

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

A STUDY ON THE WATER DIFFUSION AND SHRINKAGE IN CONCRETE BY DRYING

阪 田 憲 次*・蔵 本 修**

By Kenji SAKATA and Osamu KURAMOTO

1. 緒 論

コンクリートの乾燥収縮の生成機構については、コンクリート中の水分が、乾燥に伴って外部へ逸散すること起因する、いわゆる、シーページ理論¹⁾によって説明される。したがって、コンクリートの乾燥収縮機構を論じる場合には、コンクリート中に存在する種々の形態の水分と、それらの乾燥に伴う挙動について明らかにすることが必要である。コンクリート中に存在する水分は、化学的結合水、ゲル水、キャピラリー水および遊離水に大別される。これらのうち、乾燥収縮の生成に顕著な影響を及ぼすのは、ゲル空隙中に存在するゲル水で、キャピラリー水および遊離水の影響は、間接的かつ小さいと考えられる²⁾。

Pickett²⁾ は、コンクリート中の水の移動が蒸気の拡散によるものであり、またコンクリート中の水分の蒸気圧が含水量に比例し、浸透性が含水量に無関係であるならば、水の移動に対する微分方程式は、拡散方程式または熱伝導方程式として知られている偏微分方程式で表わされるという仮定のもとに、式(1)を導入している。

$$\frac{\partial S}{\partial t} = K \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 S : 乾燥収縮ひずみ、 K : 収縮の拡散係数。

式(1)を、境界において、熱伝導における Newton の輻射の法則を適用することにより、境界値問題として解き、さらに、応力とひずみとの関係がフックの法則に従うとして、収縮によるコンクリートの内部応力を求める方法を提案している。Pickett の研究は、水分の逸散についての実験的な検討が十分でないことなど、検討すべき問題点もあるが、乾燥収縮の生成機構を論じるうえで示唆に富んだ研究である。

一方、コンクリートの乾燥収縮およびクリープに関する最近の研究の動向は、この種ひずみの予測法および構成方程式の確立に関する研究である。すなわち、各種のプレストレストコンクリート構造物の設計施工、ひびわれの予測および許容応力度法から限界状態設計法への移行などにより、コンクリートの乾燥収縮およびクリープの、より適切な予測が必要となってきたためであると考えられる。この種ひずみの予測法については、従来より種々の予測式が提案されており、すでに、設計基準等にも採用されているところである。しかしながら、その精度は、必ずしも十分なものではなく、より適切な予測法を確立するためには、コンクリートのこの種性質の生成機構との関連を考慮したものにする必要がある。

本研究は、コンクリートの乾燥収縮ひずみを予測するための前提として、その生成機構を明らかにすることを目的としたものである。特に、コンクリート中の水分の、乾燥に伴う挙動を明らかにするとともに、水分の逸散と収縮ひずみとの関係について言及する。

2. 非線形拡散方程式によるコンクリート中の水分の分布の推定

拡散方程式によって供試体中の水分の分布を仮定することが可能であれば、含水量の変化の供試体全体の積分値は、供試体全体の重量変化を測定することによって求められ、それから拡散係数等の特性値が求められる。この拡散係数を用いて、供試体表面(あるいはその近傍)の含水量の経時変化が計算でき、それと表面でのひずみに対応させることによって、コンクリートの乾燥収縮機構を検討することができる。このような考え方により、著者³⁾ は式(2)に示す3次元の拡散方程式を解き、式(3)に示す級数解を得た。そして、式(3)の定数 K (拡散係数) および μ (蒸発係数 = f/K) を実験より決定した。なお、 f は表面係数 (cm/day) である。なお表面係数

* 正会員 工博 岡山大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 ピーエスコンクリート(株)

はコンクリートの性質によって決まる定数である。

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

ここに、 C ：含水量 (kg/l), K ：拡散係数 (cm²/day).

$$\int_V C \cdot dV = \sum_{n,m,l} \frac{2 \mu^2}{\alpha_n^2 \{(\alpha_n^2 + \mu^2)a + 2 \mu\} \cos^2 \alpha_n \cdot a} \cdot \left\{ \cos \alpha_n a \frac{\alpha_n^2 - \mu^2}{\alpha_n^2 + \mu^2} \right\}^2 \cdot \frac{2 \mu^2}{\beta_n^2 \{(\beta_n^2 + \mu^2)b + 2 \mu\} \cos^2 \beta_n \cdot b} \cdot \left\{ \cos \beta_n b \frac{\beta_n^2 - \mu^2}{\beta_n^2 + \mu^2} \right\}^2 \cdot \frac{2 \mu^2}{\gamma_n^2 \{(\gamma_n^2 + \mu^2)c + 2 \mu\} \cos^2 \gamma_n \cdot c} \cdot \left\{ \cos \gamma_n c \frac{\gamma_n^2 - \mu^2}{\gamma_n^2 + \mu^2} \right\}^2 \cdot \exp(-Kk^2 t) \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 $\alpha_n, \beta_n, \gamma_n$ ：それぞれ、 x, y, z 方向の n 番目の固有値。 a, b, c ：それぞれ、角柱供試体の大きさを表わす x, y, z 座標の大きさ。

