

2章 PC 道路橋のプレストレス評価の現状と課題

2.1 概要

PC 道路橋の健全度に関係する技術的課題の抽出のために、プレストレスに関わる事項について設計・施工・品質管理・維持管理の現状について整理する。

我が国の道路橋の設計にあたっては、道路構造令に対する技術的解釈としての性格をもつ「橋、高架の道路等の技術基準」が道路局長・都市整備局長の通達としてだされており、道路ネットワークの整備水準の整合性の観点などから、国以外の道路管理者を含むほとんどの場合には、この通達に準拠して行われている。またこの基準が適切に解釈・運用されることを補助するとともに、実務設計の便を図るために、通達条文に解説を附した参考図書として「道路橋示方書・同解説 I～V」（以下「道路橋示方書」という）が(社)日本道路協会から基準の改訂にあわせて都度出版されており、実務設計にあたってはこれが広く一般に参照される。

なお、技術基準は、その性格から関連する法令を満足する要求性能の水準を規定するものであり、必ずしも計算応力の算出手法や施工方法などについての具体的な詳細は網羅的に示されていない。そのため基準の求める性能を満足するための設計を行うために、実務では必要に応じて各種学協会等がとりまとめている様々な設計技術資料なども参照される。ただし要求性能の水準そのものはあくまで技術基準で規定されるものであることから、本研究の対象についても、基本的には「道路橋示方書」に準拠して構築された PC 道路橋を対象とする。

2.2 PC 道路橋の設計

(1) 設計規準の変遷

国内の道路橋として初めての PC 構造物は、プレテンション PC 桁を使用した長生橋（支間 3.8m）が昭和 26 年（1951 年）に建設された。その後昭和 34 年（1959 年）に張出架設工法で建設された嵐山橋（最大支間 51m）、昭和 37 年（1962 年）には支間 100m を超える越野尾橋、さらに昭和 38 年（1963 年）には日本で最初の斜張橋となる島田橋（支間 39.7m）が建設されるなど、規模が拡大するとともに構造も複雑になってきている。そのため、設計技術の高度化が進む一方、設計通りに施工が行われない場合のリスクも増加してきた。

これらコンクリート構造物の代表的な変状としては、1980 年代初めに顕在化した塩害劣化による鋼材腐食、1980 年代後半から 90 年代にかけて顕在化した PC グラウトの充填不良による PC 鋼材の腐食や破断などがある。

一方、設計技術では土木学会が昭和 28 年（1953 年）にプレストレスコンクリート小委員会を設置し、昭和 30 年（1955 年）に PC 設計施工指針が制定された。図 2.2.1 に土木学会と日本道路協会における設計規準の変遷を示す。本研究で対象とする PC 道路橋の設計体系は、『道路橋示方書・同解説Ⅲ』を基本としている。

PC 道路橋を対象とした基準に関しては、昭和 43 年（1968 年）に「プレストレストコンクリート道路橋示方書」が発刊されたのちに、昭和 53 年（1978 年）に「鉄筋コンクリート道路橋設計示方書」と統合して、「道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編」が改訂された。昭和 53 年（1978 年）の改訂では、RC 構造と PC 構造の安全率を統一するため、従来の設計荷重作用時の応力度を照査する許容応力度法に、終局荷重作用時の構造物の安全度を照査する終局強度設計法を併用した照査方法が規定された。終局荷重作用時としては、従来、鋼橋の材料から定まる安全率と統一をとるため定めた PC 道路橋に規定されていた荷重係数を改訂して規定している。

平成 2 年（1990 年）の改訂では、床版の耐久性を確保するという観点から、昭和 59 年（1984 年）2 月の通達「道路橋鉄筋コンクリート床版の設計・施工指針」を取り込み、大型車両の交通条件や床版の補修作業の容易さなどを考慮した最小床版厚の規定が見直された。また、昭和 61 年（1986 年）6 月の通達「コンクリート中の塩化物量規制規準（土木構造物）」に基づき、フレッシュコンクリートおよびグラウト中の許容塩化物量が規定された。塩化物含有量の限度の標準値は、諸外国の規制値と比較して危険側でないこと、鋼材の発錆を促進させる可能性が小さいことを実験で確かめた値であること、達成可能な値であることを考慮して定められた。

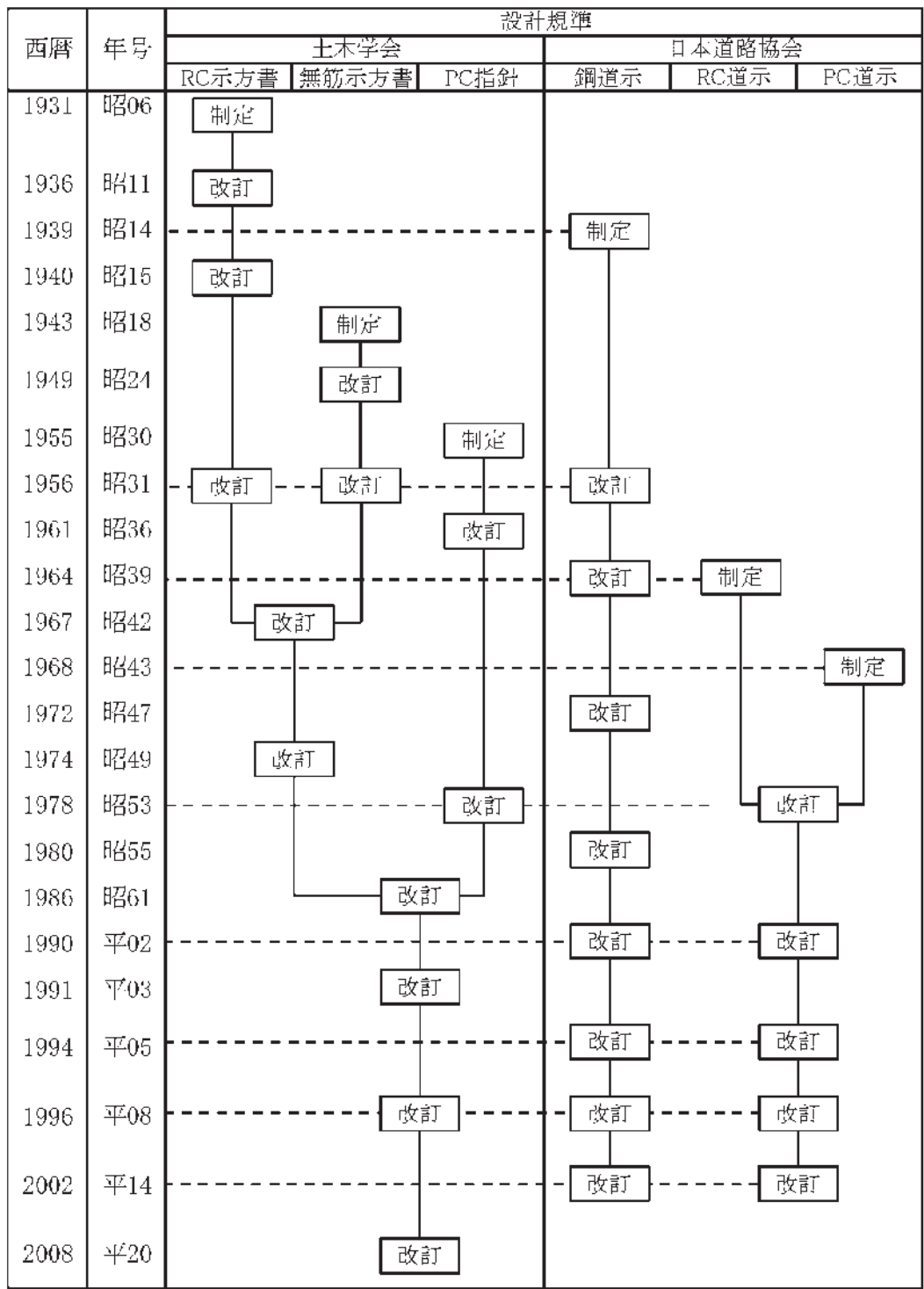
平成 6 年（1994 年）の改訂では、車両の大型化の対応や耐久性の向上等を図るため活荷重の規定の見直し、床版橋関連の規定の一部見直しが行われた。

平成 8 年（1996 年）の改訂では、兵庫県南部地震を踏まえ耐震設計関連の見直しが行われた。フレッシュコンクリート中の塩化物含有量については、土木学会や JIS 規格の動向を踏まえ、塩化物イオン量で 0.30kg/m^3 以下に規定が変更された。グラウトの材料については、

ブリーディング率を原則 3%以下に規定するとともに、グラウト規定全般について見直しが行われた。

平成 14 年（2002 年）の改訂では、性能規定型の書式に変更され、また耐久性の向上を図るために塩害地域におけるかぶりの規定を設ける等の見直しが行われた。グラウトの材料については、ノンブリーディング型グラウトを標準のグラウトとして規定するとともに、プレグラウト PC 鋼材に関する規定が新たに設けられた。

以上のように、PC 道路に関する設計規準は、疲労や塩害などによる損傷・劣化、グラウト不良による PC 鋼材の破断などを背景に改訂されている。



RC示方書：鉄筋コンクリート標準示方書、無筋示方書：無筋コンクリート標準示方書、PC指針：プレストレストコンクリート設計施工指針(案)、鋼道示：鋼道路橋示方書、RC示方書：鉄筋コンクリート道路橋示方書、PC道示：プレストレストコンクリート道路橋示方書

図 2.2.1 設計規準の変遷¹⁾

(2) 設計の現状

現在の道路橋の設計では、部材ごとに構成材料の特性を考慮して荷重等の影響に対して部材に求められる必要な機能が発揮されるか否かを照査している。また要求性能との関わりを発生応力や変形など定量的な評価基準で照査することが困難な事項については、経験的に確立してきたものも含む構造細目を遵守することで性能を満足するものとみなす場合も多い。

設計計算や構造細目の遵守によって要求性能を満足させる場合には、それらの計算理論や構造細目が前提としている材料品質、施工手順や施工管理方法などと整合した材料の使用、施工の実施が必須条件となる。したがってこれらが満足されない場合には計算手法や構造細目を形式的に遵守しても必要な性能が満足される保証がないことに注意が必要である。

本項では、我が国で現在一般的な PC 道路橋の設計・施工で用いられる手法とそこに用いられている照査式や評価項目についての現状を整理するとともに、通常の橋梁設計で実施される照査手順に従って、その根拠および部材の性能との関係について体系的にとりまとめた。

表 2.2.1～2.2.9 に、PC 道路橋の設計で実施項目とそれらの根拠、およびそれによって達成されることを意図した性能について示すとともに、それらが満足しない場合に生じることが考えられる影響についても合わせて記す。

表2.2.1 PC橋の設計および施工で担保している性能とその変状が及ぼす影響（設計条件その1）

1. 項目			2. 設計・施工で用いる制限値・性能規定等		3. 規格値, 規定に対する根拠		4. 制限値, 許容値に関する性能		5. 機能・性能が満足されない場合に橋梁に現れる事象, 事例・現状の課題		参考文献		
大	中	小	値・規定の根拠		適用範囲等の補足		耐荷性能および構造的機能	耐久性能	耐荷性能および構造的機能	耐久性能			
設計条件(使用材料)	コンクリート	一般	一般		-		<ul style="list-style-type: none"> フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートとしての所要の特性や品質を有する必要がある。[1] フレッシュコンクリートに必要な特性:ワーカビリティ、ポンパビリティ、凝結特性、施工時強度など。[1] 硬化コンクリートに必要な特性:強度、変形特性、耐久性(中性化速度係数、塩化物イオン拡散係数、相対動弾性係数、耐化学的浸食性、耐アルカリ骨材反応性、透水係数、耐火性、乾燥収縮特性など)[1] 		-		-		[1]日本道路協会:道路橋示方書・同解説, I 共通編・IIIコンクリート橋編, pp.77-78, 平成14年3月
		強度	設計基準強度、許容応力度		-		<ul style="list-style-type: none"> コンクリートは原則として、次の最低基準強度以上とする。[1] 無筋コンクリート部材:18N/mm² 鉄筋コンクリート部材:21N/mm² プレテンション方式プレレストコンクリート部材:36N/mm² ポストテンション方式プレレストコンクリート部材:30N/mm² 許容応力度は設計基準強度60N/mm²まで(一部80N/mm²まで)規定。それ以上の強度については、別途設定しなければならない。[2] 		<ul style="list-style-type: none"> 使用時:許容応力度による部材の安全性の確保 ⇒曲げ圧縮応力度、軸圧縮応力度、曲げ引張応力度、軸引張応力度、斜引張応力度、付着応力度、支圧応力度、押抜きせん断応力度 ⇒全断面有効を確保 ⇒終局時:破壊安全度の確保 コンクリートの配合強度は、すべての供試体の試験値が設計基準強度の85%以上、3回の平均値は設計基準強度以上となるよう品質のばらつきを考慮して定める。[3] 	<ul style="list-style-type: none"> W/Cの閾値として水密性、拡散係数など物質移動抵抗性と関連 ⇒耐塩害、耐中性化を確保 有害なひび割れの発生を抑制 	<ul style="list-style-type: none"> [使用時のひび割れ発生] 曲げ引張強度不足による曲げひび割れの発生 ⇒全断面有効の仮定不成立 斜引張強度不足によるせん断(斜め)ひび割れの発生 支圧強度不足による定着部背面に割裂ひび割れ発生 [終局時の耐力低下および脆性破壊] 付着強度不足による引張鋼材定着不良および曲げ引張破壊 付着強度不足によるスターラップ定着不良およびせん断破壊 圧縮強度不足による曲げ耐力低下および曲げ圧縮破壊 せん断強度不足によるせん断破壊 押抜きせん断強度不足による押抜きせん断破壊 	<ul style="list-style-type: none"> [鋼材腐食の発生] 塩害、中性化に伴う鋼材腐食の発生 付着強度不足による有害なひび割れの発生 	[1]日本道路協会:道路橋示方書・同解説, I 共通編・IIIコンクリート橋編, pp.81-82, 平成14年3月 [2]日本道路協会:道路橋示方書・同解説, I 共通編・IIIコンクリート橋編, pp.118-125, 平成14年3月 [3]日本道路協会:道路橋示方書・同解説, I 共通編・IIIコンクリート橋編, pp.330-334, 平成14年3月
		ヤング係数	設計基準強度に応じた設計値		<ul style="list-style-type: none"> 良質な骨材の不足によりコンクリートのヤング係数は従来の値より小さくなっているため、平成2年の道示改定により改められた。[1] 全国の調査結果の平均値が用いられている。[2] 		<ul style="list-style-type: none"> 十分に硬化したコンクリートの応力-ひずみ曲線は、道示に示す許容応力度以下の範囲内では実用上直線として取り扱うことができる。圧縮強度試験によって応力-ひずみ曲線を求め、圧縮強度の1/3の点と原点(50×10⁻⁶の時の応力)とを結ぶ割線弾性係数で求める。[1] 道示の値は、設計荷重作用時および終局荷重作用時の部材の設計に用いるもので、若材齢時に部材の応力度あるいは破壊に対する安全度の照査を行う場合には試験等により別途定める。[2] 		<ul style="list-style-type: none"> 直後および有効プレストレス量 主桁の変形量 	-	<ul style="list-style-type: none"> [作用応力度の差異] 直後および有効プレストレスが計算値と合致しない。 [過大な変形・振動] 過大なたわみが生じ、計画道路線形と合致しない。 過大な支承の移動量が生じる。 ⇒支承機能不全および損傷、伸縮装置の遊間異常および機能不全。 過大な振動が生じ、供用性を確保できない。 	[1]日本道路協会:コンクリート道路橋設計便覧 pp.40-41 平成6年2月 [2]日本道路協会:道路橋示方書・同解説, I 共通編・IIIコンクリート橋編, pp.82-85, 平成14年3月	
		乾燥収縮度	材齢に応じた標準値または計算式による値		<p>プレストレスの減少量および不静定力を算出する場合のコンクリートの乾燥収縮度は、次に示すRusch,Jungwirthの提案式をもとに、右に示す[標準値の根拠]の条件の下に求められている。[1]</p> <p>また、それら標準値によりがたい場合は、試験により別途求めるか、Rusch,Jungwirthの提案式によって求める。</p> $\epsilon_{CS}(t, t_0) = \epsilon_{s0} \cdot \beta_s(t - t_0)$ $t_0 \text{ または } t = \sum (T+10) \cdot \Delta t' / 30$ <p>$\epsilon_{CS}(t, t_0)$: コンクリートの有効材令t_0からtまでの乾燥収縮度 T: コンクリートの温度(°C) $\Delta t'$: コンクリートの温度がT°Cである日数(日)</p>		<p>[適用条件]</p> <ul style="list-style-type: none"> コンクリートの温度:0~40°C程度[2] 相対湿度:40~100%または水中[2] セメントの種類による影響は小さいため考慮しなくてよいが、コンクリートの配合が普通の構造用コンクリートであること(モルタルが著しく多いか、または、軟らかい配合、あるいは著しく貧配合のコンクリートには適用できない。)[2] コンクリートのスランプ:5~10cm程度[2] <p>[標準値の根拠]</p> <ul style="list-style-type: none"> 相対湿度70%、コンクリート温度20°C、部材の仮想厚さを400mmとして算定式で求められている。[2] 普通および早強ポルトランドセメント使用の場合[3] [その他] 構造系に変化がなく、乾燥収縮の影響による不静定力を算出する場合は、15×10⁻⁵とする。ただし、軸方向鋼材量が0.5%未満の場合は、20×10⁻⁵とする。[3] とくに水セメント比が小さいと自己収縮が大きくなることがあるので、土木学会コンクリート標準示方書により乾燥収縮を算出してもよい。[3] 		<ul style="list-style-type: none"> 有効プレストレス量 主桁の変形量 二次応力(不静定力) 	-	<ul style="list-style-type: none"> [ひび割れの発生] プレストレス不足による曲げ、せん断ひび割れの発生 想定以上の二次応力(不静定力)の発生によりひび割れ発生 部材の拘束(施工継目、壁高欄、箱桁のウェブ拘束)による貫通ひび割れの発生 配置鋼材(鋼材量が多い部位、変化点など)、内部拘束によるひび割れ発生 コンクリート表面に微細なヘアクラックが発生 隅角部(開口部)のひび割れ [過大な変形・振動] 過大なたわみが生じ、計画道路線形と合致しない。 過大な支承の移動量が生じる。 ⇒支承機能不全および損傷、伸縮装置の遊間異常および機能不全 	[1]土木学会:プレレストコンクリート標準示方書 解説資料 6.コンクリートの乾燥収縮とクリープおよびPC鋼材のリラクション, pp.49-50,昭和54年7月 [2]日本道路協会:コンクリート道路橋設計便覧, 平成6年2月, pp.45-46 [3]日本道路協会:道路橋示方書・同解説, I 共通編・IIIコンクリート橋編, pp.30-38, 平成14年3月	
クリープ係数	材齢に応じた標準値または計算式による値		<p>プレストレスの減少量を算出する場合のコンクリートのクリープ係数は、次に示すRusch,Jungwirthの提案式をもとに、右に示す[標準値の根拠]の条件の下に求められている。[1]</p> <p>また、それら標準値によりがたい場合は、試験により別途求めるか、Rusch,Jungwirthの提案式によって求める。</p> $\psi(t, t_0) = \psi_{s0} \cdot \beta_s(t - t_0) + \psi_{f0} (\beta_f(t) - \beta_f(t_0))$ <p>ψ_{s0}: 遅れ弾性ひずみに対する基本クリープ係数で、一般に0.4とする。 ψ_{f0}: フローひずみに対する基本クリープ係数で、環境条件に応じた値。 $\beta_s(t - t_0)$: 載荷後の有効経過日数($t - t_0$)に関する関数である。 $\beta_f(t)$: コンクリートの有効材令tおよび部材の仮想厚さに関する関数(仮想厚さは乾燥収縮の場合と同一の値とする。) t_0およびt: 載荷時およびクリープ係数の値を算出する時点でのコンクリートの有効材令(日)であり、コンクリートの温度およびセメントの種類により補正した値を用いる。 tまたは$t_0 = \sum (T+10) \cdot \Delta t' / 30$ α: コンクリートの硬化速度に関する係数 早強セメントの場合2.0、普通セメントの場合1.0 $\Delta t'$: 温度がT°Cである期間の日数</p>		<p>[適用条件]</p> <ul style="list-style-type: none"> コンクリートに作用する圧縮応力度:コンクリートの圧縮強度の40%以下[3] ⇒高応力度下での非線形性やクリープ破壊を考慮 コンクリートの平均温度:0~30°C、短時間の温度変化は-25°C、または+50°Cの限度を超えない[2] 平均湿度:40%~100%または水中[2] コンクリートの配合が普通の構造用コンクリートであること(モルタル分が著しく多い配合、あるいは著しく貧配合のコンクリートには適用できない。)[2] コンクリートのスランプ:5~10cm程度[2] <p>[標準値の根拠]</p> <ul style="list-style-type: none"> 相対湿度70%、コンクリート温度20°C、部材の仮想厚さを400mmとして算定式で求められている。[2] 普通および早強ポルトランドセメント使用の場合[3] [その他] コンクリートのクリープひずみは、回復クリープひずみ(遅れ弾性)と非回復ひずみ(フロー)との和であると考えられる。クリープによるプレストレスの損失を計算する場合、クリープひずみを2成分に分けても、これを一括しても、緊張材引張応力度の減少量の計算結果には殆ど差がないので、クリープひずみは2成分に分けなくても良いこととしている。[3] コンクリートの温度とセメントの種類による影響を考慮して有効材齢を計算する。[2] 		<ul style="list-style-type: none"> 有効プレストレス量 主桁の変形量 二次応力(不静定力) 	-	<ul style="list-style-type: none"> [作用応力度の差異] 有効プレストレスが計算値と合致しない。 [ひび割れの発生] プレストレス不足による曲げ、せん断ひび割れの発生 想定以上の二次応力(不静定力)の発生によりひび割れ発生 [過大な変形・振動] 過大なたわみが生じ、計画道路線形と合致しない。 過大な支承の移動量が生じる。 ⇒支承機能不全および損傷、伸縮装置の遊間異常および機能不全 	[1]土木学会:プレレストコンクリート標準示方書 解説資料 6.コンクリートの乾燥収縮とクリープおよびPC鋼材のリラクション, pp.51-53,昭和54年7月 [2]日本道路協会:コンクリート道路橋設計便覧, pp.41-45, 平成6年2月 [3]日本道路協会:道路橋示方書・同解説, I 共通編・IIIコンクリート橋編, pp.30-38, 平成14年3月			

