

小粒径ポーラスコンクリートの揚水モデルに関する研究

畑中重光^{*1} 三島直生^{*1} 坂本英輔^{*2}^{*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:小粒径骨材を用いたポーラスコンクリート(以下、小粒径 POC)の揚水性能を定量的に評価できれば、緑化基盤、舗装などの揚水性能を設計段階で推測できる。前報^{1,2)}では、小粒径 POC における揚水メカニズムは毛管現象でおおよそ説明でき、揚水高さは空隙の大きさおよび空隙の形状の影響を受けることを明らかにした。本報では、まず、ガラスビーズの可視化実験を実施し、次に、揚水高さの推定モデルの提案を試みた。その結果、揚水高さに及ぼす骨材粒径の影響は、格子構造としたガラスビーズ骨材間の最大空隙半径を用いることで、また、実際の POC の揚水挙動は、直径の異なる 2 径円管モデルではほぼ推定でき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、毛管現象、揚水高さ、揚水率、ガラスビーズ、格子構造、円管モデル

1. まえがき

小さな粒径(0.6 ~ 2.5mm)の骨材を用いた小粒径 POC は、従来の POC をはるかに超える揚水性能を有している¹⁾。この揚水性能を定量的に評価できれば、緑化基盤、舗装などの揚水性能の評価を設計段階で行うことが可能となる。そこで前報²⁾では、揚水実験および画像解析による断面内の空隙特性の評価結果をもとに、小粒径 POC における揚水メカニズムが毛管現象でおおよそ説明できることを明らかにし、揚水高さは、空隙の大きさおよび空隙の形状の影響を受けることを示した。本報では、前報の結果を踏まえ、ガラスビーズを用いたモデル実験を行い、毛管現象に立脚した揚水モデルの提案を試みる。また提案モデルを用いて揚水性能に及ぼす諸要因の影響について考察するとともに、揚水性能の定量化を試みる。

2. 前報の知見

ここでは、前報^{1,2)}で得られた小粒径 POC の揚水性能に関する知見について取りまとめる。本研究で用いる揚水高さの理論式を[1]で示す^{3,4)}。

$$h = \frac{2T \cos \alpha}{\rho g r} \quad [1]$$

ここに 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)

Fig.1 に、骨材粒径の異なる POC の揚水高さの実測

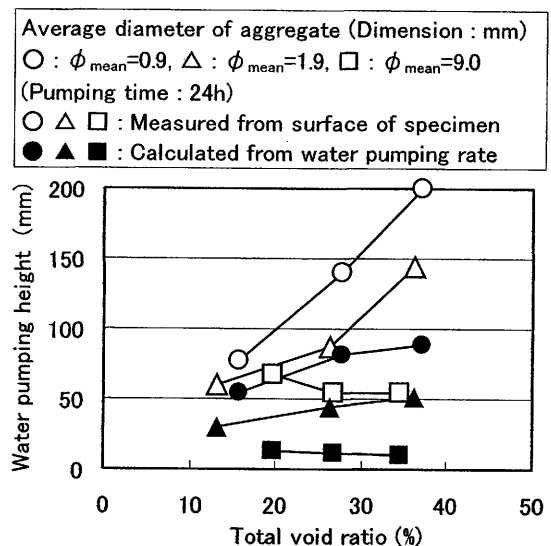


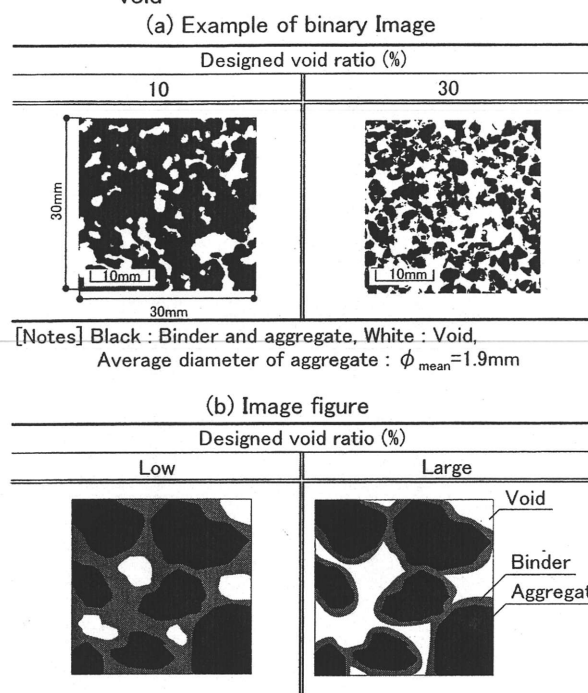
Fig.1 Relationship between water pumping height and total void ratio

結果を示す。ここでは、試験体の側面表層において揚水高さが最大および最小となる位置の平均値を側面揚水高さと呼ぶ。一方、前報²⁾と同様、試験体内の空隙分布が均一であると仮定し、揚水率から求めた揚水高さを揚水平均高さとして定義する。なお、揚水率の定義は式[2]で示される。

$$\text{揚水率} (\text{vol}\%) = \frac{\text{揚水量の容積} (\text{ml})}{\text{供試体の空隙容積} (\text{ml})} \times 100 \quad [2]$$

