

乾燥を受けるコンクリート中の水分移動を解析する手法

秋田 宏*・藤原忠司**・尾坂芳夫***

乾燥にともなうコンクリート内部での水分移動を解析する手法について検討した。水分移動の解析には、非線形の拡散方程式の適用が可能であること、移動の過程で水から水蒸気になる際の蒸発熱の影響は、常温の乾燥では無視できることを確かめた。また、解析に必要な諸係数はコンクリートの配合により変わるため、それらの配合依存性を具体的に提示し、水分移動を予測する一連の解析手順を確立した。

Key Words : moisture transfer, concrete, drying, diffusion

1. まえがき

乾燥収縮やひびわれ発生に関わるコンクリート構造物中の水分移動を、実際に測定するのは難しく、理論に基づいて予測を可能とする数値解析手法の確立が望まれている。当初は線形拡散方程式の適用が試みられたが、含水状態に応じて拡散係数が大きく変わるため、非線形拡散方程式を用いる必要のあることが、Bazant¹⁾によって示された。また、阪田²⁾は、実験で得られた含水率分布を基にボルツマン変換³⁾により、含水状態に応じた拡散係数を求める手法を提案している。

前報では⁴⁾、著者らも阪田らと同様な手法により、乾燥ばかりでなく吸湿や吸水過程をも含めた、モルタル中の水分移動について解析と実験を行い、多くの貴重な知見を得た。本研究では、モルタルでの研究成果を踏まえ、より実際のコンクリートの乾燥過程に的を絞って検討することを目的とした。

コンクリートの水分移動に関する既往の研究を検討すると、現段階では次の3つの問題点が指摘できる。第1には、解析に拡散方程式を用いることの是非であり、基本的な問題であるにもかかわらず、十分な検討がなされていない。第2には、拡散係数等の配合による変化を明らかにすることであり、これらが示されなければ実際に解析を実行することができない。しかしながら、これまでの研究では、解析に必要なすべての係数等に対する配合依存性を示したものは見当たらない。第3には、解析結果と実験結果の整合性に関する検討、および実験結果の信頼性に関する検討が十分とはいえないことである。

そこで、本研究ではもっとも信頼できると考えられる

実験結果をもとに、上記の3点を検討あるいは明確にして、水分移動解析の手法を確立した。その際、3次元の水・熱同時移動解析を行って、水分移動の過程で液体の水から気体の水蒸気になる際の蒸発熱の影響も明らかにした。また、1次元の水分移動ばかりでなく、角柱の6面すべてから乾燥させた供試体を対象に、3次元の水分移動解析も行って実用性を確認した。

本研究では、水分移動をコンクリート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。したがって、相対湿度変化から水分移動をとらえるBazant¹⁾とは異なる手法である。一方、阪田らは含水率を基にしている点が本研究と共通であるが、1次元の乾燥において割裂する代わりに長さの異なる供試体を用い、乾燥面からの距離に応じた含水率分布が、長さによらず等しいと仮定している。この仮定は、長い供試体で奥から水分が供給される場合と、短い供試体で水分の供給が無い場合を同一視することになるため、理論的に矛盾している。また、表面付近の含水率を実際よりも低く、それ以外の含水率を実際よりも高く評価してしまうことが、他の実験結果により示されている⁵⁾。したがって、本研究ではこの実験手法を採用しなかった。

2. 実験概要

水分移動をとらえるための含水率の基準として、105°Cで炉乾燥した状態(相対含水率0%、相対含水率は3章で定義する)および水中養生後の飽水状態(相対含水率100%)を用いた。したがって、本実験では飽水状態から乾燥を開始することとし、所定の日数で順次割裂してその時点の質量と炉乾燥質量との差から含水率を求めた。この方法は、割裂厚さの平均値しか得られないこと、それぞれの時点で測定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、もっとも直接的で確実な方法といえる。

* 正会員 工博 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 岩手大学教授 工学部建設環境工学科

*** 正会員 工博 東北大学教授 情報科学研究科

表一 1面乾燥および平衡含水率測定用供試体の配合

配合	粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
				セメント C	水 W	細骨材 S	粗骨材 G
(1)	20	50	43.0	360	180	757	1003
(2)	20	60	43.0	300	180	778	1031
(3)	20	70	43.0	257	180	792	1050
(4)	20	50	43.0	300	150	810	1074
(5)	20	70	43.0	300	210	745	987
(6)	20	30	43.0	600	180	667	883
(7)	20	100	43.0	180	180	825	1092

表二 6面乾燥供試体の配合因子

水セメント比 W/C (%)	30, 35, 40, 45, 50
骨材容積率 V _a (%)	55, 60, 70, 100
細骨材率 s/a (%)	60, 65, 70, 75
骨材最大寸法 (mm)	46
	20

表三 相対湿度と硫酸濃度

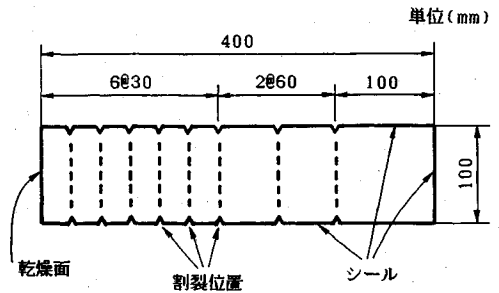
相対湿度 (%)	0	20	40	60	80
硫酸濃度 (%)	95.6	57.9	47.8	38.4	26.1

主要な実験は、1次元の水分移動を実現して含水率分布を測定するための1面乾燥実験、広い範囲の配合に対して質量減少量を調べる6面乾燥実験、雰囲気相対湿度に平衡する含水率を調べる実験の3種類である。供試体にはいずれも普通ポルトランドセメント、川砂利(比重:2.54)、川砂(比重:2.53)を用い、水中養生期間を28日とした。雰囲気条件は、1面乾燥、6面乾燥ともに室温を20°C、相対湿度を60%とした。

