

モルタルの乾燥・吸湿・吸水過程における水分移動

WATER MOVEMENT WITHIN MORTAR DUE TO DRYING AND WETTING

秋田 宏*・藤原忠司**・尾坂芳夫***

By Hiroshi AKITA, Tadashi FUJIWARA and Yoshio OZAKA

The distributions of water content within mortar specimens were observed when water moved in one direction under three environmental conditions, namely drying, moisture absorption and water absorption. Numerical results were compared with the experimental data in order to examine whether the diffusion theory with non-linear equation is adequate for description of the behavior of the water movement. From the comparison, it is concluded that the diffusion theory is applicable to the above three conditions when diffusion coefficients and boundary conditions are suitably chosen. The mechanism of water movement within mortar is also discussed.

Keywords: water movement, drying, wetting, diffusion, mortar

1. ま え が き

コンクリート中の水分移動については、主として乾燥収縮やクリープのメカニズムを解明する立場からの研究がなされてきた^{1)~5)}。また、原子炉の格納容器では中性子の透過性を判断するために含水率を知る必要があり^{6),7)}、貯水槽や海中建築物では漏水を問題とするために透水性を知る必要があるが、そのためにも水分移動をとらえることが重要となる。さらに、水分移動のメカニズムが詳しく知られれば、それが熱的性質に及ぼす影響や、塩害における塩分の移動あるいはアルカリ骨材反応の程度等を知ることも可能になると思われる。

コンクリート中の水分移動を拡散現象としてとらえ、当初は線形拡散方程式による解析が試みられた。しかしながら、多孔質体中の水分移動には、高含水状態における毛管水移動、低含水状態における水蒸気拡散および中間の共存状態等の異なった移動形態が含まれる。したがって、これらを同一の拡散方程式で扱うとすれば、そ

の拡散係数は含水状態により大きく変化するため、拡散係数を一定とみなす線形方程式では現象を表わし得ない。そのため、拡散係数を含水状態の関数とする非線形拡散方程式の適用が考えられたが^{8)~12)}、基礎式や諸係数の取扱い方が確立したとはいえず、実験結果との適合性に関する検討も十分ではない。

本稿では、コンクリート中の水分移動について知るための前段階として、まず実験上取扱いの容易なモルタルについて実験的ならびに解析的に検討した。すなわち、乾燥過程および吸湿・吸水過程に関する実験結果と、一次元の非線形解析とから、水分分布や拡散係数等の性質を調べることにより、水分移動のメカニズムを明らかにすることを目的とした。特に、乾燥ばかりではなく吸湿・吸水過程をも含めて総合的に検討したこと、および吸湿と吸水の区別を明確にしたところに特色がある。

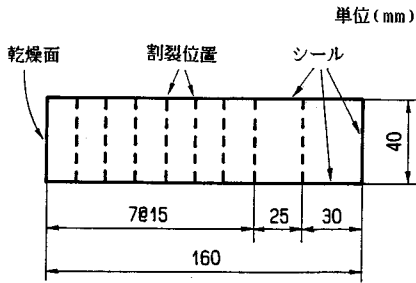
2. 実験概要

本研究では、水分移動をモルタル内部の含水率分布の変化としてとらえ、この含水率分布を測定するものである。図-1に寸法を示すように、4×4×16 cmの角柱供試体を用いた。配合は水セメント比53%、細骨材容積率53%とし、早強セメントを用い養生期間を7日とした。これは、本実験の期間中における水和の進行は小さ

* 正会員 工修 東北工業大学教授 工学部土木工学科
(〒982 仙台市太白区八木山香澄町 35-1)

** 正会員 工博 岩手大学助教授 工学部土木工学科
(〒020 盛岡市上田 4-3-5)

*** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科
(〒980 仙台市青葉区荒巻青葉)



図一 供試体の寸法

く、それが含水率分布に及ぼす影響が無視できると判断したためである。

これらの供試体を用い乾燥過程は飽水状態から、吸湿・吸水過程は105°Cでの炉乾燥による絶乾状態からスタートした。炉乾燥することにより、供試体内部の空隙に変状を与え、ひいては微細なひびわれを生じさせる可能性はあるが、ここでは含水率の定義に添った条件で実験することを優先したものである。これらを所定の日数乾燥・吸湿・吸水させ順次割裂して、その時点の質量と絶乾質量との差から含水率分布を求めた。この方法は、割裂厚さの平均値しか得られないこと、それぞれの時点で割裂する供試体が同じものでないこと、供試体を多数用意する必要があること等が欠点であるが、最も直接的で確実な方法といえる^{13),14)}。

一次元の水分移動を実現するために、乾燥面あるいは吸湿・吸水面を除く5面(ただし吸水試験用供試体は4面)にラップフィルムを巻き、さらにパ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で乾燥後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、室温を20°Cに固定し、相対湿度は乾燥時を60%、吸湿時を100%、吸水時は吸水面を直接水に触れさせ対面を相対湿度60%の霧囲気とした。ここで、湿度の計測には電子式温湿度計を用い、相対湿度100%は、デシケーター底部に水槽を置き、下端を水槽に浸した布を4周に張りめぐらすことにより実現した。これらの環境中においた供試体を、所定の時期にそれぞれ3体ずつ割裂し、その平均を実験値とした。

