

# 論文 実施工における振動締固めがポーラスコンクリートの空隙率および諸特性に与える影響

森鼻 泰大\*1・中川 武志\*2・三島 直生\*3・畑中 重光\*4

**要旨：**筆者らは、既に実施工におけるポーラスコンクリート（以下、POC と略記）の施工を比較的容易に行える POC 仕上げ機を試作したが、締固め性能に関する定量的な評価は課題として残されていた。そこで、複数の起振力の異なる POC 仕上げ機を用い、設計空隙率および通過回数（加振時間）を要因とする実験を行った結果、空隙率/設計空隙率の値は、POC 仕上げ機および設計空隙率によらず振動締固めエネルギーと比較的高い線形の相関があること、POC 仕上げ機の起振力が 4.9 kN の場合は振動締固めエネルギーを約 8 kN・m/m<sup>2</sup> 程度与えることでほぼ設計上の空隙率が得られることなどがわかった。

**キーワード：**ポーラスコンクリート, 実施工, 品質管理, 空隙率, 振動締固めエネルギー

## 1. はじめに

ポーラスコンクリート（以下、POC と略記する）は普通コンクリートでは実現不可能であった優れた透水性などの機能を有しており、今日、世界的に危惧されている地球環境問題などに対処するうえで、有効な材料になると予想される。POC の優れた透水性に着目し、POC を用いた透水性舗装あるいは排水性舗装などの施工例（写真-1<sup>1)</sup> 参照）も比較的多く見られるようになってきた。

現場打ち POC の場合、敷均し後に締固め（または仕上げ）を行うことが一般的であるが、POC は締固めの程度により空隙率が変化し、これにより透水性や強度といった物理特性が影響を受ける。すなわち、所定の品質（主に空隙率）を得るためには、締固めの程度を施工前に決定する必要がある。しかし、現在、実施工における締固めとその結果として得られる空隙率との関係は明らかとなっておらず、施工者は過去の実績をもとにした締固めを行わざるを得ない状況にある。また、比較的小規模な現場打ち POC を施工する際には、路盤やアスファルト舗装用の振動ローラや振動コンパクタが一般に用いられているが、局所的に大きな振動エネルギーが与えられてしまうために、POC 表面の不陸の発生や、結合材の脱落による表層の脆弱化および底部空隙の閉塞といった問題が発生することが多い。アスファルトと異なり POC では、不陸が発生した後に表層に少量のフレッシュ POC を追加して均したとしても、界面が形成されることで欠陥部が発生したり、振動過多となって、結合材の脱落が助長されるなど、その補修は困難なものとなる。

これに対して本研究では、既報<sup>2)</sup>において、振動コンパクタの転圧板を拡幅することにより表層に不陸が発



写真-1 POC を用いた透水性舗装の施工例<sup>1)</sup>



写真-2 POC 仕上げ機

生しにくく、比較的容易に締固めを行える POC 仕上げ機を試作した。写真-2 に、POC 仕上げ機を示す。既報<sup>2)</sup>においては、1 種類の POC 仕上げ機に対して、その通過回数と締固め程度に関する基礎的な結果が得られてい

\*1 株式会社大林組（正会員）

\*2（株）ファイナルマーケット 代表取締役 博士(工学)（正会員）

\*3 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻 准教授 博士(工学)（正会員）

\*4 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻 教授 工博（正会員）



(a) M1 : 2.8kN (b) M2 : 4.9kN (c) M3 : 7.0kN

写真-3 POC 仕上げ機 (数値は起振力を示す)

表-1 本実験で使用する POC 仕上げ機の諸元

	M1	M2	M3
概観	(a)	(b)	(c)
重量 (kg) * <sup>1</sup>	46.2	43.0	61.0
転圧盤面積 (m <sup>2</sup> ) * <sup>1</sup>	0.15	0.17	0.18
起振力 (kN) * <sup>1</sup>	2.8	4.9	7.0
振動数 (Hz) * <sup>2</sup>	91.7	91.7	106.0
振幅 (mm) * <sup>3</sup>	0.18	0.34	0.26
1 回通過に要する時間 (sec) * <sup>1</sup>	3.0	1.8	2.0
1 秒あたりの振動締固めエネルギー (N・m/m <sup>2</sup> ) * <sup>3</sup>	411	1096	1281

