

論文 乾燥下のモルタル中の一次元内部湿度変化と直方向変形に関する実験的研究

山本和範*1・木全博聖*2・田辺忠顕*3

要旨：筆者らはこれまでに、多孔体中の気相・液相拡散を非破壊によって経時的かつ局部的に測定できるような実験装置を開発した。その新しいシステムの適用性を評価するために、まずはモルタルを採用し、モルタル内部にステンレス製小電極を埋設し、水分の電気的性質を利用して内部湿度の分布状態を測定した。また、モルタル内部の湿度拡散に伴う変形量の測定も行った。そして、コンクリート中の水分移動を解析的に検討するために、熱力学観点からモデル化し、有限要素法による数値解析を行い、実験結果と比較、検討した。

キーワード：内部湿度、変形、Gibbsの自由エネルギー、非線形拡散方程式、接触角

1. はじめに

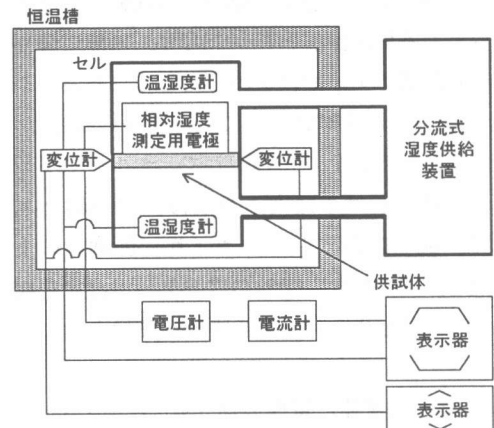
コンクリート中の水分移動が関与する現象は数多い。硬化コンクリートのクリープ特性や乾燥収縮などが代表的であるが、それらを水分移動メカニズムの見解から説明可能な理論は、毛細管張力説や表面張力説などいろいろ示されているが、決定的なものはない。それは水分拡散が非線形性の強い複雑な現象であるためであり、細孔内における含水量や化学吸着を考慮した拡散係数の同定が急がれる。また、原子力発電所から発生する低レベル放射性廃棄物の処分や、将来的に数多く建設されることが予想される地下構造物や海中構造物の設計及び建設においても、コンクリート中の浸透性に関する研究はきわめて重要であるものと考えられる。

そこで本研究では、新たに開発した実験システムを用いて、モルタルの乾燥過程における含水量変化と変形に関する実験を行った。併せて、コンクリートを固相・液相・気相からなる三相不飽和多孔質材料としてとらえたコンクリート中の水分移動に関する解析モデルを構築し、実験結果を解析的に評価した。

2. モルタル供試体の水分拡散実験

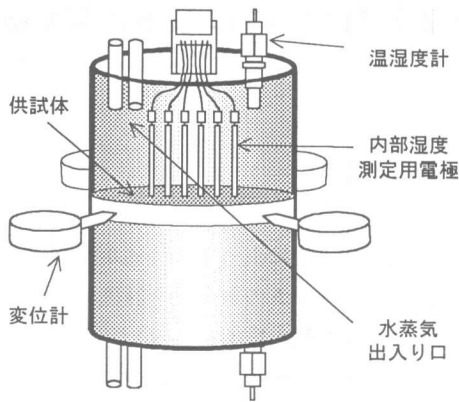
2.1 システムの概要

図—1の示すような多孔質材料気相拡散測定システムを開発した。その概要は、まず、分流式湿度発生装置から任意の湿度の空気をセル内に送り込む。セルは直径200mm高さ250mmの円筒形をしており、その中央部には円盤形の供試体を設置する。セルの断面を図—2に示す。供試体によりセル内は上・下2室に分割され



図—1 気相拡散測定システム概略図

*1 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)
 *2 名古屋大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻 工修 (正会員)
 *3 名古屋大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)



図—2 セル概要図

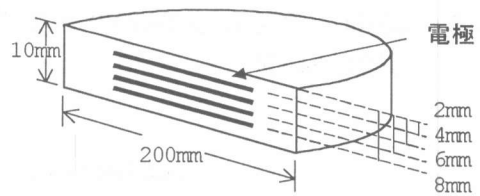
ている。その上下 2 室に様々な自由エネルギー水準の水蒸気を供給し、供試体に接触させることにより、供試体内部の水分拡散現象を生じさせる。供試体内部の湿度変化を相対湿度測定用電極を用いて測定し、同時に供試体の変形量は、供試体の前・後・左・右の 4 方向に取り付けたダイヤルゲージを用いて測定する。供試体の温度管理は重要であるが、セル全体の温度は恒温槽によって管理される。

