

## 論文 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

湯浅 幸久\*1・宮本 高秀\*2・三島 直生\*3・畑中 重光\*4

**要旨**：本研究は、ポーラスコンクリートの製造・施工に関する最適条件を整理することを目的とし、振動締固めを行ったポーラスコンクリートの内部構造と強度性状について、ペーストの流動性と関連づけて検討した。その結果、表面振動機による締固めにより、振動を直接受ける供試体の上層部と受けない下層部では空隙率にかなりの違いが生じることが明らかとなった。また、空隙率はポーラスコンクリートの強度を支配する最も重要な要因であり、この空隙率は振動エネルギーの大きさに依存してほぼ決定されることが判明した。

**キーワード**：ポーラスコンクリート、締固め、空隙率、圧縮強度、フロー値

## 1. はじめに

これまでに、ポーラスコンクリートの強度に関する影響因子として、空隙率・水セメント比・骨材粒径・ペースト粗骨材容量比などに関する報告<sup>1)</sup>がなされているが、十分な強度を確保し、かつ Funicular の第 1 領域<sup>2)</sup>を形成させる製造条件が確立されるには至っていない。

ポーラスコンクリートでは、一般に、骨材量が一定の場合、強度を確保する目的でペースト量を増加させるという手法は空隙率の低下につながるため必ずしも適切ではない。したがって、効果的に強度を確保するためには、ペーストの高強度化や結合状態の最適化が必要になると考えられる。

既往の研究では、ペーストの流動性の評価にフロー値が用いられており、ポーラスコンクリートに最適なフロー値としては、190<sup>3)</sup>、230<sup>4)</sup>、280<sup>5)</sup>など極めて広範囲の値が提案されている。このことは、ポーラスコンクリートの品質を論じる際には、普通コンクリートと同様、製造・施工に関する一連の工程を考慮した検討が必要となることを意味している。

そこで、本研究では、ポーラスコンクリートの製造・施工に関する最適条件を整理すること

を目的とし、振動締固めを行ったポーラスコンクリートの内部構造と強度性状について、ペーストの流動性と関連づけて検討する。本報では、以下の 2 シリーズの実験結果について報告する。

実験 I：φ10×20cm 円柱体を用いた実験

実験 II：φ10×100cm 円柱体を用いた実験

## 2. 実験 I

## 2.1 実験概要

## (1) 調合

使用した材料の種類と特性値を表-1 に、調合を表-2 に示す。セメントには、比表面積等の物理特性が安定して供給されるセメント協会製研究用セメントを使用し、粗骨材には、単粒度碎石 6 号を使用した。また、セメント粒子を十分に分散させて、安定したペーストの流動性を得るために、ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤をセメント質量の 1% 添加した。本実験ではポーラスコンクリートの設計空隙率を 25% とし、振動締固めに関する既往の文献<sup>3), 6)</sup>を参考に、フロー値が 150, 190, 230 となるよう W/C を設定した。

## (2) ポーラスコンクリートの製造条件

ポーラスコンクリートの製造条件を表-3 に

\*1 三重県科学技術振興センター 工業研究部 (正会員)

\*2 鈴鹿市 建築指導課

\*3 三重大学助手 工学部建築学科 (正会員)

\*4 三重大学教授 工学部建築学科 (正会員)

表-1 使用材料の種類と特性値

種類	特性値
セメント	研究用セメント (普通ポルトランド), 密度: 3.17g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 3150cm <sup>2</sup> /g
粗骨材	単粒度碎石 6号 (5~13mm: 佐奈山産), 表乾密度: 2.70g/cm <sup>3</sup> , 実積率: 57.4%
混和剤	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系)

表-2 ポーラスコンクリートの調査

設計空隙率(%)	25
ペースト粗骨材比(vol.%)	29.7

設定 フロー値	W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
		W	C	G	SP
150	21	68	324		3.24
190	22	70	319	1550	3.19
230	24	74	308		3.08

