

論文 せき板除去後のコンクリート中の水分移動に関する基礎実験

吉岡 昌洋*1・榊田 佳寛*2

要旨: 建築物の構造体コンクリートは、通常打設後数日でせき板を取り外すため、水和反応と表面からの水分逸散が同時かつ複合的に進行し、含水率が減少する。そこで、構造体としての品質維持の観点より、材齢初期の強度発現過程において重要となる含水率減少メカニズム検討の一環として、コンクリート中の水分の移動に関する基礎的な実験検討を行った。水和反応速度が遅く、乾燥の影響が出やすい中庸熟ポルトランドセメントを用いたモルタル中の含水率分布について経時変化の測定および拡散係数の検討を実施した結果、脱型材齢、深度および材齢の差異による水分移動の傾向を捉えることができた。

キーワード: 脱型材齢, 乾燥, 水分移動, 含水率, 拡散係数, 水和反応

1. はじめに

建築工事における構造体コンクリートの型枠脱型は、JASS5の規定に従い、7日以下の材齢で実施するのが一般的である。そのためセメントと水の水和反応、および表面からの自由水の逸散が同時に進行することとなる。過度な早期脱型によって特に表層部で乾燥による水和阻害が生じ、圧縮強度の低下等、品質低下が生じることが多くの研究^{1)~3)}により明らかとなっている。構造体コンクリートとして一定以上の厚さを持つ部材は内部ほど乾燥の影響は小さくなり、湯浅ら⁴⁾の報告によると、乾燥開始材齢が含水率や細孔構造に与える影響について検討し、深度5cm程度までの表層コンクリートは乾燥開始材齢による影響を強く受けるが、内部への影響は大きくないとしている。また、筆者ら⁵⁾も、表層から内部への含水率分布について同様の結果を得ている。

また、水和反応による組織形成の進行速度が比較的早い材齢初期(1~7日間程度)においては、乾燥を開始する材齢がその後の水分の移動に影響することが考えられるが、単なる含水率の比較のみでは、内部現象の詳細な評価は困難である。

そこで、乾燥を受けるコンクリート中の水分移動に関する研究^{6)~8)}にて、拡散理論における非線形拡散方程式による解析が有効であるとの報告がなされており、脱型材齢が水分移動に与える影響の傾向を拡散係数により評価することが有効と考えられる。しかしながら、水和による組織構造の変化および乾燥が進行する過程における拡散係数の推定は容易ではない。また、材齢1~7日程度の範囲で脱型材齢をパラメータとし、乾燥による影響が小さい深さまでの実測を伴った拡散現象の検討報告はなされていない。

本報では、脱型材齢がモルタル内部の水分移動に及ぼす影響を、実測により求めた拡散係数にて評価すべく実験を実施した。壁状のコンクリート部材のせき板を除去し、表面からの乾燥を受ける状況を再現したモルタル供試体において、含水率分布測定実験を実施し、材齢70日までの間の経時変化を測定した。そこから簡便に算定した拡散係数を指標とし、脱型材齢の影響等、内部水分移動に関する基礎的な評価を実施した。なお、コンクリートとモルタルでは、厳密には粗骨材の介在により水分移動が完全には一致しないことが予測されるが、既報⁵⁾にて両者の質量変化率は線形関係にあったことから、傾向は一致すると考えられる。そこで、測定誤差が生じにくい、モルタル供試体を用いた。

2. 実験概要

表-1 モルタルの調合

調合記号	W/C (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)			
			C	W	S	Ad
M55	55.0	7.0	494	272	1312	4.94

- C: 中庸熟ポルトランドセメント(密度3.21) (T社製)
- W: 工業用水
- S: 鹿島産砂(表乾密度2.59, 吸水率2.35%)と鹿沼産砕砂(表乾密度2.62, 吸水率1.98%)を容積比7:3で混合
- Ad: AE減水剤(F社製)

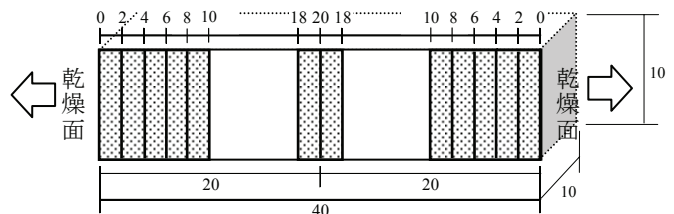


図-1 含水率分布測定試験供試体概要および切断位置

*1 (株)長谷工コーポレーション技術研究所 工修 (正会員)

