

論文 流動性の異なるモルタルを用いたポーラスコンクリートの研究

梶尾 聡^{*1}・古屋 貴之^{*2}・宇治 公隆^{*3}・國府 勝郎^{*3}

要旨：本研究はポーラスコンクリートの配合設計法の確立を目的とし、5-2.5mm 骨材および細骨材を用いた流動性の異なるモルタル（ペースト）を骨材バインダとし、ポーラスコンクリートの空隙構造を定式化した空隙量式の適合性の評価、空隙量と圧縮強度および透水性の関係の実験的検証を行った。その結果、モルタルの流動性の向上は粗骨材を被覆するモルタル量を減少させて空隙量が小さくなること、圧縮強度はペーストの種類ごとに空隙量の指数関数となること、透水係数は連続空隙量の指数関数で近似できることを確認した。

キーワード：ポーラスコンクリート、配合設計、フロー値、空隙量、圧縮強度、透水係数

1. はじめに

連続した空隙を有するポーラスコンクリート（以下、POC）は、透水性や低騒音性などの付加機能を有するコンクリートとして、護岸や舗装などの用途で実用化されており、粗骨材を結合するモルタル（ペースト）に関する研究も盛んに行われている。例えば、POC に用いるペーストは材料分離や空隙確保の観点からフロー値は190mm程度、細骨材量はセメント（結合材）に対して0.75～1.00が適正な範囲であり¹⁾、圧縮強度や透水係数は空隙量を説明変数とした指数関数で近似した結果^{2),3)}が報告されている。

本研究は、POCの配合設計法の確立を目的としたものであり、昨年の論文で実験的検討により配合条件から空隙量を求める関係式を報告した⁴⁾。本報は、粗骨材として5-2.5mm骨材を用い、流動性の異なるモルタルを用いたPOCを対象として、充填性状に着目した理論モデルより導いた空隙構造を定式化した空隙量式の適合性評価、空隙量と圧縮強度および透水性の関係の実験的検証を行ったものである。

2. 使用材料

表-1に使用材料を示す。細骨材はコンクリ

ート用細骨材（砕砂）、粗骨材は5-2.5mm骨材（単粒度砕石S-5）を使用した。

3. モルタル基本物性の確認

POCに使用するモルタルの流動性、空気量および圧縮強度を試験した。

3.1 モルタル試験方法

モルタルの配合を表-2に示す。モルタルの流動性を変化させるために混和剤添加量（SP量）、水結合材比（W/P）およびペースト細骨材空隙比（ Kp ）⁵⁾を変化させた。 Kp は、細骨材およびペーストの単位体積 s 、 p （ m^3 ）と細骨材の実積率 G_s （ m^3/m^3 ）より式(1)で示すことができる。 $Kp=$

表-1 使用材料

種類	特性および品質
セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度：3.16g/cm ³
混和剤 (SP)	ポリカルボン酸エーテル系 高性能減水剤
細骨材 (S)	表乾密度：2.63g/cm ³ ，吸水率0.92% 実積率：64.5%，粗粒率：2.88 単位容積質量（表乾）：1696kg/m ³
粗骨材 (G)	単粒度砕石 S-5，吸水率1.60% 実積率：58.7%，表乾密度：2.70g/cm ³ 単位容積質量（表乾）：1586kg/m ³

*1 太平洋セメント（株）中央研究所技術企画部主任研究員（正会員）

*2 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科

*3 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科教授 工博（正会員）

∞は細骨材を使用しない（ペースト）ことを示す。

$$Kp = \frac{p}{s} \times \frac{Gs}{1-Gs} \quad (1)$$

練混ぜ方法はセメントおよび細骨材を空練りした後、混和剤を溶解した水を投入して4分間練り混ぜた。モルタルのフロー値はJSCE-F505に準じて測定し、空気量はJSCE-F505を参考に試料を容器に詰めた後、POC製造時と同様に振動テーブルを用いて90秒間加振させた後、測定した。強度試験体の作製はJSCE-F506に準じて作製した後、振動テーブルで90秒間振動させた。圧縮強度はJSCE-G505に準じて、材齢14日で試験した。

