

# コンクリートの簡易透水試験方法 に関する一検討

庄谷 征美\*, 月永 洋一\*\*, 杉田 修一\*\*\*

## On New In-SITU Testing Method for Permeability of Concrete

Masami SHOYA, Yoichi TSUKINAGA and Shuichi SUGITA

### Abstract

In this study, the applicability of new in-situ testing method for permeability of concrete, of which original concept has been proposed by authors, is examined from experiments and its extension is also schemed based on the diffusion theory.

In the experiments, the rapid permeability coefficient defined by authors was measured in the various conditions of water cement ratio, moisture content and curing period. The higher the water cement ratio and the less the moisture content, the higher the permeability coefficient. Then, the coefficient of variation in test was ranged from 15% to 30% dependent of water cement ratio and moisture content.

The analytical study showed that the diffusivity of pressure diffusion equation, being assumed as one dimensional pressure flow from the wall of a test hole with the water pressure  $\phi(t)$  to the inner part of concrete, corresponded well to the change of water cement ratio and the moisture condition in test and was estimated within the range of diffusivity values obtained by Murata.

In conclusion, the new test method can be judged promising for the in-situ permeability test, if followed by some improvements of the quality of the rubber balloon originating the water pressure and on the testing and analytical techniques.

### 1. はじめに

コンクリートの表層部は、外的な劣化因子が作用する場合、コンクリート内部への劣化因子の侵入・拡散に低抗する保護層として、構造体の耐久性を左右する機能を担っているといえる。一方、コンクリート表層部の劣化は、ポップアウトやひびわれを伴う形で発現することが多く、その形状や発達状況によって、構造体の

劣化原因やその進行度を予測できる場合が多いものと考えられる。したがって、表層部コンクリートの品質変化を経時的に調査することは、構造体コンクリートの健全度を検討する際に有用な情報を提供することになる。

筆者らは、このような考えにたち、コンクリート表層部の品質変化を捉らえるための簡易試験方法について検討を行ない、Pull-outあるいはPull-off法に代表される表層部の強度試験方法および簡易透気性、簡易透水性などの気密性・水密性を評価するための試験方法を既に提案している<sup>1)</sup>。

コンクリートの水密性を室内で検討する方法

---

平成5年10月15日受理

\* 土木工学科教授

構造工学研究所(兼任)

\*\* 建築工学科助教授

\*\*\* 土木工学科教授

として、既に多くの提案がなされているが、村田は5~20 kg/cm<sup>2</sup>の定圧下でのインプット法(浸透深さ方法)による室内透水試験方法を提案した<sup>2)</sup>。この方法は、供試体に一軸方向の水圧を負荷し、一定時間後(48時間)の透水深さから、非定常の圧力拡散方程式の解より拡散係数を求めるものである。定常状態でダルシー則の適用によりコンクリートの透水係数を求める方法(アウトプット法)は、試験終了までの時間が相当に長く、現在では村田の方法もよく用いられている。

本研究では、筆者らが既に提案したインプット法の応用による簡易透水試験方法に更に検討を加え、その拡張方法について考察を加える。現在の所、拡張法は簡易解法の範囲にとどまっているが、村田の結果を参考に、その有用性について考察する。

## 2. 簡易透水性試験方法

筆者らが提案した試験装置の概要を図-1に示す。装置は、ゴムチューブの上部に水圧計を取り付けたものであり、手動加圧ポンプにより圧力を伝達するような構成となっている。試験コンクリートには予め直径10mm、深さ35mmの穴をドリルで穿ち、アタッチメントをエポキシ樹脂系接着剤で接着する。接着剤の硬化後ポンプでゴムチューブを加圧し、アタッチメントと小穴部に注水接続、ドレーンにより空気抜きを行なった後、圧力を3 kg/cm<sup>2</sup>に調整して試験を開始する。水圧の低下量  $\Delta P$  と時間  $T$  の関係を求め、次式により係数  $a$  を算定する。

$$\Delta P = a\sqrt{T} \quad (1)$$

$T$  は sec,  $\Delta P$  の単位は kgf/cm<sup>2</sup>, 従って  $a$  の単位は kgf/cm<sup>2</sup>/sec<sup>1/2</sup> となる。(1) 式を適用するに当たって、コンクリート内に浸透した水量と圧力低下量  $\Delta P$  の関係は、 $P=3\sim 2.5$  kgf/cm<sup>2</sup> では図-2に示すような直線関係があることを実験的に確認している。 $\Delta P$  を浸透水量の尺度

