論文 PRC はり部材のひび割れ幅経時変化の解析的評価手法に関する基礎 的研究

玉野 慶吾*1・中村 光*2・上田 尚史*3・国枝 稔*4

要旨: PRC はり部材のひび割れ幅に及ぼす収縮の影響について、クリープ、収縮、コンクリートの硬化過程 に伴う材料特性の変化と、鉄筋の付着性状を考慮した 3 次元有限要素解析を用いて解析的に評価を行った。 本解析手法により、離散的なひび割れの発生を再現し、クリープ、乾燥収縮による PRC はりの曲げひび割れ 幅の経時的な挙動を概ね評価できることを示した。解析結果から、収縮ひずみが異なる場合においても、引 張鉄筋ひずみは経時的にほとんど同一となり、ひび割れ幅の経時的な増加には、コンクリートの収縮量が主 に影響していることが示された。

キーワード:ひび割れ幅,乾燥収縮,クリープ,FEM,付着,乾燥領域

1. はじめに

PRC構造は, RC構造と PC構造の中間領域の全てを包 括する自由度の高い構造であることから、その合理性を 活かした幅広い適用が望まれている。しかしながら, PRC 構造にひび割れが発生する時期を制御する概念が明確 でないことや、ひび割れが発生した PRC 構造のクリープ や収縮の進行に伴う断面の中立軸位置の変化などを精 密に照査する手法がないことなどにより、その適用範囲 は限られ、明確な設計手法も確立されてこなかった。そ のため PRC 構造の合理性は必ずしも活かされていない のが現状である¹⁾。PRC 構造の合理性を活かしつつ,十 分な耐久性を確保するためには、構造物の使用期間に渡 ってひび割れ幅の経時変化を予測し、その制御を適切に 行うことが必要となる²⁾。PRC 構造物の挙動を評価する にあたり,多様な断面形状や,配筋,さらには境界条件 を有する実構造物を考えた場合、解析の自由度が高い有 限要素法の利用が有効と考えられる。また、ひび割れ幅 の経時変化に関しては、ひび割れ発生後のひび割れ間コ ンクリートの収縮ひずみを適切に考慮する必要がある とされており³⁾,その影響を部材レベルでの数値解析に おいても、評価可能になることが望ましいと考えられる。 さらに,近年大きな収縮量が生じた場合のひび割れへの 懸念が生じていることからも、収縮の影響を適切に評価 可能な手法の構築が望まれている。

そこで本研究では、コンクリートの時間依存変形挙動 として、クリープと収縮を考慮するとともに、コンクリ ートの硬化過程に伴う材料特性の変化を考慮し、さらに 離散的なひび割れの発生が評価可能な3次元有限要素解 析を用いることで、PRC はりの時間依存挙動の解析的評 価をひび割れ幅に着目して行った。その中では,部材全体に一様な収縮ひずみを仮定したものから,自由収縮の 絶対量の相違や,局所的な収縮の影響についても検討した。

2. 解析概要

2.1 解析手法

解析は、8節点アイソパラメトリック要素を用いた非 線形3次元有限要素プログラムを用いた⁴⁾。コンクリー トの材料モデルは、引張軟化領域では、引張破壊エネル ギーを考慮し、引張軟化曲線に1/4モデルを、圧縮領域 では、応力が圧縮強度に達するまではSeanzが提案した 等価一軸応力ーひずみ関係を用いた⁴⁾。鉄筋および PC 鋼材は離散鉄筋要素によりモデル化し、鋼材とコンクリ ート要素間はリンク要素を用いて付着挙動を考慮した。 リンク要素に仮定した付着応力ーすべり関係を式(1)に 示す。このように離散鉄筋により付着特性をモデル化す ることで、離散的なひび割れ発生状況やひび割れ幅など を概ね評価可能な事が報告されている⁵⁾。

$$\tau = \begin{cases} 0.4 \times 0.9 \times (f_c')^{2/3} \left(1 - \exp\left(-40(s/D)^{0.5} \right) \right) & 0 \le s < 0.2\\ \tau_{\max} - (\tau_{\max} - 0.1\tau_{\max})(s - 0.2)/(0.4 - 0.2) & 0.2 \le s < 0.4\\ 0.1 \times \tau_{\max} & 0.4 \le s \end{cases}$$
(1)

