炭素繊維補強モルタルの水分容量, 透湿率及び表面係数の推定

STUDY ON WATER CAPACITY, MOISTURE PERMEABILITY AND
SURFACE FACTOR OF CARBON FIBER REINFORCED MORTAR

永松 静也*, 大常 好範**

Seiki NAGAMATSU and Yoshinori OTSUNE

The constants of specific water capacity α , moisture permeability λ and surface factor f are included in a partial differential equation, representing the moisture movement in cement-based materials and its boundary condition. Therefore, they must be made clear to analyze the moisture movement.

In this paper, the following two series of experiments were made to obtain them for carbon fiber reinforced mortar. (Series 1—the measurement of α)

Written in a differential form as $\alpha = dWe / dh$ (We : evaporable water, h : relative humidity), α was obtained from measuring h - We relationship.

(Series 2—the evaluations of λ and f)

The evaluations of λ and f were made by means of the inverse operation, fitting the measured values of t - Wd relationship with the calculated ones.

keywords: carbon fiber reinforced mortar moisture movement specific water capacity surface factor
moisture permeability 炭素繊維補強モルタル 水分移動特性 水分容量 表面係数 透湿率

1. はじめに

炭素繊維補強モルタル(CFRM)は乾燥収縮ひびわれが発生し難い材料であるとされている。このような材料を適切に使用するためには、他の材料に比べてどの程度乾燥収縮ひびわれが発生し難いのかを評価すること、更には何がどのようなメカニズムでひび割れ発生を抑制しているのかを明らかにすることが大事である。これについては、図1に示す流れ図に従って研究を進める予定である。本論文は、このような研究の一環としてCFRMの水分の移動を解析する上で必要とされる材料定数を測定、もしくは推定することを

試みたものである。供試体の水分の移動を表す偏微分方程式及び境界条件の中には、水分容量、透湿率及び表面係数の3つの定数が含まれる。従って、供試体中の水分の移動を解析するためにはこれらの定数が明らかにされていなければならない。

水分容量 α は $\alpha = dWe / dh$ で表せる(We はある湿度下で残存する蒸発可能水量を、 h は相対湿度を表す)。そこで水分容量 α は、 h - We 関係を得ることにより求められる。これについては多くの研究者が基礎データとして求めているが、その殆どが供試体を一度、絶乾状態にした、いわゆる吸着曲線として得られている。本論文では処女乾燥過程における h - We 曲線を対象としている。

透湿率 λ の測定は実験的に大変難しいが、考えられる方法として、以下の方法があげられる。

- 1) 湿流移動が定常状態にある供試体中の湿度勾配と湿流量を測定し、 λ を算出する方法。—直接的な算出法^{1) 2)}
 - 2) 乾燥する供試体の脱水量の経時変化の測定値と計算値を合わせることで逆算する方法。—間接的な算出法³⁾
- 1)の方法は供試体と空気との境界層の取り扱いが難しく、若材令の場合も含めて、多くの実験要因に対応するのが困難である。2)の方法は間接的な方法であるが、測定そのものは簡単である。よって、本論文では、2)の方法によった。

図1 ひび割れ発生予測までの流れ図

* 大分大学工学部建設工学科 教授・工博
** 大阪ガス株式会社材料技術プロジェクト部 工修
(大分大学大学院工学研究科 博士後期課程学生)

Prof., Dept. of Architectural Eng., Faculty of Eng., Dr. Eng.
Osaka Gas Co., Ltd., Material Engineering Department, M. Eng.
(Graduate Student, Dept. of Architectural Eng., Faculty of Eng., Oita University)

表面係数 f は供試体の置かれている環境条件に大きく左右されるがここでは実験室内を対象としている。測定方法は透湿度の測定と同じ方法をとった。ここでは、薄板状の供試体の乾燥時間－脱水量曲線の初期勾配は f によって決まることに着目して逆算をした。なお、これらの係数は温度に大きく依存するが、本実験では20℃一定とした。また本研究の供試体は4mmまたは2mmと薄いため繊維が2次元に近い状態で配向しているものを扱っている。供試体が厚くなった場合については次の課題とする。