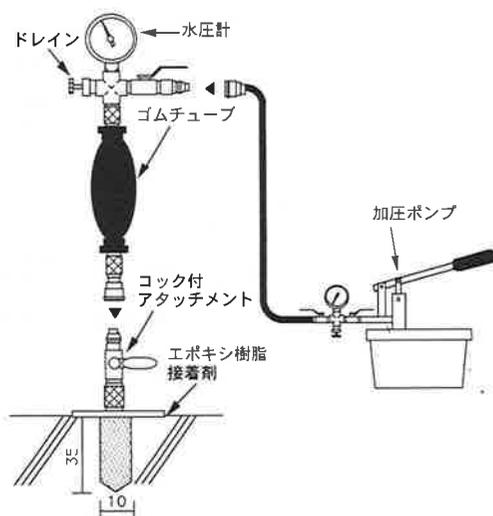


図1 簡易透水試験装置の概要

と考え、自然吸水時におけるソープティビティ(sorptivity)<sup>3)</sup>と同様の考えに準拠して、係数  $a$  を算出することにしたのである。

図-3には、実験結果の一例を示す。これによると  $T=7,200$  sec まで(1) 式の関係が保持されていることが認められる。他の多くの測定でもこの関係式が成立することが認められたので、本研究ではこの係数  $a$  を簡易透水係数と名付けて透水の尺度とすることにした。なお、実験に使用したバルーンの大きさは、長さ50mm、初期の直径15mm、ゴムの厚さは3mmであり、予備試験の結果、試験時間、繰り返し使用回数の増加によっては非回復性の膨張変形を生じることが判明した。しかし、試験時間2時間、繰り返しは2回までに制限すれば、ほぼ測定信頼性が失われることがないと確認されたので、この条件で実験計画を定めた。現在、ゴム自身の改質及び試験手順の改良に取り組んでいるところであり、これが今後の課題である。

## 3. 拡散係数の評価手法

村田は、非定常の透水について理論的考察を行ない、一定圧力下の流水はダルシー則に従い、

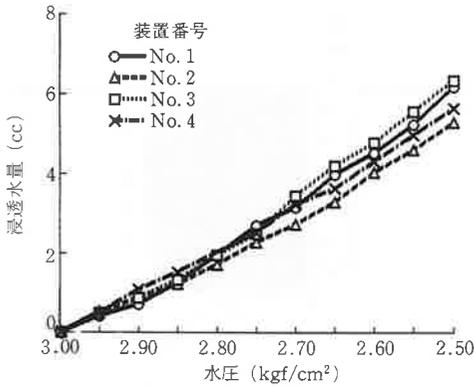


図2 水圧の低下と浸透水量の関係

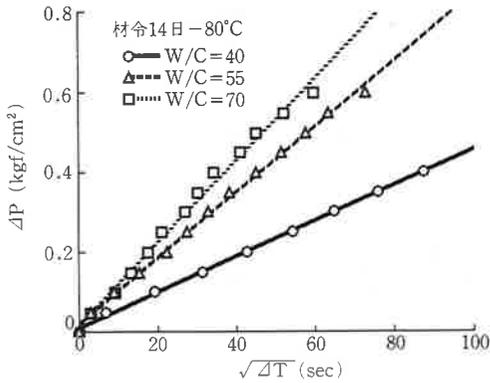


図3 簡易透水性測定結果の一例

流入した水と流出する水量の差がコンクリートの体積変形に等しいとして、任意の位置  $x$  における水圧  $P$  が拡散方程式の形で表現できるとし、求めた拡散係数を透水係数の尺度とすることを提案している<sup>2)</sup>。一次元の拡散方程式は、(2) 式で表される。

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \beta^2 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \quad (2)$$

村田は、一定時間後  $t$  の水の浸透深さ  $D_m$  を実測して、この先端部の水圧  $P_f \doteq 1 \text{ kgf/cm}^2$  と仮定するのが解析上適当であるとした。