表2.2.2 PC橋の設計および施工で担保している性能とその変状が及ぼす影響（設計条件その2）

1. 項目			2. 設計・施工で用いる制限値・性能規定等	3. 規格値, 規定に対する根拠		4. 制限値, 許容値に關係する性能		5. 機能・性能が満足されない場合に橋梁に現れる事象, 事例・現状の課題		参考文献
大	中	小		値・規定の根拠	適用範囲等の補足	耐荷性能および構造的機能	耐久性能	耐荷性能および構造的機能	耐久性能	
設計条件 (使用材料)	鋼材		一般	—	—	・強度、伸び、じん性等の機械的性質、化学組成、有害成分の制限、厚さやそり等の形状寸法等の特性や品質が確かなものでなければならない。[1] ・鉄筋およびPC鋼材については、JIS G 3112鉄筋コンクリート用棒鋼、JIS G 3109PC鋼棒、JIS G 3536PC鋼線およびPC鋼より線の規格品は上記を満足するものとみなす。[1]	—	—	[1]日本道路協会:道路橋示方書・同解説, I 共通編・IIIコンクリート橋編, pp.68-77, 平成14年3月	
		強度	使用材料の特性値 たとえばJIS規格値	—	・許容応力度は、直径32mm以下の鉄筋に対して規定し、それを超える径の鉄筋については、別途ひび割れ分散性および定着部または継手部の割裂破壊について考慮しなければならない。[1]	・使用時:許容応力度による部材の安全性の確保 ⇒引張応力度、圧縮応力度 ・終局時:破壊に対する安全性の確保	・使用時:ひび割れ幅を耐久性上有害としない値(0.2mm程度以下)に制御、および疲労耐久性を確保[1]	[終局時の耐力低下および脆性破壊] ・終局時に、鋼材が引張強度不足で耐力が低下する。 ・曲げ引張破壊およびせん断破壊により脆性破壊する。	[有害なひび割れおよび疲労破壊] ・使用時に、床版など応力変動の大きい部材で疲労破壊する。	[1]日本道路協会:道路橋示方書・同解説, I 共通編・IIIコンクリート橋編, pp.126-128, 平成14年3月
	鉄筋	ヤング係数	使用材料の特性値, 道路橋示方書の規定値	—	・鋼材のヤング係数は、原則的には試験によって求める必要があるが、鋼材のヤング係数の誤差が部材断面の応力度や部材の変形などの設計計算に及ぼす影響は小さいため、一般には道示の値(2.0×10 ⁵ N/mm ²)を用いてもよい。[1]	・設計に用いる応力度-ひずみ曲線 ⇒応力度の算定 ⇒断面耐力の算定	—	[作用応力度の差異] ・応力度-ひずみ関係が設計と合致しないため、作用応力度が設計値と一致しない。 [終局耐力の差異] ・ひずみの適合条件が設計と合致しないため、終局耐力が設計値と一致しない。	—	[1]日本道路協会:コンクリート道路橋設計便覧, p.48, 平成6年2月
	強度	使用材料の特性値 たとえばJIS規格値	—	・使用時の許容引張応力度は、部材の疲労に関する十分な検討を行わない場合には、PC鋼材の引張強さの60%または降伏点の75%として設定されている。[1]	・緊張作業時:許容応力度による破断に対する安全性の確保 ・使用時:許容応力度による部材の安全性の確保 ・終局時:破壊に対する安全性の確保	・使用時に、発生応力度を制限値内に抑え、疲労耐久性を確保する。	[緊張時の破断] ・緊張作業時に、PC鋼材が破断する。 [終局時の耐力低下および脆性破壊] ・終局時に、鋼材が引張強度不足で耐力が低下する。 ・曲げ引張破壊およびせん断破壊により脆性破壊する。	[疲労破壊] ・使用時に、床版など応力変動の大きい部材で疲労破壊する。	[1]日本道路協会:道路橋示方書・同解説, I 共通編・IIIコンクリート橋編, pp.128-129, 平成14年3月	
	PC鋼材	ヤング係数	使用材料の特性値, 道路橋示方書の規定値	—	・JIS G 3101による圧延鋼材は、大体2100000kg/cm ² のヤング係数を持っているが、高強度鋼では2000000kg/cm ² 前後のヤング係数を持っている。応力-ひずみ曲線の形は、高強度鋼線の種類によって異なるが、設計者が実際に用いるPC鋼線のヤング係数を知って設計することは少ないので、条文に大体の平均値として与えた。[1] ・鋼材のヤング係数は、原則的には試験によって求める必要があるが、鋼材のヤング係数の誤差が部材断面の応力度や部材の変形などの設計計算に及ぼす影響は小さいため、一般には道示の値(2.0×10 ⁵ N/mm ²)を用いてもよい。[2] ・JISにない、多くの本数のPC鋼線を束ねたり、あるいはより線にして用いる場合のケーブルのヤング係数は2.0×10 ⁵ N/mm ² 以下となることもあるので、試験により別途定める。[3]	・緊張作業時:鋼材の伸び管理 ・使用時:設計に用いる応力度-ひずみ曲線 ・終局時:断面耐力の算定	—	[作用応力度の差異] ・応力度-ひずみ関係が設計と合致しないため、作用応力度が設計値と一致しない。 [終局耐力の差異] ・ひずみの適合条件が設計と合致しないため、終局耐力が設計値と一致しない。	—	[1]土木学会:昭和30年土木学会制定 プレストレストコンクリート 設計施工指針, p26,昭和30年4月 [2]日本道路協会:コンクリート道路橋設計便覧, pp.48-50, 平成6年2月 [3]日本道路協会:道路橋示方書・同解説, I 共通編・IIIコンクリート橋編, pp.82-85, 平成14年3月
	リラクセーション	使用材料の特性値, 道路橋示方書の規定値	・プレストレスの減少を算出する場合は、コンクリートの乾燥収縮、クリープ等による影響を考慮し、見かけのリラクセーション率を用いる。 ・諸外国の指針(CEB-FIP: Recommendations internationales pour le calcul et l'execution des ouvrages en beton,1970およびPCI: Design Handbook Precast and Prestressed Concrete,1971)を用い、通常のPC部材について見かけのリラクセーション率を計算すると、PC鋼線およびPC鋼より線に対しては約5%前後、またPC鋼棒に対しては約3%前後の値が得られる。[1]	・死荷重作用時のPC鋼材位置でのコンクリートに作用している圧縮応力度が5N/mm ² を下回るような場合は、道示の表の値を用いることはできない。ただし、プレストレス直後のPC鋼材に作用している引張応力度が引張強度(規格値)の65%以下の場合には、上記のコンクリート応力度が3N/mm ² 程度であっても道示の表の値を用いてよい。[2] ・PC鋼材に低い値の緊張力を与える場合等特別にリラクセーション率を定める場合には、引張応力度に応じた純リラクセーション率を試験により定めるものとする。この場合、純リラクセーション率は常温での1,000時間試験値の3倍とする(土木学会規準「PC鋼材の長時間リラクセーション試験方法」参照)。[2]	・プレストレスの減少量	—	[作用応力度の差異] ・有効プレストレスが設計と合致しないため、作用応力度が設計値と一致しない。	—	[1]日本建築学会:プレレストレストコンクリート設計施工規準・同解説 pp.115-119, 昭和36年7月 [2]日本道路協会:道路橋示方書・同解説, I 共通編・IIIコンクリート橋編, pp.82-85, 平成14年3月	

表2.2.3 PC橋の設計および施工で担保している性能とその変状が及ぼす影響（構造設計その1）

1. 項目			2. 設計・施工で用いる 制限値・性能規定等	3. 規格値、規定に対する根拠		4. 制限値、許容値に関する性能		5. 機能・性能が満足されない場合に橋梁に現れる事象、事例・現状の課題		参考文献			
大	中	小		値・規定の根拠	適用範囲等の補足	耐荷性能および構造的機能	耐久性能	耐荷性能および構造的機能	耐久性能				
構造設計	床版	最小全厚	一般	床版には、橋上を通行する交通を直接支持し、それらの荷重を主桁に伝達させる機能が要求される。床版には鉄筋コンクリート(RC)床版およびプレストレストコンクリート(PC)床版がある。床版の支持形式は、①単純版、②連続版、③片持版に分類され、設計では一般的に曲げモーメントに関する照査のみを行うが、条件 ^{※1)} によってはせん断力、または、押抜きせん断に関する照査を行う必要がある。 ※1) 道路橋示方書7.3に規定する床版の最小全厚を満たしていれば、せん断および押抜きせん断の検討を行う必要はない。しかし、施工時に大きな荷重を受ける場合等では、十分な検討をすることが望ましい。									
			[RC構造] ・車道部分は、160mm又は床版の構造形式および支間により求められる値のうち大きい値										
			[PC構造] ・車道部分は、160mm又はプレストレスの導入方向および床版の支間の方向により求められる値のうち大きい値										
			トプレストレス (引張応力の発生を許容しない)										
			鉄筋										
	主桁	設計荷重作用時曲げ	コンクリート	一般	橋台または橋脚間で、上部構造全体の荷重を支持して下部構造に伝える役割を有し、主桁の形式にはT桁、箱桁、合成桁等が挙げられる。主桁に作用する断面力は、一般に曲げモーメント、軸方向力、せん断力およびねじりモーメントが考えられ、それぞれ設計荷重作用時および終局荷重作用時の照査を行う。設計荷重時の照査では、主桁に作用する断面力が許容応力度以下となるように設計を行う。せん断力が作用する部材の終局荷重作用時の照査においては、せん断破壊は一般に脆性的であるので、曲げ破壊よりも先行しないように配慮することが重要である。								
				[RC構造]									
				[PC構造]									
				許容引張応力度									
				鋼材									

表2.2.4 PC橋の設計および施工で担保している性能とその変状が及ぼす影響（構造設計その2）

1. 項目			2. 設計・施工で用いる 制限値・性能規定等	3. 規格値, 規定に対する根拠		4. 制限値, 許容値に関する性能		5. 機能・性能が満足されない場合に橋梁に現れる事象, 事例・現状の課題		参考文献																																												
大	中	小		値・規定の根拠	適用範囲等の補足	耐荷性能および構造的機能	耐久性能	耐荷性能および構造的機能	耐久性能																																													
構造設計	主桁	設計荷重用時曲げ	<p>鉄筋</p> <p>直径32mm以下の鉄筋に対して許容応力度を定めている。</p> <table border="1"> <caption>単位(N/mm²)</caption> <thead> <tr> <th rowspan="2">応力度, 材料の種類</th> <th colspan="2">規格の制限</th> </tr> <tr> <th>SRC29</th> <th>SRC34</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>引張強度</td> <td>392</td> <td>424</td> </tr> <tr> <td>引張耐力</td> <td>294</td> <td>318</td> </tr> <tr> <td>圧縮強度</td> <td>29.4</td> <td>31.8</td> </tr> <tr> <td>圧縮耐力</td> <td>21.3</td> <td>22.7</td> </tr> <tr> <td>引張耐力/引張強度</td> <td>0.75</td> <td>0.75</td> </tr> <tr> <td>圧縮耐力/圧縮強度</td> <td>0.72</td> <td>0.71</td> </tr> </tbody> </table>	応力度, 材料の種類	規格の制限		SRC29	SRC34	引張強度	392	424	引張耐力	294	318	圧縮強度	29.4	31.8	圧縮耐力	21.3	22.7	引張耐力/引張強度	0.75	0.75	圧縮耐力/圧縮強度	0.72	0.71	-	-	<ul style="list-style-type: none"> 降伏に対する安全性の確保 有害なひび割れの防止 ひび割れの分散性の確保 鉄筋定着部、継手部でのひび割れ、割裂の防止 レベル1地震動に対する安全性の確保 全断面有効の仮定の成立 	<ul style="list-style-type: none"> 有害な(0.2mmを超える)ひび割れに対する安全性の確保 	<ul style="list-style-type: none"> 全断面有効でなくなる為、繰返し荷重用時にたわみ・変形が増大する。 終局時に引張鋼材の降伏・破断による破壊が生じる。 	<ul style="list-style-type: none"> 有害なひび割れの発生 繰返し荷重によるひび割れ幅の拡大 ひび割れ発生に伴う鋼材腐食(錆汁の発生) ひび割れに伴うコンクリートの剥離・剥落 	-																					
		応力度, 材料の種類	規格の制限																																																			
			SRC29	SRC34																																																		
		引張強度	392	424																																																		
		引張耐力	294	318																																																		
		圧縮強度	29.4	31.8																																																		
		圧縮耐力	21.3	22.7																																																		
		引張耐力/引張強度	0.75	0.75																																																		
		圧縮耐力/圧縮強度	0.72	0.71																																																		
		設計荷重用時曲げ	<p>PC鋼材</p> <p>許容応力度</p> <p>1)プレストレス中 0.80σ_{pu}, 0.90σ_{ps}の小さい方</p> <p>2)プレストレス直後 0.70σ_{pu}, 0.85σ_{ps}の小さい方</p> <p>3)設計荷重用時 0.60σ_{pu}, 0.75σ_{ps}の小さい方</p>	<p>PC鋼材の許容引張応力度の取り方については、多くの意見があり、各国の許容値の間にも差があるため、その中間の値を示した。わが国では、種々のPC工法及び鋼材を用いている為、それを一率に定めるには、これが適切であると考えられる[1]。</p>	-	<ul style="list-style-type: none"> 緊張作業時の安全性の確保(PC鋼材の降伏・破断の防止) 設計荷重用時のPC鋼材の降伏を防止 破壊抵抗曲げモーメントの確保 	-	<p>[設計荷重用時]</p> <ul style="list-style-type: none"> PC鋼材が降伏・破断する可能性が生じる。 初期引張応力度が大きいと、リラクゼーションが増大するため、プレストレスが低下し、曲げひび割れが発生する。 <p>[終局荷重用時]</p> <ul style="list-style-type: none"> PC鋼材の降伏・破断による曲げ破壊が生じる。 	-	[1]土木学会:プレストレスコンクリート設計施工指針, pp.86-87, 昭和36年8月																																												
設計荷重用時せん断	<p>コンクリート</p> <p>許容斜引張応力度</p> <table border="1"> <caption>単位(N/mm²)</caption> <thead> <tr> <th rowspan="2">応力度の種類</th> <th colspan="2">コンクリート</th> </tr> <tr> <th>30</th> <th>40</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>引張強度</td> <td>3.0</td> <td>4.0</td> </tr> <tr> <td>引張耐力</td> <td>2.25</td> <td>3.0</td> </tr> <tr> <td>引張耐力/引張強度</td> <td>0.75</td> <td>0.75</td> </tr> </tbody> </table>	応力度の種類	コンクリート		30	40	引張強度	3.0	4.0	引張耐力	2.25	3.0	引張耐力/引張強度	0.75	0.75	<p>許容斜引張応力度は、[プレストレスコンクリート設計施工指針、土木学会]を参考に、道路橋としての安全性を考慮して定めた[1]。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 設計荷重用時に部材に斜せん断ひびわれを発生させないように規定。 	<ul style="list-style-type: none"> 斜めひび割れに対する安全性の確保 全断面有効の確保 	<ul style="list-style-type: none"> 有害なひび割れに対する安全性の確保 	<ul style="list-style-type: none"> 設計荷重用時に、コンクリートに有害な斜めひび割れが発生する。 	<ul style="list-style-type: none"> 設計荷重用時にコンクリートに斜めひび割れが発生し、耐久性が低下する。 	[1]土木学会:プレストレスコンクリート道路橋示方書, pp.29, 昭和43年3月																																
応力度の種類	コンクリート																																																					
	30	40																																																				
引張強度	3.0	4.0																																																				
引張耐力	2.25	3.0																																																				
引張耐力/引張強度	0.75	0.75																																																				
設計荷重用時せん断	<p>PC鋼材</p> <p>・斜めPC鋼材によるせん断応力の分力を考慮</p>	-	-	-	-	-	-	-	-																																													
設計荷重用時曲げ	<p>部材</p> <p>・破壊抵抗曲げモーメント≥設計断面力設計断面力の組合せは次のとおりとする。 (a) 1.3×(死荷重)+2.5×(活荷重+衝撃) (b) 1.0×(死荷重)+2.5×(活荷重+衝撃) (c) 1.7×(死荷重+活荷重+衝撃)</p>	<p>・終局荷重用時の荷重に乗ずる係数は、既設橋梁に対するキャリブレーション、外国の規定との対比などを行い、過去の経験から決定論的に値が決められている[1]。</p>	-	<ul style="list-style-type: none"> 破壊抵抗曲げモーメント≥終局時の作用曲げモーメントとし、終局荷重用時に曲げ破壊が生じないようにする。 	-	<ul style="list-style-type: none"> 終局荷重用時に曲げ破壊が生じる。 	-	[1]橋梁と基礎79-4, pp.37-38, 昭和54年4月																																														
設計荷重用時せん断	<p>鋼材</p> <p>・配置する引張鋼材量≤終局つり合い鋼材量の75%</p>	-	-	<ul style="list-style-type: none"> 引張鋼材を先に降伏させることで、コンクリートの圧壊を避け、靱性を確保する。 	-	<ul style="list-style-type: none"> 引張鋼材の降伏前にコンクリートが圧壊し、脆性的な破壊形態を示す。 引張鋼材量が少ないと、鋼材が破断し脆性的な破壊形態を示す。 	-	-																																														
設計荷重用時曲げ	<p>部材</p> <p>・斜引張破壊に対する断面耐力$S_{us}^{※1}) \geq$設計断面力$^{※2)}$</p>	<p>・コンクリートが負担できる平均せん断応力度及びコンクリートの平均せん断応力度の最大値は、ヨーロッパ委員会(CEB)の条文を元に決定されている[1]。</p>	<p>※1) $S_{us} = S_c + S_s + S_p$, $S_c = k \cdot \tau_c \cdot b_w \cdot d$ ここに、τ_c:コンクリートの負担できる平均せん断応力度</p> <p>※2) 設計断面力は終局時曲げ参照</p>	<ul style="list-style-type: none"> 設計せん断力作用時に、せん断破壊を防止し、脆性的な破壊を防ぐ。 	-	<ul style="list-style-type: none"> 設計せん断力作用時に、せん断破壊が生じる。 	-	-																																														
設計荷重用時せん断	<p>コンクリート</p> <p>・ウェブコンクリートの圧壊に対する断面耐力$S_{uc}^{※3}) \geq$設計断面力$^{※4)}$</p> <table border="1"> <caption>コンクリートの設計基準強度σ_{ck} (N/mm²)</caption> <thead> <tr> <th></th> <th>21</th> <th>30</th> <th>40</th> <th>50</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>設計時</td> <td>CEB(1976) $\tau_c = 1.5$</td> <td>せん断補強筋が 配置されている場合</td> <td>0.61</td> <td>0.78</td> <td>0.94</td> <td>1.10</td> </tr> <tr> <td>終局時</td> <td>同上</td> <td>上記の値の1/1.7</td> <td>0.36</td> <td>0.46</td> <td>0.55</td> <td>0.65</td> </tr> <tr> <td>平均せん断応力度(N/mm²)</td> <td></td> <td></td> <td>0.36</td> <td>0.46</td> <td>0.55</td> <td>0.65</td> </tr> <tr> <td>終局時</td> <td>CEB(1976) $\tau_c = 1.5$</td> <td>0.3σ_{ck}/1.5</td> <td>4.2</td> <td>6.0</td> <td>8.0</td> <td>10.0</td> </tr> <tr> <td>終局時</td> <td>同上</td> <td>上記の値の1/1.5</td> <td>2.8</td> <td>4.0</td> <td>5.3</td> <td>6.6</td> </tr> <tr> <td>平均せん断応力度の最大値(N/mm²)</td> <td></td> <td></td> <td>2.8</td> <td>4.0</td> <td>5.3</td> <td>6.6</td> </tr> </tbody> </table>		21	30	40	50	設計時	CEB(1976) $\tau_c = 1.5$	せん断補強筋が 配置されている場合	0.61	0.78	0.94	1.10	終局時	同上	上記の値の1/1.7	0.36	0.46	0.55	0.65	平均せん断応力度(N/mm ²)			0.36	0.46	0.55	0.65	終局時	CEB(1976) $\tau_c = 1.5$	0.3σ _{ck} /1.5	4.2	6.0	8.0	10.0	終局時	同上	上記の値の1/1.5	2.8	4.0	5.3	6.6	平均せん断応力度の最大値(N/mm ²)			2.8	4.0	5.3	6.6	<p>※3) $S_{uc} = \tau_{max} \cdot b_w \cdot d + S_p$ τ_{max}:コンクリートの平均せん断応力度の最大値 b_w:部材断面のウェブ厚(mm), d:部材断面の有効高(mm)</p> <p>S_p:PC鋼材の引張力のせん断力作用方向の分力(N)</p> <p>※4) 終局時曲げ参照</p>	<ul style="list-style-type: none"> ウェブコンクリートの圧壊による脆性的な破壊を防止する。 	-	<ul style="list-style-type: none"> ウェブコンクリートの圧壊による脆性的な破壊が生じる。 	-	[1]橋梁と基礎79-4, pp.58-61, 昭和54年4月
	21	30	40	50																																																		
設計時	CEB(1976) $\tau_c = 1.5$	せん断補強筋が 配置されている場合	0.61	0.78	0.94	1.10																																																
終局時	同上	上記の値の1/1.7	0.36	0.46	0.55	0.65																																																
平均せん断応力度(N/mm ²)			0.36	0.46	0.55	0.65																																																
終局時	CEB(1976) $\tau_c = 1.5$	0.3σ _{ck} /1.5	4.2	6.0	8.0	10.0																																																
終局時	同上	上記の値の1/1.5	2.8	4.0	5.3	6.6																																																
平均せん断応力度の最大値(N/mm ²)			2.8	4.0	5.3	6.6																																																
設計荷重用時曲げ	<p>鉄筋</p> <p>・最小鉄筋量 異形棒鋼 $A_s \geq 0.002b_w \cdot a \cdot \sin \theta$ 丸鋼 $A_s \geq 0.003b_w \cdot a \cdot \sin \theta$</p>	-	<ul style="list-style-type: none"> 丸鋼は異形棒鋼に比べ付着強度が小さいため、ひび割れ幅が大きくなる。このため、丸鋼の最小鉄筋量は異形棒鋼よりも多くすることとした。 	<ul style="list-style-type: none"> 曲げ破壊を先行させ、脆性的な破壊を防止する。 せん断ひび割れ発生時に、脆性的な破壊を防ぐ。 	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥収縮や温度変化により発生するひび割れの幅を抑制する。 	<ul style="list-style-type: none"> 曲げ破壊よりもせん断破壊が先行し、脆性的な破壊が生じる。 せん断ひび割れ発生時に、脆性的なせん断破壊が生じる。 	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥収縮等により耐久性上有害となるひび割れが発生する。 	-																																														
設計荷重用時せん断	<p>PC鋼材</p> <p>・斜めPC鋼材によるせん断応力の分力を考慮</p>	-	-	-	-	-	-	-																																														
その他	リ鉄筋とコン付着	<p>許容付着応力度</p> <table border="1"> <caption>単位(N/mm²)</caption> <thead> <tr> <th rowspan="2">鉄筋の種類</th> <th colspan="2">コンクリートの設計基準強度</th> </tr> <tr> <th>21</th> <th>30</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11丸鋼</td> <td>0.70</td> <td>0.80</td> </tr> <tr> <td>13丸鋼</td> <td>0.80</td> <td>0.90</td> </tr> <tr> <td>16丸鋼</td> <td>1.00</td> <td>1.10</td> </tr> <tr> <td>19丸鋼</td> <td>1.20</td> <td>1.30</td> </tr> <tr> <td>22丸鋼</td> <td>1.40</td> <td>1.50</td> </tr> <tr> <td>25丸鋼</td> <td>1.60</td> <td>1.70</td> </tr> <tr> <td>28丸鋼</td> <td>1.80</td> <td>1.90</td> </tr> <tr> <td>32丸鋼</td> <td>2.00</td> <td>2.10</td> </tr> </tbody> </table>	鉄筋の種類	コンクリートの設計基準強度		21	30	11丸鋼	0.70	0.80	13丸鋼	0.80	0.90	16丸鋼	1.00	1.10	19丸鋼	1.20	1.30	22丸鋼	1.40	1.50	25丸鋼	1.60	1.70	28丸鋼	1.80	1.90	32丸鋼	2.00	2.10	-	-	<ul style="list-style-type: none"> コンクリートと鉄筋の一体性の確保 	-	-	-																	
	鉄筋の種類	コンクリートの設計基準強度																																																				
21		30																																																				
11丸鋼	0.70	0.80																																																				
13丸鋼	0.80	0.90																																																				
16丸鋼	1.00	1.10																																																				
19丸鋼	1.20	1.30																																																				
22丸鋼	1.40	1.50																																																				
25丸鋼	1.60	1.70																																																				
28丸鋼	1.80	1.90																																																				
32丸鋼	2.00	2.10																																																				
せ押ん抜き	<p>許容押抜きせん断応力度</p> <table border="1"> <caption>単位(N/mm²)</caption> <thead> <tr> <th rowspan="2">項目</th> <th colspan="2">コンクリートの設計基準強度</th> </tr> <tr> <th>21</th> <th>30</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>許容せん断応力度</td> <td>0.85</td> <td>0.95</td> </tr> <tr> <td>引張強度</td> <td>39.2</td> <td>42.4</td> </tr> <tr> <td>引張耐力</td> <td>29.4</td> <td>31.8</td> </tr> <tr> <td>引張耐力/引張強度</td> <td>0.75</td> <td>0.75</td> </tr> </tbody> </table>	項目	コンクリートの設計基準強度		21	30	許容せん断応力度	0.85	0.95	引張強度	39.2	42.4	引張耐力	29.4	31.8	引張耐力/引張強度	0.75	0.75	-	-	<ul style="list-style-type: none"> 集中荷重による押抜きせん断破壊の防止 	-	<ul style="list-style-type: none"> 集中荷重による押抜きせん断破壊(円錐又は角錐状の破壊)の発生 	-																														
項目	コンクリートの設計基準強度																																																					
	21	30																																																				
許容せん断応力度	0.85	0.95																																																				
引張強度	39.2	42.4																																																				
引張耐力	29.4	31.8																																																				
引張耐力/引張強度	0.75	0.75																																																				