1面乾燥供試体の配合は表一であり、単位水量を同一にして水セメント比を変えたもの(1)、(2)、(3)、単位セメント量を同一にして単位水量を変えたもの(4)、(5)の計5種類とした。図一に寸法を示したように、10×10×40cmの角柱を用い、後に割裂しやすくするため、あらかじめ溝をつけてある。含水率分布を詳しく知るためには割裂厚さが薄いほど良いが、薄くなると割裂が困難になる。したがって、数回の試行の結果、図に示したように、割裂の最小厚を3cmに定めた。また、1次元の水分移動を実現するために、乾燥面を除く5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量を調べた結果は、8週で0.2gであり十分満足できるものであった。

6面乾燥実験では、表二に配合の因子だけを示したように、広範囲にわたる30種類の配合について調べた。すなわち、骨材容積率を60~75%の4種類とし、それぞれに対して流動性を失わない範囲で水セメント比を30~100%、あるいは50~100%に変化させた。寸法は1面乾燥供試体と同一であるが、割裂しないため溝をつけず、また6面すべてからの乾燥であるためシールもしない。

平衡含水率を求める実験の供試体は、表一の配合のうち(1)、(3)、(6)、(7)の4種類とし、10×10×40cmの角柱を厚さ1.5cmにスライスして用いた。供試体を保存したデシケータ内部で、相対湿度一定の雰囲気を実現するために、表三に示した濃度の硫酸水を置いた。それぞれの相対湿度に対し、平衡に達したかどうかを判定するために質量変化の有無を調べ、実際に6週間で質量変化が無くなったため平衡に達したものと判断



図一 1面乾燥供試体の寸法

した。

3. 解析理論

(1) 水・熱同時移動の基礎方程式

前報でも述べたように、配合によらず水分の保有状態を直接的に表わす変数と考えられる相対含水率 R を、次式により定義する。すなわち、

$$R = \phi / \phi_s \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 ϕ : 含水率 (%)

ϕ_s : 飽水時の含水率 (%)

である。ただし前報とは異なり、水分移動と同時に熱移動も考慮すると、基礎方程式は次のような連立の非線形拡散方程式となる⁶⁾。

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

$$\rho C_c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + Q \frac{\partial R}{\partial t} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 t : 時間 (s)

∇ : 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 (m²/s)

ρ : コンクリートの密度 (kg/m³)

C_c : コンクリートの比熱 (J·kg⁻¹·K⁻¹)

T : 温度 (K)

λ : コンクリートの熱伝導率 (W·m⁻¹·K⁻¹)

Q : 水の蒸発熱 (J/kg)

であり、式(3)の右辺第2項は水分の蒸発により奪わ

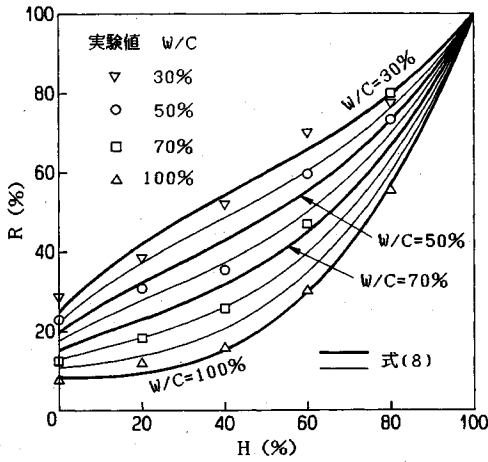


図-2 平衡含水率曲線

れる熱量を表わしている。すなわち、水の蒸発熱によって起こる温度変化およびそれともなう熱移動と、乾燥面の温度変化によって起こる蒸発速度の変化を考慮するのである。なお、厳密な水・熱同時移動解析では、温度勾配が原因で起こる水分移動 (Soret 効果) や、含水率勾配が原因で起こる熱移動 (Dufour 効果) 等の干渉項をも含めるべきであるが、これらの効果は通常の条件下では小さくて無視できることが知られているため⁷⁾、ここでも考慮外とする。

飽水状態からの乾燥では、これらの微分方程式を初期条件

$$R(x, y, z) = 100 \dots\dots\dots (4)$$

$$T(x, y, z) = T_0 \dots\dots\dots (5)$$

境界条件

$$D \frac{\partial R}{\partial n} + \alpha_m (H_s - H_0) = 0 \dots\dots\dots (6)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_c (T - T_0) + q \dots\dots\dots (7)$$

のもとに解けば良い。

ここで、 T_0 : 雰囲気温度 (K)

n : 乾燥面の法線ベクトル

α_m : 水分伝達率 (m/s)

α_c : 熱伝達率 ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

H_s, H_0 : 乾燥面および雰囲気相の相対湿度 (%)

q : 表面からの蒸発による吸収熱 (W/m^2)

である。

(2) 平衡含水率

コンクリート中の水分移動を拡散方程式を用いて解析するためには、相対含水率と相対湿度の関係を知る必要がある。コンクリート中の水分は、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とが知られている。この関係は平衡

表-4 式 (8) の係数

係数	値	係数	値
a_1	33.4	a_6	4.22×10^{-4}
a_2	1.46	a_7	7.73×10^{-5}
a_3	-0.287	a_8	1.74×10^{-4}
a_4	-1.58×10^{-2}	a_9	-4.22×10^{-6}
a_5	-1.45×10^{-2}	a_{10}	0

