

鉄筋による拘束がPC橋の持続荷重の評価に及ぼす影響に関する研究

国土交通省 国土技術政策総合研究所 正会員 狩野 武
 国土交通省 国土技術政策総合研究所 工修 玉越 隆史
 国土交通省 国土技術政策総合研究所 博(工) 白戸 真大

Abstract: With implementing seismic design for rare-scale earthquakes, reinforcement ratios increase in Prestressed Concrete (hereinafter, PC) bridges these days, affecting sustained loads. This study shows ongoing long-term experiments that have been measuring creep in PC beam specimens with different reinforcement ratios and arrangements since 2011. Measured creep factors and sensitivity analysis for bridge design results in terms of creep factors indicate that the influence of reinforcement restraint on sustained loads can considerably affect crack control design for present PC bridges.

Keywords: Reinforcement restraint, Sustained loads, Creep

1. はじめに

現行の道路橋示方書(以下, 道示)では, 乾燥収縮による不静定力を算出する場合に鉄筋比によって2種類の乾燥収縮度を用いていることにしているが, それ以外は鉄筋比の影響を考慮していない。しかし, 実際のPC橋の内力は, クリープや乾燥収縮による変形が内部に配置される鉄筋の剛性によって拘束されることの影響を多少なりとも受ける(以下, 鉄筋拘束という)。たとえば, 鉄筋量が多くなるにつれ実際のクリープ変形量や内部応力の状態は通常の設計計算で考慮しているものから乖離し, たとえばひび割れが生じやすくなるのが多くの研究により明らかにされている。

近年, 耐震設計法の改定やコンクリートの高強度化による部材断面の縮小, PRC構造の採用などにより, 以前と比較して断面内に配置される鉄筋比が大きくなる傾向にある。鉄筋比が大きい場合にはクリープや乾燥収縮によるコンクリートの変形に対する鉄筋拘束の影響が大きくなる。その結果, 設計計算で前提としていない変形やひび割れなどの主要因となることも懸念される。

本研究では, 鉄筋の拘束がクリープの評価に及ぼす影響に着目し, 持続荷重の大きさや軸方向鉄筋量, 横方向鉄筋量などをパラメータとした供試体のクリープ載荷実験についての長期計測を行ってお

表-1 各基準のクリープ予測式

基準	改訂年	クリープ式
道路橋示方書	昭和53年	$(t, t_0) = d_0 \cdot d(t - t_0) + f_0 \{ f(t) - (t_0) \}$
	平成24年	$(t, t_0) = d_0 \cdot d(t - t_0) + f_0 \{ f(t) - (t_0) \}$
コンクリート標準示方書[設計編]	平成3年	$(t, t_0) = d_0 \cdot d(t - t_0) + f_0 \{ f(t) - (t_0) \}$
	平成8年	$'cc = \cdot 'cp / Ect$ $'cc(t, t', t_0) = [1 - \exp\{-0.09(t - t')^{0.6}\}] \cdot ('cr + 'dc)$ $'bc = 15(C + W)^{2.0}(W/C)^{2.4}(\log_e t')^{-0.67}$ $'dc = 4500(C + W)1.4(W/C)4.2$ $\times [(\log_e(V/S)/10)]^{-2.2}(1 - RH/100)^{0.36}t_0^{-0.30}$
	平成24年	$'cc = \cdot 'cp / Ect$ $(t, t') / cp' = [4W(1 - RH/100) + 350] / (12 + f'c(t')) \times \log_e(t - t' + 1)$
EN	1992年	$(t, t_0) = o \cdot \{ (t - t_0) / (H + t - t_0) \}^{0.3}$ $o = RH \cdot (fcm) \cdot (t_0)$ $RH = \{ 1 + (1 - RH/100) / (0.1 \cdot h^{1/3}) \cdot (35/fcm)^{0.7} \} \cdot (35/fcm)^{0.2}$
AASHTO	2012年	$(t, t_i) = 1.9 \cdot k_s \cdot k_{hc} \cdot k_f \cdot k_{td} \cdot t_i^{-0.118}$ $k_s = 1.45 - 0.0051(V/S) \quad 1.0 \quad k_{hc} = 1.56 - 0.008H$ $k_f = 35 / (+ f'ci) \quad k_{td} = t / (61 - 0.58f'ci + t)$

