

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.841

March 2015

鋼道路橋の合理的な設計解析手法に関する研究 — 一定せん断流パネルを主体とした鋼道路橋の設計手法 —

玉越隆史・白戸真大・横井芳輝・水口知樹

Study on rationally analytical design method of steel highway bridges
- Design method for steel highway bridges mainly using “the constant shear flow panels” -

Takashi TAMAKOSHI, Masahiro SHIRATO, Yoshiteru YOKOI, Toshiki MIZUGUCHI

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

鋼道路橋の合理的な設計解析手法に関する研究

—一定せん断流パネルを主体とした鋼道路橋の設計手法—

玉越 隆史 *
白戸 真大 **
横井 芳輝 ***
水口 知樹 ****

概要

鋼道路橋における部材の設計体系は、初等はり理論に基づく棒モデルを用いた格子解析を前提に整備されてきた部分が多くある。また、道路橋の設計基準による部材の耐荷方式、安全率、許容応力度等の規定は、公称応力で整理して構築されてきたものである。すなわち、微小変形の初等はり理論で断面内の作用応力を算出することを前提にする一方で、部材としての破壊モードの違いに応じた安全性はそれらと対照することを念頭にして許容応力度として反映されている。一方、耐震補強構造や腐食のような耐久性上の損傷事例では、局所変形の影響や 2 次応力の影響など、必ずしも棒モデルを用いた計算では得られない応力性状に大きく左右されることも多く、連続体としての挙動が把握可能な高度な計算モデルである FEM 解析による評価が行われることも多い。

新設橋の設計では性能規定化や新しい構造形式の提案などにより、格子解析のみでは合理的に性能評価を行うことが難しいケースも増えるとともに、既設橋の耐荷力評価や補修補強などでも実態に則した局所的な応力評価の併用が重要となることも多い。

本研究は、鋼道路橋の性能評価のための合理的な設計手法の構築を目的として、従来の格子解析を用いた設計に対して、一定せん断流パネル要素を用いた解析、または FEM 解析のそれぞれを主体とする設計手法を比較し、それぞれの実橋への適用性と課題を整理したものである。

キーワード：鋼道路橋，有限要素解析，一定せん断流パネル解析

- * 橋梁研究室長
** 橋梁研究室 主任研究官
**** 橋梁研究室 研究官
***** 橋梁研究室 交流研究員

Study on rationally analytical design method of steel highway bridges

– Design method for steel highway bridges mainly using “the constant shear flow panels” –

Takashi TAMAKOSHI *
Masahiro SHIRATO **
Yoshiteru YOKOI ***
Toshiki MIZUGUCHI ****

Synopsis

The design system of the members of the steel highway bridges has been established on the premise analyzing with the grillage model based on the elementary beam theory. The allowable stress as well as the load-carrying capacity and the safety factor in the specifications for steel highway bridges in Japan are regulated as nominal stress. In other words, the acting stress which is calculated as nominal stress by the elementary beam theory shall be equal to or lower than the allowable stress which is reflected the safety in consideration of the differences among the various destruction modes to verify the safety of the member. On the other hand, actual damage of a exist bridge due to fatigue or an accident such as earthquake is often occurred by local stresses or secondary stresses those can not be analyzed by the grillage model. Then, a finite element analysis is applied to investigate the damage.

The specifications for steel highway bridges in Japan were revised in 2002 for performance-stipulated technical standards, and new structural type bridges have been proposed by degrees. Then, the bridges those performance cannot be rationally evaluated only by the grillage model analysis have been increasing. On the other hand, for exist bridges to evaluate those load carrying capacity or to repair/reinforce them, the evaluation of the local stress based on reality is important.

In this study, for the purpose of construction of rationally analytical design method to evaluate the performance of steel highway bridges, the usual grillage analysis, the finite element analysis, and the analysis using the constant shear flow panels are compared, and characteristics and issues in each analytical design method are arranged.

Key Words: steel highway bridge, finite element analysis, constant shear flow panel

-
- * Head, Bridge and Structures Division, Road Structures Department, NILIM
** Senior Researcher, Bridge and Structures Division, Road Structures Department, NILIM
*** Researcher, Bridge and Structures Division, Road Structures Department, NILIM
**** Guest Research Engineer, Bridge and Structures Division, Road Structures Department, NILIM

まえがき

2002年に道路橋示方書が性能規定型の基準に改定されてから、従来の標準的な仕様によらない新しい橋梁形式や構造による道路橋の採用が検討される例がみられる。設計においても、公称応力に基づいた従来の格子解析による部材の設計に加えて、FEM解析等のより高度な解析手法により局所的な応力性状なども評価して設計に反映するケースも多くあり、より高度な解析手法による照査、検討などが併用される設計実務の現状の合理化のためには、必要な照査や評価をできるだけ同じモデルによって効率的かつ整合の取れた形でできる設計手法の確立が有効と考えられる。

安全性能水準を規定する技術基準と連動した新たな設計手法の構築のためには、照査項目、照査方法、評価基準が調和した評価体系を確立する必要がある。このとき部材の設計においては、これまで一般的に行われてきた手法でかつ技術基準に基づいて行われてきた場合と、実態として期待できる安全率は、同等を確保する必要がある。例えば、FEM解析により算出した作用応力の取り扱い方法や照査方法について考えると、Von-Mises等価応力は、材料の3軸状態の応力を純引張りや主せん断を受ける一軸での応力状態に換算するものであり、部材単位での破壊モードと関連づけた応力ではないことから、各橋梁形式の各部材の破壊モードごとに確立された照査方法はない。他の応答値についても、2次応力の影響等も反映された局所応力を含み公称応力と異なることから、FEM解析結果について、現行の許容応力度や安全率と単純に比較することができない場合が多い。FEM解析についてはほかにも、設計計算ツールが整備されていないことを原因とするモデルの断面変更に関する繰り返し作業を各要素に対して手作業で行うなどの非効率さ、FEM解析では有効幅員内に載荷される活荷重に対する影響線解析が一般化されていないなど、他の課題として挙げられている。

一方、近年、従来の格子解析よりも高度な解析の一つとして、一定せん断流パネルを用いた解析（以下、「一定せん断流パネル解析」という）による橋の設計手法が検討されている。部材の設計において現行の許容応力度と比較できる作用応力度の算出が可能である一方で、格子解析では考慮できない板組形状に起因する局所的な応力状態もFEM解析と同等に算出できる。以上より、一定せん断流パネル解析は、従来の格子解析及びFEM解析の両方の長所を兼ね備えた解析手法となる可能性が期待されている。

このような背景から、本研究は、道路橋の性能評価のための高度な解析を用いた合理的な設計手法の構築を目的として、従来の格子解析、一定せん断流パネル解析、FEM解析のそれぞれの方法による照査を主体とする場合の設計の流れを整理して比較し、それぞれの実橋への適用性と課題を整理して検討したものである。

鋼道路橋の合理的な設計解析手法に関する研究
— 一定せん断流パネルを主体とした鋼道路橋の設計手法 —
目次

第1章	はじめに	1.1
1.1	鋼道路橋の設計における解析手法の現状と課題	1.1
1.2	解析手法の概要	1.4
1.2.1	格子解析	1.4
1.2.2	FEM 解析	1.4
1.2.3	一定せん断流パネルを用いた解析（一定せん断流パネル解析）	1.6
1.3	本研究の目的	1.8
第2章	解析手法の違いによる設計内容の比較	2.1
2.1	連続合成 I 桁橋	2.3
2.1.1	全体フロー	2.3
2.1.2	主桁	2.4
2.1.3	連結	2.23
2.1.4	支点上補剛材	2.24
2.1.5	中間垂直補剛材，水平補剛材	2.25
2.1.6	ずれ止めの設計	2.26
2.1.7	疲労設計	2.30
2.1.8	荷重分配横桁	2.31
2.1.9	中間横桁（少数主桁橋のみ）	2.32
2.1.10	端横桁（端対傾構）	2.36
2.1.11	中間対傾構	2.40
2.1.12	横構	2.43
2.1.13	床版の横荷重に対する照査	2.46
2.1.14	たわみ	2.48
2.2	立体ラーメン橋	2.49
2.2.1	全体フロー	2.49
2.2.2	構造解析	2.50
2.2.3	主桁	2.59
2.2.4	橋脚	2.67
2.3	格子解析では局所的な応力性状の把握ができないと考えられる構造	2.75
2.3.1	構造の概要	2.75
2.3.2	曲線少数 I 桁橋：主桁フランジの曲率による二次応力度	2.76
2.3.3	曲線細幅箱桁橋：主桁フランジの曲率と断面変形による二次応力度	2.79
2.3.4	曲線細幅箱桁橋：中間ダイアフラムのせん断応力度	2.81

2.3.5	方杖ラーメン橋：隅角部の作用応力度	2.82
2.3.6	単弦ローゼ橋：アーチリブと補剛桁間の隅角部における作用応力度	2.83
2.4	考察	2.84

第3章	まとめ	3.1
-----	-----	-----

付録1	一定せん断流パネルを用いた解析による鋼道路橋の設計マニュアル（案）	付1.1
-----	-----------------------------------	------

付1.1	はじめに	付1.1
付1.2	連続合成I桁橋	付1.2
付1.3	鋼床版連続箱桁橋	付1.20
付1.4	鋼製橋脚	付1.27
付1.5	一定せん断流パネル解析を主体とした設計において概略設計段階で決めておくべき特徴的な事項	付1.29

付録2	一定せん断流パネルを用いた解析モデル作成マニュアル（案）	付2.1
-----	------------------------------	------

付2.1	連続合成I桁橋	付2.2
付2.2	鋼床版連続箱桁橋	付2.19
付2.3	鋼製橋脚	付2.27

第1章 はじめに

1.1 鋼道路橋の設計における解析手法の現状と課題

鋼材は、コンクリートに対して単位体積重量が相対的に大きいものの、構造体を形成する場合には部材の最小厚さを薄くできることから、構造全体としては軽量にすることができやすい。その軽量化の長所を発揮して鋼構造は、一般に薄肉集成部材による骨組構造として形成されることが多い^{1.1.1.2)}。

鋼道路橋も主桁、横桁、対傾構、および横構などの細長い部材から構成されている。電算技術が発達する以前より、骨組構造である鋼道路橋の各部材に作用する断面力や変位を算出するために、初等はり理論を基にした格子理論、トラス理論、アーチ理論などの各骨組構造の特徴を踏まえた構造解析理論がそれぞれ用いられてきた。その後、電算技術の発達により、変位法に基づき定式化したマトリックス構造解析を用いることが一般的に行われるようになってきている^{1.1~1.3)}。

薄肉集成部材では、圧縮力や曲げモーメントに対して座屈耐荷力の確保が設計・施工上、重要となってくる。座屈耐荷力に対する研究は弾性分岐座屈理論が基になっているが、薄肉集成部材に対する適用については精度に関する課題がある。特に、補剛板の局部座屈および全体座屈への初期不整（初期たわみ、溶接による残留応力）、または荷重の偏心の影響を考慮する必要があるものの、この初期不整は統計量としてのばらつきを有しており、構造ごとに精度よく考慮することは困難である。これらを踏まえて、道路橋の基準である道路橋示方書には、初期不整のほか、荷重の偏心、部材断面内における降伏点のばらつき等の影響を考慮した基準耐荷力曲線が示され、これとの対照により照査が行われている^{1.1.1.2)}。

また、道路橋示方書では、材料の機械的性質のばらつきや、道路橋に作用する荷重のばらつき等を踏まえた安全率を考慮して、許容値を設定している。許容値の基である基準耐荷力曲線は、主に実験結果から求められているが、実験で網羅的に計測して統計的に処理できる項目は局所的なひずみや変位、応力、または降伏や破壊が進行している状態の断面諸元ではなく、実験供試体に作用する荷重強度、および代表箇所の変位という部材レベルの項目である。そのため、許容値は、局所的な変形や応力分布を考慮していない試験前の断面形状を用いた公称応力で整理することになる。また、材料レベルの限界状態である降伏、材片レベルの局所的な限界状態である局部座屈、格点間等の範囲の限界状態である部材の座屈、局部座屈と部材座屈の連成座屈、または橋全体の弾性座屈といった様々な損傷範囲の限界状態に対して、応力度レベルとした許容値は共通した指標として実用的である。一方、橋の状態を表す作用力については、主桁や横桁といった細長い部材を格子に組んだ構造解析（以下、「格子解析」という）を用いて算出するが、材料非線形を有しない微小変位理論による線形解析を採用するのが一般的であることから、変形前の橋の断面諸元を用いて算出する公称応力としての作用応力度は、許容応力度と精度の面で整合している^{1.1)}。

以上のように、鋼道路橋の設計体系は、初等はり理論に基づく格子解析を前提として、部材の基準耐荷力曲線、安全率、および許容応力度等の規定を公称応力で整理して構築されてきた。その結果、許容応力度設計法は部材に関するいずれの破壊モードに対する照査も公称応力で評価でき、安全余裕を確保するための基準も公称応力と対応させた許容値により明解に規定できる設計法として確立している^{1.1)}。

部材単位の設計は以上のように構成されているものの、耐震補強構造や腐食のような耐久性上の損傷事例では、局所変形や2次応力の影響など、必ずしも棒モデルを用いた計算では

設計計算の現状

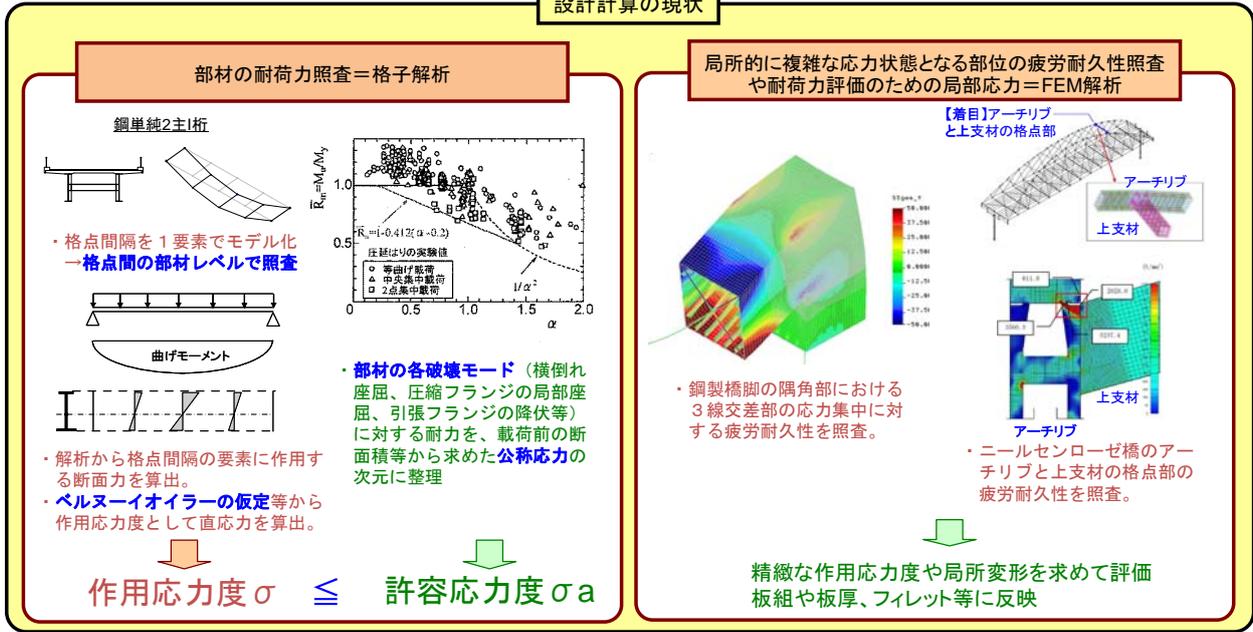


図-1.1 設計計算の現状

得られない応力性状に大きく左右されることも多い^{1.4,1.5)}。このような局所的な応力や変形の評価が重要となる場合には、部材各部の応力状態やそれによる構造系の変化の影響の再現について棒モデルを用いた解析から行うことには限界があるため、解析的検討に当たっては連続体としての局所的な挙動が把握可能な高度な計算モデルとして FEM 解析が用いられている^{1.6)}。FEM 解析によって得られる鋼橋の作用応力度は、実際の橋に作用する値に近いことが知られている^{1.7)}。また、鋼製橋脚における隅角部フランジのせん断遅れの再現、または2次部材の作用応力のような局所的で複雑な作用応力や変形の算出が可能である^{1.8~1.10)}。さらに、材料非線形および幾何学的非線形を考慮した解析によって、残留応力や初期たわみを考慮した実構造物の終局耐力と変形能を再現することも可能である。以上のように、FEM 解析は高度な解析手法の一つであり部材の変形や作用応力の状態を詳細に解析できることから、実際の損傷事例に関する原因究明のほか、研究分野における実験結果を補足するパラメトリックな検証などに用いられてきた^{1.11)}。以上の格子解析と FEM 解析による設計計算の現状を整理すると図-1.1 のようになる。

2002 年に道路橋示方書が性能規定型の基準に改定^{1.1)}されてから、従来の標準的な仕様のみによらない新しい橋梁形式や構造による道路橋の採用が検討される例も多くみられる。設計に用いる解析手法も、図-1.1 で示した格子解析による部材の設計以外に、FEM 解析による局所的な挙動の評価を併用することがより一般的になりつつある。FEM 解析を設計計算の主体とした鋼橋の設計手法を検討した研究には、格子解析結果と FEM 解析結果の比較^{1.12~1.14)}、FEM 解析結果から得られた Von-Mises 等価応力と降伏応力の比較^{1.8)}、または FEM 解析結果による作用応力から主桁の作用断面力を算出してある限界状態に対応する抵抗断面力と比較した検討等^{1.8)}がある。しかし、FEM 解析により算出した作用応力の取り扱い方法や照査方法について考えると、たとえば Von-Mises 等価応力は、材料の3軸状態の応力を純引張りや主せん断を受ける一軸での応力状態に換算するものであり、部材単位での破壊モードと関連づけた応力ではないことから、各橋梁形式の各部材の破壊モードごとに確立された照査方法はなく、今後の課題となっている。また、設計計算ツールが整備されていないことを

原因とするモデルの断面変更に関する繰り返し作業を各要素に対して手作業で行うなどの非効率さ^{1.12)}、FEM解析では有効幅員内に載荷される活荷重に対する影響線解析が一般化されていない^{1.12)}などが他の課題として挙げられている。以上より、局所的な変形や作用応力の状態を考慮した個別の部材に対する特定の破壊モードの評価について、FEM解析は多くの実績を有するものの、FEM解析を主体とした設計の実績はこれまでにない。また、本州四国連絡橋公団では、鋼構造への適用例とともに、解析モデルに用いる各要素の種類や性質、要素分割の注意点、境界条件や荷重条件の設定に関する注意点、あるいは解析結果の評価に関する着目点などをガイドラインとしてまとめている^{1.15)}。しかし、これらはFEM解析の必要性や目的を確認した後への適用であり、どの部位あるいは何の照査にFEM解析を用いた局所的な挙動の評価が必要となるかの判断

基準は示されていない。独立行政法人土木研究所では、桁橋形式の鋼道路橋の設計へのFEM解析の適用に関する検討を行っている^{1.16)}。実橋の計測結果、あるいは格子解析結果との比較により、要素分割数や影響線載荷方法の妥当性等の、設計に関する具体的な検討を詳細に行っているものの、実橋の個別の設計において、どのようにFEM解析を行うかという一般化した要領の作成までは至っていない。

従来の格子解析に替えてFEM解析を主体とした設計を行うためには、上記の課題を解決する必要がある。繰り返し作業の非効率さは、詳細設計の前段階である概略設計の精度を上げたり、直橋で支間長が短い単純2主I桁橋のような比較的構造が単純な橋梁形式から採用するなどの対応が考えられる。活荷重の影響線解析の一般化は、レーン載荷と等分布面積載荷とを比較検討した研究^{1.17)}もあるが、直橋で支間長が短い単純2主I桁橋のような比較的構造が単純な橋梁形式については、各部材の各限界状態に対して最も不利な荷重載荷状態を想定することが少なくとも不可能ではないと考えられる。最も重要で根本的な課題は、各橋梁形式の各部材の破壊モードごとにFEM解析結果に対する許容値が確立していないことである(図-1.2参照)。FEM解析の結果から得られる応答値は、2次応力の影響等も含まれた局所応力を含み公称応力と異なることから、現行の許容応力度や安全率と単純に比較することができない場合も多い。実際、道路橋示方書に示されている基準耐荷力曲線には初期不整のほか、荷重の偏心、部材断面内における降伏点のばらつき等の影響が考慮されていることから、与えられた荷重条件に対する各部材の状態を算出したFEM解析結果に初期不整などを

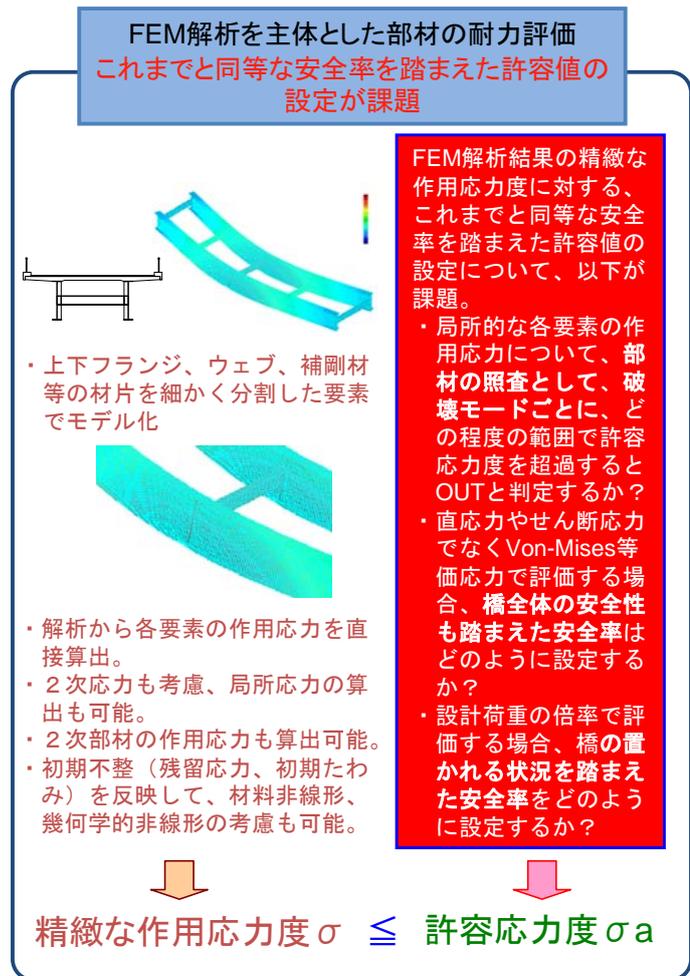


図-1.2 FEM解析を主体とした設計計算の課題

含める場合には、基準耐荷力曲線の見直しのほか、安全率を分解する必要がある。つまり、FEM 解析の結果から橋の安全性を評価できるようになるためには、照査項目、照査方法、評価基準を一体とした評価体系を確立する必要があるということである。ここで、道路橋に求められる要求性能とは、想定すべき橋の置かれる状況[作用]に対して、そうなることの確からしさ[安全率とそれが有する信頼性]を考慮した、想定される橋の状態、または機能[抵抗]のことであることから、[抵抗]側の耐荷力と[作用]側の解析結果の間に、従来の格子解析と同等の[安全率とそれが有する信頼性]を確保する必要がある。

一方、道路橋の設計の合理化・高度化について以上の課題がある中、近年、従来の格子解析と対比が容易で、格子解析では考慮できない局所的な応力状態も FEM 解析と同等に算出できる一定せん断流パネルを用いた解析（以下、「一定せん断流パネル解析」という）による橋の設計手法が用いられ、照査手法が確立されつつある^{1.18~1.24}。

それぞれの解析手法の概要については 1.2 節で示すが、一定せん断流パネルとは、せん断応力のみで抵抗する板要素とその外周に曲げに伴う垂直応力のみを負担するはり要素から構成され、板要素とはり要素の間には図-1.3 に示すような内力分布の関係がある。

一定せん断流パネル解析には以下の特徴があることから、FEM 解析と同等な局所応力の算出が可能であり、鋼製橋脚隅角部の疲労設計に関するガイドラインがまとめられている^{1.18}。

- ・ 部材軸力が部材間で線形に変化するため、少ない要素分割でも精度よくせん断変形を評価できる。
- ・ せん断遅れの影響を考慮した応力を直接的に算出することができる。
- ・ 縁部材の剛性に板曲げ剛性を考慮することで、板曲げ応力を直接的に算出することができる。

一定せん断流パネル解析によって算出される局所応力については、FEM 解析により得られる局所応力についても同様であるが、比較する許容値および比較手法の確立が課題である。

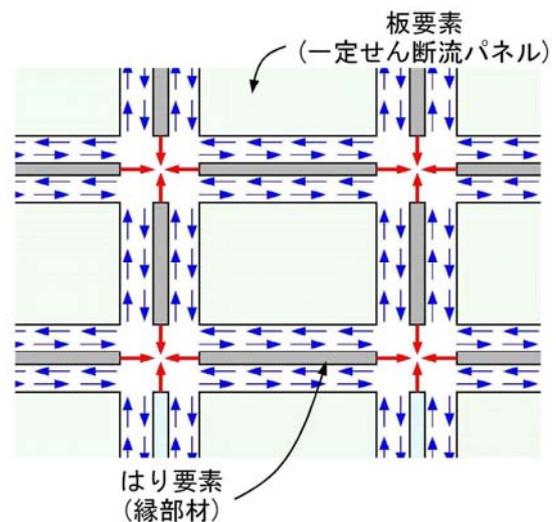


図-1.3 一定せん断流パネルの内力分布^{1.18}

1.2 解析手法の概要

1.2.1 格子解析

格子解析は、主桁や横桁をはり要素でモデル化し、格子状に組んだ解析モデルを用いて、各はり要素に作用する断面力、およびはり要素同士を結合している節点ごとの変位を変位法によって求めるものである。横構や荷重分配に寄与しない対傾構などはモデルに含めない。一般に、主桁や横桁をモデル化するはり要素は、ベルヌーイ・オイラーの仮定が成り立つと仮定し、解析から得られた断面力から、各断面に作用する応力を算出する。

鋼道路橋における格子解析による解析モデルと解析の概要について、表-1.1 に示す。

1.2.2 FEM 解析

FEM 解析とは、無限の自由度を持つ連続体を、ある指定された有限個の未知量を含む部分

領域または要素の集合体を用いて近似して応力等を算出する解析手法である。任意の形状の物体を単純な形状・性質の小部分（要素）に分割し、その1つ1つの要素の特性を数式化して近似的に表現し、これらが連続となるようにすべての方程式が成立する解を算出する。その結果、要素各部の応力や各節点の変位を求め、同時に全体としての応力や変形の状態を把握するものである（図-1.4 参照）。FEM 解析では要素分割の細かさと要素にもたせる性質によって解析結果が異なり、特に局所的な応力の変化や微小な変形量を精度よく求めるためには要素分割を細密化する必要がある、それにつれて計算量が増大することとなる^{1.18)}。

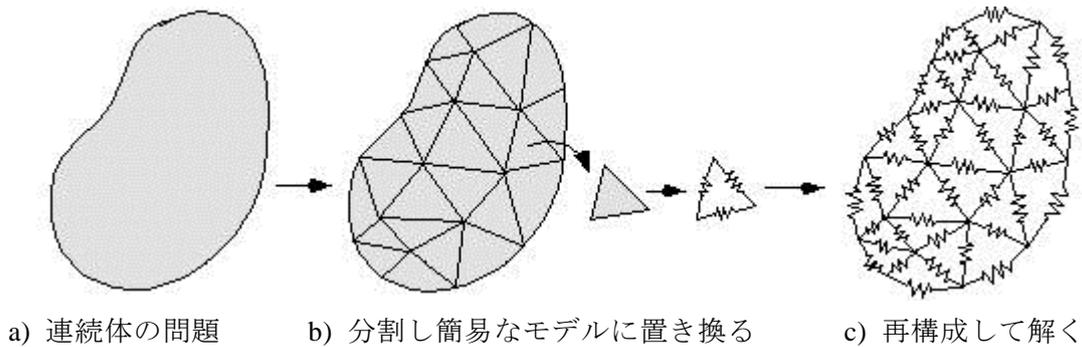
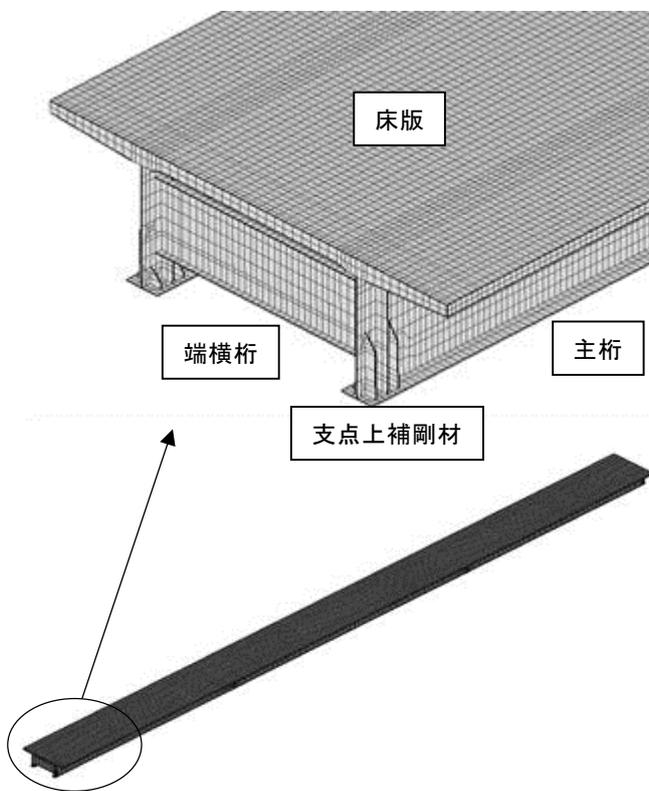


図-1.4 FEM 解析のモデル化の例^{1.18)}

解析のアルゴリズムに着目すると、1.2.1 の格子解析も 1.2.3 の一定せん断流パネル解析も FEM 解析の一部である。本研究では、1.1 節で示した鋼道路橋の設計に関する FEM 解析の検討例を参考に、FEM 解析について以下のとおり定義する。



解析モデルに用いる要素の種類

鋼部材の材片をシェル要素で、コンクリート系の床版はソリッド要素で、横構のような軸力部材を棒要素でモデル化することを標準とする。

橋全体の挙動溶接ビードやスカラップなどは基本的にモデル化しない。

荷重

格子解析や一定せん断流パネル解析と同様に、道路橋の技術基準で規定される荷重を載荷することを基本とする。

構成則

材料特性は線形を基本とする。

注記

材料の降伏後などの耐荷力を求める必要がある場合には、残留たわみや初期たわみなどの初期不整を考慮し、かつ材料非線形及び幾何学的非線形を考慮した解析を行うこともある。

図-1.5 本研究における鋼道路橋の設計に対して主体的に実施する FEM 解析の定義（鋼単純合成 2 主 1 桁の例）

本研究における FEM 解析を主体とした設計の定義

鋼道路橋全体を対象として、各部材を図-1.5 に示すようにモデル化した FEM 解析による各部材の照査、または局所的な変形や応力性状の評価による設計

以下、各解析の比較や考察、および評価については、ここで定義した FEM 解析について述べる。

1.2.3 一定せん断流パネルを用いた解析（一定せん断流パネル解析）^{1.18)}

一定せん断流パネル解析は、一定せん断流パネルを用いて対象部材をモデル化し、解析を行う手法である。図-1.6 に示すように、対象とする板部材を基本的には直交格子で区切られたパネルに分割し、それをせん断応力のみに対抗する板要素（一定せん断流パネル）に置き換え、その4辺にはその分担幅分の板の断面積をもつはり要素と結合させたモデル化を行う。なお、本解析手法はせん断場理論として航空の分野などの薄板のみ、または薄板と補剛材で構成される構造の解析では既に実績もある方法^{1.25)}であり、一定せん断流パネル要素とはり要素間にせん断流という要素力を導入し、このせん断流を未知数として応力法で行われてきたものである。変位法における使用例は少なく、変位法に用いる場合は、文献 1.18) に示されている一定せん断流パネルの剛性マトリックスの誘導が参考にできる。以下に文献 1.26) を参考にした計算例を示す。

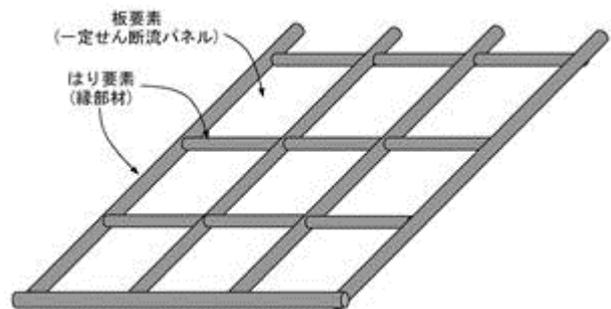


図-1.6 一定せん断流パネルのモデル^{1.16)}

計算例

一定せん断流パネルの概念を示す例として、図-1.7 に示す薄板の片持ちはりを考える。この片持ちはりを、図-1.8 に示すように軸力のみに対抗するはり要素と、せん断のみに対抗する板要素によりモデル化を行う。

ここで、 $x=x$ の位置で片持ちはりを切断した図-1.9 に示す断面内の力のつり合いを考える。

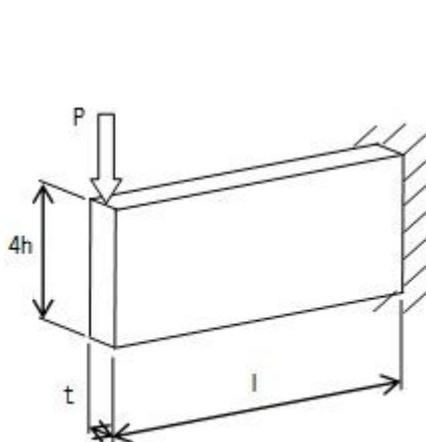


図-1.7 薄板の片持ちはり

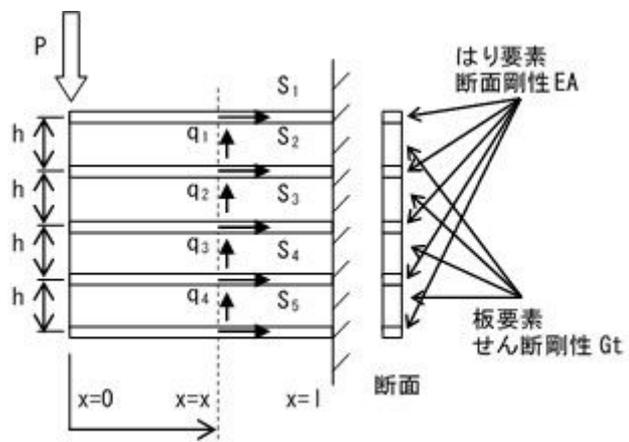


図-1.8 薄板の片持ちはりの解析モデル

上下対称であることから、

$$q_3 = q_2, \quad q_4 = q_1, \quad S_3 = 0, \quad S_4 = -S_2, \quad S_5 = -S_1$$

図-1.9 について上下方向の力のつり合いから、

$$(q_1 + q_2)h = \frac{P}{2} \quad \rightarrow \quad q_2 = \frac{P}{2h} - q_1 \quad (1.1)$$

が導かれる。以降、 q_1 を不静定量として扱う。また、

$$\frac{dS_1}{dx} = q_1, \quad \frac{dS_2}{dx} = q_2 - q_1 \quad (1.2)$$

が導かれる。これらを積分して $x=0$ で $S_1 = S_2 = 0$ の条件より、

$$S_1 = q_1 x, \quad S_2 = \left(\frac{P}{2h} - 2q_1 \right) x \quad (1.3)$$

が得られる。ここで、片持ちはりの上半分についてひずみエネルギーを求める。

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{2EA} \int_0^l (S_1^2 + S_2^2) dx + \frac{hl}{2Gt} (q_1^2 + q_2^2) \\ &= \frac{l^3}{6EA} \left[q_1^2 + \left(\frac{P}{2h} - 2q_1 \right)^2 \right] + \frac{hl}{2Gt} \left[q_1^2 + \left(\frac{P}{2h} - q_1 \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (1.4)$$

$\partial U / \partial q_1 = 0$ の条件より、

$$q_1 = \frac{2 + 3\alpha}{5 + 6\alpha} \frac{P}{2h} \quad (1.5)$$

ここで、

$$\alpha = \frac{EAh}{Gtl^2} \quad (1.6)$$

を得る。これより、

$$q_2 = \frac{3 + 3\alpha}{5 + 6\alpha} \frac{P}{2h}, \quad S_1 = \frac{2 + 3\alpha}{5 + 6\alpha} \frac{Px}{2h}, \quad S_2 = \frac{1}{5 + 6\alpha} \frac{Px}{2h} \quad (1.7)$$

が求められる。

具体の数値として以下を設定すると、

$$E = 2.0 \times 10^5 (\text{N/mm}^2), \quad G = 7.7 \times 10^4 (\text{N/mm}^2), \quad t = 10 (\text{mm}), \quad h = 50 (\text{mm}), \quad A = 400 (\text{mm}^2), \\ l = 1000 (\text{mm}), \quad P = 10000 (\text{N})$$

各要素に作用する断面力は、

$$\alpha = 5.19 \times 10^{-3}, \quad q_1 = 40.1 (\text{N/mm}), \quad q_2 = 59.9 (\text{N/mm}), \quad S_1 = 40.1x (\text{N}), \quad S_2 = 19.9x (\text{N})$$

となる。

以上のように、板要素とはり要素により任意に分割し、板要素に生じたせん断応力と等価な軸応力がはり要素に伝達すると考え、せん断の影響を考慮している。この板要素とはり要

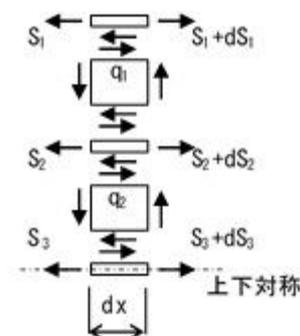


図-1.9 はりの内力分布図

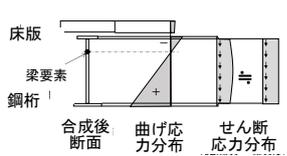
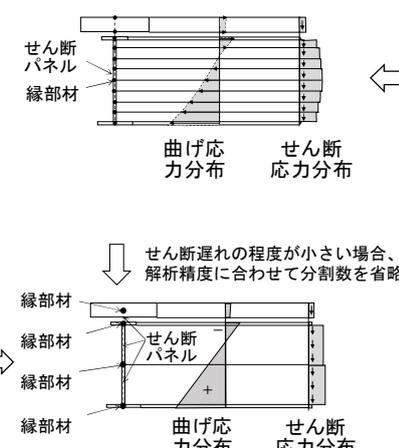
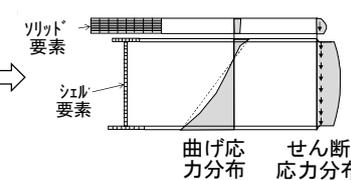
素により構成される要素が一定せん断流パネルである^{1.18)}。

一定せん断流パネルを用いた解析では、部材断面内のせん断遅れなどを表現できることから、要素を詳細に分割することで、応力状態の複雑な部位でも FEM 解析と同等な作用応力の算出が可能である。ただし、その解析モデルの詳細さは面的な要素である鋼板の板組形状が対象であり、FEM 解析においてソリッド要素でモデル化する溶接ビードやスカラップなどの立体的な要素は適用対象外となる。

一方で、解析結果から得られるのは、格子解析と同様に各要素に作用する断面力と節点の変位であることから、応力性状が複雑でない部材単独の応力状態については、公称応力として整理することが可能と考えられる。FEM 解析では、立体的なソリッド要素や面的なシェル要素、あるいははり要素など様々な次元の要素を組み合わせることで解析モデルの作成、および解析が可能であるものの、解析結果から得られるのは各要素に作用する応力と節点の変位であることから、現行の許容値と比較するための公称応力で整理する作業が別途必要となる。部材に関する公称応力の算出が容易かつ確実であることは、一定せん断流パネル解析の特徴のひとつと考えられる。

鋼道路橋における一定せん断流パネル解析による解析モデルと解析の概要について、表-1.1 に示す。

表-1.1 各解析手法の概要

従来設計（格子解析）	一定せん断流パネル解析による設計	FEM解析による設計
<p>1) ベルヌーイ・オイラーの仮定が成り立つはり要素でモデル化する。</p> <p>2) 2次部材はモデル化しない。</p> <p>3) 解析結果の作用力は曲げモーメントやせん断力等の断面力である。</p> <p>4) せん断遅れによるフランジの曲げ応力分布（橋軸直角方向）は、曲げ剛性に対して有効幅を用いて考慮する。</p> <p>5) ただし、隅角部のようなせん断遅れが大きい構造に対しては、解析結果と実際の作用応力の乖離が大きいため、別途検討したり補正したりする必要がある。 例) 奥村・石沢式を用いた隅角部の応力計算^{1.26)}</p>	<p>1) 一般に、せん断応力は一定せん断流パネル、曲げ応力は縁部材の軸力でモデル化する。</p> <p>2) 2次部材もモデル化が可能である。</p> <p>3) 解析結果の作用力は軸力やせん断流等の断面力である。</p> <p>4) 一定せん断流パネルと縁部材を組み合わせた断面の中では、平面保持は成立しない。</p>	<p>1) 一般に、鋼部材の材片をシェル要素で、床版はソリッド要素で、横構のような軸力部材を棒要素でモデル化する。</p> <p>2) 2次部材もモデル化が可能である。</p> <p>3) 解析結果の作用力は分割した要素ごとの各種応力として算出する。直応力やせん断応力のほか、主応力や相当応力としても算出が可能である。</p> <p>4) 部材断面で見た場合、平面保持は成立しない。</p>
		

1.3 本研究の目的

本研究では、従来の格子解析を用いた橋梁設計の各手続きに関する課題、または検討余地を整理し、次にそれらの解決策として一定せん断流パネル解析、またはFEM解析を用いた場合に

おける橋梁設計の各手続きを横並びで整理することで、道路橋の性能評価のための高度な解析を用いた合理的な設計手法を検討することを目的とする。

【1章参考文献】

- 1.1) (公社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2012.3
- 1.2) 小松定夫 編：鋼構造の補剛設計，森北出版，1982.6
- 1.3) 高島春生：道路橋の横分配実用計算法―前編―，理工学書出版現代社，1965.3
- 1.4) 玉越隆史：近年発生した橋梁の重大損傷の概要，道路 Vol.816，pp.28-32，2009.3
- 1.5) 玉越隆史，大久保雅憲，星野誠，横井芳輝，強瀬義輝：道路橋の定期点検に関する参考資料(2013年版)―橋梁損傷事例写真集―，国土技術政策総合研究所資料，第748号，2013.7
- 1.6) たとえば，三木千壽，菅沼久忠，富澤雅幸，町田文孝：鋼床版箱桁橋のデッキプレート近傍に発生した疲労損傷の原因，土木学会論文集 No.780/I-70，pp.57-69，2005.1
- 1.7) (公社) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002.3
- 1.8) 小西拓洋，富澤雅幸，三木千壽：FEMと数値最適化に基づいた鋼橋コスト最小化設計の試み，土木学会論文集 No.717/I-61，pp.23-36，2002.10
- 1.9) 長井正嗣，吉田安晴：合成2主I桁橋の横補剛材をパラメータとした2次応力に関する検討，構造工学論文集 Vol.42A，pp.1061-1072，1996.3
- 1.10) 黒田充紀，長井正嗣，藤野陽三，柄川伸一，川井豊：並列I桁橋の有限要素モデル化に関する検討，構造工学論文集 Vol.42A，pp.1073-1080，1996.3
- 1.11) たとえば，独立行政法人土木研究所：鋼箱形断面圧縮部材の耐荷力に関する検討，土木研究所資料，第4221号，2012.3
- 1.12) 村越潤，高橋実，吉岡勉，野中哲也，加藤修：FEM解析を用いた鋼多主桁橋の設計合理化の検討，鋼構造論文集 Vol.11 No.43，pp.131-145，2004.9
- 1.13) 山口栄輝，山本悟，村越潤，高橋実，山下健二：鋼4主I桁橋の設計計算に関する一考察，構造工学論文集 Vol.52A，pp.893-900，2006.3
- 1.14) 中村聖三，田中寿和，高橋和雄：3D-FEMを用いた単純合成I桁橋の設計方法に関する一検討，鋼構造年次論文報告集 第16巻，pp.131-138，2008.11
- 1.15) 本州四国連絡橋公団：鋼上部構造の設計にFEM解析を適用するためのガイドライン(案)，1993.9
- 1.16) 独立行政法人土木研究所 構造物研究グループ橋梁チーム：鋼桁橋の設計へのFEM解析の適用に関する研究，土木研究所資料，第4047号，2007.4
- 1.17) 土木学会鋼構造委員会：鋼橋設計へのFEMおよび非線形解析の適用に関する改訂小委員会報告書，2012.3
- 1.18) 玉越隆史，中洲啓太，石尾真理，木内耕治：道路橋の鋼製橋脚隅角部の疲労設計法に関する研究―一定せん断流パネルを用いた解析法の検討―，国土技術政策総合研究所資料，第296号，2006.1
- 1.19) 木内耕治，玉越隆史，石尾真理：鋼アーチ橋の疲労設計モデルに関する検討，鋼構造論文集 Vol.15 No.59，pp.1-9，2008.9
- 1.20) 木内耕治，玉越隆史，石尾真理：鋼製橋脚隅角部における一定せん断流パネルを用いた解析法の検討，構造工学論文集 Vol.53A，pp.57-66，2007.3
- 1.21) 大村武馬，下山田孝志，江川定利，玉越隆史：鋼製橋脚隅角部の解析手法の一提案，

構造工学論文集 Vol.51A, pp.23-32, 2005.3

- 1.22) 山本宏, 尾下里治: 連続合成桁中間支点部床版の設計計算における取り扱いに関する検討, 第4回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp.7-12, 1999.11
- 1.23) 明橋克良, 熊谷和人, 尾下里治: 一定せん断流パネルを用いた鋼・コンクリート合成桁の解析方法, 構造工学論文集 Vol.43A, pp.1313-1321, 1997.3
- 1.24) 尾下里治, 江川定利: 鋼床版合形式橋梁の解析方法に関する一提案, 土木学会論文集 No.516/VI-27, pp.197-206, 1995.6
- 1.25) 小林繁夫: 航空機構造力学, 丸善株式会社, 1992.9
- 1.26) 奥村敏恵, 石沢成夫: 薄板構造ラーメン隅角部の応力計算について, 土木学会論文集 第153号, pp.1-18, 1968.5

第2章 解析手法の違いによる設計内容の比較

1.3 節の研究の目的で示したとおり、本章では従来の格子解析を用いた橋梁設計の各手続きに関する課題、または検討余地を整理し、一定せん断流パネル解析、または FEM 解析を用いた場合における橋梁設計の各手続きを横並びで比較する。そのとき、1.1 節で示したように、解析結果として得られる断面力または応力、あるいは変位が鋼道路橋の設計に対してどのような性質であるのかを考察するため、以下の3点に着目して検討する。

- ① 各設計行為で求められる作用応力などについて、通常は、特別な手続きを必要とせずに解析結果から直接得られる。

例として、公称応力が求められる場合に、解析結果から得られる作用断面力を用いて断面計算を行うことで、公称応力としての作用応力を得られる場合などが挙げられる。

- ② 各設計行為で求められる作用応力などについて、理論上、解析結果から直接得ることができずに、別途検討しなければならない。

例として、鉛直荷重を受ける全橋モデルを作成したものの、横力を受ける場合の部材のモデル化を行っていないために、別途計算モデルを検討しなければならない場合などが挙げられる。

- ③ 各設計行為で求められる作用応力などについて、通常は、解析結果から他の内容も混在して得られることが多いために、別途処理しなければならないことがある。しかし、求められる水準で成果を得るための処理方法が確立していないことが多い。

例として、公称応力が求められる場合に、解析結果から2次応力も混在した局所的な作用応力が得られるために、公称応力とするには別途処理をしなければならないものの、処理を行う要素範囲や処理方法が確立しておらず、個別に検討しなければならない場合などが挙げられる。

橋梁設計における手続きとして、本検討では鋼上部構造の部材の設計における代表的な項目を抽出した。従来の格子解析、一定せん断流パネル解析、FEM 解析のそれぞれを主体とした場合の橋梁設計の手続きにおいて、それぞれの解析の特徴を踏まえた最も合理的な設計フローは異なる場合がある。例えば、格子解析を主体とした場合は、格子解析を行った後に主桁断面を決めてから中間補剛材の配置を設計するが、FEM 解析の場合は、解析モデルに中間補剛材を含めて主桁の要素分割にも反映することから、最初の解析モデル作成時には中間補剛材の配置を決めておくことが考えられる。ただし、解析手法ごとの最も合理的な設計フローはそもそも確立されていないことから、従来の格子解析による設計フローを基本として、各解析手法を用いた橋梁設計の手続きを比較する。なお、一定せん断流パネル解析または FEM 解析を主体とした橋梁設計を行う場合、照査内容が共通でも各解析手法における各手続き内の作業手順等が異なる場合がある。その場合は、照査内容ごとに各解析手法の設計フローを示し、作業手順の違いがわかるようにした。

対象とする橋梁形式は、鋼橋で実績が多く一般的な橋梁形式と考えられる連続合成 I 桁橋、および立体ラーメン橋の2形式とする。従来形式の多主 I 桁橋と少数2主 I 桁橋は共通事項が多いことから、連続合成板桁橋にまとめた。立体ラーメン橋は、鋼床版箱桁橋と門型ラーメン鋼製橋脚の剛構造を想定し、両形式を含むものとした。さらに、従来の格子解析では局所的な応力性状の把握ができないと考えられる構造として、以下の照査項目も検討対象とした。

- ・ 曲線少数 I 桁橋：主桁フランジの曲率による2次応力度

- ・ 曲線細幅箱桁橋：主桁フランジの曲率と断面変形による 2 次応力度
中間ダイアフラムのせん断応力度
- ・ 方杖ラーメン橋：隅角部の作用応力度
- ・ 単弦ローゼ橋：アーチリブと補剛桁間の隅角部における作用応力度

なお、現行（2012）の道路橋示方書²⁾¹⁾（以下、「道示」という）に許容値が規定されている場合は、道示の中の対象となる章番号や節番号を記載した。

比較表の形式および凡例は以下のとおりである。

【比較表の形式】

表が大きく 1 ページに収まらない場合、下記の[表示方法 1]全体のほか、[表示方法 2]部分のように、表を分割して表示する。

[表示方法 1] 全体

[表示方法 2-1] 部分		[表示方法 2-2] 部分		
設計行為		設計手法		
設計 フロー	項目	従来設計 (格子解析)	せん断パネル解析 による設計	FEM解析 による設計
主桁などの対象 部材の設計行為 をフローで示す	設計フローの 中の具体の項 目を示す。	左記の項目ごとに、 従来設計で行う作業 を示す。	左記の項目ごとに、 せん断パネル解析に よる設計で行う作業 を示す。	左記の項目ごとに、 FEM 解析による設計 で行う作業を示す。

注 1) 比較表の中の文章に関する凡例

ゴシック：上記検討項目①～③

斜体文字：道示に規定値がない照査項目

注 2) 以下、表中のみスペースに配慮して一定せん断流パネルをせん断パネルと省略して示す。

注 3) 表中の挿入図は一例を示すものであり、計算例によっては節で示した橋梁形式と異なる場合がある。その場合、計算例で示した橋梁形式などを図の名称と合わせて記載する。

例) 節は 2.2 立体ラーメン橋であるものの、図は鋼床版箱桁の場合など。

図の名称に、(鋼床版箱桁の例) と記載する。

2.1 連続合成 I 桁橋

2.1.1 全体フロー

連続合成 I 桁橋に関する従来の格子解析を用いた設計フローを図-2.1.1 に示す。概略設計において主桁本数，主桁間隔，および主桁高さが決まったものと仮定して，本検討では省略するが，まずは床版におけるコンクリート強度，および配筋を設計する。次に，格子解析モデルを作成する。その後，解析結果を用いて主桁の設計を行い，合成桁であることから床版に対して主桁作用と床版作用の重ね合わせの照査を行う。床版による主桁間の荷重分配作用を考慮する場合は，荷重分配作用と床版作用との重ね合わせの照査を行う。さらに，横桁，端横桁，中間対傾構，横構の設計を行い，たわみの照査を行う。

以下，この設計フローに示した順序で橋梁設計の手続きの比較を行う。

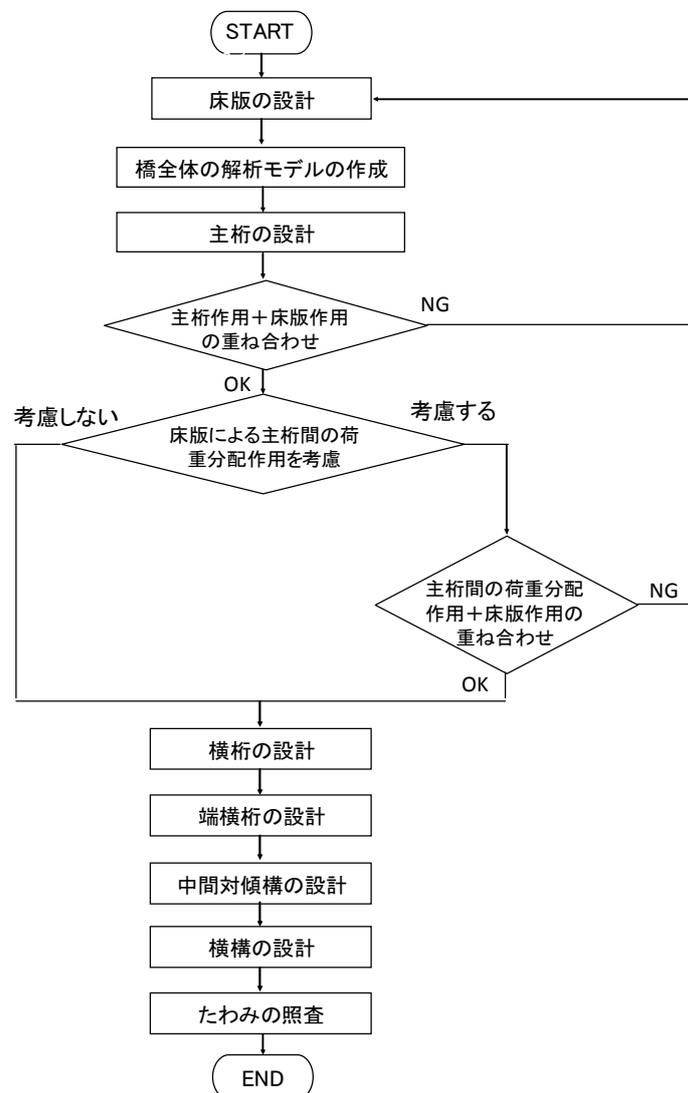


図-2.1.1 連続合成 I 桁橋の設計フロー

2.1.2 主桁

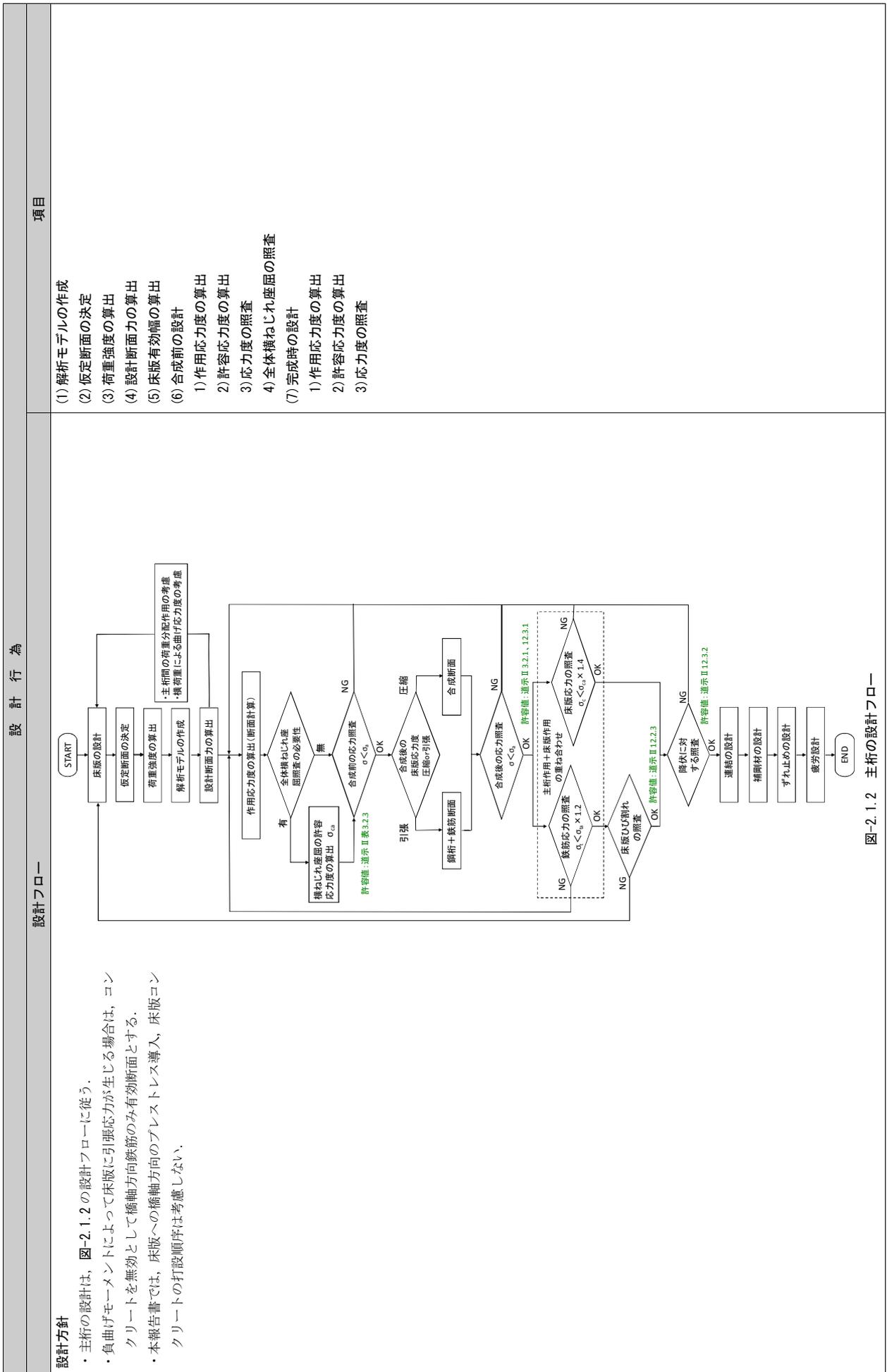
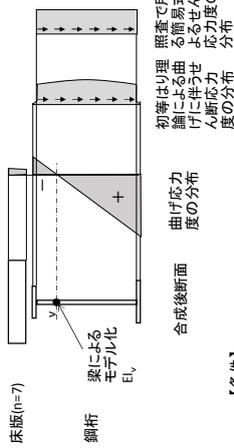


図-2.1.2 主桁の設計フロー

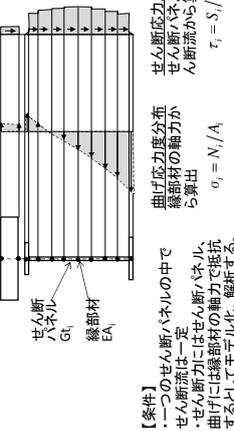
設計行為項目	従来設計(格子解析)	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
<p>(1) 解析モデルの作成と解析の実施</p> <p>(2) 解析に関する構造的理論、および特徴</p>	<p>1) 主桁と荷重分配横桁とからなる 2 次部材を含まない平面格子骨組モデルを作成する。</p> <p>2) 合成前と合成後とで主桁剛度を変える。</p> <p>3) 合成前と合成後のそれぞれにおける解析モデルに対して荷重を載荷し、各部材をモデル化したはり要素の作用断面力、および節点の変位を算出する。</p> <p>②横荷重に対しては、別途力学モデルを設定して解析しなければならない。</p>	<p>1) 主桁、床版、横桁、対傾構、横構など全ての構成部材をせん断パネルと骨組部材とで立体的にモデル化した全橋モデルを作成する。</p> <p>2) 合成前は鋼部材のみ、合成後は床版を付加した解析モデルとする。</p> <p>3) 合成前と合成後のそれぞれにおける解析モデルに対して荷重を載荷し、各板組形状をモデル化した縁要素や一定せん断流パネル要素の作用断面力、および節点の変位を算出する。</p> <p>①横荷重に対しても、鉛直荷重と同じ全橋モデルを用いて解析する。</p>	<p>1) 主桁、床版、横桁、対傾構、横構など全ての構成部材をシェル要素、ソリッド要素、棒要素とで立体的にモデル化した全橋モデルを作成する。</p> <p>2) 合成前は鋼部材のみ、合成後は床版を付加した解析モデルとする。</p> <p>3) 合成前と合成後のそれぞれにおける解析モデルに対して荷重を載荷し、各板組形状をモデル化したシェル要素やソリッド要素の作用応力度、および節点の変位を算出する。</p> <p>①横荷重に対しても、鉛直荷重と同じ全橋モデルを用いて解析する。</p>
<p>(2) 解析に関する構造的理論、および特徴</p>	<p>1) 平面保持が成り立つと仮定したはり要素を用いた変位法による解析を行う。</p> <p>2) 各要素の作用力は、曲げモーメントやせん断力などの断面力である。</p> <p>3) 支持条件を、節点に各変位の境界条件として(固定、自由)として設定する。</p> <p>4) せん断応力度分布は、初等はり理論による分布を簡易式(道示 II 11.2.2 式)で照査してよい。</p> <p>5) せん断遅れによるフランジの曲げ応力分布は、曲げ剛性に対して有効幅を用いて考慮する。</p> <p>6) 算出した作用断面力を用いて、許容応力度と対比が可能な公称応力としての作用応力度を算出する。</p> <p>②隅角部のようなせん断遅れが大きい構造に対しては、解析結果と実際の作用応力の乖離が大きいために、別途検討したり補正したりしなければならない。</p> <p>例) 奥村・石沢式を用いた隅角部の応力計算^{2.2)}</p>	<p>1) せん断応力はせん断パネル、曲げ応力は縁部材の軸力でモデル化・解析を行う。</p> <p>2) 各要素の作用力は、軸力やせん断流などの断面力である。</p> <p>3) せん断パネルと縁部材を組み合わせた断面の中では、平面保持は成立しない。</p> <p>4) ただし、せん断遅れが大きくなり、せん断剛性がある程度確保される構造では、応力分布は平面保持を仮定した断面と大きく変わらない結果になる。</p> <p>5) 支持条件を、節点に各変位の境界条件として(固定、自由)として設定する。</p> <p>6) 算出した作用断面力を用いて、許容応力度と対比が可能な公称応力としての作用応力度を算出する。</p> <p>①せん断遅れ等の解析結果について、公称応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p>	<p>1) 鋼板で構成される鋼部材の板組形状をシェル要素で、厚みがある版としての床版はソリッド要素で、主に軸力部材として挙動する横構のような部材を棒要素で、それぞれモデル化して解析を行う。</p> <p>2) 各要素の作用力は応力であり、主応力(最大、最小)や Von-Mises 等価応力の算出が可能である。</p> <p>3) 部材断面で見えた場合、平面保持は成立しない。</p> <p>4) 支持条件を、節点に各変位の境界条件として(固定、自由)として設定する。ただし、支点は点ではなく、支承の面積を考慮してモデル化処理を行う必要がある。</p> <p>5) 算出した作用応力度に処理を行って、許容応力度と対比が可能な公称応力としての作用応力度を求める。</p> <p>③-1 各要素に対して得られる作用応力は、通常は、2 次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。また、公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある。</p> <p>③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、初期不整(初期たわみ、残留応力)、幾何学的非線形、材料的非線形を考慮する必要がある。特に、初期不整については、各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない。</p> <p>③-3 全橋モデルを用いた FEM 解析から全ての部材・部位の設計を行う場合、連結部や補剛材など従来の骨組解析ではモデル化していない部材・部位のモデル化および照査方法を新たに確立する必要がある。</p>



