

論文 コンクリートの乾燥収縮と水分移動に関する基礎的研究

新井 泰*1・平野 勝識*2・津野 究*3・杜 世開*4

要旨: 本研究では、乾燥収縮の基礎的な性状を把握するためにモルタル供試体を用いた要素実験を行い、初期材齢時の硬化過程において蒸発する水分量とモルタル内部の未水和の自由水分布を計測し、水分量の経時変化を把握した。そのうえで、供試体の硬化過程における水分の移動に着目した数値解析を行い、要素実験の結果と比較することにより、数値解析手法の適用性を確認した。

キーワード: ひび割れ, 乾燥収縮, 水分移動, 数値シミュレーション

1. はじめに

都市部では、開削工法で築造された鉄道トンネルが多くあるが、これらを適切に維持管理するうえで、構築に発生しているひび割れの発生原因を推定することは重要である。荷重に起因する曲げひび割れ等の構造的なひび割れについては、実際の鉄道開削トンネルにおける現地調査によって発生傾向が把握され、数値解析結果との整合性も確認されている^{1)~2)}。

一方、乾燥収縮や温度変化などに起因する材料ひび割れについては、実際の開削トンネルにおいて施工時から供用後まで継続してライフサイクルにおけるひび割れの発生～進展プロセスの記録を残す試みがなされている。その結果、ひび割れの大部分はコンクリート打設直後の弱材齢時に発生していることや、鉄筋による収縮ひび割れに着目したひび割れ制御評価式³⁾の適用が有効であることが確認されている^{4)~5)}。この材料ひび割れをさらに深度化して評価するためには、弱材齢時の乾燥収縮の過程を定量的に把握することが有効であるが、このような手法が十分確立されていないのが現状である。

そこで、本研究では、乾燥収縮の基礎的な性状を把握するための要素実験を行い、初期材齢時の硬化過程において蒸発する水分量とモルタル内部の未水和の自由水分布を計測し、水分量の経時変化を把握した。そのうえで、供試体の硬化過程における水分の移動に着目した数値解析を行い、要素実験の結果と比較することにより、数値解析手法の適用性について検討した。

2. 乾燥収縮実験

2.1 実験概要

本実験は、RC 構造物におけるコンクリートの弱材齢時の乾燥収縮の過程を把握するため、モルタル供試体の

硬化過程で蒸発する水分量とモルタル内部の未水和の自由水分布を簡易な方法で計測することを目的に計画した。まず、モルタル供試体の硬化過程で蒸発する水分量を把握するため、高さの異なる塩ビ管(内径φ100mm)に充填したモルタルを恒温室内(室温20℃,湿度60%)でφ100mmの上面のみを乾燥状態として暴露した(図-1,写真-1)。

長期計測としてモルタルを充填した塩ビ容器全体を充填直後からロードセルに懸垂しモルタルの水分蒸発量を30秒間隔で収録した。一方、所定の材齢におけるモルタルの高さ方向の水分分布を計測するため、別途塩ビ容器に充填し暴露したモルタル柱を高さ100mm間隔で切断・破砕後、炉乾燥して重量計測を行った。本実験の供試体一覧を表-1に示す。モルタルの重量経時変化の計測用として、供試体高さ100mm,200mm,300mm,400mmの4ケースの実験を行った。また、自由水(含水量)分布の計測用としては、前述の4種類の高さ、材齢1日,3日,7日,14日,28日,56日の6材齢の計24ケースの実験を行った。なお、各ケースについて各々3本ずつの供試体を作製し実験を行っている。

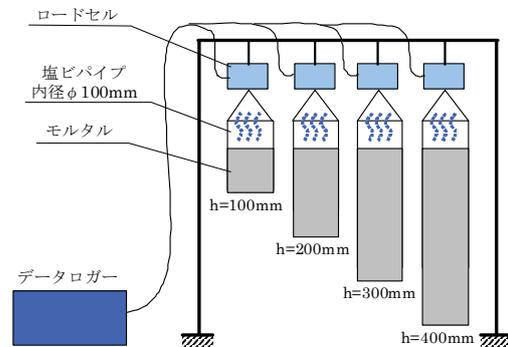


図-1 実験概要

*1 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部トンネル研究室主任研究員 工修 (正会員)

