

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630202

研究課題名(和文) 損傷クリープを考慮した若材齢コンクリートのひび割れ予測手法の開発

研究課題名(英文) Development of prediction method for cracking in early-age concrete considering damaging creep

研究代表者

松本 浩嗣 (Matsumoto, Koji)

東京大学・生産技術研究所・講師

研究者番号：10573660

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：セメントの水和反応に伴う硬化・自己収縮の発生と、外力としての力学作用を同時に受ける若材齢時のコンクリート構造物のひび割れ発生・破壊・構造性能予測を可能とする数値解析システムを構築した。既存の剛体ばねモデルに、コンクリートの力学特性、収縮ひずみ、作用外力を時間軸上の履歴として与え、従来の構造解析と初期応力問題を連成することに成功した。解析手法の妥当性を確認するため、収縮ひずみ、コンクリートの材料特性の時間変化の測定と、それらを用いたRCはりの載荷実験を併せて実施した。その結果、本研究で開発した解析システムは若材齢時に収縮が発生するコンクリート構造物の破壊挙動を良好に再現できることが確認された。

研究成果の概要(英文)：A numerical analysis system which enables to predict cracking, fracture and structural performances of concrete structures in early age under a combination of concrete hardening, cause of autogenous shrinkage and external loadings was developed. Conventional structural analysis system and initial stress problem were successfully coupled by giving histories of mechanical properties of concrete, shrinkage strain and external loads to the existing Rigid Body-Spring Model. In addition, to verify the reliability of the analysis system, tests for measuring time change of shrinkage strain and concrete properties, and loading tests of RC beams by using the material were carried out. As a result, it was confirmed that the analysis system developed in this study can simulate the fracture process of concrete structures in which shrinkage occurs during the early age of the concrete.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：若材齢コンクリート ひび割れ 収縮 初期応力

1. 研究開始当初の背景

コンクリートは、わが国のみならず、現在、地球上で最も多く使われている建設材料のひとつである。翻って言えば、これを使用したコンクリート構造物の設計方法や施工方法を改善することで、経済的効果を生み出したり、環境負荷が軽減されたりするなど、人類の持続的発展に寄与することができることを意味している。

コンクリートは比較的安価で、型枠を加工することにより様々な形状に容易に成型可能であるという利点を有している反面、耐久性にかかわるいくつかの負の性質を持つことが知られている。硬化時の水和反応に伴う自己収縮は、その一例である。これは、コンクリートが硬化する際に、セメントとの水和反応により水分が失われ、コンクリートに収縮が生じる現象である。コンクリートが収縮すると、ひび割れの発生、強度の低下などの問題が起こる。特に近年では、セメント量の多い高強度コンクリートを使った構造物で自己収縮の問題が顕在化しており、収縮量の予測と構造性能評価・対策方法の確立が求められていた。

本研究を開始する以前に実施された既往の研究では、自己収縮が生じた鉄筋コンクリート(以下、RC)はりの載荷実験が行われており、特に斜めひび割れ発生荷重とせん断耐力に自己収縮が大きな影響を及ぼすことが

報告されている。しかし、本研究実施以前は、下記の課題が残っていた。

- ① ひび割れの進展状況が、せん断挙動を決定づける重要な情報であるにもかかわらず、実験ではひび割れの発生位置と進展方向を事前に予測することが困難であるため、定量的に評価することができていない。
- ② 収縮により発生するコンクリートおよび鋼材の応力(初期応力)が、その後のせん断挙動に影響を及ぼすことが分かっているが、初期応力は収縮量だけでなく、コンクリートの硬化速度の影響を受ける。しかし、コンクリートの硬化速度の影響については検討されておらず、不明である。

2. 研究の目的

若材齢時に自己収縮が生じたコンクリート構造物に対する離散解析手法を開発し、ひび割れ進展の定量的評価を可能とし、かつ、コンクリートの硬化過程および収縮履歴の影響を考慮した構造性能予測を行うことを本研究の目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、コンクリートの硬化に伴う力学特性の変化、発生する自己収縮ひずみ、作用する外力の三者を、すべて時間軸上の関数と