表2.2.5 PC橋の設計および施工で担保している性能とその変状が及ぼす影響（構造設計その3）

1. 項目			2. 設計・施工で用いる 制限値・性能規定等	3. 規格値, 規定に対する根拠		4. 制限値, 許容値に関する性能		5. 機能・性能が満足されない場合に橋梁に現れる事象, 事例・現状の課題		参考文献
大	中	小		値・規定の根拠	適用範囲等の補足	耐荷性能および構造的機能	耐久性能	耐荷性能および構造的機能	耐久性能	
構造設計	一般			<ul style="list-style-type: none"> 以下に、横げた構造、支承、落橋防止、伸縮装置構造について、橋梁構造に対する役割を記載する。 参照：道路橋示方書 ・1964年(鉄筋コンクリート道路橋設計示方書 昭和39年6月) ・1968年(プレストレストコンクリート道路橋示方書 昭和43年3月)		-	-	-	-	-
	横桁構造	中間横桁	【一般, 構造細目】 主げた、横げた及び床版は、これらが相互の一体性および耐久性が確保される構造とする。 【配置・方向】 ・1支間について1箇所以上かつ15m以下(T桁の場合)[3] ・45°以下:主桁方向に直角	<ul style="list-style-type: none"> Tげたの配置間隔は、「1径間につき1箇所以上かつ15m以下の間隔で中間横げたを設けるものを原則とした」と記載されている[1]。(主げたのたわみやねじりによって、床版や支承、あるいは舗装、その他の構造に悪影響を与える場合があるので、横げたを配置することとした。) 配置方向:45°以上であれば、主げたのたわみ点の等しい点を連結することで、横げたに作用する力が小さくなり、補強が少なくてすむし、外観もよい[1]。 	<ul style="list-style-type: none"> 主桁の設計曲げモーメントは、多くの計算例から類推して、十分安全側にあると考えられる簡易計算式によって算出されていたため、橋梁がある程度横方向の剛性を持っている必要があった。[2] 十分な構造解析に基づき中間横げたの機能を床版で代替できると考えられる場合には、プレストレストコンクリート床版を有する斜角70°以上のTげた橋において、中間横げたを30m以下の間隔で設けることとしてよい。 	<ul style="list-style-type: none"> 荷重分配機能 断面保持機能(横方向剛性) 	主げた間の相対たわみ低減	<ul style="list-style-type: none"> 荷重分配が想定より小さい場合、主桁に想定以上の断面力が発生しひび割れ、変形が生じる。 斜角の影響がある場合、ねじりモーメントによるひび割れが発生する。 	<ul style="list-style-type: none"> 横方向剛性が確保されない場合、主桁間の相対たわみによって振動、舗装割れ、床版の疲労耐久性の低下となる 	[1]日本道路協会:プレストレストコンクリート道路橋示方書解説, pp.79-81, 昭和43年3月 [2]日本道路協会:鉄筋コンクリート道路橋設計示方書 解説, pp.31-32, 昭和39年6月 [3]建設省土木研究所(ほか):コンクリート橋の設計・施工の省力化に関する共同研究報告書(Ⅰ)-プレストレストコンクリートTげた橋の横げた減少・省略に関する研究, 平成8年11月
		端支点横桁	【支点横桁】 ・主げたの支点上には、必ず横げたを設ける。 ・車両の直接載荷、主げたからの伝達される力に対して設計する。	<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋コンクリート道路橋設計示方書[1]より記載。 	-	<ul style="list-style-type: none"> 荷重伝達機能(上部、下部) 落橋防止構造の一部の機能 	-	<ul style="list-style-type: none"> 支承部への不適切な荷重伝達で支承・主桁・桁端部が損傷する。 落橋防止構造が機能せず、落橋する可能性がある。 	-	[1]日本道路協会:鉄筋コンクリート道路橋設計示方書 解説, pp.31-32, 昭和39年6月
	支承構造	支承部	【一般】 支承は、以下の機能を満足するよう、適切な形式、構造および材料を選定する。 ・荷重伝達 ・相対的な変位吸収 ・維持管理、補修の容易さ 【作用する力】 支承部に作用する鉛直力は、鋼橋編2.2設計に用いる荷重の組み合わせにより、負の力に対しては別途(右示)の式の不利な値に対して設計する。	<ul style="list-style-type: none"> 支承部に作用する力について、以下の式で算出これは、地震または風などによる水平力と死荷重の組み合わせにより負反力が乗ずる場合、危険な状態が予想され、下部構造への定着はとくに慎重な配慮を要するので外国の規定を参考に決定している。[1] $R_u = 2R_{L+1} + R_D$ $R_u = R_D + R_W$ $R_u: \text{支点到に生じる負反力(kN)}$ $R_{L+1}: \text{衝撃を含む活荷重による最大負の力(kN)}$ $R_D: \text{死荷重による力(kN)}$ $R_W: \text{風荷重による最大の負の力(kN)}$	<ul style="list-style-type: none"> 具体的な検討にあたっては、道路橋支承便覧(日本道路協会)を参考にするのがよい。 	<ul style="list-style-type: none"> 荷重伝達機能 変位吸収(上部、下部/回転) 上揚力に抵抗 地震時の振動減衰機能 	<ul style="list-style-type: none"> 維持管理性 耐候性(ゴムの劣化) 	<ul style="list-style-type: none"> 支承が変位に追従しない場合、上部工の主桁けた端部近傍や端支点横げた部にひび割れが発生する。 上部工に対して支点沈下のような状態となる場合、けたにひび割れなどの損傷、伸縮装置に段違いが現れる。 	-	[1]日本道路協会:鉄筋コンクリート道路橋設計示方書 解説, pp.51, 昭和39年6月
	落橋防止・変位制限構造	落橋防止・変位制限構造	【落橋防止構造】 耐力: $H_F = 1.5R_d$ H_F : 設計地震力(kN) R_d : 死荷重反力(kN)	-	-	<ul style="list-style-type: none"> 落橋に対するフェールセーフ機能 	<ul style="list-style-type: none"> 維持管理性 	<ul style="list-style-type: none"> 落橋防止が機能しないことで、地震時に落橋の恐れ。 	-	-
	伸縮装置	伸縮装置	<ul style="list-style-type: none"> レベル1地震動に対する地震時設計伸縮量以上を標準[2] 舗装面との凹凸の精度±3mm以内 	<ul style="list-style-type: none"> 土木研究所による道路伸縮継手の破損現況とその破損原因調査により、構造細目が決められている。[1] 耐震設計上の供用性から、性能が定められている。 	-	<ul style="list-style-type: none"> 車両の供用性(平坦性、騒音) 変形への追従性 車軸荷重の支持性能 	<ul style="list-style-type: none"> 維持管理性 水密性 鋼材の疲労耐久性 	<ul style="list-style-type: none"> 伸縮装置が荷重支持が出来ない場合、供用性(車両走行)を妨げる。 車両走行の騒音等の原因となる。 	<ul style="list-style-type: none"> 伸縮装置付近からの雨水の侵入等が関連して、端部横桁部、床版部の設置コンクリート部の砂利化、配置鋼材の腐食の要因となる。 	[1]建設省土木研究所:道路橋伸縮継手の破損現況とその破損原因の調査について, 昭和32年 [2]道路協会:道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 平成14年3月

表2.2.6 PC橋の設計および施工で担保している性能とその変状が及ぼす影響（構造細目その1）

1. 項目			2. 設計・施工で用いる制限値・性能規定等		3. 規格値、規定に対する根拠		4. 制限値、許容値に関する性能		5. 機能・性能が満足されない場合に橋梁に現れる事象、事例・現状の課題		参考文献																									
大	中	小	値・規定の根拠		適用範囲等の補足		耐荷性能および構造的機能		耐久性性能																											
形状および部材寸法	ウェブ・横桁・隔壁	<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋、PC鋼材（シース含む）およびPC鋼材の定着具が無理なく配置でき、所定のかぶり量が十分とれるもの、コンクリートの打込みが困難とならないもの 応力の集中しやすい部位にはハンチなどを設け、応力の伝達が円滑に行われる形状とする ウェブの最小厚さ <table border="1"> <tr> <th>種別</th> <th>ウェブの最小厚さ</th> </tr> <tr> <td>両面打ち鉄筋コンクリート部</td> <td>250mm</td> </tr> <tr> <td>両面打ちプレキャストコンクリート部</td> <td>140mm</td> </tr> <tr> <td>プレキャスト部</td> <td>130mm</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> 横桁および隔壁の最小厚さは200mm ウェブ、フランジの厚さの変化は1/5よりゆるい傾斜とする 	種別	ウェブの最小厚さ	両面打ち鉄筋コンクリート部	250mm	両面打ちプレキャストコンクリート部	140mm	プレキャスト部	130mm	<ul style="list-style-type: none"> 昭和39年版RC道示[1]においてRC桁の主桁のウェブの最小厚さは、鋼材などの配置・間隔、かぶりの確保、コンクリートの打込みなどの施工性から250mmとされており、昭和43年版PC道示[2]ではT桁についてはブレンション桁では80mm、ポストテンションでは140mmとされている。昭和53年版道示[3]からは桁の形状によらず場所打ちPC桁を140mm、プレキャスト桁は施工・品質管理がよいことから130mmとしブレンション桁も実績などからこれと同じ値で規定されている。 横桁のウェブについても主桁と同じ理由により、昭和39年版RC道示[1]において厚さ200mmとされ、昭和43年版PC道示[2]ではPCT桁では150mmとされているが、昭和53年版道示[3]において実績などから桁の形状、RC・PC問わず200mmで規定されている。 ウェブ、フランジの厚さの変化は、昭和39年版RC道示[1]において円滑に応力が伝達できるよう1/10以下の傾斜とされていたが、実績や鋼橋の規定を参考とした種々検討を行い昭和53年版道示[3]より1/5以下とされている。 	<ul style="list-style-type: none"> プレキャスト桁が床版橋に用いられる場合はこの規定によらずよい（JIS A 5373）。 1/5以上の急な傾斜を用いる場合、設計計算で用いる有効断面は1/5以下のゆるい傾斜部分とする。 ウェブとフランジの厚さが大きく違う場合、接合部付近にひび割れが発生することがあるので、接合する部材の厚さが著しく不均衡にならないよう部材間の厚さのつりあいについても注意する。 	<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋、PC鋼材（シース含む）およびPC鋼材の定着具の配置・間隔、所定のかぶりの確保 コンクリートの確実な打込み、締固めによる初期欠陥の防止 応力集中の抑制 	—	<ul style="list-style-type: none"> [局部的な部材強度の低下] 打込み、締固め不良によりジャンカなど断面欠損部が発生、部材強度が低下する。 [局部応力の発生] 応力が伝達が円滑でなく、応力の集中により局部的にひび割れが発生する。 	<ul style="list-style-type: none"> [鋼材腐食の発生] ジャンカなど初期欠陥による水密・透気性の低下により耐中性化・耐塩害性の低下により建設後短期間で鋼材が腐食する。 使用時にひび割れが発生し、浸水や漏水により鋼材が腐食する。 	<ul style="list-style-type: none"> [1]日本道路協会：鉄筋コンクリート道路橋設計示方書解説、pp.30-31、昭和39年6月 [2]日本道路協会：プレストレストコンクリート道路橋示方書解説、pp.78-80,86-89、昭和43年3月 [3]日本道路協会：道路橋示方書・同解説、I 共通編・IIIコンクリート橋編、pp.215-216,220-223、昭和53年1月 																			
			種別	ウェブの最小厚さ																																
			両面打ち鉄筋コンクリート部	250mm																																
両面打ちプレキャストコンクリート部	140mm																																			
プレキャスト部	130mm																																			
（鉄鋼・材のP・C配鋼置材）	あき	<ul style="list-style-type: none"> 主鉄筋及びシースを含むPC鋼材のあきは、①場所打ちコンクリートは40mm以上かつ粗骨材最大寸法の4/3倍以上、②プレキャスト部材は20mm以上かつ粗骨材最大寸法の4/3倍以上 主鉄筋のあきは、1.5φ以上 	<ul style="list-style-type: none"> 昭和6年版RC標示[1]において鉄筋のあきとして、コンクリートとの付着から水平純間隔で2.5cm以上かつ直径の1.5倍以上、昭和24年版RC標示[2]では、施工上から粗骨材最大寸法の1.5倍とされている。昭和36年版PC標示[3]から鋼材のあきとして、ブレンション方式では付着強度の確保から鋼材直径の3倍以上かつ粗骨材最大寸法の4/3倍以上、ポストテンション方式では粗骨材最大寸法の4/3倍以上とされ、昭和53年版道示[4]より左記の値とされている。 コンクリートの打ち込み易さと所定の付着強度は、1φのあきで得られるが、施工上の余裕を見て1.5φとされている。 	<ul style="list-style-type: none"> コンクリートの締固めは内部振動機を用いることが原則とされており、コンクリートが十分に行きわたり、締固められるよう鋼材のあきを設ける必要がある。PC部材においてPC鋼材・鉄筋が錯綜するとコンクリートの打込みや締固めの妨げとなるため特に配慮が必要である。 ブレンション部材の端部ではコンクリートとPC鋼材の間に働く付着応力に対して十分な締固めにより所定の付着力を発揮するよう鋼材直径の3倍以上かつ粗骨材最大寸法の4/3倍以上としなければならない。 	<ul style="list-style-type: none"> コンクリートの確実な打込み、締固めによる初期欠陥の防止 コンクリートと鋼材の付着の確保による一体挙動 	—	<ul style="list-style-type: none"> [局部的な部材強度の低下] 打込み、締固め不良によりジャンカなど断面欠損部が発生、部材強度が低下する。 [ひび割れの発生] コンクリートと鋼材との付着不足により両者が一体で挙動せず、使用時にひび割れが発生する。 	<ul style="list-style-type: none"> [鋼材腐食の発生] ジャンカなど初期欠陥による水密・透気性の低下により耐中性化・耐塩害性の低下により建設後短期間で鋼材が腐食する。 使用時にひび割れが発生し、浸水や漏水により鋼材が腐食する。 コンクリートと鋼材との付着不足により両者が一体で挙動せず、部材の疲労耐力が低下する。 	<ul style="list-style-type: none"> [1]土木学会：鉄筋コンクリート標準示方書解説、pp.72-74、昭和6年10月 [2]土木学会：鉄筋コンクリート標準示方書解説、p.92、昭和25年11月 [3]土木学会：プレストレストコンクリート設計施工指針、p.58、昭和36年8月 [4]日本道路協会：道路橋示方書・同解説、I 共通編・IIIコンクリート橋編、p.156、昭和53年1月 																											
			最小かぶり	<ul style="list-style-type: none"> ① 床版・地覆・高欄・支間10m以下の床版橋は30mm ② 工場で作成されるPC桁は25mm ③ ②以外の桁や支間10mを超える床版橋は35mm 	<ul style="list-style-type: none"> 最小かぶりは、昭和6年版RC標示[1]で版の下側で10mm、桁で15mm、柱では20mmと規定されている。ここで、有害な化学作用などに対し有効な保護層で保護しない場合は20mm加えるものとされており、橋梁の構造物の重要度からこれが適用されている。 	<ul style="list-style-type: none"> かぶりは、部材の耐久性に対して重要なものであるが、各種の要因、コンクリートの品質が複雑に絡み合っており、かぶりを定量的に決定する手法は確立に至っていない。現行の示方書に示されるかぶりは、実績を基に密実性によって修正された値である。[2][3] 工場で作成されるPC部材は、品質管理がよく、コンクリートの品質も良好であることから他の部材より小さい値とされている。 	<ul style="list-style-type: none"> コンクリート構造物の性能照査の前提となる付着強度 鋼材の火災からの保護 	<ul style="list-style-type: none"> 鋼材の腐食防止 	<ul style="list-style-type: none"> [耐火性の低下] かぶり不足により火害に対する鉄筋保護機能が低下する。 	<ul style="list-style-type: none"> [鋼材腐食の発生] 耐中性化・耐塩害性の低下により短期間で鋼材が腐食、鉄筋に沿ったひび割れが発生する。 	<ul style="list-style-type: none"> [1]土木学会：鉄筋コンクリート標準示方書解説、p.19、昭和6年10月 [2]土木学会：コンクリート標準示方書（昭和61年制定）改訂資料、コンクリートライブラリー61、pp.96-97、昭和61年10月 [3]土木学会：コンクリート標準示方書（平成3年制定版）改訂資料およびコンクリート技術の今後の動向、コンクリートライブラリー70、pp.81-85、平成3年7月 																									
					（最小張鉄筋量）	<ul style="list-style-type: none"> 部材断面積の0.15%以上 所要のじん性を確保する鋼材を配置 	<ul style="list-style-type: none"> 最小鋼材量は、昭和36年版PC標示[1]では25kg/m³、昭和43年版PC道示[2]では30kg/m³と規定されている。しかし、規定の目的を評価していくとの観点から最小鋼材量を部材の断面積の関数とするため、30kg/m³を3断面に分解換算し、規定を約15%割増した値とされている。[3] 軸方向引張主鉄筋、軸方向主鉄筋への規定は、部材の主要な断面の急激な破壊の抑制を目的とする。 	<ul style="list-style-type: none"> コンクリートの乾燥収縮や温度勾配等により生じる可能性のあるひび割れが有害でない程度に抑えるため、部材のいかなる断面においても、その断面積の0.15%以上の鋼材を配置する。鋼材の断面積は、鉄筋コンクリート構造に配置する軸方向引張主鉄筋の断面積はウェブ厚及び有効幅により、けたに配置する斜引張鉄筋の最小鉄筋量はウェブ厚及び部材軸となす角度により算出する。 	<ul style="list-style-type: none"> 部材のじん性 想定外の曲げ応力などによる急激な破壊の抑制 乾燥収縮や温度勾配などにより生じるひび割れを有害でない程度に抑制 	<ul style="list-style-type: none"> [脆性的な破壊] 設計で想定しない曲げ応力などにより脆性的に破壊する。 [局部的な部材強度の低下] 乾燥収縮や温度勾配による有害なひび割れの発生により有効断面が減少、局部的に部材強度が低下する。 	<ul style="list-style-type: none"> [鋼材腐食の発生] 乾燥収縮や温度勾配などにより有害なひび割れが発生し、浸水や漏水により鋼材が腐食する。 	<ul style="list-style-type: none"> [1]土木学会：プレストレストコンクリート設計施工指針、p.60、昭和36年8月 [2]日本道路協会：プレストレストコンクリート道路橋示方書解説、p.34-35、昭和43年3月 [3]建設図書：道路橋示方書コンクリート橋の詳説、橋梁と基礎79-4、pp.61-63、平成54年4月 																								
鉄筋	定着	<ul style="list-style-type: none"> 定着長は鉄筋の役割、種類、定着方法に応じて、コンクリートの許容付着応力度、鉄筋の許容引張応力度及び直径から決まる定着長かつ鉄筋直径で規定される最小値以上 定着長 <table border="1"> <tr> <th></th> <th>フック幅</th> <th>フック有</th> <th>折曲げ幅</th> <th>フック有</th> </tr> <tr> <th>定着長</th> <td>△</td> <td>25△</td> <td>10φ</td> <td>10φ</td> </tr> </table>		フック幅	フック有	折曲げ幅	フック有	定着長	△	25△	10φ	10φ	<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋の定着は、鉄筋の滑動に対する安全度の確保、または必要とする定着長の確保を目的として定められている。[1] 付着による定着は、継手と同様の考えにより、鉄筋に生じる応力が許容応力度に達するまで鉄筋が抜け出さないようにRC標示にならって昭和53年版道示[2]で定められている。 折曲げ鉄筋の定着長は、実験結果から異形鉄筋でフック無が15φ、フック有が10φと定められている。[3] 	<ul style="list-style-type: none"> 付着応力度により算出される定着長l_a (mm) $l_a = \frac{\sigma_{sa}}{4\tau_{oa}} \cdot$ <p>ここに、σ_{sa}:鉄筋の許容引張応力度 (N/mm²) τ_{oa}:コンクリートの許容付着応力度 (N/mm²) ϕ:鉄筋の直径 (mm)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋端部の定着による鉄筋とコンクリートの一体挙動 鉄筋への要求性能の確保 静的耐力 高応力繰返し耐力 トラス理論の成立 	<ul style="list-style-type: none"> 高サイクル繰返し耐力 	<ul style="list-style-type: none"> [曲げ破壊・耐力の低下] 定着不全により引張鉄筋として機能せず曲げにより破壊、トラス理論の不成立による耐力の低下する。 [ひび割れの発生] コンクリートと鉄筋とが一体で挙動せず、使用時に曲げひび割れが発生する。 	<ul style="list-style-type: none"> [鉄筋腐食の発生] 使用時に曲げひび割れが発生し、浸水や漏水により鋼材が腐食する。 [疲労耐力の低下] 定着不全によりコンクリートと鉄筋とが一体で挙動せず、部材の疲労耐力が低下する。 	<ul style="list-style-type: none"> [1]土木学会：昭和31年制定コンクリート標準示方書、pp.96-97 [2]日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編・IIIコンクリート橋編、pp.160-165、昭和53年1月 [3]土木学会：昭和42年制定コンクリート標準示方書解説、p.185 																	
				フック幅	フック有	折曲げ幅	フック有																													
			定着長	△	25△	10φ	10φ																													
継手	<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋の種類、直径、応力状態、継手位置、要求性能に応じて継手方法を選定 引張鉄筋の重ね継手 付着応力度より算出する継手長かつ20φ以上 圧縮鉄筋の重ね継手 付着応力度より算出する継手長の80%かつ20φ以上 継手位置 端部同士を相互に鉄筋直径の25φ以上ずらす 	<ul style="list-style-type: none"> 引張鉄筋の継手長は、昭和6年版RC標示[1]にて、種々の事情を考慮して30φ以上と定められており、昭和31年版コン示[2]にて付着応力度からの算出式（右記）が、昭和42年版コン示[3]より最小値が定められている。 圧縮鉄筋の付着強度は、引張鉄筋に比べ大きく、既往の研究結果より80%とされている。 継手を軸方向にずらす距離は、万一、一部の継手に弱点があっても、鉄筋の定着効果によって部材にある程度の耐力が期待できること、コンクリートの打込みに影響が少ないことを考慮して定められている。[4] 	<ul style="list-style-type: none"> 付着応力度により算出される定着長l_a (mm) $l_a = \frac{\sigma_{sa}}{4\tau_{oa}} \cdot$ <p>ここに、σ_{sa}:鉄筋の許容引張応力度 (N/mm²) τ_{oa}:コンクリートの許容付着応力度 (N/mm²) ϕ:鉄筋の直径 (mm)</p> <ul style="list-style-type: none"> 機械的継手、スリーブ継手等の強度について、土木学会等で定められる場合にはこれを参考とし、それ以外は試験により定める。 	<ul style="list-style-type: none"> 部材の局部的な強度低下の抑制 コンクリートの確実な打込み、締固め 継手の強度や信頼性 静的耐力 高応力繰返し耐力 施工等に起因する信頼度 	<ul style="list-style-type: none"> 高サイクル繰返し耐力 	<ul style="list-style-type: none"> [ひび割れの発生] 継手端部への応力集中により直角方向のひび割れが発生する。 [局部的な部材強度の低下] コンクリートの打込み、締固め不良による付着不足により継手として機能せず連続性が損なわれ、局部的に部材強度が低下する。 [破壊] 引張力を受ける異形鉄筋の重ね継手は、重ね合わせた部分のコンクリートが鉄筋の軸方向に割裂して脆性的な破壊を生じる。 	<ul style="list-style-type: none"> [鋼材腐食の発生] 継手端部への応力集中によりひび割れが発生し、浸水や漏水により鋼材が腐食、錆汁が発生する。 [疲労耐力の低下] 継手単体の疲労性能が不十分となり、部材の疲労耐力が低下する。 	<ul style="list-style-type: none"> [1]土木学会：鉄筋コンクリート標準示方書解説、pp.39-40、昭和6年10月 [2]土木学会：昭和31年制定コンクリート標準示方書、pp.167-168 [3]土木学会：昭和42年制定コンクリート標準示方書、pp.182-183 [4]土木学会：昭和61年制定コンクリート標準示方書[設計編]、p.112 																												
		曲げ形状	<ul style="list-style-type: none"> 曲げ内半径（最小値） <table border="1"> <tr> <th>種別</th> <th>鉄筋</th> <th>フック</th> <th>スターラップ</th> <th>折曲げ幅</th> </tr> <tr> <td>普通</td> <td>R228</td> <td>2φ</td> <td>1φ</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>高規格</td> <td>R275A/B</td> <td>2.5φ</td> <td>2φ</td> <td>5φ</td> </tr> <tr> <td>高規格</td> <td>R294B</td> <td>2.5φ</td> <td>2φ</td> <td>—</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> フックの形状は、フックが有効に働くように、また、鉄筋の加工が容易であるよう定められている。 <table border="1"> <tr> <th>種別</th> <th>曲げ形状</th> </tr> <tr> <td>折曲げ幅</td> <td>鉄筋直径の4倍又は50mm以上</td> </tr> <tr> <td>内側フック</td> <td>鉄筋直径の12倍以上</td> </tr> <tr> <td>外側フック</td> <td>鉄筋直径の9倍又は50mm以上</td> </tr> </table>	種別	鉄筋	フック	スターラップ	折曲げ幅	普通	R228	2φ	1φ	—	高規格	R275A/B	2.5φ	2φ	5φ	高規格	R294B	2.5φ	2φ	—	種別	曲げ形状	折曲げ幅	鉄筋直径の4倍又は50mm以上	内側フック	鉄筋直径の12倍以上	外側フック	鉄筋直径の9倍又は50mm以上	<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋の曲げ内半径は、材質を傷めず、コンクリートに大きい圧力を加えないように定められており、JIS G 3112「鉄筋コンクリート用棒鋼」[1]の曲げ試験に規定されている曲げ内半径よりいくぶん大きい値とされている。 フックの形状は、フックが有効に働くように、また、鉄筋の加工が容易であるよう定められている。 折曲げ鉄筋は昭和15年RC標示[2]より、フックやスターラップは昭和49年制定コン示[3]より左記のように規定されている。 	<ul style="list-style-type: none"> スターラップの曲げ内半径の最小値が、他の鉄筋に比べ小さいのは断面内に鉄筋をおさめやすくするという実用面が考慮されている。 コンクリート部材側面から鉄筋直径の2倍に20mm加えた距離以内にある折曲げ鉄筋は折曲げ部のコンクリート支圧強度が内部より小さいため、7.5φ以上とする。 	<ul style="list-style-type: none"> 加工による鉄筋の品質低下の抑制 コンクリートに生じる支圧応力を抑制 フックの有効性、加工性 	—	<ul style="list-style-type: none"> [ひび割れの発生] 加工による亀裂の発生や破損により鉄筋の機能が低下し、局部応力によりひび割れが発生する。 [部材強度の低下] 鉄筋の機能低下により、部材強度が低下する。
種別	鉄筋	フック	スターラップ	折曲げ幅																																
普通	R228	2φ	1φ	—																																
高規格	R275A/B	2.5φ	2φ	5φ																																
高規格	R294B	2.5φ	2φ	—																																
種別	曲げ形状																																			
折曲げ幅	鉄筋直径の4倍又は50mm以上																																			
内側フック	鉄筋直径の12倍以上																																			
外側フック	鉄筋直径の9倍又は50mm以上																																			