*2 (株) フジタ 技術センター 基盤技術研究部 工修 (正会員)

*3 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部トンネル研究室副主任研究員 工博

*4 TATE コンサルタンツ (株) 代表取締役社長 工博



写真-1 重量経時変化の計測

表-1 供試体一覧 (供試体個数)

供試体高さ	水分分布計測用 材齢						重量経時 変化測定用
	1日	3日	7日	14日	28日	56日	
h100mm (1d)	3	3	3	3	3	3	3
h200mm (2d)	3	3	3	3	3	3	3
h300mm (3d)	3	3	3	3	3	3	3
h400mm (4d)	3	3	3	3	3	3	3
h400mm* (4d)	1	1	1	1	1	1	---

注) ※: 封緘養生の供試体

表-2 モルタル配合表 (ノm³)

セメント ①	水 ②	細骨材 ③	混和剤 ④	全体 ⑤	水セメント比 ②/①
486kg	280kg	1321kg	5.8kg	2093kg	58%

2.2 使用材料

使用したモルタルの配合を表-2に示す。モルタルは通常のレディミクストコンクリート(24-18-20-N)を用い、練り混ぜ時に粗骨材だけを除去して適用した。配合から求められる練混ぜ直後の含水率は②/⑤=13.4%となる。理論結合水量はセメント重量の25%程度であると仮定すると、①×25%/⑤=5.8%がセメントの水和反応で消費される理論含水率となる。

2.3 自由水の測定

自由水分布の計測のため、重量の経時変化計測で使用する供試体と別に、切断破碎用に材齢毎の供試体を用意した。試験方法は、日本コンクリート工学協会のコンクリートの試験・分析マニュアル「105℃乾燥方法」⁶⁾に準拠して行った。まず、所定の材齢に達したモルタル塩ビ管を各長さ3本ずつ取り出し、高さ100mm単位でダイヤモンドカッターにより乾燥状態で切断を行った。その後、破碎機に入るサイズに割裂し5mm以下となるよう破碎した。写真-2に材齢56日の時点での割裂時の断面の状態を示す。写真は400mmのモルタル上部100mmのものであるが、乾燥供試体、封緘供試体で若干色が異なっており、56日の段階でも養生条件で含水量が異なることが視覚的にも明らかであった。破碎したモルタルは、セメントの水和反応を固定するために、直ちにアセトンで浸漬し(写真-3)、1時間以上の静置後に105℃の乾

燥炉で48時間程度乾燥を行った。供試体割裂から破碎完了までの過程では、供試体を極力ビニル袋で封緘し、作業中の乾燥を防止した。その結果、割裂～破碎で失われる重量は含水重量の1%以下であることを事前に確認している。以降に示す含水率は重量基準含水率であり、乾燥前後の供試体重量差(含水量)を乾燥前の供試体重量で乗じた値をパーセント表示したものである。

2.4 ひずみ計測

使用したモルタルのひずみ分布の経時変化を計測するため、別途用意した400mmの供試体の乾燥面から深さ50mm、150mm、250mm、350mmの位置に写真-4に示す検長60mmの埋込型ひずみ計を埋設した。



(1) 乾燥供試体

(2) 封緘供試体

写真-2 割裂直後のモルタル断面

(材齢56日、h400mmの最上部100mm)

