

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

前川明弘^{*1} 畑中重光^{*2} 三島直生^{*2} 山本晃^{*3}

*1 三重県科学技術振興センター 工業研究部 (〒514-0819 三重県津市高茶屋 5-5-45)

*2 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)

*3 株式会社三和工務店 (〒518-0226 三重県伊賀市阿保字澤代 340-1)

要旨：本研究では、小粒径ポーラスコンクリートの強度をはじめとする各種特性の明確化と、それらの特性値に及ぼす骨材粒径の影響について検討した。骨材は粒径 0.6 ~ 1.2 及び 1.2 ~ 2.5mm の碎石とし、一般的なポーラスコンクリートとの性能を比較するために 5 ~ 13mm (6号碎石) も使用した。実験の結果、骨材粒径が圧縮強度-全空隙率関係に及ぼす影響は小さく、曲げ強度-全空隙率関係は骨材粒径が小さいほど大きくなることが確認できた。また、一般的なポーラスコンクリートと比較し、透水性能は低下するものの保水及び揚水性能は高くな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、骨材粒径、圧縮強度、曲げ強度、透水係数、保水率、揚水率

1. まえがき

著者らは、ポーラスコンクリート (以下、POC とする) 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いる。本研究では、Table 1 に示すように小粒径から大粒径まですべての POC を取り扱うため、粒径 5mm 以下の骨材を使用した場合においても統一して POC と称する。

小粒径 POC は、揚水性能に代表されるように、従来の POC を超える機能を有している³⁾ だけでなく、一般には使用されていない小粒径の碎石ダスト、溶融スラグなどの産業廃棄物や副産物の有効な利用先となることが期待できる材料である。

しかしながら、現時点では小粒径 POC の強度をはじめとする諸物性に関する検討は充分とは言えず、各種特

性に及ぼす骨材粒径の影響や従来の POC の物性値との差などについても明らかとなっていない。

そこで本報では、骨材粒径を変化させた小粒径 POC を作製し、粒径が各種特性に及ぼす影響や、従来の POC との性能比較に関する検討を行った。








2. 実験の概要

2.1 供試体の作製

(1) 使用材料

小粒径 POC で対象とする骨材粒径は、1.2 ~ 2.5mm (G8: 以下、8号碎石) 及び 0.6 ~ 1.2mm (G9: 以下、9号碎石) とした。また、一般的な POC との性能を比較するために 6号碎石 (G6: 粒径 5 ~ 13mm) を使用した POC も作製した。本実験の使用材料を Table 2 に示す。

Table 1 Location of this research with small particle size porous concrete

Classification		The object of this research		Area investigated in the past ^{1, 2)}				
								
		Small particle size porous concrete (Porous mortar ³⁾)		Porous concrete				Large particle size porous concrete
Aggregate	Particle size	0.6~1.2mm	1.2~2.5mm	2.5~5mm	5~13mm	13~20mm	20~40mm	40~400mm
	Kinds of material	Crushed fine stone, Molten fine slag		Crushed stone, Recycle aggregate				Crushed stone, Concrete rubble
Construction method		Mixing by mixer ↓ Tamping vibration / Spraying		Mixing by mixer ↓ Tamping vibration				Integration of coarse aggregate by spraying binder
Application field		Water retentive and pumping pavement ←→ Water penetration pavement ←→ Base for greenery		(Grasses) ←→				(Trees) ←→ (Fishing reef)

