# 論文 乾燥収縮による RC 面部材のひび割れ進展挙動評価に関する解析的 検討

玉野 慶吾\*1・中村 光\*2・上田 尚史\*3・国枝 稔\*4

要旨:RC面部材に対して,収縮,クリープ,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,ひび割れ進展挙動の解析的評価を行った。本解析手法により,外部拘束を受け る面部材に対して,乾燥収縮に起因するひずみならびにひび割れ進展挙動を概ね妥当に評価できることを示 した。また,乾燥収縮に起因するひび割れに対して,材料的要因の影響を検討した結果,クリープおよび断 面内の乾燥状態がひび割れ進展に大きく影響することを確認した。 キーワード:ひび割れ,乾燥収縮,クリープ,FEM,付着

#### 1. はじめに

コンクリート構造物における耐久性確保の重要性が高 まっており、これに併せて、乾燥収縮に起因するひび割 れへの関心が大きくなっている。耐久性が高くより健全 な構造物を実現するためには、乾燥収縮に起因するひび 割れ発生や、構造物の使用期間に渡るひび割れ幅の経時 変化を予測し、その制御を適切に行う事が要求される。 一般的に、乾燥収縮に起因するひび割れは、収縮、クリ ープなどの材料的な影響と、断面形状、配筋、拘束条件 などの構造的な影響を受けるため、多様な要因を考慮可 能な有限要素解析の利用が、ひび割れ進展挙動の予測や 制御に対して有用であると考えられる。

このような背景に対し,筆者らは曲げを受けるはり部 材に対して,収縮,クリープ,硬化過程に伴う材料特性 の変化を考慮し,さらに,鉄筋の付着性状を考慮して離 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 を用いて,時間依存挙動の評価手法を提案し,その適用 性を示してきた<sup>1)</sup>。本研究では,周辺部材による拘束を 受け乾燥収縮によるひび割れが発生する可能性が高く,2 次元応力場となる面部材を対象として,予測手法の適用 性と各種要因の影響の検討を行った。具体的には,柱梁 付壁模擬部材<sup>2)</sup>と梁付4辺固定スラブ<sup>3)</sup>の2例の実験を 対象とし,乾燥収縮に起因して発生するひずみならびに ひび割れの評価を行うとともに,部材の乾燥収縮,クリ ープがひび割れに与える影響について検討を行った。

#### 2. 解析手法の概要

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<sup>4)</sup>。解析手法に ついては,既報<sup>1)</sup>において報告しているので,その概要 のみを以下に示すが,コンクリートと鉄筋の付着性状を 考慮するとともに,材料の長期時間依存挙動を考慮して いることに特徴がある。

#### 2.1 応カーひずみ関係

コンクリートの材料モデルは、引張軟化領域では、破 壊エネルギーを考慮した 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 が提案した応カー ひずみ関係を用いた<sup>4)</sup>。鉄筋は離散鉄筋要素によりモデ ル化し、鉄筋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 状況やひび割れ幅が評価可能になる。

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

ここで、 $\tau$ 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、 $\tau_{max}$ は付着強度を表す。

#### 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<sup>50</sup>に対して実数倍した。

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

$$\varphi(t,t',t_0) = \alpha \Big[ 1 - \exp\{-0.09(t-t')^{0.6}\} \Big] \varepsilon'_{cr}$$
(3)

*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 博(工) (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)

ここで、 $\varepsilon_{creep}$ 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、 $\varepsilon'_{cr}$ 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。 $\alpha$ はクリープ関数の割増係数として定義した。

一方,収縮の影響に関しては,実験により計測された 自由収縮ひずみから曲線近似によりモデル化し,各時間 に対しての収縮ひずみを算出し,初期ひずみ問題とした。

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。また、材齢に伴うひび割れ後の変化は Solidification concept に基づき考慮した<sup>9</sup>。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(4)に示すように Volume function の増分 (dv(T)) とひずみ履歴を考慮し、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。

$$\sigma_g(t) = \int \sigma(\varepsilon(t) - \varepsilon(T)) dv(T)$$
(4)

