

論文 ダルシー浸透流によるコンクリートの透水試験方法の提案

伊藤 義也^{*1}・越川 茂雄^{*2}

要旨: コンクリートの水密性の評価方法として一般的に用いられている浸透深さ方法（インプット法的一种）が適用出来ない 1kgf/cm^2 程度以下の低水圧を使用した新しい透水試験方法を提案することを目的として、まず、水圧が 1kgf/cm^2 程度以下と以上とでコンクリート中の水の流れの機構が基本的に相違し後者の場合、浸透拡散流であるのに対し前者はダルシー浸透流となることを確かめた。次にダルシー浸透流における浸透係数を誘導し、誘導式の妥当性を実験により検証した。さらに、浸透係数試験値のばらつきについて検討し、これらの結果から本試験方法の有用性が明らかとなった。そこで本試験方法によって各種化学混和剤を用いたコンクリートについて水密性の検討を行った。

その結果、混和剤の減水効果に伴う水セメントの変化の影響が著しいことが認められた。

キーワード: 水密性、透水性、ダルシー浸透流、拡散係数、浸透係数、透水係数

1. はじめに

コンクリートの水密性は水密性が重視される構造物のみならず耐久性の面からも重要な性質である。コンクリート構造物の水密性を評価する場合は実際に構造物に作用する水圧を用いて透水試験を行い、その結果を実構造物の部材厚さや鉄筋のかぶり厚等、耐久性設計に反映させることが望ましいものと考えられる。

現在、コンクリートに水圧が作用する場合、水密性の試験方法およびその評価尺度としてアウトプット方法による透水係数、インプット方法の一種である浸透深さ方法による拡散係数がある。

一般の緻密なコンクリートの水密性の評価を行う場合には、アウトプット方法は水の透過までに長時間を要すること、時として透過がおこらないこともあって浸透深さ方法による拡散係数が広く用いられているのが現状である。しかし、浸透深さ方法では高水圧によるコンクリートの実体部と水の弾性変形を伴う浸透拡散流を呈し[1]、この現象は水圧が 1kgf/cm^2 程度以下の低水圧ではおこらない。そのため、 1kgf/cm^2 程度以下の低水圧を作用させた場合には理論上拡散係数は得ることが出来ない。実際のコンクリート構造物に水圧が作用する状況を考えると、 1kgf/cm^2 程度以下の低水圧が実用的な水圧の範囲であると考えられる。

しかし、このような低水圧によるコンクリートの水密性の評価方法に関する従来の研究は皆無に等しい。

そこで本研究は低水圧下の水密性の評価方法としてダルシー浸透流を用いた新しい透水試験方法および水密性の評価の尺度となる浸透係数を提案することを目的として理論式の誘導を行い実験による理論式の検証および実験値の変動について検討を行った。その結果、本試験方法が有用であることが確認されたため、本試験方法によって各種化学混和剤を用いたコンクリートの水密性の評価を行ったものである。

* 1 日本大学助手 生産工学部土木工学科、工修（正会員）

* 2 日本大学助教授 生産工学部土木工学科、工博（正会員）

2. ダルシー浸透流による透水試験方法について

(1) 使用材料および配合

実験に用いたセメントはC O社製の普通ポルトランドセメントであり、細骨材は茨城県鹿島産の陸砂（比重2.57、吸水率1.35、F M2.81）、粗骨材は東京都青梅産の硬質砂岩碎石2005（比重2.67、吸水率0.92、F M6.78）を使用した。また、混和剤としてN社製のリグニンスルホン酸塩とポリオール複合体を主成分とするA E減水剤を使用した。なお、規定の空気量に達しない場合はアルキルアリルスルホン酸塩を主成分とする補助A E剤を用いて空気量の調整を行った。