同図によれば、小粒径 POC の揚水高さは、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。

Table 1 Influence of designed void ratio on shape of void



揚水平均高さとして側面揚水高さの違いは、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。

Table 1 に、POC の断面の 2 値化画像の例を示す。この結果から画像処理により求めた空隙の周囲長と揚水平均高さの関係を Fig. 2 に示す。同図によれば、周囲長と揚水平均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るほど(空隙の周囲長が長くなるほど)、空隙の幅(毛管半径)が小さくなる部分が発生し、この部分の毛管上昇高さが高くなるためと考えられる。すなわち、たとえ空隙率が大きくなっても、骨材周囲の結合材の形によっては、空隙隅部が細くなり、その結果、空隙隅部の揚水高さが高くなることが考えられる。

以上の結果より、小粒径 POC の揚水メカニズムは、連続空隙内の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、主として空隙の大きさ、および空隙の形状の影響を受けることが明らかになった。

3. ガラスビーズを用いた可視化揚水モデル実験

揚水高さに影響を及ぼすと考えられる骨材粒径の影響を特に検討するため、骨材形状および空隙率(あるいは結合材量)の影響がほとんどなく、かつ実積率がほぼ等しい、粒径の異なる 5 種類のガラスビーズを用いて可視化揚水モデル実験を行い、格子構造に基づく理論式を用いて揚水高さを推定することを試みる。ここで、普通 POC との主な違いは、以下の点である。

- (1) ガラスビーズは、完全球形で粒度分布がなく、材質がガラスであること。
- (2) 結合材を使用していないこと。

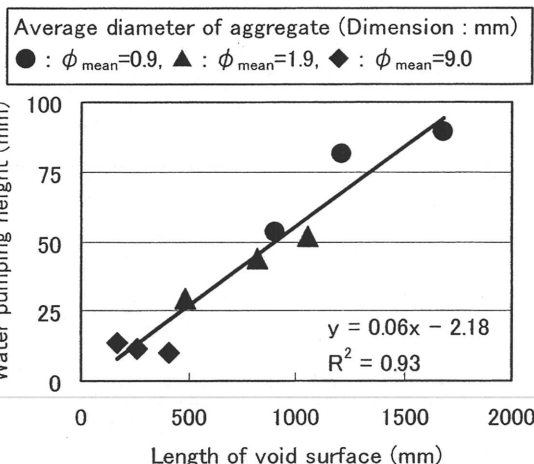


Fig. 2 Relationship between water pumping height and length of void surface

Table 2 Experimental factors and testing levels

Factor	Testing levels
Diameter of glass bead (mm)	0.4, 1.0, 2.0, 4.0, 12.0

Table 3 Materials used

Materials	Properties
Glass bead	Soda-lime glass Density: $2.5\text{g}/\text{cm}^3$
Colored water	Phthalocyanine acid (0.1wt% water) Density: $1.0\text{g}/\text{cm}^3$