(2) 式の解を (3) 式に示し、 $P_f = 1 \text{ kgf/cm}^2$  とした時の無次元項  $\xi$  を、

$$\frac{D_m}{2\beta\sqrt{t}}$$

とおけば、拡散係数  $\beta^2$  は (4) 式で与えられる。なお、浸透深さ  $D_m$  は  $t^{1/2}$  に比例せず、実験上  $t^{3/7}$  に比例することが示されているので、水の粘性  $\mu$  とこの補正係数  $\alpha$  によって  $\beta_i^2$  を求めることとしている。

$$P_f = \frac{2P_0}{\sqrt{t}} \int_0^{\frac{D_m}{2\beta\sqrt{t}}} e^{-\lambda^2} d\lambda \quad (3)$$

$$\beta^2 = \frac{D_m^2}{4t\xi^2} \quad (4)$$

さて、村田の手法を本試験方法に取り入れる場合、図-4 に示すように圧力により浸透した水は同心円状に広がり、拡散方程式は、厳密には次式で示される中空部のある円筒座標形で表示されるべきである。 $\beta^2$  は座標方向で同じと考えると、(5) 式となる。

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \beta^2 \left( \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

(5) 式を解く上で中空部の存在は解の形を複雑にし、実験との対応を考えると、境界条件等の取扱も面倒で必ずして実用的でない。従って、本論文では次の図-5 に示される概念図を基に近似的解析を試みた。

拡散は、穴の測面から一次的に生ずるものとし、(2) 式が成立すると仮定する。これを解くにあたりゴムバルーン中の初期水圧  $P_0$  は排水と共に減圧することから次の初期条件及び境界条件が得られる。

$$\begin{aligned} \text{初期条件: } t=0, \chi=0, P &= P_0 \\ \chi > 0, P &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{境界条件: } \chi=0, P &= \psi(t) \\ \chi=\infty, P &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

これに基に (2) 式を解くと次式の解を得る。

$$P = \frac{\chi}{2\beta\sqrt{\pi}} \int_0^t \psi(\lambda) \frac{e^{-\frac{\chi^2}{4\beta^2(t-\lambda)}}}{(t-\lambda)^{2/3}} d\lambda \quad (8)$$

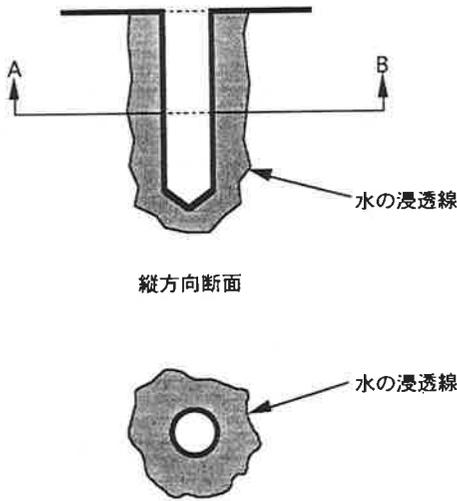


図4 簡易透水試験による水の浸透状況  
A~B (横方向) 断面

なお、小穴の圧力  $\psi(t)$  は圧力低下  $\Delta P$  が (1) 式のように実験的にあらわされるので、初期圧を  $P_0$  として (10) 式で表される。

$$\psi(t) = P_0 - \Delta P = 3 - a\sqrt{t} \quad (9)$$

本研究では、 $t=7,200$  sec 終了時に浸透深さ  $D_m$  を実測し、(8) 式から、 $P=1 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\chi=D_m$  と仮定して、拡散係数  $\beta^2$  を求めた。

