

論文

[1026] コンクリート中の水分移動における水分伝導率の評価

正会員 ○ 秋田 宏 (東北工業大学)
 正会員 藤原忠司 (岩手大学工学部)
 正会員 小西俊之 (岩手大学大学院)
 正会員 尾坂芳夫 (東北大学工学部)

1. まえがき

セメント硬化体中の水分移動を拡散現象としてとらえ、別報ではまずモルタルについて非線形拡散方程式による解析を試みた¹⁾。その際、拡散係数に対応する水分伝導率を、阪田らと同様に実験による相対含水率からボルツマン変換により求めた²⁾。しかしながら、理論的には平衡含水率を用いて境界条件を記述したこと、実験的には割裂によって含水率を求めたこと等が阪田らと異なる点である。また、その解析手法を乾燥ばかりでなく吸湿・吸水過程にも適用し、実験結果との適合性を確認している。ただし、そこでは実験も解析も1次元の水分移動を扱い、3次元的效果の検討をせず、蒸発熱の影響も無視できるものとして扱った。

本稿でも蒸発熱の影響は無視するが、水分移動解析上の具体的な資料を提供することを目的とし、3次元および1次元の水分移動解析を行うとともに、広範囲な配合についてコンクリートの乾燥実験を行い、水分伝導率の配合依存性について検討した。

2. 実験概要

10×10×40cmの角柱供試体を用い、1面からのみ乾燥させる実験および6面すべてから乾燥させる実験の2種類を行なった。1面乾燥の供試体には、後に割裂しやすくするためあらかじめ溝をつけてある。これらを所定の日数乾燥させた後順次割裂して、その時点の質量と105℃での炉乾燥質量との差から、含水率分布を求めることにより水分移動を調べるものである。1次元の水分移動を実現するために、乾燥面を除く5面にラップフィルムを巻き、さらにバラフィンを塗布することによりシールした。シールの効果を確認するために、全面シールした供試体の質量減少を調べた結果は、8週で0.2gであり十分満足できるものであった。実験条件は、室温20℃、乾燥時の相対湿度は60%とし、1面乾燥では2, 4, 8, 16週にそれぞれ3体ずつ割裂を行った。

1面乾燥供試体の配合は表-1であり、単位水量を同一にして水セメント比を変えたもの(1),(2),(3)、単位水量を変えたもの(4),(5)の計5種類とした。6面乾燥実験では、質量減少量を測定しただけであるが、表-2に示すように広範囲にわたる多数の配合について調べることが目的とした。

表-1 1面乾燥供試体の配合

配合	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
					セメント C	水 W	細骨材 S	粗骨材 G
(1)	20	9.3	50	43.0	360	180	757	1003
(2)	20	6.5	60	43.0	300	180	778	1031
(3)	20	5.5	70	43.0	257	180	792	1050
(4)	20	8.0	50	43.0	300	150	810	1074
(5)	20	19.1	70	43.0	300	210	745	987

3. 解析理論

3. 1 水分移動の基礎方程式

実験に対応した変数として、相対含水率 R を次式により定義する。すなわち、

$$R = \psi / \psi_s \times 100 \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 ψ ：含水率、 ψ_s ：飽水時の含水率である。現状は諸定数に対する知識が十分でなく、

水と水蒸気の移動を個別に扱うことが困難なので、気・液水分をまとめて扱い、圧力が一定の場合に限れば、基礎方程式は次のようになる。³⁾

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \nabla(D \nabla R) \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 t ：時間、 ∇ ：微分演算子 ($i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}$ ； i, j, k は x, y, z 方向の単位ベクトル)、 D ：水分伝導率である。飽水状態からの乾燥では、これを初期条件

$$R(x, y, z, t) = 100 \quad \dots\dots\dots(3)$$

境界条件

$$\frac{\partial R}{\partial n} + \alpha_m (H_s - H_o) = 0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

