

## 時間依存型構造解析手法によるRCはり部材の数値解析

中部大学 ○ロブレス 翔  
中部大学 正会員 博(工)伊藤 睦

Abstract : Experimental and analytical studies were conducted in order to investigate the effects of drying shrinkage and the age of loading on the behavior of reinforced concrete beams with stirrups. The applicability of the 3-dimensional time-dependent constitutive model with Solidification concept on the prediction of the behavior of RC beams under the different loading age condition was verified. In addition, the influences of humidity conditions around the beams during curing on the behaviors of RC beams were investigated analytically.

Key words : Time-dependent constitutive model , Drying shrinkage , RC beam

## 1. はじめに

各種環境作用により生じるひび割れは、プレストレストコンクリート構造物や鉄筋コンクリート構造物の耐久性低下に影響を及ぼすとともに、供用期間中の構造物の耐荷性能を低下させる恐れもある。例えば乾燥収縮は、ひび割れ幅の増加、プレストレスの減少およびたわみの増大などに影響する。このため、既設構造物の維持管理対策を検討するためには、任意時刻までに既設構造物に生じた損傷状況や初期応力状態を適切に評価することと、その上で、その時刻に構造物が保有する構造性能を評価することが求められる。数値解析的に任意時刻における構造物の損傷状況や初期応力状態および耐荷性能を予測するには、各種環境作用等による損傷や初期応力を評価する初期応力解析と、その状況下の構造物の保有耐荷力を評価する耐荷力解析とを連成して解く方が都合が良い。それは、点検で確認されたひび割れ状況を解析モデルに反映させることは難しく、点検では構造物全体の初期ひずみ、初期応力状態を評価することが困難なためである。そのため、著者らは、各種初期応力影響下の補修耐荷力解析プラットフォーム<sup>1)</sup>の構築を行い、解析ツールの改良を行っている。

任意時刻の初期応力、損傷状況は、温度応力や乾燥収縮等をはじめとするコンクリート打込み直後からの累積となる。このため、初期応力解析と耐荷力解析とを連成して解くために、コンクリート打込み後から硬化に至るまでの挙動を統一的に表現可能な材齢依存型構成則<sup>2)</sup>の開発を行っている。

本研究では、開発を進める材齢依存型構成則を使用した解析ツールの応答を検証することを目的に、載荷材齢を変化させた鉄筋コンクリートはり部材の載荷実験とその数値解析を実施した。また、養生期間中のはり試験体の周囲相対湿度をパラメータとした数値実験を行うことにより、乾燥収縮による損傷が曲げ破壊する部材の応答に及ぼす影響の検討を行った。

## 2. 実験概要

実験供試体諸元を図-1に示す。また、供試体作製に使用したコンクリートの配合を表-1に示す。コンクリートの配合は、乾燥収縮が生じやすいように、単位水量を大きくした。供試体には、材齢経過時に曲げ破壊するように、十分なせん断補強鉄筋(D6)を配置した。同一のコンクリートで6体の供試体と圧縮試験用のテストピースを作製し、打込み後1日で脱型し、脱型後は5体の供試体を気温約15°C、湿度50%程度の環境下で気中養生し、1体については水中養生した。なお、気中養生は、載荷実験時の支点位置のアルミ棒上に静置した。載荷実験を材齢2日、4日、7日、14日および28日に実施し、水中養生した供試体については、材齢28日で載荷実験を実施した。各材齢で圧縮試験を実施

