

論文 PRC はりの有効プレストレスに関する一考察

廣河 和男^{*1}・佐藤 良一^{*2}・河合 研至^{*3}・安斎 慎介^{*4}

要旨：PRC構造の有効プレストレス力を算定する際に、ひび割れ発生の影響が考えられる。そこで、ひび割れ長期解析に関して本報告で用いた解析法の概要を示し、普通コンクリートを用いて行った長期載荷実験の二径間連続はりモデルによる試算を行い、従来の計算法によって得られた結果と比較してひび割れ発生による影響を示した。また、解析結果と実験結果との照合をおこなって、その妥当性を確認した。さらに、自己収縮の影響を調査するために高強度コンクリートを用いた場合について試算を行い、従来法と比較してその影響度を推測した。

キーワード：PRC、有効プレストレス力、ひび割れ、クリープ、収縮、

1. はじめに

PRC構造は、健全なひび割れ発生を容認することでその合理性が発揮される構造形式である。一般に、永久荷重下でのひび割れを容認せず、活荷重作用によるひび割れのみを容認する方法が用いられている。しかし、近年、永久荷重下でのひび割れ発生を容認する合理性が見直されつつある。

現行の有効プレストレス力の算定方法では、ひび割れの発生や自己収縮の影響が考慮されていない。例えば、コンクリート標準示方書（設計編）（以下「示方書」という）¹⁾では、PC構造に比べて配置される鉄筋量が増加することを考えてPRC構造に関してPC鋼材や鉄筋がコンクリートのクリープ・乾燥収縮に伴うひずみ進行を拘束する効果（以下「鋼材拘束」という）を考慮した方法を示している。クリープ進行に伴う変形性状は、ひび割れ発生の前後では異なると考えられる。また、高強度コンクリートでは、プレストレス力導入以前に生じる自己収縮ひずみを鉄筋が拘束することでコンクリートに

は引張応力が生じており^{2),3)}、プレストレス力の導入によるコンクリートの圧縮応力度を相殺し、応力分布を変化させる。本研究は、PRC構造や高強度コンクリートを用いた場合の有効プレストレス力について連続はりを対象として実験的、数値解析的に、これらの影響度を明らかにするものである。

2. 解析法⁴⁾

任意骨組構造を対象にした変位法を用いた解法でA. Ghaliらの解法⁵⁾を改良したものである。短期解析によってひび割れ発生に伴う剛性低下による断面力の再配分を算定して、任意に時間分割を行った時間依存解析によりクリープ・収縮の

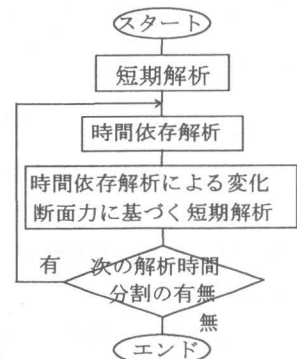


図-1 解析のブロックチャート

*1 広島大学大学院 工学研究科（正会員）

*2 広島大学大学教授 工学部第4類（建設系） 工博（正会員）

*3 広島大学大学助教授 工学部第4類（建設系） 工博（正会員）

*4 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻（正会員）

進行に伴う二次断面力を求める。この二つの解析を組み合わせてひび割れが発生した構造系に関するクリープ・収縮の進行による影響評価解析を行うものである。この際、ひび割れ状態の変化を評価するために、任意時点での新たな持続荷重作用の有無に関わらず各時間分割点でのクリープ・収縮による変化断面力に相当する等価節点力をその時点で処女載荷されたと考えた短期解析を行って断面力の再配分と新たな剛性を算定して次の解析時間分割に進めていく解法である（図-1 に示す解析チャート参照）。