【条件】
 ・リブス、アイバーの平面
 保持の仮定が成り立つ

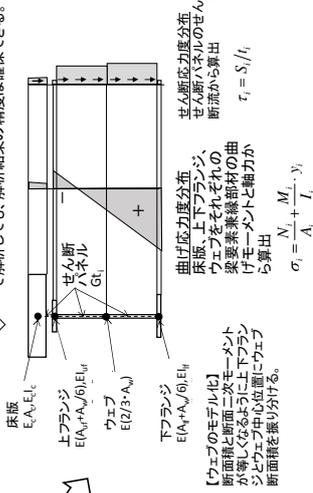
図-2.1.3A 初等はり理論による応力分布

⇒
 初等はり理論による応力分布



【条件】
 ・一つのせん断パネルの中で
 せん断力は一定
 ・せん断力にはせん断パネル、
 縁部材の軸力抵抗を
 考慮してモデル化、解析する。

⇒
 同じ精度の
 解析結果を
 得ることができる



【ウェブのモデル化】
 断面積と断面二次モーメント
 が等しくなるように上下フラン
 ジとウェブの中心位置にウェブ
 断面積を振り分ける。

$$\sigma_x = \frac{N}{A_x} + \frac{M_y}{I_y} \cdot y_x$$

図-2.1.3B せん断パネル解析における応力分布

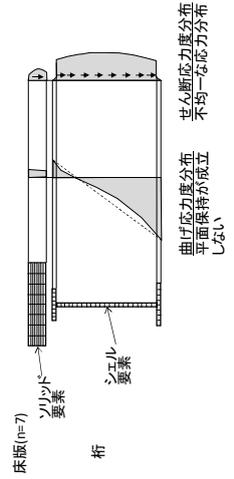


図-2.1.3C FEM 解析における応力分布

設計行為項目	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
3) 解析モデルの特徴	<p>従来設計（格子解析）</p> <ul style="list-style-type: none"> 平面格子桁であることから、断面剛度は断面 2 次元モデルのみとする。 床版について、活荷重に対する荷重分配作用、横荷重への抵抗部材などを考慮する場合、主桁や横桁と分離した床版の剛性を考慮したモデル化をしなければならぬ。平面格子モデルでは床版を分離したモデル化を行わず、通常は、別途計算モデルを作成する。 	<p>せん断パネル解析による設計</p> <p>①-1 主桁、横桁以外に床版、対傾構、横構、補剛材などをそれぞれ単独でモデル化し、全橋モデルに含めることができる。</p> <p>①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため、主桁、横桁以外の部材を独立してモデル化し、各部材の剛性を考慮することができる。</p> <p>①-3 各部材の要素から、各部材の作用断面積を求めることができる。</p> <p>①-4 床版による主桁間の荷重分配作用を考慮した設計を行う場合、同じ全橋モデルで床版の剛性を考慮することで解析が可能である。</p> <p>①-5 せん断遅れ等の解析結果について、公称応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p> <p>要素分割の例を以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> 主桁と横桁は、フランジとウェブをそれぞれ一つのはり要素に置き換え、それらをせん断パネルで繋ぎ合わせてモデル化する。 床版はせん断遅れの影響を考慮するために主桁間を 4 等分程度に分割する。 橋軸方向には横桁間を 4 等分程度で要素分割する。 	<p>FEM解析による設計</p> <p>①-1 主桁、横桁以外に床版、対傾構、横構、補剛材など 2 次部材までをそれぞれ単独でモデル化し、全橋モデルに含めることができる。</p> <p>①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため、主桁、横桁以外の部材を独立してモデル化し、各部材の剛性を考慮することができる。</p> <p>①-3 各部材の要素から、各部材の作用断面積を求めることができる。</p> <p>①-4 床版による主桁間の荷重分配作用を考慮した設計を行う場合、同じ全橋モデルで床版の剛性を考慮することで解析が可能である。</p> <p>①-5 せん断遅れ等の解析結果について、実態と整合した精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p> <p>③ 各要素に対して得られる作用断面積は 2 次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。また、公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある。</p> <p>モデル化に用いる要素の例を以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> 主桁と横桁はシェル要素、床版はソリッド要素あるいはシェル要素、対傾構と横構は棒要素でモデル化する。 支点上補剛材、垂直補剛材、水平補剛材などもシェル要素で忠実にモデル化される場合が多い。

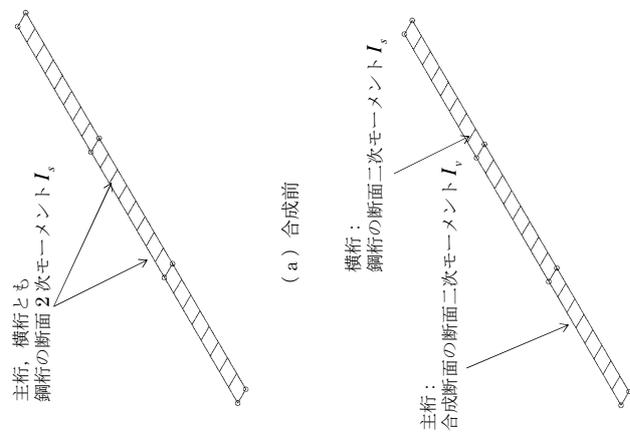


図-2.1.4A 平面格子骨組モデル
(b) 合成後

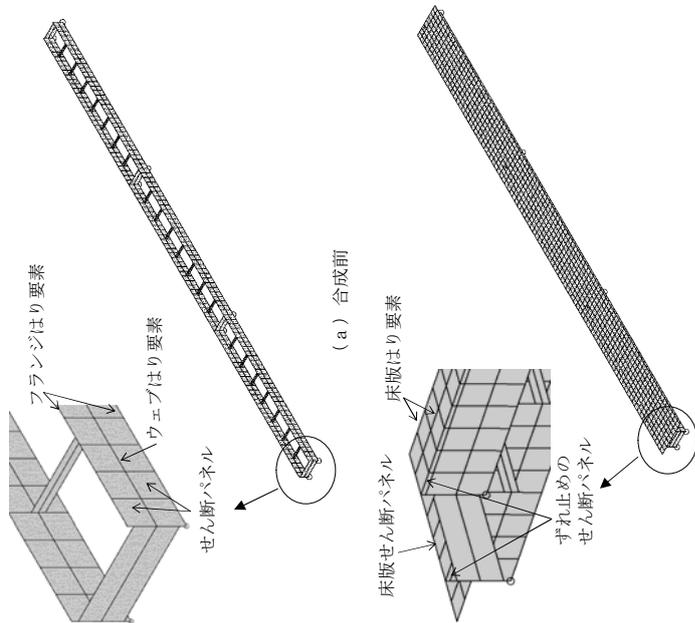


図-2.1.4B せん断パネル解析モデル
(b) 合成後

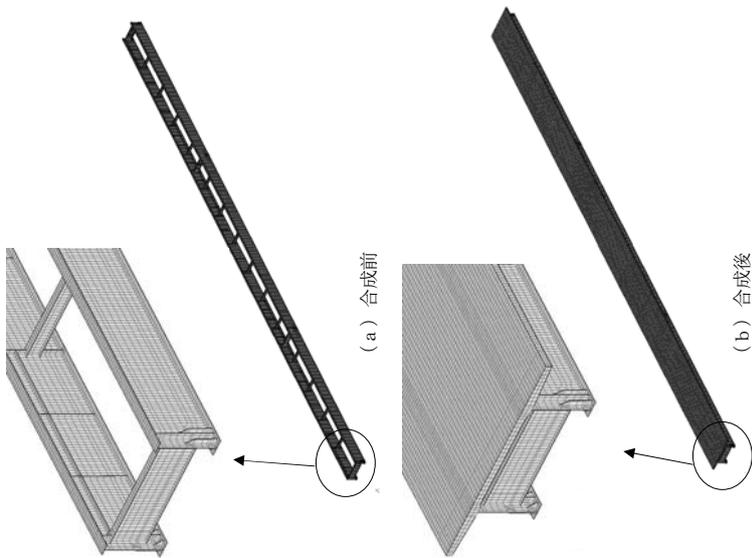


図-2.1.4C FEM解析モデル

設計行為項目	設計手法	
	従来設計 (格子解析)	FEM解析による設計
解析結果を用いて設計できる項目	<p>①せん断パネルモデルによる解析結果から、主桁と分配横桁までの部材の設計ができる。</p> <p>②その他の中間横桁、端横桁、中間対傾構、横構の設計には、別途、個別に力学モデルを設定しなければならない。</p>	<p>①FEMモデルによる解析結果によって、主桁から横構までの部材の設計がひとつの解析モデルからの解析結果を用いて行うことができる。</p>

表-2.1.1 各設計手法における解析結果を用いて設計できる項目

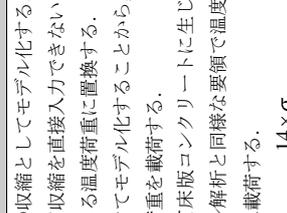
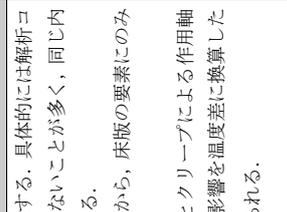
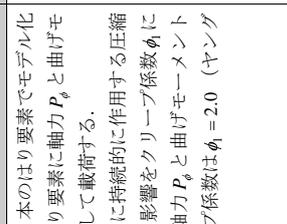
設計項目	せん断パネル解析		FEM解析
	従来設計 (格子解析)	せん断パネル解析	
断面設計	○	○	△
	×	○	△
主桁	○	○	△
	○	○	△
分配横桁	○	○	△
	○	○	△
中間横桁 (少数主桁)	×	○	△
	×	○	△
端横桁	×	○	△
	×	○	△
中間対傾構	×	○	△
	×	○	△
横構	×	○	△
	○	△	△
活荷重たわみと製作キャンパ―	○	△	△
支那他付属物の設計	×	×	×

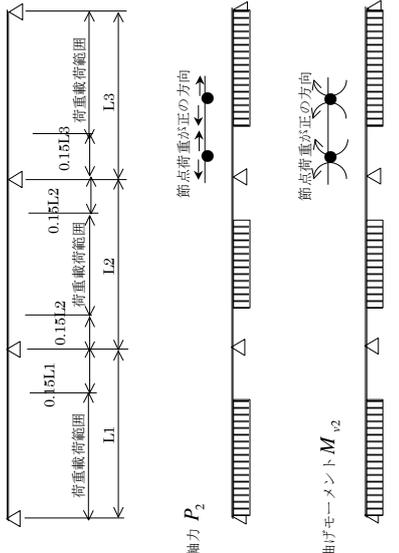
○：ひとつの橋全体モデルの解析結果を直接使い、許容値で設計が可能。

△：ひとつの橋全体モデルの解析結果を用いることができず、別途、解析モデル、力学モデル、または照査式を用いる。

△：ひとつの橋全体モデルの解析結果を用いることができるものの、直接は用いることができず、後処理が必要。または、許容値の設定が必要。

設計行為項目	従来設計 (格子解析)	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
(2) 仮定断面の決定	<p>1) 仮定断面を決めて、解析モデルにおける各要素の仮定剛度を設定する。</p> <p>2) 仮定剛度は、曲げ剛性 EI, ねじり剛性 GJ, 軸力剛性 EA などである。</p> <p>3) 合成前と合成後の各有効断面に対して断面剛性を仮定する。</p> <div data-bbox="414 1478 526 1747"> <p>図-2.1.5A 主桁の仮定剛度</p> </div> <p>(a) 合成前 (b) 合成後</p>	<p>1) 仮定断面を決めて、解析モデルにおける各要素の仮定剛度を設定する。</p> <p>2) 仮定剛度は、縁部材は軸力剛性 EA, 曲げ剛性 EI, ねじり剛性 GJ, せん断パネルはせん断剛性 Gt などである。</p> <p>(a) 合成前</p> <ul style="list-style-type: none"> 鋼桁の桁高さ H と、フランジとウェブの仮定した板幅と板厚から各板要素の断面定数 (A, J, I_x, I_y) を仮定する。 <div data-bbox="542 761 734 1276"> <p>図-2.1.5B 鋼桁の桁高さ H の設定方法</p> </div>	<p>1) 仮定断面を決めて、解析モデルにおける各要素の仮定剛度を設定する。</p> <p>2) 仮定剛度は、シェル要素は板厚 t, ソリッド要素はヤング率 E, 棒要素は軸力剛性 EA などである。</p> <p>(a) 合成前</p> <ul style="list-style-type: none"> 鋼桁を構成する全ての板要素の板幅と板厚を仮定したシェル要素として要素分割する。 主桁, 横桁の主要部材 支点上補剛材, 垂直補剛材, 水平補剛材 ソールプレートなど 対傾構, 横溝などの軸力部材は, 断面積を仮定する。 <div data-bbox="622 268 893 582"> </div>
	<p>4) 支点上補剛材や横桁取付部の垂直補剛材等の板組形状は、格子解析の中ではモデル化できない。</p> <p>これらの板組形状については、主桁等の各部材に対する解析モデルで出力される作用断面力を用いて別途、断面計算を行う。</p>	<p>図-2.1.6B 鋼桁の桁高さ H の設定方法</p> <ul style="list-style-type: none"> 支点上補剛材と横桁取付部の垂直補剛材は、主桁ウェブの有効断面を含めた柱断面を想定して、断面定数 (A, J, I_x, I_y) を仮定する。 <div data-bbox="909 873 1037 1164"> </div>	<p>図-2.1.5C シェル要素による鋼桁の要素分割の例</p> <p>(b) 合成後</p> <ul style="list-style-type: none"> 床版の厚さを設定してシェル要素あるいはソリッド要素として要素分割する。 <div data-bbox="1053 224 1388 649"> </div>
	<p>5) 対傾構, 横溝を鉛直荷重に対する主構造の一部とみなさない場合は、格子解析の中でモデル化しない。</p>	<p>図-2.1.7B 荷重集中点の有効断面の例^{2.1)}</p> <ul style="list-style-type: none"> 対傾構, 横溝などの軸力部材は、軸力剛性 EA を仮定する。 <p>(b) 合成後</p> <ul style="list-style-type: none"> 床版を分割したはり要素の断面定数 (A, J, I_x, I_y) を設定する。 <div data-bbox="1212 918 1372 1164"> <p>図-2.1.8B 床版分担幅のはり要素の断面定数</p> </div>	<p>図-2.1.6C ソリッド要素による床版の要素分割の例</p>

設計行為項目	従来設計 (格子解析)	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
5) クリープ	<p>1) 床版と鋼桁を一体化した合成断面を 1 本のはり要素でモデル化することから、主桁をモデル化したはり要素に軸力 P_ϕ と曲げモーメント M_ϕ をクリープによる荷重として載荷する。</p> <p>2) 後死荷重などにより床版コンクリートに持続的に作用する圧縮力 N_c に対して、塑性ひずみが増加する影響をクリープ係数 ϕ_1 により評価して、合成断面に作用する軸力 P_ϕ と曲げモーメント M_ϕ を次式で求める。この時、クリープ係数は $\phi_1 = 2.0$ (ヤング係数比は $n=14$) とする。</p> $P_\phi = N_c \cdot \frac{2 + \phi_1}{2 + \phi_1}$ $M_\phi = P_\phi \cdot d_{vc}$ <p>ここに、N_c : 床版に作用する圧縮力の合計 d_{vc} : 合成断面中立軸から床版中心までの距離</p> <p>3) 後死荷重による曲げモーメントが正となる範囲の主桁部材に軸方向荷重 P_ϕ とモーメント荷重 M_ϕ を載荷して不静定断面力を算出する。</p>	<p>1) クリープを床版の収縮としてモデル化する。具体的には解析ロードの機能として収縮を直接入力できないことが多く、同じ内力として載荷できる温度荷重に置換する。</p> <p>2) 床版と鋼桁を分けてモデル化することから、床版の要素にのみクリープによる荷重を載荷する。</p> <p>3) 床版と鋼桁との温度差による軸力 P_1 とクリープによる作用軸力 P_ϕ とを等しいとすると、クリープの影響を温度差に換算した場合の温度荷重 ΔT が次のように求められる。</p> $P_1 = \frac{E_s \cdot \epsilon_i \cdot A_c}{n_1} = \frac{E_s \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot A_c}{n_1} = P_\phi = N_c$ $\Delta T = \frac{n_1 \cdot N_c}{E_s \cdot \alpha \cdot A_c} = \frac{14 \times N_c}{2 \times 10^8 \times 12 \times 10^{-6} \times A_c} = 0.005833 \times \frac{N_c}{A_c}$ <p>ここに、$n_1 = n(1 + \phi_1/2) = 7 \times (1 + 2/2) = 14$ E_s : 鋼のヤング係数 α : 鋼の線膨張係数 A_c : 床版コンクリートの断面積</p>	<p>1) クリープを床版の収縮としてモデル化する。具体的には解析ロードの機能として収縮を直接入力できないことが多く、同じ内力として載荷できる温度荷重に置換する。</p> <p>2) 床版と鋼桁を分けてモデル化することから、床版の要素にのみクリープによる荷重を載荷する。</p> <p>3) 後死荷重によって床版コンクリートに生じる圧縮応力度 σ_{ci} から、せん断パネル解析と同様な要領で温度荷重 ΔT_i を求めて床版コンクリートに載荷する。</p> $\Delta T_i = \frac{n_{li} \cdot \sigma_{ci}}{E_s \cdot \alpha} = \frac{14 \times \sigma_{ci}}{2 \times 10^8 \times 12 \times 10^{-6}} = 0.005833 \times \sigma_{ci}$
	<p>図 2-1.10A クリープの荷重載荷範囲の例</p> 	<p>図 2-1.10B クリープの荷重載荷範囲の例</p> 	<p>図 2-1.10C クリープの荷重載荷対象部材の例</p> 
	<p>図 2-1.11B クリープの荷重載荷対象部材の例</p> <p>② クリープ現象による床版コンクリート部材長縮小の影響を床版の要素に、構造的に等価な温度荷重として載荷する。</p>	<p>図 2-1.11C クリープの荷重載荷対象部材の例</p> <p>② クリープ現象による床版コンクリート部材長縮小の影響を床版の要素に、構造的に等価な温度荷重として載荷する。</p>	<p>図 2-1.11D クリープの荷重載荷対象部材の例</p> <p>② クリープ現象による床版コンクリート部材長縮小の影響を床版の要素に、構造的に等価な温度荷重として載荷する。</p>

設計行為項目	従来設計（格子解析）	設計手法	FEM解析による設計
6) 乾燥収縮	<p>1) 床版と鋼桁を一体化した合成断面を1本のはり要素でモデル化することから、主桁をモデル化したはり要素に軸力P_2と曲げモーメントM_{v2}を乾燥収縮による荷重として載荷する。</p> <p>2) 床版コンクリートの最終収縮度を$\epsilon_s = 20 \times 10^{-5}$として、すると次式で求める。この時、クリープ係数は$\phi_2 = 4.0$（ヤング係数比は$n=21$）とする。</p> $P_2 = E_{c2} \cdot \epsilon_s \cdot A_c$ $M_{v2} = P_2 \cdot d_{vc2}$ <p>ここに、A_c：コンクリート床版断面積 d_{vc2}：合成断面中立軸から床版中心までの距離 $E_{c2} = E_s / 21$</p> <p>3) 乾燥収縮の影響を考慮する範囲は、中間支点付近の負の曲げモーメントが発生する範囲を除いた区間とする。（下図は負の曲げモーメント範囲を$0.15L$と仮定した例）</p>	<p>せん断パネル解析による設計</p> <p>1) 乾燥収縮を床版の収縮としてモデル化する。具体的には解析コードの機能として収縮を直接入力できないことが多く、同じ内力として載荷できる温度荷重に置換する。</p> <p>2) 床版と鋼桁を分けてモデル化することから、床版の要素にのみ乾燥収縮による荷重を載荷する。</p> <p>3) 床版コンクリートの最終収縮度を$\epsilon_s = 20 \times 10^{-5}$とすると、温度差によるひずみ</p> $\epsilon_r = \alpha \cdot \Delta T = 12 \times 10^{-6} \times \Delta T$ <p>との関係から、乾燥収縮を温度差に換算した場合の載荷温度ΔTは、次のようになる。</p> $\epsilon_s = \epsilon_r$ $\Delta T = \frac{20 \times 10^{-5}}{12 \times 10^{-6}} = 16.7^\circ\text{C}$ <p>4) 載荷範囲は、クリープと同様に後死荷重による曲げモーメントが正となる範囲とする。</p> <p>②乾燥収縮現象による床版コンクリート部材長縮小の影響を床版の要素に、構造力学的に等価な温度荷重として載荷する。</p>	<p>1) 乾燥収縮を床版の収縮としてモデル化する。具体的には解析コードの機能として収縮を直接入力できないことが多く、同じ内力として載荷できる温度荷重に置換する。</p> <p>2) 床版と鋼桁を分けてモデル化することから、床版の要素にのみ乾燥収縮による荷重を載荷する。</p> <p>3) せん断パネル解析と同様の要領で乾燥収縮の影響を温度差（16.7°C）に換算して、床版要素に載荷する。</p> <p>4) 載荷範囲は、クリープと同様に後死荷重による曲げモーメントが正となる範囲とする。</p> <p>②乾燥収縮現象による床版コンクリート部材長縮小の影響を床版の要素に、構造力学的に等価な温度荷重として載荷する。</p>
	 <p>軸力P_2</p> <p>曲げモーメントM_{v2}</p>	<p>4) 載荷範囲は、クリープと同様に後死荷重による曲げモーメントが正となる範囲とする。</p> <p>②乾燥収縮現象による床版コンクリート部材長縮小の影響を床版の要素に、構造力学的に等価な温度荷重として載荷する。</p>	
	<p>図-2.1.12A 乾燥収縮の荷重範囲の例</p> <p>②実態は床版コンクリートに生じる乾燥収縮現象であるものの、格子解析では床版と鋼桁を一体化した合成断面をモデル化したはり要素で構成し、乾燥収縮の影響を合成断面はりに対して構造力学的に等価な不静定曲げモーメントに置換して載荷する。</p>		

設計行為項目	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
7) 温度差	<p>1) 床版と鋼桁を一体化した合成断面を1本のはり要素でモデル化することから、主桁をモデル化したはり要素に軸力P_1と曲げモーメントM_1を温度差による荷重として載荷する。</p> <p>2) 床版コンクリートと鋼桁との温度差Δtを± 10度として、合成断面に作用する軸力P_1と曲げモーメントM_1を次式で求める。</p> $P_1 = \frac{E_s \times \varepsilon_t \times A_s}{n}$ $M_1 = P_1 \cdot d_{ec}$ <p>ここに、A_s：コンクリート床版断面積 ε_t：温度差によるひずみ（$=\alpha \times \Delta t$） α：コンクリートの線膨張係数（$=12 \times 10^{-6}$） d_{ec}：合成断面中立軸から床版中心までの距離 E_s：鋼のヤング係数 n：ヤング係数比（$=7$）</p> <p>3) 床版コンクリートが引張応力状態となる領域においては、ひび割れが発生する可能性があることから、温度差による応力は発生しないと見なし、残りの範囲に軸方向荷重P_1とモーメント荷重M_1を載荷して不静定断面力を算出する。</p>	<p>1) 温度差を床版の温度荷重として載荷する。</p> <p>2) 床版と鋼桁を分けてモデル化することから、床版の要素にのみ温度差による荷重を載荷する。</p> <p>3) 床版コンクリートと鋼桁との温度差Δtを± 10度として直接載荷する。</p> <p>4) 載荷範囲は、床版コンクリートが引張応力状態となる領域において、ひび割れが発生する可能性があることから、温度差による応力は発生しないと見なし、残りの範囲を載荷範囲とする。</p> <p>② 床版コンクリートと鋼桁間に生じる温度差現象による床版コンクリート部材の伸縮の影響を床版の要素に、構造的に等価な温度荷重として載荷する。</p>	<p>1) 同左。</p> <p>2) 同左。</p> <p>3) せん断パネル解析と同様の要領で乾燥収縮の影響を温度差（16.7°C）に換算して、床版要素に載荷する。</p> <p>4) 同左。</p> <p>② 床版コンクリートと鋼桁間に生じる温度差現象による床版コンクリート部材の伸縮の影響を床版の要素に、構造的に等価な温度荷重として載荷する。</p>

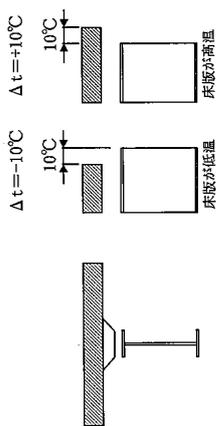
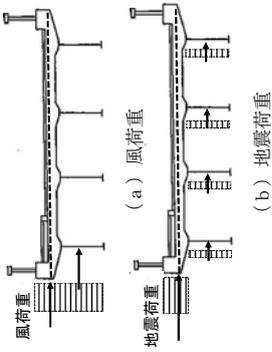
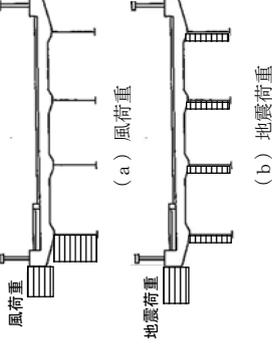


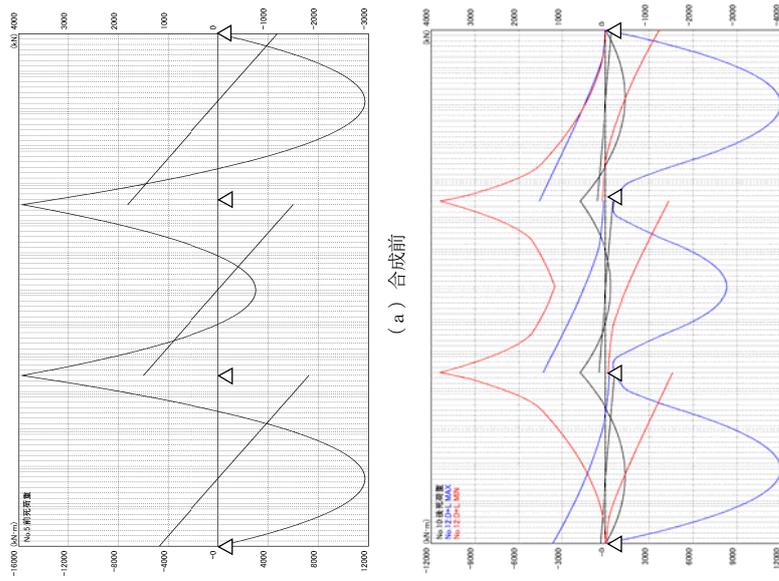
図-2.1.13A 温度差の概念図

② 実態は床版コンクリートと鋼桁間に生じる温度差により両者にひび割れが生じる現象であるものの、格子解析では床版と鋼桁を一体化した合成断面をモデル化したはり要素で構成し、温度差の影響を合成断面はりに対して構造的に等価な不静定曲げモーメントに置換して載荷する。

設計行為		設計手法	
項目	従来設計(格子解析)	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
8) 風荷重	1) 主荷重に対する解析で用いた解析モデルとは別に、中間横桁、中間対傾構、横構それぞれ別の部材に個別の力学モデルを設定する。	1) 主荷重に対する解析と同じ全橋モデルに横荷重を直接載荷する。	1) 主荷重に対する解析と同じ全橋モデルに横荷重を直接載荷する。
9) 地震荷重	2) 各力学モデルに横荷重を直接載荷する。 ②-1 上部構造全体で横力に抵抗する力学モデルが必要であるものの、通常は、格子解析モデルには載荷しないことから、横力への抵抗部材である中間横桁、中間対傾構、横構のそれぞれについて、個別の力学モデルを設定しなければならない。 ②-2 全橋モデルにおいて、高さ方向に形成される中間対傾構や主桁の重心と異なる高さに設置される横構を別途モデル化しなければならない。	2) 載荷方法は、床版および主桁のはり要素に、風荷重と地震荷重をそれぞれ分担する線荷重に置換えて載荷することとする。	2) 載荷方法は、床版および主桁の各要素に、風荷重と地震荷重をそれぞれ分担する面荷重に置換えて載荷することとする。
		 <p>図-2.1.14B 横荷重の載荷方法 (図は4主1桁の例)</p>	 <p>図-2.1.14C 横荷重の載荷方法 (図は4主1桁の例)</p>
		<p>①-1 上部構造全体で横力に抵抗する力学モデルが必要であり、主荷重に対する解析と同じ全橋モデルを用いることができる。 (主桁、横桁以外に床版、横構、補剛材など2次部材までをそれぞれ単独でモデル化し、全橋モデルに含める)</p> <p>①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため、横力に抵抗する部材である対傾構や横構および床版をモデル化することができる。</p>	<p>①-1 上部構造全体で横力に抵抗する力学モデルが必要であり、主荷重に対する解析と同じ全橋モデルを用いることができる。 (主桁、横桁以外に床版、横構、補剛材など2次部材までをそれぞれ単独でモデル化し、全橋モデルに含める)</p> <p>①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため、横力に抵抗する部材である対傾構や横構および床版をモデル化することができる。</p>

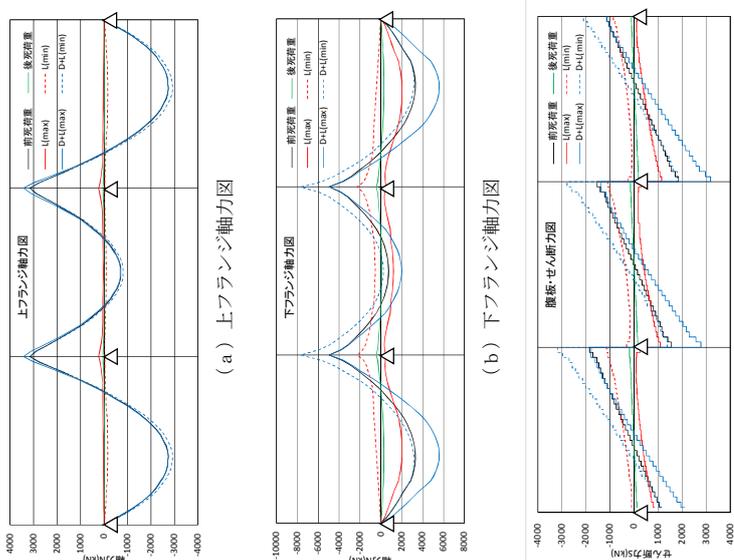
設計行為項目	従来設計 (格子解析)	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
(4) 設計断面力の算出	<p>1) 合成前と合成後の各要素における曲げモーメントやせん断力などの作用断面力を算出、整理する。</p> <p>2) 合成前は鋼桁、合成後は合成断面としての作用断面力を整理する。</p>	<p>1) 合成前と合成後の各要素における軸力、曲げモーメント、せん断力などの作用断面力を算出、整理する。</p> <p>2) 合成前は鋼桁、合成後は鋼桁のほかに床版の作用断面力をそれぞれ整理する。</p>	<p>1) 合成前と合成後の各要素における作用応力を直接算出、整理する。</p> <p>2) 合成前は鋼桁、合成後は鋼桁のほかに床版の作用断面力をそれぞれ整理する。</p> <p>3) フランジ、ウェブなどの材片ごとに各要素の作用応力を処理して公称応力に置換する。</p>
	<p>図-2.1.15A 断面力と応力度算出フロー</p> <p>ここで、M_s, Q_s : 合成前の曲げモーメント、せん断力 M_v, Q_v : 合成後の曲げモーメント、せん断力 $\sigma_{sm}, \sigma_{sl}, \tau_{sw}$: 合成前の上下フランジ応力度とウェブせん断応力度 $\sigma_{vc}, \sigma_{vl}, \sigma_{vm}, \sigma_{vl}, \tau_{sv}$: 合成後の床版、上下フランジ応力度とウェブせん断応力度</p>	<p>図-2.1.15B 断面力と応力度算出フロー</p> <p>ここで、N_{fm}, N_{fm}, Q_w : 合成前の上下フランジ軸力とウェブせん断力 $N_{cs}, N_{fm}, N_{fm}, Q_w$: 合成後の床版、上下フランジ軸力とウェブせん断力</p>	<p>図-2.1.15C 断面力と応力度算出フロー</p> <p>ここで、記号は同左。 上にバーの付いた応力は、置換した公称応力を示す。</p>

1) 断面力図



(b) 合成後
図-2.1.16A 作用断面力図の例

①許容応力度と対比するために、通常は、公称応力としての作用応力を算出できるのは要素の作用断面力を解析から得ることができる。



(c) ウェブせん断力図
図-2.1.16B 部材要素ごとの断面力図の例

①-1 許容応力度と対比するために、公称応力としての作用応力を算出できる要素の作用断面力を解析から得ることができる。

①-2 せん断遅れ等の解析結果について、公称応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。

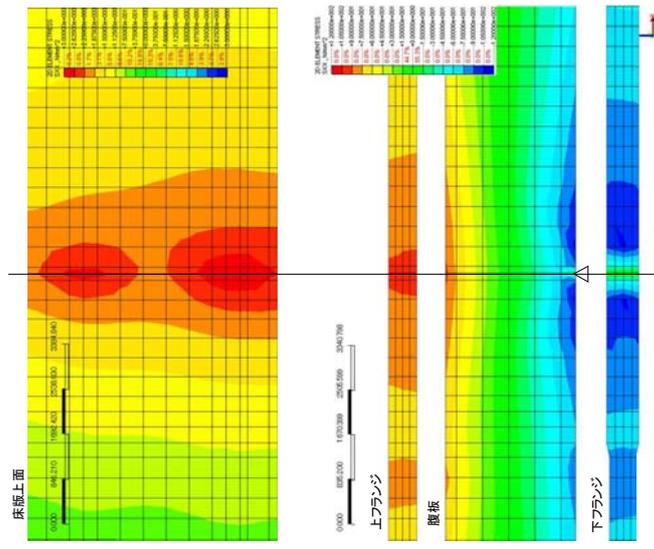
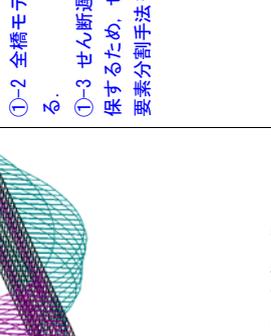
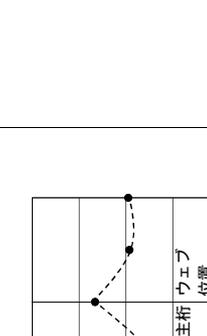
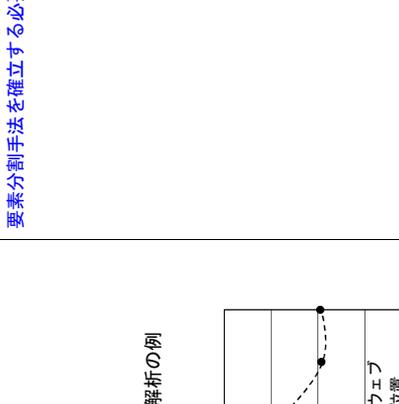
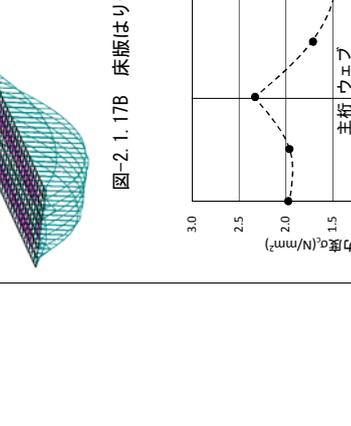
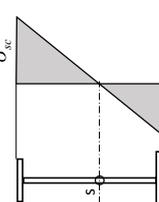
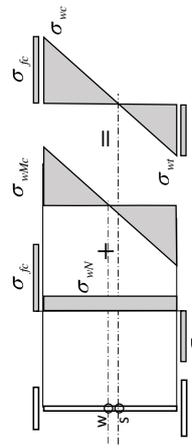


図-2.1.16C FEM 解析によるコンター図の例（中間支点部の主桁）

③-1 各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。また、公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある。

③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、初期不整（初期たわみ、残留応力）、幾何学的非線形、材料的非線形を考慮する必要がある。特に、初期不整については、各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならぬ。

設計行為項目	従来設計 (格子解析)	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
(5) 床版有効幅の算出	<p>1) 床版の有効幅は、鋼桁と床版との合成断面に参入できる床版の幅であり、下図のλとaとを合わせた長さである。λは、床版の長さbおよび支間長Lを用いて、道示II.11.3.5の規定により算出する。</p>  	<p>1) 有効幅の算出は行わずに、2.1.2(1)で作成した全橋モデルを用いて主荷重に対する解析を実施する。</p> 	<p>1) 有効幅の算出は行わずに、2.1.2(1)で作成した全橋モデルを用いて主荷重に対する解析を実施する。</p> <p>①-1 実態で生じるせん断遅れによる応力分布を直接再現できる。そのため、有効幅を設定する必要がない。</p> <p>①-2 全橋モデルは、床版を橋軸直角方向に複数の要素に分割できる。</p> <p>①-3 せん断遅れ等の解析結果について、実態と整合した精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p>
	<p>図-2.1.17A 床版の有効幅のλとaの取り方</p> <p>①実態で生じるせん断遅れによる応力分布を直接再現してはいないものの、通常は、設計上安全側に評価できるとみなせる有効幅の概念によりせん断遅れを考慮する。</p>	<p>図-2.1.17B 床版はり部材の軸力図の解析の例</p> 	<p>図-2.1.18B 中間支点上床版の軸力方向応力度の例 ($\sigma \cdot L_{max}$、時)</p> <p>①-1 実態で生じるせん断遅れによる応力分布を直接再現できる。そのため、有効幅を設定する必要がない。</p> <p>①-2 全橋モデルは、床版を橋軸直角方向に複数の要素に分割できる。</p> <p>①-3 せん断遅れ等の解析結果について、公称応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p>

設計行為		設計手法	
項目	従来設計 (格子解析)	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
(6) 合成前の設計	合成前の構造系と荷重条件で設計する。 ・構造系：鋼桁のみで抵抗し、特殊な架設工法による場合は架設系での全体横ねじれ座屈の照査などを行う。 ・荷重：合成前死荷重と架設時の短期荷重 (床版型枠、架設機材など) を考慮する。	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
1) 作用応力度の算出	1) 曲げモーメントによる垂直応力度は、平面保持が成り立つとして (道示II11.2.1) 式により算出する。	1) フランジの応力度は、作用軸力とフランジ断面面積から算出する。 $\sigma_f = \frac{N}{A_f} \leq 1.25 \cdot \sigma_{ca} \quad \text{or} \leq 1.25 \cdot \sigma_m$	1) 各要素の作用応力をフランジやウェブごとに処理して公称応力 σ_s , τ に置換する。 $\sigma_s \leq 1.25 \cdot \sigma_{ca} \quad \text{or} \leq 1.25 \cdot \sigma_m$ $\tau \leq 1.25 \cdot \tau_a$
2) 許容応力度の算出	2) せん断応力度は、せん断力の大部分がウェブで受け持たれ、ウェブ内にはほぼ均一に分布するとして (道示II11.2.2) 式により算出する。	2) ウェブの垂直応力度は、軸力と曲げモーメントから次式で算出する。 せん断応力度は従来設計と同様に算出する。 $\sigma_w = \sigma_{wM} + \sigma_{wM} = \frac{N_w}{A_w} + \frac{M_w}{I_w} \cdot y_{wT} \leq 1.25 \cdot \sigma_{ca} \quad \text{or} \leq 1.25 \cdot \sigma_m$	2) 施工時の25%割増した許容応力度に対して照査する。 3) 1) 各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。 また、公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある。 3) 2) 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、初期不整 (初期たわみ、残留応力)、幾何学的非線形、材料的非線形を考慮する必要がある。特に、初期不整については、各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない。
3) 応力度の照査	$\sigma_{sc} = -\frac{M}{I_s} \cdot y_{sc} \leq 1.25 \cdot \sigma_{ca}$ $\sigma_{st} = \frac{M}{I_s} \cdot y_{st} \leq 1.25 \cdot \sigma_m$ $\tau = \frac{S}{A_w} \leq 1.25 \cdot \tau_a$ 	$\tau = \frac{S}{A_w} \leq 1.25 \cdot \tau_a$ 	許容値がないことに対する対応 3) 1) 各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。 3) 2) 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、初期不整 (初期たわみ、残留応力)、幾何学的非線形、材料的非線形を考慮する必要がある。特に、初期不整については、各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない。
許容値 (規格値)	道示II表3.2.3 道示の適用範囲の橋梁に対して、道示どおりの作用応力度の算出を行うため、道示の許容応力度を用いることができる。	道示II表3.2.3 柱の有効屈長と同様な考え方をを用いてせん断パネルモデルの線形座屈解析によって得られる弾性座屈軸力からフランジの固定点間距離を算出して、道示の基準耐力曲線 (表-3.2.3 (b)) を適用して許容曲げ圧縮応力度を求める。	道示II表3.2.3 柱の有効屈長と同様な考え方をを用いてせん断パネルモデルの線形座屈解析によって得られる弾性座屈軸力からフランジの固定点間距離を算出して、道示の基準耐力曲線 (表-3.2.3 (b)) を適用して許容曲げ圧縮応力度を求める。

設計行為

項目

4) 全体横ねじれ座屈の照査

従来設計 (格子解析)

図-2.1.2に示した主桁の設計フローの中で全体横ねじれ座屈照査の必要性が「有」となった場合、以下の照査を行う。
照査は鋼道路橋設計便覧 2.6を参考にでき、照査フローは下図 2.6) のようであり、留意事項は以下のとおりである。
・下横構が設けられること。
・L/B > 18 の場合は弾性座屈解析を行い、安全率 3 を確保する。
・L/B > 24 の場合は上横構を設置するなど構造変更をする。

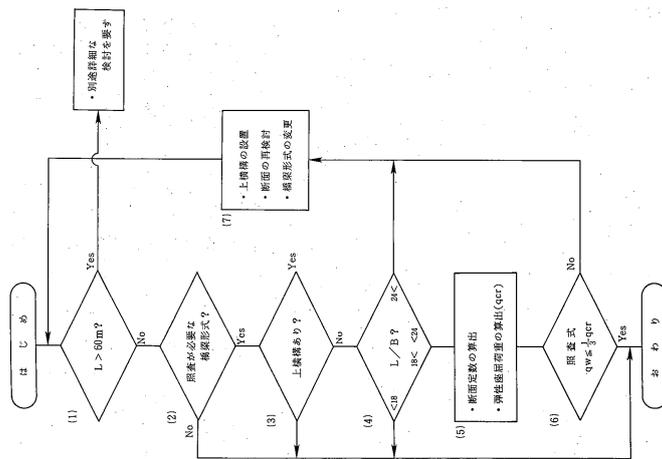


図-2.1.20A 全体横ねじれ座屈の照査フローと許容応力度 2.6)

- ①下横構がある場合の適用範囲となる。
- ②下横構がない場合、別途検討をしなければならぬ。

設計手法

せん断パネル解析による設計

全体横ねじれ座屈照査のフロー-2.7)を 図-2.1.20B) に示す。

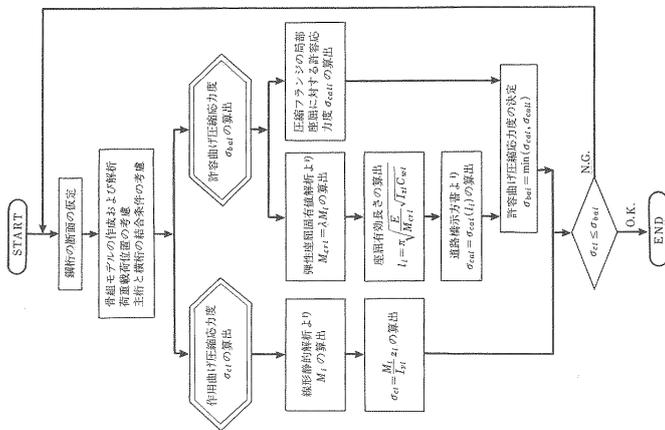


図-2.1.20B 全体横ねじれ座屈の照査フロー-2.7)

図-2.1.21B せん断パネルモデルによる横ねじれ座屈モードの例

- ①-1 下横構の有無に関わらず適用が可能である。
- ①-2 全橋モデルは、主桁のフランジ、ウェブをそれぞれモデル化することから、主桁のそりねじり剛度を考慮でき、弾性座屈モーメントの算出が可能となる。
- ①-3 局部座屈の影響を受けない支間の座屈モードの抽出方法を確立する必要がある。

FEM解析による設計

全体横ねじれ座屈照査は、せん断パネル解析と同様である。

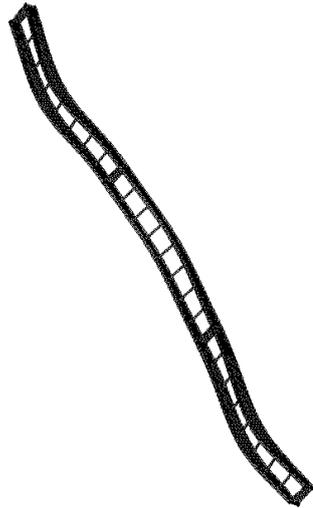


図-2.1.20C FEMモデルによる横ねじれ座屈モードの例

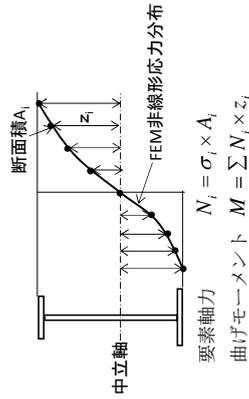


図-2.1.21C FEM結果から曲げモーメントの算出方法

- ①-1 下横構の有無に関わらず適用が可能である。
- ①-2 全橋モデルは、主桁のフランジ、ウェブをそれぞれモデル化することから、主桁のそりねじり剛度を考慮でき、弾性座屈モーメントの算出が可能となる。
- ①-3 局部座屈の影響を受けない支間の座屈モードの抽出方法を確立する必要がある。

設計手法

従来設計 (格子解析)

- 1) 各荷重に対する床版コンクリートの作用応力は表-2.1.2A、鋼桁および鉄筋の作用応力は表-2.1.3Aに算出方法をそれぞれ示す。
 2) 床版は荷重ごとにヤング係数比を変え、また引張応力が作用する場合は鉄筋断面に置き換えた合成断面で作用応力を算出する。

表-2.1.3A 鋼桁および鉄筋の作用応力の算出方法

着目荷重	適用区間	応力度算出式	床版の応力状態		鋼桁	σ	z
			圧縮	引張			
後死荷重 活荷重	全区分	$-1/n \cdot M_x \cdot y_x / I_x$	-	-	-	$-M_x \cdot y_x / I_x$	S_x / A_w
クリープ	後死荷重による 曲げモーメントが 正の範囲	$-1/n \cdot [P_\phi / A_w + (M_\phi + M_x) \cdot y_x / I_x] + E_c \cdot \sigma_c \cdot \phi / E_c$	-	-	-	$-P_\phi / A_w - (M_\phi + M_x) \cdot y_x / I_x$	S_x / A_w
	後死荷重による 曲げモーメントが 負の範囲	$-1/n \cdot M_x \cdot y_x / I_x$	-	-	-	$-M_x \cdot y_x / I_x$	S_x / A_w
乾燥収縮	中間支点付近以外	$-1/n \cdot 2 \cdot [P_2 / A_w + (M_2 + M_x) \cdot y_x / I_x] + E_c \cdot \epsilon_s$	-	-	-	$-P_2 / A_w - (M_2 + M_x) \cdot y_x / I_x$	S_x / A_w
	中間支点付近 (0.15L)	$-1/n \cdot 2 \cdot M_x \cdot y_x / I_x$	-	-	-	$-M_x \cdot y_x / I_x$	S_x / A_w
温度差	全区分	$-1/n \cdot [P_1 / A_w + (M_1 + M_x) \cdot y_x / I_x] + E_c \cdot \epsilon_t$	-	-	-	$-P_1 / A_w - (M_1 + M_x) \cdot y_x / I_x$	S_x / A_w

クリープによる応力度は、後死荷重による曲げモーメントが負の場合、不特定曲げモーメント M_x による応力の発生する。
 コンクリートの乾燥収縮は全範囲にわたりに生じる現象ではあるが、中間支点付近はひび割れを考慮しているため、その箇所でのコンクリート収縮による応力は生じず、不特定曲げモーメント M_x による応力の発生する。

- M_y : 後死荷重、活荷重による曲げモーメント
- M_ϕ : クリープによる静定曲げモーメント
- M_2 : 乾燥収縮による静定曲げモーメント
- M_x : 温度差による静定曲げモーメント
- P_ϕ : クリープによる軸力
- P_1 : 温度差による軸力
- P_2 : 乾燥収縮による軸力
- y_{c1}, A_{c1}, I_{c1} : $n=7$ 断面の重心位置からの距離、断面積、断面二次モーメント
- y_{c2}, A_{c2}, I_{c2} : $n=21$ 断面の重心位置からの距離、断面積、断面二次モーメント
- E_c : $n=7$ のコンクリートのヤング係数
- E_{c1} : $n=14$ のコンクリートのヤング係数
- E_{c2} : $n=21$ のコンクリートのヤング係数
- σ_c : 後死荷重による床版コンクリートの応力度
- ϕ : クリープ係数=2.0
- ϵ_s : 乾燥収縮による最終収縮度=20×10⁻⁵
- ϵ_t : 温度差によるひびきひずみ量=α×ΔT=12×10⁻⁵

①許容応力度と対比するために、通常は、公称応力としての作用応力を算出できるはり要素の作用断面力を解析から得ることができる。

せん断パネル解析による設計

軸力と曲げモーメントによる作用応力を足し合わせて各荷重に対する応力度を算出する。

- ①-1 全橋長にわたって床版コンクリートに引張応力が作用するため、床版コンクリートに引張応力が作用する場合は、鉄筋断面を直接置き換えずにコンクリートとする。
- ①-2 せん断遅れ等の解析結果に基づいて、実態と整合した精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。

フランジの応力度 $\sigma_f = \frac{N_f}{A_f}$ (板厚が厚い場合は板曲げ応力も加算)

$$\sigma_f = \sigma_{IN} + \sigma_{IM} = \frac{N_f}{A_f} + \frac{M_{fI}}{I_f} \cdot y_f$$

$$\tau = \frac{S}{A_w}$$

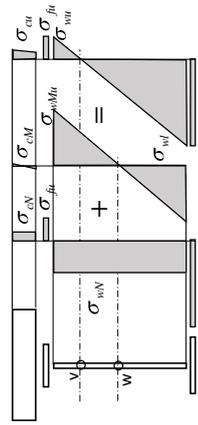


図-2.1.22A 合成断面の曲げ応力分布 (正曲げの範囲)

設計行為項目

- (7) 完成時の設計
 1) 作用応力の算出

FEM解析による設計

フランジやウェブごとに処理して公称応力に置き換える。

- ①-1 床版コンクリートに引張応力が作用する場合は、鉄筋断面を直接置き換えずにコンクリートとする。
- ①-2 せん断遅れ等の解析結果に基づいて、実態と整合した精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。

フランジの応力度 $\sigma_f = \frac{N_f}{A_f}$ (板厚が厚い場合は板曲げ応力も加算)

$$\sigma_f = \sigma_{IN} + \sigma_{IM} = \frac{N_f}{A_f} + \frac{M_{fI}}{I_f} \cdot y_f$$

$$\tau = \frac{S}{A_w}$$

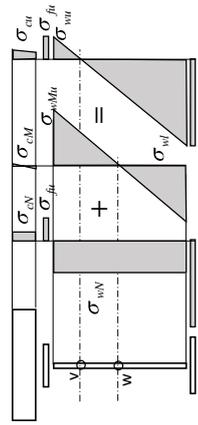


図-2.1.22B 合成断面の垂直応力分布

ここで、 N_f : フランジ軸力
 A_f, A_s : フランジ、ウェブ他の断面積
 N_f : ウェブ他の軸力
 M_{fI} : ウェブ他の曲げモーメント
 I_f : ウェブ他の断面二次モーメント
 y_f : ウェブ他の重心位置からの引張・圧縮縁距離
 S : ウェブのせん断力

設計行為項目	設計手法	FEM解析による設計
2) 許容応力度の算出	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
3) 応力度の照査	従来設計(格子解析)	せん断パネル解析による設計
許容値	道示II 3.2.1, 12.2.3, 12.3.1, 12.3.2	道示II 3.2.1, 12.2.3, 12.3.1, 12.3.2
項目	道示の適用範囲の鋼橋に対して、公称応力としての作用応力度を算出するため、道示の許容応力度を用いて良い。	道示II 3.2.1, 12.2.3, 12.3.1, 12.3.2
2) 許容応力度の算出	従来設計(格子解析)	せん断パネル解析による設計
3) 応力度の照査	基本荷重ケースと組み合わせ荷重ケース	せん断パネル解析による設計
許容値	道示II 3.2.1, 12.2.3, 12.3.1, 12.3.2	道示II 3.2.1, 12.2.3, 12.3.1, 12.3.2
項目	道示の適用範囲の鋼橋に対して、公称応力としての作用応力度を算出するため、道示の許容応力度を用いて良い。	道示II 3.2.1, 12.2.3, 12.3.1, 12.3.2
設計行為	設計手法	FEM解析による設計
項目	従来設計(格子解析)	せん断パネル解析による設計
2) 許容応力度の算出	基本荷重ケースと組み合わせ荷重ケース	せん断パネル解析による設計
3) 応力度の照査	基本荷重ケースと組み合わせ荷重ケース	せん断パネル解析による設計
許容値	道示II 3.2.1, 12.2.3, 12.3.1, 12.3.2	道示II 3.2.1, 12.2.3, 12.3.1, 12.3.2
項目	道示の適用範囲の鋼橋に対して、公称応力としての作用応力度を算出するため、道示の許容応力度を用いて良い。	道示II 3.2.1, 12.2.3, 12.3.1, 12.3.2
設計行為	設計手法	FEM解析による設計
項目	従来設計(格子解析)	せん断パネル解析による設計
2) 許容応力度の算出	基本荷重ケースと組み合わせ荷重ケース	せん断パネル解析による設計
3) 応力度の照査	基本荷重ケースと組み合わせ荷重ケース	せん断パネル解析による設計
許容値	道示II 3.2.1, 12.2.3, 12.3.1, 12.3.2	道示II 3.2.1, 12.2.3, 12.3.1, 12.3.2
項目	道示の適用範囲の鋼橋に対して、公称応力としての作用応力度を算出するため、道示の許容応力度を用いて良い。	道示II 3.2.1, 12.2.3, 12.3.1, 12.3.2
設計行為	設計手法	FEM解析による設計
項目	従来設計(格子解析)	せん断パネル解析による設計
2) 許容応力度の算出	基本荷重ケースと組み合わせ荷重ケース	せん断パネル解析による設計
3) 応力度の照査	基本荷重ケースと組み合わせ荷重ケース	せん断パネル解析による設計
許容値	道示II 3.2.1, 12.2.3, 12.3.1, 12.3.2	道示II 3.2.1, 12.2.3, 12.3.1, 12.3.2
項目	道示の適用範囲の鋼橋に対して、公称応力としての作用応力度を算出するため、道示の許容応力度を用いて良い。	道示II 3.2.1, 12.2.3, 12.3.1, 12.3.2
設計行為	設計手法	FEM解析による設計
項目	従来設計(格子解析)	せん断パネル解析による設計
2) 許容応力度の算出	基本荷重ケースと組み合わせ荷重ケース	せん断パネル解析による設計
3) 応力度の照査	基本荷重ケースと組み合わせ荷重ケース	せん断パネル解析による設計
許容値	道示II 3.2.1, 12.2.3, 12.3.1, 12.3.2	道示II 3.2.1, 12.2.3, 12.3.1, 12.3.2
項目	道示の適用範囲の鋼橋に対して、公称応力としての作用応力度を算出するため、道示の許容応力度を用いて良い。	道示II 3.2.1, 12.2.3, 12.3.1, 12.3.2

荷重ケースの作用応力度を組み合わせて、割増した許容応力度に対して照査する。

許容応力度と作用応力度を対比するには、従来設計と同様に公称応力である必要がある。参考として、死荷重と活荷重に関するせん断パネル解析による解析結果について、従来設計による場合と比較した例を図-2.1.23Bに示す。両設計法による作用応力度はほぼ一致する。

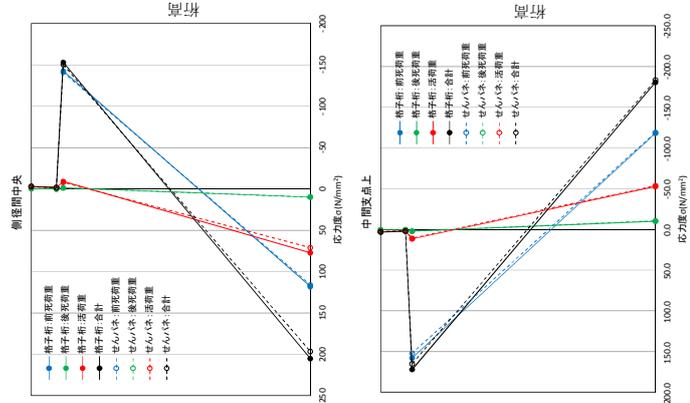


図-2.1.23B 床版と鋼桁断面の応力度分布

許容値がないことに対する対応
 ③-1 各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。
 ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない。

表-2.1.4A 基本荷重ケースと組み合わせ荷重ケース

基本荷重ケース	①合成前死荷重 ②合成後死荷重 ③活荷重 ④クリップの影響 ⑤乾燥収縮の影響 ⑥温度差の影響 ⑦床版コンクリートの床版作用による応力度
組み合わせ荷重ケース	(1)合成前死荷重による施工時鋼桁断面の照査 ①+②+③ (2)クリップと乾燥収縮の影響を除く主荷重状態の照査 ①+②+③+④+⑤ (3)主荷重状態の照査 ①+②+③+④+⑤ (4)主荷重と温度差を組み合わせた状態の照査 ①+②+③+④+⑤+⑥ (5)降伏に対する安全度の照査 ①×1.3+②×1.3+③×2+④+⑤+⑥ (6)床版の主桁作用と床版作用との重ね合わせの照査 ①+②+③+④+⑤+⑥+⑦

表-2.1.5A 許容応力度の割増係数一覧

荷重ケース	床版		鋼桁	
	コンクリート	鉄筋	上縁	下縁
合成前死荷重による施工時鋼桁断面の照査	-	-	1.25	1.25
クリップと乾燥収縮の影響を除く主荷重状態の照査	1.00	1.00	1.00	1.00
主荷重状態の照査	1.00	1.00	引縮:1.15 引張:1.00	1.00
主荷重と温度差を組み合わせた状態の照査	1.15	1.00	引縮:1.30 引張:1.15	1.15
降伏に対する安全度の照査	1.00	1.00	1.00	1.00
床版の主桁作用と床版作用との重ね合わせの照査	1.40	1.20	-	-

道示II 3.2.1, 12.2.3, 12.3.1, 12.3.2
 道示の適用範囲の鋼橋に対して、公称応力としての作用応力度を算出するため、道示の許容応力度を用いて良い。

2.1.3 連結

設計行為		設計手法		
設計フロー	項目	従来設計 (格子解析)	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
	<p>(1) 連結位置の応力度算出</p> <p>(2) フランジの連結</p> <p>1) フランジ軸力算出</p> <p>2) ボルト本数決定</p> <p>3) ボルト配置決定</p> <p>4) 母材の応力照査</p> <p>5) 連結板の設計</p> <p>(3) ウェブの曲げ応力分布の計算</p> <p>1) ボルト配置決定</p> <p>2) ボルト列数の決定</p> <p>3) せん断力の照査</p> <p>4) 合成ボルト力の照査</p> <p>5) 連結板の設計</p>	<p>道示Ⅱ3.2.3, 7.3 の各規定によって設計する。</p> <p>①通常は、連結部の設計を行うための連結部断面の作用断面積を直接算出する。</p>	<p>道示Ⅱ3.2.3, 7.3 の各規定によって設計する。</p> <p>①通常は、連結部の設計を行うための連結部断面の作用断面積を直接算出する。</p>	<p>1) 連結部の各要素の作用応力を、フランジ軸力、ウェブの曲げモーメントおよびせん断力に変換する。</p> <p>2) 後は、従来設計と同じ。</p> <p>③-1 各要素の作用応力は 2 次応力も含んだ局所応力であることから、連結部の設計を行うために連結部断面の作用断面積に置換する処理をしなければならない。また、公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある。</p> <p>③-2 連結部の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、初期不整 (初期たわみ、残留応力)、幾何学的非線形、材料的非線形を考慮する必要がある。特に、初期不整については、各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない。</p>
	許容値 (規格値)	<p>道示Ⅱ7.3</p> <p>道示における規格値の対象箇所に対して、道示どおりの作用応力度の算出を行うため、道示の許容応力度を用いて良い。</p>	<p>道示Ⅱ7.3</p> <p>従来設計と同様な公称応力としての作用応力度を算出するため、道示の許容応力度を用いて良い。</p>	<p>許容値がないことに対する対応</p> <p>③-1 各要素の作用応力は 2 次応力も含んだ局所応力であることから、連結部の設計を行うために連結部断面の作用断面積に置換する処理を行わなければならない。</p> <p>③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない。</p>

図-2.1.24 連結の設計フロー

2.1.4 支点上補剛材

設計フロー	設計行為	従来設計 (格子解析)	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
<p>項目</p> <p>(1) 設計断面力の算出 (2) 断面の仮定 (3) 有効断面の算出 (4) 軸方向圧縮応力度の算出 (5) 許容軸方向圧縮応力度の照査 (6) 軸方向圧縮応力度の算出 (7) 有効支圧面積の算出 (8) 支圧応力度の算出 (9) 許容支圧応力度の算出 (10) 支圧応力度の照査 (11) 溶接部の設計</p>	<p>従来設計 (格子解析)</p> <p>道示 II 11.5 の各規定によって設計する。 支圧反力が下図の様に鉛直方向に三角形分布すると仮定して、支点上補剛材とウェブとからなる有効断面の柱が座屈および支圧に対して安全であることを照査する。</p> <p> $\sigma_v = \frac{R_v}{A}$ R_v: 反力 A: 有効断面積 σ_v: 鉛直方向応力度 $\tau = \frac{2Q}{2t \times h}$ Q: せん断力 $2t$: 溶接有効の厚さ h: 腹高さ τ: せん断応力度 (1) 軸方向応力度分布 (2) せん断応力度分布 </p> <p>図-2.1.26A 支点上補剛材の応力分布図</p> <p>① 実態で生じる支点上補剛材の応力分布を直接再現してはいないものの、通常は、設計上安全側に評価できるとみなせる応力分布を仮定する。</p>	<p>せん断パネル解析による設計</p> <p>道示 II 11.5 の各規定によって設計する。</p> <p>軸力 N</p> <p>図-2.1.26B 支点上鉛直部材の軸力の解析の例</p> <p>①-1 設計上安全側に評価できるとみなせる従来設計と同様な応力分布を算出できる。 ①-2 従来設計と同様な応力分布となるための要素分割手法を確立する必要がある。</p>	<p>FEM解析による設計</p> <p>1) 支点上補剛材および主桁ウェブの各要素の作用応力を、支圧反力に変換する。 2) 後は、従来設計と同じ。</p> <p>図-2.1.26C 支圧付近の鉛直方向応力度の例 (中間支圧部)</p> <p>③-1 実態と整合した応力分布となるためには、支承、ソールプレート、下フランジなどを正確にモデル化しなければならない。 ③-2 各要素に対して得られる作用応力は、2 次元力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。また、公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある。 ③-3 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、初期不整 (初期たわみ、残留応力)、幾何学的非線形、材料的非線形を考慮する必要がある。特に、初期不整については、各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない。</p> <p>許容値がないことに対する対応</p> <p>③-1 各要素の作用応力は 2 次元力も含んだ局所応力であることから、支点上補剛材の設計を行うための処理を行わなければならない。 ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない。</p>	
<p>許容値 (規格値)</p>	<p>道示 II 3.2.1, 11.5.2</p> <p>道示における規格値の対象箇所に対して、道示どおりの作用応力の算出を行うため、道示の許容応力度を用いて良い。</p>	<p>道示 II 3.2.1, 11.5.2</p> <p>従来設計と同様な公称応力としての作用応力を算出するため、道示の許容応力度を用いて良い。</p>	<p>道示 II 3.2.1, 11.5.2</p> <p>従来設計と同様な公称応力としての作用応力を算出するため、道示の許容応力度を用いて良い。</p>	<p>道示 II 3.2.1, 11.5.2</p> <p>従来設計と同様な公称応力としての作用応力を算出するため、道示の許容応力度を用いて良い。</p>

図-2.1.25 支点上補剛材の設計フロー

2.1.5 中間垂直補剛材、水平補剛材

設計行		設計手法	
設計フロー	項目	従来設計 (格子解析)	せん断パネル解析による設計
	(1) 補剛材配置の設定	道示 II 11.4.3, 11.4.6 の各規定によって設定する。	道示 II 11.4.3, 11.4.6 の各規定によって設定する。
	(2) 水平補剛材の有無と段数の決定	道示 II 11.4.2 の規定によって決定する。	道示 II 11.4.2 の各規定によって設定する。
	(3) 垂直応力度とせん断応力度の算出	補剛材位置での作用応力度を算出する。	補剛材位置での作用応力度を算出する。
	(4) 間隔の照査	道示 II 11.4.3 の規定によって照査する。	道示 II 11.4.3 の規定によって照査する。 ③モデル化、許容値、および照査方法を確立する必要がある。
	(5) 補剛材断面の仮定	道示 II 4.2.3, 11.4.4 の規定により仮定する。	道示 II 4.2.3, 11.4.4 の規定により仮定する。
	(6) 剛度の照査	道示 II 11.4.4, 11.4.7 の規定により照査する。	道示 II 11.4.4, 11.4.7 の規定により照査する。 ③モデル化、許容値、および照査方法を確立する必要がある。
	許容値 (規格値)		道示 II 11.4.2, 11.4.3, 11.4.4, 11.4.7 道示における規格値の対象箇所に対して、道示どおりの作用応力度の算出を行うため、道示の規格値を用いて良い。
	(補剛材のモデル化について)		主桁をはり要素でモデル化するので、補剛材は解析において考慮されない。
	設計フロー		

図-2.1.27 中間垂直補剛材の設計フロー

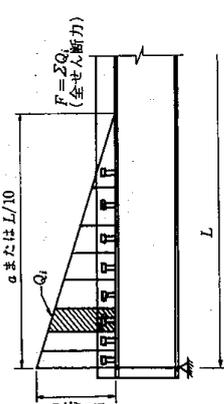
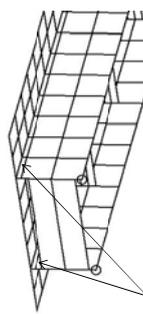
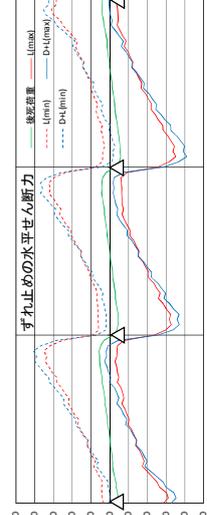
図-2.1.28 水平補剛材の設計フロー

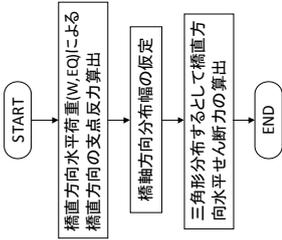
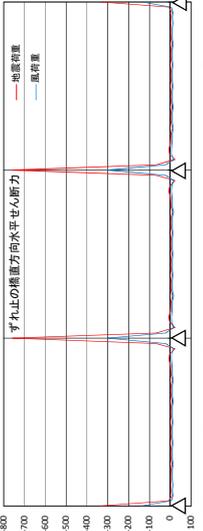
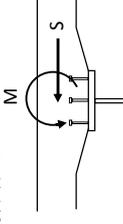
2.1.6 ずれ止めの設計

