

## ポラスコンクリートを通過する流れの流速と動水勾配の関係

浅野 勇\*・林田洋一\*・増川 晋\*・田頭秀和\*

## 目 次

I 緒 言	227	III 動水勾配と流速の関係式	232
II ポーラスコンクリートを通過する流れの水頭損失特性	227	1 骨材種別ごとの水頭損失推定式	232
1 実験方法	227	2 水頭損失推定式の予測精度の検証	235
2 実験結果	229	IV 結 言	239
3 考察	231	参考文献	240
		Summary	241

## I 緒 言

材料内部を水や空気が通過することがポラスコンクリート(POC)の大きな特徴である。POCを水質浄化, 沈砂池, ダムの法面対策などに活用していくためには, POC内部を通過する流れの特性を把握する必要がある。特にPOCを通過する水の流れを対象とする場合は, 流れの動水勾配と流速の関係を明らかにすることが重要である。

(社)日本コンクリート工学協会(2003)による「ポラスコンクリートの透水試験方法(案)」によれば, POCの透水特性は定水位透水試験に基づく透水係数により評価される。しかし, この試験における動水勾配の条件は0.3以下と定められているのみであり, 明確な設定値は示されていない。すなわち, 試験から求められた透水係数がどのような動水勾配で行われた試験値であるか不明である。また, 動水勾配が0.3以上の流れについては一般に検討されていない。つまり, POCの透水試験方法は広範囲な動水勾配に対応したものではなく, 動水勾配が0.3以上の領域におけるPOCを通過する流れに関する情報は極めて少ないのが現状である。

一方, POCに似通った空隙構造を有する礫あるいは碎石においては広範囲な動水勾配における透水試験が実施されており, 内部を通過する流れの動水勾配と流速の関係は非線形になることが報告されている(松尾ら, 1970; 森井ら, 2000)。空隙構造が良く似た材料を通過する流れが相似の関係になるとすれば, POCを通過する流れについても動水勾配と流速の関係は非線形になる

と考えられる。実際, 動水勾配が0.08～0.75の範囲におけるPOCの透水試験からPOCを通過する流れの動水勾配と流速の関係は非線形になることが報告されている(社)日本コンクリート工学協会, 1995)。

本研究では, 骨材種別及び空隙率が異なるPOC及び骨材単体の供試体を作成し, 供試体ごとに動水勾配を変化させた定水位透水試験を行い, 供試体を通過する流れの動水勾配と流速の関係を明らかにする。さらに, 化学工学の分野で粒状体を通過する流れの圧力低下推定式として用いられるErgunの圧力降下式(三輪, 1981)をPOCの動水勾配-流速関係に導入し, POCの内部を通過する流れの動水勾配-流速関係をPOCの空隙率及び骨材種別から推定するモデル式の作成を試みる。なお, 本研究におけるPOC供試体を通過する流れは, POCの内部が完全に水に飽和されている状態(飽和状態)を対象とする。

## II ポーラスコンクリートを通過する流れの水頭損失特性

POC供試体及び骨材単体を対象に定水位室内透水試験を行い, 供試体の動水勾配と流速の関係を求めた。

## 1 実験方法

## a 実験の概要

Table 1に実験ケースを示す。使用骨材は5号, 6号, 7号, 再生コンクリート骨材(以下RC骨材と呼ぶ)及び3号珪砂の5種類である。骨材の平均粒径 $D$ ((最小寸法+最大寸法)/2, 以下単に骨材粒径と呼ぶ)の範囲は0.19～1.65cmである。空隙率を10～30%の間で3～4段階変化させたPOC供試体を作成し, 供試体1本あたり動水勾配を7～8段階変化させて定水位室内透水試験を行い, 内部を通過する流れの動水勾配と流速の

\* 施設資源部構造研究室

平成21年11月5日受理

キーワード: ポーラスコンクリート, 非線形流れ, 水頭損失, 透水試験, 動水勾配, 流速, Ergunの式

**Table 1** 実験ケース  
Experimental conditions.

実験ケース	骨材種別	供試体	粒径 [mm]	目標空隙率 [%]	目標水位差 [mm]	目標動水勾配
C5-0	5号	骨材単体	13-20	-	30 ~ 250	0.15 ~ 1.25
C5-1		POC		10		
C5-2				20		
C5-3				30		
C6-0	6号	骨材単体	5-13	-		
C6-1		POC		10		
C6-2				20		
C6-3				30		
C7-0	7号	骨材単体	2.5-5	-		
C7-1		POC		10		
C7-2				20		
C7-3				30		
RC-0	RC	骨材単体	5-15	-		
RC-1		POC		10		
RC-2				20		
RC-3				25		
RC-4				30		
S3-0	3号珪砂	骨材単体	2.38	-		
S3-1		POC		10		
S3-2				20		
S3-3				30		

関係を求める。なお、骨材単体も同様の試験を実施する。

#### b 使用材料

骨材の物理的性質を **Table 2** に示す。5号、6号、7号砕石は茨城県新治村産の硬質砂岩を母材とする。RC骨材はコンクリート製の電柱を母材とする。3号珪砂は福島県相馬産である。セメントは高炉B種（密度  $3.04 \text{ g/cm}^3$ ）を、混和剤はポリカルボン酸エーテル系高性能AE減水剤を用いた。

#### c 配合条件

骨材の実積率から骨材中の空隙量を求め、空隙量に見合ったペースト容積を計算し、POCの配合を行った。骨材の実積率を修正する補正係数は1.0とした（日本コンクリート工学協会，2003）。配合表を **Table 3** に示す。

#### d 供試体の作成及び空隙率の測定

容量55リットルのパン型強制練混ぜミキサを使用し、1バッチ当たり40リットルで練混ぜを行った。練混ぜは、（粗骨材 + 1/4の水）→（30秒練混ぜ）→（セメント投入）→（30秒練混ぜ）→（残りの3/4の水投入）→（120秒練混ぜ）→（排出），の順に行った。塩ビパイプ（内径108mm）内に試料を詰め、締め、高さ約20cmの円柱供試体を作成した。締め方法は、5号、6号及びRC供試体では3層に詰め、各層を突き棒で25回突き固めた（**Fig.1**の1）。ただし、目標空隙率30%の6号及びRC供試体では、円形圧縮板付きのこて型パイプ

**Table 2** 骨材物性  
Physical properties of the aggregates.

骨材種別	粒径 [mm]	表乾密度 [ $\text{g/cm}^3$ ]	絶乾密度 [ $\text{g/cm}^3$ ]	吸収率 [%]	単位容積質量 [ $\text{kg/m}^3$ ]	実績率 [%]
5号	13-20	2.67	2.65	0.71	1,632	61.0
6号	5-13	2.66	2.64	0.73	1,697	63.7
7号	2.5-5	2.66	2.64	0.75	1,657	62.2
RC	5-15	2.47	2.33	5.88	1,578	64.1
珪砂3号	2.38	2.62	2.60	1.30	1,621	63.1

注：単位容積質量、実績率は表乾での測定値。単位容積質量は珪砂のみ突き棒での締め。その他はこて型パイプを使用。

**Table 3** 配合表  
Mixture proportions of POC.

実験ケース	骨材	目標空隙率 (%)	W/C (%)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )			混和剤 ( $\text{kg/m}^3$ )
				W	C	G	
C5-1	5号	10	28	133	477	1,632	1.4
C5-2		20		87	312	1,632	0.9
C5-3		30		41	148	1,632	1.5
C6-1	6号	10		120	427	1,697	1.3
C6-2		20		74	263	1,697	0.8
C6-3		30		28	99	1,697	0.5
C7-1	7号	10		126	452	1,657	1.4
C7-2		20		80	288	1,657	0.9
C7-3		30		35	123	1,657	1.2
RC-1	RC	10		120	427	1,578	1.3
RC-2		20	74	263	1,578	0.8	
RC-3		25	51	181	1,578	0.5	
RC-4		30	28	99	1,578	1.0	
S3-1	珪砂3号	10	124	442	1,621	1.3	
S3-2		20	78	278	1,621	0.8	
S3-3		30	32	113	1,621	1.1	

レータ（振動数150～180Hz）により2層（1層締め時間8秒）で締め付けた（**Fig.1**の2）。7号珪砂供試体では、圧縮板を自由落下させ締め付けた（**Fig.1**の3）。供試体の養生は、材齢1日までは  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  の恒温室にて湿潤養生、材齢2日以降は  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  の水中養生とした。材齢5、6日でポーラスコンクリートの物性試験（案）（日本コンクリート工学協会，2003）に従い供試体の空隙率を測定した。その後再び水中養生し、材齢26～28日で室内透水試験を行った。供試体の外観を **Fig.2** に示す。なお、空隙率の計算に用いた供試体の気中質量は、供試体を湿潤状態で放置し、供試体の質量変化が落ち着いた放置7日後の値を用いた。供試体質量の時間変化を **Fig.3** に示す。

#### e 室内透水試験

室内透水試験はポーラスコンクリートの透水試験方法（案）（日本コンクリート工学協会，2003）に準拠して行った。試験装置の外観を **Fig.4** に概要を **Fig.5** に示す。試験ではあらかじめPOCを打設した塩ビパイプを試験装置の透水円筒に接続し、供試体の上下端に30～250mm

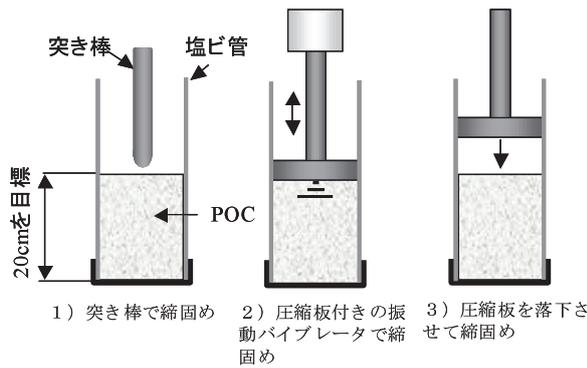


Fig.1 供試体の締め方  
Method of compaction of the specimen.

