

小粒径ポーラスコンクリートの揚水高さに関する理論的アプローチ

畑中重光^{*1} 三島直生^{*1} 坂本英輔^{*2} PARK Kwangmin^{*1}^{*1} 三重大学 大学院工学研究科建築学専攻 (〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577)^{*2} 三重大学 大学院工学研究科システム工学専攻 (〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577)

要旨：骨材に粒径 0.6 ~ 2.5mm の碎石を用いた小粒径ポーラスコンクリートは、従来のポーラスコンクリート（以下、POC）をはるかに超える揚水性能を有していることが明らかになっている。この揚水性能を定量的に評価できれば、緑化基盤および揚水舗装への POC のさらなる適用範囲の拡大が期待できる。本研究では、揚水性能の定量評価の前段階として、毛管現象に立脚した揚水メカニズムの解明を検討した。その結果、小粒径 POC の揚水メカニズムは、毛管現象によりある程度説明できることが明らかになった。すなわち、揚水高さは空隙の体積の影響を受けるのではなく、空隙の形状、特に、空隙隅部の影響が支配的であることが明らかとなった。

キーワード：ポーラスコンクリート、揚水高さ、毛管現象、毛管半径、画像解析、全空隙率

1. まえがき

著者らは、これまでに、ポーラスコンクリート（以下、POC）の適用範囲を拡大させることを目的として、小粒径骨材を用いて空隙径を小径化した小粒径 POC に関する検討を行ってきた¹⁾。それら一連の実験から、骨材に小さな粒径 (0.6 ~ 2.5mm) の碎石を用いた小粒径 POC は、従来の POC をはるかに超える揚水性能を有していることが明らかになった。この揚水性能を定量的に評価できれば、緑化基盤および揚水舗装への POC のさらなる適用範囲の拡大が期待できる。本研究では、小粒径 POC における揚水性能の定量評価の前段階として、毛管現象に立脚した揚水メカニズムの解明を検討した。

2. 揚水試験の結果

ここでは別報¹⁾で行った揚水試験について取りまとめるとともに、本研究に関連する事項について若干の検討を加える。Table 1 および 2 に、それぞれ実験要因と水準および使用材料を、Table 3 に実験条件と測定項目を示す。本報での全空隙率は、供試体型枠に投入した POC 質量を練混ぜ直後の状態で計測して算出した²⁾。揚水試験は、表乾状態にした円柱供試体を Fig. 1 に示すように、20 °C・RH80 % の雰囲気中で水深 10mm の定水位にした水槽に浸漬させ質量変化を測定し、式[1]を用いて揚水率を算出した。なお、表乾状態とは、供試体

Table 1 Experimental factor and level

Factor	Level
Aggregate	G6, G8, G9
Designed void ratio (%)	10, 20, 30

Table 2 Materials used

Materials	Properties
Cement	Ordinary portland cement Density:3.16g/cm ³ , Blaine:3350cm ² /g
Aggregate	G6 (Crushed stone No.6 : Particle size 5~13mm) Density*:2.70g/cm ³ , Water absorption:1.09% Solid content:56.0%
	G8 (Crushed stone No.8 : Particle size 1.2~2.5mm) Density*:2.70g/cm ³ , Water absorption:1.35% Solid content:54.3%
	G9 (Crushed stone No.9 : Particle size 0.6~1.2mm) Density*:2.70g/cm ³ , Water absorption:1.04% Solid content:52.8%
Water	City water
Admixtures	Air-entraining and high-range water-reducing admixture (Polycarboxylic acid)

*: in saturated surface-dry condition

Table 3 Experimental conditions

Condition	W/C (%)	25
	Mixing method	Paste premixing
	Target flow value	150 (G6·Designed void ratio 10%)
		190 (G6·Designed void ratio 20%·30%)
		230 (G8) 267 (G9)*:Impact number is 0
Compaction method	Table vibrator	
Compaction time	10s	
Evaluation item	Compressive strength, Flexural strength, Permeability, Pumping capacity, Water absorption	

