

2径間 PRC 梁におけるクリープ・収縮に伴う長期応力算定手法に関する実験的研究

三井住友建設(株) 技術研究所 正会員 工修 ○玉置 一清

同 上 正会員 工修 三加 崇

同 上 正会員 浅井 洋

1. まえがき

コンクリート部材は、収縮およびクリープによって長期的な変形を伴うものであるが、全支保工上で一括建設された比較的小規模な単純桁や連続桁であれば、単に変形が増加するだけで、応力に変化が生じないと考えられてきた。しかし、厳密には、内部に配置された鉄筋が、収縮およびクリープ変形を拘束することによって、その反力である引張応力がコンクリート内部に蓄積されることになる。この鉄筋拘束力は、従来のPC構造では無視されてきたが、鉄筋量が多いPRC構造の場合、これらの影響を考慮することが必要とされている。また、張出し施工等、架設中と完成系で構造系に変化があるような施工方法で建設された連続桁やラーメン構造では、クリープや乾燥収縮の進行に伴い、建設当初のものとは応力分布が大きく変化していく。特に、プレストレスを緊張することによって生じる、プレストレス2次力の経時変化は顕著となることが多い。これらの応力変化算定の基礎になるクリープ係数や乾燥収縮量は、コンクリートの配合や部材厚に密接な関係があることが知られているが、道路橋示方書(以下、道示)に示される値は、標準的な配合を想定されたものであり、コンクリート配合の影響を反映することはできない。一方、土木学会コンクリート標準示方書[構造性能照査編](以下、コン示)には、収縮およびクリープについて、コンクリート配合を考慮した予測式が示されているが、これらは無筋コンクリートによる試験結果に基づいたものであり、その算定値は道示に示される値と大きく乖離していることが多く、設計実務で使用されることは一般的に少ない。

本報告は、2径間PRC梁の暴露試験(1年間)を実施し、設計計算に用いるクリープ係数、乾燥収縮量の設定、およびコンクリートの長期応力算定手法の検証および提案を行ったものである。

2. 試験概要

2.1 試験体概要

図-1および図-2に、試験体の寸法および断面図を示す。軸方向鉄筋径はD22とし、下縁より100mmの位置に1S12.7Bを2本配置した。試験体は、緊張力の導入の有無および、中間支点の設置手順を変えることにより初期の不静定反力を実験パラメータとした3体である。鋼材配置は全て同じとし、PC鋼材を含めた鋼材比は1.8%である。表-1に、試験体の種類および施工手順を示す。計測項目は、支点反力およびA,B断面における全鋼材ひずみおよび埋込みゲージである。

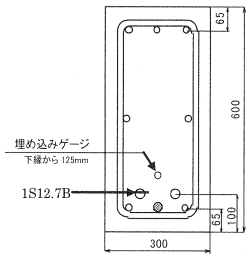


図-2 断面詳細図

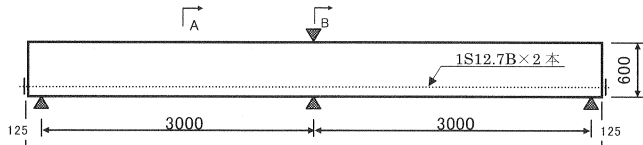


図-1 試験体寸法図

表-1 試験体の種類および施工方法

		case1	case2	case3
プレストレスの導入		○	○	×
プレストレスによる不静定反力		○	×	×
施工手順	材齢 0日	① 試験体のコンクリート打込み		
		② 散水養生		
	4日	③ 型枠の脱枠		
		④ 端支点(支間6m)に設置		
	5日	⑤ 中間支点を設置(反力ゼロ)	⑤ プレストレスを導入	⑤ 中間支点を設置
		⑥ プレストレスを導入	⑥ 中間支点を設置	

2.2 コンクリートの配合および強度

表-2に、コンクリートの配合を、図-3に、圧縮強度およびヤング係数の履歴を示す。本論文では、便宜上、プレストレス導入(材齢5日)以降のヤング係数は一定であるとして検討を行っている。

表-2 コンクリートの配合

セメント種	w/c	S/a	スランプ	空気量
早強	40%	39.60%	8cm	4.5%
単位量 (kg/m ³)				
セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
450	180	660	1006	4.95

