

論文 コンクリートの非線形拡散係数に関する研究

綾野克紀*¹・阪田憲次*²

要旨：本研究は、コンクリート中を水分が移動するしやすさを表す拡散係数を求めるための新たな手法の提案を行ったものである。拡散係数は、水分の損失に伴って生じる乾燥収縮ひずみを有限要素法などの数値解析によって求める際に必要となる係数である。本論文では、コンクリート中の水分分布を求める実験的な手法および水分分布より非線形拡散係数を求めるための逆解析手法の提案を行っている。

キーワード：拡散係数、非線形、乾燥、水分分布、逆解析

1. はじめに

コンクリートは、大小様々な空隙を有する多孔質な材料である。コンクリート中の空隙に存在する水分は、乾燥によってコンクリート内部から乾燥面へと移動し逸散する。拡散係数はコンクリート中に存在する水分の移動のしやすさを表すための係数である。従って、コンクリート中の水分の逸散によって生じる乾燥収縮ひずみを数値解析によって求める際に、拡散係数はとくに重要な役割を果たす¹⁾。コンクリート中の水分の移動に関する拡散係数は定数ではなく、水分量に依存する非線形な値である。コンクリート中の水分移動に関する拡散係数は、一般に、 $1 \sim 100 \text{ mm}^2/\text{days}$ 程度とされている²⁾。これまでにもコンクリートの拡散係数を求めるための手法は種々の方法が提案されている³⁾が、本論文では、3mmに薄くスライスした供試体を用いた方法を提案する。また、実験より求められたコンクリート中の水分分布より拡散係数を逆解析する数学的な手法の提案も行う。

2. 実験概要

本実験に用いたセメントは普通セメント(比重3.12)である。細骨材には川砂(比重:2.62, 吸水率:1.93%)を、粗骨材には川砂利(最大寸法:

16mm, 比重:2.70, 吸水率:0.62%)を用いた。モルタルおよびコンクリートの配合をTable 1に示す。また、Table 2に本実験に用いたコンクリートおよびモルタルの物性を示す。ただし、蒸発可能な水分量は、14日間水中養生を行った $100 \times 150 \times 3 \text{ mm}$ の供試体を100℃の乾燥炉の中で14日間乾燥させ求めたものである。また、相対湿度45%の空気中において損失する水分量は、150日間乾燥させた $100 \times 150 \times 33 \text{ mm}$ より求めたもので、供試体の重量変化を蒸発可能な水分量で除して求めたものである。また、圧縮強度および弾性係数は、14日間水中養生を行った供試体により得られたものである。

Fig.1に供試体中の水分分布を求めるために用いた供試体の詳細を示す。この供試体は、材令7日において3mmに薄くスライスした供試体($100 \times 150 \times 3 \text{ mm}$)を11枚重ね、その側面をアルミニウムシートで巻き作成したものである。実験には、Fig.1に示す供試体を一配合に対して9体用いた。各供試体は、14日間の水中養生を行い、0.5, 3, 7, 14, 28, 42, 56, 70 および 98 (または 84) 日目に1体ずつアルミニウムシートをはがし、供試体中の水分分布を測定した。各乾燥期間においてアルミニウムシートをはがした直後の薄くスライスされた供試体の重量

*1 岡山大学助教授 環境理工学部環境デザイン工学科, 工博(正会員)

*2 岡山大学教授 環境理工学部環境デザイン工学科, 工博(正会員)

Table 1 Mix proportion of mortar and concrete

Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m ³)			
			W	C	S	G
2.0	50.0	100	240	420	1536	—
2.0	50.0	50	200	400	854	880

Table 2 Physical properties of mortar and concrete

	Mortar	Concrete
Evaporable moisture(w/S)	9.82%	6.61%
Moisture loss at 45% R.H. room	69.1%	64.4%
Density (g/cm ³)	2.12	2.32
Compressive strength	33.6 MPa	36.4 MPa
Young's modulus	25.2 GPa	31.6 GPa

w : evaporable moisture content (g)

S : solid part of mortar or concrete (g)

