論文　自己収縮を考慮したPRCはりのプレストレスロス算定式の提案

楊　楊[*1]・Hussein Nour-Allah Mohamed[*2]・佐藤良一[*3]・角田與史雄[*4]

要旨：本論文では，鉄筋量が比較的多いPRCはりを対象とし，プレストレシング以前に生じる収縮の影響を取扱えるプレストレスロスの算定方法を示すとともに，数値クリープ解析結果との比較を行うことによりその妥当性を検討した。この算定式は実用性から既往の設計式を包含する形で導いた。また，コンクリートの弾性回復及びクリープを考慮する材齢低減係数を設定し，これらの係数を用いて，PRCはりの対象とする有効プレストレスを計算し，プレストレス導入以前の収縮考慮及び無視したそれぞれの結果を比較した。

キーワード：PRC，自己収縮，プレストレスロス，算定式

1.　はじめに

近年では，PC技術の発展及び高強度コンクリートの開発により，高強度コンクリートを使用した新しいPC構造物が建造されるようになりつつある。鉄道橋においては，PRC桁の採用が一般的になってきている。60～80 N/mm^{2}をもつコンクリートを使用したPRC構造物の施工も行われている。

コンクリート標準示方書（平成8年版）では，プレストレスト鉄筋コンクリート（PRC）構造の有効プレストレスの設計式が用意されている。同示方書でのコンクリート強度の適用範囲は80N/mm^{2}であり，これに対応して自己収縮が設計用値として提示されている。この自己収縮は材齢1日でも相当に大きなひずみに達し，PRC構造の鉄筋量が比較的多い場合には，プレストレス導入以前の収縮が無視し得ない引張応力を発生させる。この引張応力を無視すると設計プレストレス量を過大評価し，設定された限界状態を満足しないことにもなり得る。

そこで，本研究では，プレストレス量を適切に算定するために，自己収縮が大きくかつ鉄筋量も多い場合を想定して，PRCはりを対象とし，プレストレス導入前の鉄筋拘束による収縮応力を考慮した有効プレストレスの算定方法を提案し，数値クリープ解析結果との比較を行うことによりその妥当性を検討した。その算定式は実用性から既往の設計式を包含する形で導いた。

2.　提案式の誘導

設計プレストレス量は，線形クリープ則に基づき，プレストレス導入前の収縮による応力とプレストレス導入後の応力をそれぞれ独立に求め，これらを重ねて算定することとしている。**図-1**に引張鉄筋位置のコンクリート応力を例としてその概要を示す。

提案式は，平面保持を仮定し，それぞれの鋼材と各鋼材位置のコンクリートひずみの適合条件を用いて誘導している。この際，同位置にある鋼材に対し，互いに独立したひずみの適合条件を適用した場合，解が得られないので，最外縁の圧縮および引張鉄筋に適用したひずみの適合条件と断面におけるひずみの直線性を利用して[1)]，提案式を誘導している。この際，凝結からプレストレス導入時までに生じる収縮ひずみ$\Delta\varepsilon_{sh,j}$，プレストレス導入後生じる収縮ひずみ$\Delta\varepsilon_{sh,k}$がそれぞれ材齢t_j，t_kで瞬時に生じ，これによる応力がコンクリートのクリープにより

*1 広島大学大学院助手　工学研究科　博（工）　（正会員）
*2 広島大学大学院　工学研究科　工修　（正会員）
*3 広島大学大学院教授　工学研究科　工博　（正会員）
*4 北海道大学大学院教授　工学研究科　工博　（正会員）

