

乾燥にともなう軽量コンクリートの内部 含湿量変化に関する一実験

庄 谷 征 美・米 谷 裕

An Experimental Study on the Moisture Change in Light-
Weight Concrete Dried in Air

Masami SHOYA, Hiroshi YONEYA

(昭和52年10月31日受理)

1 はじめに

セメント硬化体が乾燥されると、環境の温、湿度に対応して内部水分が蒸発し、硬化体内部に湿気勾配が形成されて、硬化体の各微小要素はこの湿気分布に応じた長さ変化をおこす。各要素間に拘束が無ければ自由ひずみとなって応力は生じないが、実際には硬化体の各要素は拘束しあい個体としての連続性を保とうとするため、固有ひずみの一部は抑制されこの抑制圧により応力の作用を受けることになる。特に、乾燥表面部には引張応力が生じ、このためコンクリート部材にはひびわれの発生する事が多い。

軽量コンクリートでは普通コンクリートに比べ平均的な乾燥収縮量は大差ないにもかかわらず、引張、曲げ強度等の低下が著しい事実が認められている。この主原因として、軽量骨材自体の含水量が大きいため乾燥時におけるコンクリート内部の湿気勾配が表面近くで非常に大きくなり、乾燥面近傍において極めて大きな内部引張応力が生ずるためといわれている¹⁾。

上記観点より本論文は、軽量コンクリートの収縮応力解析を行うための第一段階として、コンクリート内部の乾燥時における湿気分布の合理的の把握を目的として行った基礎実験の結果を述べたもので、軽量モルタルについては湿気の流れを説明する透湿率などの定数の測定、軽量コンクリートではモルタルも含めて内部の湿度分布を測定し、普通コンクリートとの対比を試みた。さらに、軽量モルタルについて求めた湿気拡散係数を用いて拡散理論より求めた湿度分布と実測の湿度分布との比較より、拡散理論適用上の問題についても言及した。

昭和53年2月

2 実験の概要

1) 使用材料；セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、細骨材としては川砂およびM社の人工軽量細骨材、粗骨材としてはA社の造粒型人工軽量粗骨材および川砂利を用いた。これら骨材の物理的性質を表—1に示す。

表—1 使用した骨材の性質

骨材種類		比 重	吸 水 量 (%)	粗粒率	有機物
粗骨材	川砂利	2.57	2.80	6.55	—
	造粒型人工軽骨	1.35 (1日吸水)	6.8 (1日吸水)	6.47	合
細骨材	川 砂	2.53	2.52	2.66	—
	造粒型人工軽骨	1.70 (1日吸水)	13.2 (1日吸水)	2.74	合

2) 配合および供試体；実験に用いたモルタルおよびコンクリートの配合を表—2に示す。モルタルでは骨材量の影響を調べるため、S/Cを3種に変化させた。水セメント比は全配合を通じ50%と一定とした。コンクリートの練りまぜには可傾式ミキサを使用し、モルタルの練りまぜには可傾式ミキサおよびモルタルミキサを使用した。供試体は材令1日で脱型、材令7日まで標準水中養生を行い試験に供した。供試体の寸法、形状は、湿気密度測定用として0.8×4×16cmの薄板状、透湿率および湿気拡散係数測定用として10×30×30cmの平板状の

表一2 モルタルおよびコンクリートの配合

種 別 (番 号)	最大 寸法 (mm)	スランプ cm (フロー mm)	S/a (%)	W/C (%)	単 位 量 (kg/m ³)				初期吸水量			
					W	C	S	G	S	G		
軽 モル タル 量	①	—	(265)	—	49.9	334	669	743	—	11.0%	—	
	②	—	(174)	—	50.1	235	469	1041	—	11.0	—	
	③	—	(124)	—	50.1	181	361	1202	—	11.0	—	
軽 ク リ コ ン ト	①	細, 粗 軽, 量	15	6.5	43.0	50.0	180	360	486	524	10.3	6.8%
	②	細; 川 粗; 砂 軽; 量	15	7.5	45.5	50.0	179	358	787	502	2.67	6.8
普 通 コ ン ク リ ー ト	普 通	15	9.5	47.5	49.9	191	383	797	894	2.67	2.74	

