみずみに行きわたるようにするものとする。

■技術的課題

剛結部は、鋼部材とRC橋脚の鉄筋が交差することに加えて、大きな断面力が発生する部位で鉄筋量も多くなる。そのため、剛結部のコンクリートは、一般に狭い空間への打込みとなり、コンクリートの充填性が問題となる。

■性能評価の対応策

類似の剛結構造がある場合は、既往の検討結果を参考し、無い場合は施工試験により、充填性確保のための打込みや締固め方法を検討する。

【解説】

鋼桁とRC橋脚の剛結部では、下フランジの下面等の狭い空間や、主桁や横梁下面の高力ボルトなど凹凸のある部位が多く存在するため、剛結部が想定した伝達機構どおりに挙動するためには、コンクリートの充填性を確保することが重要となる。そのため、剛結部の模型を用いたコンクリート打設実験など施工試験を実施し、コンクリートの充填性を確認した事例がある^{2-4-5), 2-4-6)}。また、打込み方法や締固め方法を検討した事例がある²⁻⁴⁻⁷⁾。

[検証事例-5] [検証事例-6]

【参考文献】

2-4-5) 半田：鋼とコンクリートの複合構造－阿古耶橋について－，橋梁，1991-7

2-4-6) 佐久間，柴田：鋼・コンクリート複合ラーメン橋－山形自動車道 阿古耶橋－，プレストレストコンクリート，Vol.37, No.2, 1995-3

2-4-7) 木水，松田，西根，春，沼田，山田：2主桁ラーメン橋（鯉川橋）の設計と施工，橋梁と基礎，2002-10

2.4.3 検証事例

検証事例-1	鋼桁→剛結部→RC橋脚への力の伝達機構の把握と部材設計方法		
要求性能	構造物の安全性 鋼桁とRC橋脚の剛結構造特有の構造 安全性の確保（孔あき鋼板定着方式）	関連規定	道路橋示方書Ⅱ鋼橋編 (15.10)
検証目的	ずれ止めとして孔あき鋼板を用いた剛結部構造で、剛結部の力の伝達機構を把握し、主桁の設計手法、横桁の設計手法、コンクリート部、鉄筋定着部およびずれ止めに関する設計手法の妥当性を照査した検証事例。		
検証方法	<input checked="" type="checkbox"/> 実験による検証 · <input type="checkbox"/> 解析による検証 · 道路橋示方書の準用		
検証方針	剛結部の縮小模型を用いた正負交番繰返し載荷実験から得られた力学的挙動に関する結果とFEM解析結果を参照し、実用的な部材設計手法の妥当性を確認。		
参考文献	1) 前田、木水、佐々木、明橋：鋼2主桁複合ラーメン橋剛結部における設計法の提案と実挙動確認、構造工学論文集、Vol.48A、2002.3		
注意点	1) 本検討では、ずれ止めとして孔あき鋼板を用いた剛結構造を対象としているため、他の剛結構造や形状、寸法などが大きく異なる場合は、別途検討が必要である。 2) 本試験は、1/7の縮小モデルで実施した一例であるため、試験結果の評価にあたっては寸法効果などを考慮することが望ましいが、寸法効果だけに着目して検討した事例は見当たらない。そのため、評価については、今後明確にしていく必要がある。 3) 鋼桁とRC構造の剛結構造を対象とし、隅角部のシェアラグ現象だけに着目して検討した事例は見当たらないため、定量的な評価については、今後明確にしていく必要がある。		