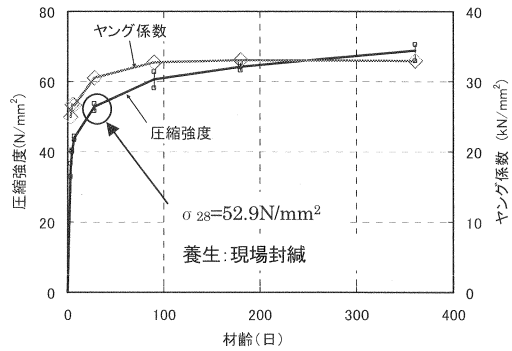


図-3 圧縮強度およびヤング係数の履歴

3. 暴露試験結果によるコンクリート応力評価

3.1 打込み直後からプレストレス導入までに生じる応力(自己収縮応力の定量的把握)

図-4に、打込み直後からプレストレス緊張直前までの鉄筋に貼付けたひずみゲージによる測定結果を示す。ひずみ実測値は、水和熱や気温変化等による線膨張ひずみは控除したものである。打込み直後からプレストレス緊張前日までは、3試験体とも全く同一条件であり、測定結果は、A, B断面ですべてほぼ同様であったため、図-4には case1 の A 断面のみを示している。実測値は、凝結開始である打込み6時間後から、材齢24時間までに急激に収縮ひずみが生じ、その後は特に収縮ひずみは進行していない。底版付近の下筋および埋込みゲージ位置では予測式にはほぼ等しいが、試験体天端付近の上筋の収縮ひずみが大きく、収縮に断面勾配が生じていることがわかる。収縮に断面勾配が生じた原因として、底版型枠の拘束によるもの、凝結過程における鉄筋の付着性状の相違などが考えられたが、現時点では勾配が生じた原因説明には至っていない。

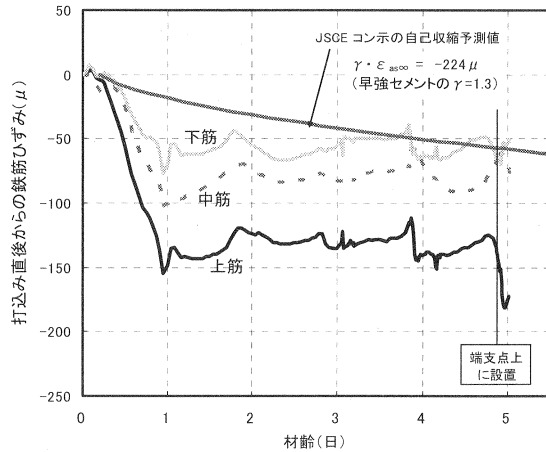


図-4 打込み直後から材齢5日までの鉄筋ひずみ

この収縮ひずみ実測値から、コンクリート応力を求めるためには、通常は凝結過程を含む若材齢時のヤング係数及びクリープ係数試験を実施し、有効ヤング係数を求めて逐次計算を行うなど膨大な労力を要するが、今回の試験では、おおよその定量的把握を目的とし、全鉄筋のひずみを打込み前から測定し、鉄筋に作用した全圧縮力と、コンクリートに生じる引張力が釣合うとした式(1)により簡易的に自己収縮応力の断面平均値を求めた。一般に、圧縮強度 40N/mm²程度では自己収縮の影響は小さく、無視してよいとされてきたが、材齢1日の時点において、式(1)に鉄筋ひずみ実測値の平均値 100 μを代入すると断面平均で 0.4N/mm²程度の引張応力がすでに蓄積されていることがわかった。