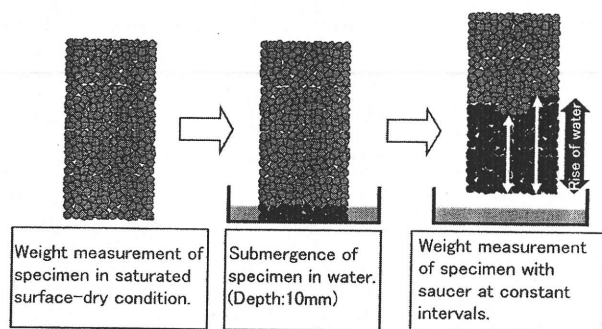


Fig. 1 Method of pumping test

を 20℃・RH60% の恒温恒湿槽内で乾燥させながら質量を測定し、内部の水分量が恒量となった時点とした。

$$\text{揚水率}(\text{vol}\%) = \frac{\text{揚水量の容積 (ml)}}{\text{供試体の空隙容積 (ml)}} \times 100 \quad [1]$$

Fig. 2 によれば、小粒径 POC の揚水率は、骨材粒径が小さい、または、全空隙率が大きいほど大きくなることが分かる。

供試体の揚水量の計測と同時に、表層部の揚水高さを

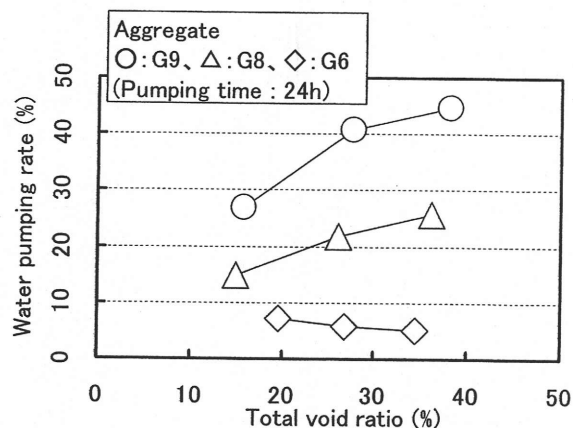


Fig. 2 Relationship between water pumping rate and total void ratio

計測した。揚水高さは、各供試体の表層において最大及び最小となる位置 2カ所を計測し、平均して求めた。供試体本数は 2 本とした。

Fig. 3 に、揚水高さの実測結果を示す。同図には、供試体内の空隙分布が均一であると仮定し、Fig. 2 の揚水率から求めた揚水高さ（以下、揚水平均高さ）も黒印で併示してある。同図によれば、小粒径 POC の揚水高さは、Fig. 2 の揚水率とはほぼ同様な傾向を示しており骨材粒径が小さい、または、全空隙率が大きいほど高くなった。しかし、定量的に見ると揚水平均高さは揚水高さのおおよそ 1/2 程度以下である。これは、POC 内部では表層部ほど揚水されていないこと、および内部の空隙が全て水で満たされていないこと（後掲の Fig. 5 参照）が主な原因であると考えられる。本報には示していないが、別の実験で、内部の揚水高さは表層部の揚水高さと同ま

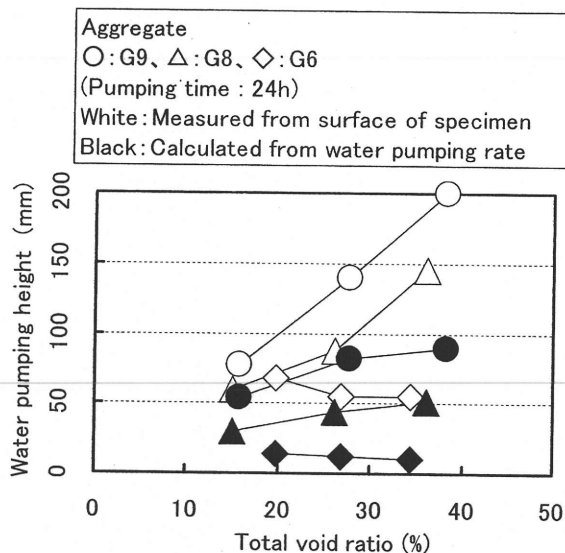


Fig. 3 Relationship between water pumping height and total void ratio

り大きくは異なることが確認されている。このことから、内部の空隙が完全に水に満たされていないことが主な原因であると考えられる。本報では、揚水性能という観点から、以下、揚水高さとは揚水率から求めた値（揚水平均高さ）を示すものとする。