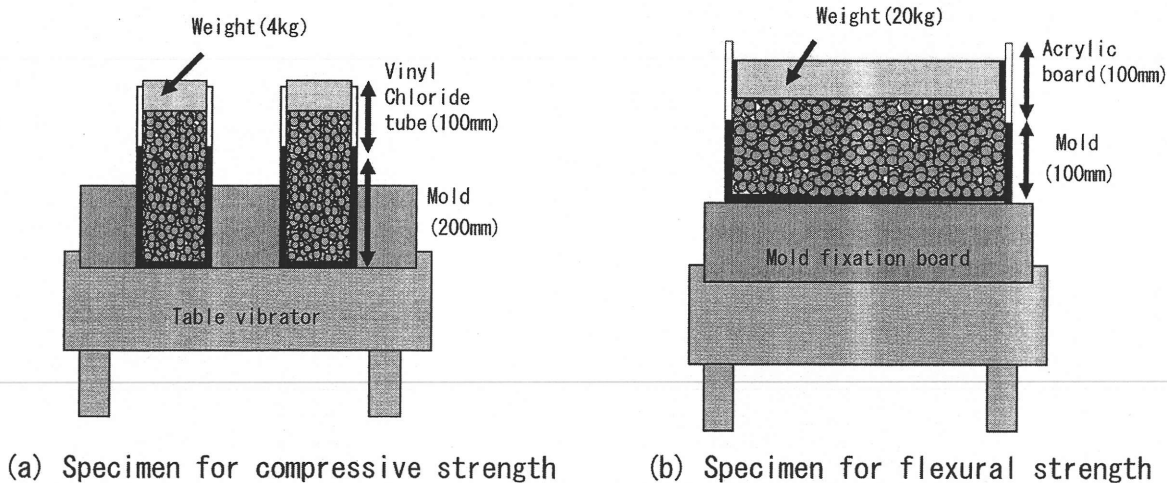


Fig. 1 Method of compaction of specimen by vibration

Table 2 Materials used

Cement	Ordinary portland cement Density : 3.16g/cm ³ , Blaine value : 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* : 2.71g/cm ³ , Water absorption : 1.04% Solid content : 52.8%
Water	General tap water
Admixtures	Air-entraining and high-range water-reducing admixture (Polycarboxylic acid)

* : in saturated surface-dry condition

(2) 製造方法

実験の要因と水準を Table 3 に示す。POC の結合材はセメントペーストとし、そのフロー値 (以下、FL) は、供試体底部に垂れが生じない値を選定した。ただし、9号砕石の場合には適切な FL が 300 を超えたため、JIS

Table 3 Experimental conditions

Factor	Level
W/C (%)	25
Aggregate	G6, G8, G9
Target void ratio (%)	10, 20, 30
Mixing	Paste premixing
Target flow value	150 (G6・Design void ratio 10%) 190 (G6・Design void ratio 20, 30%) 230 (G8) 267* (G9) * : Impact number is 0
Compaction condition	Table vibrator
Compaction time	10s
Evaluation item	Compressive strength Flexural strength Permeability, Water absorptive Pumping

R5201 に規定されるフローテーブルでの測定が不可能であった。したがって、9号砕石の FL はフローコーンを抜いた後、落下運動をさせない 0 打 FL を測定値とした。

結合材は、水及びセメントをミキサ (容量 : 30 リットル) に投入し 100rpm で 30 秒間混練した後、200rpm で 270 秒間練り混ぜた。得られた結合材に骨材を投入し、200rpm で 135 秒間練り混ぜることで POC を得た。

供試体は Φ100 × 200mm の円柱供試体と 100 × 100 × 400mm の角柱供試体とし、曲げ強度試験のみ角柱供試体を用いた。供試体の製造に際しては、Fig.1 に示すように塩ビ管などで上部 100mm を延長した型枠を、円柱では 4 本、角柱では 1 本ずつテーブルバイブレータに固定し、設計空隙率 (全空隙率) を得るのに必要な質量分の POC を投入した。

締固めは、既往の研究³⁾に準拠し、円柱では 4kg、角柱では 20kg の錘を試料上部に静置して加振した。テーブルバイブレータの振動条件は、本体及び試料の総重量約 350kg に対し、加振力を 17.4kN・10s とした。

2.2 評価項目

(1) 全空隙率の測定方法

小粒径 POC の全空隙率測定を、POC に用いられる一般的な手法¹⁾で行った場合には、誤差が生じ易く、正確な数値が得られないことが確認されている⁴⁾。

そこで本報では、供試体型枠に投入した POC の質量を練混ぜ直後の状態で計測し、その投入質量から全空隙率を算出する質量法を採用した。質量法による全空隙率測定は既報⁴⁾において検証し、その妥当性が確認されている。