この収縮ひずみ実測値から、コンクリート応力を求めるためには、通常は凝結過程を含む若材齢時のヤング係数及びクリープ係数試験を実施し、有効ヤング係数を求めて逐次計算を行うなど膨大な労力を要するが、今回の試験では、おおよその定量的把握を目的とし、全鉄筋のひずみを打込み前から測定し、鉄筋に作用した全圧縮力と、コンクリートに生じる引張力が釣合うとした式(1)により簡易的に自己収縮応力の断面平均値を求めた。一般に、圧縮強度 40N/mm²程度では自己収縮の影響は小さく、無視してよいとされてきたが、材齢1日の時点において、式(1)に鉄筋ひずみ実測値の平均値 100 μを代入すると断面平均で 0.4N/mm²程度の引張応力がすでに蓄積されていることがわかった。

$$\sigma_c = \sum (\epsilon_s \cdot E_s \cdot A_s) / A_c \quad (1)$$

ここで、 σ_c : 収縮によって生じるコンクリートの平均引張応力、
 ϵ_s : 鉄筋の圧縮ひずみ、 E_s : 鉄筋のヤング係数、
 A_s : 鉄筋の断面積、 A_c : コンクリートの断面積

3.2 プレストレス導入による応力

表-3に、材齢5日目に実施したプレストレス導入前後の反力変化およびひずみ変化を示す。実測値は、試験体を支点に設置した後を初期値としているため、表中の値には、自重によるひずみは含まれていない。弾性範囲の挙動であり、実測値はおおむね設計値に一致しているが、Case1の中間支点到に生じる不静定反力が設計値の80%程度になってしまった。これは、端支点到に支点上下が生じたことが原因と考えられ、その沈下量を逆算すると0.19mmである。次節以降における長期ひずみの検討では、case1のプレストレス導入直後のコンクリート応力は、不静定反力が29.9kN(実測値)であるとしてクリープひずみの算定を行っている。

表-3 打込み直後からプレストレス導入までの実測値とコンクリート上下縁応力の算定値

			case1				case2				case3				
			A断面		B断面(中間支点上)		A断面		B断面(中間支点上)		A断面		B断面(中間支点上)		
			設計値	実測値	設計値	実測値	設計値	実測値	設計値	実測値	設計値	実測値	設計値	実測値	
実測値	自己収縮 (材齢5日)	上段鉄筋ひずみ	-	-151	-	-175	-	-136	-	-181	-	-120	-	-145	
		下段鉄筋ひずみ	-	-76	-	-67	-	-83	-	-76	-	-89	-	-68	
	自重 (支間6mの単純桁)	上段鉄筋ひずみ	-26	-17	-34	-21	-26	-23	-34	-33	-26	-25	-34	-19	
		下段鉄筋ひずみ	26	17	34	18	26	24	34	21	26	20	34	23	
	プレストレス導入時	導入緊張力	kN	187.5	182.2	187.5	182.2	187.5	179.8	187.5	179.8	-	-	-	-
		中間支点反力	kN	-	-	-36.8	-29.9	-	-	-	-	-	-	-	-
			-14	-9	-51	-36	22	20	22	20	-	-	-	-	
			-64	-68	-27	-39	-100	-111	-100	-99	-	-	-	-	
実測値から算定した コンクリート 上下縁応力	自己収縮応力	上縁応力	-	0.4	-	0.4	-	0.4	-	0.4	-	0.4	-	0.4	
		下縁応力	-	0.4	-	0.4	-	0.4	-	0.4	-	0.4	-	0.4	
	自重による応力	上縁応力	-0.8	-0.6	-1.1	-0.7	-0.8	-0.8	-1.1	-1.1	-0.8	-0.8	-1.1	-0.7	
		下縁応力	0.8	0.6	1.1	0.6	0.8	0.8	1.1	0.8	0.8	0.7	1.1	0.8	
	プレストレス+不静定反力 による応力	上縁応力	-0.2	0.0	-1.5	-0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	-	-	-	-	
		下縁応力	-1.9	-2.0	-0.6	-1.0	-3.1	-3.4	-3.1	-3.1	-	-	-	-	
	合計	上縁応力	-	-0.2	-	-1.2	-	0.6	-	0.3	-	-0.5	-	-0.3	
		下縁応力	-	-1.1	-	0.0	-	-2.3	-	-1.9	-	1.1	-	1.1	