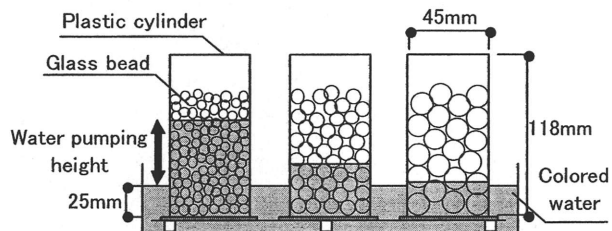


Fig. 3 Schematic drawing of visible water pumping test

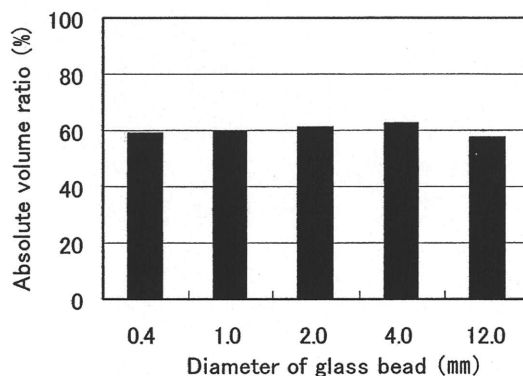


Fig. 4 Relationship between absolute volume ratio and diameter of glass bead

3.1 実験概要

Table 2 および Table 3 に実験の要因と水準および使用材料を示す。ここで、着色液は揚水高さを計測しやすくするために用いた。

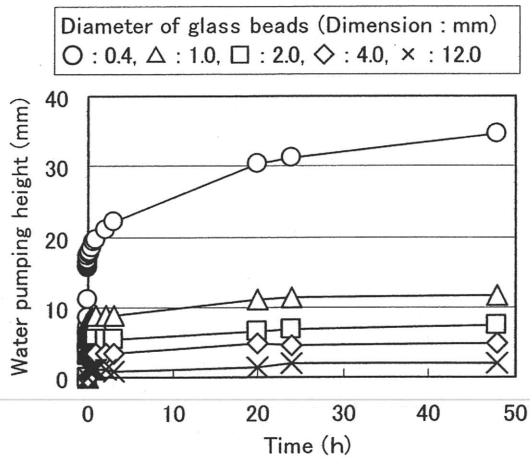


Fig. 5 Relationship between water pumping height and time

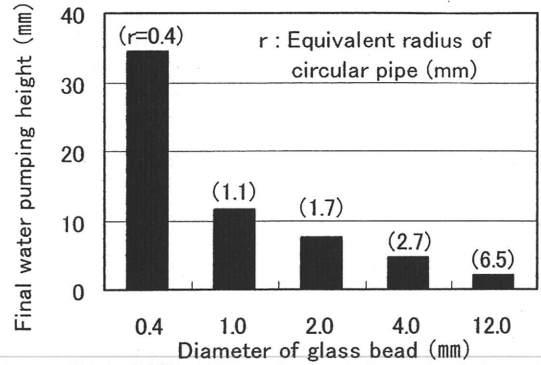


Fig. 6 Final water pumping height for each specimen

Table 4 Cubic lattice

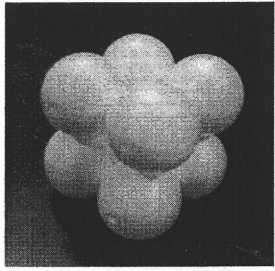
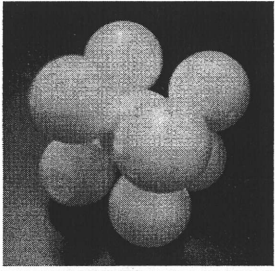
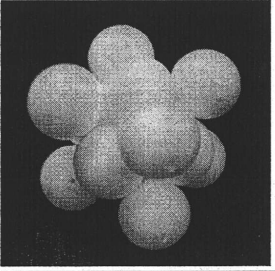
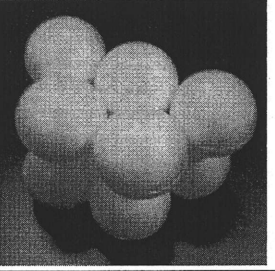
			
Simple cubic lattice	Body-centered cubic lattice	Face-centered cubic lattice	Rhombic lattice

Fig. 3 に、可視化揚水実験の概要を示す。試験体は、底に金網を付けたプラスチック製の筒を用意し、その中に、ガラスビーズを 10 回のジッキングによって充填した。揚水実験は、20 °C・RH80 %の雰囲気中で、試験体底部を着色液の入った水槽に浸漬させて行った。

測定項目は、ガラスビーズの実積率および側面揚水高さの時刻歴である。実積率は、試験体と同じ要領で詰めただけで 3 回ずつ測定し、その平均値とした。側面揚水高さは最高値と最低値の平均とした。最終側面揚水高さは、揚水速度が揚水開始 10 分間の揚水速度の 1% 以下となった時点の値とした。

3.2 実験結果および考察

Fig. 4 に、ガラスビーズの実積率の測定結果を示す。同図より、ガラスビーズの実積率は、粒径にかかわらず、ほぼ 60% 程度であった。Fig. 5 に、揚水高さの時刻歴を示す。側面揚水高さは、いずれの試験体についても、試験開始 10 分間(約 0.17h)で最終側面揚水高さの約半分に達した。Fig. 6 に、最終側面揚水高さを示す。同図によれば、粒径が小さくなるほど最終側面揚水高さが高くなる事が分かる。これは、粒径が小さいほど、粒子間に形成される空隙径(毛管半径)が小さくなるためと考えられる。なお、図中には、実験で得られた最終揚水高さと同様な揚水高さを与える円管の断面半径(r)を参考に記した。ただし、揚水高さの算出条件としてここでは、 $T=0.073N/m$ 、 $\rho=998kg/m^3$ 、 $\alpha=30^\circ$ とした。

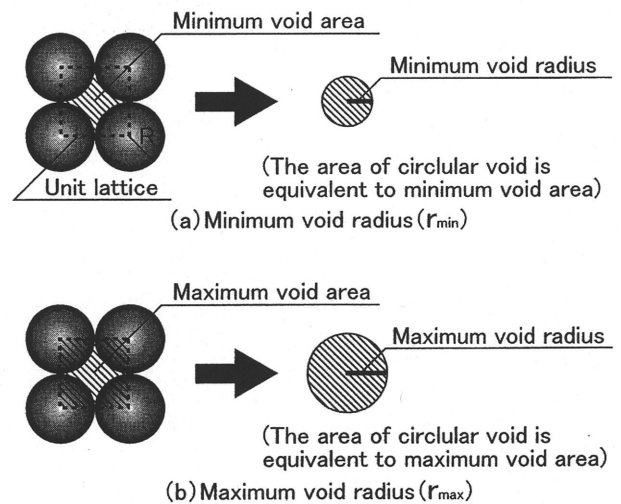


Fig. 7 Calculation method of minimum and maximum radii (Example of simple cubic lattice)

3.3 揚水高さの推定

本論文では、揚水高さの推定を行うにあたって、Table 4 に示す 4 種類の格子構造を仮定した。空隙半径の算定方法に関して、Fig. 7 に示す単純立方格子の例を用いて説明する。まず、ガラスビーズの配列を単純立方格子と仮定して、最大および最小空隙半径を求めた。ここでは、各格子において最も大きくなる空隙面積と同一面積の円の半径を最大空隙半径、最も小さくなる空隙面