ここで、 τ は付着応力、 f'_c は圧縮強度、sはすべり量、 Dは補強材の直径であり、 τ_{max} は付着応力の最大値を表 す。

2.2 時間依存挙動のモデル化

コンクリートの時間依存挙動としては,クリープ,収 縮とコンクリートの硬化過程に伴う材料特性の変化を

*1	名古屋大学大学院	工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)
*2	名古屋大学大学院	工学研究科社会基盤工学専攻教授 博(工) (正会員)
*3	名古屋大学大学院	工学研究科社会基盤工学専攻助教 工修 (正会員)
*4	名古屋大学大学院	工学研究科社会基盤工学専攻准教授 博(工) (正会員)

考慮した。クリープの影響は、主応力方向の応力増分に 対し、式(2)に示す Step by step 法によりクリープひずみ を算出し、初期ひずみ問題として考慮した。クリープ関 数は、式(3)に示す土木学会コンクリート標準示方書のと 同じ関数形とした。

$$\varepsilon_{creep} = \sum_{i=1}^{m-1} \varphi(t, t', t_0) \Delta \sigma_i \qquad (m \ge 2)$$
⁽²⁾

$$\varphi(t,t',t_0) = \left[1 - \exp\left\{\alpha_1 \left(t - t'\right)^{\beta_1}\right\}\right] \varepsilon'_{cr}$$
(3)

ここで、 ε_{creep} はクリープひずみ、 $\varphi(t,t',t_0)$ はクリープ関数、 t_0 、t'およびtはそれぞれ、乾燥開始時、載荷時および載荷中のコンクリートの有効材齢、 α_1 および β_1 は定数であり、 ε'_{cr} はクリープひずみの最終値を表す。 $\Delta \sigma_i$ は時間ステップ t_{i-1} から時間ステップ t_i 間での応力増分である。

一方,収縮の影響には,式(4)に示す土木学会コンクリ ート標準示方書^のと同じ関数形を用いて収縮ひずみを算 出し,初期ひずみ問題として考慮した。

$$\varepsilon_{cs}'(t,t_0) = \left[1 - \exp\left\{\alpha_2 \left(t - t_0\right)^{\beta_2}\right\}\right] \varepsilon_{sh}'$$
(4)

ここで、 $\varepsilon'_{cs}(t,t_0)$ は収縮ひずみ、 t_0 およびtは乾燥開始時 および乾燥中のコンクリートの有効材齢、 α_2 および β_2 は定数、 ε'_{sh} は収縮ひずみ量の最終値であり、相対湿度、 単位水量、体積表面積 (V/S)の関数である。

材齢に伴う材料特性の変化は Solidification concept に 基づき考慮した n 。

すなわち,材齢とともに変化する材料特性を,セメン トの水和の反応の程度を表す関数である Volume function (v(T))と関連付けた。任意時間の応力 $(\sigma_s(t))$ は, 式(5)に示すように Volume function の増分(dv(T))とひ ずみ履歴を考慮した。各時間ステップで生成された硬化 体の応力-ひずみ関係 $(\sigma(\varepsilon(t) - \varepsilon(T)))$ の総和として与 えられる。ここで,tはトータルの時間,Tは各ステッ プでの時間を表す。なお,材料特性の時間的変化は,コ ンクリートの圧縮強度,引張強度,ヤング係数,鉄筋と の付着強度に対して考慮した。

$$\sigma_{g}(t) = \int \sigma(\varepsilon(t) - \varepsilon(T)) dv(T)$$
(5)

