

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

名城大学大学院 ○岡田 崇宏
名城大学 正会員 博(工) 石川 靖晃

Abstract : In this study, procedure to introduce the change of meniscus due to age to the conventional drying shrinkage analysis method is presented, in which Lattice equilibrium continuum model (LECOM) and Solidification Concept is employed. Then, comparing with the analytical results and the experimental shrinkage cracking tests reported by OH-OKA, validity of the proposed procedure is discussed. Consequently, it is implied that cracking due to drying shrinkage at an early ages may be substantially controlled if the proposed procedure is used in the stress analysis.

Key words : Drying shrinkage, Meniscus, Strength intensity, LECOM, Solidification concept

1. はじめに

プレストレストコンクリート(PC)は、引張応力を制御しひび割れを許容せず耐久性に優れていることは論を待たない。一方、近年では、PC 構造物の一部に乾燥収縮を原因とするひび割れが発生する事例も報告されている¹⁾。

コンクリートの乾燥収縮解析手法は大きく分けて二つある。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樣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一方で、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。もうひとつの方法は、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決定し、その情報を基に乾燥収縮ひずみを求める方法がある。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。しかしながら、材齢極初期からひび割れが生じる解析解をとる傾向となった²⁾。材齢極初期における乾燥収縮挙動の解析の研究はこれまで十分に行われてはならず、従来の拡散方程式を解くことに基づいた乾燥収縮解析手法で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していたことが原因であると考えられる。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。

本研究では、メニスカスの材齢による変化を、従来の拡散理論に基づいた乾燥収縮解析手法に導入することを試みた。なお、ひび割れ解析には格子等価連続体モデル(LECOM)と Solidification Concept を融合した構成則モデルを採用した。そして、大岡ら³⁾によって行われた乾燥収縮ひび割れ試験結果を基に、実測値との比較検討を行うことで、材齢極初期の乾燥収縮によるひび割れ発生挙動が制御可能かどうか検討を行った。

2. 解析手法概要

2. 1 メニスカスの時間変化を考慮した乾燥収縮解析手法

既往の研究⁴⁾では乾燥すなわち水分移動に伴う応力の発生は、空隙間水のメニスカス形成で負の圧力が空隙水中に生じる結果であるとされている。比表面積が増大することはメニスカスを発生させる場所が増え、小さなメニスカス半径の水柱がより多く生じることを意味している。比表面積変化は水和変化そのものであるから水柱の変化と強度変化は概ね比例関係であると考えられる。すなわち、メニスカスを構成する水柱の

数を完全硬化状態で1.0と仮定した場合、若材齢時では強度に応じて1.0より小さいと考えることができる。この考え方により乾燥収縮ひずみは次式で示すことができる。

$$\varepsilon_{sh}(t) = \alpha \varepsilon_{sh,\infty} \tag{1}$$

ここで、 $\varepsilon_{sh}(t)$ は時間 t における乾燥収縮ひずみ、 $\varepsilon_{sh,\infty}$ は硬化コンクリートの乾燥収縮ひずみ、 α はメニスカスを構成する水柱の割合を表す係数であり、圧縮強度比の関数である。 $t \rightarrow \infty$ の時 $\alpha \rightarrow 1$ となる制約がある。また、増分系の表現では次式のようになる。

$$\Delta \varepsilon_{sh}(t) = \Delta \alpha \cdot \varepsilon_{sh,\infty} + \alpha \Delta \varepsilon_{sh,\infty} \tag{2}$$

2.2 格子等価連続体モデル(LECOM)とSolidification Conceptを融合した構成則モデル⁵⁾

材齢極初期において、ひび割れ解析を実施する場合、材齢による剛性の硬化現象と、ひずみ軟化現象を同時に反映できる構成則モデルが必要となる。本研究では、伊藤らによって構築された格子等価連続体モデル(LECOM)とSolidification Conceptを融合した構成則モデルをひび割れ解析に導入した。格子等価連続体モデルの基本的な概念は、ひび割れに着目して、ひび割れ面方向にコンクリートを表現するMain Latticeおよびせん断伝達を表現するShear Latticeを考えることにある。鉄筋そのものは方向性を持っているため、鉄筋方向に鉄筋を表す格子が配置される格子等価連続体モデルは、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⁶⁾。

