

若材齢コンクリートの乾燥収縮ひび割れ挙動に関する基礎的研究

名城大学 正会員 博(工) ○石川 靖晃
川田建設(株) 正会員 修(工) 岡田 崇宏

Abstract : This study aims to develop the theoretical model which can exactly express drying shrinkage behavior of the concrete from early age to hardening process. Especially, a model to express drying shrinkage at an early age is presented considering the change of meniscus due to age. As for the constitutive model, lattice equivalent continuum model (LECOM) and solidification concept is employed in the stress analysis. Then, validity of the proposed model is discussed comparing with restriction shrinkage experiments. Consequently, considering parameter about the compressive strength intensity in drying shrinkage strain components, it is implied that cracking due to drying shrinkage at an early age may be expressed analytically.

Key words : Early age concrete, Drying shrinkage cracking, Meniscus, LECOM, Solidification Concept

1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮解析手法は大きく分けて2つある。ひとつは、土木学会の手法に代表されるような、乾燥収縮ひずみを部材に一律に与える方法である。この方法を用いた場合、若材齢時に乾燥収縮が原因でひび割れが生じることはないが、乾燥収縮による内部拘束効果を表現することはできない。もうひとつは、水分移動に関する拡散方程式を解くことにより部材内部の水分量分布を推定し、その情報を基に乾燥収縮ひずみを求める方法である。この方法を用いた場合、乾燥収縮による内部拘束の効果が考慮されるが、若材齢時からひび割れが生じる解析解をとる傾向となる。ここでの若材齢時とはおよそ材齢7日前を指す。若材齢時における乾燥収縮挙動に関する研究は十分に行われてはおらず、初期応力解析においては、硬化時コンクリートに対する乾燥収縮ひずみ履歴を若材齢コンクリートにそのまま適用せざるを得なかった。

乾燥収縮によって生じる応力はメニスカスに大きく依存するが、メニスカスの影響の程度は硬化時と若材齢時では異なると考えられる。このため、打設直後のコンクリートの力学特性等の変化を乾燥収縮挙動に反映させる必要があると思われる。上記に鑑み、著者らは、材齢極初期におけるコンクリートの乾燥収縮挙動を正確に把握する理論モデルの構築を行い、既往の拘束ひび割れ試験結果を用いて提案し

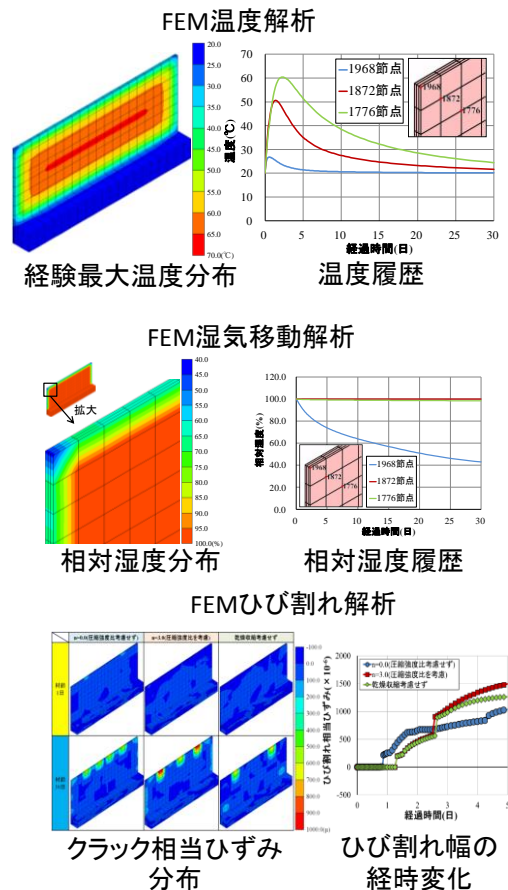


図-1 解析手順の流れのイメージ

たモデルの検証を行ってきたり。通常の拘束ひび割れ試験では乾燥開始材齢は7日であることが多いが、その場合、若材齢時の乾燥収縮挙動を十分把握することは困難である。そこで本研究では、乾燥開始材齢を早めた乾燥収縮による拘束ひび割れ試験を実施し、その実験結果と著者らが提案したモデルとの比較検討を行うことを目的とした。