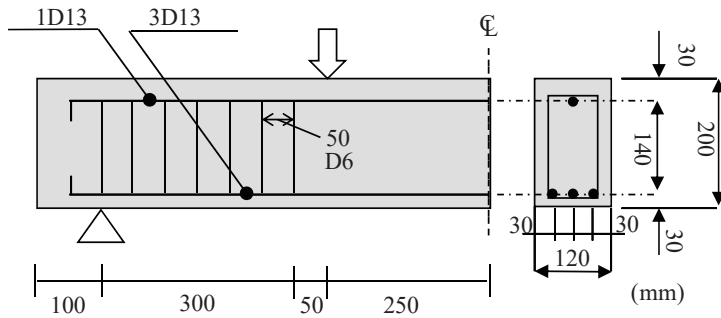


図-1 供試体諸元

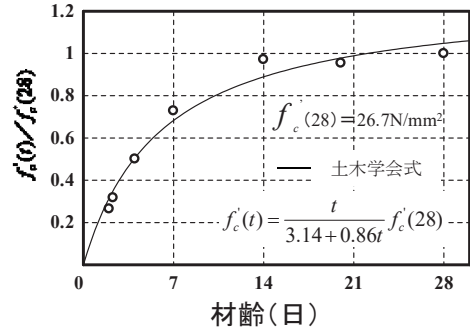


図-2 圧縮強度と材齢の関係

した結果、図-2 に示す結果が得られた。なお、主筋の引張試験の結果、降伏強度は  $375\text{N/mm}^2$  であった。

### 3. 解析概要

#### 3.1 初期応力解析と耐荷力解析の連成解析

初期応力解析と耐荷力解析の連成解析は、図-3 に示す解析フローに従って実施した。Input data を読み込み後、解析対象のメッシュや変位境界を決定する Lift step、解析対象の時系列挙動を解く Time step、およびある時刻での外力作用を想定する場合には、その挙動を評価する Load step となる。非線形解析における Iteration step は、Time step、Load step に属する。なお、応力算定に使用する構成則は、上記 step によらず、全て同一である。このプログラムの流れにより、Input data で、初期応力解析や耐荷力解析のシナリオを想定すれば、1回の計算実行で、初期応力解析と耐荷力解析の連成が可能となる。本研究では、2章で示したはりの載荷実験に対して、別途実施した温度解析および湿気移動解析により得られた温度履歴、湿度履歴を Input data として、Time step の初期応力解析を実施し、実験と同様の載荷材齢時に耐荷力解析を実施した。図-4 に本研究で使用した解析モデルを示す。温度解析および湿気移動解析の精度を向上させることを目的に、外気と接する面から断面内部方向への要素分割を細かくし、支点および載荷点要素は逐次弾性体要素としている。なお、補強鉄筋は埋込み鉄筋要素を使用してモデル化している。

表-1 コンクリートの配合

W/C	s/a	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
(%)	(%)	W	C	s	G
63	43	203	322	749	1020

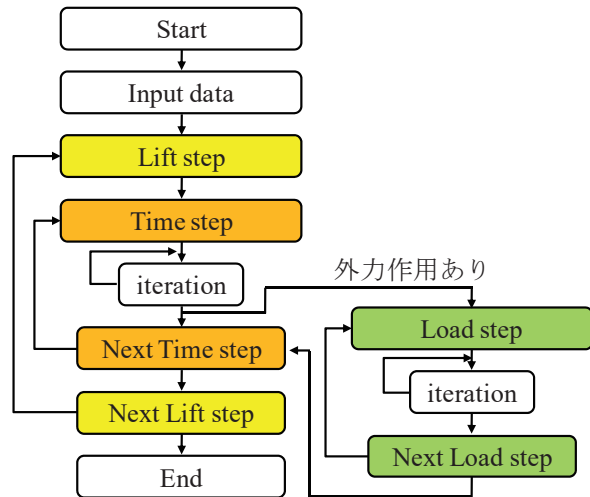


図-3 解析のフロー

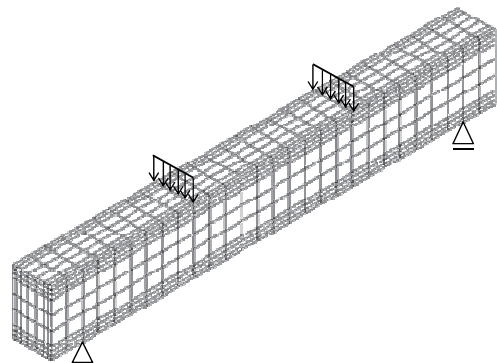


図-4 解析モデル

#### 3.2 材齢依存型コンクリート構成モデル

Ishikawa ら<sup>3)</sup>は、Bazant らの提案による Solidification<sup>4)</sup>を、さらに陽な形でひずみ依存型硬化体特性とする Solidification model の提案を行っている。図-5 にその材齢依存型構成則のイメージを示す。図中の硬化体柱が時間の経過とともに生成され、応力  $\sigma_G$  に抵抗する。各柱は固有の体積割合  $\Delta V_i$  を有し

