

論文 高強度 PRC への骨組構造クリープ解析法の拡張

廣河和男*1・安齋慎介・鳥取誠一*3・佐藤良一*4

要旨: 任意骨組構造系を対象として、ひび割れが発生した後の時間依存性長期変形骨組解析に自己収縮の影響を評価できるように、また、ひび割れ発生に伴うテンションスィフニング効果について、ひび割れ断面引張域のコンクリートの応力負担と鉄筋の付着によるものとの2つの要因に分けて評価する、新しい知見を取り込んで解析システムを拡張した。単純はりモデルでの載荷試験の結果と照合し、概ね一致した。さらに、2径間連続はりモデルで高強度コンクリートを用いた場合のコンクリートの材齢0日からのクリープ、自己収縮を考慮した試算を行って鉄筋のひずみの経時変化を示した。

キーワード: テンションスィフニング, 自己収縮, クリープ, 骨組構造解析

1. はじめに

近年、コンクリート橋にPRC構造が、その合理性や経済性により多用されている。また、材料としてのコンクリートも高強度化が進み、高強度コンクリートを用いたPRC構造が増加することが予測される。特に、高強度コンクリートの超若材齢での収縮特性やクリープ特性の解明に伴って²⁾、セメントの水和反応による自己収縮の影響が無視できないことが明らかになってきた¹⁾。一方、ひび割れ発生に伴う部材剛性低下を評価する際、テンションスィフニングの評価が重要なことは自明のことである。CEB-FIP MODEL CODE 1990(以下 MC90)³⁾に定められている方法では、高強度コンクリートの特性を必ずしも考慮されたものではないことが指摘されており⁴⁾、引張軟化-開口変位の関係を取り込んだ解析例も発表されている⁵⁾。

時間依存性長期変形骨組解析(以下「ひび割れクリープ解析」)が任意構造系に適用できる解法に関する Ghali⁷⁾らの解法の拡張解法についてすでに報告⁶⁾した。本研究は、自己収縮の特性

やテンションスィフニングに関する新しい知見を取り込んで、この解析システム⁶⁾を拡張し、結果の精度を更に向上しようとしたものである。なお、解析計算の結果は単純はりモデル、および、2径間連続はりモデルでの載荷試験の結果と照合し、その妥当性の照査や MC90 モデルの解と数値比較を行い、その傾向の差を明確にするものである。

2. 拡張した内容

2.1 自己収縮の影響評価方法

高強度コンクリートの材料特性として、セメントの水和反応による自己収縮ひずみが超若材齢で発生することが知られている。材齢1日で60%強の自己収縮ひずみ値を測定した実験報告もある²⁾。特に、比較的鉄筋量が多いPRC部材に高強度コンクリートを用いる場合には鉄筋の拘束によって無視し得ない自己収縮応力が発生する場合がある。一般に、クリープと乾燥収縮の時間依存解析は、プレストレス力が導入された時点以降を対象としている。しかし、高

*1 日本電子計算(株) 大阪支店技術営業部(広島大学大学院)(正会員)

*2 宇都宮大学大学院 工学部建設学科建設工学専攻(正会員)

*3 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部(正会員)

*4 広島大学教授 工学部第四類(建設系), 工博(正会員)

強度コンクリートを用いた場合には、プレストレスが導入される以前に発生する自己収縮ひずみの影響を評価することが重要な問題となる。

本解析では応力に関わる自己収縮は、コンクリートと鉄筋との付着力が発現し始めた時点から鉄筋がコンクリートの収縮を拘束し始め内的な不静定力が発生し始めると考える。また、クリープ進行の影響解析は、Troost-Bazant の材齢係数 (ρ) によるクリープ換算ヤング係数 (E_ϕ)