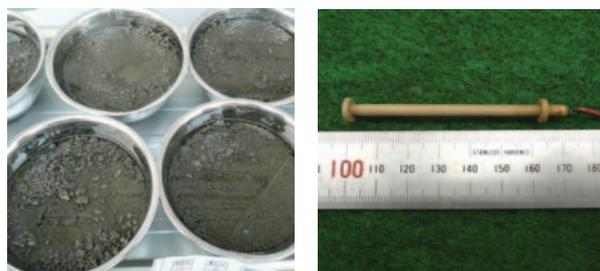


写真-3 破碎モルタル 写真-4 埋設ひずみ計
アセトン浸漬

3. 実験結果

3.1 乾燥重量経時変化

ロードセルで計測したモルタルの重量経時変化を図-2に示す。計測データは水分減少の絶対量が小さいことから、高感度のロードセルを使用したことで恒温室内

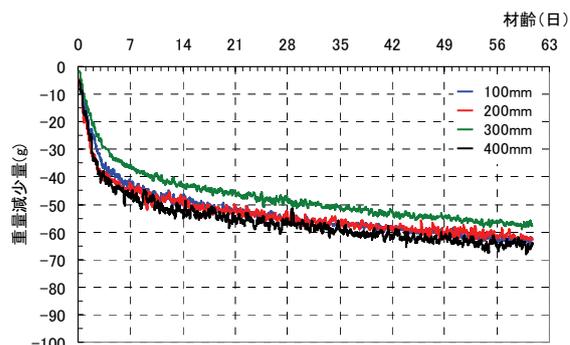
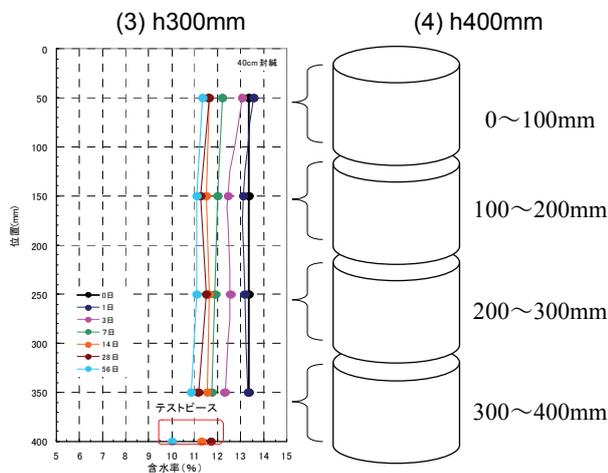
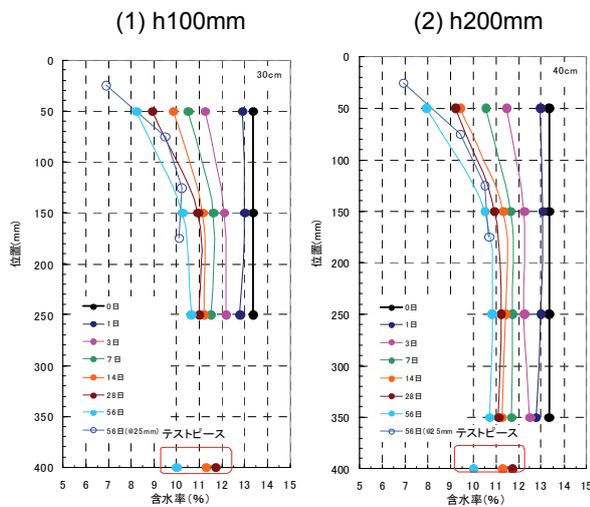
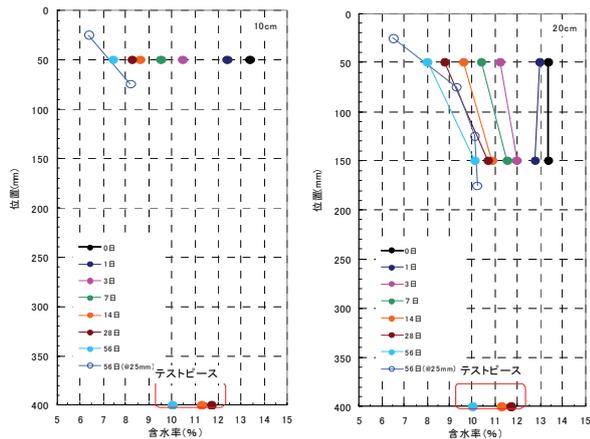