3. 解析理論

(1) 水分移動の基礎方程式

コンクリートのような多孔質体中の水分移動は、液相水分、気相水分(水蒸気)、空気および熱の4成分の同時移動として扱うのが基本である。また、水分移動の駆動力となるポテンシャルについては、化学ポテンシャルあるいは相対湿度を用いるのが直接的である^{15),16)}。しか

しながら、材料および空隙率等が同質な固体を対象とし、含水率と相対湿度の間に何らかの関数関係があるならば、変数変換により含水率をポテンシャルとみなすことができる¹⁷⁾。ここでは、割裂による含水率測定実験と対応させるため、含水率による表式を採用する。ただし、含水率をそのまま用いるのは、同じ飽水時でも供試体により差が生じて一般的な取扱いに不便であるため、水分の保有状態をより直接的に表わす変数と考えられる相対含水率¹⁸⁾

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

を用いる。ここで、 ψ :含水率、 ψ_s :飽水時の含水率である。現段階で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うこととする。また、常温では水の蒸発熱による温度変化の影響が小さいと考えられるため、熱移動を無視し、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。

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

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 :水分伝導率を表わしている。たとえば飽水状態からの乾燥では、これを初期条件

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

境界条件

$$\frac{\partial R}{\partial n} + \alpha_m (H_s - H_0) = 0 \dots \dots \dots (4)$$

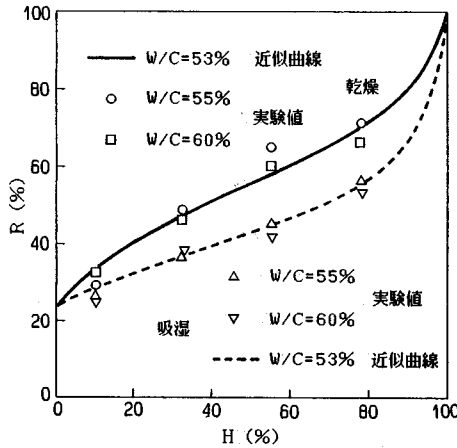
のもとに解けば良い。ここで、 n :乾燥面の法線ベクトル、 α_m :水分伝達率、 H_s, H_0 :乾燥表面および霧囲気の相対湿度である。

(2) 平衡含水率

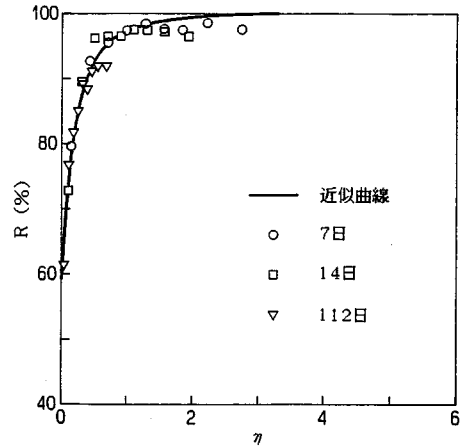
相対含水率を対象として解析するためには、相対含水率と相対湿度の関係が知られていることが必要条件である。また、式(4)における水分伝達の項が、相対湿度で表わされているのも、相対含水率あるいは含水率だけでは現象を表現できないことを示している。逆に相対湿度を対象に解析する場合でも、最終的に含水率を知るためには両者の関係が必要になる。

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、十分な資料はなく、原田らの測定値を示せば図-2のようになる¹⁹⁾。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。

また、相対湿度0%の霧囲気中に長時間放置した供試体でも、105°Cで炉乾燥することによりさらに水分が



図—2 平衡含水率曲線



図—3 R-η関係(乾燥)

減少する。本研究では、すべて絶乾状態を基準としているため、相対湿度0%に対応する相対含水率を知る必要があり、別途実験した結果23.7%が得られた。ここで、相対湿度0%は、デシケーター内の上部に濃硫酸を、下部にシリカゲルを置くことで実現した。

相対湿度と含水率の関係は配合によって異なり、さらに乾燥過程と吸湿過程で異なった経路をたどることが知られている^{20),21)}。図中には、本実験の水セメント比に近い測定値を示してあり、曲線はW/C=53%に対応し、かつ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る。それらは、乾燥過程に関しては、

$$R = 296 / (109 - H) - 447 / (21 + H) + 0.295 H + 42.1 \quad \dots\dots\dots (5)$$

吸湿過程に関しては、

$$R = 359 / (107 - H) - 370 / (32 + H) + 0.189 H + 31.7 \quad \dots\dots\dots (6)$$

であり、以下の計算にはこれらの関係式を用いる。

(3) 水分伝達率

境界条件式(4)に用いられる水分伝達率は、湿気伝達率あるいは表面係数ともよばれ、熱伝達率との相似性から、

$$\alpha_m = \frac{\alpha_c \cdot \rho_v}{C_a \cdot \rho_a} \quad \dots\dots\dots (7)$$

により求められる。ここで、 α_c :熱伝達率、 ρ_v :飽和水蒸気密度、 C_a :空気の比熱、 ρ_a :空気の密度である。熱伝達率として通常用いられる $\alpha_c = 13.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ をもとに算出した α_m は7.46 cm/dayである。

しかしながら、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と思われる。したがって、水分伝達率も配合により値が変わり得ると考えられるため、実験による乾燥の初