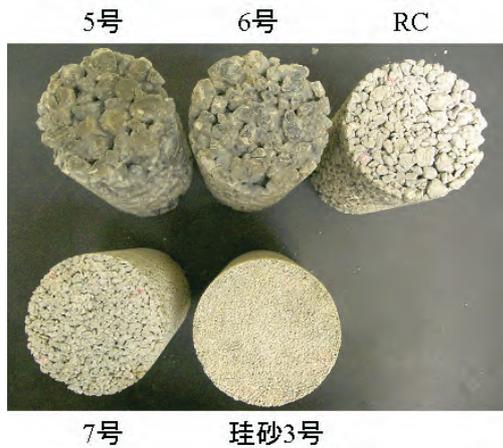


Fig.2 供試体の外観  
Outward appearance of the specimens.

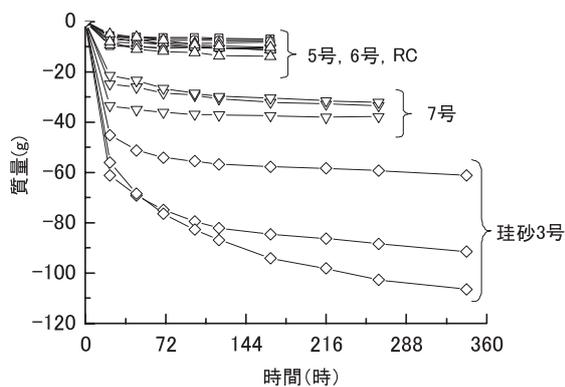


Fig.3 供試体の質量変化  
Cumulative mass of the specimens under moist curing.

(動水勾配に換算すると 0.15 ~ 1.25) の水位差を発生させた。この水位の範囲内で動水勾配を 0.1 ~ 0.2 刻みで 7 ~ 8 段階変化させ通水流量を測定した。通水流量は、容器で集水し、その質量から計算した。通水流量を集水時間と供試体の断面積で割り供試体を通過する流れのみかけの平均流速  $v$  を求めた。水位差は、ピエゾメータにより上部透水円筒と越流水槽の水位を mm 単位で読み取った。水位差及び流量は 3 回測定し、その平均値から



Fig.4 透水試験装置の外観  
Outward appearance of a permeability test apparatus.

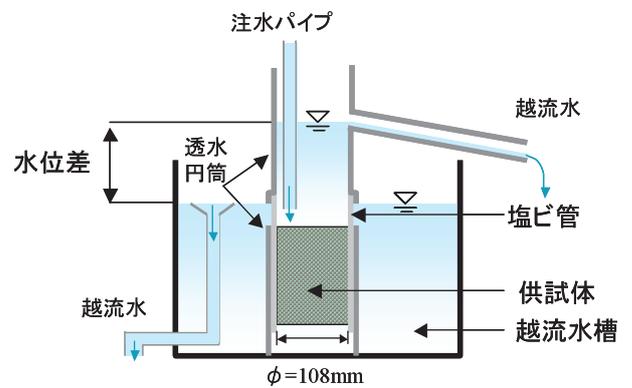


Fig.5 透水試験装置の概要  
Outline of the permeability test apparatus.

動水勾配及び流速を計算した。供試体の飽和度を高めるため、試験前に水中で供試体を通水し内部の空気を抜いた。骨材粒径が小さな 7 号及び珪砂 3 号供試体では時に念入りにこの作業を行った。試験時の水温範囲は 22 ~ 25°C であった。

骨材単体も同様の試験を行った。供試体は、底に金網を付けた塩ビ管の中に骨材を 1 層約 5cm の厚さで、4 層詰めし、高さ約 20cm の円柱供試体を作成した。各層は突き棒で 15 回突き固めた。POC 供試体と同様に供試体を水中に通水し、木づちを用いて塩ビ管の外側をたたき、内部の空気を抜き飽和度を高める準備を行った。

## 2 実験結果

### a 供試体の実測空隙率

Table 4 に供試体の空隙率の測定結果を示す。3 号珪砂 POC を除けば空隙率は目標値より 10% 程度大きくなった。骨材粒径が大きく目標空隙率が小さい供試体ほど目標値との差が大きくなる傾向が見られた。これは、骨材粒径が大きく密に詰まった供試体では突き棒による締め固めエネルギーでは締め固めが十分に行えなかったためと考えられる。なお、以下の説明では、供試体条件を区別するために骨材種別と実測空隙率を組み合わせ

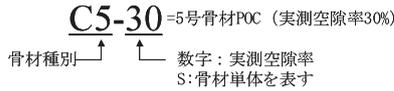


Fig.6 供試体記号  
Symbol of the specimens

Table 4 供試体の空隙率  
Measurement of void content in the specimens.

供試体記号	骨材種別	供試体	目標空隙率 [%]	実測空隙率 [%]	実験ケース
C5-S	5号	骨材単体	-	43.3	C5-0
C5-22		POC	10	21.9	C5-1
C5-32			20	31.5	C5-2
C5-39			30	39.1	C5-3
C6-S	6号	骨材単体	-	42.2	C6-0
C6-21		POC	10	21.4	C6-1
C6-30			20	29.9	C6-2
C6-31			30	30.6	C6-3
C7-S	7号	骨材単体	-	42.5	C7-0
C7-19		POC	10	19.1	C7-1
C7-26			20	25.7	C7-2
C7-32			30	31.5	C7-3
RC-S	RC	骨材単体	-	39.9	RC-0
RC-20		POC	10	19.8	RC-1
RC-27			20	26.7	RC-2
RC-30			25	29.9	RC-3
RC-33			30	32.7	RC-4
S3-S	3号珪砂	骨材単体	-	35.2	S3-0
S3-10		POC	10	9.5	S3-1
S3-13			20	13.1	S3-2
S3-26			30	26.2	S3-3

Fig.6 に示す供試体記号を用いる。

b 透水試験結果

礫を通過する流れの動水勾配  $i$  と流速  $v$  の関係は  $i$  を  $v$  の2次関数で表す場合と  $v$  の累乗式で表す場合がある(森井ら, 2000)。本研究では, 森井ら(2000)の研究に基づき POC を通過する流れの動水勾配  $i$  と流速  $v$  の関係が式(1)の2次関数で近似できると仮定する。

$$i = av + bv^2 \quad (1)$$

ここで,  $i$  は供試体上下端間の動水勾配,  $v$  は流速 [cm/s],  $a, b$  は実験より求まる係数である。式(1)の物理的な意味は,  $v$  に比例する項が層流に起因する水頭損失,  $v^2$  に比例する項が乱流に起因する水頭損失を意味する。室内透水試験から求めた動水勾配  $i$  と流速  $v$  の関係を骨材

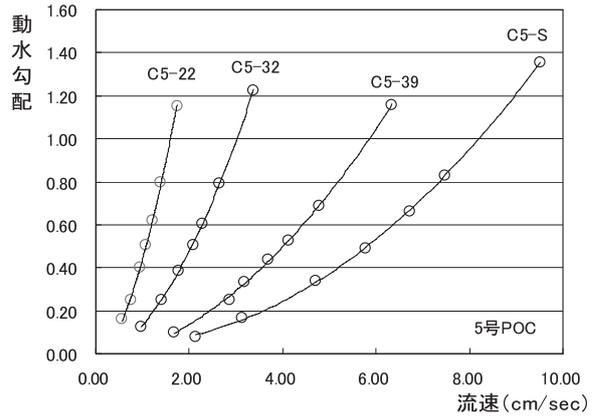


Fig.7(a)  $i - v$  の関係 (5号碎石)  
Relationship between the hydraulic gradient  $i$  and discharge velocity  $v$  (No.5 crushed stone).

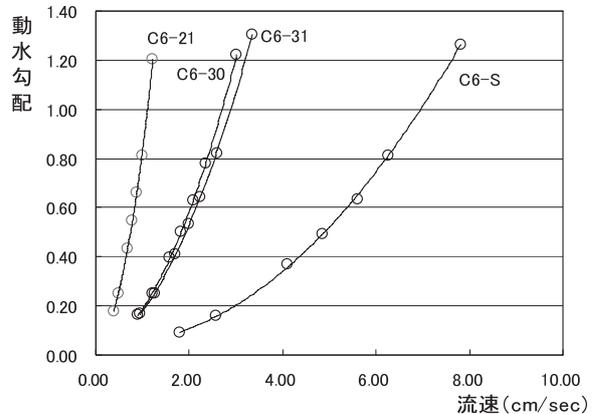


Fig.7(b)  $i - v$  の関係 (6号碎石)  
Relationship between the hydraulic gradient  $i$  and discharge velocity  $v$  (No.6 crushed stone).