含水率曲線と呼ばれるが、実験で求めるには、それぞれの相対湿度に対して平衡に達するまでに長期間を要し容易ではなく、これまでの測定例もきわめて少ない。

本実験で得られた、相対湿度-相対含水率の関係は図-2に示すとおりである。一部に逆転もあるが、同じ相対湿度に対して、水セメント比が大きくなるに従い相対含水率が小さくなる関係が見られ、配合に強く依存していることがわかる。解析上面者の関係を数式化する必要があり、この結果を基に平衡含水率曲線を以下の手順で定めた。相対含水率 R を、2変数すなわち相対湿度 H および水セメント比 W/C (数式中では γ で表わす) の関数と考え、より低次の完全多項式で近似度の良いものを試行により求めた結果、次式が得られた。

$$R = a_1 + a_2 H + a_3 \gamma + a_4 H^2 + a_5 H \gamma + a_6 \gamma^2 + a_7 H^3 + a_8 H^2 \gamma + a_9 H \gamma^2 + a_{10} \gamma^3 \dots\dots (8)$$

ここで、係数 $a_1 \sim a_{10}$ を、 γ にかかわらず $H=100$ のとき $R=100$ であることと、式 (8) で表わされる曲面が実験値の最小 2 乗近似になる条件から定めた。結果として、係数は表-4 のように求まり、水セメント比 10% ごとに計算された平衡含水率曲線は図-2 のとおりである。

(3) 水分伝達率

水分伝達率は、表面係数とも呼ばれ、水分移動の境界条件式に用いられる。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依存す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) と解析値が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ですが、時間の経過とともに急速に小さくなるからである。

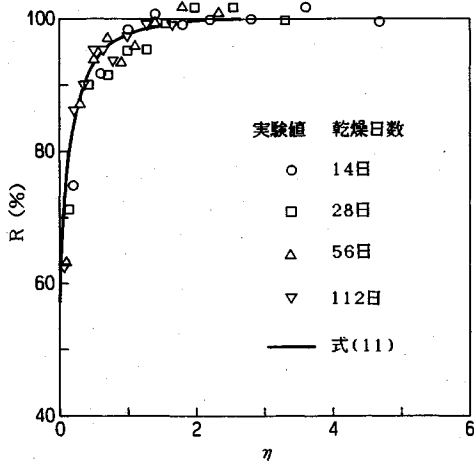
表-5 には 1 面乾燥の配合 5 種類に対し、水分伝達率 α_m 、全水分量、乾燥開始後 1 時間の質量減少量を対比させて示してある。ここで、全水分量とは、飽水状態と炉乾燥後の質量差であり、水中養生後の供試体全体に含まれる水分量を表わす。相対含水率は、全水分量に対する比率でもあるため、全水分量が同程度であれば、水分伝達率が大きいほど質量減少量が大きくなるはずであるが、実際に配合 (1) と (3) を比較するとそうになっている。逆に、配合 (1) と (4) の比較からわかるよう

表—5 水分伝達率等

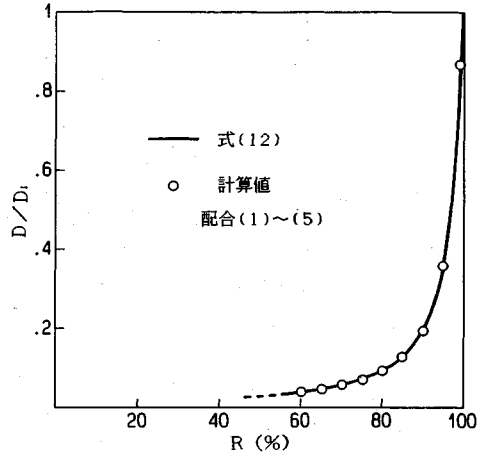
配合	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
α_m (cm/day)	4.7	4.4	5.8	6.4	7.3
質量減少量 (g)	1.0	1.1	1.4	1.0	1.6
全水分量 (g)	756	735	754	643	786

表—6 近似曲線の係数等

配合	a	b	f	η_1	D_1
(1)	0.059	0.36	0.0044	3.3	4.1
(2)	0.058	0.34	0.0042	3.4	4.3
(3)	0.107	0.44	0.0041	4.7	8.3
(4)	0.091	0.40	0.0040	4.4	7.1
(5)	0.084	0.39	0.0040	4.2	6.6



図—3 R-ηの関係



図—4 D-Rの関係

に、質量減少量が同じならば、全水分量の小さい方が水分伝達率が大きいはずであり、予想どおりの結果となっている。

(4) 水分伝達率

水分伝達率は、一般に拡散係数とも呼ばれ、阪田らが提案したようにボルツマン変換を応用して、含水率分布の測定値から求めることができる。乾燥過程における水分移動が拡散方程式で表わされるものとするれば、現象が1次元の場合、相対含水率は変数

$$\eta = \frac{x}{2\sqrt{t}} \dots \dots \dots (9)$$

に対してある曲線を描く。ここで、時間 t は日を単位としている。実際、図—3に配合(1)の例を示したように、測定値にばらつきはあるがほぼ1つの曲線に沿っていることがわかる。この結果は、実験手法が異なるにもかかわらず阪田らの結果と良く似ているが、含水率分布では手法の違いが表われている例もある⁵⁾。本実験では他の配合についても同様の結果が得られており、これは、乾燥過程を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を、明確に示しているものと考えられる。この曲線を基にして

$$D_{R=r} = 2 \left(\frac{d\eta}{dR} \right)_{R=r} \int_r^{100} \eta dR \dots \dots \dots (10)$$