以上の手法で求めた水分の逸散量の経時変化の計算値と、10×10×40 cm の角柱供試体を用いて求めた実験値とを比較したのが 図-1 である。図から明らかなように計算値と実験値は一致せず、乾燥の初期には実験値が計算値よりも大きくなり、ある程度乾燥が進行すれば逆になる。このような傾向は Carlson⁴⁾ によっても報告されている。また、Pickett²⁾ も同様の現象を報告し、 K は時間の関数として扱うべきであるとしている。しかし、 K は含水率 C の関数とすべきである。すなわち、図-1 から明らかなようにコンクリート中の水分が多い場合には水分の外部への逸散は多くなるが、水分が少ない場合には外部への逸散も少なくなる。このような現象の支配方程式は、式 (4) で示すような非線形の拡散方程式になる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}(K \text{ grad } C) \dots\dots\dots(4)$$

本研究においては、式 (4) を有限要素法を用いて定式化する。有限要素法によって対象としている問題の定式化を行う方法として、重みつき残差法⁵⁾ を用いる。すなわち、支配方程式および境界条件は次式のように表わさ

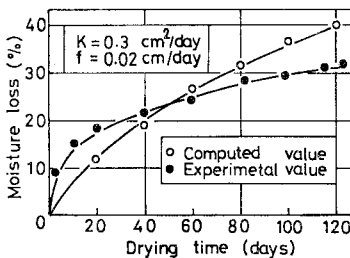


図-1 線形拡散方程式による計算例

れる。

$$L(C) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial C}{\partial t} + Q = 0 \dots(5)$$

$$\Gamma(C) = K_n \left(\frac{\partial C}{\partial n} \right)_s - f_n (C_e - C_s) = 0 \dots\dots(6)$$

ここに、

K_n ： n 方向の拡散係数

C_e, C_s ：それぞれ、外界およびコンクリート表面 (またはその近傍) の含水率

f_n ：表面係数

境界条件を満足する試験関数 $\{C\}_a$ を、次式のように仮定する。

$$\{C\}_a = [N]\{C\}, \text{ただし、} \Gamma(\{C\}_a) = 0 \dots(7)$$

ここに、 $[N]$ は、座標軸のみによって決まる形状関数である。試験関数 $\{C\}_a$ は、式 (5) を必ずしも満足せず、残差 R を生じる。最良の近似を得る方法は、残差 R が領域 V のすべての点において恒等的に 0 であれば、次式が成立することを利用するものである。すなわち、

$$\int_V W_K \cdot R dV = \int_V W_K \cdot L(\{C\}_a) dV = \int_V N_K \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \bar{Q}(t) \right] dV = 0 \dots\dots\dots(8)$$

ここに、

$$\bar{Q}(t) = \frac{\partial C}{\partial t} - Q$$

W_K ：重み関数で、ガレルキン法により形状関数 N_K に等しいとする。

以上の結果、 n 節点をもつ有限要素系におけるコンクリート中の水分逸散を支配する方程式は、マトリックス表示すると、次式のようになる。

$$A \cdot \dot{C} + K(C) \cdot C(t) = Q(t) \dots\dots\dots(9)$$

ここに、

A ：節点の座標のみで決まるマトリックス

$K(C)$ ：コンクリートの含水率に依存する拡散マトリックス

$C(t)$ ：時間 t における節点の含水率マトリックス

$Q(t)$ ：時間 t における水分の流出入マトリックス

本研究においては、4 角形アイソパラメトリック要素を用いて解析した。なお、要素マトリックスの決定、境界要素の選定とそれに伴う拡散マトリックスの修正方法および具体的な解析手法については、誌面の関係上割愛し、文献^{6),7)}に譲る。

非線形拡散方程式を数値解析する場合、ある時間ステップごとに、そのときの含水率の関数として表わされる

拡散係数を決定しなければならない。これは、次に述べる実験より求める。すなわち、実験により、拡散係数を含水率の関数として求める。次に表面係数を仮定する。これらの値をインプットデータとして、上述の数値解析を行い、供試体から外部への全逸散水量の経時変化を計算する。それを実験結果と比較し、両者が一致するときの表面係数を求める。