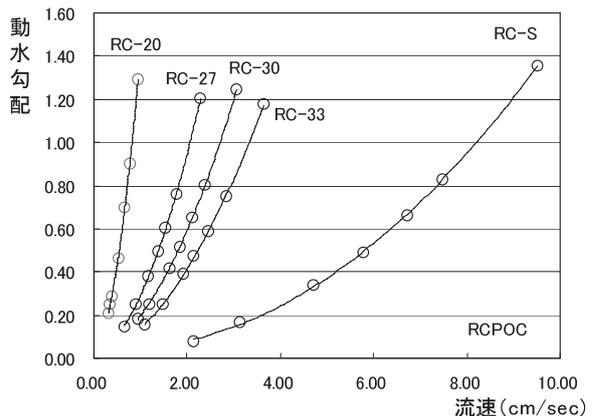
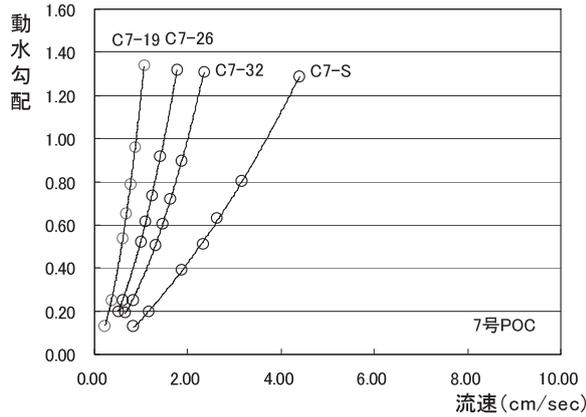
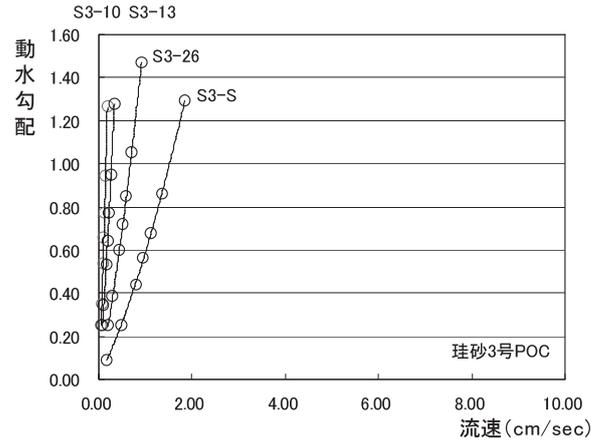


Fig.7(c)  $i - v$  の関係 (RC骨材)  
Relationship between the hydraulic gradient  $i$  and discharge velocity  $v$  (Used recycled aggregate).

種別ごとに Fig.7(a) ~ (e) に示す。図の○記号が実測値, 実線は実測値を式(1)によって回帰した2次曲線である。図から実測値と回帰曲線は良く一致することがわかる(決定係数  $R^2$  は全ての曲線で0.99以上)。よって, POC 供試体を通過する流れの動水勾配  $i$  と流速  $v$  の関係は式



**Fig.7(d)**  $i - v$  の関係 (7号碎石)  
Relationship between the hydraulic gradient  $i$  and discharge velocity  $v$  (No.7 crushed stone).



**Fig.7(e)**  $i - v$  の関係 (珪砂3号)  
Relationship between the hydraulic gradient  $i$  and discharge velocity  $v$  (No.3 silica sand).

**Table 5** 透水試験結果  
Results of the permeability test.

骨材種別	粒径 [mm]	平均粒径 [cm]	供試体	実測空隙率 [%]	動水勾配		流速 [cm/s]		限界レイノルズ数 Re	係数 $a$	係数 $b$
					最小	最大	最小	最大			
5号	13-20	1.65	骨材単体	43.3	0.08	1.36	2.13	9.52	1750	0.002	0.015
			POC	21.9	0.16	1.15	0.56	1.74	320	0.142	0.534
				31.5	0.12	1.23	0.96	3.38	621	0.050	0.093
				39.1	0.10	1.16	1.68	6.35	1167	0.021	0.026
6号	5-13	0.90	骨材単体	42.2	0.09	1.27	1.79	7.81	783	0.008	0.020
			POC	21.4	0.18	1.20	0.38	1.22	122	0.202	0.638
				29.9	0.16	1.22	0.91	3.02	303	0.075	0.109
				30.6	0.17	1.30	0.96	3.35	336	0.085	0.091
7号	2.5-5	0.38	骨材単体	42.3	0.13	1.29	0.84	4.40	186	0.140	0.036
			POC	19.1	0.13	1.34	0.23	1.06	45	0.395	0.812
				25.7	0.20	1.32	0.50	1.76	75	0.251	0.282
				31.5	0.19	1.31	0.66	2.35	99	0.175	0.163
RC	5-15	1.00	骨材単体	39.9	0.10	1.32	1.61	7.09	790	0.022	0.023
			POC	19.8	0.21	1.29	0.31	0.94	105	0.335	1.091
				26.7	0.15	1.21	0.65	2.29	255	0.111	0.181
				29.9	0.18	1.25	0.94	3.06	341	0.093	0.102
32.7	0.16	1.18		1.10	3.64	405	0.067	0.070			
3号珪砂	1.4-2.3	0.19	骨材単体	35.2	0.09	1.29	0.17	1.84	39	0.460	0.132
			POC	9.5	0.15	1.27	0.0284	0.185	4	4.960	10.027
				13.1	0.17	1.28	0.056	0.329	7	2.818	3.216
				26.2	0.25	1.47	0.198	0.916	19	1.133	0.516

(1) の2次関数で近似できると考えられる。骨材の異なる供試体の試験結果を回帰し求めた係数  $a$ ,  $b$  を **Table 5** に示す。なお、表中の限界レイノルズ数  $R_e$  は以下の式(2)から計算した。

$$R_e = \frac{\rho_w D v}{\mu} \quad (2)$$

ここで、 $\rho_w$  : 水の密度 [g/cm<sup>3</sup>],  $D$  : 骨材の平均粒径

[cm],  $v$  : 供試体内平均流速 [cm/s],  $\mu$  : 水の粘性係数 [g/cm<sup>3</sup>·s], 水の物性は 25℃ における  $\rho_w = 0.997$  [g/cm<sup>3</sup>],  $\mu = 0.00895$  [g/cm<sup>3</sup>·s] を用いた。

### 3 考察

#### a 流れの状態に関する考察

POC 及び骨材単体を通過する流れの限界レイノルズ数  $R_e$  の範囲を骨材種別ごとに **Table 6** に示す。実験にお

**Table 6** レイノルズ数の範囲  
Reynolds number range with the permeability tests.

骨材種別	限界レイノルズ数 Re	
	最小	最大
5号	320	1750
6号	122	783
7号	45	186
RC骨材	105	790
3号珪砂	4	39

ける限界レイノルズ数  $R_e$  は 4 ~ 1750 の範囲にあり 1 より大きな値を取る。よって、供試体を通過する流れは概ね乱流状態であったと考えられる。

### b 係数 $a$ , $b$ と空隙構造の関係

室内透水試験の結果から POC 供試体を通過する流れの動水勾配  $i$  と流速  $v$  の関係は式 (1) で表されることがわかった。ここでは式 (1) の係数  $a$ ,  $b$  と供試体の空隙構造の関係について考察する。**Table 5** から、使用骨材が同一な供試体では、空隙率が小さくなるほど係数  $a$ ,  $b$  の値が大きくなるのが分かる。この傾向は、**Fig.7(a) ~ (e)** で供試体の空隙率が小さくなるほど 2 次関数のグラフの開きが小さくなることから明らかである。また、**Fig.7(c) ~ (e)** で空隙率がほぼ等しい 3 本の供試体 (RC-27, C7-26, S3-26) に対する動水勾配のグラフを見ると、供試体の骨材粒径が小さくなるほどグラフの開きは小さくなる。すなわち、空隙率がほぼ等しい供試体では、骨材粒径が小さいほど係数  $a$ ,  $b$  の値は増加する。つまり、骨材粒径が小さく、空隙率が小さな POC ほど係数  $a$ ,  $b$  の値は大きくなると推定できる。この理由としては、供試体内部の空隙が細かく複雑になるほど、内部を通過する流れは狭窄した細孔中を長距離移動する必要があり、そのため流れの圧力損失は増大し、結果的に圧力損失を表す係数  $a$ ,  $b$  の値も大きくなるためと推定できる。

## III 動水勾配と流速の関係式

POC を通過する流れの動水勾配と流速の関係を表す式 (1) を再掲すれば以下のとおりである。

$$i = av + bv^2 \quad (1)$$

式 (1) の係数  $a$ ,  $b$  を骨材粒径や供試体の空隙率のみで表すことができれば、透水試験を実施せずに POC の動水勾配と流速の関係を求めることができる。これは、POC を用いた施設、構造物を設計するには大きな利点となる。そこで、化学工学の分野で圧力損失の推定式として用いられている Ergun の式に基づき、供試体の骨材粒径及び空隙率から POC の動水勾配と流速の関係を求める推定式の作成を試みる。

## 1 骨材種別ごとの水頭損失推定式

### a Ergun 式の適用性の検討

化学工学の分野では粒状体を充填した充填層に流体 (気体, 液体) を通過させ物質の分解や触媒反応を促進させる方法が各種の反応装置に用いられている。充填層に流入する流れは粒状体から抵抗を受け圧力低下を起こす。この圧力低下を予測する式に Ergun の式がある。Ergun の式は化学工学分野以外でも圧力低下の予測式として広く用いられている。たとえば、穀物を通風乾燥させる穀物充填層の通風抵抗の推定に適用され良好な結果を得ている (小出ら, 1996; 井上ら, 2003)。ここでは、粒状体の空隙構造と類似する POC に Ergun の式を適用し、POC の水頭損失の推定を試みる。

Ergun の式は材料の空隙率  $\varepsilon$  を用いて式 (3) のように表される (三輪, 1981)。

$$i = \alpha\mu \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} v + \beta\rho \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} v^2 \quad (3)$$

