

セメント硬化体，特にエアームタルの収縮応力源と それによる収縮応力の解析

ANALYSIS OF SHRINKAGE STRESS IN AIR MORTAR

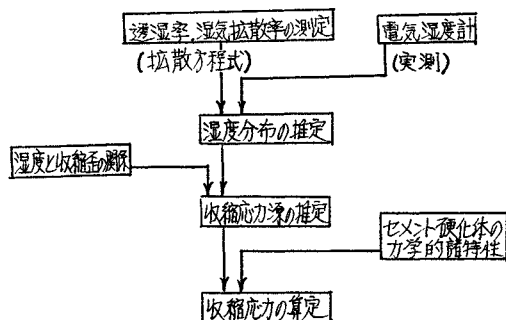
大浜 文彦*・森本 博昭**

By Fumihiko Ohama and Hiroaki Morimoto

1. まえがき

コンクリート，モルタルまたはエアームタルなどのようなセメント硬化体は温度変化，湿度変化など各種気象条件の変化を受けるとそれに応じて膨張，収縮などの容積変化を生ずる。今セメント硬化体内の微小要素についてみると，これら微小要素は周囲の温度，湿度に応じて，固有の容積変化を行う。しかしこれら微小要素における固有の容積変化は一般に他の微小要素の固有の容積変化とは適合しないので，いわば自由勝手であることができない。したがって，これらセメント硬化体内に発生する各微小要素固有のひずみの分布，いわば初応力源は一般に弾性学でいう適合条件式を満足せず，それがセメント硬化体の連続性を保つため，一部抑制されて抑制圧による応力の作用を受けていて，これがいわゆる初応力であると考えることができる。したがって，初応力の解析を行うためには，まずセメント硬化体内部の微小要素固有のひずみ分布を合理的な方法で推定する必要がある。この硬化体内部に発生するひずみ分布は計測技術の発達した今日においても，これを直接計測することはほとんど不可能である。なぜなら初応力が発生しているセメント硬化体に実測可能なひずみとして現われてくるものは初応力源のうち適合条件を満足したひずみ成分と初応力によるクリープなどの粘弾塑性ひずみ成分が複雑に組み合わせられたものであり，初応力源そのものを直接取り出してセメント硬化体の内部にまでそれを測定することは現段階においては不可能である。そこで一般には初応力源を推定する方法として初応力源の発生原因となる温度，含水量などの物理量の変化を測定し，これによりセメント硬化体内の初応力源を推定する方法がとられている。セメント硬化体の乾燥収縮応力の応力源である収

縮ひずみの発生原因はセメント硬化体中における蒸発による水分損失であり，セメント硬化体内の各所の含水率の分布を測定すれば間接的に収縮ひずみ分布を推定することができる。しかし，この含水率の分布を直接測定することは非常に困難であるので，現在この分野においてはセメント硬化体の含水率は周囲の相対湿度と密接な関係があることに着目し，セメント硬化体中の湿度分布を測定することにより乾燥収縮応力源を推定しようとする方法がとられている。この湿度分布はコンクリート部材にある間隔をもって小孔を設けておき，その小孔中の湿度を測定すれば求めることができるが，一方多孔質物質中を透過する湿流に関する拡散方程式を導き，この式を解くことによっても推定することが可能である。図一に一般的な乾燥収縮応力源とそれによる収縮応力の解析手順を示す。本報告は図一に示す手順にそってセメント硬化体内の乾燥収縮応力源とそれによる収縮応力の解析をエアームタルを例に取り上げ行った結果について述べたものであり，あわせて本報告に示した解析手順の工学的な実用性についても検討を行った。なお，本研究に取り上げたエアームタルとはモルタル中に多量の気泡を連行したもので，軽量であり断熱性，吸音性に富むことにより軽量パネルの充填材料，断熱，遮音ブロックおよびパネル，また特殊な用途として山崩れ防止用など



図一 収縮応力解析過程

* 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 岐阜大学助手 工学部土木工学科

表-1 エアーモルタルの配合

記号	実測空気量 (%)	W/C (%)	S/C	AE/C (%)	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	S (kg/m ³)	AE (kg/m ³)
AM 5-20	15.0	55	1	0.12	775	426	775	0.930
AM 5-40	38.8	55	1	0.24	775	426	775	1.860
AM 6-20	17.5	65	1	0.13	719	467	719	0.935
AM 6-40	38.8	65	1	0.20	719	467	719	1.438

表-2 エアーモルタルの力学的性質

記号	空気量 (%)	材令 (日)	圧縮強度 (kg/cm ²)	引張強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (kg/cm ²)
AM 5-20	15.0	7	138.8	12.0	10.2×10 ⁴
		14	151.7	15.2	11.8×10 ⁴
		28	178.9	26.2	13.6×10 ⁴
AM 5-40	38.8	7	35.0	6.2	3.2×10 ⁴
		14	42.4	6.3	4.1×10 ⁴
		28	58.6	8.1	4.8×10 ⁴
AM 6-20	17.5	7	78.3	6.2	4.6×10 ⁴
		14	80.3	8.9	5.2×10 ⁴
		28	86.0	11.3	5.6×10 ⁴
AM 6-40	38.8	7	31.9	5.3	2.7×10 ⁴
		14	40.5	6.6	3.4×10 ⁴
		28	49.4	7.4	3.6×10 ⁴

各方面で広く用いられているが、常温常圧養生をしたエアーモルタルはその乾燥収縮がきわめて大きくそのためひびわれの発生が著しく、これが最大の欠点として指摘されている。

