

委員会報告書 コンクリート構造物のひび割れ進展評価手法に関する研究 委員会

中村 光^{*1}・今本 啓一^{*2}・長井 宏平^{*3}・渡辺 健^{*4}・丸山 一平^{*5}・坂 敏秀^{*6}・山本 佳士^{*7}

要旨: 本委員会では、ひび割れの進展という観点のもとで、既往のひび割れ評価法の整理、ひび割れ進展を評価可能な実験手法（デジタル画像処理等）、ひび割れ進展を評価するための解析手法（FEM, RBSM 等）、各種劣化事例に対するひび割れ進展評価法（例：乾燥収縮ひび割れ、腐食ひび割れ）など、ひび割れの形態そのものに着眼して、既往の知見の整理と実験や解析手法の適用範囲や可能性を検討しながら、ひび割れ進展評価の現状と今後の展開について検討した。

キーワード: ひび割れ進展, 劣化要因, 計測技術, 数値解析, 性能評価

1. はじめに

コンクリート構造物の維持管理や長寿命化の観点から、現在、様々な要因で発生するひび割れの評価に注目が集まっている。例えば、新設構造物には、温度応力ひび割れや収縮ひび割れの抑制が、既設構造物には、ひび割れ発生原因の明確化や将来的なひび割れ進展予測が求められている。しかしながら従来は、ひび割れの発生を抑制する条件や観察されたひび割れの現状の理解とその影響の評価の検討が多く、構造解析手法においても個々のひび割れに着目して、ひび割れ発生後の進展挙動までも対象とした検討は少ない。ひび割れ進展挙動を正確に評価できれば、ひび割れ抑制やひび割れコントロール技術の高度化に大きく寄与するものと考えられる。

そこで本委員会では、コンクリート構造物のひび割れ進展評価法の技術の現状を、実験的ならびに解析的に整理するとともに、劣化事例に対するその適用方法を検討し、その有用性や将来性について纏めた。表-1に委員会委員を示す。ひび割れ計測の最新の知見の整理については実験WG、数値解析については同様に解析WGを構成し、相互の関係性や後述の共通試験については、適宜委員を編成し活動を進めた。

次章以降に委員会活動の一部を報告するが、ここでは委員会活動全体について、委員会報告書に沿って示す。本委員会ではまず、ひび割れ進展に関する知見の整理を行った。ひび割れ進展の概念について言及したうえで、ひび割れ進展を形成する物理量と性能の関係について纏めた(図-1)。ひび割れの発生、力学情報、進展、境界条件等から形成される物理量と、それによる性能評価までを示した。さらに、劣化要因ごとのひび割れ進展現象を解説し、それらを比較した。また工学的評価法として、

実務面でのひび割れの取り扱いや対策について、進展に着目して纏めた。

次に、ひび割れ計測技術の進歩と現状（実験WG）として、クラックスケール、デジタル画像、デジタル画像相関法、電子スペックル干渉法、樹脂含浸、超音波法、衝撃弾性波法、AE法、放射線を用いた手法等について、それぞれの計測精度や適用事例などを纏めた。

ひび割れ進展を表現する数値解析（解析WG）に関しては、現象に応じてひび割れを表現するのに必要なモデルについて纏めたうえで、代表的な解析手法とその特徴を整理した。断面内つり合い法、部材変形法、有限要素法（FEM）、剛体ばねモデル（RBSM）については、適用事例を示し材料劣化や外力によるひび割れ進展解析の最新の知見を纏めた。

