# 論文 4辺固定スラブの収縮ひび割れ発生に関する簡易的評価法の検討

鈴木 雄大\*1·小林 薰\*2·石田 哲也\*3

要旨:4 辺固定スラブ等のひび割れの生じやすい構造物の設計施工の実務では収縮ひび割れ発生の有無を簡易 に評価する手法が望まれる。本論文では、コンクリートのひび割れ解析に関しては分散ひび割れモデルを用 い、微視的機構に支配されるコンクリートの硬化過程から構造物の巨視的挙動までを統合解析できる熱力学 連成解析手法を用いて、拘束を受けるコンクリートのひび割れ解析を行った。まず一軸拘束状態で主ひずみ 分布からひび割れ発生を評価する方法を検討し、次に二軸方向の拘束を受ける 4 辺固定スラブのひび割れ解 析を行い、簡易的に収縮ひび割れ発生を評価する方法の検討を行った。

キーワード:収縮ひずみ、ひび割れ、4辺固定スラブ、拘束

#### 1. はじめに

コンクリートの収縮ひずみに起因するひび割れは,コ ンクリート構造物の耐久性への影響が懸念される。また 都市部で多く見られるように高架橋の下を店舗等で利用 する場合に,高架橋スラブのひび割れは高架下への漏水 の原因となるため補修が求められる場合がある。

橋台や擁壁などのマスコンクリートにおいては,JCI の「マスコンクリートのひび割れ制御指針2008」<sup>1)</sup>で, 温度ひび割れ発生確率の予測手法が示されている。一方 高架橋スラブのように薄い部材に関する収縮ひび割れ制 御に関しては一般的な評価方法はまだ確立しているとは 言えない。

コンクリートの乾燥収縮に起因するひび割れが問題に なる薄いコンクリート部材の収縮ひび割れに関する研究 には、建築構造物では壁体や屋根スラブを対象として実 構造物のコンクリート収縮ひずみを計測した例<sup>2),3)</sup>があ るが、刻々と変化する環境特性や、屋外環境下での降雨 を考慮したひび割れ発生評価を行うためには、今後さら なる検討が必要であると考えられる。このような構造物 の設計施工の実務では、収縮ひび割れ発生を簡易的に評 価する方法が望まれる。

そこで筆者らは、ひび割れ解析に分散ひび割れモデル を用い、環境特性を適切に考慮し、材料の硬化過程から 中長期の巨視的変形挙動までを連続的に評価できる統合 解析プログラムを用いて、ひび割れ発生評価の検討を行 った。

はじめにコンクリートの一軸拘束下のひび割れ発生評 価について検討を行い,解析結果から主ひずみ分布によ ってマクロ的なひび割れ発生位置,ひび割れ量を評価で きることを確認した。次に拘束方向を二軸に拡張し,4 辺固定スラブのひび割れ発生を評価する手法について検 討を行った。

本論文では分散ひび割れモデルを用いた解析結果から, 簡易的収縮ひび割れ発生評価法の検討内容について報告 する。

#### 2. 一軸拘束条件下のひび割れ判定について

#### 2.1 試験体概要

鉄筋コンクリート部材に一軸方向の拘束が作用した時 に発生するひび割れの間隔やひび割れ幅を測定するため に、図-1 に示す一軸拘束試験体を作製した。試験体は 一軸方向の外部拘束を受けるように、試験体の両側に拘 束体を設け、両側の拘束体同士を角型鋼管で接続した。 また試験体コンクリート脱型の直後に、拘束体を試験室 の反力床に PC 鋼棒で緊張固定し、一軸方向の拘束を確 保した。なおストラットとした角型鋼管に生じるひずみ を測定したが、PC 反力床に固定後はひずみの変化が見ら れず、拘束体で完全に拘束されていることを確認してい る。

試験体の断面寸法は 100mm×100mm とし, 棒部材の 長さを 700mm とした。試験体の断面中央に鉄筋を1本 配置し,鉄筋の両端部は拘束体内に定着した。コンクリ



図-1 一軸拘束試験体

\*1 東日本旅客鉄道(株) 構造技術センター主席 修(工) (正会員)

\*2 東日本旅客鉄道(株) 研究開発センターフロンティアサービス研究所主幹研究員 博士(工学) (正会員)

