

論文 加圧浸透試験に関する新測定法の提案

伊藤義也*1・越川茂雄*2

要旨：コンクリートの透水試験方法として一般に用いられている加圧浸透試験法に対し、現在目視によって行っている浸透部分の判定をコンピュータの画像解析によって判定する方法を提案した。さらに、簡易に一次元の加圧浸透流が得られる試験方法についても提案すると共に、品質および乾燥度の異なるコンクリートについて加圧浸透試験を行い、目視および提案した判定法の試験値のばらつきについて検討を行なった。その結果、提案した試験方法の有用性が明らかとなった。

キーワード：加圧浸透試験，拡散浸透流，ダルシー浸透流，透水試験，水密性

1. はじめに

水密性が要求されるコンクリート構造物にとって、コンクリートの水密性は強度、耐久性と共に重要な性質であり、設計に際して水密性を基とした設計法が必要と考えられる。しかしコンクリート中の水の流れの機構が十分解明されていないこともあって実構造物に水圧が作用した場合の部材厚さやかぶり厚などの水密性を基とした耐久設計法が完成するまでには至っていないのが現状である。一般にコンクリートの水密性を評価するための試験方法として浸透深さ方法が用いられている。この方法はコンクリート供試体の一端面から $0.5 \sim 2.0 \text{ N/mm}^2$ 程度の高水圧を加え、試験水圧と試験時間および試験時間に浸透する浸透流の浸透深さから拡散係数を算出して水密性を評価するものであるが、浸透深さは目視によって判定しているのが現状であり、供試体の乾燥度および試験水圧等によっては浸透部分の判定には熟練度が要求されることが指摘されている。本研究ではコンピュータによる画像解析によってコンクリートに浸透した加圧浸透流の浸透深さを測定する方法を提案するとともに、簡易に一次元の加圧浸透流を得ることが出来る実験方法を提案した。

2. 実験概要

2.1 簡易透水試験容器

既往の透水試験方法は図-1に示すように供試体を試験容器に設置し、一次元の流れが得られるように、供試体の側面をパラフィン・ロジンの混合物およびアスファルトを用いて水密に保ち、打ち込んだときの供試体の底面に水圧を加え、試験後に供試体を割裂して断面の浸透部を写真撮影し、印画紙上で断面の全断面積と水の浸透部の面積をプランイメータによって測定して供試体の高さの実測値より浸透部の平均浸透深さを比例計算によって求める。

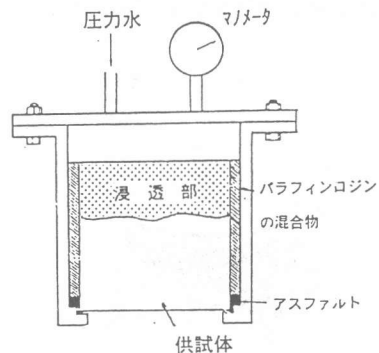


図-1 既往の透水試験容器への供試体設置

*1 日本大学専任講師

生産工学部土木工学科 工修 (正会員)

*2 日本大学教授

生産工学部土木工学科 工博 (正会員)

しかしながらこの方法は、試験容器に供試体を設置し、一次元流を得るために大変労力を要すること、水圧を加えた後も試験容器から供試体を取り出す際に試験容器を暖める必要があり浸透水量の少ない密実なコンクリートおよび試験水圧の小さい場合には浸透水の蒸発等に配慮する必要があること、割裂後、供試体の浸透深さの判定を目視によって判定するために乾燥度の低い供試体や低水圧によって試験した場合は浸透部分の判定に熟練度が要求されること、また、印画紙上で浸透深さを解析する際にも浸透深さの判定にばらつきを生じさせること等から透水試験の実験値のばらつきが他の強度などの物性値に比較して大きくなる要因になると考えられる。

本研究で提案する試験手法は図-2に示すような容器を用いて供試体上面と容器の蓋との間にOリングを置き、底板と蓋との間をボルトとナットによって連結して供試体に水圧を加える簡易試験方法である。試験の際、Oリングと供試体上面との間から漏水しないよう、供試体軸にできるだけ垂直で、且つ、平滑な平面にするため養生後に供試体端面研磨機を使い、JIS A 1132「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」に準じて、上下両端面を平面度0.05mm以内に仕上げた。また、供試体側面の油分等をワイヤー