表2.2.7 PC橋の設計および施工で担保している性能とその変状が及ぼす影響（構造細目その2）

1. 項目			2. 設計・施工で用いる制限値・性能規定等		3. 規格値, 規定に対する根拠		4. 制限値, 許容値に關係する性能		5. 機能・性能が満足されない場合に橋梁に現れる事象, 事例・現状の課題		参考文献
大	中	小	値・規定の根拠		適用範囲等の補足		耐荷性能および構造的機能	耐久性性能	耐荷性能および構造的機能	耐久性性能	
構造細目	鉄筋	スタ ーラ ップ 折 曲 げ 鉄 筋	・鉄筋径は13mm以上(プレテンション部材を除く) ・スターラップの間隔は、桁の有効高さの1/2以下かつ300mm以下 ・折曲げ鉄筋の間隔は、部材となす角度及び有効高さで決まる値以下	・道路橋けたは、一般に断面が大きいので、確実な施工ができるようスターラップ及び折曲げ鉄筋はプレテンション部材を除いて直径13mm以上とされている。 ・スターラップがウェブに発生する斜めひび割れと交わることによる斜め引張鉄筋としての有効性の確保および横方向用心鉄筋として乾燥収縮によるひび割れの抑制から定められている。[1]	・プレテンション方式によるJISげた等プレキャストけたのスターラップは、φ6およびφ9の鉄筋を用いてよい。 ・折曲げ鉄筋の間隔は、部材に有効高さの中央から正鉄筋または負鉄筋に向かって伸ばした45度の斜めひび割れ線が少なくとも一列は交わる必要がある。また、部材軸となす角度が小さい鉄筋は、斜引張鉄筋として効果が少ないので30度以上とするのがよい。	・斜めひび割れ発生後の急激な耐力低下を抑制	・横方向の乾燥収縮によるひび割れを抑制	[せん断ひび割れの発生・脆性的な破壊] ・斜め方向にせん断ひび割れが発生し、急激な耐力の低下により脆性的に破壊する。	[鋼材腐食の発生] ・乾燥収縮によりひび割れが発生し、浸水や漏水により鋼材が腐食する。	[1]日本道路協会:道路橋示方書・同解説, I 共通編・IIIコンクリート橋編, pp.176-177, 昭和53年1月	
		用 心 鉄 筋	・乾燥収縮、温度勾配、応力集中などによるひび割れを有害でない程度に抑えるように鉄筋を配置 ・場所打ちコンクリート桁のウェブ軸方向の用心鉄筋は直径13mm以上、300mm以下の間隔で配置	・用心鉄筋は、昭和6年版RC標示[1]にて安全のために必要なものとされ、昭和24年版RC標示[2]では継目断面積の0.5%以上配置するものとしている。昭和42年版コン示[3]では有害なひび割れの抑制として露出面1m当り5cm ² 以上の断面積の鉄筋を中心間隔300mm以下で配置し、集中反力を受ける部位や開口部周辺の補強としても配置するものとされている。昭和53年版道示[4]により左記のように規定されている。	・プレキャスト部材では、鉄筋量が必要量あれば用心鉄筋として直径13mm以下の鉄筋を使用しよい。 ・ポストテンション方式の桁では、緊張されるまで軸方向鉄筋量が少ないため、用心鉄筋を配置する ・新旧コンクリートの間隔は、部材に有効高さの中央から正鉄筋により発生する垂直ひび割れを有害でない程度に抑える。 ・検査孔用開口部に発生する応力集中等によるひび割れを生じやすいため用心鉄筋を配置する。 ・床版等でPC鋼材を小さい曲げ半径で定着する場合や桁端でPC鋼材を広げて定着する場合は、PC鋼材の引張力の分力により生じる引張応力に対して用心鉄筋を配置する。	・応力集中等により生じるひび割れの抑制 ・ポストテンション部材のプレストレス導入までのひび割れの抑制 ・打ち継ぎ目付近新旧コンクリート間のひび割れの抑制 ・PC鋼材引張力の分力等によるコンクリートの破損防止 ・架設時における安全性の確保	[局部的な部材強度の低下] ・乾燥収縮や温度勾配、応力集中などにより有害なひび割れが発生し、有効断面の減少し局部的に部材強度が低下する。 ・打ち継ぎ目付近の新旧コンクリートの温度差、乾燥収縮差により有害なひび割れが生じ、浸水や漏水により鋼材が腐食、錆汁が発生する。 ・架設時に有害なひび割れが発生し、浸水や漏水により鋼材が腐食する。	[1]土木学会:鉄筋コンクリート標準示方書, p.4, 昭和6年10月 [2]土木学会:鉄筋コンクリート標準示方書解説, p.70, 昭和25年11月 [3]土木学会:昭和42年制定コンクリート標準示方書, pp.188-189 [4]日本道路協会:道路橋示方書・同解説, I 共通編・IIIコンクリート橋編, pp.179-181, 昭和53年1月			
	配 置	・PC鋼材をできる限り直線状に配置 ・1本のPC鋼材の配置で多くのS字曲線を含まないよう桁の途中で定着 ・平面形状でもできる限り鉛直面内で配置	・PC鋼材引張力の摩擦損失は、PC鋼材の曲げ変化角および長さに比例するもので連続桁のように長くS字形では摩擦損失の影響が大きく、これの抑制から昭和53年版道示[1]に記載されている。	・PC鋼材緊張作業の際にPC鋼材に軸方向以外の力を与えないため、PC鋼材は定着具の支圧面から所定の区間(400mm以上)を直線状に配置する。	・有効プレストレス ・大きな局部引張応力の発生を抑制 ・腹圧力などによる部材縁の有害なひび割れを抑制	[ひび割れの発生] ・摩擦損失により緊張力の不足し、使用時に曲げひび割れが発生する。 [局部的な部材強度の低下] ・腹圧力などにより部材縁に有害なひび割れが発生し、有効断面が減少、局部的に部材強度が低下する。	[鋼材腐食の発生] ・緊張力の不足により曲げひび割れが発生し、浸水や漏水により鋼材が腐食する。 ・腹圧力などにより部材縁に有害なひび割れが発生し、浸水や漏水により鋼材が腐食する。	[1]日本道路協会:道路橋示方書・同解説, I 共通編・IIIコンクリート橋編, pp.167-168, 昭和53年1月			
	曲 げ	・PC鋼材の最小曲げ半径 ①シーソを用いる場合はシーソ直径の100倍 ②シーソを用いない場合はPC鋼材直径の40倍 ③PC鋼棒を加工しないで配置する場合はPC鋼棒直径の700倍	①②PC鋼材は直線と円曲線、放物線状に配置され、用いる曲線の局率半径が小さいと中心方向に大きな分力が発生し、コンクリートに局部的な応力が、鋼材自体にも付加応力が生じるため、これらが過大とならないよう昭和53年版道示[1]で最小曲げ半径を規定している。 ③曲げ加工がPC鋼棒の性質に及ぼす影響から、昭和36年版PC標示[2]で規定されている。	・PC鋼棒を冷間加工して配置する場合の最小曲げ半径 SBPR785/1030 φ26を用いる場合:5m φ32を用いる場合:6m SBPR930/1080およびSBPR930/1180 φ26を用いる場合:6m φ32を用いる場合:7m	・プレストレスの分力による支圧応力の抑制 ・鋼材自体の付加応力を抑制 ・部材縁の有害なひび割れを抑制	[局部応力・付加応力の発生] ・プレストレスにより中心方向に大きな分力が発生し、コンクリートの局部的な応力や鋼材自体の付加応力が発生する。 [局部的な部材強度の低下] ・部材縁の有害なひび割れの発生により有効断面の減少、局部的に部材強度が低下する。	[鋼材腐食の発生] ・部材縁に有害なひび割れが発生し、浸水や漏水により鋼材が腐食発生する。	[1]日本道路協会:道路橋示方書・同解説, I 共通編・IIIコンクリート橋編, pp.167-168, 昭和53年1月 [2]日本道路協会:プレストレスコンクリート道路橋示方書, pp.58-59, 昭和36年8月			
P C 鋼 材	(保 持 鉄 筋)	・コンクリートの打込み等によって動かないように堅固に保持 ・保持間隔	・保持間隔は、昭和48年版PC施工便覧[1]において、昭和36年版PC標示[2]で定められる摩擦係数を用いた場合には、PC鋼線で1.2~1.5m、PC鋼より線およびPC鋼棒は、左記と同様に定められており、昭和53年版道示[3]より左記と同様に記載されている。	・部材に所定の緊張力を えるため、PC鋼材は 確に配置する必要がある。シーソやPC鋼材は、コンクリートの打ち込みや締固め振動により移動するため堅固に保持しなくてはならない。 ・鋼製シーソを用いた場合の緊張管理において、平成14年版道示にあるPC鋼材の摩擦係数および見かけのヤング係数を用いる場合は、表に示す保持間隔を標準とする。 ・保持間隔は、摩擦係数に大きく影響を及ぼすので、大きくすることは望ましくなく、それぞれの緊張工法基準で定められるものを参照する。[1]	・ポストテンション方式におけるPC鋼材配置 ・発生曲げモーメントやせん断力に対する抵抗性	—	[ひび割れの発生] ・コンクリートの打込みや締固めによる著しい変形によりPC鋼材がずれ、摩擦力の増大により部分的な緊張力の不足や緊張時に鋼材の降伏、破断が生じる。	[鋼材腐食の発生] ・プレストレスの不足や計算外の応力などによりひび割れが発生し、浸水や漏水により鋼材が腐食する。	[1]日本道路協会:プレストレスコンクリート道路橋施工便覧, p.312, 昭和48年9月 [2]土木学会:プレストレスコンクリート設計施工指針, pp.50-52, 昭和36年8月 [3]日本道路協会:道路橋示方書・同解説, I 共通編・IIIコンクリート橋編, p.276-277, 昭和53年1月		
		折 曲 げ 装 置	・PC鋼材を損傷することなく所定の位置に正しく保持でき、各部分の緊張力が均等になるよう作用するもの[1] ・PC鋼材の鉛直ならびに水平方向の引張分力に抵抗でき、コンクリートを打ち込みやすい構造[1] ・折曲げ半径180mm以上、接触部分長さ18mm以上で接触部に凹凸がなく摩擦を少なくする構造、材質[1]	・PC鋼材の品質に悪影響を与えないよう、JISげたによるPC道路橋設計・製造便覧JIS A5316-1991[2]で規定されている。(1986では折曲げ半径150mm以上)	—	・プレテンション方式におけるPC鋼材配置 ・発生曲げモーメントやせん断力に対する抵抗性	—	[ひび割れの発生] ・摩擦により緊張端側で過緊張、固定端側で緊張力不足が生じ、緊張力不足や鋼材破断が生じ、使用時に曲げひび割れが発生する。 ・曲上げ支持具の変形、破損によりPC鋼材の位置がずれ、緊張力不足や鋼材破断が生じ、使用時に曲げひび割れが発生する。	[鋼材腐食の発生] ・緊張力の不足や鋼材破断により、使用時に曲げひび割れが発生し、浸水や漏水により鋼材が腐食、錆汁が発生 ・曲上げ支持具を定着するための凹部や貫通孔は、無収縮・樹脂モルタルなどによる跡埋め不良により、劣化因子の侵入、曲上げ支持具や鋼材が腐食する。	[1]PC建協:道路橋用橋げた設計・製造便覧JIS A 5373, p.144, 平成16年6月 [2]PC建協:JISげたによるPC道路橋設計・製造便覧JIS A 5316, p.127, 平成3年2月	
	定 着	・定着位置は、所定の緊張力を確保し有害なひび割れが生じないよう選定 ・部材中間部での定着は、活荷重による応力変動の小さい断面の図心に付近か圧縮部のコンクリートに定着 ・最小間隔及び最小かぶりは定着工法毎に定められた値	・定着具近くの断面では、緊張力の局部集中などの影響による応力の乱れにより偏心軸方向荷重を受けた断面としての応力計算が成立しない。設計断面と定着位置が近いと計算上の緊張力が作用せず危険なため、距離をとる必要がある。[1] ・定着部に活荷重による応力変動の影響を与えるため、応力変動の小さい断面に定着する。[1]	—	・有効プレストレス	—	[ひび割れの発生] ・応力変動による定着具の疲労耐力の低下、破損による緊張力の低下、PC鋼材の破断などが生じ、曲げひび割れが発生する。 ・緊張時の定着部付近の有害なひび割れの発生により緊張力が不足、曲げひび割れが発生する。	[鋼材・定着具腐食の発生] ・緊張時に発生する定着部付近の有害なひび割れや緊張力の不足により発生する曲げひび割れ曲げひび割れにより浸水や漏水が生じ、鋼材が腐食する。	[1]日本道路協会:プレストレスコンクリート道路橋示方書, pp.36-38, 昭和43年3月		
P C 鋼 材 の 定 着 部	(補 強 鉄 筋)	・PC鋼材と直角な方向に生じる引張応力に対する補強により、定着具背面に生じる引張応力に対して十分に抵抗できる構造	・PC鋼材を定着する場合、定着具から部材断面のコンクリートに集中荷重が作用する。プレテンション方式においてもPC鋼材定着長区間の各断面に集中荷重が作用する。これによりPC鋼材に直角な面内に生じる引張応力に対してスターラップ、格子状の鉄筋、らせん鉄筋などによる補強が必要である。補強は各PC工法毎に定められた方法によつてよい。[1]	・部材中間の定着 ①埋設し定着:定着力をPC鋼材とコンクリートの付着を期待して定着区間に分散させ小さくする方法で、PC鋼材に沿う方向あるいは部材方向に補強鉄筋が必要 ②突起定着:ウェブ、フランジへの突起定着では、隅角部に発生する可能性があるひび割れおよび突起前面に生じる引張応力に対して補強が必要 ③切欠き定着:中間定着具背面に圧縮ひずみが生じるため、隣接部に生じる引張応力やクリープにより隅角部に生じる可能性があるひび割れに対して補強が必要	・PC鋼材と直角な方向に生じる引張応力、有害なひび割れを抑制	—	[ひび割れの発生] ・定着部の有害なひび割れの発生により、緊張力が不足し、曲げひび割れが発生する。 [曲げ耐力の低下] ・プレテンション方式において、プレストレス導入時に割裂ひび割れが生じ、設計より付着伝達長が長くなり曲げ耐力が低下する。	[鋼材・定着具腐食の発生] ・定着部の有害なひび割れや隅角部の剥落、緊張力の不足による曲げひび割れにより浸水や漏水が生じ、鋼材が腐食する。 ・プレテンション方式において、プレストレス導入時に割裂ひび割れが生じ、浸水や漏水により定着具や鋼材が腐食する。	[1]土木学会:プレストレスコンクリート工法設計施工指針, コンクリートライブラリー66, 平成3年3月		
		接 続 具	・PC鋼材が引張強度に到達する前に有害な変形や破壊しない構造 ・接続具は断面図心あるいは曲げモーメントの変化の少ないところに直線上に配置	定着具や接続具は、土木学会規準「PC工法の定着具および接続具の性能試験方法(案)」[1]やこれと同等の試験に基づいて性能が確認されたものを使用する。	—	・有効プレストレス ・定着具のセット量 ・部材の局部的な強度低下を抑制 ・鋼材の連続性を確保	—	[ひび割れの発生・曲げ破壊] ・有害な変形や破損により緊張力が不足し、曲げひび割れが発生する。 ・定着具のセット量の増大により緊張力が不足、曲げひび割れが発生する。 ・接続部付近に局部応力が発生し、接続具の破損、PC鋼材の破断により曲げ破壊が生じる。	[鋼材腐食の発生] ・緊張力の不足により曲げひび割れにより生じ、浸水や漏水により鋼材が腐食する。 [定着具腐食の発生] ・接続具の破損により背面などにひび割れが発生、浸水や漏水により鋼材が腐食発生する。	[1]土木学会:プレストレスコンクリート工法設計施工指針, コンクリートライブラリー66, pp.24-25, 平成3年3月	
	(ダ イ ヤ 保 護 ラ ム)	・定着部及び部材端面は、緊張後、破損または腐食しないよう保護 ・けた橋げたの横締めPC鋼材定着部にはダイヤフラムを設けることが原則[1]	・緊張後の定着具は常に高い応力が作用しており、外部からの衝撃による破損、浸水による腐食などに対して十分に保護する必要がある。[2]	・プレテン部材のPC鋼材は、プレストレスを与えた後、部材端面できりそえ、防水性、付着性、耐アルカリ性および遮塩性について、PC建協「部端処理材料の品質試験方法(案)」[1]により、性能が確認された材料により保護する。 ・ポストテン部材は、定着具が破損または腐食しないよう定着具および部材端面を保護しなければならない。[3]	・定着具の腐食、破損の防止 ・PC鋼材の腐食、破断の防止 ・有効プレストレス量	—	[ひび割れの発生] ・設計期間中におけるPC鋼材定着具の破損や腐食により、緊張力の低下、PC鋼材の破断などが生じ、曲げひび割れが発生する。	[鋼材・定着具腐食の発生] ・かぶり不足や施工不良などにより保護が不十分となり、浸水や漏水により鋼材や定着具が腐食する。 ・緊張力の低下やPC鋼材の破断により曲げひび割れが発生し、浸水や漏水により鋼材が腐食する。	[1]PC建協:道路橋用橋げた設計・製造便覧JIS A 5373, pp.96-97, 129-131, 167-168, 平成16年6月 [2]日本道路協会:プレストレスコンクリート道路橋示方書 解説, p.38, 昭和43年3月 [3]土木学会:2007年制定コンクリート標準示方書[施工編], p.384, 平成20年3月		