3.2 モルタル試験結果

モルタルのフロー値、空気量および圧縮強度の測定結果をそれぞれ図-1～3（凡例：表-2参照）に示す。セメントペースト（ $Kp=\infty$ ）のフロー値は125mm～220mmの範囲であり、W/CやSP量が大きいくほど大きく、流動性が高い順にP4>P2>P3>P1であった。松本らの報告⁶⁾と同様に細骨材量が増加するとフロー値は小さくなった。SP量が多いP2およびP4のモルタルは、P1およびP3のモルタルに比べて空気泡（主にエントラップトエア）を多く巻き込んだため、圧縮強度は小さくなった。空気泡の巻き込みの原因は、ペーストが高粘性であり、脱泡できなかったためと考えられる。

4. ポーラスコンクリートの実験的検討

実験は、前章のモルタル（ペースト）を骨材バインダとしたPOCを製造し、空隙量、圧縮強度および透水性を確認することを目的とした。

4.1 ポーラスコンクリートの配合

表-3にPOCの配合水準を示す。モルタル粗骨材空隙比（ Km ）は、粗骨材およびモルタルの単位体積 g 、 m （ m^3 ）と、粗骨材の実積率 Gg （ m^3/m^3 ）より式(2)で示すことができる。

$$Km = \frac{m}{g} \times \frac{Gg}{1-Gg} \quad (2)$$

本試験における空隙量計算値 Vd （ m^3/m^3 ）は、空隙量式（式(3)参照）を用いて Km より求めた。

表-2 モルタルの実験水準

No	W/C	SP量	Kp	図中記号
P1	0.20	$C \times 1.0\%$	3.0, 5.0, ∞	□
P2		$C \times 1.5\%$	3.0, 5.0, ∞	◇
P3	0.21	$C \times 1.0\%$	3.0, 5.0, ∞ ^{注)}	△
P4		$C \times 1.5\%$	3.0, 5.0, ∞ ^{注)}	○

(注) フロー試験のみ実施

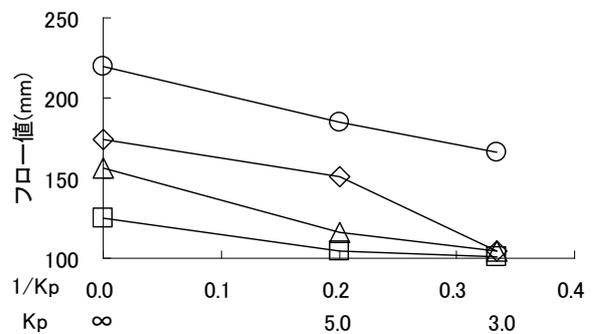


図-1 モルタルフロー

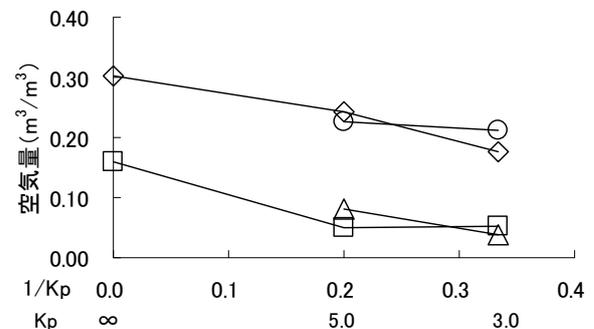


図-2 モルタルの空気量

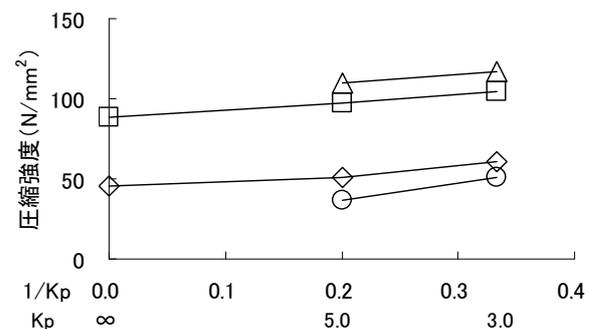


図-3 モルタルの圧縮強度

$$Vd = \frac{(1 - Gg)\{(\beta - Gg)Km + Gg\}}{\beta(1 - Gg)Km + Gg} \quad (3)$$

空隙量式は、粗骨材を被覆するモルタルの比率を β とし、充填性状に着目した理論モデル(図-4)より空隙構造を定式化したものである。また、粗骨材を被覆するモルタル量 $\beta \times m$ (m^3) に及ぼすペーストおよび細骨材の単位体積の影響割合を β_p および β_s とすると、 β は式(4)で示すことができる。 β, β_p および β_s は実験定数である。

$$\beta = \frac{(\beta_s - \beta_p)Gs}{(1 - Gs)Kp + Gs} + \beta_p \quad (4)$$

表-4 に空隙量式に用いた係数 β_p および β_s を示す。係数 β_p および β_s は昨年報告した W/P=25% の結果を基に求めた⁴⁾。表-5 および表-6 に Km または Kp を変化させた POC の配合例を示す。