# 4梁付壁模擬部材のひび割れに対する解析の適用性 8.1 解析対象柱梁付壁模擬部材

#### (1) 実験概要

今本により行われた柱梁付壁模擬部材の実験<sup>2)</sup>を対象 として解析的評価を行った。供試体は,幅 3700mm×高 さ 2700mm,柱・梁の断面 400×400mm,壁厚 100mmの フレーム付壁である。それらの実験のうち,普通骨材を 用いた No.1 試験体を対象とした。壁部材の鉄筋は D10 を縦筋・横筋ともに 200mm ピッチで配筋されている。 コンクリートは材齢 28 日において,圧縮強度は 32.8MPa, 引張強度は 2.72MPa, ヤング係数は 24.2GPa である。

供試体は、下梁を直接コンクリート土間の上にあらか じめ作製し、その後、上部コンクリートを打設し、8 日 後に脱型している。なお、上部コンクリートを打設した 時点で、下梁の収縮は見掛け上収束した傾向が埋込み型 ひずみ計の計測結果から認められている。

実験では下梁,壁,上梁の各部材断面中央で埋込み型 ひずみ計によりひずみが計測されている。さらに,柱梁 付壁模擬部材に併せて,同一鉄筋比の壁および上梁のダ ミー部材が作製され,埋込み型ひずみ計により,部材中 心部のひずみが測定されている。また,クリープ係数は ¢100×200mm 供試体(無筋)を用いて,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-1 に示す。壁部を詳 細に検討するために、50×50mmの正方形断面に奥行き 方向が 30mm と 40mmの要素分割とした。また、供試体 が土間に打設されているため、下梁が収縮により浮き上 がることが考えられる。これを考慮するために、解析で は上梁に自重に相当する荷重を分布荷重として与え、下 梁には薄いダミー要素を設け、鉛直方向の引張に対して 抵抗せず、水平方向は非拘束とした。



また、クリープ係数、収縮ひずみは、実験と同様のダ ミー部材をモデル化し実験値との比較から同定した。ク リープ係数は $\phi$ 100×200mm 供試体 (V/S=20)を基準と して、ダミー部材の体積表面積 (V/S) を考慮して算出 した。なお、収縮ひずみは実験値に適合するように、式 (3)に対して 1.8 倍 ( $\alpha$  =1.8) としている。

#### 3.2 ひずみの時間依存挙動の評価

図-2 に、下梁、壁、上梁における各部材断面中央で のひずみの経時変化の実験値と解析値を示す。解析では 上梁のひずみを若干小さめに、壁のひずみを若干大きめ に評価しているが、壁は上・下梁の拘束により圧縮ひず みが抑制され、下梁は壁の収縮により圧縮ひずみが生じ ることなど、各位置での傾向を概ね評価することができ ている。また、ひび割れ発生材齢は、解析では材齢 55 日、実験では脱型後材齢 36 日(有効材齢 35.3 日)であ り、ひび割れ発生時期を遅く評価している。



#### 3.3 ひび割れ幅の評価

図-3に、解析により得られた材齢80日におけるひび 割れ分布を示す。なお、コンター図は解析で得られた主 引張方向のひずみ分布に対して要素寸法を乗じることに より、ひび割れ幅とみなしている。実験では「壁4隅の 微細なひび割れと中心部付近のほぼ中央に貫通した比較 的大きなひび割れが発生した」と報告されており、解析 でも同様のひび割れが発生し、実現象を再現できている と考えられる。



図-4に、ひび割れ発生後25日における壁中心付近の ひび割れ幅の実験値(材齢60日)と解析値(材齢80日) を示す。解析は実験と同様に、下梁近傍が大きく、上梁 に近づくにつれてひび割れ幅が抑制される傾向が表現で きている。このことから、本解析手法を用いれば、外部 拘束を受ける面部材のひび割れ進展挙動も概ね妥当に評 価できることが分かる。



図-4 壁のひび割れ幅分布(ひび割れ発生後25日)