図-2 モルタルの重量経時変化



(5) h400mm 封緘

図-3 含水率の深度分布

の循環気流の影響を受け、値の振れ幅が大きかったため、データ 10 個毎の移動平均により整理を行った。h300mm が若干少ない値を示しているが、いずれの高さのモルタルもほぼ同様の重量変化であった。いずれの高さの供試体も材齢 56 日後には減少重量が 60~70g となっており、今回の試験期間においては、供試体高さによる差は軽微であった。

3.2 含水率分布

深さ 100mm ごとの含水率分布を図-3 に示す。図にはは圧縮試験用のテストピースの含水率（材齢 14~56 日）も示している。材齢 56 日の 3 本のうち 1 本のみ、上部の 200mm の区間だけ 50mm 間隔で切斷し計測を行った。100~400mm の供試体は材齢 3 日以降から乾燥面~200mm の範囲で乾燥による含水率の低下が認められる。

一方、h400mm の封緘供試体は、深さ方向に関係なくほぼ一定の含水率であった。これは、乾燥供試体の 200mm 以深も同様の傾向であった。

3.3 含水率と圧縮強度の関係

モルタルの材齢と圧縮強度の関係を図-4 に示す。圧縮試験で使用したテストピースは寸法 $\phi 50 \times h100\text{mm}$ で、塩ビ供試体と同一養生（温度 20℃、湿度 60%）を行ったものである。材齢 14,28,56 日のみ圧縮試験後直ちに封緘し含水率の計測を行った。テストピースと塩ビ供試体では供試体の寸法・乾燥条件ともに異なるが、含水率が比較的近い塩ビ h200mm 供試体の乾燥面から 100~200mm の位置でのデータを乾燥条件同等と仮定し、練混ぜ時の水量を起点とした含水率減少量とテストピースの圧縮強度の関係を図-5 に示した。圧縮強度と含水率減少量には比例関係が認められる。この含水率減少量には、図-3 (2), (5) に示す h200mm と封緘 h400mm の含水率の差（材齢 56 日で 1%程度）に相当する水量が含まれているが、一般的に言われている初期ひび割れ防止のための養生（含水量）管理の重要性を改めて示唆した結果であると考えられる。

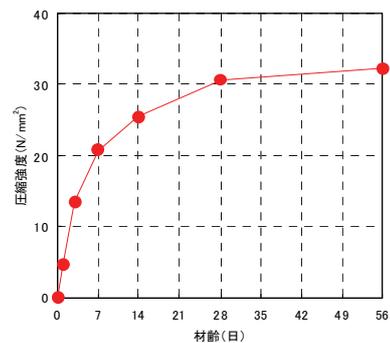


図-4 テストピースの材齢~圧縮強度関係

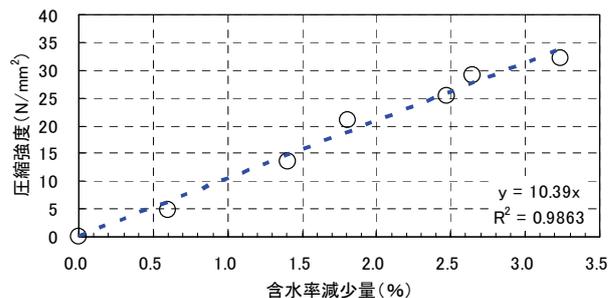


図-5 含水率減少量~圧縮強度関係
乾燥供試体 h200mm (100~200mm)