設計行 為	項目
<p>設計フロー</p> <pre> graph TD START([START]) --> A[死、活荷重(D,L)による 水平せん断力算出] START --> B[解析結果] START --> C[橋軸方向水平せん断力 (D, L, CR, SH, T)] A --> D[クリープ、乾燥収縮、温度差 (Cr, Sh, T)による水平せん断力算出] D --> E[水平せん断力合計] E --> F[ずれ止め許容せん断力] F --> G[許容力: 道示 II 12.5.5] G --> H[配置・間隔の設定] H --> I{せん断力の照査} I -- NG --> H I -- OK --> J[END] B --> K[橋直方向水平せん断力 (EQ, W)] B --> L[曲げによる引抜き力 (L, EQ, W)] C --> M[橋軸方向水平せん断力 (D, L, CR, SH, T)] M --> N[ずれ止め許容せん断力] N --> O[許容力: 道示 II 12.5.5] O --> P[配置・間隔の設定] P --> Q{せん断力の照査} Q -- NG --> P Q -- OK --> R[END] L --> S[ずれ止め許容引抜き力] S --> T[配置・間隔の設定] T --> U{せん断力の照査} U -- NG --> T U -- OK --> R </pre>	<p>(1)作用力の算出</p> <p>1)橋軸方向水平せん断力 2)橋直方向水平せん断力 3)曲げによる引抜き力</p> <p>(2) ずれ止めの許容力の算出</p> <p>1)橋軸方向許容せん断力 2)橋直方向許容せん断力 3)許容引抜き力</p> <p>(3) 配置・間隔の設定</p> <p>(4) せん断力の照査</p>

図-2.1.30 橋軸方向水平せん断力に対する
ずれ止めの設計フロー

図-2.1.31 橋直方向水平せん断力と曲げ引抜き力を
考慮した場合の設計フロー

設計行為項目	設計手法	FEM解析による設計
(1) 作用力の算出 橋軸方向せん断力	従来設計(格子解析) 1) 後死荷重と活荷重による水平せん断力を次式から算出する。 $H_p = \frac{G \cdot S_v}{I_v}$ ここで、 G : 床版の断面一次モーメント S_v : 垂直せん断力 I_v : 合成断面の断面二次モーメント 2) 乾燥収縮と温度差による水平せん断力は、床版の自由端部の下の範囲に負担させる。 	せん断パネル解析による設計 ずれ止め部分に配置したせん断パネルのせん断流を単位長さ当りの水平せん断力として算出する。  ずれ止め部分のせん断パネルのせん断流＝水平せん断力 H_p 図-2.1.32B ずれ止め部分のせん断パネル
1) 作用力の算出 橋軸方向せん断力	図-2.1.32A 乾燥収縮と温度差による水平せん断力の分布形状 ²⁾ ① 実態で生じるずれ止めの応力分布を直接再現してはならないものの、通常は、設計上安全側に評価できるとみなせる応力分布を仮定する。	① せん断遅れ等の解析結果について、実態と整合した精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。 ② 各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。また、公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある。
1) 作用力の算出 橋軸方向せん断力	図-2.1.33B 後死荷重と活荷重による水平せん断力の解析結果の例 	① せん断遅れ等の解析結果について、実態と整合した精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。 ② 各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。また、公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある。
1) 作用力の算出 橋軸方向せん断力	図-2.1.34B 乾燥収縮と温度差による水平せん断力の解析結果の例 ①-1 ずれ止め部分に配置したせん断パネルのせん断流から、設計上安全側に評価できるとみなせる従来設計と同様な応力分布を直接算出できる。 ①-2 従来設計と同様な応力分布となるための要素分割手法を確立する必要がある。	① せん断遅れ等の解析結果について、実態と整合した精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。 ② 各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。また、公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある。

設計行為項目	従来設計（格子解析）	設計手法	FEM解析による設計
2) 橋直方向せん断力	<p>主構造の解析モデルとは別の解析モデルを作成して個別に検討する。</p>  <p>図-2.1.35A 橋直方向せん断力の算出フロー</p> <p>②橋軸直角方向のずれ止めを設計する場合、主桁や横桁と床版を分離してずれ止めのモデル化をしなければならない。通常は、平面格子モデルでは床版を分離したモデル化を行わず、別途計算モデルを作成する。</p>	<p>せん断パネル解析による設計</p> <p>ずれ止め部分に配置した縁部材に作用するせん断力を要素配置間隔当りの水平せん断力として算出する。</p>  <p>図-2.1.35B 横荷重によってずれ止め要素に生じる橋直方向水平せん断力図の例</p> <p>①-1 ずれ止め部分に配置した縁部材のせん断力の解析結果から直接、橋直方向水平せん断力を得ることができる。</p> <p>①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できること、主桁や横桁と独立した床版、およびずれ止めをモデル化することができる。</p> <p>①-3 せん断遅れ等の解析結果について、公称応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p>	<p>FEM解析による設計</p> <p>ずれ止め部分に配置したパネ要素の橋直方向水平反力を要素配置間隔長さ当りの水平せん断力として算出する。</p> <p>①-1 ずれ止め部分に配置したパネ要素のせん断力の解析結果から直接、橋直方向水平せん断力を得ることができる。</p> <p>①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため、主桁や横桁と独立した床版、およびずれ止めをモデル化することができる。</p> <p>①-3 せん断遅れ等の解析結果について、実態と整合した精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p> <p>③各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。また、公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある。</p>
3) 曲げ引き抜き力	<p>主構造の解析モデルとは別の解析モデルを作成して個別に検討する。</p> <p>②曲げ引き抜き力についてずれ止めの設計する場合、主桁や横桁と床版を分離してずれ止めのモデル化をしなければならない。通常は、平面格子モデルでは床版を分離したモデル化を行わず、別途計算モデルを作成する。</p>	<p>せん断パネル解析による設計</p> <p>ずれ止め部分に配置した縁部材に作用する曲げモーメントから曲げ引き抜き力を算出する。</p>  <p>図-2.1.36B 横荷重によってずれ止めに作用する力</p> <p>①-1 ずれ止め部分に配置した縁部材の曲げモーメントの解析結果から直接、曲げ引き抜き力を得ることができる。</p> <p>①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため、主桁や横桁と独立した床版、およびずれ止めをモデル化することができる。</p> <p>①-3 せん断遅れ等の解析結果について、公称応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p>	<p>FEM解析による設計</p> <p>ずれ止め部分に配置したパネ要素の鉛直反力から曲げ引き抜き力を算出する。</p> <p>①-1 ずれ止め部分に配置したパネ要素の曲げモーメントの解析結果から直接、曲げ引き抜き力を得ることができる。</p> <p>①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため、主桁や横桁と独立した床版、およびずれ止めをモデル化することができる。</p> <p>①-3 せん断遅れ等の解析結果について、実態と整合した精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p> <p>③各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。また、公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある。</p>

設計行為 項目	設計手法		FEM解析による設計
	従来設計(格子解析)	せん断パネル解析による設計	
(2) ずれ止めの許容せん断力の算出			
1) 橋軸方向せん断力	道示II.12.5.5 道示における規格値の対象箇所に対して、道示どおりの作用応力度の算出を行うため、道示の許容応力度を用いて良い。	道示II.12.5.5 従来設計と同様な公称応力としての作用応力度を算出するため、道示の許容応力度を用いて良い。	許容値がないことに対する対応 ③-1 各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。 ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない。
2) 橋直方向せん断力	許容値がないことに対する対応 ③ 橋直方向せん断力について設計する場合、一定の安全率を踏まえた許容値を設定しなければならない。	許容値がないことに対する対応 ③ 橋直方向せん断力について設計する場合、一定の安全率を踏まえた許容値を設定しなければならない。	許容値がないことに対する対応 ③ 橋直方向せん断力について設計する場合、一定の安全率を踏まえた許容値を設定しなければならない。
3) 曲げ引き抜き力	許容値がないことに対する対応 ③ 曲げ引き抜き力について設計する場合、一定の安全率を踏まえた許容値を設定しなければならない。	許容値がないことに対する対応 ③ 曲げ引き抜き力について設計する場合、一定の安全率を踏まえた許容値を設定しなければならない。	許容値がないことに対する対応 ③ 曲げ引き抜き力について設計する場合、一定の安全率を踏まえた許容値を設定しなければならない。
(3) 配置・間隔の設定(規格値)			
1) 橋軸方向せん断力に対して	道示II.15.5.3, 12.5.4 道示における規格値の対象箇所に対して、道示どおりの作用応力度の算出を行うため、道示の規格値を用いて良い。	道示II.15.5.3, 12.5.4 従来設計と同様な公称応力としての作用応力度を算出するため、道示の許容応力度を用いて良い。	規格値がないことに対する対応 ③-1 各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。 ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、一定の安全率を確保した規格値を設定しなければならない。
2) 橋直方向せん断力に対して	規格値がないことに対する対応 ③ 橋直方向せん断力について設計する場合、一定の安全率を踏まえた規格値を設定しなければならない。	規格値がないことに対する対応 ③ 橋直方向せん断力について設計する場合、一定の安全率を踏まえた規格値を設定しなければならない。	規格値がないことに対する対応 ③ 橋直方向せん断力について設計する場合、一定の安全率を踏まえた規格値を設定しなければならない。
3) 曲げ引き抜き力に対して	規格値がないことに対する対応 ③ 曲げ引き抜き力について設計する場合、一定の安全率を踏まえた規格値を設定しなければならない。	規格値がないことに対する対応 ③ 曲げ引き抜き力について設計する場合、一定の安全率を踏まえた規格値を設定しなければならない。	規格値がないことに対する対応 ③ 曲げ引き抜き力について設計する場合、一定の安全率を踏まえた規格値を設定しなければならない。

2.1.7 疲労設計

設計行為		設計手法		
設計フロー	項目	従来設計 (格子解析)	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
<p>(1) 疲労照査条件の設定 (2) 応力範囲の算出 (3) 継手の許容応力範囲の算出 (4) 簡便な疲労照査 (5) 詳細な疲労照査</p>	<p>・作業は、図-2.1.37のとおり。 ・道示II 5.3, 6章, 鋼橋の疲労設計指針の各規定によって設計する。 ・T 荷重をレーン載荷して着目箇所の応力範囲を算出する。</p> <p>①許容応力度と対比するために、通常は、公称応力としての作用応力を算出できるはり要素の作用断面力を解析から得ることができ。</p> <p>・コンクリート床版を有する鋼1桁を格子解析する場合の構造解析係数 $\gamma_a=0.8$ を適用する。ただし、少数主桁の場合は $\gamma_a=1.0$ とする 2.8)。</p>	<p>せん断パネル解析による設計</p> <p>・作業は、図-2.1.37のとおり。 ・道示II 5.3, 6章, 鋼橋の疲労設計指針の各規定によって設計する。 ・T 荷重をレーン載荷して着目箇所の応力範囲を算出する。</p> <p>①-1 許容応力度と対比するために、通常は、公称応力としての作用応力を算出できるはり要素の作用断面力を解析から得ることができ。</p> <p>①-2 せん断遅れ等の解析結果について、公称応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p> <p>・コンクリート床版を有する鋼1桁を骨組解析する場合の構造解析係数 $\gamma_a=0.8$ を適用する。ただし、少数主桁の場合は $\gamma_a=1.0$ とする 2.8)。</p>	<p>FEM解析による設計</p> <p>1) 応力集中箇所の作用応力を処理して公称応力に変換する。 2) 後は、従来設計と同じ。</p> <p>③各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。また、公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある。</p> <p>・コンクリート床版を有する鋼1桁を三次元FEM解析する場合の構造解析係数 $\gamma_a=1.0$ を適用する 2.8)。</p>	
<p>許容値 (規格値)</p>	<p>道示II 5.3と6章, および鋼道路橋の疲労設計指針 2.8)</p> <p>道示における規格値の対象箇所に対して、道示どおりの応力範囲の算出を行うため、道示の許容値を用いて良い。</p>	<p>道示II 5.3と6章, および鋼道路橋の疲労設計指針 2.8)</p> <p>道示における規格値の対象箇所に対して、道示どおりの応力範囲の算出を行うため、道示の許容値を用いて良い。</p>	<p>許容値がないことに対する対応</p> <p>③各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。</p>	

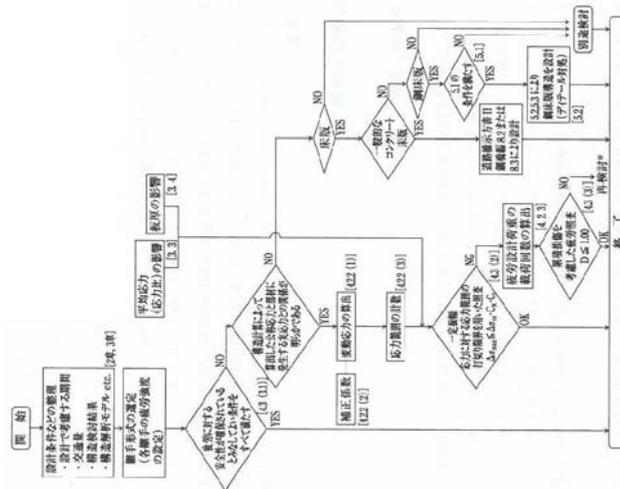


図-2.1.37 疲労設計フロー 2.8)

2.1.8 荷重分配構桁

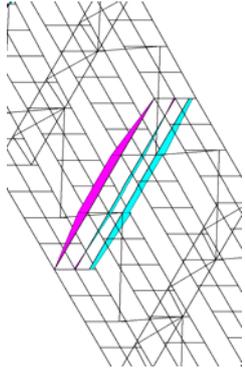
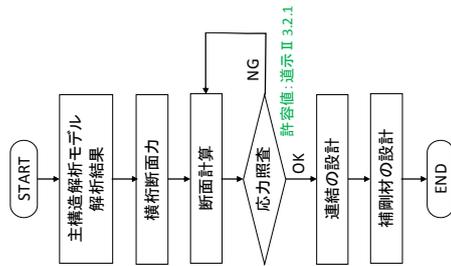
設計行為		設計手法		
設計フロー	項目	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
<p>設計方針</p> <ul style="list-style-type: none"> 荷重分配効果で主桁間の相対たわみを少なくし、床版への悪影響を避ける。 分配構桁は構造解析モデルに含めて解析して荷重分配作用を担わせる。 	<p>(1) 設計断面力の算出</p>	<p>各要素における曲げモーメントやせん断力などの作用断面力を算出、整理する。</p> <p>①許容応力度と対比するために、通常は、公称応力としての作用断面力を算出できるはり要素の作用断面力を解析から得ることができる。</p>	<p>各要素における曲げモーメントやせん断力などの作用断面力を算出、整理する。</p>  <p>図-2.1.39B 荷重分配構桁軸力の解析の例 (4 主1桁の例)</p> <p>①-1 許容応力度と対比するために、通常は、公称応力としての作用断面力を算出できるはり要素の作用断面力を解析から得ることができる。</p> <p>①-2 せん断遅れ等の解析結果について、公称応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p>	<p>各要素における作用応力を直接算出、整理する。</p> <p>③-1 各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。また、公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある。</p> <p>③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、初期不整（初期たわみ、残留応力）、幾何学的非線形、材料的非線形を考慮する必要がある。特に、初期不整については、各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない。</p>
<p>(2) 作用応力の算出 (3) 許容応力の算出 (4) 応力の照査</p>	<p>① 平面保持を仮定したはり断面の断面計算により作用応力を算出する。 ② 作用応力と許容応力を対比して照査する。</p>	<p>① フランジやウェブごとの作用応力を算出する。 ② 作用応力と許容応力を対比して照査する。</p>	<p>① 各要素の作用応力を処理して公称応力に置換する。 ② 作用応力と許容応力を対比して照査する。</p>	
<p>許容値 (規格値)</p>	<p>道示II 3.2.1 道示における規格値の対象箇所に對して、道示どおりの作用応力の算出を行うため、道示の許容応力を用いて良い。</p>	<p>道示II 3.2.1 従来設計と同様な公称応力としての作用応力を算出するため、道示の許容応力を用いて良い。</p>	<p>許容値がないことに対する対応 ③-1 各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。 ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない。</p>	
<p>(5) 連結の計算 (6) 補剛材の設計</p>	<p>主桁と同じ</p>	<p>主桁と同じ</p>	<p>主桁と同じ</p>	

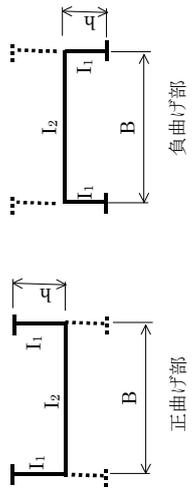
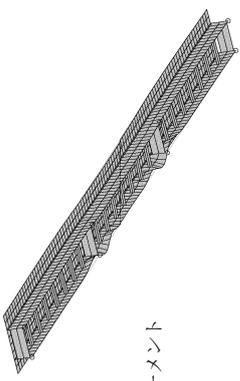
図-2.1.38 荷重分配構桁の設計フロー



2.1.9 中間横桁 (少数主桁橋のみ)

設計行為	項目
<p style="text-align: center;">設計フロー</p>	<p>(1) U形フレーム剛度の照査 1) U形フレーム剛度の算出 2) U形フレーム必要剛度の算出 (2) 断面力の算出 (3) 作用応力度の算出 (4) 許容応力度の算出 (5) 応力度の照査 (6) 連結の計算</p>

図-2.1.40 中間横桁の設計フロー

設計行為項目		設計手法	
(1) U形フレーム剛度の照査 (注) 道示では、少数主桁橋の中間横桁について、U形フレーム剛度の照査式が規定されておらず、ここでは、鋼道橋設計便覧を参考に、計算例を示す。	従来設計(格子解析) 1) ボニートラスの圧縮材の座屈照査式を応用した下式によってU形フレームの必要剛度 C' を確保する。 $C = \frac{6EI_1 I_2}{h^2(3BI_1 + 2hI_2)} \geq C'$ $C' = \alpha \cdot \frac{vN}{\ell}$ v: 座屈安全率(=2.0) N: フランジの圧縮軸力 ℓ: U形フレームの間隔 α: 鋼道橋設計便覧の表-5.2の値(2.0)	せん断パネル解析による設計 1) 従来設計法でU形フレームの必要剛度を確保する。 2) 図-2.1.42Bに従い、弾性座屈解析によって圧縮フランジの固定点間距離 ℓ_e を算出する。 3) 主桁の作用応力度と許容応力度を対比して照査する。	FEM解析による設計 1) 従来設計法でU形フレームの必要剛度を確保する。 2) 弾性座屈解析によって圧縮フランジの固定点間距離 ℓ_e を算出する。 3) 各要素の作用応力度を処理して公称応力に置換する。 4) 主桁の作用応力度と許容応力度を対比して照査する。
	2) 横力に対して中間横桁を設計する場合、主桁や横桁と床版を分離したモデル化しなければならない。通常は、平面格子モデルでは床版を分離したモデル化を行わず、別途計算モデルを作成する。	図-2.1.41A 横桁と垂直補剛材からなるU形フレーム 	図-2.1.41B 合成後モデルの弾性座屈モードの例 
		1) 従来設計法でU形フレームの必要剛度を確保する。 2) 図-2.1.42Bに従い、弾性座屈解析によって圧縮フランジの固定点間距離 ℓ_e を算出する。 3) 主桁の作用応力度と許容応力度を対比して照査する。	①-1 U形フレーム剛度と圧縮フランジの固定点間距離との関係を弾性座屈解析によって求めることができる。 ①-2 全橋モデルは、主桁のフランジ、ウェブをそれぞれモデル化することから、主桁のそりねじり剛度を考慮でき、弾性座屈解析が可能となる。 ①-3 格点間の座屈モードが抽出できる解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。

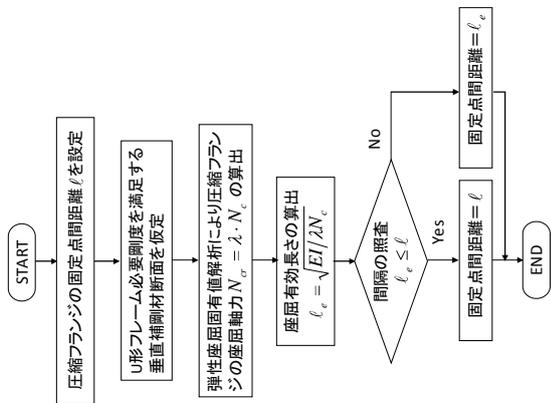
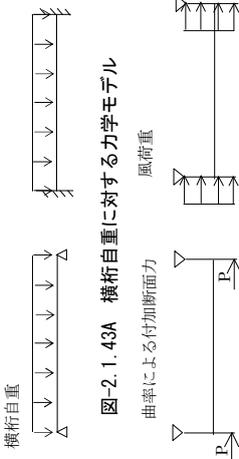
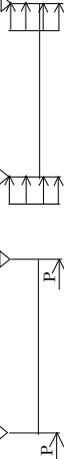
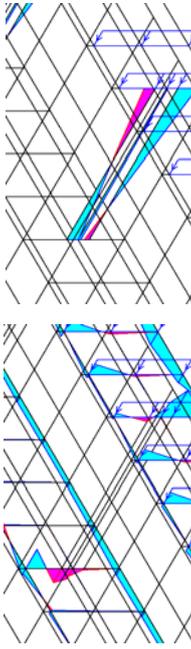
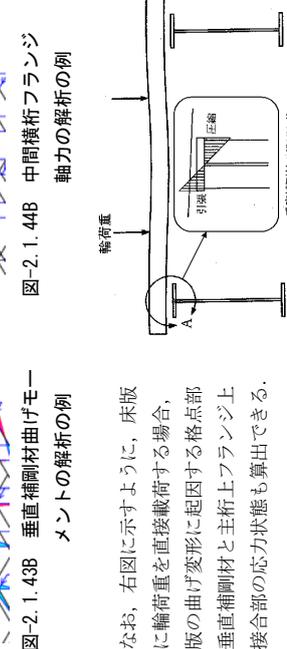


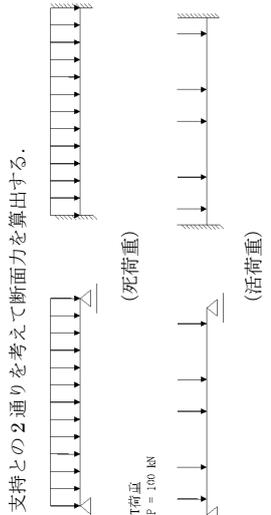
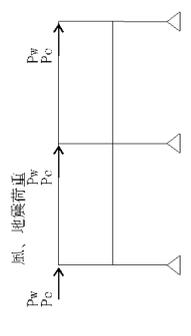
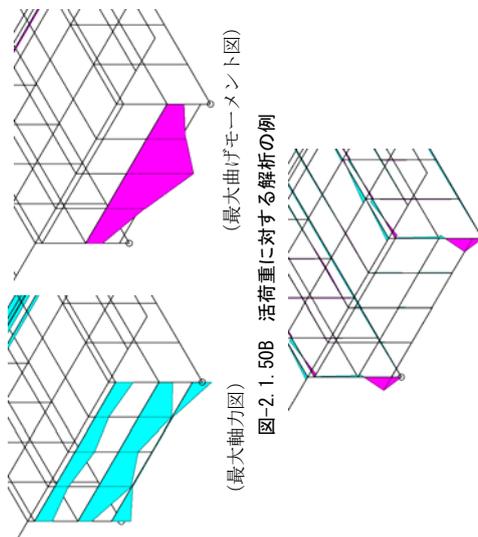
図-2.1.42B U形フレーム剛度の照査フロー

設計行為項目	従来設計(格子解析)	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
(2) 断面力の算出	<p>1) 2主桁橋の中間横桁は、全橋モデルとは別途以下のような荷重に対する力学モデルを設定する。</p> <p>2) 横桁の要素から断面力を算出する。</p>  <p>図-2.1.43A 横桁自重に対する力学モデル</p>  <p>図-2.1.44A 横力に対する力学モデル</p>	<p>1) 全橋モデルにおける横桁の要素から、各板組形状の作用断面力を算出する。</p>  <p>図-2.1.43B 垂直補剛材曲げモーメントの解析の例</p> <p>図-2.1.44B 中間横桁フランジ軸力の解析の例</p> 	<p>1) 各要素における作用応力を直接算出、整理する。</p> <p>①-1 横桁および格点部の垂直補剛材をモデル化した要素から直接、作用断面力を得ることができる。</p> <p>①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため、主桁や横桁と独立した床版、および格点部の垂直補剛材をモデル化することができる。</p> <p>①-3 せん断遅れ等の解析結果について、実態と整合した精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p> <p>③-1 各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。また、公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある。</p> <p>③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、初期たわみ、残留応力、幾何学的非線形、材料の非線形を考慮する必要がある。特に、初期不整については、各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない。</p>
(3) 作用応力度の算出 (4) 許容応力度の算出 (5) 応力度の照査	<p>②横力に対して中間横桁を設計する場合、主桁や横桁と床版を分離してモデル化しなければならない。通常は、平面格子モデルでは床版を分離したモデル化を行わず、別途計算モデルを作成する。</p>	<p>なお、右図に示すように、床版上に輪荷重を直接載荷する場合、床版の曲げ変形に起因する格点部の垂直補剛材と主桁上フランジ上の接合部の応力状態も算出できる。</p> <p>図-2.1.45B 床版による輪荷重の分配の影響の例²⁾⁹⁾</p> <p>①-1 横桁および格点部の垂直補剛材をモデル化した要素から直接、作用断面力を得ることができる。</p> <p>①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため、主桁や横桁と独立した床版、および格点部の垂直補剛材をモデル化することができる。</p> <p>①-3 せん断遅れ等の解析結果に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p> <p>1) フランジやウェブごとの作用応力度を算出する。</p> <p>2) 作用応力度と許容応力度を対比して照査する。</p>	<p>1) 各要素の作用応力度を処理して公称応力に置換する。</p> <p>2) 作用応力度と許容応力度を対比して照査する。</p> <p>許容値がないことに対する対応</p> <p>③-1 各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。</p> <p>③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない。</p> <p>主桁と同じ</p>
(6) 連結の計算	<p>道示II3.2.1 道示における規格値の対象箇所に対して、道示における作用応力度の算出を行うため、道示の許容応力度を用いて良い。</p>	<p>道示II3.2.1 従来設計と同様な公称応力としての作用応力度を算出するため、道示の許容応力度を用いて良い。</p>	<p>主桁と同じ</p>

2.1.10 端横桁 (端対傾構)

設計方針	設計行為	項目
<p>設計方針</p> <ul style="list-style-type: none"> 端横桁 (対傾構) は、主桁の位置および形状を保持し、ねじれ変形を拘束させる。 主桁に作用する水平荷重、ねじりモーメントに抵抗するとともに、円滑に支承に伝達させる。 橋端部の床版は増厚して端横桁 (対傾構) に打下るすため、分担面積分の死荷重と直上に載る T 荷重を支持できるように設計する。 	<p>設計フロー</p> <pre> graph TD START([START]) --> A[荷重強度の計算 (D, L, W, EQ)] A --> B[力学モデルの設定] B --> C[断面力算出] C --> D[断面計算] D --> E{応力照査} E -- NG --> D E -- OK --> F[連結の設計] F --> G[補剛材の設計] G --> END([END]) </pre>	<p>(1) 荷重強度の計算</p> <ol style="list-style-type: none"> 鉛直荷重 水平荷重 <p>(2) 断面力の算出</p> <p>(3) 作用応力度の算出</p> <p>(4) 許容応力度の算出</p> <p>(5) 応力度の照査</p> <p>(6) 連結の設計</p> <p>(7) 補剛材の設計</p>
<p>図-2.1.46 端横桁の設計フロー</p>		

設計行為		設計手法	
項目	従来設計 (格子解析)	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
(1) 荷重強度の計算 1) 鉛直荷重	<p>1) 死荷重は下図のように分担面積を仮定して載荷する。</p> <p>平面図 端傾構位置 桁端長 a/2</p> <p>図-2.1.47A 端横桁 (対傾構) の死荷重分担面積の例</p> <p>図-2.1.47B 活荷重 (T荷重) は端横桁 (端対傾構) の直上に載荷する。</p> <p>主桁間隔 主桁位置</p> <p>図-2.1.48A 活荷重 (T荷重) の載荷図の例</p>	<p>1) 全橋モデルに直接荷重を載荷する。 2) 活荷重は、橋面全体に影響線載荷する。</p>	<p>1) 全橋モデルに直接荷重を載荷する。 2) 活荷重は、橋面全体に影響線載荷する。</p>
2) 水平荷重	<p>1) 水平力の分担は、風荷重に対しては2組の横桁で、地震荷重に対しては全横桁で均等に受け持たせる。</p> $P_w = \frac{1}{2} W_w A$ $P_e = \frac{1}{(n-1)} W_e A$ <p> W_w : 風荷重強度 W_e : 地震荷重強度 n : 主桁本数 A : 影響面積 $= l / 2$ </p> <p>図-2.1.49A 水平荷重の分担方法</p>	<p>1) 全橋モデルに直接荷重を載荷する。 2) 風荷重は、端横桁の断面力が最大・最小となるように載荷範囲を変化させる。 3) 地震荷重は、橋長にわたって載荷する。</p>	<p>1) 全橋モデルに直接荷重を載荷する。 2) 風荷重は、端横桁の断面力が最大・最小となるように載荷範囲を変化させる。 3) 地震荷重は、橋長にわたって載荷する。</p>

設計行為項目	従来設計 (格子解析)	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
(2) 断面力の算出	<p>1) 端横桁は、全橋モデルとは別途以下のような荷重に対する力学モデルを設定する。</p> <p>2) 鉛直荷重は、1組の横桁 (対傾構) の支持条件を単純支持と固定支持との2通りを考慮して断面力を算出する。</p>  <p>図-2.1.50A 鉛直荷重に対する力学モデル</p> <p>3) 水平荷重は、下図の平面フレームの床版位置に載荷して断面力を算出する。</p>  <p>図-2.1.51A 水平荷重に対する力学モデル</p> <p>②端横桁を設計する場合、支点位置の高さ方向のモデル化をしなければならぬ。通常は、平面格子モデルでは高さ方向のモデル化を行わず、別途計算モデルを作成する。</p>	<p>1) 全橋モデルにおける端横桁の要素から、各板組形状の作用断面力を算出する。</p>  <p>図-2.1.50B 活荷重に対する解析の例 (支点上垂直補剛材の面外曲げモーメント)</p> <p>図-2.1.51B 地震荷重に対する解析の例</p> <p>①-1 端横桁の要素の解析結果から直接、作用断面力を得ることができる。</p> <p>①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため、支点位置の高さ方向にモデル化することができる。</p> <p>①-3 せん断遅れ等の解析結果について、公称応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p> <p>③-1 各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。また、公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある。</p> <p>③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、初期不整 (初期たわみ、残留応力)、幾何学的非線形、材料的非線形を考慮する必要がある。特に、初期不整については、各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない。</p>	<p>1) 各要素における作用応力を直接算出、整理する。</p> <p>①-1 端横桁の要素の解析結果から直接、作用断面力を得ることができる。</p> <p>①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため、支点位置の高さ方向にモデル化することができる。</p> <p>①-3 せん断遅れ等の解析結果について、実態と整合した精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p> <p>③-1 各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。また、公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある。</p> <p>③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、初期不整 (初期たわみ、残留応力)、幾何学的非線形、材料的非線形を考慮する必要がある。特に、初期不整については、各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない。</p>

設計手法			
設計行為項目	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
(3)作用応力度の算出 (4)許容応力度の算出 (5)応力度の照査	<p>1) I断面の断面計算により作用応力度を算出する。 2) 作用応力度と許容応力度を対比して照査する。</p> <p>道示II3.2.1 道示における規格値の対象箇所に対して、道示どおりの作用応力度の算出を行うため、道示の許容応力度を用いて良い。</p>	<p>1) フランジやウェブごとの作用応力度を算出する。 2) 作用応力度と許容応力度を対比して照査する。</p> <p>道示II3.2.1 従来設計と同様な公称応力としての作用応力度を算出するた め、道示の許容応力度を用いて良い。</p>	<p>1) 各要素の作用応力度を処理して公称応力に置換する。 2) 作用応力度と許容応力度を対比して照査する。</p> <p>許容値がないことに対する対応 ③-1各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、 許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。 ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場 合、一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない。</p>
(6)連結の設計	主桁と同じ	主桁と同じ	主桁と同じ
(7)補剛材の設計	主桁と同じ	主桁と同じ	主桁と同じ

2.1.11 中間対傾構

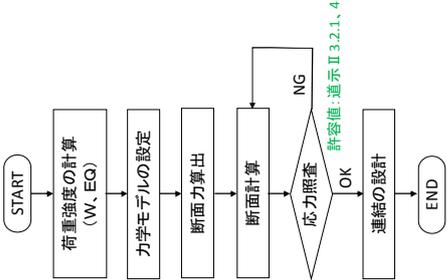
設計項目	設計行為	項目
設計方針	<ul style="list-style-type: none"> ・主桁の横倒れ座屈を防止する。 ・主桁間の相対変位を制限し，床版の付加曲げモーメントを軽減するとともに，荷重分配作用に寄与させる。 ・横荷重に対して主桁，横構および中間対傾構からなる平面トラス系を形成して，横荷重に抵抗させる。 ・架設時の主桁の位置決め材，および形状保持の役割を果たす。 	(1) 荷重強度の計算 (2) 断面力の算出 (3) 作用応力度の算出 (4) 許容応力度の算出 (5) 応力度の照査 (6) 連結の設計
設計フロー	 <pre> graph TD START([START]) --> A[荷重強度の計算 (W, EG)] A --> B[力学モデルの設定] B --> C[断面力算出] C --> D[断面計算] D --> E{応力照査} E -- OK --> F[連結の設計] E -- NG --> D F --> END([END]) Note[許容値: 告示Ⅱ 3.2.1.4] --- E </pre>	

図-2.1.52 中間対傾構の設計フロー

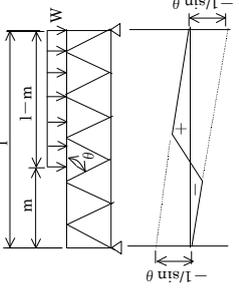
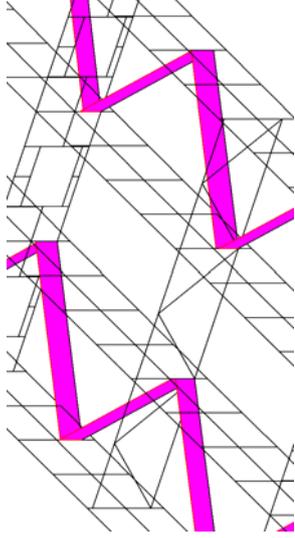
設計行為項目		設計手法		
		従来設計(格子解析)	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
(1) 荷重強度の算出	<p>1) 横荷重は下図のように分担面積を仮定して載荷する。</p> <p> n : 主桁本数 W_w : 風荷重強度 W_e : 地震荷重強度 λ : 中間対傾構間隔 $H_w = W_w \lambda$ $H_e = W_e \lambda$ </p> <p>図-2.1.53A 中間対傾構に作用する荷重</p>	<p>1) 全橋モデルに直接荷重を載荷する。</p> <p>2) 風荷重は、対傾構の断面力が最大・最小となるように載荷範囲を変化させる。</p> <p>3) 地震荷重は、橋長にわたって載荷する。</p>	<p>1) 全橋モデルに直接荷重を載荷する。</p> <p>2) 風荷重は、対傾構の断面力が最大・最小となるように載荷範囲を変化させる。</p> <p>3) 地震荷重は、橋長にわたって載荷する。</p>	<p>1) 各要素における作用応力を直接算出、整理する。</p> <p>①-1 対傾構の要素の解析結果から直接、作用断面力を得ることができる。</p> <p>①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため、格点位置の高さ方向にモデル化することができる。</p> <p>①-3 せん断遅れ等の解析結果について、実態と整合した精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p> <p>③-1 各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。</p> <p>③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、初期不整(初期たわみ、残留応力)、幾何学的非線形、材料的非線形を考慮する必要がある。特に、初期不整については、各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない。</p>
(2) 断面力の算出	<p>1) 対傾構は、全橋モデルとは別途以下のような荷重に対する力学モデルを設定する。</p> <p>2) 各部材の作用断面力を算出する。</p> <p> $P_w = \frac{1}{2} H_w$ $P_e = \frac{1}{(n-1)} H_e$ </p> <p>図-2.1.54A 中間対傾構の力学モデル</p> <p>②対傾構を設計する場合、格点位置の高さ方向にモデル化しなければならず、通常は、平面格子モデルでは高さ方向のモデル化を行わず、別途計算モデルを作成する。</p>	<p>1) 全橋モデルにおける対傾構の要素から、各板組形状の作用断面力を算出する。</p> <p>図-2.1.54B 中間対傾構軸力の解析の例 (4主1桁の例)</p> <p>①-1 対傾構の要素の解析結果から直接、作用断面力を得ることができる。</p> <p>①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため、格点位置の高さ方向にモデル化することができる。</p> <p>①-3 せん断遅れ等の解析結果について、公称応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p>	<p>1) 各要素における作用応力を直接算出、整理する。</p> <p>①-1 対傾構の要素の解析結果から直接、作用断面力を得ることができる。</p> <p>①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため、格点位置の高さ方向にモデル化することができる。</p> <p>①-3 せん断遅れ等の解析結果について、実態と整合した精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p> <p>③-1 各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。</p> <p>③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、初期不整(初期たわみ、残留応力)、幾何学的非線形、材料的非線形を考慮する必要がある。特に、初期不整については、各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない。</p>	

設計手法			
設計行為項目	従来設計 (格子解析)	せん断ハネル解析による設計	FEM解析による設計
(3) 作用応力度の算出 (4) 許容応力度の算出 (5) 応力度の照査	<p>1) 軸力部材の軸力から作用応力度を算出する。 2) 作用応力度と許容応力度を対比して照査する。</p>	<p>1) 各板組形状の作用応力度を算出する。 2) 作用応力度と許容応力度を対比して照査する。</p>	<p>1) 各要素の作用応力度を処理して公称応力に置換する。 2) 作用応力度と許容応力度を対比して照査する。</p>
許容値 (規格値)	<p>道示Ⅱ3.2.1, 4.1.5, 4.5, 4.6 道示における規格値の対象箇所に対して、道示どおりの作用応力度の算出を行うため、道示の許容応力度を用いて良い。</p>	<p>道示Ⅱ3.2.1, 4.1.5, 4.5, 4.6 従来設計と同様な公称応力としての作用応力度を算出するため、道示の許容応力度を用いて良い。 鉛直荷重に対する荷重分配効果も考慮する場合、主要部材として設計する。</p>	<p>許容値がないことに対する対応 ③-1 各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。 ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない。</p>
(6) 連結の設計	<p>各部材の軸力から必要ボルト本数を決定する。</p>	<p>各部材の軸力から必要ボルト本数を決定する。</p>	<p>1) 各要素の各要素の作用応力を、軸力に変換する。 2) 各部材の軸力から必要ボルト本数を決定する。</p>

2.1.12 横構

設計項目	設計行為	項目
設計方針	<ul style="list-style-type: none"> 地震荷重、風荷重などの水平荷重を支点まで伝達させる。 主桁、床版と一体になり準箱桁を形成し、橋全体のねじり剛性を高める。 架設時の位置決め材および形状保持の役割を果たす。 支間全長にわたり配置し、3主桁以上の場合は2列以上の横構を配置する。 	(1) 荷重強度の計算 (2) 断面力の算出 (3) 作用応力度の算出 (4) 許容応力度の算出 (5) 応力度の照査 (6) 連結の設計
設計フロー	<pre> graph TD START([START]) --> A[荷重強度の計算 (W, EQ)] A --> B[力学モデルの設定] B --> C[断面力算出] C --> D[断面計算] D --> E{応力照査} E -- OK --> F[連結の設計] E -- NG --> D F --> END([END]) Note[許容値: 道示Ⅱ 3.2.1.4] --- E </pre>	

図-2.1.55 横構の設計フロー

設計行為		設計手法	
項目	従来設計 (格子解析)	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
(1) 荷重強度の計算 1) 風荷重 2) 地震荷重	<p>1) 風荷重は、床版が風荷重の $1/2$ を分担すると、下横構には全風荷重の $1/2$ を分担させ、風上側の横構がその全風荷重を分担するように設計する。</p> <p>2) 地震荷重は、床版が地震荷重の $1/2$ を分担すると、下横構には全地震荷重の $1/2$ を分担させる。地震荷重は全面に分布して加わると考えることができるので、2列の下横構がそれぞれ下横構荷重の $1/2$ を負担するとして設計する。</p>	<p>1) 全橋モデルに直接荷重を載荷する。</p> <p>2) 風荷重は、横構の断面力が最大・最小となるように載荷範囲を変化させる。</p> <p>3) 地震荷重は、橋長にわたって載荷する。</p>	<p>1) 全橋モデルに直接荷重を載荷する。</p> <p>2) 風荷重は、横構の断面力が最大・最小となるように載荷範囲を変化させる。</p> <p>3) 地震荷重は、橋長にわたって載荷する。</p>
(2) 断面力の算出 1) トラス部材力の影響線 2) 横構部材力	<p>1) 横構は、全橋モデルとは別途以下のような荷重に対する力学モデルを設定する。</p> <p>2) 各部材の作用断面力を算出する。</p>  <p>図-2.1.56A 横構の力学モデル</p>	<p>1) 全橋モデルにおける横構の要素から、各板組形状の作用断面力を算出する。</p>  <p>図-2.1.56B 横構軸力の解析の例 (4主1桁の例)</p>	<p>1) 各要素における作用応力を直接算出、整理する。</p> <p>①-1 横構の要素の解析結果から直接、作用断面力を得ることができる。</p> <p>①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため、格点位置の高さ方向にモデル化することができる。</p> <p>①-3 せん断遅れ等の解析結果について、実態と整合した精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p> <p>③-1 各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。</p> <p>③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、初期不整 (初期たわみ、残留応力)、幾何学的非線形、材料的非線形を考慮する必要がある。特に、初期不整については、各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない。</p>
	<p>②横構を設計する場合、断面内の高さ方向にモデル化しなければならない。通常、平面格子モデルでは高さ方向のモデル化を行わず、別途計算モデルを作成する。</p>	<p>①-1 横構の要素の解析結果から直接、作用断面力を得ることができる。</p> <p>①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため、格点位置の高さ方向にモデル化することができる。</p> <p>①-3 せん断遅れ等の解析結果について、公称応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p>	

設計手法			
設計行為項目	従来設計 (格子解析)	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
(3) 作用応力度の算出 (4) 許容応力度の算出 (5) 応力度の照査	<p>1) 軸力部材の軸力から作用応力度を算出する。 2) 作用応力度と許容応力度を対比して照査する。</p>	<p>1) 各板組形状の作用応力度を算出する。 2) 作用応力度と許容応力度を対比して照査する。</p>	<p>1) 各要素の作用応力度を処理して公称応力に置換する。 2) 作用応力度と許容応力度を対比して照査する。</p>
許容値 (規格値)	<p>道示Ⅱ3.2.1, 4.1.5, 4.5, 4.6 道示における規格値の対象箇所に対して、道示どおりの作用応力度の算出を行うため、道示の許容応力度を用いて良い。</p>	<p>道示Ⅱ3.2.1, 4.1.5, 4.5, 4.6 従来設計と同様な公称応力としての作用応力度を算出するため、道示の許容応力度を用いて良い。 鉛直荷重に対する荷重分配効果も考慮するため、主要部材として設計する。</p>	<p>許容値がないことに対する対応 ③-1 各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。 ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない。</p>
(6) 連結の設計	<p>横構の軸力から必要ボルト本数を決定する。</p>	<p>横構の軸力から必要ボルト本数を決定する。</p>	<p>1) 横構の各要素の作用応力を、軸力に変換する。 2) 横構の軸力から必要ボルト本数を決定する。</p>

2.1.13 床版の横荷重に対する照査

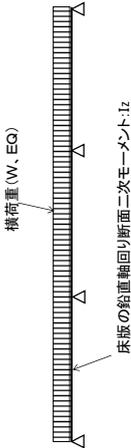
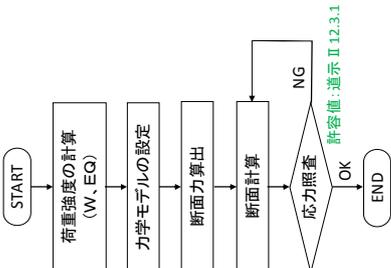
設計行		設計手法		
設計方針	項目	従来設計(格子解析)	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
<p>設計方針</p> <ul style="list-style-type: none"> 風荷重や地震荷重によって床版が橋軸直角方向に曲げられることによって生じる床版の曲げ応力度を照査する。 	<p>(1) 荷重強度の計算</p> <p>1) 風荷重</p> <p>2) 地震荷重</p>	<p>1) 風荷重は、床版が風荷重の1/2を分担するとして計算する。横構が無い場合は全荷重を分担させる。</p> <p>2) 地震荷重は、床版が地震荷重の1/2を分担するとして計算する。横構が無い場合は全荷重を分担させる。</p>	<p>1) 全橋モデルに直接荷重を載荷する。</p> <p>2) 風荷重は、端横桁の断面力が最大・最小となるように載荷範囲を変化させる。</p> <p>3) 地震荷重は、橋長にわたって載荷する。</p>	<p>1) 全橋モデルに直接荷重を載荷する。</p> <p>2) 風荷重は、端横桁の断面力が最大・最小となるように載荷範囲を変化させる。</p> <p>3) 地震荷重は、橋長にわたって載荷する。</p>
<p>(2) 断面力の算出</p>	<p>1) 床版は、全橋モデルとは別途以下のような荷重に対する力学モデルを設定する。</p> <p>2) 各材の作用断面力を算出する。</p>	 <p>図-2.1.58A 横荷重に対する力学モデル</p>	<p>1) 全橋モデルにおける床版の要素から、各部位の作用断面力を算出する。</p>	<p>1) 各要素における作用応力を直接算出、整理する。</p> <p>①-1 床版の要素の解析結果から直接、作用断面力を得ることができる。</p> <p>①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため、主桁や横桁と独立した床版をモデル化することができる。</p> <p>①-3 せん断遅れ等の解析結果について、実態と整合した精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p> <p>③-1 各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。また、公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある。</p> <p>③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、初期不整(初期たわみ、残留応力)、幾何学的非線形、材料的非線形を考慮する必要がある。特に、初期不整については、各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない。</p>
<p>設計フロー</p> 	<p>② 床版の横荷重に抵抗する設計をする場合、主桁や横桁と床版を分離したモデル化をしなければならない。通常は、平面格子モデルでは床版を分離したモデル化を行わず、別途計算モデルを作成する。</p>	<p>図-2.1.58B 地震荷重による床版はり要素の軸力図</p> <p>①-1 床版の要素の解析結果から直接、作用断面力を得ることができる。</p> <p>①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため、主桁や横桁と独立した床版をモデル化することができる。</p> <p>①-3 せん断遅れ等の解析結果について、公称応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p>		

図-2.1.57 床版の横荷重に対する設計フロー

設計行為		設計手法		
設計フロー	項目	従来設計(格子解析)	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
	(3)作用応力度の算出 (4)許容応力度の算出 (5)応力度の照査	1) 床版の鉛直軸回りの断面係数に対して作用応力度を算出する. 2) 作用応力度と許容応力度を対比して照査する.	1) 各部位の作用応力度を算出する. 2) 作用応力度と許容応力度を対比して照査する.	1) 各要素の作用応力度を処理して公称応力に置換する. 2) 作用応力度と許容応力度を対比して照査する.
	許容値 (規格値)	許容値がないことに対する対応 現状では、道示II12.3.1における床版のコンクリートおよび鉄筋の許容応力度で照査する案が考えられる.	許容値がないことに対する対応 現状では、道示II12.3.1における床版のコンクリートおよび鉄筋の許容応力度で照査する案が考えられる.	許容値がないことに対する対応 ③-1 各要素に対して得られる作用応力は、2 次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。 ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない。

2.1.14 たわみ

設計手法			
設計行為項目	従来設計 (格子解析)	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
(1) 仮定剛度と実剛度の比較	主構造部材の仮定剛度 (断面 2 次モーメント) と実剛度との差が 5~10%以内であることを照査する 2.9).	主構造部材の仮定剛度 (断面 2 次モーメント) と実剛度との差が 5~10%以内であることを照査する 2.9). 主構造部材の板要素の仮定剛度 (断面積と断面 2 次モーメント) と実剛度も 5~10%以内であることを照査することも考えられる。 規格値がないことに対する対応 ③部材としての剛度を別途算出しなければならぬ。また、板要素の剛度の規格値を確立する必要がある。	主構造部材の仮定剛度 (断面 2 次モーメント) と実剛度との差が 5~10%以内であることを照査する 2.9). 主構造部材の板要素の仮定剛度 (断面積と断面 2 次モーメント) と実剛度も 5~10%以内であることを照査することも考えられる。 規格値がないことに対する対応 ③解析結果の応力度によって設計することになるので、仮定剛度 (板厚、板幅) と実剛度は一致させる必要がある。
(2) 仮定鋼重と実鋼重の比較	鋼自重の誤差は 5%以下が望ましい 2.9).	鋼自重の誤差は 5%以下が望ましい 2.9).	鋼自重の誤差は 5%以下が望ましい 2.9).
(3) 活荷重たわみの照査	活荷重による最大たわみ量を影響線解析により算出し、道示 II.2.3 の許容値以下であることを照査する。 活荷重による最大たわみ量を影響線解析により算出し、道示 II.2.3 の許容値以下であることを照査する。 主桁のせん断変形によるたわみも考慮されるため、格子解析より値が大きくなる。 許容値がないことに対する対応 ③せん断変形も考慮した許容値の設定をしなければならぬ。現状では、道示 II.2.3 の許容値で照査する案が考えられる。	活荷重による最大たわみ量を影響線解析により算出し、道示 II.2.3 の許容値以下であることを照査する。 主桁のせん断変形によるたわみも考慮されるため、格子解析より値が大きくなる。 許容値がないことに対する対応 ③せん断変形も考慮した許容値の設定をしなければならぬ。現状では、道示 II.2.3 の許容値で照査する案が考えられる。	平面格子骨組モデルで活荷重たわみの影響線を予め算出し、活荷重たわみが最大になる載荷範囲を決定して、活荷重を固定載荷する。その結果が道示 II.2.3 の許容値以下であることを照査する。 主桁のせん断変形によるたわみも考慮されるため、格子解析より値が大きくなる。 許容値がないことに対する対応 ③せん断変形も考慮した許容値の設定をしなければならぬ。現状では、道示 II.2.3 の許容値で照査する案が考えられる。
(4) 製作キャンパバーの設定	仮定剛度と実剛度との差を補正した上で、主桁に死荷重、乾燥収縮、クリープ等によるたわみに対する製作キャンパバーを設定する。	仮定剛度と実剛度との差を補正した上で、主桁に死荷重、乾燥収縮、クリープ等によるたわみに対する製作キャンパバーを設定する。 主桁のせん断変形によるたわみも考慮されるため、格子解析より値が大きくなる。	仮定剛度と実剛度との差を補正した上で、主桁に死荷重、乾燥収縮、クリープ等によるたわみに対する製作キャンパバーを設定する。 主桁のせん断変形によるたわみも考慮されるため、格子解析より値が大きくなる。

2.2 立体ラーメン橋

2.2.1 全体フロー

2.1 節の連続合成 I 桁橋と同様に，立体ラーメン橋についても従来の格子解析による設計フローを基本として，各解析手法を用いた橋梁設計の手続きを比較する。

立体ラーメン橋に関する従来の格子解析を用いた設計フローを図-2.2.1 に示す。立体ラーメン橋は，概略設計において主桁と橋脚の配置，および外形寸法が決まったものと仮定して，まずは鋼床版の床版作用の設計を行う。次に，格子解析モデルを作成し，仮定断面，荷重強度を設定し，解析結果から設計断面力を抽出する。その後，主桁を設計し，主桁の一部として機能する鋼床版については，主桁作用と床版作用の重ね合わせの照査を行う。さらに，橋脚一般部（柱，梁）の設計を行い，その後，隅角部の設計を行う。なお，立体ラーメン橋にも連続合成 I 桁橋と同様に横桁等の部材が存在するが，2.1 節と同様な部材に関する橋梁設計の手続きの比較は本節では省略した。

以下，この設計フローに示した順序で橋梁設計の手続きの比較を行う。

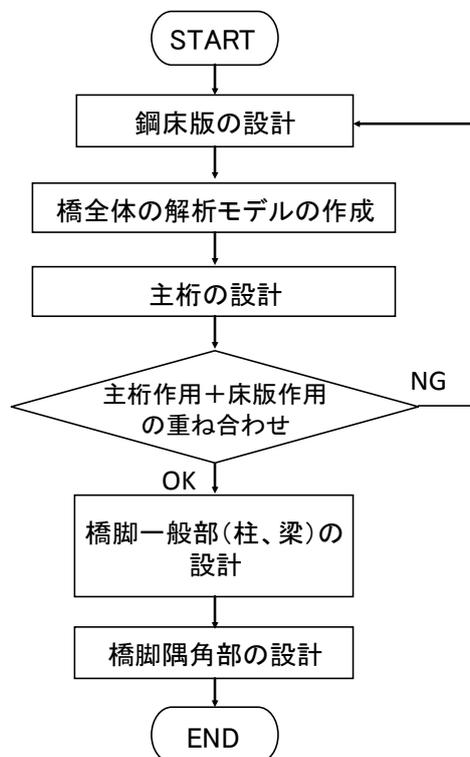


図-2.2.1 立体ラーメン橋の設計フロー

2.2.2 構造解析

設計行為		設計手法	
項目	従来設計（立体骨組解析）	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
(1) 解析モデルの作成 1) 解析モデルの作成と解析の実施	<p>1) 主桁と橋脚とからなる立体骨組モデルを作成する。</p> <p>2) 立体骨組モデルに荷重を載荷し、各部材をモデル化したはり要素の作用断面力、および節点の変位を算出する。</p> <p>3) 橋脚隅角部は、立体骨組解析結果の断面力を用いて、奥村・石沢式²²⁾によって応力計算を行う。</p> <p>4) 床版としての鋼床版は、別途力学モデルを設定して解析する。</p> <p>②ダイアフラムや橋脚隅角部の作用応力に対しては、別途力学モデルを設定して解析しなければならない。</p>	<p>1) 主桁、鋼床版、橋脚、ダイアフラムなど全ての構成部材をせん断パネルと骨組部材とで立体的にモデル化した全橋モデルを作成する。</p> <p>2) 全橋モデルに対して荷重を載荷し、各材片をモデル化した縁要素や一定せん断流パネル要素の作用断面力、および節点の変位を算出する。</p> <p>3) 床版としての鋼床版は、別途力学モデルを設定して解析する。</p> <p>①ダイアフラムや橋脚隅角部の作用応力に対しては、鉛直荷重と同じ全橋モデルを用いて解析する。</p>	<p>1) 主桁、鋼床版、橋脚、ダイアフラムなど全ての構成部材をシェル要素、ソリッド要素、棒要素とで立体的にモデル化した全橋モデルを作成する。</p> <p>2) 全橋モデルに対して荷重を載荷し、各材片をモデル化したシェル要素やソリッド要素の作用応力度、および節点の変位を算出する。</p> <p>3) 床版としての鋼床版は、別途力学モデルを設定して解析する。</p> <p>①ダイアフラムや橋脚隅角部の作用応力に対しては、鉛直荷重と同じ全橋モデルを用いて解析する。</p>
2) 解析に関する構造的力学的理論、および特徴	<p>1) 平面保持が成り立つはり要素を用いた変位法による解析を行う。</p> <p>2) 各要素の作用力は、軸力、曲げモーメント、ねじりモーメント、せん断力などの断面力である。</p> <p>3) 支持条件を、節点に各変位の境界条件として（固定、自由）として設定する。</p> <p>4) せん断応力度分布は、初等はり理論による分布を簡易式（道示II 11.2.2式）で照査してよい。</p> <p>5) せん断遅れによるフランジの曲げ応力分布は、曲げ剛性に対して有効幅を用いて考慮する。</p> <p>6) 算出した作用断面力を用いて、許容応力度と対比が可能なら公称応力としての作用応力度を算出する。</p> <p>②隅角部のようなせん断遅れが大きい構造に対しては、解析結果と実際の作用応力の乖離が大きいために、別途検討したり補正したりしなければならない。 例) 奥村・石沢式を用いた隅角部の応力計算²²⁾</p>	<p>1) せん断応力はせん断パネル、曲げ応力は縁部材の軸力でモデル化・解析を行う。</p> <p>2) 各要素の作用力は、軸力やせん断流などの断面力である。</p> <p>3) せん断パネルと縁部材を組み合わせた断面の中では、平面保持は成立しない。</p> <p>4) ただし、せん断遅れが大きくなり、せん断剛性がある程度確保される構造では、応力分布は平面保持を仮定した断面と大きく変わらない結果になる。</p> <p>5) 支持条件を、節点に各変位の境界条件として（固定、自由）として設定する。</p> <p>6) 算出した作用断面力を用いて、許容応力度と対比が可能なら公称応力としての作用応力度を算出する。</p> <p>①せん断遅れ等の解析結果について、公称応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p>	<p>1) 鋼板で構成される鋼部材の材片をシェル要素で、厚みがある版としての床版はソリッド要素で、主に軸力部材として挙動する横構のような部材を棒要素で、それぞれモデル化して解析を行う。</p> <p>2) 各要素の作用力は応力であり、主応力（最大、最小）や Von-Mises 等価応力の算出が可能である。</p> <p>3) 部材断面で見えた場合、平面保持は成立しない。</p> <p>4) 支持条件を、節点に各変位の境界条件として（固定、自由）として設定する。ただし、支点部は点ではなく、支承の面積を考慮してモデル化する必要がある。</p> <p>5) 算出した作用応力度には 2 次応力も含まれており、許容応力度と対比するために平均化処理を行って公称応力としての作用応力度を求め。</p> <p>③-1 各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。また、公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある。</p> <p>③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、初期不整（初期たわみ、残留応力）、幾何学的非線形、材料的非線形を考慮する必要がある。特に、初期不整については、各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない。</p> <p>③-3 全橋モデルを用いた FEM 解析から全ての部材・部位の設計を行う場合、連結部や補剛材など従来の骨組解析ではモデル化していない部材・部位のモデル化および照査方法を新たに確立する必要がある。</p>

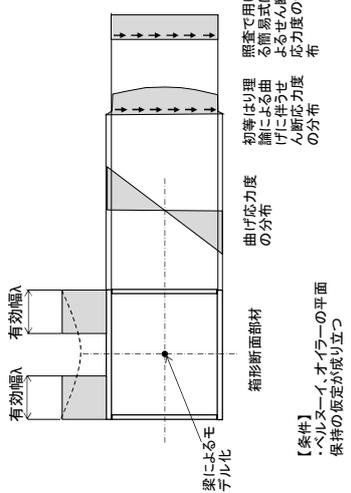
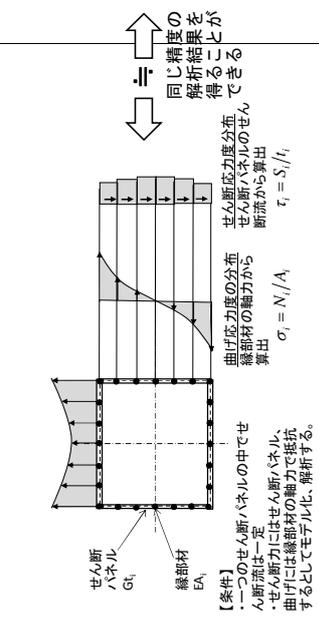


図-2.2A 初等はり理論による応力分布

同じ精度の解析結果を得ることができる



せん断流の程度が小さい場合は、いくつかのせん断パネルと縁部材を要素にまとめて解析しても、解析精度は確保できる。

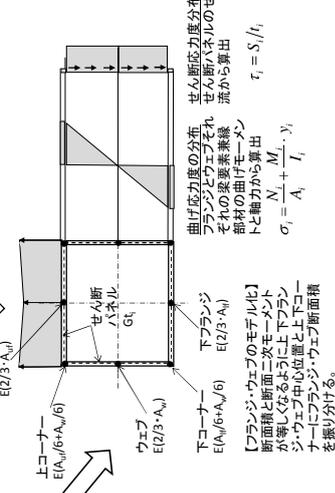


図-2.2B せん断パネル解析における応力分布

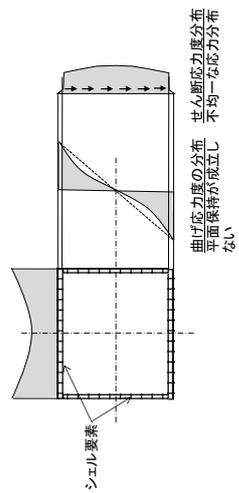


図-2.2C FEMにおける応力分布

同じ精度の解析結果を得ることができる

設計行為項目	従来設計（立体骨組解析）	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
3) 解析モデルの特徴	<p>従来設計（立体骨組解析）</p> <p>・主桁および橋脚を3次元はり要素でモデル化して解析する。</p> <p>①地震時の非線形動的解析を行うことができる。</p> <p>②隅角部のようなせん断遅れが大きい構造に対しては、解析結果と実際の作用応力の乖離が大きいために、別途検討したり補正したりしなければならない。</p>	<p>せん断パネル解析による設計</p> <p>①-1 全橋モデルは、橋脚隅角部を柱軸の直角方向に、または梁軸の直角方向に複数の要素に分割できる。</p> <p>①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため、主桁内のダイヤフラム、横リブ、支点上補剛材などをモデル化できる。</p> <p>①-3 各部材の要素から、各部材の作用断面力を求めることができる。</p> <p>①-4 せん断遅れ等の解析結果について、公称応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p> <p>②解析コードの制約上、通常は、地震時の動的解析は弾性範囲に限られることが多い。</p> <p>要素分割の例を以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・主桁、鋼床版、橋脚、ダイヤフラムなど全ての構成部材をせん断パネルと骨組部材とで立体的にモデル化して解析する。 ・主桁および橋脚の一般部は簡略化した要素分割とし、橋脚隅角部は文献2.4)に従ってモデル化する。 	<p>FEM解析による設計</p> <p>①-1 全橋モデルは、橋脚隅角部を柱軸の直角方向に、または梁軸の直角方向に複数の要素に分割できる。</p> <p>①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため、主桁内のダイヤフラム、横リブ、支点上補剛材などをモデル化できる。</p> <p>①-3 各部材の要素から、各部材の作用断面力を求めることができる。</p> <p>①-4 せん断遅れ等の解析結果について、実態と整合した精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p> <p>②解析コードの制約上、通常は、地震時の動的解析は弾性範囲に限られることが多い。</p> <p>③各要素に対して得られる作用応力は2次元力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。また、公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある。</p> <p>モデル化に用いる要素の例を以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・詳細な応力状態を求めようとする部分をシェル要素、またはソリッド要素を用いて立体的にモデル化し、それ以外の部分は3次元はり要素でモデル化する。

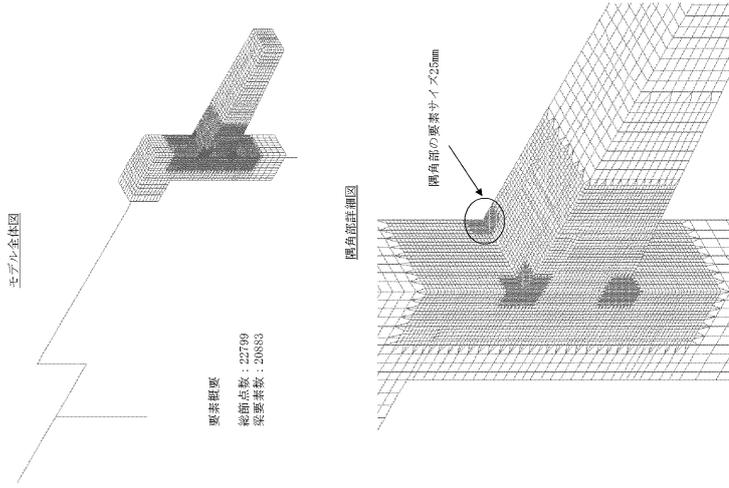
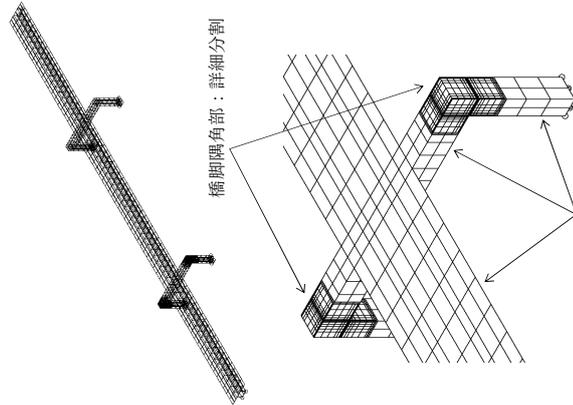


図-2.2.3C FEM 解析モデル
(門型鋼製橋脚の例)