このシステムでは、水蒸気に限らずその他の気体、液体を用いて、多孔体の上面、下面それぞれに様々なエネルギー水準を与えることで、マクロな拡散現象をより純粋に実験的に考察できるところに特徴がある。そして、拡散に伴う変形も同時に実験的に求められるのである。

本実験では、供試体としてモルタルを採用し、内部の初期湿度を 100% として、セルの上下 2 つの空間における温度、湿度は、両空間とも 25℃、60% に設定した。つまり、供試体の上下 2 面には 25℃、60% の雰囲気温度湿度を接触させることにより、モルタルを乾燥させた。

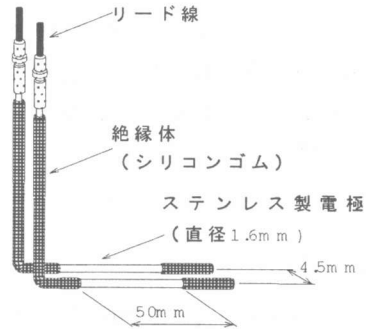
2.2 供試体と電極形状

今回の実験で用いたモルタル供試体の形状は、厚さ 10mm 直径 200mm の円盤形である。本測定システムでは、供試体の厚さを様々に変えることができ、いろいろな厚みの供試体で実験することが可能である。モルタルの配合は



図—3

供試体形状と小電極の埋め込み位置



図—4 ステンレス製電極の形状及び寸法

W/C=0.65, S/C=4, 最大骨材寸法 5mm とした。供試体は、水和の影響をできるだけ少なくするために、25℃の水で 3 ヶ月間水中養生した後、セル内に設置し、相対湿度 100% の雰囲気中で気中養生を行った。

図—3 に示すように、供試体内部には、電極の中心距離として、上部表面から 2mm、4mm、6mm、8mm の位置にそれぞれ 2 組ずつ計 8 組埋設した。なお、各深さの相対湿度の測定値は 2 本の電極の平均値をとった。

本実験で用いた内部湿度測定用のステンレス製電極を図—4 に示す。電極の直径は 1.6mm、電極の中心間距離は 4.5mm、絶縁されていない通電部分の長さは 50mm である。

電極に電圧をかけると、電極間の通電部分に挟まれたモルタルが導体となって電流が流れる。この時、抵抗 R は、電極の形状係数 C とモルタルの比抵抗 ρ との積の形で表される。

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

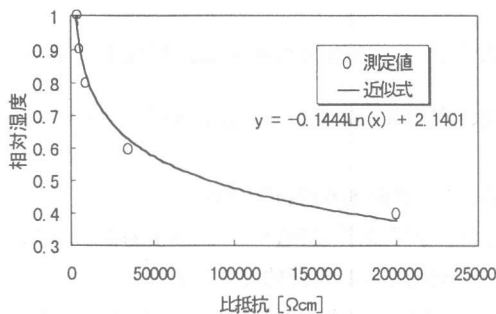
電極の形状係数 C は、比抵抗既知の 1% 塩化ナトリウム水溶液 (25℃, 60 [Ωcm]) 中に

電極を沈めて、電極間の抵抗値を求める。水溶液の比抵抗が既知であることから、式(1)より求められる。従って、形状係数測定の結果、 $C = 0.203$ [1/cm]であった。印加電圧は、直流よりも交流の方が感度は低いが、イオン分極が生じないため、安定して測定することができる¹⁾。しかし、電流が小さすぎると電流が微弱で測定が困難になる。形状係数の測定実験の際、印加電圧 5V の時に形状係数のばらつきが小さかったため、本実験における電極への印加電圧は、交流 60Hz、5V と決定した。

2.3 キャリブレーション

本実験では、モルタル中の含水状態を相対湿度で表すこととした。空隙の相対湿度～含水率の関係が明らかになっていることによって、相対湿度は含水率を間接的に表すことができるからである¹⁾。

また、モルタルの内部湿度を抵抗値で知るために、あらかじめキャリブレーションをおこない、含水状態と抵抗値の関係を求めておく必要がある。モルタルの空隙と雰囲気湿度ができるだけ早く平衡状態に達するように、電極を埋設した 15×10×80mm の形状のキャリブレーション用供試体を作製した。この供試体を任意の雰囲気中に設置し、埋設した電極に電圧をかけ、電流値に変化がなくなったときの抵抗値を、その相対湿度に対する抵抗値とした。キャリブレーションの結果を図—5 に示す。この曲線の