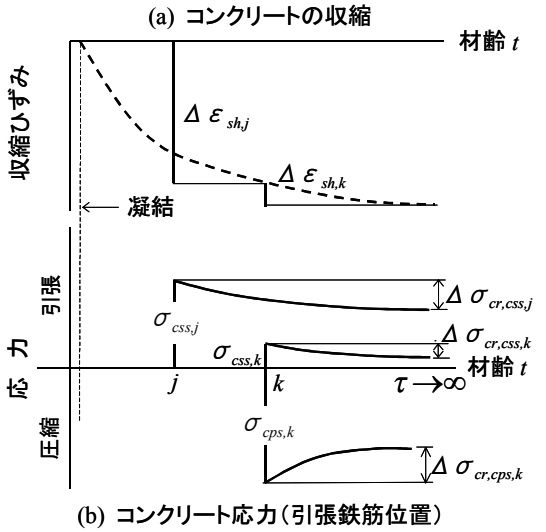

図-1 算定方法の概要

表-1　用語の定義

応力成分			応力発生原因	
			収縮	プレストレス導入
コンクリート	弾性応力	圧縮鉄筋位置	$\sigma_{cs s',j}$	$\sigma_{cps',k}$
		引張鉄筋位置	$\sigma_{cs s,j}$	$\sigma_{cps,k}$
		PC 鋼材位置	$\sigma_{csp,j}$	$\sigma_{cpp,k}$
	応力低減	圧縮鉄筋位置	$\Delta\sigma_{cr,cs s',j}$	$\Delta\sigma_{cr,cps',k}$
		引張鉄筋位置	$\Delta\sigma_{cr,cs s,j}$	$\Delta\sigma_{cr,cps,k}$
		PC 鋼材位置	$\Delta\sigma_{cr,csp,j}$	$\Delta\sigma_{cr,cpp,k}$
鋼材	弾性応力	圧縮鉄筋	$\Delta\sigma_{e,sss',j}$	$\Delta\sigma_{e,sps',k}$
		引張鉄筋	$\Delta\sigma_{e,sss,j}$	$\Delta\sigma_{e,sps,k}$
		PC 鋼材	$\Delta\sigma_{e,ssp,j}$	$\Delta\sigma_{e,spp,k}$
	応力低減	圧縮鉄筋	$\{\Delta\sigma_{s'cs,j}\}_{sh}$	$\Delta\sigma_{s'cs,k}$
		引張鉄筋	$\{\Delta\sigma_{scs,j}\}_{sh}$	$\Delta\sigma_{scs,k}$
		PC 鋼材	$\{\Delta\sigma_{pcs,j}\}_{sh}$	$\Delta\sigma_{pcs,k}$

経時的に低減すると考える。

提案式の誘導に用いた記号を**表-1** に示す。各記号のサフィックス j は凝結からプレストレス導入時までに生じる収縮が瞬時に生じると仮定した両者の中間材齢 t_j を，k はプレストレス導入時の材齢 t_k を意味する。

2.1 プレストレス導入前の収縮によるコンクリートおよび鋼材の弾性応力

コンクリートと鋼材の間には次のひずみの適合条件が成立する：

引張鉄筋位置

$$-\sigma_{cs s,j}/E_{c,j}+\Delta\varepsilon_{sh,j}=\Delta\sigma_{e,sss,j}/E_s \quad (1)$$

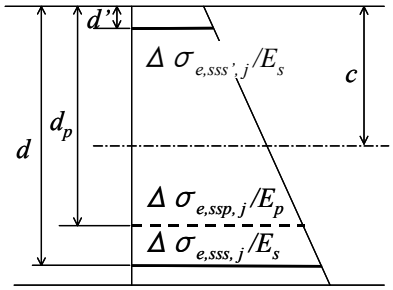

図-2　鋼材のひずみ分布

圧縮鉄筋位置

$$-\sigma_{cs s',j}/E_{c,j}+\Delta\varepsilon_{sh,j}=\Delta\sigma_{e,sss',j}/E_s \quad (2)$$

ここに，$E_{c,j}$ は材齢 t_j におけるコンクリートのヤング係数，E_s および E_p はそれぞれ引張鉄筋と圧縮鉄筋および PC 鋼材のヤング係数である。

図-2 のように，平面保持の仮定から，材齢 t_j における鋼材ひずみの変化量は直線分布するので，PC 鋼材応力の変化量が次式で得られる：

$$\Delta\sigma_{e,ssp,j}=n_{ps}\left(\beta_{13}\Delta\sigma_{e,sss,j}+\beta_{23}\Delta\sigma_{e,sss',j}\right) \quad (3)$$

ただし，$n_{ps}=E_p/E_s$

$$\beta_{13}=\left(d_p-d'\right)/\left(d-d'\right)$$

$$\beta_{23}=\left(d-d_p\right)/\left(d-d'\right)$$

材齢 t_j に生じた各鋼材の応力による各鋼材位置のコンクリート応力は，鋼材の変化応力が与えられれば，次式で得られる：

引張鉄筋位置

$$\sigma_{cs s,j}=\left(A_s\alpha_{11}+A_p n_{ps}\beta_{13}\alpha_{31}\right)\Delta\sigma_{e,sss,j}+\left(A_{s'}\alpha_{21}+A_p n_{ps}\beta_{23}\alpha_{31}\right)\Delta\sigma_{e,sss',j} \quad (4)$$