(式(1)参照)を用いた有効弾性係数法によったものであり、収縮ひずみの進行についてもこれと同一に扱う。

$$E_\phi = \frac{E_c}{1 + \rho\phi} \quad (1)$$

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 : 材齢係数

自己収縮による内的不静定力は、図-1 に示す発生模式図を参照して次式(2)で求められる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta N_{as} &= E_\phi \cdot \Delta \varepsilon(t_{i+1}, t_i)_{asfr} \cdot A_{c2} \\ \Delta M_{as} &= E_\phi \cdot \Delta \varepsilon(t_{i+1}, t_i)_{asfr} \cdot Q_{c2} \\ \Delta \sigma_{as} &= \Delta \sigma_{asc0} + \Delta \sigma_{ascv} + \Delta \sigma_{asc2} \end{aligned} \right\} (2)$$

ΔN_{as} : 時刻 $t_i \sim t_{i+1}$ に生じる自己収縮による自由ひずみと等価な力

E_ϕ : 時刻 $t_i \sim t_{i+1}$ のコンクリートのクリープ換算ヤング係数

$\Delta \varepsilon(t_{i+1}, t_i)_{asfr}$: 時刻 $t_i \sim t_{i+1}$ に生じる自己収縮による自由ひずみ量

A_{c2} : 部材断面面積 (コンクリート純断面)

$\Delta \sigma_{as}$: 時刻 $t_i \sim t_{i+1}$ での自己収縮ひずみの発生に伴う変化応力度

$\Delta \sigma_{asc0}, \Delta \sigma_{ascv}, \Delta \sigma_{asc2}$: 時刻 $t_i \sim t_{i+1}$ に生じる自己収縮による変化応力度 (図-1 参照)

2.2 テンションスィフニングモデル

単位荷重をおのおの、全断面有効とした部材に作用させた計算値とその時のひび割れ断面とした部材に作用させた計算値との補間を行って

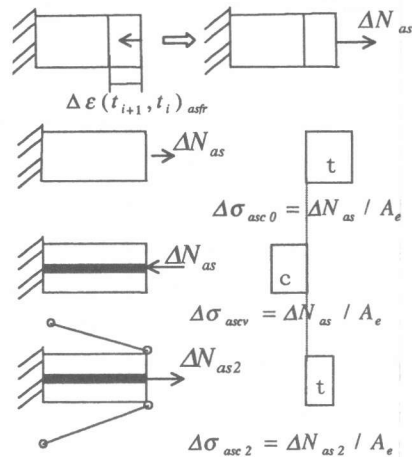


図-1 自己収縮によるひずみと応力

求めた平均曲率、平均ひずみを求め、これを部材長で積分すれば、ひび割れ部材としての変位を求めることができる。本解析法では、ひび割れ発生部材の部材剛性をこうして求めた変位から逆算して算定している。つまり、本解析法では、ひび割れ部材の剛性は平均ひずみを求める方法に大きく依存している⁷⁾。一般に、テンションスィフニングは、コンクリートと鋼材との付着が主たる要因であると考えられており、MC90をはじめとする既往の方法もこれを基本としている。しかし、最近、破壊力学からのアプローチにより、ひび割れ開口変位が小さい場合には、コンクリートの引張軟化特性による抵抗も無視しえないものといわれている⁵⁾。

特に、高強度コンクリートを用いた場合には、相対的にプレストレスも増大することや、速い時点で自己収縮が発生する反面、乾燥収縮の増加率が小さいことなどを考えあわせると、作用荷重時のひび割れ開口変位が小さく制御される可能性が高い。これらのことを背景に、最近、式(3)に示す、ひび割れ断面引張域のコンクリートの応力負担と鉄筋の付着によるものとの2つの要因に分けて評価するテンションスィフニングモデルが提案された⁴⁾。本研究では、この新しく提案されたテンションスィフニングモデル(以下「新モデル」)を取り込んでMC90