2. 乾燥収縮を受ける若材齢コンクリートのひび割れ解析手法概要

2.1 ひび割れ解析の全体の流れ

図-1に解析手順のイメージ例を示す。まず、FEM温度解析を行い、全節点の温度履歴を算出する。温度解析は通常の熱伝導方程式理論に基づいている。次にFEM温度解析で得られた温度履歴を入力データとして読み込み、FEM湿気移動解析を実施し、全節点の相対湿度履歴を計算する。湿気移動解析は森本ら²⁾によって構築された湿気移動解析理論に基づいている。最後に、得られた温度および相対湿度履歴を入力値として与え、FEMひび割れ解析を実施し、変位、ひずみ、応力、クラック相当ひずみなどを計算する。

2.2 乾燥収縮ひずみ成分のモデル化

乾燥による最大収縮量 $\epsilon_{sh,\infty}$ は、一般に相対湿度と密接な関係がある。相対湿度分布の変化を考慮に入れて乾燥収縮による変形解析を実施する際、相対湿度分布をあらかじめ評価した後、最大乾燥収縮量と相対湿度の関係から自由乾燥収縮ひずみ成分を求めることで解析が行われることが多い。この場合、若材齢時に実際生じないはずのひび割れが数値解析上発生するといった問題が生じていた。著者らは、メナスカス内に生じる水柱の材齢変化を考慮に入れることにより、若材齢コンクリートの乾燥収縮ひずみ成分を次式でモデル化している。

$$\Delta\epsilon_{sh}(t) = \alpha(t) \cdot \Delta\epsilon_{sh,\infty} \tag{1}$$

ここで、 $\epsilon_{sh}(t)$ は時間 t における乾燥収縮ひずみであり、相対湿度の関数である。 $\alpha(t)$ はメナスカスを構成する水柱の割合を表す係数であり、若材齢時では1より小さいが、時間が無限大となった時1に近づく。詳細については文献¹⁾を参照されたい。

2.3 材齢硬化とひび割れによる損傷を同時に考慮した構成則モデル

ひび割れ解析に用いる構成則として、伊藤ら³⁾によって構築された格子等価連続体モデル(LECOM)と石川ら⁴⁾によって提案されているSolidification Conceptを融合した構成則モデルを使用した。

LECOMでは、鉄筋コンクリートはひび割れが生じるまでは弾性連続体、ひび割れ発生後は、コンクリートの主ひずみ方向に配置されたMain Truss、せん断Trussおよび鉄筋を表すTrussにてモデル化される。鉄筋とコンクリートは完全に付着していると仮定している。新たに節点を設けることなく鉄筋比のみで鉄筋の影響を考慮できること、基本的に一軸の応力 - ひずみ関係の組み合わせで表現されるため、解の収束性が良いといった特徴が挙げられる。

Solidification Conceptとは、ひずみ軟化挙動と材齢に伴う硬化挙動を統一的に取り扱う概念である。若材齢時コンクリートを硬化体からなる柱の集合体で形成されると仮定し、材齢の経過とともに硬化体を増やしていくことにより、若材齢コンクリートのひび割れ挙動を表現している。