本研究に使用したエアーモルタルの配合を表-1に、またその一般的力学的性質を表-2に示す。なお、エアーモルタルはプレフォーム法により製造した。

2. エアーモルタルの乾燥収縮率と相対湿度との関係

セメント硬化体は元来非常にポロシチーが高く、大きなキャピラリー空げきから小さなゲル空げきにいたるまで大小無数の空げきから成り立っている。セメント硬化体（以下においては単に硬化体と記す）を練り混ぜた直後はこれらの空げきは水で飽和されている。一般にこれら空げき水は自由水よりも低い蒸気圧をもっており空げきが小さければ小さいほどその蒸気圧は低くなる。また水が空げきから移動するときこの水は空げきの壁をたがいに接近させるような引張力を及ぼし、その結果硬化体に乾燥収縮（以下においては単に収縮と記す）を生じせしめる²⁾。したがって、空げき水の脱水すなわち硬化体の収縮はその空げき間隔の大小に関連して周囲の相対湿度と密接な関係を持つものと考えられる。したがって、この両者の間の関係を明らかにしておけば硬化体内の湿度分布を測定することにより収縮応力源を推定することができる。

本研究ではエアーモルタルについてこの関係を明らかにすることとした。

供試体は 4×4×40 cm の角柱を使用し、供試体の側面には 検長 200 mm のゲージブラグを設け、収縮量をホイットモーストレンゲージにより測定した。各供試体は打ち込み後ただちに湿度 99% 以上の恒温室内で養生を行い、材令が 28 日に達すると以後は恒温室内の湿度を 100% から順次 90%, 70%, 55%, 43% と段階的に下げてゆき、各湿度における供試体の最終収縮量を求め湿度と収縮率との関係を求めていった。なお、1 湿度段階における収縮ひずみ測定期間は約 2 か月間とし、収縮ひずみが一定におちつくのを確認してから次の湿度段階に進んでいった。図-2 に実験結果を示す。実験結果から明らかなようにエアーモルタルの収縮率は空気量と水セメント比の増大に伴って大きくなるようである。しかしこの場合、空気量の収縮量に及ぼす影響は水セメントに比べて非常に少ない。このことは前にも述べたように、硬化体の根本的な収縮の発生原因は大小無数の空げきからの脱水であり、水セメント比が増大すればそれに伴い空げきも多くなりしたがって収縮量も増大するものと考えられる。

一方、空気量の増大によってもいくぶん収縮量も大きくなるようであるが、これは水分の拡散速度が大きくなるためであり、終局的な収縮量にはあまり影響を及ぼさないようである。また収縮率と湿度との関係は線形ではなく湿度が低くなると湿度 1% あたりの収縮量が增大することが認められる。このことは低湿度すなわち小さな空げきからの脱水ほど硬化体に大きな収縮を与えることを示すものである。

以上の実験より明らかなように、硬化体中の湿度分布がなんらかの方法で知ることができれば、図-2 の実験結果を用いてただちにこれを収縮ひずみ分布（収縮応力

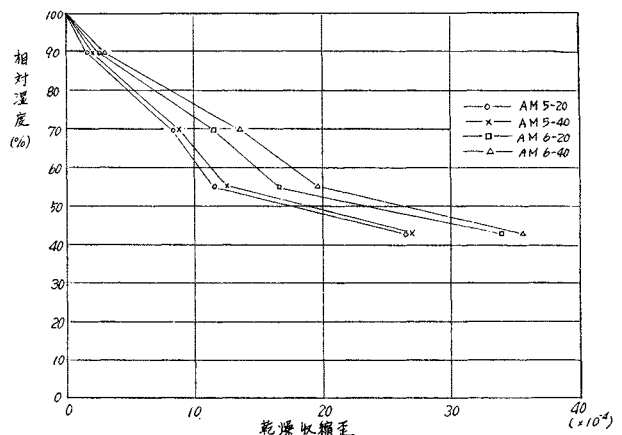


図-2 乾燥収縮ひずみと相対湿度の関係

源)に変換することができるであろう。

3. エアーモタルの透湿率および 湿気拡散率の測定

前節に述べたような実験により湿度と収縮率との関係を求めておけば, 硬化体の湿度分布を測定または推定することにより収縮応力源を推定することが可能である。この湿度分布については対象部材にあらかじめ適当な間隔をもって小孔を設けておき, その小孔中の湿度を棒状の電気湿度計により測定すれば部材中の湿度分布を求めることができる。また一方, 式(1)に示す多孔質物質中を透過する湿流に関する拡散方程式を解くことによってもこれを推定することができる。

$$\frac{\partial H}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots(1)$$

式中の K は湿気拡散率とよばれるものであって, 一般にはこれを定数として扱っているが, 厳密に言えば位置 (x, y, z) と湿度 H との関数である。そこでここではまずエアーモタルの透湿率 λ と湿気拡散率 K について明らかにしておきたい³⁾。ここで以下に使用する用語の定義を述べる。質量 W , 体積 V なる物体の湿気密度 q は次式で示すことができる。

$$q = \frac{W - W_0}{V} \dots\dots\dots(2)$$

ただし, W_0 は湿度 0% のときの物体の質量である。次に dQ の湿気が dt の時間に湿流の方向に直角な面積 S を通過するときは湿流の強さ J および湿流密度 j は次式で定義される。

$$J = \frac{dQ}{dt}, j = \frac{dJ}{dS} \dots\dots\dots(3)$$

湿流の方向を x とし, これに直角な面積 S を通過する湿流の強さを J とすれば, J はまた湿気勾配または湿気密度勾配と面積 S に比例するものと考えられるので次式で定義される。