表-1 委員会構成

委員長：中村 光（名古屋大学）	
副委員長：今本 啓一（東京理科大学）	
幹事長：長井 宏平（東京大学）	
【実験WG】	
◎渡辺 健（徳島大学）	○丸山 一平（名古屋大学）
今本 啓一（東京理科大学）	川端雄一郎（港湾技術研究所）
菊田 貴恒（東北大学）	岸本 一蔵（近畿大学）
小柳 光生（大林ファシリティーズ）	齊藤 成彦（山梨大学）
諏訪田 晴彦（国土技術政策総合研究所）	
田村 雅紀（工学院大学）	土屋 直子（建築研究所）
都築 正則（大林組）	細田 暁（横浜国立大学）
松田 浩（長崎大学）	渡辺 健（鉄道総合技術研究所）
出水 享（長崎大学・オブザーバー）	
【解析WG】	
◎長井 宏平（東京大学）	○坂 敏秀（鹿島）
中村 光（名古屋大学）	浅本 晋吾（埼玉大学）
大下 英吉（中央大学）	小倉 大季（清水建設）
高橋 典之（東京大学）	千々和 伸浩（東京工業大学）
中村 成春（大阪工業大学）	三木 朋広（神戸大学）
山本 佳士（防衛大学校）	
◎WG 主査 ○WG 副主査	

*1 名古屋大学大学院工学研究科（正会員）

*2 東京理科大学工学部（正会員）

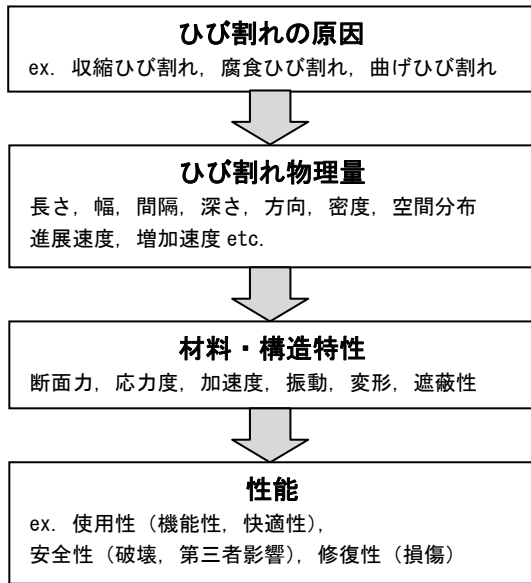
*3 東京大学生産技術研究所（正会員）

*4 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部（正会員）

*5 名古屋大学大学院工学研究科（正会員）

*6 鹿島技術研究所（正会員）

*7 防衛大学校システム工学群（正会員）



図－1 ひび割れの原因から性能評価のフロー

また、委員会において独自に、共通試験および数値解析を行った。共通試験では、材料レベル、構造レベルで AE 法や画像解析を用いてひび割れの進展を計測しその有用性について纏めた。共通解析では、既往の実験結果を対象に、乾燥収縮と梁のせん断および曲げ破壊を、FEM や RBSM を用いて解析し、その結果を比較した。

最後に、上記の委員会活動全体を通じた議論から、ひび割れ進展評価の現状と将来展望ついて纏めた。

以上が委員会報告書の概要であるが、次章以降では、ひび割れ計測技術の進歩と現状（実験 WG・2 章）、ひび割れ進展を表現する数値解析（解析 WG・3 章）、共通実験および解析（4 章）について報告する。

2. ひび割れ計測技術の進歩と現状（実験 WG）

2.1 活動内容

実験 WG では、ひび割れ進展を計測する手法や実験方法についての整理を行っている。ひび割れ進展を計測す

るには、ひび割れの形状を空間的にとらえつつ、それらの時間的な変化を計測することが重要となる。本 WG では、計測方法がひび割れの何を計測できるか「ひび割れ物理量と測定手法」および「ひび割れの発生要因とひび割れ進展の測定事例」という切り口で整理を行うこととした。以下にその報告書の一部を示す。

2.2 ひび割れ物理量と計測方法

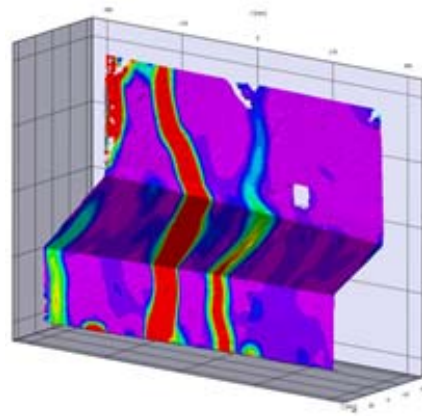
ひび割れを測定および評価する手法をひび割れ進展および物理量に対応した測定手法として、整理する。図－2 は、デジタル画像関連法の計測システムの計測結果の一例¹⁾である。

