

論文 不飽和モルタル中の水分移動に関する実験的研究

木全 博聖*1・石川 靖晃*2・大下 英吉*3・田邊 忠顕*4

要旨: 不飽和モルタル中の水分移動に関する実験及びその解析的評価を行う。コンクリート中の空隙湿度の経時変化を実験的に明らかにするため、多孔質材料中の水分移動測定装置を新たに開発した。また解析では、コンクリート骨格に作用する応力と空隙水圧の力の釣合いを考慮した連成拡散方程式を立て、空隙の相対湿度の時間変化を追った。

キーワード: 相対湿度、水分移動測定装置、小電極、比抵抗、Gibbs の自由エネルギー

1. はじめに

コンクリート中の水分移動現象を捉えることは、初期応力や乾燥収縮・クリープなどの予測を行う上で重要である。また近年においては、空隙水の移動がコンクリートの強度等に大きな影響を与えていることが注目され始めており、コンクリート中の水分移動に関する研究は極めて重要なものとなっている。

コンクリート中の水分移動に関する実験的研究は数多く行われているが、それらは主に乾燥過程についてのものであり[1]、吸水・吸湿過程について行われているものは数少ない。そこで本研究では、多孔質材料中の含水状態を経時的かつ局部的に測定する事のできる試験装置を新たに開発し、モルタルの吸湿実験を行う。併せて解析的評価を行い、不飽和モルタル中の水分移動メカニズムおよび試験装置の有効性についての検討を行った。

2. 多孔質材料水分移動測定実験

2.1 小電極の作製とキャリブレーション

ある多孔質材料に2本の電極を埋め込み、電圧を与えると、空隙に水分を含んだ材料が導体となって回路に電流が流れる。材料の抵抗値は含水状態や温度状態によって変化することから、もしコンクリート中に電極を埋設し、回路に電圧を与えて抵抗値を測定することができるならば、コンクリート空隙内の含水状態を知ることが可能となる。

非破壊によってコンクリートの空隙湿度を局部的に測定するためには、小電極を用いた測定が現在のところ最も簡便な方法であると考えられる[1]。そこで本研究では、モルタル空隙中の含水量測定を、ステンレス製の小電極を用いて行うこととした。

コンクリート中の含水状態を表す尺度としては、質量含水率などが一般的である。しかし、空隙中の相対湿度～含水率の関係が明らかとなっていれば、空隙の相対湿度はコンクリートの含水率を間接的に表すことができる。そこで、本研究ではモルタル空隙中の含水状態を相対湿度で表すこととする。

*1 名古屋大学大学院 工学研究科地圏環境工学専攻 (正会員)

*2 名城大学助手 理工学部土木工学科、工修 (正会員)

*3 防衛大学校講師 土木工学科、工博 (正会員)

*4 名古屋大学教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)

図-1に、本研究で用いた水分量測定のための小電極を示す。この電極は直径1.6mmのステンレス製で、絶縁されていない電極のむき出し部分の長さは50mm、電極の中心間距離は4.5mmである。この電極に電圧を与えると、ステンレス棒のむき出し部分に挟まれたモルタルが導体となって電流が流れる。回路に流れる電流を測定するとオームの法則から抵抗値 R が求められるが、この時 R はモルタルの比抵抗 ρ と電極の形状係数 c の積の形で次のように表される。

$$R = \rho c \quad (1)$$

図-1に示す電極の形状係数は計測の結果、 $0.15[1/cm]$ であった。

空隙湿度を抵抗値で知るためには、あらかじめ任意の空隙湿度状態にあるモルタルの比抵抗をキャリブレーションしておく必要がある。図-1の小電極をキャリブレーション用供試体(70×50×5mm)に埋め込み、この供試体を任意の湿度の雰囲気中にさらし、雰囲気と空隙内の相対湿度 H が平衡状態に達して電極間の抵抗値がほぼ一定となる4~5日後に比抵抗 ρ を測定すると、図-2に示すようなキャリブレーション曲線が得られる。この曲線の近似式は、

$$H = -0.1874 \ln(\rho) + 2.6181 \quad (2)$$

となった(相関係数0.99)。

印加電圧は、イオン分極防止のためになるべく低い交流電圧を採用することが望ましいとされている。しかし印加電圧が小さすぎると電流の測定が困難となるため、低含水状態のモルタルの抵抗測定は難しくなる。直流電圧を与えた場合は測定機器の特性上、交流電圧を与えた場合に比べてより微弱な電流を測定することが可能であるため、低含水状態の供試体の抵抗値を測定することが可能となる。しかし、イオン分極が生じてしまうために安定した測定を行うことができなかった。そこで、今回の実験では印加電圧として交流60[Hz]5[V]を採用した。