\*3 東京大学大学院 工学系研究科教授 博士(工学) (正会員)

ートの収縮に伴い鉄筋に作用するひずみを、ひずみゲージで測定した。鉄筋とコンクリートの付着を損なうことが無いように、ひずみゲージは図-2 に示す様に鉄筋を 半割りにした内部に貼付し、ゲージの配線も鉄筋の内部 を通して配線した。分割した鉄筋はエポキシ樹脂にて接 着した。鉄筋はD25 を使用したが、ゲージ貼付のための 断面欠損があり、有効断面積としては直径 24mm の鋼棒 に相当し、試験体の軸方向鉄筋比は 4.5%となる。



試験体に使用したコンクリートは、収縮が大きくひび 割れが生じやすいように、既往の論文<sup>4)</sup>を参考にしてコ ンクリートの収縮量の大きい配合(**表**-1)とした。この コンクリートの自由収縮ひずみ量を求めるため、一軸拘 束試験体と同じ生コンクリートで100×100×400mmの 試験体を作り、同環境で収縮ひずみを測定した。自由収 縮ひずみは材齢 80 日頃には-1000µに達した(**図**-3)。 測定結果との比較で解析結果を示す。解析モデルは要素 分割を10mm角として、環境条件は次節に示すように気 温 20℃、相対湿度40%RHの一定環境とした。

コンクリートの収縮が起因となるひび割れが最も生じ やすいと考えられる試験体中央には,ひび割れ位置を制



表-1 試験体コンクリート配合 4)

御する目的でテフロン板を配置し,あらかじめ断面欠損 部を設けている。試験体には複数のひび割れが入るが, 試験体中央のひび割れを基準として,ひび割れの位置や 間隔,ひび割れ幅を測定した。

# 2.2 ひび割れ解析の概要

## (1) 解析プログラムの概要

本論文ではコンクリート構造物の収縮ひずみや,ひび 割れ発生の有無を,環境特性の影響を考慮して検討する ため,東京大学コンクリート研究室で開発された熱力学 連成解析プログラム DuCOM-COM3<sup>5)</sup>を使用した。この解 析プログラムは,微視的機構に支配されるコンクリート の硬化過程から構造物の巨視的挙動までを統合解析でき る解析プログラムである。解析結果から求まるコンクリ ートのひずみは,外力によるひずみのほか,自己収縮・ 乾燥収縮ひずみ,温度ひずみ,クリープひずみを含んで いる。

ひび割れを考慮した材料構成則には、分散ひび割れモ デルを使用している。環境特性を考慮したコンクリート の硬化過程におけるコンクリート材料の引張応力を計算 し、部材に作用する引張力が引張強度を超えたときにひ び割れが生じると判定している。ひび割れの有無は、1 つの立体要素内に8つあるガウス点において判定してい る(ガウス積分次数が2の場合)。

分散ひび割れモデルを使用した解析プログラムを用 いた場合,佐藤らがひび割れ位置やひび割れ幅を特定す る手法を研究している例のがあるものの,一般的には離 散的に発生する特定のひび割れを評価することは困難で ある。

外部拘束を受けてひび割れが生じた RC 要素は軟化に よりひずみが増大する。そこで本論文では, RC 部材の ある範囲内における複数の要素に関して主ひずみの大き さを比較し,主ひずみの分布が不均一になっている場合 や,主ひずみが卓越して大きい要素が生じた場合に,そ の要素にはひび割れが生じているものと判断した。ひび 割れ位置を特定するには一つの要素は極力細かいことが よいが,骨材に対して要素が小さくなり過ぎないように し,コンクリートとしての構成側が適用されうる最小の 寸法として要素の大きさを 10×10×10mm として図-4 に示す要素分割とした。



試験体断面の要素分割を図-5 に示す。断面内の中心 部の20×20mmの4要素をひび割れ発生後の軟化領域に おいても高い引張剛性を有する RC 要素とし,それ以外 の要素はひび割れ後に引張応力が急激に低下する無筋要 素とした。なおここに示す解析の他に,RC 要素の範囲 を変えて事前に解析を行っているが,鉄筋の付着劣化を 考慮していないため RC 要素の範囲が大きくなるほど解 析モデルの主ひずみ分布が全体的に平均化する傾向を示 し,解析モデル表面においてひずみが大きい箇所と小さ い箇所の差が現れない。そこで今回は試験体表面におい てもっともひび割れ状態が明確に把握できるように,RC 要素を最も小さくしたもので検討を行った。