3. 揚水メカニズムの仮説

3.1 土中における毛管現象

土中において、地下水面と地表面の間、すなわち包気帯の土のうち地下水面に近い部分では、地下の水がある高さまで吸い上げられる。この現象は、毛管現象により説明できる。毛管現象とは、例えば、水中にガラス製の断面が丸い細管を垂直に立てると下から液体が入り、細管の外側の液面より高くなる現象のことである（Fig. 4 参照）。これは、液体と細管との間の付着力と表面張力との作用によるもので、この二つの力が細管中の高さとなる液体の重量と平衡して静止する³⁾。このときの高さは毛管上昇高さと呼ばれ、式[2]で示される⁴⁾。

$$h = \frac{2T \cos \alpha}{\rho g r} \quad [2]$$

ここで、 h : 毛管上昇高さ(m)

T : 表面張力(N/m)

α : メニスカスと細管壁面との間の接触角(°)

ρ : 液体の密度(kg/m³)

g : 重力加速度(m/s²)

r : 毛管半径(m)

実際の土中の空隙は、ガラス管のように規則正しい断面を持っていないうえに、上下方向だけでなく、各方向に連なり、錯綜した網状の組織をしている。このような

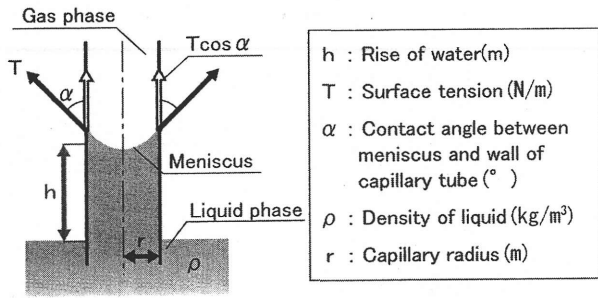


Fig. 4 Equilibrium in capillary phenomenon

実際の土中の毛管上昇高さは、近似的に式[3]で得られるとされている⁵⁾。

$$h = \frac{C}{e \cdot D_{10}} \quad [3]$$

ここで、 h : 毛管上昇高さ (cm)

e : 間隙比

D_{10} : 有効径 (粒径加積曲線において質量通過百分率が 10% の点の粒径) (cm)

C : 粒径および表面の不純度等で決まる定数 (0.1 ~ 0.5 で変化) (cm²)

POC は連続空隙を有しており、その空隙構造は土に似ていることから、その揚水メカニズムも土と同様に、毛管現象によって説明できると考えられる。Fig.5 に、2. での検討および文献⁵⁾ を参考に、POC の毛管現象と水の分布状態の予想図を示す。ここで式[3]に基づき、POC の毛管上昇高さを計算した場合、全空隙率が大きいほど間隙比 e が大きくなり、毛管上昇高さが低くなる。これは、Fig.3 に示した揚水試験の結果と矛盾する。この原因として、POC では全空隙率によって結合材の量が変化することや空隙の形状が異なることが考えられる。そのため本報では、POC の揚水高さを推定するに