2.1 短期ひび割れ解析⁴⁾

ひび割れ照査断面力による断面引張縁でのコンクリート応力度がコンクリートの引張強度を越える場合にひび割れが発生すると考える。この場合、式 (1) を用いて圧縮域の深さを算定し（図-2 参照）、断面性能や応力度の精算を行う。ひび割れ発生部材の剛性低下は、配置された鋼材による引張硬化を C E B - F I P⁶⁾ の規定を用いて評価することで平均ひずみを求め、これを部材軸方向に積分して求めた変形量から部材剛性を逆算する方法により算定する。

$$\frac{(I_{cn} - Q_{cn} \cdot y_o) + n p \cdot (I_{pn} - Q_{pn} \cdot y_o) + n s \cdot (I_{sn} - Q_{sn} \cdot y_o)}{(Q_{cn} + n p \cdot Q_{pn} + n s \cdot Q_{sn})} \cdot \frac{M - M_{pao}}{N - N_{pao}} = 0 \quad (1)$$

C : 圧縮域深さ

y_o : (n-n) 軸から着目軸までの距離 ; (n-n)

軸から上に向かって+

N_e, M_e : 断面照査用断面力

N_{pao}, M_{pao} : プレストレス力による着目軸に於ける軸力・曲げモーメント

σ_{cu} : 部材上縁のコンクリート応力度 (引張は+)

σ_o : 断面着目軸位置でのコンクリート応力度

Q_{cn}, I_{cn} : 圧縮域のコンクリート断面の (n-n) 軸に関する断面一次モーメント, 断面二次モーメント

np, ns : P C 鋼材および鉄筋のコンクリートに

対する弾性係数比

$$n p = E_p / E_{co}, \quad n s = E_s / E_{co}$$

$Q_{pn}, Q_{sn}, I_{pn}, I_{sn}$: P C 鋼材および鉄筋の (n-n) 軸に関する断面一次モーメント, 断面二次モーメント

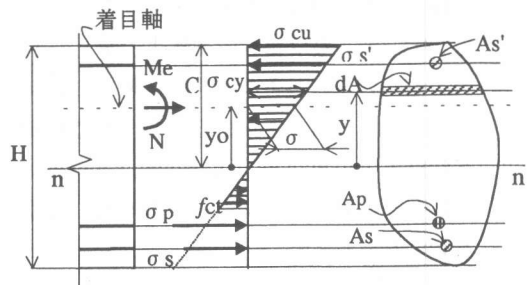


図-2 ひび割れ発生断面の応力度分布

2.2 時間依存長期解析

クリープ・収縮の進行による影響評価は、材齢係数を用いた換算ヤング係数による有効弾性係数法を用いた。

$$E_\varphi = \frac{E_c}{1 + \rho \varphi}$$

E_φ : クリープ換算ヤング係数

E_c : コンクリートのヤング係数

φ : クリープ係数

ρ : 材令係数

時刻 t_i から t_{i+1} のクリープ進行による自由ひずみ, および自由ひずみと等価な力 (レストレン力) は, 各々, 次式で求める。

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_\varphi(t_{i+1}, t_i)_{fr} &= \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\Delta \sigma_o(j) + \Delta \sigma_{\varphi o}(t_{j+1}, t_j)}{E_c} \{ \phi(t_{i+1}, t_j) - \phi(t_i, t_j) \} \\ &\quad + \frac{\Delta \sigma_o(i)}{E_c} \phi(t_{i+1}, t_i) \\ \Delta \psi_\varphi(t_{i+1}, t_i)_{fr} &= \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\Delta \gamma(j) + \Delta \gamma_\varphi(t_{j+1}, t_j)}{E_c} \{ \phi(t_{i+1}, t_j) - \phi(t_i, t_j) \} \\ &\quad + \frac{\Delta \gamma(i)}{E_c} \phi(t_{i+1}, t_i) \end{aligned} \quad (2)$$