主桁・橋脚一般部：I桁と同程度の分割
図-2.2.3B せん断パネル解析モデル

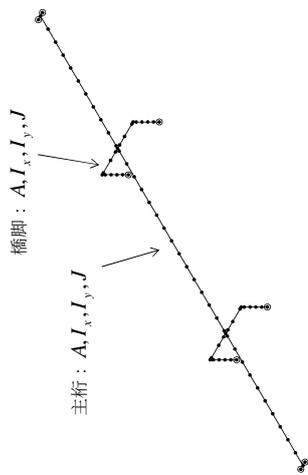


図-2.2.3A 立体骨組解析モデル

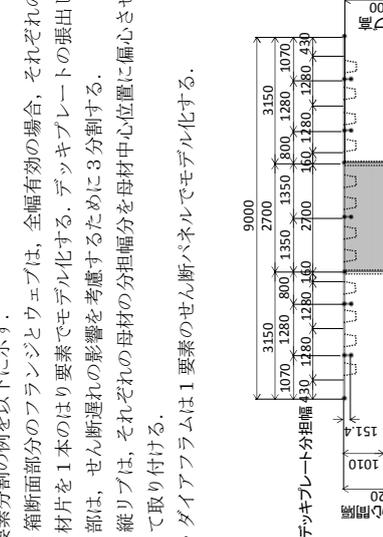
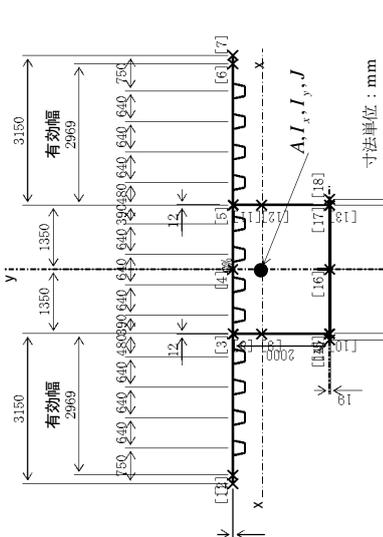
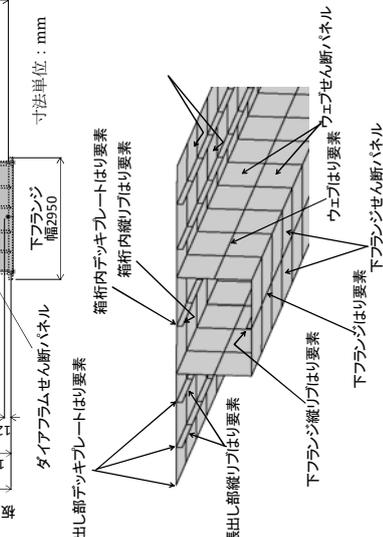
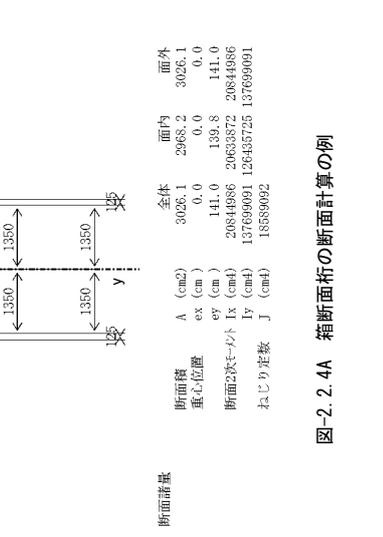
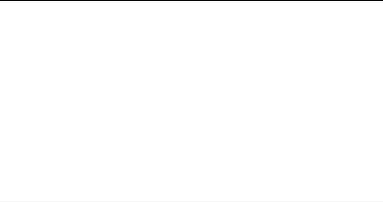
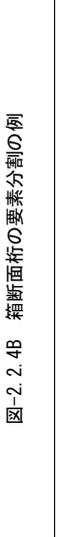
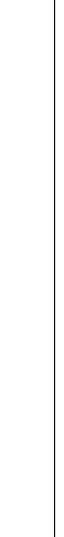
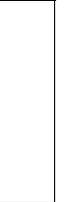
設計行為項目	従来設計 (立体骨組解析)	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
(2) 仮定剛度の決定 1) 主桁	<p>1) 仮定断面を決めて、解析モデルにおける各要素の仮定剛度を設定する。</p> <p>2) 仮定剛度は、曲げ剛性 EI、ねじり剛性 GJ、軸力剛性 EA、ねじり剛性 EI、ねじり剛性 GJ、せん断パネルはせん断剛性 Gt などである。</p> <p>モデル化の例を以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> 鋼床版および下フランジの有効幅を考慮した箱桁の断面計算を行い、図心位置で1本の3次元はり要素(A, J, I_x, I_y)に置換える。 	<p>1) 仮定断面を決めて、解析モデルにおける各要素の仮定剛度を設定する。</p> <p>2) 仮定剛度は、せん断パネルは軸力剛性 EA、曲げ剛性 EI、ねじり剛性 GJ、せん断パネルはせん断剛性 Gt などである。</p> <p>3) 各はり要素の断面定数(A, J, I_x, I_y)とせん断パネルのせん断剛性 Gt を仮定する。</p> <p>4) 横リブ、支点上補剛材などの部材は、各はり要素の断面定数(A, J, I_x, I_y)を計算した上で、縁部材としてモデル化する。</p> <p>要素分割の例を以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> 箱断面部分のフランジとウェブは、全幅有効の場合、それぞれの材片を1本のはり要素でモデル化する。デッキプレートはの張り部は、せん断剛性の影響を考慮するために3分割する。 縦リブは、それぞれの母材の負担幅を母材中心位置に偏心させて取り付ける。 ダイアフラムは1要素のせん断パネルでモデル化する。 	<p>1) 仮定断面を決めて、解析モデルにおける各要素の仮定剛度を設定する。</p> <p>2) 仮定剛度は、シェル要素は板厚 t、ソリッド要素はヤング率 E、棒要素は軸力剛性 EA などである。</p>
断面計量			
断面計量			
断面計量			

図-2.4A 箱断面桁の断面計算の例

図-2.4B 箱断面桁の要素分割の例

図-2.4C シェル要素による箱断面桁の要素分割の例

設計行為項目

従来設計 (立体骨組解析)

モデル化の例を以下に示す。
 ・有効幅を考慮した箱断面の断面計算を行った上で、図心位置で1本の3次元はり要素(A, J, I_x, I_y)に置換える。

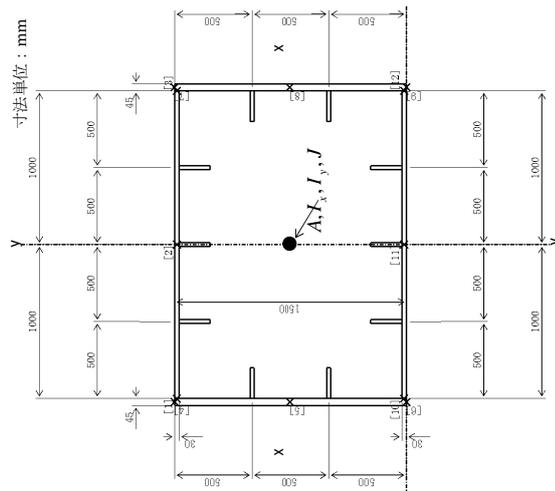


図-2.2.5A 箱断面部材の断面計算の例

設計手法

せん断パネル解析による設計

要素分割の例を以下に示す。
 ・箱断面部分のフランジとウェブは、全幅有効の場合、それぞれ部材を1本のはり要素でモデル化する。
 ・縦リブは、それぞれの母材に取り付け全本数分を一つに代表させた上で、母材中心位置に偏心させて取り付ける。
 ・ダイアフラムは1要素のせん断パネルでモデル化する。

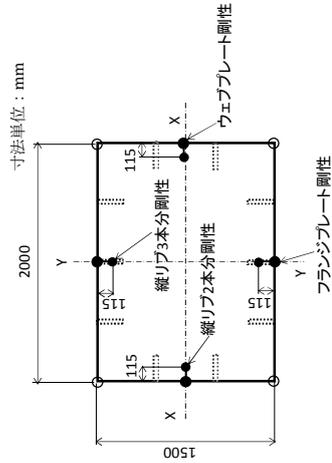


図-2.2.5B 箱断面部材の要素分割の例

FEM解析による設計

モデル化の例を以下に示す。
 ・主桁の局所応力を解析しない場合は、従来設計と同様に箱断面桁を図心位置で1本の3次元はり要素(A, J, I_x, I_y)に置換える場合がある。

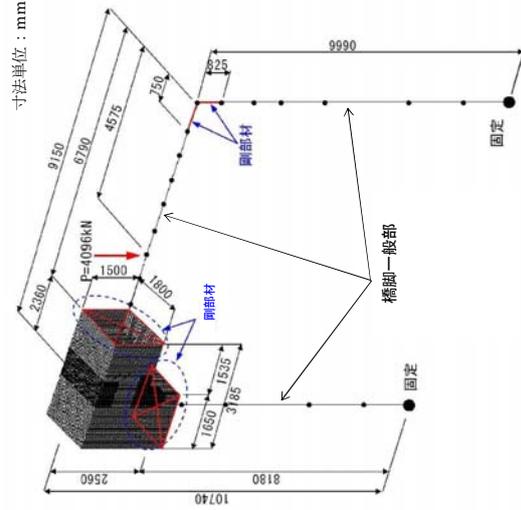
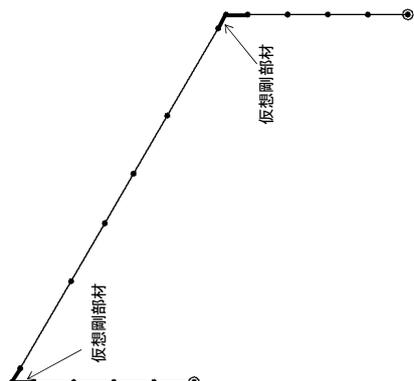
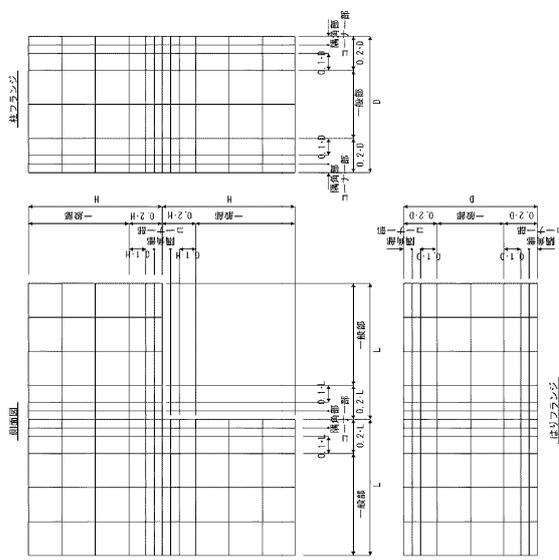
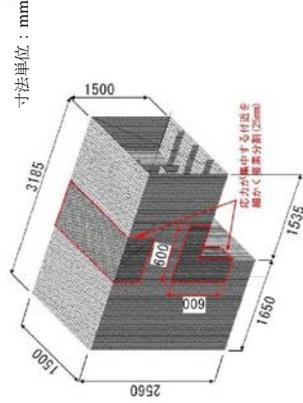
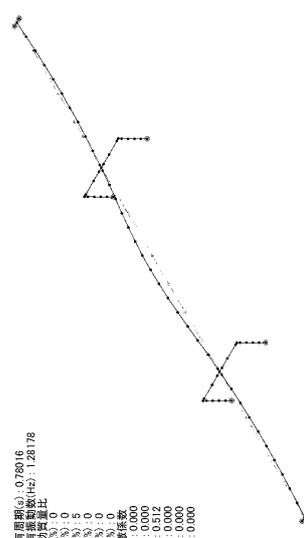
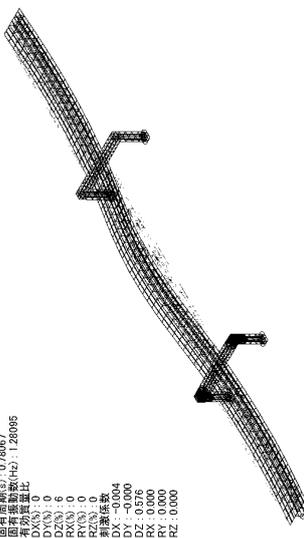
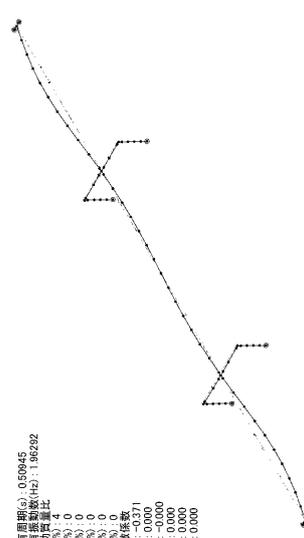
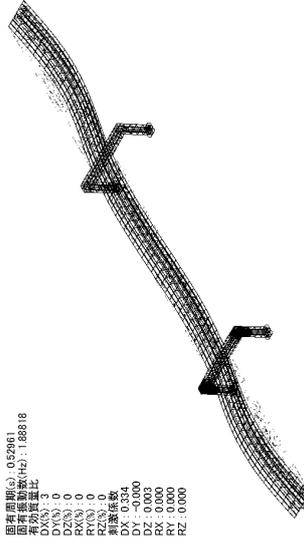


図-2.2.5C FEM解析における橋脚の解析モデルの例 (門型鋼製橋脚の例)

設計行為項目	従来設計 (立体骨組解析)	設計手法 せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
3) 橋脚隅角部	<p>モデル化の例を以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> 隅角部の剛度は、仮想剛部材とする。  <p>図-2.2.6A 隅角部の断面剛度</p>	<p>要素分割の例を以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> 文献(2.4)に従って要素分割する。 母材の板厚を仮定し、縁部材の分担幅と板厚から断面積を計算する。 縦リブは、母材の縁部材に断面積を加算する。  <p>図-2.2.6B 橋脚隅角部の要素分割の例 (2.4)</p>	<p>モデル化の例を以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> 着目する隅角部のフランジ、ウェブ、縦リブおよびダイヤフラムをシェル要素により仮定した板幅と板厚でモデル化する。 応力集中が予測される部位は密な要素分割とする。  <p>図-2.2.6C 隅角部の要素分割の例</p>

設計行為項目	従来設計 (立体骨組解析)	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
(3) 荷重強度の算出 1) 横断面形状 2) 死荷重 3) 活荷重	1) 設計荷重強度を、解析モデルにおける荷重条件として設定する。 2) 荷重条件は、集中荷重、線分布荷重、面分布荷重などに設定される。 3) 活荷重は有効幅員の中で影響線載荷を行う。	1) 設計荷重強度を、解析モデルにおける荷重条件として設定する。 2) 荷重条件は、集中荷重、線分布荷重、面分布荷重などに設定される。 3) 活荷重は有効幅員の中で影響線載荷を行う。	1) 設計荷重強度を解析モデルにおける荷重条件として設定する。 2) 荷重条件は、集中荷重、線分布荷重、面分布荷重などに設定される。 3) 活荷重は、着目要素の着目応力が最も大きい状態を想定して固定載荷を行う。
	寸法単位：mm 	①通常は、各部材にとって最も不利な状況を活荷重の影響線載荷から求めることができる。	<p>載荷点 (床版の車両走行面のFEM節点) に単位荷重を載荷し、着目点 (モデル全節点) および着目量 (変位、直応力、せん断応力) に対するFEM解析を実施し、影響面を作成する。</p> <p>影響面をX方向とY方向にそれぞれ偏微分して極値を求め、0となる点 (極値) を求める。</p> <p>極値のおおよその周辺に対して、p, 荷重をパラメトリックに動かす、最も不利となるし荷重載荷状態を算出する。</p> <p>影響面STEP1で作成した影響線をSTEP3で求めたし荷重載荷状態で積分し、着目量を算出する。</p>
	図-2.2.7A 主桁の横断面形状と荷重強度の例 ①通常は、部材にとって最も不利な状況を活荷重の影響線載荷から求めることができる。	図-2.1.7C FEM解析における活荷重の影響線載荷フロー ②活荷重の載荷は、載荷ケースの選定方法を確立する必要がある。実際には次のような方法が採用する。 ^{2,3)} (方法1) 格子解析を別途実施して、その影響線から活荷重の載荷範囲を設定して、活荷重をFEMモデルに固定載荷する。 (方法2) FEMモデルの車両走行面のFEM節点に単位荷重を載荷して着目量 (変位、直応力、せん断応力) に対する影響面を作成し、その分布形状が極値となる範囲を積分計算して着目量を算出する。	

設計行為項目	従来設計(立体骨組解析)	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
(4) 固有値解析	<p>従来設計(立体骨組解析)</p> <ul style="list-style-type: none"> 地震時の動的解析を行うために、固有値解析を実施する。 固有値解析条件は以下のとおりとする。 <p>計算手法：CQC法 比例減衰タイプ：ひずみエネルギー比例減衰 固有値解析：サブスペース法 モード次数：有効質量の90%以上を目安とすることが多い。</p>  <p>固有周期(s): 0.76916 固有振動数(1/s): 1.28778 有効質量比 DX(N): 0 DY(N): 0 DZ(N): 5 RX(N): 0 RY(N): 0 RZ(N): 0 相関係数 DX: 0.000 DY: 0.000 DZ: 0.512 RX: 0.000 RY: 0.000 RZ: 0.000</p>	<p>せん断パネル解析による設計</p> <ul style="list-style-type: none"> 地震時の動的解析を行うために、固有値解析を実施する。 固有値解析条件は以下のとおりとする。 <p>計算手法：CQC法 比例減衰タイプ：ひずみエネルギー比例減衰 固有値解析：サブスペース法 モード次数：有効質量の90%以上を目安とすることが多い。</p>  <p>固有周期(s): 0.76957 固有振動数(1/s): 1.28695 有効質量比 DX(N): 0 DY(N): 0 DZ(N): 6 RX(N): 0 RY(N): 0 RZ(N): 0 相関係数 DX: -0.004 DY: 0.000 DZ: 0.576 RX: 0.000 RY: 0.000 RZ: 0.000</p>	<p>FEM解析による設計</p> <ul style="list-style-type: none"> 地震時の動的解析を行うために、固有値解析を実施する。 固有値解析条件は以下のとおりとする。 <p>計算手法：CQC法 比例減衰タイプ：ひずみエネルギー比例減衰 固有値解析：サブスペース法 モード次数：有効質量の90%以上を目安とすることが多い。</p>
	<p>図-2.2.8A 1次振動モードの例</p>  <p>固有周期(s): 0.50845 固有振動数(1/s): 1.96792 有効質量比 DX(N): 4 DY(N): 0 DZ(N): 0 RX(N): 0 RY(N): 0 RZ(N): 0 相関係数 DX: -0.371 DY: 0.000 DZ: 0.000 RX: 0.000 RY: 0.000 RZ: 0.000</p> <p>図-2.2.9A 2次振動モードの例</p>	<p>図-2.2.8B 1次振動モードの例</p>  <p>固有周期(s): 0.52961 固有振動数(1/s): 1.88818 有効質量比 DX(N): 3 DY(N): 0 DZ(N): 0 RX(N): 0 RY(N): 0 RZ(N): 0 相関係数 DX: 0.334 DY: -0.000 DZ: 0.000 RX: 0.000 RY: 0.000 RZ: 0.000</p> <p>図-2.2.9B 2次振動モードの例</p>	<p>①材片の局部モードを除いた部材単位以上のモードが抽出できる解析手法を確立する必要がある。</p>
	<p>①通常は、材片の局部モードを除いた部材単位以上のモードのみを抽出できる。</p>	<p>①材片の局部モードを除いた部材単位以上のモードが抽出できる解析手法を確立する必要がある。</p>	<p>①材片の局部モードを除いた部材単位以上のモードが抽出できる解析手法を確立する必要がある。</p>

2.2.3 主桁

設計行為	項目
<p style="text-align: center;">設計フロー</p> <pre> graph TD START([START]) --> A[鋼床版の設計] A --> B[解析モデルの作成] B --> C[仮定断面の決定] C --> D[荷重強度の算出] D --> E[設計断面力] E --> F[横桁・ダイアフラム配置] F --> G[縦リブ・縦リブの決定] G --> H[有効幅の算出] H --> I[断面計算] I --> J{応力照査} J -- OK 重ね合せ 主桁作用+床版作用 σ < σ_a × 1.14 --> K[連結の設計] J -- NG 許容値: 道示 II 3.2.1 --> L[再合わせ] L --> E J -- NG 許容値: 道示 II 9.4.2 --> M[補剛材の設計] M --> N[ダイアフラムの設計] N --> O[疲労設計] O --> END([END]) </pre>	<p>(1) 設計断面力の算出 (2) 床版およびフランジの有効幅の算出 (3) 作用応力度の算出 (4) 許容応力度の算出 (5) 応力度の照査 (6) 主桁作用と床版作用の重ね合わせの照査 (7) ダイアフラムの設計</p>

図-2.10 主桁の設計フロー

設計行為

項目

(1) 設計断面力の算出
1) 断面力図

従来設計 (立体骨組解析)

1) 各要素における曲げモーメントやせん断力などの作用断面力を算出、整理する。

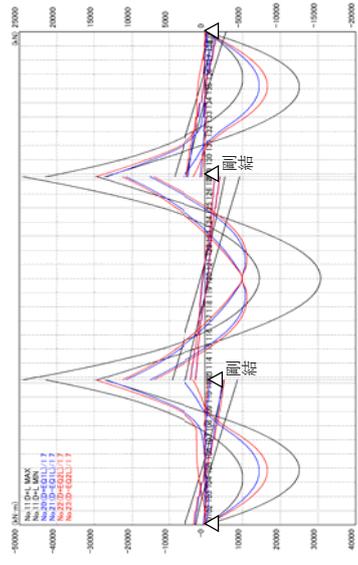


図-2.2.11A 主桁の断面力図の例

①許容応力度と対比するために、通常は、公称応力としての作用断力を算出できるのは要素の作用断面力を解析から得ることができる。

せん断パネル解析による設計

1) 各要素における軸力、曲げモーメント、せん断力などの作用断面力を算出、整理する。
2) 部材を構成する部材要素 (上下フランジ、ウェブ) ごとに整理する。

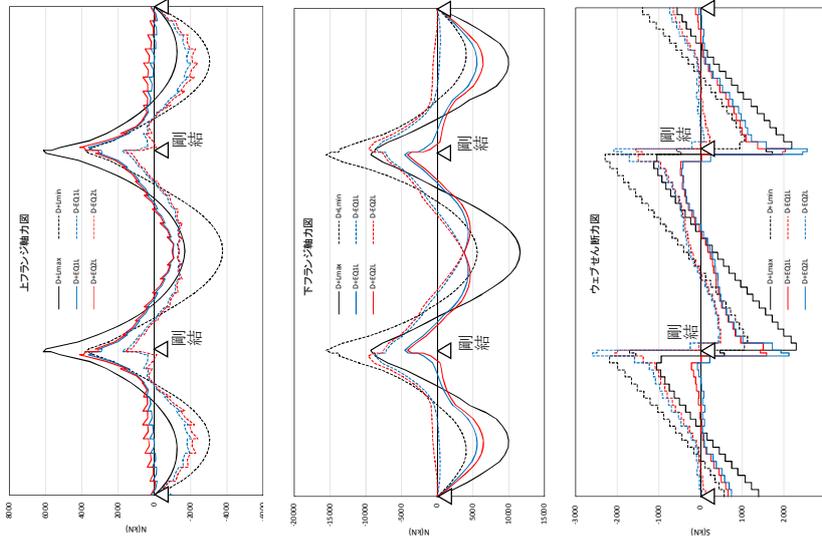
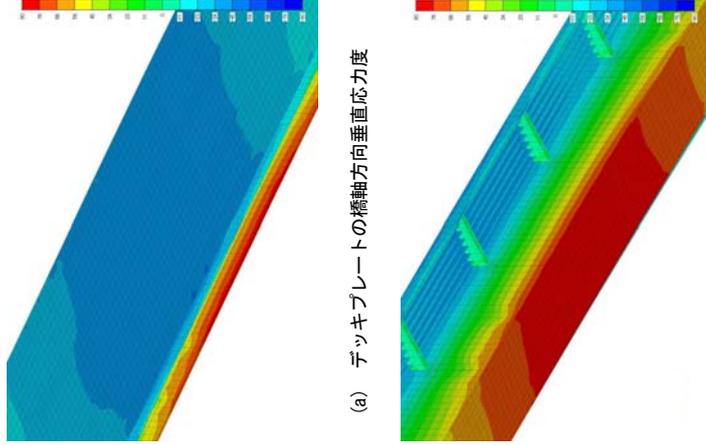


図-2.2.11B 主桁部材要素の断面力図の例

①-1 許容応力度と対比するために、公称応力としての作用断力を算出できるのは要素の作用断面力を解析から得ることができる。
①-2 せん断遅れ等の解析結果について、公称応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。

FEM解析による設計

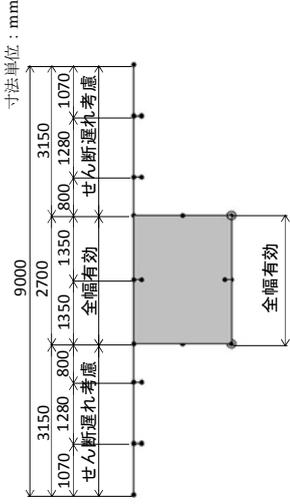
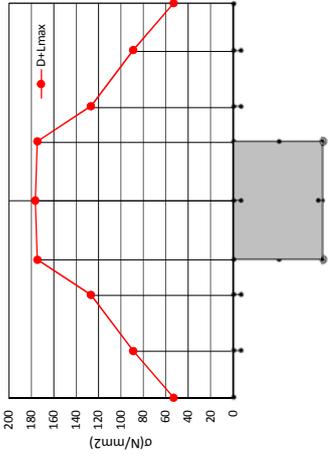
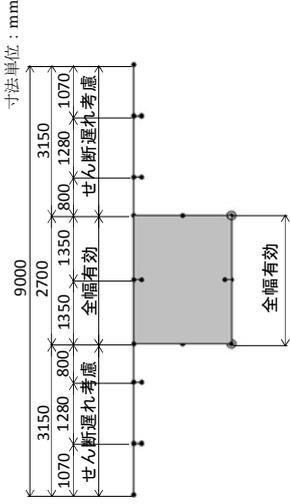
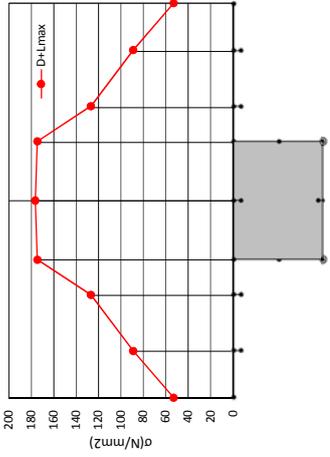
1) 各要素における作用応力分布を直接算出、整理する。



(a) デッキプレート の橋軸方向垂直応力度

(b) 下フランジ、ウェブの橋軸方向垂直応力度
図-2.2.11C FEM解析による箱桁橋の応力分布図の例 (鋼床版箱桁の例)

③-1 各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。また、公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある。
③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、初期不整 (初期たわみ、残留応力)、幾何学的非線形、材料的非線形を考慮する必要がある。特に、初期不整については、各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない。

設計手法		設計項目	
せん断パネル解析による設計		従来設計 (立体骨組解析)	
設計行為項目	(2) 床版およびフランジの有効幅の算出	<p>1) 床版および箱断面のフランジの有効幅を道示Ⅱ.11.3.5の規定により算出する。</p> <p>2) 主桁の等価支間長は道示Ⅱ.表11.3.1に従う。</p> <p>①実態で生じるせん断遅れによる応力分布を直接再現してはいないものの、通常は、設計上安全側に評価できるとみなせる有効幅の概念によりせん断遅れを考慮する。</p>	<p>1) 有効幅の算出は行わずに、2.2.2(1)で作成した全橋モデルを用いて主荷重に対する解析を実施する。</p> <p>①-1 せん断遅れが顕著に現れるフランジは、せん断遅れを適切に再現できる程度にフランジを分割してモデル化することで、有効幅を設定する必要がない。</p> <p>①-2 橋脚横はりとは鋼床版とが一体となったせん断遅れが大きい箇所鋼床版の応力状態が精度良く解析できる。</p> <p>①-3 全橋モデルは、床版やフランジを橋軸直角方向に複数の要素に分割できる。</p> <p>①-4 せん断遅れ等の解析結果について、実態と整合した精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p>
設計項目	せん断パネル解析による設計	<p>1) 有効幅の算出は行わずに、2.2.2(1)で作成した全橋モデルを用いて主荷重に対する解析を実施する。</p> 	<p>①-1 せん断遅れが顕著に現れるフランジは、せん断遅れを適切に再現できる程度にフランジを分割してモデル化することで、有効幅を設定する必要がない。</p> <p>①-2 橋脚横はりとは鋼床版とが一体となったせん断遅れが大きい箇所鋼床版の応力状態が精度良く解析できる。</p> <p>①-3 全橋モデルは、床版やフランジを橋軸直角方向に複数の要素に分割できる。</p> <p>①-4 せん断遅れ等の解析結果について、実態と整合した精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p>
設計項目	せん断パネル解析による設計	<p>1) 有効幅の算出は行わずに、2.2.2(1)で作成した全橋モデルを用いて主荷重に対する解析を実施する。</p> 	<p>①-1 せん断遅れが顕著に現れるフランジは、せん断遅れを適切に再現できる程度にフランジを分割してモデル化することで、有効幅を設定する必要がない。</p> <p>①-2 橋脚横はりとは鋼床版とが一体となったせん断遅れが大きい箇所鋼床版の応力状態が精度良く解析できる。</p> <p>①-3 全橋モデルは、床版やフランジを橋軸直角方向に複数の要素に分割できる。</p> <p>①-4 せん断遅れ等の解析結果について、公称応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p>
設計項目	せん断パネル解析による設計	<p>1) 有効幅の算出は行わずに、2.2.2(1)で作成した全橋モデルを用いて主荷重に対する解析を実施する。</p> 	<p>①-1 せん断遅れが顕著に現れるフランジは、せん断遅れを適切に再現できる程度にフランジを分割してモデル化することで、有効幅を設定する必要がない。</p> <p>①-2 橋脚横はりとは鋼床版とが一体となったせん断遅れが大きい箇所鋼床版の応力状態が精度良く解析できる。</p> <p>①-3 全橋モデルは、床版やフランジを橋軸直角方向に複数の要素に分割できる。</p> <p>①-4 せん断遅れ等の解析結果について、公称応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p>
設計項目	せん断パネル解析による設計	<p>1) 有効幅の算出は行わずに、2.2.2(1)で作成した全橋モデルを用いて主荷重に対する解析を実施する。</p> 	<p>①-1 せん断遅れが顕著に現れるフランジは、せん断遅れを適切に再現できる程度にフランジを分割してモデル化することで、有効幅を設定する必要がない。</p> <p>①-2 橋脚横はりとは鋼床版とが一体となったせん断遅れが大きい箇所鋼床版の応力状態が精度良く解析できる。</p> <p>①-3 全橋モデルは、床版やフランジを橋軸直角方向に複数の要素に分割できる。</p> <p>①-4 せん断遅れ等の解析結果について、公称応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p>

設計行為		設計手法	
項目	従来設計 (立体骨組解析)	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
(4) 許容応力度の算出 (5) 応力度の照査	<p>道示II 3.2.1 より箱形断面の許容曲げ圧縮応力度は、許容軸方向圧縮応力度の上限值となるので、局部座屈に対する許容応力度がこの値よりも小さい場合は、局部座屈に対する許容応力度が許容曲げ圧縮応力度となる。</p> <p>$\sigma_{ca} = \sigma_{cal}$ ここに、σ_{ca} : 許容曲げ圧縮応力度 σ_{cal} : 板の局部座屈に対する許容応力度</p>	<p>道示II 3.2.1 より箱形断面の許容曲げ圧縮応力度は、許容軸方向圧縮応力度の上限值となるので、局部座屈に対する許容応力度がこの値よりも小さい場合は、局部座屈に対する許容応力度が許容曲げ圧縮応力度となる。</p> <p>$\sigma_{ca} = \sigma_{cal}$ ここに、σ_{ca} : 許容曲げ圧縮応力度 σ_{cal} : 板の局部座屈に対する許容応力度</p>	<p>道示II 3.2.1 より箱形断面の許容曲げ圧縮応力度は、許容軸方向圧縮応力度の上限值となるので、局部座屈に対する許容応力度がこの値よりも小さい場合は、局部座屈に対する許容応力度が許容曲げ圧縮応力度となる。</p> <p>$\sigma_{ca} = \sigma_{cal}$ ここに、σ_{ca} : 許容曲げ圧縮応力度 σ_{cal} : 板の局部座屈に対する許容応力度</p>
(6) 主桁作用と床版作用の重ね合わせの照査	<p>鋼床版が主桁の一部として作用するので、主桁作用による応力度と床版作用による応力度を同時に考慮した場合の照査を行う。この時、道示 3.2.3 に規定する許容値を 40%割増できる。</p> <p>道示II 3.2.1, 4.2.2~4.2.4, 9.4.2 道示の適用範囲の橋梁に対して、道示どおりの作用応力度の算出を行うため、道示の許容応力度を用いて良い。</p>	<p>鋼床版が主桁の一部として作用するので、主桁作用による応力度と床版作用による応力度を同時に考慮した場合の照査を行う。この時、道示 3.2.3 に規定する許容値を 40%割増できる。</p> <p>道示II 3.2.1, 4.2.2~4.2.4, 9.4.2 従来設計と同様な公称応力としての作用応力度を算出するため、道示の許容応力度を用いて良い。</p>	<p>鋼床版が主桁の一部として作用するので、主桁作用による応力度と床版作用による応力度を同時に考慮した場合の照査を行う。この時、道示 3.2.3 に規定する許容値を 40%割増できる。</p> <p>許容値がないことに対する対応 ③-1 各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。 ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない。</p>
許容値 (規格値)	<p>道示II 3.2.1, 4.2.2~4.2.4, 9.4.2 道示の適用範囲の橋梁に対して、道示どおりの作用応力度の算出を行うため、道示の許容応力度を用いて良い。</p>	<p>道示II 3.2.1, 4.2.2~4.2.4, 9.4.2 従来設計と同様な公称応力としての作用応力度を算出するため、道示の許容応力度を用いて良い。</p>	<p>許容値がないことに対する対応 ③-1 各要素に対して得られる作用応力は 2 次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。 ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない。</p>

設計行為
項目

(比較検討)

主桁と橋脚の応力度

(1) 主桁応力度

主桁の上下フランジの作用応力度について、骨組解析とせん断パネル解析結果を比較して図-2.2.15~17に示す。荷重ケースとしては、死荷重および断面決定要因となる活荷重に着目した。全体にせん断パネル解析結果がわずかに小さいが、両者は良く一致する。小さくなる理由は、フランジ断面を箱幅中央に集中させて配置するが、それとウェーブとを繋ぐせん断パネル板厚をフランジ厚とするために、この間でせん断変形するためである。

(2) 橋脚応力度

橋脚柱の作用応力度について、骨組解析とせん断パネル解析結果を比較して、図-2.2.18~20に示す。荷重ケースとしては、死荷重と断面決定要因となるタイプII地震時に着目した。

せん断パネル解析結果は、隅角部手前までの作用応力度を示しており、断面のコーナー部と板の中心点の8点について比較する。骨組解析結果とせん断パネル解析結果の番号は断面力の符号の関係で必ずしも対応できていないが、全体として両者の値にはある程度の整合が見られる。

①せん断遅れ等の解析結果について、公称応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。

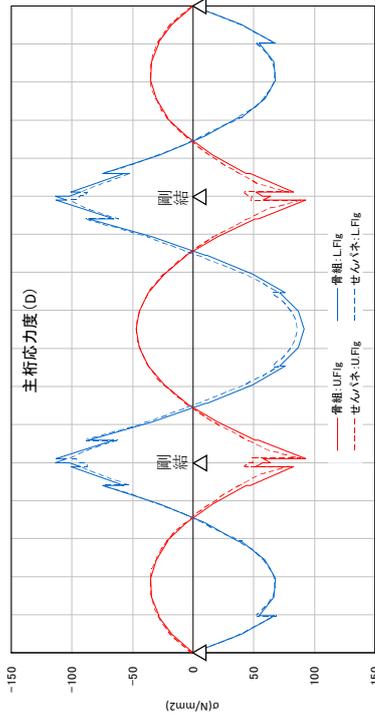
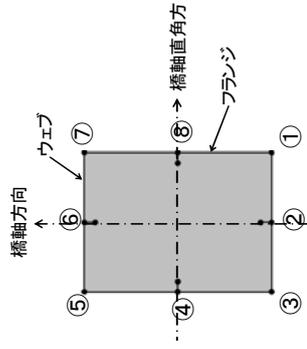


図-2.2.15 主桁の死荷重による応力度の例

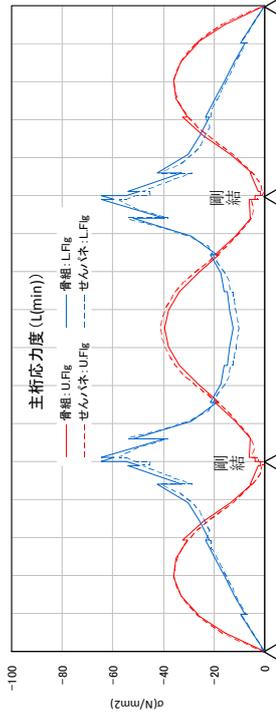


図-2.2.16 主桁の活荷重による最小応力度の例

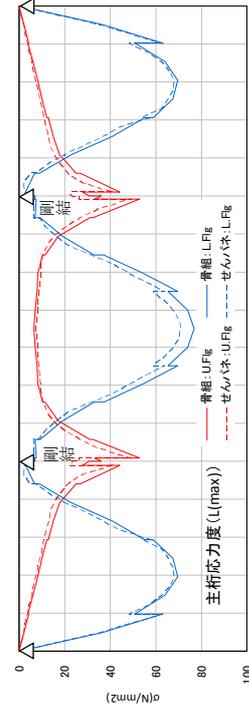


図-2.2.17 主桁の活荷重による最大応力度の例

図-2.2.21 脚柱断面と板要素番号

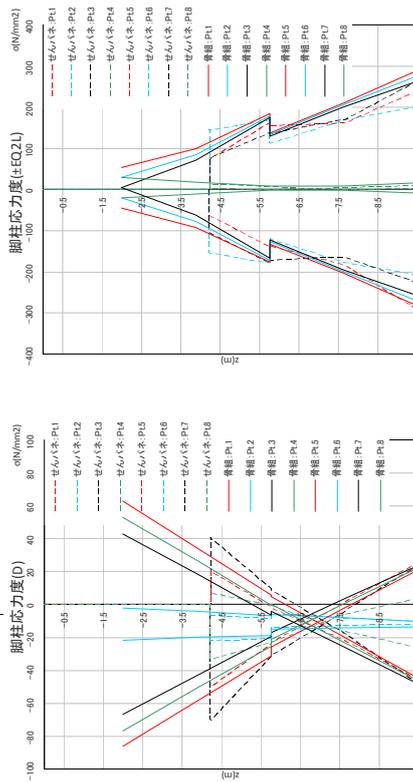


図-2.2.18 脚柱の死荷重による応力度の例
(鋼製橋脚柱部1本の例)

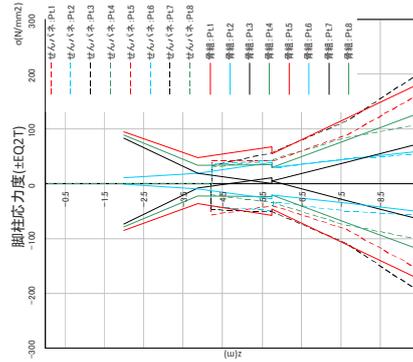


図-2.2.19 脚柱の地震時(E02L)による応力度の例
(鋼製橋脚柱部1本の例)

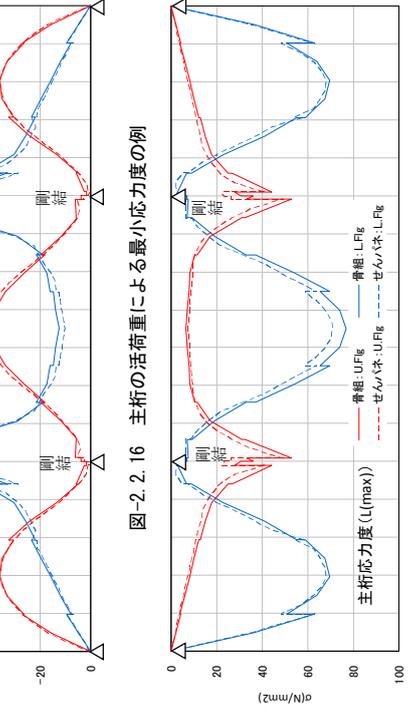


図-2.2.20 脚柱の地震時(E02T)による応力度の例
(鋼製橋脚柱部1本の例)

設計行為項目	従来設計(立体骨組解析)	設計手法 せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
(7) ダイアフラムの設計	<p>・鋼道橋設計便覧^{2.4)}に従って、ダイアフラムの必要剛性を確保した上で、ダイアフラムの応力度照査を行う。</p> <p>1) ダイアフラムの必要剛性</p> $K \geq K_{req}$ $K = 4G \cdot A \cdot t_D$ <p>G : 鋼のせん断弾性係数</p> $K_{req} = 20 \frac{EI_{DW}}{L_D^3}$ <p>L_D : ダイアフラムの必要剛性</p> <p>G : 鋼のせん断弾性係数</p> <p>A : 閉断面部の板厚中心線で囲まれる部分の面積</p> <p>t_D : ダイアフラムの板厚</p> <p>L_D : ダイアフラムの間隔</p> <p>I_{DW} : 箱桁の断面変形に対する慣性矩 (便覧(3.9)式)</p> <p>E : 鋼のヤング係数</p> <p>2) 中間ダイアフラムの応力度照査</p> <p>・充腹板方式の場合は、ダイアフラムに作用するねじりモーメント T_d によって生じる次式の式のせん断応力度に対して照査する。</p> $\tau = \frac{T_d}{2A \cdot t_D} \leq \tau_a$ <p>・ラーメン方式の場合は、下図の計算モデルで照査する。</p> <div data-bbox="893 1344 1085 1881" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="font-size: small;"> T_d : ダイアフラムに作用するねじりモーメント $P = \frac{T_d}{2h}$: 線荷重によるトルク T_a : 剪断面による単位長さ当りのトルク L_D : ダイアフラムの間隔 h, t_a, T_a, h, t_a : 式(3.13)参照 </p> </div>	<p>せん断パネル解析による設計</p> <p>①-1 解析モデルで仮定したダイアフラム配置と剛性(板厚)に対して、ダイアフラムに作用するせん断流と、主桁のそり応力が含まれた形で主桁部材断面力が得られる。</p> <p>①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため、主桁内のダイアフラムの要素をモデル化できる。</p> <p>①-3 ダイアフラムの要素から、ダイアフラム単独のせん断力を直接求めることができる。</p> <p>①-4 せん断遅れ等の解析結果について、公称応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p> <p>1) 中間ダイアフラムの応力度照査</p> <ul style="list-style-type: none"> ・充腹板方式の場合は、ダイアフラムに作用するせん断流から直接せん断応力度を算出して照査する。 $\tau = \frac{SH}{t_D} \leq \tau_a$	<p>FEM解析による設計</p> <p>①-1 解析モデルで仮定したダイアフラム配置と剛性(板厚)に対して、ダイアフラムに作用するせん断流と、主桁のそり応力が含まれた形で主桁部材断面力が得られる。</p> <p>①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため、主桁内のダイアフラムの要素から、ダイアフラム単独のせん断力を直接求めることができる。</p> <p>①-3 ダイアフラムの要素から、ダイアフラム単独のせん断力を直接求めることができる。</p> <p>①-4 せん断遅れ等の解析結果について、実態と整合した精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p> <p>③-1 各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。また、公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある。</p> <p>③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、初期不整(初期たわみ、残留応力)、幾何学的非線形、材料的非線形を考慮する必要がある。特に、初期不整については、各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない。</p>
	<p>鋼床版箱桁部のダイアフラム</p> <p>・ラーメン方式の場合は、矩形ラーメンの骨組をせん断パネルモデルに組み込んで解析して断面力を直接求める。これより、ラーメン部材の応力度を照査する。</p> <p>3) 支点上ダイアフラムの応力度照査</p> <ul style="list-style-type: none"> ・1枚のせん断パネルによる簡略化したモデル化による場合は、全体系の上記せん断流の解析結果+従来設計の応力度照査を行う。 ・支点がダイアフラムの中間にある場合などは、ダイアフラムの断面力が算出できるように要素分割した上で、その結果を用いて応力度照査を行う。 <p>鋼道橋設計便覧 3.3.4</p>	<p>図-2.2.22B ダイアフラムのせん断流</p> <p>(図-2.2.23B(a)のように1枚でモデルした鋼床版箱桁部のダイアフラム)</p> <p>①ウェーブ上で支持される場合 (a) ②中間に支点がある場合 (b)</p> <p>図-2.2.23B 支点上ダイアフラムの要素分割</p> <p>許容値がないことに対する対応</p> <p>③-1 各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。</p> <p>③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない。</p>	
許容値(規格値)	鋼道橋設計便覧 3.3.4	鋼道橋設計便覧 3.3.4	鋼道橋設計便覧 3.3.4

ダイアフラムを含む箱断面桁のせん断パネル解析で、箱桁の断面変形によるそり応力度が正しく求められるかを確認する。文献2.10)の単純支持箱桁にずり荷重を載荷して、Beamアナロジとブロック有眼要素法との結果を比較した計算例に対して、せん断パネル解析結果を比較する。

計算例は図-2.2.25 (文献2.10)のFig.5)に示す単純支持された矩形箱桁にずり荷重を載荷したもので、中間ダイアフラムの板厚は0.1cmと1.0cmの2種類となる。これに対してせん断パネルモデルは、右図のようにフランジとウェブをそれぞれ1枚の板要素で置き換えた解析モデルで、ダイアフラムは8箇点のせん断パネル1要素でモデル化する。ダイアフラムのせん断パネルの板厚は実板厚とするが、フランジとウェブの板厚は実際より大きくする。これは、Beamアナロジでは外板のせん断変形の影響を無視するので、それと合わせるためである。

箱桁コーナー部でのそり応力度の分布図を図-2.2.26, 27 (文献2.10)のFig.7, 8)に示すが、せん断パネルモデルによる解析結果は、論文で解析された結果とよく整合する。

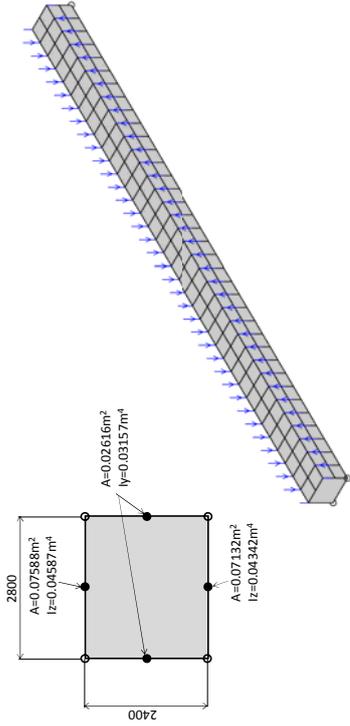


図-2.2.24B 箱桁のみをモデル化したせん断パネルモデル

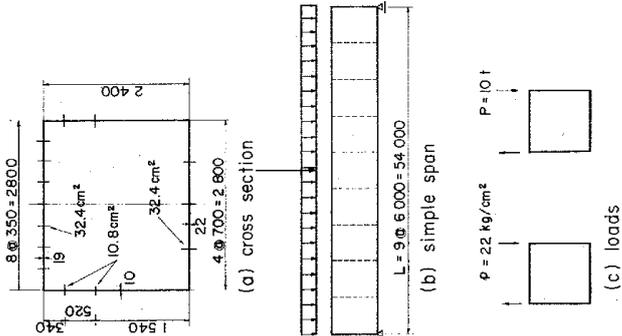


Fig. 5 Model Girder (Type 1)

図-2.2.25B 断面変形によるそり応力度を算出する箱桁

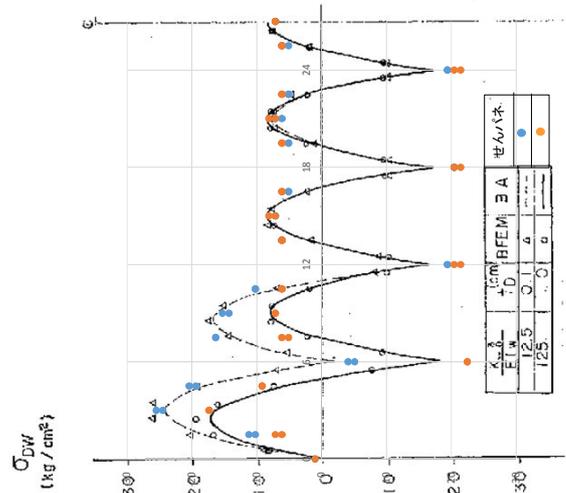


Fig. 7 Comparison between BA and BFEM Solutions (Type 1, uniform load)

図-2.2.26B そり応力度の算出例 (その1)

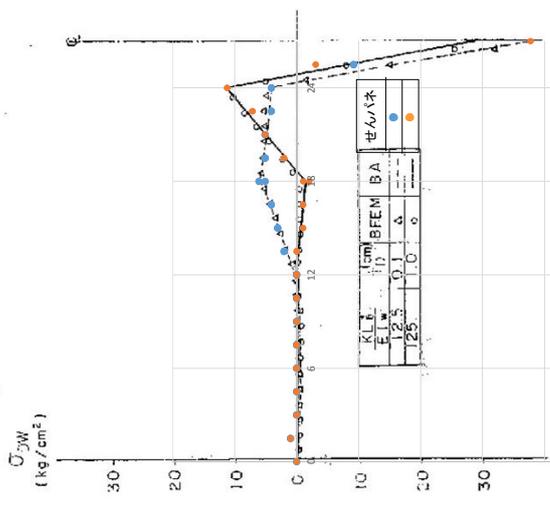


Fig. 8 Comparison between EA and BFEM Solutions (Type 1, concentrated load)

図-2.2.27B そり応力度の算出例 (その2)

2.2.4 橋脚

設計行 為	項目
<p style="text-align: center;">設計フロー</p>	<p>(1) 設計断面力の算出 (2) 一般部の設計 1) 有効座屈長の決定 2) 有効幅の算出 3) 作用応力度の算出 4) 許容応力度の算出 5) 応力度の照査 (3) 隅角部の設計 1) 作用応力度の算出 2) 許容応力度の算出 3) 応力度の照査</p>

図-2.2.28 橋脚の設計フロー

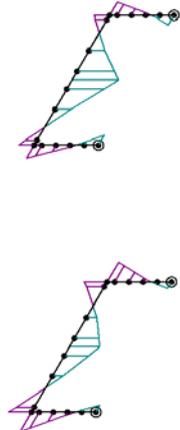
設計行為

項目

(1) 設計断面力の算出
1) 断面力図

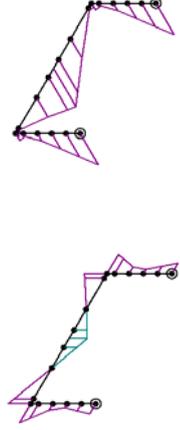
従来設計 (立体骨組解析)

1) 各要素における曲げモーメントやせん断力などの作用断面力を算出、整理する。



(a) D+Lmax

(b) D+Lmin



(c) D+EQ2T

(d) D+EQ2L

図-2.2.29A 橋脚の曲げモーメント図の例

せん断パネル解析による設計

1) 各要素における軸力、曲げモーメント、せん断力などの作用断面力を算出、整理する。

2) 部材を構成する部材要素 (フランジ、ウェブ) ごとに整理する。

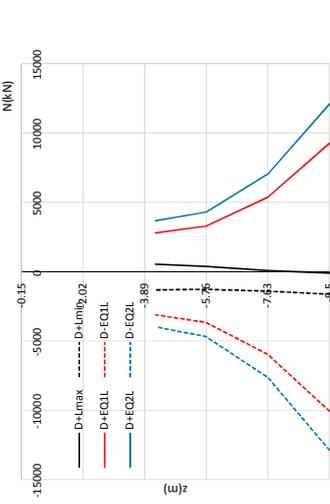


図-2.2.29B 鋼製橋脚柱ウェブの軸力図の例

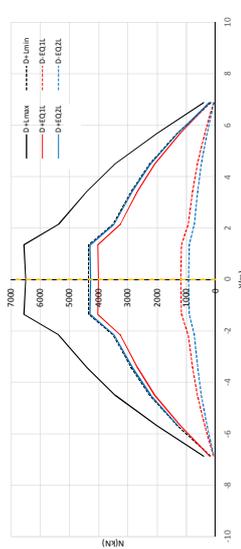


図-2.2.299 鋼製橋脚横はり下フランジの軸力図の例

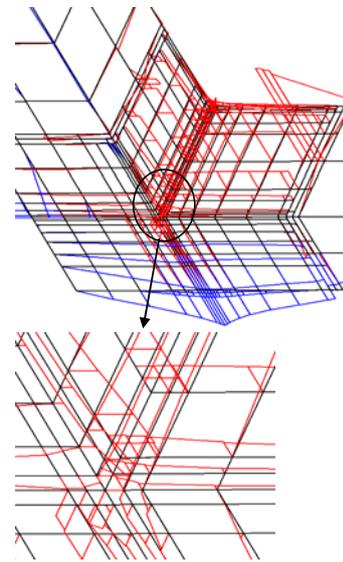


図-2.2.300 隅角部はり下フランジの垂直応力度コンター図の例

設計手法

FEM解析による設計

1) 各要素における作用応力度を直接算出、整理する。

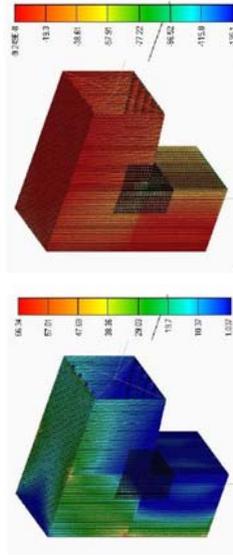


図-2.2.29C 隅角部主応力度のコンター図の例

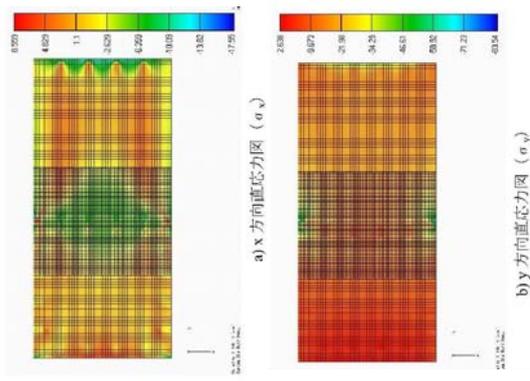
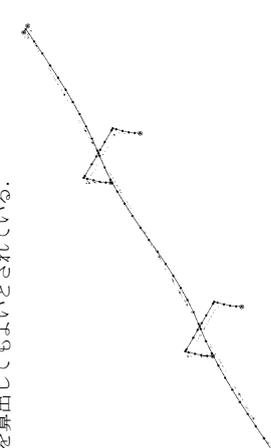
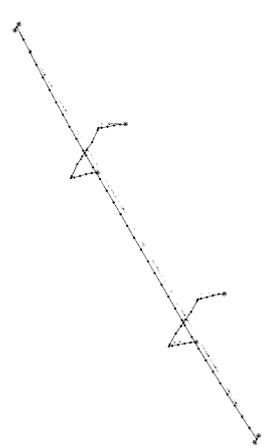
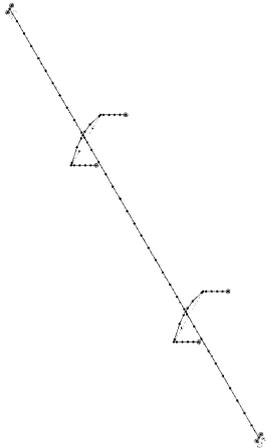
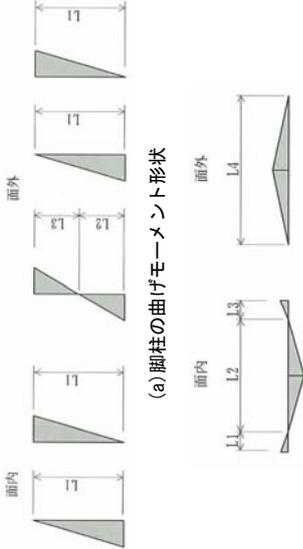
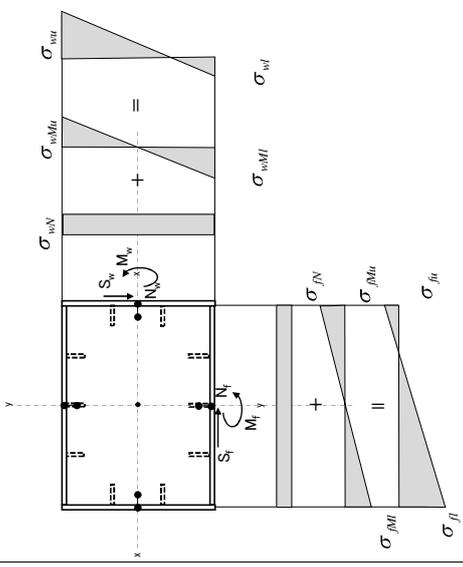


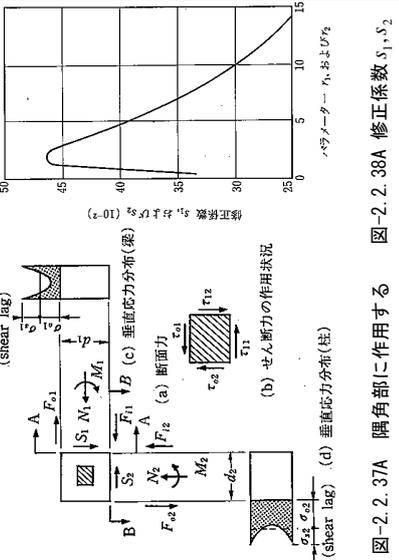
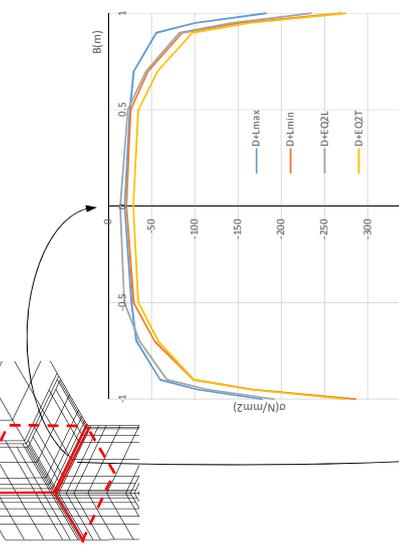
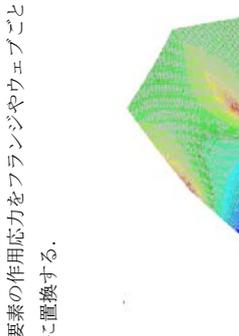
図-2.2.300 隅角部はり下フランジの垂直応力度コンター図の例

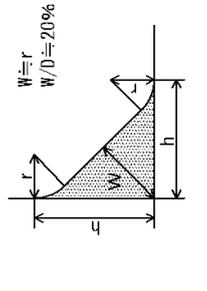
設計行為 項目	設計手法		
	従来設計（立体骨組解析）	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
(2)一般部の設計 1)有効座屈長の決定	<p>従来設計（立体骨組解析）</p> <p>1) 脚柱の有効座屈長は、道示Ⅱ16.5.2に従い、橋軸方向は$L_{d,c} = 2H$、橋軸直角方向は$L_{r,c} = 1.5H$とする。</p> <p>なお、道示Ⅱ16.5.2では、構造全体系の弾性固有値解析を行って有効座屈長を算出してもよいとされている。</p>  <p>図-2.32A 1次モード・脚柱面外座屈の例</p>	<p>せん断パネル解析による設計</p> <p>1) 脚柱の有効座屈長は、道示Ⅱ16.5.2に従い、橋軸方向は$L_{d,c} = 2H$、橋軸直角方向は$L_{r,c} = 1.5H$とする。</p> <p>なお、道示Ⅱ16.5.2では、構造全体系の弾性固有値解析を行って有効座屈長を算出してもよいとされている。</p> <p>①材片の局部モードを除いた部材単位以上のモードの抽出手法を確立する必要がある。</p>	<p>FEM解析による設計</p> <p>1) 脚柱の有効座屈長は、道示Ⅱ16.5.2に従い、橋軸方向は$L_{d,c} = 2H$、橋軸直角方向は$L_{r,c} = 1.5H$とする。</p> <p>なお、道示Ⅱ16.5.2では、構造全体系の弾性固有値解析を行って有効座屈長を算出してもよいとされている。</p> <p>①材片の局部モードを除いた部材単位以上のモードの抽出手法を確立する必要がある。</p>
	 <p>図-2.33A 5次モード・脚柱面内座屈の例</p>		
	 <p>図-2.34A 8次モード・横はり面外座屈の例</p> <p>①通常は、材片の局部モードを除いた部材単位以上のモードのみを抽出できる。</p>		

設計行為項目	従来設計 (立体骨組解析)	設計手法	FEM解析による設計
2)有効幅の算出	<p>1) 箱断面のフランジの有効幅を道示Ⅱ.11.3.5の規定により算出する。</p> <p>2) 橋脚の等価支間長は下図のように曲げモーメントの分布形状から決定する。</p>  <p>(a) 脚柱の曲げモーメント形状</p> <p>(b) 横ばりの曲げモーメント形状</p> <p>図-2.2.35A 橋脚の曲げモーメント形状と等価支間長</p>	<p>せん断パネル解析による設計</p> <p>1) 有効幅の算出は行わずに、2.2.2(1)で作成した全橋モデルを用いて主荷重に対する解析を実施する。</p> <p>①-1 せん断遅れが顕著に現れるフランジは、せん断遅れを適切に再現できる程度にフランジを分割してモデル化することで、有効幅を設定する必要がない。</p> <p>①-2 橋脚横ばりと鋼床版とが一体となったせん断遅れが大きい箇所の鋼床版の応力状態が精度良く解析できる。</p> <p>①-3 全橋モデルは、床版やフランジを橋軸直角方向に複数の要素に分割できる。</p> <p>①-4 せん断遅れ等の解析結果について、公称応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p>	<p>FEM解析による設計</p> <p>1) 有効幅の算出は行わずに、2.2.2(1)で作成した全橋モデルを用いて主荷重に対する解析を実施する。</p> <p>①-1 せん断遅れが顕著に現れるフランジは、せん断遅れを適切に再現できる程度にフランジを分割してモデル化することで、有効幅を設定する必要がない。</p> <p>①-2 橋脚横ばりと鋼床版とが一体となったせん断遅れが大きい箇所の鋼床版の応力状態が精度良く解析できる。</p> <p>①-3 全橋モデルは、床版やフランジを橋軸直角方向に複数の要素に分割できる。</p> <p>①-4 せん断遅れ等の解析結果について、実態と整合した精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p>

設計行為項目	従来設計（立体骨組解析）	設計手法 せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
3) 作用応力度の算出	<p>1) 軸力による垂直応力度は、全断面有効として算出する。</p> <p>2) 曲げモーメントによる垂直応力度は、平面保持が成り立つとして二軸方向の曲げに対して（道示II11.2.1）式により算出する。この時の断面二次モーメントはフランジの有効幅を考慮したものとす</p> <p>る。</p> <p>3) せん断応力度は、せん断の大部分がウェブで受け持たれ、ウェブ内にほぼ均一に分布するとして（道示II11.2.2）式により算出する。</p>	<p>1) 要素ごとの軸力と曲げモーメントから垂直応力度を算出する。</p> <p>2) 要素ごとのせん断力からせん断応力度を直接算出する。</p>	<p>1) 各要素の作用応力をフランジやウェブごとに平均化して公称応力に置換する。</p> <p>③-1 各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。また、公称応力を求めるための処理方法を確立する必要がある。</p> <p>③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、初期不整（初期たわみ、残留応力）、幾何学的非線形、材料的非線形を考慮する必要がある。特に、初期不整については、各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない。</p>
$\sigma = \pm \frac{N}{A} \pm \frac{M_x}{I_x} \cdot y \pm \frac{M_y}{I_y} \cdot x$ $\tau = \frac{S_x}{A_{wx}} + \frac{S_y}{A_{wy}} + \frac{T}{2Ft}$	<p>ここで、σ：垂直応力度 N, M_x, M_y：x軸・y軸回りの曲げモーメント A：断面積 I_x, I_y：x軸・y軸回りの断面二次モーメント x, y：x方向・y方向縁端距離 τ：せん断応力度 S_x, S_y：x方向・y方向のせん断力 T：ねじりモーメント A_{wx}, A_{wy}：x方向・y方向ウェブの断面積 F：閉断面面積 t：板厚</p>	$\sigma_i = \sigma_{iN} + \sigma_{iM} = \frac{N_i}{A_i} + \frac{M_i}{I_i} \cdot y_i$ $\tau = \frac{S_i}{A_i}$	
図-2.2.36A	橋脚断面と断面力	橋脚断面を構成する板要素の垂直応力度	
ここで、	N_i ：板要素の軸力 A_i ：板要素の断面積 M_i ：板要素の曲げモーメント I_i ：板要素の断面二次モーメント y_i ：板要素の重心位置からの縁端距離 S_i ：板要素のせん断力		
①許容応力度と対比するために、通常は、公称応力としての作用応力を算出できるのはり要素の作用断面力を解析から得ることができる。	①許容応力度と対比するために、公称応力としての作用応力を算出できる縁要素の作用断面力を解析から得ることができる。	①-1 許容応力度と対比するために、公称応力としての作用応力を算出できる縁要素の作用断面力を解析から得ることができる。	①-2 せん断遅れ等の解析結果に対して、公称応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。

設計行為		設計手法	
項目	従来設計(立体骨組解析)	せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
4)許容応力度の算出 5)応力度の照査	<p>許容軸方向引張応力度および許容軸方向圧縮応力度は道示Ⅱ 3.2.1による。許容軸方向圧縮応力度は、局部座屈を考慮しない柱としての許容軸方向圧縮応力度と部材を構成する板の局部座屈に対する許容応力度から算出する。</p> $\sigma_{ca} = \sigma_{avg} \cdot \sigma_{cal} / \sigma_{c60}$ <p>ここに、σ_{ca}：許容軸方向圧縮応力度 σ_{avg}：局部座屈を考慮しない許容軸方向圧縮応力度で、柱断面の有効座屈長と断面二次半径から求める。 σ_{cal}：板の局部座屈に対する許容応力度 σ_{c60}：許容軸方向圧縮応力度の上限値</p>	<p>許容軸方向引張応力度および許容軸方向圧縮応力度は道示Ⅱ 3.2.1による。許容軸方向圧縮応力度は、局部座屈を考慮しない柱としての許容軸方向圧縮応力度と部材を構成する板の局部座屈に対する許容応力度から算出する。</p> $\sigma_{ca} = \sigma_{avg} \cdot \sigma_{cal} / \sigma_{c60}$ <p>ここに、σ_{ca}：許容軸方向圧縮応力度 σ_{avg}：局部座屈を考慮しない許容軸方向圧縮応力度で、柱断面の有効座屈長と断面二次半径から求める。 σ_{cal}：板の局部座屈に対する許容応力度 σ_{c60}：許容軸方向圧縮応力度の上限値</p>	<p>許容軸方向引張応力度および許容軸方向圧縮応力度は道示Ⅱ 3.2.1による。許容軸方向圧縮応力度は、局部座屈を考慮しない柱としての許容軸方向圧縮応力度と部材を構成する板の局部座屈に対する許容応力度から算出する。</p> $\sigma_{ca} = \sigma_{avg} \cdot \sigma_{cal} / \sigma_{c60}$ <p>ここに、σ_{ca}：許容軸方向圧縮応力度 σ_{avg}：局部座屈を考慮しない許容軸方向圧縮応力度で、柱断面の有効座屈長と断面二次半径から求める。 σ_{cal}：板の局部座屈に対する許容応力度 σ_{c60}：許容軸方向圧縮応力度の上限値</p>
許容値 (規格値)	<p>道示Ⅱ 3.2.1, 4.2.2~4.2.4 道示の適用範囲の橋梁に対して、道示どおりの作用応力度の算出を行うため、道示の許容応力度を用いて良い。</p>	<p>道示Ⅱ 3.2.1, 4.2.2~4.2.4 従来設計と同様な公称応力としての作用応力度を算出するため、道示の許容応力度を用いて良い。</p>	<p>許容値がないことに対する対応 ③-1 各要素に対して得られる作用応力は2次応力も含まれるため、許容応力度と対比するための処理を行わなければならない。 ③-2 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、一定の安全率を確保した許容値を設定しなければならない。</p>