2. 基礎式

図2のように板の厚さ方向に（一次元）水分が移動する場合を取り扱う。物体内の単位面積を単位時間あたりに移動する水分量 q は(1)式のように表せる。

$$q = -\lambda \frac{\partial h}{\partial x} \quad (1)$$

ただし、 q : 流量 λ : 透湿係数
 h : 試片内の相対湿度（試片内の含有水分量と平衡する相対湿度）

$\frac{\partial h}{\partial x}$: 湿度勾配 x : 水分の移動方向にとった座標

図2 試片断面(左)と断面内の微小直6面体(右)

今、微小時間 dt 間に、図2の微小6面体A面から流入する水分量は

$$W_A = -\lambda \frac{\partial h}{\partial x} S dt \quad (2)$$

B面から流出する水分量は、

$$W_B = -\left\{ \lambda \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial h}{\partial x} \right) dx \right\} S dt \quad (3)$$

となり、微小6面体中の蒸発可能水量の変化は次のように表せる。

$$dWe S dx = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial h}{\partial x} \right) dx S dt \quad (4)$$

ここで、 We は単位容積当たりの蒸発可能水量を表す。いま、 We の変化による相対湿度の変化を(5)式で表すと(4)式より、相対湿度 h に

$$\alpha \frac{dh}{dt} = dWe \quad (5)$$

関する偏微分方程式が次のように得られる。

$$\alpha \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial h}{\partial x} \right) \quad (6)$$

ここで、水分容量 α および透湿度 λ は試片の材齢（水和度）や乾燥の程度などに依存するため(6)式は非線形となる。

<境界条件>

試片の表面から大気中へ蒸発する水分量は次式で表せる。

$$q = f(h - h_{air}) \quad (7)$$

ここで、 f は表面係数、 h_{air} は外気の相対湿度である。

以上より、(6)式を解くためには α 、 f 、 λ の3つの材料定数を決定しなければならないことが分かる。

3. 水分容量 α の測定

3-1. 実験

3-1-1. 実験計画

各種相対湿度平衡下におけるCFRMの蒸発可能水量を測定し、 We - h 関係を得るために以下の実験を計画した。

乾燥開始材齢：1, 7, 28日 試験体数：各3体

設定相対湿度：20, 45, 66, 86, 100%

3-1-2. 使用材料および配合

使用材料を以下に、調査表を表1にそれぞれ示す。

セメント：早強ポルトランドセメント（秩父小野田セメント社製、比重3.14）

砂：珪砂6号（S） 増粘剤：メチルセルロース（Mc）

繊維：汎用性ビッチ系炭素繊維（CF）（繊維径18μm、長さ6mm、比重1.65）

収縮低減剤：アルコールアクリレート付加物を主成分とするもの

高性能AE減水剤：ポリカルボン酸を主成分とするもの

表1 CF RMの調査表

調査 種類	CF (vol. %)	W/C (%)	S/C (%)	質量 (kg/m³)			高性能AE 減水剤
				W	C	S	
①	1.0	47.0	0.5	457	970	485	Cx1.0%
②	2.0			452	961	480	
③	0.0			462	980	490	

※McをCFのマトリクスへの分散を考慮して、調査②ではセメント2kgに対し10g、調査①、③では2kgに対し5gの割合で外割混入

3-1-3. 混練、硬化体作製および養生

CFがモルタルマトリクスによく分散するように、ホバートミキサーにより以下に示すような手順で練り混ぜた。

(練り混ぜ手順)				
C+Mc	30秒間空振り	CF+S2割+水8割	3分間練り混ぜ	S8割+水2割
			1分30秒後に掻き落とし	1分30秒間練り混ぜ
				1分後に掻き落とし
				排出

練り混ぜの終了したモルタルを4×0.4×14cmの成形体になるように12連鋼製型枠に気泡が残らないよう配慮しながら詰めた。つぎに、モルタルからの水分蒸発を防ぐために、打設面(0.4×14cm)を真鍮板、ビニールテープ、パラフィンでシールした。24時間後、予め余盛りしておいたモルタル部分をサトペーパー付きグラインダーで除去し、脱型後直ちにサランラップ、アルミホイルとパラフィンでシールして所定の乾燥開始材齢まで恒温恒湿室(温度20±2℃、湿度60±2%)でシール養生した。