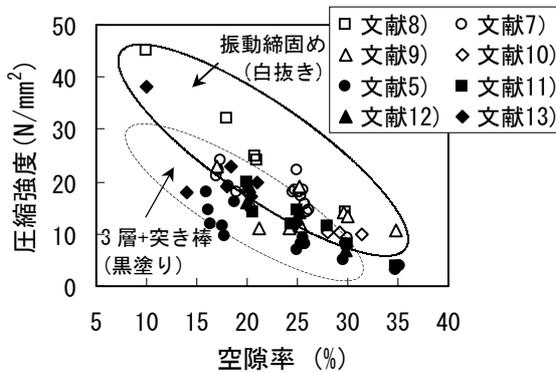


図-1 空隙率と圧縮強度の関係 (締め固め方法別) 5), 7)-13)

示す。練混ぜ方法は、文献 7)より、硬練りに適した練混ぜ性能が得られ、かつ骨材の破壊が少ない揺動攪拌型ミキサ (容量 30 L) を使用し、セメントおよび水を投入後 30 秒間は 50rpm で、その後ミキサ回転数を 200rpm にしてペーストの流動性が安定する 270 秒まで練り混ぜた後、骨材を投入してさらに 90 秒間練り混ぜた。

既往の研究を整理した図-1<sup>14)</sup>によれば、材料・製造条件は様々であるが、締め固めに関しては、振動締め (図中の白抜きデータ) が有効であることが推測される。よって、本実験では、表面振動機を用いて締め固めを行うこととした。

締め固め時間は、図-2 に示す振動エネルギーの算出式<sup>15)</sup>を用いて、起振力ごとに所定の振動エネルギーが得られるよう表-4 のように設定した。

表-3 ポーラスコンクリートの製造条件

練混ぜ方法	揺動攪拌型ミキサ ミキサ回転数: 200rpm 練混ぜ時間: ペースト 270(s) 骨材投入後 90(s)
供試体寸法	φ10×20cm (円柱供試体)
試料の投入方法	1層詰め
締め固め方法	表面振動機
振動エネルギー	0, 6, 36, 90, 144(N/mm <sup>2</sup> )
測定項目	空隙率, 圧縮強度

表-4 締め固め時間 (s)

		振動エネルギー(kN・m/m <sup>2</sup> )				
		0	6	36	90	144
起振力 (N)	245		10	60	150	240
	735	0	2	10	25	40
	1225		1	4	10	16

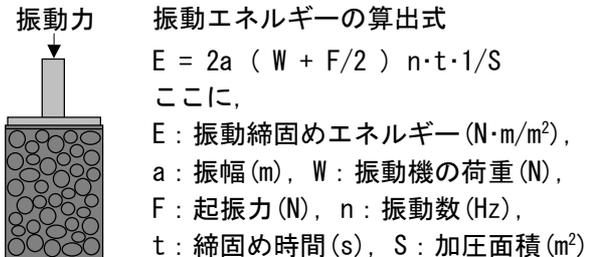


図-2 振動エネルギーの算出式<sup>15)</sup>

この時、練り上がり時から締め固め開始までのペーストの流動性の経時変化は無視できる範囲であった。なお、フロー試験は JIS R 5201 に準じた。また、表面振動機による締め固めの程度を供試体の高さ方向 (上, 中, 下の 3 層に等分) で評価するため、試料の投入に際して突き棒等は使用せずに 1 層詰めとした。全空隙率 (以下、「空隙率」という) および透水係数の測定は、エココンクリート研究委員会報告書に示された試験方法 (案)<sup>1)</sup> によった。