$C_{0,i}$ と、さらに 100℃の乾燥炉内で 14 日間乾燥を行った後の重量 $C_{1,i}$ とを測定することにより、各位置での水分量を求めた。

$$q_i = \frac{w - w'}{S + w - w'} = \frac{C_{0,i} - C_{1,i}}{C_{0,i}} \quad (1)$$

ここに、 q_i は乾燥面より i 番目のスライス供試体の水分量、 w は蒸発可能な水分量、 w' は蒸発水分量、また、 S はコンクリートまたはモルタルの水分を除いた部分の重量である。とくに、乾燥開始直後におけるコンクリートの水分量を p とすれば、乾燥開始直後における供試体重量に対する水分損失量の割合 H_i が式(3)によって求められる。

$$p = \frac{w}{S + w} = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \quad (2)$$

$$H_i = \frac{w'}{S + w} = \frac{p - q_i}{1 - q_i} \quad (3)$$

ここに、 C_0 は乾燥開始直後における供試体の重量、 C_1 は 14 日間の養生後 100℃の乾燥炉内でさらに 14 日間乾燥を行った供試体の重量である。式(2)および式(3)で表される p および H_i を用いれば、蒸発可能な水分量に対する水分損失量 ω_i が式(4)によって求められる。

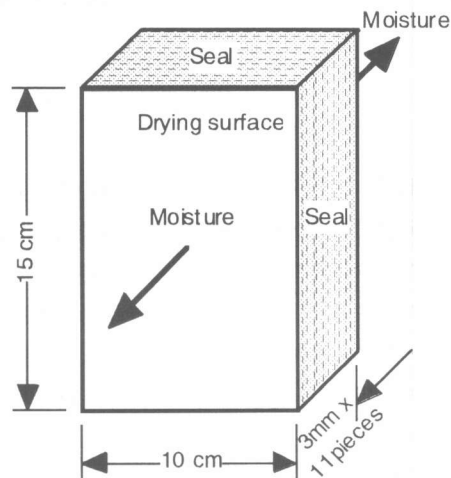


Fig.1 Sliced specimen for moisture loss

$$\omega_i = \frac{w'}{w} = \frac{1}{p} \times H_i \quad (4)$$

なお、本実験では、供試体の重量測定に電子ばかり（容量 5kg、最小目盛り 0.01g）を用い、供試体の乾燥に関する実験は温度 20℃および相対湿度 45%の室内で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 水分移動に及ぼす空気層の影響

Fig.2 は、150×100×33mm の供試体と Fig.1 に示す供試体の水分損失の差を示したものである。ただし、150×100×33mm の供試体は、150×100mm の 2 面の乾燥面以外をアルミニウムシートで巻き、Fig.1 に示す供試体同様に水分の移動を一次元とした。また、Fig.2 の縦軸は式(5)より求められたものである。

$$\begin{aligned} & \text{Moisture loss differential} \\ & = \frac{1}{p} \times (\Delta C_{\text{solid}}(t) - \Delta C_{\text{sliced}}(t)) \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 p は式(2)によって求められる値で、 ΔC_{solid} および ΔC_{sliced} は、それぞれ、150×100×33mm および Fig.1 に示す供試体の水分損失量である。

$$\Delta C = \frac{C_0 - C(t)}{C_0} \quad (6)$$

ここに、 C_0 は乾燥開始直後における供試体重量で、 $C(t)$ は、各乾燥期間での供試体重量である。

空气中を移動する水分の拡散係数は、温度 20℃において 218mm²/day であり²⁾、コンクリート中を移動する水分の拡散係数の 50~100 倍の値である。従って、コンクリート中の水分移動に関して空気層が及ぼす影響は極めて小さいものと一般に考えられている。しかし、実際には、Fig.2 に示されるように、150×100×33mm 供試体と Fig.1 に示す供試体の水分損失の差は、乾燥後 1 ヶ月程で最高に達し十分な乾燥期間が経過しなければ無くならない。11 枚のスライス供試体を重ねた供試体を用いて 150×100×33mm 供試体内部の水分分布を表すためには、Fig.2 に示される水分損失の差が工学的に無視できるほど小さいことを証明する必要がある。