*2 宇都宮大学 工学部建設学科教授 工博 (正会員)

2.1 使用材料および調査

本実験は比較的強度発現が遅く、乾燥の影響を受けやすい中庸熟ポルトランドセメントを使用し、採取試験片毎の粗骨材配置の不均一性等にて、切断した試験片毎の粗骨材容積率が変動することで生じる測定誤差を排除するために、モルタル供試体にて行った。モルタルの調査は、水セメント比 55%、空気量 4.5%、スランプ 18cm のコンクリートから粗骨材を取り除いた表-1 に示す調査とした。なお、モルタルはレディーミクストコンクリート工場の実機ミキサで製造した。製造時の外気温度は 20.5℃であった。

2.2 圧縮強度測定試験

圧縮強度試験にはφ10×20cm 円柱供試体を用いた。養生方法および試験材齢は 20±1℃の室内で養生した封かん供試体は材齢 1,3,5,7,28 日、標準養生供試体は材齢 28,56,91 日とした。

2.3 含水率分布測定試験

(1) 実験概要

図-1 に示すように厚さ 40cm の壁部材において温度一定条件の下で単純な湿度分布による乾燥過程をモデル化した 10×10×40cm の供試体を作製し、小口両端面のみを開放して乾燥面とし、乾燥面から内部への深度 20cm の範囲での質量含水率分布を乾燥質量法にて測定した。供試体の作製においては、型枠の隙間等からの水分の逸散を防止するために、厚さ 0.2mm のビニールシートを成形して敷き込んだ木製型枠にモルタル試料を打ち込み、直ちにビニールで被って密封し、さらにゴムパッキン付きの蓋をボルト固定することにより密閉した。供試体は養生条件および試験材齢毎に 1 体ずつ作製した。打設およびその後の養生は温度 20±1℃、湿度 60±3%RH の試験室内にて行った。なお、所定の材齢における乾燥の開始については、小口面のみ型枠およびビニールシートを取り外し、型枠と供試体との隙間をシールで覆って行った。

測定は、所定材齢毎に用意した供試体を図-1 に示す位置にて、供試体の含水率に影響しないように無水で割裂切断し、切り出した試料にて行った。切断面が乾燥面に平行となるように切断し、1 つの供試体から厚さ約 2cm の 6 試験片を 2 組ずつ採取した。切断後、直ちに乾燥前質量を測定し、105℃の乾燥炉で恒量となるまで乾燥して絶乾質量を求めた。測定材齢における乾燥前質量からの質量減少量を含水分質量として、乾燥前質量に対する含水質量の比を各試験片中心位置における質量含水率とした。なお、高温乾燥時に水和反応が進行することが考えられるが、厚さが 2cm であり、水和反応で消費される水分は無視した。ただし、これについては今後の課題とした。質量含水率の算定式を式(1)に示す。

表-2 含水率試験の要因と水準

要因	水準
試験体寸法	10×10×40cm
養生環境	温度:20±1℃、湿度:60±3%RH
乾燥条件	両小口2面乾燥
養生条件(脱型材齢)	1, 3, 5, 7日 および 全期間封緘
試験片採取位置(乾燥面からの深度)	1) 0~2.0cm 2) 2.0~4.0cm 3) 4.0~6.0cm 4) 6.0~8.0cm 5) 8.0~10.0cm 6) 18.0~20.0cm
含水率測定時期	材齢1,3,5,7,9,11,14,28,56,70日

表-3 モルタル圧縮強度試験結果

調査記号	封かん養生供試体圧縮強度(N/mm ²)					標準養生供試体圧縮強度(N/mm ²)		
	材齢1日	材齢3日	材齢5日	材齢7日	材齢28日	材齢28日	材齢56日	材齢91日
M55	2.46	7.24	10.4	12.2	27.2	25.8	36.9	42.2

$$w_w = \frac{W_p - W_D}{W_p} \times 100 \dots (1)$$

ここで、 w_w は質量含水率 (%), W_p は乾燥前モルタル試料の質量, W_D は乾燥後モルタル試料の質量(絶乾質量)を表す。

(2) 要因と水準

含水率分布測定試験の要因と水準を表-2 に示す。型枠の脱型材齢は 1~7 日の間で 2 日毎の 4 水準とし、その他に水分逸散による乾燥が生じない封かん養生での測定も実施した。試験片の採取については厚さ約 2cm で、それぞれ中心部が乾燥面からの深度 1,3,5,7,9,19cm となるよう設定しており、各試験片の含水率が、試験片中心における含水率であるものとした。また、封かん養生供試体は表層からの水分逸散は生じないため、深度 19cm のみの測定とした。また、含水率の測定については材齢 70 日までの 10 水準にて実施した。