# 24. 梁付4 辺固定スラブを対象とした乾燥収縮挙動評価 に関する検討

4.1 解析対象梁付4辺固定スラブ

# (1) 実験概要

鈴木らによって行われた梁付4辺固定スラブの実験<sup>3)</sup> を対象として解析的評価を行った。対象供試体の概要を 図-5に示す。縦2400mm×横1200mmのスラブに対し て,幅300mm×高さ400mmの梁が接合されている。鉄 筋は、スラブ内に D10 を 200mm ピッチ複鉄筋で配置し、 2 方向を同一鉄筋比としている。コンクリートは森戸ら の実験<sup>7)</sup>を参考に、単位水量を 315kg/m<sup>3</sup>とした収縮量の 大きい配合が用いられている。



供試体は,材齢4日後に脱型をして室内環境におかれ, スラブが上下面から乾燥するように,600mm間隔に並べ た200mm角の木材ブロックで梁部分を支持し,スラブ 下面の通風を確保されている。実験では鉄筋ひずみとス ラブ厚さ中心でコンクリートひずみが埋込み型ゲージで 測定されている。また,スラブ厚と同じ厚さ140mmの 断面で,体積表面積比(V/S)を梁付スラブ供試体と一 致させている(V/S=70)自由収縮供試体が作成され,収 縮ひずみが測定されている。

#### (2) 解析のモデル化

有限要素解析モデルを図-6 に示す。解析は対称性を 考慮して,実供試体の 1/4 モデルとした。境界条件に関 しては,実験では 200mm 角の木材ブロックの上に設置 されているため,図-6 の網掛けの領域に対して鉛直方 向のみ固定した。対象境界面では,対称性に考慮した境 界条件を設定した。要素寸法は,ひび割れを詳細に検討 するため,スラブ内を 20mm の立方体要素とした。



収縮ひずみは、スラブおよび梁部材毎に部材全体に一様な値を与えた。スラブの収縮ひずみは、図-7 に示す ように2体の自由収縮供試体の実験値にばらつきがあっ たため、その中央値と適合するように決定した。一方、 梁部を模擬した自由収縮ひずみは計測されていなかった ため、実験で計測された梁部の収縮ひずみと等しくなる ように同定し、スラブの収縮ひずみに対して 0.5 倍と仮 定した。なお、スラブ部の収縮ひずみやクリープが2倍 程度変化しても、梁部の収縮量には殆んど変化が生じな いことを確認しており、梁部の収縮量は他の要因の影響 が小さいことを確認している。クリープ係数に関しては 実験で測定されていないため、式(3)を採用し、その値を 1.0倍(α=1.0)としている。また単位水量と単位セメン ト量が式(3)の適用範囲外であり、クリープ係数の値が過 大であるが、そのまま適用した。

# 4.2 ひずみの時間依存挙動の評価

図-5に示す代表的な測定箇所における供試体短辺お



よび長辺方向の鉄筋ひずみの経時変化の実験値と解析値 の比較を図-8 に示す。いずれの位置においても解析値 は実験値を妥当に評価できている。鈴木らは、このひず みの経時変化から、スラブコンクリートは梁近傍で梁軸 方向の拘束を受け、その拘束は梁中央部に近いほど大き い。また、梁が長いほど拘束が大きく、梁から離れるほ ど梁軸方向の拘束が小さくなるとして、拘束度の影響を 検討している。解析結果は実験値を妥当に評価できてい ることから、本手法により梁付スラブの拘束度を数値解 析的に検討可能なことが示されたと考えられる。

# 5. ひずみならびにひび割れ進展に及ぼす各種要因の検 討

乾燥収縮に起因するひび割れは、拘束等の構造的な要因とともに、収縮やクリープなどの材料的要因の影響を受ける。3章の検討により、ひび割れ進展挙動も本手法により解析可能なことが示されたので、本章では、いくつかの材料的要因に対して比較検討をすることにより、ひび割れ発生に対する影響を検討した。