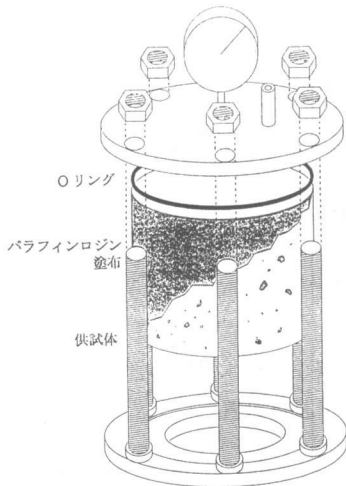


図-2 提案した透水試験容器への供試体設置

ブラシを用いて除去する作業を行い、パラフィン・ロジンの付着性を高めた。所定の環境で所定時間乾燥した後、供試体側面に十分に熱したパラフィン・ロジンをブラシによって含浸させるように塗布をした。試験時にOリングと供試体上面との間および側面からの漏水を目視によ

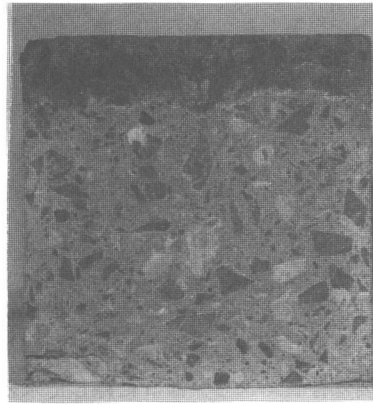


写真-1 高水圧試験による水の浸透状況
(混和剤：高性能A E減水剤、 $C=340\text{kg/m}^3$)
(乾燥度 45℃、RH35%、14日)

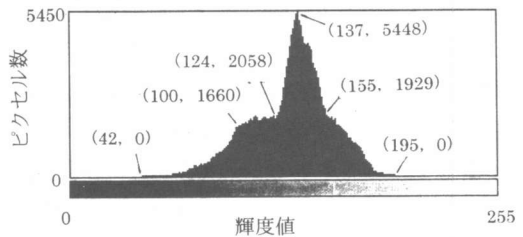


図-3 高水圧試験供試体断面のピクセル値の分布状況

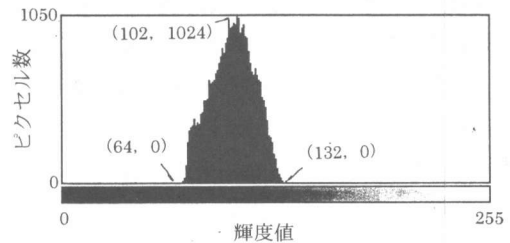


図-4 高水圧試験供試体の浸透部のピクセル値分布状況

て観察した結果、圧縮強度 24N/mm^2 程度のコンクリート供試体で 0.98N/mm^2 程度の水圧に対しても十分使用できることが認められた。

しかし、端面研磨による平面度や底板と蓋とを連結する際の強度が確保できない供試体の場合は試験直後に漏水が確認された。

また、乾燥度が低くパラフィン・ロジンが付着しにくい供試体の場合は、エポキシ樹脂等を用いて試験する事も出来るため、この試験方法は低水圧を加える場合だけでなく、乾燥度の低い供試体にも有効である。

2. 2 浸透部の画像解析方法

試験後直ちにレンズ焦点距離 50mm の一眼レフカメラによって供試体割断面の浸透部を写真撮影しネガフィルムから0社製のフィルムスキャナによって解像度 1770dpi でビットマップ画像として読み込みを行った。ビットマップ画像はピクセルという正方形のグリッド(ビットマップ)が集合することによって画像全体が構成されており、各ピクセルには特定の位置とカラー値がそれぞれ割り当てられている。

写真-1は試験水圧 0.98N/mm^2 の水圧で試験時間 48 時間とした場合の一例である。写真-1に示すとおり、コンクリートに水が浸透した部分はその他の部分とは濃淡に差が生じ、目視により識別することができる。