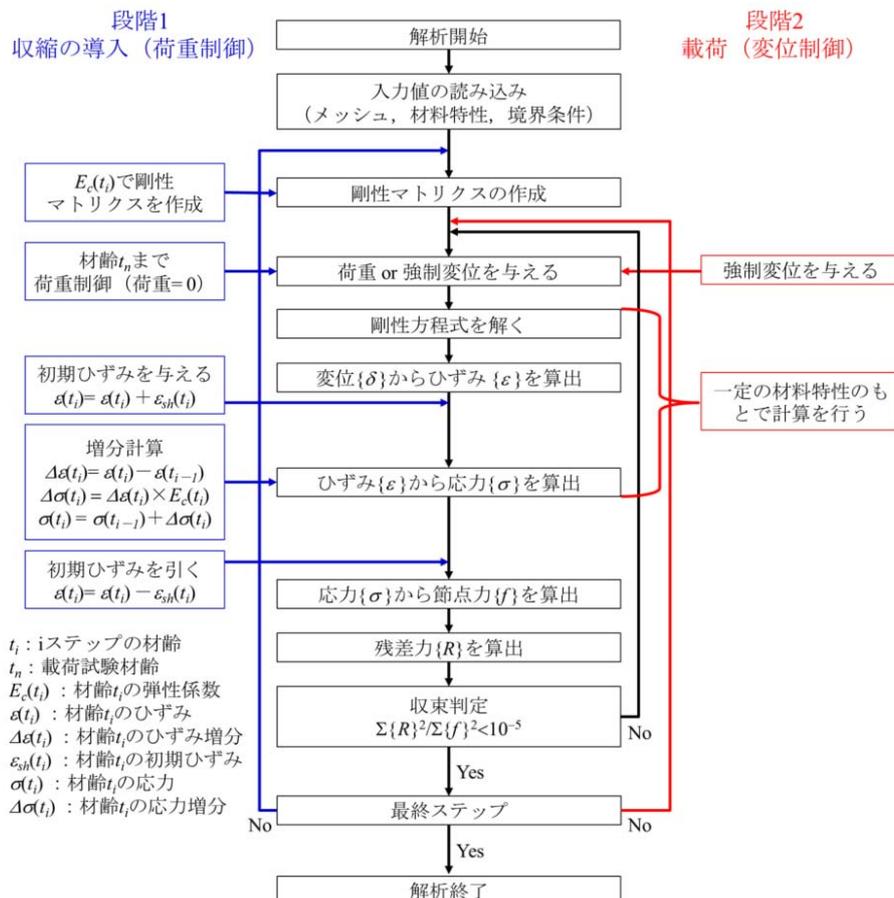


図1 強度発現・収縮・力学作用の連成解析における解析フロー

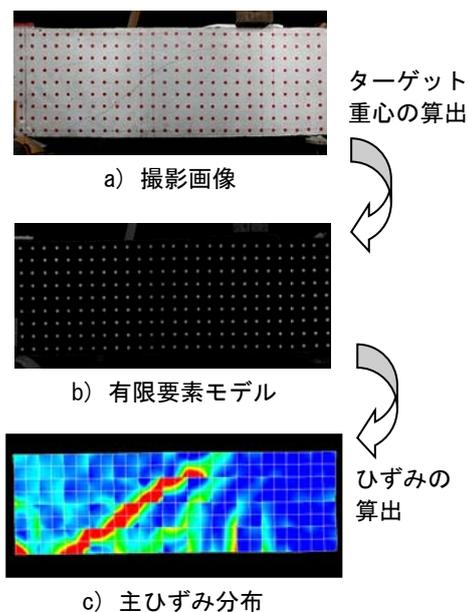


図2 画像解析によるひずみ計測プロセス

して入力する解析システムを開発した。これにより、コンクリートの硬化・収縮・力学作用が同時に発生する RC 構造物の挙動を追跡することができるようになり、構造性能予測を正しく行うことができるものと考えられる。解析手法には、離散解析のひとつである剛体ばねモデルを採用した。既存の剛体ばねモデル解析システムに、硬化に伴うコンクリートの力学特性変化と、収縮を初期ひずみにより考慮するシステムを実装した。解析フローを図1に示す。図中では、硬化および収縮の導入過程に対応する「段階1」と力学作用