Solidification Conceptとは、石川ら⁷⁾によって提案された、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。この概念は、図-1に示すように、若材齢時コンクリートは硬化体からなる柱の集合体で形成され、材齢の経過とともに、硬化体が増えていくとした考え方である。全ての硬化体柱に生じるひずみ増分が等しいというKinematicな制約条件を仮定した場合、コンクリート全体に生じる応力増分 $d\sigma_g$ とひずみ増分 $d\varepsilon$ との関係は次式で表現される。

$$d\sigma_g = D(t)d\varepsilon \tag{3}$$

$$D(t) = \int_0^t \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} dv(t) \tag{4}$$

ここに、 $v(t)$ は硬化体の体積であり、 $\partial \sigma / \partial \varepsilon$ は、硬化体の応力ひずみ勾配である。

2.3 クラック相当ひずみ

前述の等価連続体モデルでは、分布ひび割れモデルにより、ひび割れ発生を考慮している。分散ひび割れの概念ではコンクリートおよび鉄筋の全ひずみ ε は同一であるが、コンクリート領域および鉄筋領域ではそれぞれ次式のように表される。

$$\varepsilon_C = \varepsilon_C^e + \varepsilon_C^{cr} + \varepsilon_C^{ve} + \varepsilon_C^0 \tag{5}$$

$$\varepsilon_S = \varepsilon_S^e + \varepsilon_S^p + \varepsilon_S^{ve} + \varepsilon_S^0 \tag{6}$$

ここで、下付き添字”C”および”S”はそれぞれコンクリートおよび鉄筋を表している。上付き添字”e”,”ve”はそれぞれ弾性、クリープを表し、”p”あるいは”cr”は弾性およびクリープひずみ以外の応力依存性成分を表している。 ε_C^{cr} はクラック相当ひずみであり、1m長さあたりの「ひび割れ幅濃度」に相当するひずみとなる。例えば、クラック相当ひずみが100マイクロであった場合には、1mあたり0.1mmのひび割れ幅濃度となる。