により、任意の相対含水率 r に対する水分伝達率を求めることができる。式(10)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、次の双曲線を用いた。

$$R = 100 \{1 + f - a/(\eta + b)\}^2 \dots \dots \dots (11)$$

ここで、 a, b, f は定数であり、その定め方は前報と同様である。これらの係数を解析の対象とした各配合についてまとめて示せば表—6のようになる。

式(10)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、

$$D/D_1 = 1 / \{29(1 - R/100) + 1\}^{14} \dots \dots \dots (12)$$

となる。すなわち、水分伝達率は相対含水率に大きく依存し、相対含水率が100%から60%まで低下する間に、20分の1近くまで減少している。したがって、水分伝達率を一定とする線形拡散方程式を用いることは適当でなく、非線形の拡散方程式を用いる必要があることは明らかである。

図—4の曲線を配合(2)~(5)について求めても、それらのずれは図上で区別できるほどではないため、式(12)は対象とした配合すべてに共通に用いることができると考えてよい。すなわち、 D と R の関係は配合により異なるが、 D/D_1 と R の関係で表わせば、配合によらず同一の式(12)で表わすことができるのである。したがって、水分伝達率の配合依存性は、配合による D_1 の変化として表われることになり、表—6にも示したように顕著な変動が見られる。

4. 水分移動に及ぼす蒸発熱の影響

(1) 水・熱同時移動解析

水分移動の過程では、水から水蒸気になる際に蒸発熱を奪うため、熱移動も同時に起こる。一般には、この

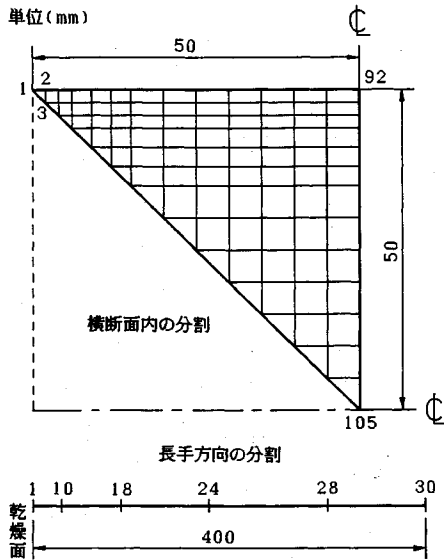


図-5 3次元解析モデル

表-7 材料の物理定数

コンクリート	熱伝達率 ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	5.41
	熱伝導率 ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	1.34
	密度 (kg/m^3)	2300
	比熱 ($kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	1.05
水	蒸発熱 ($kJ \cdot kg^{-1}$)	2448
	毛管水移動から水蒸気拡散に 変る相対含水率 (%)	95

熱移動を無視した解析が行われているが、その妥当性が十分検証されているとは言いがたい。そこで、解析により熱移動と蒸発熱の影響を検討してみる。

水と熱の同時移動を扱う場合、蒸発熱による冷却が側面からの熱の流入を引き起こすため、1面乾燥実験でも現象が1次元的であるとは限らない。そのため、1面乾燥供試体で配合(1)を対象とし、対称性から全体の1/8を取り上げ、図-5に示す3次元の解析モデルを採用した。すなわち、長手方向には横断面内の分割を共通にし、さらに乾燥面および側面に向かって分割が細くなるように配慮した結果、節点総数は3150となった。材料の物理定数は表-7を用いたが、ここでコンクリートの物理定数は、別途行った実験結果に基づいている⁸⁾。解析では、コントロールボリューム法により離散化し⁹⁾、時間積分は完全陰解法、時間きざみを6分とした。

コンクリート中の水分移動は、高含水率領域での毛管水移動と低含水率領域での水蒸気拡散を含み、移動の過程で水から水蒸気变为するため、現象が単一の過程ではない。そこで、水から水蒸気变为の際の、蒸発熱の影響を次のように取り扱った。水分移動が毛管水移動から水蒸気拡散に変わる限界は、相対含水率で90~95%と言われている¹⁰⁾。したがって、供試体内部では相対含水率が95%まで減少する間は蒸発熱を考慮する必要はな

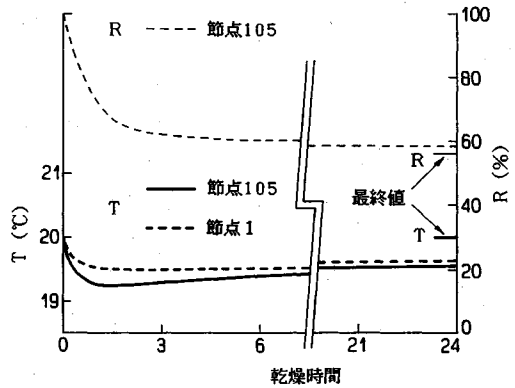


図-6 乾燥面の温度および相対含水率

く、それ以下になってからの水分減少量に対しては、式(3)の右辺第2項を適用する。すなわち、相対含水率95%以下では水分の減少はすべて蒸発により起こると見なし、蒸発熱による温度降下を考慮するのである。また、乾燥面から逸散する水分のうち、内部の蒸発分を差し引いた残りが、毛管作用により液体のまま表面まで来て蒸発する部分と考え、式(7)において対応する蒸発熱を計上する。乾燥面を除く他の5面では、水分の蒸発が無いので式(7)の第1項のみを用いれば良い。

(2) 1面乾燥における3次元的效果

配合(1)の供試体に関し、解析結果を乾燥面の中心(図-5における節点105)および隅角部(同節点1)で、温度と相対含水率の時間的な変化を示せば図-6となる。蒸発による温度降下は、乾燥開始後約1時間半で最大0.8°Cに達し、以後蒸発量の減少とともに雰囲気温度に近づくことが知られる。また、表面の相対含水率は急速に低下し、2時間程度で雰囲気と平衡する相対含水率に近い値となる。図で最終値とは、雰囲気温度および雰囲気相対湿度に対応した相対含水率であり、乾燥時間が十分長ければ、その値に到達することを示す。