詳細については文献^{3,4)}を参照されたい。

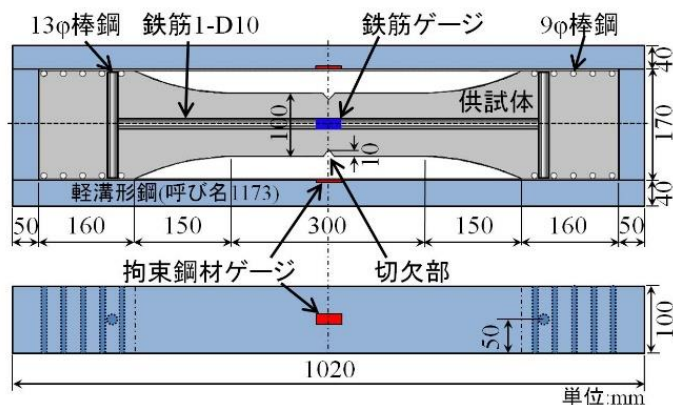


図-2 拘束ひび割れ試験体

3. 乾燥開始材齢を早めた拘束ひび割れ試験による本解析手法の検証

3.1 乾燥開始材齢を早めた拘束ひび割れ試験概要

乾燥開始材齢を早めた乾燥収縮ひび割れ試験を行った。使用した試験体は「JIS A 1151拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験」に準拠している。試験体の形状寸法を図-2に示す。

コンクリート配合は1種類のみとした。配合を表-1に示す。なお、セメントの種類は普通ポルトランドセメントである。拘束鋼材とコンクリートを定着する部分には9mmの棒鋼が点溶接されており、13mmの棒鋼が試験体長手方向に向かって垂直に配置されている。拘束枠の両側の側面にひずみゲージを貼付けることにより拘束鋼材のひずみを測定した。さらに、ひび割れを意図した箇所に発生させるため、試験体の中央部に両側から深さ10mmの切欠部を設けた。本研究では、鉄筋の有無により2種類の試験体を作製した。作製本数は各1本である。鉄筋有りの試験体については、写真-1に示すように、鉄筋中央2箇所にひずみゲージを接着し防水加工をすることで鉄筋ひずみを測定した。

試験体の作製は、恒温恒湿室内で行った。室内の温度は20℃、周囲相対湿度は50%RHである。打設完了直後から拘束鋼材ひずみおよび鉄筋ひずみの測定を開始した。試験体中央部に生じるひび割れ幅の測定に関しては、コンクリート表面が硬化した24時間後にPI型変位計(ゲージ)を2箇所取り付け、計測を開始した。

測定されたひび割れ幅、拘束枠ひずみおよび鉄筋ひずみの経時変化を図-3に示す。図-3には後述する自由収縮ひずみ結果も併記されている。

鉄筋無しのケースにおいては、材齢8日頃に写真-2に示すように切り欠き部にひび割れが発生した。材齢の経過とともにひび割れ幅は緩やかに大きくなり、材齢28日におけるひび割れ幅は0.3mm程度となった。拘束枠ひずみについては、ひび割れが発生するまでは40マイクロ程度の圧縮ひずみが発生しており、ひび割れが発生すると同時にひずみは引張側に転じた。ひび割れ発生後は-5マイクロ程度となり、材齢が経過してもほとんど変動はしなかった。

鉄筋有りのケースにおいては、材齢7日頃にやはり切り欠き部にひび割れが発生した。材齢の経過とともにひび割れ幅は緩やかに大きくなり、材齢28日でのひび割れ幅は0.15mm程度となった。拘束枠ひずみについては、測定開始から材齢28日まで緩やかに圧縮ひずみが発生しており、材齢28日でのひずみは-40マイクロ程度であった。鉄筋ひずみは、ひび割れ発生前では、ほとんど生じていないが、ひび割れ発生後では引張側に発生し、その値は材齢28日では350マイクロ程度となっている。

3.2 強度および自由収縮試験概要

3.1節で述べた拘束試験と同じ配合にてφ100mm×200mmの円柱供試体を作製し、温度20℃、周囲相対湿度50%RHの環境条件下で自由収縮ひずみの経時変

表-1 試験体の配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
		W	C	S	G	SP
60	44.5	175	292	919	881	1.752