コンクリートの配合は水セメント比55%、70%および80%、目標のスランプおよび空気量はそれぞれ15cm、および5%としたものである。

(2) 供試体の製造方法および透水試験方法

透水試験に使用した供試体は直径15cm、高さ15cmの円柱形である。28日間標準水中養生を行った後、45℃、相対湿度約35%の室内で14日間乾燥を行った。乾燥後、供試体側面をアスファルトおよびパラフィンとロジンの混合物でシールして供試体の打込み時の底面に低、高加圧法の場合所定の水圧および時間を加えた。また、毛管浸透法の場合は前述の通り設置した供試体上面に、約1cmの深さの水を張り、重力方向に吸水させた。コンクリート中の浸透深さは毛管浸透法および低水圧法の場合、浸透深さの先端部まで行い、高圧法の場合は従来提案されている浸透深さ方法に準じた拡散浸透流れによる浸透部までとし、加圧および吸水後、供試体を直径方向に割裂して水の浸透部を確認して直ちに断面を撮影した。印画上で断面の全断面積と水の浸透部の面積を測定して平均浸透深さを求めた。なお、試験に際し、供試体の寸法を測定するとともに乾燥前後および加圧前後に重量測定を行って重量差から空隙率および供試体に浸透する水量を求めた。

(3) 試験水圧と浸透水量比との関係

表－1は各試験水圧における透水試験結果である。この結果によればコンクリート中の水の浸透水量は低水圧の場合より、高水圧の場合の方が大きいことを示した。また、水の浸透部の濃淡は1.25kgf/cm²以下の低水圧より5kgf/cm²以上の高水圧の場合の方が著しく濃いことが視覚的に明瞭に認められた。これらのことは、後に示す流れの基礎方程式（2）および（9）に示すように低水圧下の場合是一般の砂層内の流れと同様に圧力勾配が線形のダルシー浸透流となるが高水圧の場合はコンクリート実体部および水が圧縮変形することにより浸透水量が空隙容積より大と

表－1 各試験水圧による透水試験結果

水セメント比 (%)	項目	試験水圧 (kgf/cm ²)								
		毛管浸透	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	5	10	15
55	浸透深さ(cm)	2.785	3.395	3.460	3.580	3.900	3.953	2.560	3.560	4.190
	浸透量(cc/cm ²)	0.152	0.197	0.193	0.205	0.210	0.229	0.400	0.572	0.601
	空隙率 (%)	5.870	6.430	5.700	5.760	5.265	5.230	5.780	5.410	5.480
70	浸透深さ(cm)	4.175	4.988	5.100	5.585	5.568	5.750	3.828	5.890	6.030
	浸透量(cc/cm ²)	0.206	0.276	0.280	0.312	0.336	0.362	0.586	1.076	1.036
	空隙率 (%)	7.671	7.820	7.717	7.940	7.984	7.510	6.840	7.380	7.110
80	浸透深さ(cm)	4.700	5.933	6.468	6.575	7.008	7.725	7.260	—	—
	浸透量(cc/cm ²)	0.329	0.435	0.480	0.440	0.550	0.621	1.330	—	—
	空隙率 (%)	8.755	9.490	9.696	8.550	9.716	9.020	8.703	—	—
備考) 試験値は4本の平均値である。										

なる浸透拡散流であるからと考えられる。そこでコンクリート中の水の流れを低水圧下の場合は加えた各低水圧により浸透した水の流れの先端に、毛管流れが生じるのに対し、高水圧下の流れは拡散流れの先端に約 1kgf/cm^2 の水圧により浸透した流れがあり、さらにその先端には毛管流れが生じるものとし、表-2の備考

表-2 水の浸透部における浸透水量比

水セメント比 (%)	水の浸透部における空隙容積に対する浸透水量比							
	試験水圧 (kgf/cm^2)							
	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	5	10	15
55	1.15	1.05	1.15	0.93	1.19	1.36	1.80	1.64
70	1.11	1.04	0.96	1.19	1.30	1.33	1.94	1.84
80	0.94	0.92	0.68	1.04	1.09	1.23	—	—