表-1の記号: 表-2参照

表-2 クリープの影響パラメータ

基準	改訂年	パラメータ	
道路橋示方書	昭和53年	材齢: コンクリート材齢 (t), 載荷材齢 (t ₀)	
	平成24年	環境: コンクリート温度 (T), 相対湿度 (RH)	
	コンクリート標準示方書[設計編]	平成3年	配合: セメント種類 部材: 仮想厚さ (A/u)
		平成8年	材齢: コンクリート材齢 (t), 載荷材齢 (t'), 乾燥開始材齢 (t ₀) 環境: コンクリート温度 (T), 相対湿度 (RH) 配合: 単位セメント量 (C), 単位水量 (W), 水セメント比 (W/C) 物性: 載荷時ヤング係数 (E _{ct}) 部材: 体積表面積比 (V/S)
	設計時 [配合 未定]	環境: 環境条件 (屋内 or 屋外) 配合: 骨材種類 (普通 or 軽量) 部材: 鉄筋比 (無筋 or 1%)	
	平成24年	材齢: コンクリート材齢 (t), 載荷材齢 (t') 環境: コンクリート温度 (T), 相対湿度 (RH) 配合: 単位水量 (W), 水セメント比 (W/C) 物性: 載荷時ヤング係数 (E _{ct})	
EN	1992年	材齢: コンクリート材齢 (t), 載荷材齢 (t ₀) 環境: コンクリート温度 (T), 相対湿度 (RH) 配合: セメント種類 部材: 仮想厚さ (A/u)	
AASHTO	2012年	材齢: コンクリート材齢 (t), 載荷材齢 (t ₀) 環境: 相対湿度 (RH) 部材: 仮想厚さ (A/u)	

り、過去2年にわたって報告している^{1), 2)}。本論文では、その後の計測データも含めた計測結果を既往の道示やコンクリート標準示方書(以下、コン示)などの予測式と比較し、設計基準との関係について検証を行う。また、実橋モデルを対象とした解析を行い、鉄筋の拘束による影響度合いの検証を行う。

2. 供試体によるクリープ載荷実験

2.1 供試体の計画

(1) 基準の現状

クリープ載荷実験の計測結果を既往の基準と比較するために各基準のクリープ予測式について整理をした。各基準のクリープ予測式を表-1に示す。道示では、昭和53年から変更されていない。一方、コン示では、平成3年までは道示と同様であったが、平成8年と平成24年に大きく改定され、表-2のように配合条件やヤング係数などを考慮するようになった。クリープ係数を算出する際に使用する特性値については、道示(H24)、コン示(H8・H24)、欧米の基準(EN1992、AASHTO)で異なる。本実験の特性値を、表-3に示す。また、この条件で算出した各基準のクリープ係数を表-4と図-1に示す。1年後のクリープ係数は道示(H24)の値が最も大きく、コン示(H8)の2.2倍(=2.11/0.95)である。またコン示(H8)では5年以降のクリープ係数が一定値(=1.01)に収束しており他基準に比べて最も収束が早く、また最終のクリープ係数が小さい。

(2) 供試体のタイプ

筆者らは、平成23年度に配置鉄筋比をパラメータにした梁供試体のクリープ載荷実験による長期挙動の計測を開始した。さらに平成24年度には、PC鋼棒を偏心配置した供試体などの追加を行った。図-2および表-5に平成23年度の実験供試体(H23供試体)の概要を、図-3および表-6に平成24年度の実験供試体(H24供試体)の概要を示す。供試体は、軸方向鉄筋量および横方向鉄筋量、鉄筋の偏心配置、持続荷重の大きさ、PC鋼材の偏心配置をパラメータとして変化させ、PC鋼棒により持続荷重を作用させた状態での挙動を継続的に計測した。なお、軸方向鉄筋量および横方向鉄筋量は、実橋に配置される最小・最大量程度を想定して設定した。軸方向鉄筋比3.4%は、耐震設計によって箱桁の下床版(t=250mm)にD25が125mm間隔で配置される程度の鉄筋量である。

表-7にコンクリートの配合を示す。使用したコンクリートは、実橋に用いられるコンクリートを想定し、設計基準強度を40N/mm²、セメントの種類を早強セメントとした。なお、H23供試体とH24供試体は製作の都合上、異なるプラントのコンクリートを使用したため配合や骨材が異なっており、コンクリートの違いによる影響の有無を確認するため、H23供試体とH24供試体で共通の供試体を製作し比較することとした。コンクリート打設後、材齢3日目に脱型、5日目にプレストレスを導入し持続荷重を