期の質量減少量(逸散水分量)に一致するようにトリアルで求めた。なぜならば、水分伝達率が質量減少量に及ぼす影響は、乾燥の初期には大きい、時間の経過とともに急速に小さくなるからである。

計算の結果、乾燥過程については $\alpha_m = 3.4 \text{ cm/day}$ が、同様に吸湿過程については 0.1 cm/day が得られた。乾燥と吸湿で水分伝達率にこのように大きな差が生じたことの理由は明らかではない。

(4) 水分伝達率

水分伝達率は湿気伝達率あるいは単に拡散係数とよばれる場合があるが、ここでは拡散物質を明確にするためにこの呼称を用いる。Bazantらは相対湿度に対する水分伝達率の関係を示しているが、その導出過程あるいは出典を明確にしていない⁸⁾。阪田らはボルツマン変換²²⁾を応用して、含水率測定値をもとに水分伝達率を求める手法を用いている¹¹⁾。ここでは、阪田らの手法に準じたが、その適用にあたってはより詳しい検討内容を示すことにする。

乾燥過程が拡散方程式で表わされるものとすれば、現象が一次元の場合、相対含水率は変数

$$\eta = \frac{x}{2\sqrt{t}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

に対してある曲線を描く。すなわち、相対含水率分布は時間とともに変化するが、変数 η に対して表わすことにより、1つの曲線で近似されるわけである。図—3には相対湿度60%で乾燥させた供試体の例を示してあり、測定値にばら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。したがって、乾燥過程が拡散方程式で扱えること、およびボルツマン変換の適用が可能であることがわかる。この曲線をもとにして

$$D_{R=R_2} = 2 \left(\frac{d\eta}{dR} \right)_{R=R_2} \cdot \int_{R_2}^{100} \eta dR \quad \dots\dots\dots (9)$$

表-1 係数等

	a	b	f	η_1	日数	$D_1 \cdot D_0$
乾燥	0.059	0.38	0.0044	3.3	6	4.2
吸湿	0.021	0.16	0.0037	2.2	13	2.2

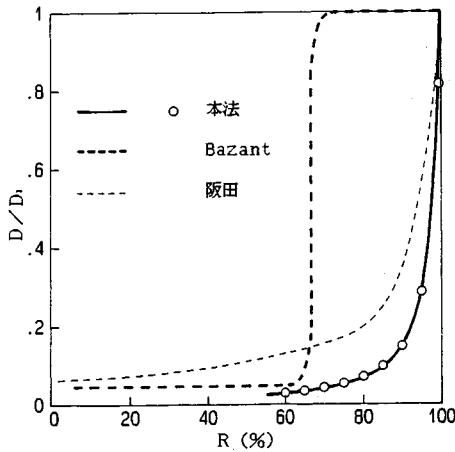


図-4 D-R関係(乾燥)

により、任意の相対含水率 R_2 に対する水分伝導率を求めることができる。式(9)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、ここでは誤差関数、べき関数、双曲線について検討した。その結果、誤差関数とべき関数は、吸湿時について実験値との対応が悪かったため、次の双曲線を用いた。

$$R = 100 \{ 1 + f - a / (\eta + b) \}^2 \dots \dots \dots (10)$$

ここで、 a, b, f は定数であり、 $\eta = \eta_1$ で $R = 100\%$ になること、 $\eta = 0$ で雰囲気相対湿度に対応する相対含水率になること、実験値と関数値の差の2乗を最小にするための3条件から定まる。 η_1 は質量減少量および相対含水率分布が良く近似されるようにトライアルで求めた。これらの値は乾燥・吸湿過程については表-1のようになる。

乾燥過程に関する式(9)の計算結果を、 D_1 すなわち $R = 100\%$ での D に対する比で表わせば、図-4に示す曲線、

$$D/D_1 = 1 / \{ 29(1 - R/100) + 1 \}^{1.4} \dots \dots \dots (11)$$

となる。 D_1 の値は次のように定めた。双曲線を用いた場合、 R が 95% から 100% まで変化する間に、 D は急激に大きくなり 99.5% 付近で極大をとり、100% では 0 となる。そこで、99.5% までの値をプロットし、外挿により 100% に対応する D_1 を定めた。このことは、双曲線が $R-\eta$ 関係を表わす式として、完全ではないことを示している。しかし、前述した他の2関数についても同様に外挿が必要になるため、簡単に近似度の良い双曲線を採用したものである。表-1には乾燥に対する

D_1 および後に扱う吸湿に対する D_0 の値も示してあり、さらに η_1 および最奥の点に対応する乾燥日数(吸湿の場合は吸湿日数)も示してある。この日数は、式(8)に η_1 および最奥の点に対する $x = 16$ (cm) を代入することにより求まる。すなわち、最奥の点で相対含水率が 100% から下り始めるのは乾燥開始後 6 日であり、0% から上り始めるのは吸湿開始後 13 日である。

図-2から知られるように $\partial R / \partial H$ は H に関してかなり変化するが、Bazantらはそれを定数として取り扱っている⁸⁾。したがって、Bazantらの水分伝導率を直接本法と比較することはできないが、 $\partial R / \partial H$ を定数とみなした場合は、乾燥過程について図-4のようになる。したがって、本法により得られた水分伝導率は高含水率領域でBazantらのものとかかなりかけ離れているが、阪田らのものとは似た傾向になっている。 D/D_1 による比較ではなく直接 D を比較すると、本法による値は、高含水率領域でBazantらならびに阪田らの6倍、低含水率領域ではそれらの2倍程度である。