# 5.1 スラブの収縮量の相違が与える影響の評価

スラブの収縮量の相違がひずみ挙動,ひび割れ性状に 与える影響について検討を行った。スラブ内のみ収縮ひ ずみを 1100  $\mu$  (材齢 200 日)から,0.5 倍 (550  $\mu$ ),1.5 倍 (1650  $\mu$ ) としたものに対して,スラブ中央と隅角部 における鉄筋ひずみの経時変化を図-9 に示す。また, 解析によって得られた材齢 200 日における表面ひび割れ 分布を図-10 に示す。

図-9から、収縮量の大小によって、鉄筋ひずみに大きな違いがみられる。また、ひび割れ分布も同様に大きな違いがみられる。すなわち、収縮量が大きくなれば、それにほぼ比例してひずみ値が大きくなる。また、多数のひび割れが発生する。このことから、スラブ内の収縮量の変化は、全体挙動に大きな影響を与えるため、ひずみ、ひび割れ進展挙動を評価するために、その値を適切に評価することが重要となる。







# 5.2 スラブ内のクリープの相違が与える影響の評価

クリープがひび割れ進展に影響することは自明であ るが、実験ではクリープの影響を独立に評価することが 困難である。そこで、解析的にスラブ内のクリープ量の みを変化させ、そのひずみならびにひび割れ進展への影 響を検討した。スラブ内のみクリープ係数を 5.8(材齢 200日)から 0.5倍(2.9)、1.5倍(8.7)としたものに対 して、スラブ中央と隅角部における鉄筋ひずみの経時変 化を図-11に示す。また、解析によって得られた材齢 200 日における表面ひび割れ分布を図-12に示す。



図-11から、クリープの大小によらず、鉄筋ひずみに 大きな差は生じなかった。このことから、スラブ内のク リープ係数は全体挙動に大きな影響を与えないと考えら れる。一方、ひび割れ分布はクリープの大小により大き な違いがみられた。クリープ量が小さい場合には、スラ ブ中央付近の大きなひび割れと隅角部の微細なひび割れ が増加している。クリープ量が大きい場合には、ひび割 れ幅が小さく、その進展も抑制されていることが分かる。 これは、クリープ変形が大きいため、梁部材からの拘束 効果が小さくなることが原因と考えられる. さらにひび 割れ発生時期は、図-12の点線で囲まれたスラブ内の最 大ひび割れに着目をすれば、基本(1.0倍)が80日、ク リープ係数0.5倍が50日、クリープ係数1.5倍が160日 となり、クリープ係数が小さいほどひび割れ発生時期が 早くなる傾向がある。乾燥収縮量が同一でも、クリープ 量が異なればひび割れ進展挙動が大きく異なることが分 かる。乾燥収縮量がひび割れ進展挙動に及ぼす影響は実 験的にかなり検討されているが、その際にクリープ量を 算出し、その影響もあわせて議論することが重要である と言える。

#### 5.3 スラブの表面の乾燥状態が与える影響の評価

前節までの検討では、各部材内の収縮を断面内で一様 と仮定して行った。しかしながら,部材表面と内部では 相対湿度が大きく異なることが知られており<sup>8)</sup>,収縮量 は部材断面内で一様ではない。そこで本節では、スラブ 表面の乾燥状態がひずみ挙動、ひび割れ性状に与える影 響について検討を行った。阪田らは、長さの異なる供試 体の重量変化を用いて含水率の経時変化を求めている %。 これによれば、表面から 40mm 程度までは著しい含水率 の低下がみられるとしている。本節では、スラブ厚さ 140mm のうち乾燥が著しく大きい領域を乾燥面と定義 し, その深さを 20mm, 40mm と仮定した。そして, 乾 燥面は内部に比べ収縮ひずみが 2.0 倍となると仮定し, 部材全体の収縮量としては一定になるようにし、表面乾 燥の影響を評価した。深さが 20mm の場合は、厚さ方向 一様の 1100 µ (材齢 200 日) に対し, 乾燥面の収縮ひず みは1700μ, 内部の収縮ひずみは850μであり, 深さが 40mm の場合は、乾燥面の収縮ひずみは 1400 µ, 内部の 収縮ひずみは 700 µ である。乾燥面を考慮したスラブ中 央と隅角部における鉄筋ひずみの経時変化を図-13 に 示す。また,解析によって得られた材齢200日における 表面ひび割れ分布を図-14に、スラブ厚さ方向中央にお けるひび割れ分布を図-15に示す。部材表面では表面ひ び割れの発生, 断面中央では貫通ひび割れの発生の挙動 を理解できる。