のもとに解けば良い。ここで、 n ：乾燥面の法線ベクトル、 α_m ：水分伝達率、 H_s, H_o ：乾燥表面および雰囲気相の相対湿度である。

3. 2 平衡含水率

セメント硬化体中でセメント粒子の表面に吸着された水分子は、通常の条件ではその位置での水蒸気圧に平衡しているため、相対湿度に対応した含水率を示す。この関係は平衡含水率曲線として知られるが、モルタルおよびコンクリートに対する十分な資料はなく、原田らの測定値を示せば図-1のようになる。^{4), 5)}ただし、この図は含水率ではなく相対含水率に対して表わしたものである。図から知られるように両者の関係は配合に依存しており、水セメント比をひとつのパラメータと考えることができる。ただし、相対含水率は相対湿度0%の時の平衡値よりも炉乾燥によってさらに減少するが、本研究では炉乾燥を基準としているため、そのように表わしてある。ここで、相対湿度0%での相対含水率は、 W/C により若干変動する可能性があるが、他に資料が無いために $W/C=50\%$ での値をすべての W/C に共通に用いている。

図中の曲線は、測定値を良く表現できるように簡単な関数で表わしたものであり、それらは共通の式、

$$R = 0.763[C/(100+D-H) - A/(B+H) + 0.01\{100-C/D+C/(100+D) - A/B+A/(100+B)\}H - C/(100+D) + A/B] + 23.7 \quad \dots\dots\dots(5)$$

から計算され、ここで定数 A, B, C, D は水セメント比 γ の関数として、

$$\begin{aligned} A &= 600 - 500 \exp(-\gamma/15) \quad , \quad B = 26 \exp(\gamma/100) - 23 \\ C &= 490 - 3500 \exp(-\gamma/15) \quad , \quad D = 20 \exp(-\gamma/50) + 2.3 \quad \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

で表わされる。

これらの曲線を実験値と比較すると、モルタルについてはほぼ実験値を表わし得ている。しかし、コンクリートについては $W/C=66\%$ で、ほぼモルタルの $W/C=80\%$ の曲線に近いことが知ら

表-2 6面乾燥供試体の配合因子等

水セメント比 W/C (%)	30, 35, 40, 45, 50 55, 60, 70, 100
骨材容積率 V_a (%)	60, 65, 70, 75
細骨材率 S/a (%)	46
最大骨材寸法 (mm)	20