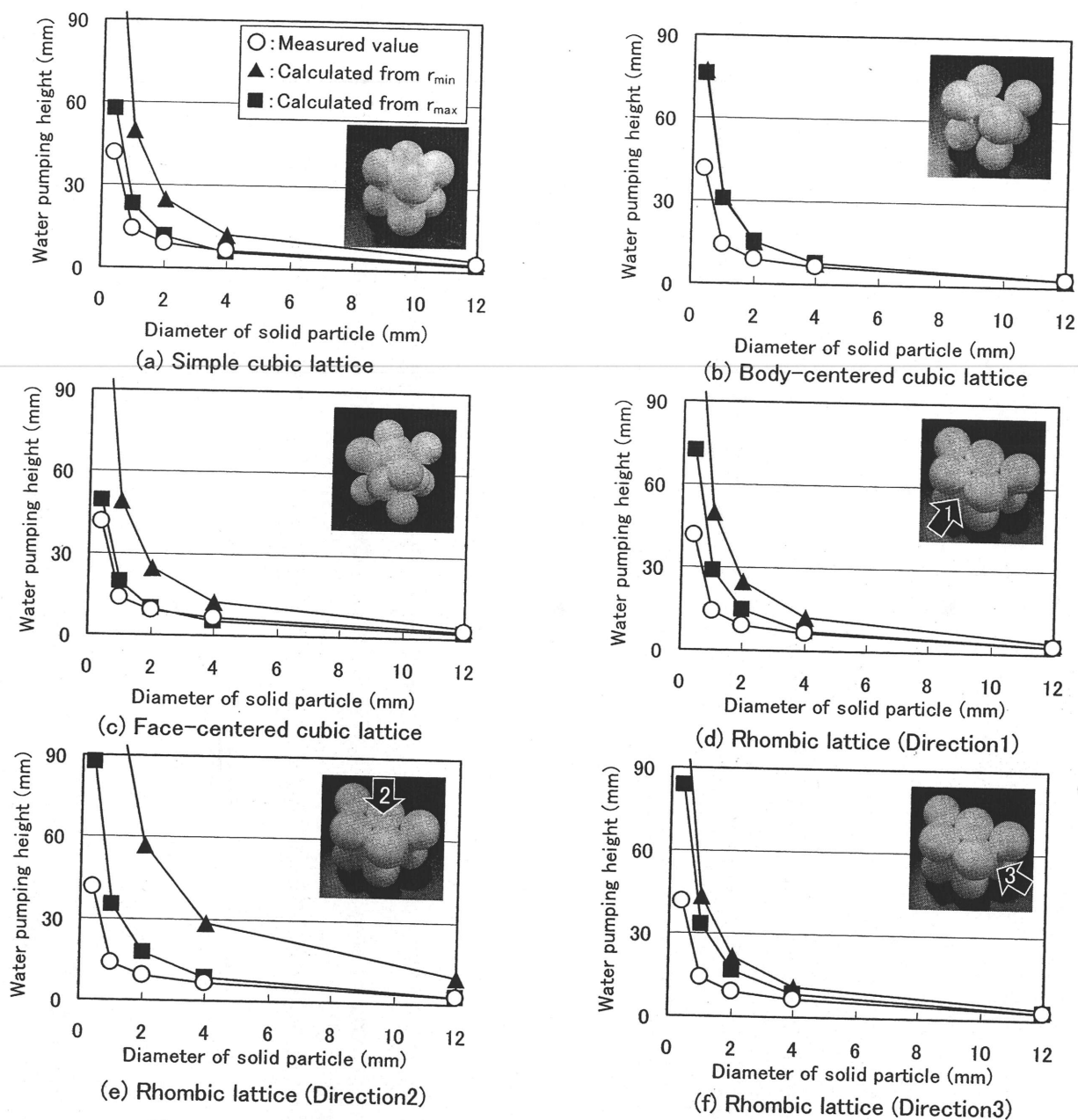


Fig. 8 Relationship between water pumping height and diameter of solid particle

積から求めた半径を最小空隙半径と定義した。揚水高さは、これらの空隙半径の円管を仮定し、前掲の式[1]を用いて計算できる。

Fig. 8(a)から(f)に、検討した格子構造(単純立方格子、体心立方格子、面心立方格子、斜方格子)における揚水高さと粒径の関係を示す。斜方格子には異方性があるため、3方向に分けて結果を示す。揚水高さの算出条件としてここでは、Fig. 6中の r の値の算出時と同様 $T=0.073\text{N/m}$ 、 $\rho=998\text{kg/m}^3$ 、 $\alpha=30^\circ$ とした。なお予備実験から、着色液を用いた揚水高さの実測値については、表面張力などの相違により、水の揚水高さの0.8倍になることが明らかになっているため補正を行った。これらの図によれば、検討したすべての格子構造に関して、最小および最大空隙径から算出した揚水高さは、定性的に実測値と一致することが分かる。また、定量的に