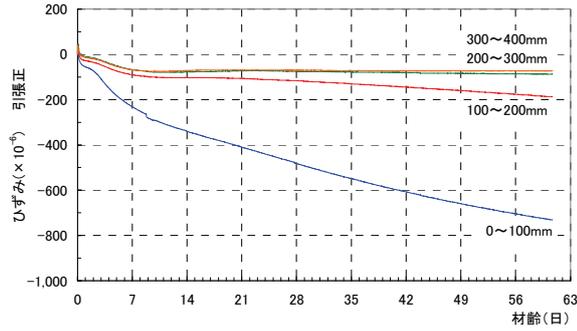


図-6 乾燥供試体 h400mm のひずみ経時変化

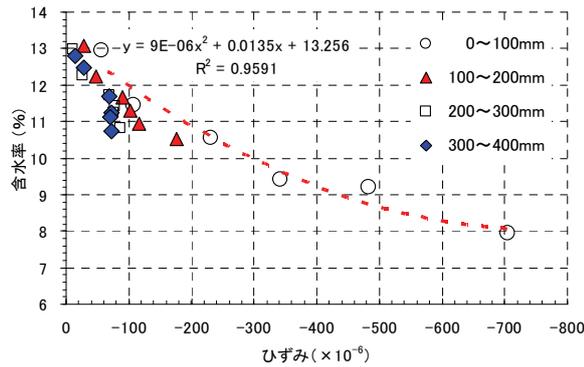


図-7 乾燥供試体 h400mm の自由水～ひずみ関係

3.4 モルタルのひずみ

図-6 に乾燥供試体 h400mm の各層ひずみの経時変化を示す。図-3 の含水比の分布と同様に上部 100mm でひずみが顕著に変化している。今回乾燥の影響が軽微であると考えられる 200mm 以深の材齢 56 日時のひずみは 100×10^{-6} 程度、0~100mm のひずみが 700×10^{-6} であることから、本実験で用いたモルタルの 0~100mm の領域では、乾燥で 600×10^{-6} 程度収縮したものと推定される。

図-7 に乾燥供試体 h400mm の各層の含水率の関係を示す。乾燥の影響が少ない 200mm 以深の材齢 56 日時の含水率の減少量は 2.5% であり、これがセメントの結合水として消費されたと仮定すると、前節の 2.2 で述べた水和完了時点での理論含水率 5.8% から材齢 56 日時の段階での水和率は $2.5\% / 5.8\% = 43\%$ となる。この含水率の減少量は h400mm の封緘供試体も同様の結果であった。

一方、0~100mm の領域では材齢 3 日以降に 100mm 以深との含水率の乖離が始まっており、初期材齢時の収縮ひび割れへの含水率の影響が示されている。

4. 乾燥収縮実験の数値シミュレーション

4.1 解析概要

(1) 解析方法

乾燥収縮実験を対象に、モルタル供試体の硬化過程における水分の移動に着目して逸散する水分量と含水量の分布を有限要素法により算出し、実験結果と比較した。

まず、水分の移動は拡散方程式に従うものとする、モルタル内の単位体積当たりの含水量 $W_e(\text{kg/m}^3)$ は次式で表せる。

$$\frac{\partial w_e}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 w_e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_e}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_e}{\partial z^2} \right) + W \quad (1)$$

ただし、 k : 拡散係数(m^2/s)

t : 時間(s)

W : 単位時間当たりの消耗水量($\text{kg/m}^3/\text{s}$)

また、境界における水収支は水分蒸散によるとすると、境界条件は次式で表せる。

$$-k \frac{\partial w_e}{\partial n} = f(w_e - w_a) \quad (2)$$

ただし、 f : 表面係数(m/s)

w_a : 外気含水量(kg/m^3)

n : 境界と法線方向

拡散係数 k および表面係数 f は、含水量によって変化する値であるが、ここでは既往の研究⁷⁾をもとに以下の式が成り立つものとする。

$$\left(\frac{k}{k_0} \right) \left(\frac{f}{f_0} \right) = 0.05 \quad 0 \leq R.H. < 0.6$$

$$\left(\frac{k}{k_0} \right) \left(\frac{f}{f_0} \right) = 0.05 + \frac{19}{7}(R.H. - 0.6) \quad 0.6 \leq R.H. < 0.95 \quad (3)$$

$$\left(\frac{k}{k_0} \right) \left(\frac{f}{f_0} \right) = 1.0 \quad 0.95 \leq R.H. \leq 1.0$$