に対応する「段階2」を区別しているが、解析システム上では、それらを同時に作用させることも可能である。

また、数値解析の再現性を確認するため、画像解析による計測を伴う高強度コンクリートはりの載荷実験も併せて実施した。画像解析には、格子法に基づく既存のシステム(図2)を採用した。本システムにより、人間が目視可能と言われている幅0.1mmのひび割れを検知することができることが既往の研究で確認されており、十分な精度を有するものと判断できる。

さらに、コンクリートの強度発現と収縮履歴の組み合わせの影響に関しても、実験的な裏付けを捕うとともに、それらの組合せが変化する要因を明らかにするため、セメントの種類が異なる若材齢コンクリートの圧縮強度、割裂引張強度、静弾性係数、収縮ひずみの時間変化を計測した。この結果は、高強度コンクリートはりの載荷実験結果の整理に用いるとともに、数値解析の入力データとしても用いることで、解析の再現性を検討した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 若材齢コンクリートの強度発現履歴および自己収縮ひずみの測定結果

図3に、圧縮強度、割裂引張強度、静弾性係数、内部温度、自己収縮ひずみ、高強度コンクリートはりの引張鉄筋ひずみの時間変化の測定結果を示す。図中のMPCは中庸熱セメントを用いたケース、BPC-EX15は高炉スラグセメントと膨張材を併用したケースである。自己収縮ひずみに着目すると、高炉スラグセメントと膨張材を併用したケースの方が、中

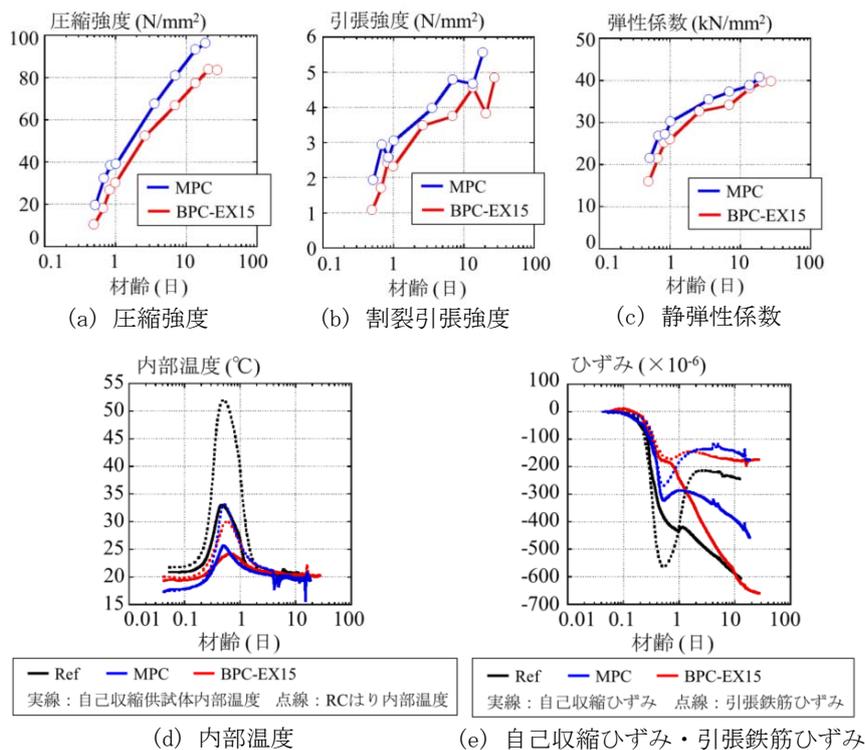


図3 圧縮強度・割裂引張強度・静弾性係数・内部温度・自己収縮ひずみ・引張鉄筋ひずみの時間変化

庸熱セメントを用いたケースよりも自己収縮ひずみが大きいことがわかる。一方、圧縮強度、割裂引張強度、静弾性係数は異なる傾向を示しており、中庸熱セメントを用いたケースの方が、いずれも発現が早いことが分かる。このように、セメントの種類や混和材の有無により、コンクリートの強度発現履歴と自己収縮履歴の組み合わせが異なることが明らかになった。