現在、使用されているひび割れ進展の評価方法は、計測を対象とする物理量や、適用や結果の解釈の仕方によって定量的な評価ができる場合や、定性的な評価に留まることもあることに注意が必要である。また、手法によっては現場での計測が難しく、ラボレベルでの適用となるものもある。

表－2 は、ひび割れの計測手法での評価対象とひび割れへの変換方法について示したものである。測定手法は、最終的にはひび割れのいずれかの諸量や定性的な指標を示すことになるが、多くの手法において、直接的にひび割れの諸量を計測してはならず、ひび割れを表すために何らかの変換や読み替えを行っていることが多い。これらについて整理した。ただし、表中の記述内容については、網羅できていない手法もあることに留意して頂きたい。

表－2 に示すこれらの手法を用いてひび割れ進展を計測するためには、時間的に連続な計測を実施することになる。対象とするひび割れ進展の現象が、動的な破壊現象のように時間的に非常に早く進展するものについては、その手法の時間的な分解能の影響が大きくなる。また、例えば樹脂含浸のような手法のように、同一試験体では時間的に連続な計測ができないものもある。

2.3 ひび割れ発生要因とひび割れ進展の測定事例



図－2 画像関連法の計測システムと計測結果(最大主ひずみ分布)¹⁾

表-2 ひび割れの計測手法とひび割れの関係

計測手法	評価対象	ひび割れへの変換方法・定量化手法
目視 (クラックスケール・巻尺含む)	長さ, 幅	
変位計 (パイゲージ等)	変位 (ひずみ)	
デジタル画像 (カメラ, スキャナ)	撮像した映像の画素を解析	画像解析からひび割れを認識し, 撮影面積と画素の大きさの関係よりひび割れ長さや幅を特定
デジタル画像相関法	撮像した映像の画素を解析	任意の点の移動量の算出による変位の大きさと方向
樹脂含浸	樹脂の存在を光学的に確認	・樹脂の存在を光学的に確認する
赤外線サーモグラフィ	撮像した映像の画素を解析	撮影面積と画素の大きさの関係よりひび割れ幅を特定
弾性波 (超音波・衝撃弾性波)	時間波形, 弾性波到達時間	・相対動弾性係数による微細ひび割れ増加の把握 ・伝播速度と伝播時間差による深さの評価
アコースティックエミッション (AE)	ひび割れが発生するときに生じる弾性波の時間波形, 波形パラメータ	・複数のセンサによりひび割れ発生位置の同定 ・発生履歴, 頻度, 相関, パターンなどを解析することにより, ひび割れの識別, 発生条件, 成長特性あるいは構造物の損傷の程度を評価する
X線	入射した放射線束に対する透過或いは散乱した放射線束	撮影面積と画素の大きさの関係よりひび割れの長さや幅を特定

表-2 に示した測定手法を用いて実施にひび割れ進展を測定した事例を, ひび割れの発生の要因別で整理を行っている。今回のWGでは, 発生要因を「収縮ひび割れ (乾燥・温度)」、「外力によるひび割れ (疲労, 静的, 動的・地震動)」および「劣化によるひび割れ (鉄筋腐食, アルカリ骨材反応, 凍害)」と分けており, 文献調査の結果を取り纏めた。

3. ひび割れ進展を表現する数値解析 (解析WG)

3.1 活動内容

解析WGでは, ひび割れ進展を解析する手法やひび割れモデルの最新情報を整理している。コンクリート材料・部材でのひび割れ進展を解析するためには, 対象とするひび割れ現象に応じたモデル化と解析手法の選択が重要となる。本WGでは, ひび割れ進展を追跡するための解析手法の基本的な考え方, 各種解析手法におけるひび割れの取り扱い方, 最新の解析事例について整理することとした。以下に, 報告書の一部を示す。