乾燥面内の温度は中心が隅角部よりも低く、両者の差は最大で0.2°Cである。温度が下がると蒸発量が少なくなるため、乾燥面内における相対含水率は中心が大きく、隅角部との差が最大で0.9%であり、図上では区別できないため図-6には中心の値のみを示してある。以上の結果から、蒸発熱による温度降下が側面からの流入熱量で補われるための3次元的效果は小さいことが知られる。

そこで、比較のために3次元的效果を無視した、1次元の水・熱同時移動解析も行った。その際、長手方向のモデル分割は、3次元解析と同一にした。乾燥面の温度降下について、3次元解析における中心での値と1次元解析の値では1次元解析の方が大きい。差は全乾燥期間を通じて0.1°C以内であった。すなわち、本実験

の供試体寸法では、側面から流入する熱が乾燥面の中心温度に与える影響は小さいことが知られる。また、相対含水率に関しても差が小さく、同様の比較では1次元解析の方が最大で0.2%大きいだけである。したがって、1面乾燥実験において、側面からの熱の流入による3次元的效果は、実際上無視できる程度である。

(3) 蒸発熱の影響

蒸発熱の影響を明確にするために、熱移動を考慮しない1次元解析も行って比較した。その場合は、式(2)を初期条件式(4)および境界条件式(6)のもとで解けば良い。その結果は、蒸発熱による乾燥面の温度降下を無視しているため、蒸発量が相対的に大きく、乾燥面の相対含水率が最大で2.4%低くなる。しかし、この差は乾燥面だけであって、乾燥面から4mm以上内部の点では、両者の差が0.1%以下であった。また、質量減少量を前述の3つの解析について比較すると、最大は1次元の熱移動を無視した解析であり、最小が1次元の熱移動を考慮した解析であるが、両者の差は最大でも0.1g以下である。

したがって、水分移動の解析が主目的である場合、通常の所要精度では、蒸発熱の影響は無視できることがわかる。また、他の配合についても結果は同様であり、蒸発熱の影響に対して配合による差は問題とならない。ただし、ここでの解析にはすべて20°C前後の物性値を用いているため、この結果は常温の範囲で成立するものと考えられる。

5. 諸係数の配合依存性

水分移動の解析にあたって、コンクリートの配合に応じた諸係数の値が知られていなければ、実際上解析を実行することができない。コンクリート内部の水分は空隙中に存在しており、この空隙構造は水セメント比の影響を強く受けることが知られている¹¹⁾。そこで、実験結果と解析結果との比較から、諸係数の水セメント比に応じた変化を明らかにする。また、前節の結果より、水分移動を問題とする場合、本実験条件に対応した解析では蒸発熱の影響は無視できることがわかったので、以下の解析では熱移動を考慮せず、単に水分移動のみを扱うことにする。

(1) 6面乾燥の水分移動解析

1面乾燥実験だけでは水セメント比の範囲が広くないこと、また6面すべてから乾燥させた場合について本解析手法の適用性を調べるために、以下の付帯的な実験と解析を行った。

6面乾燥を解析するには、水分伝達率に関してコンクリート打設時の打設方向と水平方向との差異を調べる必要がある。そのため、10×10×40cmの供試体から10×10×10cmの部分を取り出し、ケース1は打設時の両

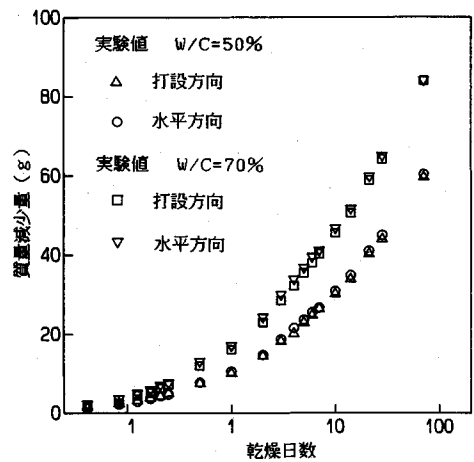


図-7 方向による質量減少量の差

側面を、ケース2は打設面および底面を残し、いずれも他の4面をシールして乾燥による質量減少量を調べた。ただし、乾燥時にはいずれも乾燥面を垂直にし、同一乾燥条件とした。図-7は配合(1)および(3)に対する結果であり、いずれもケース1である水平方向がわずかに大きい。方向による差を問題にするほどではない。したがって、コンクリートの打設方向と水平方向との違いによる水分伝達率の差を考慮する必要はなく、水分移動に関してコンクリートを等方的に扱って良いことが知られる。

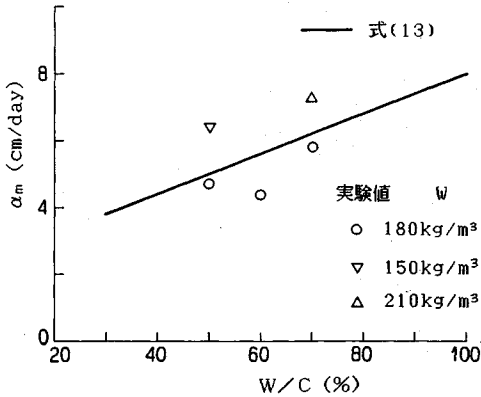
熱移動における熱伝達率は、水平面が垂直面の半分近くになることが知られているが¹²⁾、水分伝達率も同様であるかどうかは必ずしも明らかではない。また、仮に水平面の水分伝達率が垂直面の半分であったとしても、解析結果に与える差が大きくなければ、同一の値を用いることができる。表-8は、1面乾燥供試体(1)を対象に、水分伝達率 $\alpha_m=4.7$ cm/dayを基準として、それが約半分になった場合に、質量減少量にどの程度影響するのかを調べたものである。乾燥開始時では、質量減少量は水分伝達率に比例するために、初期においては両者の差が基準の半分程度であるが、時間とともに小さくなり、しかも基準に対する割合で見ると極めて小さくなる。すなわち、水分伝達率が半分になったとしても、その影響は乾燥開始後3日を過ぎれば2.2%以下となり無視できる程度である。したがって、水平面と垂直面の水分伝達率の差を無視すれば、解析モデルは対称性から供試体全体の1/16で済ませることができる。すなわち、図-5に示したモデルで長手方向には半分を用いれば良い。