本実験では A 社製の写真レタッチ、画像編集等を目的にデザインされたソフトを用いて、前述の濃淡を輝度値としてとらえ境界部分の判別を行った。このソフトには目的範囲の大きさを自由に矩形で選択し囲むことが出来るもの、また、隣接した近似色範囲を指定して自動的に選択することの出来る道具が用意されている。

これらを用いて水の浸透部分を以下の手順で判別した。まず、加圧面付近の浸透部と供試体中心部付近(未浸透部分)の任意の一部を矩形範囲として選択し、それぞれの輝度値の平均値を求めた。平均値の差から浸透部と未浸透部の輝度差を求め、これを「隣接した近似色の範囲」として指定し、加圧面付近の浸透部から自

動的に近似色範囲を選択させ浸透部分を判別した。次に、供試体断面を矩形範囲として選択し浸透部と供試体断面のそれぞれのピクセル数(SおよびA)を測定した。供試体の高さの実測値(h)から浸透部の平均浸透深さ(Dm)を比例計算($D_m=h \cdot S/A$)によって求めた。

図-3および図-4は、それぞれ、写真-1の供試体断面および浸透部を選択範囲とした時のピクセル値の分布状況を示したものである。図-3において横軸はピクセルの輝度値を示すものであって左端は最も暗いカラー値(0)であり右端は最も明るいカラー値(255)を示す。縦軸はピクセル数を示す。また、図-4において浸透部の輝度値は64~132であった。

3. 提案した測定法によるコンクリートの水密性の評価

3. 1 試験水圧の設定

コンクリート中の水の流れは加圧浸透流と毛

表-1 試験水圧と平均浸透深さとの関係(実験値)

区分	水セメント比 (%)	平均浸透深さ D_m (mm)			m ($D_m = \gamma_0 P^{1/m}$)	
		試験水圧 P(N/mm ²)				
		0.49	0.98	1.47		
モルタル	55	28.5 24.5 24.5 25.0	25.6 36.7 27.6 36.1	34.5 37.5 42.4 38.3	40.2	2.43
	70	42.8 45.1 36.7 36.5	40.3 47.4 46.4 54.6	50.9 55.3 52.3 58.8	60.2	
コンクリート	55	27.1 25.6 20.7 29.0	25.6 41.0 39.1 38.4	35.6 41.0 35.8 50.6	50.9	2.21
	70	45.7 38.9 40.0 35.5	40.0 60.7 59.6 60.7 54.4	58.9 62.2 67.9 44.5 64.9	60.3	2.17

備考 1) 配合 コンクリート:粗骨材砕石 2005, スランプ 16cm, 空気量 5%
W/C=55%, $s/a=47.2\%$
W/C=70%, $s/a=50.2\%$
2) 養生材齢 28 日まで 20℃水中, 14 日間 45℃, 湿度 35%で絶乾

表-2 P_f の仮定値に対する P- ξ 関係

$P(x,t)=P_f$ の仮定値 (N/mm ²)	ξ の値			m ($\xi = \gamma_0 P^{1/m}$)
	水圧 P (N/mm ²)			
	0.49	0.98	1.47	
0.001	2.182	2.324	2.403	11.4
0.01	1.640	1.817	1.914	7.07
0.05	1.156	1.380	1.499	4.19
0.10	0.898	1.156	1.290	3.00
0.12	0.822	1.091	1.231	2.69
0.14	0.755	1.036	1.180	2.43
0.15	0.724	1.010	1.156	2.31
0.16	0.694	0.986	1.134	2.21
0.18	0.637	0.940	1.092	2.01
0.20	0.585	0.898	1.054	1.83

管浸透流に大別される。前節で述べたようにコンクリートの水密性の評価は一般に拡散係数によって行われている。高水圧を加えた場合コンクリートの実態部が弾性変形を起こすと言う条件をダルシー則に加えることによって一次元の高圧浸透流の圧力に関する基礎方程式、式(1)が得られる。

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \beta^2 \frac{\partial^2 p}{\partial \chi^2} \quad (1)$$