($0.25 \sim 1.25\text{kgf/cm}^2$)

$$\text{浸透水量比} = \frac{\text{各水圧の浸透量} - \text{毛管浸透の浸透量}}{\text{各水圧の浸透部の空隙} - \text{毛管浸透による浸透部の空隙}}$$

($5 \sim 15\text{kgf/cm}^2$)

$$\text{浸透水量比} = \frac{\text{各水圧による浸透量} - \text{先端}1\text{kgf/cm}^2\text{と毛管浸透による浸透量}}{\text{拡散浸透流による浸透部の空隙}}$$

欄中に示す毛管浸透水量を考慮した低、高水圧下の浸透水量比によって浸透水量と空隙容積の関係について検討を行った。結果を表-2に示す。この結果によれば浸透水量比は $0.25 \sim 1.25\text{kgf/cm}^2$ の低水圧の場合水セメント比55、70%および80%でそれぞれ $0.93 \sim 1.19$ 、平均 1.09 、 $0.96 \sim 1.30$ 、平均 1.12 および $0.68 \sim 1.09$ 、平均 0.93 、 $5 \sim 15\text{kgf/cm}^2$ の高水圧を加えた場合は水セメント比55および70%で、それぞれ $1.36 \sim 1.80$ 、平均 1.60 および $1.33 \sim 1.94$ 、平均 1.70 となった。このように低水圧下における浸透水量比はほぼ、 1.00 と空隙容積と同等となることが確かめられた。

これは、前述のように低水圧で試験した場合のコンクリート中の水の流れはダルシー浸透流に毛管浸透流が加わった流れであることを示唆するものである。

(4) コンクリートの浸透係数算定式の誘導

低水圧下におけるコンクリートの水密性評価に用いる浸透係数を次のように導く。

圧力勾配を伴うダルシーの速度方程式は式(1)で表される。

$$u = \frac{k}{\omega} \frac{dP}{dx} \quad (1)$$

ここに u : 流速 (cm/s) dp/dx : 圧力勾配 (gf/cm^3)

ω : 水の単位容積質量 (gf/cm^3) k : 透水係数 (cm/s)

コンクリート中の水の流れは非定常流であるが流速 u は場所的に一定であり

$$u = \frac{dx}{dt} = \frac{k}{\omega} \frac{P}{x} \quad (2)$$

ここに P : コンクリート表面に加えた水圧 (gf/cm^2)

x : 浸透深さ (cm)

浸透時間に対する浸透深さ x は

$$x dx = k \frac{P}{\omega} dt \quad (3)$$

$$\frac{x^2}{2} = k \frac{P}{\omega} t + C \quad (4)$$

$t = 0$ 、 $x = 0$ であるから $C = 0$

$$\chi^2 = 2k \frac{Pt}{\omega} \quad (5)$$

$$\chi = \sqrt{\frac{2kP}{\omega}} \sqrt{t} \quad (6)$$

であり、透水係数 k は式 (7) となる。

$$k = \frac{\omega \chi^2}{2Pt} \quad (7)$$

そこで低水圧が作用したコンクリート中の水の浸透深さ χ は前述 (3) の通りであることから浸透係数 K は χ の測定値 ($Dm_P - Dm_0$) を式 (7) に代入した式 (8) で求められる。

$$K = \frac{\omega (Dm_P - Dm_0)^2}{2Pt} \quad (8)$$

K (cm/s) をコンクリートの浸透係数と定義する。

ここに Dm_P : 各試験水圧の浸透深さ (cm)

Dm_0 : 毛管浸透における浸透深さ (cm)

これに対し高水圧が作用した場合の水密性評価に用いられている拡散係数 β^2 はダルシー式 (式 (1)) と水およびコンクリートの実体部が水圧によって弾性変形を起こすという条件等を組み合わせて導いた拡散型の微分方程式 (式 (9)) を基礎方程式とするものである。[1]

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \beta^2 \frac{\partial^2 P}{\partial \chi^2} \quad (9)$$