3. PRC はり部材のひび割れ幅に対する解析の適用性 3.1 解析対象 PRC はり

(1) 実験概要

手塚らにより行われた PRC はり (NL32) の実験⁸⁾を 対象として解析的評価を行った。供試体は、断面が 200×250mm,長さが 2400mm のはりであり、その概要を 図−1 に示す。鉄筋は引張鉄筋に D13, PC 鋼材に *φ*9.0 の細径異形 PC 鋼棒, 圧縮鉄筋に D16 が、それぞれ 2 本 ずつ配筋さていている。コンクリートの材料特性を**表**-1 に示す。鉄筋および PC 鋼材のヤング係数は 201kN/mm², 202kN/mm² である。



表-1 材料特性

試験時期	プレストレス導入時 (材齢9日)	持続荷重載荷時 (材齢17日)	標準養生 (材齢28日)
圧縮強度(N/mm ²)	39.9	45.4	44. 5
引張強度(N/mm ²)		3.6	3.6
ヤング係数(kN/mm ²)	30. 1	32. 7	36.8

実験では、材齢9日でPC 鋼棒に 118.6kN (927.3N/mm²) のプレストレスが導入され、材齢 17日で 68.5kN の持続 荷重が載荷された。さらに材齢 1224日で持続荷重を 77.25kN まで増加させている。さらに、実験ではスパン 中央 520mm 区間に 20mm 間隔で引張鉄筋ひずみ分布が 測定されている。また、はり供試体とは別に載荷用供試 体と同断面で長さ 500mm の供試体を用いて、収縮ひず みが計測されている。計測には、埋込み型ひずみ計と標 点距離 100mm としたコンタクトゲージ(精度 1/1000mm) が併用されている。クリープの測定には、プレーンのコ ンクリート供試体により、クリープ係数が計測されてい る。

(2) 解析のモデル化

本解析で用いた解析モデルを図-2 に示す。等曲げ区間を含む周辺では、ひび割れ分布を詳細に検討するために細かな要素分割をした。



コンクリートの材料特性の変化を示す Volume function は, **表**-1 の材齢 28 日の値で正規化して 9 日, 17 日の 値を補間するように式(6)で与えた。

$$v(t) = 1 - \exp(-0.3 \times t^{0.85}) \tag{6}$$

また、クリープ係数、収縮ひずみは、図-3 に示すように実験値と適合するように、式(3)および式(4)のα,と

 β_i を決定した。収縮量に関しては、部材全体に一様に与えるものとした。



3.2 ひずみの時間依存挙動の評価

図-4 に、等曲げ区間での引張鉄筋ひずみ分布の経時 変化の解析値と、ひずみ測定区間の実験値を示す。ひず みの最大値や最小値、ひずみが増加する間隔や領域など のひずみ分布性状ならびに、その経過時間変化について、 解析値は実験値を概ね妥当に評価していることが分か る。このように、本解析のようなクリープ・収縮の影響 と付着の影響を適切に考慮した有限要素解析を用いれ ば、長期的に、分布的にも、鉄筋のひずみを妥当に評価 できることが示された。



3.3 ひび割れ幅の評価

図-5に、持続荷重増加直前(1223日)の実験で得ら れたひび割れ性状と解析で得られたひずみ分布を重ね たものを示す。コンター図は、解析より得られた部材軸 方向のひずみ分布であり、コンター図の赤色で表示され ている領域がひび割れ発生位置に対応する。また、実験 で観察されたひび割れを白線で重ねて表している。底面 位置でのひび割れ発生本数は、実験が6本、解析が6本 となり一致している。底面での最大ひび割れ間隔は、実 験が 226mm,解析が 180mm であり,平均ひび割れ間隔 は、実験が 181mm,解析が 140mm となり,若干小さめ ではあるが,概ね評価することができている。一方,側 面でのひび割れ進展長さは、実験と解析でよく一致して いる。