表-3 クリープ係数の算出に用いる特性

特性値	基準					今回の実験 (シ-ス)	備考
	日本		欧州	米国			
	道示 H24	コン示 H8	コン示 H24	EN 1992	AAS HTO		
材齢	載荷材齢					5日	
	乾燥開始材齢					3日	
環境	コンクリート温度					17	
	相対湿度					58%	
配合	セメント種類					早強	
	単位セメント量					393kg/m ³	
	単位水量					157kg/m ³	
	W/C					40%	
物性	圧縮強度					40.6N/mm ²	載荷時
						48.8N/mm ²	材齢28日
	ヤング係数					23.5kN/mm ²	載荷時
部材	仮想部材厚					390mm	= 2.6
						300mm	k = 2
						150mm	k = 1
	体積表面積比					150mm	k = 1

表-4 クリープ係数

載荷後日数	7日 (1週)	14日 (2週)	28日 (4週)	90日 (3ヶ月)	180日 (半年)	365日 (1年)	1825日 (5年)	3650日 (10年)
道示(H24)	0.45	0.63	0.90	1.42	1.74	2.11	2.71	2.90
コン示(H8)	0.24	0.33	0.46	0.71	0.85	0.95	1.01	1.01
コン示(H24)	0.66	0.87	1.09	1.48	1.71	1.95	2.49	2.72
EN1992	0.52	0.63	0.77	1.07	1.28	1.49	1.85	1.93
AASHTO	0.31	0.43	0.59	0.91	1.05	1.15	1.24	1.25

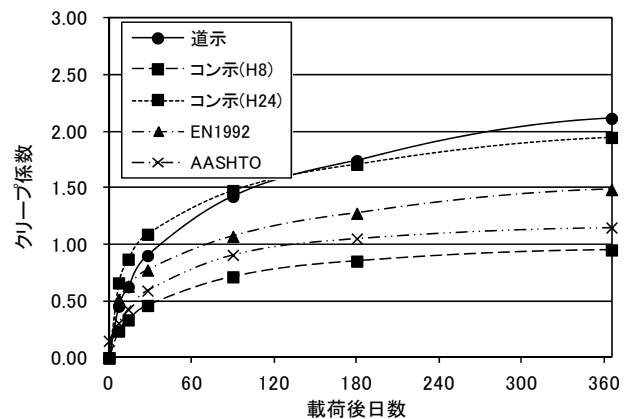


図-1 各基準のクリープ係数の経時変化

作用させた。脱型直後に供試体側面にアルミテープを貼付け，側面からのコンクリートの乾燥を防ぐことで，体積表面積比(V/S)を一般的なPC橋と同程度の150mmと設定した。

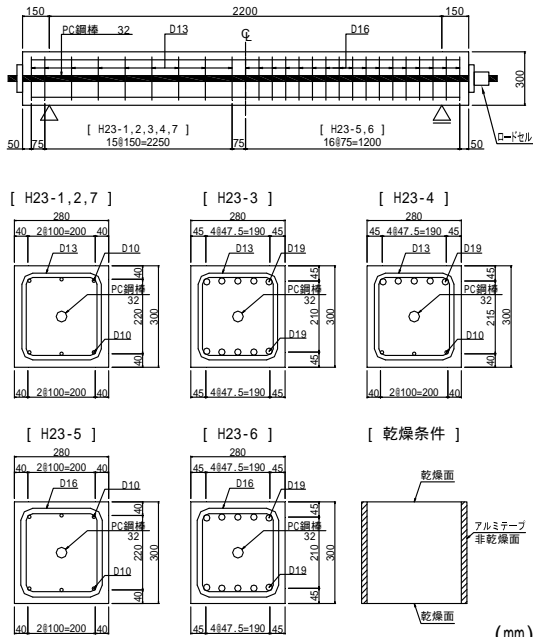


図-2 実験供試体 (H23年度)

表-5 実験ケース (H23年度)