2.2 実験方法

今回新たに開発した不均質材料水分拡散測定システムの概要を図-3に示す。このシステムの第一の特徴は、自由エネルギー水準の異なる、任意の温湿度の気体を発生させることができることにある。

セルの概略図を図-4に示す。このセルは、中央部に設置した供試体によって上下に2分された小室内の気体の湿度及び温度を自由に変化させることができるため、異なる自由エネルギー水準の気体を、供試体の上下2面に触れさせることを可能としている。今回行う実験では、上の小室を温度25℃・相対湿度0.6(湿度60%)、下の小室を温度25℃・相対湿度0.9(湿度90%)になるように温湿度を設定した。モルタル供試体(W/C=0.65, S/C=4)の形状は直径200mm、厚さ10mmの円柱形である。供試体は、水和反応の影響をできるだけ少なくするために40℃の水中で1週間

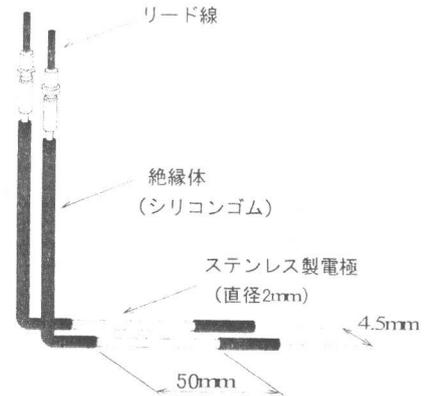


図-1 小電極の形状及び寸法

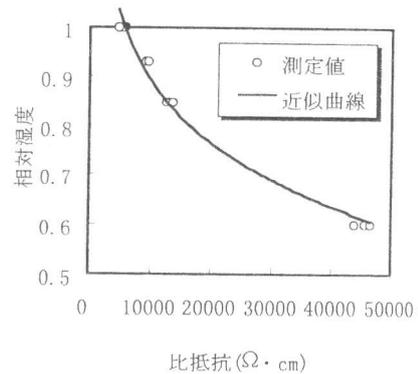


図-2 キャリブレーション曲線

養生を行った後、温度 25℃・相対湿度 0.6 の雰囲気中で気中養生を行った。相対湿度測定用の小電極は、供試体底面からそれぞれ 2mm、4mm、6mm、8mm の深さに、それぞれ 2 組ずつ計 8 組埋設した。

3. 実験供試体の解析

通常、コンクリート中の水分移動解析は、差分もしくは有限要素法を用いて拡散方程式を解いて行う。本研究では、コンクリート骨格に作用する有効応力と間隙水圧の力の釣合いも考慮した連成拡散方程式を、有限要素法を用いて解くことにより水分移動解析を行う[2]。

多孔質材料であるコンクリートの内部に間隙水が存在する時、その水圧がコンクリート材料粒子を圧縮し、体積ひずみを発生させる。コンクリート内の全応力 $\{\sigma\}$ 、有効応力 $\{\sigma'\}$ および間隙水圧 p の関係は、クロネッカーの記号 $\{m\}$ を用いて次のように表される。

$$\{\sigma\} = \{\sigma'\} - \{m\}p \quad (3)$$

この時の符号は、応力については引張を、間隙水圧については圧縮を正としている。

移動する間隙水の流束 J は、単位体積当たりのGibbsの自由エネルギー G の勾配の関数であると仮定すると [3]、

$$J = -\tilde{c}\nabla G \quad (4)$$

ここで、 \tilde{c} はコンクリート中の浸透率を表す定数である。単位質量当たりの間隙水分のGibbsの自由エネルギー G は、相状態によって

$$\text{液相 } G = \frac{p}{\rho} + G_{sat}(T) \quad \text{気相 } G = \frac{RT}{M} \ln H + G_{sat}(T) \quad (5)$$