(2) 圧縮強度試験

供試体端部をセメントペーストでキャッピングした後、JIS A1108 に準拠し、材齢 28 日で実施した。

(3) 曲げ強度試験

JIS A1106 に準拠し、材齢 28 日で実施した。

(4) 透水試験

一般的な POC の透水試験方法¹⁾に従い測定した。

(5) 保水試験

小粒径 POC の実施による使用では、水分はコンクリート表面のみから放出されることが予想できる。したがって、本試験では円柱供試体の側面と底部を塩ビ管とビニルシートで遮水することでこれらを再現した。遮水は供試体の水切り直後に行い、保水率は、供試体を 20℃・RH60% の恒温恒湿槽内で乾燥させた時の質量変化を測定し、式[1]を用いて算出した。なお、測定用供試体本数は 2 本とした。

$$\text{保水率 (vol\%)} = \frac{\text{供試体の空隙に存在する水分容積 (ml)}}{\text{供試体の空隙容積 (ml)}} \times 100 \quad [1]$$

(6) 揚水試験

表乾状態にした円柱供試体を、Fig. 2 に示すように、20℃・RH80% の環境で水深 10mm の定水位にした水槽に浸漬させて質量変化を測定し、式[2]を用いて揚水率を算出した。表乾状態は、供試体を 20℃・RH60% の恒温恒湿槽内で乾燥させて質量を測定し、空隙内部の水分量が恒量となった時点の状態とした。また、供試体の揚水量を計測した後は、揚水高さも計測した。揚水高さは各供試体の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。供試体本数は保水試験同様、2 本とした。

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

3. 実験結果及び考察

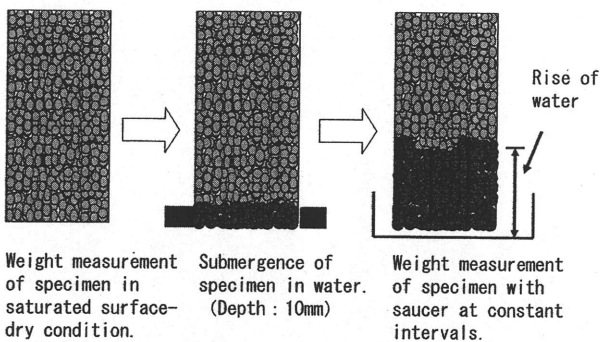


Fig. 2 Method of pumping test

3.1 強度特性

(1) 圧縮強度

圧縮強度と全空隙率との関係を Fig. 3 に示す。同図には、結合材ペースト強度を全空隙率 0% の強度として示した⁵⁾。また、設計空隙率(全空隙率)は実測空隙率(全空隙率)と異なるため破線で示した。Fig. 3 より、小粒径 POC の圧縮強度と全空隙率の関係には普通粒径の POC と同様に高い相関関係があり、また、小粒径 POC では、骨材粒径が圧縮強度に及ぼす影響は小さいことが確認できた。既往の研究によれば、骨材粒径が圧縮強度

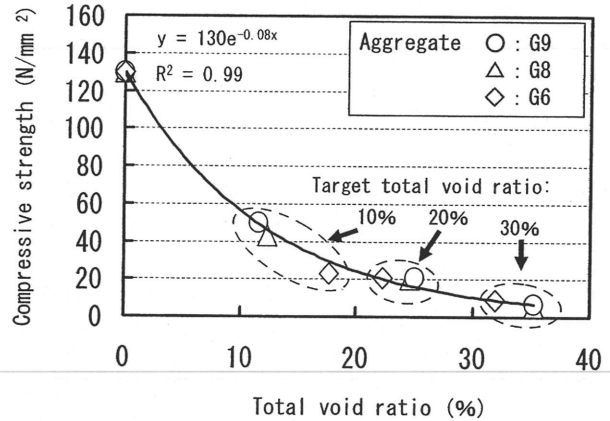


Fig. 3 Relationship between compressive strength and total void ratio

に及ぼす影響は小さいとする報告⁶⁾、骨材粒径が小さいほど骨材の接点数が増え圧縮強度が大きくなるとする報告⁷⁾、逆に、骨材粒径が大きいほど結合材の垂れにより骨材接点部分が補強され圧縮強度が大きくなるとする報告⁸⁾があり統一した結論は得られていない。本実験では骨材粒径による影響は小さいという結果となった。その理由として、骨材が小径化されることで均質性は高くなるが、結合材厚さは薄くなるという正負の要因が混在することが考えられる。