図-13から、乾燥面を考慮した場合でも、鉄筋ひずみに大きな違いがみられない。このことから、乾燥面近傍での局所的な収縮量の増大はスラブの全体挙動に大きな影響を与えないと考えられる。一方、ひび割れ分布は乾燥面の影響を大きく受ける。まず、図-14から、乾燥面を20mmとした場合、表面に微細なひび割れが多数発生するが、点線で囲まれた最大ひび割れ幅は小さくなることが分かる。さらに、図-15から、微細な表面ひび割れは貫通ひび割れには進展しないことが分かり、乾燥面の影響はスラブ表面に限定的である。乾燥面を40mmとし



た場合は、20mm の場合より表面の微細なひび割れの発 生が少ないが、点線で示す各ひび割れ幅が大きなものと なっている。これは、乾燥面がある程度の深さをもつに つれて、断面内部との収縮量の差による拘束が弱くなる ため、ひび割れが分散せず、局所的に発生するためと考 えられる。ただし、今回の解析の範囲では、既存の貫通 ひび割れの幅は小さくなり、新たな貫通ひび割れの発生 は限定的である。

以上のことから,梁の拘束を受けるスラブに対して, 乾燥収縮に起因するひび割れ進展挙動を評価するために は、クリープの影響を適切に評価する必要がある。さら に、表面ひび割れを評価するために、表面近傍の乾燥を 考慮する必要性があると考えられる。ただし、貫通ひび 割れへの影響は比較的小さいことが示された。

# 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,拘束部材を有する面 部材に対してひび割れ進展挙動を評価することにより, 以下の結論を得た。

- (1)本解析手法を用いれば、外部拘束を受ける面部材に 対して、乾燥収縮に起因するひび割れ進展挙動を概 ね妥当に評価できる。
- (2) クリープ量のみがひび割れ進展に及ぼす影響を検討した結果、ひび割れ発生時期やひび割れ幅、本数ともに影響が確認され、ひび割れ進展挙動を適切に評価するためには乾燥収縮量とともに、クリープを適切に評価する重要性が解析的に示された。
- (3) 部材断面に対して表面近傍の乾燥収縮を考慮した結果,乾燥収縮に起因する表面ひび割れの発生を評価 することができた。

#### 謝辞

東京理科大学の今本啓一先生,ならびに東日本旅客鉄 道(株)の鈴木雄大氏,小林薫氏には,本解析手法の検 討を行う際,実験データを提供して頂きました。ここに 感謝の意を表します。

# 参考文献

- 玉野慶吾,中村光,上田尚史,国枝稔: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,コンクリート工学年次論文集 Vol.33, No.1, pp.521-526, 2011.6
- 今本啓一:各種コンクリートの収縮挙動,日本建築 学会構造系論文集,第568号,pp.15-20,2003.6
- 3) 鈴木雄大,小林薫:梁付4辺固定スラブのコンクリート乾燥収縮ひずみと拘束度に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集 Vol.33, No.2, pp.1477-1482, 2011.6
- 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) 土木学会:2007 年制定コンクリート標準示方書【設 計編】,2007
- 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
- 7) 森戸重光,半井健一郎:収縮応力および収縮ひび割れが RC はりのせん断耐力に及ぼす影響,コンクリート工学年次論文集 Vol.32, No.2, pp.673-678, 2010.6
- 8) 例えば, T.Ayano, F.H.Wittmann: Drying, moisture distribution, and shrinkage of cement based materials, Materials and Structures, Vol355, pp.134-140, April.2002
- 阪田憲次,蔵本修:乾燥に伴うコンクリート中の水 分の逸散と乾燥収縮に関する研究,土木学会論文報 告集,第316号 pp.145-152, 1981.2