圧縮鉄筋位置

$$\sigma_{cs s',j}=\left(A_s\alpha_{12}+A_p n_{ps}\beta_{13}\alpha_{32}\right)\Delta\sigma_{e,sss,j}+\left(A_{s'}\alpha_{22}+A_p n_{ps}\beta_{23}\alpha_{32}\right)\Delta\sigma_{e,sss',j} \quad (5)$$

PC 鋼材位置

$$\sigma_{csp,j}=\left(A_s\alpha_{13}+A_p n_{ps}\beta_{13}\alpha_{33}\right)\Delta\sigma_{e,sss,j}+\left(A_{s'}\alpha_{23}+A_p n_{ps}\beta_{23}\alpha_{33}\right)\Delta\sigma_{e,sss',j} \quad (6)$$

ただし，$\alpha_{11}=(1/A_c+e_s^{\,2}/I_c)$

$$\alpha_{21}=(1/A_c-e_{s'}e_s/I_c)$$

$$\alpha_{31}=(1/A_c+e_p e_s/I_c)$$

$$\alpha_{12} = (1/A_c - e_s e_{s'}/I_c)$$
$$\alpha_{22} = (1/A_c + e_{s'}{}^2/I_c)$$
$$\alpha_{32} = (1/A_c - e_p e_{s'}/I_c)$$
$$\alpha_{13} = (1/A_c + e_s e_p/I_c)$$
$$\alpha_{23} = (1/A_c - e_{s'} e_p/I_c)$$
$$\alpha_{33} = (1/A_c + e_p{}^2/I_c)$$
$$e_s = d - c \quad e_{s'} = c - d' \quad e_p = d_p - c$$

式（4），（5）を式（1），（2）に代入すれば，材齢 t_j で瞬時に生じるとした収縮による圧縮および引張鉄筋の応力が式（7）より求まる。さらに，式(8)により PC 鋼材の応力も得られる。

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_{e,sss,j} \\ \Delta\sigma_{e,sss',j} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{j11} & N_{j21} \\ N_{j12} & N_{j22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} E_s \Delta\varepsilon_{sh,j} \\ E_s \Delta\varepsilon_{sh.j} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

ただし，
$$N_{j11} = 1 + n_{s,j} A_s \alpha_{11} + n_{s,j} A_p \alpha_{31} n_{ps} \beta_{13}$$
$$N_{j21} = n_{s,j} A_{s'} \alpha_{21} + n_{s,j} A_p \alpha_{31} n_{ps} \beta_{23}$$
$$N_{j12} = n_{s,j} A_s \alpha_{12} + n_{s,j} A_p \alpha_{32} n_{ps} \beta_{13}$$
$$N_{j22} = 1 + n_{s,j} A_{s'} \alpha_{22} + n_{s,j} A_p \alpha_{32} n_{ps} \beta_{23}$$

$$\Delta\sigma_{e,ssp,j} = n_{ps}\left(\beta_{13}\Delta\sigma_{e,sss,j} + \beta_{23}\Delta\sigma_{e,sss',j}\right) \quad (8)$$

各鋼材位置のコンクリートの材齢 t_j に生じる弾性応力は式（4）～（6）から求められる。

2.2 クリープによる応力損失

クリープによるコンクリートと圧縮および引張鉄筋のひずみ変化に対し，次の適合条件が適用できる：

$$\{\Delta\sigma_{scs,j}\}_{sh}/E_s = -\Delta\sigma_{cr,css,j}/(\chi_{e,j}E_{c,j}) + (\sigma_{css,j} - \chi_{cr,j}\Delta\sigma_{cr,css,j})\phi_j/E_{c,j} \quad (9)$$

$$\{\Delta\sigma_{s'cs,j}\}_{sh}/E_s = -\Delta\sigma_{cr,css',j}/(\chi_{e,j}E_{c,j}) + (\sigma_{css',j} - \chi_{cr,j}\Delta\sigma_{cr,css',j})\phi_j/E_{c,j} \quad (10)$$