注) \*<sup>1</sup>: 実測値, \*<sup>2</sup>: カタログ値, \*<sup>3</sup>: 理論値

るが、POC 仕上げ機の性能の違いに関しては現時点では不明であった。そこで本報では、起振力の異なる複数の POC 仕上げ機を用いた実験により、締固め性能に関する定量的な評価を行うとともに、既往の研究<sup>3)</sup>で提案されている振動締固めエネルギーの考え方を導入することにより、より汎用的な評価を試みる。

## 2. 実験概要

以下、空隙率とは実際に施工された POC スラブの全空隙率を、設計空隙率とは JIS A 1104 の方法に準拠した方法で算出した粗骨材の実積率を用いて算出した設計空隙率を意味する。

### 2.1 POC 仕上げ機の諸元

本実験では、既報<sup>2)</sup>で試作した POC 仕上げ機(起振力: 4.9 kN, 以下、M2 と称する)に加えて、起振力 2.8 kN のもの(以下、M1 と称する)と起振力 7.0 kN のもの(以下、M3 と称する)を新たに試作した(写真-3を参照)。なお、改造前の振動コンパクタの選定にあたっては、運搬性や施工性を考慮して 60kg 以下の比較的小型のものを選択した。表-1に、本実験で使用する POC 仕上げ機の諸元を示す。なお、振動締固めエネルギーは谷本の式を表面振動機に適用した修正式<sup>3)</sup>を用いた。式(1)および(2)に、振動締固めエネルギーの算出に用いた式を示す。

表-2 要因と水準

要因	水準
設計空隙率 (%)	20, 25, 30
POC 仕上げ機	M1 : 起振力 2.8kN M2 : 起振力 4.9kN M3 : 起振力 7.0kN
仕上げ機の通過回数(回)	0, 1, 2, 4

注) ・水セメント比 : 45%  
・下線 : 基本水準  
・通過回数 0 回 : 仕上げなし(軽盛り)

表-3 使用材料の種類と特性値

材料	種類と特性値
水	水道水
セメント	普通ポルトランドセメント 密度 : 3.15g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 : 3150cm <sup>2</sup> /g
粗骨材	単粒度砕石 6号 (5-13mm) 三重県伊賀市真泥字東山産 表乾密度 : 2.696g/cm <sup>3</sup> JIS 実積率 * <sup>1</sup> : 58.6%, 軽盛り実積率 : 52.1%

注) \*<sup>1</sup>: JIS A 1104 に準拠した方法で算出した実積率

表-4 標準調合表

設計空隙率 (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )		
		C	W	G
20	45	279	125	1573
25	45	214	96	1573
30	45	149	67	1573

$$E = 2a(W + F/2)n \cdot t \cdot 1/S \quad (1)$$

$$a = \frac{F/m}{\omega^2} = \frac{F/m}{(2\pi n)^2} \quad (2)$$

ここに、E: 振動締固めエネルギー(N・m/m<sup>2</sup>)、a: 振幅(m)、n: 振動数(1/sec)、W: 振動機の重量(N)、S: 加圧面積(m<sup>2</sup>)、F: 起振力(N)、t: 締固め時間(sec)、m: 振動機の質量(kg)、 $\omega$ : 角振動数(rad/sec)

### 2.2 要因と水準および使用材料

表-2 に要因と水準を、表-3 に使用材料の種類と特性値を示す。設計空隙率は 3 水準とし、POC 仕上げ機を変更することで起振力を変化させた。通過回数とは、POC 仕上げ機が通過する回数の中で、POC 仕上げ機の種類によって 1 回の通過に約 1.8~3.0 秒を要する。なお、通過回数 0 回とは仕上げなし(軽盛り)の状態、すなわち敷き均したままの状態のことである。使用材料は既報<sup>2)</sup>と同様とした。