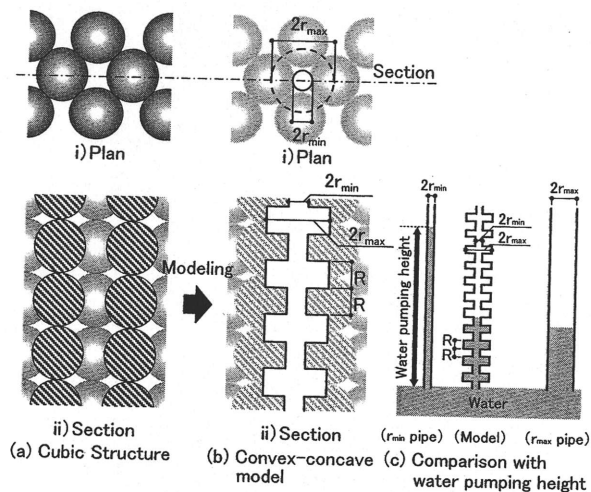


Fig. 9 Explanation of water pumping mechanism with a convex-concave pipe model

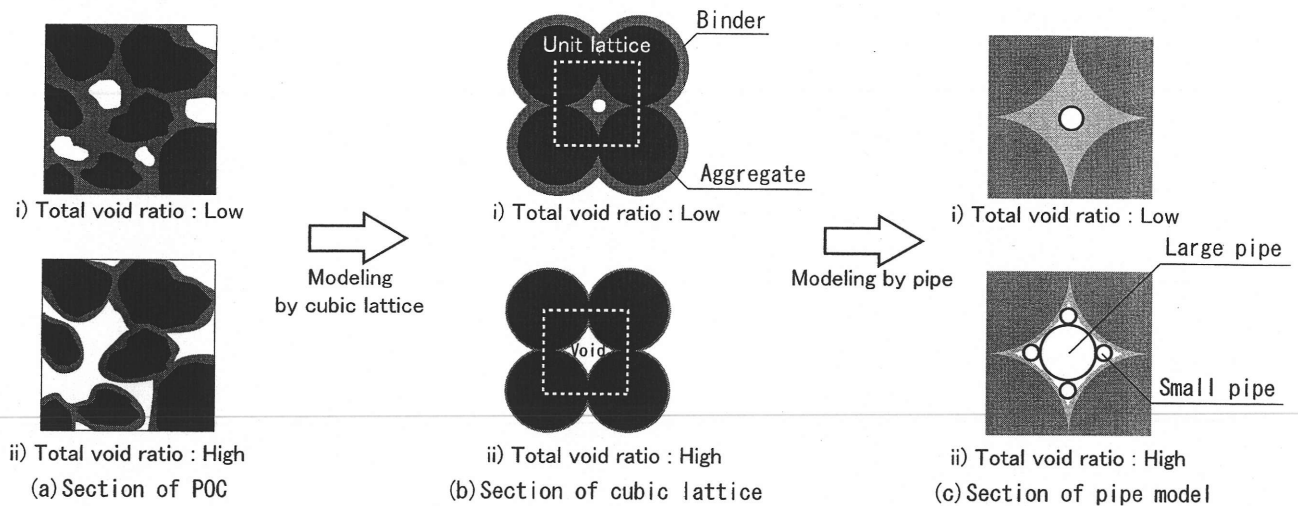


Fig. 10 Modeling of influence of total void ratio on shape of void (Example of simple cubic lattice)

は、体心立方格子の場合を除き、最小空隙半径より最大空隙半径を用いた方が実測値に近い値が得られている。

この傾向は、格子構造の立体像をイメージし、以下のようなモデルを想定することにより説明できる。Fig. 9に、その概要を示す。まず、格子構造を、最大空隙半径と最小空隙半径を持った細管が揚水方向に粒子半径の間隔で連続する凹凸細管モデルに置き換える。このような凹凸細管を仮定した場合、便宜上くびれ部分の水の重さを無視すれば、同図(c)に表したように、揚水高さはほぼ最大空隙半径で決まることになる。ただし、本モデル実験の結果は、あくまで完全球形のガラスビーズのみを骨材として用い、また結合材も存在しないという条件下で得られたものであることを付記する。

4. POC の簡易揚水モデル

実際の POC では、揚水挙動に対して、前章の可視化実験で取り挙げた骨材粒径以外に、結合材の膜厚、骨材形状、セメントペースト硬化体内部における揚水なども複合して影響していると考えられる。本章では、前報^{1,2)}の実験結果および前章のガラスビーズによる基礎実験の結果を踏まえ、実際の POC の空隙の形成状態に及ぼす結合材の影響などを考慮した揚水モデルの構築を試みる。

4.1 モデルの概念

一般に、ポラスコンクリートの調合設計において、空隙率は骨材の実積率(一定)および結合材の量により決定されており、空隙率の増加は結合材量の減少を意味する。結合材量が減少すると空隙径は大きくなり、この空隙径で側面揚水高さおよび揚水率が決定されると考えると、空隙率の増大とともに側面揚水高さおよび揚水率が低下し、実験結果と矛盾することになる^{1,2)}。この点を解決するために、Table 1 で示した空隙率の変化に伴う POC 断面の空隙形状の特徴的な変化挙動に着目する。すなわち、空隙率が大きいほど、空隙の形状が複雑になっている点をモデルに反映させることを試みる。