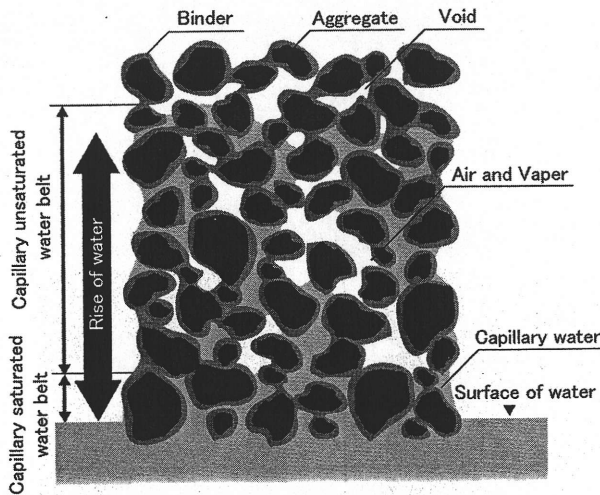


Fig. 5 Capillary phenomenon in POC and distribution condition of water

あたり、式[3]の基となった式[2]に立ち返り、以下の検討を行う。

3.2 POC における毛管現象

式[2]によれば、液体が 20℃ の水の場合 ($T = 0.07275\text{N/m}$, $\rho = 998.2\text{kg/m}^3$)、毛管上昇高さ (h) は、メニスカスと細管壁面との間の接触角 (α) および毛管半径 (r) の影響を受ける。Fig.6 に、毛管上昇高さに及ぼす接触角の影響を示す。同図によれば、接触角が小さいほど毛管上昇高さが大きくなること、グラフの形状はすべてコサインカーブ ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) となることが分かる。Fig.7 に、毛管上昇高さに及ぼす毛管半径の影響を示す。同図によれば、毛管半径が小さいほど、毛管上昇高さが急激に大きくなること分かる。

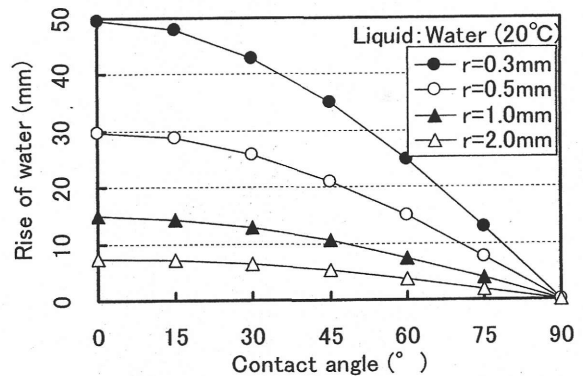


Fig. 6 Relationship between rise of water and contact angle

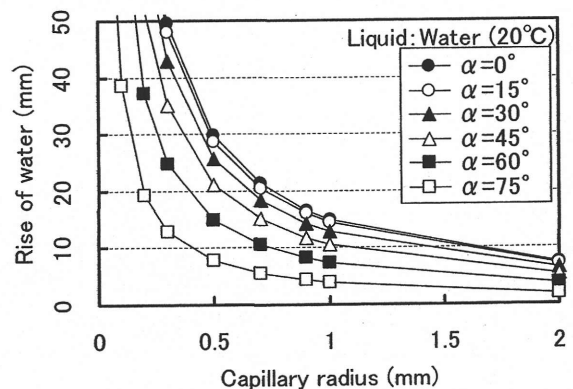


Fig. 7 Relationship between rise of water and capillary radius

4. POC における毛管上昇高さ

式[2]を用いることにより、接触角 (α) および毛管半径 (r) が分かれば、毛管上昇高さ (h) を推定することが可能となる。このため、本章では、本実験条件下における接触角 (α) および 2 次元的な空隙径分布 (毛管半径の分布) の実測を試みる。要因と水準および使用材料は、Table 1 および 2 と同様である。

4.1 接触角

固体の上に液体を静かに落とすと、表面張力により液滴の形状を示し、液滴と気体との界面は、球面の一部を形成する。球状の端面の立ち上がり部分は、固体表面に対して一定の角度 α をなしており、その角度は接触角と呼ばれる (Fig.8 参照)⁴⁾。