表2.2.8 PC橋の設計および施工で担保している性能とその変状が及ぼす影響（施工その1）

1. 項目			2. 設計・施工で用いる 制限値・性能規定等	3. 規格値, 規定に対する根拠		4. 制限値, 許容値に関する性能		5. 機能・性能が満足されない場合に橋梁に現れる事象, 事例・現状の課題		参考文献	
大	中	小		値・規定の根拠	適用範囲等の補足	耐荷性能および構造的機能	耐久性能	耐荷性能および構造的機能	耐久性能		
施工	一般			一般	—	—	—	—	—	[1] 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編・III コンクリート橋編, pp.77-78, 平成14年3月	
	コンクリート	ワーカビリティ	・スランブ標準値は80mm	・道示昭和53年, スランブ最大値を12cm→道示平成2年, 8cmを原則→道示平成14年, 80mmを標準 ・8cm原則の根拠は、「大きなスランブのコンクリートを用いると、単位水量および単位セメント量が大きくなり、乾燥収縮などにより構造物に有害な影響を与える。したがって、スランブは、作業が容易にできる範囲でできる限り小さくしなければならない。このため、一般の鉄筋コンクリート、プレストレストコンクリート部材では、スランブは8cmを原則とした。」としている。[1]	・スランブと粗骨材最大寸法により設定[2] ・高性能AE減水剤を使用した場合は、スランブを80mmより大きく設定してよい。ただし、材料分離がないことを確認する必要がある。[2] ・高流動コンクリートを使用する場合は、「高流動コンクリート施工指針」にしたがってワーカビリティを定める。[2] ・粗骨材最大寸法標準値は20mmまたは25mm[2] ・土木学会では、構造物の種類、部材の種類、鋼材量や配筋条件、締固め作業高さなどを考慮して、打込み時の最小スランブを規定する方法を採用している。[3]	・フレッシュコンクリートの変形のしやすさと材料分離抵抗性 ・密実で所要の強度を有するコンクリート部材を形成	・密実で所要の強度を有するコンクリート部材を形成	・ジャンカなど初期欠陥が生じる。 ・ブリーディングにより、沈下ひび割れが発生する。 ・ブリーディングにより、鋼材の付着強度が低下し、曲げ引張破壊およびせん断破壊により脆性破壊する。	・ジャンカ、砂すじ、沈下ひび割れなど初期欠陥が生じる。 ・初期欠陥により、水密性、透気性、物質移動抵抗性が想定より劣り、塩害や中性化による鋼材腐食が発生する。 ・ブリーディングの影響により、鋼材によるひび割れの制御機能が低下してひび割れ幅が設定値より大きくなる。	[1] 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編・III コンクリート橋編, pp.293-298, 平成2年2月 [2] 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編・III コンクリート橋編, pp.330-334, 平成14年3月 [3] 土木学会: コンクリート標準示方書, 施工編, pp.74-79, 2007年12月	
		W/C	・配合強度と耐久性を考慮して設定	—	・一般には、耐久性確保の観点から50%以下が望ましい。[1] ・かぶりコンクリートの遮塩性に期待して耐久性を確保する場合は、遮塩性能を考慮して水セメント比を定めなければならない。[1] ・塩害に対する最小かぶりの設定値で想定している構造ごとのW/C以下。[2] ・上記によらない場合は、別途耐久性を検討。[1]	・コンクリート強度、耐荷性能および構造的機能	・水密性、透気性、物質移動抵抗性など耐久性能	・施工時にPC鋼材定着部背面に割裂ひび割れが発生する。 ・使用時に曲げひび割れが発生する。 ・鋼材の付着強度不足により、鋼材に沿ったひび割れが発生する。 ・終局時にコンクリートの強度不足で脆性的に曲げ圧縮破壊する。 ・終局時に鋼材の定着不全により耐力が低下し、曲げ引張破壊およびせん断破壊により脆性破壊する。	・塩害、中性化などにより鋼材腐食が発生する。 ・所要の水密性が確保されず、浸水や漏水が発生する。 ・凍害やアルカリ骨材反応が発生しやすい。	[1] 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編・III コンクリート橋編, pp.330-334, 平成14年3月 [2] 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編・III コンクリート橋編, pp.171-175, 平成14年3月	
		セメント単位量	・単位水量とW/Cから定める ・鉄筋コンクリート部材の最小量は230kg/m ³ ・プレテン部材の最小量は350kg/m ³ ・ポステン部材の最小量は300kg/m ³	・鉄筋コンクリートの場合は、最低設計基準強度を210kg/cm ² と規定したので、この強度に対応する値とした。[1] ・プレテンション方式の場合は、コンクリートとPC鋼材の付着強度を十分に確保する必要があるため、最小量をポステン方式より多く規定した。[1] ・イギリスのFirst Reportでは、最小単位セメント量をプレテンションングに対し374kg、ポステンションングに対し326kgとしている。[2]	・単位セメント量が多くなると、乾燥収縮によるひび割れの発生などにより、構造物に有害な影響を与えるおそれがあるので養生などの施工方法について注意する必要がある。[1]	・コンクリートの強度	・コンクリートの耐久性、水密性	・単位セメント量が少なすぎると、プレテンション方式PC鋼材の確実な定着やプレストレスの導入ができないため、使用時に曲げひび割れが発生する。 ・終局時に脆性的に曲げ破壊する。	・単位セメント量が過多で、施工方法や養生方法等が適切でない場合、マズン部材に温度ひび割れが発生したり、拘束のある部材に乾燥収縮ひび割れが発生する。	[1] 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編・III コンクリート橋編, pp.265-269, 昭和53年1月 [2] 土木学会: 昭和30年土木学会制定 プレストレストコンクリート 設計施工指針, p15, 昭和30年4月	
		空気量	・AEコンクリートを原則 ・標準は4.5%	・道示昭和53年, 規定なし→道示平成2年, 4%を標準→道示平成8年, 4.5%を標準 ・コンクリートの単位水量を減少させ、凍結融解作用に対する耐久性を改善するためにAEコンクリートを用いることを原則とした。また、空気量については、土木学会の規程およびJIS A 5308の規格を考慮して、4.5%を標準とした。[1]	・土木学会コンクリート標準示方書では、「AEコンクリートの空気量は、粗骨材の最大寸法、その他に応じてコンクリート容積の4~7%を標準とする。」としている。[2]ただし、現示方書では、性能照査型のため、空気量の標準値はない。 ・JIS A 5308では、普通コンクリート空気量4.5%の許容差を±1.5%としている。[3]	—	・凍結融解作用に対する耐久性の改善	・凍結融解作用に対する耐久性の改善	・空気量が過多の場合、コンクリート強度が低下する。 ・空気量が不十分な場合、凍害が発生する。	[1] 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編・III コンクリート橋編, pp.306-311, 平成8年12月 [2] 土木学会: [平成8年制定] コンクリート標準示方書 施工編, p65, 平成8年3月 [3] JIS A 5308	
		イオン量	・フレッシュコンクリート中の塩化物イオン量は、0.3kg/m ³ 以下	・道示昭和53年, NaCl量で鉄筋コンクリートおよびポステン部材はセメント量の0.1%以下、プレテン部材およびグラウトは砂乾重量の0.03%以下→道示平成2年, 塩素イオン量で鉄筋コンクリートおよびポステン部材は0.6kg/m ³ 以下、プレテン部材およびオートクレープ養生部材は0.3kg/m ³ 以下→道示平成8年, フレッシュコンクリート中の塩化物イオン量は0.3kg/m ³ 以下	・コンクリート構造物の長期的な耐久性を確保するために必要なフレッシュコンクリート中の塩化物量の規制値を示す。[1] ・ただし、一般の条件下で使用される無筋コンクリートおよび鉄筋コンクリート部材の場合、塩化物量の少ない材料の入手が著しく困難な場合には、0.6kg/m ³ 以下としてよい。この場合には、水セメント比あるいは単位水量をできるだけ小さくすることと、コンクリートの打込みを入念に行うことなど配慮が必要。[1]	—	・コンクリート構造物の長期的な耐久性を確保	—	・鋼材の腐食発生限界塩化物量は、1.2kg/m ³ と考えてよい。 ・外来塩分は、かぶりコンクリートによる遮塩効果が期待できるが、内在塩分は直接鋼材に触れるため、制限値を小さく設定してある。 ・したがって、内在塩分が過多であると、短期間での鋼材腐食が懸念される。	[1] 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編・III コンクリート橋編, pp.306-311, 平成8年12月	
	シース仕様	・コンクリート打設時に変形しにくい ・継ぎ目からペーストが流入しない ・有害な腐食、よごれ、傷、変形等がない ・所定の強度、変形性、耐久性を有する	—	・断面方向につぶれにくい節付きのものや波付きのものを用いることが望ましい。[1] ・外ケーブル保護管や斜張橋の斜材保護管は、コンクリート中に配置されるシースとは異なり、環境の影響を受けやすい。腐食や劣化に対する耐久性を考慮して選定することが望ましい。また、注入圧に対して十分な強度を有していなければならない。[1] ・有害な品質変化等が生じると、施工に支障をきたしたり、耐久性を損ねる可能性があるため、運搬時、受入れ時、施工時に十分注意する必要がある。[1] ・一般に薄い鋼製のシースが用いられる。塩害地域等において、高い耐久性を確保するために、ポリエチレン等のプラスチック製シースが用いられている例もある。[1]	・PC鋼材の緊張やグラウト注入に支障をきたさない。	・PC鋼材のグラウト注入に支障をきたさない。 ・耐久性を確保する。	・過度の変形などがある場合、PC鋼材の挿入や緊張に支障をきたす。 ・内面に錆を生じると、緊張時に摩擦係数が増大し、所定の緊張力を導入できない。 ・十分なグラウト充填ができない場合、コンクリートとPC鋼材が一体にならないため、曲げ耐力が低下する。	・シースの耐久性が劣ると、PC鋼材に容易に腐食因子が到達し、鋼材が腐食する。 ・十分なグラウト充填ができない場合、鋼材が腐食する。 ・シースの空隙に水が存在すると、凍結により鋼材に沿ったひび割れが生じる。	[1] 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編・III コンクリート橋編, pp.334-335, 平成14年3月		
	グラウト	グラウト材料	・PC鋼材が錆びないよう保護できるもの ・部材コンクリートと一体とする場合は十分な付着を有するもの ・ノンブリーディング型が標準 ・セメントは JIS R 5210 に適合する普通ポルトランドセメントを原則とする ・混和剤はPC鋼材に悪影響のないもの	—	・ノンブリーディンググラウトは、従来タイプのグラウト材に増粘剤を加えたもので、その増粘剤の添加量により、ノンブリーディング型とノンブリーディング粘性型とに区分される。[1]	—	・完全充填により部材コンクリートと一体化させる。 ・平面保持の仮定の成立。 ・PC鋼材を引張鋼材として十分に機能させる。	・完全充填によりPC鋼材を腐食から保護する。	・グラウト充填が不完全な場合、コンクリートと一体にならないため、曲げ耐力が低下する。 ・グラウト強度が不足する場合、コンクリートとの付着が不十分となり、曲げ耐力が低下する。	・グラウト充填が不完全な場合や塩化物イオン量が過多の場合、PC鋼材を腐食から保護できず、PC鋼材に腐食が発生する。 ・グラウト充填が不完全な場合、空隙部に水が滞り、凍結により鋼材に沿ったひび割れが生じる。	[1] 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編・III コンクリート橋編, pp.335-336, 平成14年3月
		グラウト特性	・W/Cの標準は45%以下 ・材齢28日の圧縮強度の標準は20N/mm ² 以上 ・膨張率は0.5%以下 ・ブリーディング率は0.0% ・塩化物イオン量は0.3kg/m ³ 以下	・従来タイプのグラウトでは、ブリーディング水が生じる。このため、ブリーディング水を外部に押出すために、膨張剤を添加していたがノンブリーディング型の場合、これが不要となるため、膨張率については値を変更した。また、これに伴いブリーディング率も0.0%へと変更している。[2] ・従来タイプのグラウトを用いる場合は、コンクリートへの有害な圧力が加わらないこと、グラウトが完全に充填されるための膨張率を設定しなければならない。[1] ・土木学会標準示方書では、ブリーディング率0.0%、体積変化率-0.5%~0.5%、圧縮強度30N/mm ² 以上を標準としている。[2]	—	・完全充填によりPC鋼材を腐食から保護する。	・完全充填によりPC鋼材を腐食から保護する。	・グラウト充填が不完全な場合、コンクリートと一体にならないため、曲げ耐力が低下する。 ・グラウト強度が不足する場合、コンクリートとの付着が不十分となり、曲げ耐力が低下する。	・グラウト充填が不完全な場合や塩化物イオン量が過多の場合、PC鋼材を腐食から保護できず、PC鋼材に腐食が発生する。 ・グラウト充填が不完全な場合、空隙部に水が滞り、凍結により鋼材に沿ったひび割れが生じる。	[1] 土木学会: 2007年制定 コンクリート標準示方書 施工編, pp.365-367, 2007年12月 [2] 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編・III コンクリート橋編, pp.335-336, 平成14年3月	

表2.2.9 PC橋の設計および施工で担保している性能とその変状が及ぼす影響（施工その2）

1. 項目			2. 設計・施工で用いる 制限値・性能規定等	3. 規格値、規定に対する根拠		4. 制限値、許容値に関する性能		5. 機能・性能が満足されない場合に橋梁に現れる事象、事例・現状の課題		参考文献
大	中	小		値・規定の根拠	適用範囲等の補足	耐荷性能および構造的機能	耐久性能	耐荷性能および構造的機能	耐久性能	
施工	コンクリート工	運搬	<ul style="list-style-type: none"> 材料分離が生じないこと 適切なコンクリートポンプの選定 鉄筋、型枠、支保工に配慮した配管 	<ul style="list-style-type: none"> 練混ぜ後の水和による温度上昇を防ぐため、できるだけ早くにコンクリートを打込むことが望ましい。旧示方書では、このような観点から練混ぜ後1時間以内に打込むように定めていた。しかし、レディーミクストコンクリートを十分に使いこなしている現状から、練混ぜから打込みまでの限度をJISに合わせて1.5時間以内と長くした。[1] 	<ul style="list-style-type: none"> 運搬距離が長い場合や、分離抵抗性の少ないコンクリートを運搬するときは、攪拌機能を有したトラックアジテータ車を用いて運搬しなければならない。[2] レディーミクストコンクリートの運搬時間は、JIS A 5308の規定に従う。[2] 練混ぜてから打込みが終了するまでの時間は、原則として、外気温が25℃以上の時は1.5時間以内、25℃未満の場合でも2時間をこえないことが望ましい。[2] 輸送管は、水平または上向きに配置することが望ましい。また、ポンプの輸送管はコンクリート圧送中に動くので、直接、鉄筋あるいは型枠等の上に配置しないで、支持台の上に配置することが望ましい。[2] 	<ul style="list-style-type: none"> 所要のワーカビリティを有し、材料分離のないコンクリートを打込むことにより、所定の強度特性を有するコンクリートを確保する。 	<ul style="list-style-type: none"> 所要のワーカビリティを有し、材料分離のないコンクリートを打込むことにより、所定の耐久性能を有するコンクリートを確保する。 	<ul style="list-style-type: none"> コンクリートの打ち込みができない。 ジャンカ、コールドジョイントなど初期欠陥が生じる。 ブリーディングにより、沈下ひび割れが発生する。さらに、鋼材の付着強度が低下し、曲げ引張破壊およびせん断破壊により脆性破壊する。 	<ul style="list-style-type: none"> ジャンカ、コールドジョイント、砂すじ、沈下ひび割れなど初期欠陥が生じ、水密性、透気性、物質移動抵抗性が想定より劣り、塩害や中性化による鋼材腐食が発生する。 ブリーディングの影響により、鋼材によるひび割れの制御機能が低下して、ひび割れ幅が設定値より大きくなる。 	<ul style="list-style-type: none"> [1] 土木学会：コンクリート標準示方書（昭和61年制定）改定資料，p86，昭和61年10月 [2] 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編・IIIコンクリート橋編，pp.340-345，平成14年3月
		打込み	<ul style="list-style-type: none"> 雨天または強風時に行わない 型枠を清掃し吸水部は湿潤状態を保つ 暑中コンクリートは原則30℃以下 寒中コンクリートは原則5～20℃の範囲 	<ul style="list-style-type: none"> コンクリート温度が高いと、所要のコンシステンシーを得るに必要な単位水量が大きくなること、過早に固まるおそれのあること、長期材齢強度が小さいこと、温度変化によりひび割れの生じるおそれがあることから、暑中コンクリートの打込み時のコンクリート温度は30℃以下と規定した。[1] 寒中コンクリートの打込み時のコンクリート温度は、10～20℃と定められていたが、5～20℃に拡大した。その理由は、部材厚が大きい場合は、低温で長時間養生するほうが経済的で長期的な物性に対して望ましいためである。また、コンクリート温度だけ高くすると、型枠や鉄筋に接触する部分と温度差ができ、露出部の水分の蒸発が著しくなる。最低温度5℃としたひとつの理由は、ACI規準である。[2] 	<ul style="list-style-type: none"> 材料分離が無く均質なコンクリートを打ち込むことが重要である。[3] 悪天時にやむを得ずコンクリートを打込む場合は、遮蔽設備を設けなければならない。[3] 日平均気温が25℃を超える暑中コンクリートを施工する場合は、コンクリート温度は原則30℃以下であるが、やむを得ない場合でも打込み時のコンクリート温度は35℃を超えてはならない。[3] 日平均気温が4℃以下となる寒中コンクリートを施工する場合は、打込み温度は最低でも10℃程度を確保する必要がある。コンクリート温度が高くなる場合には、外気温とコンクリートの温度差によって大きな温度応力が生じる恐れがあるので、コンクリート温度を20℃以下とする必要がある。[3] 	<ul style="list-style-type: none"> 初期ひび割れ、W/Cの変化、長期強度不足、温度差によるひび割れなどを防ぎ、所定の強度特性を確保する。 	<ul style="list-style-type: none"> 初期ひび割れ、W/Cの変化、長期強度不足、ひび割れなどを防ぎ、所定の耐久性能を確保する。 	<ul style="list-style-type: none"> 床版上面などコンクリート表面に初期乾燥ひび割れが発生する。 部材断面急変部やマスコン部に温度ひび割れが発生する。 それらにより、所要の強度特性を確保できない。 	<ul style="list-style-type: none"> 床版上面などコンクリート表面に初期乾燥ひび割れが発生する。 部材断面急変部やマスコン部に温度ひび割れが発生する。 それらにより、所要の耐久性能を確保できない。 	<ul style="list-style-type: none"> [1] 土木学会：コンクリート標準示方書解説【昭和42年版】，pp.79-81，昭和42年7月 [2] 土木学会：コンクリート標準示方書（昭和61年制定）改定資料，pp.83-85，昭和61年10月 [3] 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編・IIIコンクリート橋編，pp.340-345，平成14年3月
		養生	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥、低温、急激な温度変化を避ける 硬化中は有害な振動と衝撃を避ける 湿潤養生を原則とする 普通セメントを用いる場合は5日以上 早強セメントを用いる場合は3日以上 寒中コンクリートは養生中の凍結を避ける 蒸気養生の場合、前養生2時間、温度上昇は15℃/時以下、最高65℃以下 	<ul style="list-style-type: none"> セメントの水和作用の観点からは、できるだけ長く湿潤状態に保つのがよいが、実際の構造物では困難であり、不経済でもある。そこで、硬化コンクリートからの水分の蒸発、初期材齢での硬化の増進などを考慮し、最も一般的な普通セメントを用いる場合について、普通の場合、型枠で保護されないすべてのコンクリート面に対して5日間以上、湿潤養生を行うことを定めた。[1] 早強ポルトランドセメントを用いる場合は、水和作用が硬化初期に盛んで、初期発熱量が大きくコンクリート温度が高くなり、クリープも小さく、硬化初期にひび割れが生じやすいので、3日間以上、特に十分湿気を与えて、乾燥による収縮ひび割れの発生を防ぐ必要がある。[1] 	<ul style="list-style-type: none"> 打込み後ごく早い時期に、直射日光や風等により、打込み後ごく早い時期に、直射日光や風等により表面だけが急激に乾燥するとひび割れが生じる。また、内部の水分が失われると水和反応が十分に行われず、強度の発現が期待できなくなる。[2] 床版コンクリートを施工する場合、気温が低い時期には、コンクリートの圧縮強度が15N/mm²程度に達するまでは、適当な保温設備のもとに養生を行い、15N/mm²程度に達するまでは、コンクリート温度を5℃以上に保ち、さらに2日程度は0℃以上に保つことが望ましい。[2] 寒中コンクリートの場合は、コンクリートの打込み後の初期に凍結しないよう十分に保護し、とくに風を防ぐ必要がある。[2] 	<ul style="list-style-type: none"> 打込み後早い時期の表面の急激な乾燥によるひび割れ、内部の水分の喪失、硬化時の振動、硬化時の急激な温度変化や温度差などを避け、セメントの十分な水和反応による所定の強度特性を有するコンクリートを確保する。 	<ul style="list-style-type: none"> 打込み後早い時期の表面の急激な乾燥によるひび割れ、内部の水分の喪失、硬化時の振動、硬化時の急激な温度変化や温度差などを避け、セメントの十分な水和反応に起因する強度不足や、鋼材の定着性能の低下が発生する。 	<ul style="list-style-type: none"> 床版上面などコンクリート表面に初期乾燥ひび割れが発生する。 部材断面急変部やマスコン部に温度ひび割れが発生する。 不十分な水和反応に起因する強度不足や、鋼材の定着性能の低下が発生する。 	<ul style="list-style-type: none"> 床版上面などコンクリート表面に初期乾燥ひび割れが発生する。 部材断面急変部やマスコン部に温度ひび割れが発生する。 不十分な水和反応に起因する強度不足や、鋼材の定着性能の低下が発生する。 	<ul style="list-style-type: none"> [1] 土木学会：昭和49年制定コンクリート標準示方書解説【昭和55年版】，pp.153-155，昭和55年3月 [2] 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編・IIIコンクリート橋編，pp.340-345，平成14年3月
		打継目	<ul style="list-style-type: none"> 設計で定めた位置や構造を変更しない せん断力の小さい位置に設ける 圧縮力と直角方向に設ける 温度応力や乾燥ひび割れのないようにする レイタンスやゆるんだ骨材を除去 打ち継ぐ前に十分吸水する 塩害域では少なくし鉛直を避ける 打重ね部は一体性を確保する 耐久性に影響するひび割れやコールドジョイントを生じさせない 	<p style="text-align: center;">—</p>	<ul style="list-style-type: none"> 設計で定めた位置をやむを得ず変更する場合、構造物の性質を理解し、位置、方向、構造および施工方法を定める。[1] 打継目付近には、スターラップあるいは配力筋等を他の部分と比較して密に配置する等の処置を講じる必要がある。[1] 旧コンクリート表面に残留した水は、打ち継ぐ前に除去する。[1] 打継目は防食上の弱点となりやすいため、できるだけ打継目が少なくなるよう計画する。[1] コールドジョイントを防ぐため、コンクリートの種類および品質、練混ぜ開始から打込み終了までの経過時間、コンクリート温度、締固め方法等の影響を考慮して、打継時間間隔を設定して管理することが大切。[1] 	<ul style="list-style-type: none"> 打継目が構造的弱点にならないようにし、構造物の耐荷性能を確保する。 	<ul style="list-style-type: none"> 打継目が防食上の弱点等にならないようにし、構造物の耐久性能を確保する。 	<ul style="list-style-type: none"> 打継目の開きや打重ね面にコールドジョイントが生じ、耐荷性能の低下が発生する。 	<ul style="list-style-type: none"> 打継目の開きや打重ね面にコールドジョイントが生じ、漏水や鋼材腐食などが発生する。 	<ul style="list-style-type: none"> [1] 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編・IIIコンクリート橋編，pp.340-345，平成14年3月
P C 鋼材緊張工	コンクリート	<ul style="list-style-type: none"> プレストレス時の圧縮強度は最大圧縮応力度の1.7倍以上、プレテンは30N/mm²以上 定着部は生じる支圧応力に耐えること 複数のPC鋼材を順次緊張する場合は各段階の発生応力度に注意 	<ul style="list-style-type: none"> プレストレスを与えた後の最大圧縮応力度は、一般に緊張材のレラクセーション、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮、永久荷重等によって減少するものであるから、この場合の安全度は、設計荷重を受けたときの安全度よりも小さくてもよいわけである。しかし、コンクリートの圧縮強度に比較して与える応力度が大きくなりすぎると、コンクリートのクリープが応力度に比例する範囲を超えて大きくなるという害を生じる。示方書では、このような場合のコンクリートの圧縮強度は、プレストレスを与えた直後のコンクリートの最大応力度の1.7倍以上あればよいことにした。[1]この安全率1.7以上を定めたのは、DIN 42271による。[2] 	<ul style="list-style-type: none"> プレテンション方式において、プレストレス時の圧縮強度を30N/mm²以上としたのは、コンクリートに生じる最大圧縮応力度に対して安全度を持たせるだけでなく、PC鋼材とコンクリートの間に十分な付着強度が必要であることを考慮して定めた。[3] PC鋼材の定着による局所的な支圧応力や引張応力は、定着具の種類、間隔、かぶり等によって異なる。したがって、各PC工法で規定されているコンクリート強度に達してから、緊張しなければならない。[3] 複数のPC鋼材を順次緊張する場合は、先に緊張したPC鋼材は、後から緊張したPC鋼材の引張力によるコンクリートの弾性変形のために、引張力が減少するので、これを考慮する。[3] 	<ul style="list-style-type: none"> 緊張直後のコンクリート部材の安全性 	<p style="text-align: center;">—</p>	<ul style="list-style-type: none"> 早期にプレストレスを導入すると、想定以上のクリープ変形を生じる。 プレストレス導入時に、定着部背面に割裂ひび割れが生じる。 	<p style="text-align: center;">—</p>	<ul style="list-style-type: none"> [1] 土木学会：昭和53年制定プレレストコンクリート標準示方書，pp.120-121，昭和53年12月 [2] 土木学会：昭和30年土木学会制定 プレレストコンクリート 設計施工指針，pp.13-14，昭和30年4月 [3] 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編・IIIコンクリート橋編，pp.347-353，平成14年3月 	
	緊張管理等	<ul style="list-style-type: none"> 緊張後の損失を考慮して初期値を決定 装置のキャリブレーションを行う 管理に用いる摩擦係数およびみかけのヤング係数は試験緊張により求める 所定の緊張力が得られるよう管理する 管理は荷重計示度とPC鋼材の伸び量で行う 後埋め部は膨脹コンクリートまたは無収縮モルタルを用いる 	<p>管理限界について[2] 【方法1】摩擦係数をパラメータとする管理手法における2σ法の管理限界について ①ケーブル1本ごとに対して ：$\pm 2\sigma$（式1） ②グループの平均値に対して ：$\pm 2\sigma / \sqrt{n}$ n=1グループの本数（式2） 【方法2】緊張力と伸びを独立して管理する手法における許容誤差δについて ①ケーブル1本ごとに対して ：$\pm \text{バラツキの標準偏差} \sigma = 5\%$として、 （式1）より2σで管理した場合±10% ②グループに平均値に対して ：$\pm \text{バラツキの} \sigma = 5\%$として、</p>	<ul style="list-style-type: none"> 現場における試験緊張は、PC鋼材の配置形状の異なる代表的なものから、5ケーブル以上行うことを原則とする。[1] 鋼製シースを使用し、緊張試験を行うことが困難な場合は、道示に示す値を用いてよい。ただし、この場合はプレストレスの管理において、仮定した値が正しいことを確認する。もし異なる場合は、その値を用いて再度引張力を計算する。[1] プレストレスにより与えられるプレストレス力は、PC鋼材の見かけのヤング係数のばらつき、摩擦係数のばらつき等により目標値から外れる場合がある。プレストレスの管理は、これらのばらつきのうち、不注意による誤差を最小限にとどめるとともに、部材設計断面に正確にプレストレスが行われているかどうかを判断し、異常がみられた場合に、その原因を早期に発見するために行うものである。[1] PC鋼材に与えられる引張力を荷重計の示度で推定した場合も、PC鋼材の伸びで推定した場合も、5%程度の誤差を含むことは避けられないので、誤差発生危険性を低減するため2つの方法を併用することを原則とする。[1] 具体的な管理手法は、日本道路協会「コンクリート道路橋施工便覧 8.6 緊張管理」を参照するとよい。[1][2] 	<ul style="list-style-type: none"> 所要の緊張力を確保 誤差を最小限にとどめる 緊張作業の安全を確保 	<ul style="list-style-type: none"> 後埋め材の収縮による打継目面の目地開きを防ぎ耐久性を確保 	<ul style="list-style-type: none"> 所要のプレストレスが確保されないため、使用時に曲げおよび斜めひび割れが発生する。 プレストレス導入時に、定着部背面に割裂ひび割れが生じる。 緊張作業中にPC鋼材が破断する。 	<ul style="list-style-type: none"> 後埋め部の打継目面より腐食因子が浸入し、定着部の鋼材が腐食する。 プレストレス不足により曲げおよび斜めひび割れが発生し、耐久性が低下する。 	<ul style="list-style-type: none"> [1] 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編・IIIコンクリート橋編，pp.347-353，平成14年3月 [2] 日本道路協会：コンクリート道路橋設計便覧，pp.288-334，平成10年1月 	