写真-4 POCの練混ぜの様子



写真-6 POC仕上げ機(M3)による締固めの様子



写真-5 POC敷均し機による敷均しの様子

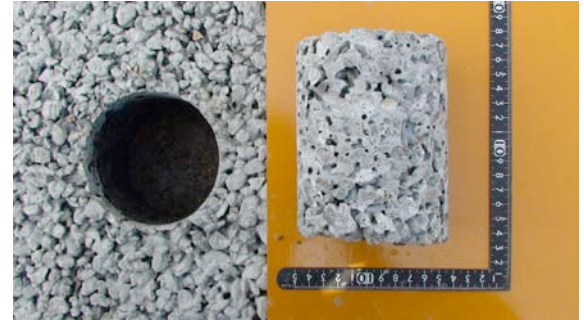


写真-7 コア抜き後のスラブとコア供試体の様子

### 2.3 調合表および練混ぜ

表-4 に、標準調合表を示す。水セメント比は既報<sup>2)</sup>と同様に45%で一定とし、セメントペースト容積を変化させることで設計空隙率を変化させた。なお、調合表を作成する際はJIS A 1104に準拠した方法により算出した実積率を使用している。練混ぜは、バックホウおよび鋼製容器(2.4×1.6×0.9m)を用いて行った。練混ぜ手順は、最初に所定の骨材量を入れ、次いで所定のセメント量を入れ、鋼製容器内でバックホウを用いて空練りを行った。骨材とセメントが十分に混合されたことを確認した後に、所定の水量を数回に分けて投入し、本練りを行った。なお、練り量が多いため、骨材の計量のみ、容積で管理した。写真-4に、POCの練混ぜの様子を示す。

### 2.4 敷均しおよび仕上げ

POCの敷均しは、既報<sup>2)</sup>で試作したPOC敷均し機(敷均し幅:2.0m)を用いて行った。写真-5に、POC敷均し機による敷均しの様子を示す。仕上げにはPOC仕上げ機を用い、敷均し方向とは垂直方向に各水準の仕上げを行った。写真-6に、POC仕上げ機(M3)による締固め(仕上げ)の様子を示す。

### 2.5 養生条件と供試体の作製

打設後14日目までは屋外シート養生とし、毎日散水を行い、常に湿潤状態を維持した。材齢15日目に、φ93.1mmのコア抜きを行い、壁効果を完全に無くすため上下両端面を研磨し、各水準ごとに3体の供試体を作製した(以下、この供試体をコア供試体と称する)。写真-7に、コア抜き後のスラブとコア供試体の様子を示す。

その後、コア供試体は現場水中養生とし、打設後27日目以降は実験室内での気中養生を行い、打設後28日目に圧縮強度試験を行った。

### 2.6 空隙率、透水係数および圧縮強度の測定方法

空隙率の測定方法は、「空気室圧力法を応用したポーラスコンクリートの空隙率測定方法」<sup>4)</sup>(以下、容積圧力法と称する)で行った。なお、測定にあたって、測定精度向上のため、遠心脱水処理<sup>4)</sup>を行った。

透水係数の測定方法は、「JCI-SPO3-1 ポーラスコンクリートの透水試験方法(案)」<sup>5)</sup>(動水勾配:0.38~0.42)に準拠して行った。

圧縮強度試験は、打設後27日目にコア供試体両端面に硫黄キャッピングを行い、打設後28日目に試験を行った。なお、コア供試体は高さ/直径比が2.0とならない場合が多く、本実験では文献<sup>6)</sup>に示されているPOCの圧縮強度補正係数を算出し、補正を行った値を圧縮強度として採用した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 空隙率

図-1に、設計空隙率30%、水セメント比45%における空隙率とPOC仕上げ機の通過回数との関係を示す。なお、以下の空隙率は3体のコア供試体の平均値を採用した。同図より、起振力7.0kNを除き、通過回数が増加するほど空隙率が低下している。また、起振力が大きくなるほど1回通過時の空隙率が小さくなっている。しかし、4回通過で比較すると、起振力の大きさが空隙率に与え

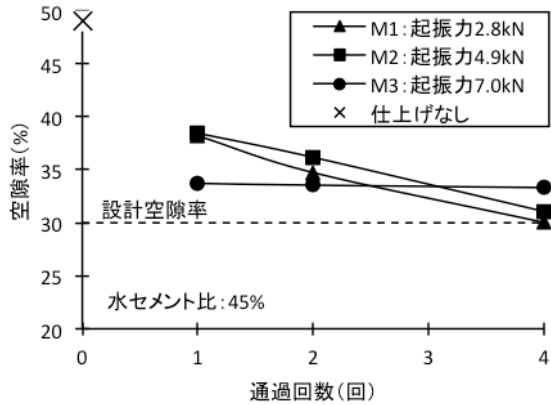


図-1 空隙率と通過回数との関係  
(POC 仕上げ機の種類の影響)