単位時間当たりの消耗水量 W については、水和反応による結合に使われた水量に相当するとみなし、結合水量の時間に対する変化率に等しく、反応物質の時間的増加量は未反応物質の量に比例すると仮定する。この場合、以下の式が成り立つ。

$$W = \frac{dw_n}{dt} \quad (4)$$

$$\frac{d(W_n - w_n)}{dt} = -\lambda(W_n - w_n) \quad (5)$$

ただし、 W_n : 最終結合水量(kg/m^3)

w_n : 時刻 t までの結合水量(kg/m^3)

$W_n - w_n$: 未結合水量(kg/m^3)

λ : 比例定数

式(5)を初期条件 $t=0$ および $w_n=0$ として解くと、結合水量は、次式で表される。

$$w_n = W_n(1 - e^{-\lambda t}) \quad (6)$$

式(4)および式(6)より

$$W = \frac{dw_n}{dt} = \lambda W_n e^{-\lambda t} \quad (7)$$

となる。

以上より、次式で示す方程式および境界条件に関する式(2)を解くことにより、水分の移動をシミュレーションする。

$$\frac{\partial w_e}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 w_e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_e}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_e}{\partial z^2} \right) - \lambda W_n e^{-\lambda z} \quad (8)$$

(2) 解析条件

シミュレーションにおける拡散係数 k および表面係数 f の設定にあたっては、既往の研究⁸⁾より得られた含水量と空隙相対湿度の関係(図-8)を用いている。まず図-8より空隙相対湿度を求めたうえで式(3)を用いて k および f の関係を求め、これと式(2)より k および f を決定している。ここで、外気含水量 w_a を湿度 60%、温度 20°C における飽和水蒸気量から 17.3g/m^3 とし、 k_0 および f_0 は各々、 $5.0 \times 10^{-7}\text{m}^2/\text{h}$ 、 $4.3 \times 10^{-3}\text{m/h}$ とした⁹⁾。

一方、比例定数 λ については、結合水量を $t=56$ 日で最終結合水量の 43% ($w_n/W_n = 0.43$) になると仮定し、これを式(6)に代入することにより以下のように算出した。

$$\lambda = -\frac{\ln 0.57}{56 \times 24 \times 3600} = 1.16 \times 10^{-7} \quad (9)$$

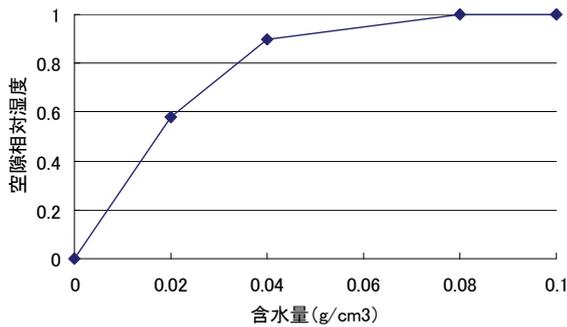


図-8 含水率と空隙相対湿度の関係⁸⁾



図-9 解析モデル (4D のケース)

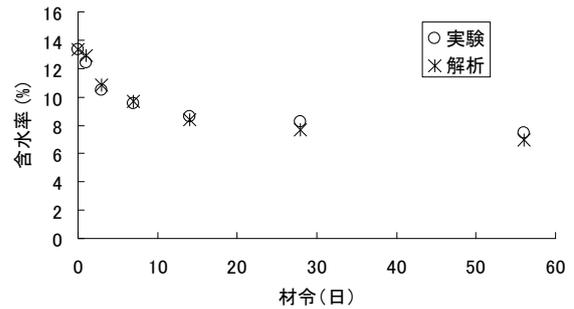
(3) 解析モデル

乾燥収縮実験で用いた 4 種類の供試体 (高さ 1d, 2d, 3d, 4d, ただし d:直径 100mm) について、図-9 のように三次元有限要素でモデル化した。ここでは、供試体の