$$J = -\lambda S \frac{dH}{dX} \dots\dots\dots(4)$$

$$J = -KS \frac{dq}{dX} \dots\dots\dots(5)$$

ここに, dH/dX : 湿度勾配

dq/dX : 湿気密度勾配

λ : 透湿率

K : 湿気拡散率

また式(4), (5)より次式を得る。

$$K = \lambda \frac{dH}{dq} \dots\dots\dots(6)$$

本研究では, 式(4), (6)から定義された透湿率および湿気拡散率を求めることとした。測定に使用した供試体

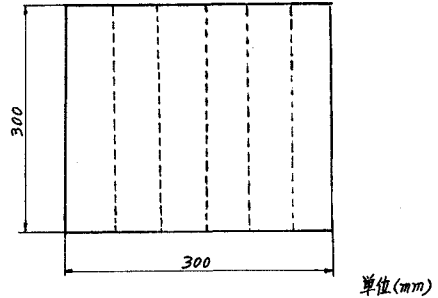
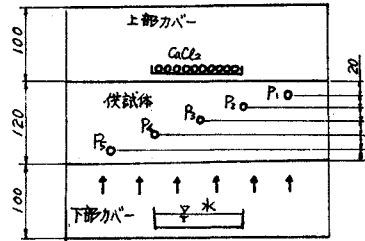


図-3 透湿率測定用供試体

の形状は 図-3 に示すような $30 \times 30 \times 12$ cm の直方体であり図中に示すような位置に直径 20 mm の小穴を 5 個上下 20 mm の間隔をもって供試体の長さ 30 cm の方向に平行に貫通せしめる。この供試体を 図-3 に示すように 2 つのカバーではさみ上方のカバーには塩化カルシウムを入れた皿を置き, 下方のカバーには水を入れた皿を置き湿気を下から上に移動させる。供試体側面には湿気を上下一方向のみ通過させるためパラフィンを用いて十分な防湿処理をほどこした。供試体は温度 20 ± 1 °C, 湿度 $43 \pm 2\%$ の恒温室に放置し, 側面に設けた測定用小孔中の湿度を随時電気湿度計(共和 HD-100 B)にて測定した。測定は各小孔中の湿度が一定になるまで行った。各小孔中の湿度が一定になってから任意の期間における下方カバー中の水の重量変化を測定し, この測定結果に式(3)を適用することにより湿流の強さ J および湿流の密度 j を求めることができる。また一方, 各小孔中の湿度測定値から湿度勾配 dH/dX が知り得るので, これらの測定結果に式(4)を適用することによりエアーモタルの透湿率 λ を求めることができる。

次に式(6)より湿気拡散率 K を求めるためには湿度 H と湿気密度の微分比 dH/dq を求めなければならない。そこで, 本研究においては $4 \times 4 \times 4$ cm の立方体供試体を作成しそれを各湿度ごとに湿度一定の湿度箱に入れ供試体の重量が一定になった時点においてその供試体の湿気密度を式(2)から算出した。そしてこれらの測定結果から $H-q$ 曲線を求め, この曲線から各種湿度における dH/dq を推定した。湿流が平衡状態に達した後の供試体小孔中の湿度とそれに伴う湿気勾配を表-3に,

また表-4 に定常状態における湿流の強さ J および密度 j を示す。表-5 に得られた測定結果を利用して式 (4) より算出した各湿度における4種類のエア-モルタルの透湿率を示す。

表-3 定常状態における供試体内の湿度分布と湿度勾配

AM 5-20				AM 5-40			
測点	湿度 (%)	平均 (%)	dH/dx (RH/m)	測点	湿度 (%)	平均 (%)	dH/dx (RH/m)
P ₁	69.5	73.9	440	P ₁	70.6	74.5	390
P ₂	78.3	81.3	295	P ₂	78.4	80.9	250
P ₃	84.2	85.8	160	P ₃	83.4	84.4	100
P ₄	87.4	88.3	90	P ₄	85.4	86.2	80
P ₅	89.2			P ₅	87.0		

AM 6-20				AM 6-40			
測点	湿度 (%)	平均 (%)	dH/dx (RH/m)	測点	湿度 (%)	平均 (%)	dH/dx (RH/m)
P ₁	68.2	74.5	625	P ₁	73.9	77.0	305
P ₂	80.7	83.0	230	P ₂	80.0	81.6	160
P ₃	85.3	86.5	120	P ₃	83.2	84.6	135
P ₄	87.7	88.6	85	P ₄	85.9	86.7	80
P ₅	89.4			P ₅	87.5		

表-4 定常状態における湿流の密度および強さ

	AM 5-20	AM 5-40	AM 6-20	AM 6-40
湿流の密度 j (g/day·m ²)	12.3011	20.6056	15.4544	29.0911
湿流の強さ J (g/day)	1.1071	1.8545	1.3909	2.6182

表-5 各種湿度におけるエア-モルタルの透湿率

AM 5-20			AM 5-40		
湿度 (%)	透湿率 λ (g/day·m·RH)		湿度 (%)	透湿率 λ (g/day·m·RH)	
73.9	0.0280		74.5	0.0528	
81.3	0.0417		80.9	0.0824	
85.8	0.0769		84.4	0.2061	
88.3	0.1367		86.2	0.2576	

AM 6-20			AM 6-40		
湿度 (%)	透湿率 λ (g/day·m·RH)		湿度 (%)	透湿率 λ (g/day·m·RH)	
74.5	0.0247		77.0	0.0954	
83.0	0.0672		81.6	0.1818	
86.5	0.1288		84.6	0.2155	
88.6	0.1818		86.7	0.3636	