導入時のコンヤング係数 $E_c=26.7\text{kN/n}$ 応力の符号 +:引張 -:圧縮

3.3 プレストレス導入直後から1年間に生じる応力変化

1) 収縮量およびクリープ係数の設定

図-5および図-6に、コン示および道示による乾燥収縮およびクリープ係数予測式の算定結果を示す。クリープ係数は、1年まででは両者に大きな差異はないようであるが、収縮は大きく異なることがわかる。コン示は、圧縮強度 55N/mm^2 以下に適用される無筋コンクリートの収縮値(自己収縮+乾燥収縮)が示されており、鋼材配置による影響は適切に定めるものとされている。そこで、鉄筋配置の影響について著者らが提案した式(2)を用いて算出すると、今回の試験桁の鋼材比1.8%では、無筋コンクリートに比べ、約 60μ 程度収縮量が小さくなるものと推定される。この 60μ にコンクリートの有効ヤング係数を乗じたものが、乾燥収縮による鉄筋拘束力である。

$$\epsilon_{cs} = \frac{\epsilon_{cs0}}{1 + n(1 + \varphi_c / 2) \cdot \rho_s} \quad (2)$$

ここで、 ϵ_{cs} : 鉄筋コンクリートの収縮ひずみ、 ϵ_{cs0} : 無筋コンクリートの収縮ひずみ
 n : 鉄筋とコンクリートのヤング係数比、 φ_c : コンクリートのクリープ係数、 ρ_s : 鉄筋比

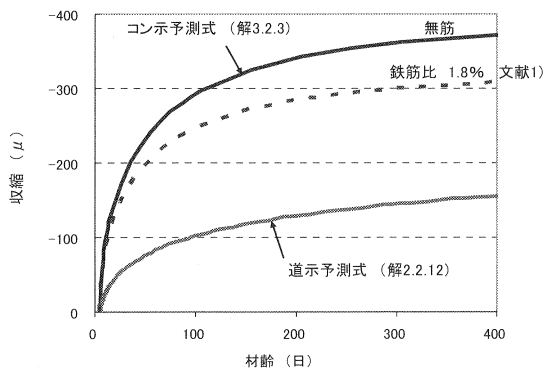


図-5 設計規準による収縮量の予測値

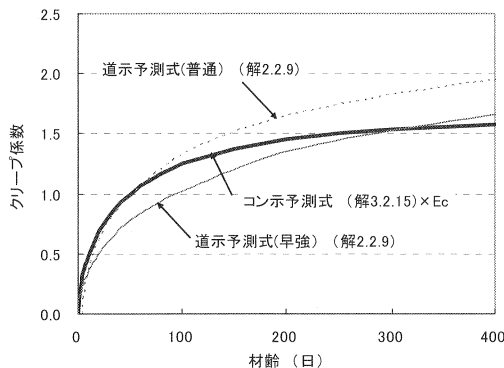


図-6 設計規準によるクリープ係数の予測値

2) クリープによる不静定反力の変化

図-7に、中間支点反力の1年間の経時変化の実測値および道示(点線)およびコンシ(実線)のクリープ係数(図-7)を用いた計算値を示す。クリープによる反力変化の計算方法は、道示(解 2.2.14)に示される式(3)の近似計算である。実線と破線はほぼ重なっており、クリープ係数の予測値の差異は少ないと考えられる。不静定反力は、全支保工状態の反力 R_0 を目指して移行するが、材齢 60 日程度でほぼ収束しており、計算値はこの傾向をよく表している。