(2) 水分伝達率

本実験で対象とした1面乾燥の配合5種類に関する、水分伝達率と水セメント比の関係(表-5)を示したのが図-8である。データ数が少なく、また、ばらつきも

表—8 1面乾燥における質量減少量

時間	1時間	3時間	6時間	12時間	1日	3日	7日	14日	28日	56日	112日
質量減少量 (g)	$\alpha_m=4.7\text{cm/day}$ 1.03	1.88	2.59	3.57	4.97	8.49	12.91	18.23	25.77	36.44	51.54
	$\alpha_m=2.3\text{cm/day}$ 0.62	1.47	2.26	3.31	4.74	8.30	12.74	18.07	25.61	36.29	51.40
差 (g)	0.41	0.41	0.33	0.26	0.23	0.19	0.17	0.16	0.16	0.15	0.14
差の割合 (%)	39.8	21.8	12.7	7.3	4.6	2.2	1.3	0.9	0.6	0.4	0.3



図—8 α_m-W/C の関係

あるが、阪田らの実験でもほぼ直線的な両者の関係が得られていることを考慮して、次式により両者の関係を表わす。

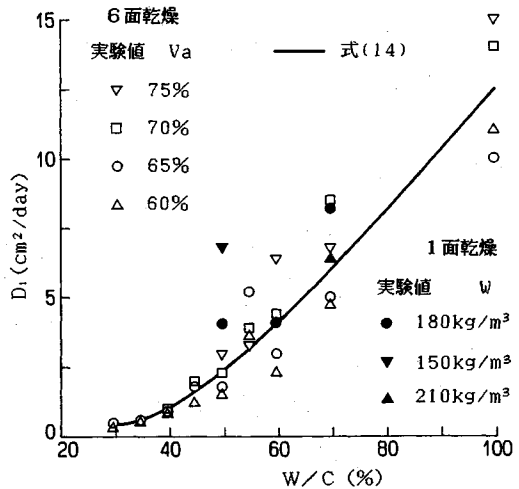
$$\alpha_m = 0.06\gamma + 2 \dots \dots \dots (13)$$

ここで、水セメント比 50~70% の範囲で得られた結果を、30~100% まで外挿したのでは推定誤差が大きくなるが、表—8 の結果から知られるように、水分伝達率の誤差の影響が小さいことから、実用上差しつかえないものと考えられる。なお、6面乾燥実験では、1日以前の(乾燥初期の)質量減少量を測定しなかったため、水分伝達率の推定に実験結果を役立てることができない。なぜならば、乾燥1日目の質量減少量における-4.6%の実験誤差が、水分伝達率の50%低下に対応するからである。

(3) 水分伝達率

外部からの水分供給が絶たれた場合の乾燥では、相対含水率が100%で同時に相対含水率の勾配が有限であることはないで、飽水時の水分伝達率 D_1 は現実に観測されることはない。しかしながら、図—4 に示したように、水分伝達率 D を D_1 に対する比で表わすと、相対含水率 R に対する変化を配合によらず同一の曲線で表わし得ることから、解析上は重要であり、 D_1 が知られば水分移動の解析が可能となる。

1面乾燥の配合5種類について求めた表—6の結果、および6面乾燥について求めた結果を図—9に示す。6面乾燥について求める手順は、 $W/C=50\sim70\%$ の範囲で得られた $D-R$ 曲線の式(12)が $W/C=30\sim100\%$ の範囲で使えるものと仮定し、水分伝達率には式(13)を用いる。 D_1 をパラメータとみなして適当な値に対して解析し、質量減少量の解析値と実験値とが一致するよ



図—9 D_1-W/C の関係

うに D_1 を定めるのである。図から、同じ水セメント比では、骨材容積率 V_a の小さい方が D_1 が小さいことが認められる。1面乾燥供試体の骨材容積率は68~74%の範囲にあるため、6面乾燥供試体の範囲と重複しており、実験値も配合(4)すなわち単位水量 210 kg/m^3 以外はほぼ一致していると言える。このように、水セメント比と水分伝達率の関係が、1面乾燥と6面乾燥でほぼ一致したことは、本解析手法の妥当性を裏づけるものと思われる。図中にはこれらの測点に関し D_1 と W/C の関係を表わす曲線

$$D_1 = 230/\gamma + 0.25\gamma - 14.7 \dots \dots \dots (14)$$

を示してある。

図—9から知られるように、同じ水セメント比でも骨材容積率の違いにより、 D_1 の値にはかなりの幅がある。 D_1 の推定誤差が質量減少量の解析結果にどの程度の影響を及ぼすかを、6面乾燥を対象に調べたのが図—10であり、質量減少量は全水分量に対する割合、すなわち相対質量減少量で表わしている。ここでは、 $W/C=50\%$ および 100% に対し、それぞれ実験による D_1 の上下限である4種類の D_1 に対する解析結果を示している。たとえば、 $W/C=50\%$ では D_1 は $1.5\sim3\text{ cm}^2/\text{day}$ の範囲にあり(図—9)、 $3\text{ cm}^2/\text{day}$ を基準とすれば D_1 に50%の低下があった場合に、質量減少量に及ぼす低下は乾燥1日で20%程度で、時間とともにその割合は減少してゆく。同様に、 $W/C=100\%$ では D_1 はほぼ $10\sim15\text{ cm}^2/\text{day}$ の範囲にあり $15\text{ cm}^2/\text{day}$ を基準として D_1 に