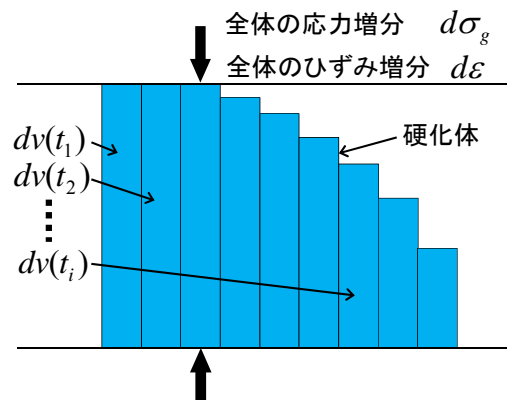


図-1 Solidification Conceptによる遷移材齢時コンクリートのモデル化

3. 乾燥収縮ひび割れ試験との比較検討

3.1 大岡らによる乾燥収縮ひび割れ試験

大岡らによって行われた実験試験体の形状寸法を図-2に示す。中央部両面には深さ 10mm の切欠部を設け、断面中心に D10 鉄筋が 1 本埋め込んである。これは JIS 原案⁸⁾に示されている供試体で、この試験方法においては、ひび割れの発生材齢を約 28 日に設定している。拘束率は約 40% となり、拘束鋼材の全断面積は、コンクリート断面積 100cm² に対して 6cm² 程度になっている。大岡らの実験は板状のコンクリートの供試体周辺に、剛な型枠に取り付けた多数のボルトとの付着力を型枠に伝達して、収縮ひび割れを発生させる方法である。試験体の打設、および乾燥試験は、すべて外気温 20℃ 一定、相対湿度 60% 一定の恒温恒湿内で行われ、乾燥開始材齢までは、湿布・シートがけ養生をしている。材齢 7 日目で脱枠し、乾燥を開始した。実験に用いた D10 鉄筋の引張試験結果を表-1 に示す。使用されたコンクリートの配合を表-2 に示す。大岡らは W/C の違いで 3 ケース配合を設定しているが、自己収縮を考慮していない本研究との比較のため、自己収縮ひずみが 3 ケースの中で最も少なかった W/C 60% の配合のみを示す。次に大岡らの実験より得られた鉄筋ひずみと拘束鋼材のひずみの経時変化を図-3 に示す。材齢 19 日辺りで切欠き部にひび割れが生じている挙動を示している。

3.2 実測値と本解析手法との比較検討

2章で述べた手法に基づき温度と湿気移動を考慮した応力解析を実施した。図-4に解析対象モデルの外観を示す。解析対象モデルは大岡らの実験供試体のものを参考に作成し、板状のコンクリートの供試体の周辺に拘束鋼材を設置した 1/4 対称モデルである。変位拘束条件と熱伝達境界、および形状寸法は凡例に示すとおりである。解析に用いた物性値は土木学会コンクリート標準示方書を基に決定した。解析に用いた各材料の特性を表-3、表-4に示す。まず、温度解析を行い、次に計算された温度履歴を用い

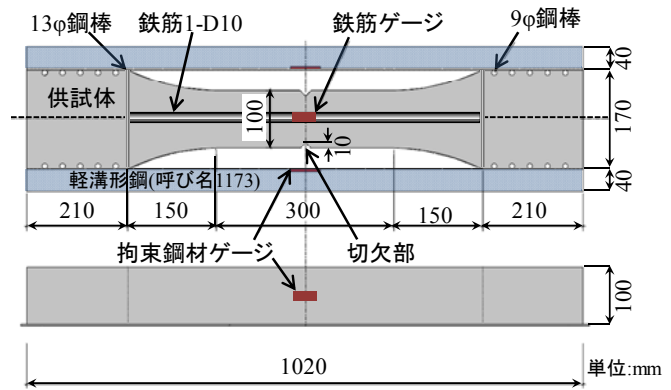


図-2 乾燥収縮ひび割れ試験体形状寸法

表-1 鉄筋引張試験結果 (D10)

降伏点	365N/mm ²
引張強さ	400N/mm ²
伸び	22.5%
ヤング係数	193kN/mm ²

表-2 コンクリートの示方配合

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

図-3 鉄筋・拘束鋼材ひずみ経時変化

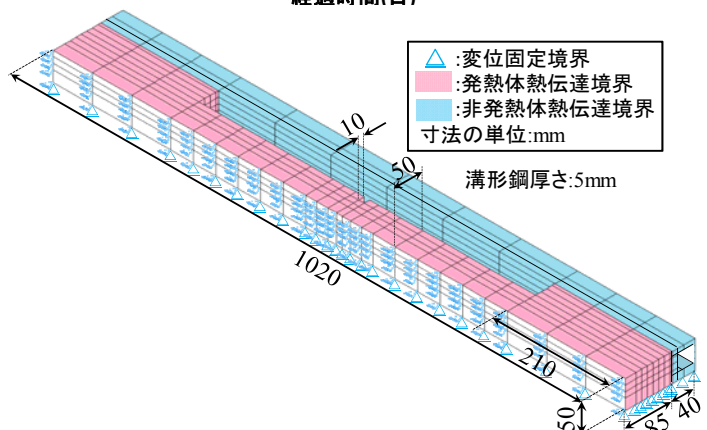
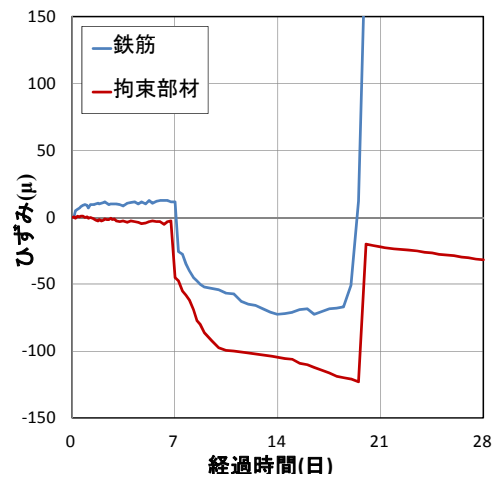