(5) 浸透係数算定式の実験的検証

a) 試験時間と平均浸透深さとの関係

水セメント比55%、70%および80%、試験水圧を0.5および1.0kgf/cm²、それぞれの加圧時間を6、16、24、48、72、140、200および250時間として透水試験を行ない、理論式における平均浸透深さ ($Dm_P - Dm_0$) と時間の関係について実験的検証を行った。図-1に実験結果を示す。

図-1においてコンクリートに水圧を加えてからの経過時間に伴う平均浸透深さ ($Dm_P - Dm_0$) の増加割合を $t^{1/n}$ としたときの n の値は水セメント比55、70および80%で水圧が0.5kgf/cm² の場合それぞれ2.39、2.00、および1.88、1kgf/cm² の場合は2.04、2.22、および1.85であって、それぞれの相関係数が0.911~0.971、平均0.935と式 (6) による理論値の2.0によく一致した。

b) 試験水圧と平均浸透深さとの関係

水セメント比55%、70%および80%、試験時間を48時間として水圧の大きさを0.25、0.5、0.75、1.0およ

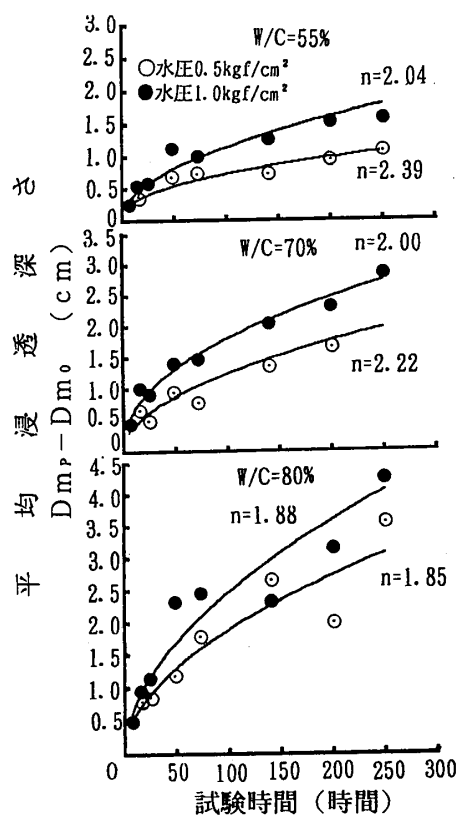


図-1 試験時間と平均浸透深さの関係

び1.25kgf/cm²として透水試験を行い、式(6)の理論式における平均浸透深さと試験水圧の関係について実験によって検証を行った。結果は図-2に示すとおりであって圧力の増加に伴う浸透深さの増加割合を $P^{1/n}$ とした場合のnの値は水セメント比55、70、および80%で、それぞれ2.33、2.31および1.98、相関係数0.965、0.947および0.973、平均0.962と理論値にほぼ一致する事が認められた。

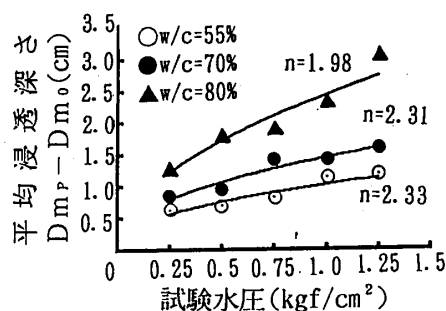


図-2 試験水圧と平均浸透深さ

c) 浸透係数試験値のばらつき

表-3に浸透係数の変動係数の一覧を示す。表-3において浸透係数の試験値の変動係数は水セメント比55、70および80%でそれぞれ9.7~67.2%、平均27.5%、16.4~61.0%、平均30.5%、および11.7~39.1%、平均24.7%であって拡散係数試験値のばらつきに関する既往の報告とほぼ同等である。