に定められている方法との比較を行う。

$$\bar{\psi} = \psi_{2t_1} - \psi_{ct} - \psi_{bt} \quad (3)$$

$$= \psi_{2t_1} - (\psi_{2rt2} - \psi_{1rt2}) \cdot$$

$$\{\alpha_{(t)} [1 + C_c (1 - M_K)] + \gamma_{(t)} C_b (1 - 1 / M_K)\}$$

ただし、

$$M_K = (M - M_0) / (M_r - M_0) \leq 2.0$$

$\bar{\psi}$: 平均曲率

ψ_{2t_1} : t_1 日におけるひび割れ断面の M に対応する曲率

ψ_{ct} : t_1 日におけるひび割れ断面引張域のコンクリート応力負担による曲率

ψ_{bt} : t_1 日における付着による引張剛性による曲率

ψ_{1rt2} 、 ψ_{2rt2} : ひび割れ発生時点 t_2 日における全断面およびひび割れ断面の M_r に対応する曲率

M : 作用モーメント

M_r : ひび割れ発生モーメント

M_0 : ディコンプレッションモーメント

C_c : 開口変位などの影響を表す係数

C_b : 付着特性などの影響を表す係数

α_t : ひび割れ断面引張域のコンクリート応力負担の経時変化を表す係数

γ_t : 付着による引張剛性の経時変化を表す係数

3. 計算例と検証

3.1 計算上の仮定

- ① 自己収縮は断面に均一に生じる。
- ② クリープ進行、乾燥収縮ひずみの進行は断面圧縮域のみに生じる。
- ③ 収縮ひずみの進行は自己収縮と乾燥収縮を分割しないで合計値を用いた計算を行う。この合計収縮ひずみの進行は、自己収縮の進行特性を勘案したものである。

3.2 計算モデルと計算内容

高強度コンクリートを用いた単純はりに一定の曲げモーメントを作用させたモデルで短期ひび割れ解析を行い、載荷実験の結果との比較によりテンションステイフィングモデルの妥当性を評価する。

また、高強度コンクリートを用いた単純はり供試体や普通強度コンクリートを用いた2径間連続はり供試体について実施した長期載荷実験をモデル化したひび割れ長期解析の計算を実行して結果の照合を行う。さらに、2径間連続はりモデルについて高強度コンクリートを用いた場合のプレストレス導入を含めて載荷以前からの試算を行い、材齢0日からのクリープ、自己収縮による時間依存変化について明らかにする。

この際に用いる収縮（自己、乾燥）係数、クリープ係数、ヤング係数、コンクリート強度は実験で得られた普通強度、高強度コンクリート各々の値を用いて計算を行う（普通強度コンクリートに対して $E_c=2.92 \times 10^4$, $f_c=3.42 \text{ N/mm}^2$, $\phi_\infty=3.603$, $\epsilon_{cs,\infty}=543 \times 10^{-6}$, 材令係数 $\rho=0.8$ （一定値）、高強度コンクリートに対して $E_c=4.06 \times 10^4$, $f_c=5.61 \text{ N/mm}^2$, $\phi_\infty=3.425$, $\epsilon_{cs,\infty}=568 \times 10^{-6}$, 材令係数 $\rho=0.8$ （一定値）。2径間連続はり供試体の構造諸元と解析モデルを図-2に示す。