写真-1 防水加工された鉄筋

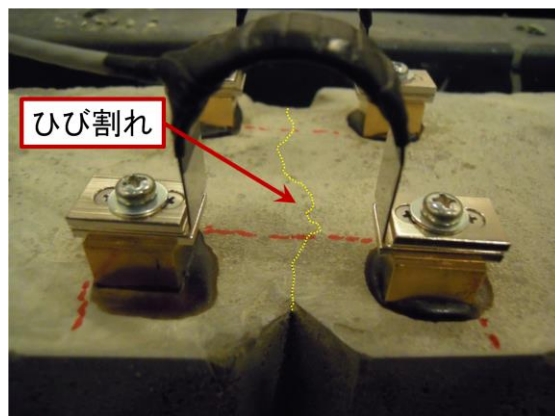


写真-2 ひび割れ発生状況

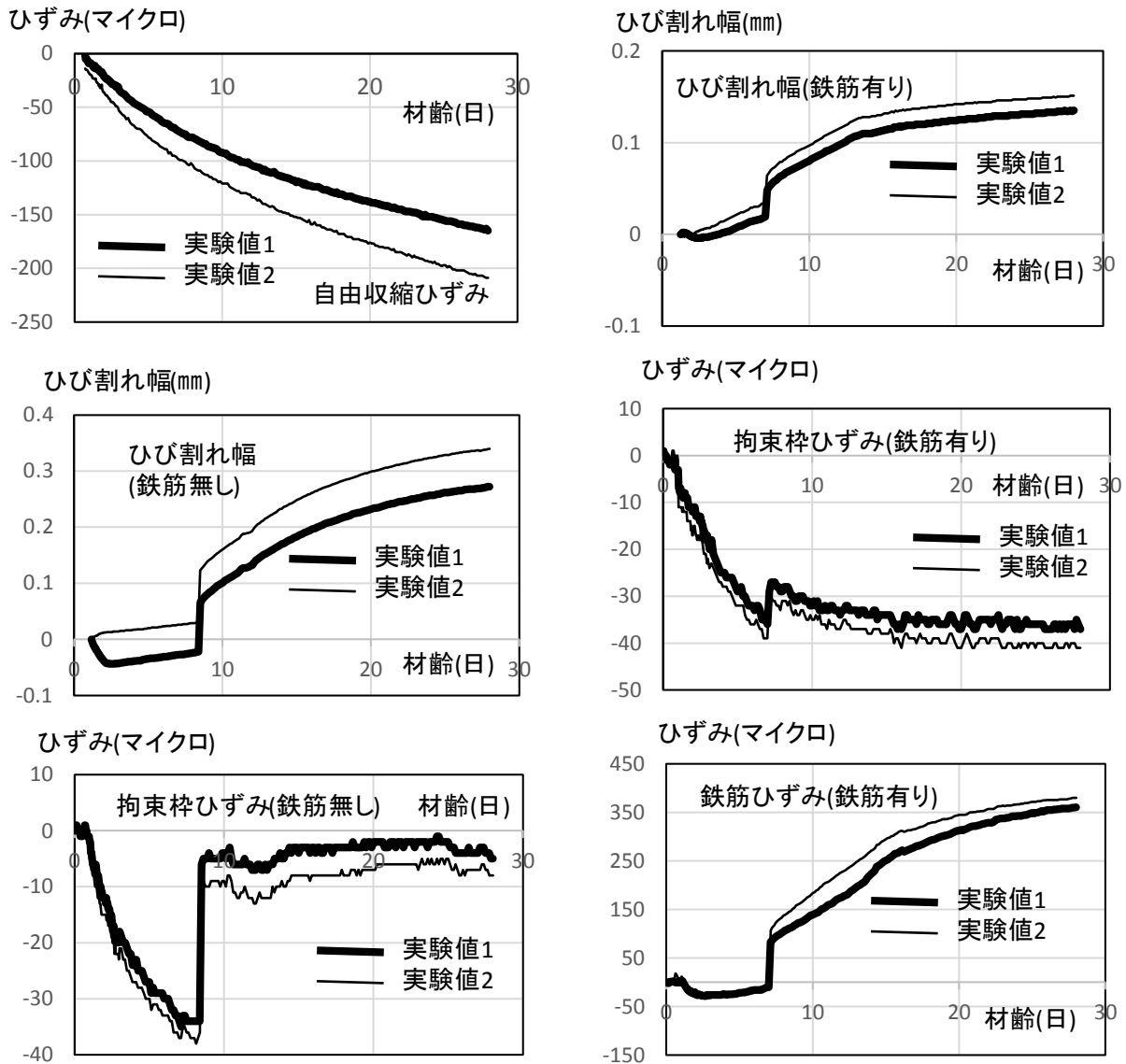


図-3 拘束ひび割れ試験および自由収縮ひずみ試験測定結果

化を測定した。自由収縮ひずみについては、供試体中央部に長さ60mmのひずみ計を埋め込み、材齢1日に脱枠し、直ちに測定を開始し、材齢28日まで測定を実施した。測定本数は2本である。供試体表面については、封緘などの処置を施さなかった。すなわち、供試体すべての表面からの乾燥を許容している。自由収縮ひずみ測定結果を図-3に重ねて示す。材齢28日で170マイクロ程度の収縮ひずみが生じている。

同一条件にて、一軸圧縮試験、割裂試験を実施した。試験材齢はともに3,7,14日であり、各材齢での試験本数はそれぞれ3本である。強度試験結果を図-4に示す。図中には、各強度と材齢との補間式を記載している。水セメント比が60%と比較的大きいため、材齢14日