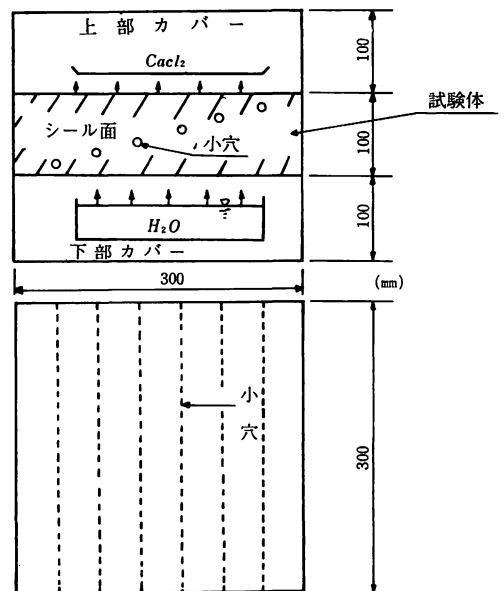
ものを使用した。また、別途にφ10×20cmの円柱供試体により湿気拡散係数の算定を試みている。乾燥に伴なう内部湿度測定用としては先の10×30×30cmの平板を使用した。

3) 測定項目および手法; 試験項目として、軽量モルタルについては湿気密度、透湿率、湿気拡散係数および乾燥供試体内部の湿度分布測定であり、コンクリートについては湿度分布測定のみを行った。湿気密度は炉中105℃絶乾状態を湿度0%の状態と仮定して、5種の湿度に保たれたデシケータ内での3~4ヶ月の測定より求めた。なお、湿度は各種塩類の飽和溶液上の密閉空間における20℃の湿度²⁾を採用した。本実験で使用した飽和溶液の種類等を表一3に示した。透湿率および湿気拡散

表一3 乾燥に用いた塩類の飽和溶液上の湿度

種 類 (塩類)	相 対 湿 度 (%)
ク ロ ム 酸	35
炭 酸 カ リ ウ ム	44
室 内	50
塩 化 ア ン モ ン	80
硫 酸 ナ ト リ ウ ム	95
水	—

係数の測定には図一1に示す装置を用いてこれを行った。この装置は、平板状の試験体を2つのカバーではさみ、上部にCaCl₂の入ったパン、下部には水の入ったパンを設け、下部より上部に湿気移動をおこさせるよ



図一1 透湿率測定装置

うにしたものである。試験体の側面10×30cm部に設けた6点の小穴の湿度を測り、この小穴の湿度が一定、すなわち、湿気の流れが定常となった時の小穴の湿度および単位時間あたりの上部カバー中のCaCl₂の吸湿量より上記定数の算定をすることができる³⁾。この試験に要した日数は約2ヶ月程度であった。なお、本試験装置は完全に側面が密封されていないと、このためパラフィンを外枠と試験体の間に流し込んで密閉した。

平板供試体の乾燥にあたっては30×30cmの相対する2面より乾燥させた厚さ10cmの4面シール体とした。シールはパラフィンにより行った。所定材令における6点の湿度をエース鋭感湿度計(ヤマト科学製, AY-1 L型, 受感部φ10mm, 測定範囲20~90%)を用いて測定した。なお、90%以上の湿度に対する測定値は精度上意味を持

たないが、目盛を拡張して指示値を読み取り、参考値としてこれを使用した。供試体内の小穴はコンクリート打設前にφ13mmの丸鋼を所定の位置に設置し、打設後2～3時間後にこれを引き抜き作製した。なお、乾燥は50% R.H., 20℃の恒温恒湿室内で行った。

3 湿気密度、透湿率および湿気拡散係数の測定

1) 各定数の定義

湿気密度、透湿率、湿気拡散係数の定義は次のように示される。

質量W, 体積Vなる物体の湿気密度をqとすれば、

$$q = \frac{W - W_0}{V} \quad (1)$$

ただしW₀は相対湿度0%における物体の質量である。本解析では105℃の絶乾時の質量をW₀とした。これは、105℃がセメント硬化体の遊離水の逸散上限温度とされていることによった4)。