ここで、 $\varepsilon$ : 材料の空隙率,  $\mu$ : 流体の粘性係数 [ $\text{g}/\text{cm}\cdot\text{s}$ ],  $\rho$ : 流体の密度 [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ],  $v$ : 流速 [ $\text{cm}/\text{s}$ ] (単位時間に供試体を通過する流量を流に直角な粒状体層の面積で割ったいわゆる平均速度),  $\alpha, \beta$ : 空隙構造 (比表面積, 形状, 複雑さ) に依存する係数, である。式 (1) と式 (3) の係数を比較すると、式 (1) の係数  $a$  は式 (4) に示す空隙率関数  $f(\varepsilon)$  に、係数  $b$  は式 (5) に示す空隙率関数  $g(\varepsilon)$  に影響を受けると考えられる。そこで係数  $a, b$  をそれぞれ  $f(\varepsilon), g(\varepsilon)$  の関数と仮定し、 $a, b$  と  $f(\varepsilon), g(\varepsilon)$  の関係を求めることにする。モデル化では、水温  $25^\circ\text{C}$  と仮定し、 $\rho = 0.997$ ,  $\mu = 0.00895$  を用いた。

$$a = F(f(\varepsilon)), \quad f(\varepsilon) = \mu \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (4)$$

$$b = G(g(\varepsilon)), \quad g(\varepsilon) = \rho \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (5)$$

### (1) $a \sim f(\varepsilon)$ の関係

**Table 5** に示した 16 組の POC 供試体の動水勾配と流速の関係から求めた係数  $a$  と空隙率関数  $f(\varepsilon)$  の関係を **Fig.8** 及び **Fig.9** に示す。図の直線は係数  $a$  の空隙率関数  $f(\varepsilon)$  に対する回帰直線である。**Fig.8** は 16 組の全データをプロットしたグラフ、**Fig.9** は **Fig.8** の原点付近にかたまっているデータを拡大したグラフである。**Fig.8** 及び **Fig.9** から骨材の種類が同一であれば、係数  $a$  と空隙率関数  $f(\varepsilon)$  の間には直線関係が成り立つことが分かる (全ての回帰直線で決定係数  $R^2$  は 0.97 以上)。そこで、同種の骨材を用いた供試体を通過する流れの  $a$  と  $f(\varepsilon)$  の間には直線関係が成り立つと仮定し、その関係を式 (6) で表すことにした。回帰分析を行い求めた式 (6) の係数  $k_1, k_2$  を **Table 7** に示す。

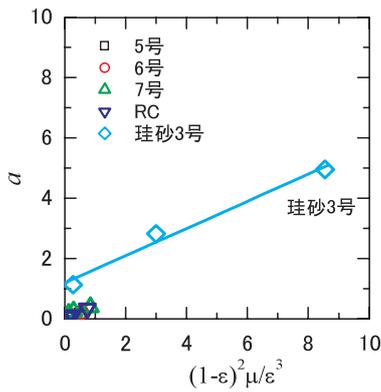


Fig.8 a ~ f(ε) の関係 (全データ)  
Relationship between a and f(ε) (full data).

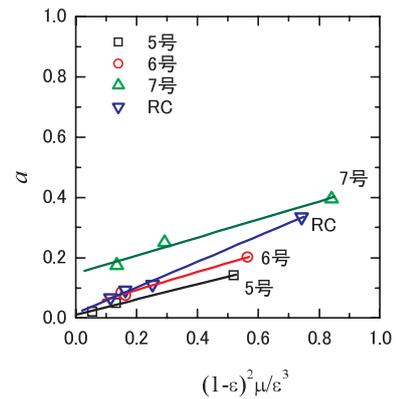


Fig.9 a ~ f(ε) の関係 (3号珪砂を除く)  
Relationship between a and f(ε) (removing No.3 silica sand data).

Table 7 骨材別の k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub> の値  
Estimated values for k<sub>1</sub> and k<sub>2</sub> from laboratory test.

骨材種別	粒径 [mm]	平均粒径 [cm]	空隙率範囲 [%]	流速範囲 [cm/s]	係数 k <sub>1</sub>	係数 k <sub>2</sub>
5号	13-20	1.65	22 ~ 39	0.56 ~ 6.35	0.011	0.253
6号	5-13	0.90	21 ~ 30	0.38 ~ 3.35	0.034	0.297
7号	2.5-5	0.38	19 ~ 32	0.23 ~ 2.35	0.147	0.299
RC	5-15	1.00	20 ~ 33	0.31 ~ 3.64	0.016	0.428
3号珪砂	1.4-2.3	0.19	10 ~ 26	0.028 ~ 0.916	1.191	0.451

注：式 (6) に用いる骨材種別ごとの係数を示す。空隙率及び流速範囲は骨材種別ごとの係数に対する適用範囲を示す。

$$a = k_1 + k_2 \mu \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (6)$$

係数 k<sub>1</sub> は a ~ f(ε) 直線の切片値を表す。切片においては ε=1 が成り立つ。つまり、切片では供試体の空隙率は 100% となり、k<sub>1</sub> は供試体が存在しない状態での透水円筒を通過する流れの層流に起因する水頭損失を意味する。供試体が存在しないので k<sub>1</sub> の値は理論的には 0 になるべきだが、透水円筒内壁の摩擦などが存在するため k<sub>1</sub> の値は 0 にならない。Fig.8 及び Fig.9 の回帰直線のグラフを外挿し、切片値 (= k<sub>1</sub>) を推測すると、5号、6号及び RC の切片値は 0 に近い値を取ると推定できる。また、切片値は (5号, 6号及び RC) < 7号 < 珪砂 3号 の順に大きく傾向がある。つまり、k<sub>1</sub> は供試体の骨材粒径が小さくなるほど大きくなる。この原因は、Fig.8 及び Fig.9 から推定した k<sub>1</sub> の値が外挿値であり、元データの影響を強く受けているためと考えられる。すなわち、空隙率が等しい (f(ε) が等しい) 供試体を比較した場合、骨材粒径が小さいほど流れの損失水頭は大きくなり、係数 a の値も大きくなる。このため、骨材粒径が小さくなるほど f(ε) = 0 の近傍でも係数 a の値は大きくなり、外挿値である k<sub>1</sub> も骨材粒径が小さくなるほどその値が大きくなると推定できる。

係数 k<sub>2</sub> は式 (6) の直線の傾きを表す。空隙率が等しい供試体では、骨材粒径が小さいほど空隙構造は複雑と

なり、流れの損失水頭は大きくなると仮定すれば、空隙率が等しい供試体、すなわち空隙率関数 f(ε) が等しい場合、供試体の骨材粒径が小さくなるほど圧力損失が大きくなり係数 a の値も大きくなる、つまり k<sub>2</sub> の値も大きくなり直線の傾きも増加すると推測できる。たしかに、Table 7 の平均粒径と k<sub>2</sub> の値の関係からは平均粒径が小さくなるほど k<sub>2</sub> の値は増加する傾向が、RC 骨材を除いて観察される。このような考えに基づく係数 k<sub>2</sub> に骨材粒径の影響を取り入れたモデル化も有効と思われるが、今回は k<sub>2</sub> が骨材種別ごとに Table 7 に示す固有の値を持つと考え a を推定した。なお、本研究の室内透水試験は空隙率が 20% 未満の供試体の試験データが少なく、空隙率が 20% 未満の領域における a と f(ε) の関数関係について十分には明らかではない。よって、空隙率が 20% 未満の領域については a と f(ε) の関係が直線関係であるかも含めてさらなる検討が必要である。

(2) b ~ g(ε) の関係

Fig.10 に Table 5 に示した b と空隙率関数 g(ε) の関係及び b の g(ε) に対する回帰直線及び回帰式を示す。

Fig.10 から、b と g(ε) の間には直線関係が存在すると推測できる。しかし、珪砂 3号の 2 組のデータ (S3-10, S3-13) は他の 14 組のデータから大きく外れており、全

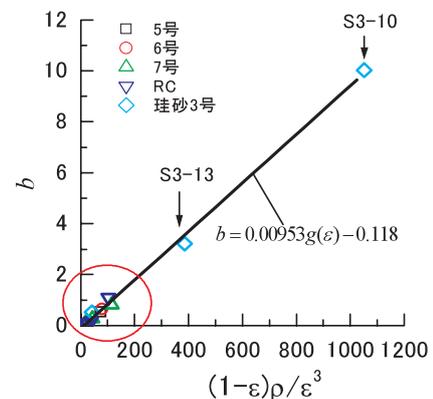


Fig.10 b ~ g(ε) の関係 (全データ)  
Relationship between b and g(ε) (full data).

データから求めた回帰直線が珪砂3号の2つのデータに強く影響を受けた関係式になる可能性がある。珪砂3号の供試体を通過する流れは限界レイノルズ数4~39の範囲にあり、乱流の影響が弱い領域の流れである。係数  $b$  は乱流の影響を表す係数であるので珪砂3号のデータに影響を受けた関係式は、乱流の影響を十分反映していない可能性が高い。事実、Fig.10 から求めた係数  $b$  を用いて予測した動水勾配と流速の関係は、5, 6, 7号供試体では実測の動水勾配と流速の関係と良い一致が見られなかった。

そこで、本研究では、 $b$  と  $g(\epsilon)$  の関係が供試体の空隙構造により変化すると仮定し、空隙構造で分類した  $b$  と  $g(\epsilon)$  の関係式を求めることにする。すなわち、Fig.10 に示したデータを供試体の空隙構造に応じて2つのグループに分け、グループごとに  $b$  と  $g(\epsilon)$  の関係を求めることにする。この考えの背景には、供試体の空隙構造と内部を通過する流れの状態が互いに関係し、内部空隙の状態が変化する境界と内部を通過する流れの状態も変化する境界が一致するという仮定が存在する。