#### 4. 材料、配合、養生及び試験条件

セメントは早強ポルトランドセメントを使用し、細骨材は比重 2.59, f.m. 2.73 の陸砂、粗骨材は比重 2.70 最大寸法 20 mm の硬砂岩碎石

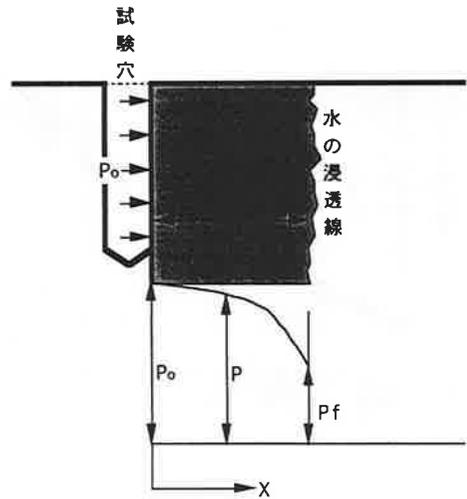


図5 簡易透水試験による水の拡散概念図

を使用した。混和剤は AE 剤 ヴィンソルを使用した。

コンクリートの配合を表-1 に示す。水セメント比は 40, 55% 及び 70% の 3 種類を選定し、目標スランプ 8 cm, 目標空気量 5% で実施した。

コンクリートの練り混ぜば、強制練りミキサ (容量 50L) を用いた。供試体は  $10 \times 10 \times 40$  cm 角形型枠を用い、同一の配合、試験条件で各 4 個の供試体を作製した。締固めは内部振動機により行なった。養生は、材齢 1 週試験用では、1 日で脱型、その後試験目的に応じた養生とした。2 週試験用は 1 日で脱型、材齢 7 日まで水中養生し、以後試験目的に応じた養生とした。図-6 に養生条件を示す。

表-1 コンクリートの配合

打設記号	$G_{\max}$ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	目標		結果		単用量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				SL (cm)	Air (%)	SL (cm)	Air (%)	W	C	S	G	AE 剤
W/C 40	20	40	40.0	8.0	6.0	6.8	4.4	174	435	651	1018	0.3480
W/C 55	20	55	43.0	8.0	6.0	7.6	5.5	169	307	750	1037	0.1397
W/C 70	20	70	46.0	8.0	6.0	8.7	4.8	169	241	828	1013	0.1036

図-6 養生条件

・2週養生					
材齢 (日)					
0	1	水中	7	密封	14
0	1	水中	7	40°C	14
0	1	水中	7	80°C	14
0	1	水中	7	105°C	14
・1週養生					
0	1	密封	7		
0	1	40°C	7		
0	1	80°C	7		
0	1	105°C	7		

## 5. 実験結果

### 5-1 簡易透水係数 a の評価

表-2 に試験結果の一覧を示す。

表には (1) 式で求めた簡易透水係数  $a$  ( $\text{kgf}/\text{cm}^2/\text{sec}^{1/2}$ ),  $a$  の変動係数(データ数 12 点基本)  $V$  (%), 試験 2 時間後 (7,200 sec 後) の水の浸透深さ  $D_m$  (mm), 試験時含水率  $W'_t$  (%) を示した。試験時含水率は次式により求めた。これは、含水状態を無次元化したものであり、水分飽和度に相当する。

$$W'_t = \frac{W_t - W_0}{W_s - W_0} \times 100 (\%) \quad (10)$$

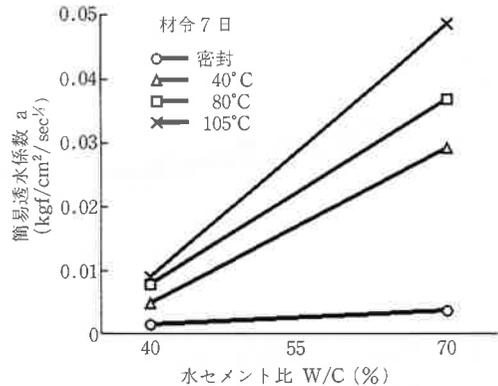


図7 水セメント比  $W/C$  と簡易透水係数  $a$  の関係 (材齢 7 日)