3-1-4. 乾燥の方法

供試体の乾燥には、幅287×高さ487×奥行290mmの立方体デシケターを用いた。図3に示すように供試体を乾燥を阻害しないように十分な間隔を保ってデシケター内に静置し、調湿剤とKOH飽和水溶液を同封した。使用した調湿剤と湿度の測定値を表2に示す。KOH飽和水溶液はデシケター内の炭酸ガスを除去するために用いた。シール養生中の供試体は湿度100%と仮定した（湿度が、ほぼ100であることを別途確認し

ている)。なお、デシケータの保存や測定は全て恒温恒湿室内で行った。

図3 デシケータ概略図

表2 調湿剤の種類と測定値

調湿剤	理論値 (%)	湿度測定値 (%)		
		1日	7日	28日
KHS ₄	8.6	80.8	79.0	79.0
NaNO ₂	6.6	66.7	66.2	66.2
KNO ₂	4.5	49.1	48.4	48.4
CH ₃ COOK	2.0	25.4	18.8	18.8

※湿度測定にはヒューメックスYH-12-P2

(精度±2%(15~85%)増田理化学工業㈱)

を使用

3-1-5. 質量の測定

質量測定(精度0.1mgの電子天秤を使用)のフローを以下に示す。

※供試体質量が変化しなくなった時点と湿度平衡時質量とし、デシケータから取り出して105℃で乾燥後、微粉砕して強熱減量した。

3-2. 実験結果

測定結果を表3および図4に示す。また、これらの結果からh-We関係を図示すると図5のようになる。ここで、hは供試体の相対湿度で、デシケータ内の相対湿度と平衡しているものとする。

表3 各水分量 (単位: mg/cc 供試体単位容積当り, mは無次元)

乾燥開始材齢	調合No.	1日			7日			28日		
		①	②	③	①	②	③	①	②	③
20%	Wd	236.8	228.3	247.1	202.8	190.8	204.9	181.4	170.1	181.1
	We	73.8	68.4	77.2	79.0	75.4	93.2	85.0	84.0	88.6
	Wn	167.9	162.6	170.2	204.7	194.4	218.7	229.1	226.2	244.4
	Wo	478.5	459.3	494.5	486.5	460.6	516.0	495.5	480.3	514.1
45%	Wd	252.3	242.5	265.6	164.5	158.5	173.3	140.3	129.2	140.6
	We	85.0	80.1	77.2	106.8	104.5	113.8	123.6	121.4	125.7
	Wn	135.9	133.6	170.2	199.2	201.2	216.4	228.6	235.9	246.9
	Wo	473.2	456.2	494.5	470.5	464.2	503.8	492.5	486.5	513.2
66%	Wd	153.4	137.0	155.9	103.5	99.9	108.6	80.6	69.1	77.8
	We	147.6	138.7	147.7	163.7	158.5	166.6	183.2	173.4	182.2
	Wn	192.9	180.6	198.2	206.5	203.6	222.8	227.2	220.1	248.7
	Wo	493.9	456.3	501.8	473.7	462.0	498.0	491.0	462.6	508.7
86%	Wd	97.4	92.4	104.3	50.6	52.1	56.0	29.3	25.9	27.4
	We	186.8	175.1	189.1	208.2	201.5	218.2	223.5	218.0	232.0
	Wn	196.8	187.8	206.6	222.7	218.1	234.4	230.3	224.9	251.0
	Wo	481.0	455.3	500.0	481.5	471.7	508.6	483.1	468.8	510.4
100%	Wd	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	We	348.2	342.1	360.9	274.6	265.5	285.0	263.1	246.7	265.2
	Wn	125.8	115.2	131.6	220.0	220.9	240.9	248.6	239.0	262.7
	Wo	474.0	457.3	492.5	494.6	486.4	525.9	511.7	485.7	527.9
調合水量		457.0	452.0	462.0	457.0	452.0	462.0	457.0	452.0	462.0
m		0.506	0.482	0.501	0.885	0.924	0.917	1.0	1.0	1.0

Wo: 全水量 (=Wd + We + Wn)

