

コンクリートの乾燥収縮挙動に関する簡易モデルの提案

Proposal of simple model for drying shrinkage behavior of concrete

吉田 秀典¹⁾, 松本 康寿²⁾

Hidenori YOSHIDA and Yasuaki MATSUMOTO

- 1) 香川大学工学部 (〒761-0396 高松市林町 2217-20, E-mail:yoshida@eng.kagawa-u.ac.jp)
2) 香川大学工学部 (〒761-0396 高松市林町 2217-20, E-mail: s04t053@stmail.eng.kagawa-u.ac.jp)

The drying shrinkage behavior of a concrete is quite important issue to discuss the health of concrete structures since the behavior has much effect on the deformation and cracking of the concrete structures. A lot of researches have studied about the behavior, and have analogized its mechanism or suggested the numerical model to reproduce the behavior. However, there is rare model which considers the merits of the past studies to expect the behavior of concrete structures. Thus, in this study, the simple model which is constructed by taking the merits into account is proposed, and is implemented into a three dimension finite element code. Furthermore, finite element analyses are carried out to reproduce a drying shrinkage behavior of a concrete. Numerical results have good agreements with experimental data. Consequently, the proposed model has a validity to expect the drying shrinkage behavior of concrete structures.

Key Words: Concrete, Drying Shrinkage, Water Diffusion, Finite Element Analysis

1. はじめに

トンネルの施工においては、「トンネルじん肺訴訟」などに代表されるように、換気が不十分である場合、現場作業員の健康に甚大な被害を及ぼす。そこで近年では、徹底した坑内換気が実施されるようになり、こうした被害も沈静化してきている。一方、山岳トンネルや地下発電所の掘削では、主として、ロックボルトと吹付けコンクリートを組み合わせた NATM 工法 (New Austrian Tunneling Method) により施工が進められる。吹付けコンクリートあるいは覆工コンクリートについては、十分な湿潤養生期間が確保されぬまま、換気などによって外気が坑内に流れ込むと、急速な乾燥が進行する。コンクリート構造物の拘束条件によっては、こうした乾燥にともなう収縮により大小様々な微細なひび割れが発生し、最悪の場合、ひび割れが進展し、その結果、大規模な剥離などが生ずる可能性もある。

一般に、普通コンクリートの収縮には、水和収縮、乾燥収縮、そして自己収縮というものがある。このうち、水和収縮は水和によって可塑的なコンクリートが固相へと変化する際に生じる体積変化のことであり、主に若齢期にみられる現象である。また、自己収縮は水和収縮が引き金になって生じる現象であるが、そのメカニズムは後述する乾燥収縮のメカニ

ズムと基本的には同じであり、また、収縮のオーダーは、他の2つより1桁程度小さい。したがって、固化後の普通コンクリートの収縮においては、乾燥収縮がメインとなる⁽¹⁾。

乾燥収縮とは、乾燥によってコンクリート中の水分が逸散・移動し、それにともなって水分量の変化する現象である。コンクリートの乾燥収縮に最も影響を及ぼすのは含水状態である。単位水量が同じであれば、単位セメント量や水セメント比が乾燥収縮に及ぼす影響は比較的小さい。また、乾燥収縮は水分の逸散と大きく関係することから、周辺環境の湿度の影響も強く受ける。湿度が低い場合、乾燥収縮速度は速く、また、周辺環境の温度が高い場合も水分逸散速度が速くなるため、いずれの場合も大きな乾燥収縮を示すこととなる。さらに、構造物・部材レベルでは、水分の逸散速度が部材寸法や形状によって大きく異なるため、乾燥収縮速度はこれらの影響を強く受ける。一般に、供試体の表面積が大きいほど乾燥収縮は大きい⁽²⁾⁽³⁾。乾燥収縮ひずみは引張破断時のひずみとオーダー的には同程度以上に達するため、構造物が内的、外的に拘束された場合、ひび割れ発生の原因となる。ひび割れの発生は構造物の機能性、耐久性に大きな影響を及ぼすため、構造物を維持、管理する上では、精度の高い乾燥収縮の予測技術が求められている。