となる。ここで、 ρ 、 p 、 R 、 M 、 T はそれぞれ水の単位体積質量、間隙水圧、気体定数、水の分子量、絶対温度であり、 $G_{sat}(T)$ は気相と液相が相平衡状態にある時のGibbsの自由エネルギーである。そして H は相対湿度であり、

$$H = \frac{p_v}{p_{sat}(T)} \quad (6)$$

と表される。ここで、 p_v は気相の蒸気圧、 $p_{sat}(T)$ は飽和水蒸気圧を表している。

今、温度 T が場所によらず一定である場合を考えると、式 (4) で表される間隙水の拡散速度 J は次式のように相対湿度の関数として表される。

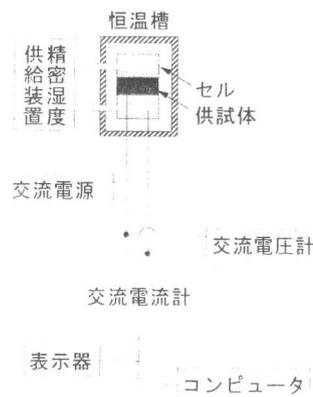


図-3 測定システム概要図

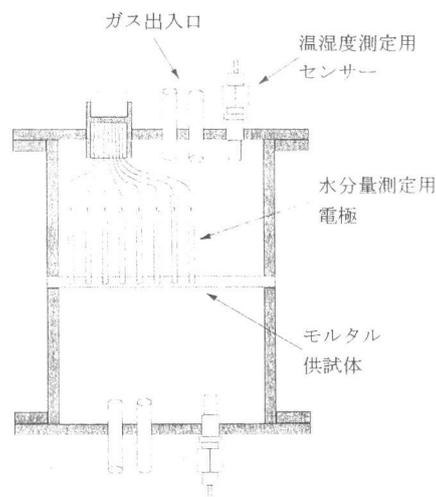


図-4 セル概略図

$$\bar{J} = -c\nabla H \quad c = \frac{R}{M} T \frac{\tilde{c}}{H} \quad (7)$$

ここで、 c は相対湿度 H の関数である材料定数で、コンクリート中の水分の拡散率を表している。既存の研究において多くの拡散率の関数が示されているが、本研究では、実験および数値解析により得られた次の近似式を用いることとした[3]。

$$c(H) = c_1 \left(0.05 + \frac{0.95}{1 + \left(\frac{1-H}{0.15} \right)^{16}} \right) \quad (8)$$

ここで、 c_1 は $H = 1$ の時の拡散率である。

式(3)、式(7)を有限要素で離散化し、連成させると、次のようなコンクリート骨格および間隙水の圧縮性を考慮した拡散方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -Q \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\bar{u}\} \\ \{\bar{H}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_T & -L_\alpha \\ -L^T & -S_\alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} \\ \frac{d\{\bar{H}\}}{dt} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{d\{f\}}{dt} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

ここで、 K_T 、 L_α 、 Q 、 S_α はそれぞれ接線剛性マトリクス、間隙水圧による固相の圧縮性の影響に関するマトリクス、間隙水の移動に関するマトリクス、間隙水の圧縮性の影響に関するマトリクスである。また、 $\{\bar{u}\}$ 、 $\{\bar{H}\}$ 、 $\{f\}$ はそれぞれ節点変位ベクトル、節点相対湿度、外力ベクトルである。

4. 供試体の解析モデル

直径200mm、高さ10mmのモルタル円柱供試体中の水分移動を解析するためには、この供試体を有限要素にモデル化する必要がある。モルタル供試体内の水分移動は垂直方向に支配的であると考えられるため、本研究では図-5に示すように、供試体の一部を2次元4節点アイソパラメトリック要素に分割してモデル化し、一元的な流れの解析を行った。

相対湿度に関する境界条件を、モデル上端が0.6、下端が0.9となるように与える。また、変位に関する境界条件は、モデルの全節点を固定とした。解析に用いた諸パラメーターは、表-1に示す通りである。