3. 実験結果

3.1 圧縮強度試験

圧縮強度試験結果を表-3 に示す。封かん養生供試体における圧縮強度は材齢 1~7 日の型枠脱型時において、2.46~12.2N/mm²、材齢 28 日にて 27.2N/mm² が得られている。

3.2 質量含水率

脱型材齢別にモルタルの質量含水率分布と材齢の関係を図-2 に示す。供試体がモルタルであり粗骨材を含まないため、質量含水率はコンクリートよりも 5 割ほど高い。なお、各グラフの深度 19cm の位置には太線にて封かん養生を継続した場合の質量含水率推移も示している。封かん養生供試体含水率の材齢に伴う減少分は、水分逸散が生じていないため、ほぼ結合水率による変化に近しいと考えられる。

図-2 に示した結果は、割裂での正確な平面切断が困難

なため、試料の一部は本来の深度とは異なる隣接した試験片の試料として採取されることがあり、隣接試験片間の含水率差が大きい場合に、測定誤差が生じると考えられるが、その傾向は明確に得られている。

乾燥開始直後2日間の変化が特徴的であり、脱型材齢1日では、深度19cmの質量含水率が太線で示した封かん養生の結果と乖離し、深度19cmの内部まで全体的に質量含水率が低下しており、含水率分布の勾配も緩やかとなった。脱型材齢の増加に伴いその傾向は弱まり、脱型材齢3日ではまだ内部までの含水率低下が認められたが、5日以上で封かん養生供試体との差異は小さくなった。

3.3 体積含水率

質量含水率は、測定材齢までに生じた水分逸散により W_p が変化するため、経時変化にともなう水分移動の評価を行う指標として最適ではない。そこで、指標として、体積含水率を採用した。体積含水率を式(2)に示す。

$$w_v = \frac{W_p - W_D}{\rho \cdot V_p} \times 100 \dots (2)$$

ここで、 w_v は体積含水率(%vol)、 V_p は乾燥前モルタル試料の体積、 ρ は水の密度を表す。

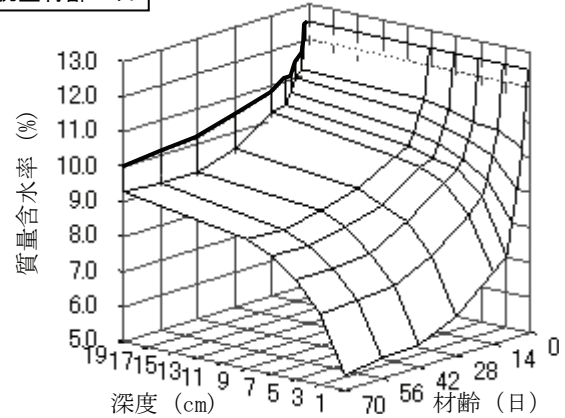
ただし、本報では、既知の質量含水率と結合水率より逸散した水分の質量が推定可能であるため、水分が逸散しなかった場合の質量を推定し、体積含水率を調合密度から算定した。なお、算定において、収縮による体積変化率は無視できるレベルであるため、モルタルの体積は一定とした。また、永松ら⁹⁾の研究にて、結合水率は含水状態により異なることが示されているが、結合水率に関するデータが充分では無いため、脱型材齢および深度によらず同一材齢における結合水率は一定であると仮定した。また、ここでの算定に用いた結合水率は、モルタルの調合上の含水率と各材齢における封かん養生供試体の含水率の差分を見かけの結合水率 w_n と定義し、その値を用いた。質量含水率から体積含水率への変換式を式(3)に示す。

$$w_v = \rho \cdot \left(\frac{100 - w_w}{100 - w_n} - \frac{W_D}{W_p} \right) \dots (3)$$