水分伝導率の差が解析値にどの程度影響するのかを、モルタル(本法)とコンクリート(Bazantら)の違いを無視して調べた。すなわち、本法による水分伝導率を用い、変数変換により相対湿度に対する基礎方程式を求め、相対湿度分布を計算してBazantらの結果と比較した。この場合の基礎方程式は、

$$\frac{\partial R}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \left(D \frac{\partial R}{\partial H} \nabla H \right) \dots \dots \dots (12)$$

となり、 $\partial R / \partial H$ が定数であれば、Bazantらの式に一致する。ここでは、解析モデルとして供試体長を 4 cm としたが、乾燥の進行を速くするためであり、また雰囲気相対湿度を 40% としたのは、Bazantらの水分伝導率の特徴(相対湿度 75% あるいは相対含水率 68%

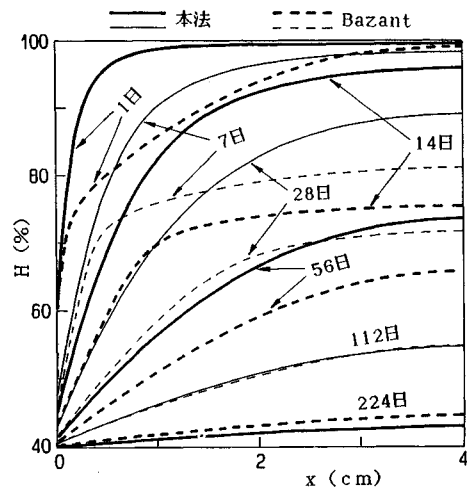


図-5 相対湿度分布

で急変する)が良く現われるように選んだものである。また、Bazantらの D_1 (当該論文では C_1)の値を、112日までの質量減少量が本法と等しくなるように $1.5 \text{ cm}^2/\text{day}$ と定めた。また、境界条件はBazantらと同一、すなわち実乾燥面の外側 0.75 mm の位置に仮想乾燥面を考え、そこでの相対湿度を雰囲気と同じとした。

数値解析はコントロールボリューム法²³⁾により、時間積分を完全陰解法で、時間きざみを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、他を0とおく重みつき残差法である。計算結果は図-5であり、相対湿度分布における両者の差は乾燥の初期28日まではかなり大きい。Bazantらの水分伝導率による計算結果は、乾燥初期の相対湿度減少が大きいこと、75%近傍での勾配変化が目立つことが特徴である。

4. 乾燥過程

図-6は、雰囲気相対湿度60%で乾燥させた供試体に関する、測定相対含水率と計算値との比較である。割裂による相対含水率の測定では、割裂厚さの平均値が得られるため、計算値も対応する平均値で表示してある。図中の実験値が込み合わないところでは、実験値として3供試体の平均値だけでなく、ばらつきの範囲も示してある。実験値のばらつきは小さくはないが、平均値のみを限れば計算値と一致しているといえる。

図-7は、乾燥過程における質量減少量および次章の吸湿過程における質量増加量について、実験値と計算値を比較したものである。実験値に若干のばらつきはみられるが、計算値に良く一致していることがわかる。もちろん、図-6, 7において実験値と良く対応するように κ を定めたのであるが、図-3も含め全体として良く対応していることは、手法の妥当性を示しているものと考

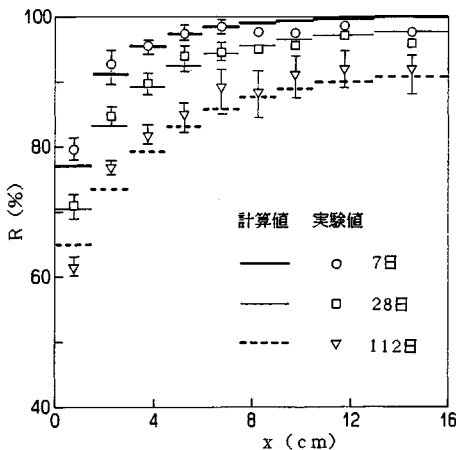


図-6 相対含水率分布(乾燥)

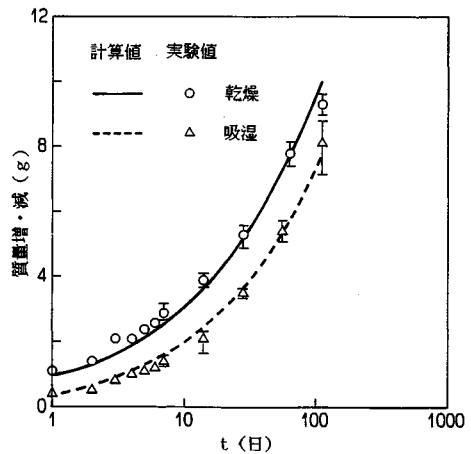


図-7 質量減少あるいは増加

えられる。

ばらつきの範囲は、乾燥あるいは吸湿の初期には小さく表示できないほどであり、乾燥あるいは吸湿日数が増加するにつれ大きくなる傾向があるが、これは供試体ごとの差が現われてきたものと思われる。図-6でもいえることであるが、図上で測点が込み合っていないくばらつきの範囲を表示できる測点が、表示できない測点よりもばらつきが大きい傾向にある。