3. 実験概要

実験は、拡散係数を求めるための実験と、コンクリート中の水分逸散と収縮ひずみとの関係を求めるための実験とに大別できる。以下、それらの概要について述べる。

(1) 使用材料

本実験に用いたセメントは住友社製普通ポルトランドセメント、粗骨材は最大寸法 20 mm の砕石、細骨材は海砂である。コンクリートおよびモルタルの配合を表-1 に、それらの強度および弾性係数を表-2 に示す。

(2) 供試体

前述のごとく、拡散係数を含水率の関数として求めるためには、供試体中の各点における含水率の経時変化を

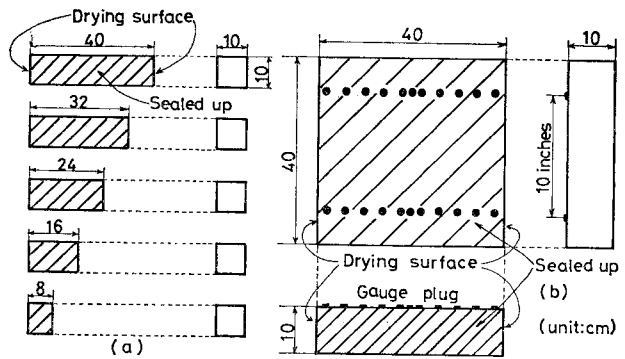


図-2 供試体の形状と寸法

測定しなければならない。本実験においては、(i) 長さの異なる供試体の重量変化により求める方法、(ii) r 線密度検層法、および、(iii) 土壌水分計による方法の3種類の方法を試みたが、(ii)、(iii)の方法は精度上満足すべきものでなく、(i)の方法を主体とした。

図-2 (a) は、(i)の方法に用いた供試体の形状を示したものである。供試体は、乾燥表面2面を残し、他の4面をビニール塗料およびパラフィンフィルムで被覆し、水分の逸散が1次元的になるよう考慮した。

図-2 (b) は、乾燥収縮ひずみ測定用供試体の形状、寸法を示したもので、乾燥表面からの深さ方向各点のひずみを測定するもので、乾燥表面以外の4面を、上記同様被覆した。

(3) 実験方法

コンクリートの練混ぜは、可傾式ミキサ (容量 54 l) で行い、打設後 24 時間実験室内に放置した。脱型後は所定の材令になるまで標準水中養生を行った。試験開始時の材令は、7日、14日 および 28日である。所定の材令に達した供試体は図-2 に示すように、被覆およびゲージプラグの取付けを行い、重量変化およびひずみを測定した。供試体重量の測定は、卓上台秤 (容量: 10 kg, 感量: 1 g) を用いて行った。ひずみの測定は、ホイットモアひずみ計 (検長 10 in.) を用いて行った。実験は温度 $20^{\circ}\text{C} \pm 1 \text{ deg.}$ 、湿度 60% R.H. の恒温恒湿室内にて行った。

いま、図-2 に示した長さの異なる供試体の逸散水量と時間との関係を測定すれば、ある時間 t における乾燥表面からの深さ x (本実験では、 $x=2, 6, 10, 14, 18$ cm) の点の含水率 $C(x, t)$ は、乾燥表面から x の距離の点における水分の分布が、供試体の大きさにかかわらず一定であると仮定すれば、次式より求められる⁷⁾。

$$C_i(x_i, t) = \left(1 - \frac{w_i - w_{i-1}}{w_0(l_i - l_{i-1}) \cdot S} \right) \times 100 \dots (10)$$

ここに、 l_i : 供試体の長さ (cm)、 w_i : 長さ l_i の供試体

表-1 コンクリートおよびモルタルの配合

Kind of specimen	W/C (%)	W (kg/m³)	C (kg/m³)	S/a (%)	S (kg/m³)	G (kg/m³)	
Concrete	A	48.3	203	420	44	731	926
	B	43.6	183	420	44	754	996
	C	50.1	213	420	44	720	912
	D	56.4	203	360	44	753	954
	E	42.3	203	480	44	709	899
	F	48.3	203	420	42	698	959
	G	48.3	203	420	46	764	893
Mortar	H		272	566	—	1 387	—
	I		254	586	—	1 422	—
	J		290	553	—	1 354	—

表-2 コンクリートの強度と弾性係数

Kind of specimen	Age (days)	Modulus of elasticity		Compressive strength		Tensile strength	
		kg/m²	MPa	kg/cm²	MPa	kg/cm²	MPa
A	7	27.8	27 244	348	34.1	30.5	2.99
	14	28.5	27 930	359	35.2	32.0	3.14
	28	31.7	31 066	452	44.3	34.6	3.39
B	28	31.5	30 870	501	49.1	42.9	4.20
C	28	31.0	30 380	387	37.9	34.0	3.33
D	28	29.5	28 910	344	33.7	34.4	3.37
E	28	32.5	31 850	514	50.4	37.1	3.64
F	28	31.8	31 164	410	40.2	37.6	3.68
G	28	31.6	30 968	432	42.3	35.6	3.49

の時間 t における逸散水量 (g), w_0 : 単位体積当たりの可能逸散水量 (kg/l) および S : 乾燥表面の面積 (cm²).