表-2 試験結果一覧

実験条件	密封				40°C				80°C				105°C				
	$W/C$ (%)	$a$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2/\text{sec}^{1/2}$ )	$V$ (%)	$D_m$ (mm)	$W'_t$ (%)	$a$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2/\text{sec}^{1/2}$ )	$V$ (%)	$D_m$ (mm)	$W'_t$ (%)	$a$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2/\text{sec}^{1/2}$ )	$V$ (%)	$D_m$ (mm)	$W'_t$ (%)	$a$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2/\text{sec}^{1/2}$ )	$V$ (%)	$D_m$ (mm)	$W'_t$ (%)
7	40	0.00150	31.4	12.7	73.9	0.00493	20.7	14.7	50.8	0.00780	12.8	17.5	18.0	0.00901	16.5	19.8	8.7
	70	0.00361	27.4	17.5	72.0	0.0291	23.2	25.0	33.7	0.0369	16.5	28.4	13.8	0.0485	13.5	29.3	3.9
14	40	0.00252	19.4	7.7	88.6	0.00284	16.1	10.5	73.6	0.00505	14.9	11.3	37.4	0.00830	16.3	16.7	8.0
	55	0.00146	24.7	8.0	85.0	0.00335	19.8	10.0	68.5	0.00759	18.6	15.4	35.6	0.0108	14.5	17.5	12.8
	70	0.00204	31.0	13.6	79.8	0.00731	24.1	19.0	47.2	0.0133	25.9	24.2	22.2	0.0155	26.5	26.6	14.5

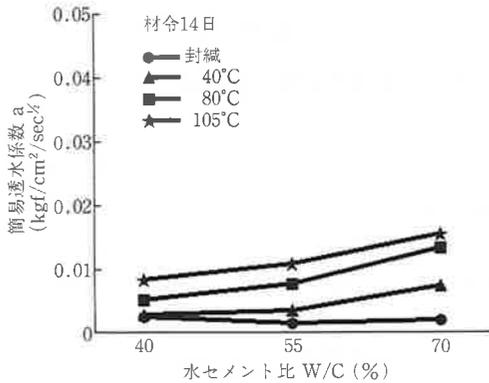


図8 水セメント比  $W/C$  と簡易透水係数  $a$  の関係 (材齢 14 日)

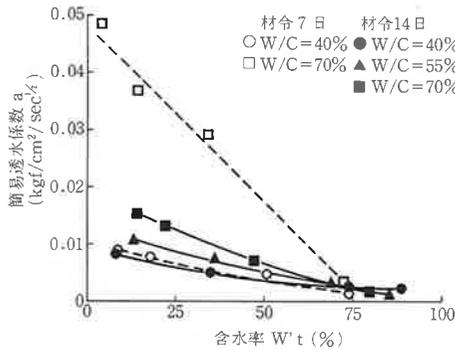


図9 含水率  $W_t$  と簡易透水係数  $a$  の関係

$W_t$ : 試験時の試料質量 (g)

$W_0$ : 絶乾後の試料質量 (g)

$W_s$ : 絶乾状態から 48 時間吸水された試料質量 (g)

図-7, 8 に, 簡易透水係数  $a$  と水セメント比  $W/C$  の関係を示す。試験材齢の若いほど水セメント比  $W/C$  の影響が大きくなり, また, 密封から 105°C へと乾燥程度が大きくなるほどその傾向は著しい。図-9 は, (10) 式で定義した無次元の含水率  $W_t$  と簡易透水係数  $a$  の関係を示す。含水率の増加と共に  $a$  は直線的に減少し,  $W_t$  が 70~80% 程度以上ではほぼ一定値になる傾向にある。このことは, 乾燥によって簡易透水係数  $a$  が増加し, 水密性が低下することを示

しており, 水分浸透が乾燥過程における一部ゲル部分の破壊による空隙の通導, 連絡や sorptivity による機構(毛細管張力を motive force とする)を含んだものとなっているためと考えられる。しかし, 乾燥の影響は, 村田, Powers らのデータと, 定性的には同傾向を示しており, 乾燥程度の違いによる水和程度の違いや, 前者の空隙の連絡等の理由が大きな比重を占めるものと考えられる。いずれにせよ, 含水率  $W_t$  70~80% 程度の高含水域に比べ  $W_t=5\sim10\%$  の低含水域の増加率は大きく, 3~15 倍程度となる。

図-10 に, 含水率  $W_t$  と簡易透水係数  $a$  の変動係数  $V$  (%) との関係を示す。

これにより, 水セメント比  $W/C$  が小さいほど変動係数  $V$  は小さくなり,  $W/C=40\%$  で  $V=15\sim20\%$  に比し 70% では 25~30% となる。これは, 供試体の品質のパラッキが水セメント比が増加すると大きくなることを示すものであると考えられる。