図-5 断面の要素分割

ー軸拘束試験体の解析モデルは試験体両端部で軸方 向に完全固定されているものとみなした。脱型後は自重 を考慮した。

#### (2)環境条件の設定

測定された試験体周囲の気温と相対湿度を図-6 に示 す。冬季に向かってさらに気温や相対湿度が低下する時 期であったことから,解析では気温 20℃,相対湿度 40%RHの一定条件とした。試験体は室内環境に置いたた め降雨は考慮していない。

解析ステップは,打設直後および脱型直後の環境変化 点付近は細かくし,徐々に大きくなっていく設定とした。



## 2.3 試験結果と解析結果

外部拘束試験体のひび割れの進展が見られなくなり, ひび割れ定常状態での試験体のひび割れを図-7 に示す。 ここに示すひび割れは,クラックゲージで測定できるひ び割れ幅が 0.02mm 以上のひび割れを示している。



試験体には複数のひび割れが発生しており、テフロン 板を入れて断面欠損させている中央から概ね 100mm 程 度の間隔でひび割れが発生した。測定されたひび割れ幅 は図-7に示す通り、0.04~0.20mm 程度であった。

次に解析結果から,材齢100日目の主ひずみ分布図を 図-8に示す。



図-8 一軸拘束試験体主ひずみ分布

解析モデルのコンクリートはひび割れ発生以前には自 己収縮・乾燥収縮によりひずみは小さくなるが,ひび割 れが生じた箇所では局所的にひずみが大きくなると想定 される。一軸拘束試験体は両端拘束されており,試験体 全長が変化しないため、250 $\mu$ の引張ひずみが生じている 場合はコンクリートにひび割れが発生して軟化領域にな っていると想定される。そこで主ひずみ分布図の表示範 囲は  $0\mu \sim +250\mu$ とした。この表示範囲を超える主ひず みとなっていても分解能の表示範囲内での表示となる。 例えば引張ひずみが 250 $\mu$ 以上であっても 250 $\mu$ と同一 表示になっている。

ー軸拘束試験体のひび割れ (図-7) と主ひずみ分布図 の赤色表示部 (図-8) を比較すると,ひび割れは解析の 赤色部も中心から概ね 10cm 間隔となっており,実験と 解析がよく合っている。

試験体で図-7 の通り測定された各ひび割れ幅を足し 合わせると 1.05mm となる。一方,収縮解析では解析モ デル表面の節点変位のうち,節点間隔が解析前よりも 0.04mm 以上広がった個所(引張ひずみが生じている個 所)を抽出し(図-9),それらの節点変位を合計したと ころ 0.89mm となり,試験体のひび割れ幅の和と同程度 であった。このことから解析の精度について概ね妥当で あると判断した。



## 3.4辺固定スラブのひび割れ判定について

## 3.1 試験体概要

ー軸拘束試験体に関する解析結果から、一軸方向の拘 束が作用する場合の RC 部材に生じるひび割れを,解析 結果の主ひずみ分布から概ね判別できることが確認され た。次に拘束方向を二軸に拡張することとした。拘束方 向が二軸の試験体として,4辺固定スラブを対象とする。 4辺固定スラブは RC ラーメン高架橋のビームスラブ構 造等として実構造物として用いられている。4辺固定ス ラブの中央部および隅角部には貫通ひび割れが出やすい ため、そのひび割れ発生を判定することは有意義である といえる。

4 辺固定スラブに発生するひび割れは、梁によってス ラブコンクリートが拘束されることでひび割れが生じて いると考えられる。そこで2つの軸方向の梁の長さを変 え,それぞれの軸方向の拘束の程度を変えることとした。 一般的な RC ラーメン高架橋では、スラブの辺長比が 1:2程度であったことから、試験体の辺長比を1:2と した。試験体の長いほうの梁を縦梁、短いほうの梁を横 梁と称する。

4 辺固定スラブ試験体を図-10 に示す。スラブの平面 寸法は 1200×2400mm とし、スラブ厚さはひび割れが貫 通ひび割れとなりやすいように極力薄く 40mm とした。 実際の RC ラーメン高架橋のビームスラブの鉄筋比を参 考にして、スラブの鉄筋比を 0.5% (D6 を 160mm ピッチ のシングル配筋) とした。梁の段面寸法は 300×400mm とし、梁の軸方向鉄筋比は 1.9%とした。