CASE	着目	緊張力 (応力度)	鉄筋配置	鉄筋比 (ρ_s)
H23-1	基本ケース	569kN (6.9N/mm ²)	軸筋上段:D10×3本 軸筋下段:D10×3本 横筋 : D13ctc150	0.5% 0.5% 0.6%
H23-2	持続荷重の大きさの影響	285kN (3.4N/mm ²)	軸筋上段:D10×3本 軸筋下段:D10×3本 横筋 : D13ctc150	0.5% 0.5% 0.6%
H23-3	軸方向鉄筋の影響	569kN (6.9N/mm ²)	軸筋上段:D19×5本 軸筋下段:D19×5本 横筋 : D13ctc150	3.4% 3.4% 0.6%
H23-4	軸方向鉄筋偏心配置の影響	569kN (6.9N/mm ²)	軸筋上段:D19×5本 軸筋下段:D10×3本 横筋 : D13ctc150	3.4% 0.5% 0.6%
H23-5	横方向鉄筋の影響	569kN (6.9N/mm ²)	軸筋上段:D10×3本 軸筋下段:D10×3本 横筋 : D16ctc75	0.5% 0.5% 1.9%
H23-6	軸方向鉄筋・横方向鉄筋の影響	569kN (6.9N/mm ²)	軸筋上段:D19×5本 軸筋下段:D19×5本 横筋 : D16ctc75	3.4% 3.4% 1.9%
H23-7	基本ケース (プレストレス無し)	0kN (0N/mm ²)	軸筋上段:D10×3本 軸筋下段:D10×3本 横筋 : D13ctc150	0.5% 0.5% 0.6%

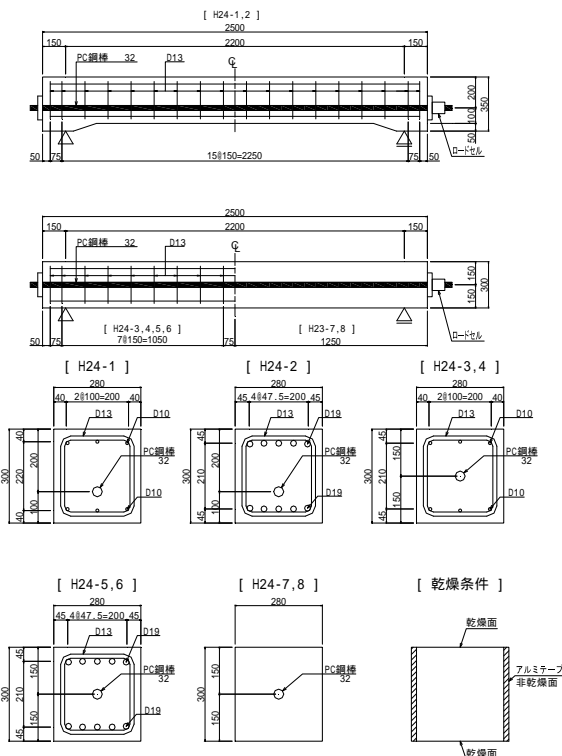


図-3 実験供試体 (H24年度)

表-6 実験ケース (H24年度)

CASE	着目	緊張力 (応力度)	鉄筋配置	鉄筋比 (ρ_s)
H24-1	PC鋼材偏心 軸筋基本ケース	569kN (上縁:0.0N/mm ² 下縁:13.3N/mm ²)	軸筋上段:D10×3本 軸筋下段:D10×3本 横筋 : D13ctc150	0.5% 0.5% 0.6%
H24-2	PC鋼材偏心 軸筋大	569kN (上縁:0.0N/mm ² 下縁:13.3N/mm ²)	軸筋上段:D19×5本 軸筋下段:D19×5本 横筋 : D13ctc150	3.4% 3.4% 0.6%
H24-3	基本ケース	569kN (6.9N/mm ²)	軸筋上段:D10×3本 軸筋下段:D10×3本 横筋 : D13ctc150	0.5% 0.5% 0.6%
H24-4	基本ケース (プレストレス無し)	0kN (0N/mm ²)	軸筋上段:D10×3本 軸筋下段:D10×3本 横筋 : D13ctc150	0.5% 0.5% 0.6%
H24-5	軸筋大	569kN (6.9N/mm ²)	軸筋上段:D19×5本 軸筋下段:D19×5本 横筋 : D13ctc150	3.4% 3.4% 0.6%
H24-6	軸筋大 (プレストレス無し)	0kN (0N/mm ²)	軸筋上段:D19×5本 軸筋下段:D19×5本 横筋 : D13ctc150	3.4% 3.4% 0.6%
H24-7	無筋	569kN (6.9N/mm ²)	軸筋上段: - 軸筋下段: - 横筋 : -	0.0% 0.0% 0.0%
H24-8	無筋 (プレストレス無し)	0kN (0N/mm ²)	軸筋上段: - 軸筋下段: - 横筋 : -	0.0% 0.0% 0.0%