5. 吸湿過程

吸湿過程について調べるため、炉乾燥後5面をシールした供試体の1面を、相対湿度100%の雰囲気中に曝す実験を行った。当初、図-4の関係をそのまま低含水率領域まで延長して相対含水率分布の計算に用いたが、良い結果は得られなかった。そこで、乾燥過程と同様の手順を踏むために、 $R-\eta$ 関係を求めたのが図-8である。ここで、吸湿面すなわち $\eta=0$ での相対含水率は、次章

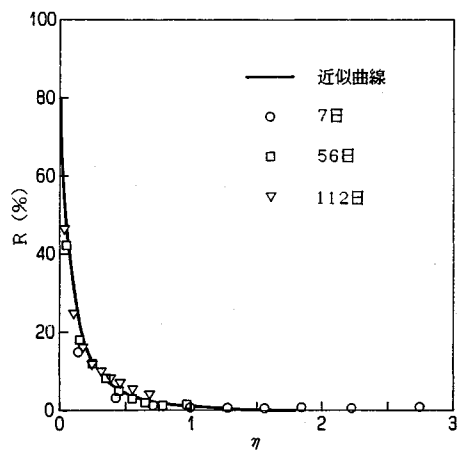


図-8 $R-\eta$ 関係(吸湿)

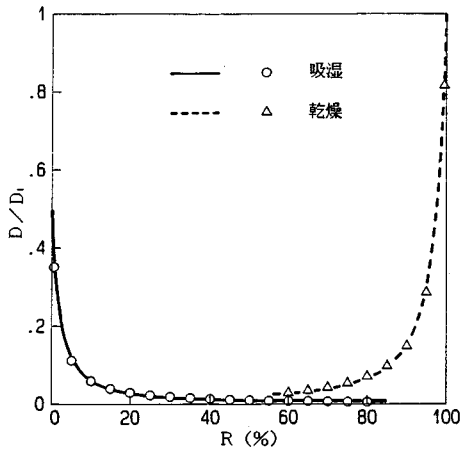


図-9 D-R関係 (吸湿)

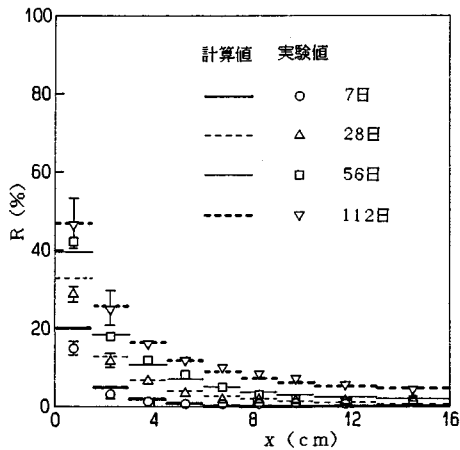


図-10 相対含水率分布 (吸湿)

の吸水過程の結果から判断して、毛管水移動と水蒸気拡散の境目と思われる80%を採用した。このことは、吸湿過程では毛管水移動が起こるほどの含水率にはならないと仮定したことになるが、実際に本実験期間中にはそのような高含水率にはなっていないので、問題はないと思われる。R-ηの近似曲線には式(10)と対称な

$$R = 100 \{ -f + a/(\eta + b)^2 \} \dots\dots\dots(13)$$

を用いた。この場合式(9)に対応するものは、

$$D_{R=R_2} = -2 \left(\frac{d\eta}{dR} \right)_{R=R_2} \cdot \int_0^{R_2} \eta dR \dots\dots\dots(14)$$

であり、計算の結果を乾燥過程のD₁に対する比で表わすと図-9となる。この関係を表わす近似曲線は、

$$D/D_1 = \frac{2.2}{4.2} [41 R/100 + 1]^{1.3} \dots\dots\dots(15)$$

である。同図には乾燥過程の変化も示してあり、D₀すなわち相対湿度0%でのDは表-1にも示したがD₁の半分程度になっている。

このDを用いて計算した相対含水率分布が図-10で

あり、吸湿面近傍で若干のずれが目立つが、それ以外はきわめて良く実験結果と一致していることがわかる。ばらつき範囲はごく一部を示したのみであるが、含水率変化の大きい表面付近では大きく、吸湿日数が大きくなるにつれ大きくなるのが認められる。また、この場合の質量増加量も図-7に示してあるが、実験値と計算値が良く一致している。

6. 吸水過程

解析上の境界条件は、吸水面を直接水に触れさせた場合は吸水面での相対含水率が100%であり、したがって相対湿度も100%となる。吸湿の場合は、雰囲気相対湿度が100%でも、水分伝達による相対湿度低下があるため、吸湿面の相対湿度あるいは相対含水率はある程度小さくなる。したがって、直接毛管水移動が起こるかそうでないかの差となるため、吸水と吸湿とはまるで異なる結果となることが予想される。そこで、吸湿過程とは別に、炉乾燥後4面をシールし、1面を直接水に漬けて吸水させ、対面を相対湿度60%の雰囲気に曝す実験も行った。この場合のR-η関係が図-11であるが、時間にかかわらず1つの曲線で表わすことは無理と思われるため、図に示したような時間ごとに異なる曲線を用いた。ここで、0.5日の場合を例にとれば直線部分について、

$$R = 100 (1 - 0.085 \eta) \dots\dots\dots(16)$$

曲線部分は、図-8の近似曲線を平行移動したものをを用い、

$$R = 100 \{ -0.0037 + 0.021 / (\eta - 2.44) \} \dots\dots\dots(17)$$

で表わされる。正確にはシャープな勾配変化点があるわけではなく、滑らかな変化をしていることが実験値からも読み取れるが、以下の計算を簡単にするためと、後の議論に便利であるため、あえて式(16)、(17)で表わし