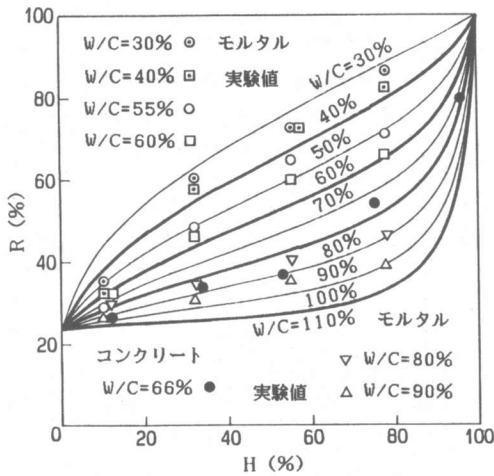


図-1 R-H関係

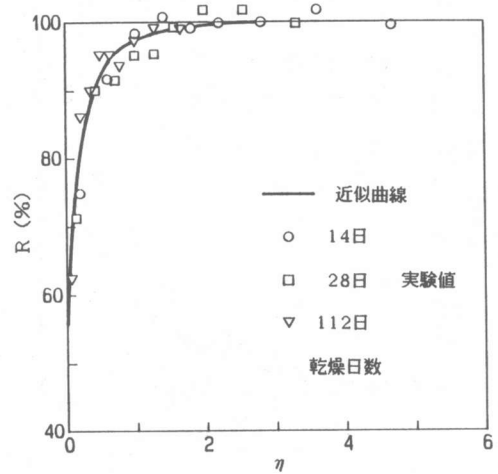


図-2 R-η関係

れる。したがって、以下の計算では、コンクリートに対して実際の W/Cよりも10%大きい値に対応する曲線を用いることにする。

3.3 水分伝達率

水分伝達率は熱伝達率との相似性から求められるが、ごく初期の乾燥面全体が濡れている時期を除いては、乾燥面からの水蒸気拡散に対して全表面が有効ではなく、乾燥面に開いている空隙の割合に関係するものと思われる。したがって、配合により値が変わり得ると考えられるため、実験による乾燥初期の質量減少量に一致するようにトライアルで求めた。

3.4 水分伝導率

阪田らと同様にボルツマン変換を応用して^{2),6)}、含水率測定値をもとに水分伝導率変化を求める。1次元の乾燥過程で、いくつかの時点・位置での相対含水率が知られれば、相対含水率は変数

$$\eta = x / (2\sqrt{t}) \quad \dots\dots\dots(7)$$

に対してある曲線を描く。図-2には1面乾燥供試体(1)の例を示してあり、測定値にバラつきはあるがほぼ一定の曲線に沿っていることがわかる。この曲線を基にして次式

$$D_{R=R_2} = 2 \left(\frac{d\eta}{dR} \right)_{R=R_2} \int_{R_2}^{100} \eta dR \quad \dots\dots\dots(8)$$

により任意の相対含水率 R₂に対する水分伝導率を求めることができる。(8)式を計算するには、Rを適当なηの関数として表わすのがよいが、次の双曲線を用いた。

$$R = 100 \{ 1 + f - a / (\eta + b) \}^2 \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここで、a, b, fは定数であり、R=100%となるηすなわち η₁、雰囲気相対湿度に対応するη=0での相対含水率、実験値と関数値の差の2乗を最小にするこの3条件から定まる。

計算結果を D₁すなわち R=100%でのDに対する比で表わせば、W/C=50~70%の範囲では配合の違いによらず同一の曲線、

$$D/D_1 = 1 / \{ 22(1 - R/100) + 1 \}^{1.4} \quad \dots\dots\dots(10)$$

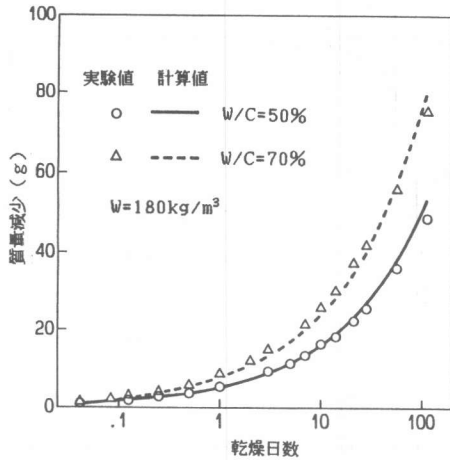


図-3 1面乾燥の質量減少

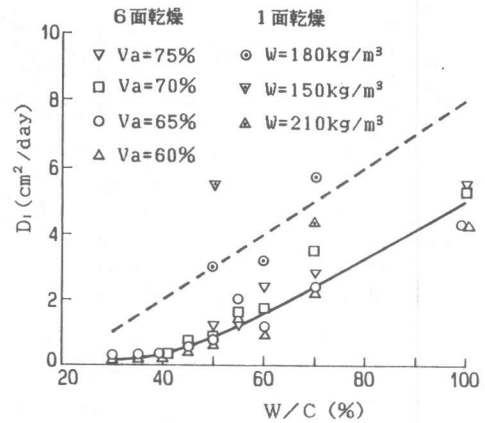


図-4 D_1 - W/C 関係

となる。

4. 1面乾燥

4.1 実験結果との比較

1面乾燥供試体(1)を対象とし、対称性から全体の1/8を取り上げた計算モデルにより解析した。諸定数は前章に示したように扱い、コントロールボリューム法により離散化し、時間積分は完全陰解法、時間さざみを6分とした。ここで、コントロールボリューム法とは、分割された部分領域(コントロールボリューム)内での重み関数を1に他を0とした重みつき残差法である。