また, 含水率が大きくなると  $V$  は若干増加傾向にあり, 絶乾に近い状態から, 湿润状態に近づくにつれて 5~10% 変動係数は大きくなる。これは主に水の浸透深さ  $D_m$  のパラッキや簡易透水係数がかかなり小さくなり, 相対誤差が増加したためと考えられる。しかしながら, 本試験の変動係数  $V$  は村田らの試験と同程度か

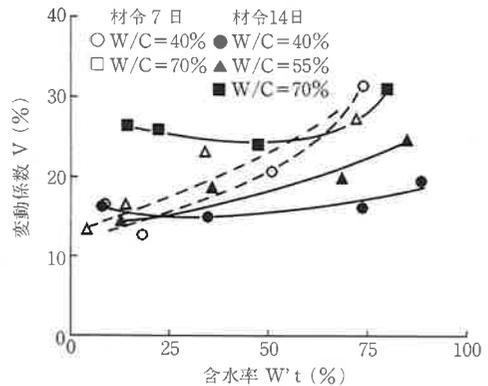


図10 含水率  $W_t$  と簡易透水係数の変動係数  $V$  との関係

表-3 拡散係数  $\beta$  算定結果

実験条件		密封			40°C			80°C			105°C		
$t$ (days)	W/C (%)	$a$ (kgf/cm <sup>2</sup> / sec <sup>1/2</sup> )	$D_m$ (mm)	$\beta^2$ ( $\times 10^{-4}$ cm <sup>2</sup> /sec)	$a$ (kgf/cm <sup>2</sup> / sec <sup>1/2</sup> )	$D_m$ (mm)	$\beta^2$ ( $\times 10^{-4}$ cm <sup>2</sup> /sec)	$a$ (kgf/cm <sup>2</sup> / sec <sup>1/2</sup> )	$D_m$ (mm)	$\beta^2$ ( $\times 10^{-4}$ cm <sup>2</sup> /sec)	$a$ (kgf/cm <sup>2</sup> / sec <sup>1/2</sup> )	$D_m$ (mm)	$\beta^2$ ( $\times 10^{-4}$ cm <sup>2</sup> /sec)
7	40	0.00150	12.7	112	0.00493	14.7	137	0.00780	17.5	176	0.00901	19.8	200
	70	0.00361	17.5	159	0.0291	25.0	—	0.0369	28.4	—	0.0485	29.3	—

$t$ (days)	W/C (%)	密封			40°C			80°C			105°C		
		$a$ (kgf/cm <sup>2</sup> / sec <sup>1/2</sup> )	$D_m$ (mm)	$\beta^2$ ( $\times 10^{-4}$ cm <sup>2</sup> /sec)	$a$ (kgf/cm <sup>2</sup> / sec <sup>1/2</sup> )	$D_m$ (mm)	$\beta^2$ ( $\times 10^{-4}$ cm <sup>2</sup> /sec)	$a$ (kgf/cm <sup>2</sup> / sec <sup>1/2</sup> )	$D_m$ (mm)	$\beta^2$ ( $\times 10^{-4}$ cm <sup>2</sup> /sec)	$a$ (kgf/cm <sup>2</sup> / sec <sup>1/2</sup> )	$D_m$ (mm)	$\beta^2$ ( $\times 10^{-4}$ cm <sup>2</sup> /sec)
14	40	0.00252	7.7	68.7	0.00284	10.5	94.1	0.00505	11.3	107	0.00830	16.7	165
	55	0.00146	8.0	65.0	0.00335	10.0	90.3	0.00750	15.4	150	0.0108	17.5	183
	70	0.00204	13.6	120	0.00731	19.0	185	0.00133	24.2	273	0.0155	26.2	327