ここに β^2 : 拡散係数

この解は式(2)が示す余誤差関数となり場所的な水圧分布が誤差関数曲線に従う。

$$p(\chi, t) = \frac{2P}{\sqrt{t}} \int_{\frac{\chi}{2\beta\sqrt{t}}}^{\infty} e^{-\lambda^2} d\lambda \quad (2)$$

ここに P : 加えた水圧

曲線の先端に相当する浸透部先端の値を適切に仮定し初期拡散係数 β_0 を求める。1) 表-1 は試験水圧 P と平均浸透深さ Dm の実験結果を示したものであって、 $Dm = \gamma_D P^{1/m}$ と表せば、m は 2.17~2.74, 平均 2.39 となる。

表-2 は式(2)の Dm の先端水圧を P_f として積分下限の値 $Dm / 2\beta t^{1/2} = \xi$ とおき、 P_f 値を適当に定め、試験水圧 P と浸透深さの相対値 $\xi = \gamma_0 P^{1/m}$ として m の値を求めたものである。

表-1 に対応する先端水圧は約 0.15N/mm²

であることが認められる。したがって、コンクリート中における加圧浸透流は作用する水圧の大きさによって、流れの機構が相違する。以上のことから本研究の試験水圧を高水圧 (0.98N/mm²) と低水圧 (0.15N/mm²) および毛管浸透

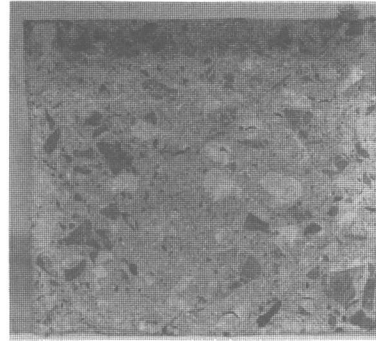


写真-2 低水圧試験による水の浸透状況
(混和剤 : 高性能 A E 減水剤、C=340kg/m³)
(乾燥度 45℃、RH35%、14 日)

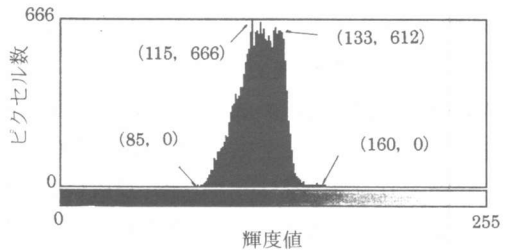


図-5 低水圧試験供試体の浸透部のピクセル値分布状況

表-3 コンクリートの配合

スランパの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	混和剤の種類	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
8 ± 1.5	5 ± 0.5	AE 減水剤	69.5	47.8	153	220	914	1014	C × 0.25%
			58.8	45.7	153	260	859	1036	
			51.0	44.1	153	300	814	1048	
			45.0	42.9	153	340	778	1051	
		高性能 AE 減水剤	61.8	46.3	136	220	906	1067	C × 1.1%
			52.3	44.4	136	260	854	1086	
			45.3	43.0	136	300	813	1094	
			40.0	41.9	136	340	778	1096	

に設定して水密性を評価することとした。
 なお、試験時間はいずれも48時間とした。

3.2 使用材料およびコンクリートの配合
 セメントはC社製普通ポルトランドセメント(比重3.16, プレーン比表面積3350cm²/g) 細骨材は茨城県鹿島産の陸砂(比重2.63, 吸水率1.37%, 実積率64.4%, F.M.2.77), 粗骨材は栃木県葛生産の碎石2005(比重2.67, 吸水率0.92%, 実積率57.1%, F.M.6.70)であって、いずれも良好な品質のものである。化学混和剤はN社製でAE減水剤としてリグニンスルホン酸塩, 高性能AE減水剤としてポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体を用いた。コンクリートの種類は2種類として単位セメント量を220, 260, 300および340kg/m³とした8配合である。コンクリートのスランプは8±1.5cm, 空気量は5±0.5%とした。

コンクリートの配合を表-1に示す。

3.3 供試体の作製方法

供試体はφ150×150mmであり, 材齢28日まで20℃の水中で養生を行った。養生後の乾燥度を2通り設定し, 一方は20℃, 湿度65%の室内, 他方は45℃, 湿度35%の室内でそれぞれ14日間乾燥を行った後, 供試体の側面をパラフィンとロジンの混合物をブラシによって塗布し, それぞれの設定水圧で透水試験を行った。