(2) 曲げ強度

曲げ強度と全空隙率との関係を Fig. 4 に示す。同図には、圧縮強度と同様に、結合材ペーストの曲げ強度を全空隙率 0% の曲げ強度として示した。

Fig. 4 より、小粒径ポーラスコンクリートの曲げ強度と全空隙率の関係は、圧縮強度とほぼ同様であり、全空隙率が小さくなると曲げ強度は曲線的に大きくなることが確認できた。骨材粒径の影響としては、骨材粒径が小さくなるほど曲げ強度-全空隙率の関係は上方にシフトすることが確認できた。この傾向は、既往の研究結果⁹⁾にも一致している。上記は、骨材粒径が大きくなった場

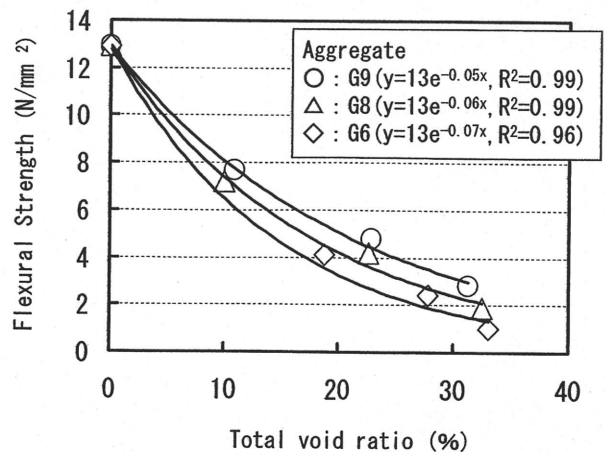


Fig. 4 Relationship between flexural strength and total void ratio

合には上下の骨材接点がそれぞれ上下縁から離れることになるため、供試体断面の有効せいが相対的に小さくなること、断面の不均一性が増し、応力やひずみの集中が起りやすくなるなどの理由によると推察される。なお、大粒径 POC では、この傾向がとくに顕著になることが確認されている¹⁰⁾。

また、小粒径 POC の曲げ強度は、全空隙率 20% 程度であれば、8 号碎石、9 号碎石ともに歩道の曲げ強度の規格値である $3.0\text{N}/\text{mm}^2$ をクリアしている。

3.2 透水性

透水係数と全空隙率との関係を Fig.5 に示す。ここで、縦軸は対数目盛とした。Fig.5 より、小粒径 POC の透水係数は $0.001 \sim 1.0\text{cm}/\text{s}$ 程度と一般的な POC の数値より小さく、骨材粒径が小さい程小さくなることを確認できた。小粒径 POC を透水性舗装の分野で使用する場合には、透水性アスファルト舗装の透水係数の下限値である $0.01\text{cm}/\text{s}$ を超える必要がある。本実験では 8 号及び 9 号碎石を使用した場合、全空隙率が約 20% 以下の時に上記の数値を下回る結果となった。したがって、小粒径 POC の透水係数は、骨材粒径や全空隙率などを制御すれば、透水性アスファルト舗装の下限値をクリアできることが確認できた。