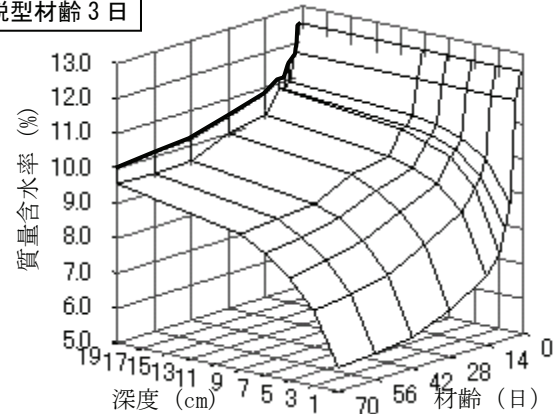
ここで、 w_v は体積含水率(% vol) w_w は質量含水率(%), ρ はモルタル調合密度, w_n は見かけの結合水率(%), W_p は乾燥前モルタル試料の質量, W_D は乾燥後モルタル試料の質量を表す。

図-3に深度別に材齢と体積含水率の関係を示す。材齢1日におけるモルタルの体積含水率は26.1(%vol)であり、単位水量にして、261(l/m³)に相当する。調合上の単位水量が273(l/m³)であるため、体積含水率として妥当な数値が得られていると考えられる。基本的な傾向は、やは