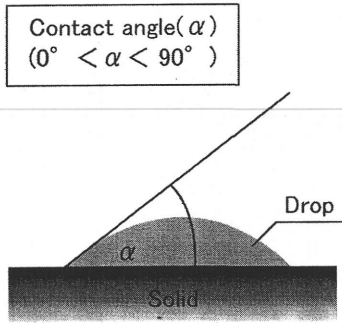


Fig. 8 Contact angle

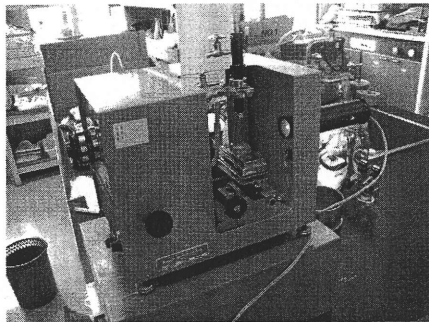


Photo. 1 Measuring device of contact angle

接触角は、液体と固体の種類によって異なる。そこで、セメントペーストの表面性状が接触角に及ぼす影響を検討した。セメントペーストの表面性状に影響を及ぼす要因として、ここではフロー値を取り上げ、230 (15打フロー値) および 267 (0打フロー値) の2水準とした。供試体サイズは75(縦)×30(横)×15(高さ)mmで、W/C = 0.25のセメントペーストを使用し、打設時に10s間の振動締固めを行った (Table 3 参照)。材齢10日で、表乾状態の供試体を用いて、接触角を測定した。

測定には、Photo. 1の接触角計を用いた。

その結果、フロー値が230 (15打フロー値) および 267 (0打フロー値) の場合の接触角は、それぞれ 14° 、 9.6° となった。測定された接触角は、いずれも $0\sim 15^\circ$ の範囲内にあり、Fig.7によれば、揚水高さに対する接触角の影響は小さいといえる。そこで、セメントペーストと水との接触角をフロー値によらず $\alpha = 10^\circ$ として、以下の議論を進める。

4.2 2次元的な空隙径分布

(1) 実験方法

供試体の作製方法を以下に示す。まず、揚水高さを計測した $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を高さ方向に2等分した。次に、上層の供試体下面 (試験面) を研磨機で2mm程度研磨し、研磨面に W/C = 0.30 のホワイトセメントペーストを塗布した。なお、骨材粒径9号を使用した全空隙率30%の供試体については、研磨機による研磨が不可能であったため、試験面から W/C = 0.45 のホワイトセメントペーストを真空吸引して充填した。ペーストの硬化後、塗布表面を #180 の耐水ペーパーで研磨して試験面を仕上げた。

次に、画像解析の手順 (Table 4 参照) を以下に示す。試験面の乾燥後、試験面の画像をスキャナで取り込み、試験面中央の $60 \times 60\text{mm}$ の画像を抽出した。パソコンの処理能力を考慮して、抽出画像を4等分 ($30 \times 30\text{mm}$) したものを測定視野として、デジタル画像計測・解析ソフトを用いて2値化した。測定視野4枚をそれぞれ2値化して、空隙の面積および周囲長を自動計測して平均した。解析ソフトの面積認識限界値から、空隙面積の計測範囲は 1mm^2 (円換算半径: 0.56mm) 以上とした。

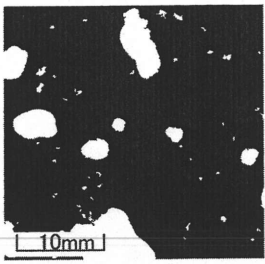
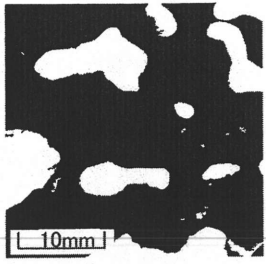
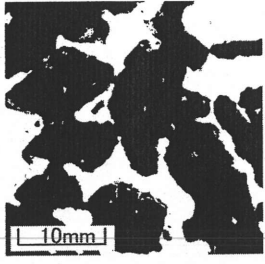
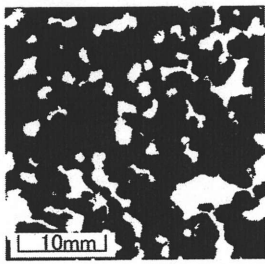
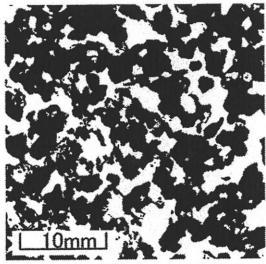
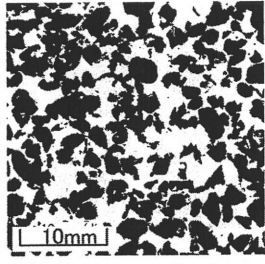
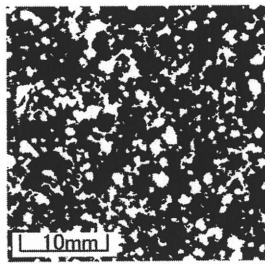
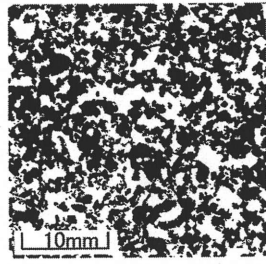
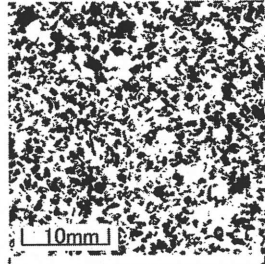
(2) 実験結果および考察