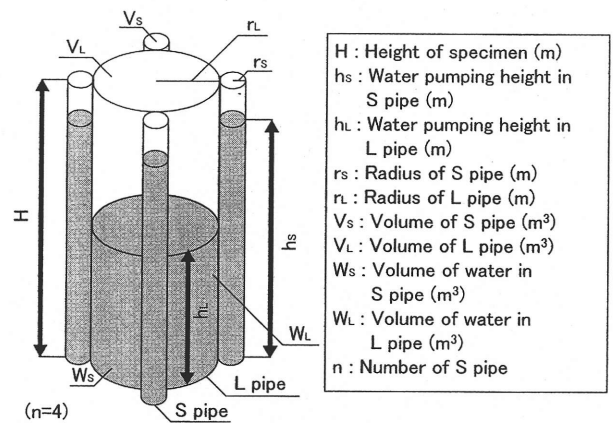
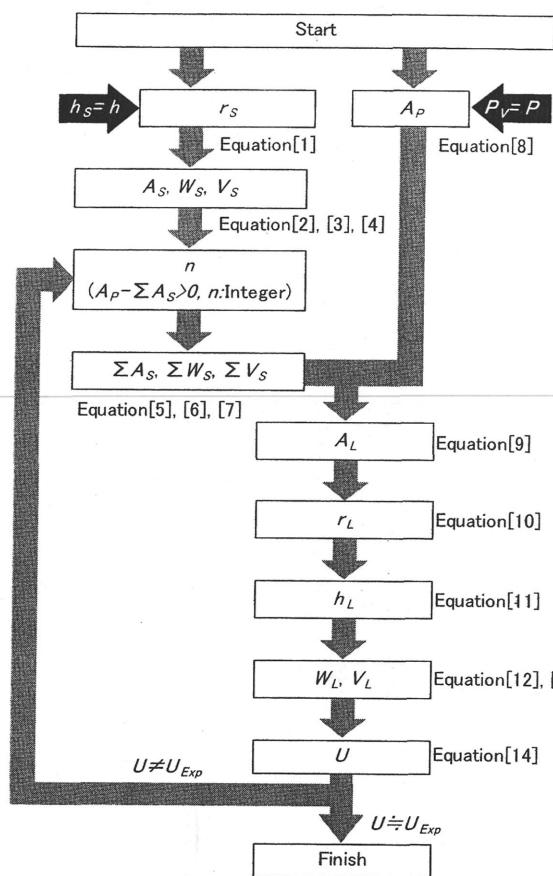


Fig. 11 2-pipes model

4.2 2 径円管モデル

本節では、前章と同様に単純立方格子を用いてモデル化の手順を示す。まず、実際の POC の骨材の配列 [Fig. 10(a) 参照] を単一粒径の単純立方格子と仮定すると、格子を水平面で切断したときの断面図は、Fig. 10(b) のようになる。同図から、空隙率が大きくなると、空隙の面積が大きくなるとともに、空隙の隅部での曲率が小さくなるのが分かる。したがって、この空隙形状をそのまま用いても、空隙率の増加に伴って揚水高さが増加するという実現象を表現することができない。そこで、Fig. 10(c) に示すように、空隙中央部を大径管(以下、L 管)、空隙の隅部を小径管(以下、S 管)で表した 2 径円管モデルを提案する。提案モデルを立体的に示すと、Fig. 11 のようになる。すなわち、本提案モデルは、以下の概念に基づいている。

- (1) POC の揚水性能は、2 径円管(S 管および L 管)モデルによって表現する。
- (2) S 管および L 管の断面積の総和は、任意の断面における空隙総面積と一致する。ここで、容積空隙率 P_V は、面積空隙率 P_A に等しいと仮定する⁵⁾。
($P_V=P_A$)



$$r_s = \frac{2T \cos \alpha}{\rho g h_s} \quad [1]$$

$$A_s = \pi \times r_s^2 \quad [2]$$

$$W_s = A_s \times h_s \quad [3]$$

$$V_s = A_s \times H \quad [4]$$

$$\sum A_s = n \times A_s \quad [5]$$

$$\sum W_s = n \times W_s \quad [6]$$

$$\sum V_s = n \times V_s \quad [7]$$

$$A_p = (2R)^2 \times \frac{P_v}{100} \quad [8]$$

$$A_L = A_p - \sum A_s \quad [9]$$

$$r_L = \sqrt{\frac{A_L}{\pi}} \quad [10]$$

$$h_L = \frac{2T \cos \alpha}{\rho g r_L} \quad [11]$$

$$W_L = A_L \times h_L \quad [12]$$

$$V_L = A_L \times H \quad [13]$$

$$U = \frac{W_s + W_L}{V_s + V_L} \times 100 \quad [14]$$

Fig. 12 Flow of each parameter and calculation

- (3) POC の側面揚水高さは S 管の揚水によって表現する。
- (4) POC の揚水量は、S 管および L 管の揚水量の総和である。

4.3 各種パラメータとその算定フロー

Fig. 12 に各パラメータの算定フローを示す。なお、求める値は、単位格子面積(断面積)あたりの値であり、格子構造は簡単のために単純立方格子と仮定する。大きな流れはおおよそ以下ようになる。

- (1) 側面揚水高さの実測値 h を S 管の揚水高さ h_s と仮定し、S 管の半径 r_s を求める。
- (2) S 管の本数(整数 $n=1, 2, \dots$)を仮定し、S 管の総揚水量 $\sum W_s$ を求める。
- (3) 容積空隙率の実測値 P から単位格子面積あたりの空隙総面積 A_p を求める。
- (4) 空隙総面積 A_p から S 管の総面積 A_s を差し引き、L 管の面積 A_L を求める。
- (5) L 管の面積 A_L から L 管の揚水高さ h_L を求める。
- (6) L 管と S 管の総揚水量を L 管と S 管の総容積で割り、揚水率 U を求める。

ただし、揚水高さの算出条件としてここでは、 $T=0.073\text{N/m}$ 、 $\rho=998\text{kg/m}^3$ 、 $\alpha=10^\circ$ とした。以下に、Fig. 12 中で使用した記号の意味をまとめて記す。

h_s : S 管の揚水高さ(m)、 h : 側面揚水高さの実測値(m)、 r_s : S 管の半径(m)、 T : 表面張力(N/m)、 α : メニスカスと細管壁