$\Delta \sigma_o(j), \Delta \gamma(j)$: j 番目の解析時間分割で処女載荷される持続荷重による変化応力度, 変化応力度勾配

$\Delta \sigma_{\varphi o}(t_{j+1}, t_j), \Delta \gamma_\varphi(t_{j+1}, t_j)$: 同上 j 番目 (時刻 $t_j \sim$

tj+1)でのクリープ・乾燥収縮の進行による
変化応力度, 変化応力度勾配

$\Delta\sigma_0(i), \Delta\gamma(i)$: i 番目の解析時間分割で処女載荷
される持続荷重による変化応力度, 変化応
力度勾配

$\phi(t_i, t_j)$: 時刻 t_i から t_j 間のクリープ進行を表
すクリープ係数

式(2)での各解析時間分割ごとの変化応力度

$\Delta\sigma_0(j), \Delta\gamma(j), \Delta\sigma_0(i), \Delta\gamma(i),$

$\Delta\sigma_{\phi 0}(t_{j+1}, t_j), \Delta\gamma_{\phi}(t_{j+1}, t_j)$ は, 各々の段階で断面の
ひび割れの有無に従った値を用いる。

$$N_{\phi, rst} = -E_{\phi} \cdot [A_{c2} \cdot \Delta\epsilon_{\phi}(t_{i+1}, t_i)_{fr} + Q_{c2} \cdot \Delta\psi_{\phi}(t_{i+1}, t_i)_{fr}]$$

$$M_{\phi, rst} = -E_{\phi} \cdot [Q_{c2} \cdot \Delta\epsilon_{\phi}(t_{i+1}, t_i)_{fr} + I_{c2} \cdot \Delta\psi_{\phi}(t_{i+1}, t_i)_{fr}] \quad (3)$$

$N_{\phi, rst}, M_{\phi, rst}$: 時刻 t_i から t_{i+1} の間のクリープ
進行に伴う自由ひずみと等価な力(レストレ
イン力)

E_{ϕ} : コンクリートのクリープ換算ヤング係数

A_{c2}, I_{c2}, Q_{c2} : ひび割れ断面の断面性能

$\Delta\epsilon_{\phi 0}(t_{i+1}, t_i)_{fr}, \Delta\psi_{\phi}(t_{i+1}, t_i)_{fr}$: クリープ進行に
伴う自由ひずみ, 自由曲率(式(2)参照)

3. 実験概要^{7), 8)}

3.1 供試体

供試体は, 幅 20×高さ 25×長さ 400cm の等断面
面 2 径間連続矩形はり (2φ1.800=3.600) で断面

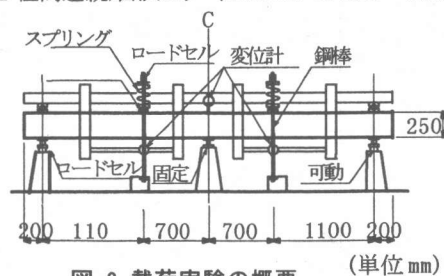


図-3 載荷実験の概要

は鋼材配置を含めて上下対称形とし, プレスト
レス量, 鉄筋量をパラメータとして3タイプを

製作した。材齢3日で脱型後, 湿潤養生を行い
材齢9日にプレストレス導入, 乾燥を開始し, シ
ース内へのグラ

ウトは翌日(材
齢10日)に実
施した。

持続荷重は, 中
間支点から
70cmの位置に

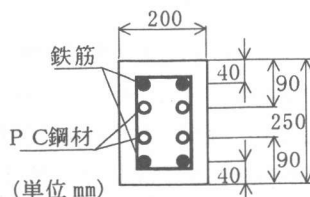


図-4 断面形状寸法

材齢16日に載荷した。図-3に載荷実験の概要,
図-4に断面形状寸法を示し, 表-1に供試体諸
元を示す。

3.2 計測方法

PC鋼棒の中間支点上となる位置で鋼棒1
本当たり2枚のひずみゲージを対面に貼付し
てひずみを計測した。

3.3 材料特性

コンクリートの強度, ヤング係数, クリープ
係数を表-2にまとめて示す。

表-2 コンクリートの材料特性

材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
9	33.5	----	26.7
16	39.9	2.57	28.7
28	48.8	3.16	29.5