つぎに、dQなる湿気がdt時間に湿流の方向に直角な面積Sを通過する時は、湿流の強さJおよび湿流密度jを次のように定義する。

$$J = \frac{dQ}{dt} \quad (2)$$

$$j = \frac{dJ}{dS} \quad (3)$$

湿流の方向をxとし、これに直角な面積Sを通る湿流の強さをJとすれば、Jは湿度勾配dH/dxまたは湿気密

度勾配dq/dxと面積Sに比例するものと考えられ、次のように示される。

$$J = -\lambda \cdot S \frac{dH}{dx} \quad (4)$$

$$J = -K \cdot S \frac{dq}{dx} \quad (5)$$

ここで、λは透湿率、Kは湿気拡散係数である。式(4)、式(5)から湿気拡散係数は次のように表わされる3)。

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

次に、端面をシールされた半径rの円柱供試体から、拡散係数Krを求める場合は無限円柱に対する拡散方程式の解を利用して近似的に次のように求めることができる5)。

$$Kr = \frac{\pi r^2}{16t} \left(\frac{Q'}{W_0'} \right)^2 \quad (7)$$

ここでW₀'は損失水量の単位高さあたりの究極値、Q'は時間tにおける単位高さあたりの損失水量である。

2) 測定結果および考察

湿気密度は各デシケータ内で乾燥された供試体の容積Vおよび最終重量Wを求め、式(1)により求めた。その結果を図-2に示す。なお図中には西岡らが普通モルタルについて求めた結果も併記した。これによると、軽量モルタルでは骨材量の多いものほど同一湿度に対する湿気密度は小さくなること、普通モルタルに比べると軽量モルタルの湿気密度が相当に大きいこと、などが認めら

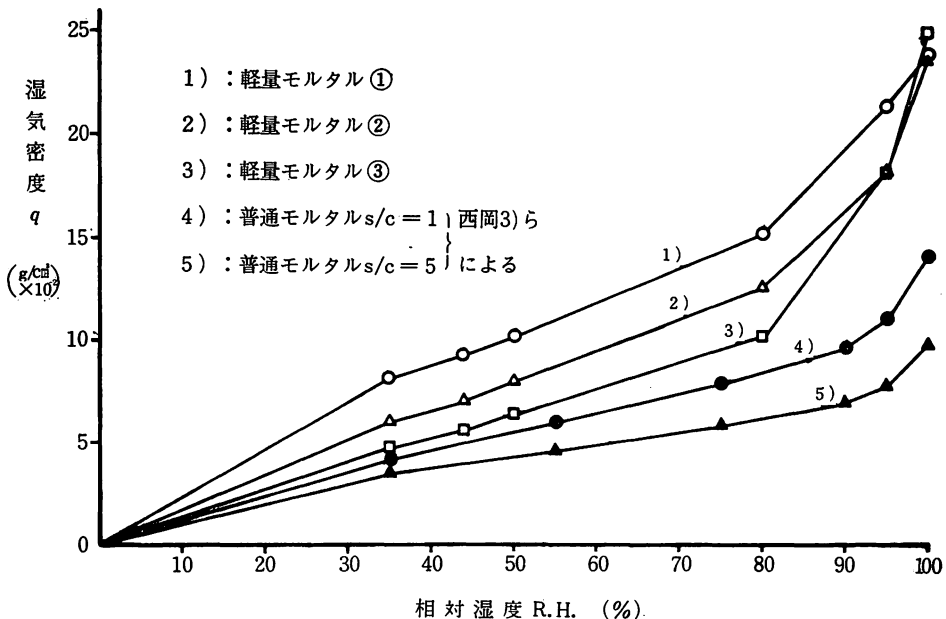


図-2 軽量モルタルの湿気密度と湿度の関係

れる。前者は、骨材に吸水されている水分の逸散量が大きいためであり、後者は、普通モルタルの総逸散水量が小さく、主に骨材部分からの水分逸散に支配されるためであろうと推察される。軽量モルタルの湿気密度～相対湿度の関係は、大浜等がエアモルタルについて求めたものと同様の傾向にあることも認められた。