面との接触角($^\circ$)、 ρ : 液体の密度(kg/m^3)、 g : 重力加速度(m/s^2)、 A_s : S 管の面積(m^2)、 W_s : S 管の揚水量(m^3)、 V_s : S 管の容積(m^3)、 H : 試験体の高さ(m)、 $\sum A_s$: S 管の総面積(m^2)、 n : S 管の本数、 $\sum W_s$: S 管の総揚水量(m^3)、 $\sum V_s$: S 管の総容積(m^3)、 P_v : 容積空隙率(%)、 P : 容積空隙率の実測値(%)、 A_p : 空隙総面積(m^2)、 R : 骨材の半径(m)、 A_L : L 管の面積(m^2)、 r_L : L 管の半径(m)、 h_L : L 管の揚水高さ(m)、 W_L : L 管の総揚水量(m^3)、 V_L : L 管の総容積(m^3)、 U : 揚水率(%)、 U_{Exp} : 揚水率の実測値(%)

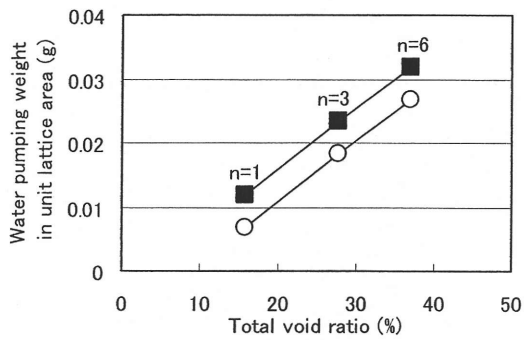
4.4 実験結果との比較

(1) 揚水量

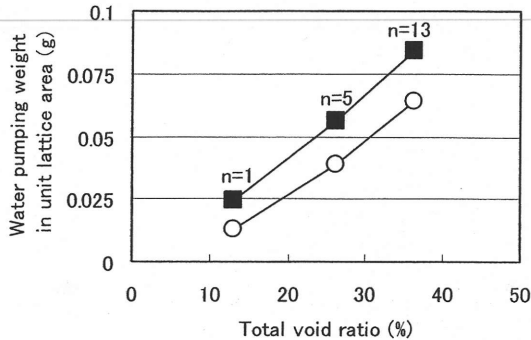
Fig. 13 に、4.3 の手順で求めた単位格子面積あたりの揚水量と実験値との比較を示す。図中には、それぞれの実験データに対する S 管の本数 n を記載してある。なお、ここでは前述の傾向、すなわち POC の全空隙率が増加するにつれて揚水量が増大する傾向を再現するように n の値を決定した。図によれば、POC の全空隙率が大きくなるほど S 管の本数 n が多くなっている。なお、S 管の本数 n が、全空隙率と骨材粒径によって増減する理由については、今後ポーラスコンクリートの内部組織の変化をより詳細に分析して議論する必要がある。

(2) 揚水率

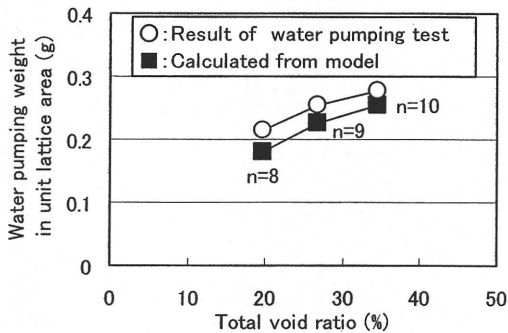
Fig. 14 に、4.3 の手順で求めた揚水率と実験値との比較を示す。Fig. 13 では、揚水量について考察したが、



(a) Average diameter of aggregate $\phi_{mean}=0.9mm$

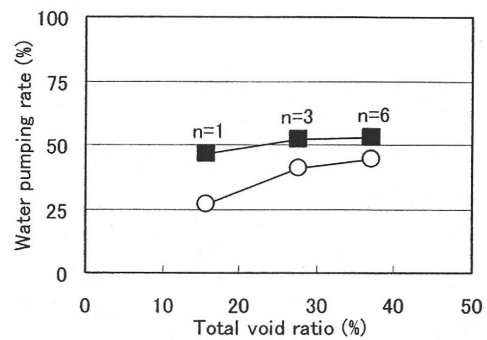


(b) Average diameter of aggregate $\phi_{mean}=1.9mm$

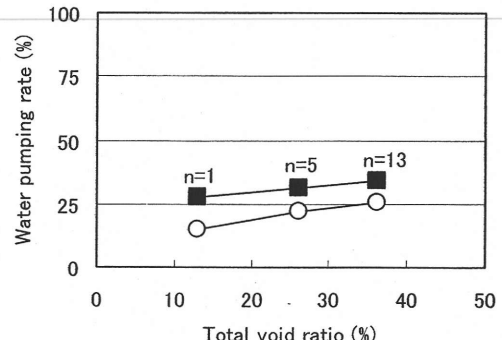


(c) Average diameter of aggregate $\phi_{mean}=9.0mm$

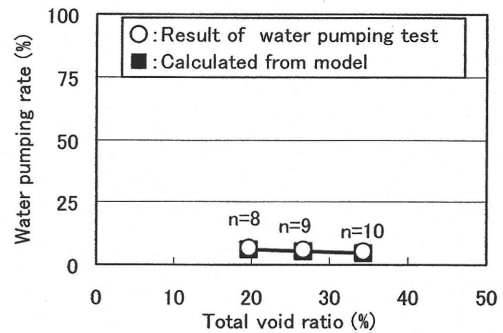
Fig. 13 Relationship between water pumping weight in unit lattice area and total void ratio