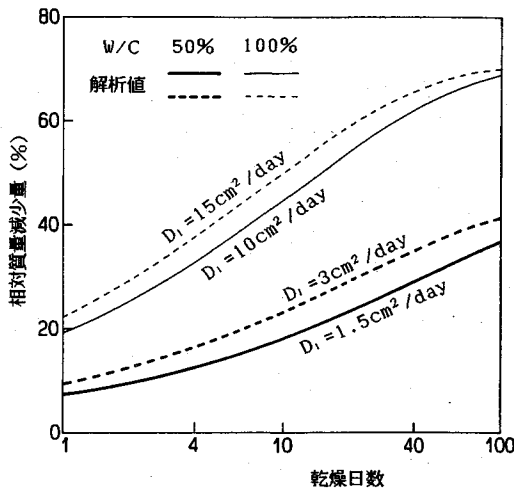


図-10 D_1 に応じた質量減少量の変化

33%の低下があれば、質量減少量への影響は1日で15%程度となる。したがって、 D_1 が質量減少量に及ぼす影響は小さくはないが、対象としたのは本実験での上限と下限であり、実用上式(14)を用いて D_1 を決定しても、その誤差が水分移動の解析値に与える影響はそれほど大きくないと思われる。

6. 解析手法の妥当性に関する検討

(1) 1面乾燥

図-11は、配合(1)の1面乾燥供試体に関する、測定相対含水率と解析値との比較である。実験値のばらつきは小さくはなく、乾燥日数に対する相対含水率の大小関係にも一部逆転が見られ、100%を越える相対含水率も得られている。このように実験精度が落ちる理由は、割裂時の厚さが不揃いになること、個々の割裂片に含まれる粗骨材の割合にばらつきを生じること等にあると思われる。しかしながら、個々の測点にはばらつきがあるものの、全体的には空間的・時間的に妥当な分布をしており、実験結果の信頼性は高いものと思われる。解析値は、乾燥面付近で実験値よりも大きい傾向があるが、全体的には空間的・時間的な相対含水率分布の変化を表わし得ており、本解析手法の妥当性を示す根拠の1つになるものと思われる。

図-12は、配合(1)と(3)の供試体に対する質量減少量の実験値と解析値を比較したものである。実験値は、3供試体の平均値であるが、ばらつきは最大でも1.3g程度であり、質量減少量の測定は、かなり精度良く行ない得ることが知られる。また、1時間から98日までの実験期間を通じて、実験値と解析値が良く一致していることがわかる。もちろん、水分伝導率を定める際に、質量減少量が一致するように η_1 を選んだのである

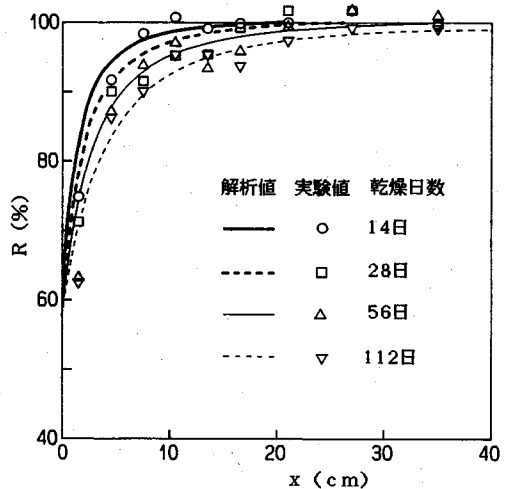


図-11 相対含水率分布

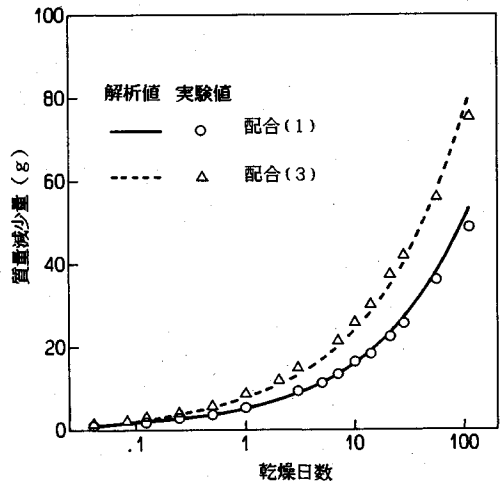


図-12 1面乾燥における質量減少量

が、対比期間全体にわたって良く一致していることは、本解析手法の妥当性を裏づける根拠の1つであると思われる。

(2) 6面乾燥

図-13は、6面乾燥供試体に関し、質量減少量の時間的な変化を、相対質量減少量で表わしたものである。実験値と解析値を比較すると、いずれの配合でも全期間を通じて両者がほぼ一致していることがわかる。このことは、1面乾燥の実験結果から得られた $D-R$ 曲線の式(12)が6面乾燥にも適合することを示し、解析手法の妥当性を示す根拠の1つになると思われる。また、この図から、水セメント比の違いが質量減少量に大きく影響することがわかり、その原因は平衡含水率曲線(図-2)から定まる乾燥面の相対含水率の差が直接影響するためと考えられる。