図—5 キャリブレーション結果

近似式は次式となる。

$$H = -0.1444Ln(\rho) + 2.1401 \quad (2)$$

3. コンクリート中の水分移動に関するモデル化

3.1 変形特性に関する定式化

コンクリートの全応力 $\{\sigma\}$ 、有効応力 $\{\sigma'\}$ 及び間隙水圧 p の関係は次のように表される。

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

ここで、 $\{m\}$ はクロネッカーの記号である。

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

また、コンクリートの変形は固相に生じる有効応力に起因することを考慮して、仮想仕事の原理から求められるコンクリートの力の釣合方程式は、

$$\int_V \delta\{\varepsilon\}^T (1-\xi)D_s d\{\varepsilon\}dV - \int_V \delta\{\varepsilon\}^T \{m\}dpdV - \int_V \delta\{u\}^T d\{b\}d\Omega - \int_S \delta\{u\}^T d\{f\}dS = 0 \quad (4)$$

となる。ここで、 $d\{\sigma\}$ 、 $d\{\varepsilon\}$ 、 $\{u\}$ はそれぞれ全応力増分、全ひずみ、変位ベクトルである。また、 ξ はコンクリートの空隙率を表す。

最終的に、(4)式を有限要素で離散化すると次式のような力の釣合式が導かれる。

$$K_T \frac{d\{u\}}{dt} - L \frac{d\{p\}}{dt} - \frac{d\{f\}}{dt} = 0 \quad (5)$$

ここで、 K_T 、 L 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である。また、 $\{u\}$ 、 $\{p\}$ 、 $\{f\}$ はそれぞれ、節点変位ベクトル、節点間隙水圧、外力ベクトルである。

3.2 透水特性に関する定式化

不飽和コンクリート中を流れる間隙水の流速 J は、単位体積あたりの Gibbs の自由エネルギー G の勾配の関数であるとする²⁾。

また、単位質量あたりの間隙水分の Gibbs の自由エネルギーは、気・液混相をなす不飽和空隙中では、

$$G = \frac{RT}{M} \ln H + G_{sat}(T) \quad (6)$$

で表される。ここで、 R 、 M 、 T はそれぞれ、気体定数、水の分子量、絶対温度であり、 $G_{sat}(T)$ は気相と液相が平衡状態にある時の Gibbs の自由エネルギー、 H は相対湿度である。従って、流束 J は相対湿度 H の関数として書き直すことができる。

$$J = -c \cdot \text{grad}(H) \quad (7)$$

係数 c は間隙中の浸透性を表す係数であり、本研究では、次の式を浸透率の関数として用いることとした²⁾。

$$c(H) = c_1 \left(\alpha_0 + \frac{1 + \alpha_0}{1 + \left(\frac{1-H}{1-H_c} \right)^n} \right) \quad (8)$$

ここで c_1 は $H=1$ のときの浸透率、 α_0 、 H_c 、 n は材料パラメータである。今回の実験では、実験結果より、 $\alpha_0 = 0.05$ 、 $H_c = 0.85$ 、 $n = 6$ と決定した。

次に単位体積のコントロールボリュームを考える。間隙水のコントロールボリューム内における流体の体積変化は、質量保存則が成り立つ。そして、全ひずみの変化における体積変化と流体自身の圧力変化による体積変化を考慮すると、次のような不飽和コンクリート中の透水特性の関する支配方程式が得られる。

$$\{m\}^T \frac{d\{\varepsilon\}}{dt} + \frac{\xi}{K_f} \frac{dp}{dt} - \text{div}(c \cdot \text{grad}(H)) = 0 \quad (9)$$

最終的に Galerkin 法により有限要素で離散化すると、質量保存の式(9)は次のように表される。

$$-Q\{\bar{H}\} - L^T \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} - S \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} + \{f_p\} = 0 \quad (10)$$

ここで、 $\{\bar{H}\}$ 、 $\{\bar{u}\}$ 、 $\{\bar{p}\}$ はそれぞれ節点相対湿度、節点変位、節点間隙水圧である。そして、 Q 、 L 、 S はそれぞれ、間隙水の移動に関するマトリクス、固相の圧縮性の影響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。

3.3 水分移動の支配方程式

式(5)と式(10)を連成させることにより、不飽和コンクリート中の水分移動に関する非線形拡散方程式が得られるのである。その際、飽和と不飽和の境界 $H=1$ における熱力学的平衡条件を考慮し、節点間隙水圧 $\{\bar{p}\}$ を節点相対湿度 $\{\bar{H}\}$ に換算することによって、力の釣合式(5)及び質量保存の式(10)を連成させた方程式が導かれる。