設計行為項目	従来設計（立体骨組解析）	設計手法 せん断パネル解析による設計	FEM解析による設計
(3) 隅角部の設計 1) 作用応力度の算出	<p>従来設計（立体骨組解析）</p> <p>1) 奥村・石沢式(2.2)を用いて隅角部のシェアラグによる応力度を計算する。</p> <p>2) 隅角部に作用する設計断面力は、立体骨組モデルの解析結果による。</p> <p>・軸力と曲げモーメントによる垂直応力度</p> $\sigma_{s1} = \frac{M_1}{W_1} \cdot \frac{N_1}{A_1}, \quad \sigma_{s1} = \frac{M_1}{W_1} \cdot \frac{N_1}{A_1}$ $\sigma_{s2} = \frac{M_2}{W_2} \cdot \frac{N_2}{A_2}, \quad \sigma_{s2} = \frac{M_2}{W_2} \cdot \frac{N_2}{A_2}$ <p>ここで、A_1, A_2：はりあるいは柱の断面係数 W_1, W_2：はりあるいは柱の断面係数 M_1, M_2：シェアラグによる応力度</p> $\sigma_{s1} = \frac{F_{i2}}{A_{w1}} \cdot \frac{b}{d_1} \cdot s_1, \quad \sigma_{s2} = \frac{F_{i1}}{A_{w2}} \cdot \frac{b}{d_2} \cdot s_2$ <p>ただし、修正係数s_1, s_2は、次のパラメータr_1, r_2に関する図表から求める。</p> $r_1 = \frac{6A_{f1}}{A_{w1}}, \quad r_2 = \frac{6A_{f2}}{A_{w2}}$ <p>ここで、A_{f1}, A_{f2}：はりと柱のフランジ断面積（平均値） A_{w1}, A_{w2}：はりと柱のウェブ断面積 b：ウェブ間隔</p>  <p>(a) 垂直応力分布(梁) (b) せん断力の作用状況 (c) せん断力の作用状況 (d) 垂直応力分布(柱)</p>	<p>せん断パネル解析による設計</p> <p>1) 要素ごとの軸力と曲げモーメントから垂直応力度を算出する。</p> <p>2) 要素ごとのせん断力からせん断応力度を直接算出する。</p> <p>ここで、N_i：縁部材の軸力 A_i：縁部材の断面積 SH_i：せん断パネルのせん断流 t_i：せん断パネルの板厚</p> $\sigma_i = \frac{N_i}{A_i}$ $\tau_i = \frac{SH_i}{t_i}$  <p>(a) 隅角部の変形と垂直応力度 (b) 横はり下フランジの垂直応力度</p>	<p>FEM解析による設計</p> <p>1) 各要素の作用応力をフランジやウェブごとに平均化して公称応力度に置換する。</p> 
1) 隅角部の設計 2) 作用応力度の算出	<p>図-2.2.37A 隅角部に作用する断面力と応力度(2.2)を求めるときの図表</p> <p>図-2.2.38A 修正係数s_1, s_2を求めるための図表(2.2)</p>	<p>図-2.2.37B 隅角部フランジの垂直応力度分布の例</p> <p>(a) 横はり下フランジ (b) 脚柱内側フランジ</p>	<p>図-2.2.37C 隅角部のFEM解析結果のコンター図の例</p>

設計行為項目	従来設計 (立体骨組解析)	設計手法	FEM解析による設計
2) 許容応力度の算出	1) 隅角部の許容応力度について、道示に具体的な値は示されていないが、都市高速道路路会社の設計基準が準用される。これによると、垂直応力度については道示Ⅱ3.2.1をそのまま適用し、せん断応力度については垂直応力度の許容値を基準に次のように規定される。 首都高速道路会社： $\tau_a \leq 0.45\sigma_a$ ^{2.11)} 阪神高速道路会社： $\tau_a \leq 0.52\sigma_a$ ^{2.12)} また、曲げとせん断の合成応力度の照査式は、割増1.2を考慮していない。 $\left(\frac{\sigma}{\sigma_a}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_a}\right)^2 \leq 1.0$	せん断パネル解析による設計 1) 従来設計と同様に許容応力度を算出する。  図-2.2.39B フィレット構造と形状 ^{2.11)}	1) 従来設計と同様に許容応力度を算出する。  図-2.2.39B フィレット構造と形状 ^{2.11)}
3) 応力度の照査	③奥村・石沢式 ^{2.2)} の算出仮定は、はり断面は左右対称ではり長さにわたって一定、荷重はウェブの上下縁に作用しその方向はウェブに平行で断面において左右対称など、ラーメン面内の作用力だけを考慮したもので、断面が左右非対称や、ラーメン面外荷重(ねじり、面外曲げ)は考慮されていないため、適用範囲が限定的である。	①-1 隅角部コーナー部のウェブにフィレットを設けずに解析すること、従来設計のせん断遅れ以上の大きな応力度となる。一方、フィレットを設けた解析を行うと小さくなる。 ①-2 上図の形状のフィレットを設けることが都市高速道路路会社の設計基準に規定されており、道示Ⅱ16.10にも解説があるので、実構造にはフィレットが設けられることになる。 ①-3 解析においてフィレットをどのように取り扱うか、また、フィレットを設けた場合も、フィレット縁端に高い応力集中が生じることが予想されるので、これに対する許容応力度をどのように設定するかが課題である ^{2.13)} 。	①-1 隅角部コーナー部のウェブにフィレットを設けずに解析すること、従来設計のせん断遅れ以上の大きな応力度となる。一方、フィレットを設けた解析を行うと小さくなる。 ①-2 上図の形状のフィレットを設けることが都市高速道路路会社の設計基準に規定されており、道示Ⅱ16.10にも解説があるので、実構造にはフィレットが設けられることになる。 ①-3 解析においてフィレットをどのように取り扱うか、また、フィレットを設けた場合も、フィレット縁端に高い応力集中が生じることが予想されるので、これに対する許容応力度をどのように設定するかが課題である ^{2.13)} 。
許容値 (規格値)	道示Ⅱ3.2.1, 4.2.2~4.2.4 道示に具体的な値は示されていないが、高速道路路会社等の規定を準用する。これらの規定に示されたとおりの作用応力度の算出を行うため、許容応力度の適用は可能である。 フィレット部の許容値がないことに対する対応 ③フィレット部について設計する場合、一定の安全率を踏まえた規格値を設定しなければならない。	フィレット部の許容値がないことに対する対応 ③フィレット部について設計する場合、一定の安全率を踏まえた規格値を設定しなければならない。	フィレット部の許容値がないことに対する対応 ③フィレット部について設計する場合、一定の安全率を踏まえた規格値を設定しなければならない。

2.3 格子解析では局所的な応力性状の把握ができないと考えられる構造

2.3.1 構造の種類

従来の格子解析では局所的な応力性状の把握ができないと考えられる構造として、以下の照査項目の検討を行う。

- 曲線少数I桁橋：主桁フランジの曲率による2次応力度
- 曲線細幅箱桁橋：主桁フランジの曲率と断面変形による2次応力度
中間ダイヤフラムのせん断応力度
- 方杖ラーメン橋：隅角部の作用応力度
- 単弦ローゼ橋：アーチリブと補剛桁間の隅角部における作用応力度

2.3.2 曲線少数1桁橋：主桁フランジの曲率による2次応力度

設計行為項目	従来設計（格子解析）	せん断パネル解析による設計	FEMによる設計
1)作用応力度の算出 ・フランジの曲率による2次応力度	<p>・主桁フランジの曲率による2次応力度は、次の近似式(2.5.2.10)によって算出する。</p> $\sigma_2 = \pm 0.106 \frac{\sigma_f}{RW_f} \left(A_f + \frac{A_w}{3} \right) \ell^2$ <p>ここに、 σ_f：着目フランジの曲げ応力度 R：主桁の曲率半径 A_f：着目フランジの断面積 A_w：中立軸より着目フランジまでのウェブの断面積 W_f：着目フランジの断面係数 ℓ：着目フランジの固定点間距離</p>	<p>・主桁フランジ縁部材の作用軸力から、2次応力度を考慮した曲げ応力度を直接算出する。</p>	<p>・主桁フランジ要素の応力度には、曲率による2次応力度を考慮した曲げ応力度を直接算出する。</p>
	<p>図-2.3.1A フランジの曲率による2次応力</p>	<p>図-2.3.1B 主桁フランジの水平曲げモーメント図の例</p>	<p>①-1 作用応力度を解析から直接得ることができる。 ①-2 せん断遅れ等の解析結果について、応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。 ③ 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、初期不整（初期たわみ、残留応力）、幾何学的非線形、材料的非線形を考慮する必要がある。特に、初期不整については、各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならない。</p>
<p>① 通常は、作用応力度を算出できるはり要素の作用断面力を解析から得ることができる。</p>	<p>①-1 作用応力度を算出できる縁要素の作用断面力を解析から直接得ることができる。 ①-2 せん断遅れ等の解析結果について、応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p>	<p>①-1 作用応力度を算出できる縁要素の作用断面力を解析から直接得ることができる。 ①-2 せん断遅れ等の解析結果について、応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p>	

設計行為
項目
(比較検討)
曲率による2次応力

格子解析結果を用いてフランジの曲率によって生じる2次応力を算出した結果と、せん断パネルモデルによってフランジの水平曲げモーメントから直接付加応力を算出した結果を荷重段階ごとに比較して下図に示す。着目点は、G1桁の曲率半径内側のフランジ縁である。

- 1) 合成後の上フランジは、床版で固定されるので2次応力は生じない。
- 2) 近似式による結果とせん断パネル解析結果とは、2次応力の分布形状に整合が見られる。
- 3) 近似式で算出した値の方が大きい。近似式の係数を本来の無限連続桁の係数に置換えた結果を合成前死荷重のみ参考を示すと、赤丸のようにせん断パネル解析結果と良く一致する^{2.10)}。
- 4) 本計算例では、2次応力の値は合成前の上フランジで±20N/mm²程度、下フランジで±10N/mm²以下、合成後の下フランジでは±10N/mm²程度を示した。

(計算例:3径間連続合成少数I桁橋,支間長34.4m+49.0m+34.4m,総幅員11.32m,平面線形R=700m,斜角90度)

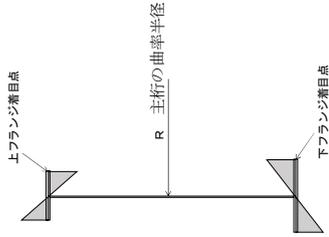


図-2.3.2 2次応力の分布形状と着目点

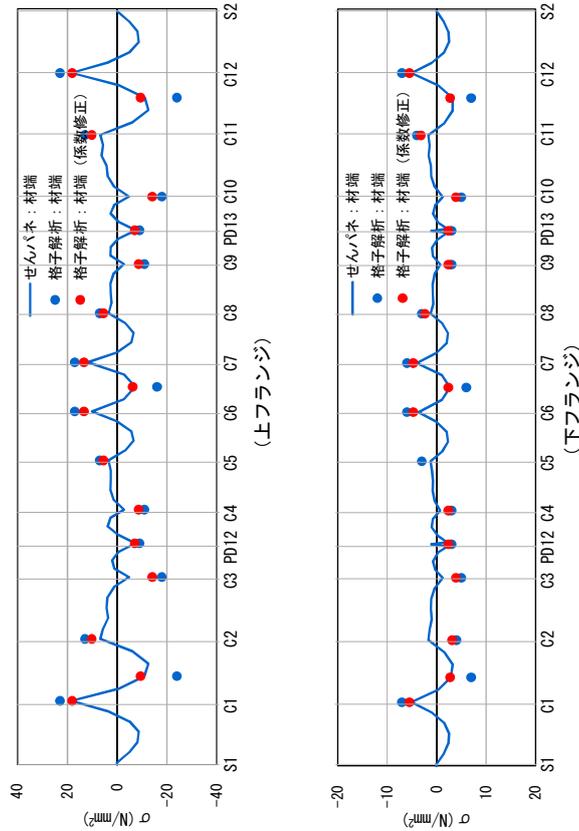


図-2.3.3 合成前死荷重D1によるG1桁フランジの曲率2次応力分布図の例

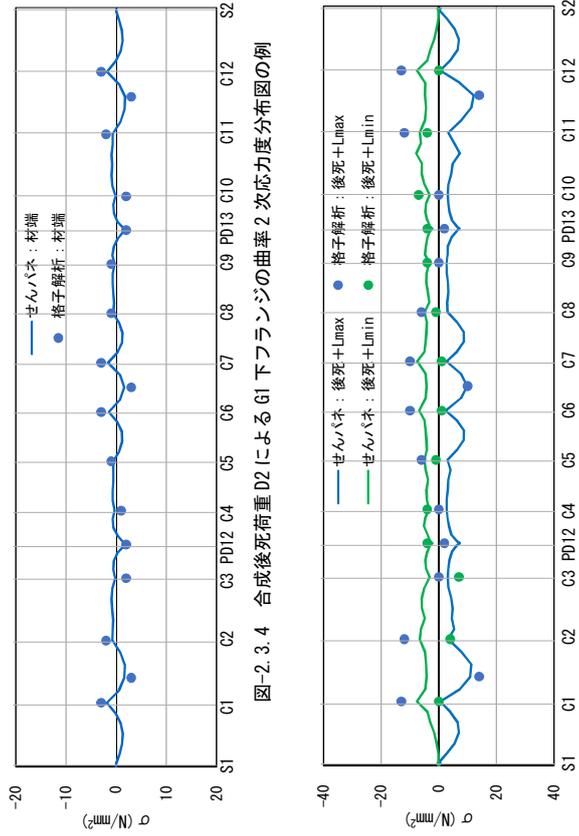


図-2.3.4 合成後死荷重D2によるG1下フランジの曲率2次応力分布図の例

設計手法

従来設計（格子解析）とせん断パネル解析

合成前後の主桁フランジ応力度を、せん断パネル解析結果と格子解析結果とで比較して下図に示す。なお、解析法の比較を行うのが目的であることから、合成後の中間支点部で床版に引張応力が発生する点については、これを考慮せずに床版コンクリートを有効とした合成桁として応力計算を行っている。これらの結果より、次のことがいえる。

- 1) 両解析結果の主桁フランジ応力度はよく一致している。
- 2) フランジの曲率による2次応力度は一次応力度に対して比較的小さく、近似算出式による2次応力度が実際よりも大きめの値を与えている影響は少ないと考えられる。
- 3) せん断パネル解析から、フランジの曲率による2次応力度も正確に算出することができると考えられる。

(比較検討)
主桁応力度

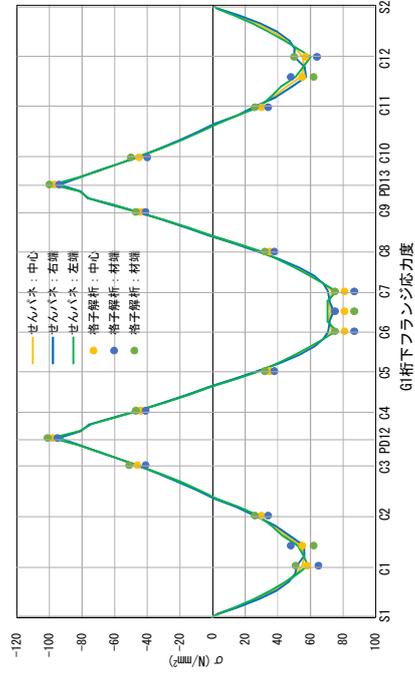
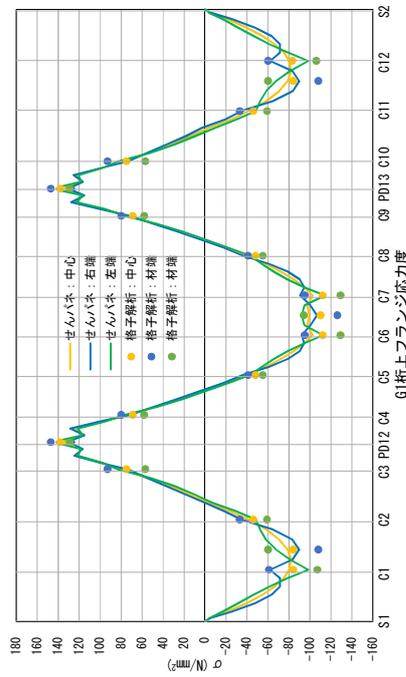


図-2.3.6 合成前死荷重D1による主桁フランジの応力度分布図の例

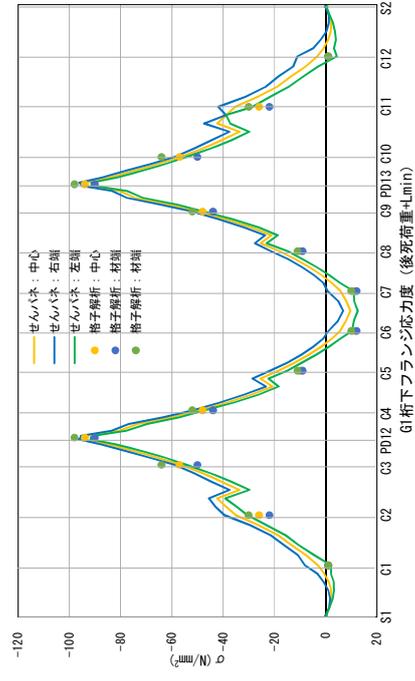
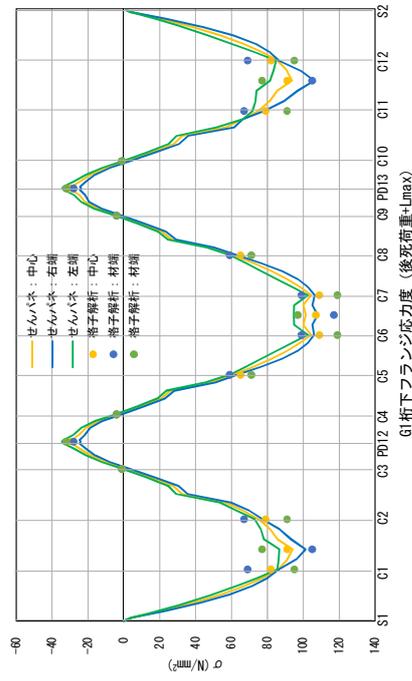
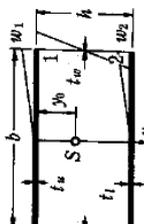
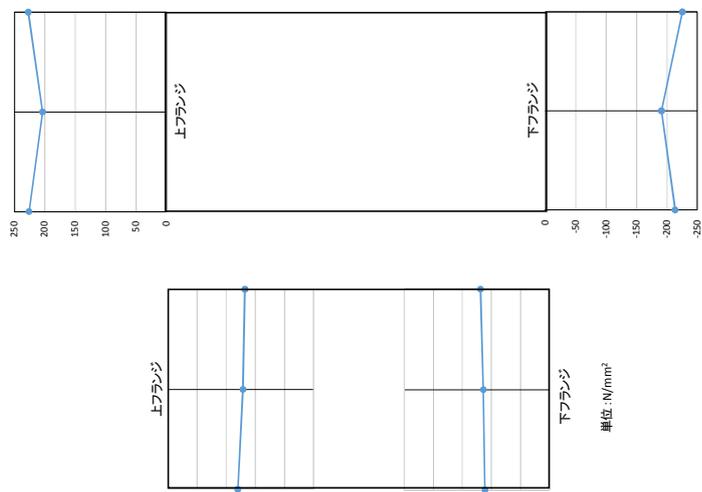


図-2.3.7 合成後死荷重(D2+L)による主桁フランジの応力度分布図の例

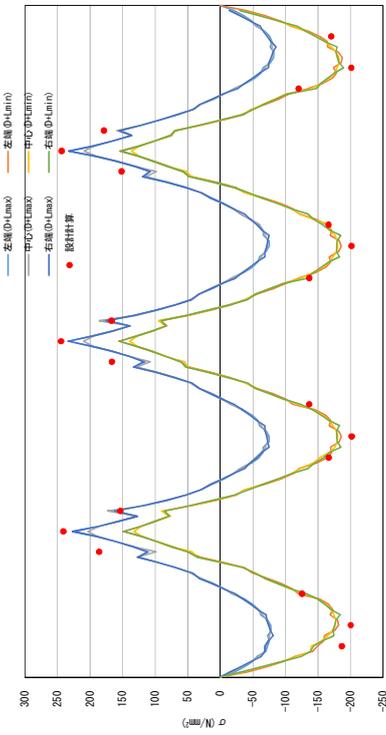
2.3.3 曲線細幅箱桁橋：主桁フランジの曲率と断面変形による2次応力度

設計行為	設計手法	FEMによる設計
<p>項目</p> <p>1) 作用応力度の算出</p> <p>・フランジの曲率と断面変形による2次応力度</p> <p>従来設計（立体骨組解析）</p> <p>・主桁フランジの曲率による2次応力度は、曲げねじり理論から一般的に、次式を用いてそり応力度として算出する。</p> $\sigma_w = \frac{M_w}{C_w} \omega$ <p>ここで、σ_w：そり応力度</p> M_w ：そりねじりモーメント C_w ：そりねじり定数 ω ：そり関数  $w_1 = -\Delta w \cdot \frac{\beta_1 + 3}{\beta_w + \beta_1 + 6}$ $w_2 = \Delta w \cdot \frac{\beta_2 + 3}{\beta_w + \beta_2 + 6}$ $\Delta w = \frac{bh}{2} \cdot \frac{\psi}{t_w}$ $\psi = bt_w \cdot \frac{\epsilon}{\beta_w + \beta_1 + \epsilon}$ $\beta_w = \frac{bt_w}{ht_w}$ $\beta_1 = \frac{bt_1}{ht_w}$ $\beta_2 = \frac{bt_2}{ht_w}$ $\epsilon = 2 \cdot \frac{t_w t_1}{t_w^2}$ <p>せん断中心の位置</p> $\gamma_0 = \frac{2w_1}{b} + \frac{\psi}{t_w}$ <p>図-2.3.8A 箱断面のそり関数とそりねじり定数^{2.15)}</p>	<p>せん断パネル解析による設計</p> <p>・主桁フランジ縁部材の作用軸力から、2次応力度を考慮した曲げ応力度を直接算出する。</p>  <p>単位：N/mm²</p> <p>(a) C4 端点 (b) P1 支点上</p> <p>図-2.3.8B 主桁フランジの応力度分布の例</p> <p>①-1 作用応力度を算出できる縁要素の作用断面力を解析から直接得ることができる。</p> <p>①-2 せん断遅れ等の解析結果について、応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p>	<p>①-1 作用応力度を解析から直接得ることができる。</p> <p>①-2 せん断遅れ等の解析結果について、応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p> <p>③ 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、初期不整（初期たわみ、残留応力）、幾何学的非線形、材料的非線形を考慮する必要がある。特に、初期不整については、各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならぬ。</p>

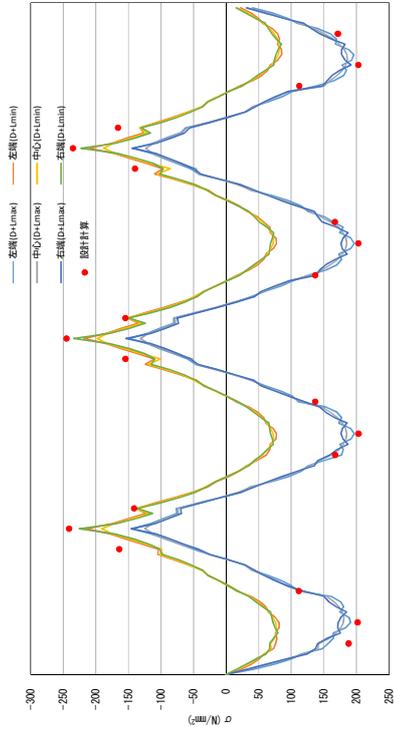
従来設計（格子解析）とせん断パネル解析

常時荷重 (D+L)に対する主桁フランジの作用応力度について、せん断パネル解析結果と格子解析結果を比較して下図に示す。せん断パネル解析については、床版剛性を考慮したものと存在を無視したものを対比した。これらの結果より、次のことがいえる。

- 1) 両解析結果は多少のばらつきがあるものの、比較的整合しているとみなすことができる。
- 2) せん断パネル解析において、床版剛性を考慮したものと存在を無視したものでは、ほとんど差がない結果となった。
- 3) フランジの2次応力度を把握するためにせん断パネル解析では、フランジ中心位置（1次応力度）と材端位置（1次応力度と2次応力度の和）での応力度を示した。その結果、1次応力度に対して2次応力度の値は比較的小さい。
- 4) 中間支点上では、せん断パネル解析のフランジ中心位置での作用応力度が材端位置よりも小さい。これは、フランジのせん断遅れの影響と考えられる。

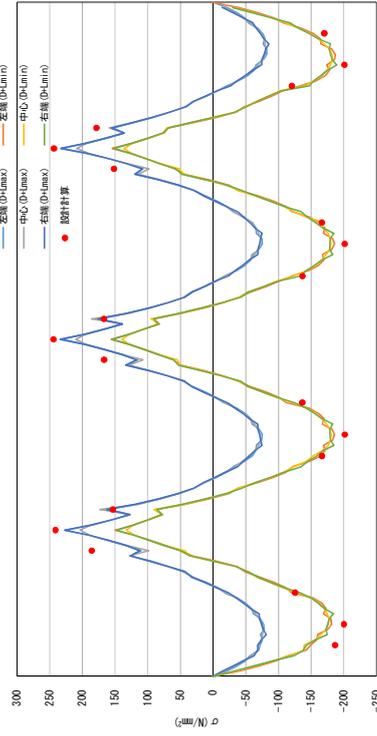


G1桁：上フランジ

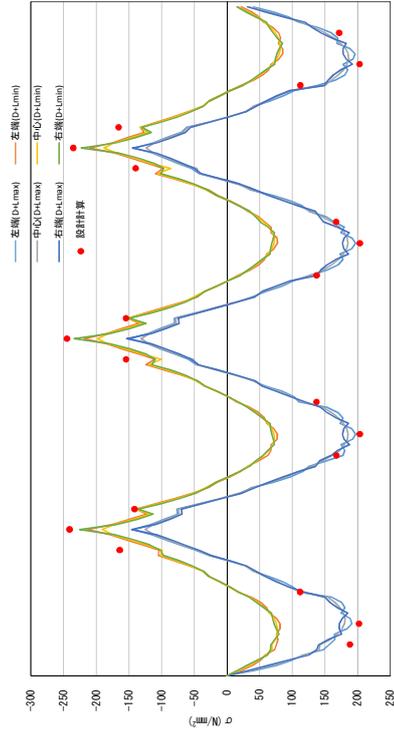


G1桁：下フランジ

図-2.3.9 床版剛性を考慮したG1桁フランジの応力分布図の例



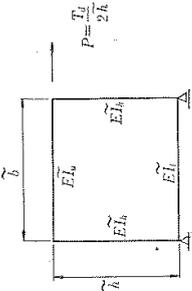
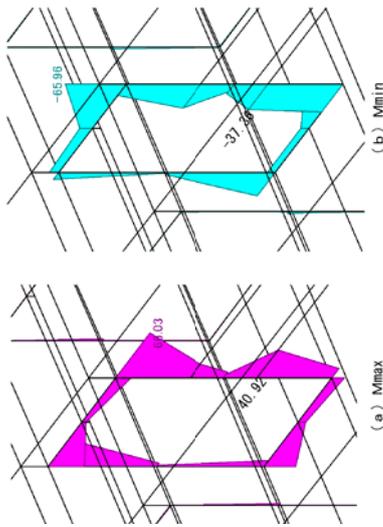
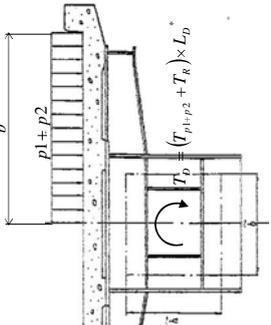
G1桁：上フランジ



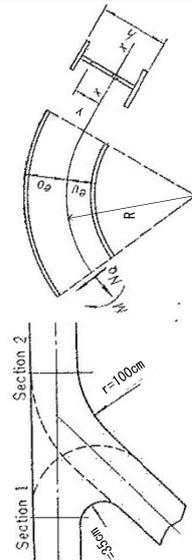
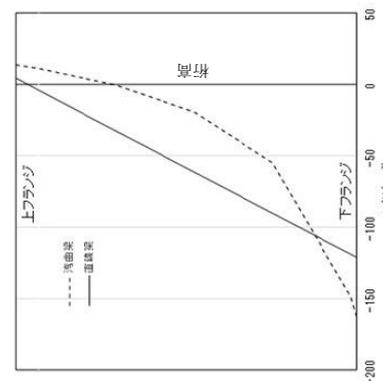
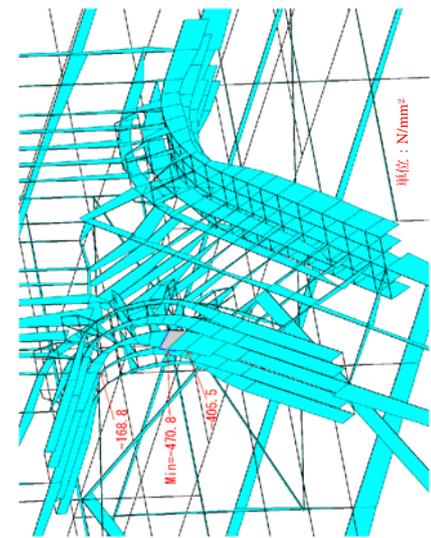
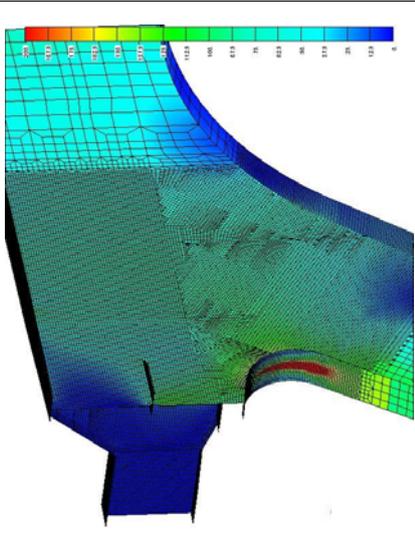
G1桁：下フランジ

図-2.3.10 床版を無視したG1桁フランジの応力分布図の例

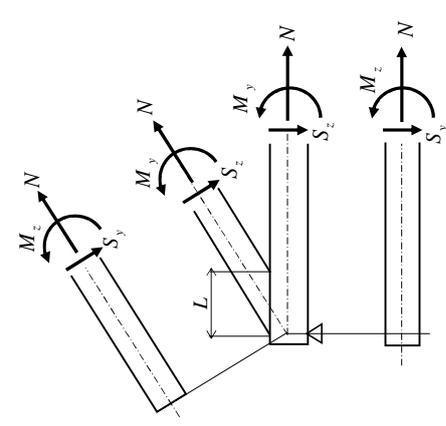
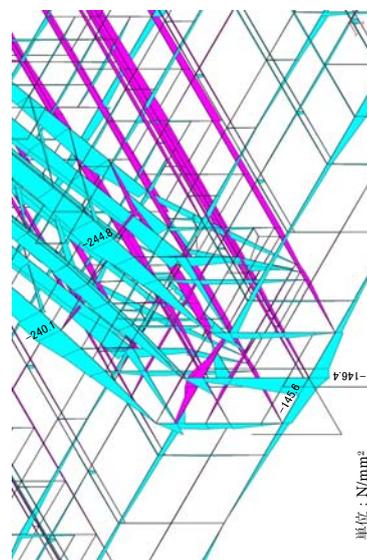
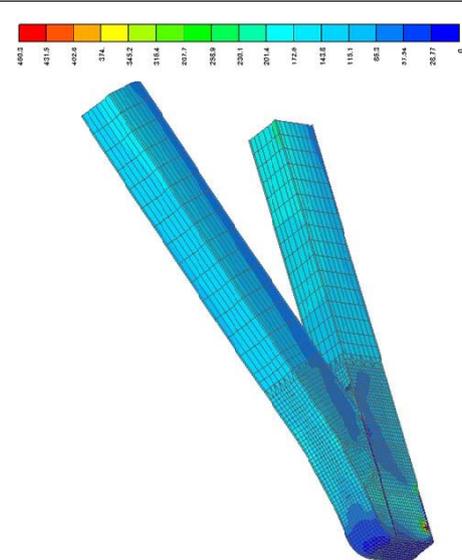
2.3.4 曲線細幅箱橋：中間ダイアフラムのせん断応力度

設計行為	設計手法		FEMによる設計
項目	せん断パネル解析による設計		FEMによる設計
1) せん断応力の算出	<p>従来設計（立体骨組解析）</p> <p>・中間ダイアフラムの作用せん断応力度について、充腹板方式の場合は、ダイアフラムに作用するねじりモーメント T_D から次式により算出する^{2.5)}。</p> $\tau = \frac{T_D}{2A \cdot t_D} \leq \tau_a$ <p>・ラーメン方式の場合は、下図の計算モデルから算出する^{2.5)}。</p>  <p>T_D : ダイアフラムに作用するずりモーメント $(= T_L + T_R + J_{D0} \cdot \omega)$ (3.18) T_L : 線荷重によるトルク T_R : 分布荷重による単位長さ当りのトルク J_{D0} : ダイアフラムの慣性 ω : ねじり角 τ : せん断応力 τ_a : 許容せん断応力</p>	<p>せん断パネル解析による設計</p> <p>・充腹板方式の場合は、ダイアフラムに作用するせん断流から直接せん断応力度を算出して照査する。</p> $\tau = \frac{SH}{t_D} \leq \tau_a$ <p>ここに、τ : 作用せん断応力 SH : ダイアフラムに作用するせん断流 t_D : ダイアフラムの板厚 τ_a : 許容せん断応力</p> <p>・ラーメン方式の場合は、矩形ラーメンの骨組をせん断パネルモデルに組み込んで解析して断面力を直接求める。これより、ラーメン部材の応力度を照査する。</p> 	
2) せん断応力の算出	<p>図-2.3.11A ラーメン方式ダイアフラムの計算モデル^{2.5)}</p> <p>② ダイアフラムを設計する場合、支点位置の高さ方向にモデル化しなければならぬ。通常は、平面格子モデルでは高さ方向のモデル化を行わず、別途計算モデルを作成する。</p> <p>・ダイアフラムに作用するずりモーメントは、下図のように主桁に最大のトルクを発生させるように活荷重を載荷した状態に対して算出する。曲線橋の場合は、着目点での死荷重及び活荷重による主桁曲げモーメントの曲率半径によるずりモーメントを加算する。</p> $T_D = (T_{p1+p2} + T_R) \times L_D$ <p>ここに、$T_{p1+p2} = (p1 + p2) \times b^2 / 2$ $T_R = M_{D+L} / R$ L_D^* : ダイアフラムの実間隔 (m) $p1, p2$: L荷重の等分布荷重 (kN/m²) b : L荷重の載荷幅 (m) R : 着目点での主桁曲率半径 (m) M_{D+L} : 着目点での死・活荷重による主桁曲げモーメント (kN・m)</p> 	<p>①-1 解析モデルで仮定したダイアフラム配置と剛性（板厚）に対して、ダイアフラムに作用するせん断流と、主桁のそり応力が含まれた形で主桁部材断面力が得られる。</p> <p>①-2 全橋モデルは立体的で高さ方向にも要素を配置できるため、主桁内のダイアフラムをモデル化できる。</p> <p>①-3 ダイアフラムの要素から、ダイアフラム単独のせん断力を直接求めることができる。</p> <p>①-4 せん断流れ等の解析結果に対して、応力の精度を確保するため、せん断流れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p>	
図-2.3.12A ずりモーメント算出荷重とラーメン方式の設計モデルの例 ^{2.5)}			

2.3.5 方柱ラーメン橋：隅角部の作用応力度

設計行為	従来設計（立体骨組解析）	設計手法	FEMによる設計
<p>項目</p> <p>1) 隅角部の作用応力度の算出</p>	<p>1) フランジを湾曲させた隅角部の断面設計方法として、Bleichの近似式^{2.16.2.17}を適用する。</p> <p>2) 隅角部を下図のような湾曲した2つの部材に仮定し、それぞれ個別に応力計算を行う。</p>  <p>図-2.3.13A Bleichの近似式に対する仮定^{2.16.2.17}</p> <p>上図の断面にM, N, Qなる外力が作用した時の中立軸よりyなる距離における軸方向応力度は次式で算出される。</p> $\sigma_m = \frac{N}{A} - \frac{M}{RA} - \frac{My}{z} \cdot \frac{R+y}{R+y}$ <p>ここに、$z = R^2 \sum RB \log \frac{R+y_1}{R+y_2} - f = R^3 \sum B \log \frac{W_1}{W_2} - AR^2$</p> <p>A：断面積，R：部材重心軸の曲率半径，B：フランジ幅</p>  <p>図-2.3.14A 湾曲部材の応力分布の例</p>	<p>せん断パネル解析による設計</p> <p>1) 垂直応力度は縁部材の軸力から直接算出する。</p> <p>2) せん断応力度は、せん断パネルのせん断流から直接算出する。</p> $\sigma_i = \frac{N_i}{A_i}$ <p>ここで、N_i：縁部材の軸力 A_i：縁部材の断面積</p> $\tau_i = \frac{SH_i}{t_i}$ <p>SH_i：せん断パネルのせん断流 t_i：せん断パネルの板厚</p>  <p>図-2.3.13B 隅角部の作用応力度の例</p> <p>①-1 作用応力度を算出できる縁要素の作用断面積を解析から得ることができる。</p> <p>①-2 せん断遅れ等の解析結果について、応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p>	<p>1) 各要素の作用応力度を直接算出する。</p>  <p>図-2.3.13C 隅角部のFEM解析によるコンタ一図の例</p> <p>①-1 作用応力度を解析から直接得ることができる。</p> <p>①-2 せん断遅れ等の解析結果について、応力の精度を確保するため、せん断遅れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p> <p>③ 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、初期不整（初期たわみ、残留応力）、幾何学的非線形、材料的非線形を考慮する必要がある。特に、初期不整については、各部分材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならぬ。</p>

2.3.6 単弦ローゼ橋：アーチリブと補剛桁間の隅角部における作用応力度

設計行為	従来設計（立体骨組解析）	設計手法	FEMによる設計
<p>項目</p> <p>1) 隅角部の作用応力度の算出</p> <p>注) 道示では、単弦ローゼ橋における隅角部については、照査式が規定されていない。ここでは、実績を参考に、計算例を示す。</p>	<p>1) 端部の断面決定に当たっては、アーチリブと主桁のフランジが連続していないことから力の伝達はウェブプレートによって分担されると仮定して、アーチリブと主桁各々の断面力に対して応力度を算出して照査する。</p> <p>応力度の算出式は次の通りである。</p> $\sigma = \frac{N}{2h_w t_w} \pm \frac{3M_y}{h_w^2 t_w} \pm \frac{M_z}{h_w b t_w}$ $\tau = \frac{S_z}{2h_w t_w}$ <p>ここに、h_w：ウェブ高、t_w：ウェブ厚、b：ウェブ間隔</p> <p>2) アーチリブと主桁との接合面に生じるせん断応力度も照査する。</p> $\tau_H = \frac{N_G}{2L t_w}$ <p>ここに、N_G：主桁の最大軸力、L：アーチリブと主桁の接合長</p>  <p>図-2.3.15A アーチリブ端部の断面力</p>	<p>せん断パネル解析による設計</p> <p>1) 垂直応力度は縁部材の軸力から直接算出する。 2) せん断応力度は、せん断パネルのせん断流から直接算出する。</p> <p>ここで、N_i：縁部材の軸力 A_i：縁部材の断面積 SH_i：せん断パネルのせん断流 t_i：せん断パネルの板厚</p> $\sigma_i = \frac{N_i}{A_i}$ $\tau_i = \frac{SH_i}{t_i}$  <p>単位：N/mm²</p> <p>図-2.3.15B 端部縁部材の応力図の例</p> <p>①-1 作用応力を算出できる縁要素の作用断面力を解析から得ることができる。 ①-2 せん断流れ等の解析結果について、応力の精度を確保するため、せん断流れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。</p>	<p>1) 各要素の作用応力度を直接算出する。</p>  <p>図-2.3.15C 隅角部のFEM解析によるコンタート図の例</p> <p>①-1 作用応力度を解析から直接得ることができる。 ①-2 せん断流れ等の解析結果について、応力の精度を確保するため、せん断流れの程度や構造特性に対して、解析モデルの要素分割手法を確立する必要がある。 ③ 部材の最大耐力の状態を想定して終局限界状態を照査する場合、初期不整（初期たわみ、残留応力）、幾何学的非線形、材料的非線形を考慮する必要がある。特に、初期不整については、各部材の破壊モードごとに最も厳しい設定をしなければならぬ。</p>

2.4 考察

本章では従来の格子解析を主体とした橋梁設計の各手続きに関する課題，あるいは精度向上や一連の設計行為全体の合理化の観点からの検討余地を整理し，一方で，一定せん断流パネル解析，あるいはFEM解析をそれぞれ主体とした設計手法における橋梁設計の各手続きを，従来の設計手法と同様の視点で比較できるように整理して相互の特徴や異同の比較を行った．その結果，以下のことが明らかとなった．

■格子解析を用いた従来設計について

- 第1章でも記述したとおり，格子解析でモデル化した主桁や横桁など解析結果から直接断面力を得られる部材は，公称応力として算出した作用応力が必ずしも実際の橋の状態を正確に再現するわけではないものの，同じ公称応力として許容応力度と対比することで，部材ごとには人為的要素に左右されにくく安定的に一定の安全率を確保した設計が行いやすい．
- 主桁や横桁をモデル化するより要素は，解析モデル上は部材軸方向の1次元しか有せず，各部材を組み合わせた格子解析も平面的な2次元しか有しないため，以下の課題があることがわかった．
 - 高さ方向に形成される中間対傾構や主桁の重心と異なる高さに設置される床版，あるいは横構を直接モデル化できない．床版と主桁を接合するずれ止めも同様に直接モデル化できない．少数主桁橋の格点部におけるU形フレームも同様である．
 - 格子解析において棒要素1本でモデル化された箱桁の内部に設置されるダイアフラムについて，作用するせん断力を直接算出して設計することができない．
 - 棒要素1本でモデル化された主桁の支点部は，主桁の重心位置で支持されるため，端横桁の挙動を正確に解析できない．
 - 一般に，棒要素で考慮できる断面力は6成分であり，I桁橋の横ねじれ座屈を解析するために必要なそりねじりを考慮した解析はできない．

つまり，主桁や横桁など，従来設計において格子解析で棒要素を用いてモデル化する部材以外の部材を直接モデル化することができない．そのため，格子解析で直接モデル化できない対傾構や横構は別途簡易な力学モデルを用いて作用断面力を算出する，あるいは全体横ねじれ座屈の照査のように別途項目ごとに照査の作業が必要となる．このことは，技術者のちがいによって設計成果の大きな差異につながり最終的に得られる橋の性能が安定的に保証されないリスクとなる．鋼製橋脚の隅角部における奥村・石沢の方法^{2.2)}のように別途簡易式を適用するとしても，その適用が制限される適用範囲が存在することから，設計の合理化・高度化等に資する新たな知見の導入促進には課題となる．なお，格子解析と異なる簡易な力学モデル，あるいは簡易式を用いる場合も，格子解析による部材の設計と同様に，算出する作用応力は必ずしも実際の橋の状態を正確に再現していない場合があるものの，同じ公称応力として許容応力度と対比することで，一定の安全率を確保することが前提である．

■格子解析を用いた従来設計の課題に対して一定せん断流パネル解析あるいはFEM解析を主体として設計に導入することについて

- 格子解析を用いた従来設計では，別途簡易な力学モデル，あるいは簡易式を用いる必要があった設計項目について，一定せん断流パネル解析あるいはFEM解析では全橋モデルで直接各部材の作用断面力，あるいは作用応力度を算出し，設計することができる．これは，全橋モデルが立体的

で高さ方向にも要素を配置できるからである。そのため、各部材あるいは部位における実際の橋の状態を従来設計と同等以上の精度で再現できることから、以下の設計が全橋モデルを用いて可能となった。

- 中間対傾構や横構などの横力に抵抗する 2 次部材
 - 主桁間の荷重分配作用，あるいは横力に抵抗する場合の床版の設計
 - 橋軸方向のせん断力のほかに，床版が横力に抵抗する場合の橋軸直角方向のせん断力，あるいは曲げ引き抜き力に抵抗するずれ止め
 - 少数主桁橋の格点部における U 形フレーム
 - 箱桁の内部に設置されるダイアフラム
 - I 桁橋のそりねじりを考慮した横ねじれ座屈
- ・ 合成桁において，床版と鋼桁を分離してモデル化できることから，床版コンクリートのクリープ，乾燥収縮，床版と鋼桁の温度差などの荷重を，従来設計のように合成断面をモデル化した 1 本はりに作用する曲げモーメントや軸力などの力学的な作用に置換することなく，実際の橋の場合と同じ床版に載荷することが可能となった。
 - ・ また，床版などの各部材，あるいは部材を構成する鋼板を部材軸直角方向に複数の要素を用いてモデル化できることから，せん断遅れを直接解析することが可能である。これにより，一般的な桁橋におけるフランジも，立体ラーメンにおける橋脚横はりや鋼床版とが一体となった剛結部，あるいは橋脚隅角部のようなせん断遅れが大きい部位もせん断遅れによる実際の応力分布を直接算出可能となり，有効幅という設計上の架空の概念を用いることが不要となった。
 - ・ 道示に具体的な数値で許容値が示されていない設計項目については，実際の橋の状態をより高精度に再現することが可能になったとしても，対比する許容値，および許容値と対比するために作用応力を公称応力として整理するなどの設計計算手法の確立が必要となる。これらが確立していない場合は，解析結果を個別に判断する必要がある。
 - ・ なお，本検討では格子解析を用いた従来設計における各設計手続きを基本として横並び比較したために，一定せん断流パネル解析あるいは FEM 解析によって新たに可能となる設計項目は示されていない。しかし，上記のように全橋モデルが立体的となり 2 次部材を板組形状まで直接モデル化し，実際の橋の状態をより高精度に定量的に再現することで，今までは必ずしも定量的ではなく設計者の経験や試行錯誤によって決定されていた以下のような設計項目を，設計者の技量によらず定量的に設計できる可能性が考えられる。
 - アーチリブと支材の格点部など複雑な応力が作用するものの橋脚隅角部のように複雑な作用応力を算出する簡易式が確立されていない部位の耐荷力設計あるいは疲労設計（図-2.4.1 参照）
 - アーチ橋の垂直材と補剛桁の格点部など疲労等級が明確な継手構造であるものの疲労設計用の公称応力の算出が格子解析では困難だった部位の疲労設計（図-2.4.2 参照）

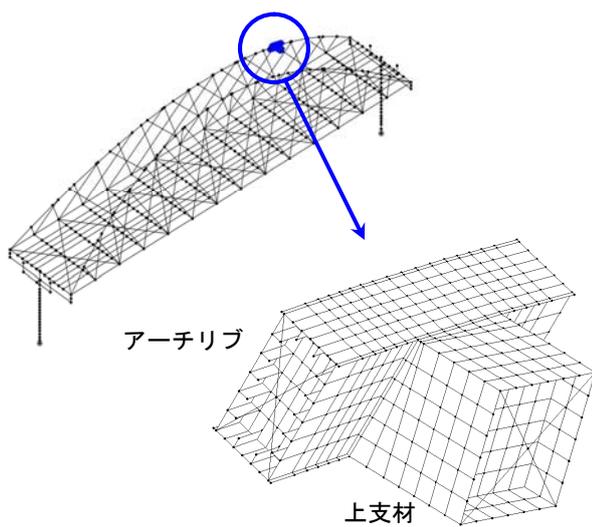


図-2.4.1 アーチリブと上支材の格点部

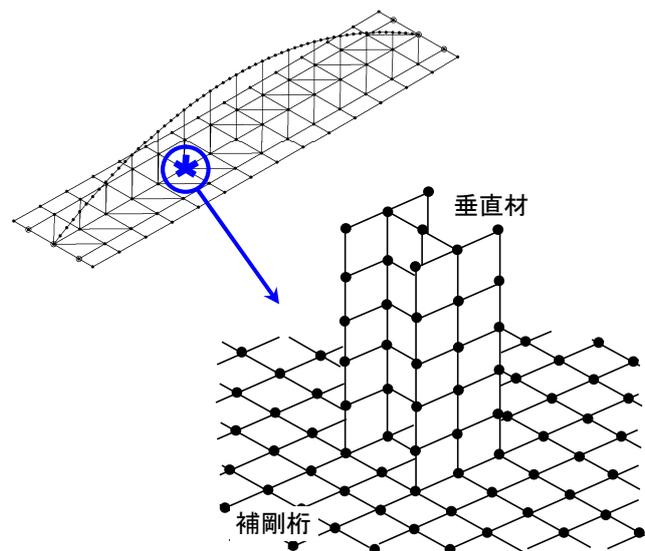


図-2.4.2 アーチ橋の垂直材と補剛桁の格点部

■一定せん断流パネル解析あるいは FEM 解析を用いて鋼道路橋の設計を行う実現可能性について

- 従来の格子解析結果を用いて直接設計できる主桁や横桁などの各部材単独の設計について、一定せん断流パネル解析では従来の格子解析と同様に公称応力としての作用応力を算出できることから、道示に規定された許容応力度との対比により設計が可能である。
- 主桁や横桁などの部材単独の設計については、一定せん断流パネル解析を用いる場合、道示による安全率を確保した設計が可能である。一方で、要素分割の要領によって解析結果にある程度のばらつきが生じる。そこで、道示で求められる設計の品質を確保するためには、求められる解析精度を確実に確保するための解析モデル作成の要領を各橋梁形式の部材ごとに確立する必要がある。このような解析モデルの作成については、一定せん断流パネル解析では算出される断面力から得られる作用応力は、第1章で定義した FEM 解析における Von-Mises 等価応力や主応力と異なり、従来の格子解析と同じ1方向の直応力あるいはせん断応力であることから、FEM 解析より一定せん断流パネル解析の方が要領として確立しやすいといえる。なお、解析モデル作成の要領が確立されていない中で一定せん断流パネル解析を行う場合は、例えば、主桁や横桁などの部材の設計においては従来の格子解析と同程度の精度が確保されることを確認の上、解析を行うなどの対応が考えられる。
- 活荷重の影響線載荷について、一定せん断流パネル解析では格子解析と同様に行うことができるが、FEM 解析では第1章で記述したとおり、一般化されていない。これも理論上は可能であるものの、上記の道示に規定された許容応力度と対比できる作用応力度の平均化と同様に、具体的な作業要領の確立は今後の課題である。
- FEM 解析では、第1章でも記述したとおり部材単独の設計における許容応力度が道示に規定されていないことから、より実際の橋の状態に近い局部応力や局部変形を算出できるものの、従来の設計と同等の安全率を確保した設計手法が確立していないことが大きな課題である。逆に、FEM 解析から得られた局部応力や局部変形から公称応力を求める処理を行って、道示に規定された許容応力度と比較する方法も考えられる。明確な制約や不可能となる根拠はなく理論上は可能であり、FEM 解析による高精度な解析結果を直接設計に用いることができれば、これまでよりも高度で合理的な設計が可能になることは明らかである。しかし、FEM 解析結果を実務設計においてど

のように用いて、道示に規定された安全率をどのように確保するか、あるいは確保されていることを定量的かつ統一的な尺度で示し得るのかといった研究は少なく、設計項目ごとの作業要領の確立が課題として残されている。

【2 章参考文献】

- 2.1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2012.3
- 2.2) 奥村敏恵，石沢成夫：薄板構造ラーメン隅角部の応力計算について，土木学会論文集 第 153 号，pp.1-18，1968.5
- 2.3) 村越潤，高橋実，吉岡勉，野中哲也，加藤修：FEM 解析を用いた鋼多主桁橋の設計合理化の検討，鋼構造論文集 Vol.11 No.43，pp.131-145，2004.9
- 2.4) 玉越隆史，中洲啓太，石尾真理，木内耕治：道路橋の鋼製橋脚隅角部の疲労設計法に関する研究——一定せん断流パネルを用いた解析法の検討——，国土技術政策総合研究所資料，第 296 号，2006.1
- 2.5) (社) 日本道路協会：鋼道路橋設計便覧，1980.8
- 2.6) 建設省土木研究所：プレートガーダー側道橋の全体横倒れ座屈に関する検討（その 1），土木研究所資料 第 1795 号，1982.2
- 2.7) (社) 土木学会 鋼構造委員会：鋼構造架設設計施工指針[2012 年版]，2012.5
- 2.8) (社) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002.3
- 2.9) (社) 日本道路協会：鋼橋の疲労，1997.5
- 2.10) 坂井藤一，長井正嗣：鋼箱桁橋の中間ダイアフラム設計法に関する一試案，土木学会論文報告集 第 261 号，pp.21-34，1977.5
- 2.11) 首都高速道路株式会社：橋梁構造物設計施工要領，2008.7
- 2.12) 阪神高速道路株式会社：設計基準 第 2 部 構造物設計基準（橋梁編），2011.11
- 2.13) 美島雄士，小野潔，田川陽一，西村宣男：鋼製ラーメン橋脚隅角部におけるフィレット構造の限界状態と性能照査法に関する研究，土木学会論文集 A1，Vol.69 No.2，pp.206-221，2013.5
- 2.14) 小松定夫：曲線並列桁橋の実用計算式，土木学会論文集 第 93 号，pp.1-9，1963.5
- 2.15) (社) 日本橋梁建設協会：'11 デザインデータブック，p.293，2011.4
- 2.16) Bleich,F. (池部宗薫他訳)：鉄骨構造，第 1 巻，p.691，1936.9，コロナ社
- 2.17) 宮本潔，上野建昭，小林啓明：中央道日吉川橋（鋼方杖ラーメン橋）の設計，橋梁と基礎 1972-5，pp.18-21，1972.5

第3章 まとめ

道路橋示方書に規定された許容応力度と解析で得られた作用応力を、公称応力として対比することによって一定の安全余裕を確保して部材の設計を行う格子解析を主体とした設計手法と、局所的な部位の応力集中や局部変形に対する FEM 解析を用いた評価を併用することがより一般的になりつつある。このような橋梁設計の実務の現状に対して、必要な照査や評価をできるだけ同じモデルによって効率的かつ整合の取れた形でできる合理的な設計手法の提案を目的として、本研究では、従来設計に対して、より高度な一定せん断流パネル解析、または FEM 解析のそれぞれを主体とする各設計手法を比較した。その結果、本研究で得られた知見を以下に示す。

格子解析において主桁や横桁をモデル化するより要素は、解析モデルにおいて部材軸方向の1次元しか有していない。また、各部材を組み合わせた格子解析も平面的な2次元しか有しない。そのため、格子解析でモデル化できない対傾構や横構の設計においては、別途簡易な力学モデルを用いなければならないことが設計手法の合理化における大きな課題であった。この課題に対して、一定せん断流パネル解析または FEM 解析では全橋モデルが立体的で高さ方向にも要素を配置できることから、全橋モデルから各部材の作用断面力または作用応力を直接算出することで解決できることを示した。さらに、本検討では、2次部材を板組形状までモデル化し、各材片の公称応力を算出することで、格子解析による従来設計では必ずしも定量的ではなく設計者の経験や試行錯誤によって決定されていた設計項目を、設計者それぞれの裁量や判断に過度に依存させることなく、ある程度制御された形で定量的に設計できる新たな可能性も示された。

より高度な解析手法である FEM 解析では、上記のように詳細なモデル化により実際の橋の状態をより高度に再現できる一方で、試行錯誤が繰り返し行われる設計の段階で標準作業として導入することは非効率で不経済な面があることが課題であった。これに対し、文献 3.1) では、高い応力が複雑に作用し、疲労による損傷も多数見られる、鋼道路橋において最も複雑な構造のひとつと考えられる鋼製橋脚隅角部の疲労設計に着目して、一定せん断流パネル解析が作用応力の推定を経済的かつ一定の精度で合理的に算出する解析手法として検討されている。

ただし、一定せん断流パネル解析または FEM 解析にも新たな課題があることもわかった。FEM 解析に関する基本的な課題は、解析結果から得られる作用応力が公称応力でないことから、単純に道示の許容応力度との対比ができないことである。そのため、解析精度の確認だけでなく、解析結果から公称応力を求める処理が解析後に必要となる。あるいは、技術基準に規定された安全率の確保、または確保されていることを定量的かつ統一的な尺度で示す手法を確立しなければならない。これに対し、一定せん断流パネル解析では、主桁や横桁の作用応力について格子解析と同様な公称応力として算出できることを本検討において確認した。ただし、一定せん断流パネル解析のモデル化によって解析結果にばらつきが生じることから、要素の配置や要素分割の程度による解析結果の精度のばらつきを抑え、従来の格子解析結果と同等な精度を確保する解析モデルの作成要領の確立が課題となる。

本検討結果から、一定せん断流パネル解析による全橋モデルを主体とした設計手法が、必要な照査や評価を同じモデルによって効率的かつ整合の取れた形でできる合理的な設計手法に成り得ると考え、現段階で整理できる設計手法および解析モデル作成要領を「付録1 一定せん断流パネルを用いた解析による鋼道路橋の設計マニュアル(案)」および「付録2 一定せん断流パネルを用いた解析モデル作成マニュアル(案)」にそれぞれまとめた。

【3章参考文献】

3.1) 玉越隆史, 中洲啓太, 石尾真理, 木内耕治: 道路橋の鋼製橋脚隅角部の疲労設計法に関する研

究 ―一定せん断流パネルを用いた解析法の検討―, 国土技術政策総合研究所資料, 第 296 号,
2006.1

付録 1

一定せん断流パネルを用いた解析による
鋼道路橋の設計マニュアル（案）

付録1 一定せん断流パネルを用いた解析による鋼道路橋の設計マニュアル（案）

付録 1.1 はじめに

ここでは、従来設計に対して合理性に優れた設計手法として、一定せん断流パネル解析を主体とした設計フローをまとめた。

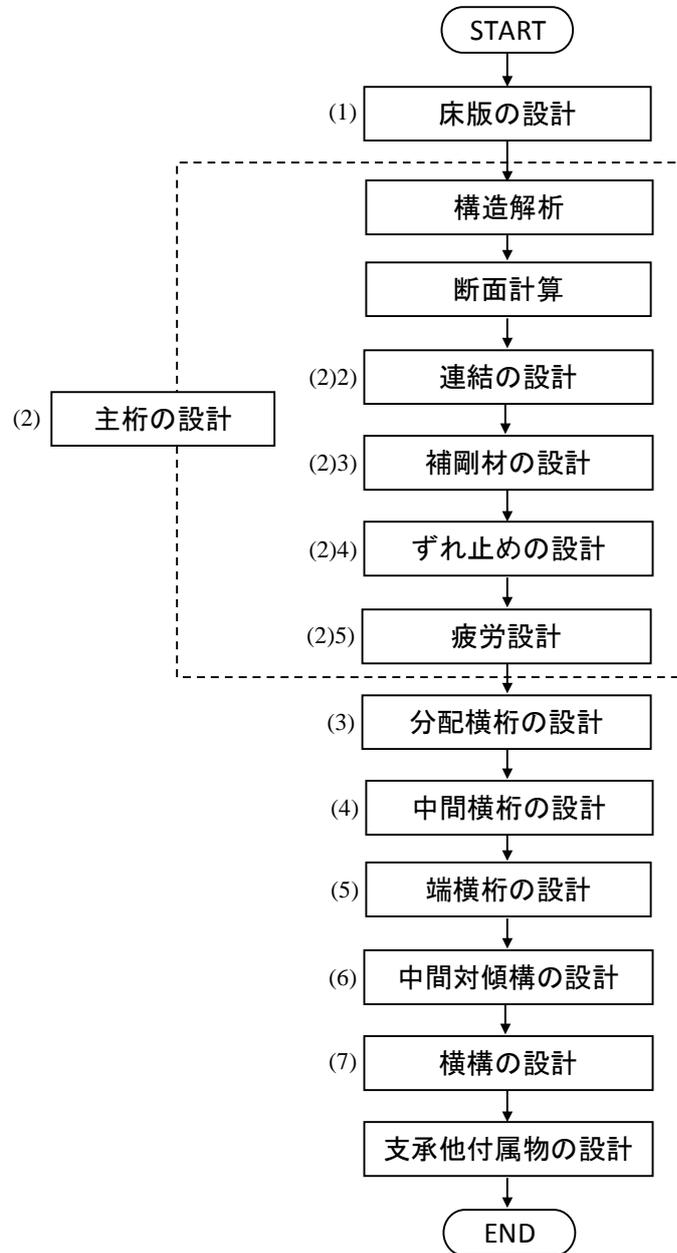
ただし、一定せん断流パネル解析による設計では、従来設計の設計フローと異なる点も多く、新たな照査項目も追加できることから、これらを設計フローに含めた。また、いずれの解析手法を用いた場合でも個別の課題は存在し、一定せん断流パネル解析も同様である。特に、従来にない新たな設計フローを構築するためには、多くの課題が存在し、それらを全て解決、または考慮した設計を行わないと、設計基準によって求められる橋の安全性を確保することはできない。そこで、従来設計と異なる点を理解し設計の品質を確保するため、一定せん断流パネル解析を行う場合の留意点について、設計フローとともに示した。橋梁形式としては、これまでの採用実績が多く最も一般的と考えられ、一定せん断流パネル解析を適用するメリットが大きいと考えられる連続合成I桁橋、連続鋼床版箱桁橋、および鋼製橋脚の3形式とした。

また、一定せん断流パネル解析を主体として設計を行う場合、従来設計よりも解析モデルが詳細であることから、前作業である概略設計において、構造諸元などを従来設計よりも詳細に決定しておく必要がある。そこで、概略設計段階で決めておくべき事項のうち、従来設計と異なり、一定せん断流パネル解析を主体とした設計に関する特徴的な事項を最後に整理した。

ここで示した設計マニュアル（案）では、道示に規定されている許容応力度と対比できる精度の作用応力度を算出する解析モデルを前提としている。また、2次部材や局所的な応力集中を考慮した作用応力度を算出する場合は、評価が可能な詳細モデルを前提としている。これら一定せん断流パネル解析の解析モデルの作成については、「付録2 一定せん断流パネルを用いた解析モデル作成マニュアル（案）」を参考にできる。

付録 1.2 連続合成 I 桁橋

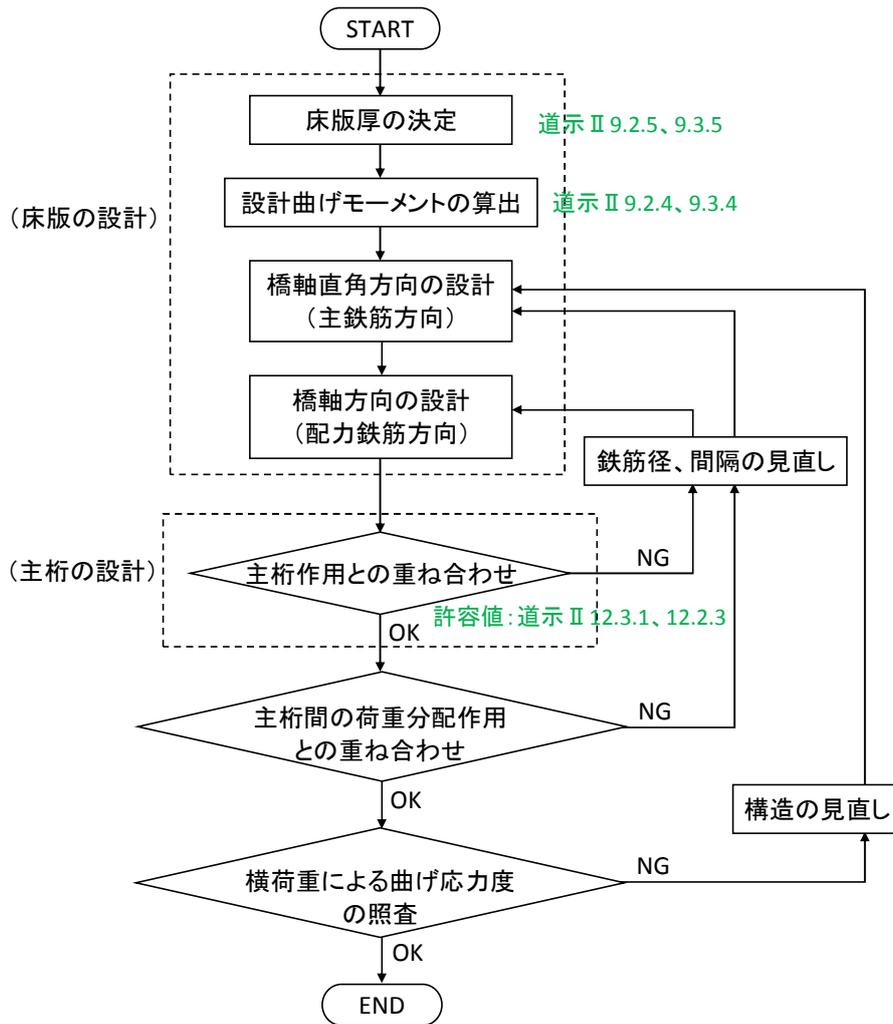
・連続合成 I 桁橋の全体設計フローを下図に示す。各項目の詳細な設計フローは、次ページ以降にそれぞれ記載し、対象番号を下図に示す。