因 5 天歌ののの割れ住私と解析ののすが方相

図-6 に、実験において測定された、供試体側面引張 鉄筋位置でのひび割れ幅の経時変化の平均値と最大値 の実験値と解析値を示す。ここで、ひび割れ幅は、各有 限要素節点間の水平方向の相対変位として表わした。こ れは、ひび割れが発生していない位置の弾性変形は微少 と仮定すれば、各節点間の相対変位をひび割れ幅とみな せるためである。解析はひび割れ幅を小さめに評価して いるが、クリープ、収縮の影響により、徐々に増加して いるが、クリープ、収縮の影響により、徐々に増加して いく経時変化の傾向をよく評価できている。また、最大 ひび割れ幅と平均ひび割れ幅の比は、例えば 500 日では、 実験および解析はそれぞれ 1.17、1.10 であり、概ね一致 している。以上のことから、本解析手法により、PRC 部 材のひび割れの経時変化を概ね妥当に評価できること が分かる。



図-6 ひび割れ幅の経時変化(引張鉄筋位置)

3.4 表面ひび割れ幅・時間依存挙動の評価

実験では、表面ひび割れ幅が計測されていなかったため、式(7)に示す土木学会コンクリート標準示方書^ののひ び割れ幅算定式と比較しながら、表面ひび割れ幅の評価 および、ひび割れ幅におよぼすクリープ、収縮の影響に ついて検討する。

$$w = 1.1k_1k_2k_3 \left\{ 4c + 0.7(c_s - \phi) \right\} \left[\frac{\sigma_{ss}}{E_s} + \varepsilon_{csd}' \right]$$
(7)

ここで、wはひび割れ幅、 k_1 , k_2 および k_3 はひび割れ 間隔に影響する係数、cはかぶり、 c_s は鋼材の中心間隔、 ϕ は鋼材径、 σ_{sc} は鋼材位置のコンクリートの応力度が0 の状態からの鉄筋応力度の増加量、 E_s は鋼材のヤング係 数、 ε'_{csd} はコンクリートの収縮およびクリープ等による ひび割れ幅の増加を考慮するための数値を表す。

図-7 に、スパン中央でのはりの下縁での、持続荷重 増加直後の17.2 日と持続荷重増加直前の1223 日の表面 ひび割れ幅の分布を示す。表面ひび割れ幅は、クリープ、 収縮の影響で、時間経過とともに2倍程度増加すること が分かる。式(7)より算出した最大ひび割れ間隔は195mm であり、解析で得られた180mmと概ね一致している。



また図中には式(7)より求めた短期載荷と長期載荷の ひび割れ幅を示している。短期ひび割れは、 ε'_{csd} を零と 仮定し算出した。長期ひび割れは、土木学会コンクリー ト標準示方書^のでは、収縮ひずみが 1000 μ 以下であるコ ンクリートに対しては、 ε'_{csd} を 300~450 μ 程度としてよ いと記述されているので、 ε'_{csd} を 300 μ と 450 μ で仮定し 算出した。解析で得たひび割れ幅は、示方書により算出 した値と概ね一致した値となった。

ひび割れ幅の増加は,式(7)で明らかなように,引張鉄 筋ひずみの増加と,クリープ・収縮によるひずみの影響 の和として表される。そこで両者の経時変化について検 討するため,図-8に図-7のAの位置の引張鉄筋ひず みと ε'cal の経時変化を示す。ここで,引張鉄筋ひずみに は解析値を用い、 ε'_{csd} は解析値の引張鉄筋ひずみ、最大 ひび割れ間隔 (180mm),表面ひび割れ幅を用いて、式(7) により算出した。鉄筋ひずみは、初期に急激に増加し、 初期段階のひび割れ幅の増加に大きく寄与しているこ とが分かる。一方、 ε'_{csd} は、徐々に増加している。持続 荷重増加直前の鉄筋ひずみ、 ε'_{csd} を合わせたひずみの増 加量は 500 μ 程度であった。その内鉄筋ひずみは 200 μ 程 度であり、クリープ・収縮による鉄筋ひずみの増加を適 切に評価することが重要であることが分かる。ただし、 対象としたはりでは、式(7)に用いたコンクリートの引張 応力を無視するなどの安全側の仮定を含んだ設計上の 鉄筋ひずみは 593 μ であり、クリープ・収縮により増加 した鉄筋ひずみは、設計上のひずみ値とほぼ等しい値と なった。