3.2 ひび割れ進展解析の基本的な概念

図-3 に, ひび割れ進展解析のフローを例示する。ひび割れ進展解析では, まず, ひび割れ発生とひび割れを引き起こす引張応力を再現する必要がある。つまり, 引張応力の駆動原理・駆動力をモデル化する必要がある。

例示した鉄筋コンクリート構造の場合, 駆動原理・駆動力は内的要因と外的要因の2つに分けられる。内的要因には, コンクリート材料を表現する体積変化・強度発現・ヤング率発現などの力学モデル, 鉄筋や繊維など補強材のモデルがある。また, 外的要因には, 力学挙動の要因となる拘束部材・地盤条件・荷重条件などのモデル

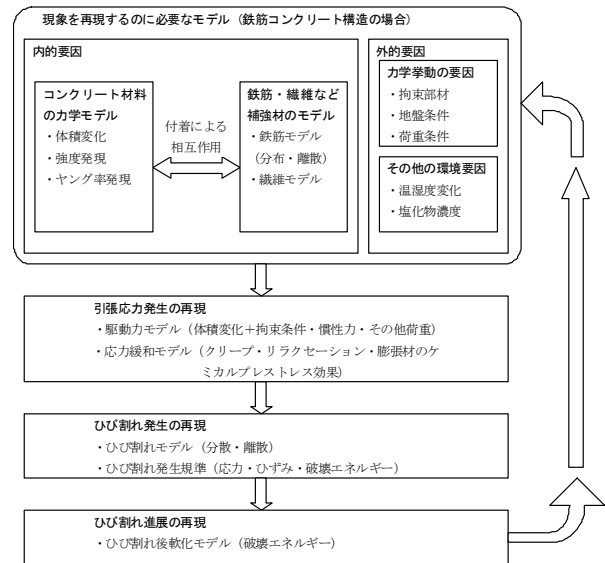


図-3 ひび割れ進展解析の基本フロー

表-3 代表的なひび割れ進展解析手法

分類	代表的手法
断面内つり合い法	引張限界ひずみ基準 ²⁾ , 引張応力基準 ³⁾ , 引張軟化則基準 ⁴⁾
部材変形法	部材変形法
連続体に基づく手法	有限要素法 (FEM), 一般化有限要素法 (X-FEM など)
不連続体に基づく手法	剛体パネモデル (RBSM) ⁵⁾ , 個別要素法 (DEM)

化や, 温度や湿度の変化などの環境要因が挙げられる。

ひび割れ発生の再現に際しては, ひび割れ発生基準やひび割れモデルなどを設定する必要がある。ひび割れモ

デルには、分散モデルや離散モデルなど多数提案されており、対象とする現象や着目するひび割れ物理量(長さ, 幅, 位置など)に応じて選択すべきだと考えられる。

ひび割れ進展の再現においては、ひび割れ後の軟化モデルや、補強材との相互作用である付着のモデルなどを設定する必要がある。ひび割れ後の軟化モデルは、引張破壊エネルギーに従って、2 直線モデルや曲線モデルで設定する方法が主流である。付着のモデルは多数存在し、対象とする現象に応じて選択すべきだと考えられる。

3.3 ひび割れ進展解析手法と最新の解析事例

本 WG では、表-3 に示した解析手法を対象として、ひび割れの取り扱いと最新の解析事例を整理した。

断面内つり合い法は、部材断面に経時的に作用する力と変形のつり合いに、ひび割れ発生基準を照査して、ひび割れの発生と進展(ひび割れ幅)を評価し、乾燥収縮などの影響を受けた一軸部材の収縮ひび割れや曲げひび割れなどを対象としている。解析手法は、コンクリート-鉄筋間の付着すべりに着目してひび割れ幅をモデル化し、外力や収縮ひずみを部材断面内に作用するコンクリートの応力とひずみや、鉄筋の応力とひずみの断面内つり合い式を組み立てている。