$$\begin{aligned}
 d\sigma_G &= \sum \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \cdot \Delta\varepsilon \cdot \Delta v(\tau) \\
 &= \int_0^t \frac{\partial}{\partial\varepsilon} f(\varepsilon - \varepsilon_\tau) \cdot d\varepsilon \cdot dv(\tau) \\
 &= \left[ \int_0^t \frac{\partial}{\partial\varepsilon} f(\varepsilon - \varepsilon_\tau) \cdot dv(\tau) \right] \cdot d\varepsilon \quad (1) \\
 &= \left[ \int_0^t \frac{\partial}{\partial\varepsilon} f(\varepsilon - \varepsilon_\tau) \cdot \frac{\partial v(\tau)}{\partial\tau} \cdot d\tau \right] \cdot d\varepsilon \\
 &= D \cdot d\varepsilon
 \end{aligned}$$

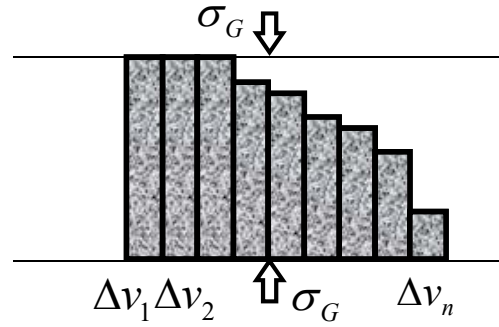


図-5 材齢依存型構成則のイメージ

ており、図中の柱の高さは、各柱が負担する応力の大きさを表している。ここで、各柱の応力一ひずみ関係を同一とすること、およびある時刻までに生成しているいくつかの硬化体に対して、ある時間 step 内で生じる応力依存性ひずみ増分は等しいとする Kinematic 的な制約条件を仮定することにより、材齢依存型構成則が式(1)のように記述することができる。ここで、 $t$ 、 $\tau$ はそれぞれ、コンクリート打込み後からの材齢および各硬化体柱が生成された材齢であり、 $\varepsilon_\tau$ は、材齢 $\tau$ までに生じた応力依存性ひずみ、関数 $f$ は応力一ひずみ関係である。本研究では、この概念を硬化コンクリート用の構成則として開発を進める格子等価連続体モデル(LECOM)<sup>5)</sup>に導入した3次元材齢依存型構成モデル<sup>2)</sup>を使用した。このモデルは、載荷材齢と載荷履歴を変数としたコンクリートの曲げ試験結果を妥当な精度で予測可能である<sup>2)</sup>。なお、本研究では、生成される硬化体柱の本数を最大30本とし、各硬化体柱の体積割合を決定する関数 $v$ には、図-2に示す圧縮強度と材齢の関係を使用した。

### 3.3 格子等価連続体モデル<sup>5)</sup>

3次元格子等価連続体モデルは、要素内の力の流れに沿った局所座標系に設定した3本のMain Latticeとひび割れ面を介して伝達されるせん断能力と直応力を評価するために、1ひび割れ面に対して4本設定されるShear Latticeを用いることにより、コンクリートの多軸挙動をそれぞれの格子に想定した応力一等価一軸ひずみ関係の組合せにより表現するモデルである。

図-6に、式(1)中の関数 $f$ に本研究で使用したコンクリートの応力一等価一軸ひずみ関係を示す。圧縮および引張を受けるコンクリートの軟化領域には、等価長さ $l$ を要素体積の3乗根として破壊エネルギーを導入した。ただし、鉄筋との付着が期待できる領域のコンクリートの応力一等価一軸ひずみ関係には、tension stiffening modelを仮定した。また、圧縮を受けるコンクリートモデルには、圧縮力の流れに直交する方向の引張ひずみを用いて圧縮応力を低減する圧縮軟化係数を使用した。