上述の通り、乾燥収縮はコンクリート中の水分の逸散・移動が契機となって生じる現象であることから、水分の逸散・移

動を中心とした研究が多々なされている．例えば，Picket⁽⁴⁾による線形拡散型モデル，およびそれを発展させた Bazantら⁽⁵⁾による非線形拡散型モデルが挙げられる．また，近年では，下村ら^{(6)~(8)}による微視的機構に基づいた水分移動モデルなどが挙げられ，この研究では，コンクリート中の水分移動を直接表現したことにより，水分の平衡過程における非可逆性の表現など利点も多く，将来性も高い．こうした研究事例では，理論的な類推によって拡散係数が定義づけられているが，これに対し，阪田ら⁽⁹⁾は実験より拡散係数を回帰式によって定めている．秋田ら⁽¹⁰⁾についても，コンクリート中の相対含水率と相対湿度の平衡関係を，実験を通して回帰式によって定めている．

このように，乾燥収縮に関する研究事例の多くは，簡易な力学モデルの構築，毛細管現象などに代表されるような微視的構造レベルに基づくメカニズムの解明，そして経験的に物理性能を定めるといようなものであるが，これらの知見を上手く統合し，実際の構造物に適用して，それらの妥当性を検証するというような事例はまだ多くない．そこで本研究では，こうした既往の研究より得られた知見を統合して新たなモデルを構築する．さらに，水 - 応力の連成有限要素解析を実施し，乾燥収縮ひずみ挙動の再現を試み，提案モデルの妥当性を検証する．

2. 解析モデル

本研究では，文献^{(7),(8)}に倣い，コンクリート中に存在する物質について，以下に示すような仮定を設ける．

1. コンクリート中に存在する物質の相は気体相と液体相である．
2. 気体相は水蒸気と乾燥空気より構成される理想混合気体である．
3. 液体相は液状水のみからなり，液状水は粘性と表面張力を有する非圧縮流体である．

上記の仮定は，水分の挙動（主として移動と拡散）の取り扱いとしては，極めて簡素化を図ったものであるが，分子レベルの挙動をより厳密に記述するためには，固体物理学など別の学問体系を必要とする．しかしながら，そうした学問体系の導入は，コンクリートの挙動の解析というような工学レベルの解析においては複雑すぎることから，本研究では上記のような仮定の下，水分の挙動の定式化を行う．

2.1. 支配方程式

コンクリート中の水蒸気の質量保存則は，それぞれ次のように表すことができる．

$$\frac{\partial w_V}{\partial t} = -\nabla J_V + v \quad (1)$$

$$\frac{\partial w_L}{\partial t} = -\nabla J_L - v \quad (2)$$

ここで， t は時間， w_V は単位体積中の水蒸気の質量， w_L は単位体積中の液状水の質量， J_V は水蒸気の質量流束， J_L は液状水の質量流束，そして v は相変化速度を表す．

一般に，コンクリートの内部を気体が対流により移動することは考え難く，気体相である水蒸気は，狭い経路において移動の制約を受ける．そこで，水蒸気の移動則は

$$J_V = -K_V V_G D_{VO} \nabla \rho_V \quad (3)$$

にて表される^{(7),(8)}．ここで， K_V は水蒸気の移動に関する係数， V_G は単位体積中における気相の体積， D_{VO} は水蒸気と乾燥空気の相互拡散係数，そして ρ_V は水蒸気の密度を表す．

細孔組織中において，コンクリートの単位体積中の気相の体積 (V_G) および液状水の体積 (V_L) には，以下のような関係が成り立つ．

$$V_0 = V_G + V_L \quad (4)$$

ここで， V_0 は単位体積中の総細孔容積である．

単位体積中の水蒸気の質量 w_V と液状水の質量 w_L はそれぞれ，以下の様な関係を有する．

$$w_V = \rho_V V_G \quad (5)$$

$$w_L = \rho_L V_L \quad (6)$$

気体相は水蒸気と乾燥空気との理想混合気体と仮定すると，水蒸気の分圧 p_V と密度には，以下のような関係がある．

$$p_V = \rho_V \frac{RT}{M_W} \quad (7)$$

ここで， R は気体の状態定数， T は絶対温度， M_W は水の分子量を表す．

水蒸気と液状水の質量保存則（式 (1) と式 (2)）の和をとり，さらに，単位体積中における水蒸気の質量が液状水のそれと比較して常に微小であり，その変化を無視できるものとする，水分の質量保存則が以下のように導かれる．