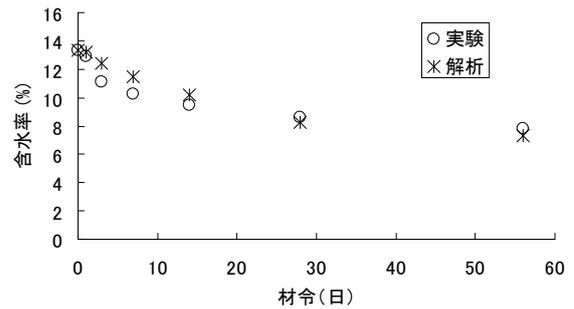
対称性を考慮して 1/4 モデルとしており、高さ 4d のモデルは、2055 要素、8072 節点で構成されている。境界条件については、実験と同様に上面のみ水分蒸散するとし、式(2)が成り立つとした。

(4) 解析ケース

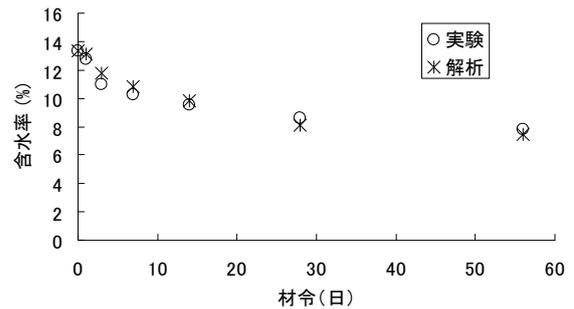
解析ケースについては、寸法の異なる 4 種類のモデルそれぞれについて、材齢が 1 日、7 日、28 日および 56 日の 4 ケースを設定し、計 16 ケースの解析を行った。



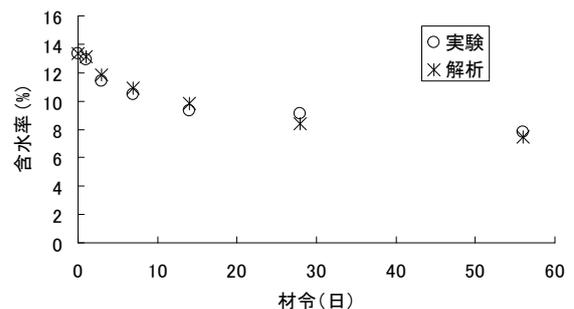
(a) 高さ 1d (100mm) の供試体



(b) 高さ 2d (200mm) の供試体



(c) 高さ 3d (300mm) の供試体



(d) 高さ 4d (400mm) の供試体

図-10 含水率の経時変化 (上面から 100mm の部分)

4.2 解析結果

解析より得られた含水量 $W_e(m^2/s)$ の時間変化を含水率の時間変化に換算し、実験結果と比較した。供試体上面から 100mm の部分の比較結果を図-10 に示す。解析結果については、中心位置の値を代表値としている。図より、解析より得られた含水率の経時変化は、実験結果と概ね整合が取れていることが確認できた。また、解析結果も実験と同様に、供試体の高さが 1d~4d に変わっても、含水率はほぼ同じである結果となっている。つぎに、解析より得られた深さ方向の含水率の分布を図-11 に示す。これより、解析結果は、上面に近くなるほど含水率が低下し、材齢が大きくなるほど含水率が低下する結果となっており、実験結果と概ね同傾向を示すことが確認できた。図-12 に、高さ 3d の供試体について、材齢 1 日、7 日、28 日および 56 日における含水率のコンターを示す。これより、水分が蒸散する上面に近いほど含水率が低くなっており、材齢が大きくなるにつれて上面から含水率が低下していく傾向が視覚的に把握できた。