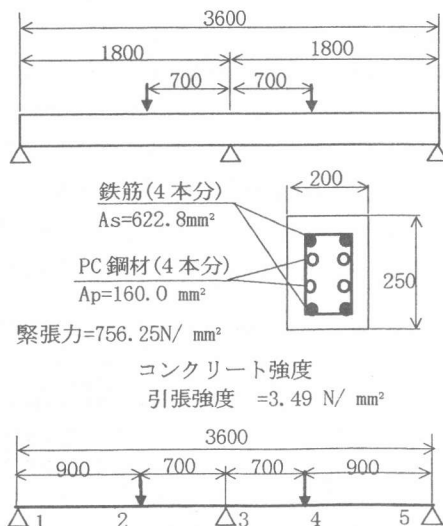


図-2 実験モデル及び解析モデル

3.3 結果と考察

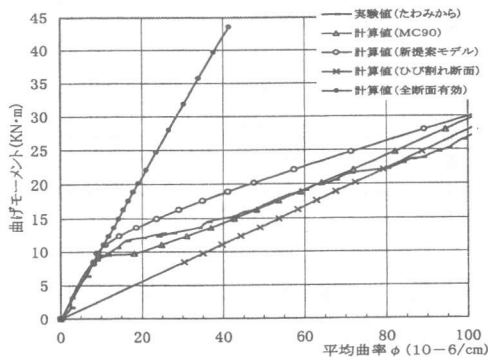
単純はりモデルで得られた短期ひび割れ解析

の結果を図—3, 4, 5, 6に示し、ひび割れクリープ解析の結果を図—7に示す。また、2径間連続はりモデルで得られたひび割れクリープ解析の結果を図—8, 9に示す。

(1) 単純はりモデル

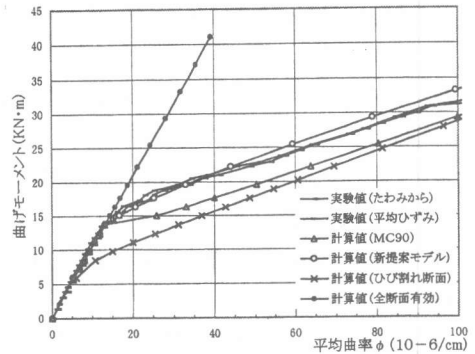
i) 短期ひび割れ解析の結果

図—3, 4は支間中央での曲げモーメントと平均曲率の関係を示し、図—5, 6は同位置での曲げモーメントと平均ひずみの関係を示したもので、各々、曲げモーメントのみを載荷した場合と曲げモーメントと軸力を載荷した場合について表している。この際の軸力は、プレストレス力(P=72.0kN)である。平均ひずみ、平均曲率とも新モデルの方がMC90モデルより小さな値(剛性が高い目)を示す傾向がある。また、平均曲率、平均ひずみとも曲げモーメントのみを載荷した場合にはMC90モデルが新モデル(式(3)参照)に比べて実験値に近い結果を示し、曲げモーメントと軸力を載荷した場合には新モデル(式(3)参照)が実験値に近い結果を示している。これは、新提案モデルは、ひび割れ断面の鉄筋応力が軸力によるものであるとか曲げによるものとかの区別をせずに、鉄筋の全応力を曲げ換算して評価している部分があり、軸力が零、つまり曲げモーメントのみを載荷した場合に誤差が大きくなったとも考えられる。また、今回設定した軸力は、プレストレスによるコンクリートの応力度が比較的小さい値(PC鋼材位置で $\sigma_c=1.8\text{N/mm}^2$)であり、大きな軸力が

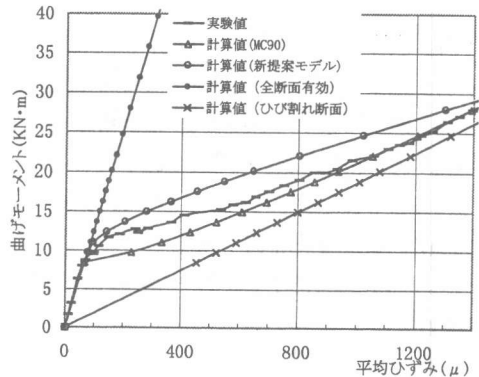


図—3 単純はり支間中央での曲げモーメント—平均曲率関係 (Mのみ作用)

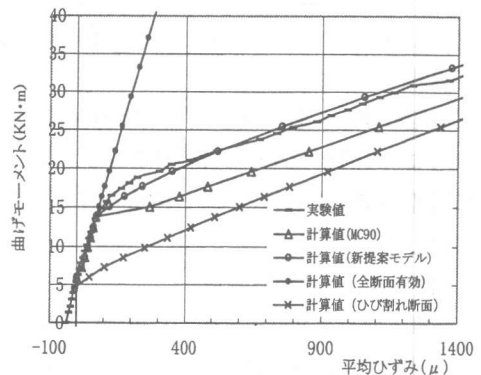
作用する場合についても検証する必要がある。なお、図—3に示す曲げモーメントのみを載荷した場合の平均曲率が $M=220\text{kNm}$ 付近から実験値がひび割れ断面とした計算値を上回っているのは、計算には考慮していない荷重載荷材令(16