3. 各種化学混和剤を用いたコンクリートの水密性

3-1 使用材料および配合

使用したセメントはC.O社製普通ポルトランドセメントである。細骨材は茨城県鹿島産陸砂(比重2.58、吸水率1.60、FM2.64)、粗骨材は東京都青梅産碎石2005(比重2.67、吸水率0.92、FM6.78)をそれぞれ使用した。また、混和剤としてN社製のアルキルアリルスルホン酸塩を主成分としたAE剤、リグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体を主成分とするAE減水剤、ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体を主成分とする高性能AE減水剤を使用した。コンクリートの配合はプレーンコンクリートの場合スランプ12cm AEコンクリートの場合スランプ12cm、空気量6%を目標に配合を定めたものである。

表-3 浸透係数および変動係数

W/C (%)	試験水圧 (kgf/cm ²)	浸透係数 $K \times 10^{-9}$ (cm/s)							
		浸透時間 (時間)							
		6	16	24	48	72	140	200	250
55	0.50-0	1.99 1.81 3.31 0.28	1.67 1.09 2.92 4.17	2.32 1.32 1.17 2.32	3.04 1.15 3.57 3.21	1.48 2.41 2.11 1.89	0.89 0.81 1.37 1.15	1.08 1.62 0.91	1.44 1.16 1.32 1.23
		1.85	2.46	1.78	2.74	1.97	1.05	1.20	1.29
		変動係数(%)	67.2	55.8	35.0	39.6	19.8	24.0	9.7
	1.00-0	1.42 0.90 1.53 1.10	2.35 1.92 2.63 2.00	1.38 2.35 2.43 1.73	4.70 3.66 4.41 1.97	1.56 1.93 2.33 1.89	1.29 1.81 1.68 1.63	1.85 1.63 1.63 1.44	1.76 1.06 1.39 1.33
		1.24	2.22	1.97	3.69	1.93	1.60	1.63	1.39
		変動係数(%)	23.5	14.7	25.6	33.3	16.4	13.8	20.9
70	0.5-0	6.00 2.89 5.35 5.04	5.64 9.77 2.51 13.14	3.13 2.89 1.76 2.78	5.53 4.26 4.36 5.87	2.53 1.44 2.92 2.23	5.21 2.40 3.72 3.25	2.88 3.51 2.92 4.86	9.41 7.57 12.17 8.16
		4.82	7.76	2.64	5.00	2.28	3.65	3.54	9.33
		変動係数(%)	27.9	61.0	22.9	16.4	27.6	26.1	21.9
	1.0-0	5.33 0.84 3.89 3.89	5.84 6.13 13.35 11.28	4.18 6.14 4.48 4.28	4.43 6.49 5.18 6.58	3.01 5.64 3.84 4.11	2.60 3.14 5.29 5.76	2.18 4.13 3.64 5.06	2.96 5.37 4.70 5.03
		3.49	9.15	4.77	5.67	4.15	4.20	3.75	4.52
		変動係数(%)	54.3	41.0	19.3	18.4	26.4	37.1	23.7
80	0.5-	5.67 8.17 6.00 11.57	7.39 12.32 12.32	5.39 10.50 9.22	15.23 23.67 21.17 13.41	10.50 13.49 10.76 13.64	12.43 13.85 15.69	14.0 6.45	10.54 16.21 11.31 15.71
		7.15	10.7	8.37	18.4	12.1	14.0	4.78	13.4
		変動係数(%)	34.6	26.7	25.9	26.4	14.3	11.7	21.8
	1.0-0	6.50 6.02 3.52 4.08	7.39 7.23 7.88 7.71	6.78 9.52 4.82 9.37	12.19 19.15 16.01 14.81	10.47 14.48 10.84 10.84	6.51 5.92 3.63	10.64 5.27 6.11 6.02	8.02 9.61 10.95 11.70
		5.03	7.55	7.62	15.5	11.7	5.35	7.01	10.1
		変動係数(%)	28.9	39.1	29.6	18.6	16.3	23.2	16.1