4. ひび割れ間コンクリートの収縮を考慮した解析評価

石橋らは、表面ひび割れ幅を評価する場合、ひび割れ 発生後のひび割れ間コンクリート(図-9)を鉄筋や他 部分から拘束を受けない自由体と考え、その自由収縮ひ ずみを考えることで、実橋のひび割れ幅実測結果に算定 値を近づけることができるとしている³⁾。

そこで、ひび割れ発生に伴い、部材内にひび割れ間コ ンクリートが発生し、ひび割れ間コンクリートの領域で は、図-10に示すように、ひび割れ発生時間を基準にし て、収縮量の最終値が、ひび割れ間コンクリート収縮量 と等しくなるようなモデルを仮定し、ひび割れ間コンク リートの収縮量増大の影響を検討した。



図-9 ひび割れ間コンクリートの概略図



体積表面積 (V/S) の導出にあたっては、3章で求めた 解析結果の、ひび割れ間隔 (l_{max} =180mm)を用いて、ひ び割れ高さは h=100mm と仮定し導出した。その体積表 面積と、解析対象の材料特性を用いて式(4)の土木学会コ ンクリート標準示方書^のから導出した収縮量の最終値は 673 μ となった。ひび割れ間コンクリートを考慮しない 場合の収縮量は 602 μ となる。ここでは、簡便のため、 ひび割れ間コンクリートの収縮量は 1.2 倍 (a=1.2) にな ると決定した。また、ひび割れ間コンクリートとみなし 収縮量を増加させる領域は、ひび割れの発生する曲げ区 間内で、底面から 100mm までの位置とした。

図-11 に、等曲げ区間での 800 日における引張鉄筋ひ ずみ分布を示す。部材全体に一様な収縮ひずみを仮定し たモデルとひび割れ間コンクリートを考慮した解析で は、引張鉄筋ひずみの分布は、ほぼ一致している。今回 対象とした部材では、ひび割れ間コンクリートの収縮の 増加分を考慮した場合も、部材の全体挙動やひずみ性状 にほとんど影響がない結果となった。



図-12 に、供試体側面引張鉄筋位置での、ひび割れ間 コンクリートの収縮を考慮した場合の、ひび割れ幅の経 時変化の平均値と最大値の実験値と解析値を示す。ここ で、供試体に発生するひび割れは、本数、位置ともに、 図-11 からも明らかなように、部材全体に一様な収縮ひ ずみを仮定した場合と、等しいものとなった。したがっ て、ひび割れ間コンクリートの収縮の増加を考慮した場 合、鉄筋ひずみが変化しない場合でも、ひび割れ幅が増

加することが示されている。図-13 に、図-8 と同様の 方法で算定した、図-11 の B の位置の引張鉄筋ひずみと ε'_{csd} の経時変化を示す。ひび割れ発生断面における引張 鉄筋ひずみは、部材全体に一様な収縮量ひずみを考慮し たモデルとほぼ等しい。しかし ε'_{csd} は、部材全体に一様 な収縮ひずみを考慮したモデルより増加し、最終値 355 μ から 445 μ まで増加した。その増加の割合は約 1.25 倍である。このことは、ひび割れ間コンクリートを考慮 して収縮量を増加させた場合、その影響の大部分がひび 割れ幅の増加に費やされたと言える。