部材変形法は、柱や梁などの線材でモデル化されることの多い部材に生じる曲げひび割れやせん断ひび割れを取り扱っており、主に地震荷重によって生じるひび割れを対象としている。解析手法は、ひび割れ幅評価モデル⁵⁾・ひび割れ長さ評価モデル⁶⁾・ひび割れ幅-ひび割れ長さ関係評価モデル⁵⁾によって構成されており、簡便な解析手法に実験式を当てはめることで、部材変形から、曲げひび割れ、曲げせん断ひび割れ、せん断ひび割れの幅および長さの進展を評価することを目的として検討されている方法である。

連続体に基づく手法は、コンクリート部材を連続体とみなし、ひび割れが生じると異方性を与えるモデル化を行う手法で、有限要素法が代表的である。応力-ひずみ関係の構成則を発展させた手法が主流である。近年では、一般化有限要素法を用いてひび割れを明示的にモデル化する研究例も見られる(既往研究のレビュー⁷⁾に詳しい)。対象とする現象は、収縮ひび割れから応力ひび割れまで多岐にわたり、多数の解析モデルが提案されている。最近では、時間依存で変化する応力状態、ひび割れ挙動を打設から供用終了まで追跡することが可能な、ミクロな材料特性とマクロな構造応答を統合解析するシステム開発が進められている⁸⁾。

不連続体に基づく手法は、ひび割れが生じることによって起こる不連続的な変位を表現することに長けた手法で、剛体バネモデル⁹⁾や個別要素法などが挙げられる。特に剛体バネモデルでは、比較的単純な構成則によって

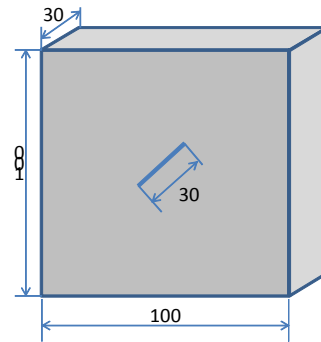


図-4 供試体概要

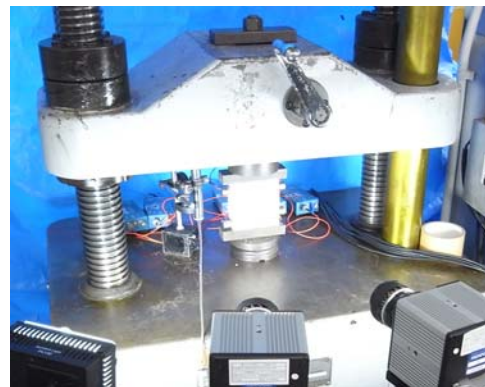


写真-1 計測の様子

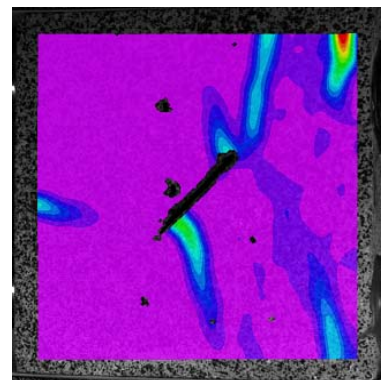


図-5 画像相関法による最大主ひずみ分布

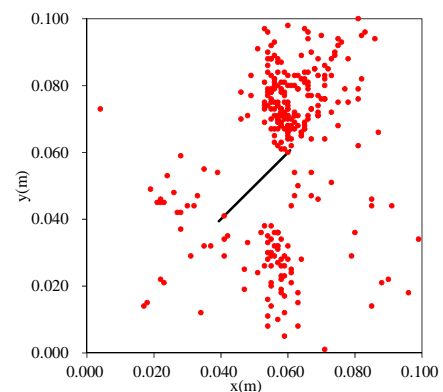


図-6 AE法による位置評定結果

モデルが構築でき、ひび割れ幅を垂直バネの引張変形量として直接評価できる特長を有している。垂直バネの構成モデルでは、引張破壊エネルギーを考慮した軟化モデルが一般的に用いられる。骨材や鉄筋の節を明示的にモデル化するコンクリートのメゾレベル解析^{10) 11)}などにも用いられている。また、適用事例は有限要素法と同様に多岐にわたっている。