図-3は、質量減少の実験値と計算値の比較であり、両者が良く一致していることがわかる。もちろん、水分伝導率を定める際に、質量減少量が一致するように η_1 を選んだのであるが、対比期間全体にわたって良く一致していることは手法の妥当性を裏付けるものと思われる。

4.2 水分伝達率および飽水時の水分伝達率

任意相対含水率の水分伝達率 D を D_1 に対する比で表わすと、 R に対する変化が配合によらず同一の曲線で表わし得ることから、 D_1 が知られば水分移動の解析が可能となる。 D_1 は、コンクリートの水セメント比、混和剤の種類、骨材の粒度、締め固めの程度、材令等の影響を受けると考えられる。ここでは水セメント比を主要変数として D_1 の変化を調べてみる。

本実験で対象としたコンクリート5種類について求めた結果は図-4である。データ数が少なく、また、バラつきもあるが、単位水量の少ない ($W=150\text{kg/m}^3$) を除けば、ほぼ直線的な関係が認められる。

同様に、水分伝達率を水セメント比との関係で示したのが図-5である。大小関係が水分伝達率と入れ替わっているものもあるが、図-4とほぼ類似の関係が認められる。図中の直線は、式

$$\alpha_m = \gamma/2+13 \quad \dots\dots\dots(11)$$

で表わされる。ただし、質量減少量に対し水分伝達率の大小は、乾燥のごく初期には大きく影

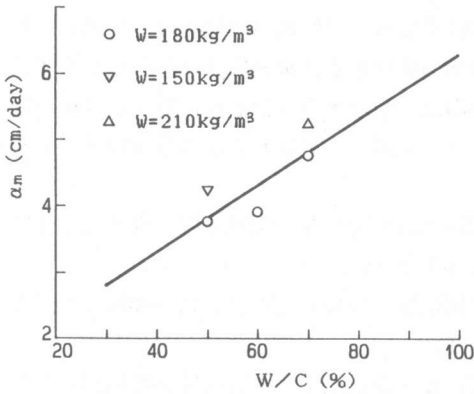


図-5 α_m -W/C関係

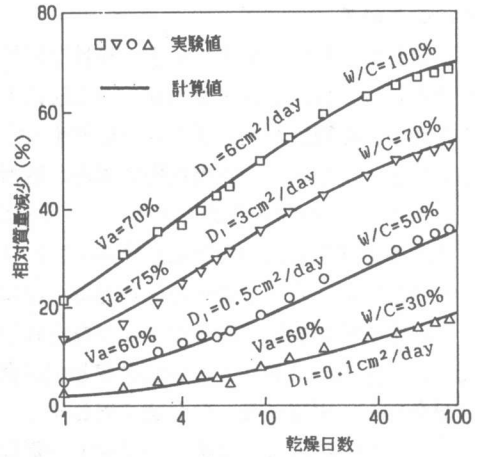


図-6 6面乾燥の水分減少

響するが、時間とともに急速にその影響が小さくなるのが、実際の計算から知られる。

5. 6面乾燥

前章の D_1 -W/C関係を表わす図-4で、測点の数が少ないのを補うため、また6面すべてから乾燥させた場合の本解析法の適用性を調べるために、以下の実験と解析を行った。

6面乾燥を扱うには、コンクリート打ち込み方向との関連で水分伝導率の方向依存性を調べる必要がある。そのため、 $10 \times 10 \times 40$ cmの供試体から $10 \times 10 \times 10$ cmの供試体を切り出し、Aは打ち込み時両側面を、Bは打ち込み面および底面を残し、いずれも他の4面をシールして乾燥による質量減少を調べた。その結果、A、Bの差は無視できる程度であり、水分移動に関して等方的に扱って良いことが知られた。