表-4 各種混和剤を使用したコンクリートの配合

混和剤 の種類	単位セメ ント量 (kg/m ³)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (k g/m ³)					混 和 剤			スランプ ^o (cm)	空気量 (%)	
				W	C	S	G		A E 剤	A E 減水剤	高性能 A E 減水剤			
							20-15mm	15-5mm						
ブレン	2 2 0	78.2	53.9	172	220	1022	182	726	――	――	――	11.9	2.5	
	2 6 0	66.2	51.5	172	260	964	188	752	――	――	――	12.7	2.6	
	3 0 0	57.3	49.7	172	300	914	192	766	――	――	――	13.1	2.8	
	3 4 0	50.6	48.4	172	340	874	193	771	――	――	――	11.6	2.6	
A E 剤	2 2 0	73.6	51.4	162	220	939	276	643	1A	――	――	――	10.5	6.5
	2 6 0	62.3	49.2	162	260	883	283	661		――	――	――	13.5	6.0
	3 0 0	55.0	47.7	165	300	837	285	665		――	――	――	13.5	6.0
	3 4 0	47.6	46.2	162	340	799	289	674		――	――	――	11.9	5.3
A E 減水剤	2 2 0	68.2	49.3	150	220	916	293	682	――	C× 0.25 %	――	――	10.0	6.5
	2 6 0	58.8	47.5	153	260	864	296	692	――		――	――	13.5	6.0
	3 0 0	50.0	45.7	150	300	820	302	706	――		――	――	11.7	6.2
	3 4 0	44.1	44.5	150	340	784	303	708	――		――	――	13.9	6.4
高性能 A E 減 水剤	2 2 0	62.7	48.2	138	220	911	304	709	――	――	C× 1.1%	――	13.0	6.0
	2 6 0	53.1	46.3	138	260	860	310	722	――	――		――	13.3	6.0
	3 0 0	46.0	44.9	138	300	819	312	728	――	――		――	12.7	6.4
	3 4 0	40.6	43.8	138	340	785	313	729	――	――		――	13.1	5.8

3-2 試験方法

供試体の養生条件を標準水中養生28日とし、標準養生後の供試体の乾燥は20℃、相対湿度65%の恒温恒湿室内で7日間行なった。透水試験は水压を0.5kgf/cm²、試験時間48時間として行った。

3-3 試験結果

図-3に水セメント比と浸透係数の関係を示す。図-3において各コンクリートの浸透係数は10⁻⁹(cm/s)であり混和剤の種類による浸透係数への影響は特に認められず混和剤の減水効果に伴う水セメント比の変化によって浸透係数が影響されることが認められた。また、セメント比55%以上で浸透係数は急激に大となっており従来の他の透水試験方法による結果と良く一致した。

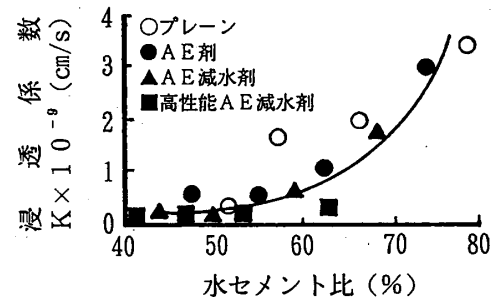


図-3 各種化学混和剤を用いたコンクリートのダルシー浸透流による透水試験結果

4. まとめ

本研究によって得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 水压が1kgf/cm²程度以下のコンクリート中の水の流れはダルシー浸透流の先端に毛管浸透流が存在する流れとなり高水压下の拡散浸透流を伴う流れの機構と相違することを検証した。
- 2) ダルシー浸透流における水密性の尺度となる浸透係数を誘導し、誘導式の妥当性を実験によって検証した結果、式と実験値がほぼ一致し、浸透係数の変動係数も既往の透水試験の試験値と同程度であり本試験法が有用であることが明らかとなった。
- 3) 本試験法によって各種化学混和剤を用いたコンクリートの水密性を検討した結果、混和剤の減水効果に伴う水セメント比による影響が大きいことが確認された。

謝 辞：本研究は東京都立大学名誉教授 村田二郎先生のご指導により行ったもので、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 コンクリートイブナリ-第7号、1963