解析では, 実測値を3次曲線補完して得られ
たヤング係数を用いた。また, クリープ係数は,
持続載荷実験と同じ断面寸法(幅20cm×高さ
25cm×長さ50cm)のクリープ供試体を製作し,
コンクリート応力度が約8.0 N/mm²になるプレ
ストレス力を導入して計測を行った。乾燥収縮
もこれと同じ大きさの供試体を製作して計測し
た。図-5にクリープ係数を, 図-6に乾燥収縮
について経時変化の計測値を示す。

表-1 供試体諸元

供試体 名称	上・下段鉄筋			上・下段PC鋼棒			PC鋼棒緊張応力(N/mm ²)		載荷荷重 (kN)
	鉄筋呼び径	As(cm ²)	鉄筋比(%)	呼び名	Ap(cm ²)	鋼材比(%)	上段	下段	
Dm16-7.4	2-Dm16	3.114	0.62	2-φ7.4	0.8	0.16	777	751	65.3
Dm13-9.2	2-Dm13	1.872	0.37	2-φ9.2	1.28	0.26	773	787	65.6
Dm13-11	2-Dm13	1.859	0.37	2-φ11	1.8	0.36	797	872	69.6

(鉄筋呼び径のDmは溝切り加工を施した鉄筋を意味し, 鉄筋比, 鋼材比は全断面に対する比率を表す。)

解析は、持続荷重載荷後の時間を 10 分割して行った。この際に用いた各載荷材齢ごとのクリープ係数は、CEB-FIPの方法によって求めたクリープ係数を各解析材齢ごとにクリープ供試体のひずみに一致するように修正を行って算出した。また、乾燥収縮の進行は、実験値の近似曲線を求めて算出した。図-5、6 に解析に用いた持続荷重の載荷材齢毎のクリープ係数および、乾燥収縮の進行曲線をあわせて示す。

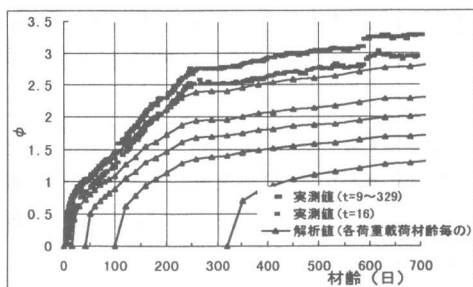


図-5 クリープ係数

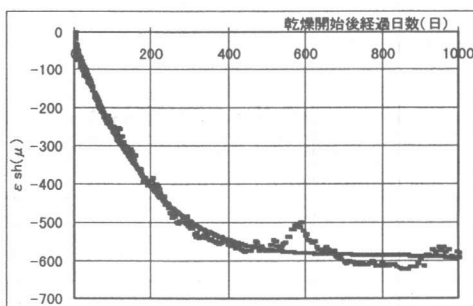


図-6 乾燥収縮の経時変化

4. 解析結果と考察

4.1 ひび割れ発生の影響

図-7 は Dm16-7.4 供試体について行った解析結果を引張側に配置した P C 鋼材、圧縮側に配置した P C 鋼材のクリープ、乾燥収縮によるプレストレス力の減少量の支間方向分布を各々示したものである。ここでの符号は、緊張力が減少する場合にマイナスで表す。

グラフ中の「従来法 (P C)」, および「従来法 (P R C)」は、示方書に規定されている P C 構造に対する減少量を求める方法と P C 鋼材や鉄筋による鋼材拘束を考慮した方法を用いた計算結果を各々、示すものである。この供試体は、荷重載荷点下側と中間支点上付近上側にひび割