可能逸散水量とは, 乾燥開始時の供試体重量と, 実験終了後 80°C の炉乾燥によって得られる供試体の絶乾重量との差である.

なお, 上述の方法と同時に, r 線による含水率の測定を, 低キュリー (100 μ Ci) の ⁶⁰Co を線源に用いて行い, さらに, 島津製作所製土壌水分計 (SM-3 B) を埋め込んだ供試体によっても含水率の測定を行った. 土壌水分計による方法は, 石コウブロック内の電極間の電気抵抗の変化から含水率を求めるものである.

4. 実験結果と考察

(1) 拡散係数の決定

1次元の非線形拡散方程式は,

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(C) \frac{\partial C}{\partial x} \right) \dots\dots\dots (11)$$

となる. いま, $\lambda = x/\sqrt{t}$ なる変数を導入し, 境界条件のもとでボルツマン変換⁹⁾を行うと, 式 (11) より, 拡散係数 $K(C)$ は, 次式のように表わされる.

$$K(C) = \int_c^{C_s} \lambda \cdot dC / 2 \left(\frac{dC}{d\lambda} \right) \dots\dots\dots (12)$$

ただし, $C_s=100\%$ である.

図-3 は, 長さの異なる供試体の乾燥に伴う逸散水量と時間との関係の一例を示したものである. この結果を式 (10) を用いて, 乾燥表面からの深さ x の点における含水率の経時変化を表わしたのが, 図-4 である. 図-4 によれば, $x=2$ cm すなわちコンクリート表面近傍の含水率の変化は著しいが, 少し深い点になれば, その変化は小さい. このような傾向は, 他の供試体においても同様である. これは, 本実験のように, 比較的乾燥期間が短いものでは, 外気の湿度の影響を直接受ける表面近傍の含水率は急激に低下するが, 内部の点では, 外気と

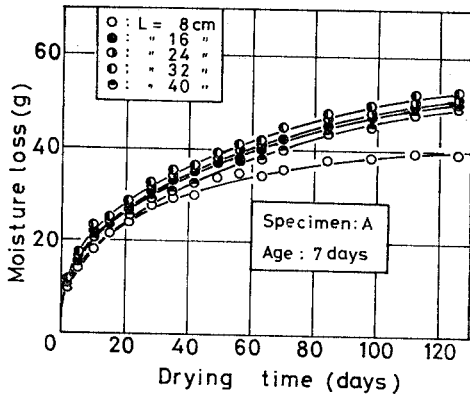


図-3 逸散水量~時間曲線

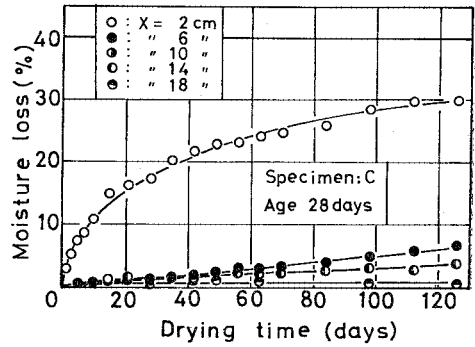


図-4 逸散水量~時間曲線

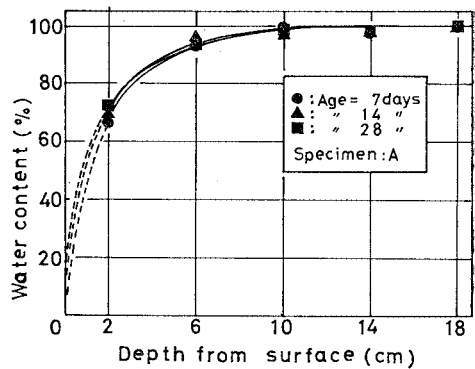


図-5 含水率の分布

の湿度差の影響をそれほど受けないためであると考えられる. 以上の事実をさらに明確に示したのが, 図-5 である. 図-5 は, 乾燥期間 98 日目における含水率の乾燥表面から深さ方向への分布を示した一例である. 図によれば, 表面から 4 cm 程度までは著しい含水率の低下がみられるが, それ以上の深さにおける含水率の低下はきわめて小さい.

以上のことから, コンクリートの乾燥は, 外気にふれるごく表層では顕著であるが, コンクリート内部では, きわめて緩慢であることがうかがわれる.