供試体の空隙構造に基づく流れの状態のグループ分けを行うためには空隙構造が変化する境界を求める必要がある。大友ら(2006)は微小点X線を用いたPOC供試体の空隙構造の観察から最大骨材粒径 ( $G_{max}$ ) が10mmと15mmの供試体の間でPOCの空隙構造が大きく変化することを明らかにした。この結果は、POCの空隙構造が骨材粒径によって変化し、骨材粒径を指標として空隙構造の境界を決定できる可能性を示す。大友の試験における空隙構造の境界は、本研究では6号供試体と7号供試体の間に存在する。さらに、松川ら(1996)はPOCの横断面の観察から同じく6号供試体と7号供試体の間に空隙構造の境界があることを報告している。以上の研究結果に基づき、本研究では、POC供試体の空隙構造の境界が6号供試体と7号供試体の間に存在すると仮定する。また、骨材粒径の算術平均を空隙構造の境界を表す指標として用い、6号及び7号骨材の骨材粒径の算術平均  $(0.90+0.38)/2 \approx 0.6\text{cm}$  を空隙構造の境界値として仮定する。

以上の考察に基づき、Table 5 の16組の供試体データを大空隙グループ(以下LG)と小空隙グループ(以下SG)の2組に分類する。LGは5号, 6号, RC骨材を主体とする7本の供試体グループ(C5-32, C5-39, C6-30, C6-31, RC-27, RC-30, RC-33)である。骨材粒径  $D$  は0.9~1.65cmの範囲にある。SGは7号及び珪砂3号の6供試体に空隙率が20%程度の3供試体(C5-21, C6-21, RC-20)を加えた合計9本の供試体グループ(C5-21, C6-21, RC-20, C7-19, C7-26, C7-32, S3-10, S3-13, S3-26)である。骨材粒径  $D$  は0.19~0.38cmの範囲にある。3供試体を組み入れたのは空隙率が小さい供試体では乱流の影響が小さいと考えたためである。LG及びSGの空隙構造の特徴は以下のとおりで

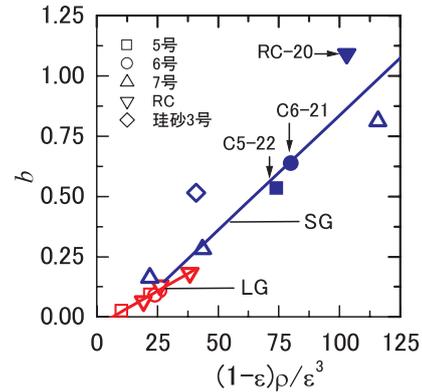


Fig.11  $b \sim g(\epsilon)$  の関係 (SG と LG でグループ分) Relationship between  $b$  and  $g(\epsilon)$  (classification by SG and LG).

Table 8 粒径別の  $l_1, l_2$  の値 Estimated values for  $l_1$  and  $l_2$  with SG and LG.

グループ	適用平均粒径範囲 [cm]	適用骨材種	空隙率範囲 [%]	係数 $l_1$	係数 $l_2$
SG	$D < 0.6$	5号 6号 RC	22 ~ 39 21 ~ 30 20 ~ 33	-0.117	0.00953
LG	$D \geq 0.6$	7号 珪砂3号	19 ~ 32 10 ~ 26	-0.0356	0.00568

注：式(7)に用いる  $l_1, l_2$  の値を示す。平均骨材粒径  $D$  によりSG, LGどちらかの値を判別する。骨材種は適用骨材の例、空隙率範囲は例示骨材に対する式の適用範囲を示す。

ある。LGは概ね最大限界レイノルズ数が300以上、 $g(\epsilon) < 30$ であり、供試体を通過する流れは乱流の影響を強く受けており、供試体の空隙構造は粗く疎である。SGは概ね最大限界レイノルズ数が300未満、 $g(\epsilon) > 30$ であり、流れは乱流の影響が弱く層流に近い状況であり、供試体の空隙構造は細かく密である。

Fig.11 にSGとLGの2つにグループ分けした  $b$  及び  $g(\epsilon)$  のデータとその回帰直線を示す。図ではLGに属するデータ及び回帰直線を赤色、SGに属するそれらを青色で区別する。また、SGに組み込んだ3供試体(C5-21, C6-21, RC-20)は内部を青色で塗りつぶした記号を用い区別する。Fig.11 からSG及びLGどちらのグループに関しても、 $b$  と  $g(\epsilon)$  の間には直線関係が成り立つことがわかる(回帰直線の決定係数は両直線とも0.96以上)。よって、 $b$  と  $g(\epsilon)$  の関係を式(7)で表すことにする。回帰分析から求めたSG及びLGに対する  $l_1, l_2$  の値をTable 8に示す。

$$b = l_1 + l_2 \rho \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} \tag{7}$$

(3) 平均骨材粒径  $D$  を考慮した  $a \sim f(\epsilon)$  の関係式式(6)は、使用骨材種ごとに係数  $k_1, k_2$  を設定する必要があること、5種類の骨材しか適用できないことなど適用に限界がある。そこで、適用範囲を拡大するため

に、式 (6) に骨材種別の影響を考慮するパラメータとして骨材平均粒径  $D$  を導入し、 $a$  を  $D$  と  $f(\epsilon)$  の関数として表す推定式の作成を試みる。

推定式の作成では  $a$  と  $f(\epsilon)$  の間に以下の2つの仮定が成り立つとする。

- ①骨材種に関係なく  $a$  と  $f(\epsilon)$  の間には直線関係が成り立つ。
- ②直線の切片、すなわち式 (6) の  $k_1$  の値は  $D$  の関数であるとする。すなわち  $k_2 = m_1(D)$ 。

以上の仮定に基づけば、 $a$  と  $f(\epsilon)$  の関係は式 (8) で表すことができる。式 (8) による  $a$  のモデル式の概要を Fig.12 に示す。

$$a = m_1(D) + m \mu \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \quad (8)$$

式 (8) は傾き  $m$  が一定で切片  $m_1$  が  $D$  の関数で表される直線である。直線の傾き  $m$  は  $a$  に対する  $f(\epsilon)$  の影響を代表する値である必要がある。そこで、 $m$  には Table 7 の5種類の骨材に対する回帰直線の傾き  $k_2$  の平均値 0.346 を用いることにした。つぎに、直線の切片  $m_1$  を  $D$  の関数として表すために Table 8 のデータを用いて  $m_1$  と  $D$  の関係を整理した。結果を Fig.13 に示す。 $m_1$  は

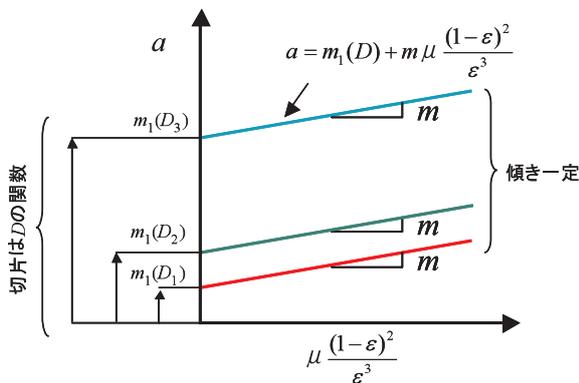


Fig.12 式 (8) による  $a$  のモデル式の概要  
Schematic diagram straight line of Eq. (8).

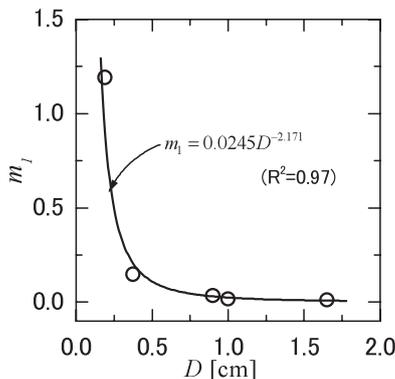


Fig.13  $D$  と  $m_1$  の関係  
Aggregate grain size ( $D$ ) versus intercept of formula (8)  $m_1$ .

$D$  の累乗式により式 (9) で近似可能と考えた。

$$m_1 = 0.0245D^{-2.171} \quad (9)$$

$m=0.346$  及び式 (9) を式 (8) に代入すると  $a$  を  $D$  と  $f(\epsilon)$  の関数として表した式 (10) が得られる。

$$a = 0.0245D^{-2.171} + 0.346\mu \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \quad (10)$$

式 (10) の適用範囲は  $D$  が 0.19 ~ 1.65cm, 供試体の空隙率については Table 7 に示すように概ね 20 ~ 35% の範囲である。

## 2 水頭損失推定式の予測精度の検証

### (1) 関数値による予測精度の検証

前節 a 項では、Ergun の式に基づき供試体の骨材粒径及び空隙率から式 (1) の係数  $a$ ,  $b$  を求める推定式を作成した。すなわち、係数  $a$  に対して式 (6), 式 (10) を、係数  $b$  に対して式 (7) を提案した。本節では、推定式から求めた  $a$ ,  $b$  を用いて計算した動水勾配グラフと実測値から求めた  $a$ ,  $b$  を用いて計算した動水勾配グラフを比較して、推定式の予測精度を検証する。予測精度の評価には、以下の式 (11) に示す相対誤差  $\epsilon_r$  を用いる。

$$\epsilon_r = \frac{\Delta i}{i_o} = \frac{i_o - i_p}{i_o} \quad (11)$$

ここで、 $\epsilon_r$ : 相対誤差、 $i_o$ : 透水試験から回帰して求めた係数  $a$ ,  $b$  を用いて式 (1) から求めた動水勾配値、 $i_p$ : 推定式から求めた係数  $a$ ,  $b$  を用いて式 (1) から求めた動水勾配値である。 $\epsilon_r$  の絶対値が大きいくほど実測値と推定値のずれは大きくなる。