表-7 コンクリートの配合

供試体	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)						
						水	セメント	細骨材	粗骨材	高性能AE減水剤	減水剤	AE剤
H23年度	15	8.0	4.5	40	44.6	157	393	780	996	3.14	-	-
H24年度	15	8.0	4.5	43	50.0	157	365	890	921	-	3.10	3.65

持続荷重はP C鋼棒(32)の緊張力によって与え、設定した緊張力に対する誤差が±3%程度となるよう定期的に緊張力の調整を行った。計測項目は、外気温、湿度、P C鋼棒の緊張力、コンクリートおよび鉄筋のひずみ、供試体の変位量とし緊張力載荷直前から計測を開始した。H23供試体の計測データは、平成23年11月にプレストレスを導入してから平成26年2月までの約830日分、H24供試体の計測データは、平成25年2月にプレストレスを導入してから、平成26年2月までの約370日分である。

2.2 クリープ係数の評価

クリープ載荷実験の結果を以下に示す。

図-4～図-8は、埋込型ひずみ計の計測値より得られたクリープ係数を示す。クリープひずみの値は、持続荷重を作用させた供試体で得られたひずみ値(クリープひずみ+乾燥収縮ひずみ)から同一配筋の無載荷供試体で得られた乾燥収縮ひずみを差し引くことで評価した。また、クリープ係数は1日毎のひずみ増分をその時のコンクリート応力度で除し載荷時のヤング係数を乗じて算出した。図-4は、コンクリート配合の影響を比較したものである。H23供試体とH24供試体のひずみ量は実験結果からほぼ同程度であったが、鉄筋ひずみから算出したクリープ係数は1年後で1.06と1.40の乖離があった。クリープ係数算出用のヤング係数に違い(2.47×10⁴N/mm²と3.23×10⁴N/mm²)があり、ヤング係数が同じであればクリープ係数は同程度である。図-5は、コンクリートに導入した軸力の影響を比較したもので、導入軸力がクリープ係数に与える影響はわずかであるといえる。図-6は、軸方向に配置する鉄筋量の違いを比較したもので、軸方向鉄筋の配筋量が多いとクリープ係数が小さくなる傾向があるといえる。図-7は、横方向に配置する鉄筋量の違いを比較したもので、横方向鉄筋の配筋量がクリープ係数に与える影響はわずかであるといえる。図-8は、鋼材配置(偏心量)の違いを比較したもので、鋼材配置がクリープ係数に与える影響はわずかであるといえる。

図-9は、鉄筋ひずみや鉄筋の断面積・ヤング係数・偏心量を式(1)(2)に代入して鉄筋拘束力(軸力N・曲げモーメントM)を算出したものである。これを用いて、鉄筋拘束の影響を控除すると、H24-5のコンクリートひずみから算出したクリープ係数がやや小さいが、その他のクリープ係数は、図-10に示すように軸方向鉄筋の配筋量にかかわらず同程度である。

$$\begin{aligned} \text{軸力} \quad N(t) &= \sigma_{st}(t) \times A_s \\ &= \{ \varepsilon_{st}(t) - \varepsilon_{ss}(t) \} \times E_s \times A_s \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{曲げモーメント} \quad M(t) = \sigma_{st}(t) \times A_s \times e_{ss} \quad (2)$$

$\varepsilon_{st}(t)$: 鉄筋累加ひずみ(全ひずみ) , A_s : 鉄筋断面積

$\varepsilon_{ss}(t)$: " (乾燥収縮分) , E_s : 鉄筋ヤング係数

上筋と下筋の影響の合計で算出 , e_{ss} : 鉄筋偏心量(換算断面)