4.2 ポーラスコンクリートの試験方法

(1) ポーラスコンクリートの練混ぜ

POC の練混ぜはモルタル先練り方法とした。セメントおよび細骨材を空練りした後、混和剤を溶解した水を投入して 2 分間練り混ぜてモルタルを製造し、モルタルに粗骨材を投入して 2 分間練り混ぜた。

(2) 試験体の作製

試験体は配合より 2651cm^3 ($\phi 10 \times 15\text{cm}$ 相当) となる試料を量りとり、JCI-SPO1-1 (ポーラスコンクリートの供試体の作り方(案)) に準じて成形した。本試験で用いた振動テーブルは振動数 4300rpm (加速度 5G) のものであり、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 鋼製型枠に予め計量した試料を投入し、本試験では 3kg の錘を載せて振動をかけた。所要振動時間はほぼフルコンパクション状態となる 90 秒間とした。

(3) 空隙量の測定

硬化後の POC 試験体の空隙量(空隙量実験値 V_i) は、JCI-SPO2-1 (ポーラスコンクリートの空隙率試験方法(案)) の質量法に準じて行った。ただし、粗骨材粒径が小さいことから、空隙径

が小さく、試験体内の水が抜け切らなかったため、試験体の気中質量は試験体作製時の計量値を用いた。

表-3 ポーラスコンクリートの実験水準

No	W/C	SP 量	Kp	Km	図中記号
P1	0.20	$C \times 1.0\%$	3.0	0.62, 0.71	□
			5.0	0.62	
			∞	0.41~0.62	
P2	0.20	$C \times 1.5\%$	3.0	0.62	◇
			5.0		
			∞	0.42, 0.45	
P3	0.21	$C \times 1.0\%$	3.0	0.66, 0.72	△
			5.0	0.36~0.74	
P4	0.21	$C \times 1.5\%$	3.0	0.70	○
			5.0	0.58	

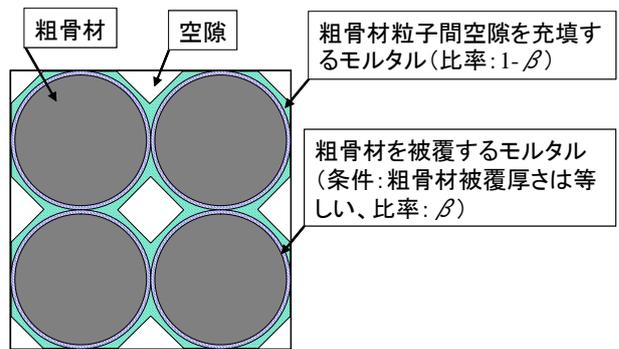


図-4 充填性状に着目した理論モデル

表-4 係数 β_p および β_s ⁴⁾

配合水準			係数 β_p	係数 β_s
W/B	Kp	Km		
0.25	1.0~7.5	0.45~1.13	-0.0285	0.6424

表-5 配合例 1 ($SP=C \times 1.0\%$)

Km	Kp	W/C	Vd (m^3/m^3)	単位質量 (kg/m^3)			
				W	C	S	G
0.62	3.0	0.20	0.232	56	282	231	1445
	5.0		0.209	68	341	168	1489
	∞		0.146	101	501	0	1606

表-6 配合例 2 ($SP=C \times 1.0\%$)

Km	Kp	W/C	Vd (m^3/m^3)	単位質量 (kg/m^3)			
				W	C	S	G
0.36	5.0	0.21	0.291	42	200	100	1528
0.41			0.275	47	227	114	1520
0.62			0.209	70	334	168	1489
0.74			0.172	83	395	198	1471

(4) 連続空隙量の測定

図-5に示す浮力法⁷⁾を用いて、POCの縦軸方向における連続空隙量を測定した。浮力法はPOC試験体を外部から支持した状態で水槽中に固定し、注水量 ΔW_w (g)、水槽下部に設置した秤の増分 dW (g)を計測する。連続空隙量 V_c (m^3/m^3)は、 ΔW_w 、 dW 、POC試験体の断面積 A_c (cm^2)、水槽の断面積 A_t (cm^2)、試験体を支持する治具の断面積 A_g (cm^2)を用いて、式(5)により求めた。

$$V_c = 1 - \frac{A_t}{A_c} \left(1 - \frac{\Delta W_w}{dW} - \frac{A_g}{A_t} \right) \quad (5)$$