$$\frac{\partial w_L}{\partial t} = -\nabla (J_V + J_L) \quad (8)$$

また，式 (3)，式 (4)，式 (5) および式 (6) より，

$$J_V = -D_V \nabla w_L \quad (9)$$

が得られる．ここで， D_V は水蒸気の拡散係数である．下村ら^{(7),(8)}は，同様の手法にて，液状水の移動則を

$$J_L = -D_L \nabla w_L \quad (10)$$

と定義している．ここで， D_L は液状水の拡散係数である．詳しくは文献^{(7),(8)}を参照されたい．

式 (9) と式 (10) を式 (8) に代入すると，

$$\frac{\partial w_L}{\partial t} = \nabla (D \nabla w_L) \quad (11)$$

を得る．ここで， D は水分拡散係数と称され，次式にて定義される．

$$D = D_V + D_L \quad (12)$$

これによって，水分の移動に関する支配方程式である式 (11) を用いることで，水蒸気と液状水を区別することなく，コン

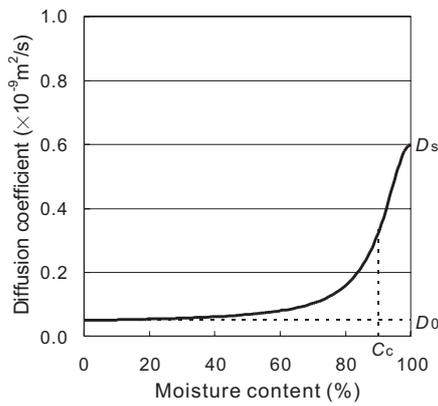


Fig. 1 Moisture content v.s. diffusion coefficient

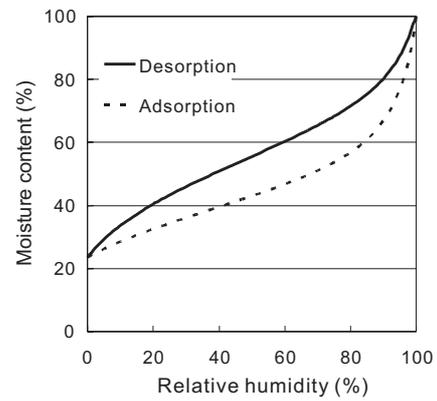


Fig. 2 Relative humidity v.s. moisture content

クリート中における水分移動の解析が可能となる。なお、本研究では、コンクリート中における水分は等方的に拡散するものと仮定する。

2.2. 拡散係数

本研究では、コンクリート材料の乾燥収縮を対象としていることから、式 (11) における拡散係数としては、コンクリート中における水分の拡散係数を与える。阪田ら⁽⁹⁾は、Boltzman 変換を応用して、大きさの異なるコンクリート供試体の乾燥試験の結果から、相対含水率と拡散係数の関係を以下の近似式 (Fig.1 参照) で表している。

$$D(C) = D_0 + \frac{D_s - D_0}{1 + ((100 - C)/(100 - C_c))^n} + \frac{D_s - D_0}{1 + (100/(100 - C_c))^n} \frac{C - 100}{100} \quad (13)$$

ここで、 D_s は飽和状態での拡散係数、 D_0 は絶乾状態での拡散係数、 C は相対含水率、 C_c は変曲点での相対含水率、 n は定数である。 n については、コンクリートの場合、0.50 ~ 2.00 の範囲であるとされており、一般に、水セメント比が大きいほど n は小さく、また、若齢期においても n は小さな値をとるという傾向が認められるが、それほど顕著なものではない。Fig.1 は $n = 2.00$ とした時の相対含水率と拡散係数の関係である。阪田らにより実験的に導出されたこの相対含水率と拡散係数の関係は、相対含水率が高い範囲においては拡散係数が急激な勾配を描き、相対含水率が 70 ~ 80 % 程度以下ではほぼ一定値になる傾向を呈している。この傾向は Bazant ら⁽⁵⁾ が提案したモデルとほぼ同じであったものの、実測によって得た意義は大きい。こうした Boltzman 変換を用いて実験的に相対含水率と拡散係数の関係を導出する研究は、その後秋田ら⁽¹⁰⁾ によっても試みられているが、相対含水率と拡散係数の関係は、阪田らと同様の結果が得られている。したがって、多くの研究者の検討より、相対含水率と拡散係数の関係は式 (13) にて表現が可能であることから、本研究でもこの関係式を採用する。