3.2 水分分布の推定

Fig.1 に示す供試体の乾燥面から x の距離にある単位断面当たりの水分量を $g(x)$ とする。供試体中の水分分布がべき乗式で表されるとすれば、 $g(x)$ は次式となる。

$$g(x) = a(x_{\text{center}} - x)^n + c \quad (7)$$

ただし、 $x_{\text{center}} = 16.5\text{mm}$ で、 a 、 n および c は定数である。また、Fig.1 の供試体中の水分量を体積分した値 Q_{sliced} は、 $g(x)$ を用い次式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2A} \times Q_{\text{sliced}} &= \int_{x_{\text{surface}}}^{x_{\text{center}}} g(x) dx \\ &= \frac{a}{n+1} x_{\text{center}}^{n+1} + x_{\text{center}} \times c \\ &= \sum_{i=1}^6 l_i \times g_i \end{aligned} \quad (8)$$

ここに、 $A(=100 \times 150\text{mm}^2)$ は水分の通過する断面積で、 l_i はスライス供試体 1 枚の厚さである。とくに $i=1$ が Fig.1 に示す供試体の乾燥面におけるスライス供試体を意味し、 $i=6$ が中央におけるスライス供試体を意味する。従って、 $i=1 \sim 5$ において $l_i=3\text{mm}$ であり、 $i=6$ のとき $l_i=1.5\text{mm}$ となる。

g_i を各スライス供試体の水分量とすれば、乾燥面におけるスライス供試体中の水分量 g_1 および 11 枚に束ねられた中央のスライス供試体の水分量 g_6 は、それぞれ、式(9)および式(10)で表される。

$$\begin{aligned} g(x_{\text{surface}}) &= a \times x_{\text{center}}^n + c \\ &= \frac{g_1 - g_6}{3} \times 1.5 + g_1 \end{aligned} \quad (9)$$

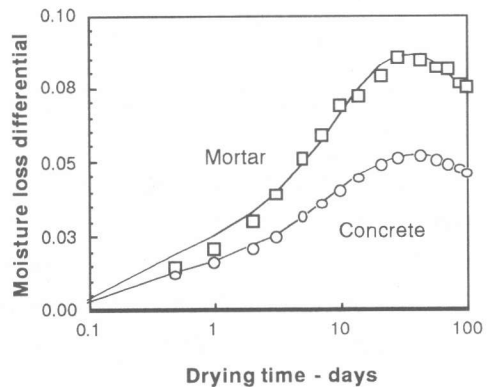


Fig. 2 Moisture loss differential between solid and sliced specimen

$$g(x_{\text{center}}) = c = g_6 \quad (10)$$

式(7)に含まれる定数 c は、式(10)より求められる。また、式(8)および式(9)から導かれる式(11)によって定数 n が決定され、式(9)から導かれた式(12)により定数 a が決定される。

$$n = \frac{\left(\frac{g_1 - g_6}{3} \times 1.5 + g_1 - g_6 \right) \times x_{\text{center}}}{\sum_{i=1}^6 l_i \times g_i - x_{\text{center}} \times g_6} - 1 \quad (11)$$

$$a = \frac{g(x_{\text{surface}}) - g_6}{x_{\text{center}}^n} \quad (12)$$

一方、150×100×33mm 供試体の乾燥面から x の距離にある単位断面当たりの水分量を $f(x)$ とすれば、150×100×33mm 供試体中の水分量を体積分した値 Q_{solid} は次式より求まる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2A} \times Q_{\text{solid}} &= \int_{x_{\text{surface}}}^{x_{\text{center}}} f(x) dx \\ &= \sum_{i=1}^6 l_i \times g_i - \frac{L}{2} \times \Delta C \end{aligned} \quad (13)$$

ここに、 ΔC は Fig.2 に示される 150×100×33mm 供試体と Fig.1 に示す供試体の水分損失の差である。また、 L は 33mm である。

150×100×33mm 供試体の乾燥面における水分量 $f(x_{\text{surface}})$ は、Fig.1 に示す供試体の乾燥面における水分量 $g(x_{\text{surface}})$ と 150×100×33mm 供試体と Fig.1 に示す供試体の乾燥面における水分量の差 Δh_s によって求められる。また、 Δh_s はフィルム係数 H_F と $d\Delta C/dt$ から式(14)より求められる。

$$\begin{aligned}\Delta h_s &= \frac{1}{H_F} \times \frac{1}{2A} \times \left(\frac{dQ_{solid}}{dt} - \frac{dQ_{sliced}}{dt} \right) \\ &= \frac{1}{H_F} \times \frac{L}{2} \times \frac{d\Delta C}{dt}\end{aligned}\quad (14)$$