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -Q \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\bar{u}\} \\ \{\bar{H}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & -L_\alpha \\ -L^T & -S_\alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} \\ \frac{d\{\bar{H}\}}{dt} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{d\{f\}}{dt} \\ -\{f\} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

3.4 間隙中の相対湿度と圧力の関係

狭い空間に閉じこめられた水の内側と外側の圧力が異なることは良く知られている。この圧力の差は水に負圧として作用しており、その値は Laplace の式により以下ようになる。

$$\Delta p = \frac{2\gamma \cos \theta}{r} \quad (12)$$

ここで、 γ は水の表面張力、 r は毛管半径、 θ は壁と水の接触角である。また、水に圧力 Δp が作用する時の水蒸気圧は以下ようになる。

$$p = p_{sat} e^{\frac{V\Delta p}{RT}} \quad (13)$$

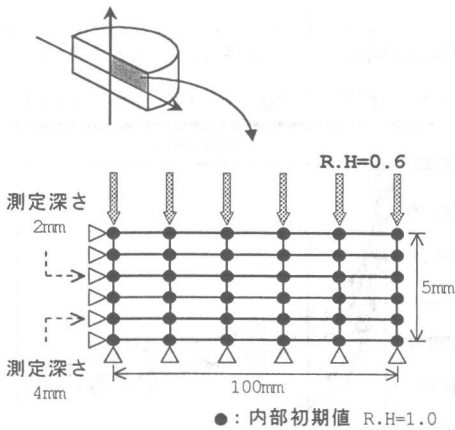
よって、間隙水圧と内部湿度の変化には次のような関係がある。

$$\Delta H = \frac{p}{P_{sat}} = e^{\frac{V\Delta p}{RT}} \quad (14)$$

ここで、 p_{sat} は飽和水蒸気圧、 V は水のモル体積、 R は気体定数、 T は温度を表している。

3.5 供試体の解析モデル

今回の測定条件においては、水分移動は供試体内の垂直方向に支配的であると考えられるため、図—6に示すように供試体をモデル化した。直径 200mm、高さ 10mm である供試体の断面を 4 分割し、その一部分に 2 次元アイソパラ



図—6 供試体の数値解析モデル

メトリック要素を適用した。

湿度に関する境界条件は、実験に基づきモデル上面にのみ湿度 60% (相対湿度 0.6) を与えた。供試体内部の湿度の初期値は、全節点 100% (相対湿度 1.0) としている。変位に関する境界条件は、下面と左面垂直方向を固定として、上面と右面の 2 次元的な変形挙動を示すようにした。

そして、一般的な乾燥収縮変位の有限要素解析には初期ひずみを与えている。しかし本解析は全くそのようなものを仮定しない。

また本実験に用いたモルタル及び間隙水のパラメーターは表—1 に示す通りである。

表—1 モルタル及び間隙水の物性値

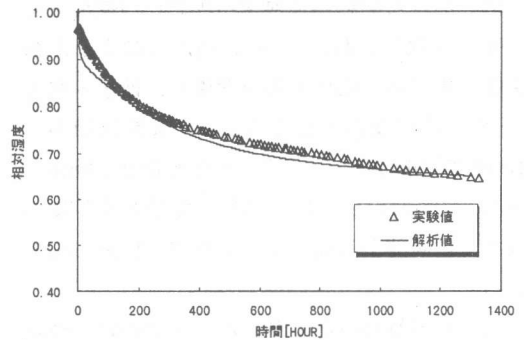
モルタルの物性値	
弾性係数	20000 [MPa]
ポアソン比	0.2
透水係数	1.4×10^{-5} [cm ² /sec]
間隙比	0.15
間隙水の物性値	
体積弾性係数	22 [MPa]
単位体積質量	0.0001 [N/cm ³]