梁・スラブの接合部にはハンチは設けず,高架橋柱の 拘束は考慮していない。スラブと梁の接合部は,配筋の 都合からスラブ面を梁上面より140mm下げている。

試験体に使用したコンクリートは,一軸拘束試験体で 使用したものと同じ収縮ひずみが大きい配合(表-1)を 使用した。

試験体は材齢5日目に脱型し、スラブが上下面から乾燥するように、60cm間隔に並べた20cm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した。



図-10 4辺固定スラブ試験体

## 3.2 ひび割れ解析の概要

4辺固定スラブの解析モデルを図-11に示す。スラブ 中央部付近で、縦梁に対して直角にひび割れが入る事を 想定し、そのひび割れを解析的で表現できるように縦梁 方向には境界条件を設けず、横梁方向のみ対称条件を考 慮した 1/2 モデルとした。



図-11 4辺固定スラブ解析モデル(1/2 モデル)

スラブ面はすべて平面的に 20mm 角の要素分割で統一 した。事前解析の中で,スラブ中で要素分割が細かい箇 所と荒い箇所を設けた解析モデルとした結果,要素サイ ズが大きく変わる境界部分で,寸法が大きいほうの要素 でひずみが卓越する傾向が現れた。そのため要素分割で 解析結果のひずみに偏りが生じるのを防ぐため,すべて の要素寸法を統一することとした。スラブ厚さ方向は 40mm を 10mm 毎の 4 分割とした。

解析に適用した環境特性は測定値の平均とし,図-12 に示す気温 20℃,相対湿度 40%RH とした。



図-12 4辺固定スラブの環境特性(11日目以降)

## 3.3 試験結果と解析結果

## (1) 試験体のひび割れ

4 辺固定スラブのスラブ上面に発生したひび割れの発 生状況を図-13に示す。スラブ表面のひび割れの本数は, 材齢 36 日目以降は増加しなかった。

別途測定したコンクリート表面の収縮ひずみは材齢 100日目ごろまで増加していた。材齢36日目まではひび 割れ本数が増えたが、その後はコンクリートの収縮ひず みの増大に伴い、ひび割れ幅が拡大したものと考えられ る。ひび割れ幅の最大値は0.4~0.5mm 程度となってい る。



図-13 スラブ表面のひび割れ発生状況

## (2) 一軸拘束モデルの解析結果

4 辺固定スラブの解析に先立ち,スラブ厚さと同じ 40mm 角の一軸拘束モデル(図-14)について解析を行 い,一軸拘束時のひび割れ発生時の材齢やひずみ,応力 度を確認することとした。一軸拘束解析モデルは 40×40×200mmとし,断面中心にD6鉄筋を1本配置した。 要素分割は10×10×10mmとした。





ー軸拘束モデルの解析結果について,解析モデルの内 部要素の主ひずみ分布を図-15に示す。主ひずみの表示 範囲は-10~+10µとしており,解析モデル内にひずみ の正負の領域が点在している状況が確認できる。

材齢8日時点で,解析モデルの表面側の要素にはすべてひび割れが発生した。モデル内部の線で囲った要素は, それぞれの材齢の時点でひび割れが発生している内部要 素を示している。一軸拘束モデルでは、材齢13日で表面 及び内部の全要素にひび割れが発生した。

ー軸拘束モデルの内部要素の主応力分布を図-16 に 示す。主応力分布の表示範囲はコンクリートの引張強度 程度となるように 0~2.5MPa とした。材齢 8 日時点で, モデル中心部は濃い青色表示となっており, 圧縮応力状 態になっており,表面は引張応力状態になっていること が確認された。



図-15 ー軸拘束モデル内部要素の主ひずみ分布



図-16 一軸拘束モデル内部要素の主応力分布

材齢 13 日となり全断面にひび割れが発生すると,鉄 筋が存在する中心部に引張応力が作用することが確認さ れた。ひび割れが生じる時の主応力は,1.0~2.0Mpa 程 度であり,若材齢でコンクリート強度が発現する前にひ び割れが生じたと考えられる。