検証事例-2	鋼桁→剛結部→RC 橋脚への力の伝達機構の把握と部材設計方法		
要求性能	構造物の安全性 鋼桁と RC 橋脚の剛結構造特有の構造安全性の確保	関連規定	道路橋示方書 II 鋼橋編 (15.10)
検証目的	剛結部内の下フランジを設げずに支圧板とした剛結形式における荷重伝達機構を確認し、設計方法の妥当性を検証した事例。		
検証方法	<input checked="" type="checkbox"/> 実験による検証 <input type="checkbox"/> 解析による検証 <input type="checkbox"/> 道路橋示方書の準用		
検証方針	剛結部の縮小模型を用いた載荷実験で得られた力学的挙動と FEM 解析結果から、設計手法の妥当性を確認。		
参考文献	1) 鈴木、水口、吉田、中嶋、館：複合ラーメン橋剛結部の一構造と模型実験、構造工学論文集、Vol.48A、1998.3		
注意点	<p>1) 本検討では、剛結部内の下フランジを設げずに支圧板とした剛結構造を対象としているため、他の剛結構造や形状、寸法などが大きく異なる場合は、別途検討が必要である。</p> <p>2) 本試験は、1/5 の縮小モデルで実施した一例であるため、試験結果の評価にあたっては寸法効果などを考慮することが望ましいが、寸法効果だけに着目して検討した事例は見当たらない。そのため、評価については、今後明確にしていく必要がある。</p> <p>3) 鋼桁と RC 構造の剛結構造を対象とし、隅角部のシェアラグ現象だけに着目して、検討した事例は見当たらないため、定量的な評価については、今後明確にしていく必要がある。</p> <p>4) 本検討では、今後の課題として、以下の 4 点を挙げている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ① せん断遅れによる付加応力算定式の検討 ② 支圧板部の摩擦力や支圧板部以外の鋼板に作用する支圧力等の設計上考慮していない結合力の評価 ③ 実験、解析双方によるスタッドジベルに作用する力の評価方法の検討と評価のための基礎的実験の必要性 ④ 複合剛結部を実際に壊すような耐荷力実験の必要性 		

検証事例-3	大規模地震時の耐震性能の確保		
要求性能	構造物の安全性 大規模地震時の耐震性能の確認（孔あき鋼板定着方式）	関連規定	道路橋示方書 V 耐震設計編 (5.3)
検証目的	ずれ止めとして孔あき鋼板と孔あきダイヤフラムを用いた場合の大規模地震時の剛結部の変形破壊挙動を確認し、終局耐力特性に優れる方式を実験により確認した検証事例。		
検証方法	<input checked="" type="checkbox"/> 実験による検証 <input type="checkbox"/> 解析による検証 <input type="checkbox"/> 道路橋示方書の準用		
検証方針	剛結部の縮小模型を用いて正負交番繰返し載荷実験を行い、得られた力学的挙動に関する結果を考察。		
参考文献	1) 前田、木水、佐々木、明橋：鋼 2 主桁複合ラーメン橋剛結部における設計法の提案と実挙動確認、構造工学論文集、Vol.48A、2002.3		
注意点	<p>1) 本検討では、ずれ止めとして孔あき鋼板を用いた剛結構造を対象としているため、他の剛結構造や形状、寸法などが大きく異なる場合は、別途検討が必要である。</p> <p>2) 本試験は、1/7 の縮小モデルで実施した一例であるため、試験結果の評価にあたっては寸法効果などを考慮することが望ましいが、寸法効果だけに着目して検討した事例は見当たらない。そのため、評価については、今後明確にしていく必要がある。</p> <p>3) 鋼桁と RC 構造の剛結構造を対象とし、隅角部のシェアラグ現象だけに着目して、検討した事例は見当たらないため、定量的な評価については、今後明確にしていく必要がある。</p>		