ここに、 $d\Delta C/dt$ は、Fig.2 に示した水分損失量の差の時間速度である。

Fig.1 に示す供試体の水分損失が、 $150 \times 100 \times 33\text{mm}$ 供試体の水分損失を追い抜くことは理論的にありえない。従って、 $d\Delta C/dt \leq 0$ のとき $\Delta h_s = 0$ となり、 Δh_s が負となることはない。なお、式(14)は、式(15)および式(16)より導かれたものである。

$$\begin{aligned}\frac{1}{2A} \times \frac{dQ_{sliced}}{dt} &= H_F \left(g(x_{surface}, t_{\infty}) - g(x_{surface}, t) \right)\end{aligned}\quad (15)$$

$$\begin{aligned}\frac{1}{2A} \times \frac{dQ_{solid}}{dt} &= H_F \left(f(x_{surface}, t_{\infty}) - f(x_{surface}, t) \right)\end{aligned}\quad (16)$$

ここに、 $g(x_{surface}, t_{\infty})$ および $f(x_{surface}, t_{\infty})$ は、 $150 \times 100 \times 33\text{mm}$ 供試体と Fig.1 に示す供試体の乾燥面における水分量の終局値であり、これらの値は同じ値とならなければならない。

フィルム係数 H_F は q_t と $\omega_{surface} - \omega_a$ の関係を表す係数である。 q_t は、単位時間あたりに単位面積当たりの乾燥面を通過する水分量である。また、 $\omega_{surface}$ は任意の乾燥期間における乾燥面での水分量で、 ω_a は供試体中の湿度と外気の湿度が平衡状態に達したときの供試体中の水分量である。なお、 ω_a の値は、Table 2 に示している。

$$q_t = H_F \times (\omega_a - \omega_{surface}) = \frac{1}{2A} \times \frac{dQ_{sliced}}{dt} \quad (17)$$

Fig.3 に q_t と $\omega_{surface} - \omega_a$ の関係を示す。この図に示されるとおり、これらの関係は線形となり、フィルム係数 H_F はその傾きとなる。

いま、 $f(x)$ が式(18)によって表されるとすれば、 $150 \times 100 \times 33\text{mm}$ 供試体の乾燥面における水分量は、式(19)によって求められる。

$$f(x) = \alpha (x_{center} - x)^{\beta} + \gamma \quad (18)$$

$$\begin{aligned}f(x_{surface}) &= \alpha \times x_{center}^{\beta} + \gamma \\ &= g(x_{surface}) + \Delta h_s\end{aligned}\quad (19)$$

供試体中の水分量および乾燥面における水分勾配は、いずれも、 $150 \times 100 \times 33\text{mm}$ 供試体の方が Fig.1 に示す供試体よりも小さい。従って、 $150 \times 100 \times 33\text{mm}$ 供試体と Fig.1 に示す供試体中の

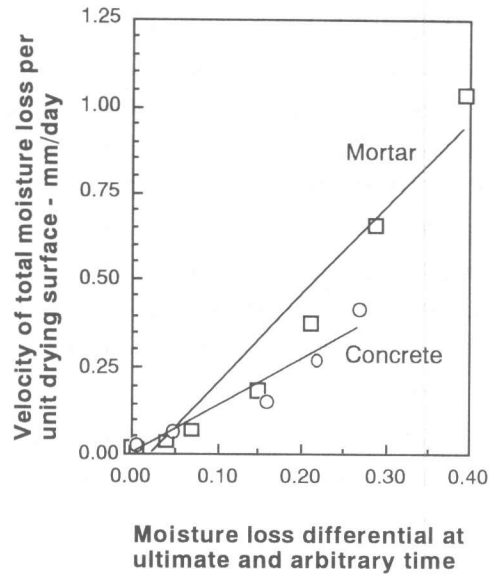


Fig.3 Relationship between q_t and

$$\omega_{surface} - \omega_a$$

水分分布の差の無いことを証明するために、両供試体中の水分分布の差が最も大きくなる仮定、すなわち、 $150 \times 100 \times 33\text{mm}$ 供試体と Fig.1 に示す供試体の乾燥面における水分勾配が等しいとする仮定をおけば式(20)が得られる。