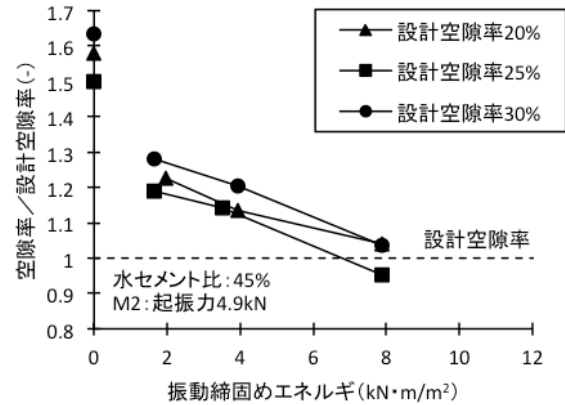


図-3 設計空隙率が空隙率/設計空隙率と振動締固めエネルギーの関係に及ぼす影響 (起振力 4.9kN)

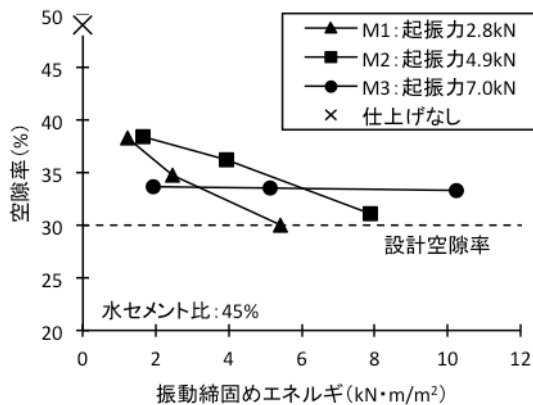


図-2 起振力が空隙率と振動締固めエネルギーの関係に及ぼす影響 (設計空隙率 30%)

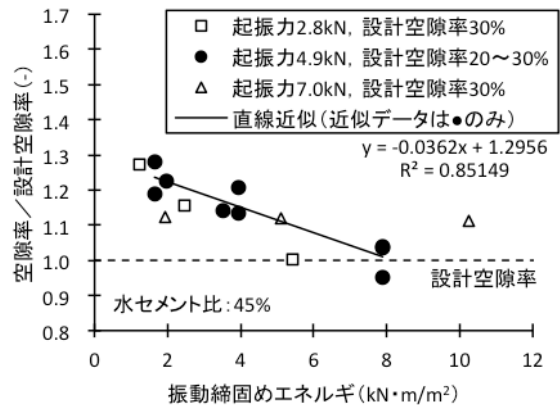


図-4 空隙率/設計空隙率と振動締固めエネルギーの関係 (全データ)

る影響は小さくなっている。この原因は、現在のところ不明であるが、起振力が大きいほど骨材間の拘束力が増加し、骨材同士がかみ合い、締固めが阻害された可能性がある。すなわち、比較的表面付近の骨材がかみ合うことにより、締固めによる空隙率低下が収束していることが考えられる。

次に、図-1の横軸を振動締固めエネルギーとすることで、1回通過あたりの加振時間の違いおよび起振力の違いも加味して考察する。図-2に、設計空隙率30%の場合の起振力が空隙率と振動締固めエネルギーの関係に及ぼす影響を示す。同図より、M3(起振力7.0kN)の場合、振動締固めエネルギーを増加させても空隙率の減少傾向が少ないことから、締固めの効果が必ずしも起振力および通過回数だけでは依存しないことが考えられ、弱い起振力で回数を増やす方が、より深い部分に締固めを到達させることができると考えられる。また、M1(起振力2.8kN)およびM2(起振力4.9kN)においても、空隙率と振動締固めエネルギーとの関係は完全に一致しておらず、起振力の違いを含めて、振動締固めエネルギーを用い