れが発生しており、プレストレス力の減少量にその影響が表れている。すなわち、引張側鋼材も圧縮側鋼材も従来法によって得られた減少量の値は全区間で過大評価、つまり、有効プレストレス力を小さく見積もる結果となっている。また、グラフ中の中間支点位置に○印でプロットした実験結果からも同じ傾向が指摘できる。導入プレストレス力は、上側鋼材が 777 N/mm^2 、下側鋼材が 751 N/mm^2 に対して減少量の値は、従来法 (P C) では上側鋼材が $-111 \sim -213 \text{ N/mm}^2$ 、下側鋼材が $-134 \sim -236 \text{ N/mm}^2$ 、従来法 (P R C) では上側鋼材が $-87 \sim -161 \text{ N/mm}^2$ 、下側鋼材が $-104 \sim -178 \text{ N/mm}^2$ 、本解析法 (ひび割れ解析) では上側鋼材が $+44 \sim -118 \text{ N/mm}^2$ 、下側鋼材が $-9 \sim -118 \text{ N/mm}^2$ である。その差は、本解析と従来法 (P C) とでは上側鋼材が $56 \sim 155 \text{ N/mm}^2$ (導入プレストレス力の $7.2 \sim 20.0 \%$)、下側鋼材が $55 \sim 126 \text{ N/mm}^2$ (同 $7.4 \sim 16.7 \%$)、従来法 (P R C) とでは上側鋼材が $15 \sim 131 \text{ N/mm}^2$ (同 $1.9 \sim 16.8 \%$)、下側鋼材が $15 \sim 95 \text{ N/mm}^2$ (同 $1.9 \sim 12.7 \%$) を示している。

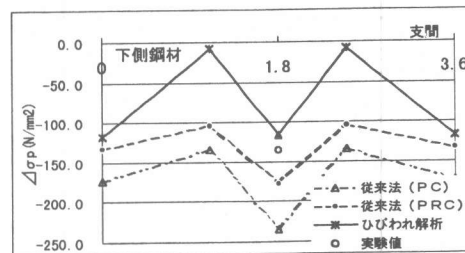
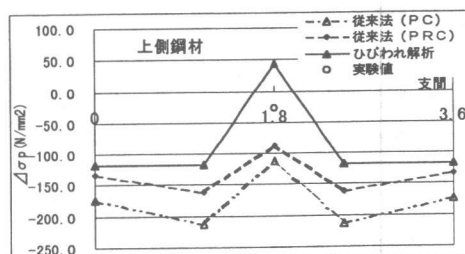


図-7 プレストレス力減少量分布

端支点位置でひび割れ解析による結果と「従来法 (P R C)」の結果が概ね一致しているのは、この位置にはひび割れ発生が無く、かつ、ひび割れ発生による断面力再配分の影響がないためであると考えられる。

また、このモデルで配置した鉄筋量は、引張側 (A_s)、圧縮側 (A_s') の鉄筋比が各々、 $p=p'=0.62\%$ である。実橋の標準的な鉄筋量は、箱桁 PRC ラーメン橋で $p=0.5\sim0.7\%$ 、 $p'=0.1\sim0.3\%$ であり、場所打ち中空床版 PRC 橋で $p=0.2\sim0.5\%$ 、 $p'=0.2\sim0.4\%$ であることから配置鉄筋量は、実橋レベルであるといえる。