また、透水係数の測定時において、9 号碎石・設計空

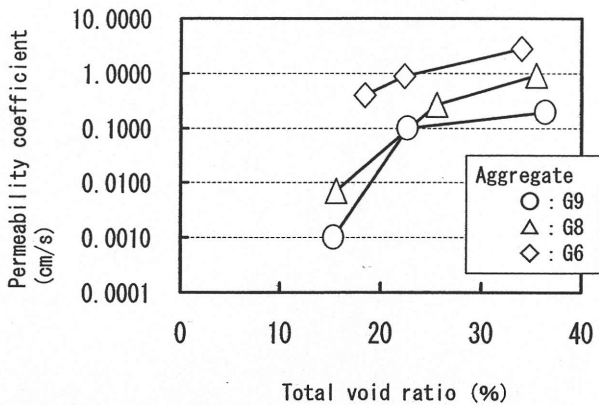


Fig. 5 Relationship between permeability coefficient and total void ratio

隙率 (全空隙率) 10% の供試体では時間の経過とともに越流量が減少していくことを確認した。そこで、9 号碎石・設計空隙率 (全空隙率) 10% 及び 20% と 8 号碎石・設計空隙率 (全空隙率) 10% の 3 供試体を用いて越流量の経時変化を確認した (Fig. 6)。一回の採取時間は 60 秒とし、同図には供試体の実測空隙率 (全空隙率) も示した。Fig. 6 より、9 号碎石・実測空隙率 (全空隙率) 15.7% の供試体のみが時間経過と共に越流量が減少し最終的にはほぼ 0g となった。越流量が減少した原因は現時点では明確にできていないが、供試体内部の空隙径が小さいために時間経過に伴い流水中または供試体内部に残留している空気泡が移動し除々に詰まることで最終的に透水を妨げたのではないかと推察した。以上のことが

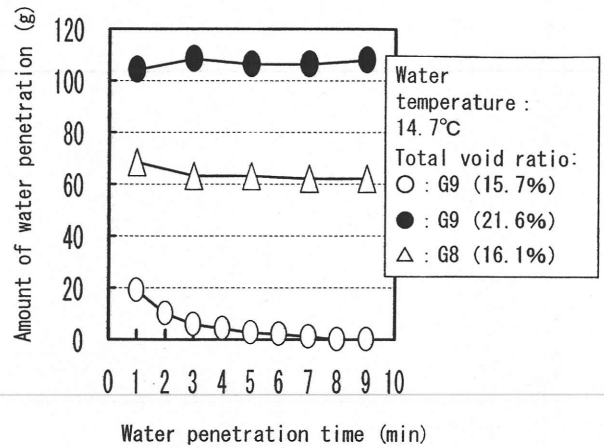


Fig. 6 Relationship between amount of water penetration and water penetration time

ら、全空隙率が小さい小粒径 POC の透水試験では、空隙の閉塞による影響を受ける可能性があると言える。

3.3 保水性

供試体を上面のみから乾燥させた場合の保水率と乾燥時間との関係の例 [設計空隙率 (全空隙率) 20%] を Fig. 7 に示す。Fig. 7 によれば、すべての供試体において乾燥開始後 24 時間で保水率は大幅に低下した。この傾向は他の設計空隙率 (全空隙率) の場合においても同様であった。また、骨材粒径では 9 号碎石、8 号碎石、6 号碎石の順に保水率が高く、特に 9 号碎石を用いた小粒径 POC は 10 日間 (240h) 程度であれば、他の POC と比較し高い保水率を維持できることが確認できた。

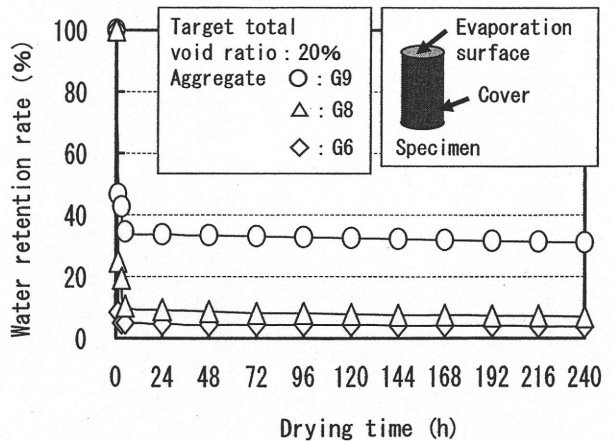


Fig. 7 Relationship between water retention rate and drying time [20 °C, RH60 %]