図-4 解析対象モデル

て湿気移動解析を行った。実測と比較を行うにあたり、恒温恒湿内での乾燥を想定し、周囲外気温は20℃一定で、周囲相対湿度は60%一定とした。なお、物性値は実測と自己収縮を考慮していない本研究の比較のため、大岡らの実測の3ケースの中で自己収縮ひずみが最も少なかった W/C 60% の供試体を基に物性値を入力してある。図-5に相対湿度経時変化を示す。出力対象接点は図中の凡例に対応している。材齢 28 日目での相対湿度分布を図-6に示す。供試体温度は材齢 3 日程度で外気温 20℃に収束し、供試体中心部の経験最大温度は 24℃を示した。湿度に関しては供試体の厚さが 100mm と薄いため供試体中心部においても徐々に周囲相対湿度 60%に近づく傾向となり乾燥が進行している。

続いて応力解析を行った。なお、式(1)、式(2)における α は次式で仮定した。

$$\alpha = \left(\frac{f'_c}{f'_{c91}} \right)^n \quad (7)$$

ここで f'_c は圧縮強度、 f'_{c91} は材齢 91 日における圧縮強度、 n は定数である。 n の値を 0.0, 1.0, 3.0 と変えた計 3 ケースを設定した。なお、 $n=0.0$ は圧縮強度比を考慮していないこと、すなわち、従来の乾燥収縮解析手法であることを意味している。なお、本手法では材齢極初期におけるコンクリートの乾燥収縮挙動を検証するため湿布・シートがけ養生は考慮せず、自己収縮は簡単のため考慮していない。乾燥収縮ひずみ成分と相対湿度の関係は JCI-TC911 推定式の最終収縮量を基に決定した。

図-7に各ケースの材齢 7, 14, 21 日目における供試体中央部のクラック相当ひずみ分布を示す。全てのケースにおいて、切欠部にクラック相当ひずみが発生しており、実測と対応している。また、 n の値が大きいほどひび割れ発生材齢は遅くなる傾向にあり、解析解は実験結果の傾向により近づくことが確認された。圧縮強度の変化を乾燥収縮挙動に反映させることにより、解析上生じていた材齢ごく初期における乾燥収縮ひび割れを制御可

表-3 材料特性(コンクリート)

材料特性	値もしくは式
熱伝導率	2.7 W/m°C
比熱	1.1kJ/kg°C
密度	2350kg/m ³
圧縮強度 $f'_c(t)$	$f'_c(t) = 34\text{N/mm}^2$
設計基準強度	30N/mm ²
引張強度 $f_t(t)$	$f_t(t) = 0.44f'_c(t)^{0.5}$
ヤング係数 $E(t)$	$E(t) = 4700f'_c(t)^{0.5}\text{N/mm}^2$
ポアソン比	0.2
線膨張係数	$10 \times 10^{-6}(1/^\circ\text{C})$

表-4 材料特性(拘束鋼材)

熱伝導率	51.6 W/m°C
比熱	0.473kJ/kg°C
密度	786000kg/m ³
圧縮強度	235N/mm ²
引張強度	400N/mm ²
ヤング係数	$0.31 \times 10^6\text{N/mm}^2$
ポアソン比	0.3