しかしながら、この拡散係数の値はコンクリート中の相対含水率との関係から導出されたものであることから、周囲の環境湿度を境界条件とする解析などでは式 (13) を直接用い

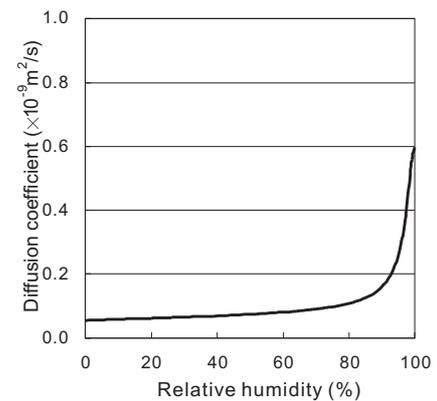


Fig. 3 Relative humidity v.s. diffusion coefficient

ることはできず、コンクリート中の相対含水率と湿度との平衡関係が必要となる。また、相対含水率と湿度の平衡関係は Fig.2 に示すように乾燥過程と吸湿過程では異なる経路をたどる。そこで、秋田ら⁽¹⁰⁾ は実験よりこの平衡関係について、乾燥過程に関しては、

$$C = 296/(109 - H) - 447(21 + H) + 0.295H + 42.1 \quad (14)$$

吸湿過程に関しては、

$$C = 359/(107 - H) - 370(32 + H) + 0.189H + 31.7 \quad (15)$$

という近似式で提案している。ここで、 H は相対湿度を表す。

式 (13) に式 (14) あるいは式 (15) を代入することで、拡散係数は相対含水率ではなく湿度に依存することになり、これによって境界条件として湿度を用いることが可能となる。本研究の比較対象とする実験は乾燥過程での実験であることから、式 (13) に式 (14) を代入した場合を考える (Fig.3 参照)。

2.3. 乾燥収縮

前章にて説明した通り、一般に、硬化コンクリートは、乾燥によってコンクリート中の水分が逸散・移動し、それともなう水分量の変化により収縮する。このメカニズムとしては、組織内部に存在する水分と組織の固体壁との間における応力のやりとりによって組織が変形するというのが一般的である (毛細管張力説)。しかしながら、コンクリート中の微

視的レベルの応力のやりとりは観察/計測が不可能であり、この説も類推の域を出ない。しかも、前述の定式化の過程で明らかのように、コンクリート中の微視的機構に基づく水分移動モデルも、直接には検証不可能な多くの仮定の上に成り立っており、加えて実験より定まるパラメータも多々含んでいる。こうした状況の下で、毛細管張力説に基づいた収縮変形モデルを用いた解析が、必ずしも高精度で現象を再現できるとは限らない。

水分(湿度)の増減によってコンクリートがどれだけ伸縮するかについては、古くより実験的に把握がなされている⁽¹¹⁾。本研究では、多くの仮定や類推を含んだ毛細管張力説は採用せずに、過去の研究事例より、水分増分(相対湿度増分) dH とコンクリートのひずみ増分 ε^h の関係を

$$d\varepsilon^h = \alpha dH \quad (16)$$

と定義する。ここで、 α は材料定数となるが、これは温度伸縮における線膨張係数と同じような物理的な意味を有する。文献⁽¹¹⁾によれば、90日後のコンクリート供試体は、相対湿度が100%の下では収縮/伸長はほとんどなく、50%の下では約750 μ の収縮ひずみが認められている。したがって、相対湿度が10%低下すると150 μ の収縮が生じることから、本研究では、 $\alpha = 1.50 \times 10^{-5} / \%$ と仮定した。無論、 α は線形的に変化するパラメータではないと思われるが、簡便性を重視し、本パラメータを定数として用いる。本研究では、このような収縮は等方的に生じると仮定し、3次元有限要素解析では、

$$d\varepsilon_{ij}^h = \alpha_{ij} dH \quad (17)$$

$$\alpha_{ij} = \alpha \delta_{ij} (\delta_{ij} \text{はクロネッカーのデルタ}) \quad (18)$$

と、式(16)を拡張して用いる。

本研究では、上述したモデルを有限要素解析コードに組み込み、3次元の有限要素解析を行う。

3. 数値解析

3.1. 実験概要

森川⁽¹²⁾は、コンクリートの湿度と周囲の環境湿度が乾燥収縮挙動に及ぼす影響の評価を行うために、温度を一定とし、湿度を段階的に低下させる手法で乾燥収縮試験を行い、さらに、乾燥収縮ひずみの予測式であるJCI式(日本コンクリート工学協会式)およびCEB式(CEB-FIP MODEL CODE 1990, Comite Euro-International du Beton式)を用いて乾燥収縮挙動について考察している。本研究では、この実験事例を参考に解析を行う。なお、この研究については、関連する文献^{(13),(14)}が発表されているので、そちらも参照されたい。