て空隙率制御を行うことは現段階では比較的困難であると考えられる。

次に、起振力が4.9kNの場合の設計空隙率が空隙率と振動締固めエネルギーとの関係に与える影響を検討する。一般的には、調合の段階で設計空隙率が異なるため、施工されるPOCスラブの空隙率も異なる。そこで、空隙率を設計空隙率で除して求めた設計空隙率に対する空隙率の変化率と振動締固めエネルギーとの関係を検討する。図-3に、起振力4.9kNの場合の設計空隙率が空隙率/設計空隙率と振動締固めエネルギーの関係に及ぼす影響を示す。同図より、設計空隙率の影響は明確には現れておらず、高い相関関係が見られる。すなわち、水セメント比45%の場合、POCの締固めにおいて、単位容積あたりのセメントペーストの容積は締固め程度に影響しないことがわかる。

図-4に、図-2および図-3のデータをまとめて示す。ただし、同図は各水準につき3体のコア供試体の値を示している。同図より、起振力を4.9kNとした場合、設計空隙率に関係なく概ね直線近似できることがわかる。さ

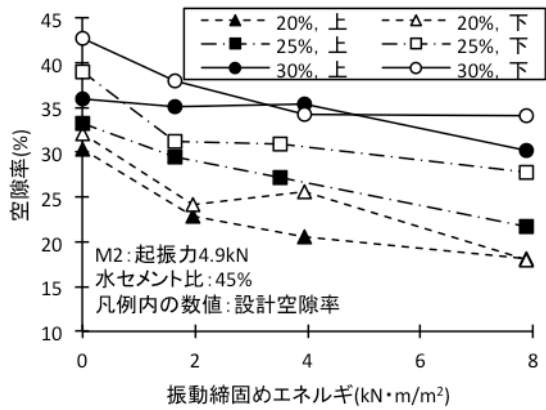


図-5 POCスラブの上下方向の空隙率分布

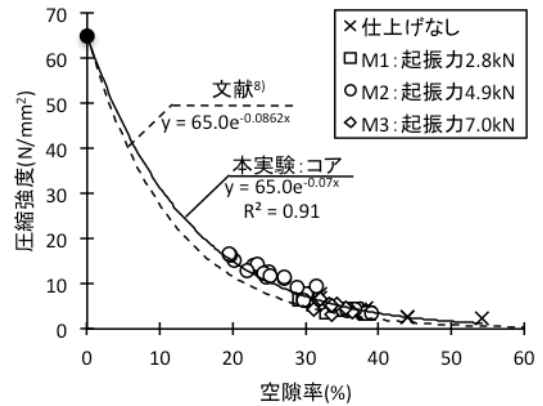


図-7 圧縮強度と空隙率との関係

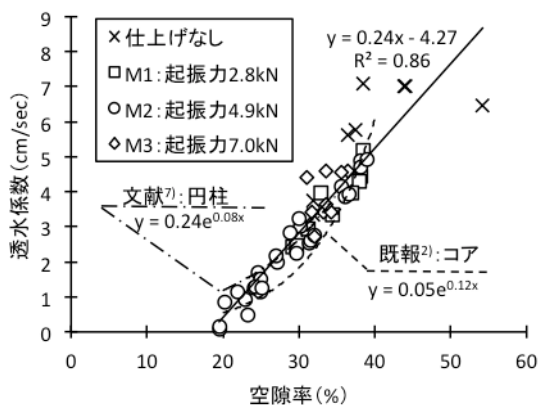


図-6 透水係数と空隙率との関係

らに、起振力を4.9kNとした場合、約8kN・m/m<sup>2</sup>の振動締固めエネルギーを加えることで、概ね設計空隙率となることもわかる。なお、仕上げなしの空隙率は直線近似に含んでいないが、これは、締固めが全く行われていないため、その時点での空隙率が材料自体の品質や調合を表したものではないと判断したためである。