### (3) 4 辺固定スラブの解析結果

4 辺固定スラブの表面要素と,鉄筋が配置されている 内部要素について主ひずみ分布を示す。材齢13日目の主 ひずみ分布を図-17に,材齢100日目の主ひずみ分布を 図-18に示す。

スラブの要素寸法は 20×20×(厚さ)10mm とした。測 定された最大ひび割れ幅は 0.4mm 程度であり, 1辺 20mm の要素内にこれが生じた場合に 2000 μ (=0.4/20)の ひずみに相当する。解析でひび割れの大きさの程度を判 別できるように、ひずみの表示範囲は 0~2000 μ と設定 した。しかし一軸拘束試験体と異なり、ひび割れ発生場 所は表現されるが、具体的なひび割れの向きやひび割れ 幅を特定するには至っておらず、今後の課題である。

材齢 13 日の①に示す箇所では、スラブ中央部に主ひ ずみが 2000 μ の範囲が帯状に分布している。解析結果に このように主ひずみが大きい領域が現れた場合はひび割 れが存在する領域と判断できる。②に示す隅角部は、隅 角部以外の場所と比較して、主ひずみが 2000 μ 以上の赤 色の帯域が斜めに配置されている。これは 4 辺固定スラ ブ試験体の隅角部に発生したひび割れと一致する。

材齢 13 日の内部要素の図にはスラブ面に鉄筋の配置 位置を重ねている。鉄筋位置において主ひずみが小さく なっており,鉄筋の拘束を受けている様子が見られる。





図-17 材齢13日目主ひずみ分布(表面および内部)



図-18 材齢 100 日目主ひずみ分布(表面および内部)

材齢 100 日の時点ではひび割れは定常状態になってい る。図−18 に示す表面要素の③に示す箇所は,材齢 13 日の②の状態よりも 2000 μ以上の範囲が広くなってお り、ひび割れが広がる様子が現れている。③の内部要素 にも同様に主ひずみが大きい範囲が生じており、ひび割 れを表しているものと考えられる。内部要素の④に示す 箇所は、スラブ中央部で鉄筋の位置(RC 要素)でひず みが小さく、無筋要素で大きく出ている。無筋部と RC 部のひずみ差が大きく、ひび割れを表現していない。

#### 4. まとめ

本論文では、分散ひび割れモデルを使用した解析を行 い、一軸拘束条件下での棒部材および4辺固定スラブの 簡易的なひび割れ発生評価法について検討し、以下の知 見を得た。

- (1) 一軸拘束モデルでは、断面内の鉄筋位置をRC要素とし、その周囲を無筋要素とした解析モデルを用いて解析を行った結果、主ひずみ分布のひずみの大きい個所が試験体のひび割れを表現した。
- (2) 一軸拘束モデルでは、モデル表面の節点変位から求 まるひび割れ幅の和と、試験体に生じたひび割れ幅 の和が概ね一致しており、解析結果からコンクリー ト部材のある範囲内のひび割れ量(ひび割れ幅×ひ び割れ数)を評価できた。
- (3) 4辺固定スラブの解析モデル表面に,試験体のひび割れと同様の分布で,ひび割れが生じていると想定される大きさの主ひずみ分布が現れており,4辺固定スラブ中央および隅各部のひび割れ発生状態を評価できることがわかった。
- (4) スラブ内部の鉄筋が存在する要素では鉄筋の拘束が 大きく、スラブ中央部では主ひずみ分布から明確な ひび割れを判別できなかったが、隅角部ではひび割 れ状の主ひずみ分布が現れており、解析的にひび割 れ発生を判定できる可能性があることがわかった。

#### 参考文献

- 日本コンクリート工学協会:マスコンクリートのひ び割れ制御指針 2008
- 今本啓一:各種コンクリート壁体の収縮挙動,日本 建築学会構造系論文集,No.568, pp.15, 2003
- 中西正敏:鉄筋コンクリート構造物の乾燥収縮ひず みの実測例、日本建築学会論文報告集、号外、1967
- 4) 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, 2010
- Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: Multi-scale Modeling of Structural Concrete, Taylor & Francis, 2008
- 6) 佐藤裕一,長沼一洋:分散ひび割れ型 FEM による ひび割れ幅の予測(その1: 解析手法),日本建築 学会大会学術講演梗概集,2005.9