4. 共通実験および解析

4.1 材料レベルでの試験

(1) 実験概要

材料レベルの実験として、既往の研究¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾を参考に、**図-4**に示すようなスリットを有する供試体を作製し、一軸圧縮荷重でのひび割れ進展の様子を、画像相関法およびアコースティック・エミッション法（以下、AE法とする）により同時に計測する実験を行った。計測の様子を**写真-1**に示す。供試体材料は、石膏、モルタルおよびコンクリートとし、スリットの角度は0度、45度および90度とした。

画像相関法による計測のために100万画素の高速度カメラを2台用いた。AE法の計測では、150kHz型の共振型センサを使用し、供試体側面に4ch、供試体のスリット近傍に2chの合計6chのセンサを設置した。

(2) 実験結果

試験結果の一例として、モルタル供試体のスリット角度が45度での計測結果を示す。**図-5**は画像相関法による最大主ひずみ分布を、**図-6**はAE法によるAE発生源の位置評定結果を示す。

図-5より、画像解析で得られる最大主ひずみの分布は、目視で確認された巨視的なひび割れ箇所とほぼ同じであり、ひび割れ位置との対応が良いことが確認された。また、**図-6**より、AEの発生源は、**図-5**のひずみが多い箇所付近に分布しており、微細なひび割れが発生し、それが大きなひび割れと進展したと考えられる。また、荷重レベルと両手法の計測結果を比較すると、画像解析でひずみ増加が確認されるより低い荷重レベルでAEが検出される傾向が示された。

なお、実験に際しては、長崎大学工学部の実験施設を使用させて頂いた。また、AE計測結果の分析には、首都大学東京の大野健太郎先生にご協力を頂いた。ここに、感謝の意を表す。

4.2 共通解析

(1) 解析概要

ひび割れ進展予測技術の現状を把握するために、3.3で報告した、断面内つり合い法、部材変形法、FEMおよびRBSMを用いて、各種条件下におけるRCおよび短繊維補強コンクリート部材の共通解析を行った。ここでは、

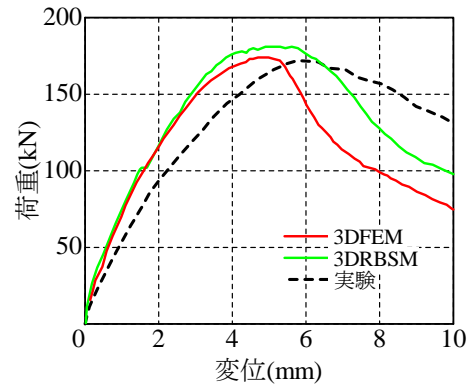
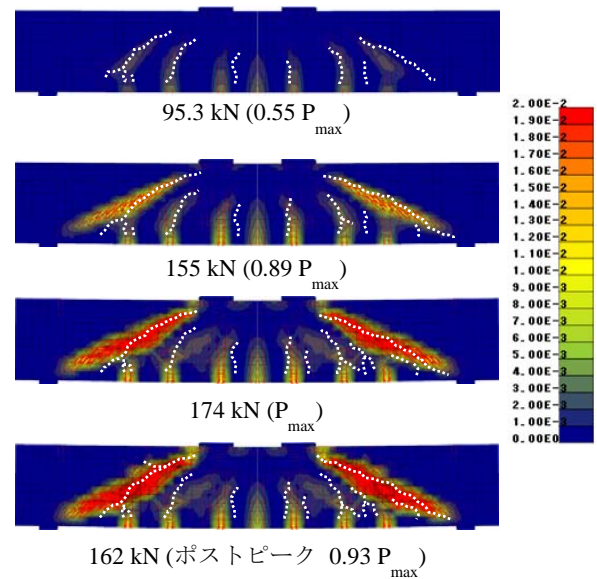
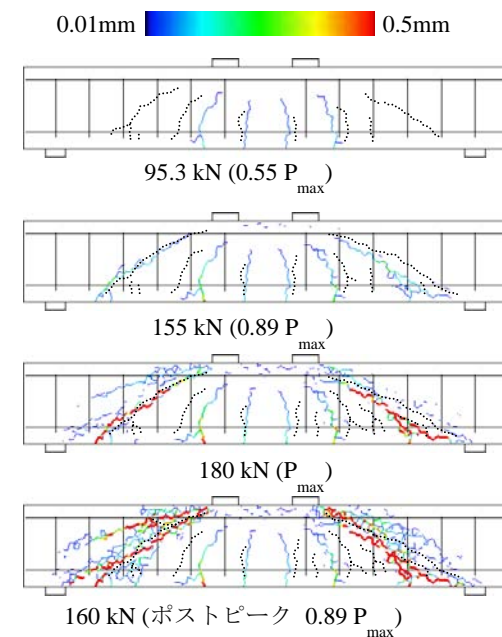