4. 実験結果と解析結果の比較

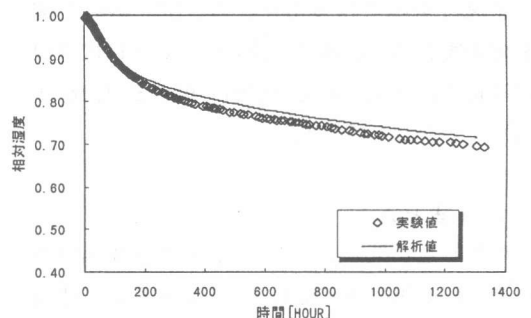
4.1 内部湿度に関する考察

図—7、図—8 は、表面から 2mm と 4mm の位置における、時間の経過に伴った相対湿度変化を表している。両図ともに実験結果と解析結

果は、モルタル内部が乾燥するにつれて、相対湿度が徐々に低下するといった傾向をよく捉えている。1300 時間後に、深さ 2mm の相対湿度は、実験値が 0.645、解析値が 0.649 であり、ほぼ同じ相対湿度を示している。しかし、実験前半において、実験では相対湿度が緩やかに低下しているのに対して、解析では、20 時間後までは急激な相対湿度の低下が生じている。実験値と解析値は、17 時間後で相対湿度の差が最大 0.052 となる。解析結果についてこのような湿度低下が起こる原因については、拡散係数が考えられる。拡散係数は含水状態によって変化する。供試体の表面付近では実際には湿度変化を大きく受けており、本研究で用いた拡散係数がその湿度変化を表しきれていないと思われる。よって、厳密に材料パラメーターを求め、最適な透水係数の関数を選択する必要がある。



図—7 表面から 2mm の距離の相対湿度変化



図—8 表面から 4mm の距離の相対湿度変化

そして、表面から 4mm の深さの相対湿度変化を、実験値と解析値とを比較してみると、2mm とは逆に、実験前半ではほぼ一致している。内部湿度が徐々に低下するにつれて、実験値よりも解析値の方がやや遅れて乾燥が進行している。1300 時間の時点では実験値 0.693 に対して解析値は 0.715 となる。

これらのようなずれの原因は実験方法についても考えられる。まず、供試体内部に埋め込んだ電極が、正確な深さに埋設されていたかどうかである。電極や供試体の作製はすべて手作業であるため、電極の埋設高さを厳密に管理することは難しいと思われる。また厚さが 10mm の薄い供試体では湿度勾配が大きいために、その影響を無視できないと考えられる。

4.2 変形に関する考察

図-9 は時間経過に対する供試体の変形量を示す。実験値において 4 方向から測定した結果を、供試体の剛体変形を考慮し、前後・左右の 2 方向の変形として表した。実験開始から 1300 時間後において、前後の変形量 0.96mm、左右 1.03mm を示しており。乾燥が進むにつれて、供試体が収縮していく傾向が捉えられている。

また変形解析であるが、現在までのいくつかの報告から、まず、水と骨格との接触角 θ を 0° をとじて解析を行ったが、この時の解析値は実験値よりもかなり大きな値を示した。そこで θ を変えて解析を行ったところ、 65° の時に変形量の実験結果とほぼ一致した。これは内部湿度変化に伴う水圧の変化率が変化する（減少する）ことを示している。

5. まとめ

開発したシステムを用いて、モルタル内部の乾燥に伴う相対湿度変化と変形を実験的に測定した。実験システムの性能に関しては、湿度の安定供給、セル内の温度管理が確実に行われた。

しかし、供試体への電極の埋め込み位置につ

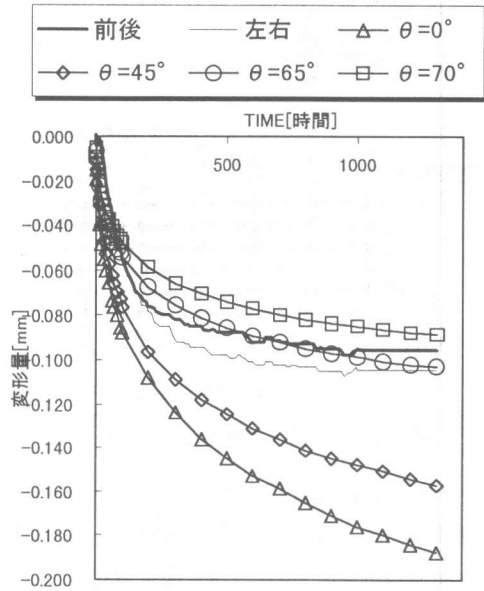


図-9 変形量の実験値と解析値

いては信頼性に欠ける。

また連成方程式を用いた数値解析では内部湿度変化をよく捉えることができたが、表面近くの湿度勾配の大きい部分では両者のずれが見られた。

乾燥収縮に関しては、水とモルタル固相との接触角を θ_0 としたときの収縮量の解析値が実験値と大きく異なった。水とセメント硬化体固相との接触角は不明であるが、間隙水圧発生メカニズムと密接に絡んでいるパラメーターであり、今後も注目する必要があると思われる。

参考文献

- (1)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），日本建築学会大会学術講演要旨集，p.33 1962.9
- (2)Bazant,Z.P, and, Najjar,L.J：Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated concrete, *Materiaux et Constructions*, Vol.5, No.25, pp3-20, 1972