$$\begin{aligned}\frac{df(x_{surface})}{dx} &= \alpha \times \beta \times x_{center}^{\beta-1} \\ &= \frac{dg(x_{surface})}{dx}\end{aligned}\quad (20)$$

式(13)、式(19)および式(20)を用いれば、式(18)に含まれる全ての定数 α 、 β および γ を以下のとおり求めることができる。

$$\begin{aligned}\beta &= x_{center}^2 \times \frac{dg(x_{surface})}{dx} \\ &+ \left\{ \left(g(x_{surface}) + \Delta h_s \right) \times x_{center} \right. \\ &\left. + \left[-\sum_{i=1}^6 l_i \times g_i - \frac{L}{2} \times \Delta C \right] \right\}^{-1}\end{aligned}\quad (21)$$

$$\alpha = \frac{\frac{dg(x_{surface})}{dx}}{\beta \times x_{center}^{\beta-1}} \quad (22)$$

$$\gamma = g(x_{surface}) + \Delta h_s - \alpha \times x_{center}^{\beta} \quad (23)$$

Fig.4 は、 $150 \times 100 \times 33\text{mm}$ 供試体および Fig.1 に示す供試体の乾燥期間 3 日目および 84 日目における水分分布を示したものである。○および□は Fig.1 に示す供試体より実際に求められた実験値であり、破線は式(7)に基づく計算値である。

また、●、■および実線が式(18)に基づく計算値である。この図に示されるように、150×100×33mm 供試体と Fig.1 に示す供試体の水分分布に大きな差のないことが分かる。

3.3 拡散係数を求めるための逆解析手法

式(24)は、一次元の拡散方程式である。

$$\frac{\partial \omega(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(\omega) \times \frac{\partial \omega(x,t)}{\partial x} \right) \quad (24)$$

ここに、 $\omega(x,t)$ は乾燥面から x の距離にある位置での乾燥期間 t における水分量で、 $D(\omega)$ は拡散係数である。式(24)は供試体の全ての位置で満足されなければならないので、任意の関数 $F(x,t)$ に対して式(25)が成り立たなければならない。

$$\int_{x_{surface}}^{x_{center}} F \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(D \times \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) - \frac{\partial \omega}{\partial t} \right\} dx = 0 \quad (25)$$

部分積分によって、式(25)の第1項は式(26)に書き換えられる。

$$\begin{aligned} & \int_{x_{surface}}^{x_{center}} F \times \frac{\partial}{\partial x} \left(D \times \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) dx \\ &= \left[F \times D \times \frac{\partial \omega}{\partial x} \right]_{x_{surface}}^{x_{center}} \\ & - \int_{x_{surface}}^{x_{center}} \frac{\partial F}{\partial x} \times D \times \frac{\partial \omega}{\partial x} dx \end{aligned} \quad (26)$$

式(26)を式(25)に代入すれば、次式が得られる。

$$\begin{aligned} & \int_{x_{surface}}^{x_{center}} D \times \frac{\partial F}{\partial x} \times \frac{\partial \omega}{\partial x} dx \\ &= \left[F \times D \times \frac{\partial \omega}{\partial x} \right]_{x_{surface}}^{x_{center}} - \int_{x_{surface}}^{x_{center}} F \times \frac{\partial \omega}{\partial t} dx \end{aligned} \quad (27)$$

境界条件に基づく式(28)と式(29)を考慮に入れれば、式(27)は式(30)に書き換えられる。

$$q_t = -D \times \frac{\partial \omega(x_{surface}, t)}{\partial x} \quad (28)$$

$$\frac{\partial \omega(x_{center}, t)}{\partial x} = 0 \quad (29)$$

ここに、 q_t は、単位時間あたりに単位面積当たりの乾燥面を通過する水分量である。

$$\begin{aligned} & \int_{x_{surface}}^{x_{center}} D \times \frac{\partial F}{\partial x} \times \frac{\partial \omega}{\partial x} dx \\ &= F(x_{surface}, t) \times q_t - \int_{x_{surface}}^{x_{center}} F \times \frac{\partial \omega}{\partial t} dx \end{aligned} \quad (30)$$