図-6 に, r 線密度検層法および土壌水分計によって求めた逸散水量と乾燥日数との関係を示す. 図によれば

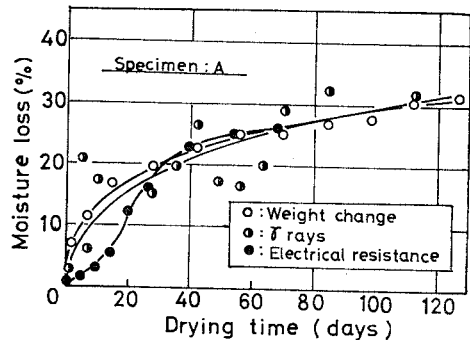


図-6 逸散水量~時間曲線

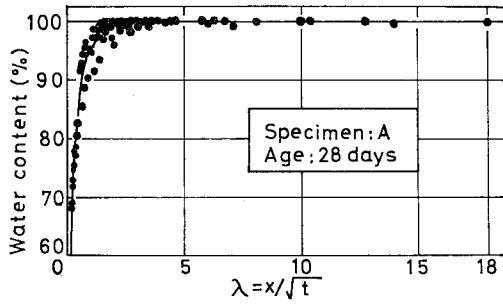


図-7 含水率とλとの関係

ば、前者はばらつきが大きく、後者は、重量変化から求めたものとは異なった特徴を示す。これは、いずれの方法も、含水率の変化を直接測定するものでなく、密度や電気抵抗などから間接的に求めているためであると考えられる。しかし、大略ほぼ同様の傾向を示している。

図-7は、図-4に示した結果を、前述のλなる変数を横軸に、含水率を縦軸にとって描いたものである。図に示した曲線を、次式で近似する。

$$C = 100 \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{a - \lambda}{b} \right)^n \right\} \dots \dots \dots (13)$$

ここに、a, b および n は、曲線の形状によって決まる定数である。なお、式(13)は、厳密には境界条件を満足しないが、式(12)の積分値を求めるとき、異常積分とならないよう考慮して近似したものである。表-3は、

表-3 式(13)の定数

Kind of specimen	Age (days)	Water content (%)	a	b	n	
Concrete	28	0~92	18.00	18.00	60	
		92~100	18.00	18.00	30	
	7	0~92	18.00	18.00	60	
		92~100	17.25	18.00	30	
	14	0~100	18.00	18.00	60	
		—	—	—	—	
	B	28	0~85	17.88	18.00	60
			85~100	17.56	18.00	40
	C	28	0~92	17.75	18.00	60
			92~100	17.38	18.00	30
	D	28	0~90	18.00	18.00	60
			90~100	18.00	18.00	40
E	28	0~90	17.88	18.00	60	
		90~100	16.56	18.00	20	
F	28	0~93	18.00	18.00	60	
		93~100	17.88	18.00	50	
G	28	0~100	17.75	18.00	40	
		—	—	—	—	
Mortar	H	28	0~85	18.00	18.00	60
			85~100	17.38	18.00	30
	I	28	0~92	17.88	18.00	60
			92~100	17.13	18.00	30
	J	28	0~90	18.00	18.00	60
			90~100	17.38	18.00	30

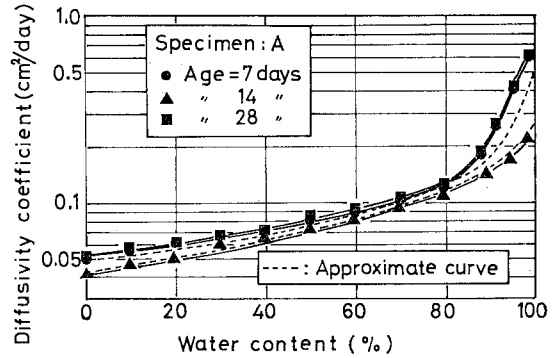


図-8 拡散係数と含水率との関係

定数 a, b および n を一括して示したものである。

式(13)を用いて、式(12)で示される拡散係数を求めた一例を、図-8に示す。

図-8によれば、拡散係数は含水率ときわめて密接な関係があることがうかがわれる。すなわち、含水率が高い範囲においては、含水率の低下とともに拡散係数が急激に小さくなるが、含水率が70~80%程度以下になれば、拡散係数はほぼ一定値になると考えられる。このような傾向は、いずれの供試体においても同様である。このような結果は、Bažant ら⁹⁾によっても報告されている。

図-8に示した拡散係数と含水率との関係を次式で近似する。

$$K(C) = K_0 + \frac{K_s - K_0}{1 + \left(\frac{100 - C}{100 - C_c} \right)^n} + \frac{K_s - K_0}{1 + \left(\frac{100}{100 - C_c} \right)^n} \cdot \frac{C - 100}{100} \dots (14)$$