(3) まとめ

プレストレスの導入量、特に残存しているプレストレス量は、表 2.2.1～2.2.9 のように橋梁の耐荷性能・耐久性能に直接影響するため、その残存量の程度を正確に把握しておくことは、PC 構造物の維持管理上において最重要項目である。

一般に PC 構造はひび割れを許容しない設計であるため、プレストレス量が不足することで以下のような不具合が発生するおそれがある。

- ・ プレストレス量の不足によりひび割れ発生抵抗モーメントが小さくなるため、ひび割れが発生する。
- ・ ひび割れの発生により主桁の剛性が著しく低下するため、想定を越えたたわみや振動が発生する。
- ・ ひび割れ部の PC 鋼材において、応力変動が大きくなるため疲労破断が生じるおそれがある。
- ・ ひび割れから塩化物イオン等の劣化因子が侵入し、構造物内の鉄筋や PC 鋼材を腐食させる。最悪の場合は、鉄筋や PC 鋼材が破断して落橋するおそれがある。
- ・ せん断耐力が減少するため、破壊モードが曲げ破壊先行型からせん断破壊先行型へ移行する可能性があり、せん断破壊モードとなった場合には破壊が脆性的となる。

一方、曲げ破壊に対しては、一般にプレストレスの効果は無視するため、曲げ破壊安全度についてはほとんど影響がないといえる。ただし、上述のように破壊モードがせん断破壊先行型になる可能性があるため、注意を要する。

以上述べたように、実構造物にはひび割れを生じさせないことが、所要の性能を満足させることとなる。すなわち、道路橋示方書の規定は、原則としてひび割れを発生させないことを目的としていると考えることができる。

一方、道路橋示方書の許容応力度はコンクリートのひび割れ強度に対してある程度の余裕を有している。ただし、これは設計で仮定した材料の物性値の違い（ヤング係数、クリープ係数、乾燥収縮度等）、製作誤差、施工条件等により引張応力度が設計値以上に発生しても、ある程度の安全度を確保するように定められているものである。したがって、実構造物の設計・施工・維持管理においては、通常の使用状態ならびにレベル 1 地震動の範囲内において、あくまでも許容応力度を遵守してひび割れを発生させないことが必要である。

2.3 PC 道路橋の施工及び品質管理

(1) 施工及び品質管理の現状

2.2 で整理したように、PC 道路橋の設計においては、所定の性能が発揮されるために様々な設計項目について定量的な照査や構造細目等の遵守が行われる必要がある。またそれらの設計項目や構造細目では前提となる材料や施工手順によることが前提となっているものも多く、施工にあたってはそれらが満足されるように種々の品質管理が行われることとなる。

特にコンクリート、鉄筋、PC 鋼材を用いて橋体を形成する複合構造であり、RC 部材に比べ荷重に対して全断面で抵抗する特徴を有する PC 部材では、RC 部材に比べて一般により高強度のコンクリートが用いられるだけでなく、施工段階で有効断面を侵すような有害なひび割れをできるだけ生じないような施工の実施、所定のプレストレス力が導入されるための緊張方法（緊張量・手順など）の設定とその管理、適切なグラウトの施工など高度な施工技術とその確実な実施が求められる²⁾。

そして、硬化後のコンクリートの特性や導入されたプレストレスの状態については、PC 道路橋の性能を大きく左右する一方で、それらを施工後に直接的に評価する手法は十分でない。また評価できたとしてもプレストレスが導入された後での是正は極めて困難である。

このため設計の前提となった施工品質が得られることについては、施工段階毎に行われる個々の品質管理の積み上げにより間接的に保証されているのが現状である。

そこで本節では、現状の品質管理において実施している項目と手法を整理し、それらと部材の性能の関わりについてとりまとめた。また各着目品質について構造物の完成後の検証性についても検討して整理した。

施工手順や品質管理の詳細は道路橋示方書などの設計技術資料では網羅されていないため、ここでは、主に国土交通省直轄事業の PC 道路橋施工で実際に実施されている品質管理項目を例として工種、細目、確認事項に体系整理した(図 2.3.1)。

また各項目について品質管理で実施している内容を表 2.3.1 に、構造物完成後の確認手法を表 2.3.2 のグレード分けの定義に従って分類することにより現状の品質管理体系を評価する。分類を判定する評価手法は、既往の知見等³⁾⁴⁾で確立されているのものではないことから、実際の PC 道路橋の品質管理に携わった経験を有する技術者（プレストレスコンクリート建設業協会に所属する技術者）の主観、および非破壊検査技術関連の一部については（社）日本非破壊検査工業会に所属する企業のアンケートを基にグレード分けを実施した。

その他 PC 道路橋の建設現場で実施されている一連の品質管理について、実際に運用されている工事仕様書⁵⁾、基準類^{6),7),8)}から抜粋し、①使用材料の品質管理、②施工精度の管理、③緊張管理、④グラウト管理、⑤出来形管理に分類した（参考資料-1）。さらに一般の工事仕様書等に記載されていない PC 構造特有なプレストレスの緊張管理手法について参考資料-2 に示す。

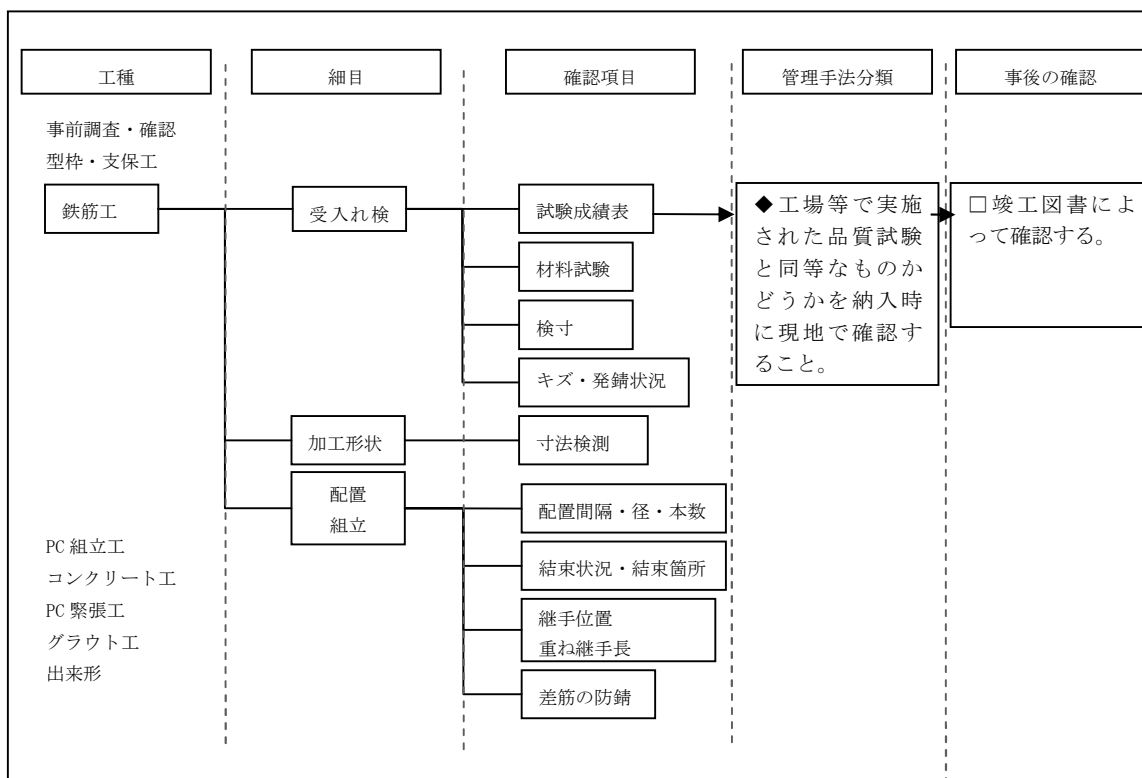


図 2.3.1 品質管理項目の整理方法（例）

表 2.3.1 品質管理手法の分類

記号	概要	備考 (例事)
●	目視，写真等による品質管理手法	・寸法，配置本数を検測する事
○	理論計算等による品質管理手法	・支保工耐力計算，たわみ計算を実施する事
△	JISや特定の試験方法が規格化されており直接的な管理手法	・コンクリートの圧縮強度試験，鋼材の引張強度試験
◆	現場において書類，成績表の整合をチェックする間接的な品質管理手法	・納入された鋼材が所要の製品であるか試験成績表を確認する事

表 2.3.2 事後（構造物完成後）確認の容易さのグレード分けの定義

記号	概要	備考
▽	目視により事後確認できる	・打ち継目のコールドジョイント等目視観察によって判定可能
◎	現存する非(微)破壊検査技術で、既に実用的段階で検証がなされている	・テストハンマー等によるコンクリート強度が試験法・規準として確立している事項
▲	テストピース(供試材)抜き取ること確認可能	・コンクリートの品質状態（単位水量，含有塩分量など）など抜き取りで状態が把握可能な事項
□	竣工図書等の書類で確認できる	・試験成績表，納品書等の材料の所在に関わる事項
■	事後確認することが困難である	・目視、検査技術も用いても評価が困難となる事項
--	PC 道路橋の性能評価に直接関わらない項目	・施工条件，コンクリートの試験練結果などが該当する

注) 品質管理の評価手法は、既往の知見等^{3),4)}で確立されているものではないことから、実際の PC 道路橋の品質管理に携わった経験を有する技術者（プレストレストコンクリート建設業協会に所属する技術者）の主観、および非破壊検査技術関連の一部については（社）日本非破壊検査工業会に所属する企業のアンケートを基にグレード分けを実施した。

なお、品質管理手法は、一つの項目に対して複数となる場合もある。複数となる場合や、手法の選定理由について補足が必要な項目に対しては補足説明を記載した。

(2) 品質管理手法の分析結果

品質管理項目を評価した結果を工種ごとに表 2.3.3～2.3.10 に示す。

表 2.3.3 品質管理項目および事後の確認の可・否の評価 (事前調査および確認)

工 種	細 目	確 認 項 目	品質管理 手法の分類	事後の確認
事前調査 および確認	設計図書確認	形状、寸法、材料、鋼材 (配置, ランク) 等の計算結果や 図面・数量との整合性	●, ○ ※1)	--
	施工条件調査	施工条件 (架設条件・施工条件の調査)	●	--
※1) 設計図書の確認では、現場施工条件と設計図書との整合性や、標準設計などとの比較、 そして概算数量や必要鋼材量と図面の整合性等をチェックする作業の「●」と、 計算結果や図面・数量の妥当性や整合性を試算により照査・チェックする「○」 を示す。				

表 2.3.4 品質管理項目および事後の確認の可・否の評価 (型枠・支保工)

工 種	細 目	確 認 項 目	品質管理 手法の分類	事後の確認
型枠 支保工	型枠・支保工の耐力	型枠・支保工の耐力計算	○	--
		地盤耐力 (平板載荷試験、レベル による沈下量測定等)	△	--
	出来形	寸法検測 (組立精度)	●	--

表 2.3.5 品質管理項目および事後の確認の可・否の評価 (鉄筋工)

工 種	細 目	確 認 項 目	品質管理 手法の分類	事後の確認
鉄筋工	受入れ検査	試験成績表	◆	□
		材料試験 (強度試験等)	△	□
		検寸	●	--
		キズ、発錆状況 (断面欠損)	●	◎
	加工形状	寸法検測	●	--
	配置・組立	配置間隔・径・本数	●	◎
		結束状況・結束箇所	●	--
		継手位置、重ね継手長	●	◎
		施工時に暴露環境にある差筋の防 錆処理	●	--
	かぶり	スパーサーサイズ(かぶり) と配 置個数 (m2当たり)	●	◎

表 2.3.6 品質管理項目および事後の確認の可・否の評価 (PC組立工)

工 種	細 目		確 認 項 目	品質管理 手法の分類	事後の確認
PC組立工	受入れ検査	シーす	試験成績表	◆	□
			検寸	●	--
			キズ、発錆状況	●	◎
		PC鋼材	試験成績表	◆	□
			強度試験	△	□
			キズ、発錆状況	●	◎
		定着具	試験成績表	◆	□
			強度試験	△	□
		配置・組立	シーす	棚筋の高さ・間隔	●
	平面位置(ピッチ・あき)			●	--
	本数			●	◎
	PC鋼材		本数	●	◎
			余長(緊張ジャッキが配置可能な長さ)	●	--
			配置高さ	●	◎
	定着具		補強筋(グリッド筋など)	●	--

表 2.3.7 品質管理項目および事後の確認の可・否の評価 (コンクリート工)

工 種	細 目	確 認 項 目	品質管理 手法の分類	事後の確認
コンクリート工	試験練	配合、強度	△	--
	受入れ検査	運搬時間 (練混ぜ開始から荷卸しまでを原則として1.5時間以内)	◆	--
		配合 (伝票)	◆	□
		塩化物総量	△	▲
		単位水量	△	▲
		スランプ	△	--
		空気量	△	▲
		場内運搬	●	--
	打込み・養生	締固め、打継ぎ時間 (コールドジョイント)	●	▽
		スランプロス	○, △ ※2)	--
		温度	●	--
		仕上げ状況	●	▽
		湿潤状況、養生期間	●	--
	打継処理	打継目位置	●	▽
		レイタンス	●	▽
	マスコン	材料、配合、打継ぎ目の位置、養生方法	○ ※3)	▽
施工時の強度	脱枠時、PC緊張時、 σ_{28}	△	□ ※4)	

※2) コンクリート標準示方書・施工編に従い、打ち込み最小スランプを基準として、以下のスランプロスを考慮し算出するため「○」とする。(①現場まで運搬によるロス、②ポンプ圧送や配管による現場内の運搬によるロス、③環境温度によるロス、④時間経過によるロス等。)
打込み時の最小スランプはコンクリート標準示方書・施工編を目安とし、JIS A 1101に基づくスランプ試験を実施する「△」を示す。

※3) マスコンは、経験等から温度ひび割れが懸念される場合、温度応力解析などにより、材料、配合、打継目位置、養生方法などによりひび割れの発生を制御することが可能。

※4) 施工時の強度は、各材齢の強度試験結果を書類で確認する。

表 2.3.8 品質管理項目および事後の確認の可・否の評価 (PC 緊張工)

工 種	細 目		確 認 項 目	品質管理 手法の分類	事後の確認
PC緊張工	緊張前準備		緊張計算	○	□
			キャリブレーション	△	--
			試験緊張	○, △ ※5)	--
	緊張時		緊張管理(導入緊張力管理) (マノメーター示度、PC鋼材の 伸びにより緊張管理図作成)	●, △ ※6)	■, □ ※7)
			変形拘束物の有無	●	--
			セットロス	●	--
		グループ管理	○	--	
		管理限界の修正	○	--	
<p>※5) コンクリート道路橋施工便覧に従い、摩擦係数をパラメーターとして緊張管理を行う場合、PC鋼材の見かけのヤング係数および摩擦係数を定められた試験緊張方法から理論計算により算出するため「○」および「△」とする。また、十分な試験データがあるような単純ポストや試験緊張が困難な片引き施工の場合は、試験緊張を省略し施工便覧に示す値を使用してもよい。</p> <p>※6) コンクリート道路橋施工便覧に従い、定められた方法で緊張管理を実施するため「△」とする。また、実際の緊張管理はジャッキの圧力計やPC鋼材の伸び量を目視や写真によって管理するため「●」とする。</p> <p>※7) 施工時に導入した緊張力は書類で確認できるため「□」とする。しかし、何らかの原因で緊張力が低下した影響まで考慮は出来なく、事後に残存緊張力を確認する非破壊検査技術は現時点では確立されていないため「■」とする。</p>					

表 2.3.9 品質管理項目および事後の確認の可・否の評価 (グラウト工)

工 種	細 目		確 認 項 目	品質管理 手法の分類	事後の確認
グラウト工	材料受入れ	水	上水道以外は以下を管理 (懸濁物質量、溶解性蒸発残量 物、塩化物イオン量、セメントの 凝結時間の差、グラウトの圧縮強 度の比)	△	□
		セメント	試験成績表(材料種類, 成分等)	◆	□
		混和材	試験成績表	◆	□
	品質管理試験		レオロジー試験	△	--
			単位容積質量	△	--
			ブリーディング率	△	--
			体積変化率	△	--
			圧縮強度	△	▲
			塩化物イオン量	△	▲
	注入時		注入量の確認(風袋)	●	□
		排出口からの流出確認	●	--	

表 2.3.10 品質管理項目および事後の確認の可・否の評価 (出来形工)

工 種	細 目	確 認 項 目	品質管理 手法の分類	事後の確認
出来形	出来形	寸法検測	●	▽
		たわみ、そり量管理	●、○ ^{※8)}	▽
	コンクリートの品質	表面状態 (ひび割れ)	●	◎、▽ ^{※9)}
		強度確認	△	◎、▲ ^{※10)}
<p>※8) 施工時に目視等で計測したたわみやそり量と、計算式から求まる結果を比較する事で管理が可能なため「●」および「○」とする。</p> <p>※9) 表面状態 (ひび割れ) の確認は、目視により確認可能なため「▽」とする。また、目にみえないようなひび割れでも、非破壊検査技術 (赤外線法、弾性波法、AE法、電磁波レーダー法) によって確認可能であり「◎」とする</p> <p>※10) 完成後のコンクリート強度は、反発硬度法 (テストハンマ) などの非破壊検査手法で確認が可能なため「◎」とする。また、テストピースを抜き取ることで、より正確な強度確認も可能なため「▲」とする。</p>				

(3) 集計結果及び考察

本研究で実施した評価方法は、個々の品質管理手法の信頼性・精度・重要度までを網羅して品質管理体系を評価しているものではないが、PC道路橋を建設する際に実施されている工種毎、項目毎に分類された品質管理項目を各方法の実施頻度数量(度数)として集計し品質管理体系を大枠の評価を試みた。

品質管理手法の分類の集計を表 2.3.11 に、事後の確認のグレード分けを表 2.3.12 に示す。

表 2.3.11 品質管理手法の分類の集計 (単位：項目数)

項目 \ 管理手法の分類	目視, 写真等による	理論計算等による	JIS等の検査手法が規格化される直接的な手法	現場で書類, 成績表の整合確認する間接的手法	集計
事前調査・確認	2	1	0	0	3
型枠・支保工	1	1	1	0	3
鉄筋工	8	0	1	1	10
PC・組立工	10	0	2	3	15
コンクリート工	7	2	7	2	18
PC緊張工	3	4	3	0	10
グラウト工	2	0	7	2	11
出来形	3	1	1	0	5
集計	36	9	22	8	75

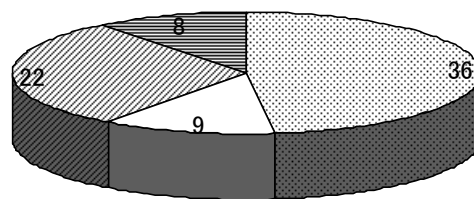
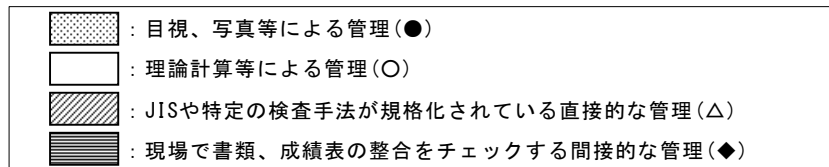
表 2.3.12 品質管理項目の事後確認のグレード分け集計 (単位：項目数)

項目 \ 分類	目視により確認可 ▽	非(微)破壊検査技術により検証可 ◎	テストピースを採取により確認可	竣工図書等の書類により確認可	事後確認が容易でない	集計	性能評価に直接関係しない事項 --	総集計
事前調査・確認	0	0	0	0	0	0	2	2
型枠・支保工	0	0	0	0	0	0	3	3
鉄筋工	0	4	0	2	0	6	4	10
PC・組立工	0	6	0	5	0	11	4	15
コンクリート工	5	0	3	2	0	10	7	17
PC緊張工	0	0	0	2	1	3	6	9
グラウト工	0	0	2	4	0	6	5	11
出来形	3	2	1	0	0	6	0	6
集計	8	12	6	15	1	42	31	73

1) 品質管理手法の分類について

品質管理手法の分類したものを度数で整理したグラフを図 2.3.2 に示す。PC 道路橋の建設に際し実施される品質管理項目の約半数(36/75 項目)は工事関係者による目視、写真等による管理手法に拠っていることが解る。

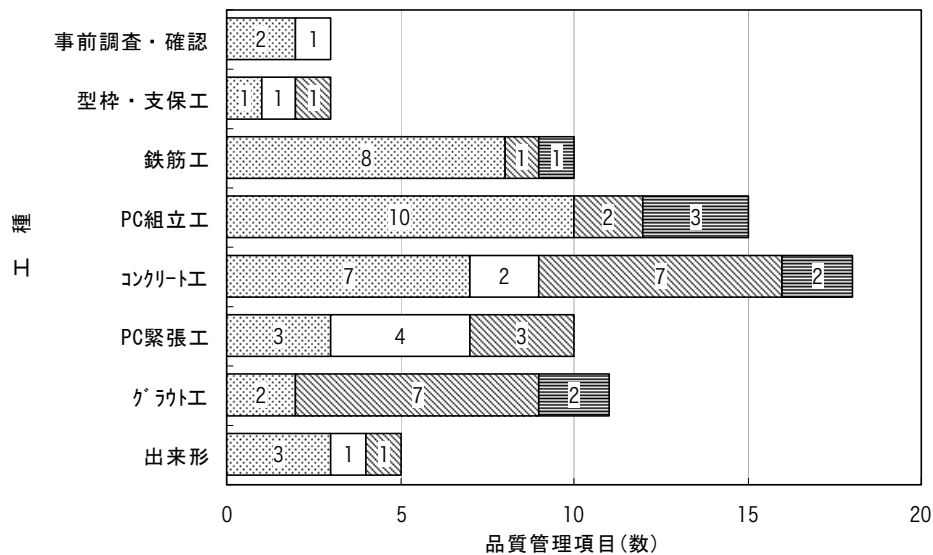
また、規格化されている管理手法の多くはコンクリート工 (7/75 項目) およびグラウト工(7/75 項目)に関する項目であり、コンクリートおよびグラウト施工に対する過去の規格化への取組みが反映された結果となっている^{9),10)}。