(2) 自己収縮ひずみが生じた高強度コンクリートはりのせん断破壊挙動

(1)の検討で用いたコンクリートを使って高強度コンクリートはりを作製し、載荷実験を行った。図4に、得られた荷重レベルー変位関係を示す。図中のRefは、自己収縮ひずみが十分に小さいケースである。「荷重レベル」は、既往の経験式を用いて、コンクリート強度のばらつきと自己収縮の影響を作用荷重から取り除いた値である。図から明らかなように、中庸熱セメントと膨張材を併用したケースでは、荷重レベルの最大値が大きく低下していることが分かる。これは、(1)で述べた、強度発現履歴の影響によるものと考えら

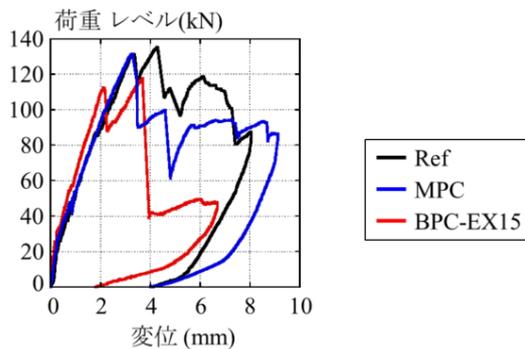


図4 荷重レベルー変位関係の実験結果

れる。画像解析による測定結果を図5に示す。図中のHAS-WO, HAS-W, LAS-WOは、それぞれ自己収縮が生じたせん断補強鉄筋を有さないRCはり、自己収縮が生じたせん断補強鉄筋を有するRCはり、自己収縮が十分に小さいせん断補強鉄筋を有さないRCはりであり、荷重レベル  $P/f' = 28.9$  (斜めひび割れ発生近辺) の状況を示している。図から明らかなように、自己収縮の有無によって、同一での荷重レベルであるにもかかわらず、ひび割れ性状に大きな違いがみられ、自己収縮を受けたケースは斜めひび割れが圧縮縁までより深く進展していることが捉えられた。

(3) 強度発現・収縮・力学作用の連成解析結果

本研究で開発した解析システム(3.で詳述)を用いて、コンクリートの強度発現と自己収縮が同時に起きる高強度コンクリートはりのせん断破壊シミュレーションを行った。なお、比較のため、自己収縮が発生しないケー

表1 解析ケース一覧

解析ケース	解析対象	解析シリーズ	備考
No.1	OPC1	1	強制変位のみ
No.2		2	初期ひずみ
No.3		3	各履歴考慮
No.4	OPC2	1	強制変位のみ
No.5		2	初期ひずみ
No.6		3	各履歴考慮
No.7	HEX	1	強制変位のみ
No.8		2	初期ひずみ
No.9		3	各履歴考慮