Fig. 8 に保水率と全空隙率との関係を示す。日本における日降水量 10mm 以上の年間降雨日数は 50 日程度¹¹⁾ で 7 日に 1 回程度は雨が降ることになるため、同図では、乾燥時間 168 時間後の結果を採用し比較した。Fig. 8 によれば、設計空隙率 (全空隙率) 20%、30% の場合、8 号碎石と 6 号碎石の保水性能にそれほど大きな差は認められないものの、保水率は骨材粒径及び全空隙率が小さくなるほど高い傾向となる。また、小粒径 POC は、6 号碎

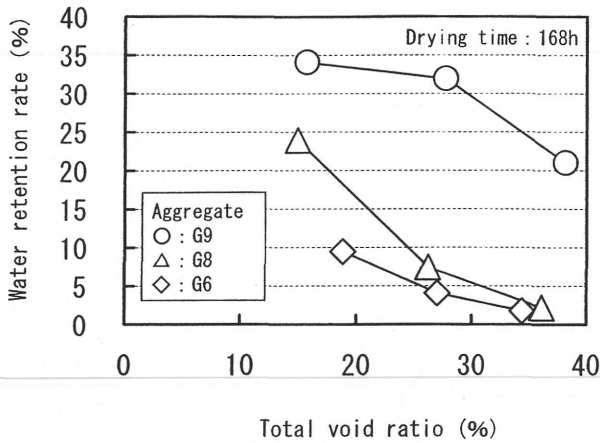


Fig. 8 Relationship between water retention rate and total void ratio

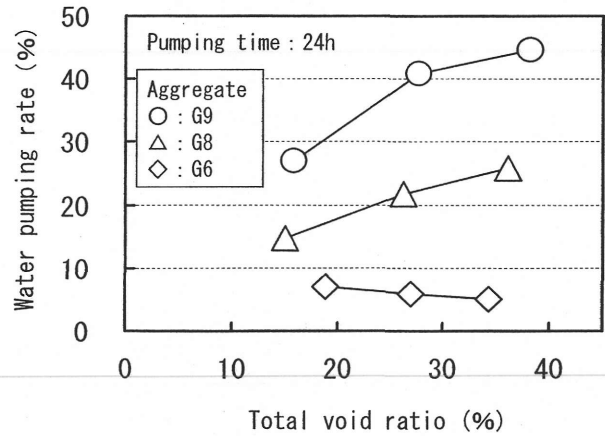


Fig. 10 Relationship between water pumping rate and total void ratio

石を用いた一般的な POC を上回る保水性能を有し、9 号碎石を使用した場合には、保水率 20% 以上を 7 日以上 の長期間維持できることが確認できた。

3.4 揚水性

揚水率と浸漬時間との関係の一例[設計空隙率(全空隙率) 20%]を Fig. 9 に、全空隙率との関係の一例(浸漬時間 24h)を Fig. 10 に示す。Fig. 9 より、揚水率は浸漬時間 1 時間で急激に増加し、その後 24 時間までに能力の 9 割以上を揚水する事が確認できた。上記の傾向は設計空隙率(全空隙率)にかかわらず同様となり、すべての条件で浸漬 144 時間後にはほぼ一定となった。

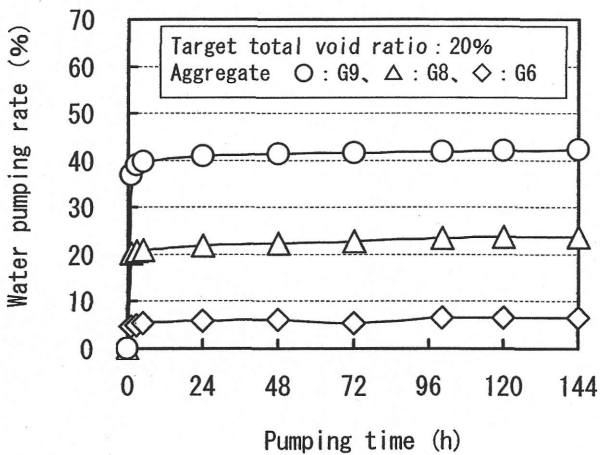


Fig. 9 Relationship between water pumping rate and pumping time [20 °C , RH80 %]