付図-1.1 連続合成 I 桁橋の全体設計フロー

(1) 床版

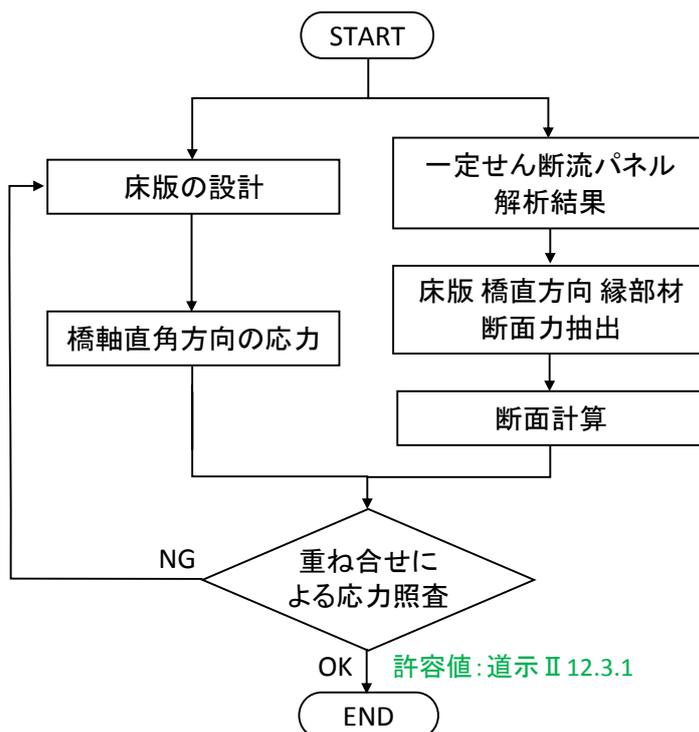
- ・床版の設計は、下図の設計フローに従い、道示Ⅱの規定を用いて行う。
- ・連続合成桁の場合は、支間中央の床版の圧縮応力あるいは中間支点の床版の引張応力に対して、床版作用と主桁作用の重ね合わせを行う。
- ・必要に応じて、床版に主桁間の荷重分配作用を考慮した設計を行う。
- ・必要に応じて、地震の影響や風荷重等の横荷重に対して床版が抵抗する設計を行う。



付図-1.2 床版の設計フロー

1) 主桁間の荷重分配作用との重ね合わせ

- ・床版に主桁間の荷重分配作用を考慮した設計を行う場合の設計フローは下図による。
- ・床版作用による橋軸直角方向の作用応力度は、道示Ⅱ9.2により算出し、主桁間の荷重分配作用による橋軸直角方向の作用応力度は、一定せん断流パネル解析結果の橋軸直角方向縁部材の断面力から算出する。



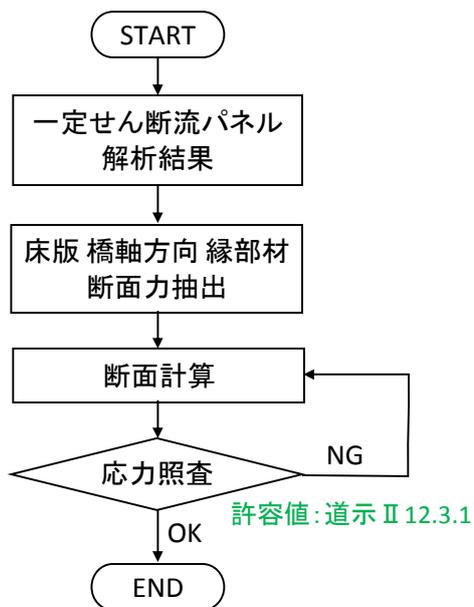
付図-1.3 主桁間の荷重分配作用との重ね合わせフロー

【一定せん断流パネル解析における留意点】

- ① 従来設計，FEM 解析も同様であるが，床版による主桁間の荷重分配作用と床版作用の重ね合わせについて，道示に具体的な許容値が示されていない。よって，解析結果を個別に判断して設計を行う必要がある。

2) 横荷重による曲げ応力度の照査

- ・風荷重，または地震荷重によって，床版が橋軸直角方向に曲げられることによって生じる床版の曲げ応力度を下図フローで照査する．
- ・風荷重，または地震荷重を全橋モデルに載荷して，床版橋軸方向縁部材の軸方向力から作用応力度を直接，求める．



付図-1.4 横荷重による曲げ応力度の照査フロー

【一定せん断流パネル解析における留意点】

- ① 従来設計，FEM 解析も同様であるが，横荷重による曲げ応力度について，道示に具体的な許容値が示されていない．よって，解析結果を個別に判断して設計を行う必要がある．

(2) 主桁

- ・主桁の設計は、次ページの設計フローに従う。
- ・負曲げモーメントによって床版に引張応力が生じる場合は、コンクリートを無効として橋軸方向鉄筋のみ有効断面とする。
- ・本設計マニュアル（案）では、床版への橋軸方向のプレストレス導入、床版コンクリートの打設順序は考慮しない。

【一定せん断流パネル解析における留意点】

① 要素分割手法

主桁の設計では、従来の許容応力度と解析結果を用いて算出した作用応力度を対比して照査することから、従来設計の格子解析と同程度の精度を確保するための要素分割手法を確立する必要がある。また、橋ごとに解析精度の確認を行う必要がある。要素分割の要領については、「付録2 一定せん断流パネルを用いた解析モデル作成マニュアル（案）」を参考にできる。

② 仮定断面の決定方法

従来設計では、はり要素の断面定数 (I_x) だけを仮定すればよいが、一定せん断流パネル解析では、桁高、フランジ・ウェブの断面定数 (A, I_x, I_y, J)、垂直補剛材の断面定数など全ての構成部材の断面を仮定しなければならない。

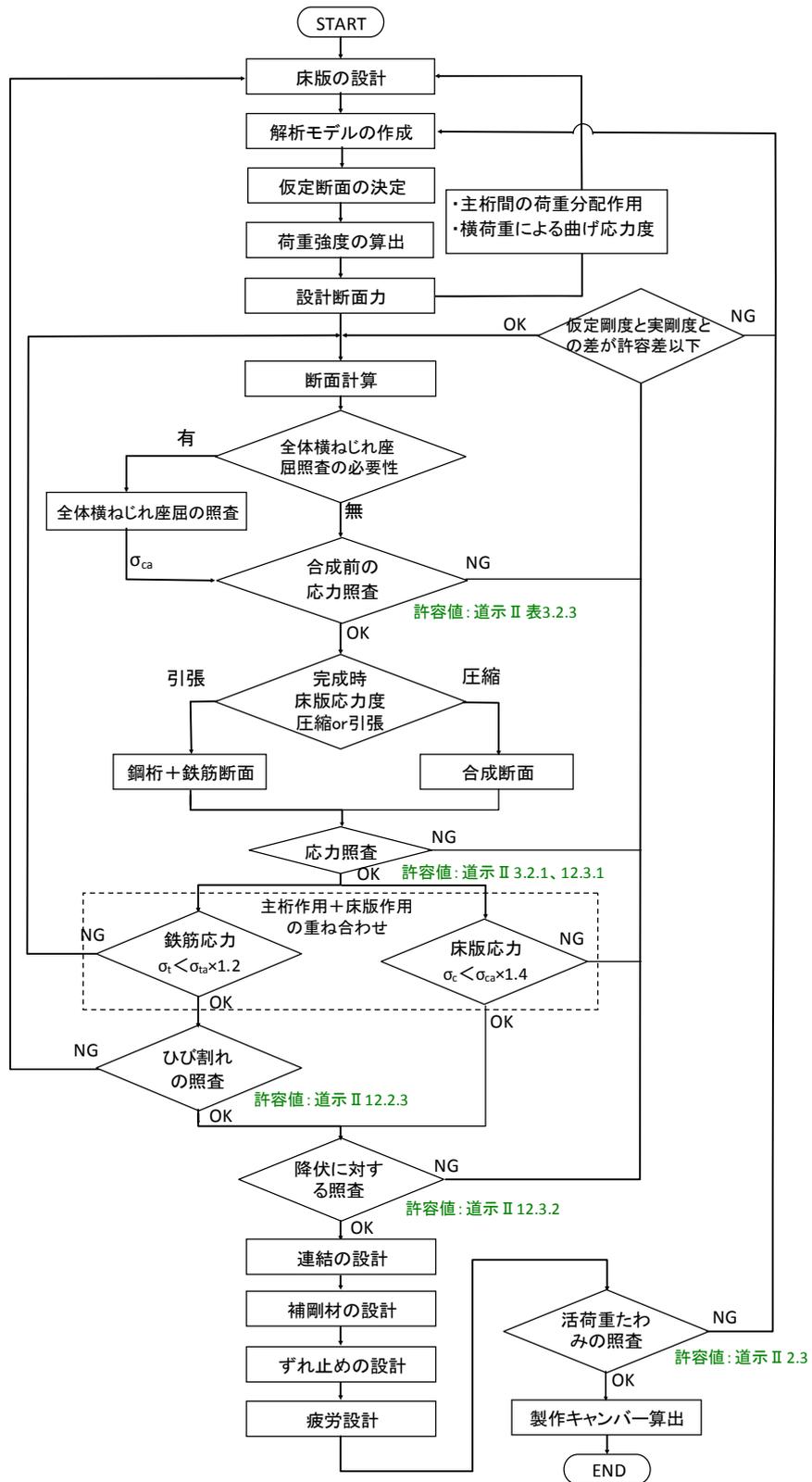
概略検討による仮定断面の設定方法について、今後整理していくことで効率化の向上を図ることができる。

③ 仮定断面と実断面の照査方法

従来設計では主桁の仮定剛度（断面二次モーメント）と実剛度との差が5～10%以内であることを照査するが、一定せん断流パネル解析では、主桁を構成する板要素の仮定剛度（断面積と断面二次モーメント）と実剛度、または部材としての仮定剛度（断面二次モーメント）と実剛度との差を照査するか、さらには許容差を何パーセントにするかなどを整理する必要がある。

④ 活荷重たわみの照査法および製作キャンバーの設定方法

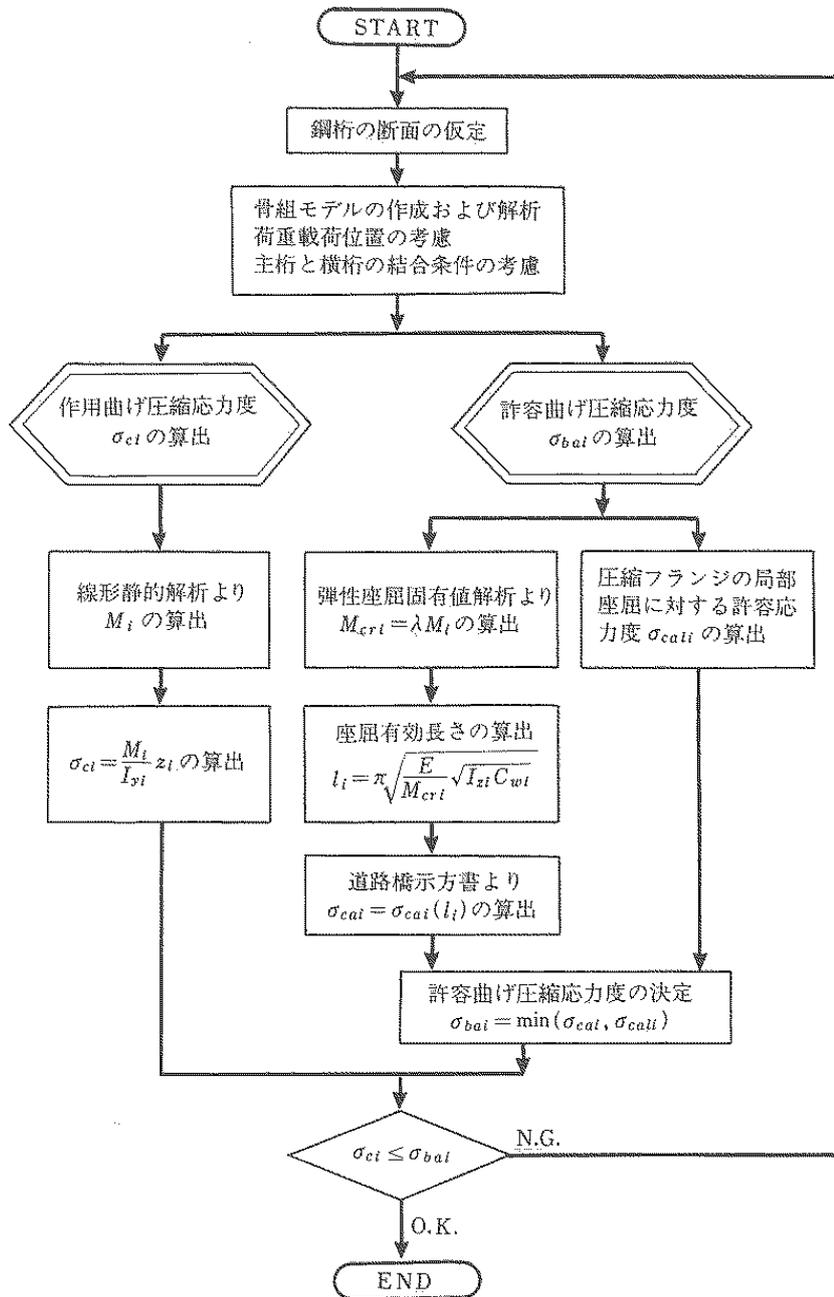
主桁のフランジとウェブの一定せん断流パネルの板厚を実板厚で解析すると、従来設計では考慮されていないせん断変形の影響で鉛直荷重による鉛直たわみが大きくなることに留意する必要がある。



付図-1.5 主桁の設計フロー

1) 全体横ねじれ座屈の照査

- ・幅員が小さく支間長の大きい桁橋では、鋼桁架設時や、床版打設時には鋼桁が全体横ねじれ座屈を起こす可能性がある。
- ・一定せん断流パネルモデルの弾性座屈固有値解析を行い、下図の照査フロー^{付1.2)}に従って、架設時の全体横ねじれ座屈の照査を行う。



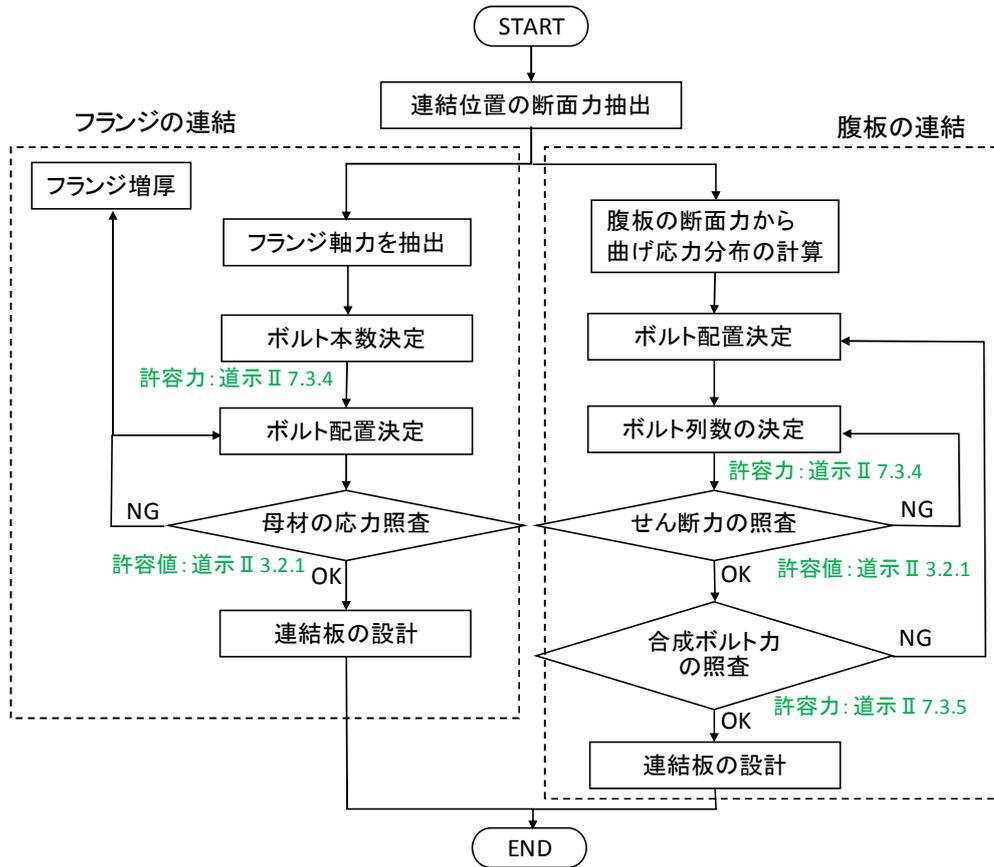
付図-1.6 全体横ねじれ座屈の照査フロー^{付1.2)}

【一定せん断流パネル解析における留意点】

- ① 弾性座屈固有値解析において、局部座屈モードと部材の座屈モードを正確に分類する必要がある。

2) 連結の設計

- ・道示Ⅱ3.2.3, 7.3 の各規定に従って, 下図の設計フローによって設計する.
- ・従来設計では格子解析結果から連結位置の作用応力度を算出する作業が必要なことに対して, 一定せん断流パネル解析による場合は, フランジと腹板の断面力から直接それぞれの設計計算を行う.

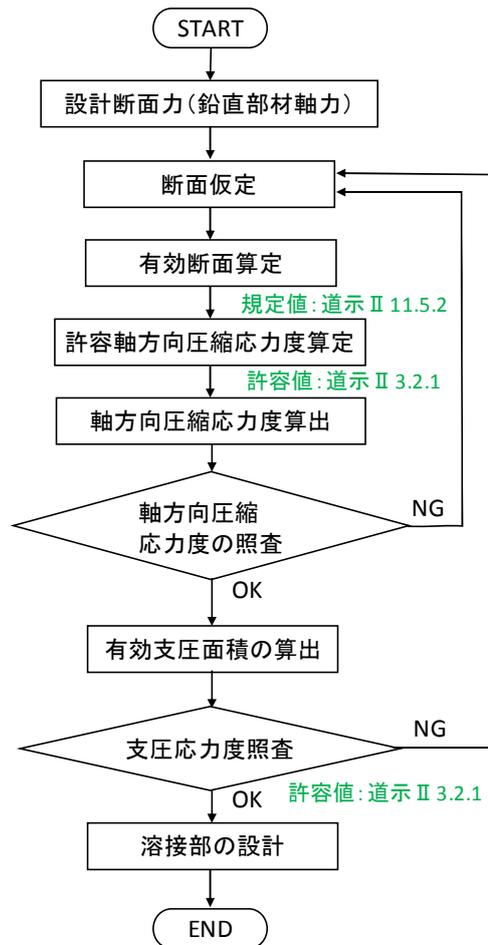


付図-1.7 連結の設計フロー

3) 補剛材の設計

a) 支点上補剛材

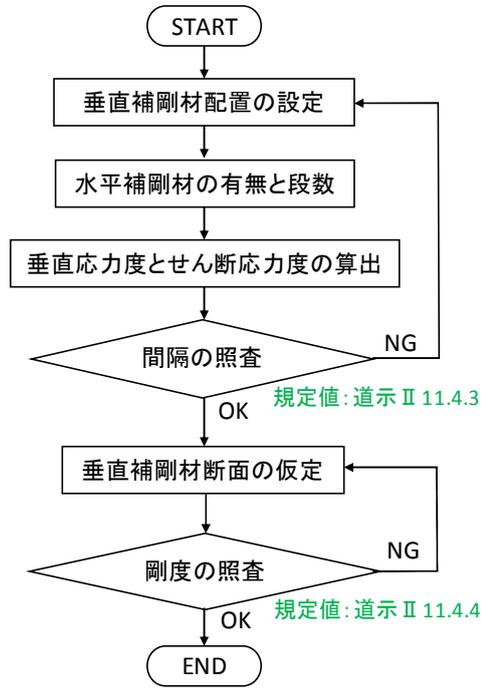
- ・道示Ⅱ 11.5 の各規定によって設計する.
- ・支点上補剛材の有効断面を持つ支点上の鉛直部材の軸力分布は、ほぼ三角形分布となり下端では支点反力と一致する. よって、解析結果の部材軸力を用いて下図の設計フローに従って設計する.



付図-1.8 支点上補剛材の設計フロー

b) 中間垂直補剛材

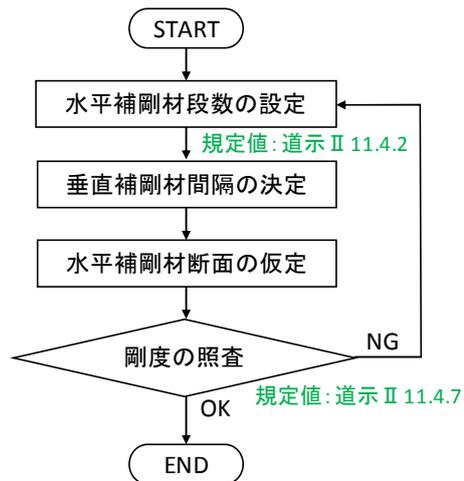
・道示Ⅱ11.4の各規定によって、下図の設計フローに従って設計する。



付図-1.9 中間垂直補剛材の設計フロー

c) 水平補剛材

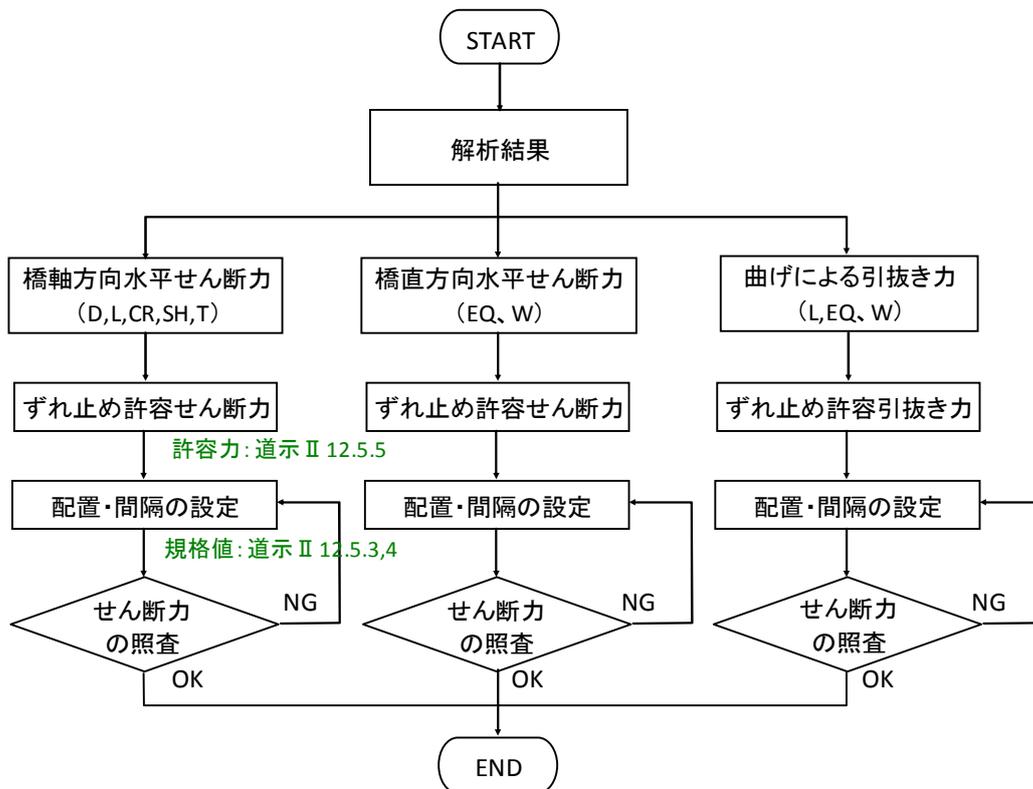
・道示Ⅱ11.4の各規定によって、下図の設計フローに従って設計する。



付図-1.10 水平補剛材の設計フロー

4) ずれ止めの設計

- ・道示Ⅱ12.5の各規定によって、下図の設計フローに従って設計する。
- ・鉛直方向のせん断力による橋軸方向水平せん断力のほかに、橋軸直角方向水平せん断力と曲げ引抜き力を考慮した場合のずれ止めの設計フローである。
- ・橋軸方向水平せん断力は、ずれ止め部分に配置した一定せん断流パネルのせん断流の解析結果から直接求める。
- ・橋軸直角方向水平せん断力は、ずれ止め部分に配置した鉛直部材のせん断力の解析結果から求める。
- ・曲げ引き抜き力は、ずれ止め部分に配置した鉛直部材の曲げモーメントの解析結果から求める。



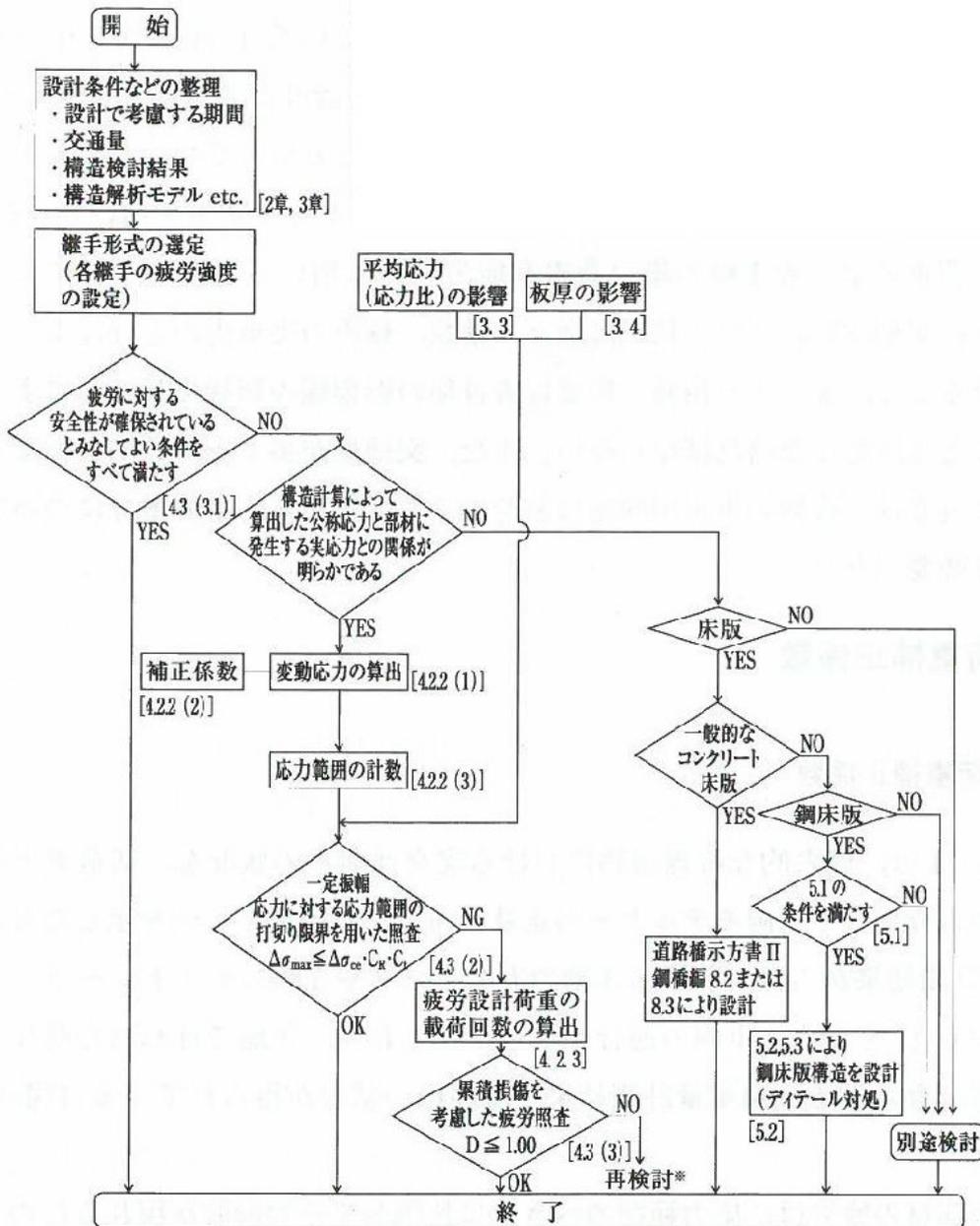
付図-1.11 ずれ止めの設計フロー

【一定せん断流パネル解析における留意点】

- ① 橋軸方向水平せん断力について、従来の許容応力度と解析結果を用いて算出した作用応力度を対比して照査することから、従来設計の格子解析と同程度の精度を確保するための要素分割手法を確立する必要がある。また、橋ごとに解析精度の確認を行う必要がある。要素分割の要領については、「付録2 一定せん断流パネルを用いた解析モデル作成マニュアル(案)」を参考にできる。
- ② 従来設計、FEM解析も同様であるが、橋軸直角方向水平せん断力および曲げ引抜き力について、道示に具体的な許容値が示されていない。よって、解析結果を個別に判断して設計を行う必要がある。

5) 疲労設計

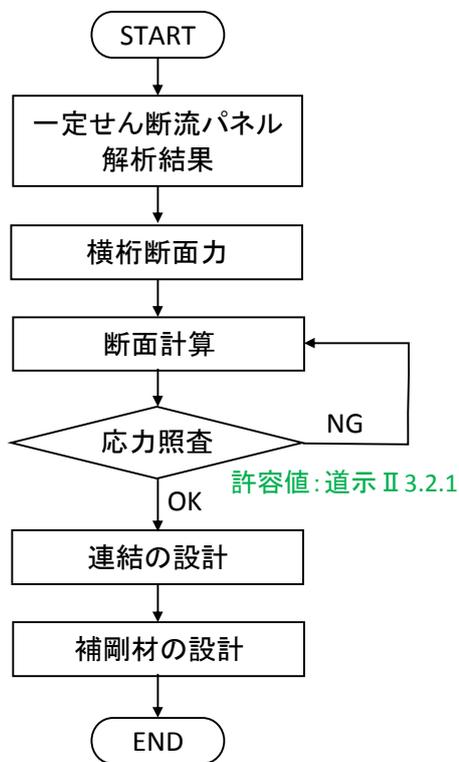
- ・道示Ⅱ5.3, 6章および鋼橋の疲労設計指針の各規定によって, 下図の設計フローに従って設計する.
- ・一定せん断流パネルモデルに, T荷重をレーン載荷して着目箇所の応力範囲を算出する.



付図-1.12 疲労設計フロー^{付 1.4)}

(3) 荷重分配横桁

- 各荷重ケースの断面力を集計して、応力照査を行う。ただし、横桁は主桁と同じくフランジ要素と腹板要素とでモデル化されているので、要素ごとに集計、照査する。



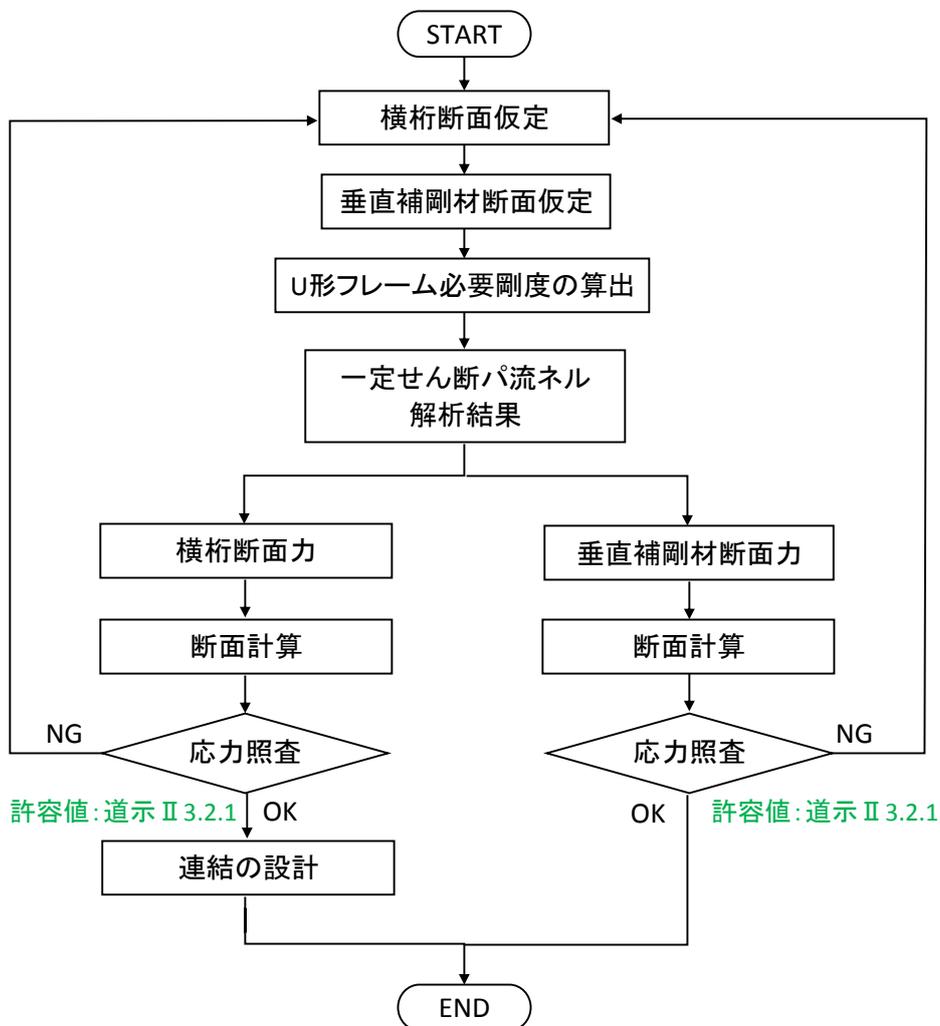
付図-1.13 荷重分配横桁の設計フロー

【一定せん断流パネル解析における留意点】

- 荷重分配横桁の設計では、従来の許容応力度と解析結果を用いて算出した作用応力度を対比して照査することから、従来設計の格子解析と同程度の精度を確保するための要素分割手法を確立する必要がある。また、橋ごとに解析精度の確認を行う必要がある。要素分割の要領については、「付録2 一定せん断流パネルを用いた解析モデル作成マニュアル（案）」を参考にできる。

(4) 中間横桁 (少数主桁橋)

- ・中間横桁と取付け部の垂直補剛材は、一定せん断流パネル解析結果の断面力によって応力照査する.
- ・下図の設計フローに従って設計する.



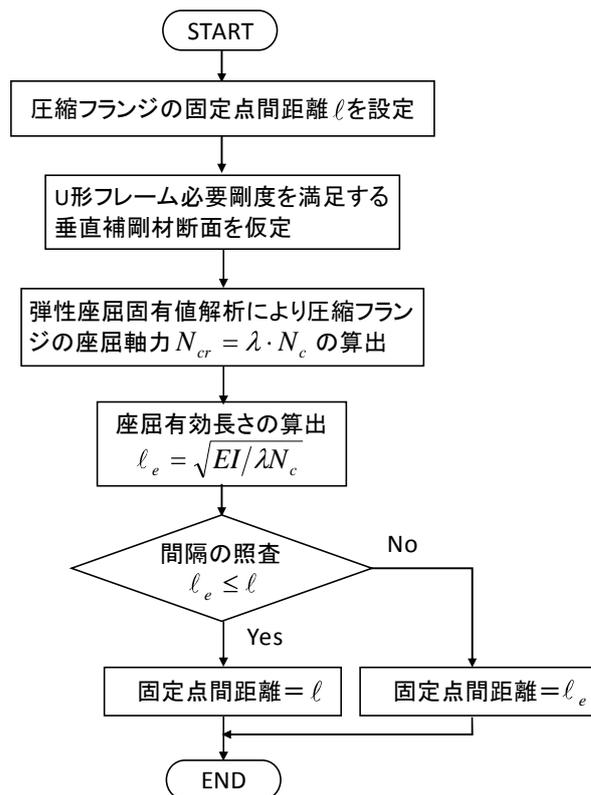
付図-1.14 中間横桁の設計フロー

【一定せん断流パネル解析における留意点】

- ① 中間横桁の設計では、従来の許容応力度と解析結果を用いて算出した作用応力度を対比して照査することから、従来設計の格子解析と同程度の精度を確保するための要素分割手法を確立する必要がある。また、橋ごとに解析精度の確認を行う必要がある。要素分割の要領については、「付録2 一定せん断流パネルを用いた解析モデル作成マニュアル (案)」を参考にできる。

1) U形フレーム剛度の照査 (参考)

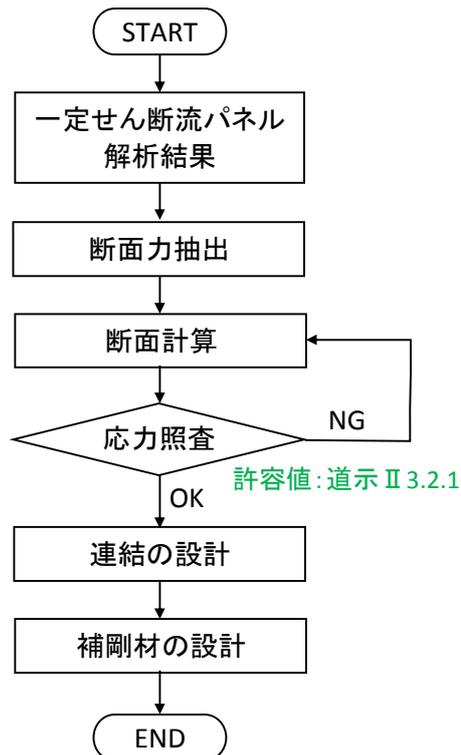
- 一定せん断流パネル解析において、弾性座屈解析結果から得られる圧縮フランジの固定点間距離 l_e を用いて圧縮フランジの座屈照査を行うことから、U形フレームの必要剛度を満足する必要がない。
- 以下はU形フレームの剛度の目安として、従来設計法と同等なU形フレームの必要剛度を確保する場合の照査フローを参考に示す。



付図-1.15 U形フレーム剛度の照査フロー (参考)

(5) 端横桁

- ・橋端部の床版は増厚して端横桁に打下ろすため、死荷重と活荷重（T 荷重）を支持できるように設計する。
- ・個別の力学モデルは用いずに、全橋モデルの解析結果から直接、部材力を求める。
- ・端横桁の荷重分担方法は設定せず、鉛直荷重および水平荷重を全橋モデルに載荷する。
- ・活荷重については、T 荷重を橋面全体に影響線載荷して、端横桁の最大・最小断面力を算出する。



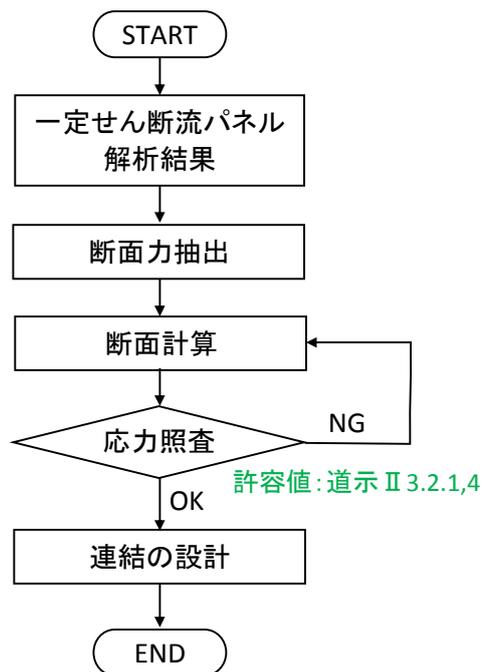
付図-1.16 端横桁の設計フロー

【一定せん断流パネル解析における留意点】

- ① 端横桁の設計では、従来の許容応力度と解析結果を用いて算出した作用応力度を対比して照査することから、従来設計と同程度の精度を確保するための要素分割手法を確立する必要がある。また、橋ごとに解析精度の確認を行う必要がある。要素分割の要領については、「付録2 一定せん断流パネルを用いた解析モデル作成マニュアル（案）」を参考にできる。

(6) 中間対傾構

- ・個別の力学モデルは用いずに，全橋モデルの解析結果から直接，部材力を求める．
- ・横荷重の影響以外に，鉛直荷重による部材力も考慮して設計する．その場合，対傾構は主要部材として設計する．
- ・中間対傾構の荷重分担方法は設定せず，鉛直荷重および水平荷重を全橋モデルに載荷する．
- ・活荷重についてはL荷重を，主桁位置を載荷点として影響線載荷して，中間対傾構部材の最大・最小断面力を算出する．



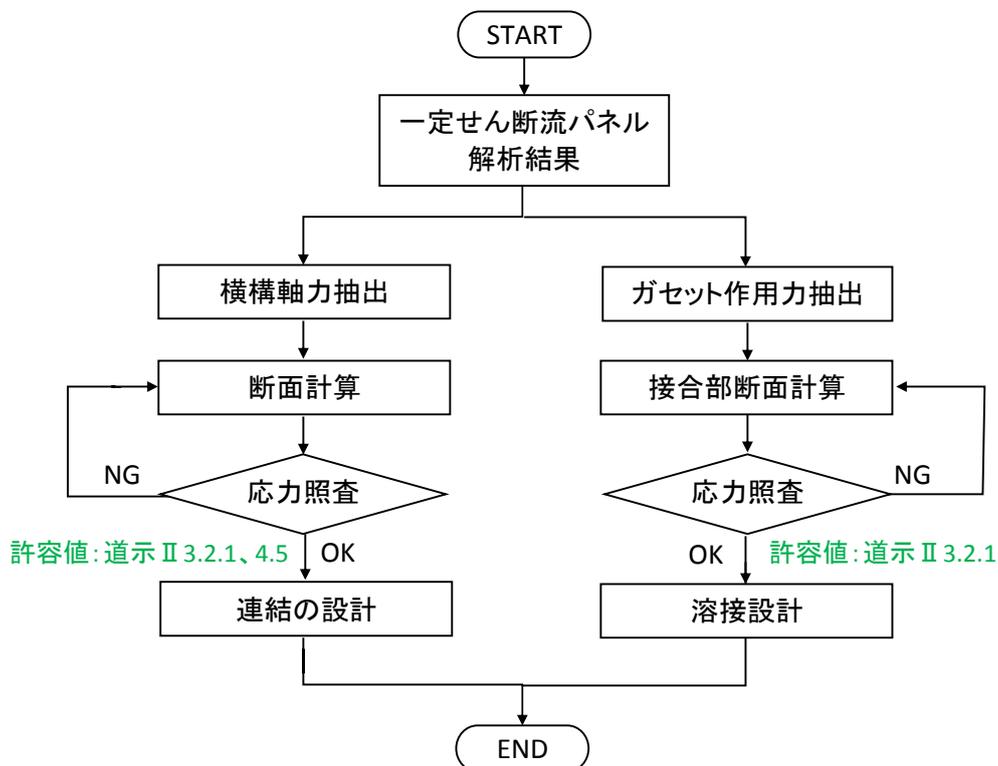
付図-1.17 中間対傾構の設計フロー

【一定せん断流パネル解析における留意点】

- ① 中間対傾構の設計では，従来の許容応力度と解析結果を用いて算出した作用応力度を対比して照査することから，従来設計と同程度の精度を確保するための要素分割手法を確立する必要がある．また，橋ごとに解析精度の確認を行う必要がある．要素分割の要領については，「付録2 一定せん断流パネルを用いた解析モデル作成マニュアル（案）」を参考にできる．

(7) 横構

- ・個別の力学モデルは用いずに、全橋モデルの解析結果から直接、部材力を求める。
- ・横荷重の影響以外に、鉛直荷重による部材力も考慮して設計する。その場合、横構は主要部材として設計する。
- ・横構の荷重分担方法は設定せず、鉛直荷重および水平荷重を全体系解析モデルに載荷する。
- ・活荷重についてはL荷重を、主桁位置を載荷点として影響線載荷して、横構部材の最大・最小断面力を算出する。
- ・ガセットプレートに作用する力を算出し、ガセットプレート接合部を設計する。



付図-1.18 横構の設計フロー

【一定せん断流パネル解析における留意点】

- ① 横構の設計では、従来の許容応力度と解析結果を用いて算出した作用応力度を対比して照査することから、従来設計と同程度の精度を確保するための要素分割手法を確立する必要がある。また、橋ごとに解析精度の確認を行う必要がある。要素分割の要領については、「付録2 一定せん断流パネルを用いた解析モデル作成マニュアル（案）」を参考にできる。

付録 1.3 鋼床版連続箱桁橋

(1) 主桁

- ・鋼床版箱桁の設計は、次ページの設計フローに従う。
- ・鋼床版と上フランジ縦リブについては、主桁作用と床版作用の重ね合わせの照査を行う。
- ・せん断遅れが顕著に現れるフランジは、せん断遅れを適切に再現できる程度にフランジを分割してモデル化することで、有効幅を設定しない。

【一定せん断流パネル解析における留意点】

① 要素分割手法

主桁の設計では、従来の許容応力度と解析結果を用いて算出した作用応力度を対比して照査することから、従来設計の格子解析と同程度の精度を確保するための要素分割手法を確立する必要がある。また、橋ごとに解析精度の確認を行う必要がある。要素分割の要領については、「付録2 一定せん断流パネルを用いた解析モデル作成マニュアル（案）」を参考にできる。

② 仮定断面の決定方法

従来設計では、はり要素の断面定数 (A, I_x, I_y, J) だけを仮定すればよいが、一定せん断流パネル解析では、桁高、箱幅、フランジ・ウェブ・縦リブ、ダイアフラム、横リブ、垂直補剛材の断面定数 (A, I_x, I_y, J) など全ての構成部材の断面を仮定しなければならない。

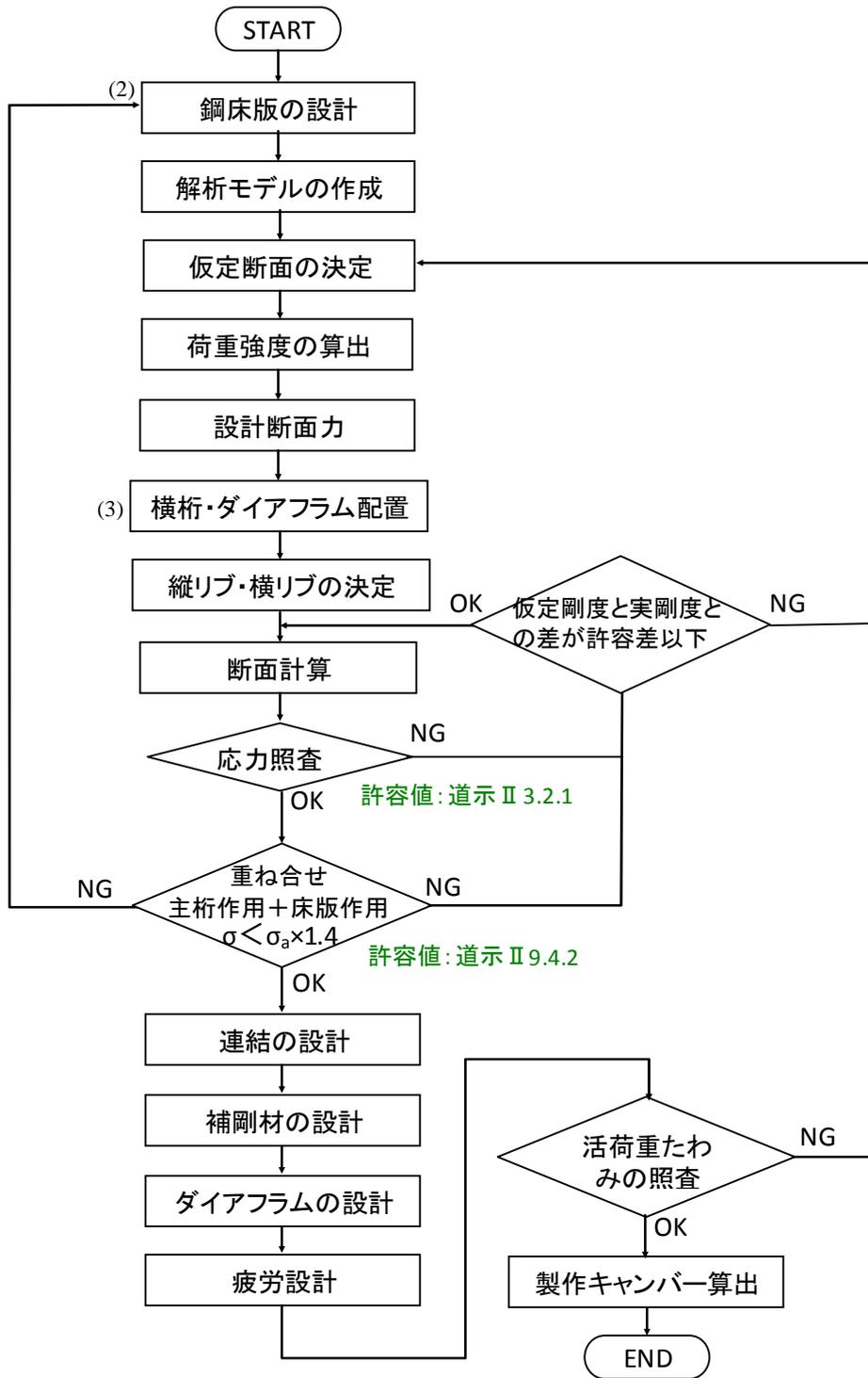
概略検討による仮定断面の設定方法について、今後整理していくことで効率化の向上を図ることができる。

③ 仮定断面と実断面の照査方法

従来設計では主桁の仮定剛度（断面二次モーメント）と実剛度との差が5～10%以内であることを照査するが、一定せん断流パネル解析では、主桁を構成する板要素の仮定剛度（断面積と断面二次モーメント）と実剛度、または部材としての仮定剛度（断面二次モーメント）と実剛度との差を照査するか、さらには許容差を何パーセントにするかなどを検討する必要がある。

④ 活荷重たわみの照査法および製作キャンバーの設定方法

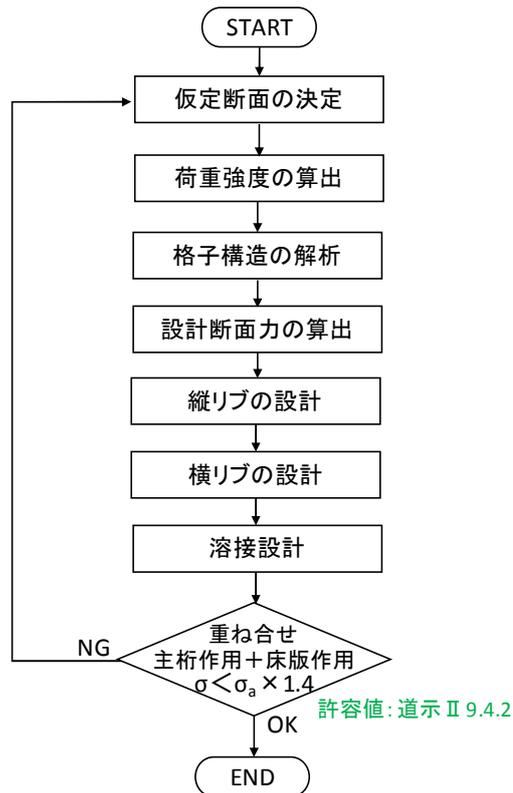
主桁のフランジとウェブの一定せん断流パネルの板厚を実板厚で解析すると、従来設計では考慮されていないせん断変形の影響で鉛直荷重による鉛直たわみが大きくなることに留意する必要がある。



付図-1.19 主桁の設計フロー

(2) 鋼床版

- ・鋼床版の設計は、下図の設計フローに従う。
- ・鋼床版の解析は、従来設計の格子桁構造の解析によって行う。
- ・主桁作用と床版および床組作用を同時に考慮した場合に安全であることを照査する。この時、許容応力度を 40%割増した許容応力度により照査する。



付図-1.20 鋼床版の設計フロー

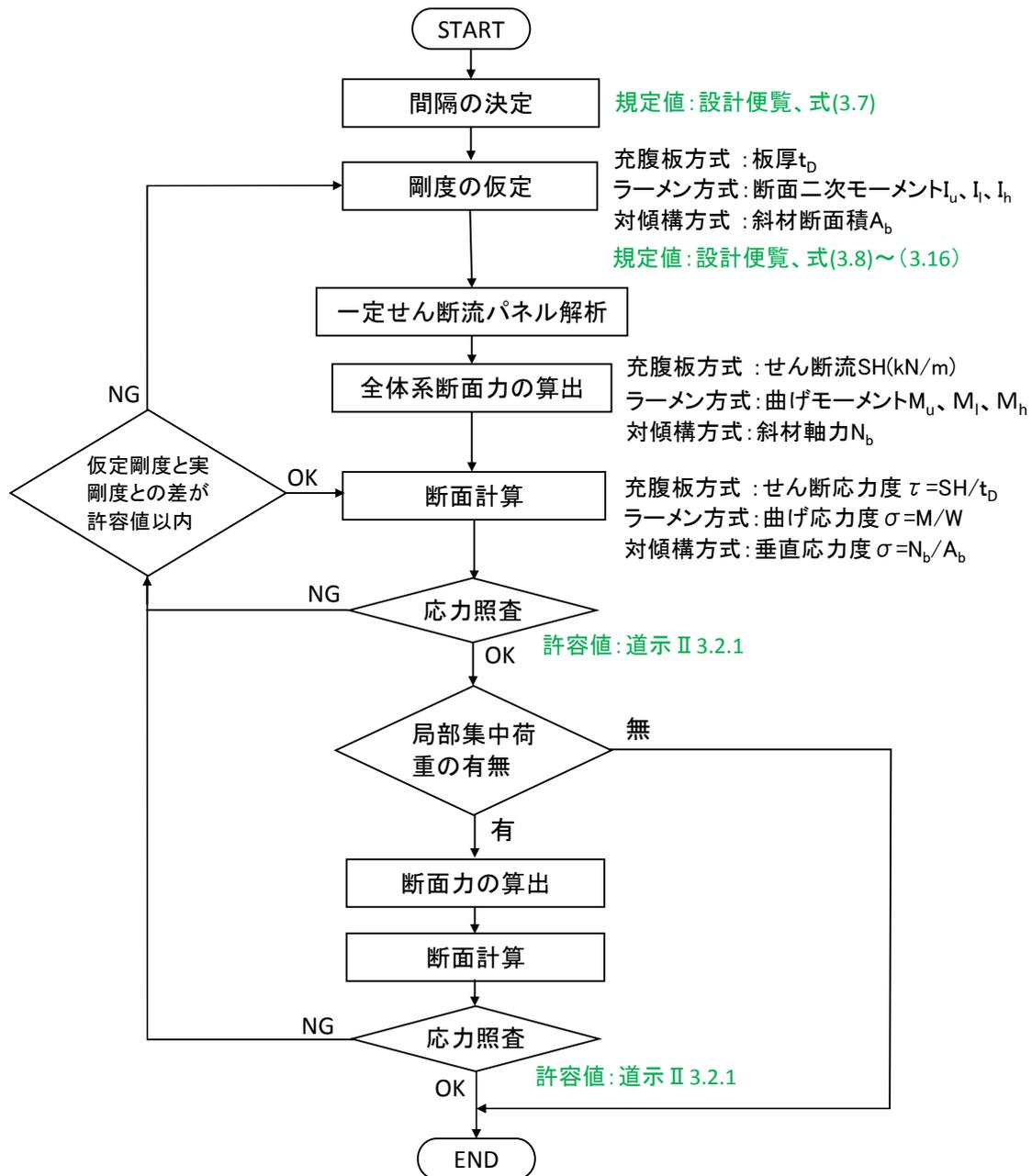
(3) ダイアフラム

1) 中間ダイアフラム

- ・鋼道路橋設計便覧に従って、ダイアフラムの間隔と必要剛性を確保する^{付1.3)}。
- ・充腹板方式の場合は、ダイアフラムに作用するせん断流から直接せん断応力度を算出して照査する。
- ・ラーメン方式の場合は、矩形ラーメンの骨組を一定せん断流パネルモデルに組み込んで解析して断面力を直接求める。これより、ラーメン部材の応力度を照査する。
- ・対傾構方式の場合は、斜材軸力から垂直応力度を算出して照査する。
- ・床組ブラケットや横桁等から局部集中荷重を受ける場合は、別途力学モデルを設定して照査する。

【一定せん断流パネル解析における留意点】

- ① 床組ブラケットや横桁等から局所集中荷重を受ける場合は、別途力学モデルを設定して計算する必要がある。



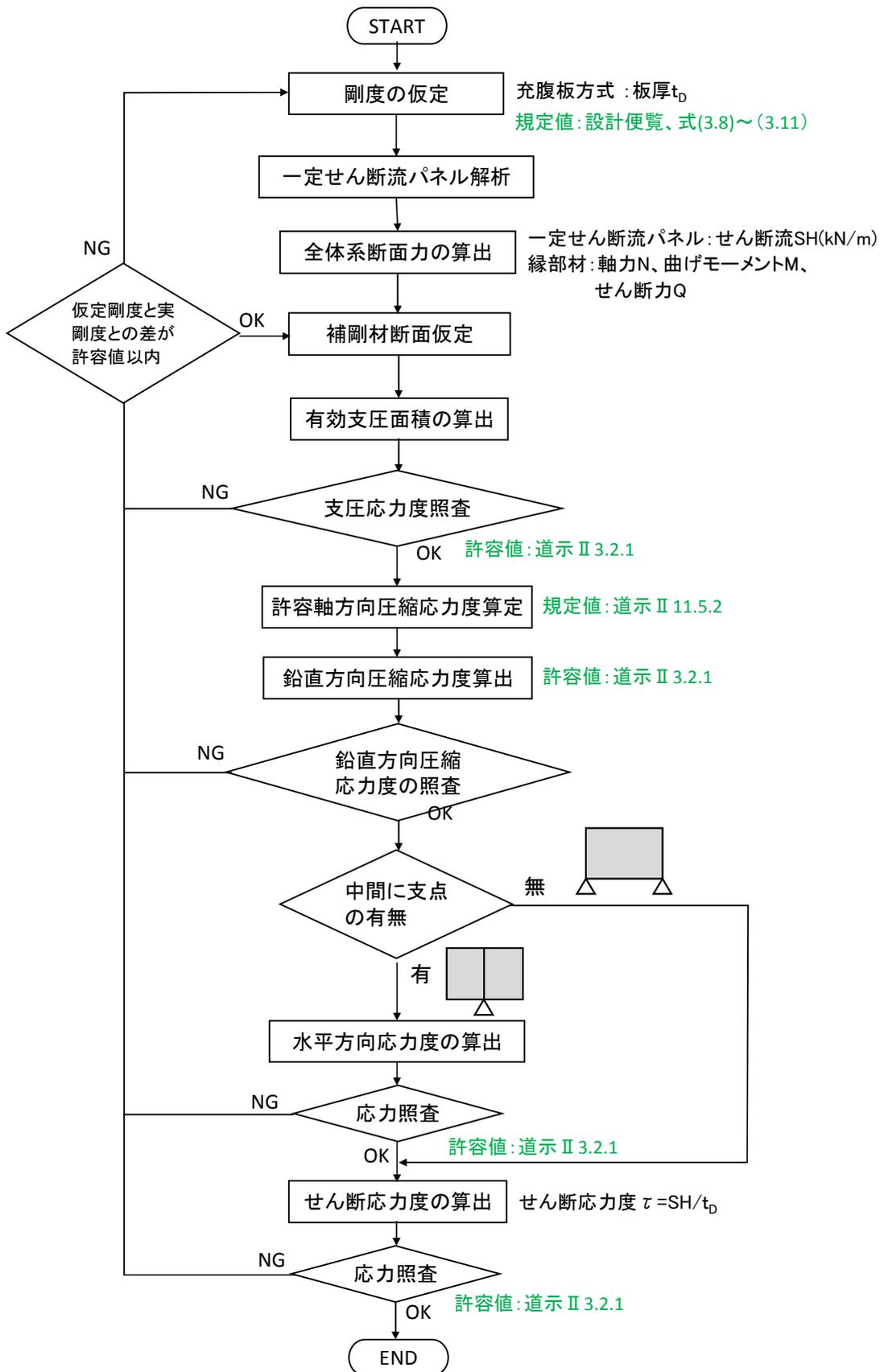
付図-1.21 中間ダイアフラムの設計フロー

2) 支点上ダイヤフラム

- ・鋼道路橋設計便覧に従って、ダイヤフラムの必要剛性を確保する^{付1.3)}。
- ・支点上補剛材として必要な、支圧応力度、鉛直方向応力度の照査を行う。
- ・ダイヤフラムの中間に支点がある場合は、水平方向応力度の照査を行う。
- ・全橋モデルの解析結果から得られるねじりモーメント（せん断流）に対するせん断応力度の照査を行う。
- ・床組ブラケットや横桁等から局部集中荷重を受ける場合は、別途力学モデルを設定して照査する。

【一定せん断流パネル解析における留意点】

- ① 床組ブラケットや横桁等から局所集中荷重を受ける場合は、別途力学モデルを設定して計算する必要がある。



付図-1.22 支点上ダイアフラムの設計フロー

付録 1.4 鋼製橋脚

- ・橋脚の設計は、次ページの設計フローに従う。
- ・隅角部は、せん断遅れの影響を考慮して断面設計を行う。
- ・レベル2地震動に対しても同様に解析し、断面照査を行う。

【一定せん断流パネル解析における留意点】

① 要素分割手法

橋脚の設計では、従来の許容応力度と解析結果を用いて算出した作用応力度を対比して照査することから、従来設計の格子解析と同程度の精度を確保するための要素分割手法を確立する必要がある。また、橋ごとに解析精度の確認を行う必要がある。要素分割の要領については、「付録2 一定せん断流パネルを用いた解析モデル作成マニュアル（案）」を参考にできる。

② 有効座屈長の決定方法

立体骨組モデルのように弾性座屈解析によって有効座屈長を求めるためには、局部座屈モードと部材の座屈モードを正確に分類する必要がある。

③ 仮定断面の決定方法

従来設計では、はり要素の断面定数 (A, I_x, I_y, J) だけを仮定すればよいが、一定せん断流パネル解析では、箱断面寸法、フランジ・ウェブ・縦リブ、ダイヤフラム、横リブ、垂直補剛材の断面定数 (A, I_x, I_y, J) など全ての構成部材の断面を仮定しなければならない。

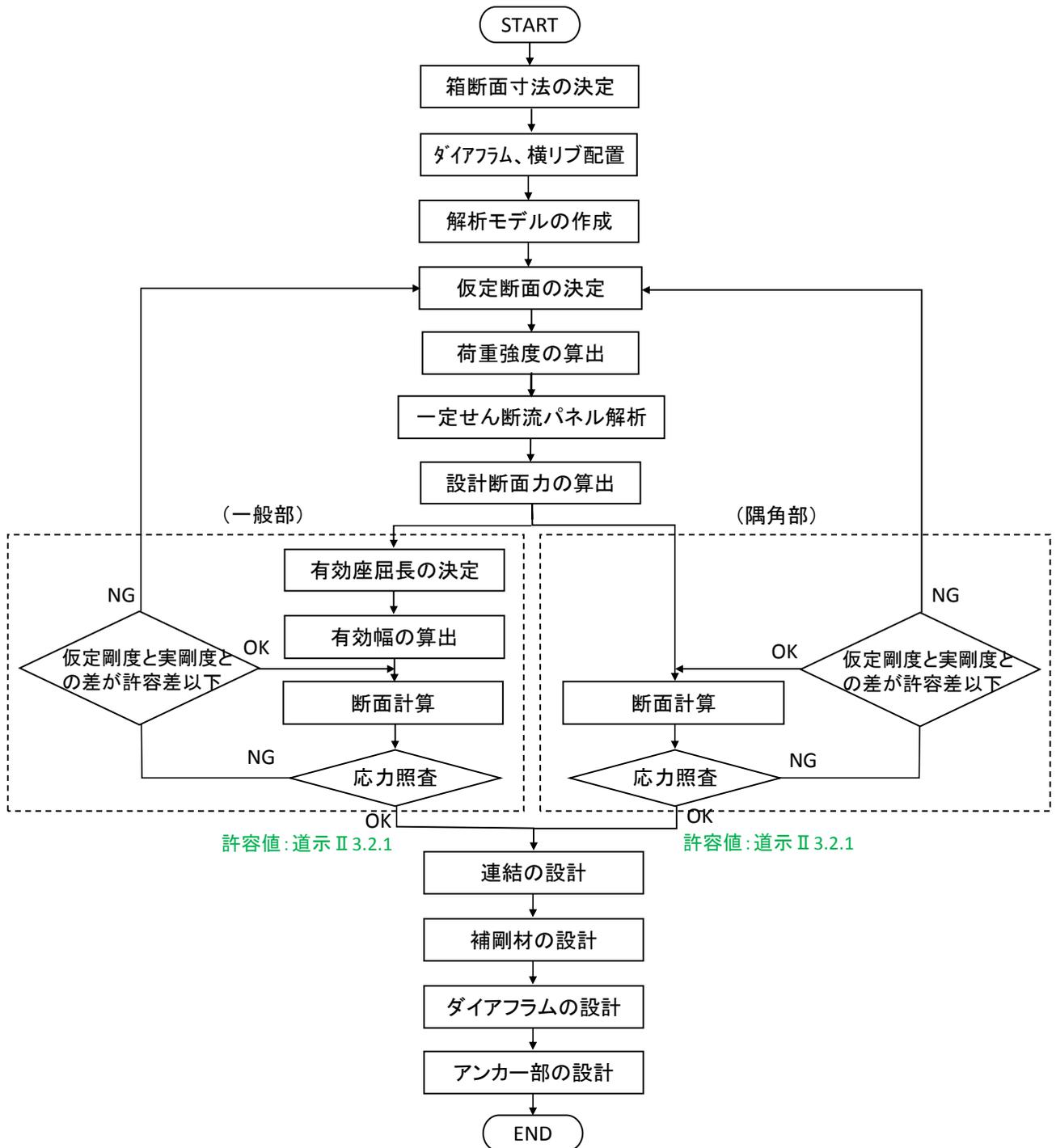
概略検討による仮定断面の設定方法について、今後整理していくことで効率化の向上を図ることができる。

④ 仮定断面と実断面の照査方法

従来設計では主桁の仮定剛度（断面二次モーメント）と実剛度との差が5～10%以内であることを照査するが、一定せん断流パネル解析では、主桁を構成する板要素の仮定剛度（断面積と断面二次モーメント）と実剛度、あるいは部材としての仮定剛度（断面二次モーメント）と実剛度との差を照査するか、さらには許容差を何パーセントにするかなどを検討する必要がある。