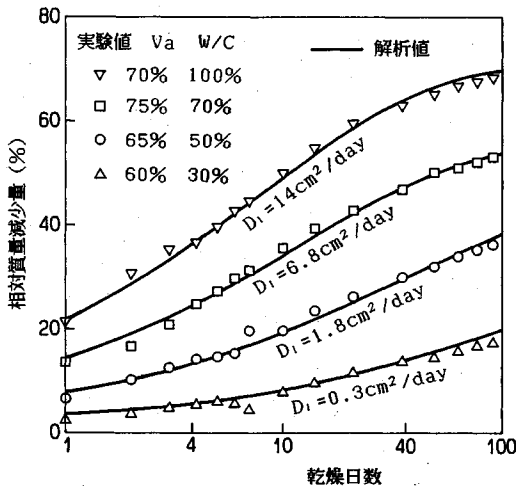


図-13 6面乾燥における質量減少量

7. あとがき

乾燥にともなうコンクリート内部の水分移動を予測する手法を確立し、任意の配合に対して解析が可能となるように、具体的な資料を提供することを目的として、実験および数値解析を行って検討した結果、以下のことが知られた。

(1) 水分移動の解析に非線形の拡散方程式を用いることの妥当性については、ボルツマン変換の適用が可能であること、実験値に適合する水分伝導率が1面乾燥・6面乾燥でほぼ一致したこと、質量減少量の実験値と解析値が1面乾燥・6面乾燥ともに良く一致したこと、1面乾燥の含水率分布に関する実験値と解析値がほぼ一致したこと、等の多面的な検討から確認できたものと考えられる。

(2) 解析の際に必要な諸係数等の配合に応じた変化を、実験値を基にして求めた結果は、平衡含水率について図-2に、水分伝達率について図-8に、水分伝導率について図-9に示す通りである。

(3) 対象とするコンクリートの配合と雰囲気条件が定めれば、含水率分布を任意に解析することが可能であり、その手順は次のようになる。

a) 当該水セメント比に対する飽水時の水分伝導率 D_1 を式 (14) から求める。

b) D/D_1 を式 (12) から定めることにより、任意の相対含水率に対する水分伝導率 D が定まる。

c) 当該水セメント比に対する水分伝達率 α_m を式 (13) から求める。

d) 非線形拡散方程式 (2) を初期条件式 (4) と境界条件式 (6) のもとに数値解析する。境界条件に必要な相対湿度 H と相対含水率 R の関係は、式 (8) により定める。

(4) 解析に必要な平衡含水率曲線、水分伝達率および水分伝導率の性質について、以下のような点が明らかになった。

a) 平衡含水率曲線で表わされる相対湿度と相対含水率の関係は、配合によって大きく異なり、水分移動の解析値に影響する度合ももっとも大きい。

b) 水分伝導率と相対含水率の関係は、飽水時の水分伝導率に対する比 D/D_1 で表わせれば、配合によらず同一の曲線、式 (12) で表わすことができる。

c) 水分伝導率は、飽水状態から中含水率領域までにはほぼ20分の1に低下する。含水率に応じて、水分伝導率にこのような大きな変動があることは、水分移動を線形拡散方程式で扱うことが不適当であることを明確に示している。

d) 飽水時の水分伝導率 D_1 は水セメント比に応じて大きく変化し、両者の関係は1面乾燥実験から得られたものと6面乾燥実験から得られたものとがほぼ一致した。

e) 飽水時の水分伝導率 D_1 は、水セメント比が同一の場合、単位水量の小さい方が、あるいは表現を変えれば骨材容積率の大きい方が大きくなる傾向が見られる。

f) 水分移動の解析値に与える水分伝達率の影響は、乾燥の初期を除けば小さい。

(5) 常温の1面乾燥実験において、水から水蒸気に変わる際の蒸発熱による温度低下が原因で、側面から熱が流入するための3次元効果は小さく、また蒸発熱による温度低下が相対含水率分布や質量減少量に与える影響も小さくて無視できる程度である。

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生佐藤嘉一郎君（現オリエンタル建設 K. K.）と小西俊之君（現 JR 東日本旅客鉄道 K. K.）および同卒業研修生寺嶋敏行君（現宮城県庁）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) Bazant, Z. P. and Najjar, L.J.: Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete, *Materials and Structures*, Vol.5, No.25, pp.3-20, 1972.
- 2) 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.
- 3) Crank, J.: *The Mathematics of diffusion*, Oxford at the Clarendon Press, 1955.
- 4) 秋田宏・藤原忠司・尾坂芳夫：モルタルの乾燥・吸湿・吸水過程における水分移動，土木学会論文集，No. 420, pp.61-69, 1990.
- 5) 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.

-
- 6) 中村泰人・他：新建築学体系 10, 彰国社, pp.105~182, 1984.
 - 7) 武山斌郎・大谷茂盛・相原利雄：伝熱工学, 丸善, 1983.
 - 8) 秋田宏・尾坂芳夫：コンクリートの熟物性および熟物性試験に関する一考察, 土木学会論文集, No. 384, pp.119~127, 1987.
 - 9) Patankar, S.V. (水谷・香月訳)：熱移動と流れの数値解析, 森北出版, 1983.
 - 10) 空気調和・衛生工学会：空気調和・衛生工学便覧 I 第 11 版, オーム社, pp.193~202, 1987.
 - 11) 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.
 - 12) 日本機会学会：伝熱工学資料 第 3 版, 1975. (1993. 6. 18 受付)

AN ANALYTICAL METHOD OF MOISTURE TRANSFER WITHIN CONCRETE DUE TO DRYING

Hiroshi AKITA, Tadashi FUJIWARA and Yoshio OZAKA

The moisture transfer within concrete due to drying was analyzed by non-linear diffusion equation. The complete procedure of the analysis was established by the comparison of the numerical results with experimental ones concerning wide range of mix proportions of concrete. The variation of the coefficients needed to the analysis were also presented related to wide range of water cement ratios and some characteristics of the coefficients are discussed based on the numerical results. In addition, the effect of evaporation heat loss on water transfer was considered by the analysis of a simultaneous heat and moisture transfer. As a result, it is shown that the effect is negligibly small as for the drying in room temperature and humidity.