ここに，$\chi_{e,j}$ は，コンクリートのヤング係数の経時変化を考慮した，t_j から設計期間の最終時までの応力低減による弾性回復に関する材齢係数，$\chi_{cr,j}$ は t_j に応力発生した場合の最終時までのクリープによる応力損失に関する材齢係数，ϕ_j は t_j に載荷されたコンクリートの終局クリープ係数である。

式（3）と同様の考えに基づき，PC 鋼材の応力損失は次式で得られる。

$$\{\Delta\sigma_{pcs,j}\}_{sh} = n_{ps}\left(\beta_{13}\{\Delta\sigma_{scs,j}\}_{sh} + \beta_{23}\{\Delta\sigma_{s'cs,j}\}_{sh}\right) \quad (11)$$

各鋼材の損失応力による各鋼材位置のコンクリート応力も式（4）～（6）の場合と同様に次式で得られる：

$$\Delta\sigma_{cr,css,j} = (A_s\alpha_{11} + A_p n_{ps}\beta_{13}\alpha_{31})\{\Delta\sigma_{scs,j}\}_{sh} + (A_{s'}\alpha_{21} + A_p n_{ps}\beta_{23}\alpha_{31})\{\Delta\sigma_{s'cs,j}\}_{sh} \quad (12)$$

$$\Delta\sigma_{cr,css',j} = (A_s\alpha_{12} + A_p n_{ps}\beta_{13}\alpha_{32})\{\Delta\sigma_{scs,j}\}_{sh} + (A_{s'}\alpha_{22} + A_p n_{ps}\beta_{23}\alpha_{32})\{\Delta\sigma_{s'cs,j}\}_{sh} \quad (13)$$

$$\Delta\sigma_{cr,csp,j} = (A_s\alpha_{13} + A_p n_{ps}\beta_{13}\alpha_{33})\{\Delta\sigma_{scs,j}\}_{sh} + (A_{s'}\alpha_{23} + A_p n_{ps}\beta_{23}\alpha_{33})\{\Delta\sigma_{s'cs,j}\}_{sh} \quad (14)$$

これら 3 式を（9）と（10）に代入して整理すれば，プレストレス導入前の収縮により瞬時に生じた鋼材応力の，クリープによる損失が次のように求められる。

圧縮および引張鉄筋に対して，

$$\begin{Bmatrix} \{\Delta\sigma_{scs,j}\}_{sh} \\ \{\Delta\sigma_{s'cs,j}\}_{sh} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{j11} & M_{j21} \\ M_{j12} & M_{j22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} n_{s,j}\phi_j\sigma_{css,j} \\ n_{s,j}\phi_j\sigma_{css',j} \end{Bmatrix} \quad (15)$$

ただし，
$$M_{j11} = 1 + \alpha_{ssj} + \alpha_{psj} n_{ps}\beta_{13}$$
$$M_{j21} = \alpha_{s'sj} + \alpha_{psj} n_{ps}\beta_{23}$$
$$M_{j12} = \alpha_{ss'j} + \alpha_{ps'j} n_{ps}\beta_{13}$$
$$M_{j22} = 1 + \alpha_{s's'j} + \alpha_{ps'j} n_{ps}\beta_{23}$$
$$\alpha_{ssj} = n_{s,j} A_s \alpha_{11} J_j$$
$$\alpha_{s'sj} = n_{s,j} A_{s'} \alpha_{21} J_j$$
$$\alpha_{psj} = n_{s,j} A_p \alpha_{31} J_j$$
$$\alpha_{ss'j} = n_{s,j} A_s \alpha_{12} J_j$$
$$\alpha_{s's'j} = n_{s,j} A_{s'} \alpha_{22} J_j$$
$$\alpha_{ps'j} = n_{s,j} A_p \alpha_{32} J_j$$
$$n_{s,j} = E_s/E_{c,j}$$
$$J_j = 1/\chi_{e,j} + \chi_{cr,j}\phi_j$$

PC 鋼材に対して

$$\{\Delta\sigma_{pcs,j}\}_{sh} = n_{ps}\left(\beta_{13}\{\Delta\sigma_{scs,j}\}_{sh} + \beta_{23}\{\Delta\sigma_{s'cs,j}\}_{sh}\right) \quad (16)$$