⑤ 活荷重たわみの照査法および製作キャンバーの設定方法

主桁のフランジとウェブの一定せん断流パネルの板厚を実板厚で解析すると、従来設計では考慮されていないせん断変形の影響で鉛直荷重による鉛直たわみが大きくなることに留意する必要がある。



付図-1.23 橋脚の設計フロー

付録 1.5 一定せん断流パネル解析を主体とした設計において概略設計段階で決めておくべき特徴的な事項

本設計マニュアル(案)は、対象橋梁の構造諸元が確定していることを前提としている。ここでは、一定せん断流パネル解析を主体とした設計を行う場合、必要となる構造諸元を仮定するための検討方法および判断基準を整理して示す。

一定せん断流パネル解析と従来の格子解析における解析モデルの主な相違点は本編第2章より次のとおりである。解析モデル作成時には、これら相違点を考慮して必要となる構造諸元を決定する。

■一定せん断流パネル解析と従来の格子解析における解析モデルの主な相違点

- ・主要部材が1次元の棒要素ではなく、部材形状を3次元的な立体形状にモデル化する。
- ・格子解析ではモデル化されない、横構・対傾構などの2次部材や、床桁・縦桁などの床組構造をモデル化する。
- ・非合成桁の場合も含めて、床版を連続体としてモデル化する。

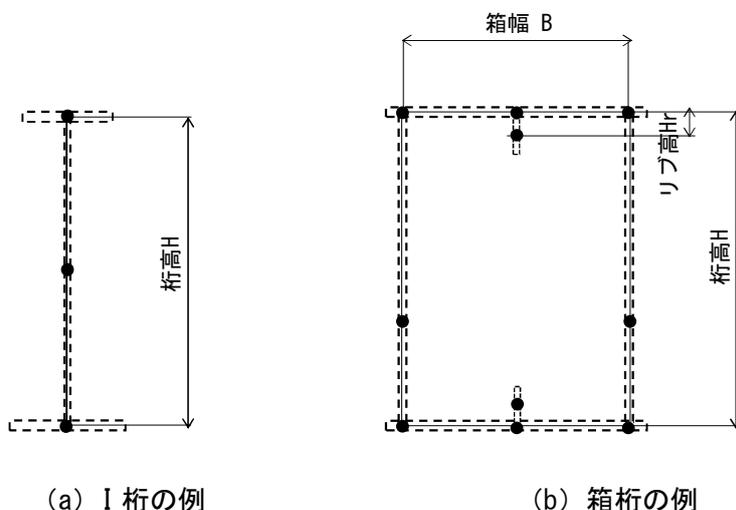
(1) 主要部材配置

主要部材の配置は、格子解析と同様に、橋梁形式ごとの参考図書^{付1.6~付1.8}や実績資料^{付1.9}などを参考にして決定すればよい。しかし、特殊な構造形式の場合は、概略設計段階で格子解析を行い、主要部材の配置を決定することもある。

(2) 部材寸法

部材形状を3次元的にモデル化する場合、従来設計では容易に変更可能な仮定値としている場合もある部材寸法を決定しておく必要がある。I桁の場合は桁高、箱桁の場合は桁高と箱幅および縦リブ断面寸法などである。

部材断面寸法の決定には、前述の既往資料^{付1.6~付1.9}などを参考にするのが良いが、概略設計段階で試算による検討が必要となる場合もある。



付図-1.24 部材寸法の例

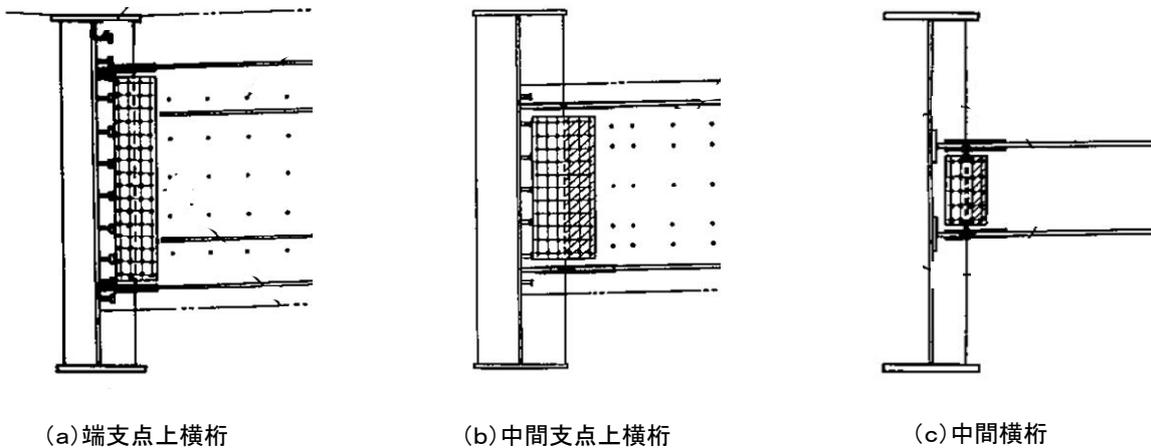
(3) 格点部における部材間の取付け構造

格子解析では、格点部における部材同士の結合は単純に剛結合、あるいは結合自由度を任意に設定すれば良い。しかし、一定せん断流パネル解析では、部材高などの大きさが両部材間で異なる場合、どのような取付け構造とするかをあらかじめ決定しておく必要がある。

代表的な部材取付け構造^{付1.10}を以下に示す。構造形式によって考慮すべき構造特性が異なることに注意が必要である。

1) 少数主桁橋の主桁と横桁間の取付け構造

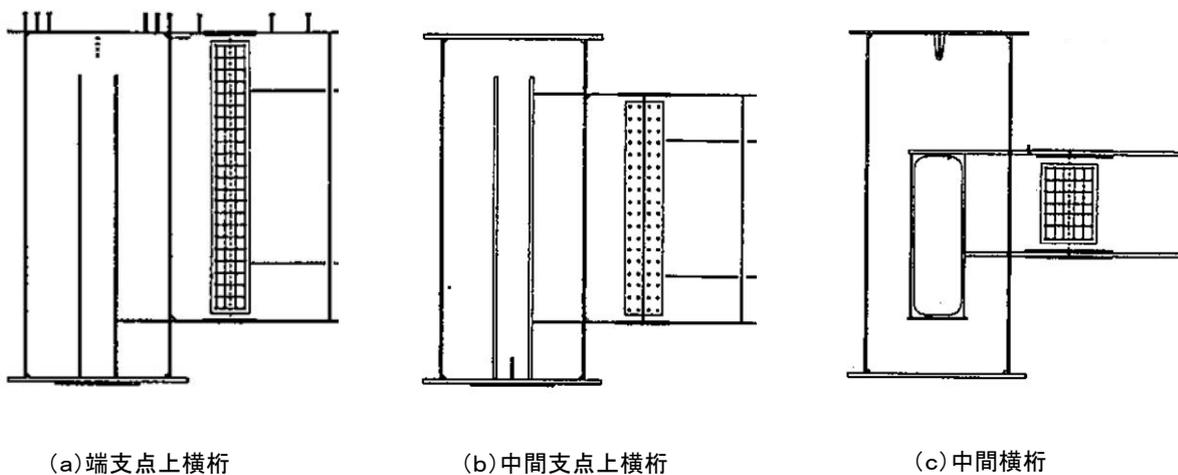
下図のように支点上横桁と中間横桁とでは横桁の高さと主桁に対する取付け位置が異なる。特に、中間横桁は主桁の横ねじれ座屈への影響を考慮して取付け位置と剛度を決定する必要がある。



付図-1.25 少数主桁橋の横桁取付け構造の例

2) 細幅箱桁橋の主桁と横桁間の取付け構造

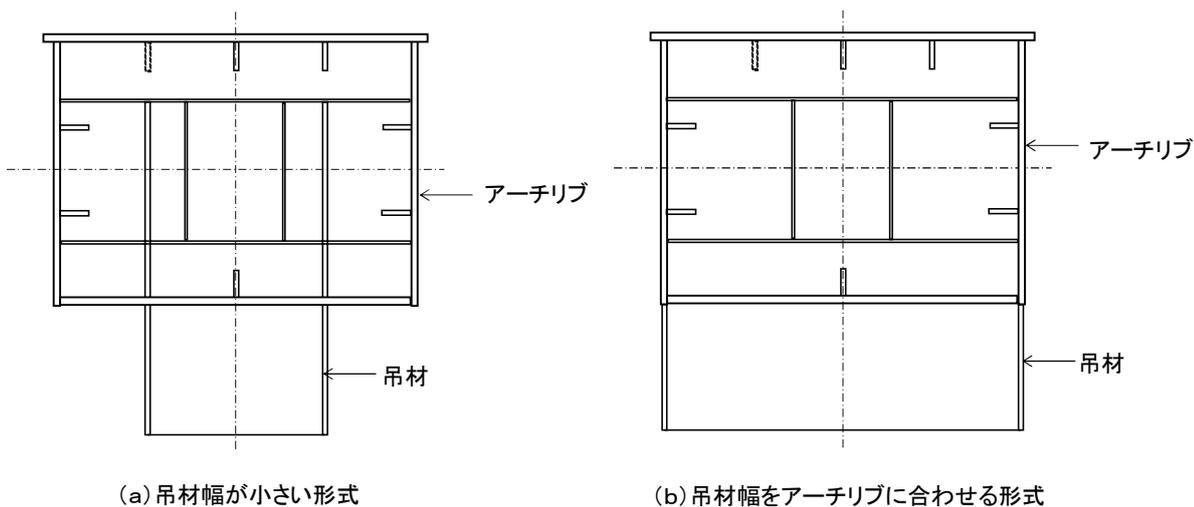
下図のように支点上横桁と中間横桁とでは横桁の高さと主桁に対する取付け位置が異なる。特に、中間横桁は主桁の横ねじれ変形に対する影響、およびダイヤフラムの補強構造を考慮して取付け位置と剛度を決定する必要がある。



付図-1.26 細幅箱桁橋の横桁取付け構造の例

3) アーチリブあるいは主桁と吊材間の取付け構造

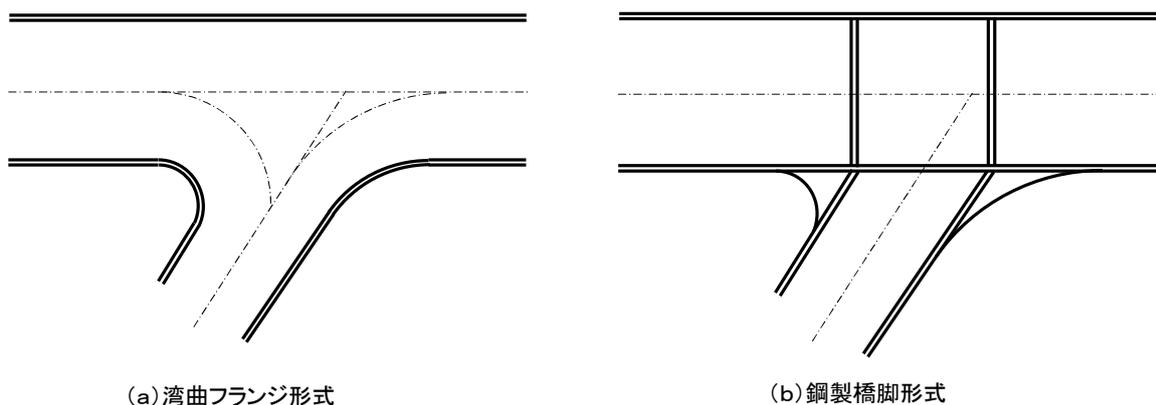
アーチリブあるいは主桁と吊材との取付け構造は、大別すると下図のように吊材幅が小さい場合とアーチリブに合わせる場合の2種類がある。アーチリブと吊材の部材幅の関係、アーチリブの面外座屈に対する補強の効果などを考慮して決定する必要がある。吊材幅が小さい場合は、アーチリブのダイアフラムに補強リブが必要なことから、一定せん断流パネルによってモデル化し、応力伝達を評価する必要がある。



付図-1.27 アーチリブの吊材取付け構造の例

4) 方杖ラーメン橋の隅角部の構造形式

方杖ラーメン橋隅角部の構造形式は、大別すると下図のように湾曲フランジ形式と鋼製橋脚形式がある。小規模な方杖ラーメン橋では湾曲フランジ形式が多いが、橋梁規模や隅角部の作用力などを勘案して、構造形式を決定する必要がある。



付図-1.28 方杖ラーメン橋の隅角部の構造形式の例

【付録1 参考文献】

- 付 1.1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2012.3.
- 付 1.2) (社) 土木学会 鋼構造委員会：鋼構造架設設計施工指針[2012 年版]，2012.5.
- 付 1.3) (社) 日本道路協会：鋼道路橋設計便覧，1980.8.
- 付 1.4) (社) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002.3.
- 付 1.5) 奥村敏恵，石沢成夫：薄板構造ラーメン隅角部の応力計算について，土木学会論文集 第 153 号，pp.1-18，1968.5
- 付 1.6) (社) 日本橋梁建設協会：連続合成 2 主桁橋の設計例と解説，2005.8
- 付 1.7) (社) 日本橋梁建設協会：細幅箱桁橋のコンセプトと設計例，2004.12
- 付 1.8) 「新しい鋼橋の設計」編集委員会：新しい鋼橋の設計，山海堂，2002.12
- 付 1.9) (社) 日本橋梁建設協会：'11 デザインデータブック，2011.4
- 付 1.10) (社) 日本橋梁建設協会：鋼橋構造詳細の手引き，2002.1

付録 2

一定せん断流パネルを用いた解析モデル作成マニュアル（案）

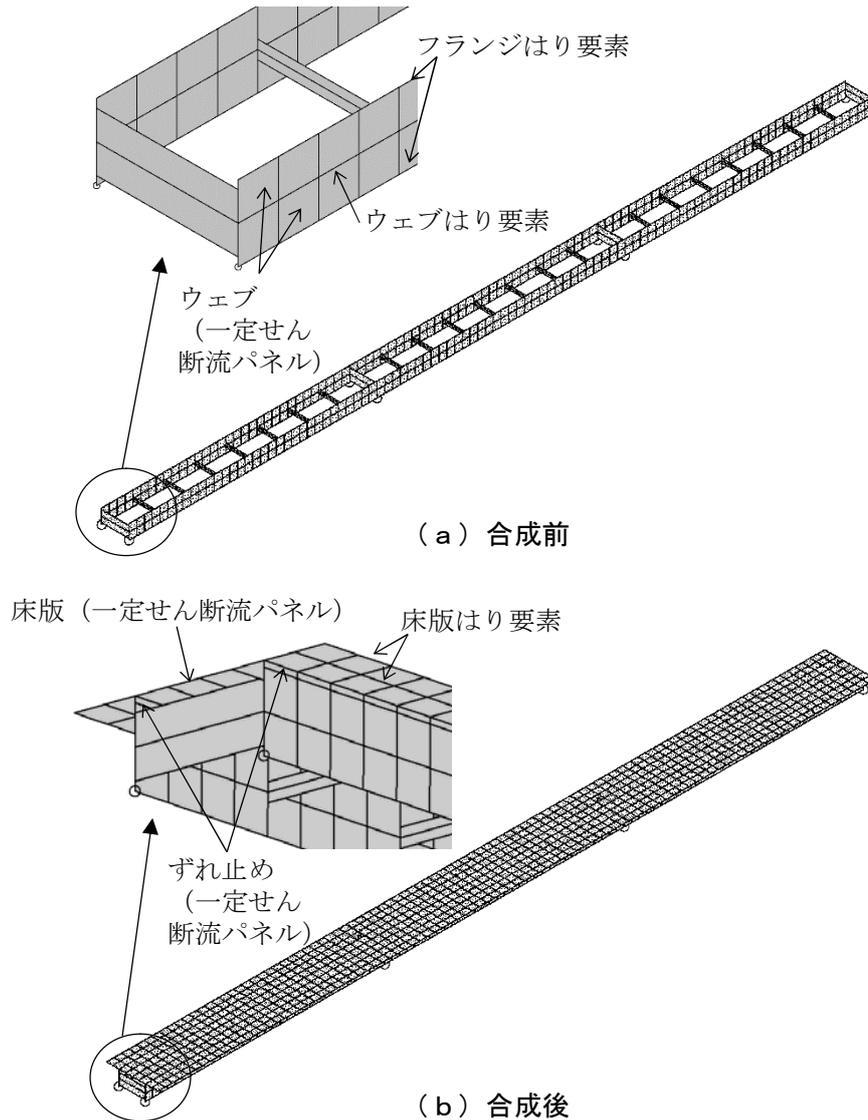
付録2 一定せん断流パネルを用いた解析モデル作成マニュアル（案）

「付録1 一定せん断流パネルを用いた解析による鋼道路橋の設計マニュアル（案）」では、連続合成I桁橋、連続鋼床版箱桁橋、および鋼製橋脚の3形式を対象として、一定せん断流パネル解析を主体とした設計フローを示した。ここで、提案した新しい設計フローでは、部材の設計において、道示に規定されている許容応力度と対比できる精度の作用応力度を算出できる解析モデルを前提としている。また、2次部材や局所的な応力集中を考慮した作用応力度を算出する場合は、評価が可能な詳細モデルを前提としている。これらについて、それぞれの橋梁形式における標準的な橋梁を想定した、モデル作成要領の目安、および留意点を基本としてここに整理した。

付録 2.1 連続合成 I 桁橋

(1) 概要

- ①主桁, 床版, 横桁, 対傾構, 横構など全ての構成部材を一定せん断流パネルと骨組部材とで, 全橋を立体的にモデル化する.
- ②合成前は鋼部材のみ, 合成後は床版を付加した解析モデルとして, 各系の荷重に対する解析を行う.
- ③横荷重も同解析モデルで解析する.



付図-2.1 連続合成 I 桁橋の一定せん断流パネル解析モデルの例

(2) モデル化

1) 床版

a) モデル化要領

床版を橋軸方向と橋軸直角方向のはり要素（縁部材）で格子状にモデル化して軸方向力と曲げモーメントを受け持たせ、格子の間に一定せん断流パネルを設置してせん断剛性を受け持たせることを基本とする。

b) 要素分割

i) 橋軸直角方向

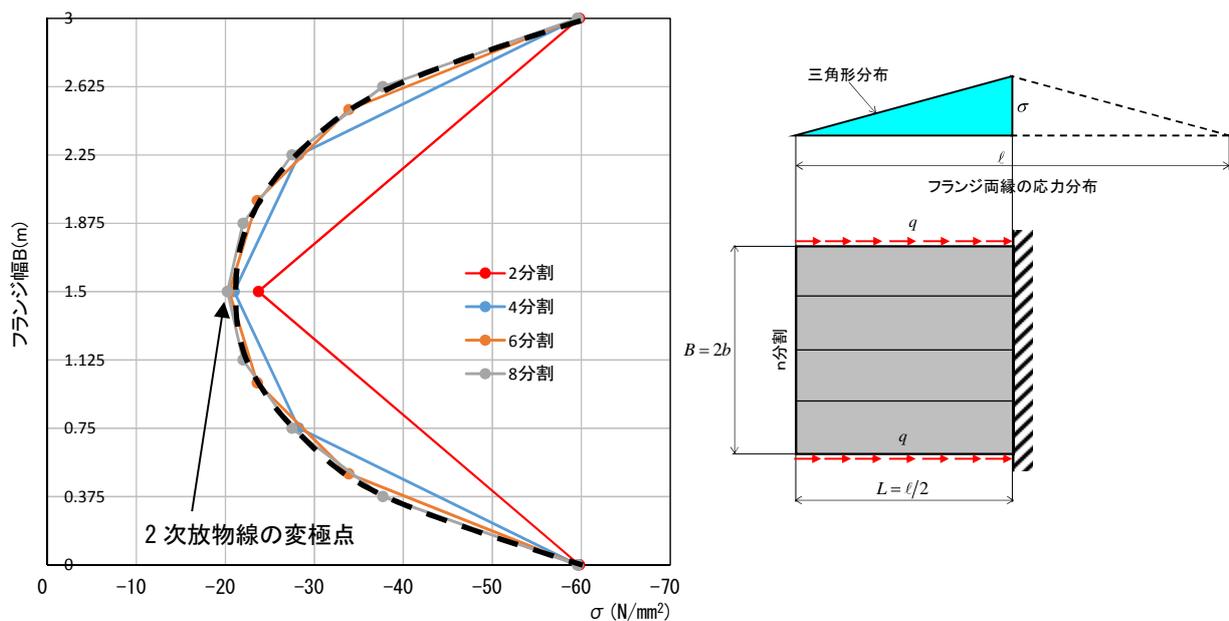
【目的】

合成桁における床版のせん断遅れによる有効幅を評価できるように分割する。

【分割例】

桁橋の場合、合成桁の床版や鋼床版桁の鋼床版デッキのせん断遅れによる曲げ応力分布は、二次元弾性問題として Airy の応力関数を用い、また面内変位をそれによって表現することにより算出することができる^{付2.1)}。ただし、そこで得られる厳密解はかなり煩雑であることから、鋼床版桁のデッキプレート内の曲げ応力分布が2次放物線で近似できるという Reissner の仮定が、小松らや中井らによって実験あるいは解析によって確認されている^{付2.2,付2.3)}。

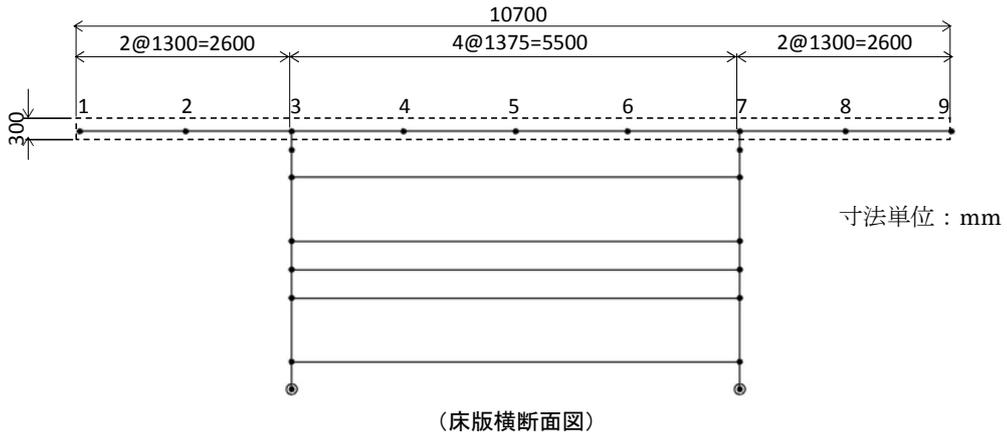
ここで、合成桁橋の床版を想定した、片持ちりの両縁に三角形分布で軸方向荷重を作用させた簡易モデルによる、床版の分割数をパラメータとした曲げ応力分布の計算結果を下図に示す。これより、床版縁（主桁直上を想定）と、曲げ応力分布の変極点である床版幅中央との間を2分割以上とする場合、せん断遅れを再現できることがわかる。



付図-2.2 要素分割数を変化させた場合の床版の曲げ応力分布の計算例

つまり、桁橋の場合、橋軸直角方向の分割は主桁間を4分割以上、張出し部を2分割以上とすることを参考にできる。

また、道路橋示方書^{付2.4)}（以下、「道示」という）の有効幅を用いて算出する従来設計と、作用応力度や主桁のたわみが同等程度となることで要素分割の妥当性を確認することができる。



付図-2.3 床版の要素分割の例（橋軸直角方向）

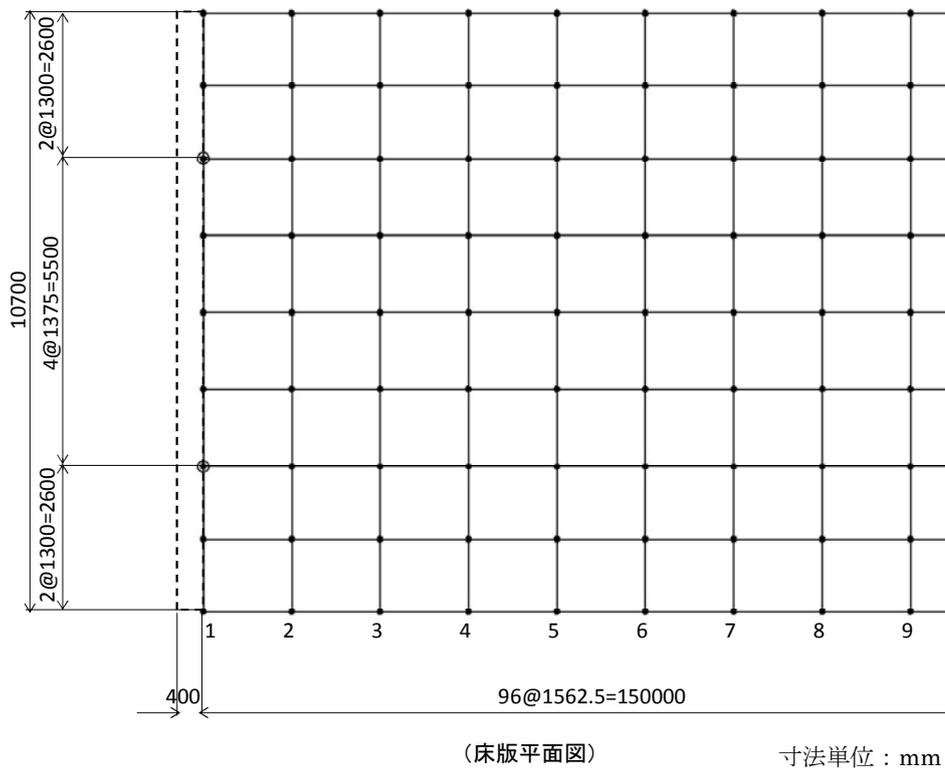
ii) 橋軸方向

【目的】

主桁作用の曲げモーメント分布により床版に作用する曲げ応力を評価できるように分割する。

【分割例】

橋軸方向の分割は、主桁の要素分割に合わせることを基本とする。

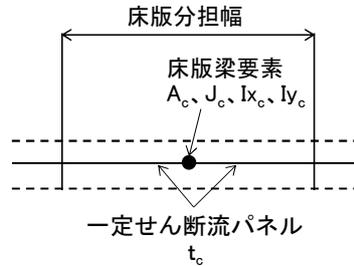


付図-2.4 床版の要素分割の例（橋軸方向）

c) 部材剛度

橋軸方向縁部材の剛度は、床版分担幅の矩形断面の断面定数 $(A_c, J_c, I_{xc}, I_{yc})$ とする。橋軸直角方向縁部材の剛度も同じであるが、鉛直軸回りの断面二次モーメント I_{zc} については一定せん断流パネルのせん断変形を拘束しないように値を小さくすることを基本とする。例を下表に示す。

床版の一定せん断流パネル剛度としては、厚さ t_c のみとなる。



付図-2.5 床版要素の分担幅

付表-2.1 床版縁部材の断面定数の例

方向	番号	分担幅B(m)	A(m ²)	J(m ⁴)	I _y (m ⁴)	I _z (m ⁴)
橋軸方向	1.9	0.6500	0.195000	0.00417920	0.00146250	0.00686563
	2.8	1.3000	0.390000	0.01000655	0.00292500	0.05492500
	3.7	1.3375	0.401250	0.01034363	0.00300938	0.05981655
	4~6	1.3750	0.412500	0.01068075	0.00309375	0.06499023
橋直方向	1	1.1813	0.354375	0.00893939	0.00265781	0.00000100
	2~	1.5625	0.468750	0.01236673	0.00351563	0.00000100

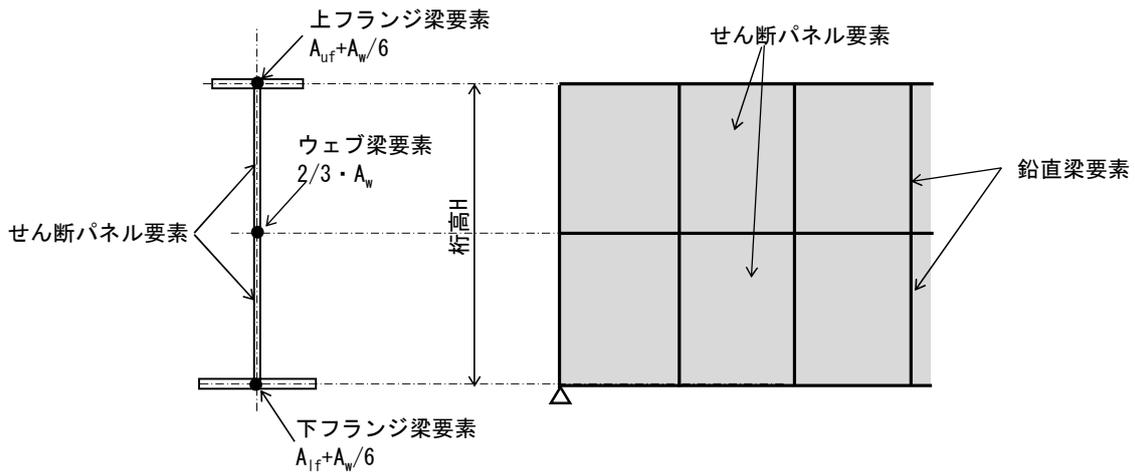
2) 主桁

a) モデル化要領

主桁断面は、上下フランジとウェブをそれぞれ一つのはり要素（縁部材）に置き換え、鉛直方向にこれらを結ぶはり要素（縁部材）とで格子構造を形成することを参考にできる。この格子構造を縁部材として一定せん断流パネルを格子の間に設置して主桁をモデル化することを基本とする。

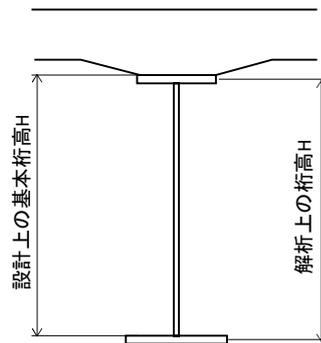
一例として、上下フランジに $A_w/6$ 、ウェブ中心に $2/3 \cdot A_w$ とする場合、断面積および断面二次モーメントは理論値と一致する。ウェブの断面二次モーメントを下式に示す。

$$I_w = 2 \times \frac{A_w}{6} \times \left(\frac{h_w}{2} \right)^2 = \frac{A_w h_w^2}{12} = \frac{t_w h_w^3}{12} \quad \text{ここで、} h_w : \text{ウェブ高, } t_w : \text{ウェブ厚}$$



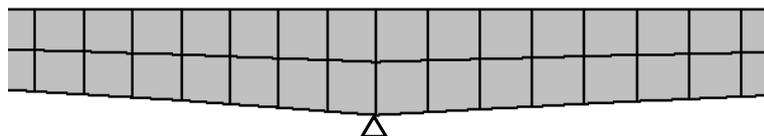
付図-2.6 主桁のモデル化の例

各要素の図心は板幅および板厚の中心となるので、解析上の桁高さ H が解析モデルの断面剛性と実際の主桁の断面剛性とが極力等しくなるように設定することを参考にできる。具体的には、ガイドライン型設計^{付 2.5)}における主桁の板厚構成が上フランジ上面と下フランジ上面の高さを一定としてフランジ板厚変化を下逃げとしているので、解析モデルの桁高さ H を実際のウェブ高さとは関係なくこの値に設定することを基本とする。



付図-2.7 主桁の板厚構成と解析上の桁高 H

主桁高さが変化する場合は、一定せん断流パネルの台形要素を用いることで実際の形状に合わせて再現することを基本とする。



付図-2.8 主桁高さが変化する場合のモデル化の例

b) 要素分割

i) 橋軸方向

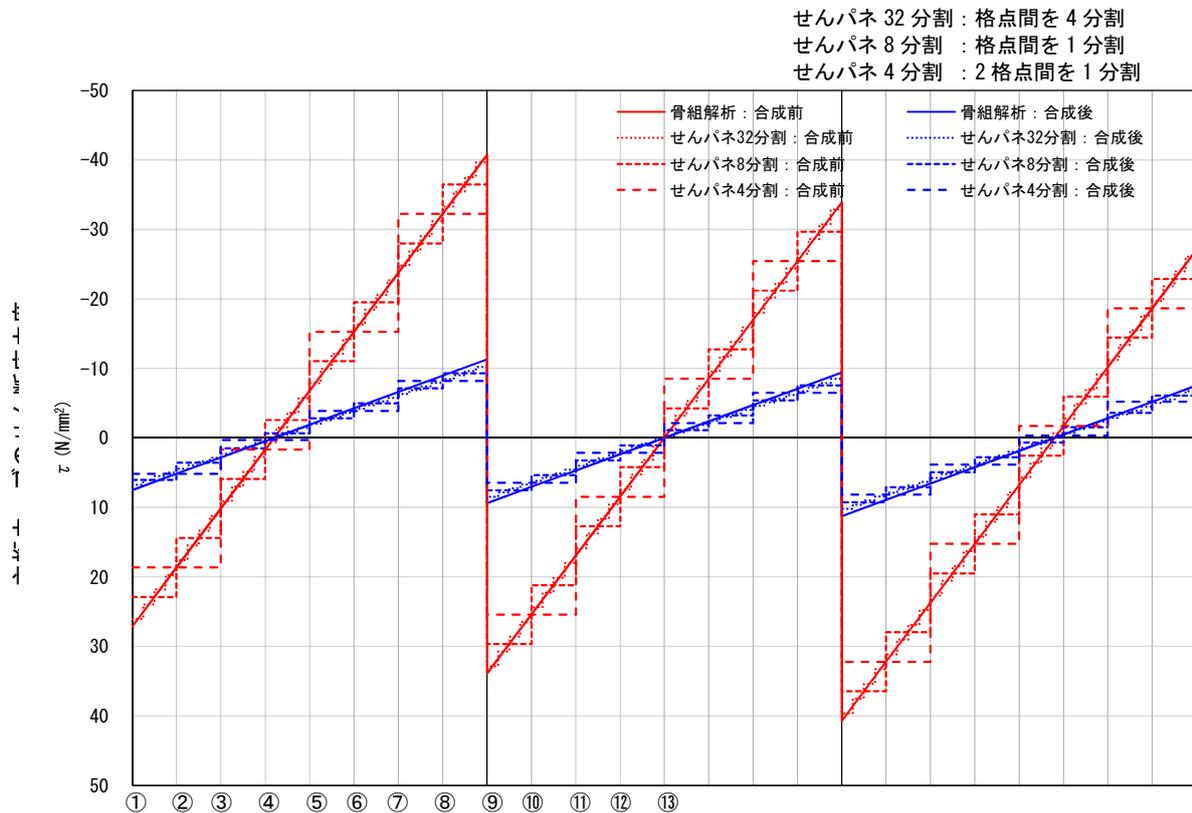
【目的】

主桁の曲げモーメント分布による曲げ応力、およびせん断力によるせん断応力を評価できるように分割する。

【分割例】

桁橋の場合、死荷重や活荷重などが分布荷重または集中荷重として作用すると、主桁に作用する曲げモーメントは2次放物線あるいは三角形の分布を示す^{付2.4)}。せん断力は曲げモーメントを桁軸方向に微分して得られることから、それぞれ1次勾配あるいは一定値を示すと考えられる。これに対して、一定せん断流パネルでは、パネル間でせん断流が一定であることから、1次勾配以上の精度を確保できるように分割する必要がある。

ここで、3径間連続桁橋について、橋軸方向の要素分割数をパラメータとした主桁ウェブのせん断応力度の計算結果を下図に示す。これより、対傾構や横桁のある格点間を垂直補剛材間隔と同程度である4分割以上とする場合、せん断応力を再現できることがわかる。



付図-2.9 要素分割数を変化させた場合のウェブせん断応力度の計算例

ii) 鉛直方向

【目的】

一定せん断流パネルで構成される主桁断面の曲げ剛性が、実際の曲げ剛性と等価となるように分割する。また、主桁の断面内に生じる曲げ応力、およびせん断応力の分布を評価できるように分割する。

【分割例】

主桁に関する曲げモーメントに伴うせん断応力度の断面内の分布は、薄肉断面のほりであることから、せん断流理論によって厳密な値が得られることが知られている^{付2.4)}。しかし、一般の鋼桁では、曲げモーメントに伴うせん断力の大部分がウェブで受け持たれ、しかもこれはウェブ内にほぼ均一に分布すると考えてもせん断流理論との誤差が少ない^{付2.4)}。

ここで、鋼I桁のウェブを細分割したときの各縁部材の断面積の割り振り方を下図に示す。これより、各分割方法におけるウェブの断面二次モーメントを計算すると次のようになる。

・ 2分割調整割 $I_w = 2 \times \frac{A_w}{6} \times \left(\frac{h}{2}\right)^2 = \frac{t_w h^3}{12}$: ウェブの理論式の値と等価

・ 2分割均等割 $I_w = 2 \times \frac{A_w}{4} \times \left(\frac{h}{2}\right)^2 = \frac{t_w h^3}{8}$

・ 4分割均等割 $I_w = 2 \times \frac{A_w}{8} \times \left(\frac{h}{2}\right)^2 + 2 \times \frac{A_w}{4} \times \left(\frac{h}{4}\right)^2 = \frac{3t_w h^3}{32}$

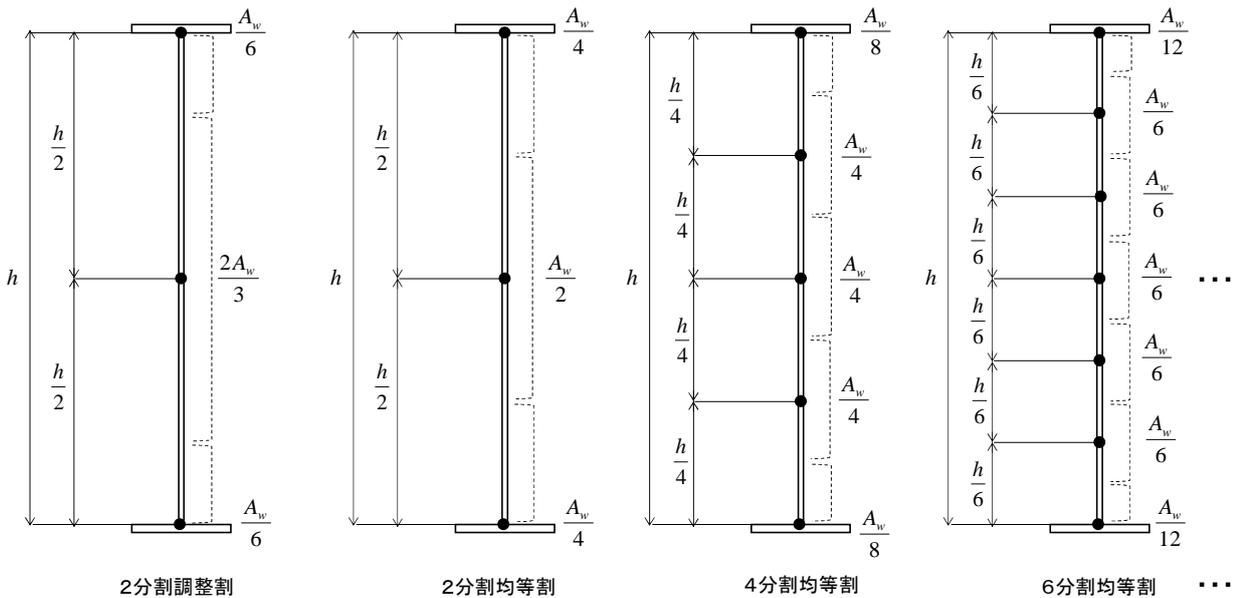
・ 6分割均等割 $I_w = 2 \times \frac{A_w}{12} \times \left(\frac{h}{2}\right)^2 + 2 \times \frac{A_w}{6} \times \left(\frac{h}{3}\right)^2 + 2 \times \frac{A_w}{6} \times \left(\frac{h}{6}\right)^2 = \frac{57t_w h^3}{648}$

・ 8分割均等割

$$I_w = 2 \times \frac{A_w}{16} \times \left(\frac{h}{2}\right)^2 + 2 \times \frac{A_w}{8} \times \left(\frac{3h}{8}\right)^2 + 2 \times \frac{A_w}{8} \times \left(\frac{h}{4}\right)^2 + 2 \times \frac{A_w}{8} \times \left(\frac{h}{8}\right)^2 = \frac{11t_w h^3}{128}$$

・ 10分割均等割

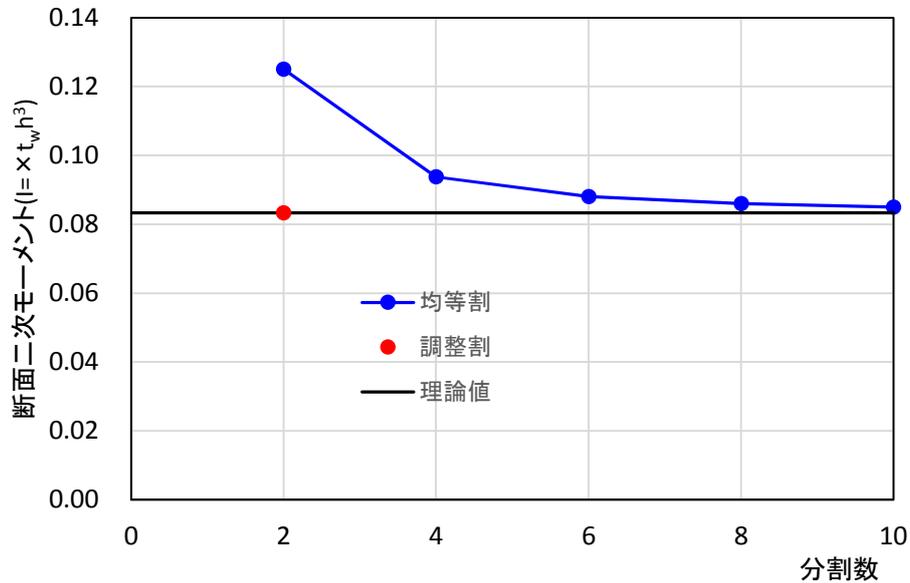
同様に計算すると、 $I_w = \frac{17t_w h^3}{200}$



付図-2.10 ウェブの分割方法の例

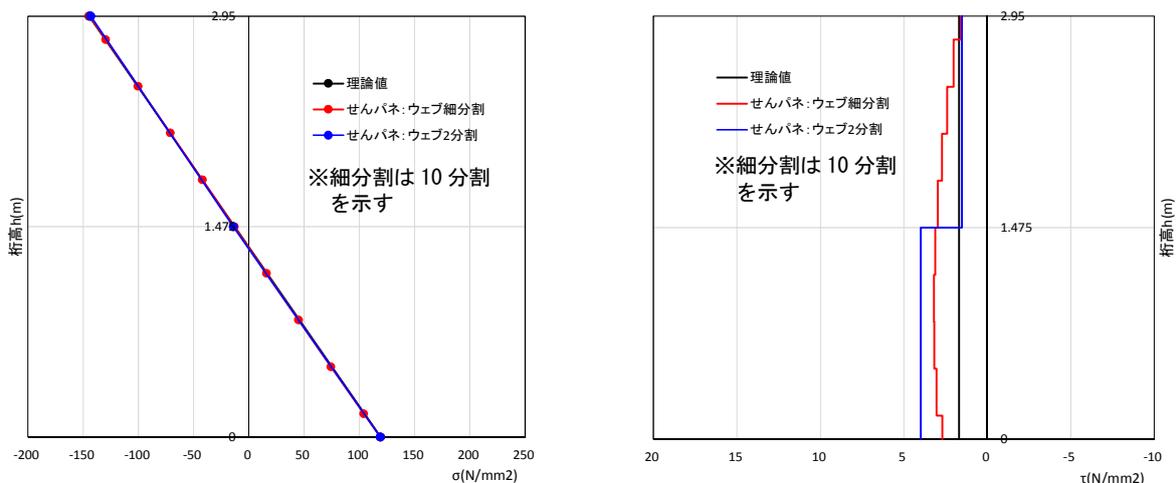
ウェブの分割数ごとに、断面二次モーメントの計算式の値をプロットすると下図のようになる。ウェブを4分割以上とする場合、誤差は10%程度以下に収束していくことがわかる。

I断面や箱断面などの一般的な鋼桁を対象とする場合、付図-2.6のように、2分割で断面積を調整して断面積および断面二次モーメントを理論値に合わせることもできる。



付図-2.11 ウェブの分割数と断面二次モーメントの関係

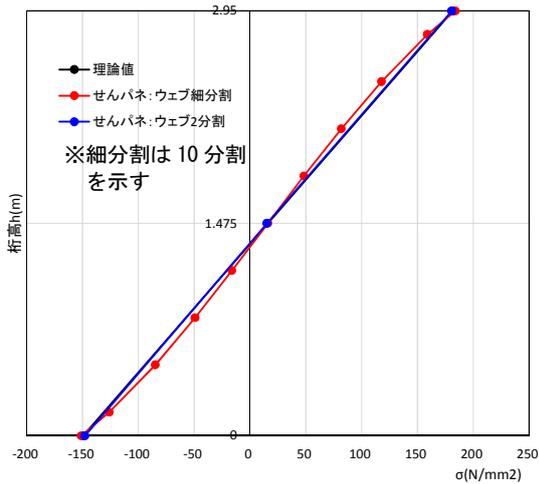
また、連続鋼I桁の支間中央と中間支点部を対象に、ウェブの要素分割数をパラメータとした主桁ウェブの曲げ応力、およびせん断応力の分布を下図に示す。これより、曲げ応力度の分布は、いずれの分割数でも理論値とほぼ一致していることがわかる。せん断応力度の分布は、要素分割を細分化する場合、せん断流理論による厳密解に近づくと考えられるが、各要素から得られるせん断応力を平均化すると、ウェブ内に均一に分布すると仮定した理論値とほぼ同じ値を示すことがわかる。



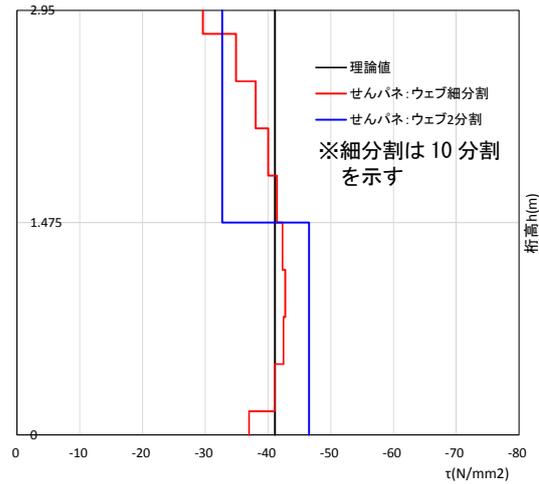
(a) ウェブの曲げ応力度分布

(b) ウェブのせん断応力度分布

付図-2.12 主桁ウェブの分割数と応力分布（支間中央部）



(a) ウェブの曲げ応力度分布



(b) ウェブのせん断応力度分布

付図-2.13 主桁ウェブの分割数と応力分布（中間支点部）

c) 部材剛度

橋軸方向縁部材となるフランジとウェブの剛度は、各板要素の断面定数 (A_c, J_c, I_{xc}, I_{yc}) とする。実際の断面変化に合わせて断面を変化させることを基本とする。例を下表に示す。

上フランジ材質	SM490Y							
上フランジ断面	750x25	750x26	750x26	750x23	750x29	750x23	750x23	750x23
上フランジ断面長	11719	10937	10938	10937	10938	9375	9375	10937
下フランジ材質	SM490Y							
下フランジ断面	750x28	750x38	750x38	750x32	800x50	750x36	750x23	750x23
下フランジ断面長	11719	10937	10938	10937	10938	9375	9375	10937
ウェブ材質	SM490Y				SM490Y	SM490Y		
ウェブ断面	15				20	15		
横桁間隔	6250	6250	6250	6250	6250	6250	6250	6250
支間長	50000				50000			

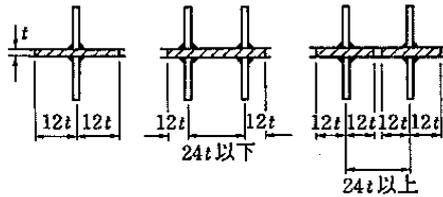
付図-2.14 主桁の断面構成図の例

付表-2.2 主桁の板要素の断面定数の例

板要素	B(mm)	t(mm)	$A(m^2)$	$J(m^4)$	$I_x(m^4)$	$I_y(m^4)$
上フランジ	750	25	0.018750	0.00000391	0.00000098	0.00087891
	750	26	0.019500	0.00000439	0.00000110	0.00091406
	750	23	0.017250	0.00000304	0.00000076	0.00080859
	750	29	0.021750	0.00000610	0.00000152	0.00101953
	750	23	0.017250	0.00000304	0.00000076	0.00080859
ウェブ	2950	15	0.044250	0.00000332	0.03209047	0.00000083
	2950	20	0.059000	0.00000787	0.04278729	0.00000197
下フランジ	750	28	0.021000	0.00000549	0.00000137	0.00098438
	750	38	0.028500	0.00001372	0.00000343	0.00133594
	750	32	0.024000	0.00000819	0.00000205	0.00112500
	800	50	0.040000	0.00003333	0.00000833	0.00213333
	750	36	0.027000	0.00001166	0.00000292	0.00126563
	750	23	0.017250	0.00000304	0.00000076	0.00080859

支点上と対傾構や横桁取付部の鉛直方向縁部材の剛度は、垂直補剛材と主桁ウェブの有効断面を含めた柱断面を想定して断面定数 (A, J, I_x, I_y) を設定する。ウェブ面内の断面二次モーメント I_y については一定せん断流パネルのせん断変形を拘束しないように値を小さく(例えば 0.000001m^4)することを基本とする。

ウェブの一定せん断流パネル剛度としては、厚さ t_w のみとなる。これをウェブ厚とすることを基本とする。



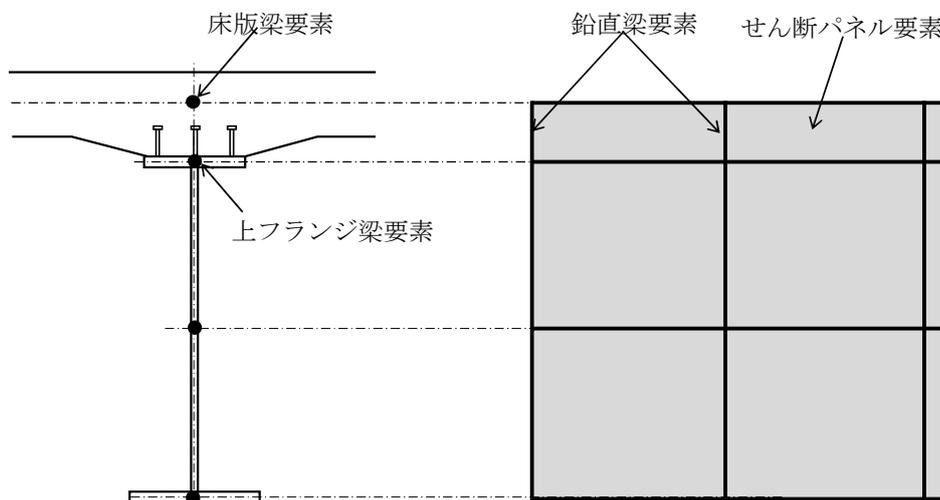
付図-2.15 鉛直方向縁部材の有効断面^{付2.4)}

3) ずれ止め

a) モデル化要領

床版はり要素と上フランジはり要素との間に鉛直はり要素を配置して、これらを縁部材とする一定せん断流パネルを組み込むことを基本とする。

ずれ止めの橋軸方向せん断力は、一定せん断流パネルのせん断流から算出するが、橋軸直角方向のせん断力と曲げモーメントは鉛直はり要素の断面力から求める。



付図-2.16 ずれ止めのモデル化の例

b) 要素分割

【目的】

合成桁においてずれ止めに作用する水平せん断力の分布を評価できるように分割する。

【分割例】

ずれ止めに作用する水平せん断力は、主桁に作用する鉛直方向のせん断力に比例するため、主桁および床版の橋軸方向の要素分割に合わせることを参考にできる。

c) 部材剛度

ずれ止めの橋軸方向バネ定数と一定せん断流パネルのせん断剛性を合わせた一定せん断流パネルの厚さとするを基本とする。なお、完全合成桁として設計する場合、せん断剛性 $G \cdot t$ を大きくする。

鉛直はり部材の剛度は、橋軸直角方向のせん断力と曲げモーメントを算出するために、ウェブ面外の断面二次モーメント I_x は大きくし、ウェブ面内の断面二次モーメント I_y については一定せん断流パネルのせん断変形を拘束しないように値を小さく(例えば 0.000001m^4) することを基本とする。

4) 横桁

a) モデル化要領

横桁についても主桁と同様に上下フランジとウェブの3つの板要素を縁部材として、一定せん断流パネルを組み込んでモデル化することを基本とする。

b) 要素分割

【目的】

横桁の曲げモーメント分布による曲げ応力、およびせん断力によるせん断応力を評価できるように分割する。

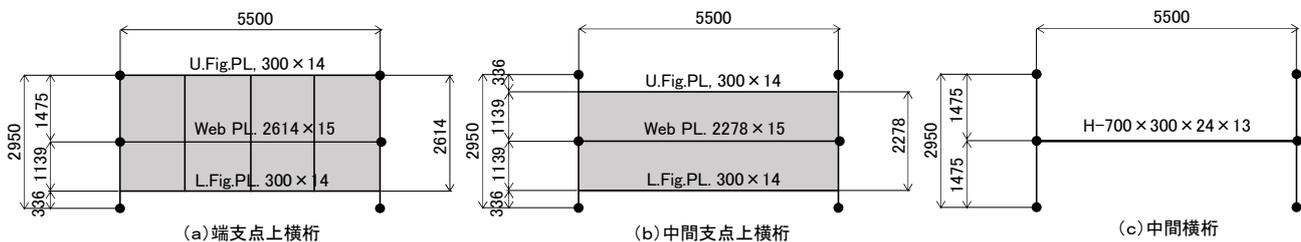
【分割例】

横桁の中間点に荷重が載らない場合、横桁に作用する断面力は格点部における主桁から伝達される断面力のみとなるため、主桁間で要素を分割する必要はない。

端横桁で床版が打ち下ろされて荷重が中間点に載る場合、床版の要素分割に合わせて分割することを参考にできる。

少数主桁橋のように、中間横桁が形鋼で形成された小断面はり部材の場合は、はり要素でモデル化できる場合もある。

これらの例を、主桁との取り付け位置関係も含めて下図に示す。



寸法単位：mm

付図-2.17 横桁のモデル化の例

c) 部材剛度

主桁と同様に、フランジとウェブの板要素の断面定数 (A, J, I_x, I_y) を設定し、一定せん断流パネルの板厚は実際のウェブ厚とするを基本とする。

5) 中間対傾構

a) モデル化要領

対傾構部材の断面積と断面二次モーメントを考慮したはり要素で対傾構のトラス構造をモデル化し、主桁との取り付け位置関係についても実際と合わせることを基本とする。

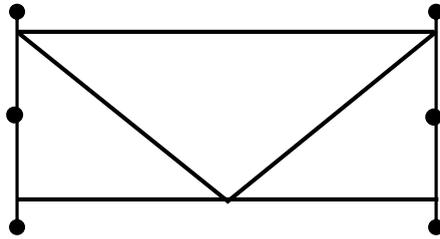
b) 要素分割

【目的】

中間対傾構の弦材および斜材に作用する断面力を評価できるように分割する。

【分割例】

対傾構部材ははり要素なので、中間に荷重が載らない場合は、一部材一要素とすることを参考にできる。



付図-2.18 中間対傾構のモデル化の例

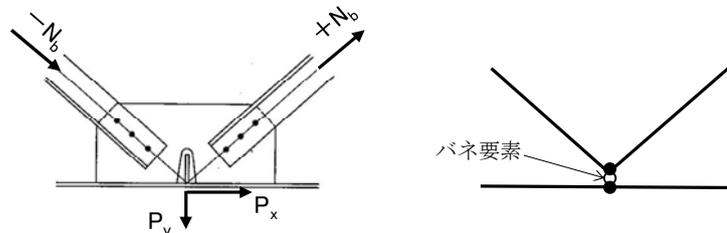
c) 部材剛度

各弦材には形鋼を用いることが多いが、その断面定数(A, J, I_x, I_y)を設定することを基本とする。

6) 横構

a) モデル化要領

横構部材の断面積と断面二次モーメントを考慮したはり要素で実際の配置に合わせてモデル化することを基本とする。主桁に取り付く部分のガセットプレートについては、一定せん断流パネルを組み込んでモデル化することを基本とする。ただし、構造や作用応力が複雑にならない場合は、下図のように、主桁軸方向の作用力 P_x と、その直角方向の作用力 P_y を算出することに着目して、横構のはり要素と主桁ウェブの結合点をバネ要素で単純化することを参考にできる。



付図-2.19 横構ガセットプレート部のバネ要素

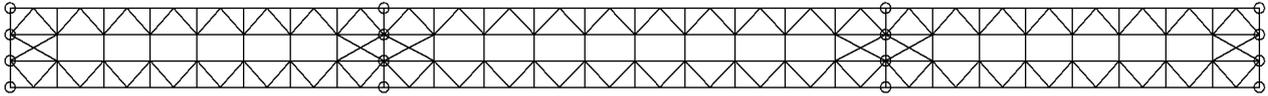
b) 要素分割

【目的】

横構に作用する断面力を評価できるように分割する。

【分割例】

横構部材ははり要素なので、中間に荷重が載らない場合は、一部材一要素とすることを参考にできる。



付図-2.20 横構のモデル化の例

c) 部材剛度

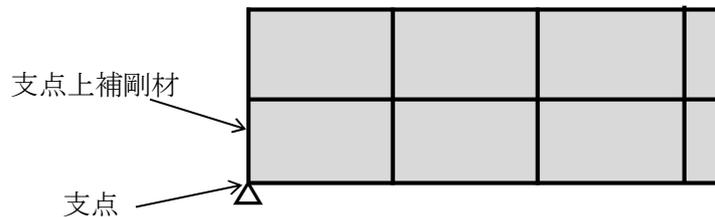
横構には形鋼を用いることが多く、その断面定数(A, J, I_x, I_y)を設定することを基本とする。

ガセットプレートに一定せん断流パネルを用いる場合は実板厚の剛性とするが、バネ要素を用いる場合はバネ定数を6成分とも剛 (10^{12} kN/m) とすることを参考にできる。

7) 支点

a) モデル化要領

支点上補剛材の直下で、格子桁モデルと同様に支持条件を与えることを基本とする。



付図-2.21 支点のモデル化の例

(3) 荷重

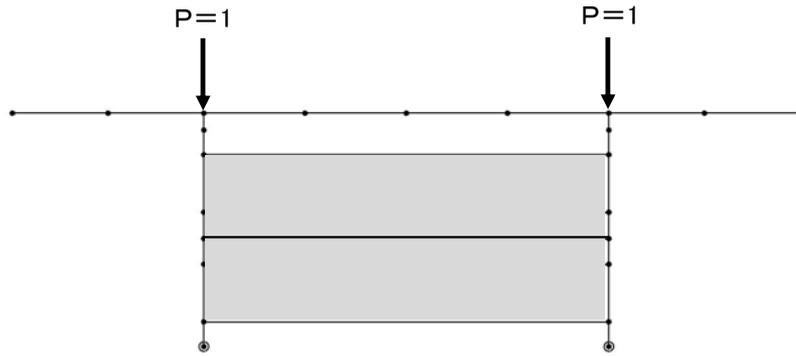
1) 鉛直荷重

a) 死荷重

合成前死荷重と合成後死荷重を、それぞれの解析モデルに載荷することを基本とする。

従来設計と同様に、主構造による荷重分配効果のみを考慮する場合、床版上に載荷される荷重についても、直接に床版要素に載荷するのではなく、主桁上フランジを載荷点として作成した影響線を用いて各荷重に対する着目量(変位, 断面力)を算出する。

一方、床版による荷重分配効果も考慮する場合、床版の橋軸方向縁部材を載荷点として作成した影響線を用いて計算することを基本とする。



付図-2.22 影響線作成のための単位荷重載荷点の例

b) 活荷重

i) L 荷重

B 活荷重 L 荷重は、主桁上フランジ上に影響線載荷することを基本とする。つまり、主桁上フランジに単位荷重を載荷して作成した影響線を用いて、着目量（変位、断面力）が最大・最小となるように有効幅員の中で移動させた載荷状態に対して影響線体積を積分して着目量を算出する。

ii) 疲労照査の T 荷重

T 荷重をレーン載荷して着目箇所の応力範囲を算出する。

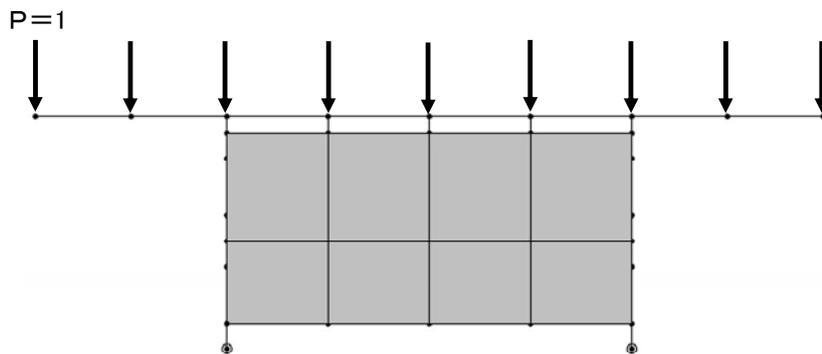
従来設計と同様に、主構造による荷重分配効果のみを考慮する場合、主桁上フランジを載荷点として作成した影響線を用いて計算することを基本とする。

一方、床版による荷重分配効果も考慮する場合、床版の橋軸方向縁部材を載荷点として作成した影響線を用いて計算することを基本とする。

iii) 端横桁設計の T 荷重

床版を打ち下ろした端横桁の設計には、B 活荷重 T 荷重を床版上に影響線載荷して端横桁の断面力を算出することを基本とする。つまり、床版の橋軸方向縁部材を載荷点として作成した影響線を用いて T 荷重に対する着目量の最大・最小値を算出する。

死荷重についても、全死荷重を床版上に載荷して端横桁の断面力を算出する。



付図-2.23 端横桁設計の T 荷重の影響線作成のための単位荷重載荷点の例

2) クリープ

後死荷重により床版コンクリートに持続的に作用する圧縮力 N_c に対して、クリープによる作用軸力

を、温度荷重に換算して床版部材に直接載荷することを基本とする。床版と鋼桁との温度差による軸力 P_1 とクリープによる作用軸力 P_ϕ とを等しいとすると、クリープの影響を温度差に換算した場合の温度荷重 Δt が次のように求められる。

$$P_1 = \frac{E_s \cdot \varepsilon_t \cdot A_c}{n_1} = \frac{E_s \cdot \alpha \cdot \Delta t \cdot A_c}{n_1} = P_\phi = N_c$$

$$\Delta t = \frac{n_1 \cdot N_c}{E_s \cdot \alpha \cdot A_c} = \frac{14 \times N_c}{2 \times 10^8 \times 12 \times 10^{-6} \times A_c} = 0.005833 \times \frac{N_c}{A_c}$$

ここに、 $n_1 = n(1 + \phi_1/2) = 7 \times (1 + 2/2) = 14$

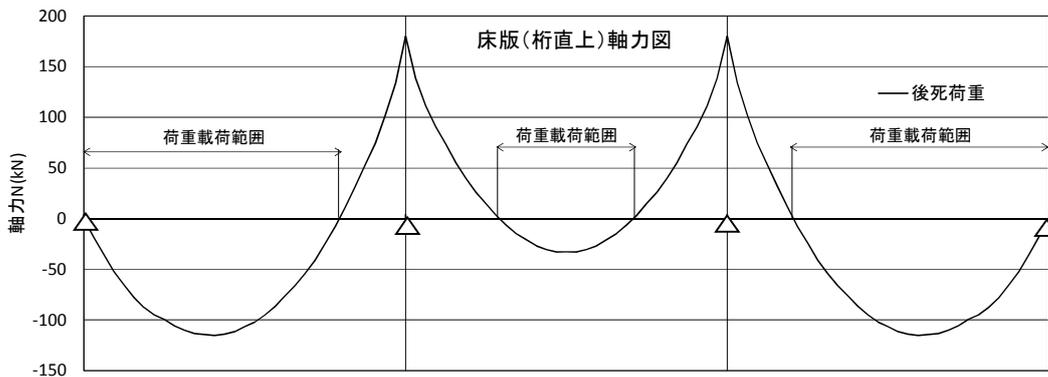
E_s : 鋼のヤング係数

α : 鋼の線膨張係数

A_c : 床版コンクリートの断面積

後死荷重による曲げモーメントが正となる範囲に載荷する。

解析モデルのヤング係数比は $n=14$ で計算する。



付図-2.24 クリープの荷重載荷範囲の例

3) 乾燥収縮

床版コンクリートの乾燥収縮による作用力を、温度荷重に換算して床版部材に直接載荷することを基本とする。床版コンクリートの最終収縮度を $\varepsilon_s = 20 \times 10^{-5}$ とすると、温度差によるひずみ

$$\varepsilon_t = \alpha \cdot \Delta t = 12 \times 10^{-6} \times \Delta t$$

との関係から、乾燥収縮を温度差に換算した場合の載荷温度 Δt は、次のようになる。

$$\varepsilon_s = \varepsilon_t$$

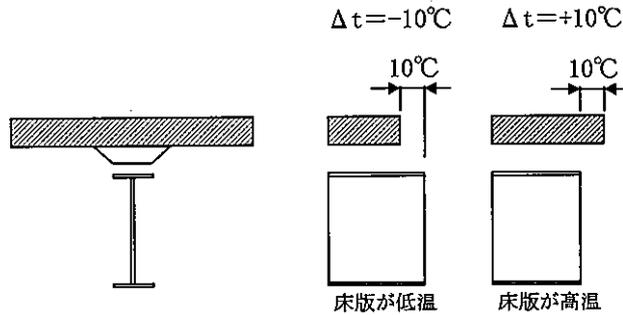
$$\Delta t = \frac{20 \times 10^{-5}}{12 \times 10^{-6}} = 16.7^\circ\text{C}$$