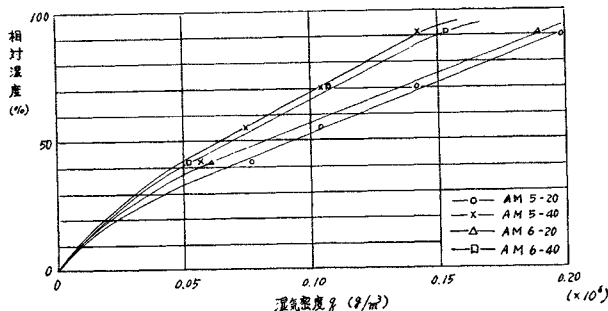


図-4 エア-モルタルの湿気密度と湿度との関係

表-6 各種湿度におけるエア-モルタルの湿気拡散率

AM 5-20		AM 5-40	
湿度 (%)	湿気拡散率 (m ² /day×10 ⁻⁹)	湿度 (%)	湿気拡散率 (m ² /day×10 ⁻⁹)
73.9	10.360	74.5	25.344
81.3	15.429	80.9	39.552
85.8	26.915	84.4	94.806
88.3	45.111	86.2	118.496

AM 6-20		AM 6-40	
湿度 (%)	湿気拡散率 (m ² /day×10 ⁻⁹)	湿度 (%)	湿気拡散率 (m ² /day×10 ⁻⁹)
74.5	9.386	77.0	43.884
83.0	25.536	81.6	83.628
86.5	48.944	84.6	99.130
88.6	65.448	86.7	159.984

次に図-4 に実験により求めた $H-q$ 曲線を示す。また表-6 は式 (6) より算出した各湿度におけるそれぞれのエア-モルタルの湿気拡散率である。一般に湿気が多孔質物質中を透過する際の機構については水蒸気が物体を構成する微結晶に吸着あるいは凝縮して液体の形となり、吸着ポテンシャルの局部的差により移動する吸着水透湿と水蒸気の形のままで湿度の局部的差により物体中の空げきを通して移動する水蒸気透湿の二つがあり、実際の透湿現象は上記2種の透湿が重複したものと考えられる³⁾。いま、実験結果から明らかなようにエア-モルタルの透湿率は湿度が増加するにつれて急激に増大することがわかる。これは前に述べた2種の透湿機構のうち主に吸着水透湿が湿度の増加に伴い増大するためと思われる。また一方、エア-モルタルの透湿率は水セメント比および空気量の増大によっても大きくなる傾向を示しているが、これらの増大により主にしてエア-モルタル中の空げきを通して水蒸気が移動するところの水蒸気透湿が増加するためと思われる。しかしこのポロシチーの増大による全体の透湿率の増加傾向は湿度の増加によるものよりかなり少ない。このことは多孔質物質中の湿流の透過機構は主に吸着水透湿によることを裏づけるものと考えられる。

次に湿気拡散率について実験結果から明らかなように湿度が高くなると大きくなる傾向を示しているが、これは湿度の増加に伴い透湿率 λ が大きくなるためであり、水セメント比、空気量の増大による湿気拡散率の増加も同様の理由によるものと思われる。なお、エア-モルタル中の気泡の大きさ、状態など、エア-モルタルの微細構造の違いによっても、透湿率や湿気拡散率の値が変化するほか、透湿のメカニズムもかわってくるものと思われるが、これについては今後の課題としたい。

4. エアモルタル部材中の湿度分布

セメントコンクリート部材中の湿度分布は前にも述べたように電気湿度計を用いて実測することが可能であるが, 実際問題としてこの方法を既存の構造物に適用するのはかなり問題がある。そこで湿度分布の推定法として, 現在では多孔質物質中を湿気が透過する現象は熱伝導と類似の現象であるとして式(1)に示す湿流に関する拡散方程式を導き, これを適当な境界条件のもとで解いた解をもって湿度分布の推定値とする方法が一つの有力な手段として考えられているようである。ここで式(1)を導くに当たって一般に湿気拡散率 K は定数とみなすわけであるが, 実験結果からも明らかなように, これは湿度その他により著しく変化する。したがって, 湿気拡散率 K を湿度の関数 $K(H)$ として取り扱うことが望まれるわけであるが, その結果生ずる数学的取り扱いの複雑さは実用的立場から見て好ましくない。しかし, 湿気拡散率 $K(H)$ を定数とすることによって生じる湿度分布推定(計算)値の実測値に対する誤差が無視できないほど大きければ, K を定数とすることによって生ずる利点すなわち数学的取り扱いの簡易化は無意味なものとなってしまふ。そこで, ここでは表-1 に示す配合 AM 5-20 のエアモルタルで図-5 に示す直六面体供試体を作成し, 供試体中の湿度分布の湿気拡散率 K を一定とした場合の式(1)による計算値と電気湿度計による実測値とを比較検討することによって, K を一定とした場合の拡散方程式による実用的推定法の評価を行った。供試体は透湿度測定用供試体と同じものであり, 供試体打ち込み後 24 時間をもって脱型し小孔にはゴムせんで厳重にせんをし, 側面にはパラフィンをぬり湿気が供試体の上下端面以外の所から通過しないようにした。