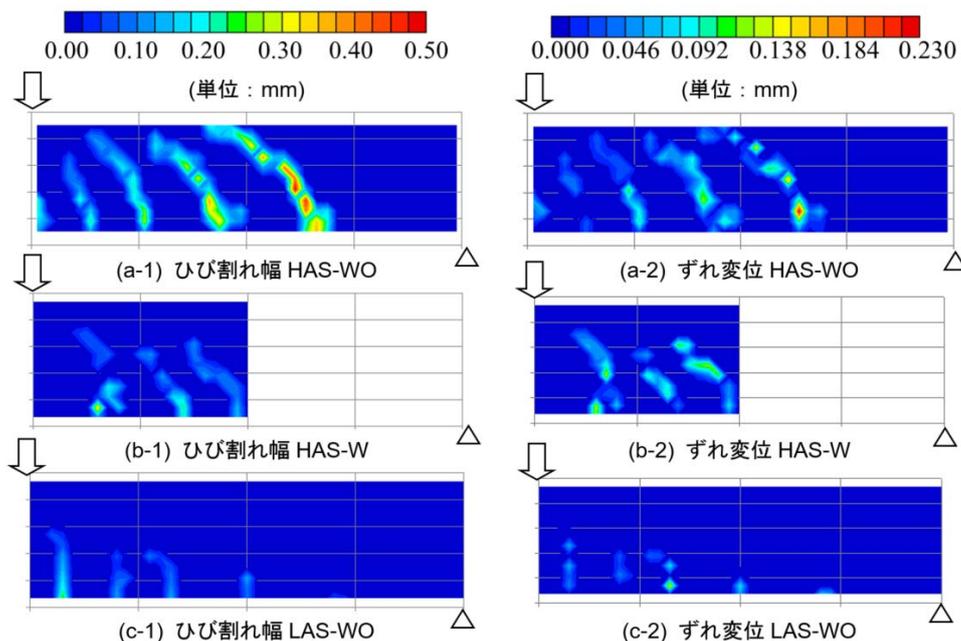


図5 画像解析による計測結果

ス、強度発現終了後に自己収縮が発生するケースも併せて実施した。表 1 に、実施した解析ケースの一覧を示す。

図 6 に、解析で得られた荷重-変位関係と斜めひび割れ発生荷重の比較、図 7 に解析で得られたひび割れパターンおよび応力分布を示す。なお、OPC1、OPC2、HEX は使用したコンクリートの種類を示しており、それぞれ普

通ポルトランドセメント (ケース 1)、普通ポルトランドセメント (ケース 2)、早強ポルトランドセメント+膨張材を用いたケースである。自己収縮を導入していないケースの斜めひび割れ発生荷重は、いずれも実験結果を大きく上回っている。一方、強度発現後に自己収縮を導入したケースは逆に、斜めひび割れ発生荷重が実験結果を下回っている。強度