品質管理手法の分類 全体数の集計

a. 全体数の集計

品質管理手法の分類



b. 工種類毎の集計

図 2.3.2 品質管理手法の分類結果の数量による集計

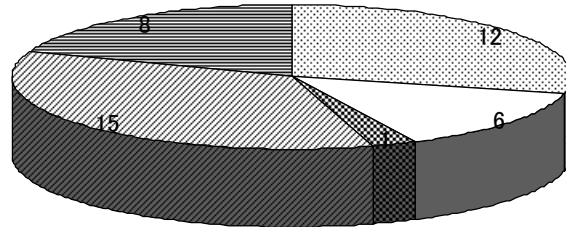
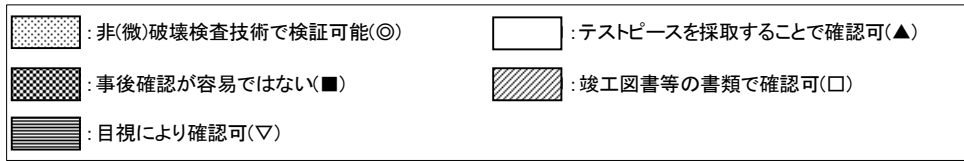
2) 事後（構造物完成後）の評価について

品質管理項目について、PC 道路橋の性能に関わる項目を構造物完成後に確認することが可能か否か評価した結果を図 2.3.3 に示す。

現状の PC 道路橋に対する点検体系は主に目視調査によっているが、近年、コンクリート構造物に対する非破壊検査手法は多く開発されており、目視で確認できない内部の状況についても事後の確認ができるようになりつつある。グラウト工についてもグラウト未充填に関わる問題¹¹⁾から、現在、非破壊検査技術で調査する手法が各方面で多く取組まれており、検査技術は確立されつつある。

事後(構造物完成後)の管理項目のうち容易に確認できない事項(■)は、PC 緊張工だけであり、PC 緊張工において導入したプレストレス力の状態を構造物完成後に確認できるようになれば、精度に課題はあるものの現在の品質管理項目の全ての品質について事後の確認が可能となると言える。

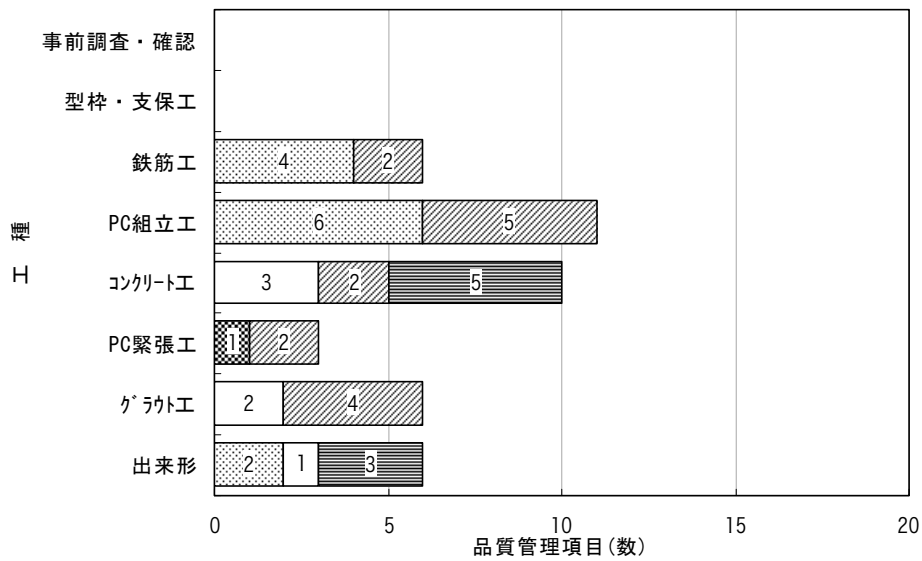
プレストレス導入力は参考資料-2 に示すような入念なプロセス管理により保証している。しかしながら適切に導入されたプレストレス力も参考資料-3 に示す事例からも読みとれるように、様々な要因により経時的に減少する。減少要因の多くは設計で考慮されているが、材料劣化など設計で考慮されない要因もある。着目時点のプレストレス力はその時の PC 道路橋の耐荷性能、耐久性能に大きく影響するため、その時のプレストレス力を非破壊で測定できるようになれば、PC 道路橋の維持管理において適切な対応を行うことが可能になると考えられる。



事後確認のグレード分け集計

a. 全体数の集計

事後確認の評価



b. 工種類毎の集計

図 2.3.3 品質管理項目の事後の確認の容易さのグレード分けの集計

(4) まとめ

現状の品質管理において、2.2で整理した要求品質や要求性能が構造物の建設時および供用時においてどのように定量的に品質保証されるのかを評価した。

PC道路橋の性能は、施工時に行われる施工段階ごとの品質管理により間接的に保証されているが、構造物完成後においても、構成材料個々が保有している性能および状態は、精度に課題があるものの既往の技術により一定レベルで確認できることがわかった。構造物の性能を直接的に評価する方法はないが、構成材料の性能を反映した復元設計を行うことにより、構造物の性能を間接的に評価することができる。しかしながら、復元設計を行うためにはプレストレス力を推定する必要があるが、現時点の知見ではその確認方法がないのが現状である。2.2の整理で分かるとおり、特に耐久性の確保においてはプレストレス力の状態をある一定レベルで把握できなければ、構造物としての性能評価は困難となる。

したがって、PC道路橋のプレストレス力の定量的な確認手法の開発と、維持管理への適用に向けた展開方法の整備が望まれる。ただし、確認手法としては非破壊検査に限定する必要はなく、目視等でもプレストレス力を推定することが可能であれば、一定レベルで性能を評価できると考えられる。

2.4 PC 道路橋の維持管理

(1) 維持管理の現状

現状の維持管理は、直轄の道路橋に対しては、昭和 63 年より旧建設省土木研究所がとりまとめた「橋梁点検要領（案）土木研究所資料 2651 号 昭和 63 年 7 月」（以下「S63 点検要領」という）をもとに統一的な点検が始められ、現在は「橋梁定期点検要領(案) 国土交通省道路局 平成 16 年 3 月¹²⁾」（以下、「直轄点検要領」という）に従って実施されている。

本研究では、維持管理段階にある PC 道路橋の現状把握を目的として、平成 16 年 3 月から平成 20 年 3 月までの間に直轄点検要領に基づいて実施された定期点検の結果から、既にデータベース化されているものを対象として代表的な損傷形態の抽出などの分析を行った。

(2) 既設 PC 道路橋の点検の現状

直轄点検要領における定期点検のフローを図 2.4.1 に示す。

定期点検の内容は、「損傷状況の把握」と「対策区分の判定」に大別されており、「損傷状況の把握」は原則としてマニュアルに示す定義に従って客観的事実としての損傷の拡がりや深さなどの性状「損傷程度の評価」として記録する。この記録は点検技術者の主観に左右されない客観的データとして損傷発生傾向の分析や複数回の結果を比較することで劣化進行程度の評価や予測モデルの検討などを行うための基礎データとなる。

一方、部材毎の特徴や橋の構造的特徴、損傷に至った原因、架橋環境条件などによって、同じ損傷であっても橋の性能に及ぼす影響の程度や補修や補強等の対策実施の是非、内容、適切な実施時期などは同じでない。そのため直轄点検要領では「損傷程度の評価」とは独立して「対策区分の判定」を行うこととされている。

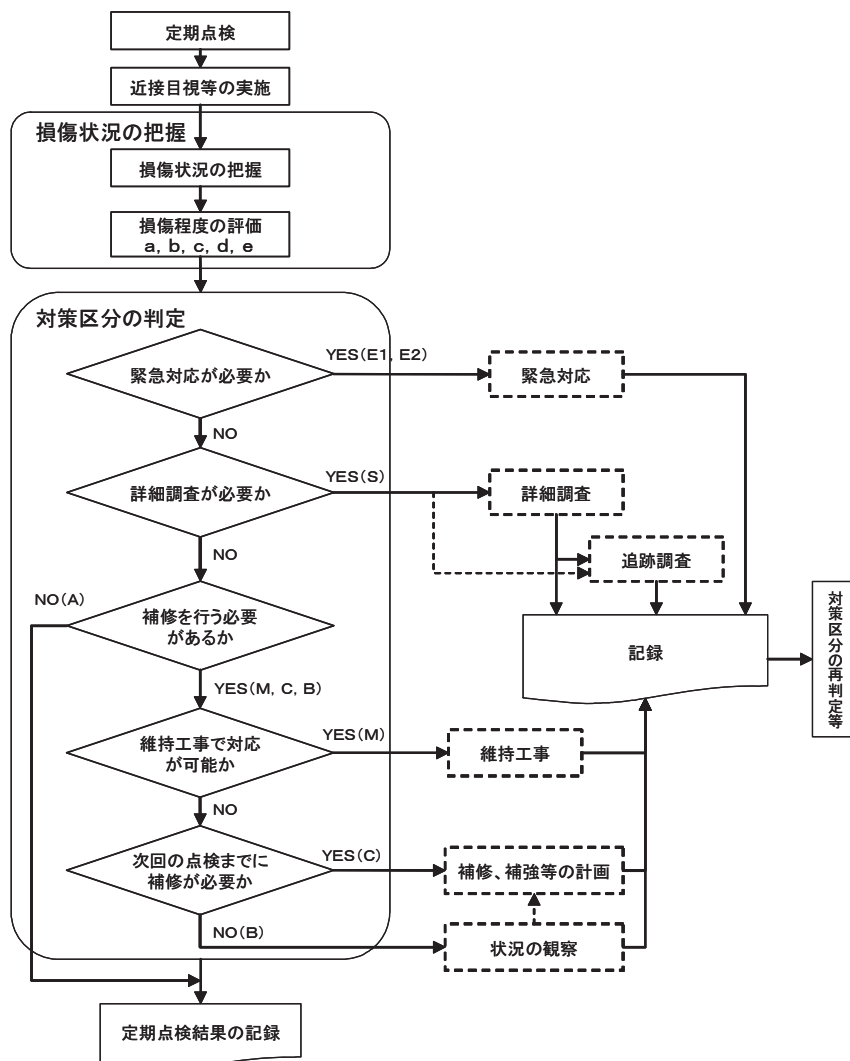


図 2.4.1 損傷評価および対策の流れ

「対策区分の判定」は損傷の程度に関係なくその影響による対策実施の緊急性、供用安全性への影響の程度などの観点から、判定する橋梁技術者が管理者に対して対応の考え方について一次的な診断を提示するものであることから、マニュアル的な判定要領は存在せず、様々な情報を総合的に判断して判定を行う技術者が自らの知見に基づいて判定することとなる。そのため直轄点検要領では、判定の適切性を依存することになる従事技術者については適当な経験や技術的知見を有するものを当てることが想定されている。表 2.4.1 に対策区分の判定内容を示す。

表 2.4.1 対策区分の判定内容

判定区分	判定の内容
A	損傷が認められないか、損傷が軽微で補修を行う必要がない。
B	状況に応じて補修を行う必要がある。
C	速やかに補修等を行う必要がある。
E1	橋梁構造の安全性の観点から、緊急対応の必要がある。
E2	その他、緊急対応の必要がある。
M	維持工事で対応する必要がある。
S	詳細調査の必要がある。

このような考え方による直轄点検要領における、損傷程度の評価を行うにあたって用いられる PC 部材に関連するひび割れパターンの分類と定義を表 2.4.2、2.4.3 および図 2.4.2 に示す。

これらは一般的なコンクリート橋の上部構造を対象に、既往の実績から代表的なひびわれ形態を、発生原因や耐荷力などの部材の性能の観点からその内容が異なる可能性のあるものは別のパターンとして認識できるように分類されたものである。しかしながら構造物自体が現在どのような状態に在るかといった PC 道路橋の性能や機能との関係における健全度を直接的に判断するものとはなっていない。

橋梁のような複雑な構造系では、それぞれの部材毎にその状態が橋の性能に及ぼす影響の程度やその内容は一概ではなく、ある部材のみに着目してその性能状態を評価したとしても橋の性能との関係に関連づけることは容易ではない。またコンクリート構造はコンクリートと補強鋼材からなる複合構造であり、その耐荷機構も一種類の材料だけからなる部材と異なり複合的なものである。さらにコンクリート自体もセメント・骨材など複数の素材から構成されている不均一で複雑な構造体であり、PC 構造の場合には最も重要な要素であるプレストレスの存在そのものもその性能を左右する要因となっている。

こうしたことから目視による外観調査が主体の定期点検は、膨大な量の道路橋の維持管理において、経済性、効率性、信頼性など総合的には現在のところ極めて合理的な方法と考えられているものの、原因の推定や詳細な性能状態の判断においては目視点検で得られる情報だけでは十分でなく、目視に頼ることなく必要な情報は把握されなければならないと考えられる。

表 2.4.2 ひび割れの種類

①主桁直角方向の桁下面および側面の鉛直ひびわれ（支間中央部）	⑪ウェブと上フランジの接合点付近の水平方向のひびわれ
②主桁下面縦方向ひびわれ	⑫桁全体に斜め 45° 方向のひびわれ
③主桁直角方向の桁下面および側面の鉛直ひびわれ（支間 1/4 部）	⑬変断面桁の下フランジの PC 鋼材に沿ったひびわれ
④支点付近の腹部に斜めに発生しているひびわれ	⑭主桁上フランジ付近
⑤支承上桁下面・側面に鉛直に発生しているひびわれ	⑮PC 連続中間支点付近の反曲部の PC 鋼材に沿ったひびわれ
⑥支承上から斜めに側面に発生しているひびわれ	⑯PC 連続中間支点付近の反曲部の PC 鋼材曲げ上げに直交するひびわれ
⑦ゲルバー部のひびわれ	⑰主桁の腹部に水平なひびわれ
⑧連続桁中間支点部の上側の鉛直ひびわれ	⑱PC 鋼材定着部付近
⑨亀甲状、くもの巣状のひびわれ	⑲PC 鋼材が集中している付近
⑩桁の腹部に規則的な間隔で鉛直方向のひびわれ	⑳シースに沿って生じるひびわれ

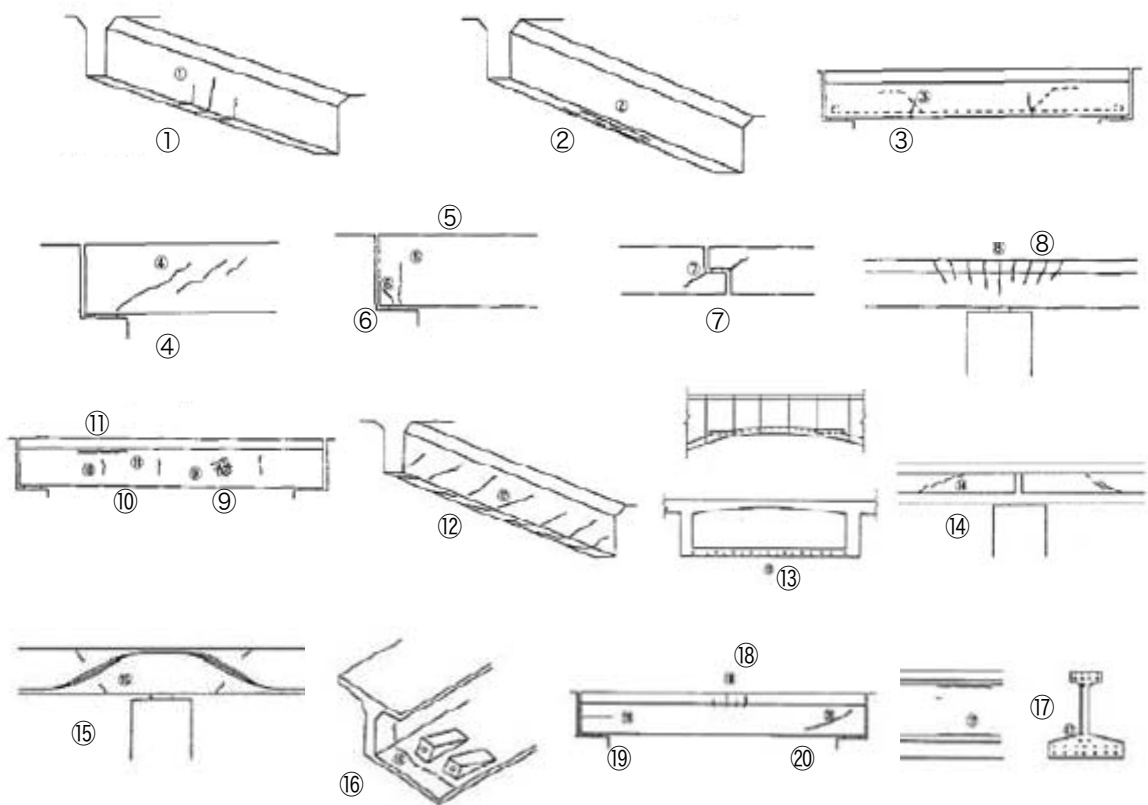


図 2.4.2 ひび割れの種類

表 2.4.3 ひび割れの「損傷程度の評価」の定義 (PC 構造物)

区分	最大ひび割れ幅	最小ひび割れ間隔 (目安値)
a	損傷なし	
b	小 : 0.1mm 未満	小 : 0.5m 間隔以上
c	小 : 0.1mm 未満	大 : 0.5m 間隔未満
	中 : 0.1mm 以上~0.2mm 未満	小 : 0.5m 間隔以上
d	中 : 0.1mm 以上~0.2mm 未満	大 : 0.5m 間隔未満
	大 : 0.2mm 以上	小 : 0.5m 間隔以上
e	大 : 0.2mm 以上	大 : 0.5m 間隔未満

(3) 既設 PC 道路橋の点検結果

1) 分析対象

図 2.4.3 は、直轄点検要領に基づいて定期点検された橋梁のうち、これまでに点検結果がデータベース化されている 31,430 橋の構造形式別橋梁数の比率を示している。このうち PC 橋は 13,853 橋と 44.1% を占めている。これらの点検結果から PC 橋上部構造に関するものを今回の分析対象とした。また、対象となった PC 橋の構造別の橋梁数を表 2.4.4 に示す。

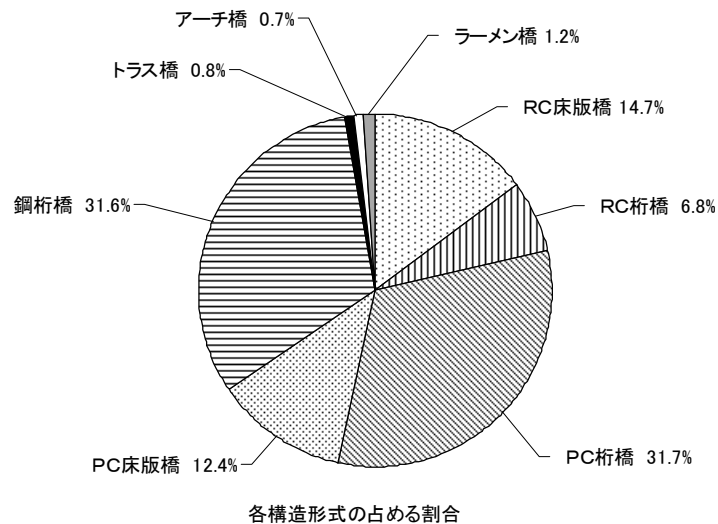


図 2.4.3 構造形式別の橋梁数比率

表 2.4.4 分析対象の PC 構造橋梁数

橋梁形式		データ橋梁数
PC 桁橋	プレテン T 桁	6,269
	ポステン T 桁	3,359
	プレテン箱桁	90
	ポステン箱桁	251
PC 床版橋	プレテン床版橋	2,497
	プレテン中空床版	917
	ポステン中空床版	470

2) 損傷種類と発生の傾向

PC 橋上部構造（主げた、横げた、床版）で確認された損傷の種類ごとの発生率を図 2.4.4 に示す。

全体としては「漏水・遊離石灰」の発生が最も多く、径間数で示した損傷発生率は 6 割を超えている。次いで「剥離・鉄筋露出」と「ひび割れ（床版ひび割れ）」が続いてい

る。さらに次いで多い損傷である「うき」が最終的には剥離に至ることが多いと考えると PC 道路橋の上部構造では「ひびわれ」「漏水・遊離石灰」「うき・剥離・鉄筋露出」が主たる損傷形態と言える。径間数による整理であるため、これらの 3 形態の損傷の併発の状況や、相互の関係の有無等については不明である。

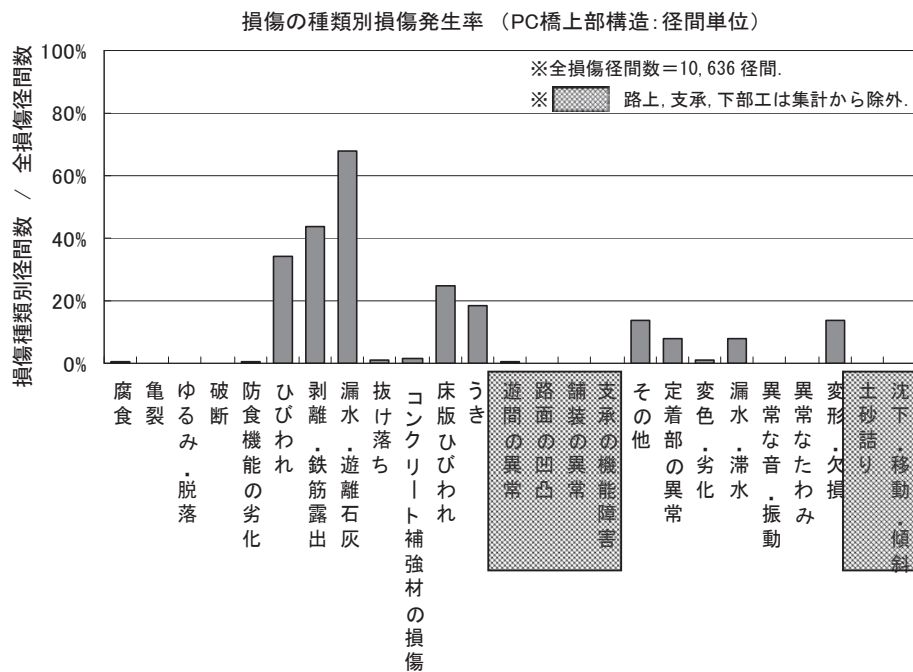


図 2.4.4 PC 橋上部構造に発生している損傷の比率

3) ひび割れ損傷の傾向と代表事例

図 2.4.5 は、PC 橋全体で主桁において確認されたひび割れ種類と発生径間数および損傷程度を整理したものである。

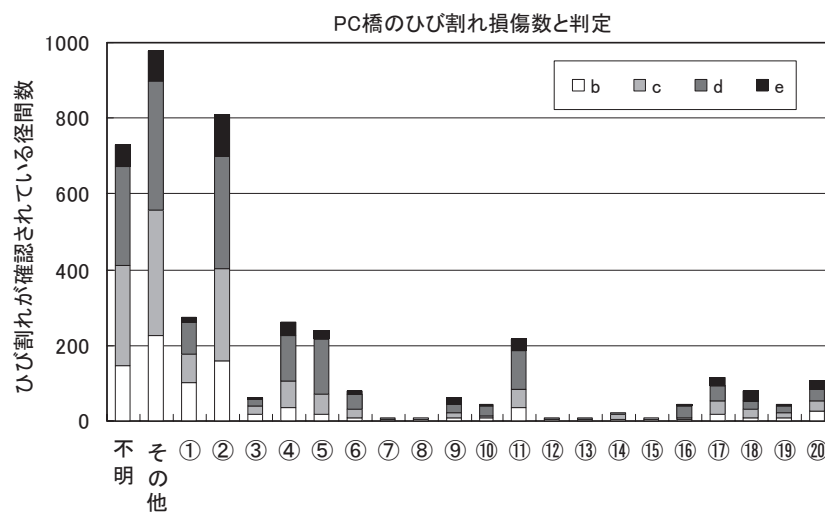


図 2.4.5 PC 橋のひび割れの分類

ひび割れでは「②：主桁下面縦方向（橋軸方向）ひび割れ」の頻度が突出していることが分かる。その他「①：主桁下面および側面の直角方向ひび割れ」、「④：支点付近の斜めひび割れ」、「⑤：支承上の主桁鉛直ひび割れ」が比較的多い。