図-5に、POCスラブの上下方向の空隙率分布を示す。同図のみ、遠心脱水処理<sup>4)</sup>を行った後、「JCI-SPO2-1 ポーラスコンクリートの空隙率測定方法(案)」<sup>5)</sup>に規定されている質量法を用いて算出した空隙率を採用した。なお、図-5の凡例中の「上」とは採取されたコア供試体を上下方向に2等分した上層部分を、「下」とはその下層部分を意味している。同図より、上層の空隙率が下層より小さく、また、振動締固めエネルギーを増加させることで、上下層とも空隙率が低下していることがわかる。また、明確ではないが、設計空隙率が小さい方が供試体上下の空隙率の差が小さいという傾向がある。この理由として、結合材量が多いほど、すなわち設計空隙率が小さいほど、締固めによる骨材の移動が円滑になり、上下方向で空隙率の差が小さくなったことが考えられる。

### 3.2 透水係数

POC仕上げ機の種類の違いがPOCの透水性に及ぼす影響を検討するために、図-6に透水係数と空隙率との関係を示す。同図より、既報<sup>2)</sup>および文献<sup>7)</sup>では、透水係数と空隙率との関係を指数関数で近似しているが、本実験結果からは、POC仕上げ機の種類に関係なく、概ね直線で近似でき、高い相関関係が見られた。しかし、その値は既報<sup>2)</sup>による指数関数近似曲線と大きくずれることはなく、同程度の値を示している。また、仕上げなしの透水係数の値にばらつきが見られるのは、もともと供試体の状態がばらついていること、および透水量が大きいため、測定精度がやや低下したことが主な原因として考えられる。

### 3.3 圧縮強度

図-7に、圧縮強度と空隙率との関係を示す。なお、本実験では、結合材を採取することが不可能であったため、結合材強度を過去の研究データと照らし合わせることで推定した。同図より、圧縮強度は設計空隙率およびPOC仕上げ機の種類に関係なく、空隙率と高い相関が見られ、その関係は文献<sup>8)</sup>と同様に指数近似できることがわかる。文献<sup>8)</sup>と比較すると、本実験の値は若干大きく出ているが、これは円柱供試体とコア供試体の違い、すなわち壁効果の有無の影響を受けたためと考えられる。

## 4. まとめ

本報では、実施工における振動締固めがポーラスコンクリートの空隙率に与える影響を検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 空隙率/設計空隙率と振動締固めエネルギーとの関係は、POC仕上げ機の起振力によって異なるが、設計空隙率には影響されない。
- 2) POC仕上げ機の起振力が4.9kNの場合、設計空隙率に関係なく振動締固めエネルギーを約8kN・m/m<sup>2</sup>加えることで、ほぼ設計上の空隙率が得られる。

- 3) POC 仕上げ機の種類に関係なく、透水係数と空隙率との関係は直線近似できる。
- 4) POC 仕上げ機の種類に関係なく、圧縮強度と空隙率との関係は既往の研究と同様に指数近似できる。
- 5) コア供試体を用いた場合の圧縮強度は、円柱供試体を用いた場合の圧縮強度に比べ、壁効果の影響がないため、若干大きくなる可能性がある。
- 3) 超硬練りコンクリート研究委員会報告書，(社)コンクリート工学協会，pp.147-168，1998.6
- 4) 中川武志，畑中重光，三島直生，湯浅幸久，前川明弘：空気室圧力法を応用したポーラスコンクリートの空隙率測定方法，日本建築学会構造系論文集，Vol.73，No.629，pp.1043-1050，2008.7

#### 謝辞

本研究費の一部は、平成 22 年度日本学術振興会科学研究補助金・基礎研究 (B) (代表者：畑中重光) によった。付記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 中川武志，畑中重光，三島直生，松村 豪：住空間における意匠性に配慮した複層ポーラスコンクリート歩道の施工実験，コンクリート工学，Vol.46，No.12，pp.20-27，2008
- 2) 森鼻泰大，中川武志，三島直生，畑中重光：ポーラスコンクリートの実施工における敷均しおよび仕上げ方法が空隙率に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1397-1402，2010
- 5) JCI 基準表 (1977～2002 年度)，日本コンクリート工学協会，pp.582-586，2004.4
- 6) 中川武志，畑中重光，三島直生：供試体の高さ／直径比がポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文集，Vol.23，No.650，pp.695-699，2010.4
- 7) 湯浅幸久，宮本高秀，三島直生，畑中重光：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：コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1263-1268，2002
- 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，No.594，pp.17-23，2005.8