図-5 において x 軸と直交する面が供試体の上下端面である。なお, 座標軸は供試体上下方向に x 軸をとって

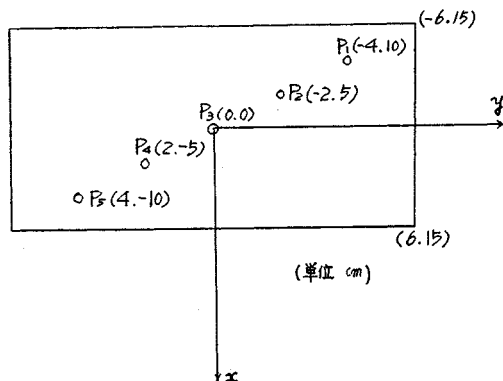


図-5 エアモルタル供試体

いる。供試体に上記の処理をほどこした後, これを温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$, 湿度 $43 \pm 2\%$ の恒温室に放置し, その後, 適時, 電気湿度計により小孔中の湿度を測定した。一方, 計算による推定は次のようにして行った。供試体側面には十分パラフィンをぬり湿気の入出を防いであるので供試体中の湿度 H は時間 t と位置 x のみの関数 $H(t, x)$ とみなすことができる。この場合, 式(1)の基礎偏微分方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial H}{\partial t} = K \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \dots\dots\dots(7)$$

式(7)中の湿気拡散率 K には, AM 5-20 のエアモルタルの湿気拡散率のうち周囲の湿度 43% 付近における値 $K=9.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{day}$ を採用した。これは表-6 に示す AM 5-20 の各湿度における湿気拡散率の値から湿度-湿気拡散率曲線を描き, その曲線を周囲の湿度 43% 付近まで延長して推定した値である。

次に初期条件と境界条件については, まず初期条件として最初の湿度分布 H_0 を $(100-43)=57\%$ とした。これはエアモルタル供試体中の湿度は打込み後の湿度 100% から周囲の相対湿度 43% にしだいに近づいていくため, 拡散により減少する湿度分を 57% であると考えたからである。一方, 境界条件については供試体の外気と接する境界上の湿度は周囲の湿度 43% と等しくなると考えた。したがって, 初期条件式, 境界条件式として, 式(8), (9)を得る。

$$(H)_{t=0} = H_0 = 57\% \dots\dots\dots(8)$$

$$(H)_{x=\pm a} = 0 \dots\dots\dots(9)$$

ただし, $2a$ は供試体の厚さであり今の場合 $2a=12 \text{ cm}$ である。式(1)の偏微分方程式を式(8), (9)の初期条件および境界条件で解くと式(10)のような解が得られる。

$$H = (4 H_0) \pi^{-1} [\{ \exp(-k\pi^2 t/4 a^2) \} \cos(\pi x/2 a) - 3^{-1} \{ \exp(-9 k\pi^2 t/4 a^2) \} \cos(3 \pi x/2 a) + 5^{-1} \{ \exp(-25 k\pi^2 t/4 a^2) \} \cos(5 \pi x/2 a) - \dots] \dots\dots\dots(10)$$

式(10)より任意の時刻 t における供試体中の任意点 x における湿度計算値 H を求めることができる。図-4 に示すエアモルタル供試体中の湿度分布の実測値と計算値とを表-7 に示す。計算値は式(10)の第 10 項目までを計算して求めたものである。

表-7 から明らかなように供試体中の湿度の計算値は供試体表面におけるほど実測値とよく合致しており, 実測値と計算値との差は最大で実測値の 5% 程度でほとんど 2~3% 内におさまっている。しかし供試体の中心に向うほど, 計算値の実測値に対する近似は悪くなりその差は 10~15% となっている。これは湿気拡散率 K の値として 45% 付近の値を採用したため, 表面に近い部

表-7 供試体中の湿度分布 (AM 5-20)

測 点 乾燥日数 (日)	P ₁		P ₂		P ₃		P ₄		P ₅	
	計算値 (%)	実測値 (%)	計算値 (%)	実測値 (%)	計算値 (%)	実測値 (%)	計算値 (%)	実測値 (%)	計算値 (%)	実測値 (%)
13	88.0	83.8	99.3	94.5	100	91.2	99.3	91.5	88.0	85.8
26	78.6	76.2	95.6	85.4	99.1	85.7	95.6	85.7	78.6	79.8
37	73.9	70.1	92.0	80.6	97.0	82.9	92.0	80.8	73.9	75.4
43	72.0	74.2	90.1	80.9	95.6	82.2	90.1	77.8	72.0	73.0
53	69.4	68.0	89.0	78.8	92.8	80.2	89.0	78.0	69.4	73.7
61	67.7	67.6	84.7	77.9	90.2	77.7	84.7	76.2	67.7	72.8
72	65.7	62.7	81.7	73.4	87.4	75.1	81.7	73.6	65.7	67.0
80	64.4	—	79.7	—	85.2	—	79.7	—	64.4	—
90	63.0	—	77.3	—	82.5	—	79.3	—	63.0	—
100	61.6	—	75.1	—	80.0	—	75.1	—	61.6	—

分のエアームタルの湿気拡散率はほぼ仮定した値に近いものと推定されるが、中心付近は表面部分より高い湿度中にあるので、その湿気拡散率は仮定した値よりかなり大きな値になるものと思われる。そのため中心付近における湿度の計算値は実測値よりも高い値となり、かなりの差を生じたものと思われる。本研究においてはエアームタルの湿気拡散率 K の値としてできるだけ周囲の湿度に近い湿度におけるものを採用したわけであるが、ここでその根拠を述べておきたい。

エアームタル部材内部の湿度を式 (7) を解いて推定し得られた結果と 図-2 に示す湿度と収縮率の関係をj使って部材中の収縮ひずみを推定する場合、最終的によい結果を得るためには、その前提条件として精度のよい湿度推定値を得る必要があり、とりわけ部材中の湿度が低くなった場合の推定値の誤差(実測値に対する)を小さくすることが大切である。なぜならば、図-2 に示すようにエアームタルの湿度変化1%あたりの収縮率は低湿度になるほど増大する傾向にある。すなわち、湿度50% 付近における湿度変化1% あたりの収縮率は湿度80% 付近における値に比較して3~4.5 倍程度の大きさとなっている。