なお、「その他」や「不明」に分類されるものの頻度が非常に多く、現直轄点検要領のひび割れパターン分類では代表的なPC道路橋のひび割れパターンがカバーできていないか、パターンの定義が不適切であり点検技術者が要領の意図したパターン分類に区分しにくい状況にある可能性がある。

このように形式的に分類したひび割れ発生頻度の傾向だけから詳細な考察を行うことには限界があり、同じパターンに分類されているひび割れに対しても原因の推定などの考察には配筋の状況やひびわれ位置、当該部材の構造的特徴、荷重の条件などの個別の様々な条件についての詳細を考慮する必要がある。

ここでは、PC部材としての健全性の観点から代表的なひび割れパターンの特徴¹³⁾について整理する。

・「②：主桁下面縦方向（橋軸方向）ひび割れ」

活荷重や死荷重などの鉛直荷重による曲げ、せん断によって主げたに発生する応力や変形で生じる可能性のあるひびわれと直交する方向のひびわれであり、主げたの軸方向に配置されている鉄筋やPC鋼材の腐食が原因である可能性が高い。

主げた下面は降雨が直接あたらず滞水も生じないため、疑われる鋼材の腐食の原因には、極端なかぶり不足や上面やPC定着部などからの桁内部への雨水の浸入、PC鋼材のグラウト充填不良などが考えられる。腐食によってPC鋼材に断面減少や破断が生じるとプレストレスの減少などにより耐荷力性能に深刻な悪影響が生じる可能性があることから、このタイプのひび割れでは、内部鋼材の健全性の確認と腐食原因となった雨水等の水分の侵入経路の特定とその改善が重要である。

このタイプのひび割れの例を以下に示す。



写真 2.4.1 PC主げた下面の縦方向のひび割れ

・「①：主桁下面および側面の直角方向ひび割れ」

活荷重や死荷重などの鉛直荷重による曲げによって主げたに発生する応力や変形に伴って発生する可能性があるひび割れであり鉛直荷重に対して相対的に耐荷力が不足している可能性が疑われる。すなわちプレストレス導入量の不足や減少、あるいは過積載車両の通過など過大な鉛直荷重の载荷などが主な要因と考えられる。

このタイプのひび割れの例を以下に示す。



写真 2. 4. 2 PC 主げたの鉛直方向ひび割れ

・「④：支点付近の斜めひび割れ」

鉛直荷重に起因するせん断力による場合、支点付近から支間中央部に向かう方向のひび割れとなることが多い。せん断に対する相対的な耐荷力が不足している可能性がうたがわれる。すなわちプレストレス導入量の不足や減少、あるいは過積載車両の通過など過大な鉛直荷重の载荷などが主な要因と考えられる。なお、曲げひびわれと異なり、せん断ひび割れ発生後は部材の構造特性によっては大きく耐荷力が損なわれたり、急速に破壊が進む可能性もあることから注意が必要な損傷と考えられる。

このタイプのひび割れの例を以下に示す。



写真 2. 4. 3 支点付近の斜めひび割れ

・「⑤：支承上の主桁鉛直ひび割れ」

桁端部では支承（およびそれに伴うアンカーボルトや補強鉄筋）やPC鋼材の定着部の存在から、複雑な応力状態となりやすい部位である。また支承の機能不全を生じると設計では考慮されていない異常な応力が生じることもある。また内部の鋼材が密に輻輳する部位であるためにコンクリートの充填など施工品質の確保が困難となりやすい部位でもある。それらの影響からひび割れの発生が比較的多いものと推定されるが、それぞれのひび割れの原因については複数の要因が関連する可能性もあり一概でないと考えられる。

このタイプのひび割れの例を以下に示す。



写真 2.4.4 PC 主げた桁端部近傍の鉛直ひび割れ

以上のように、点検結果の分析からは、ひび割れのうち、PC鋼材の腐食やプレストレス不足などプレストレス状態の異常に繋がる可能性のあるひび割れが比較的多く占める結果となっている。

4) その他の変状

PC 道路橋では、3)で例示した頻度の高い代表的なひび割れ以外にも、構造安全性や耐久性に影響を及ぼす可能性のある様々な変状が確認されている。

写真 2.4.5 は、塩害や中性化などにより鉄筋が腐食し、コンクリートが剥落、鋼材が露出した事例である。原因としては、想定外の環境条件も考えられるが、かぶり不足、締固め不良など設計とおりに適切な施工がなされていない可能性もある。今後、鋼材腐食の進行による断面減少や破断により、曲げひび割れや異常たわみの発生など曲げ耐力の低下やこれに起因した支承や伸縮装置の不具合などによる使用性能の低下が考えられる。

写真 2.4.6 は、PC 鋼材が腐食し、ひび割れが生じた事例である。原因としては、グラウトの充填不良や未充填と、これに対しての水分、空気、塩分などの供給が考えられる。プレストレスは鉛直分力によりせん断耐力にも寄与しており、PC 鋼材の腐食・破断により曲げ耐力の低下による曲げひび割れの発生や異常たわみに加え、せん断耐力の低下によるせん断ひび割れの発生や、これにより脆性的に破壊することも考えられる。



写真 2.4.5 コンクリートの剥落、鋼材の腐食・露出



写真 2.4.6 PC 鋼材に沿ったひび割れ

写真 2.4.7 は、支間中央部にひび割れが多数発生した事例である。原因としては、建設時に想定しなかった交通量の増加や過重積載による過大な応力状態、コンクリートの強度不足やヤング係数の異常、プレストレス量の不足などによる曲げ耐力の低下、異常たわみなどが考えられ、ひび割れの発生により断面剛性も低下しているものと思われる。

写真 2.4.8 は間詰め部の漏水などによる鋼材の腐食、写真 2.4.9 は間詰め床版の抜け落ちであり、グラウトの充填不良や未充填による横締め PC 鋼材が腐食・破断や施工不良などにより、プレストレスが不足したために起きた事例である。本事例は、著しく耐荷力を低下させるものではないが、床版の抜け落ちにより、橋梁は一時的に使用できなくなり緊急な補修が必要となるほか、交通事故などの原因となりえる事例である。近年の JIS 規格に準拠した PCT 桁のように、主げたフランジ端部に勾配が設けられている場合には、仮に PC 緊張力が喪失したり、不足しても間詰めコンクリートは形状的に大きな塊としては落下することはほとんど考えられないが、古い時代のものでは間詰め部に桁と連結する鉄筋が十分でないだけでなく、桁フランジ端面が鉛直になっており大きなコンクリート塊として落下する危険性があるため注意が必要である。

写真 2.4.10 は、セグメント目地に開きが生じた事例である。セグメント目地はフルプレストレスで設計されており、本事例は何らかの原因によってプレストレス量が不足しているものと思われる。プレストレス量の不足から曲げ耐力の低下は明らかであり、緊急な補修・補強が必要と思われる。



写真 2.4.7 支間中央部のひび割れ



写真 2.4.8 間詰め部の漏水



写真 2.4.9 間詰め床版の抜け落ち



写真 2.4.10 セグメント目地開き

写真 2.4.11 は、PC 鋼材の腐食や破断がみられる事例である。コンクリート部材の内部鋼材の腐食は、当初よりのかぶり不足、桁等の上部からの雨水の浸入、ひびわれからの水分の侵入、PC 鋼材の定着部からの雨水の浸入、セパレータやスペーサーなど内部鋼材と繋がった金属材料の暴露部やかぶり不足部からの腐食の進行、など様々な要因がある。PC 部材の場合、内部の PC 鋼材が腐食に至ると断面減少や破断に繋がる恐れがあり、速やかな対策が必要である。また塩害等の補修で表面被覆を行った場合にも、内部の腐食環境が完全に改善されない場合には被覆下で腐食が進行することもある。このような場合、腐食が著しく進行して大きなひび割れや錆び汁の発生、断面欠損が生じるまで外観に顕著な変状が現れない例も見受けられることから注意が必要と考えられる。



写真 2.4.11 PC 鋼材の腐食, 破断

写真 2.4.12 は、横締め PC 鋼材定着部を後埋めしたコンクリート部に著しい遊離石灰の析出や錆び汁の発生などの変状が見られた事例である。後埋めコンクリートは先打コンクリートとの一体性が十分でない事例があり、早期にひびわれやうきが生じて内部の定着部の鋼材に腐食を生じることがある。また定着部から内部の鋼材一般部に水分が浸入したり、錆が進行すると極端な場合には鋼材の破断事故に至る例もある。さらにポステン方式の場合でグラウトが十分に行われていないか鋼材との付着に問題がある場合では、鋼材の腐食や破断によって PC 鋼材の突出や飛び出しの事例も報告されている。第三者被害の防止の観点からも重大な変状であり、定着部の異常については一般部のコンクリート変状と区別して内部鋼材の状態を含めて適切な評価と対策が必要と考えられる。



写真 2.4.12 PC 定着部の後埋め部からの遊離石灰、後埋め部の剥離

写真 2.4.13 は、路下の火災の影響を受けた PC 道路橋の事例である。長時間火炎にさらされたことから主げたや RC 床版には多数のひび割れ、変色、かぶりコンクリートの浮き、剥落が見られたものである。

このように高温環境に長時間暴露された場合には、コンクリートそのものの変質に加えて鉄筋等の鋼材とコンクリートの付着性能の低下、PC 緊張力の減少、PC 鋼材や鉄筋の機械的性能の低下の可能性がある。しかしこれらの影響範囲を正確に推定することは現時点では困難であり、燃焼規模、時間、燃焼物などから温度上昇の程度と範囲を推定し、既往の実験結果などの知見に照らして健全性の評価を行うこととなる。この際にも、コンクリート強度などはコア試験等で確認が可能であるが、プレストレスの状態については載荷試験などによっても評価は困難な場合が多く、PC 状態の非破壊的な推定手法の確立が望まれていると言える。



写真 2.4.13 火炎に長時間曝された PC げた

このようにこれまでに建設された PC 道路橋には、様々な変状が見られるものがある。施工段階で計画したプレストレスを確実に導入し、供用段階ではこれが維持されるよう適切な管理を行うことは重要であるが、過大な荷重や地震、火災など不測の外力や厳しい環境条件にさらされるなど、必ずしも設計段階で想定するものと実際の橋が長い供用期間中におかれる条件は同じではないことから、維持管理段階の任意の時期にプレストレス状態や内部鋼材の状態を把握できる手法が確立されることが強く望まれる。そのときプレストレス力による内力状態が部材の性能に大きく関係している PC 部材では、特に既設構造物に悪影響を及ぼさずに必要な情報が取得できる非破壊・微破壊の手法が望まれる。

(4) PC 道路橋に対する検査技術の現状

1) PC 構造物に用いられる検査技術の実態

整理された既設のPC構造物でみられる損傷などの変状と設計思想やプロセス管理が中心にならざるを得ない施工品質管理の実態を考慮すると、既設PC道路橋の健全度等の状態評価を適切かつ合理的に行うためには目視点検の限界を補うことのできる非破壊検査技術によりこれを実現することが不可欠と考えられる。

ここではPC道路橋の健全度評価への適用が期待できる検査技術を概観するとともに、これまでにPC橋において実際に行われた健全度評価に関連する実験や研究について整理した。

コンクリート構造物の診断や調査に適用される非破壊試験法の例を表2.4.5に整理した。対象となる構造や適用条件などによって必ずしも十分な検査精度が得られるとは言えないが、既存の非破壊検査技術の活用だけでも確認できる項目は多い。

例えば、定期点検で顕在化している「漏水・遊離石灰」「剝離・鉄筋露出」等に対しては、補強鋼材のかぶり厚さや配置、コンクリートの内部欠陥、鋼材腐食状況などの把握によって、損傷が顕在化する以前にその発生を予見することができる。また「ひび割れ」に対しては、表面の幅とともに深さを知ることで影響の大きさを客観評価できる可能性がある。

また構造の全体的な状態に対しては、コンクリート強度や部材厚さ、部材剛性などを測定する既存技術があり、健全度評価のための情報を得ることができるといえる。

ただし、現在のところPC構造のプレストレスそのもの、つまり部材の応力状態やその変化を把握、評価するために有効な検査手法については、斜張橋のメインケーブルや外ケーブルなど露出したPCケーブルの張力（応力）を振動法や磁歪法で推定する技術が開発されている。またコンクリート内部に配置されるPC緊張材によるプレストレスについてはPC鋼棒の場合に定着部から直接弾性波を入力する方法などが検討されているものの、定着部のコンクリートの破壊を伴うことと精度上の問題から実用の観点からは課題も多い。またPCケーブルに対しては有力な技術が確立していないことが分かる。

なお、表中の下段A)~C)は、最新の非破壊検査技術の調査として(社)日本非破壊検査工業会に所属する非破壊検査を主業務とする企業121社に対して行ったアンケート結果から抜粋したものである。アンケートでは各社が保有するPC橋に関する非破壊検査技術について調査した。なおプレストレスそのものを検査対象としているとした技術は回答では得られなかった。

表 2.4.5 コンクリート構造物の非破壊試験法の例

非破壊検査手法	部材		コンクリート						鉄筋・PC鋼材					PC鋼材				
	部材剛性	振動特性	圧縮強度	部材厚さ	内部欠陥・空隙	浮き・剥離	ひび割れ深さ	荷重載荷履歴	応力	配置	かぶり厚さ	腐食程度	腐食位置	腐食速度	腐食環境		グラウト充てん	外ケーブル張力
荷重載荷（静的、動的）	○	○															橋体の変形・ひずみ・加速度等の測定	
反発硬度法			○														コンクリート表面の反発硬度を測定	
弾性波法	衝撃弾性波		○	○	○	○										○	伝搬速度、伝播時間、波形測定	
	超音波法		○	○	○	○	○										伝搬速度、伝播時間、波形測定	
	AE法							○									AE音源の探査	
電磁波法	電磁波レーダー法				○	○			○	○						○	電磁波パルスの反射波測定	
	電磁誘導法								○	○							誘導電流の変化を測定	
	放射線法（X線）								○							○	X線の透過画像の撮影	
	赤外線サーモグラフィ					○	○										赤外線センサによる表面温度分布測定	
電気化学的手法	自然電位法											○	○				自然電位測定により腐食状況・位置の評価	
	分極抵抗法												○				分極抵抗値の測定により腐食速度を評価	
	電気抵抗法													○			電気抵抗測定により腐食環境を評価	
振動法																○	ケーブル固有振動数測定による張力推定	
磁歪法																	○	磁歪現象による鋼材応力測定
A) デジタルX線検査システム									○							○	透過X線法：を画像記録媒体を利用してデジタル処理を行う	
B) 非破壊鉄筋腐食調査器											○		○				分極抵抗法：鉄筋界面の静電容量により腐食程度も把握可能	
C) パルス電磁力音響法			○						○								磁歪により鉄筋を振動させて発生した音響をAEセンサで受信	

2) PC 構造物の健全度評価に関する既往の研究

過去にPC橋に対して行われた健全度評価に関連する実験や現場計測の事例を文献により調査した。調査対象は参考資料-3 に示すとおりである。

PC橋の健全度の評価として多く行われていたのは、主に新設橋において荷重載荷や加振によって得られる橋体の応答の計測を行うものであり、主として設計との整合性をマクロ的に評価する観点のものである（調査文献 I-1~11）。このような方法では橋全体としての振動特性に変化が生じるような異常の有無は把握できる可能性があるものの、一部の部材のプレストレスの変状やひび割れの発生等による部材性能の低下などの詳細な健全度の評価は困難と考えられる。

プレストレス導入の評価に関するものとしては、既設橋での補強工事に際してプレストレス補強の効果を確認するために計測実施された事例が多い。追加導入されたプレストレス量の把握のために、橋体ひずみを計測したり（II-1,7 など）、外ケーブル張力の変化を振動法や磁歪法で計測したり（II-11~15 など）するものなどである。但し、いずれ

も計測開始後に新たに加えられるプレストレスの把握を行うものであり、これらの方法はあくまで計測前後の相対関係が把握できるものである。そのため既設橋の場合のように調査時点での残存プレストレス量や部材の応力状態が不明な対象に対してそれらの絶対値を推定することへの適用には問題があるものと考えられる。

既設部材に対して現有するプレストレスの量を直接に定量評価する内容としては、鉄筋切断法（Ⅱ-14）やスロットストレス法（Ⅱ-16～18）の適用があるが、これらの手法は構造一部の破壊を伴うものであるため、構造物の負担が大きく、適用可能な箇所や頻度には条件に応じて厳しい制約が課せられるものである。

以下に現在適用可能性のあるコンクリート部材の応力を推定するための代表的な技術について特徴を整理した。

① 応力解放法（コア解放法）¹⁴⁾

コンクリートに切り込み（コア）を入れその時に解放されるひずみから作用応力を推定する方法である。多くの機関で検討されている手法であるが、コンクリート材料の不均質性の考慮や、解放ひずみの中に含まれるコンクリートの収縮ひずみ（乾燥収縮、クリープ）を別途に推定することなどが必要である。また応力算定には部材の弾性係数も必要である。



写真 2.4.14 応力解放法実施状況

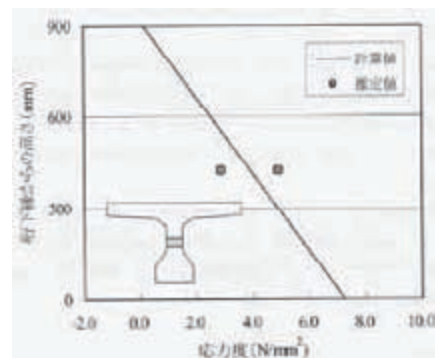


図 2.4.6 有効応力の推定値と計算値の比較

②鉄筋切断法¹⁵⁾

鉄筋切断法では、コンクリートを部分的にはつすることで鉄筋を露出させ、これを切断する。この際に開放されるひずみを測定することで、鉄筋位置におけるコンクリート応力を推定する手法である。鉄筋の解放ひずみには、プレストレスによるコンクリートひずみ以外に、コンクリートの収縮によるひずみ（乾燥収縮、クリープ）が含まれるためこれらを別途に推定しておく必要があるとされている。



図 2.4.7 鉄筋のはつり出し切断

③スロットストレス法¹⁶⁾

スロットストレス法は、コンクリートそのものの応力開放による手法である。切削したスロットの開放ひずみを測定する代わりに、フラットジャッキを用いて開放ひずみを復元させる。その復元力によってコンクリート応力を推定するものである。この手法ではコンクリートの弾性係数値が不要であることが特徴である。

室内試験結果では、実応力レベル $3\sim 3.5\text{N/mm}^2$ の範囲における応力推定誤差は $4\sim 8\%$ との報告がなされている。

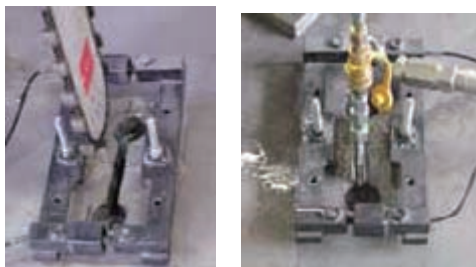


写真 2.4.15 削孔およびジャッキ配置状況

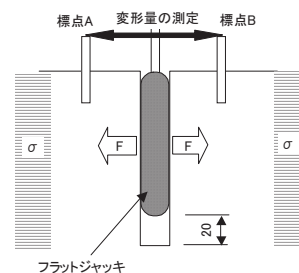


図 2.4.8 スロットストレス法概念図

④ケーブル張力の推定方法

斜張ケーブルや外ケーブルなどの張力を求める非破壊検査手法として、振動法と磁歪法による技術がある。これらはケーブル張力を把握し、これにより導入されるプレストレスを推定しようとするものである。

(振動法)

ロードセルなどの荷重計による直接的な計測によらずに、ケーブルの固有振動数を求めることで、弦理論を基本とした固有振動数と張力の関係により間接的に推定する方法である。ケーブル固有振動数の計測は、ケーブルの常時微動あるいはケーブルに強制的に付与した振動を加速度計で計測し、FFT法によって周波数分析を行い求めることができる。

(磁歪法)

磁歪現象を利用した鋼材の実応力測定方法で、磁歪型センサ (EM センサ)¹⁷⁾はコイルが設置された円筒構造となっており、センサ内空に非接触で鋼材を配置して測定を行う。外ケーブル方式 PC 鋼材に対して設置される場合が報告されており、測定には対象と同じ鋼材によるキャリブレーションが必要である。

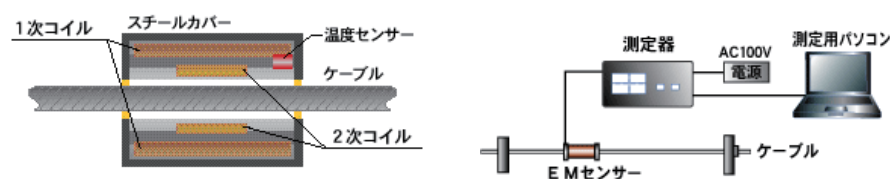


図 2.4.9 EM センサ設置イメージ

以上のように過去の研究や実橋への適用事例には残存プレストレスに着目した事例は少なく、また現時点では構造物に影響を与えず非破壊でプレストレスを評価できる適切な手法も見受けられない。

(5) まとめ

本節では維持管理の現状として PC 道路橋の損傷状況および定期点検について概観し、現在の健全度評価のための技術について調査を行った。

現在、PC 橋の維持管理のための点検の体系は点検要領によって整備されている。しかしながら点検結果からの健全さの評価や対策区分の判定においては、損傷そのもの評価はできていても、構造物としての PC 橋自体の状態や性能に対しての工学的な判断を行えるまでには至っていないと考えられる。経験的（感覚的）な評価に依存している部分も少なくないと思われ、点検の目的である保全行為の必要性判断や維持管理計画のための情報取得が必ずしも十分なものとはなっていないという課題がある。

【2章 参考文献】

- 1) (社)プレストレストコンクリート技術協会：PC 技術の変遷，平成 15 年 11 月
- 2) (社)プレストレストコンクリート建設業協会：PC 橋コンクリート施工管理の手引き(案)，平成 14 年 7 月
- 3) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート施工におけるリスク要因の発生確率調査研究委員会 報告書，平成 20 年 1 月
- 4) 鮫島，庄司，山本：コンクリート構造物の施工時における施工傷害・不具合の発生率に関する確立モデル，土木学会第 63 回年次学術講演会(平成 20 年 9 月)5-322, pp.643-644, 平成 20 年
- 5) 関東地方整備局：土木工事共通仕様書，平成 19 年 10 月
- 6) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編，平成 14 年 3 月
- 7) (社)日本道路協会：コンクリート道路橋施工便覧，平成 10 年 1 月
- 8) (社)プレストレストコンクリート技術協会：PC グラウトの設計施工指針，平成 17 年 12 月
- 9) 例えば、国土交通省大臣官房技術調査課長通達：「土木コンクリート構造物の品質確保について」平成 13 年 3.29
- 10) (社)プレストレストコンクリート建設業協会：PC グラウト&プレグラウト PC 鋼材 施工マニュアル(改訂版)，平成 18 年
- 11) 土木学会：PC 構造物の現状の問題点とその対策，コンクリート技術シリーズ No.52, 平成 15 年 6 月
- 12) 国土交通省道路局：橋梁定期点検要領(案)，平成 16 年 3 月
- 13) 国土交通省国土総合技術政策総合研究所：道路橋の定期点検に関する参考資料-橋梁損傷事例写真集-，平成 16 年 12 月
- 14) 二井谷：コンクリートに作用する有効応力の推定に関する研究 岡山大学大学院博士論文 平成 20 年 3 月
- 15) 横山,長田,室井,加藤：鉄筋切断法による実 PC 橋の残存プレストレス測定に関する検討,PC 技術協会第 13 回シンポジウム論文集,平成 16 年 10 月
- 16) 浅井,藤田,Diouron,宮本：フラットジャッキを併用した応力解放法によるコンクリート部材の現有応力測定,コンクリート工学,Vol42,No4,平成 16 年
- 17) 黒川,羅,Wang,嶋野：EM センサを用いた PC 梁緊張材の応力モニタリング実験，土木学会応用力学論文集,Vol.1,平成 14 年