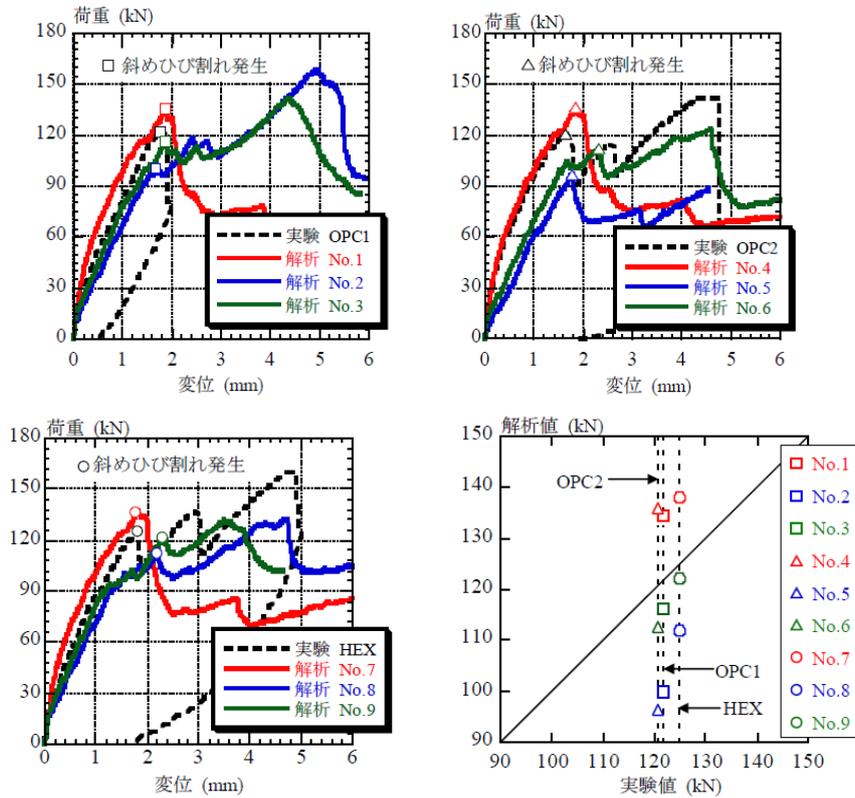


図 6 荷重-変位関係および斜めひび割れ発生荷重の比較

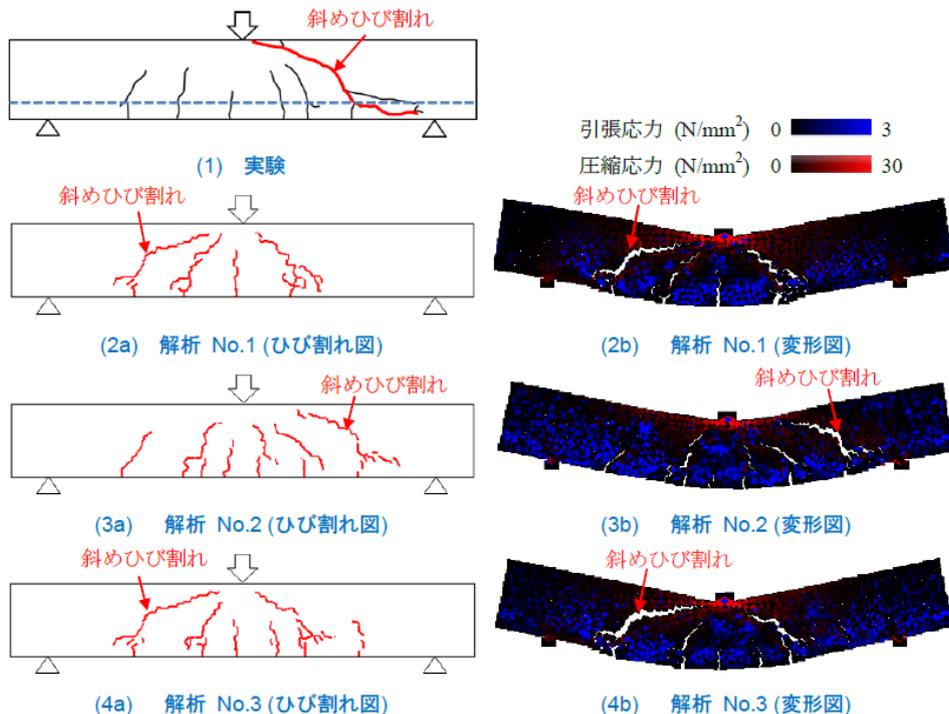


図 7 ひび割れパターンおよび応力分布図

発現履歴と自己収縮履歴を同時に考慮したケースに着目すると、いずれも実験結果を良好に捉えていることが分かる。このように、本解析のように、コンクリートの強度発現履歴と収縮ひずみ履歴の組み合わせを考慮することにより、高強度コンクリートはりのせん断破壊挙動を正しく再現できることが明らかになった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 1 件）

- ① 刑部圭佑、松本浩嗣、二羽淳一郎、自己収縮履歴と強度発現履歴の組合せが高強度コンクリートはりのせん断破壊に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、査読有、36 巻、2014、373-378

〔学会発表〕（計 3 件）

- ① 中村麻美、松本浩嗣、二羽淳一郎、収縮および強度発現性状が異なる高強度 RC はりのせん断破壊挙動、土木学会第 70 回年次学術講演会、岡山大学、2015
- ② Koji Matsumoto, Keisuke Osakabe and Junichiro Niwa, Effect of Shrinkage and Strength Development Histories on High Strength Concrete Beams in Shear, fib Symposium, Tivoli Congress Center, Copenhagen, Denmark, 2015.
- ③ Koji Matsumoto, Keisuke Osakabe and Junichiro Niwa, Shear Failure of High Strength Concrete Beams with Different Shrinkage and Strength Development Histories, 13<sup>th</sup> International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia, Yangon Technological University, Yangon, Myanmar, 2014.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

特になし

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 浩嗣 (MATSUMOTO, Koji)  
東京大学・生産技術研究所・特任講師  
研究者番号：10573660