したがって、低湿度領域における湿度推定値の誤差の大きさが収縮ひずみ推定値の誤差の大きさにおよぼす影響は、高湿度領域のそれにくらべ非常に大きなものとなることが考えられる。エアームタル部材が乾燥をうける場合、部材中の湿度はその表面から順次周囲の湿度(多くの場合低い湿度)に近づいてゆく。したがって、部材中の表面付近における湿度の推定値ほどその誤差を小さくしてやるのが望ましい。そのためには、式 (7) 中の定数 K すなわちエアームタルの湿気拡散率として、部材中表面付近の湿度における値を採用することが妥当と考えられる。しかし部材中表面付近の湿度は刻々変化し、しだいに周囲の湿度に近づいてゆくものと考えられる。そこで本研究においては部材中表面付近の湿度を最初から周囲の湿度と等しいものと仮定し、エアームタルの湿気拡散率 K の値として周囲の湿度付近の値

を採用しても結果的には大きなまちがいは生じないものと考えた。

このように湿気拡散率 K として周囲の湿度付近における値を採用した場合、表面付近における部材中の湿度推定値の誤差は小さくなるが部材中心部にむかうほどその誤差は大きくなるのが考えられる。事実、表-7 に示す計算値と実測値を検討してみるとそのような傾向がうかがわれる。しかし、このようにして求めた湿度推定値を収縮ひずみ推定値に変換した場合、前にも述べたように低湿度領域におけるエアームタルの湿度変化1%あたりの収縮率と高湿度領域におけるそれとの大きさが非常に異なるため、収縮ひずみ推定値の誤差が全湿度領域にわたり平均化され、その結果全体的にみた場合、誤差が小さくなるものと考えられる。

以上のような解析結果より、本研究に述べたようなセメント硬化体中の湿度分布についての理論的計算法はかなり実用性があるものと思われる。

5. 乾燥収縮応力の解析

本節においては今まで述べてきた収縮応力源解析法によって、図-6 に示すエアームタル供試体の収縮応力源を解析し、それをもとにして供試体中に発生している収縮応力の解析を行う。供試体は表-1 に示す配合AM 5-20 のエアームタルにより作成し打ち込み後、ただちに湿度 $43 \pm 2\%$ 、温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の恒温室にて乾燥を行った。収縮応力の解析を行うにあたりここではこの問題を平面応力場の問題として取り扱うこととする。

収縮応力源を S としこれを時間 t と座標 y のみの関数 $S(t, y)$ とする。いま、Airy の応力関数を導入すると面内の収縮応力 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ は次式によって与えら

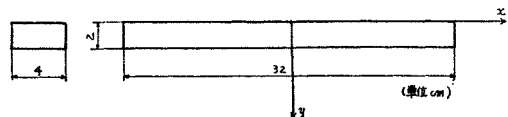


図-6 エアームタル供試体

れる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x S &= \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2}, \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \\ \tau_{xy} &= -\frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

ただし, つり合い条件, 適合条件から応力関数 ϕ は次式を満足しなければならない。

$$\frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \phi}{\partial y^4} = E \cdot \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \dots\dots\dots (12)$$

すなわち, ある境界条件のもとで式 (12) を満足する応力関数 ϕ が求まれば収縮応力は式 (11) より求めることができる。ここでは差分法を適用し, この問題を解くことにする。また 図-6 に示す供試体は上下左右対称であるので, 供試体の 1/4 部分について解析を行う。まず, エアームタル 供試体に 図-7 に示すように $\Delta x=4$ cm, $\Delta y=0.2$ cm であるような差分網を設ける。このような差分網において式 (12) を差分表示すると次のようになる。

$$\begin{aligned} 1541.130 \phi_0 - 1026.560(\phi_2 + \phi_4) - 2.566(\phi_1 + \phi_3) \\ + 1.280(\phi_6 + \phi_8 + \phi_{10} + \phi_{12}) + 256.000(\phi_7 + \phi_{11}) \\ + 0.002(\phi_5 + \phi_9) = 10.240 E_t (S_2 - 2 S_0 + S_4) \end{aligned} \dots\dots\dots (13)$$

ただし, 式 (13) 中の応力関数における添字は 図-8 に示すような差分網の節点の番号を表わす。

一方, 境界差分節点における応力関数とその勾配は境界上のつり合いより次のように求まる。

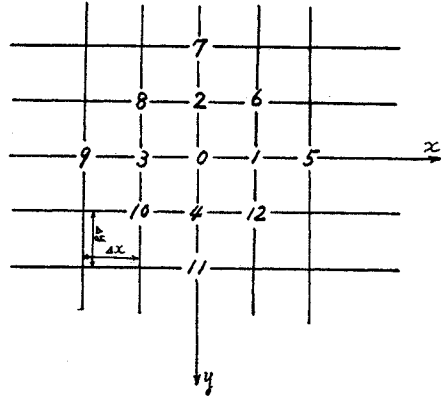


図-8 差分網

$$\left. \begin{aligned} \text{境界 1: } \phi=0, \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)=0, \left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right)=0 \\ \text{境界 2: } \phi=0, \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)=0, \left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right)=0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

また, 仮想節点上の応力関数は次式より求まる。

$$\phi_A = \phi_B \pm \left(\frac{\partial \phi}{\partial S}\right) \times \Delta S \dots\dots\dots (15)$$