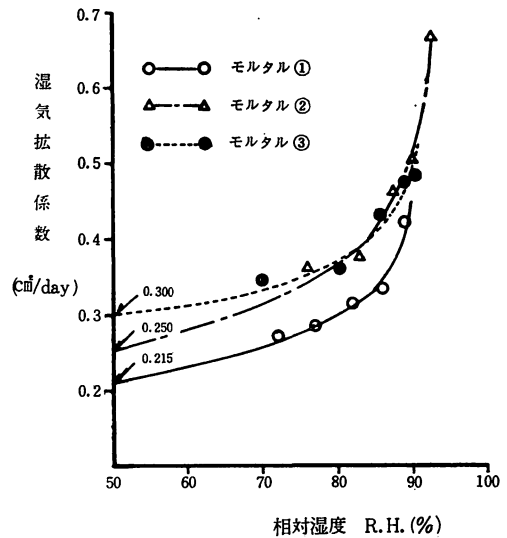
表一は軽量モルタルについて式(1)～式(6)を用いて求めた透湿率 λ 、湿気拡散係数 K と、式(7)を用いて求めた拡散係数 K_r について示したものである。前者の計算においては $S/C=1$ の1:1モルタルでは $J=2.470$ g/day, $S/C=2$ の1:2モルタルでは $J=3.033$ g/day, 1:3モルタルでは $J=3.863$ g/dayの測定値を用いた。後者の円柱供試体については、70～80日間の重量測定結果を双曲線形実験式にあてはめ最終重量を求め、重量損失量が最終損失量の半分に達する材令 t 日における拡散係数を採用した。なお、式(6)における dH/dq は図上微分してこれを求めた。これらの結果より、透湿率 λ は相対湿度の増加に伴い著しく増加し、

表一 軽量モルタルの透湿率および湿気拡散係数の評価結果

配合	測点	RH (%)	RHm	λ (g/day·m·R.H)	$(\frac{m^2}{day}) \times 10^{-6}$		J(g/day)
					K	K_r	
①	P1	71.0	—	—	—	—	2.47
	P2	74.5	72.3	0.0549	27.5	34.5	
	P3	79.8	77.2	0.0673	28.5		
	P4	84.2	82.0	0.0937	31.7		
	P5	88.0	86.1	0.1154	33.7		
	P6	90.2	89.1	0.1868	42.0		
②	P1	73.0	—	—	—		43.3
	P2	80.0	76.5	0.0722	36.1		
	P3	86.0	83.0	0.1221	37.6		
	P4	88.7	87.4	0.1872	45.9		
	P5	90.8	89.8	0.2160	50.5		
	P6	92.0	91.4	0.3663	67.6		
③	P1	64.2	—	—	—	48.5	3.86
	P2	76.5	70.4	0.0498	34.6		
	P3	84.2	80.4	0.0780	35.9		
	P4	87.2	85.7	0.1865	43.1		
	P5	90.0	88.6	0.2295	47.7		
	P6	91.0	90.5	0.6044	48.7		

湿度が70%から90%程度に増加すると4～6倍程度にも達していること、骨材量が増加すればそれに比例的に増加の傾向を示すこと、などが認められる。拡散係数 K は相対湿度の増加に伴いやはり増加する傾向を有する。また、全体的には円柱供試体から算定した拡散係数 K_r は、前者の K の平均的な値とみなしても良いようである。