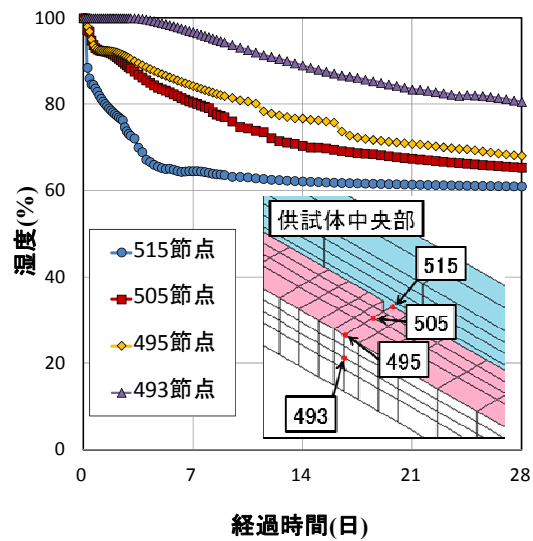


図-5 相対湿度経時変化

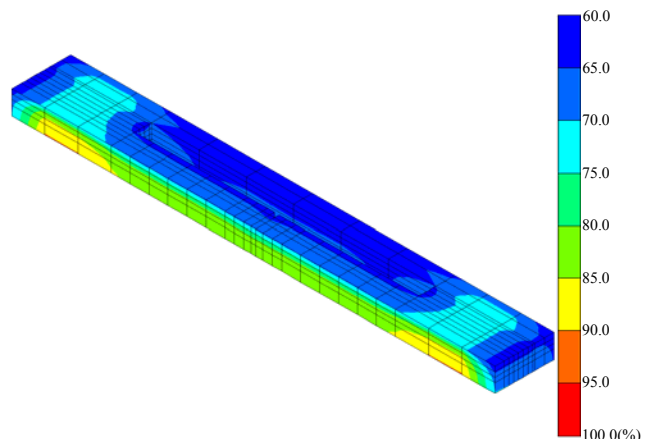


図-6 相対湿度分布(材齢 28 日目)

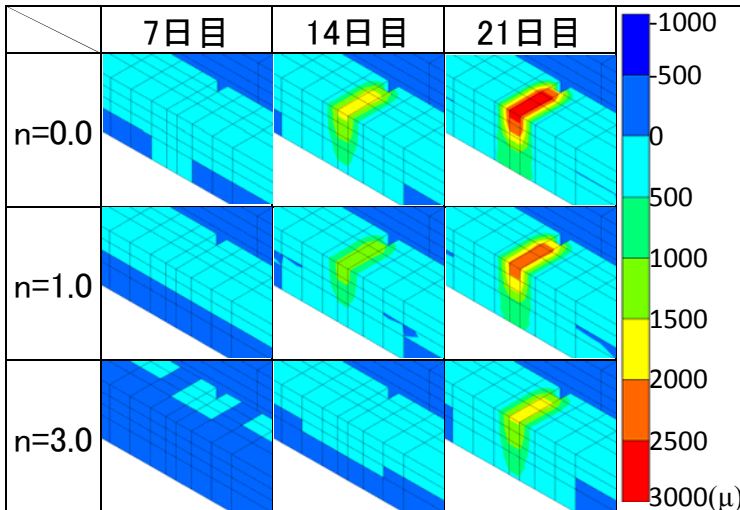


図-7 クラック相当ひずみ分布

能であることが確認された。図-8に鉄筋部でのひずみの経時変化の比較を示す。解析の出力対象要素は切欠部の中心部である。全てのケースでひび割れが発生しており n の値の違いでひび割れの発生時期にばらつきが生じている。このことから n の値が大きくなるほどひび割れの発生が遅れていることが確認できる。また、実測値ではひび割れの発生が材齢19日頃であり、 n の値が大きいくほど実測値に近づく傾向にあることが示唆された。実測値と解析値を比較すると解析値3ケースともひび割れの発生が早い挙動を示しているが、これは養生期間を設けていないことに起因しているものと思われる。図-9に拘束部材のひずみ経時変化の比較を示す。拘束部材においては解析値の傾向は実測値と類似しているが、実測値との対応は良くないことが示された。この原因として、今回の解析では、乾燥収縮のみ考慮していること、および構成則モデルに使用したパラメータの検討が不十分であることが挙げられる。