これらの鋼材の損失応力を式（12）～（14）に代入すれば，各鋼材位置のコンクリートのクリープによる緩和応力が求まる。

$\chi_{e,j}$ はヤング係数が経時的に増大していくと1以上の値になる。$\chi_{cr,j}$ は経時的にクリープ進行が遅くなるため0.5～1の値になる。収縮応力の場合，弾性回復ひずみが大きくかつクリープひずみが小さいほうがその損失が小さいので，ここでは，簡便さを重視しさらに安全側の結果を与えることを考慮して $\chi_{e,j}=1$，$\chi_{cr,j}=0.8$ としている。

なお，プレストレス導入後のコンクリートのクリープ及び収縮による鋼材応力度の損失量の算定は，以下のように求まる。

$$\begin{Bmatrix}\Delta\sigma_{scs,k}\\ \Delta\sigma_{s'cs,k}\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}M_{k11} & M_{k21}\\ M_{k12} & M_{k22}\end{bmatrix}^{-1}\begin{Bmatrix}n_{s,k}\phi_k\sigma_{cps,k}+E_{c,k}\Delta\varepsilon_{sh,k}\\ n_{s,k}\phi_k\sigma_{cps',k}+E_{c,k}\Delta\varepsilon_{sh,k}\end{Bmatrix} \quad (17)$$

$$\Delta\sigma_{pcs,k}=n_{ps}\left(\beta_{13}\Delta\sigma_{scs,k}+\beta_{23}\Delta\sigma_{s'cs,k}\right) \quad (18)$$

ただし，M_{k11}，M_{k21}，M_{k12} 及び M_{k22} は式（15）での M_j と同様の意味を持ち，j を k で置き換えたもので，$\chi_{e,j}=1$，$\chi_{cr,j}=0.5$ としている。

式（17）及び（18）は，部材断面の最外縁の圧縮および引張鉄筋を代表して取り扱い，これらの損失量から PC 鋼材の損失量を求めているため式の形は平成8年版と異なっている。しかし，鉄筋およびその位置のコンクリート間にひずみの適合条件を適用しているので考え方は同様である。

3. 提案式の検証

提案式の検証は，数値クリープ解析（クリープ解析）結果と PRC はりの実測鉄筋ひずみを比較することにより，本クリープ解析法の良好な解析精度を示した後，提案式により得られた値とクリープ解析結果を比較することにより行っている。

3.1 クリープ解析の概要

クリープ解析法は，重ね合わせの原理に基づくクリープ解析法[2), 3)]である。この方法は，各タイムインターバルにおけるヤング係数の経時変化と増分応力のクリープ進行を考慮して，変動応力を求めるものであり，クリープにおよぼす載荷時材齢の影響も考慮されている。

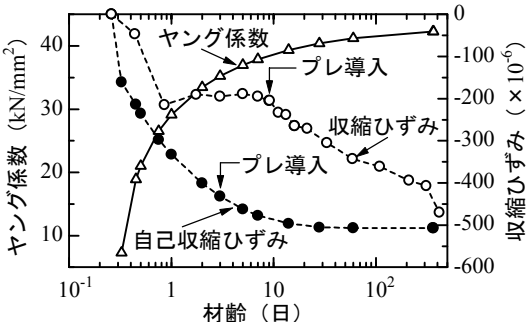

図-3　ヤング係数及び収縮ひずみ

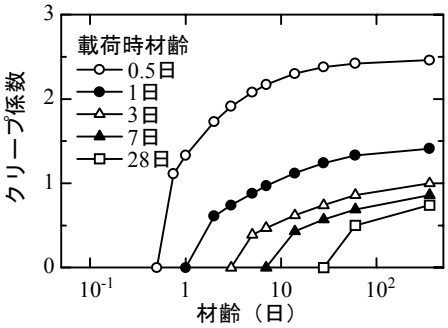

図-4　クリープ係数[5)]

3.2 検証に用いた PRC はり供試体の概要[4)]

PRC はりに用いたコンクリートは，早強ポルトランドセメントと置換率10%のシリカフュームを結合材とし，水結合材比は0.25で，標準養生材齢28日の圧縮強度は105N/mm² であった。このコンクリートのヤング係数と収縮を**図-3**に，クリープ係数を**図-4**に示す。収縮ひずみは材齢9日まで湿潤養生の場合とシールした場合の値を示している。ヤング係数，クリープ係数は，この養生の相違では大きな差がなかったので，シールした供試体から得られたものを示している。これらの物性値は材齢360日の値を最終値としている。鉄筋と PC 鋼材のヤング係数はそれぞれ204，201kN/mm² である。