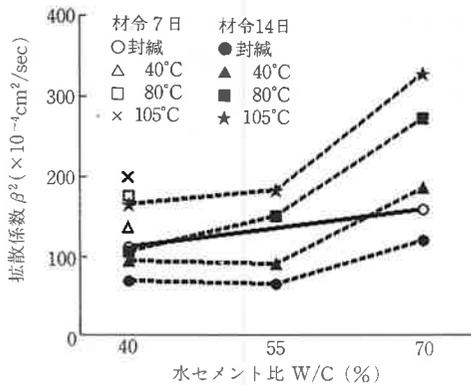


図 11 水セメント比 W/C と拡散係数  $\beta^2$  の関係

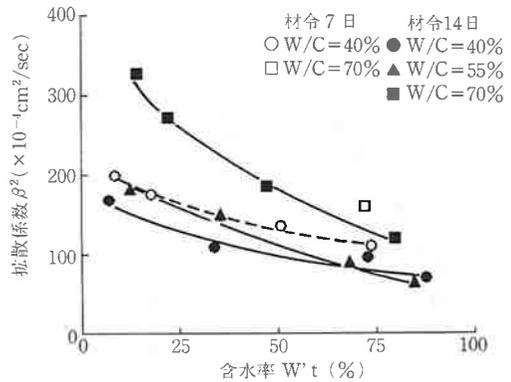


図 12 含水率  $W_t$  と拡散係数  $\beta^2$  の関係

それ以下であり、この種の試験方法としては、精度的にはかなり良いと判断できる。

### 5-2 拡散係数 $\beta^2$ の証価

表-3 に拡散係数算定結果一覧を示す。拡散係数  $\beta^2$  は、簡易透水係数  $a$  と同様、水セメント比、養生方法及び材令の影響が認められる。

図-11 は、表-3 の結果より水セメント比 W/C と  $\beta^2$  の関係を表したものである。図-7, 8 の  $a \sim W/C$  関係と、養生条件の違いによる値の大小傾向は同じであるが、W/C の変化に伴う  $\beta^2$  の変化の傾向がより明瞭に表れている。村田らの結果では W/C 46~65% での変化は 3 倍程

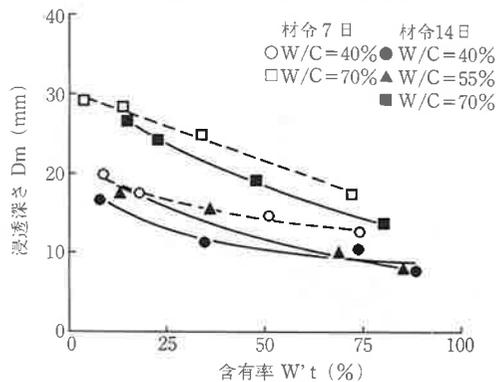


図 13 含水率  $W_t$  と水の浸透深さ  $D_m$  の関係

度となっているが、本試験では2倍程度(2Wのデータ)と若干小さい。

図-12に含水率  $W_i$  と  $\beta^2$  の関係を示す。 $a \sim W_i$  との関係に比べ、含水状態の変化に対する  $\beta^2$  の変化は鈍く、 $W_i$  70~80% 以上でのほぼ一定値に対し、 $W_i$  5~10% での  $\beta^2$  の値に比べその増加は3倍程度以下となる。

このように、 $\beta^2$  による評価は、コンクリート材質の変化による透水性能自体の変化を盲く捉えていると考えられる。

図-14に、水の浸透深さ  $D_m$  と簡易透水係数  $a$  の関係を示す。図-13より分かるように水セメント比が大きいほど、また、乾燥の程度が大きいほど  $D_m$  は大となるが、簡易透水係数  $a$  の変化に比べるとその変化は小さく、 $a$  が増大す