ここに、 K_s : 飽和状態での拡散係数、 K_0 : 絶乾状態での拡散係数、 C_c : 曲線の変曲点での含水率および n: 定数。

このようにして求めた各供試体に対する n, K_s , K_0 および C_c の値を表-4に示す。

表-4 式(14)の定数

Kind of specimen	Age (days)	K_0 (cm²/day)	K_s (cm²/day)	C_c (%)	n	
Concrete	A	28	0.047	0.76	98.5	0.81
		7	0.047	0.76	98.5	0.81
		14	0.044	0.34	99.5	0.28
	B	28	0.031	0.55	97.5	0.79
	C	28	0.026	1.20	98.0	1.10
	D	28	0.046	0.65	98.0	0.80
	E	28	0.036	1.21	94.5	1.65
	F	28	0.045	0.48	98.5	0.57
	G	28	0.056	0.63	98.0	0.52
Mortar	H	28	0.048	0.75	94.5	1.35
	I	28	0.032	0.73	97.5	1.01
	J	28	0.049	0.75	95.0	1.15

表-4 によれば、乾燥開始時の拡散係数は、0.5~1.0 cm²/day 程度である。この値は、含水率にかかわらず拡散係数を一定値とする従来の研究結果（たとえば、Pickett の研究²⁾では 0.23 cm²/day、著者の研究³⁾では 0.30 cm²/day）とは著しく異なる。しかし、本研究の結果においても、平均的な拡散係数を考えれば、従来の研究結果と大差はない。

一般に、コンクリートの乾燥収縮が問題となるのは、若材合すなわち高含水率のコンクリートにおける場合であることが多い。そのような場合には、拡散係数を含水率の関数として取り扱った方が望ましいと思われる。

図-9 は、定数 n と水セメント比との関係を示したもので、水セメント比が大きくなるほど n の値は小さくなる傾向が認められるが、それほど顕著なものではない。

このようにして求めた含水率と拡散係数との関係を用い、前述の有限要素法により、供試体 (10×10×40 cm) 全体の逸散水量と時間との関係を求めた。すなわち、図-10 に示す。51 節点および 32 個の 4 節点長方形アイソパラメトリック要素をもつモデルを用いて解析した。なお、初期条件および境界条件は次のとおりである。

$$\left. \begin{array}{l} \text{初期条件: } C(x, y, 0) = 100\% \\ \text{境界条件: } K \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)_s = f(C_e - C_s) \end{array} \right\} \dots (15)$$

このような解析を行うためには、拡散係数 K および表面係数 f を与えてやらなければならない。 K は、前述の実験結果を用いる。表面係数 f の決定法は次のとおりである。すなわち、種々の f を仮定して計算し、逸散水量～時間曲線を求め、それらのうちで実験結果と

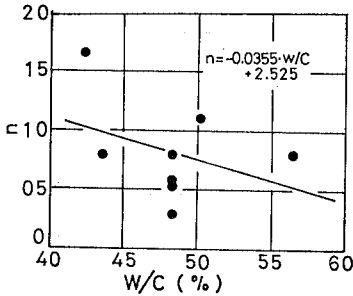


図-9 定数 n と水セメント比との関係

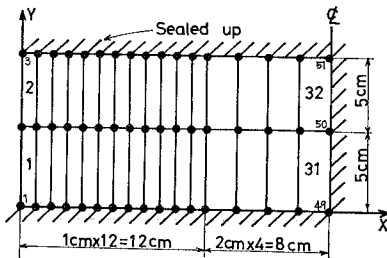


図-10 要素の分割

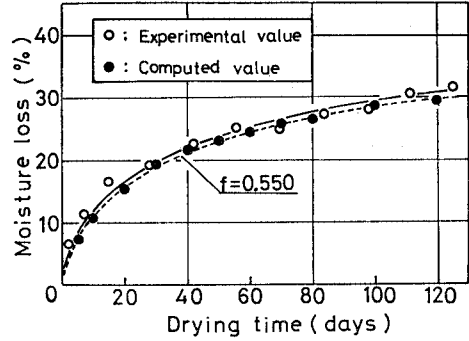


図-11 表面係数の決定

表-5 実験結果

Kind of specimen	Age (days)	Shrinkage strain * σ_{ss} ($\times 10^{-5}$)	Moisture loss ** W_{ss} (g)	Capacity of moisture loss W_0 (kg/l)	Surface factor f (cm/day)	
Concrete	A	28	37.50	33.1	0.147	0.550
		7	37.00	38.4	0.144	0.600
		14	37.00	35.9	0.146	0.600
	B	28	28.50	24.7	0.131	0.100
	C	28	38.50	35.9	0.158	0.550
	D	28	33.75	42.2	0.158	0.750
	E	28	36.00	25.8	0.139	0.075
	F	28	47.25	35.2	0.147	0.550
G	28	33.75	32.1	0.145	0.550	
Mortar	H	28	—	43.4	0.202	0.500
	I	28	—	29.5	0.180	0.075
	J	28	—	47.6	0.214	0.550