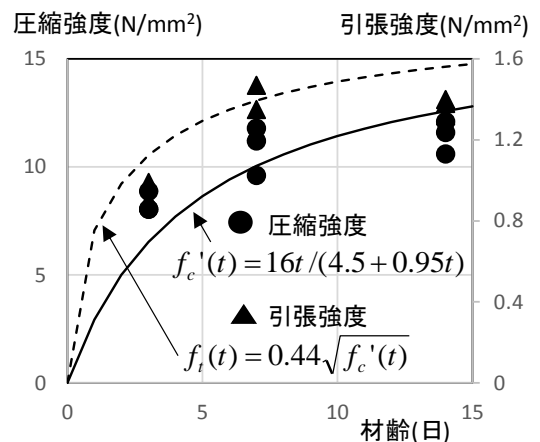


図-4 強度試験結果

の圧縮強度は11N/mm²程度，引張強度は1.3N/mm²程度となっている。

3.3 試験結果と本解析手法との比較検証

3.1および3.2節で述べた拘束試験および自由収縮試験結果に対する解析を実施した。拘束ひび割れ試験の解析メッシュを図-5に示す。対称性から1/8部分のみ解析対象としている。コンクリート部分については，コンクリート弾性領域とコンクリートひび割れ発生領域の2つに要素タイプを区別した。コンクリート弾性領域を表す要素は逐次弾性体とし，コンクリートひび割れ発生領域に，前述の構成則モデルを適用した。自由収縮試験に対しては，ひずみ自由収縮ひずみ分布は，理論上周方向で一様であるため，平面軸対称メッシュとした。双方の解析において，湿気移動解析パラメータについては，森本らの研究²⁾を基に決定し，強度特性値については，図-4中に