乾燥収縮の影響を考慮する範囲は、後死荷重によって中間支点付近の床版に引張軸力が発生する範囲を除いた区間とする。解析モデルのヤング係数比は $n=21$ で計算する。

4) 温度差

床版コンクリートと鋼桁との温度差は ± 10 度として、床版部材に直接温度差荷重 ± 10 度を載荷することを基本とする。

床版コンクリートが引張応力状態となる領域における取り扱いについては、クリープ、乾燥収縮と整合をとって、後死荷重による曲げモーメントが正となる範囲には温度差による応力は発生しないとして温度差荷重を載荷しない。



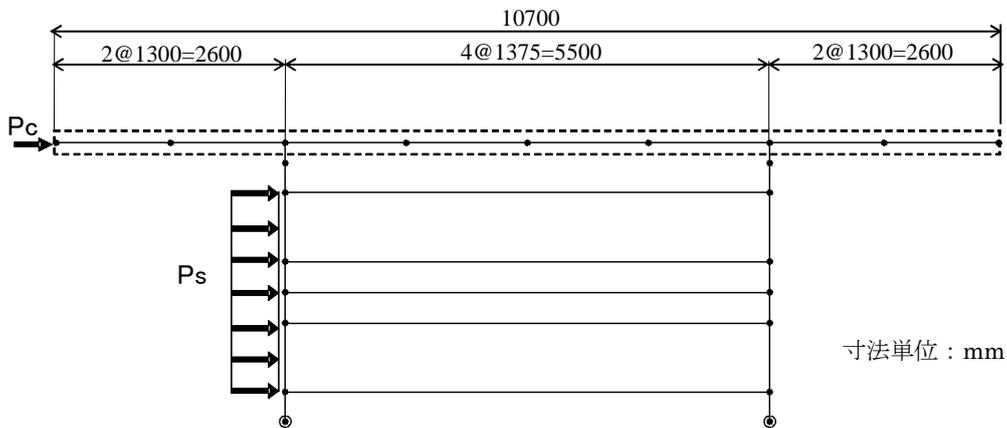
付図-2.25 温度差荷重の概念図

5) 風荷重

a) 載荷方法

床版に作用する風荷重は、床版外縁に等分布線荷重として載荷することを基本とする。

風上側主桁に作用する風荷重は、ウェブ面の垂直補剛材に等分布荷重として載荷する。



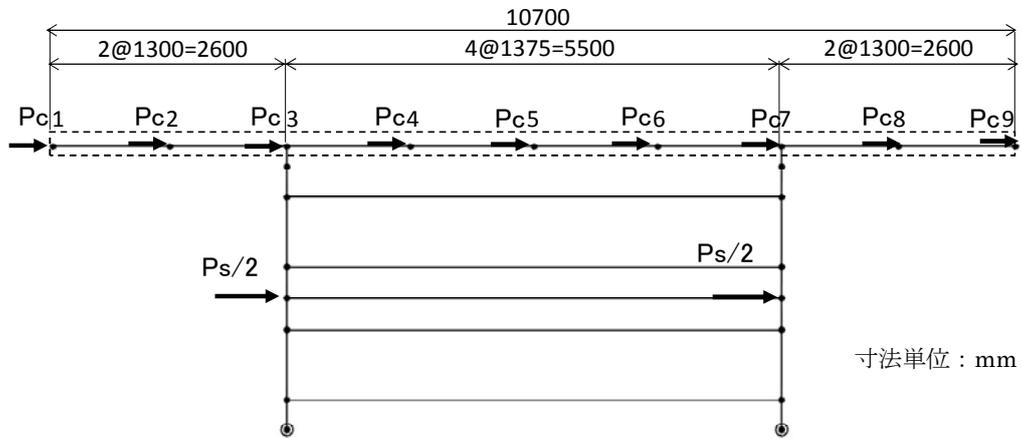
付図-2.26 横断面形状と風荷重の例

b) 橋軸方向の載荷パターン

風荷重は、着目部材力が最も不利になるように載荷する必要があるので、区間ごとに載荷した基本ケースを組み合わせて各部材力が最大・最小となるケースを抽出する。

6) 地震荷重

床版に作用する地震荷重は床版全節点に分担分を載荷し，主桁に作用する地震荷重は各主桁中心に載荷することを基本とする．橋軸方向には全載する．

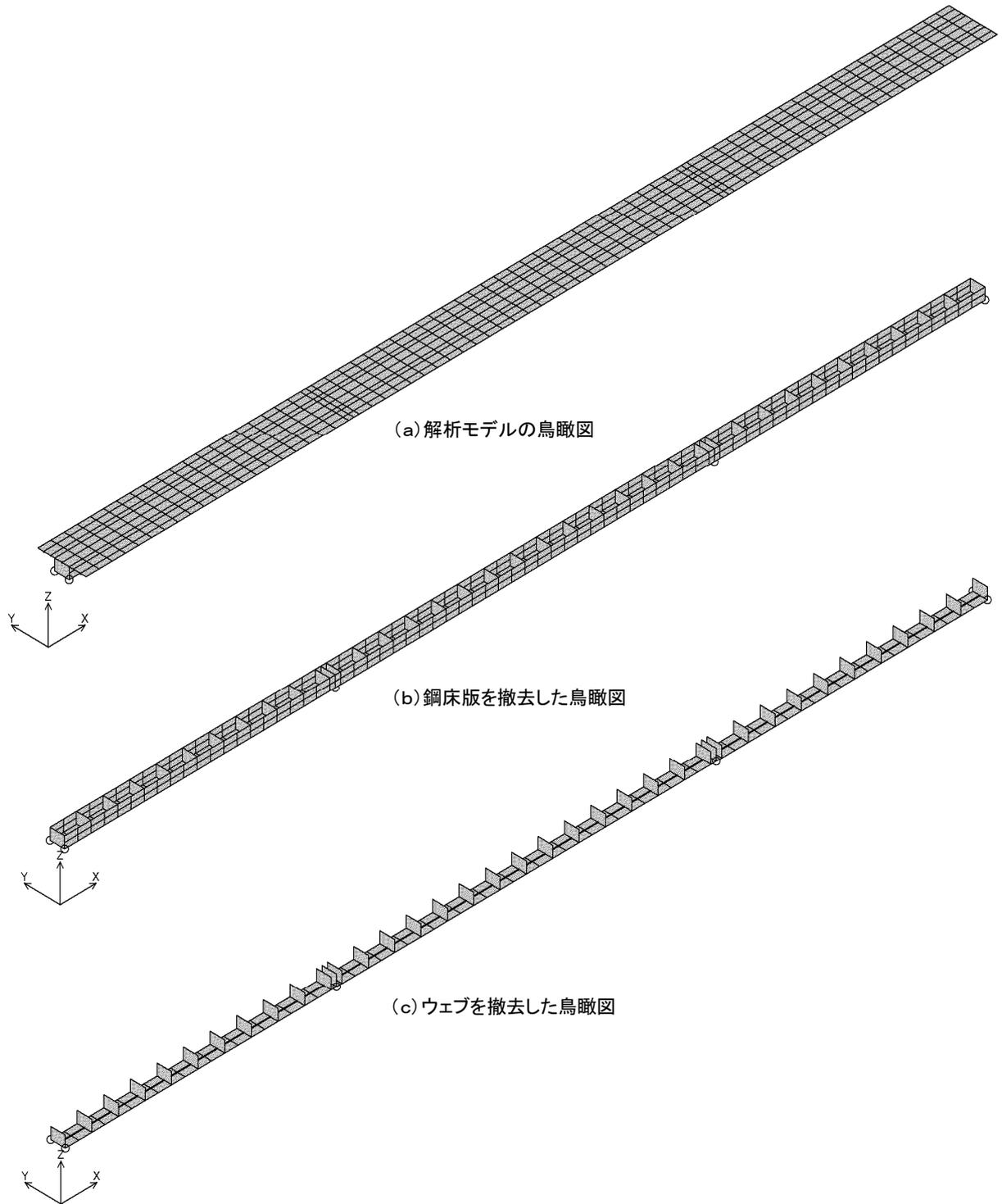


付図-2.27 地震荷重の載荷方法の例

付 2.2 鋼床版連続箱桁橋

(1) 概要

- ①主桁，鋼床版，ダイアフラムなど全ての構成部材を一定せん断流パネルと骨組部材（縁部材）とで全橋を立体的にモデル化する。
- ②せん断遅れの影響が小さい箱桁部分は，簡略化した要素分割でモデル化する。
- ③鋼床版の設計は，別途力学モデルを設定して解析する。



付図-2.28 鋼床版連続箱桁橋の一定せん断流パネル解析モデルの例

(2) モデル化

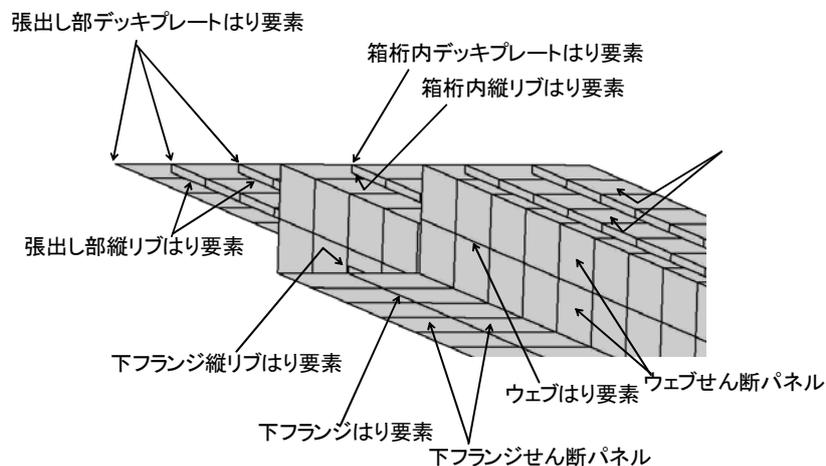
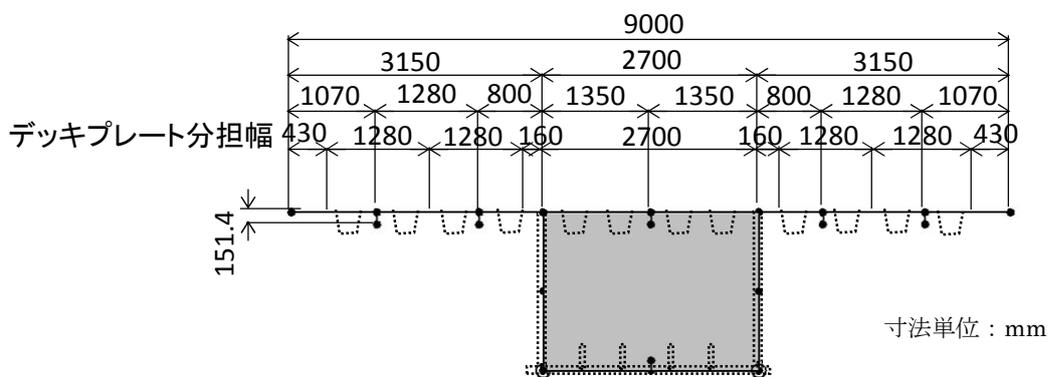
1) 鋼床版

a) モデル化要領

鋼床版を橋軸方向と橋軸直角方向のはり要素（縁部材）で格子状にモデル化して軸方向力と曲げモーメントを受け持たせ、格子の間に一定せん断流パネルを設置してせん断剛性を受け持たせることを基本とする。

縦リブは、デッキプレートの分担幅に存在する本数分を一つにまとめてデッキプレート縁部材位置に偏心させて取り付けることができる。

横リブは、デッキプレートの橋軸直角方向縁部材を合わせて配置するが、その形状はモデル化せず、剛性のみを付加することができる。



付図-2.29 鋼床版のモデル化の例

b) 要素分割

i) 橋軸直角方向

【目的】

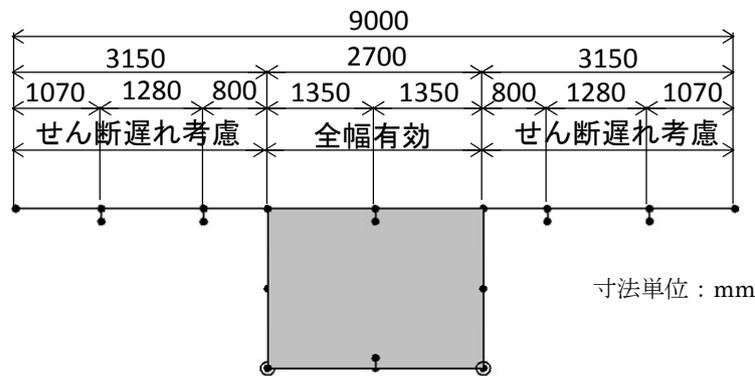
鋼床版成桁における床版のせん断遅れによる有効幅を評価できるように分割する。

【分割例】

せん断遅れが顕著に現れる鋼床版は、せん断遅れを適切に再現できる程度に鋼床版を断面内で分割してモデル化する。せん断遅れの影響については、あらかじめ道示Ⅱ11.3.5のフランジの有効幅の規定を参考にできる。

下図の要素分割例では道示Ⅱ11.3.5の規定によって、箱断面部分は全断面有効で、張り出し部の鋼床版はせん断遅れの影響があることから、箱断面部分は最小の2分割として張り出し部分を2分割以上の目安から3分割とする。

また、道示の有効幅を用いて算出する従来設計と、作用応力度や主桁のたわみが同等程度となることで要素分割の妥当性を確認することができる。



付図-2.30 鋼床版断面の要素分割の例

ii) 橋軸方向

【目的】

主桁作用の曲げモーメント分布により床版に作用する曲げ応力を評価できるように分割する。

【分割例】

橋軸方向の分割は、横リブ配置を最小限の分割とするとともに、それ以上の分割については主桁の要素分割に合わせることを参考にできる

c) 部材剛度

デッキプレートの橋軸方向縁部材の剛度は、デッキプレート分担幅の板断面の断面定数 (A, J, I_y, I_z) とすることを基本とする。

デッキプレートの橋軸直角方向縁部材の剛度は、横リブがある場合は横リブを含めた断面定数とし、横リブがない場合はデッキプレートの断面定数とすることを基本とする。この時、鉛直軸回りの断面二次モーメント I_z については、一定せん断流パネルのせん断変形を拘束しないように値を小さく(例えば 0.000001m^4) することを基本とする。

デッキプレート面に配置する一定せん断流パネルの厚さは、デッキプレート厚とすることを基本とする。

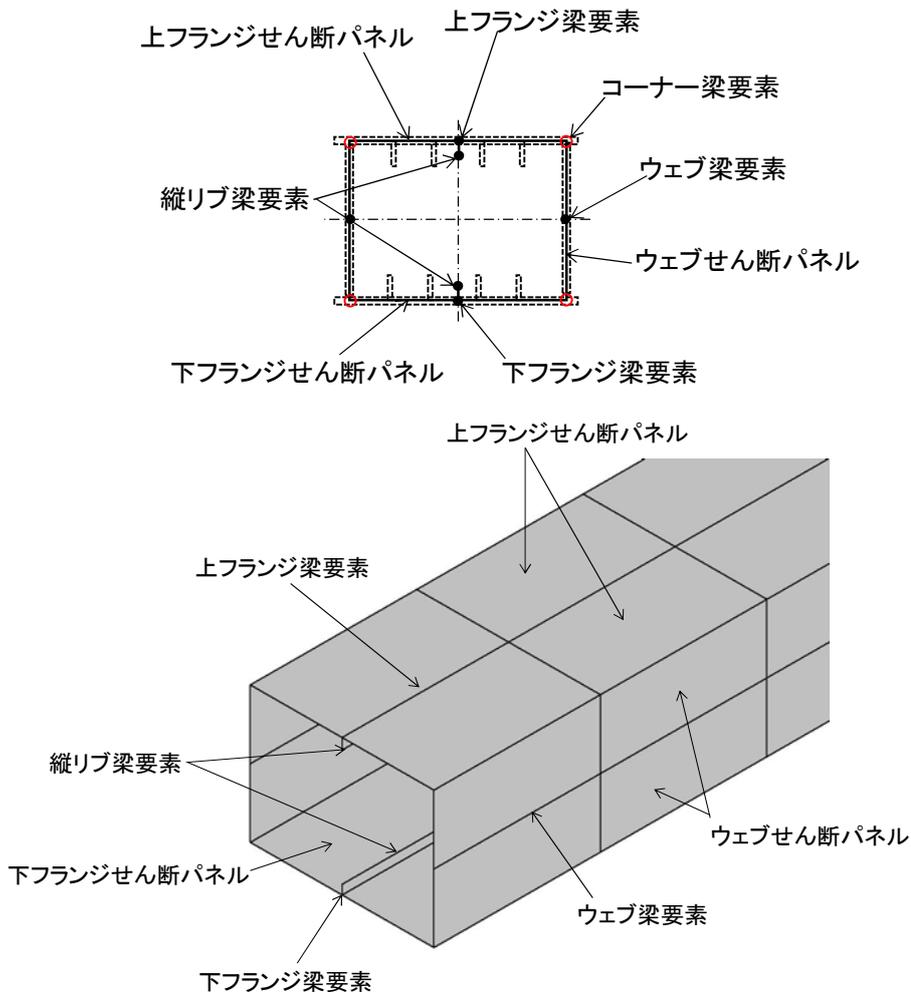
縦リブの橋軸方向縁部材の剛度は、モデル化要領に合わせてデッキプレートの分担幅内に存在する縦リブ剛度の合計とする。縦リブとデッキプレートを繋ぐ鉛直はり部材を配置し、それらに囲まれた空間にせん断剛性の大きな一定せん断流パネルを取り付ける。鉛直はり部材は、一定せん断流パネルのせん断変形を拘束しないように、一定せん断流パネル面内の断面二次モーメントを小さく(例えば 0.000001m^4) して、それ以外の剛性は大きくすることを基本とする。

2) 箱桁

a) モデル化要領

フランジとウェブをそれぞれ一つのはり要素(縁部材)に置き換え、箱断面の角部にはコーナーはり要素を設置し、断面方向にこれらを結ぶはり要素(縁部材)とで格子構造を形成することを参考にできる。この格子構造を縁部材として一定せん断流パネルを格子の間に設置して主桁をモデル化することを基本とする。

縦リブは、フランジに含まれる全ての縦リブを1本のはり要素に代表させて縦リブ重心位置配置し、フランジと縦リブ間には一定せん断流パネルを配置することができる。



付図-2.31 箱桁のモデル化の例

b) 要素分割

i) 橋軸方向

【目的】

主桁の曲げモーメント分布による曲げ応力、およびせん断力によるせん断応力を評価できるように分割する。

【分割例】

箱断面の要素分割は、上記 a) のように箱断面を構成する 4 つの板要素によりモデル化するか、または、せん断遅れの影響が大きい場合は、フランジを 4 分割することを参考にできる。要素分割の目安は、道示の有効幅の規定によってパラメータ b/l との関係参考にすることができる。

橋軸方向の要素分割は、横リブまたは垂直補剛材間隔を目安とすることを基本とする。

ii) 鉛直方向

【目的】

一定せん断流パネルで構成される主桁断面の曲げ剛性が、実際の曲げ剛性と等価となるように分割する。また、主桁の断面内に生じる曲げ応力、およびせん断応力の分布を評価できるように分割する。

【分割例】

付録 2.1 連続合成 I 桁橋の (2) 2) b) ii) 鉛直方向の要素分割を参考にできる。

c) 部材剛度

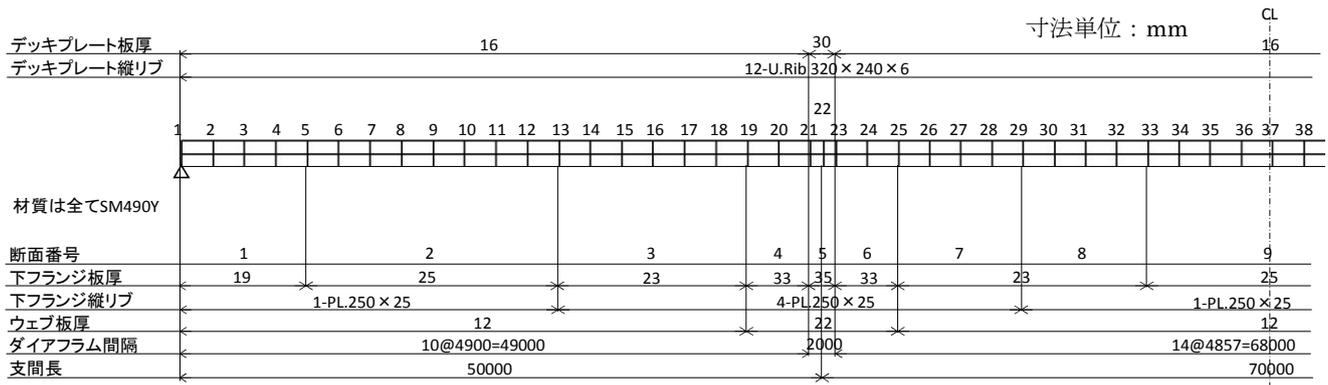
橋軸方向縁部材となるフランジとウェブの剛度は、各板要素の断面定数 (A, J, I_x, I_y) とする。実際の断面変化に合わせて断面を変化させることを基本とする。箱断面のコーナーに設けた橋軸方向縁部材の剛度は、他の部材に影響を与えないように全ての成分を小さく (例えば $A=0.00001\text{m}^2$, $J=I=0.000001\text{m}^4$) 設定することを基本とする。

横リブ、垂直補剛材など橋軸直角方向に配置される縁部材は、各はり要素の断面定数を計算した上で、縁部材としてモデル化することを基本とする。

フランジとウェブ面に配置する一定せん断流パネルの厚さは、それぞれの板厚とすることを基本とする。

縦リブの橋軸方向縁部材の剛度は、モデル化要領に合わせて母材の分担幅内に存在する縦リブ剛度の合計とする。縦リブと母材を繋ぐはり部材を配置し、それらに囲まれた空間にせん断剛性の大きな一定せん断流パネルを取り付ける。繋ぎのはり部材は、一定せん断流パネルのせん断変形を拘束しないように、一定せん断流パネル面内の断面二次モーメントを小さく (例えば 0.000001m^4) して、それ以外の剛性は大きくすることを基本とする。

鋼床版箱桁における例を以下に示す。



付図-2.32 鋼床版箱桁の断面構成図の例

付表-2.3 鋼床版箱桁の板要素の断面定数の例

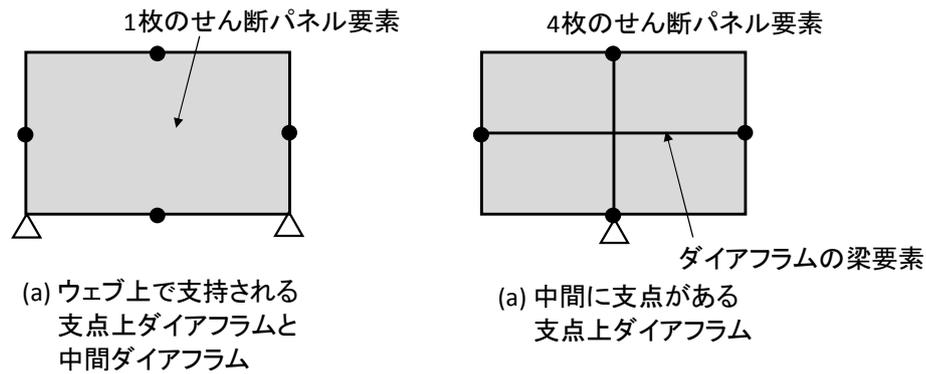
板要素	B(mm)	t(mm)	A(m ²)	J(m ⁴)	I _x (m ⁴)	I _y (m ⁴)
デッキプレート	430 ×	16	0.006880	0.00000059	0.00000015	0.00010601
	1280 ×	16	0.020480	0.00000175	0.00000044	0.00279620
	160 ×	16	0.002560	0.00000022	0.00000005	0.00000546
	2700 ×	16	0.043200	0.00000369	0.00000092	0.02624400
	430 ×	30	0.012900	0.00000387	0.00000097	0.00019877
	1280 ×	30	0.038400	0.00001152	0.00000288	0.00524288
	160 ×	30	0.004800	0.00000144	0.00000036	0.00001024
Uリブ	2-U.Rib 320 × 240 × 6		0.008052	0.00000010	0.00004920	0.00082450
	4-U.Rib 320 × 240 × 6		0.016104	0.00000019	0.00009840	0.00824500
ウェブ	2000 ×	12	0.024000	0.00000115	0.00800000	0.00000029
	2000 ×	22	0.044000	0.00000710	0.01466667	0.00000177
下フランジ	2950 ×	19	0.056050	0.00000674	0.00000169	0.04064793
	2950 ×	25	0.073750	0.00001536	0.00000384	0.05348411
	2950 ×	23	0.067850	0.00001196	0.00000299	0.04920539
	2950 ×	33	0.097350	0.00003534	0.00000883	0.07059903
	2950 ×	35	0.103250	0.00004216	0.00001054	0.07487776
L.Rib	1-PL. 250 × 25		0.006250	0.00000130	0.00003255	0.00000033
	4-PL. 250 × 25		0.025000	0.00000521	0.00013021	0.00911250

3) ダイアフラム

a) モデル化要領

充腹板方式の中間ダイアフラムと、ウェブ上で支持される支点上ダイアフラムの場合は、8 節点の一定せん断流パネル1 枚でモデル化できる。ダイアフラムの中間に支点がある場合は、下図のように4 枚の一定せん断流パネルでモデル化することを基本とする。

中間ダイアフラムがラーメン方式の場合は、矩形ラーメンの骨組の剛度を橋軸直角方向縁部材の剛度に組み込むことを基本とする。

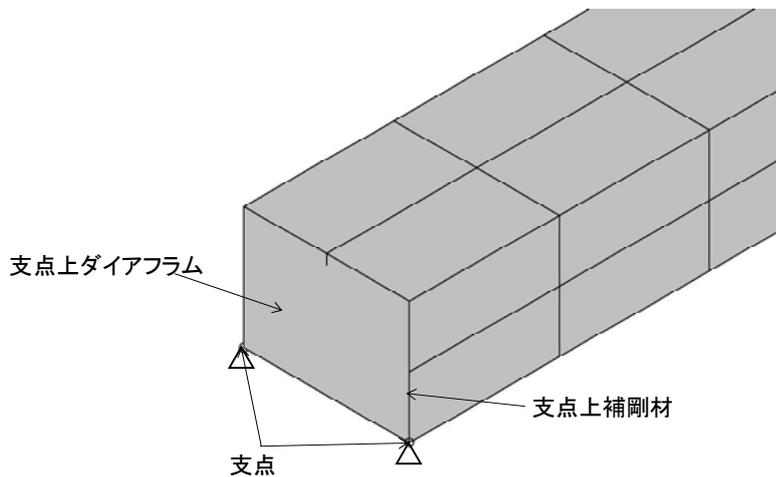


付図-2.33 ダイアフラムのモデル化の例

4) 支点

a) モデル化要領

支点上補剛材の直下で、格子桁モデルと同様に支持条件を与えることを基本とする。



付図-2.34 支点のモデル化の例

(3) 荷重

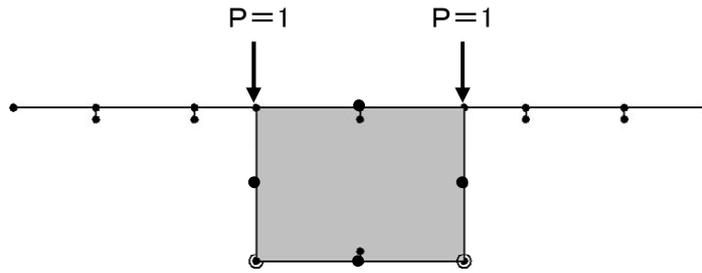
1) 鉛直荷重

a) 死荷重

死荷重を、一定せん断流パネルモデルに固定載荷することを基本とする。

従来設計と同様に、主構造による荷重分配効果のみを考慮する場合、鋼床版上に載荷される荷重についても、直接に床版要素に載荷するのではなく、主桁ウェブ上端を載荷点として作成した影響線を用いて各荷重に対する着目量（変位，断面力）を算出する。

一方、床版による荷重分配効果も考慮する場合、床版の橋軸方向縁部材を載荷点として作成した影響線を用いて計算することを基本とする。



付図-2.35 影響線作成のための単位荷重載荷点の例

b) 活荷重

i) L 荷重

B 活荷重 L 荷重は，主桁ウェブ上端に影響線載荷することを基本とする。つまり，主桁ウェブ上端に単位荷重を載荷して作成した影響線を用いて，着目量（変位，断面力）が最大・最小となるように有効幅員の中で移動させた載荷状態に対して影響線体積を積分して着目量を算出する。

ii) 疲労照査の T 荷重

T 荷重をレーン載荷して着目箇所の応力範囲を算出する。

従来設計と同様に，主構造による荷重分配効果のみを考慮する場合，主桁ウェブ上端を載荷点として作成した影響線を用いて計算することを基本とする。

一方，床版による荷重分配効果も考慮する場合，床版の橋軸方向縁部材を載荷点として作成した影響線を用いて計算することを基本とする。

2) 風荷重

a) 載荷方法

橋面上に作用する風荷重は，鋼床版外縁に等分布線荷重として載荷することを基本とする。

風上側主桁に作用する風荷重は，ウェブ面の垂直補剛材に等分布荷重として載荷する。

b) 橋軸方向の載荷パターン

風荷重は，着目部材力が最も不利になるように載荷する必要があるので，区間ごとに載荷した基本ケースを組み合わせて各部材力が最大・最小となるケースを抽出する。

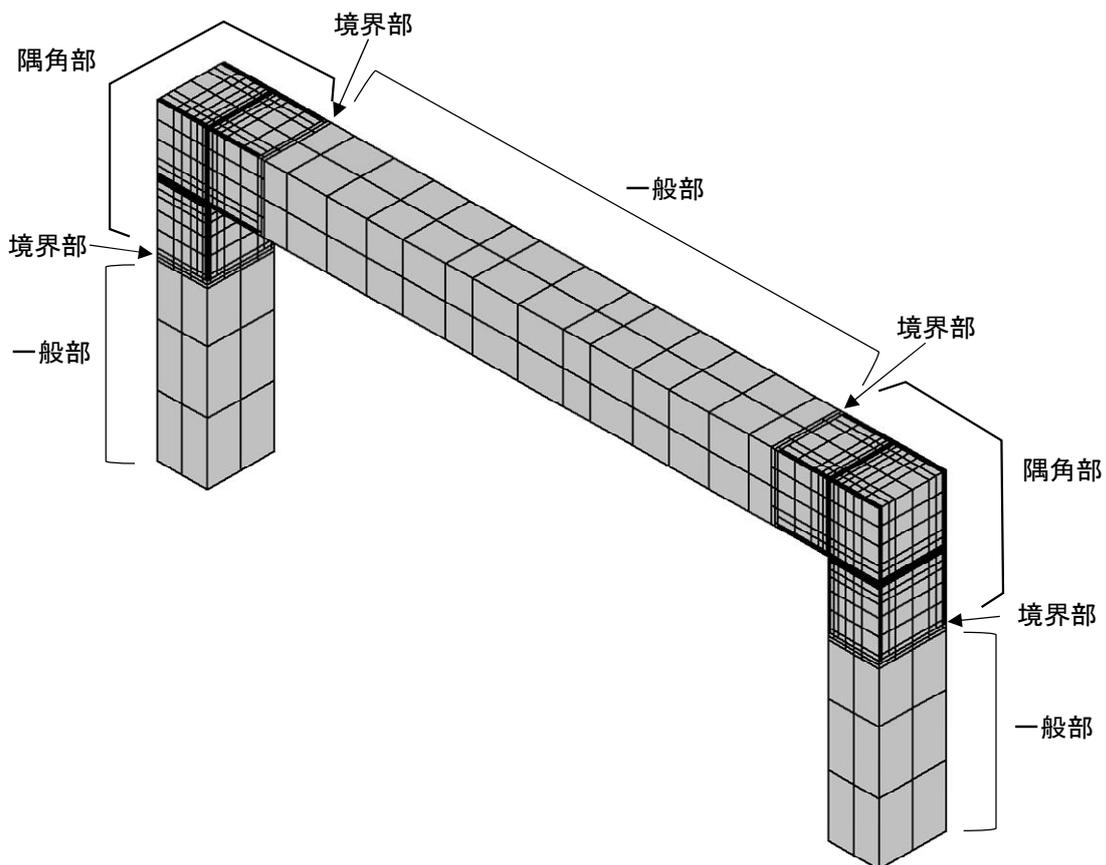
3) 地震荷重

橋面上に作用する地震荷重は鋼床版全節点に分担分を載荷し，主桁に作用する地震荷重は各主桁ウェブ中心に載荷することを基本とする。橋軸方向には全載する。

付録 2.3 鋼製橋脚

(1) 概要

- ① 鋼製橋脚の柱、隅角部、横はりなど全ての構成部材を骨組部材（縁部材）と一定せん断流パネルとで立体的にモデル化する。
- ② せん断遅れの影響が小さい一般部は簡略化した要素分割でモデル化し、隅角部は文献 付 2.6)を参考にして詳細に要素分割することができる。



付図-2.36 鋼製橋脚の一定せん断流パネル解析モデルの例

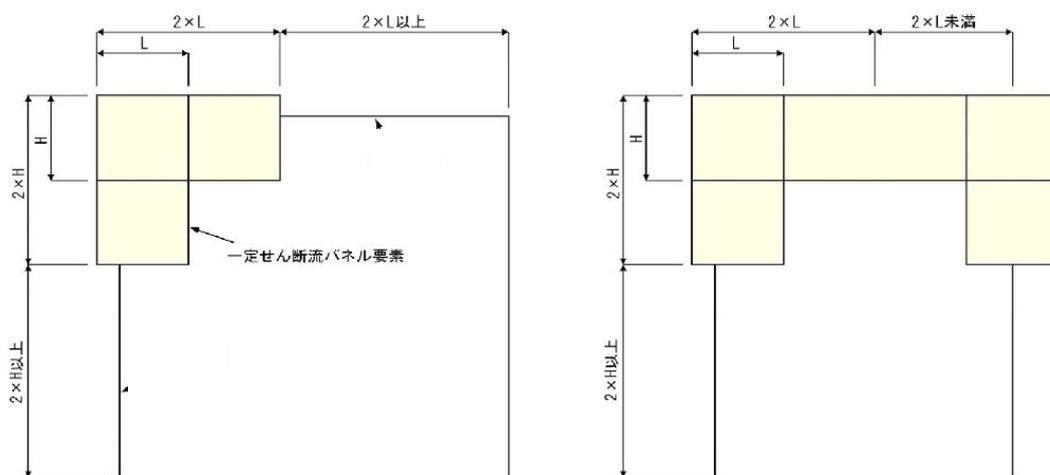
(2) モデル化

1) 隅角部の範囲

a) 隅角部の範囲

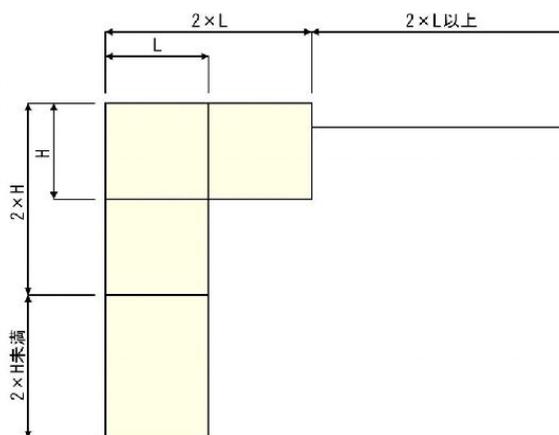
i) 着目隅角部より荷重（上部工反力）載荷点が十分に離れている場合

- ・ 橋脚高さ、柱中心間隔が十分な場合は、横はり方向を柱幅の2倍以上、柱高さ方向を横はり高さの2倍以上とする。
- ・ 柱中心間隔が狭い場合は、横はり全体を一定せん断流パネルモデル範囲とする。
- ・ 横はり高さが低い場合は、柱全体を一定せん断流パネルモデル範囲とする。



a) 橋脚高 \geq 横はり高 $\times 4$
橋脚幅 \geq 柱幅 $\times 4$

b) 橋脚高 \geq 横はり高 $\times 4$
橋脚幅 \leq 柱幅 $\times 4$

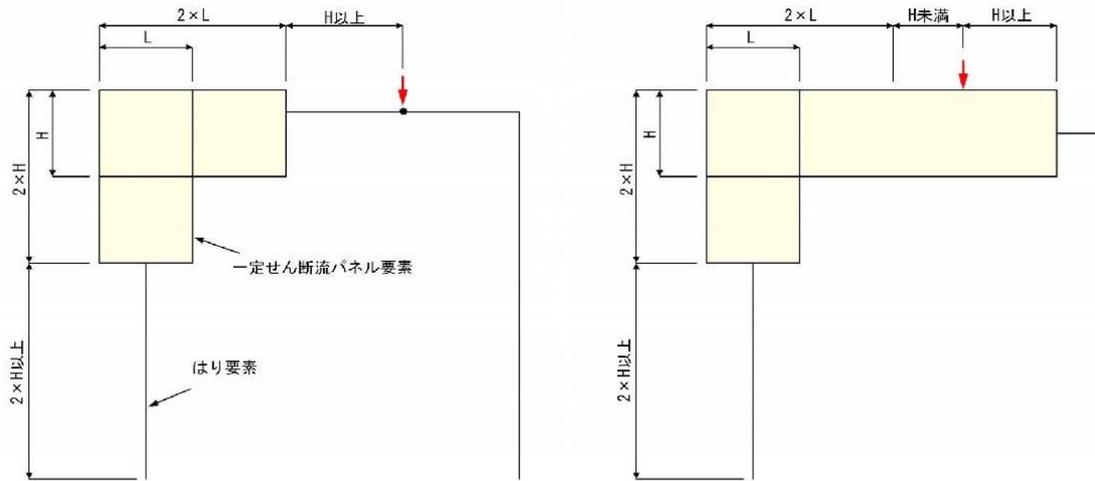


c) 橋脚高 \leq 横はり高 $\times 4$

付図-2.37 隅角部のモデル化範囲 (その1) 付 2.6)

ii) 着目隅角部と荷重載荷点が近い場合

- ・隅角部範囲端から上部工反力載荷位置まで十分な距離がある場合は、横はり方向は柱幅の2倍以上とする。
- ・隅角部範囲端から上部工反力載荷位置までが横はりの高さを下回る場合は、上部工反力載荷位置よりさらに横はりの高さまでもモデル化範囲とする。



a) 橋脚高 $\times 2$ +横はり高
 \leq 柱幅 \sim 上部工反力位置

b) 橋脚高 $\times 2$ +横はり高
 \geq 柱幅 \sim 上部工反力位置

付図-2.38 隅角部のモデル化範囲 (その2) 付2.6)

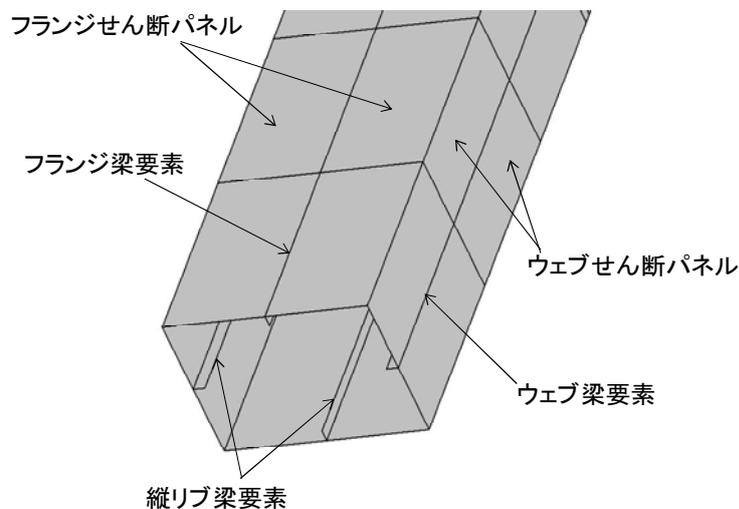
2) 一般部

a) モデル化要領

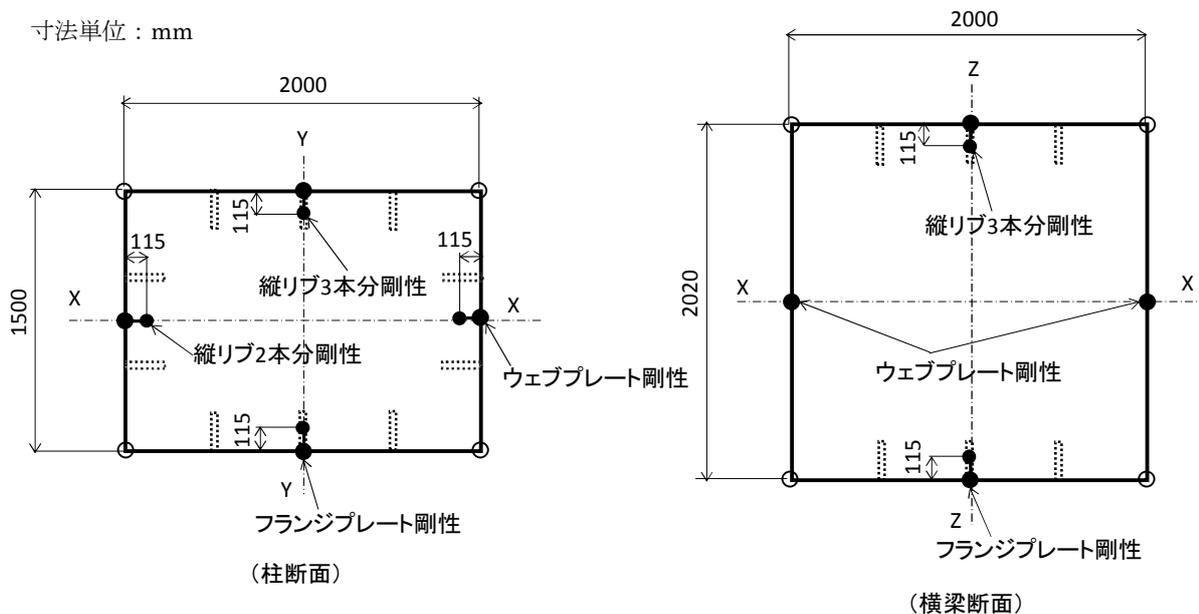
フランジとウェブをそれぞれ一つのはり要素（縁部材）に置き換え，箱断面の角部にはコーナーはり要素を設置し，断面方向にこれらを結ぶはり要素（縁部材）とで格子構造を形成することを参考にできる．この格子構造を縁部材として一定せん断流パネルを格子の間に設置して主桁をモデル化することを基本とする．

縦リブは，フランジおよびウェブに含まれる全ての縦リブを1本のはり要素に代表させて縦リブ重心位置に配置して良く，フランジと縦リブ間には一定せん断流パネルを配置する．

荷重が載荷されない中間ダイアフラムは，8節点の1枚の一定せん断流パネルでモデル化し，ダイアフラムの中に支点がある場合は，支点直下に縁部材を配置して複数枚の一定せん断流パネルでモデル化する．



付図-2.39 一般部断面のモデル化要領



付図-2.40 一般部断面のモデル化の例

b) 要素分割

i) 橋軸方向

【目的】

柱部，および横はり部の曲げモーメント分布による曲げ応力，およびせん断力によるせん断応力を評価できるように分割する。

【分割例】

箱断面の要素分割は，上記 a) のように箱断面を構成する 4 つの板要素によりモデル化するか，または，せん断遅れの影響が大きい場合は，フランジを 4 分割することを参考にできる。要素分割の目安は，道示の有効幅の規定によってパラメータ b/l との関係を参考にすることができる。

橋軸方向の要素分割は，ダイヤフラムまたは横リブ間隔を目安とする。

ii) 鉛直方向

【目的】

一定せん断流パネルで構成される柱部および横はり部断面の曲げ剛性が，実際の曲げ剛性と等価となるように分割する。また，柱部および横はり部の断面内に生じる曲げ応力，およびせん断応力の分布を評価できるように分割する。

【分割例】

付録 2.1 連続合成 I 桁橋の (2) 2) b) ii) 鉛直方向の要素分割を参考にできる。

c) 部材剛度

橋軸方向縁部材となるフランジとウェブの剛度は，各板要素の断面定数 (A, J, I_x, I_y) とする。実際の断面変化に合わせて断面を変化させる。箱断面のコーナーに設けた橋軸方向縁部材の剛度は，他の部材に影響を与えないように全ての成分を小さく $(A=0.00001\text{m}^2, J=I=0.000001\text{m}^4)$ 設定する。

横リブや補剛材など橋軸直角方向に配置される縁部材は，各はり要素の断面定数を計算した上で，縁部材としてモデル化する。

ダイアフラム位置の橋軸直角方向の縁部材は、母材の分担幅の断面定数とする。

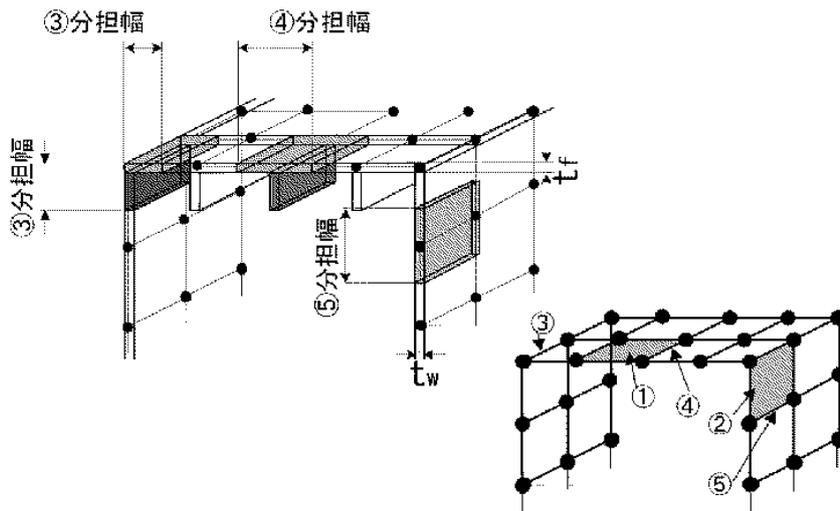
フランジとウェブ面に配置する一定せん断流パネルの厚さは、それぞれの板厚とする。

縦リブの橋軸方向縁部材の剛度は、モデル化要領に合わせて母材の分担幅内に存在する縦リブ剛度の合計とする。縦リブと母材を繋ぐはり部材を配置し、それらに囲まれた空間にせん断剛性の大きな一定せん断流パネルを取り付ける。繋ぎのはり部材は、一定せん断流パネルのせん断変形を拘束しないように、一定せん断流パネル面内の断面二次モーメントを小さく(0.000001m^4)して、それ以外の剛性は大きくする。

3) 隅角部

a) モデル化要領

- ・隅角部のフランジとウェブは、板厚 t_f と t_w の一定せん断流パネル (①, ②) に置換える。
- ・縁部材③の剛性は、フランジおよびウェブの分担幅分の断面積、フランジ面外の断面二次モーメント、ウェブ面外の断面二次モーメントを考慮する。
- ・縁部材④の剛性は、フランジの分担幅分の断面積とフランジの面外の断面二次モーメントの他に、リブがある場合はリブの剛性も考慮する。
- ・縁部材⑤の剛性は、ウェブの分担幅分の断面積とウェブの面外の断面二次モーメントを考慮する。



付図-2.41 隅角部断面のモデル化の例^{付2.6)}

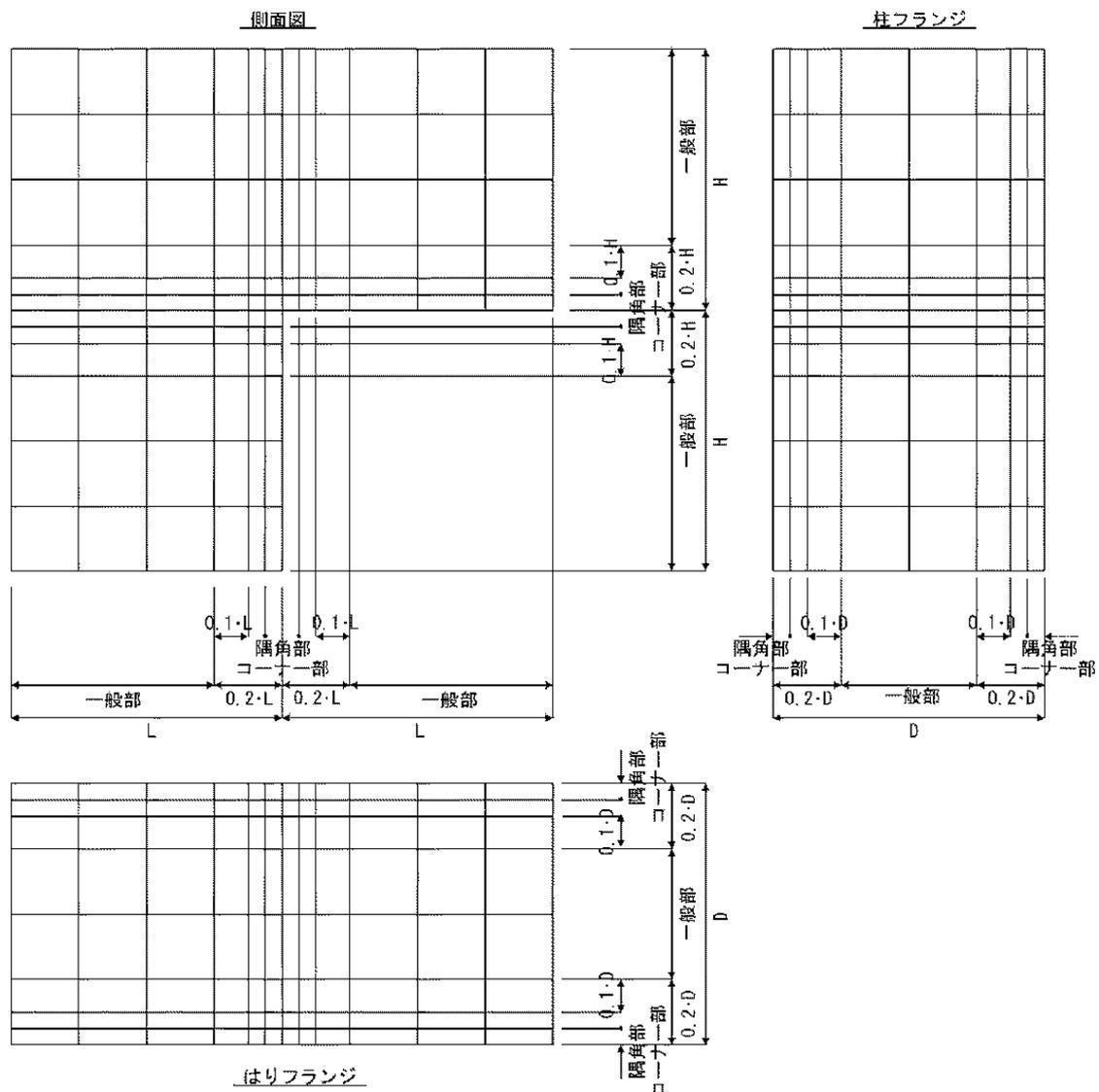
b) 要素分割

【目的】

隅角部におけるフランジのせん断遅れを評価できるように分割する。

【分割例】

- ・基本的な分割方法は、縦リブ間隔を最大サイズとし、隅角部コーナー部付近では最小要素サイズ 50mm 程度で分割する。
- ・隅角部コーナー部付近 (0.1H, 0.1L, 0.1D の範囲) は、要素サイズ 50mm 程度で等分割する。
- ・一般部 (0.8H, 0.8L, 0.6D の範囲) では、断面高 (H, L) の 1/4 程度以下または縦リブ間隔程度で等分割する。



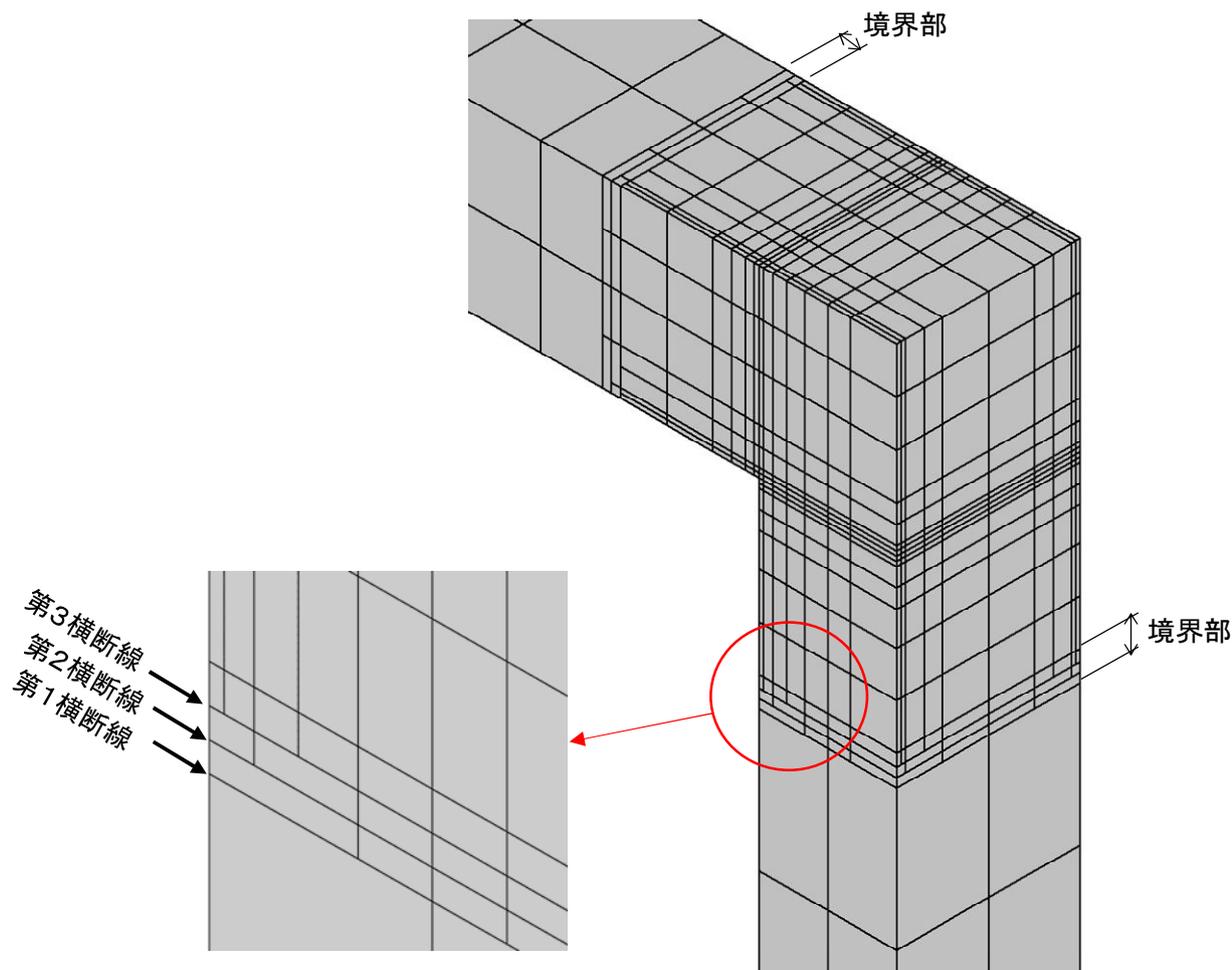
付図-2.42 隅角部の要素分割方法の例^{付2.6)}

4) 一般部と隅角部の境界部

a) モデル化要領

一般部の粗い要素分割から隅角部の細かな要素分割へ移行する境界部では、下図のように要素分割を行う。一定せん断流パネルの1辺の縁部材においては、中間に1個の節点を追加することができるので、一般部の要素分割を、1横断線目で2分割、2横断線目で4分割、3横断線目で8分割と細分化することができる。

境界部は、隅角部から離れた位置にありせん断変形の影響が少ないことから、平面保持の仮定が成り立つものとする。



付図-2.43 一般部と隅角部の境界部の例

b) 要素分割

【目的】

隅角部と一般部の両者の応力伝達がスムーズに行えるように分割する。

【分割例】

板幅方向の要素分割は上図の通りで、一般部の要素分割から隅角部の要素分割へ漸次変化させる。

境界部の母材面内の剛性は十分に大きくするので、横断線の間隔は小さいほうが有利となり、100 mm程度が目安となる。

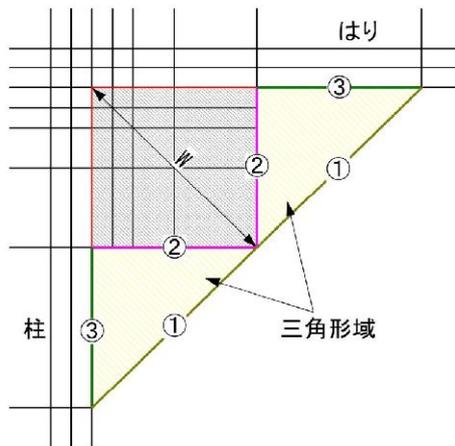
c) 部材剛度

横断線の縁部材剛度は、母材面内では十分に大きくし、母材面外では板の剛度とする。

部材軸方向の縁部材剛度は、中央の縁部材については一般部板要素の剛度を使用し、それ以外はダミーとして小さな値とする。

5) フィレット構造

フィレット構造を一定せん断流パネルによりモデル化する場合、曲線を廃して直線形状を近似しても下図のような三角形域ができる。しかし、一定せん断流パネル解析では三角形要素を定義できないため、このような箇所をはり要素(①, ②, ③)とパネル要素を組み合わせでモデル化する。なお、各はり要素の部材剛度は、以下に示すように分担幅を定義して設定する。



付図-2.44 フィレット構造の要素分割法^{付2.6)}

・部材①のモデル化

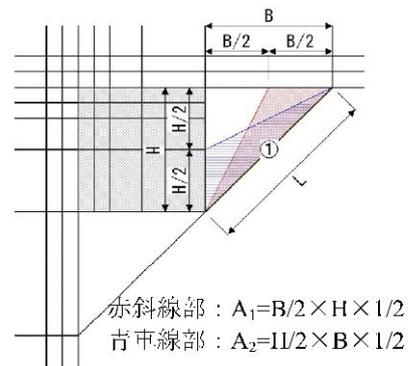
右図に示すような赤斜線部と青斜線部を考え、この斜線部の合計面積が部材①方向の面積と等価になる幅をはり要素の分担幅と考え、部材の剛度を算出する。

分担幅： $(A_1 + A_2)/L$

フィレット構造板厚： t

断面積： $(A_1 + A_2)/L \times t$

断面二次モーメント： $(A_1 + A_2)/L \times t^3/12$



赤斜線部： $A_1 = B/2 \times H \times 1/2$
 青斜線部： $A_2 = 1/2 \times B \times 1/2$

付図-2.45 部材①のモデル化^{付2.6)}

・部材②のモデル化

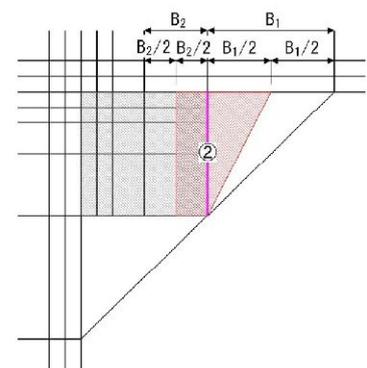
右図に示すような赤斜線部を考え、この斜線部の面積が部材②方向の面積と等価になる幅をはり要素の分担幅と考え、部材の剛度を算出する。

分担幅： $(B_1/2 + B_2)/2$

フィレット構造板厚： t

断面積： $(B_1/2 + B_2)/2 \times t$

断面二次モーメント： $(B_1/2 + B_2)/2 \times t^3/12$



付図-2.46 部材②のモデル化^{付2.6)}

・部材③のモデル化

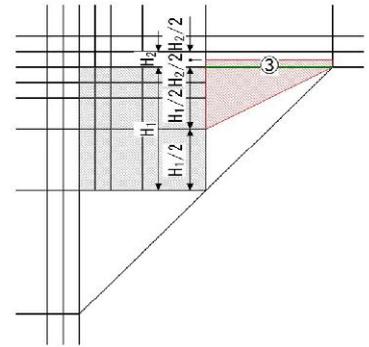
右図に示すような赤斜線部を考え、この斜線部の面積が部材③方向の面積と等価になる幅をはり要素の分担幅と考え、部材の剛度を算出する。

$$\text{分担幅} : (H_1/2 + H_2)/2$$

フィレット構造板厚 : t

$$\text{断面積} : (H_1/2 + H_2)/2 \times t$$

$$\text{断面二次モーメント} : (H_1/2 + H_2)/2 \times t^3/12$$



付図-2.47 部材③のモデル化^{付2.6)}

6) 支点条件

柱基部の完全固定の条件を再現するために、脚柱の縁部材下端の境界条件を6成分とも固定とする。

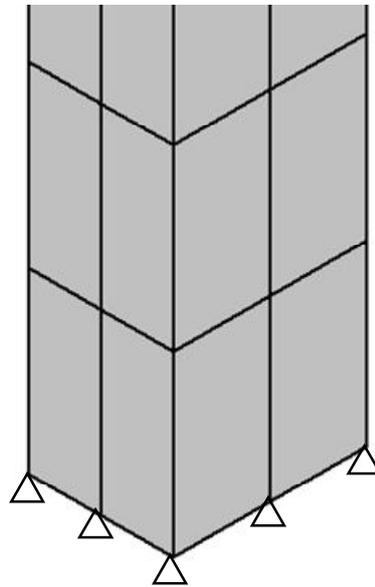


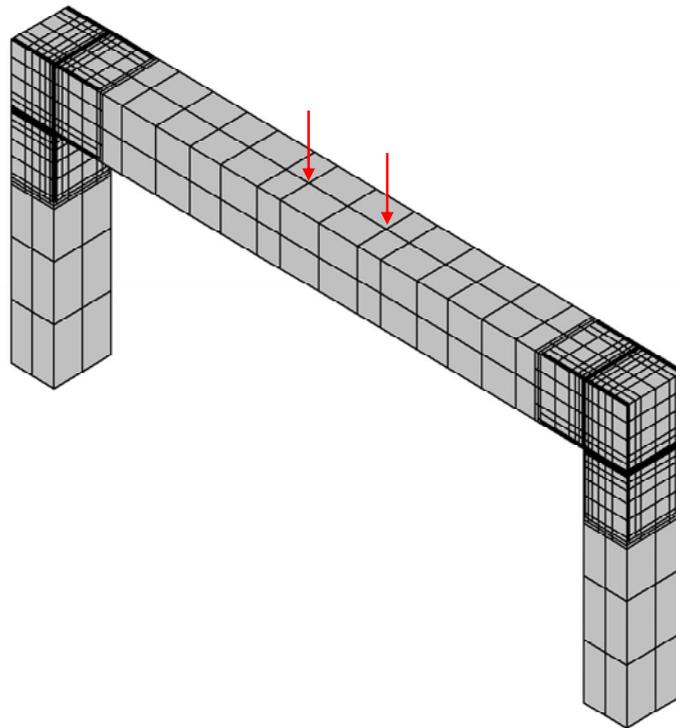
図-2.48 柱基部の支点条件

(3) 荷重

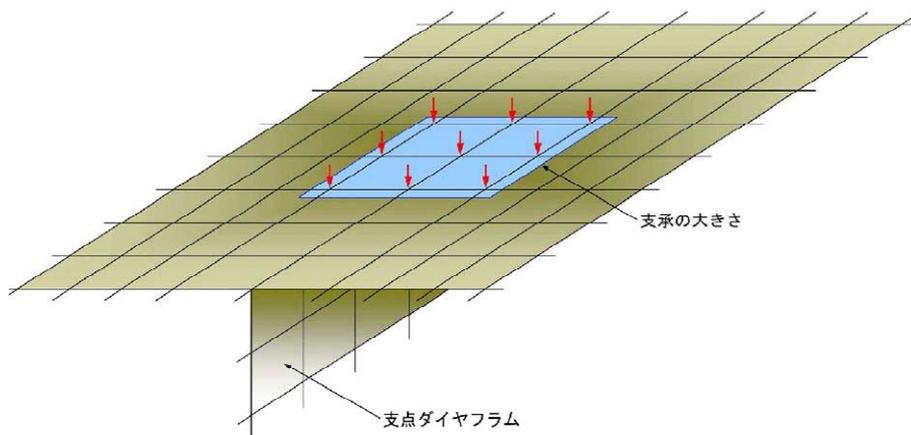
1) 上部工反力

・一般部に載荷する場合、下図のように支点となる節点に集中荷重として載荷する。

・隅角部に含まれる範囲に支点がある場合は、下図のように支承の大きさ内にある節点に荷重を等分して載荷する。



(a)一般部の支点



(b)隅角部の支点

付図-2.49 支点部の荷重載荷方法^{付2.6)}

2) 橋脚に作用する荷重

橋脚自重、充填コンクリート、根巻きコンクリートなどの死荷重、橋脚に作用する風荷重、地震荷重は、橋脚の節点に分散させて載荷する。

【付録2 参考文献】

- 付 2.1) 中井博, 北田俊行: 鋼橋設計の基礎, 1992.5, 共立出版株式会社
- 付 2.2) E.Reissner: Analysis of Shear Lag in Box Beam by Principle of Minimum Potential Energy, Quarterly of Applied Mechanics, Vol.4, No.4, pp.268-278, 1946.
- 付 2.3) H.Nakai and C.H.Yoo: Analysis and Design of Curved Steel Bridges, McGraw-Hill, New York, 1988.
- 付 2.4) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 2012.3
- 付 2.5) 建設省道路局国道課 監修: 鋼道路橋設計ガイドライン (案), 1998.5
- 付 2.6) 玉越隆史, 中洲啓太, 石尾真理, 木内耕治: 道路橋の鋼製橋脚隅角部の疲労設計法に関する研究 —一定せん断流パネルを用いた解析法の検討—, 国土技術政策総合研究所資料, 第 296 号, 2006.1

.....
国土技術政策総合研究所資料
TECHNICAL NOTE of N I L I M
No. 841 March 2015

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

.....
本資料の転載・複写の問い合わせは
〒305-0804 茨城県つくば市旭一番地
企画部研究評価・推進課 TEL 029-864-2675