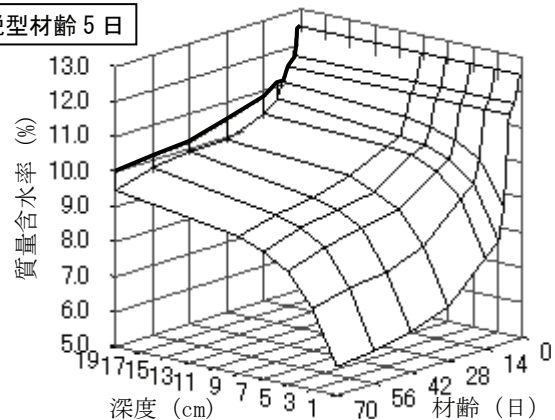
脱型材齢 1日



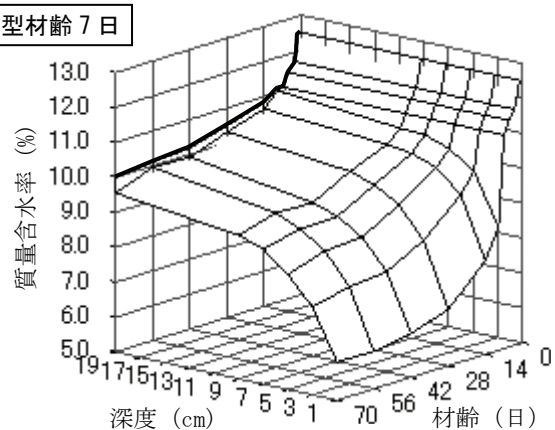
脱型材齢 3日



脱型材齢 5日



脱型材齢 7日



— 封かん養生供試体の質量含水率

図-2 モルタルの質量含水率分布と材齢の関係

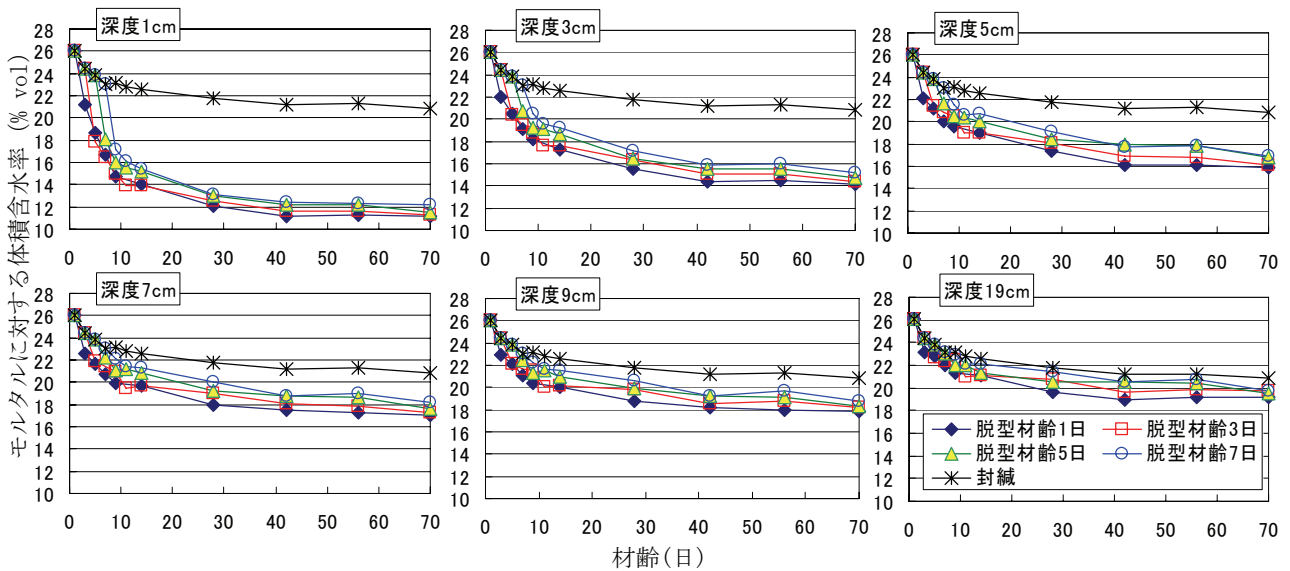


図-3 材齢とモルタル体積含水率の関係

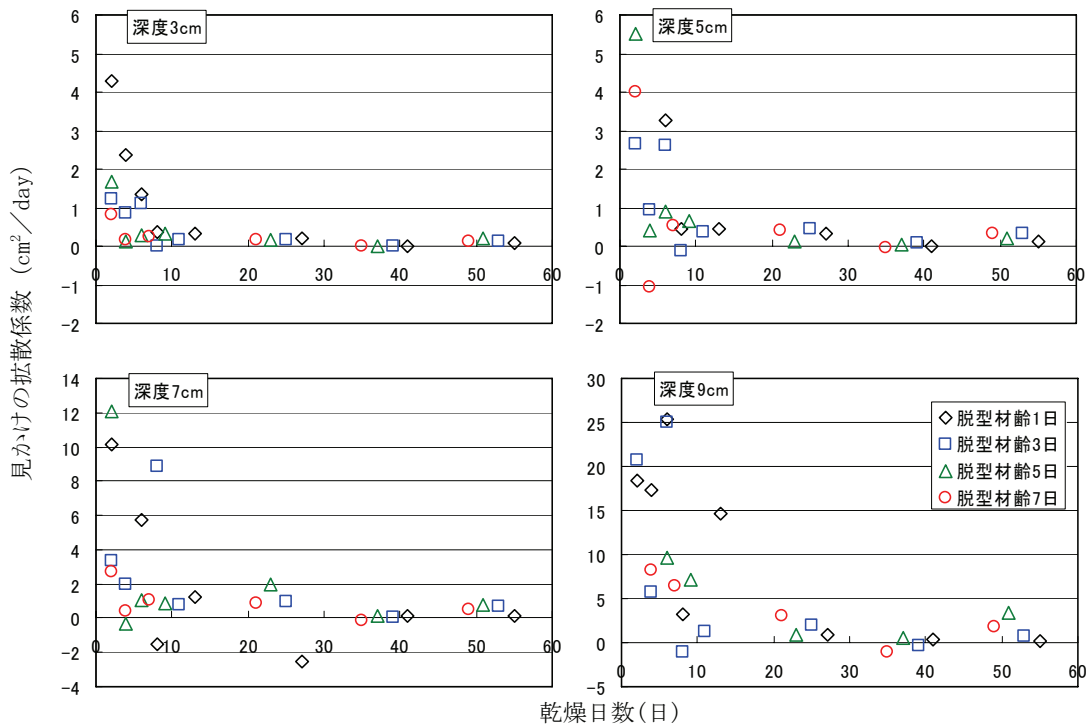


図-4 乾燥日数と見かけの拡散係数の関係

り質量含水率と同一であり、深度が浅いほど、また脱型材齢が早いほど含水率の低下が大きく、深度 7cm 以上の深さでは含水率の低下は小さい。

4. 水分拡散の検討

モルタル内部の含水率変化を水分の拡散として捉え、体積含水率よりモルタルにおける拡散係数の評価検討を実施した。フィックの第二法則による体積含水率における拡散方程を式(4)に示す。

$$\frac{\partial w_v}{\partial t} = D \frac{\partial^2 w_v}{\partial x^2} \dots (4)$$