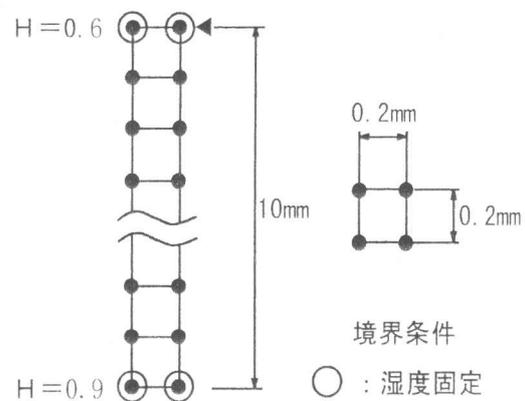


図-5 解析モデル

5. 実験結果と解析結果の比較

図-6～9は、測点1～4（供試体底面から2、4、6、8mmの深さ）の相対湿度変化の、実験・解析の両結果を表している。両結果を比較すると、実験前半に若干の差異が生じている。実験開始後、相対湿度の実験結果は緩やかに増加しているのに対し、解析結果は急激に増加するか、少し遅れて増加するかのどちらかの傾向を示している。

実験前半において両結果に差異が生じた理由としては、供試体の厚さが1cmと非常に薄いために、供試体内部に大きな湿度勾配が発生したためであると考えられる。透気係数は、温度や湿度状態によって変化するが、空隙内部に温度や湿度の大きな勾配が発生する場合には、透気係数はこれらにも依存すると考えられている[3]。今回の測定では、残念ながら厚さが1cmの供試体でしか測定することができなかったが、この理由を明らかにするために、今後様々な厚さの供試体で測定を行う必要がある。

表-1 解析パラメータ

モルタルのパラメータ	
弾性係数	20000 (MPa)
ポアソン比	0.2
透気係数	1.4×10^{-5} (cm ² /sec)
間隙比	0.15
間隙水のパラメータ	
体積弾性係数	22 (MPa)
単位体積重量	0.0001 (N/cm ³)