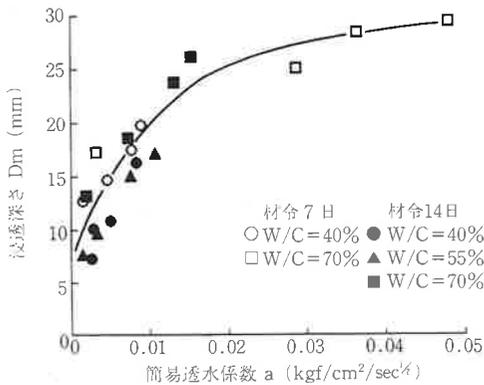


図14 簡易透水係数  $a$  と水の浸透深さ  $D_m$  の関係

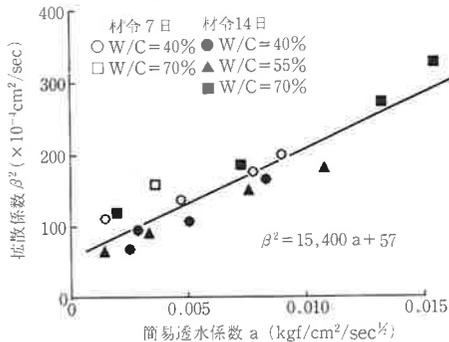


図15 簡易透水係数  $a$  と拡散係数  $\beta$  の関係

ると双曲線的に一定値に近づく様相にある。このように、 $\beta^2$  が含水状態にあまり大きく左右されないのは、 $D_m$  の変化に関連すると考えられる。

図-14に、拡散係数  $\beta^2$  と簡易透水係数  $a$  の関係を示す。先に簡易透水係数  $a$  は含水状態、および水セメント比の影響を受けて3~15倍程度変化することを示したが、拡散係数  $\beta^2$  は  $a$  とほぼ直線関係にある。しかしながら、この関係は、 $\beta^2$  の変化が  $a$  の1/2~1/3程度に減少することを示す。 $\beta^2$  はこのようにバラツキはあるものの、 $a$  と直線関係を示しており、このことは、逆に簡易透水係数  $a$  は、水密性の尺度として利用できることを裏付けているに他ならない。

拡散係数  $\beta^2$  は、5~20 kgf/cm<sup>2</sup> 程度の圧力で行なわれている通常の透水試験との対比が今後の課題であるが、本研究での  $\beta^2$  の値は村田の求めた  $\beta^2$  の範囲(1~1000×10<sup>-4</sup> cm<sup>2</sup>/sec程度)の中にあり、試験条件によりほぼ対応する値になっていることから、本拡張法による  $\beta^2$  の評価はほぼ妥当なものとなっていることが伺われる。

## 6. まとめ

以上の結果を総括すると以下のようになる。

(1) 筆者らが提案するインプット方式を応用したゴムバルーンによる簡易透水試験は、試験時間も短く、操作も簡単であり現場試験に適しているが、これを実用化するには試験手順やゴム材質の改良が特に重要と思われる。

(2) 前掲式(1)より求めた簡易透水係数  $a$  は、水セメント比、含水量、養生期間の影響により変化した。含水量による変化は大きく、含水率70~80%のケースと含水率5~10%のケースを比べると、後者は前者の3~15倍の値を示した。

(3) 簡易透水係数  $a$  算定の変動係数は15~30%であり、高水セメント比及び高含水率の

状態で若干増加傾向を示した。

(4) 近似解法による拡散係数  $\beta^2$  は村田の求めた  $\beta_i^2$  の範囲内にあり、試験の条件によっては良く対応していた。従って、本拡張法の有用性を示唆する結果を得たと言える。

(5)  $\beta^2$  には簡易透水係数  $a$  及び浸透深さ  $D_m$  が関係するが、含水状態による変化は  $a$  の変化のそれと比べ  $1/2 \sim 1/3$  であって、 $\beta^2$  は含水状態の影響が小さいことが判明した。

(6) 簡易透水係数  $a$  と拡散係数  $\beta^2$  の間には、ほぼ直線関係が成立し、簡易透水係数  $a$  も十分に透水性能の評価指標として有用と思われるが、含水状態の補正を行なう必要がある。

(7) 今後、一定圧力下の透水試験との比較や、敵密解との比較を通して、本拡張法についてさらに検討を加える必要がある。

### 参考文献

- 1) 月永洋一, 庄谷征美: コンクリート構造物の耐久性判断のための非破壊試験。非破壊検査, 第40巻第9号, pp 598~605 1991
- 2) 村田二郎: コンクリートの水密性に関する研究。土木学会論文集 pp 69~103 昭和36年11月
- 3) C. Hall, Water Sorptivity of Mortars and Concretes: A Review, Magazine of Concrete Research, 41, No.147, pp: 51~61, 1989.