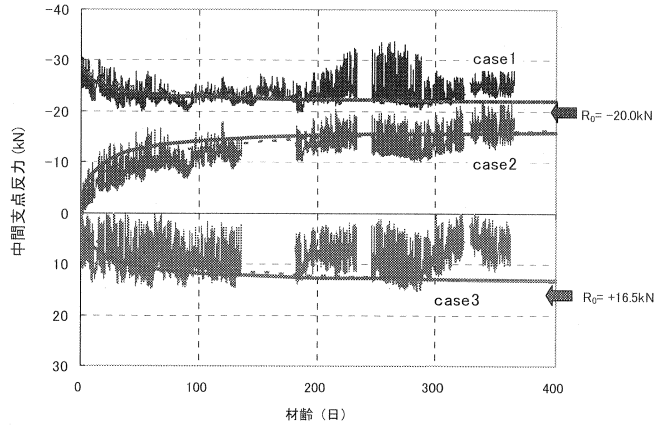


図-7 中間支点反力の経時変化

$$\Delta R_{\phi} = (R_0 - R_1)(1 - e^{-\phi_c}) \quad (3)$$

ここで、 ΔR_{ϕ} : クリープによる反力の変化量、 R_1 : 施工段階を考慮した反力
 R_0 : 全支保工で施工したと仮定した場合の反力

3) 断面内のひずみ変化

図-8に、プレストレス導入以後における断面内のコンクリートひずみ(鉄筋に貼り付けたひずみゲージにより測定)分布の変化を示す。長期に発生するコンクリートひずみは、乾燥収縮ひずみ+クリープひずみであり、case1 および2のA断面では圧縮応力の大きい下縁側でクリープひずみ成分が大きくなっていることがわかる。中間支点上のB断面では、初期の応力勾配に関わらず、断面全体がほぼ均一に収縮している。これは、不静定反力の変化が、初期の応力勾配と逆方向に作用しているために、クリープひずみが相殺されたものと考えられる。プレストレスを導入していないcase3では、不静定反力を含めた死荷重による応力が $\pm 0.2 \sim 0.4 \text{N/mm}^2$ と小さく、長期ひずみはほぼ収縮ひずみのみと考えられ、断面が一様に収縮していることがわかる。また、case3では、材齢300日程度で微細なひび割れが梁全長にわたって生じ、収縮ひずみが緩和される傾向を示している。

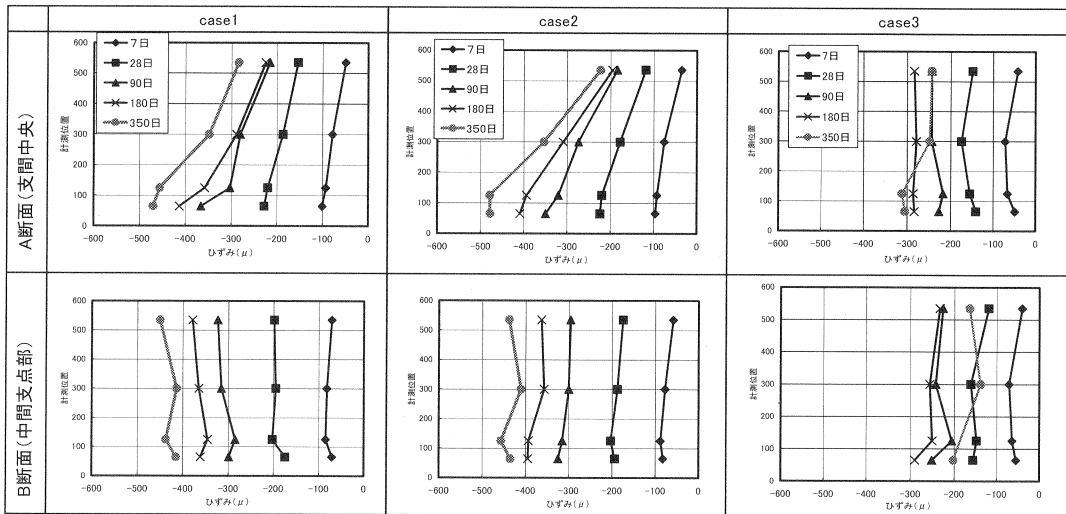


図-8 コンクリートひずみの断面勾配

4) クリープ・収縮による PC 鋼材の応力減少量

著者らは、文献 1)において鉄筋比を変化させた RC 部材の暴露試験から鉄筋拘束を考慮した乾燥収縮の予測式(2)を提案したが、これに、プレストレスおよび自重によるクリープひずみ、および不静定反力の変化によるひずみの影響を加えた式(4)を新たに提案する。

$$\varepsilon_{cs+cc} = \frac{\varepsilon_{cs0} + \varphi_c \frac{\sigma_{d+p}}{E_c} + \frac{\sigma_{\Delta R}}{E_c} \left(1 + \frac{\varphi_c}{2}\right)}{1 + n \left(1 + \frac{\varphi_c}{2}\right) \cdot \rho_s} \quad (4)$$