検証事例-4	大規模地震時の耐震性能の確保		
要求性能	構造物の安全性 大規模地震時の耐震性能の確認（下フランジ支圧方式）	関連規定	道路橋示方書V 耐震設計編（5.3）
検証目的	剛結部内の下フランジを設げずに支圧板とした剛結形式における大規模地震時の終局挙動を把握し、構造安全性を実験により確認した検証事例。		
検証方法	実験による検証・解析による検証・道路橋示方書の準用		
検証方針	剛結部の縮小模型を用いて、地震時を想定した水平力載荷実験を実施し、終局状態から剛結部の安全性を確認。		
参考文献	1) 鈴木、水口、吉田、中嶋、舘：複合ラーメン橋剛結部の一構造と模型実験、構造工学論文集、Vol.48A、1998.3		
注意点	<p>1) 本検討では、剛結部内の下フランジを設げずに支圧板とした剛結構造を対象としているため、他の剛結構造や形状、寸法などが大きく異なる場合は、別途検討が必要である。</p> <p>2) 本試験は、1/5 の縮小モデルで実施した一例であるため、試験結果の評価にあたっては寸法効果などを考慮することが望ましいが、寸法効果だけに着目して検討した事例は見当たらない。そのため、評価については、今後明確にしていく必要がある。</p> <p>3) 鋼桁とRC構造の剛結構造を対象とし、隅角部のシェアラグ現象だけに着目して、検討した事例は見当たらないため、定量的な評価については、今後明確にしていく必要がある。</p> <p>4) 大規模地震で下フランジ側に引張力の発生が予測される構造に適用する場合の設計手法の整理については、今後の課題として、検討を加える必要があるとしている。</p>		

検証事例-5	剛結部のコンクリート充填性の確保		
要求性能	施工性 狭隘部のコンクリート充填性確保	関連規定	道路橋示方書III コンクリート橋編（19.6）
検証目的	PC剛結構造における鋼桁と橋脚天端コンクリートの隙間への無収縮モルタルの充填性を実験により確認した検証事例。		
検証方法	実験による検証・解析による検証・道路橋示方書の準用		
検証方針	無収縮モルタル注入試験の結果から、目視確認およびコア供試体による圧縮強度試験により充填性および信頼性を確認。		
参考文献	<p>1) 半田：鋼とコンクリートの複合構造－阿古耶橋について－、橋梁、1991.7</p> <p>2) 佐久間、柴田：鋼・コンクリート複合ラーメン橋－山形自動車道 阿古耶橋－、プレストレストコンクリート、Vol.37、No.2、1995.3</p>		
注意点	<p>1) 本検討では、PC剛結構造を対象としているため、他の剛結構造や形状、寸法などが大きく異なる場合は、別途検討が必要である。</p> <p>2) 本検討は、材料としてセメント系無収縮モルタルを使用した施工試験であり、施工方法、施工条件、材料、配合等が大きく異なる場合は、別途検討が必要である。</p> <p>3) PC剛結構造の課題として、以下の2点を挙げている。</p> <p>① 予めPC鋼棒をRC橋脚の天端に配置して箱状に製作した横梁の底板に孔を開け、PC鋼棒を貫通する構造としたため、剛結部の構造が複雑であり、主桁と横梁の架設時の施工性が劣る結果となった。</p> <p>② 横梁の底板とRC橋脚天端とのすき間への無収縮モルタルの充填は、確実な充填を行うために入念な施工が要求されるが、狭隘な空間の作業でもあり、施工性の改善が必要である。</p>		

検証事例-6	剛結部におけるコンクリートの充填性の確保		
要求性能	施工性 狭隘部のコンクリート充填性確保	関連規定	道路橋示方書IIIコンクリート橋編（19.6）
検証目的	剛結部のコンクリート充填性を実験により確認した検証事例。		
検証方法	<input checked="" type="checkbox"/> 実験による検証 ・ <input type="checkbox"/> 解析による検証 ・ <input type="checkbox"/> 道路橋示方書の準用		
検証方針	実物大模型を使用したコンクリート打設実験の結果から、充填性確保のための打込みおよび締固め方法を検討。		
参考文献	1) 木水、松田、西根、春、沼田、山田：2主桁ラーメン橋（鯉川橋）の設計と施工、橋梁と基礎、2002.10		
注意点	<p>1) 本検討では、ずれ止めとして孔あき鋼板を用いた剛結構造を対象としているため、他の剛結構造や形状、寸法などが大きく異なる場合は、別途検討が必要である。</p> <p>2) 本検討は、材料として普通コンクリートを使用した施工試験であり、施工方法、施工条件、材料、配合等が大きく異なる場合は、別途検討が必要である。</p>		