Wn: 結合水量 (1000℃で3時間乾燥したときの減量)

Wd: 脱水量 (一定の温度及び相対湿度にあるデシケータ内で9週間乾燥したときの減量)

We: 蒸発可能水 (105℃で24時間乾燥したときの減量)

調合水量: 練り混ぜ時の水量

m: 水合度 = $\frac{\text{その時点での結合水量 } W_n}{\text{水和が終了した時点での結合水量 } W_{n\infty}}$

図4 相対湿度と各水分量の関係

図5 $h - W_e$ 関係

これらの図から、 $h - W_e$ 関係は、ほぼ／形をしていることがわかる。材齢の影響をみると、相対湿度 h に対応する蒸発可能水量 W_e は材齢が若いほど小さいことがわかる。しかし、高湿度域では材齢が若いほど勾配が急であり、当然ながら、 $h=1.0$ （湿度100%）における蒸発

可能水は材齢が若いほど多いため曲線は逆転することがわかる。この傾向は著者らによるセメントペーストについての測定例⁴⁾と一致している。この測定結果を各材齢毎に $h=1.0$ における蒸発可能水 W_{e0} で正規化すると図6のようになる。

図6 $h - W_e / W_{e0}$ 関係

3-3. h - We/Weo 曲線の数式表示

図6より、 h - We/Weo 曲線はかなり複雑で、これを忠実に数式化するのには困難である。ここでは、中高湿度域のみを対象とし、次式のような指数関数式で表すことにした。

$$\frac{We}{Weo} = h^\beta \dots\dots\dots (8)$$

Weo : 未乾燥時の蒸発可能水量 (= $Wo - Wn$)

β : 材齢 (水和の程度) によって決まる定数

ここでは、 Weo , β を水和度 m で表す。本実験では早強セメントを使用していることから、材齢28日の結合水量を $Wn\infty$ とみなした (m , Wo , $Wn\infty$ の値については表3を参照)。

また、 Weo は次式のように表せる。

$$Weo = Wo - Wn\infty m \dots\dots\dots (9)$$

Wo , Wn について見てみると調合による差は見られない。

(8)式の β については、実測データに合うように試行錯誤により求めた。その結果を図7に示す。

図7 β の推定

これらの場合の β と m の関係を示すと図 8 のようになる。

図 8 $m - \beta$ の関係

調合による差はほとんどみられない。そこでこれらをまとめ表せば次式ようになる。

$$\textcircled{1} - \beta = -3.438 m + 4.240 \quad \text{..... (10)}$$

$$\textcircled{2} - \beta = -3.164 m + 4.038 \quad \text{..... (11)}$$

$$\textcircled{3} - \beta = -3.316 m + 4.172 \quad \text{..... (12)}$$

3-4. α について

以上の結果から、本実験の場合の α は次のように与えられる。

$$\alpha = \frac{dWe}{dh} = Weo \beta h^{\beta-1} \quad \text{..... (13)}$$

m が与えられると Weo は (9) 式より、 β は (10)～(12) 式より得られる。

4. 表面係数 f 、透湿係数 λ の推定

ごく薄い、厚さ 2mm の薄片供試体の乾燥による脱水量のデータを用い f 、 λ を推定する。これにより、脱水は速やかに終結し、乾燥途中の水和の進行による影響が小さくなる。ここでは (6) 式を 2mm の薄片の境界条件のもとで、線形および非線形として解き、これに実験データをあてはめ f 、 λ を以下のように逆算することを試みる。

- ① まず、 f 、 λ の湿度依存性について仮定をする。 λ については、拡散係数について Bazant の提案した式⁵⁾を透湿率に換算した式を用いる。 $C = \lambda / \alpha$ (C : 拡散係数) より $C/Co = (\alpha o / \alpha) (\lambda / \lambda o)$ (Co , αo は 100%RH 時の拡散係数及び水分容量) である。ここで (13) 式より $\alpha o / \alpha = 1 / h^{\beta-1}$ となる。従って以下の式を得る。

$$\lambda = \lambda o h^{\beta-1} \left\{ a_o + \frac{1 - a_o}{1 + \left(\frac{1-h}{1-hc} \right)^n} \right\} \quad \text{..... (14)}$$