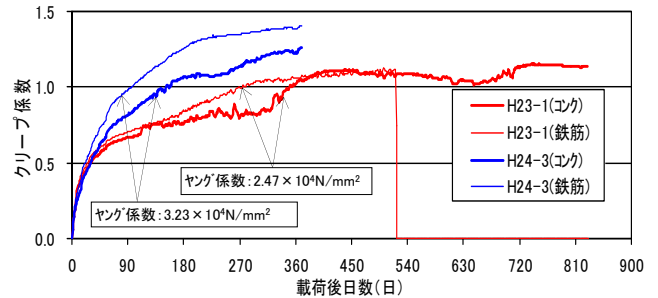


図-4 配合の影響

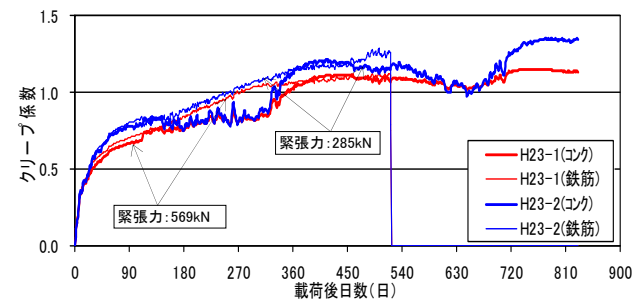


図-5 導入軸力の影響

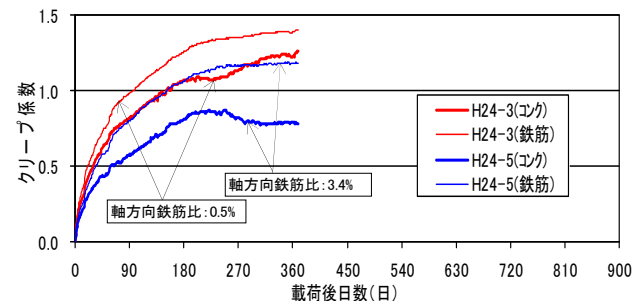


図-6 軸方向鉄筋量の影響

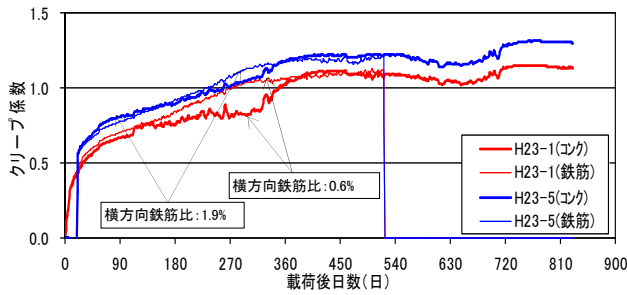


図-7 横方向鉄筋量の影響

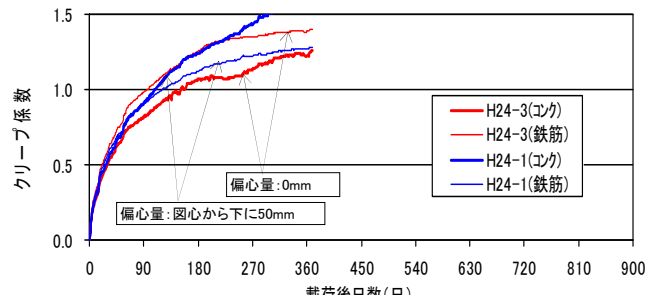


図-8 鋼材偏心量の影響

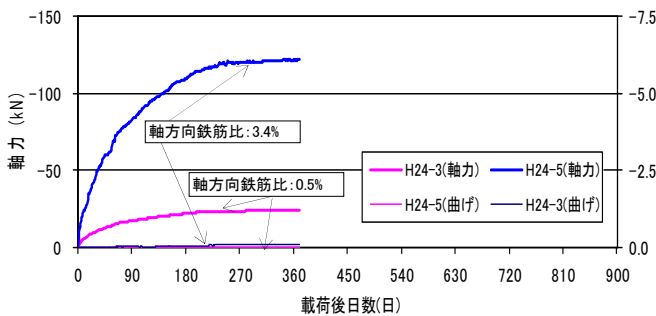


図-9 鉄筋拘束力 (鉄筋ひずみから算出)

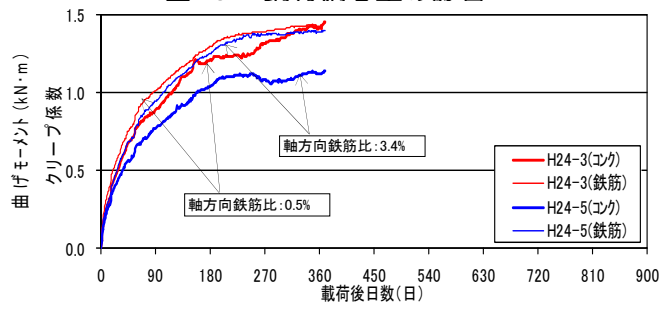


図-10 軸方向鉄筋の影響 (鉄筋拘束力を控除)

図-11は、本実験の結果から乾燥収縮および鉄筋拘束の影響を控除したクリープ係数を、各基準により算出したクリープ係数と比較したものである。軸方向鉄筋量 (H24-3 : 3.4%, H24-5 : 0.5%, H24-7 : 0.0%) の違いにかかわらず、クリープ係数は、1年後で1.3程度[1.13~1.44]である。これは、道示[2.11]の約6割、コン示(H8)[0.95]の1.3倍程度で、欧米のEN1992[1.49]やAASHTO[1.15]に近い結果となった。