図-7 荷重-変位関係



(a) 3次元 FEM



(b) 3次元 RBSM

図-8 ひび割れ進展性状

その一例として、せん断破壊する RC はりを対象とした 3次元 FEM および 3次元 RBSM を用いた解析例を示す。

解析対象実験は、各荷重段階におけるひび割れ性状を、画像解析技術を用いて詳細に計測している渡辺ら¹⁵⁾により実施された実験である。

3次元 FEM¹⁶⁾¹⁷⁾および 3次元 RBSM¹⁸⁾¹⁹⁾の両解析とも、破壊エネルギーを用いた引張軟化モデルを用い、また、鉄筋を離散的にモデル化するとともに、鉄筋-コンクリート間の付着すべり挙動をモデル化している。また、実験で観察されたひび割れ間隔を十分に再現できる 20mm 程度の要素寸法を用いている。

(2) 実験結果との比較

図-7 に実験および解析により得られた荷重-変位応答を示す。解析は、実験の剛性を過大に評価しているものの、最大荷重は両解析手法ともに妥当に再現していることが分かる。

図-8 に実験および解析により得られた各荷重ステップにおけるひび割れ進展性状図を示す。図-7 (a) は主ひずみ分布を、図-7 (b) はひび割れ幅を表示しており、図中の点線は実験で観察されたひび割れ性状を示している。3次元 FEM および 3次元 RBSM ともに、実験の「ひび割れ間隔」および「ひび割れ進展角度」を概ね再現していることが分かる。

(3) まとめ

ここで対象とした実験の範囲においては、現状の解析技術を用いて、「ひび割れ間隔」および「ひび割れ進展角度」を妥当に再現できることを確認した。ただし、FEM 等の非線形数値解析技術は、マクロな荷重変位応答あるいはひずみの空間分布の再現性に着目した研究は行われているものの、本節で検証したようなひび割れ詳細情報の再現性に着目した研究は十分行われていない。ひび割れ詳細情報を再現するには、十分に細かい要素寸法が必要であり、従来使用されている構成モデルの前提となる力学挙動の平均化スケールと要素寸法との対応関係はさらに検証が必要であろう。なお、本節では、ひび割れ進展に関連が深い、鉄筋-コンクリート間の付着すべりモデル、乾燥収縮に伴う初期ひび割れ等、各種解析条件が結果に与える影響についても検証している。詳細は本委員会報告書を参照されたい。

5. おわりに

本研究委員会では、ひび割れの進展と評価法について、計測および解析の両面からと、学術的および実務の両面から、様々な要因に対して横断的に整理した。現状では、コンクリート内部を含んだひび割れ進展の計測と数値解析の有機的な連携は十分とは言えず、定量的な評価法や設計への陽な形で反映はなされていないが、計測技術