実験供試体は50 mm × 50 mm × 300 mm, 100 mm × 100 mm × 400 mm, および150 mm × 150 mm × 600 mmの3寸法の供試体を用い、長さ変化はダイヤルゲージによって、また、相対湿度はスティック型小型電気湿度計によって測定している。相対湿度測定用供試体については、湿度計を供試

体中心部に設けた小孔(ϕ 10 mm)に挿入して測定を行っている。環境条件は温度を20一定とし、初期湿度60%より段階的に湿度を低下させてコンクリート部材中の相対湿度および乾燥収縮ひずみを測定している。いずれの供試体も水セメント比(W/C)は57%であるが、乾燥開始材齢については3日および7日という2パターンがある。本研究では、乾燥開始材齢が7日の供試体について解析を行う。

実験より、周囲の環境湿度の低下がコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響は大きく無視できない、つまり、周囲の環境湿度とコンクリート中の相対湿度および乾燥収縮には大きな相関関係があると考察している。

3.2. 解析概要

解析においては、水分の拡散解析と応力解析という2つを連成的に行い、供試体の内部の湿度の状態と乾燥収縮挙動を再現することとした。供試体の寸法や境界条件などはすべて、森川⁽¹²⁾の実験と同様になるように設定した。変位については、最も小さな断面となる正方形の断面において、その一方の断面における垂直方向と、中心点のみについては水平2方向も固定した。供試体の初期湿度については、実験開始が水中養生の直後であることから、供試体全体の相対湿度を100%と仮定した。実験においては、周囲の環境湿度は60%より始まり、乾燥開始後28日目に40%へと低下させているので、解析でも同様に設定した。

文献⁽⁹⁾を参考に、式(13)における D_S を0.60、 D_0 を0.05、 C_C を90%、 n を2.00として解析に用いた。式(16)における α については、前章にて説明したとおり、文献⁽¹¹⁾を参考に $1.50 \times 10^{-5} / \%$ と定めた。その他、解析に必要な弾性係数、ポアソン比、密度などは文献に記載されていないことから、本研究では、コンクリートとして一般的な値を採用し、弾性係数を20,000 MPa、ポアソン比を0.25、密度を2,500 kg/m³と仮定して用いた。なお、本解析では、水分の拡散解析と応力解析とで同じ要素分割を用いている。

3.3. 解析結果

まず、供試体中心の湿度をFig4, Fig5およびFig6に示す。Fig4より、50 mm × 50 mm × 300 mmの供試体においては、環境湿度の変化が平衡過程にも敏感に現れている。一方、Fig5, Fig6より、サイズが大きい供試体については上述したような湿度の変曲点が表れていないことがわかる。森川⁽¹²⁾による実験結果をFig7, Fig8に示すが、これらと同寸法の解析結果であるFig4, Fig6と比較すると、定性的にも定量的にも類似しており、解析が実験をよく再現できていることがわかる。これより、前章にて示した相対湿度依存型の拡散係数モデルは妥当であると考えられる。

次に、ひずみの経時変化について、解析結果をFig9, Fig10およびFig11に、実験結果をFig12, Fig13およびFig14に示す。なお、解析結果におけるひずみは、供試体長軸方向の断面の中心における長さ変化を、初期の供試体長さで除したものであるが、文献⁽¹²⁾にはダイヤルゲージの設置箇所に関する記載がない。