(a) Average diameter of aggregate $\phi_{mean}=0.9mm$



(b) Average diameter of aggregate $\phi_{mean}=1.9mm$



(c) Average diameter of aggregate $\phi_{mean}=9.0mm$

Fig. 14 Relationship between water pumping rate and total void ratio

Table 5 Radius of 2-pipes model

Average diameter of aggregate (mm)	Total void ratio (%)	Radius of pipe (mm)	
		S pipe	L pipe
0.9	15.8	0.19	0.07
	27.7	0.10	0.20
	37.0	0.07	0.25
1.9	13.1	0.24	0.29
	26.2	0.17	0.38
	36.1	0.10	0.51
9.0	19.7	0.22	2.17
	26.8	0.27	2.50
	34.4	0.27	2.86

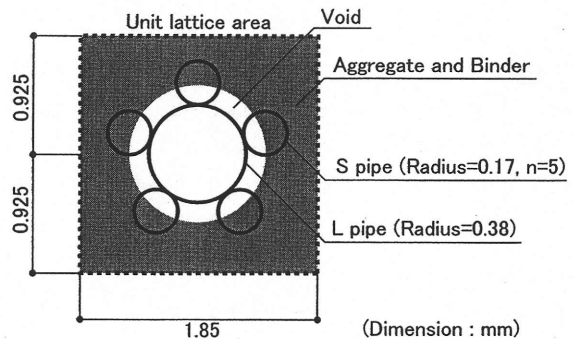


Fig. 15 Example of 2-pipes model ($\phi_{mean} = 1.9mm$, Total void ratio = 26.2%)

ここで取り扱う揚水率には、これに加えてS管とL管の総空隙量の情報が盛り込まれている。図によれば、揚水量と同様なnの値を設定すれば、POCの全空隙率の変化に伴う揚水率の傾向をほぼ表し得ることが分かる。

(3) S管およびL管の半径

Table 5に、4.3の手順で求めたS管およびL管の半径を示す。ほぼすべての試験体でL管半径がS管半径を上回っており、全空隙率が大きいほど、また骨材粒

径が大きいほどL管半径が大きくなる傾向が見られる。なお、骨材径0.9mm、総空隙率15.8%の場合は、L管半径の方がS管半径より小さくなっている。これは、粒径が細かく空隙率が小さな場合は、ほぼS管だけで、揚水高さのみならず揚水率も決定するためと解釈できる。

Fig. 15 に、上記で得られた2円管モデルの実例(骨材の平均粒径1.9mm、空隙率26.2%の場合、Table 5中に網掛けで示した。)を示す。この試験体の場合、S管半径は0.17mmであり、L管半径のおおよそ1/2になっている。

5. まとめ

本研究で得られた知見をまとめると以下ようになる。

- (1) POCの揚水高さに及ぼす骨材粒径の影響は、毛管現象の理論式において、格子構造内で仮定した最大空隙半径を用いれば実験結果をおおよそ再現できる。
- (2) 骨材粒径および空隙率の異なる実際のPOCの揚水挙動は、本報で提案した直径の異なる2径円管モデルによって実験結果の傾向を再現できる。

謝辞：

本研究の一部は、平成18、19年度科学研究費補助金・基盤(B)(研究代表者：畑中重光)によった。また、本実験に際して、Park Kwangmin君(三重大学大学院生)および高井玲子さん(三重大学卒業生)のご助力を得た。ここに、付記して謝意を表する。

参考文献：

- 1) 前川明弘ほか：小粒径ポーラスコンクリートの基礎的特性に関する実験的研究、セメント・コンクリート論文集、No.60、pp.264-270(2006)
- 2) 畑中重光ほか：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、セメント・コンクリート論文集、No.60、pp.271-278(2006)
- 3) 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)
- 4) 河上房義：土質力学、森北出版、pp.41-45(1995)
- 5) 五十嵐心一ほか：毛細管空隙の空間分布特性の定量評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.28、No.1、pp.593-598(2006)

STUDY ON MODELING OF WATER PUMPING BEHAVIOR IN SMALL PARTICLE SIZE POROUS CONCRETE

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

*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 : Wider application of porous concrete (POC), especially small particle size POC can be expected in the fields of e.g. greenery base, water pumping pavement, etc., if the water pumping performance is able to be easily predicted and evaluated. In the earlier paper, the authors already pointed out that the pumping mechanism of POC with small size aggregate can be largely explained by the capillary phenomenon, and that pumping height of water is greatly affected by both the size and the shape of air void. In the present study, the authors have carried out a visible test of pumping phenomena in a packed glass beads, then proposed a simple prediction model of water pumping. As a result, it is pointed out that the effect of size of aggregate on the pumping height of the packed glass beads can be predicted by using the maximum radius of void of a lattice structure, and that the pumping behavior of actual POC can be well predicted by the proposed 2-pipes model.

KEY WORDS : Porous concrete, Capillary phenomenon, Water pumping height, Water pumping rate, Glass beads, Lattice structure, Pipe model