ここで、D は拡散係数(cm²/day)、W_v は体積含水率(%), t は材齢もしくは乾燥日数(日)、x は乾燥面からの深度

(cm)を表す。

4.1 モルタルにおける水分の見かけの拡散係数

拡散方程式での検討においては、本来、移動した水量と水和により消費された結合水量を分けて取り扱うが、ここでは、体積含水率そのものから式(4)にて見かけの拡散係数として算定した。深度別に乾燥日数と見かけの拡散係数の関係を図-4に示す。乾燥日数は脱型日からの経過日数である。ここに示した拡散係数は、主にセメントとの水和反応等でセメント硬化体内部に取り込まれた水量も拡散したものとして捉えた場合の値であり、実際の拡散移動を示す係数ではない。そこで、見かけの拡散係数と定義した。拡散係数の算定過程において、実

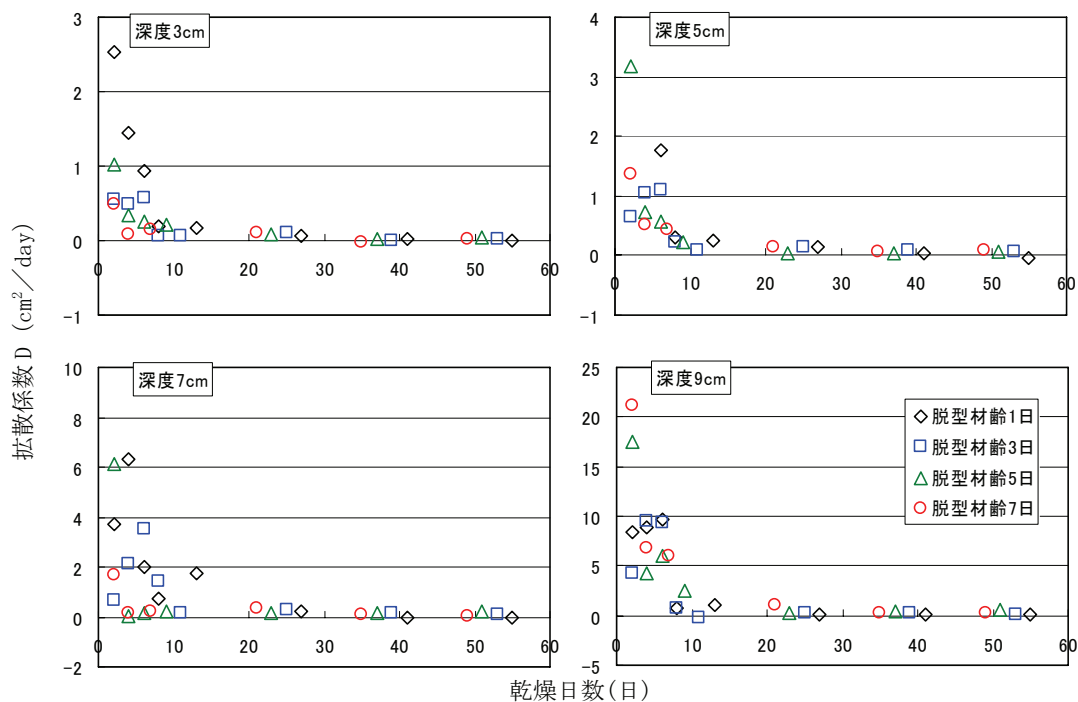


図-5 乾燥日数とモルタルにおける水分の拡散係数の関係

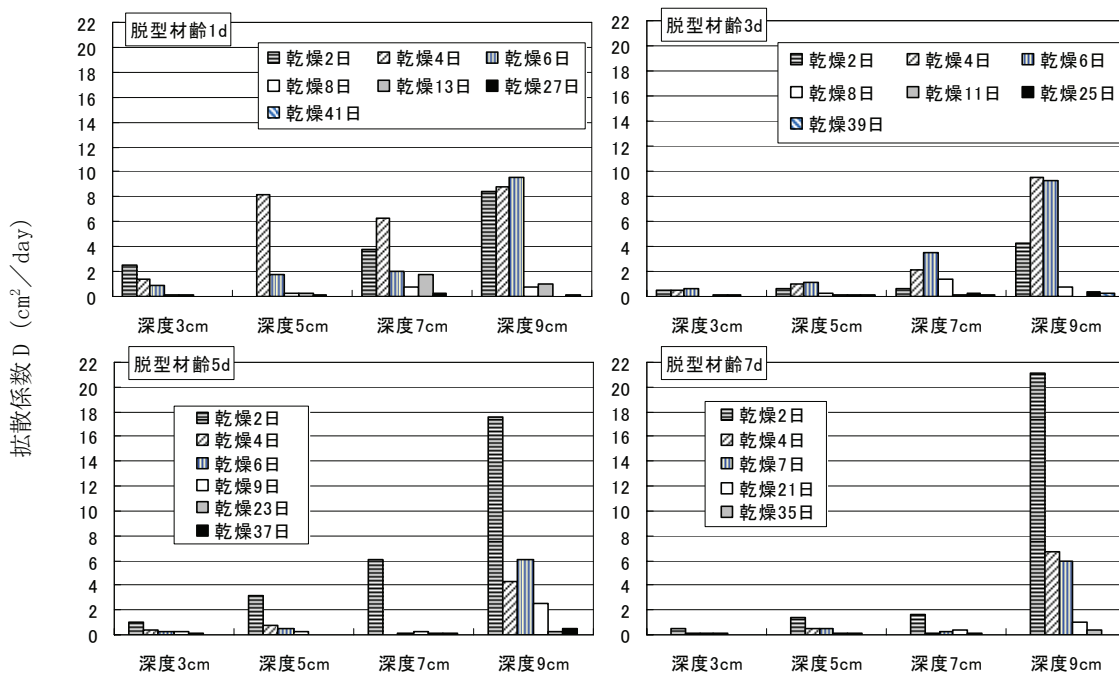


図-6 各深度におけるモルタルにおける水分の拡散係数

測定の誤差が増幅されるため、データのばらつきは大きいものの、全体的として、脱型材齢が早い程、かつ深度が深い程、拡散係数が大きくなり、また乾燥日数の経過とともに小さくなる傾向にある。

4.2 モルタルにおける水分の拡散係数