一連の図より、解析では、乾燥開始時と環境湿度が60%

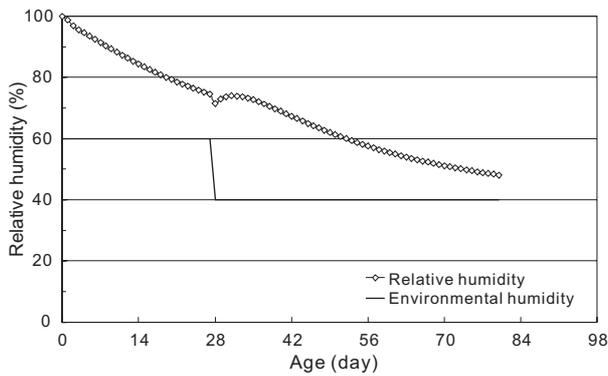


Fig. 4 Time v.s. humidity (50×50×300, analysis)

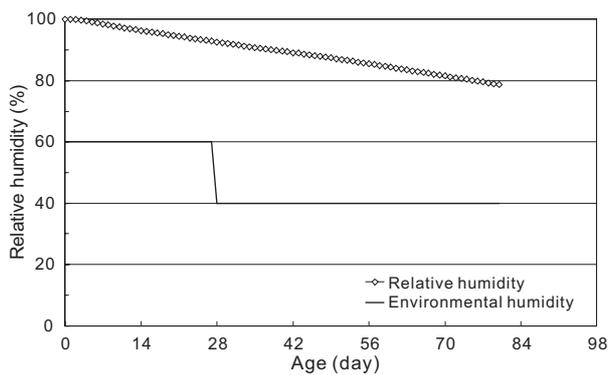


Fig. 5 Time v.s. humidity (100×100×400, analysis)

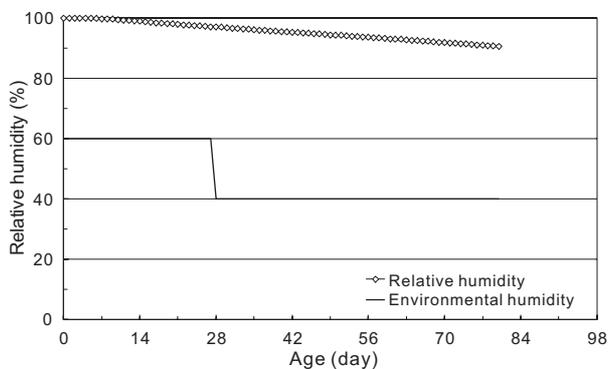


Fig. 6 Time v.s. humidity (150×150×600, analysis)

から 40 % に低下した段階においては、環境湿度の変化にともないひずみが敏感に変化している。解析では内挿する関数の関係上、やや極端になっているが、実験においては明確ではないものの、同様の変化が確認できる。文献⁽¹²⁾においては、乾燥収縮ひずみ予測式である JCI 式および CEB 式を用いて評価を行っているが、本解析の結果は、これらの予測式と同等以上の再現性を有しているものと判断できる。特に、供試体が小さい場合は、両予測式による乾燥収縮ひずみは実験結果と乖離があるが、本解析結果は、定性的にも定量的にも実験をよく再現出来ている。また、解析は寸法依存性も再現できており、本研究にて提案したモデルは妥当であると考えられる。

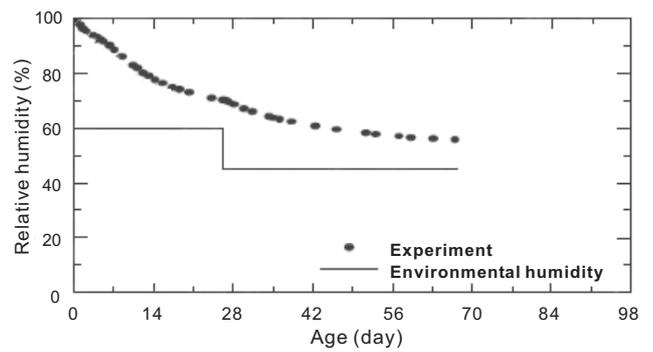


Fig. 7 Time v.s. humidity (50×50×300, experiment⁽¹²⁾)

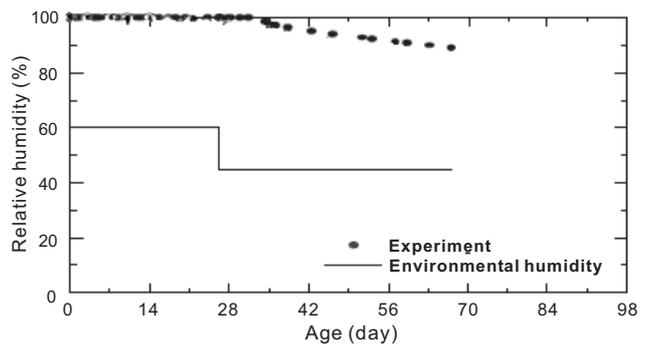


Fig. 8 Time v.s. humidity (150×150×600, experiment⁽¹²⁾)