PRC 供試体の断面を**図-5**に，また6体の供試

表-2 検証に用いた PRC 部材の配置鋼材の構成 [4)]

No.	引張鉄筋		PC 鋼材		圧縮鉄筋		プレストレス導入直後 σ_c * (N/mm^2)
	断面積 (mm^2)	鉄筋比 (%)	断面積 (mm^2)	鋼材比 (%)	断面積 (mm^2)	鉄筋比 (%)	
CASE1	317.5	0.64	80	0.16	397.2	0.79	-2.5
CASE2	184.9	0.37	128	0.26	397.2	0.79	-3.9
CASE3	184.9	0.37	180	0.36	397.2	0.79	-5.9
CASE4	397.2	0.79	80	0.16	---	---	-2.4
CASE5	253.4	0.51	128	0.26	---	---	-3.7
CASE6	146.7	0.29	180	0.36	---	---	-6.0

*σ_c ：下縁コンクリート応力

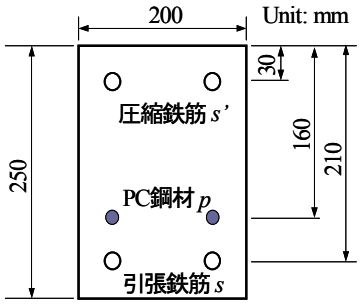

図-5　PRC はりの断面諸元

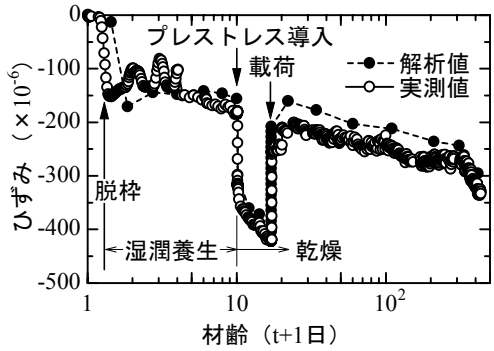

図-6　引張鉄筋のひずみの経時変化

体の鋼材量・鋼材比と下縁における導入プレストレスを**表-2** に示す。ここに示されているように，全断面に対する引張鉄筋比は 0.29～0.79%，圧縮鉄筋比は 0 と 0.79%である。なお，供試体はポストテンション方式のはりで，プレストレス導入直後の PC 鋼材の緊張応力は平均でほぼ 895N/mm^2 である。

図-5 および**表-2** に示す PRC 供試体は手塚ら [4)] の研究によるもので，本研究では，クリープ解析と比較することにより提案式の妥当性を検証するため，PRC はりの検証用（モデル）断面として用いた。

3.3 提案式による結果とクリープ解析結果の比較

まず，クリープ解析結果と実測鉄筋ひずみの比較した結果の一例を**図-6** に示す。供試体は材齢 9 日のプレストレス導入まで湿潤養生されているので，**図-3** の実測収縮ひずみを用いている。これによれば，凝結からプレストレス導入を経て，永久荷重下における長期の材齢まで両者は比較的良く一致しており，重ね合わせの原理はおおむね妥当であることがわかる。

次に，各供試体について提案式とクリープ解析法による計算値を，プレストレス導入前の収縮を考慮した場合と無視した場合について検討する。ただし，供試体はシールされた状態を想定し，自己収縮ひずみを用いている。材齢係数の設定値の妥当性を検討する際に，要求される強度を満たす範囲で極力若い材齢でプレストレスを導入することが望ましく，さらに 3 日までの自己収縮による応力が顕著であることを考慮し，プレストレス導入材齢は 3 日としている。**図-7** は最終時の供試体下縁のコンクリート応力を，また**図-8** は，提案式でプレストレス導入前の自己収縮を無視した場合の値，すなわち平成 8 年版本文（解 10.4.2）及び（解 10.4.3）により得られる値に対する比率を示している。ここで，プレストレス導入時から最終時までの収縮ひずみ増加は 75×10^{-6} である。これらから，提案式はクリープ解析に比べ，両者の応力差は圧縮鉄筋がない場合に大きく，最大でおよそ 0.5N/mm^2 である。プレストレス導入前の収縮の影響は，提案式がクリープ解析法より若干大きく評価している。ちなみに最も顕著な CASE4 の場合，プレストレス導入前の収縮を考慮した場合と無視した場合との下縁コンクリート応力