Table 5に、設計空隙率 (全空隙率) と骨材粒径の関係を2値化画像で示す。また、表中には、Fig.3に示した揚水高さを用いて式[2]から算出した毛管半径の理論値も示してある。ここで、 $T = 0.07275\text{N/m}$ 、 $\alpha = 10^\circ$ 、 $\rho = 998.2\text{kg/m}^3$ とした。同表によれば、骨材粒径に関わらず、全空隙率が小さい場合は、黒色で示す硬化体 (骨材粒子 + 結合材) の中に白色で示す空隙が存在するが、

Table 4 Method of image analysis

Step	Step1	Step2	Step3
	Scanning	Binary	Measurement (Area and surrounding length of void)
Image sample •Particle size : G8 •Designed void ratio : 20% •Image size : $30 \times 30\text{mm}$			<p>Expansion of the square part of the figure on the left</p>

Table 5 Relationship between particle size and designed void ratio on binarized imaged

Designed void ratio (%)		10	20	30
		Particle size		
G6	Binarized image			
	Theoretical Capillary radius (mm) × 2	2.06	2.48	2.87
G8	Binarized image			
	Theoretical Capillary radius (mm) × 2	1.00	0.67	0.57
G9	Binarized image			
	Theoretical Capillary radius (mm) × 2	0.54	0.36	0.33

全空隙率が大きい場合は、空隙中に硬化体が浮いた状態となることが分かる。また、毛管半径の理論値は、骨材粒径が小さい、または、全空隙率が大きいほど小さくなることが分かる。

次に、硬化体の接点に注目する。Table 6 に、設計空隙率（全空隙率）の違いが空隙形状に及ぼす影響を示す。表中の図は、測定視野（Table 5 参照）から硬化体の隅部、すなわち空隙の隅部を 1 × 1mm の視野で拡大した画像である。また、表中の下段には、Table 5 と同様に毛管半径の理論値も示してある。同表によれば、全空隙率が大きいほど、空隙の隅部がより複雑になり、空隙の幅が小さくなることが分かる。これは、Fig. 9 に示すように、全空隙率が大きくなると、結合材の量が少なくなり骨材接点での形状が空隙に反映されるからである。次に、Table 7 に、骨材粒径の違いが空隙形状に及ぼす影響を示す。同表によれば、骨材粒径が小さいほど、

空隙の隅部がより複雑になり、空隙の幅が小さくなることが分かる。これは、Fig. 10 に示すように、骨材粒径が小さくなるほど、空隙の隅部の数が増加するためである。このことから、骨材粒径が小さい、または、全空隙率が大きいほど空隙隅部がより複雑な形状になり、空隙の幅が小さくなるといえる。

以上のように、前述した毛管半径の理論値（Table 6 参照）と画像から判断した空隙の幅の間には、ある一定の関係が見られることが分かる。

次に、自動計測された空隙面積および周囲長について考察する。Fig. 11 に、総空隙面積と全空隙率の関係を示す。同図によれば、総空隙面積は、骨材粒径によらずほぼ一定で、全空隙率が高いほど大きくなることが分かる。Fig. 12 に、空隙の周囲長と全空隙率の関係を示す。同図によれば、空隙の周囲長は、骨材粒径が小さい、または、全空隙率が大きいほど大きくなることが分かる。