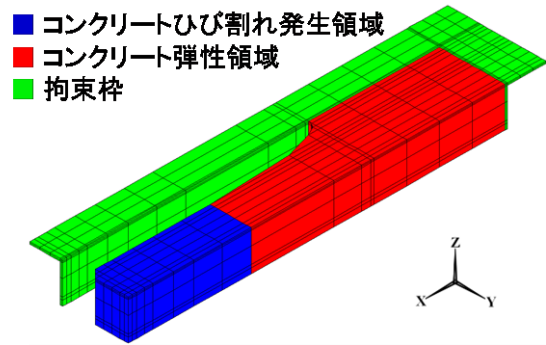


図-5 拘束ひび割れ試験解析メッシュ

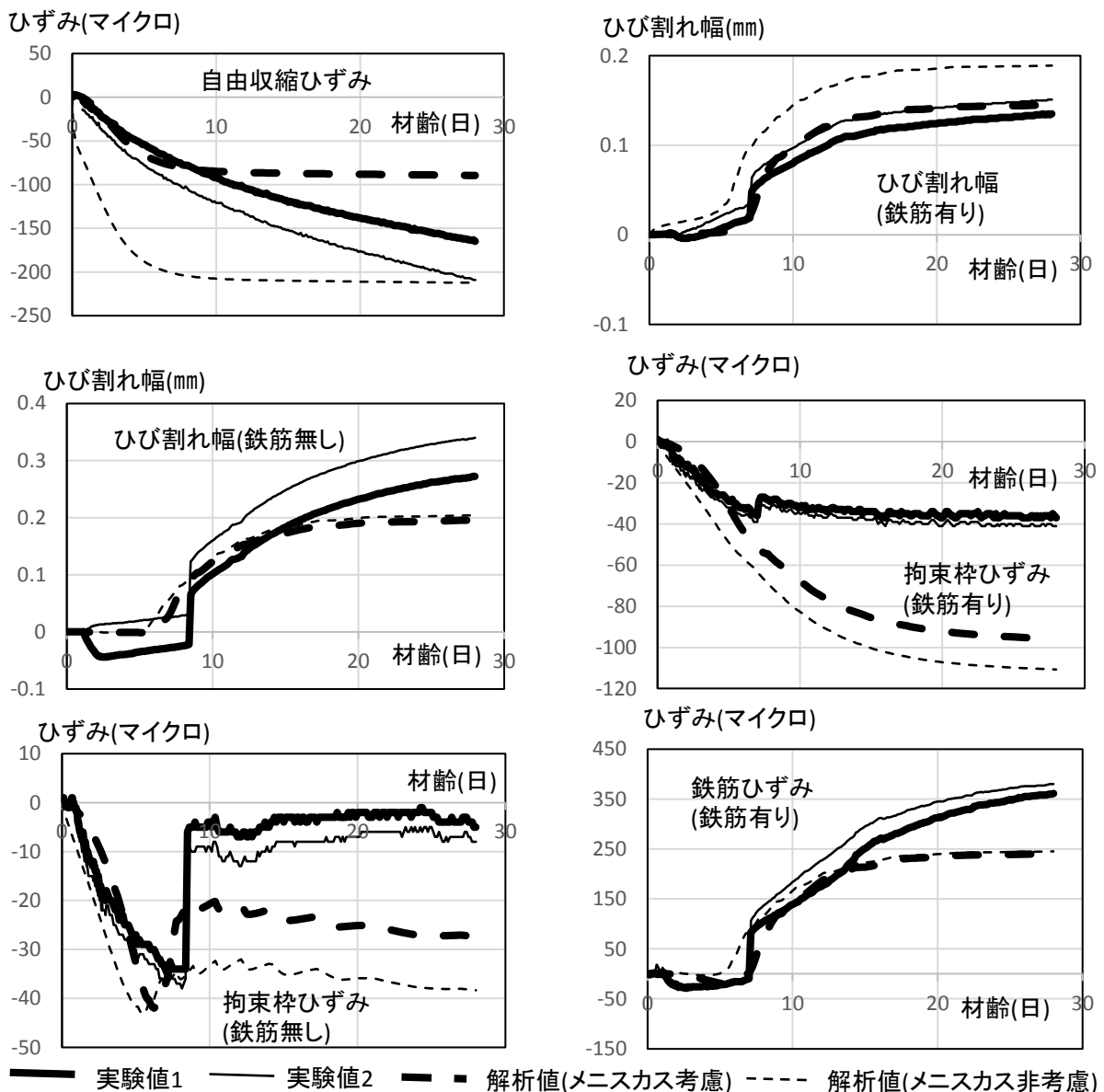


図-6 実験値と解析値の比較

記載されている強度補間式を使用した。解析に使用した最大収縮量はJCITC-911に掲載されているものを使用した。メニスカスを構成する水柱の割合を表す係数 $\alpha(t)$ をどのように与えるかについては本来十分な検討を行う必要があるが、本研究ではとりあえず一番基本的な形として、 $\alpha(t)$ を圧縮強度比の関数として次式で与えた。

$$\alpha(t) = f_c'(t) / f_{c7}' \quad (2)$$

ただし、 $f_c'(t)$ は材齢 t での圧縮強度、 f_{c7}' は材齢7日での圧縮強度である。材齢7日以降においては、 $\alpha(t)$ は1とした。

自由収縮ひずみ試験および拘束ひび割れ試験に対する解析値と実測値を比較したものを図-6に示す。図にはメニスカスを考慮しない場合すなわち $\alpha(t)$ を常に1とした場合の解析値も重ねて示している。なお、PI型変位計取り付け位置に対応する節点における長手方向変位を2倍した値をひび割れ幅の解析値とみなし、ひび割れが発生した要素において鉄筋に最も近いガウス点の鉄筋ひずみを鉄筋ひずみの解析値とみなした。ひび割れ幅、拘束枠ひずみ、鉄筋ひずみいずれにおいても、材齢10日以前では、メニスカスを考慮した解析解の方が、より実測値を良く捉えていることがわかる。一方、材齢10日以降は、自由収縮ひずみも含めて、実測値と解析値はあまり合っていない。自由乾燥収縮ひずみは内部相対湿度履歴に大きく依存する。今回の実験では、相対湿度履歴の測定を行っておらず、解析に使用した湿度履歴の精度が十分であるとは言えない。このことから、実際の相対湿度履歴と解析に用いた相対湿度履歴が異なっていたことが、実測値と解析値が合わなかった大きな原因と考えられる。加えて、 $\alpha(t)$ の関数形について十分検討していないことも原因として考えられる。

4. まとめ