3. 実橋モデルによる鉄筋拘束の影響評価

3.1 解析概要

断面に配置されている鉄筋が実橋の応力状態に与える影響を把握することを目的として、道示に従って設計された3径間連続ラーメンのモデル橋(図-12)を対象とした検討を行った。架設方法は張出し架設を想定し、施工ステップを考慮した変位法による解析³⁾⁴⁾によってコンクリートの応力度を算出した。

解析ケースは、：道示のクリープ係数で鉄筋拘束を考慮しないケース、：ケースに対して鉄筋による拘束を考慮したケース、：ケースに対してクリープ係数を約0.5倍としたケースとした。この理由は、供試体試験による約2年間(H23供試体)の実測クリープ係数が道示に従い算出したクリープ係数の0.4~0.6倍の範囲にあり、平均すると0.5倍程度であった、および、欧米の基準のクリープ係数にも近いためである。設定した鉄筋配置は、耐震設計で決定される鉄筋量を想定しているた

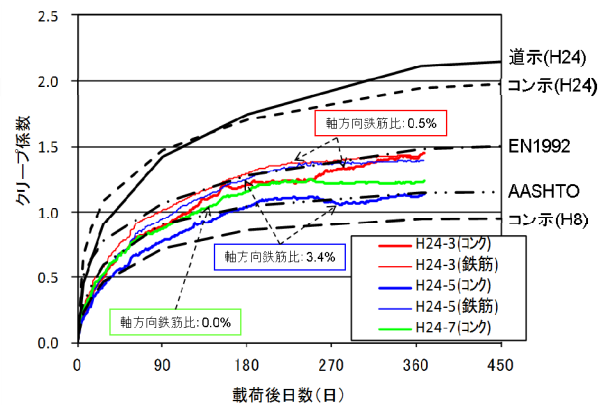


図-11 クリープ係数の比較

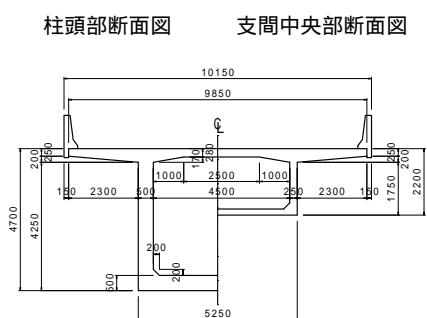
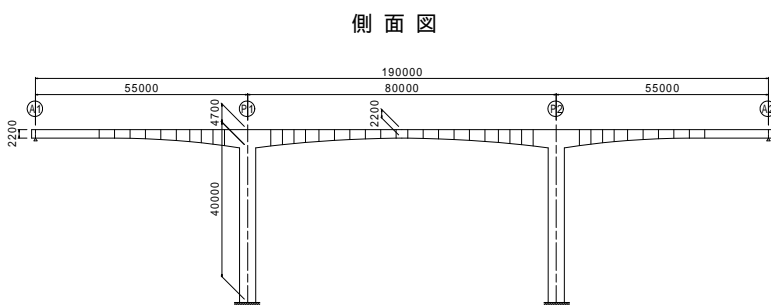


図-12 検討対象橋梁

め部位ごとに鉄筋量が異なるが、鉄筋比は最大で 3.7% (側径間の下床版に D25 を配置)、最小で 0.6% (柱頭部付近の下床版) となり、実験供試体で設定した鉄筋比の範囲とほぼ同等である。

3.2 実橋モデルにおける検討結果

本検討は、ケース 1 で道示の P C 構造に対するコンクリートの許容曲げ引張応力度を満足するように P C 鋼材量を設定し、ケース 2 はこれと同じ P C 鋼材量で試算を行った。図-13 に死荷重時および設計荷重 + 温度時の主桁下縁の応力度を示す。死荷重時の応力度に着目すると、ケース 1 およびケース 2 で曲げ引張応力度が発生した。設計荷重 + 温度時に着目すると、ケース 1 では許容曲げ引張応力度 2.0N/mm^2 以下であるが、ケース 2 の支間中央では -2.48N/mm^2 、側径間では -2.70N/mm^2 と許容曲げ引張応力度を超過する結果となった。また、ケース 1 においても側径間では -2.30N/mm^2 と許容曲げ引張応力度を超過する結果となった。このように、通常的设计計算において考慮していない鉄筋拘束の影響によって、実構造物では設計で想定していない応力状態となる可能性があることが確認された。また、鉄筋拘束に加えて、本実験の結果と同程度のクリープ係数を用いた場合でも引張側に移行することが確認された。耐震設計などによって断面内に多くの鉄筋が配置される場合には、鉄筋拘束の影響を考慮した設計が必要であると考えられる。