一方, 供試体中の収縮応力源 $S(t, y)$ は次のようにして求めた。供試体中の湿度分布を $H(t, y)$ とし拡散方程式

$$\frac{\partial H}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 H}{\partial y^2}\right) \dots\dots\dots (16)$$

において $K=9.8 \times 10^{-6}$ m²/day (AM 5-20 の湿度 45% 付近における湿気拡散率): 初期条件 $H(0, y)=57\%$, 境界条件 $H(t, 0)=0\%$ として式 (16) を解いて供試体中の各乾燥日数における湿度分布を求め, その後前に求めた AM 5-20 の収縮率と湿度との関係を示すグラフ 図-2 を使って, これを収縮ひずみの分布に変換した。表-8 に乾燥開始後 5 日, 10 日, 15 日, 20 日, 25 日におけるエアームタル 供試体中の収縮応力源 $S(t, y)$ の分布を示す。以上のようにして境界上および仮想節点上の応力関数を乾燥開始後各時点における収縮応力源の分布関数を求め, 式 (13) を差分網の各節点に適用すれば, 節点上の応力関数を未知数とする連立方程式が得

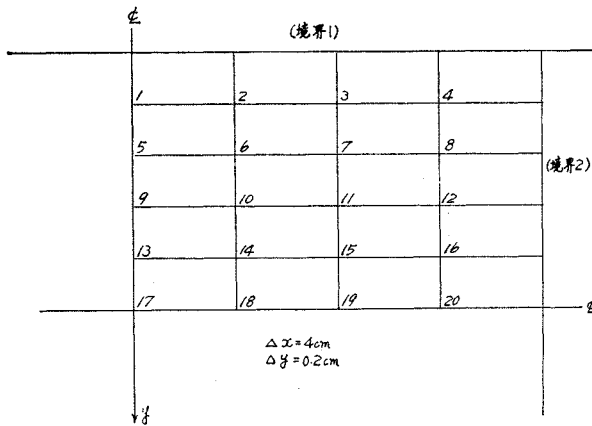


図-7 エアームタル 供試体の 1/4 部分における差分網

表-8 エアームタル 部材中の湿度および収縮ひずみの分布

表面からの距離 (cm)	0.2		0.4		0.6		0.8		1.0 (中心)	
	湿度 (%)	ひずみ ($\times 10^{-4}$)	湿度 (%)	ひずみ ($\times 10^{-4}$)	湿度 (%)	ひずみ ($\times 10^{-4}$)	湿度 (%)	ひずみ ($\times 10^{-4}$)	湿度 (%)	ひずみ ($\times 10^{-4}$)
5	49.7	16.6	55.7	12.3	60.5	10.5	63.6	9.5	64.6	8.9
10	45.0	20.8	46.8	18.8	48.2	16.9	49.1	15.8	49.5	15.7
15	43.6	22.5	44.1	21.9	44.6	21.7	44.8	21.6	44.9	21.5
20	43.2	22.7	43.3	22.6	43.5	22.5	43.5	22.5	43.6	22.5
25	43.0	23.0	43.1	23.0	43.1	23.0	43.2	23.1	43.2	23.1

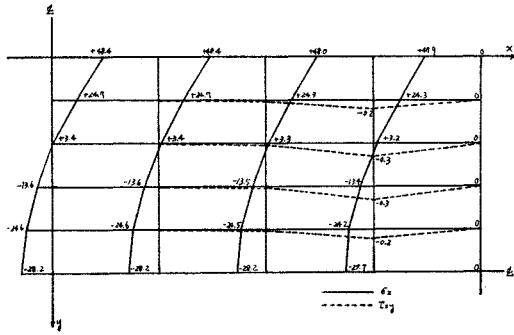


図-9 乾燥日数5日における収縮応力 σ_x および τ_{xy} (kg/cm²)

られる。これを用いて式 (11) を適用すればただちに各節点上の収縮応力成分 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ が求まる。計算は乾燥開始後5日, 10日, 15日について行った。図-9に乾燥後5日の σ_x, τ_{xy} の分布を示す。なお, σ_y の計算の結果は解析対象部材の形状からも明かなようにほとんど0であったのでここでは省略する。また τ_{xy} もわずかしか発生しておらず, 供試体中に発生している収縮応力は σ_x が支配的であり, 中央部において最大の分布を示すことが認められた。乾燥後10日, 15日における供試体中の収縮応力も σ_x を除いては0に近かったので省略することにし図-10に乾燥後5日, 10日, 15日における供試体中央部における σ_x の分布を示す。図から明かなように σ_x は乾燥が進むにつれて供試体中の収縮応力源のy軸方向の変化率が小さくなるため, その値はしだいに減少していくことがわかる。図-11に供試体上端に発生する σ_x (引張応力) の時間的変化を示す。また図中にエアーモルタルの引張強度増加曲線も示す。これによると乾燥後5日における σ_x は約 48 kg/cm² であり, これは同時点におけるエアーモルタルの引張強度約 10 kg/cm² にくらべ著しく大であり, これ以前に供試体にひびわれが発生するはずであるが実際には全乾燥期間を通じてひびわれの発生は目で観察する限りでは認められなかった。この主な原因として考えられるのは,