および数値解析手法は多様かつ精度も向上しており、今後の展開が期待される。将来的には、ひび割れ進展の知見が体系化されると、ひび割れ進展の制御に活用することが期待できる。例えば繊維補強コンクリートは、ひび割れを架橋しその開口を制御するもので、外力の条件や劣化因子に応じて、これまでより積極的に制御を目的とした利用が可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 出水亨, 松田浩, 伊藤幸広, 木村嘉富: デジタル画像相関法を用いた撤去 PCT 桁橋の載荷試験時における変位, ひずみ, ひび割れ計測, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.1411-1416, 2012.
- 2) 小柳光生, 増田安彦, 中根淳: 乾燥収縮による外壁のひび割れ幅予測に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.2, No.2, pp.59-68, 1991.
- 3) 徐泰錫, 中川隆夫, 大野義照: 鉄筋コンクリート壁の収縮ひび割れの幅と間隔, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.557-562, 2006.
- 4) 氏家勲, 佐藤良一, 許明, 安齋慎介: 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, No.3, pp.133-138, 1998.
- 5) 高橋典之, 高橋絵里, 中埜良昭: 鉄筋コンクリート部材のひび割れ量推定モデルの検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.859-864, 2009 年 7 月
- 6) 高橋典之, 伊藤洋一ら: 鉄筋コンクリート梁部材のひび割れ長さ評価手法に関する研究 その 1~その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.249-252, 2012 年 9 月
- 7) 土木学会応用力学委員会計算力学小委員会: 土木工学における計算力学手法の研究動向, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.68, No.1, 31-50, 2012.
- 8) Maekawa, K., Ishida, T., and Kishi, T.: Multi-Scale Modeling of Structural Concrete, Taylor and Francis, 2008.
- 9) Kawai, T.: New Element Models in Discrete Structure Analysis, 日本船舶学会論文集, 第 141 号, 174-180, 1977.
- 10) Nagai, K., Sato, Y., Ueda, T.: Mesoscopic Simulation of Failure of Mortar and Concrete by 2D RBSM, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.2, No.3, pp.359-374 2004.
- 11) 武藤 信太郎, 中村 光, 田辺忠顕, Worapong Srisoros, 李 相勲: メゾスケール解析によるコンクリートと異形鉄筋の付着挙動, 応用力学論文集, Vol.7, pp.767-774, 2004.

- 12) 重石光弘, 大津政康 : 2次元モデルによるアコースティック・エミッション波形解析, 材料 Vol45. No.9, pp1055-1060, 1996.
- 13) 前田弦輝ほか : デジタル画像相関法を用いたコンクリート系材料のひび割れ進展の可視化, JSCE 第 67 回年次学術講演会講演概要集, pp.1007-1008, 2012.
- 14) 杉山拓巳ほか : デジタル画像相関法を用いたき裂を有する石膏のひび割れ発生・進展に関する研究, JSCE 第 67 回年次学術講演会講演概要集, pp.1009-1010, 2012.
- 15) 渡辺 健, 東 広憲, 三木朋広, 二羽淳一郎 : コンクリート構造実験を対象としたリアルタイム画像解析システムの開発, 土木学会論文集 E, Vol. 66, No. 1, pp.94-106, 2010.
- 16) 森川博司, 小磯利博, 福田隆介 : 繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリート構造物の非線形解析, 鹿島技術研究所年報, 第 54 号, 57-62, 2006.
- 17) 森川博司 : ブラインド解析による鉄筋コンクリート造柱梁接合部の 3次元 FEM 解析法の構築, 鹿島技術研究所年報, 第 60 号, 79-84, 2012.
- 18) 山本佳士, 中村光, 黒田一郎, 古屋信明 : 3次元 RBSM による横拘束コンクリートの 1 軸圧縮破壊解析, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.4, pp. 433-451, 2010.
- 19) Gedik, Y. H., Nakamura, H., Yamamoto, Y. and Kunieda, M. : Evaluation of Three-Dimensional Effects in Short Deep Beams Using a Rigid-Body-Spring-Model, Cement and Concrete Composites, Volume 33, Issue 9, pp.978-991, 2011.