の差は，提案式で 1.03N/mm^2，クリープ解析では0.89N/mm^{2}と提案式のほうが20%大きいが，応力差としては小さい。表-3 に提案式による下縁のコンクリート応力とクリープ解析による下縁のコンクリート応力の比率を示す。この表によれば，クリープ解析に比べ，本提案式による検討供試体全体のプレストレス量の平均値は，プレストレス導入前の収縮がない場合約 10%小さく，ある場合約 16%小さい。ただし，CASE4 のようにプレストレス量が小さいと 43%と小さくなる場合もある。

4. まとめ

本研究の範囲で，得られた結果は以下通りである。

1) プレストレス導入前の鉄筋拘束による収縮応力を考慮した有効プレストレスの算定方法を提案した。
2) 本研究において，高強度コンクリートを用いた PRC はりの場合，引張鉄筋比 0.29～0.79%，圧縮鉄筋比 0 と 0.79%の範囲で，プレストレス導入前の収縮を考慮した場合と無視した場合との下縁コンクリート応力の差は，最大 1N/mm^{2}程度が生じうることを示した。
3) 本提案式は，重ね合わせの原理に基づくクリープ解析に比べ，プレストレス量を安全側に算定する。本検討範囲では，両者の差は 0.2～0.5N/mm^{2}である。この差はクリープ解析により求まるプレストレス量に対し 5～43%であった。

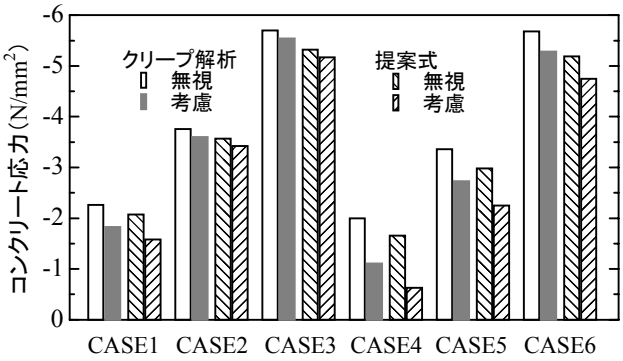

図-7 下縁のコンクリート応力

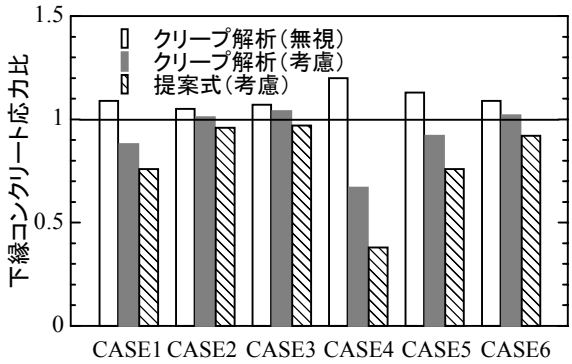

図-8 式解 10.4.2 及び 10.4.3 による応力に対する比率

表-3 コンクリートの応力比

No.	プレストレス導入前の収縮無視	プレストレス導入前の収縮考慮
CASE1	0.92	0.86
CASE2	0.95	0.95
CASE3	0.93	0.93
CASE4	0.83	0.57
CASE5	0.89	0.82
CASE6	0.91	0.90
平均	0.90	0.84

参考文献

1) 角田與史雄:コンクリート橋　横道英男著，第 10 章コンクリート静定桁および不静定桁におけるクリープおよび収縮の影響，土木学会監修，pp.140-146，1972
2) 山本浩嗣，佐藤良一他：PRC 部材の長期変形挙動の検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16, No.1, pp.973-978,1994
3) 筒井英之，佐藤良一他：高強度コンクリートの自己収縮応力に関する検討，セメント・コンクリート論文集，No.50, pp.478-483, 1996
4) 手塚正道，佐藤良一他：高強度コンクリート部材の時間依存性変形挙動の検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19, No.2, pp.585-590, 1997
5) Y. Yang, R. Sato, et.al. : Experimental Investigation on Shrinkage and Creep of High Strength Concrete at Early Ages, ACI SP-179, pp.201-215, 1998