Table 6 Influence of designed void ratio (Example of particle size = G8)

Designed void ratio (%)	10	30
Expansion of a part of Table 5 (1 × 1mm)		
Theoretical Capillary radius (mm)	(r = 0.50)	(r = 0.28)

Table 7 Influence of particle size (Example of designed void ratio = 20%)

Particle size	G8	G9
Expansion of a part of Table 5 (1 × 1mm)		
Theoretical Capillary radius (mm)	(r = 0.34)	(r = 0.18)

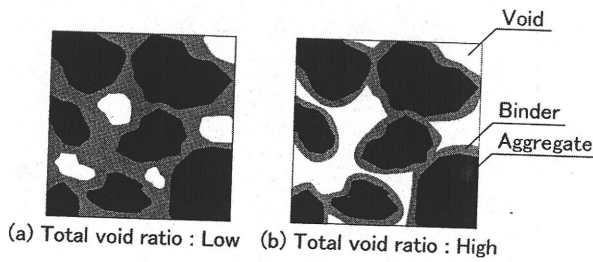


Fig. 9 Influence of total void ratio

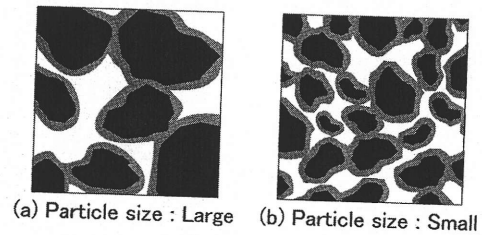


Fig. 10 Influence of particle size

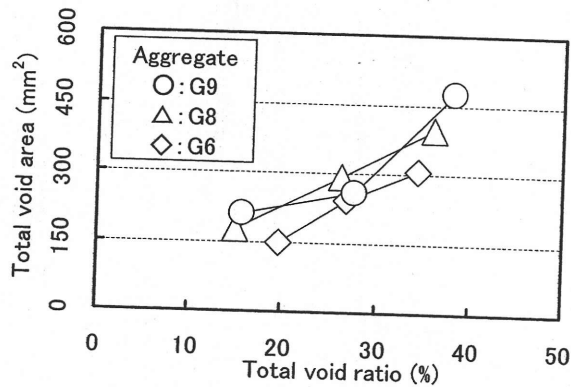


Fig. 11 Relationship between total void area and total void ratio

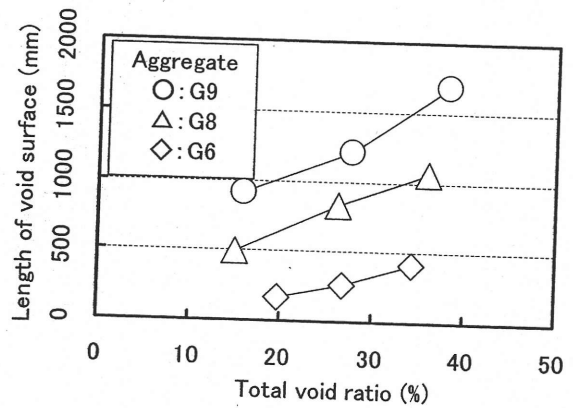


Fig. 12 Relationship between total void areas and total void ratio

Fig. 13 に、空隙の周囲長と揚水高さの実験結果との関係を示す。同図によれば、周囲長と揚水高さには比較的強い相関が見られる。これは、空隙の隅部が複雑になればなるほど（空隙の周囲長が長くなればなるほど）、空隙の幅（毛管半径）が小さくなり、毛管上昇高さが高くなるためと考えられる。

以上の結果より、小粒径 POC の揚水メカニズムは、毛管現象によってある程度説明が可能であり、揚水高さは空隙の容積の影響に比べ、空隙の形状、特に、空隙隅部の影響が支配的であることが明らかとなった。