経過時間 (日) 図ー13 引張鉄筋ひずみと ε_{'sd} の経時変化

5. 収縮量の相違がひび割れ幅に及ぼす影響

近年大きな収縮量を示すコンクリートを使用した場合の挙動が問題となっている。そこで本章では、収縮量の相違がひび割れ幅に及ぼす影響について検討を行った。収縮量を、実験結果で得られた最終値である $600 \mu e$ 基準として、 300μ 、 900μ 、 1200μ の4ケースの収縮量に対して比較検討した。

図-14に、スパン中央でのはりの下縁での、初期ひび 割れ発生後の最大ひび割れ位置でのひび割れ幅の増加 量の経時変化を示す。収縮量が大きくなるに従い、経時 的なひび割れ幅の増加量は大きくなる傾向が示されて いる。

図-15に、図-14に示したひび割れ位置での、引張鉄 筋ひずみの増加量の経時変化を示す。収縮量の差異によ らず、引張鉄筋ひずみ増加量の経時変化は、早期に収束 し、どのケースも概ね等しい傾向を示した。また、増加 量の差は小さい。表面ひび割れ幅算定式の式(7)と対応さ せて考えると、長期的なひび割れ幅に影響するのは、引 張鉄筋ひずみの増加ではなく、収縮量であると考えられ る。この結果は、関らが実験的に検討している、ひび割 れ幅の経時的な増加に及ぼす鉄筋ひずみの影響は小さ く、主に影響を及ぼすのは、ひび割れ間コンクリートの 収縮である⁹、という実験結果と一致するものとなった。



図-14 ひび割れ幅の増加量の経時変化



図-15 引張鉄筋ひずみ増加量の経時変化

6. まとめ

本研究では,時間依存挙動に加え,補強筋の付着特性 を考慮した有限要素解析を用いて,直接ひび割れ幅を評 価することにより,以下の結論を得た。

- (1) 本論文での解析手法を用いれば, PRC 部材のひび割 れ間隔や, ひび割れ幅の経時変化を概ね妥当に評価 できる。
- (2) ひび割れ発生に伴う乾燥収縮の増加により、ひび割れ幅が増加することの影響を、ひび割れ間コンクリートの収縮量を考え、その自由収縮ひずみを考慮することにより、評価することができた。
- (3) 収縮量の影響を検討した結果,収縮量が異なった場合も,引張鉄筋ひずみは経時的にほとんど同一となり,ひび割れ幅の経時的な増加には,コンクリートの収縮量が主に影響していることが解析的に示された。

参考文献

- 1) 土木学会:2007年度版コンクリート標準示方書改訂 資料,2007
- 青山尚,古賀裕久,渡辺博志,竹内祐樹: PRC 部材のひび割れ幅の長期変化に関する検討,コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.523-524, 2009
- 石橋忠良,津吉毅:コンクリート桁の曲げひび割れ 幅の算定法に関する研究,土木学会論文集, No.484/V-22, pp.33-40, 1994.2
- 4) 田辺忠顕:初期応力を考慮した RC 構造物の非線形 解析法とプログラム,技報堂出版,2004
- 5) 澤部純浩,上田尚史,中村光,国枝稔:せん断補強 筋に定着不良が生じた RC はりのせん断破壊挙動解 析,土木学会論文集, Vol.62, No.2, pp.441-461, 2006.6
- 6) 土木学会:2007年制定コンクリート標準示方書【設 計編】,2007
- (7) 国枝稔, Srisoros,W,岸山雄多佳,中村光,石川靖晃: 若材齢コンクリートの硬化過程および載荷履歴を 考慮したひび割れ構成則に関する研究,土木学会論 文集, Vol.63, No.1, pp.127-142, 2007.2
- 手塚正道,佐藤良一,山本浩嗣,鳥取誠一:PRC部 材の長期変形・応力に関する研究,土木学会論文集, No.613/V-42, pp.43-57, 1999.2
- 9) 関友則,櫻井哲哉,下村匠:鉄筋コンクリートのひび割れ幅の経時変化における乾燥収縮の影響,コンクリート工学年次論文集,Vol.32, No.2, pp.211-216,2010