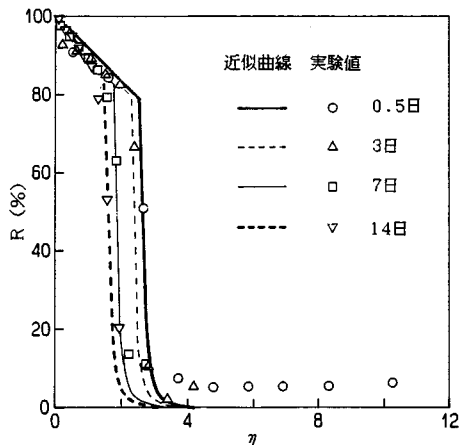


図-11 R-η関係 (吸水)

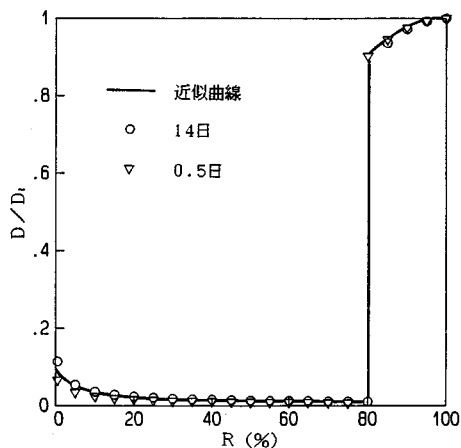


図-12 D-R関係 (吸水)

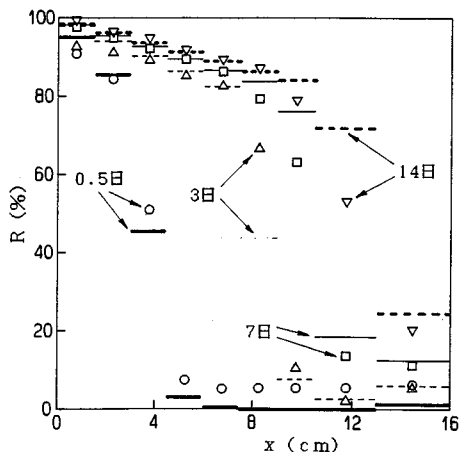


図-13 相対含水率分布 (吸水)

表-2 換算 D_1 等

日数	0.5	3	7	14
D_1	57.0	48.3	35.0	24.6
換算 D_1	57.0	46.6	25.0	14.2
η	2.6	2.3	1.8	1.5
x	3.7	8.0	9.5	11.2

たものである。ここで、高含水率領域の直線部分が毛管水移動に対応するものと思われ、中・低含水率領域で吸湿過程の $R-\eta$ 関係が適合することは、毛管水移動に先だってメニスカスの前面から水蒸気拡散が起きていることを示すものと思われる。

図-11 に示した4曲線から求めた $D-R$ 関係のずれはあまり大きくないので、図-12 のように平均的な1本の曲線で表わしてある。たとえば、 D/D_1 が不連続に変わる相対含水率は78%~82%であるため、平均の80%を用いている。この曲線は、高含水率領域では、

$$D/D_1 = 100 \{1 - 2.5(1 - R/100)^{1/2}\} \dots \dots \dots (18)$$

低含水率領域では、

$$D/D_1 = 100 \{0.004 + 0.0031/(R/100 + 0.095)^{1/2}\} \dots \dots (19)$$

で表わされる。ただし表-2 に示したように、時間によって D_1 の値は半分以下にまで低下するので、解析上はそれぞれの時点に対しそれぞれの D_1 を用い、個別に計算する必要がある。しかし、次のような換算 D_1 を用いることにより、連続的に計算することができる。すなわち、3日の相対含水率を算出するには、最初から3日の D_1 を用いればよいのであるが、すでに0.5日までは0.5日の D_1 を用いて計算しているため、その差を相殺するため3日の換算 D_1 として次式、

$$\begin{aligned} & (\text{半日の } D_1) \times \text{半日} + (\text{3日の換算 } D_1) \times 2.5 \text{ 日} \\ & = (\text{3日の } D_1) \times 3 \text{ 日} \end{aligned}$$

を満足するように求めるものである。

これを用い、吸水面の境界条件として式(4)ではな

く、相対含水率を100%に固定して相対含水率分布を計算し、実験結果と比較したのが図-13である。全体的に両者は良く一致しているが、相対含水率の急変部ではずれが目立つ。しかし、この部分は割裂位置のほんのわずかなずれが大きな誤差を招くはずであり、計算値との一致が悪くなるのはやむを得ないところである。また、7日および14日については、勾配変化点を滑らかに結ばなかったためと思われるずれが認められる。しかし、本来は $D-R$ 関係として別個の4曲線を用いるべきものを平均化した1曲線によったこと、勾配変化点近傍を単純化したこと、換算 D_1 を用いたこと等を考えれば、予想以上の良い結果だといえる。