図—4 単純はり支間中央での曲げモーメント—平均曲率関係 (M, N作用)



図—5 単純はり支間中央での曲げモーメント—平均ひずみ関係 (Mのみ作用)



図—6 単純はり支間中央での曲げモーメント—平均ひずみ関係 (M, N作用)

日)までの自己収縮を鉄筋が拘束することによる下反りがひび割れ発生に伴って増幅したことが一因であると考えられる。

ii) ひび割れクリープ解析

図-7は一定の曲げモーメント (257 kNm) を載荷した場合の支間中央での鉛直たわみ量の経時変化を示す。この結果はちょうど実験値を挟むように、MC90 は若干大きめのたわみ値を与え、新提案モデルは小さめのたわみ値を与えている。実験値と新モデルはたわみ量が 0.3mm 弱から次第に増加量が減少してゆき、MC90 モデルでは 0.4mm 強から同様の傾向をたどっている。部材はこの時点でひび割れており、新モデルと MC90 モデルとのこの違いは、まさに、テンションスティフニング効果の評価の差である。

(2) 連続はりモデルの結果

普通コンクリートを用いた場合と高強度コンクリートを用いた場合の計算値と、普通コンクリートを用いて行った実験値各々の載荷点位置での鉛直たわみ量の載荷直前を0とした経時変化を図-8に示す。この結果から普通コンクリートを用いた場合でもMC90 モデルは若干大きめのたわみ値を与え、新モデルは材齢が1年程度までは小さめのたわみ値を与えるが、それ以降ではかなり実験値と一致している。この傾向は高強度コンクリートを用いた単純はりの結果と一致するものであるが、この構造系は、不静定構造であり部材剛度が支点反力におよぼす影響も存在すると考えられる。この場合にも単純はりの場合と同様に、荷重載荷時点でのたわみ値の差異が大きく影響している、これは、テンションスティフニング効果の評価差である。図-8には高強度コンクリートを用いた場合の仮想の計算結果も併せて示す。この図からも読みとれるように、高強度コンクリートを用いた場合には載荷後に発生する時間依存変化量(率)は非常に小さい。しかも載荷後速い時期にその多くが生じる結果を示している。これは高強度コンクリートが有するクリープ、自己収縮の材料特性を顕著に表している。この計算結果では、自

己収縮による引張側鉄筋位置でのコンクリートの応力度は、プレストレス力導入前時点(コンクリート打設後9日目に導入する)で 0.27N/mm²の引張であった。これは、プレストレス力(図-2参照)による応力度が圧縮の 2.2N/mm²であ