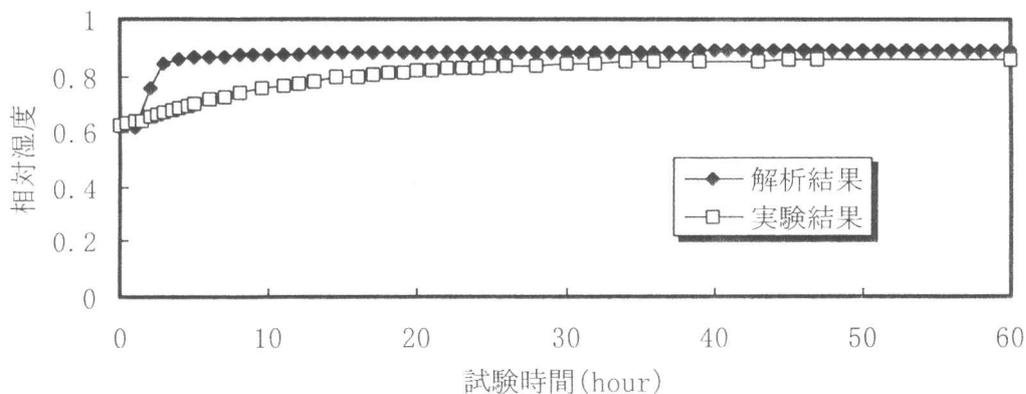


図-6 実験結果と解析結果（測点1）

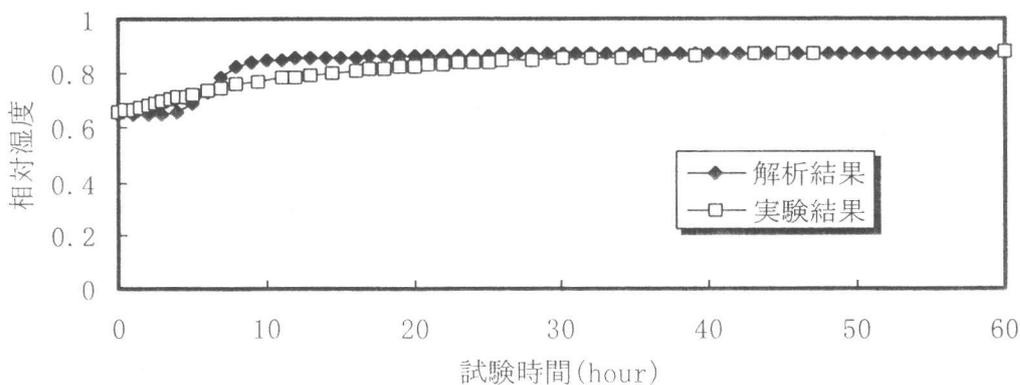


図-7 実験結果と解析結果（測点2）

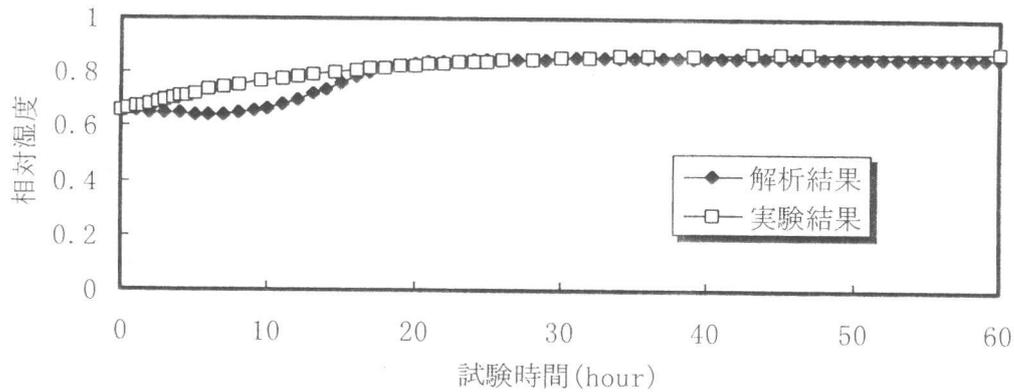


図-8 実験結果と解析結果 (測点3)

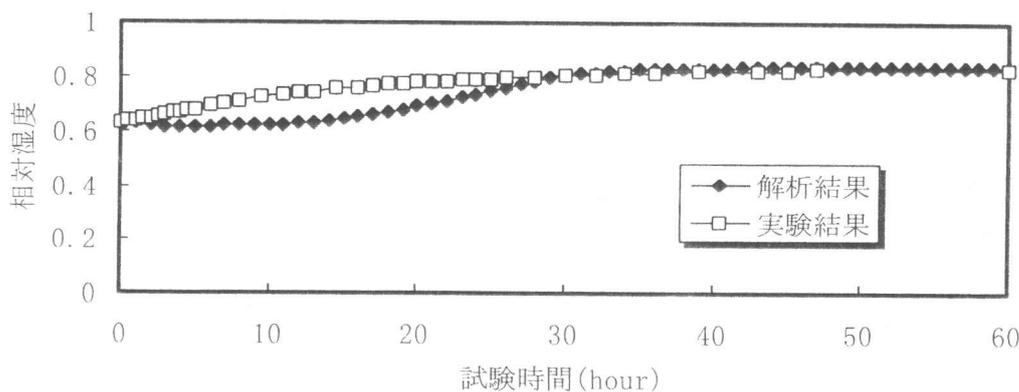


図-9 実験結果と解析結果 (測点4)

6. まとめ

本研究を以下にまとめる。

- (1) 新たに開発した不均質材料水分拡散測定システムを用いて、モルタル供試体内部の経時的な湿度変化を測定した。その結果、本測定システムの有効性を確認することができた。
- (2) 実験初期において、実験と解析の両結果の間に差が見られた。これは、今回測定に用いたモルタル供試体が1cmと非常に薄く、供試体内部に大きな湿度勾配が発生したためであると考えられる。理由を明らかにするためには、今後様々な厚さの供試体を用いて測定を行ってみる必要がある。

謝辞 本研究の一部は、平成6年度文部省科学研究費（試験研究A、代表田邊忠顕）の交付を受けて行われたものです。ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] 笠井芳夫、松井勇、湯浅昇、佐藤弘和：小ステンレス電極を用いたコンクリートの含水率測定、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17, No.1, pp.671-678、1995年
- [2] 木全博聖、大下英吉、田邊忠顕：不飽和コンクリートの気相・液相の移動に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.17, No.2, pp.671-678、1995年
- [3] Bazant, Z. P. and Najjar, L. J.: Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated concrete, *Materiaux et Constructions*, Vol.5, No.25, 1972, pp.3~20