水和による水分消費の影響を排除し、実際のモルタル内部の水分移動における拡散係数を簡便に得るためには、表層からの乾燥により逸散した水量の変化のみを対象とする必要がある。そこで自由水だけでなく結合水等も含め供試体中に残存した全水量を非逸散水量と定義

し、その体積含水率変動に基づく拡散係数をモルタルにおける水分の拡散係数とし、式(4)にて求めた。なお、非逸散水量の体積含水率は、脱型材齢および深度によらず同一材齢における結合水率は一定であるとの仮定の下、見かけの体積結合水率を図-3に示した体積含水率に付加し、算定した。

また、材齢の経過に伴って、あるいは深度が浅い部分の方が、含水率が大きくなるような結果が得られた場合は、物理的に考えて逆転しており、拡散係数の計算値が負の値を取ったりするので、逆転する前後の値の中間値

を採用する、いわゆる移動平均にて補正した。

補正後の体積含水率より算定したモルタルにおける水分の拡散係数を図-5 および図-6 に示す。両グラフは同一データであるが、図-5 は深度毎のグラフ、図-6 は脱型材齢毎のグラフとなっている。図-4 の見かけの拡散係数結果と比較し、傾向が明確となった。まず、全体の傾向として脱型材齢によらず、深度が深い程拡散係数が大きくなった。また、乾燥日数 10 日程度で拡散係数は小さい値に低下している。拡散係数については含水率の低下にともない大幅に低下するとの報告⁸⁾がなされており、含水率の変化による影響が大きいと考えられる。また、乾燥日数の経過に伴う拡散係数の低下要因には、水和進行による内部組織の緻密化も含まれていると考えられる。