4. まとめ

提案するモデルを組み込んだ 3 次元有限要素解析は、コンクリート供試体中の相対湿度および乾燥収縮ひずみ挙動に関して、実験を精度よく再現できること、また、JCI 式および CEB 式と比較しても高い解析精度を有していることなどから、簡易的ではあるものの提案モデルは妥当なものであり、かつ、工学的にも有用であると考えられる。しかしながら、乾燥収縮に影響を及ぼす要因の 1 つである温度の影響を考慮していないことから、今後、温度の影響も考慮に入れたモデルを構築する必要がある。また、コンクリートに関する乾燥収縮挙動については、無拘束下で収縮するという挙動を再現することも重要であるが、変形を拘束した条件下ではコンクリートにひび割れも発生する。むしろ、コンクリートについては、このひび割れ挙動を再現することが求められることが多いことから、ひび割れ発生メカニズムもモデル化し、解析に反映していくことが今後の課題である。

参考文献

- (1) 日本材料学会 編：コンクリート混和材料ハンドブック，エヌ・ティー・エス，(2004)，pp.78-90.
- (2) 小林一輔，佐藤政次：コンクリート実務便覧，オーム社，(2004)，pp. 120-124.
- (3) 大塚浩司，庄谷征美，原忠勝：コンクリート工学，朝倉書店，(1992)，pp.127-129.
- (4) Picket,G.:Shrinkage stress in Concrete, Journal of ACI, 17, No.3 (1946), pp.165-195.

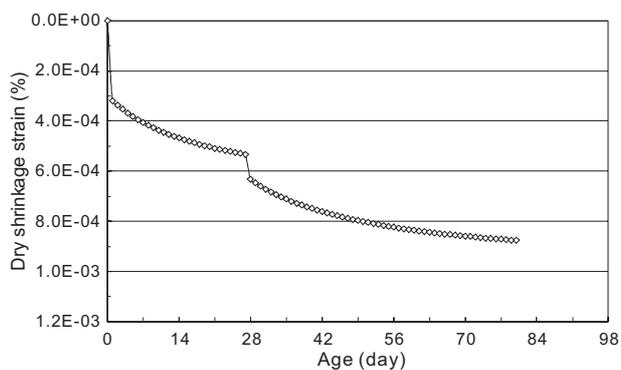


Fig. 9 Time v.s. strain (50×50×300, analysis)

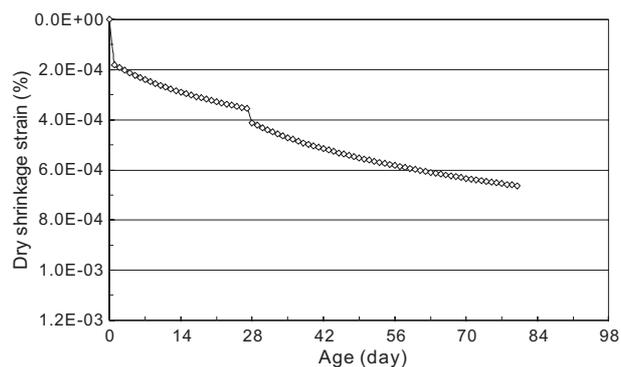


Fig. 10 Time v.s. strain (100×100×400, analysis)

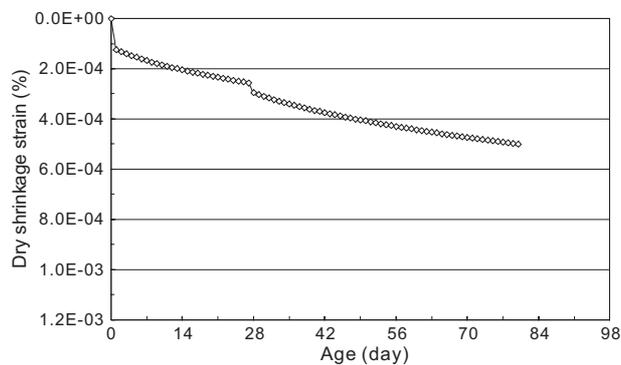


Fig. 11 Time v.s. strain (150×150×600, analysis)