## 4. 実験結果と解析結果

図-7に実験による荷重一変位関係と解析値との比較を示す。変位は、スパン中央断面下端位置で

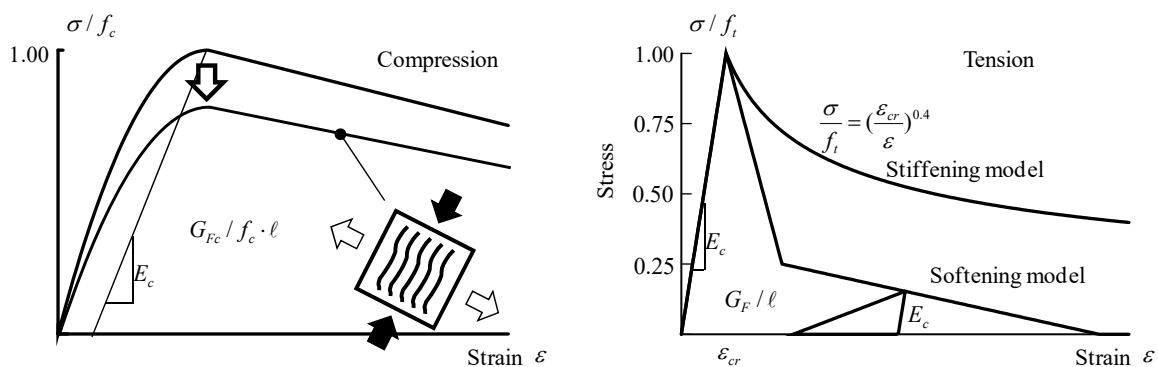


図-6 コンクリートの応力一等価一軸ひずみ関係

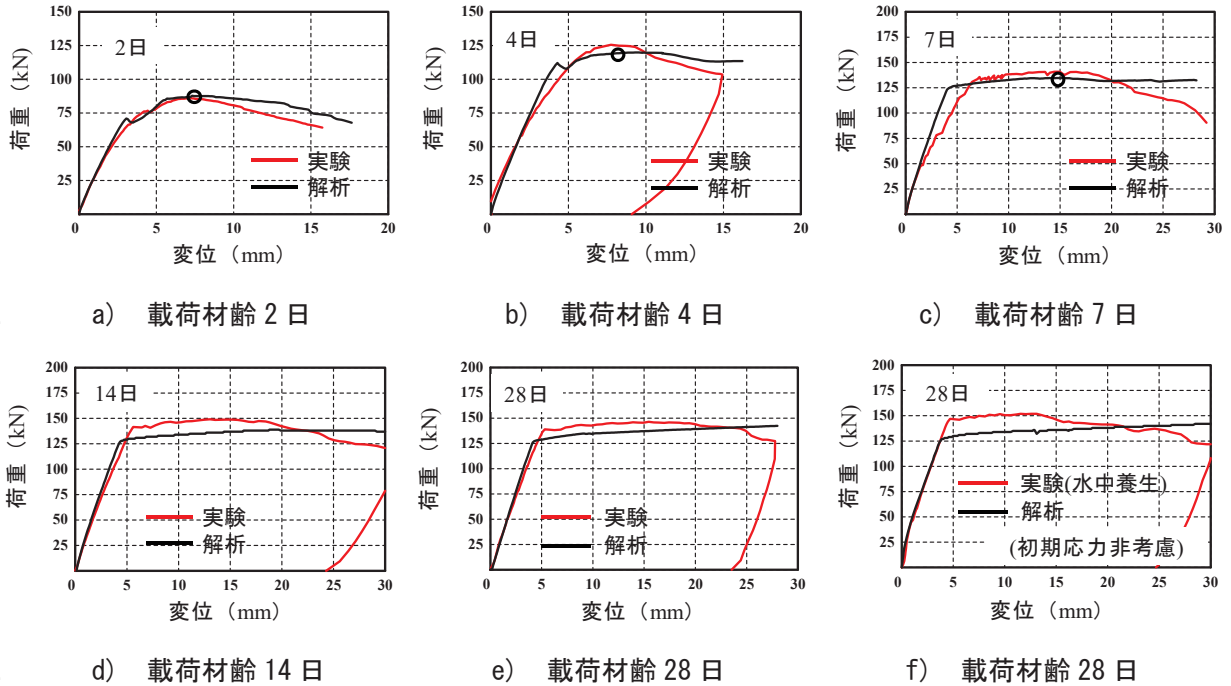


図-7 実験と解析の荷重-変位関係の比較

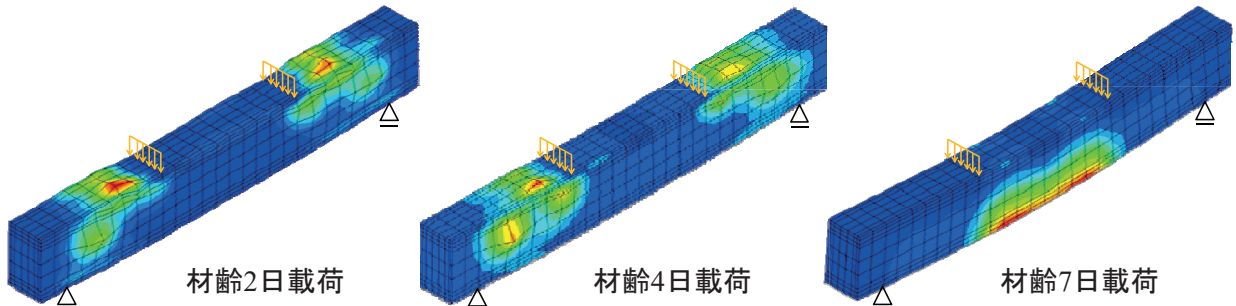


図-8 予測された変形と最大主ひずみ分布

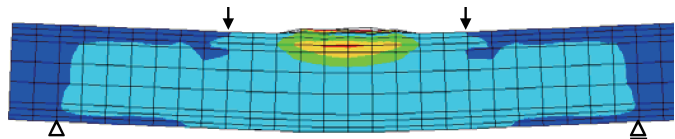


図-9 最終 step での変形と鉛直方向ひずみ分布 (載荷材齢 7 日)

のたわみであり、実験値の変位は、計測されたスパン中央断面下端位置のたわみから両支点位置断面上縁の沈下量の平均値を差し引いた値である。なお、図-7f)には、載荷材齢 28 日まで水中養生した試験体の荷重-変位関係と初期応力解析を実施しない通常の耐荷力解析により得られた荷重-変位関係の比較を示している。また図-8

には、載荷材齢 2 日、4 日および 7 日の荷重-変位関係中の○印点の変形図と最大主ひずみ分布の計算結果を示す。なお、実験では、材齢 28 日までの載荷時において乾燥収縮等によるひび割れ損傷を確認できなかった。また解析においても、材齢極初期に生成した硬化体においてひび割れの発生が予測された程度の初期損傷状態であったので、載荷直前の損傷状況の比較を割愛する。荷重載荷により実験で観察された破壊形態は、載荷材齢 2 日および 4 日ではせん断破壊、載荷材齢 7 日以降では曲げ破壊であった。載荷材齢 4 日までは、コンクリートの強度が十分に発現しておらず、斜めひび割れ発生後、せん断スパン内に複数の斜めひび割れの発生が確認され、せん断スパン内のコンクリートが圧壊するせん断圧縮破壊の形式で耐力の低下を示した。材齢 7 日以降の終局状態は、等曲げ区間内のコンクリートが圧壊するというよりも、等曲げ区間内の圧縮縁付近に発生した水平ひび割れや載荷点近傍か