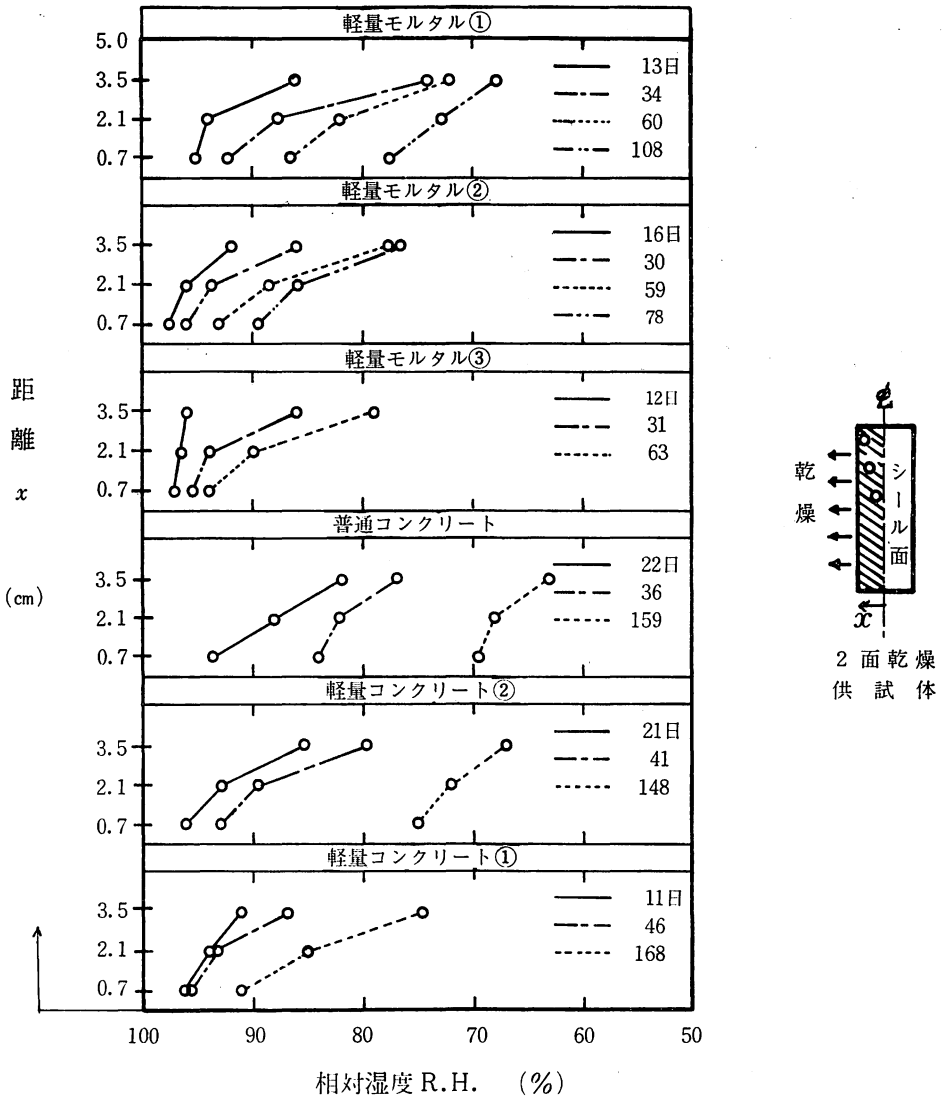
一般に、透湿の形態は水蒸気が物体を構成する微結晶の表面に吸着または凝結して液体の形となり吸着ポテンシャルの局部差により移動する吸着水透湿と、水蒸気の形のまま湿度の局部的差により移動する水蒸気透湿の2種の透湿が重複したものと考えられている。本実験の湿気密度～湿度曲線より理論的に考察した結果、湿度の増加による透湿率の増大は吸着水透湿の増大したためであり、骨材量の増加による透湿率の増加は、水蒸気透湿の増加に帰因するものと判断された。拡散係数 K の湿度増加に伴う増大は式(6)により理解されるように透湿率 λ の増大に帰因するものである。図一にこの拡散係数 K と湿度の関係を示した。



図一 軽量モルタルの拡散係数と湿度の関係

4 乾燥に伴う供試体内部湿度の測定

乾燥供試体は図一に示された試験体と同寸法の平板で、4面をシールした2面乾燥の状態50%、20℃の恒温恒湿室におかれ、各小穴の湿度の経時変化が調べられた。この結果を図一にまとめて示した。これらより、軽量モルタルでは骨材量が増すに従い、供試体中心部近くの湿度の変化は少く、表面部近くの湿度勾配が



図—4 軽量モルタルおよびコンクリートの内部湿度の乾燥による経時変化

大となること、コンクリートでは同一乾燥日数では普通コンクリートが最も乾燥が速く、細粗骨材ともに軽量骨材を用いた軽量コンクリートでは乾燥後5ヶ月程度経っても乾燥面から43mm地点の湿度が90%以上を示しており、表面より15mm地点と16%近くもの湿度差を有していること、さらに表面近くの湿度勾配が相当に大きいと推定できることなどが認められる。これに関しては、軽量骨材の含水量が大きく、乾燥に伴ない骨材からペースト部への水分の補給が徐々に行なわれるため、骨材量の多いものほど内部湿度が相当に長期間高く保たれていると考えられる。いずれにせよ、軽量コンクリート、特に吸水量の大きな人工軽量骨材を細、粗骨材として使用した

ものでは、乾燥により、比較的長い期間、大きな引張応力が表面部に作用すると推察される。以上湿度分布の測定から、軽量コンクリートの乾燥に伴ない引張、曲げ強度の低下の説明がある程度なされるものと考えられる。

5 コンクリート内部含湿度の拡散理論による推定

セメント硬化体の内部含湿度は前述のように、電気湿度計等を用いて測定することが可能であるが、これには一定の限度があると思われ、実際のコンクリート部材の含湿度を測定するには困難な点が多い。そこで、内部含湿度を推定するための一手法としての拡散方程式の適用