(5) 圧縮強度試験

圧縮強度試験はJIS A 1108に準じて行った。ただし、試験体の高さが直径の2倍よりも小さいため、圧縮強度はJIS A 1107の補正係数を乗じて、直径の2倍の高さをもつ試験体に換算した。試験体は材齢1日で脱型した後、20℃水中で試験に供するまで養生を行い、材齢14日で試験した。

(6) 透水試験

透水試験はJCI-SPO-1(ポーラスコンクリートの透水試験方法(案))に準じて行った。

4.3 空隙量への影響

POCの空隙量の測定結果(空隙量実験値 V_t)を K_p 別に図-6(凡例:表-3参照)に示し、 V_t と V_d の関係を図-7(凡例:表-3参照)に示す。 V_t と V_d の差の目標許容範囲はコンクリートの空気量を参考に $\pm 0.015 m^3/m^3$ とすると、半数近い測定値は計算値よりも下回った。この原因について以下に考察する。式(3)より導いた式(6)を用いて、 V_t より粗骨材を被覆するモルタルの比率(β_t)を求めた。 β_t の解析結果を図-8(凡例:表-3参照)に示す。図中の設定値は表-4および式(4)より求めた粗骨材を被覆するモルタルの比率 β である。

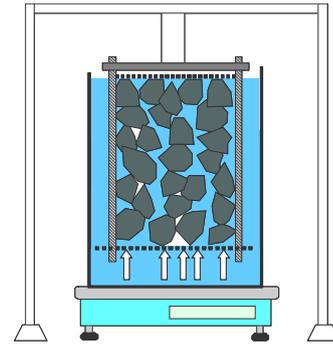


図-5 浮力法

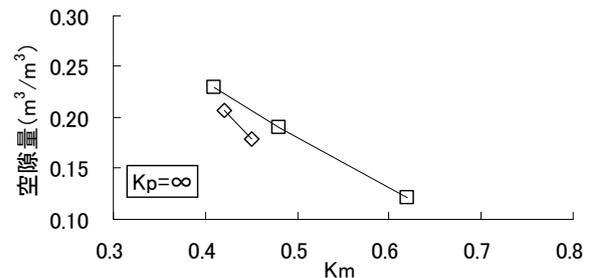
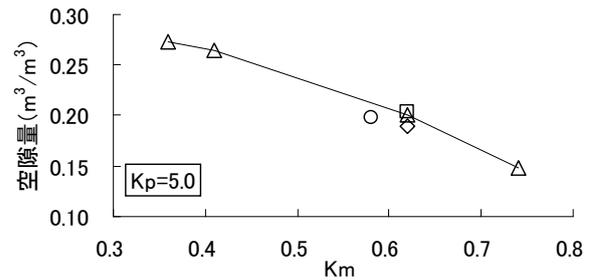
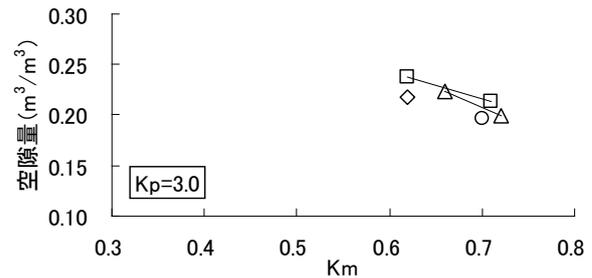