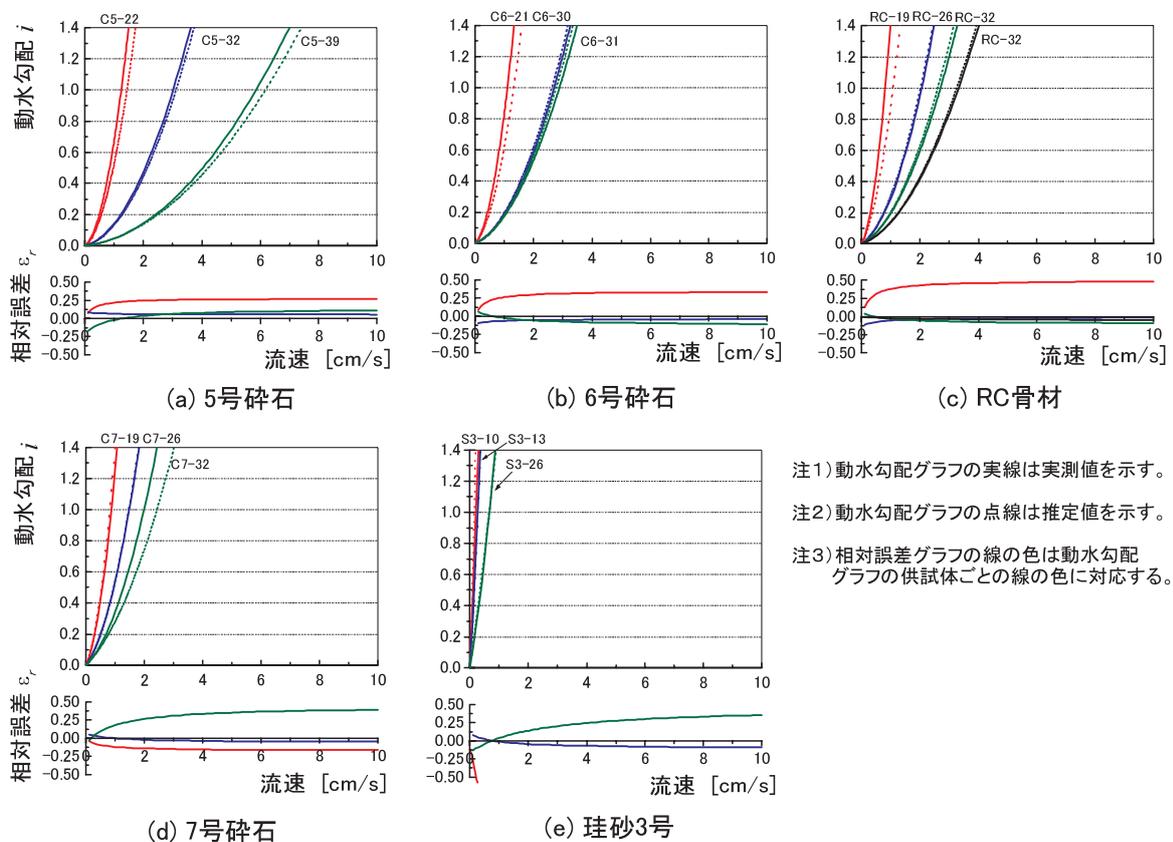
係数  $a$  は式 (6) と式 (10) から、係数  $b$  は式 (7) から計算した。Table 9 に係数  $a$ ,  $b$  の各式から求めた推定値を示す。

実測値から求めた係数  $a$ ,  $b$  と式 (6) 及び式 (10) から推定した係数  $a$ ,  $b$  を用いて動水勾配-流速のグラフを描き両者を比較した。式 (6) を用いた推定値と実測値の比較結果を Fig.14 に、式 (10) を用いた推定値との実測値の比較結果を Fig.15 に示す。Fig.14 及び Fig.15 では骨材種別ごとの比較結果を上下一組の5つのグラフで整理した。Fig.14 の (a) 5号碎石のグラフを例に説明すれば、上のグラフは空隙率が異なる供試体に対する動水勾配と流速の関係の比較を目的とし、実線が実測、点線が推定値から求めたグラフである。供試体の空隙率が大きくなる順に線の色を赤→青→緑に変化させている。下のグラフは上のグラフに示した推定値の実測値に対する相対誤差を示す。Fig.14 及び Fig.15 から推定式の予測精度について以下の傾向が認められる。

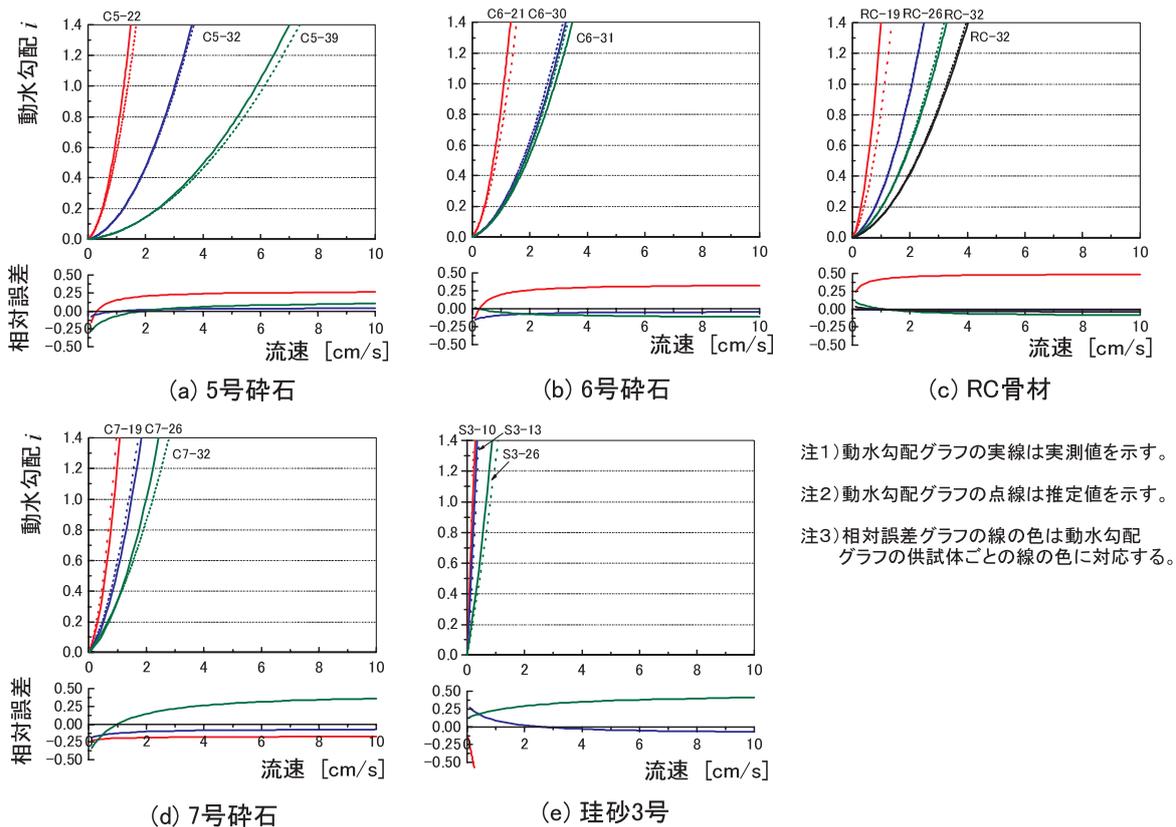
- ①動水勾配 0.17 ~ 1.26 の範囲において、式 (6) あるいは式 (10) から係数  $a$  を、式 (7) から係数  $b$  を求め計算した動水勾配推定値の相対誤差は実測値の

**Table 9** 透水試験及び推定式から求めた係数  $a$ ,  $b$   
 Values of  $a$  and  $b$  from permeability test and estimated values of  $a$  and  $b$  from Eq.(6), Eq.(7), Eq.(10).

供試体 記号	骨材 種別	粒径 [mm]	平均 粒径 [cm]	動水 勾配	実測 空隙率 [%]	最大限界 レイノルズ 数 Re	$(1-\varepsilon)^2$ $\mu/\varepsilon^3$	$(1-\varepsilon)$ $\rho/\varepsilon^3$	透水試験からの 回帰値		推定値		
									係数 $a$	係数 $b$	係数 $a$		係数 $b$ 式 (7)
											骨材種別	粒径考慮	
C5-22	5号	13-20	1.65	0.17 ~ 1.26	21.9	320	0.520	74.1	0.142	0.534	0.143	0.188	0.385
C5-32					31.5	621	0.134	21.9	0.050	0.093	0.045	0.055	0.089
C5-39					39.1	1167	0.056	10.2	0.021	0.026	0.025	0.027	0.022
C6-21	6号	5-13	0.90		21.4	122	0.564	80.0	0.202	0.638	0.201	0.226	0.419
C6-30					29.9	303	0.165	26.1	0.075	0.109	0.083	0.088	0.113
C6-31					30.6	336	0.150	24.1	0.085	0.091	0.078	0.083	0.102
C7-19	7号	2.2-5	0.38		19.1	45	0.841	115.8	0.395	0.812	0.399	0.491	0.986
C7-26					25.7	75	0.291	43.6	0.251	0.282	0.234	0.301	0.299
C7-32					31.5	99	0.134	21.9	0.175	0.163	0.188	0.246	0.091
RC-20	RC	5-15	1.00		19.8	105	0.742	103.0	0.335	1.091	0.335	0.281	0.549
RC-27					26.7	255	0.253	38.4	0.111	0.181	0.126	0.112	0.182
RC-30					29.9	341	0.165	26.1	0.093	0.102	0.088	0.081	0.113
RC-33					32.7	405	0.116	19.2	0.067	0.070	0.067	0.065	0.073
S3-10	3号 珪砂	1.4-2.3	0.19		9.5	4	8.550	1052.4	4.960	10.027	5.049	3.858	9.912
S3-13					13.1	7	3.006	385.4	2.818	3.216	2.548	1.940	3.556
S3-26				26.2	19	0.271	40.9	1.133	0.516	1.313	0.994	0.273	



**Fig.14** 式 (6), 式 (7) を用いた推定値と実測値の比較  
 Comparison of estimated hydraulic gradient values from Eq.(6), Eq.(7) and test values with relative error.