次に、脱型材齢別にみると、基本的に脱型材齢が早いほど、浅い深度においても拡散係数が大きく、かつ数日間は急激な低下を示さない傾向がある。特に脱型材齢 1 日で特徴的で、表層から内部にかけて乾燥日数 7 日間ほどまで拡散係数が大きいまま保たれており、内部から表層側へ比較的速やかな水分移動が生じやすい状況が継続的に生じていると考えられる。脱型材齢 3 日でも、深度 7cm 以下での数値は小さくなるものの、同様な傾向が見られる。それに対し、脱型材齢 5 日以上では、深度 7cm 以下の比較的浅い位置では、乾燥日数 2 日から 4 日にかけて拡散係数は急激に低下し、それ以降の水分移動が生じにくくなっていることが分かる。ただし、含水率が高く維持されている深度 9cm については乾燥日数 7 日間程度までは、比較的拡散係数が大きい状態である。以上の結果は、乾燥開始が早いほど、自由水の絶対量が多く、内部組織自体も粗であることが要因かと想定されるが、詳細は定かではない。

脱型材齢が 5 日と 7 日の比較では、7 日の方が脱型直後の表層部の拡散係数は小さくなっている。

全体的に含水率の低下しにくい深度 9cm 程度では、乾燥開始後の数日間、拡散係数が大きく水分が移動し易い状態にある。そこで、表層部の拡散係数が小さい場合に、内部の水分は維持されやすくなることが想定される。

全体的な考察として、脱型日数が 3 日程度以下では、表層部の拡散係数が数日間保たれ、内部の水分を誘引しやすいのに対し、脱型日数が 5 日程度以上では、脱型直後のみ内部からの水分移動が生じやすいものの、その後急激に表層部の拡散係数が低下するため、内部での水分低下が抑制されることが推察される。

5. まとめ

構造体コンクリートにおいて、せき板の除去により開始する水分逸散に伴う内部水分移動の検討として、乾燥状況を模擬したモルタル供試体にて、含水率の変動を実

測し、拡散係数から型枠脱型材齢の影響について検討した結果、以下の結論を得た。

- (1)含水率の影響により、拡散係数は乾燥面からの深度が大きいほど大きくなり、基本的には材齢および乾燥日数の経過に伴い小さくなる傾向がある。
- (2)脱型材齢が早いほど拡散係数が高く、かつ維持されやすい傾向がある。
- (3)脱型材齢が 1 日では浅い深度においても比較的拡散係数が大きく、乾燥日数 7 日程度まで低下しにくい傾向にあり、内部の水分も減少しやすいことが考えられる。
- (4)脱型材齢が 5 日および 7 日では、乾燥開始直後の拡散係数が大きくなるが、深度 7cm 以下の部位では乾燥日数 4 日には大きく低下している。
- (5)硬化過程において乾燥をうけるコンクリート中の水分移動について、体積含水率より簡易的に算定した拡散係数によりその傾向の評価が可能と考えられる。

参考文献

- 1) 谷川恭雄, 森博嗣, 木村芳幹: モルタルの内部強度分布に関する研究, セメント技術年報 Vol.38, pp. 230-233, 1984
- 2) 伊代田岳史, 魚本健人: 早期脱型による乾燥と水分の再供給がコンクリートの内部組織構造に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.787~792, 2001
- 3) 伊代田岳史, 魚本健人: 若材齢による乾燥がセメント硬化体の内部組織構造に及ぼす影響, 土木学会論文集 No.732/V-59, pp.17~26, 2003.5
- 4) 湯浅昇, 笠井芳夫, 松井勇: 乾燥を受けたコンクリートの表層から内部にわたる含水率, 細孔構造の不均質性, 日本建築学会構造系論文報告集, No.509, pp.9~15, 1998.7
- 5) 安部弘康ほか: 各種セメントを用いたコンクリートの合理的な型枠脱型材齢に関する実験 (その 5,6), 日本建築学会大会学術講演梗概集 2006 年 9 月, pp.333~334
- 6) 永松静也, 佐藤嘉昭: 非線形拡散方程式に夜コンクリートの脱水量の分布に関する研究, セメント技術年報 Vol.35, pp. 162-165, 1981
- 7) 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 No.316, pp.145~152 1981.7
- 8) 秋田宏, 藤原忠司, 尾坂芳夫: 乾燥を受けるコンクリート中の水分移動を解析する手法, 土木学会論文集 No.490/V-23, pp.101~110, 1994.5
- 9) 永松静也, 竹田吉昭, 佐藤嘉昭: 乾燥を受けるセメント硬化体の水和の進行を表す式, 日本建築学会構造系論文報告集 No.361, pp.21~30, 1986.3