図 9 $h - \lambda / \lambda o$ 関係

なお { } 内の式は、 C/Co について Bazant の提案した式である。ここで、 λo は供試体の相対湿度が 100% の時の透湿率、 h は供試体の相対湿度、 a_o 、 hc 、 n は図 9 に示すような意味を持ち、その決定にあたっては文献 5) の表 1 より $a_o = 0.05$, $hc = 0.75$, $n = 16$ とした。

f については次の二つのケースを仮定する。

Case 1 : h に依存せず一定とする ($f = fo$)。この場合、境界層が乾燥と共に短くなる。

Case 2 : 依存性が (14) 式で表せるとする。ただし λ , λo をそれぞれ f , fo に置き換える。境界層の長さは一定となる。

ここで、 fo は供試体の相対湿度 h が 100% の時の表面係数。

- ② 上述した ① の仮定により、 fo , $\lambda o / fo$ を決める問題に帰着される。このため次の二つの条件を与える。

(a) 実測値と計算値の「時間-脱水量曲線」の初期勾配を合わせる

(b) 実測値と計算値の「時間-脱水量曲線」を合わせる

(a) は乾燥開始直後のため線形とみなせ解析解が利用できる。これにより後述するように、与えられた $\lambda o / fo$ のもとで、 fo が簡単に求められる。

(b) は乾燥が進んでいるため非線形となる。そこで、(6) 式を FEM を用いて解き、脱水量の実測データに合わせ、最適な $\lambda o / fo$ を決定する。

4-1. (6) 式の微分

(6) 式において、 h を $h - hair$ に変換して解く。

境界条件: $x = 0$ において

$$\frac{d(h - hair)}{dx} = 0 \quad \text{..... (15)}$$

$x = l$ において

$$\frac{d(h - hair)}{dx} = -\frac{f}{\lambda} (h - hair) \quad \text{..... (16)}$$

初期条件: $t = 0$ において

$$h - hair = 1 - hair \quad \text{..... (17)}$$

これらの条件より (6) 式の解は次のようになる。

$$h - hair = (1 - hair) \sum \frac{\sin \eta_n l}{\frac{\sin 2 \eta_n l}{4} + \frac{\eta_n l}{2}} \exp\{(-\eta_n l)^2 T\} \cos \eta_n l \frac{x}{l} \quad \text{..... (18)}$$

ただし、 $T = \frac{\lambda}{\alpha l^2} t$ である。また、 $\eta_n l$ は下式の n 番目の根である。

$$\tan \eta_n l = \frac{1}{\eta_n l} \cdot \frac{l \cdot f}{\lambda} \quad \text{..... (19)}$$

<脱水量>

供試体表面より単位時間、単位面積当り外気中に流れる水分量 q は、

$$q = f (1 - hair) \sum \frac{\sin \eta_n l}{\frac{\sin 2 \eta_n l}{4} + \frac{\eta_n l}{2}} \exp\{(-\eta_n l)^2 T\} \cos \eta_n l \quad \text{..... (20)}$$

となり、時刻 t における脱水量 Wd は (21) 式ようになる。

$$Wd = \frac{\alpha f l^2}{\lambda} (1 - hair) \sum \frac{\sin \eta_n l \cos \eta_n l}{\frac{\sin 2 \eta_n l}{4} + \frac{\eta_n l}{2}} \cdot \frac{1}{(\eta_n l)^2} \times \left\{ 1 - \exp\{(-\eta_n l)^2 T\} \right\} \quad \text{..... (21)}$$

次に、(20) 式における $t - Wd$ 曲線の $t = 0$ における傾き $q_{t=0}$ は (22) 式のようにになる。

$$q_{t=0} = f(1 - \text{hair}) \sum \frac{\frac{\sin \eta_n \ell \cdot \cos \eta_n \ell}{4} + \frac{\eta_n \ell}{2}}{\dots} \dots \dots (22)$$