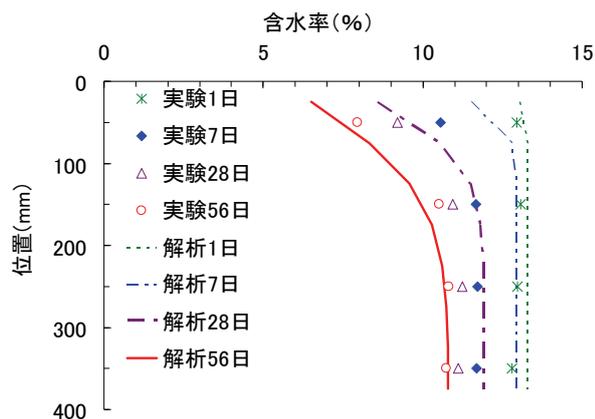
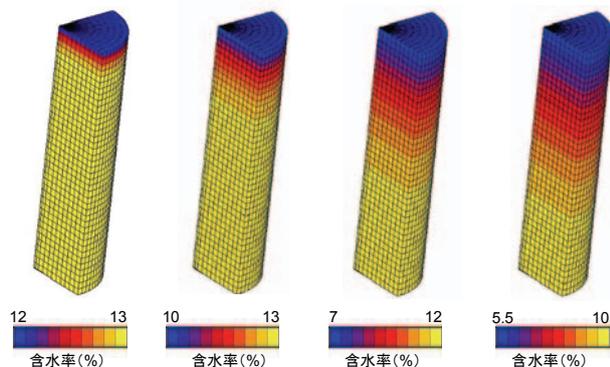


図-11 含水率の深さ方向の分布
(高さ 4d (400mm) の供試体)



(a) 材齢 1 日 (b) 材齢 7 日 (c) 材齢 28 日 (d) 材齢 56 日
図-12 含水率の分布 (高さ 3d (300mm) の供試体)

5. まとめ

本研究では、乾燥収縮の基礎的な性状を把握するため

の要素実験を行い、水分量の経時変化を把握した。また、供試体の硬化過程における水分の移動に着目した数値解析を行った。得られた知見を以下に示す。

- 乾燥の影響範囲は深さ 200mm までであり、最も乾燥する深さ 0~100mm では材齢 3 日以降にそれ以降と乖離が始まる。材齢 56 日でひずみ差 600×10^{-6} となった。
- 材齢 56 日の深さ 200mm 以降と封緘供試体で高さ方向の含水率分布に差が無いことから、封緘状態での鉛直方向の水分移動は軽微な量であると推察される。
- 供試体の硬化過程における水分の移動に着目した数値解析を用いて要素実験をシミュレーションし、実験結果と整合が取れることを確認した。また、水分が蒸散する上面から含水率が低下していく傾向を視覚的に把握できた。

今後は、実際の開削トンネルを対象に数値解析を用いたシミュレーションを行い、現場調査の結果と比較するとともに、乾燥収縮に起因する材料ひび割れの判別法を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 新井泰, 杜世開, 渡辺忠朋, 山本努: 非線形挙動を考慮した開削トンネルのひび割れ調査結果シミュレーション, トンネル工学論文集, Vol.15, pp.173-181, 2005.12.
- 2) 田辺将樹, 大石敬司, 山本努, 本間実, 松川俊介: 開削トンネルの形状寸法および荷重条件と曲げひび割れの発生状況に関する一考察, トンネル工学報告集, Vol.16, pp.455-460, 2006.11.
- 3) 小寺重郎: 鉄筋による収縮ひび割れの制御, コンクリート工学, Vol.44, pp.39-46, 2006.8.
- 4) 諸橋由治, 石川幸宏, 瀬筒新弥, 新井泰, 有賀貴志: 開削トンネルの材料ひび割れに関する一考察, トンネル工学報告集, Vol.17, pp.349-354, 2007.11.
- 5) 石川幸宏, 河畑充弘, 大石敬司, 新井泰, 有賀貴志: 現場調査に基づくひび割れ発生時期の推定法に関する研究, トンネル工学報告集, Vol.18, pp.301-307, 2008.11.
- 6) コンクリートの長期耐久性に関する研究委員会: 日本コンクリート工学協会, pp.30, 2000.5.
- 7) Bazant, Z.P. and Najjar, L.T.: Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete, *Materiaux et Constructions*, Vol.5, No.5, pp.3-20, 1972.
- 8) 西岡栄香, 原田有: コンクリートの透湿率および湿気拡散率について, セメント技術年報, Vol.15, pp.274-278, 1961.
- 9) 滝口克己, 堀田久人, 小板橋裕一: 若材令コンクリートの熱及び乾燥による応力解析法, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 396 号, pp.118-124, 1989.2.