いま、 $\omega(x,t)$ を任意関数 $F(x,t)$ として選べば、式(30)は式(31)に書き換えられる。

$$\begin{aligned} & \int_{x_{surface}}^{x_{center}} D \times \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \right)^2 dx \\ &= \omega(x_{surface}, t) \times q_t - \int_{x_{surface}}^{x_{center}} \omega \times \frac{\partial \omega}{\partial t} dx \end{aligned} \quad (31)$$

さらに、 $\omega(x,t)$ を各スライス供試体の水分量 $\omega_i(t)$,

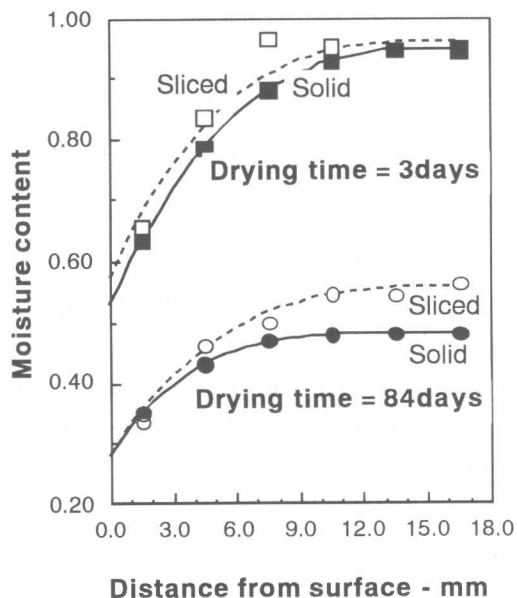


Fig.4 Moisture distribution of solid and sliced specimen

$\omega_2(t), \dots, \omega_i(t), \dots, \omega_6(t)$ を用いて表せば単位時間あたりに単位面積当たりの乾燥面を通過する水分量 q_t は、式(32)で求められる。

$$q_t = \sum_{i=1}^6 \frac{d\omega_i(t)}{dt} \times l_i \quad (32)$$

式(32)を式(31)に代入することで次式が得られる。

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^6 D(\omega_i) \times \left(\frac{d\omega_i}{dx} \right)^2 \times l_i \\ &= \omega(x_{surface}, t) \sum_{i=1}^6 \frac{d\omega_i}{dt} \times l_i - \sum_{i=1}^6 \omega_i \times \frac{d\omega_i}{dt} \times l_i \end{aligned} \quad (33)$$

ここに、 $d\omega_i/dx$ は、 $x=x_i$ における水分勾配である。ただし、 $x_1=1.5\text{mm}$ 、 $x_2=4.5\text{mm}$ 、 $x_3=7.5\text{mm}$ 、 $x_4=10.5\text{mm}$ 、 $x_5=13.5\text{mm}$ および $x_6=16.5\text{mm}$ である。

いま、拡散係数が式(34)で示される指数式によって表されるとすれば、式(33)は式(35)に書き換えられる。

$$D(\omega) = a \times e^{b(1-\omega)} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} & a \sum_{i=1}^6 \left(e^{b(1-\omega_i)} \times \left(\frac{d\omega_i}{dx} \right)^2 \times l_i \right) \\ &= \omega(x_{surface}, t) \times \sum_{i=1}^6 \frac{d\omega_i}{dt} \times l_i \\ & - \sum_{i=1}^6 \omega_i \times \frac{d\omega_i}{dt} \times l_i \end{aligned} \quad (35)$$

さらに式(35)は、全ての乾燥期間において成り立たなければならないから式(36)が導かれる。

$$\begin{aligned}
 & a \sum_{t=0}^{t=98} \sum_{i=1}^6 e^{b(1-\omega_i)} \times \left(\frac{d\omega_i}{dx} \right)^2 \times l_i \\
 & = \sum_{t=0}^{t=98} \left(\begin{aligned} & \omega(x_{surface}, t) \sum_{i=1}^6 \frac{d\omega_i}{dt} \times l_i \\ & - \sum_{i=1}^6 \omega_i \times \frac{d\omega_i}{dt} \times l_i \end{aligned} \right) \quad (36)
 \end{aligned}$$