Fig. 10 より、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傾向が認められ、特に、9 号碎石を用いた場合には全空隙率 15% 以上で揚水率が 25% を超える数値を示した。一方、6 号碎石を用いた場合については、全空隙率が大きくなるほど揚水率が若干低下し、全ての供試体で 10% を下回る低いものであった。

次に、揚水高さの計測結果を Fig. 11 に、計測時の供

試体の状況の一例を Photo. 1 に示す。

Fig. 11 より、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大きくなったが、6 号碎石を用いた普通粒径 POC においては上記のような傾向は現れなかった。ここで、Fig. 10 と Fig. 11 を比較すると、小粒径 POC の揚水高さは揚水率が高い供試

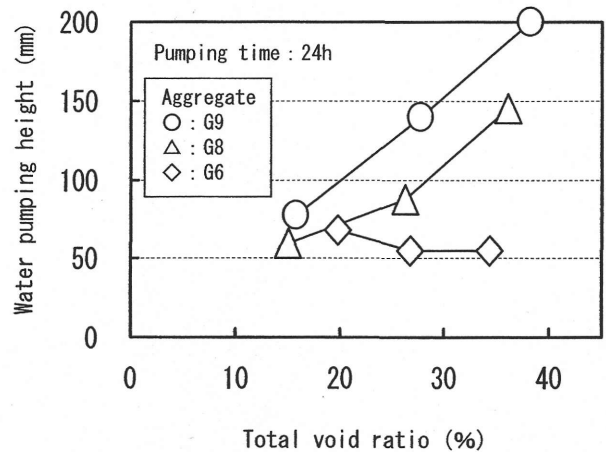


Fig. 11 Relationship between water pumping height and total void ratio

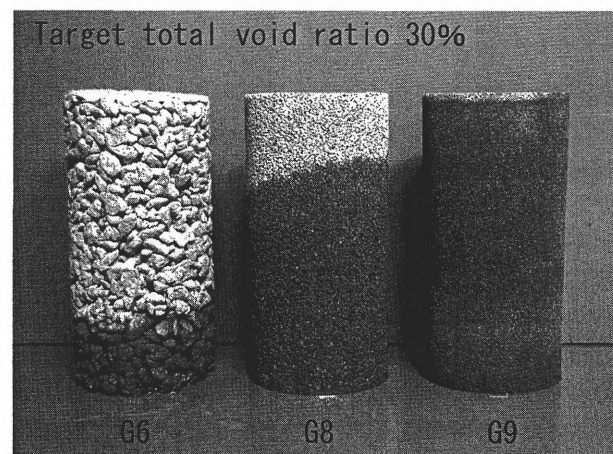


Photo. 1 Example of specimens during pumping test (After 24hours)

体ほど高くなることが確認できた。POC の揚水は、内部の連続空隙による揚水と結合材表面を水が浸透する揚水に区分できると考えられる。6号砕石を用いた普通粒径 POC の場合には、内部の連続空隙による揚水能力は低く、外観から判断される揚水高さには、結合材表面を浸透する水の影響が大きいものと思われる。

以上の結果より、小粒径 POC は従来の POC を上回る揚水性能を有することが確認できた。その能力は骨材粒径が小さい、または全空隙率が大きくなるほど高くなることが明らかとなった。

4. まとめ

本研究により、小粒径 POC に関して下記に示す知見が得られた。

- (1) 小粒径 POC の圧縮強度は全空隙率との相関が高く、骨材粒径による影響は小さい。また、曲げ強度は、骨材粒径が小さくなるほど大きくなる。
- (2) 透水係数は 0.001 ~ 1.0cm/s 程度で一般的な POC の数値より小さく、骨材粒径が小さいほど小さい値となった。しかしながら、骨材粒径や全空隙率などを制御すれば透水性アスファルト舗装の下限値である 0.01cm/s をクリアできる。
- (3) 保水率は骨材粒径が小さいほど大きく、特に、9号砕石を使用した場合には 20% 以上の数値を長期間維持できることが確認できた。
- (4) 揚水率は骨材粒径が小さいほど大きく、浸漬時間 24 時間で能力の 90% 以上を揚水した。特に、9号砕石を使用した場合には全空隙率 15% 以上で 25% を超える揚水率を示した。