## 2.2 実験結果と考察

### (1) 平均空隙率

締め固め時に与えた振動エネルギーと φ10×20cm 供試体の供試体全域における平均空隙率の関係を図-3 に示す。

図によれば、加振前の状態では、概ね 50%前後の空隙率を示し、フロー値の違いに関わらず、

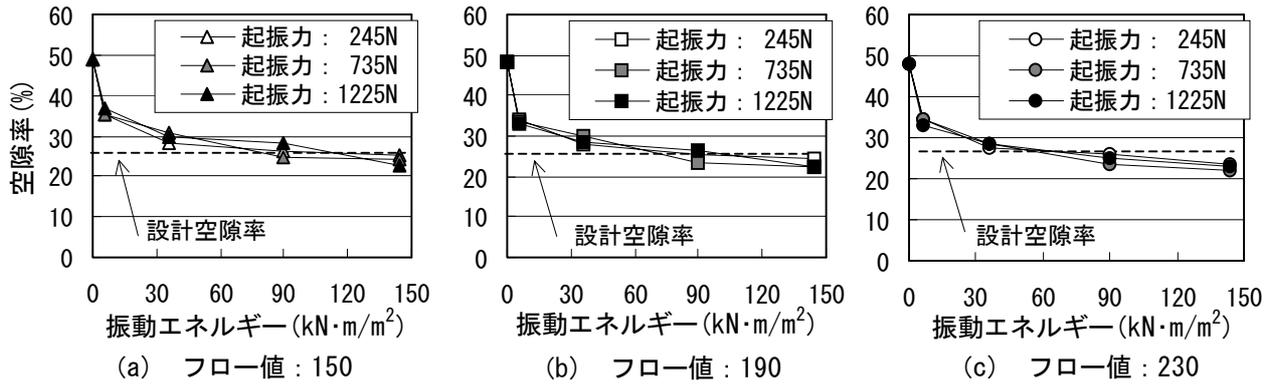


図-3 振動エネルギーと平均空隙率の関係

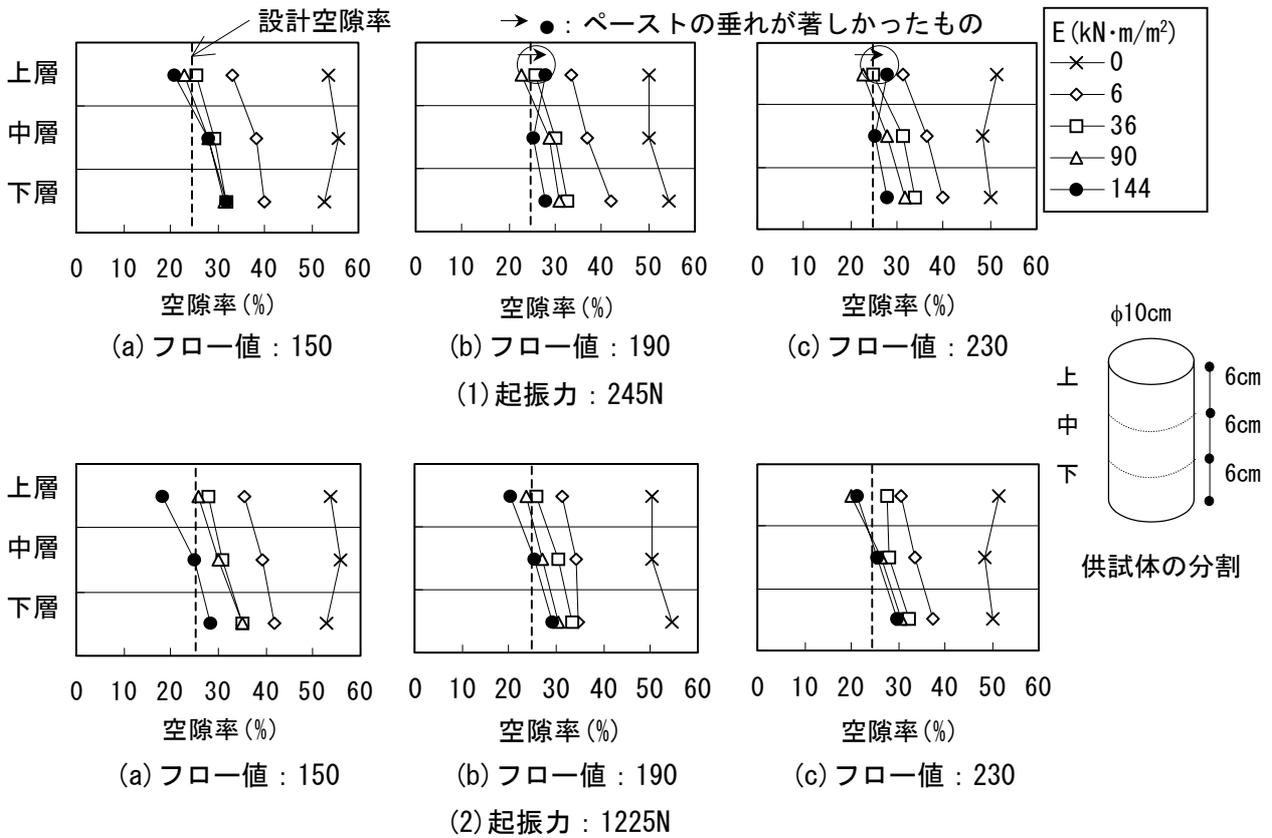


図-4 起振力別の空隙率分布 (φ10×20cm)

振動エネルギーが低い段階で急激に空隙率が低下し、その後、振動エネルギーの増加に伴って、設計空隙率である 25% に漸近した。また、起振力の違いによる影響はなく、平均空隙率は振動エネルギーにより決定されるといえる<sup>16)</sup>。

(2) 空隙率分布

表面振動機により締固めを行う場合、振動エネルギーの伝播は、供試体の下層方向に減衰することが予測される。そこで、硬化後の供試体 (φ10×20cm) を上下方向に 3 等分し、空隙率の分

布を調べた。