3.4 試験結果および考察

(1) 高水圧試験における実験値のばらつき

表-2に提案した測定法と従来方法により測定した拡散係数およびその変動係数を示す。表-2において従来法によって求めた拡散係数の変動係数は乾燥温度が20℃の場合16.0~69.8, 平均30.4%, 45℃の場合7.60~38.8, 平均18.1%である。一方, 画像を解析して求めた場合の拡散係数の変動係数は20℃の場合3.5~19.1, 平均11.0%, 45℃の場合, 5.45~14.2, 平均11.0%であり, 従来の浸透深さの測定法に対して変動係数が小さく, データのばらつきが小さくなることが認められた。

(2) 低水圧試験における浸透性状について

低水圧によって試験した結果の一例を写真-2に示す。図-5は, この浸透部分のピクセル値の分布状況である。図-5において輝度値の範囲は85~160であってピクセル数は輝度値85~

表-4 拡散係数(β₀)の一覧および変動係数

(単位: ×10⁻⁸m²/s)

混和剤の種類	単位セメント量(kg/m ³)	供試体の乾燥条件						
		20℃, RH65%, 14日間		45℃, RH35%, 14日間				
		従来法	画像解析法	従来法	画像解析法			
高性能AE減水剤	220	10.4 12.2 9.18 8.03	7.86 7.60 8.76 8.12	8.09	79.5 51.5 60.6 61.9	63.4	67.6 63.8 70.2 62.3	66.0
	変動係数(%)	17.7	6.18	18.5	5.45			
	260	4.01 4.95 6.15 6.56	4.88 5.02 4.67 4.67	4.81	48.0 49.1 51.2 56.8	51.3	46.4 39.4 47.9 54.9	47.2
	変動係数(%)	21.3	3.51	7.60	13.4			
	300	6.15 5.76 5.33 7.62	5.66 5.02 5.02 5.02	5.18	38.7 51.1 42.3 40.6	43.2	37.3 47.7 43.7 39.2	42.0
	変動係数(%)	16.0	6.29	12.7	11.1			
	340	1.66 4.86 1.03 2.12	1.53 3.77 0.69 0.61	1.65	25.1 13.2 37.0 33.2	27.1	24.6 18.1 25.1 22.1	22.5
	変動係数(%)	69.8	8.92	38.8	14.2			
	220	10.1 6.17 5.97 6.35	5.52 4.15 5.02 4.47	4.79	57.0 39.0 41.2 50.6	46.9	60.1 48.4 47.3 62.6	54.6
	変動係数(%)	27.1	12.6	17.9	14.4			
	260	4.79 5.67 9.10 10.8	3.89 4.08 5.67 5.45	4.77	34.9 36.9 29.1 24.0	18.7	35.8 43.2 45.1 39.2	40.9
	変動係数(%)	37.4	19.1	18.7	10.2			
300	2.70 3.03 4.64 3.94	2.45 2.08 2.70 3.13	2.59	20.5 23.9 28.0 25.4	24.4	22.5 28.0 26.7 25.9	25.8	
変動係数(%)	24.3	17.1	12.8	9.11				
340	4.50 3.70 2.08 3.56	2.91 2.55 2.08 2.40	2.49	22.2 18.1 17.4 14.5	17.7	20.3 18.7 17.5 15.9	18.1	
変動係数(%)	29.2	14.0	17.7	10.3				

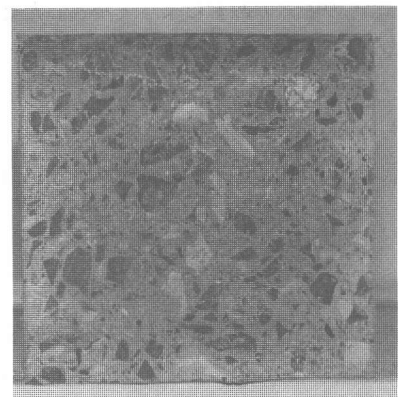


写真-3 毛管浸透試験による水の浸透状況
 (混和剤: 高性能AE減水剤, C=340kg/m³)
 (乾燥度45℃, RH35%, 14日)