注1) 動水勾配グラフの実線は実測値を示す。  
 注2) 動水勾配グラフの点線は推定値を示す。  
 注3) 相対誤差グラフの線の色は動水勾配グラフの供試体ごとの線の色に対応する。

Fig.15 式 (10), 式 (7) を用いた推定値と実測値の比較と相対誤差  
 Comparison of estimated hydraulic gradient values from Eq.(10), Eq.(7) and test values with relative error.

± 50%以内に収まる。

- ② 5号, 6号, RC 及び珪砂3号供試体では供試体の空隙率が小さいほど, 7号供試体では空隙率が大きくなるほど, 推定値の実測値に対する相対誤差は増加する。つまり, 5号, 6号, RC 及び珪砂3号供試体では空隙率の下限に近づくほど, 7号供試体では空隙率の上限に近づくほど相対誤差は増加する。
- ③ 式 (6) と式 (10) の予測精度の差はほとんど無い。つまり, 骨材粒径と供試体空隙率のみから式 (10) を用いて係数  $a$  を推定することができる。

(2) 透水試験流速値に対するモデル式の精度検証

モデル式の予測精度を検証するために, 透水試験で得られた 112 点の実測流速と推定流速値の関係を整理する。透水試験の実測流速を  $y$ , Table 9 の式 (6) を用いて推定した流速を  $x_A$ , 式 (10) を用いて推定した流速を  $x_D$  とする。推定流速の計算では透水試験で設定した動水勾配  $i$  を入力値に用いる。  $y$  に対する  $x_A$ ,  $x_D$  の回帰直線を求めると, 式 (12), (13) が得られる。決定係数は共に 0.98 以上であった。

$$y = 0.968x_A + 0.0182 \tag{12}$$

$$y = 0.9846x_D + 0.0086 \tag{13}$$

$y$  と  $x_A$ ,  $y$  と  $x_D$  の散布図を Fig.16, Fig.17 に示す。 Fig.16 及び Fig.17 には式 (12) 及び式 (13) の回帰直線

を実線で表す。 Fig.16 及び Fig.17 から実測流速と推定流速は良く一致することがわかる。式 (12), 式 (13) から,  $x_A$  を 0.968 倍,  $x_D$  を 0.984 倍すれば流速推定値から実測流速のより良い予測値が得られることがわかる。このことは, 流速推定値  $x_A$  及び  $x_D$  が 1 ~ 3% 程度実測流速を過小推定する傾向があることを意味する。

流速推定値  $x_A$ ,  $x_D$  の予測精度を式 (12), (13) の残差から検討する。残差とは (実測値  $y_i$  - 推定値  $y_i'$ ) で表される量で推定値と実測値のずれを意味する。残差は推測流量から回帰直線で予測される  $y$  の値の回りに分布するが, この残差が  $y$  の値の回りに一定で分布すると仮定すれば (等分散性を仮定), 残差の標準偏差は式 (14) で表される条件付標準偏差  $S_{y/x}$  から求めることができる (Alfred H-S, Ang ほか, 2007)。

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i')^2} \tag{14}$$

ここで,  $n$  はデータ数である。式 (12), (13) に対する条件付標準偏差を求めると, 式 (12) では  $S_{y/x_A} = 0.141$  [cm/s], 式 (13) では  $S_{y/x_D} = 0.124$  [cm/s] となり, 式 (12) の条件付標準偏差がわずかに大きくなる。すなわち, 式 (12) を用いた方が予測精度はわずかに低下する。回帰直線に沿って残差の分散が一定とすれば, 推定流速が大きくなるほど推定流速に対する実測値と推定値のずれの比率は小さくなる。推定流速に対する実測値と推定値のずれの

比率は、流速の推定値  $x_A$ ,  $x_D$  に対する条件付標準偏差の変動係数により求めることができ、それぞれ、 $0.141/x_A$ ,  $0.124/x_D$  となる。条件付標準偏差の変動係数の変化を Fig.18 に示す。Fig.18 から流速が 0.7cm/s 以上の場合

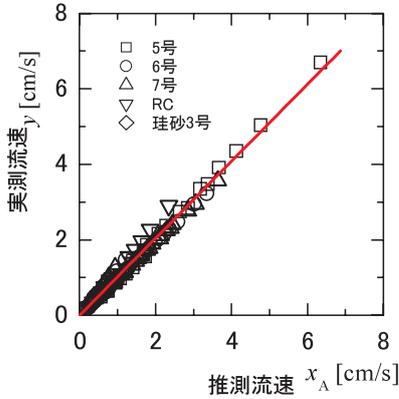


Fig.16  $y$  と  $x_A$  のプロットと回帰直線  
Comparison of discharge velocity measured ( $y$ ) in the permeability test with one ( $x_A$ ) estimated by Eq.(6) and Eq.(7).

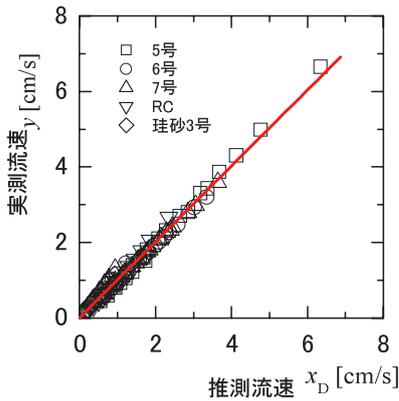


Fig.17  $y$  と  $x_D$  のプロットと回帰直線  
Comparison of discharge velocity measured ( $y$ ) in the permeability test with one ( $x_D$ ) estimated by Eq.(10) and Eq.(7).

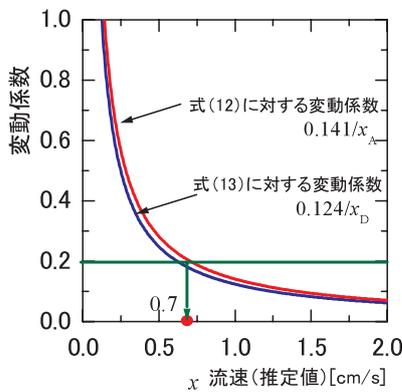


Fig.18 推定値 (流速) に対する残差の変動係数  
Variation coefficient of residual error for estimated discharge velocity.

ずれば推定流速に対して 20%以内に収まり、モデル式の予測精度は高いと考えられる。一方、流速が 0.7cm/s 未満の領域では変動係数の値は急激に増加し、流速が 0.25m/s 以下では 0.5 を越え、予測精度が急激に低下する傾向を示す。

(3) 他論文の透水試験値を用いた予測精度の検証

本研究以外に実施された POC の透水試験値から求めた流速に対するモデル式の予測精度を検証するために、エココンクリート委員会 (1995) が実施した POC の共通透水試験結果を対象に予測精度の検討を行う。対象とする 10 本の供試体の試験データを Table 10 に示す。ただし、式 (1) を用いて試験データを回帰分析した結果、式 (1) の係数  $a$ ,  $b$  が負の値となったデータについては検討から除外した。また、委員会の試験では使用骨材条件として最大骨材寸法のみが記述されていたため、最大骨材寸法 20mm の骨材を 5号、13mm を 6号、5mm を 7号と同一し整理した。流速については試験データに与えられていないため、動水勾配と透水係数から逆算した。

前節 (2) の検討と同様に実測流速データを  $y$ , 式 (6)

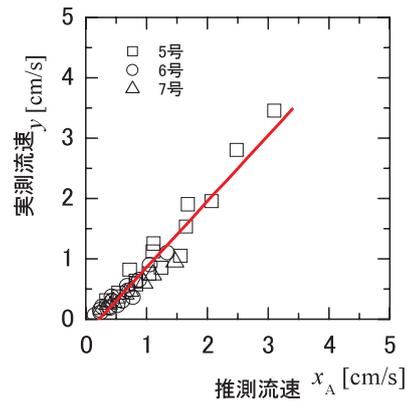


Fig.19  $y$  と  $x_A$  のプロットと回帰直線 (他論文データ)  
Comparison of discharge velocity measured ( $y$ ) in another permeability test (JCI,1995) with one ( $x_D$ ) estimated by Eq.(10) and Eq.(7).

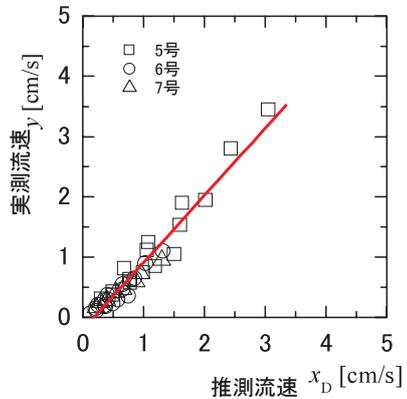
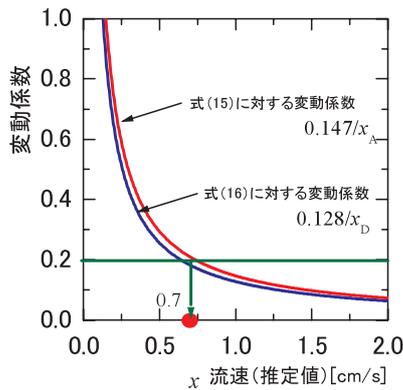


Fig.20  $y$  と  $x_D$  のプロットと回帰直線 (他論文データ)  
Comparison of discharge velocity measured ( $y$ ) in another permeability test (JCI,1995) with one ( $x_D$ ) estimated by Eq.(10) and Eq.(7).