実験値より、 $\omega(x_{surface}, t)$ 、 $d\omega_i/dx$ および $d\omega_i/dt$ の全てが既知であるから、式(36)中の拡散係数に含まれる定数 a および b は、非線形最小二乗法によって求めることが可能である。

このようにして、Fig.1 に示す供試体および $150 \times 100 \times 33\text{mm}$ から求められたモルタルの拡散係数は以下の通りである。

$$D_{sliced} = 18.5e^{-4.13(1-\omega)} \quad (37)$$

$$D_{solid} = 17.6e^{-2.81(1-\omega)} \quad (38)$$

また、コンクリートの拡散係数は次のようになる。

$$D_{sliced} = 6.47e^{-3.23(1-\omega)} \quad (39)$$

$$D_{solid} = 9.15e^{-3.35(1-\omega)} \quad (40)$$

モルタルおよびコンクリートのいずれにおいても、 $150 \times 100 \times 33\text{mm}$ 供試体と Fig.1 に示す供試体から求められる拡散係数に大きな差が無いことが分かる。

3.4 提案する手法の妥当性

Fig.5 は、直径 50、80 および 150mm のコンクリートの円柱供試体の水分損失を調べた結果である。ただし、直径 50、80 および 150mm の円柱供試体の高さは、それぞれ、100mm、100mm および 150mm で、供試体の上面および下面には乾燥を防止するためにレジンを塗布されている。図中の○、◇および□は、それぞれ、直径 50、80 および 150mm の円柱供試体より得られた実験データで、実線および破線が $150 \times 100 \times 33\text{mm}$ 供試体および Fig.1 に示す供試体より得られた拡散係数を用いた解析値である。この図から明らかなように、 $150 \times 100 \times 33\text{mm}$ 供試体および Fig.1 に示す供試体から得られた拡散係数を用いた解析値に大きな差は無く、実験値と解析値も非常によく一致していることが分かる。すなわち、拡散係数を求める上で、空気層の影響を考慮する必要はなく、Fig.1 に示す供試体より得られる水分分布を用いて信頼性の高い拡散係数を

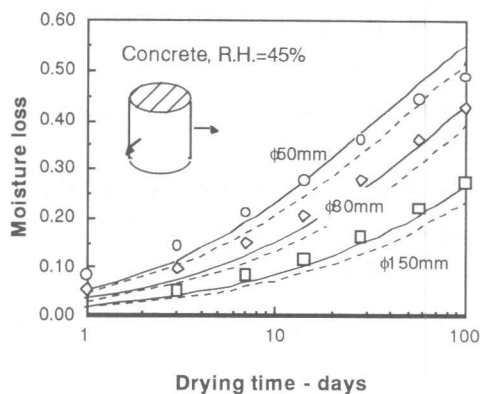


Fig.5 Moisture loss of cylinder with different diameter

合理的に求めることが可能であるといえる。

4. まとめ

本論文では、コンクリート中の水分の移動に関する非線形拡散係数を求めるために、スライス供試体を用いて実験的に水分分布を求める方法とそれらの実験値から拡散係数を求めるための逆解析手法の提案を行った。コンクリート中の水分移動に及ぼす空気層の影響が小さいことを証明し、直径の異なる円柱供試体の水分損失量の実験値と解析値の比較より、本論文で提案する手法の妥当性を示した。

参考文献

- 1) 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，Vol.7, No.6, pp.1-11, 1969
- 2) Holm, A., Krus, M. und H. M. Künzel: Feuchtetransport über Materialgrenzen im Mauerwerk, Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen, Heft 5, 1996
- 3) X. Wittmann, H. Sadouki and F. H. Wittmann: Numerical Evaluation of Drying Test Data, Trans. 10th Int. Conf. on Struct. Mech. in Reactor Technology, SMIRT-10, Vol. R., pp.71-89, 1989