が考えられる。

一般に多孔質物質中を通過する湿気の現象を熱伝導と極めて類似の現象であると考えれば、次式で示される拡散方程式が成立する。

$$\frac{\partial q}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} \right) \quad (8)$$

ここでqは湿気密度、Kは拡散係数を表わす。式(8)を用いるにあたりKは定数でなければならないが、先に述べたように実際には相対湿度、すなわち含湿量と時間tの関数となっている。この点を含めて、式(8)の厳密性には問題が残るが、工学上の立場からいえばKを一定として解いた場合の推定の誤差が許容しうる範囲内であれば便宜的にはこのKを定数として取り扱うことはさしつかえないように思われる。

今、2面乾燥の問題に着目すれば式(8)はx方向のみを考えて次式で表わされる。

$$\frac{\partial q}{\partial t} = K \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} \quad (9)$$

初期条件として $t = 0$ で $q = q_0$ (初期湿気密度)、境界条件として $x = \pm a$ で $q = q_b$ (平衡湿気密度) とすると、この解は次式で与えられる。

$$q = q_b + \frac{4(q_0 - q_b)}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cdot \cos \frac{(2n-1)\pi x}{2a} \cdot e^{-Kt \left\{ \frac{(2n-1)\pi}{2a} \right\}^2} \quad (10)$$

実測した供試体内の湿度と比較するため、qbとして湿度50%の湿気密度をとり、q0として100%における湿気密度をとって各3種のモルタルについて計算を行い、求めたqを湿気密度～湿度曲線にあてはめて再計算を行い各地点の湿度H%を求めた。これは湿気密度と湿度の関係がS字状の曲線となり、式(9)のqに直接Hを置き換えた場合の誤差が相当に大きくなると判断されたためである。以上のように求めた結果と実測値を対比した例を図5に示した。計算に用いた拡散係数Kは式(7)で示されるKrと、式(6)で求めたKを図3のように50%RH程度まで延長して推定したK値との2ケースである。これより、平均的な拡散係数Krを用いて推定した場合は実測値との適合は極めて悪いこと、外気湿度近くのKを推定して用いた場合は表面近くではいくらか近い値を示すが、内部ではやはりあまり良い適合とは言えないようで、乾燥日数が長くなるに従い、推定値と実測値の差が大きくなる傾向も認められた。さらに、モルタル中の骨材量が増すと両者の差は広がる傾向も認められる。しかしながら、実用的見地から言えば、外気湿度に近い拡散係数を用いた場合には、平均的なものを用いた場合よりはいく分精度良く含湿状態の変化を表わしていると思われる、式(10)による計算は表面近くの推定に限れば比較的有効な手法として考えて良いと思われる。