図-8 は中間支点上位置でのひび割れ解析によって得られたプレストレス減少量の経時変化の結果を実験値と照合したものである。

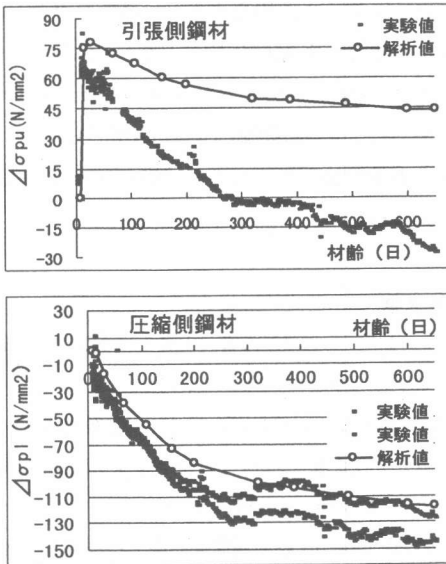


図-8 中間支点上でのプレストレス力減少量の経時変化

このグラフから圧縮側 (下側) 鋼材の減少量は解析値と実験値とが概ね一致しており、引張側 (上側) 鋼材については、減少量の経時変化の傾向は一致している。しかし、解析結果ではプレストレス張力が 44 N/mm^2 増加するのに対して実験結果では $17\sim20 \text{ N/mm}^2$ 減少している。両者の差は、 60 N/mm^2 程度で導入プレストレス力の 7.7% 前後である。この差違は、前述のように、この位置ではりの上側にひび割れが発生しており、解析で用いた PC 鋼材の平均ひずみの求め方がこの原因であると考えられる。つまり、ひび割れ解析でのテンションスティフネスを評価するために、前述のように CEB-FIP の規定の異形鉄筋に対する評価を用いた。PC 鋼材の平

均ひずみもこれに準じて求めている。しかし、実際はシース内にグラウトされて存在する PC 鋼材は、異形鉄筋と比べてコンクリートとの付着性能が低いことが明白であり、部材軸方向により長い範囲で、いわゆる滑り現象が生じ、部材軸方向に張力変動が平滑化されているものと推測される。これを異形鉄筋と同一の付着性状を持つものと評価したため部材軸方向の平滑化を過小評価してはり軸方向の張力変動分布を大きく評価しているためであると考えられる。

また、持続荷重を載荷した当初にその差違がグラフから認められる。これは、実験では中間支点到、はり方向に 10cm 、幅 20cm 、厚さ 8mm の鋼板を挿入してはりを直接支持する形式となっており、はり断面の剛性や、力の伝達が解析と異なっていることや、CEB-FIP に規定されているテンションスティフニングの評価法の問題等もこの要因と考えられる。

4.2 自己収縮の影響

一般に自己収縮の影響が大きいと言われている高強度コンクリートを用いた場合について Dm16-7.4 供試体モデルで行った試算結果を図-9 に示す。同図には、引張側 PC 鋼材、圧縮側 PC

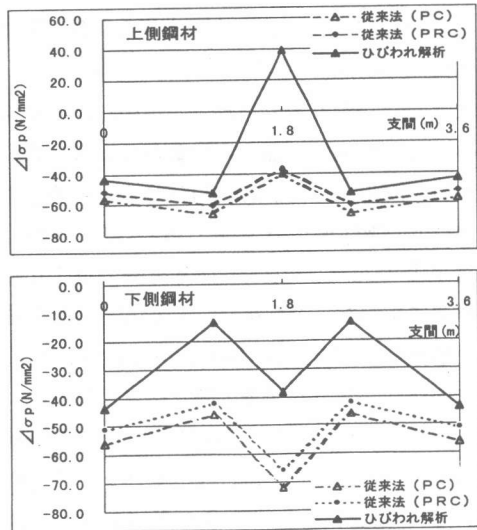


図-9 プレストレス力減少量分布 (高強度コンクリート)

鋼材各々のクリープ、収縮によるプレストレス力の減少量の支間方向分布を表示する。この際、

コンクリートの諸値は、ヤング係数 $E_c = 40.6 \text{ kN/mm}^2$, 引張強度 $f_{ct} = 5.61 \text{ N/mm}^2$, クリープ係数は、載荷材齢 0.4 日の $\phi_\infty = 2.378$, 9 日の $\phi_\infty = 0.991$, 収縮ひずみは $\epsilon_{sh}(\infty, 0.4) = 335E-6$, $\epsilon_{sh}(\infty, 9) = 220E-6$ を用いた。なお、この試算では、中間支点位置の上側にひび割れが発生する結果となった。