今後、小粒径 POC の内部空隙構造を分析し、各種の性能、特に、揚水性能の発現メカニズムについて定量的検討を行う予定である。

謝辞：

本研究では、株式会社大栄工業 川岡孝督氏、山本健次氏、吉永明弘氏、株式会社三和工務店 飯田諒氏、三重県科学技術振興センター工業研究部 湯浅幸久氏のご助力を得た。ここに、付記して謝意を表します。

参考文献：

- 1) 日本コンクリート工学協会：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委員会報告書 (2003)
- 2) 前川明弘ほか：リサイクル型大粒径ポーラスコンクリートの製造および魚礁としての適用性に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文集、第 589 号、pp. 43-48 (2005)
- 3) 梶尾聡、宇治公隆、國府勝郎：ポーラスモルタルの配合設計法と保水特性に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No. 59、pp. 210-217 (2005)
- 4) 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)
- 5) 湯浅幸久ほか：ポーラスコンクリートの振動締めに関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、第 552 号、pp. 37-44 (2002)
- 6) 大谷俊浩ほか：ポーラスコンクリートの圧縮強度特性に及ぼす影響因子に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 585 号、pp. 31-37 (2004)
- 7) 中澤隆雄、ZOUAGHIA、今井富士夫：ポーラスコンクリートの配合が透水性および強度に及ぼす影響、セメント・コンクリート論文集、No. 50、pp. 382-387 (1996)
- 8) 畑中重光、三島直生、湯浅幸久：ポーラスコンクリートの圧縮強度 - 空隙率関係に及ぼす結合材強度および粗骨材粒径の影響に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、第 594 号、pp. 17-23 (2005)
- 9) 大谷俊浩ほか：ポーラスコンクリートの力学特性に及ぼす骨材粒径の影響に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 403-404 (2004)
- 10) 前川明弘ほか：大粒径ポーラスコンクリートの曲げ破壊性状に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 27、No. 1、pp. 1273-1278 (2005)
- 11) 国立天文台編：理科年表、pp. 226-227 (1995)

EXPERIMENTAL STUDY ON FUNDAMENTAL PROPERTIES OF SMALL PARTICLE SIZE POROUS CONCRETE

Akihiro MAEGAWA^{*1}, Shigemitsu HATANAKA^{*2}, Naoki MISHIMA^{*2}
and Akira YAMAMOTO^{*3}

- *1 MIE PREFECTURE SCIENCE AND TECHNOLOGY PROMOTION CENTER, Industrial Research Division (5-5-45, Takachaya, Tsu-shi, Mie 514-0819, Japan)
- *2 MIE UNIVERSITY, Graduate School of Engineering, Division of Architecture (1577, Kurima machiya-cyo, Tsu-shi, Mie 514-8507, Japan)
- *3 SANWA CONSTRUCTION COMPANY (340-1, Aza-aho sawadai, Nabari-shi, Mie 518-0226, Japan)

ABSTRACT : In the present research, the influence of aggregate size on various characteristics (strength, permeability, water retention and water pumping) of the small particle size porous concrete was examined. Small particle size porous concrete using small size crushed stone (particle size : 0.6-1.2, 1.2-2.5mm) was compared with normal particle size porous concrete using No.6 crushed stone (5-13mm). According to the test results, compressive strength of porous concrete was not influenced so much by the aggregate size, while flexural strength became higher by decreasing particle size. Also, it was shown that small particle size porous concrete was superior in water retention and pumping, compared to normal particle size porous concrete. It should be noted, however, that permeability of the small particle size porous concrete was rather low.

KEY WORDS : Porous concrete, Particle size of aggregate, Compressive strength, Flexural strength, Permeability coefficient, Water retention rate, Water pumping rate