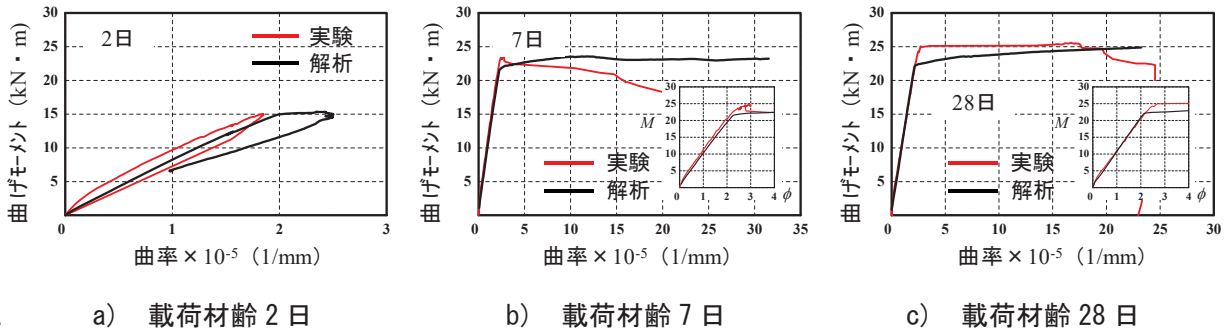


図-10 実験と解析の曲げモーメントー曲率関係の比較

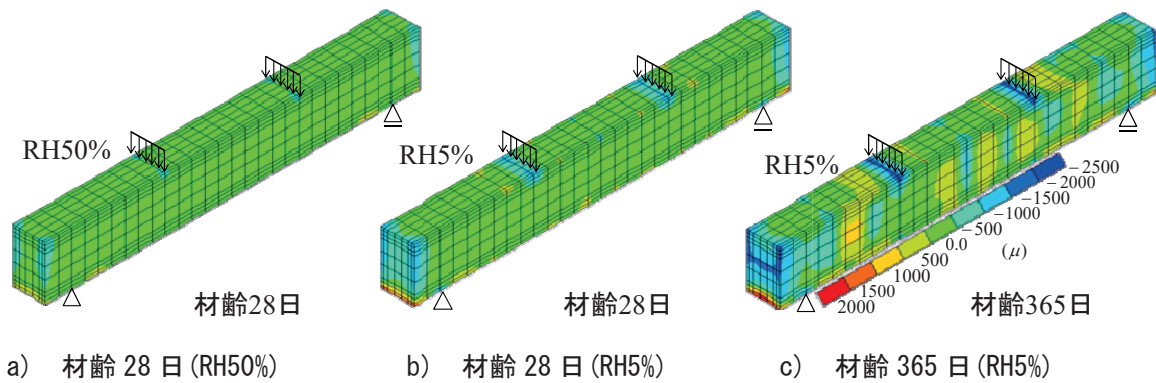


図-11 荷重直前の部材軸方向ひずみ分布

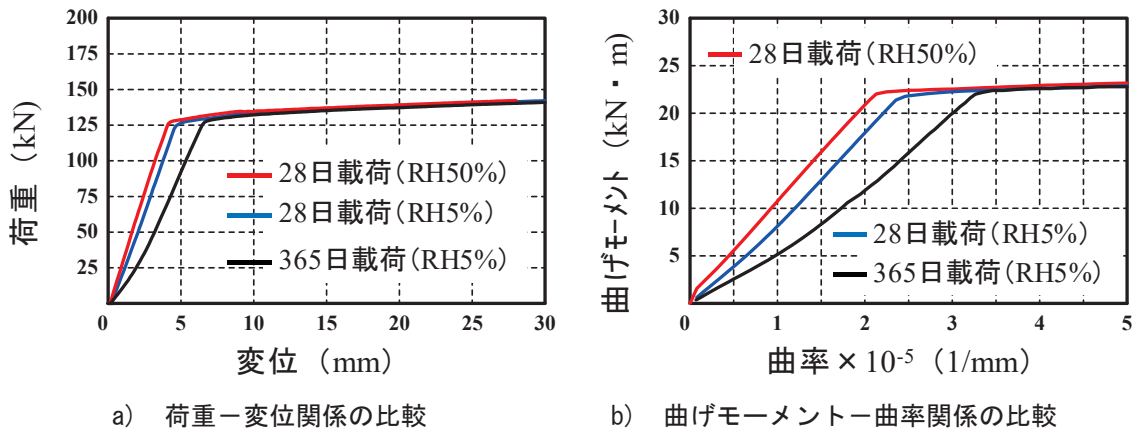


図-12 養生期間中の周囲相対湿度を変化させた解析結果

ら発生したひび割れが進展することで、圧縮縁のコンクリートが剥離する形式で耐力の低下を示した。なお、材齢7日においては、斜めひび割れの発生が確認された。

解析においても、図-7および図-8から確認できるように、荷重材齢4日まではせん断圧縮破壊し、荷重材齢7日以降では曲げ破壊した。荷重材齢7日以降の曲げ耐力には顕著な差異は確認されなかった。また、いずれの実験・解析結果においても、養生期間中に収縮で発生したひび割れの影響により、明確な曲げひび割れ発生点が確認されないが、荷重材齢28日の初期応力非考慮の解析では、曲げひび割れの発生による剛性の変化が確認できる。なお、解析は、実験値と比較して、降伏荷重と曲げ耐力を過小評価している。平面保持、完全付着およびコンクリート引張抵抗を無視した断面計算から得られる降伏荷重は120kN程度であることから、実験では等曲げ区間長を確保するために使用したIビームの荷重治具が変形し、エネルギー吸収したためと考えられる。また、解析は曲げ破壊時の耐力の低下を予測できていない。一例として、図-9に解析で予測された荷重材齢7日の最終stepにおける変形図と