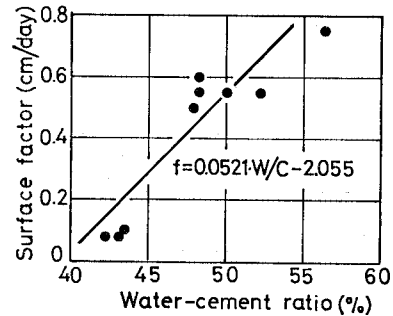


図-12 表面係数と水セメント比との関係

最もよく一致するときの f の値を、そのコンクリートの表面係数とした (図-11 参照)。このようにして求めた表面係数の値を表-5 に示す。また、図-12 に、表-5 に示した表面係数と水セメント比との関係を示す。図によれば、両者の間にはきわめて密接な関係が認められ、水セメント比が大きくなるほど表面係数は大きくなる。

(2) 乾燥収縮ひずみと水分逸散率との関係

図-13 は、乾燥表面から x cm の深さにおける乾燥収縮ひずみと乾燥時間との関係の一例を示したものである。

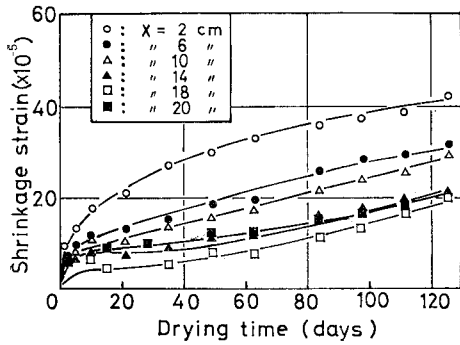


図-13 乾燥収縮ひずみ～時間曲線

なお、本実験より得られた乾燥収縮ひずみは、厳密には自由収縮ではなく、拘束応力の影響があるものと思われる。このようなひずみを乾燥収縮と定義することには議論のあるところであるが、本研究では、このような拘束応力の影響を考慮せず、測定により得られたひずみそのものを乾燥収縮ひずみとしていることを付記する。

また、表-5 に、表面より 2 cm の深さの点の 98 日目の収縮ひずみの値を一括して示す。図-13 によれば、乾燥表面近傍の乾燥収縮ひずみは、乾燥初期(20 日程度)において急激に増大し、120 日程度になれば、ややその増加率は低下する。ところが、乾燥表面より深い点では、120 日程度では、ひずみそのものも小さく、増加率もそれほど低下しない。これは、前節で述べた、コンクリート中の水分の逸散機構ときわめてよく類似している。

図-14 は、乾燥表面近傍、すなわち表面より 2 cm の点の乾燥収縮ひずみ～時間曲線を示したものである。図から明らかなように、単位セメント量が多いほど乾燥収縮は大きくなる。同様に比較した結果によれば、単位水量が多いほど、 S/a が小さいほど乾燥収縮は大きくなり、この傾向は、前節で述べた逸散水量に対する配合条件の影響と同様である。

以上の事実より、乾燥収縮がコンクリート中の水分の逸散に起因することがうかがわれる。

図-15 は、乾燥収縮ひずみと乾燥表面からの深さと

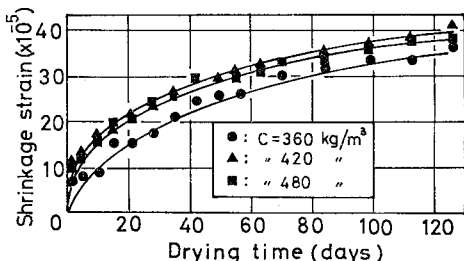


図-14 乾燥表面近傍の乾燥収縮ひずみ～時間曲線

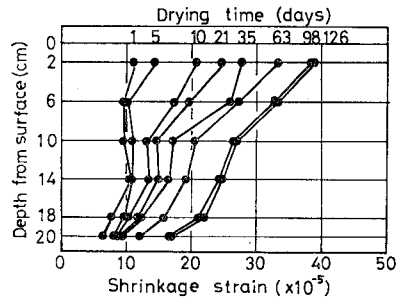


図-15 乾燥収縮ひずみの分布 (供試体: C)