4. おわりに

本研究では、メンスカスを構成する水中の経時変化を圧縮強度の変化と捉え、それを考慮したひび割れ解析手法で実測との比較検討を行った。その結果、拡散方程式を解くことにより乾燥収縮ひずみを考慮した応力解析においては、圧縮強度比を適切に設定し、硬化時の乾燥収縮量に反映させれば、若材齢時に生じるひび割れを制御できる可能性があることが示唆された。今回の検討は十分ではないことから、材齢ごく初期からコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験を実施し、本解析手法を用いて比較検討を行いたいと考えている。

謝辞

本研究の一部は、平成24年度私立大学戦略的基盤研究形成支援事業「21世紀型自然災害のリスク軽減に関するプロジェクト」で名城大学に設置された「自然災害リスク軽減研究センター」の助成を受けて実施されたものである。また、本研究を遂行するに当たり、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。

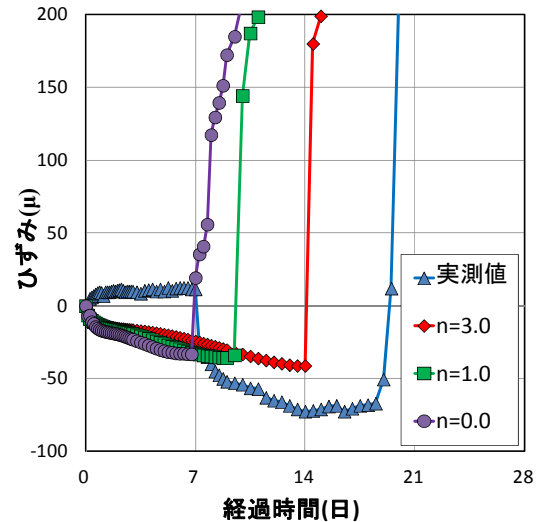


図-8 鉄筋ひずみ経時変化

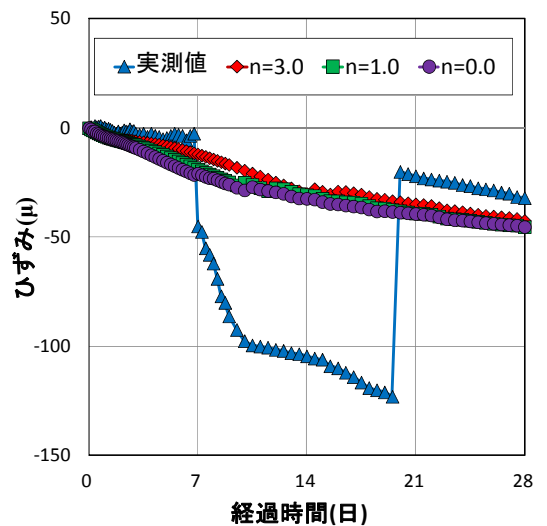


図-9 拘束鋼材ひずみ経時変化

参考文献

- 1) 第二阪和国道の橋梁損傷対策検討特別委員会 報告書, 土木学会, 2010
- 2) 小松怜史ほか:鉄筋比や体積表面積比の異なるコンクリートの収縮挙動の数値シミュレーション, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.565-570, 2013
- 3) 大岡督尚ほか:鉄筋コンクリートの収縮ひび割れ試験(その 2 乾燥収縮ひび割れ試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.635-636, 2005.9
- 4) Bazant,Z.P. and Wittman, F.H.: Creep and Shrinkage in Concrete Structures , John Wiley & Sons, 1982.
- 5) 伊藤睦ほか: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
- 6) 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
- 7) 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.
- 8) JIS 原案:コンクリートの乾燥収縮ひびわれ試験方法(案), コンクリート工学, Vol.23, No.3, pp.50-51, 1985.5