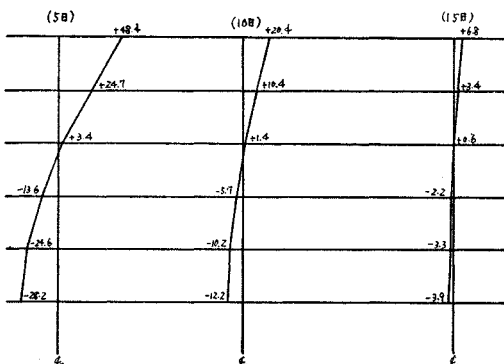


図-10 乾燥収縮応力 σ_x (kg/cm) の時間的変化

今までに述べてきた収縮応力解析過程において, エアーモルタルのクリープによる応力緩和現象を考慮しなかったことがあげられる。したがって, 以下にクリープを考慮した場合の解析結果について述べる。エアーモルタルのクリープひずみ量を観測時間 t と材令 τ の関数 $C(t, \tau)$, 弾性係数を材令 τ の関数 $E(\tau)$ としたときクリープを考慮した場合の収縮応力 $\sigma_x^*(t)$ は次式より求まる⁴⁾。

$$\sigma_x^*(t) = \sigma_x(t) + \int_{\tau_1}^t \sigma_x^*(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} E(t) \cdot \left[\frac{1}{E(\tau)} + C(t, \tau) \right] d\tau \dots\dots\dots (17)$$

ここに,

τ : エアーモルタルの材令

t : 観測時間

$\sigma_x(t)$: 弾性理論による解

$\sigma_x^*(t)$: クリープを考慮した場合の応力

$C(t, \tau)$: クリープ関数

$E(\tau)$: 弾性係数

ただし, 上式は弾性ポアソン比とクリープポアソン比が等しいとして導いたものである。

以下に式 (17) を使って図-5に示した供試体中央上端における収縮応力 $\sigma_x^*(t)$ を算出してみる。計算に先立ち式中の関数 $E(\tau), C(t, \tau)$ を知る必要がある。そこで本研究においてはエアーモルタル AM 5-20 についてのクリープおよび弾性係数測定試験を行い, これらの関数を次のように決定した。

$$E(\tau) = 1.37(1 - t^{-0.176\tau}) \times 10^6 \dots\dots\dots (18)$$

$$C(t, \tau) = \varphi(\tau) (1 - t^{-0.065(t-\tau)})$$

$$\varphi(\tau) = \left(4.750 + \frac{46.729}{\tau} \right) \times 10^{-5} \dots\dots\dots (19)$$

式 (17) は第2種ボルテラ型の積分方程式であるが, 本研究においては数値解法 (ニュートンコーツの方法) により方程式の解 $\sigma_x(t)$ を求めた。図-10に計算結果を示す。計算結果から明かなように供試体中央上端の収縮応力 $\sigma_x^*(t)$ はクリープにより著しく緩和されていることがわかる。すなわち, 弾性理論のみによる収縮応力計算値は乾燥開始後5日付近で最大値を示し, その値

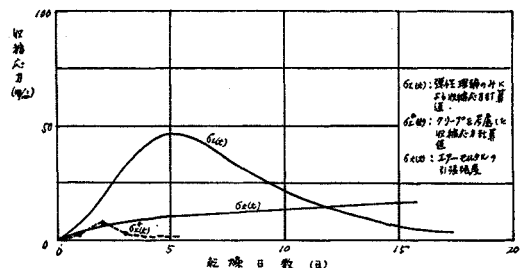


図-11 供試体中央上面における収縮応力

は約 48 kg/cm^2 となるが, クリープを考慮すると計算値は乾燥開始後 2 日付近で最大となり, その値は約 8 kg/cm^2 となる。これは同時期におけるエアームタルの引張強度 7 kg/cm^2 と大差はなくクリープを考慮に入れた場合の解析結果は弾性理論のみによるものより, より合理的なものになることが明らかとなった。

5. あとがき

本報告においてはセメント硬化体に発生する収縮応力の解析手法をエアームタルを例にとって述べてきた。まず収縮応力源はセメント硬化体中の湿度分布について湿流に関する拡散方程式を解くことにより推定し, これより収縮応力源を求めることができることを示した。この際, セメント硬化体の湿気拡散率 K を一定としてもさしつかえはないが, 定数 K の値のとりかたに一考を要することを指摘した。

ついで収縮応力解析例としてエアームタル供試体を取りあげ, 供試体中に発生している収縮応力源とそれに起因する収縮応力を解析したところ, クリープを考慮に

入れた解析結果は, 実状と比較的よく合致し, したがって本報告に述べた一連の収縮応力算定法は十分実用性があり, 構造物にしばしば発生する収縮き裂のメカニズムの解明に有力な手がかりを与えるであろうと考えられる。

参 考 文 献

- 1) たとえば, 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第 7 巻 6 号, 1969.
- 2) W. チェルニン: セメントコンクリート化学, 技報堂.
- 3) 西岡栄香・原田 有: コンクリートの透湿率および湿気拡散率について, セメント技術年報, 昭和 36 年.
- 4) ARNTYUNYAN: Some Problem in the Theory of Creep, PERGAMON PRESS.
- 5) 大浜文彦: コンクリートの初応力に関する基礎的研究, 京都大学土木工学科学学位論文, 昭和 34 年.
- 6) 栗野誠一: 伝熱工学, 丸善.
- 7) 望月 重, 他 5 名: 板構造, 鹿島出版会.
- 8) 近藤次郎: 積分方程式とその応用, コロナ社.
- 9) 大浜・森本: エアームタルのクリープおよび乾燥収縮について, 第 26 回セメント技術年報, 昭和 47 年.
- 10) 大浜・森本: エアームタルの収縮応力について, 土木学会第 27 回年次学術講演会概要集, 昭和 47 年.

(1974.1.14・受付)