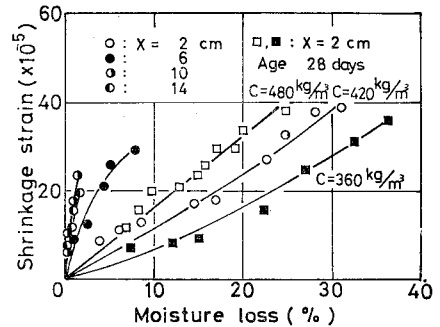


図-16 乾燥収縮ひずみと逸散水量との関係

の関係を、乾燥時間をパラメーターとして示したものである。図-15 から、表面近傍では乾燥されやすく、内部になるほど乾燥されにくく、収縮ひずみも小さいことがうかがわれる。

図-16 は、それぞれ、乾燥表面から深さ x の点および乾燥表面近傍 ($x=2$ cm) の点の逸散水量と乾燥収縮ひずみとの関係を示したものである。

Pickett は、コンクリート中の水分の逸散と収縮ひずみとの間には比例関係があるとしている²⁾。図-16 によれば、乾燥表面近傍においては、水分の逸散と収縮ひずみとの間には、直線ないしは若干下に凸な曲線で表わされる関係があるが、内部の点においては明確でない。

したがって、表面ひずみに限れば、水分の逸散より収縮ひずみを予測することも可能であり、また乾燥収縮の生成機構を、シーページ理論によって説明することも可能である。

5. 結 論

本研究は、コンクリートの乾燥収縮機構を明らかにすることを目的として実施したものである。すなわち、乾燥に伴うコンクリート中の水分の挙動を、実験および数値解析によって明らかにするとともに、それとコンクリートの変形挙動との関係を明らかにしたものである。コンクリート中の含水率の分布の測定方法など、実験手法

上さらに検討すべき問題点もあるが、本研究の結果明らかになったことを列挙し結論とする。

(1) コンクリート中の水分の逸散を支配する拡散係数は、コンクリートの含水率に依存する。すなわち、低含水率の範囲(80%程度以下)においては、ほぼ一定値(約 $0.05 \text{ cm}^2/\text{day}$)と考えてよいが、高含水率の範囲、すなわち乾燥の初期においては、含水率の増加に伴い増大する。

(2) 拡散係数と含水率との関係は、式(14)で表わしたS字形の曲線で近似でき、定数 n は、水セメント比の増加に伴って減少する。また C_0 は、コンクリートの配合にかかわらず98%程度とすればよい。

(3) 拡散方程式中の定数、すなわち表面係数は、コンクリートの水セメント比と密接な関係がある。

(4) コンクリート中の水分の逸散は、乾燥表面近傍において急激かつ多いが、内部では著しく緩慢かつ少ない。

(5) コンクリートの乾燥収縮ひずみは、乾燥表面からの深さによって著しく異なり、表面近傍では内部に比較して著しく大きい。また、乾燥収縮ひずみと水分逸散率との間には密接な関係があり、特に乾燥表面近傍においては、両者は比例すると考えられる。

(6) コンクリートの乾燥収縮機構は、巨視的にみれば、シーページ理論によって説明できる。

(7) 本研究で示した解析手法および実験結果により、コンクリートの乾燥収縮ひずみを予測することは、ある程度は可能であると考ええる。

本研究は、文部省科学研究費(一般C)によるものであり、すでに第35回土木学会全国大会において報告済みである。また、本研究を実施するに際し、岡山大学工学部土木工学科 西垣 誠講師ならびに大学院生 浜野隆司君に多大のご協力を得たことを記し、感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 西林新蔵・阪田憲次：コンクリートの乾燥収縮の内部機構に関する一考察，材料，22巻，232号，pp. 52~56，1973年1月。
- 2) Pickett, G.: Shrinkage Stress in Concrete, Journal of ACI, Vol. 17, No. 3, pp. 165~195, January, 1946.
- 3) 阪田憲次：持続および繰返し荷重下におけるコンクリートの塑性的挙動に関する基礎的研究(京都大学学位論文)，pp. 26~36，1976年6月。
- 4) Carlson, D.W.: Drying shrinkage of large concrete members, Journal of ACI, Vol. 33, pp. 327~336, January-February, 1937.
- 5) Zienkiewicz, O.C. (吉識 ほか訳)：基礎工学におけるマトリックス有限要素法，培風館，pp. 43~45，1971。
- 6) Polivka, R.M. and E.L. Wilson: Finite element analysis of nonlinear heat transfer problems, Univ. of California, Berkeley, June, 1976.
- 7) 蔵本 修：コンクリートの乾燥収縮の生成機構に関する研究(岡山大学修士論文)，1980年3月。
- 8) Crank, J.: The mathematics of diffusion, Oxford at the Clarendon Press, pp. 148~149, 1955.
- 9) Bazant, Z.P. and L.J. Najjar: Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete, Materiaux et Constructions, Vol. 5, No. 25, pp. 3~20, 1972.

(1980.10.27・受付)