図-6 空隙量実験値

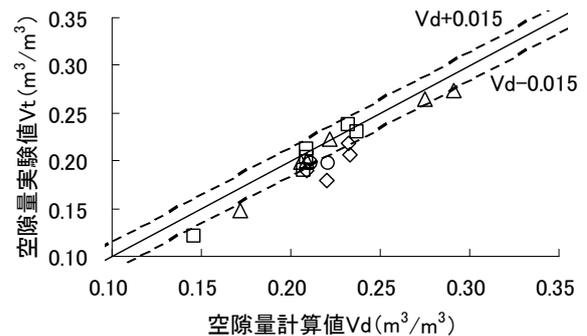


図-7 空隙量実験値と空隙量計算値の関係

$$\beta t = \frac{Gg\{Vt - (1 - Gg)(1 - Km)\}}{(1 - Gg)(1 - Vt)Km} \quad (6)$$

$Kp = \infty$ (ペースト) において $\beta t < 0$ となるが、これは沼田ら⁸⁾の報告による引締め現象により粗骨材の実積率が增大したためと考えられる。 βt は β より小さく、P1 に比べて流動性が高い P2 の βt の方が小さい結果であった。 $Kp=3$ および 5 におけるモルタルフロー値と $\beta t/\beta$ の関係を図-9 (凡例: 表-3 参照) に示す。フロー値が増大すると $\beta t/\beta$ が減少することから、粗骨材の被覆厚が小さくなると考えられる。よって、 Km および Kp が同等であっても粗骨材粒子間空隙の縮小、粗骨材間空隙を充填するモルタル量の増大により、空隙量は減少する。以上の要因により、 Vt が Vd と乖離したと考えられる。流動性の異なるモルタルを使用する場合には、配合設計で用いる実験定数 β もしくは β_p および β_s を事前に調整する必要があることが明らかとなった。

4.4 連続空隙量への影響

浮力法により測定した連続空隙量と Vt の関係を図-10 (凡例: 表-3 参照) に示す。全データを用いて回帰した結果、 Vt と連続空隙量の差は約 $0.05\text{m}^3/\text{m}^3$ であり、この結果は湯浅ら²⁾の結果と同等であった。しかし、個々の差は $0 \sim 0.10\text{m}^3/\text{m}^3$ と変動幅が大きい結果であるが、モルタルの流動性との相関性は認められず、今後データを蓄積し、原因を明らかにする必要がある。

4.5 圧縮強度への影響

圧縮強度と Vt の関係を図-11 (凡例: 表-3 参照) に示す。圧縮強度と Vt の関係をペーストの種類ごとに指数関数で回帰した結果を図中に付記した。回帰式の決定係数は 0.89 以上であり、圧縮強度は Kp の影響よりペーストの種類や空隙量の影響を大きく受けることが確認された。ペーストの配合として W/C が小さく、 SP 量が多い方が POC の圧縮強度はやや高くなる傾向が認められた。しかし、モルタルと POC の圧縮強度には相関性が認められなかった。この原因は、モルタルは空気泡を巻き込むことから空気量の