115 にかけて急激に多くなり輝度値 115~133 までほぼ同数となりその後輝度値 160 にかけて急激に少なくなることが認められた。写真-3 は写真-2 の供試体と同じ条件で作製、養生および乾燥を行って毛管浸透試験を行った供試体である。図-6 はこの供試体の毛管浸透部分のピクセル値の分布状況であって、輝度値は 90~160 の範囲となっており、低水圧によって試験した図-5 の輝度値の範囲に入ることが認められる。また、ピクセル数は輝度値 90 からピクセル数のピークとなる輝度値 136 までほぼ一定の勾配で達し図-5 と同様に輝度値 160 にかけて急激に少なくなることが認められた。すなわち、図-5 は毛管浸透試験と同等の輝度値の範囲 (85, 0), (133, 662), (160, 0) と 0.15N/mm^2 の水圧の影響によって浸透したと考えられる輝度値の範囲 (85, 0), (115, 666), (133, 612) が加わったものと考えられる。このことから低水圧下の流れはダルシー浸透流と毛管浸透流が存在することが考えられる。そこで、図-5 と図-6 で求めた輝度値の平均の差を隣接した近似色の範囲として指定し、写真-2 の加圧面付近の浸透部から自動的に近似色範囲を選択させ浸透部分を判別した。

図-7 はこのようにして求めたピクセル値の分布状況であって輝度値の範囲は 85~133, またピクセル数のピークは輝度値 119 となり、 0.15N/mm^2 の圧力の影響によって浸透した輝度値の分布と同等となることが認められた。したがって、図-7 はダルシー浸透流による浸透部を示すものと考えられる。以上のことから本測定法は低水圧下の水の浸透性状について検討を行う場合、有効な方法となることが確認された。

4. まとめ

本研究は加圧浸透試験方法に対して簡易試験方法を提案すると共にコンクリート中の浸透部をコンピュータによる画像解析法によって判定する方法についても提案をおこない従来方法との比較を行った。その結果をまとめると以下の通

りである。

(1) 提案した加圧試験容器によって透水試験を行った結果、一次元の加圧浸透流を得るための簡便な方法であることが確認された。

(2) 高水圧によって加圧浸透試験を行い、提案した画像解析法と従来の方法とによって水の浸透部分を判定し、それぞれの拡散係数のばらつきを比較した結果、提案した測定法の有用性が認められた。

(3) 低水圧によって加圧浸透試験を行ない画像解析を行った結果、低水圧下の流れはダルシー流れと毛管浸透流れが加わった流れとなることが考えられ、本測定法によってそれぞれの浸透部分を判別できることが確認された。

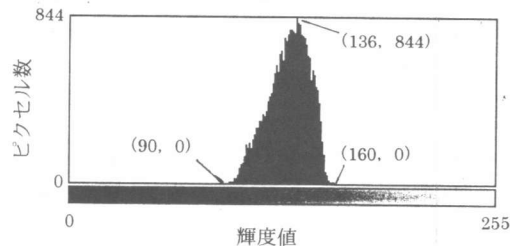


図-6 毛管浸透試験供試体の浸透部のピクセル値分布状況

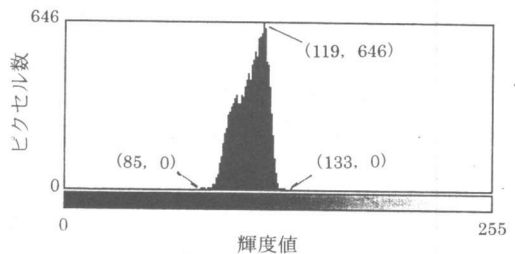


図-7 低水圧供試体のダルシー浸透部のピクセル値分布状況

謝辞: 本研究の実施にあたり東京都立大学名誉教授村田二郎先生よりご指導および貴重なご助言を賜りました、ここに記して感謝の意を表します。

参考文献)

- 1) 村田二郎, コンクリートの水密性の研究
土木学会コンクリートライブラリ第7号, 1963