熱伝達率は、水平面が垂直面の半分近くになることが知られているが、⁸⁾水分伝達率も同様であるかどうかは必ずしも明らかではない。また、仮に水平面の水分伝達率が垂直面の半分であったとしても、その影響は乾燥のごく初期を除いては無視できる程度である。したがって、水平面と垂直面の差を無視することができ、計算モデルは供試体全体の $1/16$ で済ませることができる。

実際の計算では、水分伝達率には式(11)を用い、 D_1 をパラメータとして適当な値に対して計算し、計算値と実験値の比較からその配合に対する D_1 を定めるのである。これから定めた D_1 をW/Cに対してプロットしたものが図-4である。図中には D_1 とW/Cの関係を表現できる曲線を示してあるが、1面乾燥の結果から計算された D_1 に比べ6面乾燥のそれは小さい値が得られている。配合が同じであれば、1面乾燥か6面乾燥にかかわらず D_1 が同じになるはずであるが、このような差が生じた原因は不明である。同じ水セメント比では、単位水量の大きい方が D_1 が小さいことが、1面乾燥・6面乾燥共通に認められる。

図-6は、水分減少量の時間的な変化を、全水分量に対する割合で表わしたものである。実験値は計算に用いた D_1 にもっとも近いものを示してあるが、配合、時間によらず良く両者が一致していることがわかる。

6. あとがき

コンクリートやモルタルの水分移動を解析する際に必要となる具体的な資料を提供することを目的とし、コントロールボリューム法による数値計算ならびに乾燥の実験を行って検討した。その結果、広範囲な水セメント比に対する水分伝導率の変化および水分伝達率の変化を示すことができた。これらの結果を用い実際に解析する手順は、当該水セメント比に対する D_1 を図-4から、 α_m を図-5から求め、 D/D_1 は式(10)を用い、(2)式を境界条件(4)式と初期条件(3)式のもとに数値解析すればよい。

その他にもいくつかの新しい知見ならびに現象解明上の示唆となる実験結果を得ることができた。本研究の範囲で明らかになった点は以下のものである。

(1) 乾燥過程における水分伝導率と相対含水率の関係は、少なくとも $W/C=50\sim 70\%$ の範囲では配合によらずほぼ同一の曲線で表わすことができる。

(2) 本解析法により算出した質量減少量は、1面乾燥・6面乾燥ともに広範囲な配合に対し100日までの範囲で実験結果に良く一致する。

(3) 質量減少量の計算値にもっとも大きく影響するのは、平衡含水率曲線から定まる乾燥面の相対含水率である。

(4) ボルツマン変換は、水分伝導率を求める方法として有効である。

ただし、解析にあたってもっとも重要な相対湿度・相対含水率の関係について資料が十分でないため、さらに研究の必要がある。

謝辞：本研究に関する実験の一部は、岩手大学大学院工学研究科生佐藤嘉一郎君（現オリエントル・コンクリート K. K. ）および同卒業研修生寺嶋敏行君が行ったものである。ここに記して謝意を表わします。

参考文献

- 1) 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，投稿中
- 2) 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.
- 3) 中村泰人・他：新建築学体系10，彰国社，pp.105-182,1984.
- 4) 原田有・仕入豊和・椎名国雄：含湿に伴うコンクリートの容積変化，日本建築学会大会学術講演要旨集，No.76，p.33,1962.
- 5) 原田有・仕入豊和・椎名国雄：2，3の砕石コンクリートの含湿に伴う容積変化，日本建築学会論文報告集，No.103，p.39,1964.
- 6) Crank, J. : The Mathematics of diffusion, Oxford at the Clarendon Press, 1955.
- 7) Patankar, S. V. (水谷・香月訳)：熱移動と流れの数値解析，森北出版，1983.
- 8) 日本機会学会：伝熱工学資料 第3版，1975.