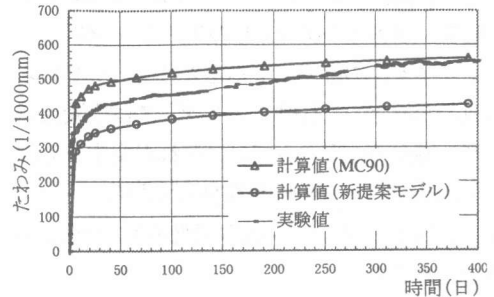


図-7 単純はり支間中央の鉛直たわみの経時変化

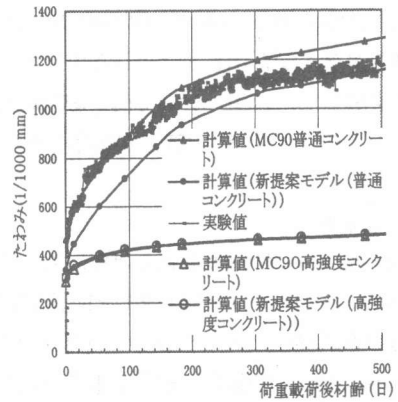


図-8 連続はり荷重載荷点での鉛直たわみの経時変化

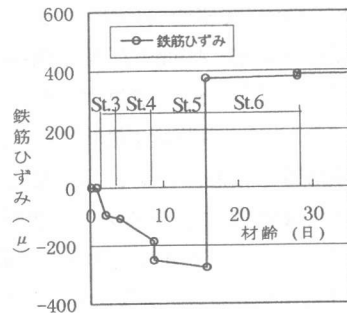


図-9 連続はり荷重載荷点断面の引張鉄筋ひずみの経時変化

るから、これを 10%以上相殺するものである。本供試体に導入したプレストレス力は、けた橋主けたに導入される値に比べてコンクリート応力度で 1/2~1/3 程度で大きな値でないことを考えあわせても無視できる値ではない。

また、高強度コンクリートを用いた試算では、新提案モデルと MC90 とのテンションスィフニングモデルの違いによる差異はほとんど認められなかった。これは、このモデルでは中間支点上及び載荷点位置のみでひび割れが発生しその他の断面ではひび割れが発生しておらず、テンションスィフニング効果の評価差の影響が小さいためである。

図—9は、図—8に示した高強度コンクリートを用いた場合の試算の結果から載荷位置断面での引張側鉄筋ひずみの経時変化をコンクリートの材齢が 0 日から示す。図中の St. 3~St. 6 は解析ステージを示しステージ 5 でプレストレスを導入し、ステージ 6 で荷重載荷を行っている。ステージ 6 でひび割れが発生した。

4. まとめ

本研究は任意骨組構造系を対象に、ひび割れ発生後のひび割れクリープ解析に自己収縮の影響や、ひび割れ発生に伴うテンションスィフニング効果についての新しい知見を取り込んで解析法を拡張したもので研究成果として次のことがあげられる。

i) 自己収縮の影響を考慮した解析が可能になった。高強度コンクリートを用いた連続はりモデルでの試算では、普通強度コンクリートを用いた結果とたわみ値の時間依存変化の性状が著しく異なることが示され、高強度コンクリートを用いた場合には、3ヶ月程度で最終たわみ量の 90%程度が発現する結果となった。このことは、若材齢における変化量、つまりクリープや自己収縮の影響度が大きいことを示すものといえる。自己収縮によって生じるコンクリートの応力度は、プレストレスによるものの 10%程度を相殺する値であった。

ii) 計算値は概ね実験値と一致しており、解析計算に際して、モデルを MC90 および、新たに提案されたテンションスィフニングモデルから選択できるようになった。また、本計算では、新たに提案されたテンションスィフニングモデルは小さめのたわみ値を与える傾向が確認された。MC90 が若干大きめのたわみ値を与える傾向であるから、改善が図られたものといえる。

iii) 新たに提案されたテンションスィフニングモデルは、軸力と曲げが同時に作用する場合について本研究の範囲では不十分な点はあるものの得られた結果からは、実用に耐えうるものであると判断される。また、新モデルはテンションスィフニング効果に原理的にアプローチしたもので、論理的な面から改良の余地を持つものと考えられ、さらなる進歩が期待できる。

参考文献

- 1) 田澤栄一, 宮沢伸吾, 佐藤剛, 小西謙二郎: コンクリートの自己収縮 コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 14 1992
- 2) 揚揚, 許明, 佐藤良一, 手塚正道: 高強度コンクリートの収縮及びクリープについて プレストレストコンクリート技術協会 第 7 回シンポジウム論文集 1997 10
- 3) CEB-FIP: MODEL CODE 1990
- 4) 手塚正道, 佐藤良一, 廣河和男, 安斎慎介: 引張軟化の影響と付着に基づくテンションスィフニングモデル コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 21 1999
- 5) 氏家勲, 佐藤良一, 許明, 安斎慎介: 引張軟化を考慮した RC 部材のクリープ解析 コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 20 1998
- 6) 廣河和男, 野村貞広, 鳥取誠一, 佐藤良一: 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 1998
- 7) A.Ghali · M.M.Elbadry: Serviceability Design of Continuous Prestressed Concrete Structures PCI Journal Vol 34 No3 1989