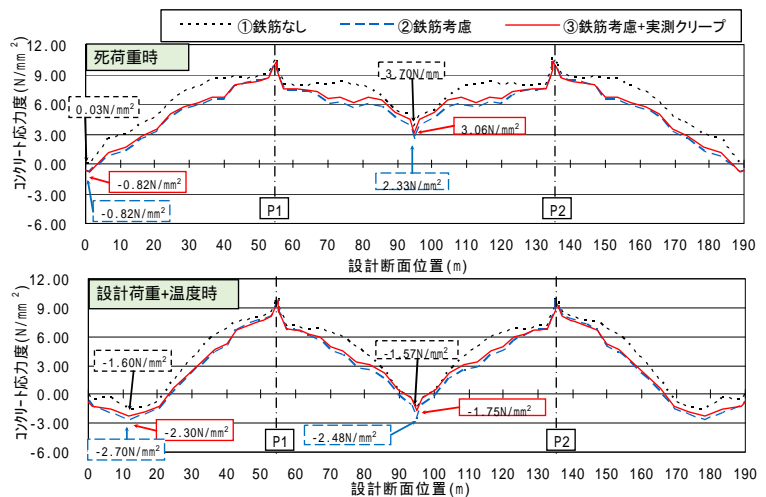


図-13 断面下縁応力度

に着目すると、ケース 1 では許容曲げ引張応力度 2.0N/mm^2 以下であるが、ケース 2 の支間中央では -2.48N/mm^2 、側径間では -2.70N/mm^2 と許容曲げ引張応力度を超過する結果となった。また、ケース 1 においても側径間では -2.30N/mm^2 と許容曲げ引張応力度を超過する結果となった。このように、通常的设计計算において考慮していない鉄筋拘束の影響によって、実構造物では設計で想定していない応力状態となる可能性があることが確認された。また、鉄筋拘束に加えて、本実験の結果と同程度のクリープ係数を用いた場合でも引張側に移行することが確認された。耐震設計などによって断面内に多くの鉄筋が配置される場合には、鉄筋拘束の影響を考慮した設計が必要であると考えられる。

4. まとめ

- (1) 各基準のクリープ予測式で算出した値を比較すると、道示のクリープ値は、コン示(H8)の 2 倍以上であり、欧米基準は両者の中間である。
- (2) コンクリートのひずみは、軸方向鉄筋量が多いほど小さくなるが、横方向鉄筋量の影響は小さい。
- (3) 鉄筋拘束の影響を控除したクリープ係数は、軸方向鉄筋量の違いにかかわらずほぼ同じであり、本実験の結果では、EN1992 または AASHTO のクリープ係数と近い値である。
- (4) 本稿の実橋モデルにおける主桁応力に着目した場合については、配筋量が多い場合、鉄筋拘束の影響による応力度は無視できないレベルとなることがわかった。
- (5) 本稿の実橋モデルにおいて、クリティカルになる断面の主桁応力に着目した場合については、実験値のクリープ係数と鉄筋拘束の組合せ、または、道示のクリープ係数かつ鉄筋拘束を考慮する組合せで計算した結果、後者が安全側の設計結果を与える。

なお、本研究は国土技術政策総合研究所と(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会の共同研究として実施されたものである。また、筆者(狩野)は三井住友建設株より出向中である。

参考文献

- 1) 吉川, 玉越, 北村, 横井: 鉄筋配置が P C 構造物の持続荷重に及ぼす影響に関する研究, 第21回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp393-396, 2012.10.
- 2) 吉川, 玉越, 北村: P C 橋の持続荷重に及ぼす鉄筋拘束力の影響に関する研究, 第22回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp437-440, 2013.10.
- 3) 本間, 森田: 不静定 P C 構造物のクリープによる影響, プレストレストコンクリート, pp24-35, 1977.8.
- 4) 佐藤, 渡辺, 佐藤: 変位法によるコンクリート構造物のクリープ・乾燥収縮解析の基礎理論, プレストレストコンクリート, pp59-66, 1980.4.