また、吸水面の対面を相対湿度60%の雰囲気に曝したため、計算ではこの近傍に吸湿過程の水分伝導率を用いている。したがって、中・低含水率のところでは、同じ相対含水率でも吸湿過程と吸水過程では水分伝導率が異なることになるが、吸水過程では毛管水移動と水蒸気拡散が加算されたものと考えることができる。また、乾燥開始0.5日後で計算上はまだ相対含水率が0の位置に、実験では若干の水分がみられるが、実験誤差であるのか実際に水分が速く移動できる毛管が存在するのかは明らかではない。

7. 毛管水移動のメカニズム

吸水過程で、時間の経過とともに水分伝導率が低下することは、次のように考えられる。すなわち、時間が直接の変動要因ではなく、吸水面からメニスカスまでの距離が時間とともに長くなり、管壁の摩擦抵抗合力がそれにつれて大きくなるためと考えられる。

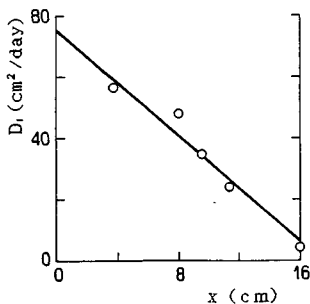
モルタル内部の毛管水移動について考える際に、簡単のためにまっすぐな毛管の束を想定し、それらの半径はある限界 r_0 以下のものがきわめて少ないと仮定する²⁴⁾。

メニスカスによる負圧すなわちサクシヨンプレッシャ²⁵⁾は、半径が小さいほど絶対値が大きいため、細い毛管ほど水の進行が速く、メニスカスの位置も前に（吸水面から遠く）なる。しかるに、毛管内の水分量は半径の2乗に比例するため、半径が小さくなれば急激に小さくなり、かつ r_0 より細い半径では毛管の数も少なくなるため、相対含水率に影響するのは r_0 より太い毛管に限られるものと思われる。したがって、図—11, 13の勾配変化点は半径 r_0 の毛管のメニスカスの位置だと考えることができる。当然、半径が r_0 より大きい毛管のメニスカスはより後ろにあるため、勾配変化点から吸水面に向かって相対含水率が增加するわけである。

D_1 は相対含水率 100 % のときの水分伝導率であるから、吸水面では D_1 で水分移動が起こっていると考えられる。たとえば、半径 r_0 の毛管に着目すると、その毛管水の流速は吸水面からメニスカスまでの距離 x に応じて変化する。したがって、すべての毛管に関する総和に対応する D_1 も、 x に応じて変化するものと考えられる。

図—14は、吸水面からメニスカスまでの距離 x に対応する D_1 を示したものである。 x は各時間に対し、図—11の勾配変化点に対応する η から式(8)で求めたもので、 η とともに表—2に示してある。測点数が少なく若干ばらついているが、メニスカスまでの距離に応じて D_1 がほぼ直線的に変化しているのが認められる。 $x = 16$ cmの位置には乾燥過程に対する D_1 を示してあるが、吸水過程の測点を近似する直線に近い位置にあることは興味深い。すなわち、乾燥開始時の乾燥面の水分伝導率が、メニスカスが対面まで到達したときの吸水面での水分伝導率に等しいことを表わし、毛管水が完全につながっている場合には起こり得ることである。ただし、データ数が少ないので、さらに実験により確かめてみる必要がある。

また、同じ毛管水移動が起こっていても、乾燥過程は相対含水率の低下に伴い急激に水分伝導率が小さくなることも理解できる。すなわち、乾燥過程で乾燥面のメニ



図—14 D_1 の変化

スカスによりその毛管内の水が移動するためには、外部から水の供給がないので、引っ張り合いに負けたメニスカスが後退して空気が入り込まなければ、毛管内の水の移動は起こり得ない。したがって、乾燥面に平行な任意の断面に着目すれば、メニスカスがその断面よりも後退した毛管が増えるに従い、すなわち相対含水率が低下するに従い、水蒸気拡散の占める割合が増え、水分伝導率は低下することになる。

8. あとがき

コンクリートやモルタル内部の水分移動のメカニズムを明らかにすることを目的として、乾燥・吸湿・吸水の実験、およびコントロールボリューム法による数値計算を行って検討した。その結果、解析手法を整理して示すことができ、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も得られた。本研究の範囲で明らかになった点は以下のようである。

(1) 吸水過程すなわち直接水に触れさせることと、吸湿過程で相対湿度 100 % の空気に触れさせることは、毛管水移動が起こるか起こらないかの差となり、水分移動の速さがまるで違うため、明確に区別する必要がある。

(2) 乾燥過程と吸湿過程は解析上まったく同一の手法で扱うことができるが、吸水過程は毛管水移動が卓越するため、異なる取扱いが必要である。

(3) 乾燥および吸湿については、相対含水率に依存し時間・位置によらない水分伝導率で解析することができる。

(4) 水分伝導率は、中含水率領域では乾燥・吸湿にかかわらずほぼ一定値 $0.1 \text{ cm}^2/\text{day}$ であり、吸湿時の低含水率領域では約 20 倍、乾燥時の高含水率領域では約 40 倍となり、吸水時の高含水率領域では約 600 倍にもなる。