ここで、 ε_{cs+cc} : 鉄筋拘束の影響を考慮した収縮ひずみ およびクリープひずみ、
 σ_{d+p} : プレストレス導入直後の死荷重による PC 鋼材位置のコンクリート応力、
 $\sigma_{\Delta R}$: 不静定反力の変化 ΔR によって生じる PC 鋼材位置のコンクリート応力

図-9(a)に、PC 鋼材位置でのコンクリートひずみの実測値(下縁から 125mm 位置の埋込みゲージ)と、コンシにより収縮度、クリープ係数を予測した式(4)の計算値を示す。プレストレスを導入しておらずクリープひずみの影響の小さい case3 は、算定値にほぼ一致しているが、プレストレスを導入した case1 および case2 では、実測値が算定値を 15%程度上回っており、クリープ係数がコンシによる予測値よりも大きかったものと推察された。case1 および case2 の実測値の方からクリープ係数を同定すると、およそ 5 程度という結果になり、これはコンシによる予測値 1.6 の 3 倍以上とあまり現実的な値ではない。次に、別の推察として、算定値が実測値に合うように収縮ひずみを求めると、コンシの予測値よりも 20%程度上回る値になる。

図-9(b)に、コンシの収縮ひずみ予測値 ε_{cs0} を 1.2 倍と仮定して式(4)を算定した場合を示す。今回は、残念ながら無筋コンクリート梁による収縮試験およびクリープ試験を実施しておらず、以上の考察を完全には明らかにすることはできないが、コンシの予測値にバラツキを考慮した適切な補正係数を設定することで、式(4)を用いて鉄筋量に応じた収縮量を算定することができるものとする。

式(4)で示した PC 鋼材位置のひずみ ε_{cs+cc} に、PC 鋼材のヤング係数 E_p を乗じたものが、鉄筋拘束を考慮したクリープ・収縮による PC 鋼材の応力損失量となる。ただし、この算定値に PC 鋼材のリラクセーションによる損失量は含まれていないので、別途加える必要がある。図-10 に、case2 の A 断面におけるクリープ・収縮による PC 鋼材の応力損失量を示す。計算値は、すべてコンシの収縮予測値を 1.2 倍と仮定したものである。本提案式の鉄筋比を 0%としたものは、従来式の算定結果にほぼ一致するものであり、鉄筋比が大きくなる

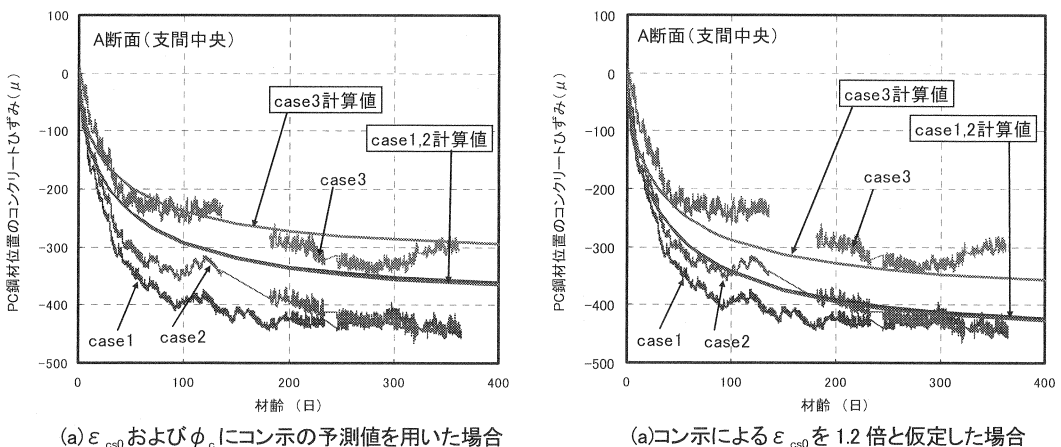


図-9 PC 鋼材位置のひずみ経時変化と式(4)による算定値との比較

につれて PC 鋼材の応力損失量が小さくなる
ことがわかる。本試験体の鉄筋比 1.8%
では、鉄筋拘束の影響を考慮しない従来式
(コン示 解 10.4.1 式)による算定結果に
比べ、PC 鋼材の応力損失量は 20%程度小
さくなる。