グラフに示す値は、「従来法」による計算では、プレストレス導入(9 日目)以降に進行する収縮のみを考慮して得られた結果であり、ひび割れ解析では、自己収縮を考慮するため材齢 0.4 日目以降に進行する収縮ひずみ・クリープ係数を用いた解析値を示す。導入プレストレス力は普通コンクリートの場合と同一の値で上側鋼材が 777 N/mm^2 , 下側鋼材が 751 N/mm^2 である。

「従来法」による結果は、普通コンクリートを用いた場合と同じ傾向で有効プレストレス力を小さく評価した結果となっている。特に、引張側(中間支点付近では上側、支間中央付近では下側)の P C 鋼材の張力減少量で、その傾向が著しい。ただし、中間支点上の引張側(上側) P C 鋼材張力減少量の差違(「従来法」で各々 -39.9 , -36.9 N/mm^2 に対して本解析では $+39.1 \text{ N/mm}^2$) は、ひび割れが発生したことが大きく影響していると考えられる。

また、ひび割れ発生が無く、かつ、ひび割れ発生による断面力再配分の影響がない端支点位置では、本解析と「従来法(P C)」との差違が上側、下側鋼材共 12.5 N/mm^2 (導入力の 1.6%), 「従来法(P R C)」とでは 7.6 N/mm^2 (同 1.0%) の結果であった。つまり、自己収縮ひずみを考慮した解析を行ってもその差はこの程度であった。

なお、プレストレス導入時点に自己収縮によって生じているコンクリート応力度は 0.47 N/mm^2 (引張)であった。これは、プレストレスの導入によって生じるコンクリート応力度 -2.32 N/mm^2 の 20%程度を相殺する値である。

5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

(1) 持続荷重によるひび割れ発生を容認する構

造形式に、示方書のプレストレス力減少量評価法を用いた場合には、有効プレストレス力を圧縮側鋼材も引張側鋼材も過小評価をする結果となった。また、ひび割れ発生位置付近での引張側 P C 鋼材では、ひび割れの発生に伴って張力の増加が起こる可能性があり、このことを考慮して鋼材の応力照査を行う必要がある。

- (2) 本解析に用いた条件の下では、プレストレス力の減少量に自己収縮が直接与える影響は大きいものではなく、自己収縮ひずみによって生じるコンクリートの引張応力がひび割れ発生に繋がった場合の影響が大きいと考えられる。
- (3) テンションスティフニングの評価や P C 鋼材の平均ひずみの評価などの問題は残っているが、本解析法が概ね妥当な結果を与えることが確認された。

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書(平成 8 年制定)設計編, 土木学会, 1996
- 2) 廣河和男ほか: 高強度 P R C への骨組構造クリープ解析法の拡張, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No3, pp. 907-912, 1999. 7
- 3) 安斎慎介ほか: 応力履歴を考慮した高強度 P R C 部材のクリープ解析について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No3, pp. 1877-192, 1999. 7
- 4) 廣河和男ほか: ひび割れた部材を有する骨組構造系の長期変形解析法に関する提案, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No3, pp. 913-918, 1998. 7
- 5) A. Ghali・M. M. Elbadry: Serviceability Design of Continuous Prestressed Concrete Structures, PCI Journal, Vol 34, No3, pp. 54-91, 1989
- 6) CEB-FIP Model Code 1990, 1993
- 7) 津田守ほか: 持続荷重を受ける P R C 連続はりの挙動について コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No2, pp. 697-702, 1995. 7
- 8) 阿部浩幸ほか: 長期持続荷重を受けた P R C 連続はりの静的荷重実験, プレストレストコンクリート技術協会 第 9 回シンポジウム論文集, pp. 485-490, 1999. 10