本研究では、乾燥開始材齢を早めた拘束ひび割れ試験を実施し、ひび割れ幅、拘束体ひずみなどの実測結果と著者らが以前提案したメニスカスを表現する水柱の材齢による変化を考慮した解析手法による解との比較検討を行った。その結果、本研究の範囲では、メニスカスの影響を乾燥収縮ひずみ成分に反映させることにより、材齢が10日程度までは、乾燥収縮ひび割れ挙動を良く捉えることが確認された。一方で、材齢が概ね10日以上乾燥収縮挙動については、メニスカスの影響のみならず、自由乾燥収縮ひずみ成分を算定する基になる内部相対湿度履歴を精度よく評価することが肝要であることが示唆された。この点については、今後検討していきたいと考えている。

謝辞

本研究は、名城大学自然災害リスク軽減研究センター(代表者：小高猛司)とJSPS科研費25420467の助成を受けて実施したものである。また、本研究を遂行するにあたり、LECOM研究会の委員の方々から貴重なご意見を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 岡田崇宏, 石川靖晃: 材齢極初期におけるコンクリートの乾燥収縮挙動の解析, 第22回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp65-70, 2013
- 2) 籠橋忍, 秦泳, 小澤満津雄, 森本博昭: 温度との連成を考慮したコンクリートの湿気移動解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp685-690, 2001
- 3) 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, 2012
- 4) Ishikawa, Y., Kunieda, M., Srisoros, W. and Tanabe, T. : Modeling of uniaxial constitutive law in early age concrete based on solidification concept, International conference on creep, shrinkage and durability of concrete and concrete structures, pp.393-398, Sep, 2005