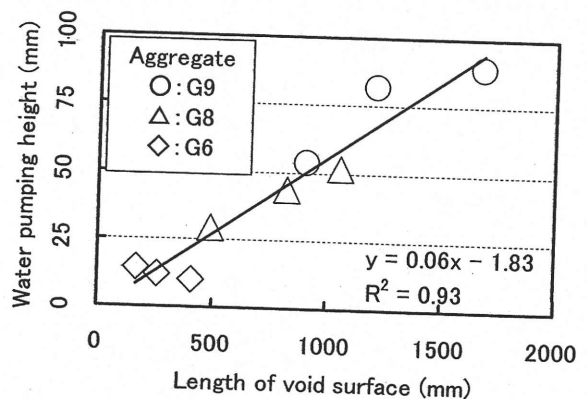


Fig. 13 Relationship between water pumping height and length of void surface

5. まとめ

本研究により、以下の知見が得られた。

- (1) 小粒径 POC の揚水メカニズムは、毛管現象によっ

である程度説明が可能であり、その揚水高さは、空隙の形状、特に、空隙隅部の影響を大きく受ける。

- (2) 小粒径 POC の揚水性能を論じる際には、表層部で観察される見かけの揚水高さではなく、揚水量と全空隙率から算出される揚水高さ（揚水平均高さ）を用いることが望ましい。
- (3) セメントペーストと水との接触角はフロー値によらず、 $10 \sim 15^\circ$ 程度である。
- (4) 小粒径 POC の断面観察によれば、全空隙率が等しい場合、断面内の総空隙面積は骨材粒径によらずほぼ一定であるが、空隙の周囲長は骨材粒径が小さいほど大きくなる。また、両者ともに全空隙率が大きいほど大きい。
- (5) 小粒径 POC 内部の空隙の周囲長と揚水高さには比較的強い相関が見られた。これは、空隙の隅部が複雑になればなるほど（空隙の周囲長が長くなればなるほど）、空隙の幅（毛管半径）が小さくなり、毛管上昇高さが高くなるためと考えられる。

謝辞：

本実験に際して、前川明弘氏（三重県科学技術振興センター工業研究部）および高井玲子さん（三重大学学生）の助力を得た。ここに、付記して謝意を表する。

参考文献：

- 1) 山本晃ほか：小粒径ポーラスコンクリートの透水・保水・揚水特性に関する研究、第 60 回セメント技術大会講演要旨、pp. 216-217 (2006)
- 2) 前川明弘ほか：小粒径ポーラスコンクリートの空隙率測定方法に関する研究、第 60 回セメント技術大会講演要旨、pp. 218-219 (2006)
- 3) 河上房義：土質力学、森北出版、pp. 41-45 (1995)
- 4) 本多健一：表面・界面工学大系 上巻 基礎編、株式会社フジ・テクノシステム、pp. 853-861 (2005)
- 5) 熊城正治ほか：図解土木講座 土質力学の基礎、技報堂出版、pp. 55-56 (1986)

THEORETICAL APPROACH ON WATER PUMPING HEIGHT IN SMALL PARTICLE SIZE POROUS CONCRETE

Shigemitsu HATANAKA*¹, Naoki MISHIMA*¹, Eisuke SAKAMOTO*² and Kwangmin PARK*¹

*1 MIE UNIVERSITY, Division of Architecture, Graduate School of Engineering (1577, Kurima machiya-cho, Tsu-shi, Mie 514-8507, Japan)

*2 MIE UNIVERSITY, Division of System Engineering, Graduate School of Engineering (1577, Kurima machiya-cho, Tsu-shi, Mie 514-8507, Japan)

ABSTRACT : It is clear that the small particle size porous concrete using small particle size crushed stone (the particle size : 0.6-1.2, 1.2-2.5mm) is considerably superior in the water pumping performance to normal particle size porous concrete. If the water pumping performance is able to be evaluated, wider application of porous concrete can be expected in the fields of e. g. greenery base and water pumping pavement, In the present paper, before evaluating the water pumping performance, water pumping mechanism was investigated based on capillary phenomenon. According to the test results, it is clear that the water pumping mechanism of small particle size POC is able to be explained to some extent by the capillary phenomenon. In other words, water pumping height is not affected by the volume of void, but the shape of void, especially, corner parts of the void.

KEY WORDS : Porous concrete, Water pumping height, Capillary phenomenon, Capillary radius, Image analysis, Total void ratio