4-2. (6) 式 の 非 線 形 解

一次元 F. E. M. による。

4-3. f_o , λ_o の 推 定 方 法

- ① まず、 t - W_d 曲線の実測値より初期勾配 q_o を求める。
- ② (22) 式における Σ の項を 1.0 として^{注1)} f_o の第一次近似 $\bar{f}_o$ を次式より求める。

$$\bar{f}_o = \frac{q_o}{1 - \text{hair}} \dots \dots \dots (23)$$

- ③ $f_o = \bar{f}_o$ とし、FEM による脱水量の計算値と実測値が合うように繰り返し計算し、最適の λ_o / f_o を求める。得られた λ_o / f_o より次式から f_o を修正する。

$$f_o = \frac{\bar{f}_o}{\sum \frac{\frac{\sin \eta_n \ell \cdot \cos \eta_n \ell}{4} + \frac{\eta_n \ell}{2}}{\dots}} \dots \dots \dots (24)$$

注 1) Σ の項は ℓ と λ / f の関数である。いま、 ℓ をパラメータにして、 λ / f と Σ の項との関係を描くと図 10 のようになる。 ℓ が 0.1 cm の場合、 Σ の項はほぼ 1.0 となる。従って、 $f_o = \bar{f}_o$ とみて十分である。

図 10 (22) 式における Σ 項の計算値

4-4. 実験

4-4-1. 実験計画

厚さ 2mm の薄片供試体により脱水量の経時変化を測定する。実験要因としては、供試体の乾燥開始材齢、外気の相対湿度とする。なお、温度は一定 (20℃) とする。

- ・乾燥開始材齢：1, 7, 28 日
- ・外気の設定相対湿度：60% ・供試体数：各 3 体

4-4-2. 使用材料および調査

3-1-2 に同じ

4-4-3. 混練、供試体作製および養生

3-1-3 に同じ

4-4-4. 乾燥の方法

供試体からの蒸発水分によって周辺の湿度 (hair に相当) が影響

を受けないようなキャパシティを持つ恒温恒湿室にて乾燥を行った。

4-4-5. 質量の測定

質量の測定には精度 0.1mg の電子天秤を用いた。なお、乾燥直後の質量減少率は著しいので、この変化に十分、追従出来るような測定間隔で供試体質量を測定した。

4-5. 実験の結果および考察

4-5-1. 時間-脱水量関係およびその初期勾配

図 11 に時間-脱水量関係の測定値を示す。これをもとに、初期勾配を求めた。しかし、この値は外気の相対湿度 hair に依存するため、(23) 式で定義した $\bar{f}_o$ (Σ の項は、ほぼ 1.0 とみなせるので表面係数とみてよい) で表すことにした。その結果が表 4 に示されている。これによると、繊維混入の影響は見られない。材令の影響を平均値で見ると材齢 1 日で 0.2876、7 日で 0.2313、28 日で 0.0973g/cm²day となって材齢が大きいほど小さくなっている。

表 4 $\bar{f}_o$ の測定値 (単位: g/cm²day)

材 齢	①	②	③
1 日	0.2755	0.2743	0.3131
7 日	0.2372	0.2382	0.2184
28 日	0.1009	0.0951	0.0959

4-5-2. λ_o / f_o の逆推定

4-3 に示す手順に従って f_o , λ_o を逆算した。FEM の計算において材料定数は以下のようにした。即ち、 α の値は 3 章の実験値を、 $\bar{f}_o$ は 4 章の実験値を用いた。 λ の湿度依存性には (14) 式を、 f の湿度依存性については前述した Case 1 及び Case 2 の二通りとした。 λ_o / f_o についてはこれをパラメータとして、 t - W_d 関係の計算を繰り返し実測データと最も合致する場合の値を捜し出した。Case 1 の場合は、Case 2 に比べて、計算値を実測値に合わせるのが困難であった。Case 2 の場合について、脱水量の計算値と実測値を比較すると図 11 のようになる^{注 2)}。これによると材齢 7 日、28 日は全体的によく一致している。材齢 1 日については乾燥初期はよく一致しているが中盤において、 t - W_d 曲線の曲率が一致していない。材齢 1 日の場合、自由水が多いために水分移動は必ずしも (6) 式に従わないことが考えられる。