影響を排除した強度を基準とする必要があること、POC 中のモルタルは粗骨材に薄層で被覆するため、振動によりモルタルの空気量が小さく

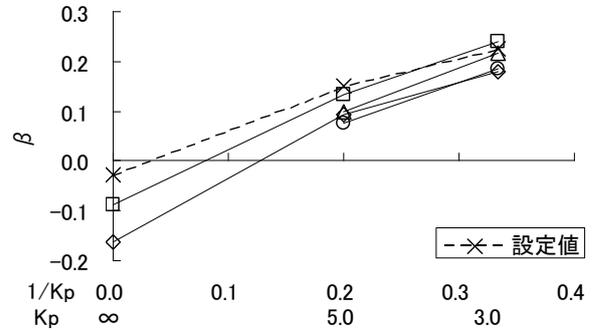


図-8 粗骨材を被覆するモルタルの比率 β

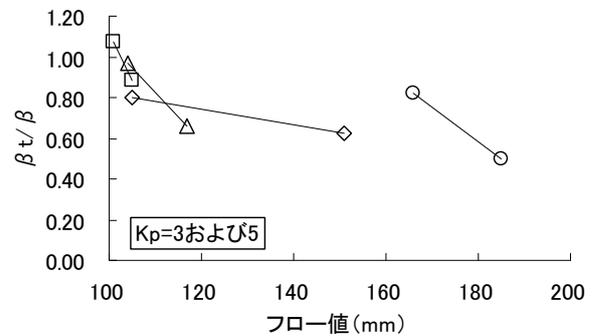


図-9 $\beta t/\beta$ とフロー値の関係

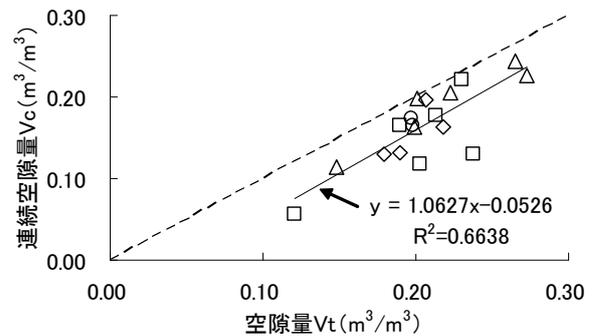


図-10 連続空隙量と空隙量の関係

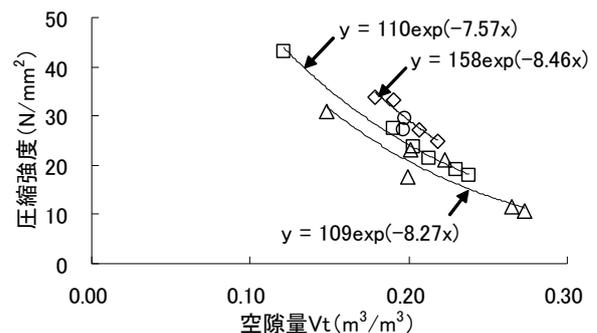


図-11 圧縮強度と空隙量の関係

なり強度が高くなることなどが推察される。

4.6 透水性への影響

透水係数と V_c の関係を図-12 (凡例: 表-3 参照) に示す。透水係数と V_c の関係を指数関数で回帰した結果, 透水係数はモルタルの流動性の影響が小さく, 連続空隙量との相関性が高いことが明らかとなった。また, POC 試験体の底面はモルタルのダレによる空隙の閉塞が少なく, 空隙面積を測定した結果は最小値で $0.178\text{cm}^2/\text{cm}^2$ であった (写真-1 参照)。

5. まとめ

5-2.5mm 骨材を粗骨材とし, 細骨材を用いたポーラスコンクリートにおける実験的検討により得られた成果を以下に示す。

- (1) 粗骨材を結合するモルタル (ペースト) の流動性が向上すると, 引締め効果や粗骨材を被覆するモルタルの比率の低減により, ポーラスコンクリートの空隙量は減少することを示した。
- (2) ポーラスコンクリートの圧縮強度は, モルタル中のペーストが同等であれば, 説明変数を空隙量とした指数関数で近似できることを実験により確認した。
- (3) ポーラスコンクリートの透水係数は, 説明変数を連続空隙量とした指数関数で近似でき, モルタルの流動性の影響は小さいことを明らかにした。

参考文献

- 1) 松川徹ほか: ポーラスコンクリートに適用する結合材の性質に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1181-1186, 2003
- 2) 湯浅幸久ほか: ポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす結合材強度の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1425-1430, 2004
- 3) 湯浅幸久ほか: ポーラスコンクリートの内部構造に及ぼす表面振動締固めの影響, コンク

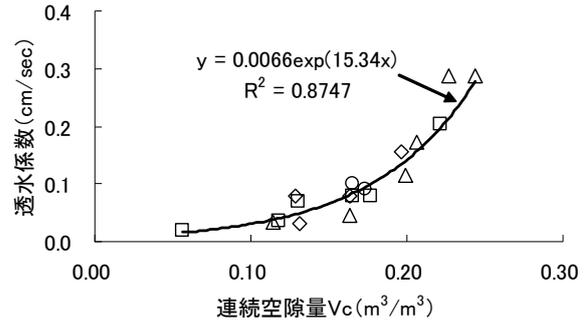


図-12 透水係数と連続空隙量の関係

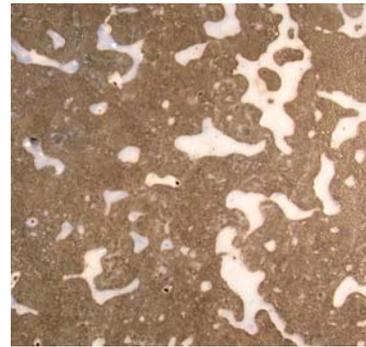


写真-1 試験体底面の状況

リート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1263-1268, 2002

- 4) 梶尾聡ほか: ポーラスコンクリートの配合設計法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1427-1432, 2006
- 5) 國府勝郎ほか: 締固め仕事量に基づく超硬練りコンクリートの配合設計, 土木学会論文集, No.532, V-30, pp.109-118, 1996.2
- 6) 松本宏哉ほか: ポーラスコンクリートのフレッシュ性状評価に関する一提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1211-1216, 2003
- 7) Somer, M. et al.: Method to Establish the "Porosity-Depth" Distribution of Porous Concrete Pavement Using Cylindrical 100cm² Cores Samples, 8th International Symposium on Concrete Roads, Theme II, pp.171-176, 1998
- 8) 沼田晋一ほか: 練混ぜ作用によるポーラスコンクリートの配合割合の構成機構と配合設計に関する基礎的研究, ポーラスコンクリートの設計・施工法と最近の適用例に関するシンポジウム論文集, pp.23-30, 2003.5