(5) 水分伝達率は、乾燥過程と吸湿過程で異なる値を取り、本実験の結果から推定すると、前者では後者の 30 倍程度となる。

(6) 直接水に接して吸水させた場合の相対含水率分布から、毛管水移動に先行して水蒸気拡散が起こっていることが推定される。

(7) 吸水過程の水分伝導率は、吸水面からメニスカスまでの距離に応じて減少する傾向がみられ、解析上は時間により変化する水分伝導率で扱うことができる。

(8) ボルツマン変換は、乾燥、吸湿、吸水いずれに対しても、水分伝導率を求める方法として有効である。

ただし、解析にあたって重要な相対湿度・相対含水率の関係および相対湿度 0 % での平衡含水率について資料が十分でないこと、実験そのものがかなりばらつきのある大きいものであること、他の配合や寸法、環境条件に関

しても調べる必要があること等のためさらに研究の必要がある。

謝 辞：本研究に関する主要な実験は、岩手大学大学院工学研究科 佐藤嘉一郎君（現・オリエンタルコンクリート(株)）および小西俊之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) 原田 有・仕入豊和・椎名国雄：乾燥に伴うコンクリート部材の湿気こう配に関する研究，セメント技術年報，Vol. 22, pp. 297~301, 1968.
- 2) 椎名国雄：コンクリートの内部湿度と変形，コンクリート・ジャーナル，Vol. 7, No. 6, pp. 1~11, 1969.
- 3) 中西正俊：コンクリートおよびモルタルの乾燥収縮過程を拡散方程式で表示したときの諸係数について，日本建築学会論文報告集，No. 190, pp. 11~17, 1971.
- 4) 後藤幸正・藤原忠司・飯泉 章：乾燥過程におけるコンクリート内部の含水状態について，セメント技術年報，Vol. 29, pp. 175~178, 1975.
- 5) 後藤幸正・藤原忠司：軽量コンクリートの乾燥収縮応力について，土木学会論文報告集，No. 287, pp. 95~106, 1979.
- 6) Hughes, B. P., Lowe, I. R. G. and Walker, J. : The diffusion of water in concrete at temperatures between 50 and 95°C, Brit. J. Appl. Phys., Vol. 17, pp. 1545~1552, 1966.
- 7) 三橋博三, Wittmann, F. H. and Roelfstra, P. : 高温下のコンクリートの水分拡散に関する理論的研究，セメント技術年報，Vol. 41, pp. 495~498, 1987.
- 8) Bazant, Z. P. and Najjar, L. J. : Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete, Materials and Structures, Vol. 5, No. 25, pp. 3~20, 1972.
- 9) Kasperkiwicz, J. : Some aspects of water diffusion process in concrete, Materials and Structures, Vol. 5, No. 28, pp. 209~214, 1972.
- 10) 永松静也・佐藤嘉昭：非線形拡散方程式による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.
- 11) 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.
- 12) 松本 衛・松下敬幸：ハイグロスコピックの領域での気泡コンクリートの吸放湿性状，日本建築学会論文報告集，No. 306, pp. 65~71, 1981.
- 13) 鎌田英治・田畑雅幸・中野陽一郎：コンクリート内部の含水量の測定，セメント技術年報，Vol. 30, pp. 288~292, 1976.
- 14) 藤原忠司・佐藤嘉一郎・小西俊之：乾湿に伴うコンクリート内部での水分移動について，セメント技術年報，Vol. 42, pp. 427~430, 1988.
- 15) 中野泰人ほか：新建築学大系 10, 彰国社，pp. 105~182, 1984.
- 16) Huang, C. L. D., Siang, H. H. and Best, C. H. : Heat and Moisture transfer in concrete slabs, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 22, pp. 257~266, 1979.
- 17) 桐柴良三・林 信也：乾燥，化学工学，Vol. 25, No. 9, pp. 675~690, 1951.
- 18) CEB-Guide to durable concrete structures, No. 166, 1985.
- 19) 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（予備実験），日本建築学会論文集，No. 76, p. 33, 1962.
- 20) Powers, T. C. and Brownard, T. L. : Studies of the physical properties of hardened portland cement paste, J. ACI, Vol. 18, No. 2, pp. 101~132, 249~336, 469~504, 1946, pp. 549~602, 669~712, 845~880, 933~992, 1947.
- 21) 空気調和・衛生工学会：空気調和・衛生工学便覧 I, 11 版，オーム社，pp. I-193~202, 1987.
- 22) Crank, J. : The Mathematics of diffusion, Oxford at the Clarendon Press, 1955.
- 23) Patankar, S. V. (水谷・香月訳)：熱移動と流れの数値解析，森北出版，1983.
- 24) Neville, A. M. (後藤幸正・尾坂芳夫監訳)：コンクリートの特性，技報堂出版，1979.
- 25) 大谷茂盛・前田四郎：湿った粒状物質内における水分移動の機構—恒温・定常蒸発下における検討，化学工学，Vol. 28, No. 5, pp. 362~367, 1964.

(1989. 8. 21・受付)