f_o , λ_o の推定結果 (Case 2 のみの場合) を表 5 に示す。これによると λ_o , f_o 共に繊維混入の影響は見られない。 f_o は第一次近似値である $\bar{f}_o$ とほぼ変わらない。 λ_o について材齢の影響を平均値でみると材齢 1 日で 0.2878、7 日で 0.0234、28 日で 0.0092g/cmday となり材齢が大きくなるにつれ桁のオーダーで小さくなっている。参考のため既往の測定値と比較してみると、文献 2) では直接法により、供試体厚さ 1mm, 95%RH, 砂セメント比 40% において、0.0015g/cm day を得ている。本測定値 (表 5) においては、材齢 28 日の 0.0082~0.0097g/cm day に対応するが、本測定値の方が約 8 倍大きい。これは本実験の測定が first drying であること、乾燥収縮低減剤を使用していること、水セメント比が 47% と大きいことなどによるものと思われる。次に、 λ_o / f_o は、材齢 1 日で 1.0cm, 7 日で 0.1cm, 28 日で 0.08~0.1cm となった。

注 2) t - W_d 曲線の終局値の大きさは α に依存する (ここでは実測値と計算値を合わせるため α を調整することはしていない) が曲率は λ_o / f_o に依存する。

図11 乾燥時間－脱水量関係

表5 λ_0 及び f_0 の推定値

乾燥開始材齢	割合	Σの項	λ_0/f_0 (cm)	λ_0 (g/cm day)	f_0 (g/cm²day)
1 日	①	0.9990	1.0	0.2758	0.2758
	②	0.9988	1.0	0.2746	0.2746
	③	0.9989	1.0	0.3131	0.3131
7 日	①	0.9860	0.1	0.0241	0.2406
	②	0.9880	0.1	0.0241	0.2411
	③	0.9864	0.1	0.0221	0.2214
28 日	①	0.9854	0.08	0.0082	0.1024
	②	0.9880	0.1	0.0096	0.0963
	③	0.9900	0.1	0.0097	0.0969

5. 結 論

以上の実験、解析による範囲内で以下のことがわかった。

- 1) $h-We/We_0$ 曲線は中高湿度域に限定すれば指数関数式で表せ、指数は水和度の関数となる。本実験では指数は材齢1日で2.5、材齢7日で1.2、材齢28日で0.8となり調合による影響は見られなかった。この曲線を微分することにより水分容量 α が相対湿度 h の関数として得られる。
- 2) 薄板状の供試体の場合、 $t-W_d$ 曲線の初期勾配から表面係数 f_0 が求まることを示した。 f_0 は繊維の混入による影響を受け

なかった。材齢の影響を平均値で見ると材齢1日で0.2878g/cm²day、7日で0.2344g/cm²day、28日で0.0985g/cm²dayとなっており、長期材齢ほど小さくなっている。

- 3) $t-W_d$ 曲線の実測値にFEMによる解析値を合わせることににより λ_0 を逆算した。これによると λ_0 は繊維混入の影響を受けなかった。また材齢の影響を平均値で見ると、材齢1日で0.2878g/cm²day、材齢7日で0.0234g/cm²day、28日で0.0092g/cm²dayとなっており、材齢が大きくなるにつれ桁のオーダーで小さくなっている。 λ_0/f_0 は材齢1日で1.0cm、7日で0.1cm、28日で0.08～0.10cmとなった。

参考文献

- 1) 西岡, 原田: コンクリートの透湿率及び湿気拡散率について: セメント技術年報, pp. 274～278, 昭和36年
- 2) 沼尾, 三橋: セメント硬化体中の水分移動に及ぼす湿度と温度の影響: 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 321～322, 1996年9月
- 3) 岡田, 川村: ソフトメントの乾燥収縮応力に関する2, 3の考察: 土木学会論文集第142号, pp. 37～45, 1967年
- 4) 永松, 佐藤, 大常: セメント硬化体の乾燥の程度と乾燥収縮ひずみの関係(総説的記述): 日本建築学会学術論文報告集, No. 439, pp. 13～21, 1992年9月
- 5) Z. P. BAZANT, L. J. NAJJAR: Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete, Materials and Structures, Vol. 5, pp. 3～20, 1972年

(1997年9月22日原稿受理, 1998年3月3日採用決定)