5) 鉄筋拘束によるコンクリート応力

式(4)の PC 鋼材位置を各鉄筋位置と置き
換えて、各鉄筋位置のひずみ変化を求め、
鉄筋のヤング係数を乗じると、各段の鉄筋
に生じる圧縮応力が求められる。この反作
用力が、各段の鉄筋位置に作用すると仮定
すると、鉄筋拘束によってコンクリート断面
に生じる引張応力 σ_c は、式(5)として求められる。

$$\sigma_c = \sum \left[\varepsilon_{cs+cc,si} \times E_s \times A_{s,i} \times \left(\frac{1}{A_c} + \frac{e_{s,i}}{W} \right) \right] \quad (5)$$

ここで、 $\varepsilon_{cs+cc,si}$: i 段目の鉄筋ひずみ (式(4)で、PC 鋼材位置を i 段目の鉄筋位置と置換えて求める)

$A_{s,i}$: i 段目の鉄筋の断面積 , $e_{s,i}$: i 段目の鉄筋位置と断面図心の距離

W : コンクリートの断面係数

図-11 に、クリープ、収縮が鉄筋に拘束さ
れることによって生じるコンクリート引張
応力を断面図心位置で算定した結果を示す。実
測値は、全鉄筋の圧縮ひずみを式(5)に代入し
たものである。算定値は、コン示の予測値(た
だし、収縮量のみ 1.2 倍)を用い、式(4)およ
び式(5)より求めたものである。算定結果は実
測値に概ね一致しており、鉄筋比が 1.8%程
度と比較的少ない量であっても、コンクリー
トの引張強度相当の引張応力が蓄積されるこ
とがわかる。

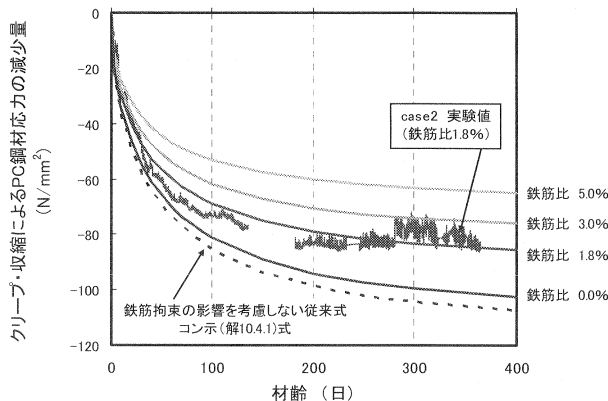


図-10 クリープ・収縮による PC 鋼材の応力減少量

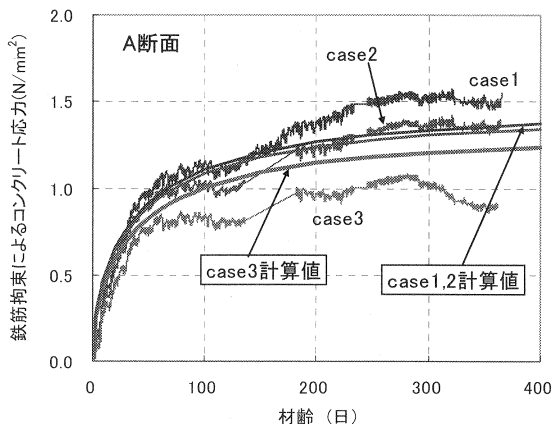


図-11 クリープ・収縮が鉄筋に拘束されることによって
生じる断面図心位置のコンクリート引張応力

4. まとめ

- 1)プレストレス 2 次力を含む不静定反力の経時変化量は、道示の簡易計算式により、精度よく算定できる。
- 2)コン示で算定される無筋コンクリートの収縮量およびクリープ係数に基づき、プレストレスのクリープロス算定方法および鉄筋拘束によるコンクリート応力の簡易な算定方法を提案し、実測値との妥当性を検証した。ただし、コン示における収縮予測式には±40%程度のばらつきがあると報告されており、このばらつきを考慮した補正が必要である。

参考文献

- 1)玉置,三加,浅井,藤田：鉄筋が乾燥収縮を拘束することによって生じる初期ひび割れに関する基礎的研究, PC 技術協会第 14 回シンポジウム論文集, 2005 年 11 月