**Table 10** 他機関の透水試験結果と試験データから回帰した係数  $a$ ,  $b$   
Results of the permeability test (JCI, 1995) and the values of  $a$  and  $b$  calculated by regression analysis with JCI data.

動水勾配	流速 [cm/s]		動水勾配	流速 [cm/s]								
	A1	A2		C1	C2	C3	D1	D2	E1	E2	E3	
0.125	1.00	0.59	0.083	0.38	0.21	0.07	0.25	0.17	0.82	0.31	0.15	
0.250	1.02	0.73	0.167	0.55	0.30	0.11	0.42	0.28	1.12	0.43	0.20	
0.500	1.13	0.83	0.333	0.90	0.47	0.18	0.73	0.47	1.53	0.63	0.30	
0.750	1.20	1.00	0.500	1.10	0.65	0.23	0.95	0.60	1.95	0.75	0.36	
最大骨材寸法 [mm]	20	20	最大骨材寸法 [mm]	13	13	13	5	5	20	20	13	
骨材種別	5号	5号	骨材種別	6号	6号	6号	7号	7号	5号	5号	6号	
空隙率 [%]	33.4	24.7	空隙率 [%]	26.3	21.4	16.6	31	25.6	31.1	22.7	20.1	
係数 $a$	0.038	0.196	係数 $a$	0.113	0.201	0.438	0.190	0.236	0.047	0.127	0.243	
係数 $b$	0.064	0.238	係数 $b$	0.187	0.403	0.957	0.152	0.337	0.091	0.326	0.501	



**Fig.21** 推定値 (流速) に対する残差の変動係数  
Variation coefficient of residual error for estimated discharge velocity.

を用いて推定した流速を  $x_A$ , 式 (10) を用いて推定した流速を  $x_D$  とする。  $y$  の  $x_A$ ,  $x_D$  に対する直線回帰式を求めると以下の式 (15) 及び式 (16) が得られ, それぞれの直線回帰式に対する条件付標準偏差  $S_y/x_A=0.147$  [cm/s],  $S_y/x_D=0.128$  [cm/s] となる。

$$y = 1.094x_A - 0.236 \quad (15)$$

$$y = 1.114x_D - 0.206 \quad (16)$$

**Fig.19** に  $y$  と  $x_A$  の散布図と回帰直線を, **Fig.20** に  $y$  と  $x_D$  の散布図と回帰直線を示す。決定係数は式 (15), (16) 共に約 0.94 であり, 自ら実施した室内透水試験に対する結果に較べるとやや相関は低下した。式 (15), (16) の傾きはそれぞれ, 1.094, 1.114 となり, 推定値は約 10% 程度実測値を過大に評価する傾向が見られた。

流速の推定値  $x_A$ ,  $x_D$  に対する条件付標準偏差の変動係数の変化を **Fig.21** に示す。変動係数の変化の傾向は **Fig.18** とほぼ等しく, エココンクリート委員会のデータについても提案した推定式は本節 (2) で述べた室内透水試験と同程度の予測精度を有すると考えられる。

## VI 結 言

本研究では, 骨材及び空隙率を変化させた POC 供試

体に対して動水勾配を変化させた定水位透水試験を行い, 動水勾配と供試体を通過する流れの流速の関係を明らかにした。さらに, Ergun の圧力降下式に基づき POC の空隙率及び骨材粒径から動水勾配を求める推定式を作成した。本実験の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- 1) 5 種類の骨材を用いて空隙率 10 ~ 39% の範囲の POC 供試体を作成し, 動水勾配 0.17 ~ 1.26 の範囲で定水位室内透水試験を行い, 供試体の動水勾配と流速の関係を求めた。その結果 POC の動水勾配  $i$  と流速  $v$  [cm/s] の関係は式 (1) に示される 2 次関数で表せることがわかった。

$$i = av + bv^2 \quad (1)$$

- 2) Ergun の式に基づき式 (1) の係数  $a$  を POC 供試体の空隙率  $\varepsilon$  で表す推定式 (6) を作成した。係数  $k_1$ ,  $k_2$  は骨材種別ごとに決定される値である。骨材種別ごとの値を **Table 7** に示す。

$$a = k_1 + k_2 \mu \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (6)$$

- 3) 式 (6) を改良し係数  $a$  を POC 供試体の空隙率  $\varepsilon$  及び平均骨材粒径  $D$  [cm] で表す推定式 (10) を作成した。式 (10) の適用範囲は  $D$  が 0.19 ~ 1.65cm, 供試体の空隙率が概ね 20 ~ 35% の範囲である。

$$a = 0.0245D^{-2.171} + 0.346 \mu \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (10)$$

- 4) Ergun の式に基づき式 (1) の係数  $b$  を POC 供試体の空隙率  $\varepsilon$  で表す推定式 (7) を作成した。係数  $l_1$ ,  $l_2$  は平均骨材粒径により決定される値である。値については **Table 8** に示す。

$$b = l_1 + l_2 \rho \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (7)$$

- 5) 動水勾配 0.17 ~ 1.26 の範囲においては, 動水勾配の推定に式 (6) あるいは式 (10) を用いても推定値の相対誤差は実測値の  $\pm 50\%$  以内に収まる。相対誤

差は、Table 7 の空隙率の範囲に対して、5号、6号、RC 及び3号珪砂供試体では空隙率の下限に近づくほど、7号供試体では空隙率の上限に近づくほど増加する。

- 6) 式 (6), (7) 及び (10) を用いた推定値の実測流速に対する推定精度は、推定流速が 0.7cm/s 以上の領域では、実測流速と推定流速のずれが推定流速の 20% 以内に収まるが、流速が 0.25m/s 以下の領域では実測流速と推定流速のずれは推定流速の 50% を越える。流速が 0.25m/s 以下の領域における適用に関しては注意が必要である。

なお、本研究は、農林水産省委託プロジェクト農林水産バイオリサイクル研究（平成 14～18 年度）で得られたデータに新たな検討を加え取りまとめた結果であることを付記する。

### 参考文献

- 1) Alfredo H-S.Ang, Wilson H, Tang, 監訳（伊東 學, 亀田浩行）（2007）：土木建築のための確率・統計の基礎, pp.380-391.
- 2) 井上慶一・大塚寛治・村上則幸・杉本光穂・黎 文（2003）：大豆の高品質乾燥調整に関する研究, 中央農研研報, pp.1-49.
- 3) 大友鉄平・大塚浩司・武田三弘（2006）：ポーラスコンクリートの三次元的空隙性状に関する研究, 東北学院大学工学部研究報告第 40 巻第 1 号, pp.65-71.
- 4) 小出章二・田村 敏・内野敏剛・菅原祐二・田中史彦・K.S.P. アマラトゥンガ（1996）：小麦充填層の通風抵抗に関する研究, 農業機械学会誌 58 (6), pp.111-117.
- 5) 松川 徹・玉井元治・杉野 守・芦田 馨（1996）：緑化コンクリートの空隙性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.999-1004.
- 6) 松尾真一郎・木暮敬二（1970）：碎石の透水性に関する実験, 土と基礎 18-2 (144), pp.5-10.
- 7) 三輪茂雄（1981）：粉体工学通論, pp.88-91.
- 8) 森井俊広・立石卓彦・佐田豊和・小林考至（2000）：ロックフィルを通る流れの非線形水頭損失特性, 農業土木学会論文集 No.206, pp.199-207.
- 9) 社日本コンクリート工学協会（1995）：エココンクリート研究委員会報告書, pp.59-63.
- 10) 社日本コンクリート工学協会（2003）：ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究会報告書, pp.182-185.

# Relationship between Hydraulic Gradient and Discharge Velocity in Flow through Porous Concrete

ASANO Isamu, HAYASHIDA Yoichi, MASUKAWA Susumu and TAGASHIRA Hidekazu

## Summary

The relationship between hydraulic gradient and discharge velocity in flow through a porous concrete (POC) has been investigated on the laboratory permeability test. The conditions for the laboratory permeability test were as follows; POC specimen: 5 kinds of aggregates used, hydraulic gradient: 0.17~1.26, void contents of POC specimen: 10~39%. A model equation is proposed for estimating the relationship between hydraulic gradient and discharge velocity from the results of laboratory permeability test. The main results obtained are shown below. The proposed equation expressed a good agreement to the experimental results.

- (1) It was found that the relationship between hydraulic gradient  $i$  and discharge velocity  $v$  [cm/s] in flow through a porous concrete (POC) is considered to be a quadratic function following Eq.(1) from the results of laboratory permeability test.

$$i = av + bv^2 \quad (1)$$

- (2) Applying the Ergun equation to above Eq.(1), we found the following estimate equations Eq.(6) and Eq.(7) for the coefficient  $a$  of Eq.(1).

$$a = k_1 + k_2 \mu \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (6)$$

$$a = 0.0245D^{-2.171} + 0.346 \mu \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (10)$$

where,  $\varepsilon$ : void contents of POC,  $D$ : average aggregate diameter [cm],  $k_1, k_2$ : these factors are given **Table 7** for 5 kinds of the aggregates.

- (3) Applying the Ergun equation to above Eq.(1), we found the following estimate equations Eq.(7) for the coefficient  $b$  of Eq.(1).

$$b = l_1 + l_2 \rho \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (7)$$

where,  $\varepsilon$ : void contents of POC,  $l_1, l_2$ : these factors are given **Table 9** for average aggregate diameter.

- (4) The hydraulic gradient values estimated by the equation Eq.(6) or Eq.(10) with Eq.(7) were within almost less than 50% relative errors.

**Keywords** : Porous concrete, Nonlinear flow, Head loss, Permeability test, Hydraulic Gradient, Discharge velocity, Ergun equation