鉛直方向のひずみ分布を示すが、解析においても、等曲げ区間内の水平方向ひび割れやコンクリートの破壊が予測されているが、耐力の低下には至っていない。この点については、メッシュ分割や構成則における等価長さの設定方法等も踏まえて今後の検討課題としたい。

図-10に実験と解析により得られたスパン中央断面の曲げモーメント-曲率関係の比較を示す。曲率は、スパン中央断面の引張、圧縮鉄筋ひずみと平面保持の仮定を用いて算出した。曲げモーメントは支点反力にせん断スパン長を乗ずることで評価した。解析において鉄筋とコンクリートの完全付着を仮定した結果、載荷材齢7日までにおいて、鉄筋ひずみが大きくなることで曲率を過大評価することが確認された。若材齢時には、ひずみやひび割れ幅の適切な評価には、付着モデルの導入が必要と考えられる。なお、乾燥収縮による損傷が少なかったこともあり、付着モデルの考慮の有無は、材齢が経過した硬化後の挙動には、ほとんど影響を与えない結果となった。

## 5. 養生期間中の周囲相対湿度を変数としたパラメトリック解析

載荷材齢28日までの実験および数値解析では、載荷材齢7日以降の曲げ挙動に顕著な差は確認されなかった。そこで、養生期間中の試験体周囲の相対湿度を5%まで低下させ、28日および1年後に荷重載荷する数値実験を行った。図-11に乾燥収縮による載荷直前の部材軸方向ひずみ分布、図-12に荷重-変位関係と曲げモーメント-曲率関係の比較を示す。この結果、既往の研究<sup>6)</sup>にあるように、乾燥収縮によりひび割れ損傷や初期応力が生じて、降伏荷重や曲げ耐力に顕著な差が生じない結果が得られた。ただし、初期の剛性に顕著な影響を与える結果が得られた。

## 6. まとめ

本研究では、載荷材齢を変化させたRCはり部材の載荷実験と、初期応力解析と耐荷力解析との連成解析を実施した。その結果、以下の結論を得た。

- ・本解析手法は、載荷材齢のみを入力値として変化させるだけで、載荷材齢による破壊モードの変化や挙動を概ね妥当な精度で予測可能であることが確認された。ただし、精度向上のために、要素分割や、若材齢時コンクリートと鉄筋間の付着について検討を要する。
- ・養生期間中の周囲相対湿度を変数とした数値実験では、乾燥収縮によるひび割れ損傷および初期応力は、降伏荷重、曲げ耐力にほとんど影響を及ぼさないが、初期剛性に顕著な影響を及ぼす結果が得られた。

謝辞：本研究の一部に、科学研究費補助金（25820197）および中部大学特別研究費の助成を得た。

ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 石川靖晃, 伊藤 睦, 荒畑智志, 河合真樹, 原 健悟: コンクリート構造物建設シミュレータの開発-各種初期応力影響下の保有耐荷力解析プラットフォーム-, コンクリート工学 Vol.53, No.2, pp.172-180, 2015.2
- 2) 伊藤 睦, 石川靖晃, 上田尚史, 田辺忠顕: 初期応力を考慮したRC構造物の耐荷力解析手法の構築, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.19-24, 2012.
- 3) Ishikawa, Y., Kunieda, M., Worapong, S., Tanabe, T.: Modeling of uni-axial constitutive law in early age concrete based on solidification concept, Proc. of Concreep7, pp.393-398, 2005.
- 4) Bazant, Z. P. and Prasannan, S.: Solidification theory for concrete creep I: Formulation, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.115, No.8, pp.1691-1703, 1989.
- 5) 田辺忠顕ほか: 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, 技法堂出版, pp.201-314, 2004.3
- 6) 長谷川 俊昭, 関 弘: 乾燥収縮ひび割れが鉄筋コンクリート部材に及ぼす影響, 第6回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.617-620, 1984.