- (5) Bazant, Z. P. and Najjar, L. J.: Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete, *Materials and Structures*, **5**, No.25 (1972), pp.3-20.
- (6) 下村匠, 小沢一雅: 細孔構造モデルによるコンクリート中の水分移動解析, *コンクリート工学年次論文報告集*, **14**, No.1 (1992), pp.631-636.
- (7) 下村匠, 前川宏一: 微視的機構に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル, *土木学会論文集*, **No.520/V-28**, (1995), pp.35-45.
- (8) 下村匠, 福留和人, 前川宏一: 微視的機構モデルによるコンクリートの乾燥収縮挙動の解析, *土木学会論文集*, **No.514/V-27**, (1995), pp.41-53.
- (9) 阪田憲次, 蔵本修: 乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散と乾燥収縮に関する研究, *土木学会論文報告集*,

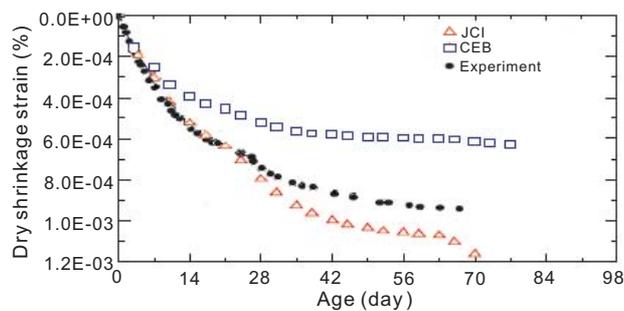


Fig. 12 Time v.s. strain (50×50×300, experiment (12))

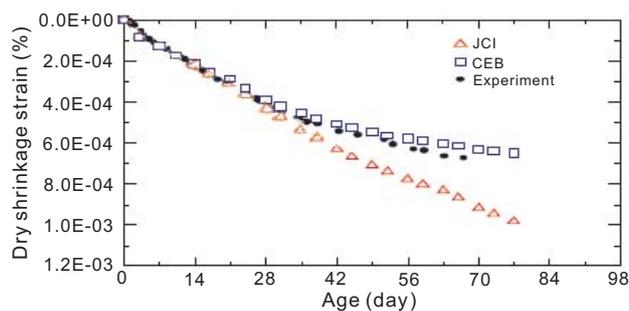


Fig. 13 Time v.s. strain (100×100×400, experiment (12))

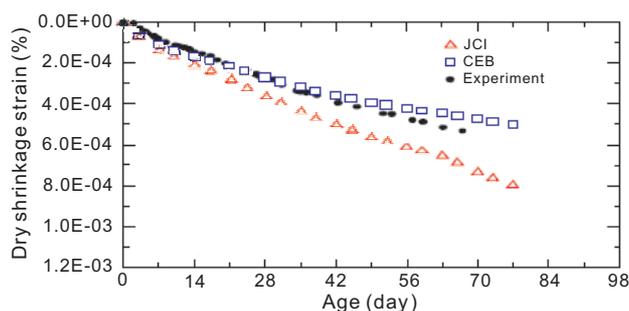


Fig. 14 Time v.s. strain (150×150×600, experiment (12))

No.316, (1981), pp.145-152.

- (10) 秋田宏, 藤原忠司, 尾坂芳夫: モルタルの乾燥・吸湿・吸水過程における水分移動, *土木学会論文集*, **No.420**, (1990), pp.61-69.
- (11) 小林一輔: *コンクリート工学*, 森北出版, (1975), pp. 81-84.
- (12) 森川友博: コンクリート部材の乾燥収縮挙動に関する研究, *岐阜大学修士論文*, (2004).
- (13) 森川友博, 川上寛正, 森本博昭: コンクリート部材の乾燥収縮ひずみの推定法に関する研究, *土木学会第59回年次学術講演会概要集*, (2004), pp. 563-564.
- (14) 中村恭香, 森川友博, 川上寛正, 小澤満津雄, 森本博昭: コンクリート部材の乾燥収縮挙動の推定に関する研究, *土木学会第60回年次学術講演会概要集*, (2005), pp. 557-558.