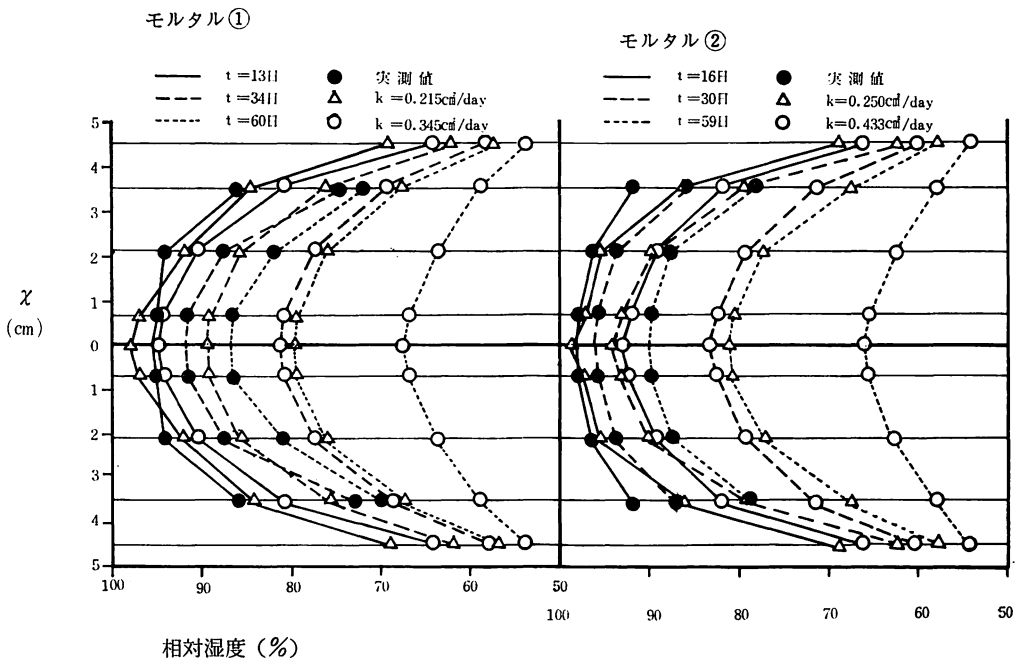


図5 軽量モルタルの内部湿度の計算値と実測値の対比例

6 拡散方程式適用上の問題について

先の章で述べたように、 K の値として外気湿度近くの拡散係数を用いて計算を行なうのも便宜の一方法であるが、全般的には測定値との適合が良好とはいえない。この点に関して K を時間および位置の関数として扱い差分法により解いた例⁷⁾もあるが、拡散理論の定義からは疑問が残ると思われる。また、平均的な拡散係数の使用が実情に即しない点を考えると、境界条件の扱いに問題があるように思われる。式(9)を解くにあたり、境界条件として表面部コンクリートの湿気密度が外気湿度のそれに平衡するとの考えは熱伝達率に対応する表面係数 f が ∞ として扱われていることを示す。満久らの木材についての測定⁸⁾では拡散係数との比 $h = f/K$ はごく小さなオーダーの有限値をとるとの報告がされている。したがって、Newtonの法則に類似させ境界条件を表わすことによる適合性の検討は次の大きな課題と考えられる。さらに、上記の f 、 K 値をいかに合理的に算定するかについてはその手法の確立を急ぐ必要がある。

7 ま と め

以上の結果を総括すれば以下のようになる。

- 1) 軽量モルタルの同一湿度における湿気密度は、湿度が100%近くを除けば骨材量の多いものほど小さい結果を示したが、普通モルタルに比べれば相当に大きく、エアモルタルのそれと類似の傾向にある。
- 2) 軽量モルタルの透湿率および湿気拡散係数は、骨材量および湿度の増加ともない大きくなる傾向を示した。得られた拡散係数の値は、相対湿度50%で $0.2 \sim 0.30 \text{ cm}^2/\text{day}$ となり、平均的には $0.35 \sim 0.5 \text{ cm}^2/\text{day}$ の値となった。
- 3) 相対湿度50%の恒温恒湿室内で乾燥された2面乾燥供試体の内部湿度の測定より、細粗ともに軽量骨材を

用いた軽量コンクリートでは普通コンクリートに比較して湿度の低下が遅く、表面部近くと中心部との湿度差が大きくなること、5ヶ月程度の乾燥でも表面から4cm以深の地点では湿度が90%以上を保っている事、などが認められた。この結果は、軽量コンクリートの乾燥による引張、曲げ強度の顕著な低下傾向の裏づけとなると思われる。

4) 内部含湿量変化は、適当な拡散係数値を用いることにより拡散方程式によりある程度まで表現できる可能性が示された。境界条件の取り扱い、各定数の適切な決定法などを含めさらに今後の検討事項としたい。

終りにあたり本研究の御手伝いを頂いた現酒井建設(株)勤務、小田島洋美君に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 長滝重義：日本ACI構造用軽量コンクリートシンポジウム討議，昭和39年
- 2) 国分正胤：土木材料実験，技報堂
- 3) 西岡栄香，原田有：セメント技術年報XV，昭和36年
- 4) W, チェルニン(徳根訳)：建設技術者のためのセメントコンクリート化学，技報堂
- 5) 河角誠，関根吾他：電力中央研究所技術第二研究所報告，72018，昭和48年
- 6) 大浜文彦，森本博昭：土木学会論文報告集228号，昭和49年
- 7) 後藤幸正，藤原忠司他：セメント技術年報XXIX，昭和50年
- 8) 満久崇磨：木材の乾燥，森北出版
- 9) 椎名国雄：コンクリートジャーナル第7巻6号，昭和44年
- 10) 庄谷征美，小田島洋美，米谷裕：土木学会東北支部技術研究発表会講概，昭和52年