図-4 に示した空隙率分布の測定結果によれば、いずれの供試体も空隙率は振動力を直接受ける上層が最も小さく、下層にいくにつれ大きな値となった。そして、振動エネルギーの増加に伴い、ある一定の傾斜を保持したまま全体に空隙率が小さくなる方向にシフトした。締固め終了時には、3 層の平均値が設計空隙率(25%)に近い値を、上層の空隙率は所定の空隙率よりも小さい値を示した。これは表面加振によって

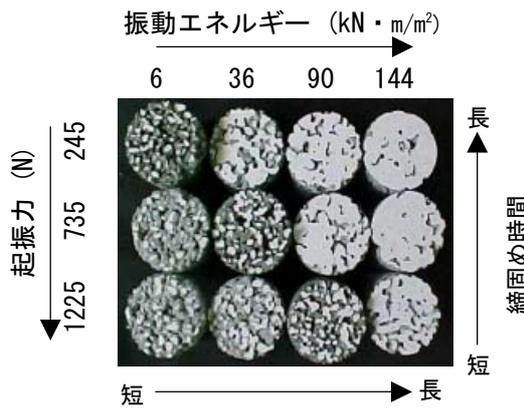


図-5 供試体底面の様子  
(フロー値 : 230)

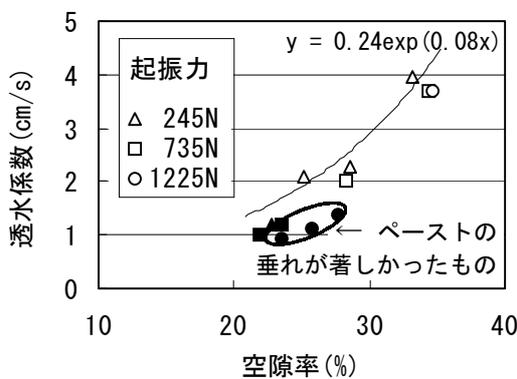


図-6 空隙率と圧縮強度の関係

骨材どうしが直接接触することで、骨材の角が欠けたためと考えられる。

また、図-4中に矢印で示した供試体はペーストの垂れにより上層の空隙率が大きくなったものである。ペーストの垂れは、図-5に示すように締固め時間が長いものほど顕著に見られた。

本実験で設定したフロー値の範囲では、骨材表面に付着したペーストは、静止時には保持されることが確認されており、上記のペーストの垂れは、振動によりペーストが流動化し下層部に脱落していることを意味している。また、このようなペーストの垂れは、図-6に示すように、ポーラスコンクリートの透水機能を低下させることが確認された。したがって、振動締固めを行う場合には、ペーストの過度な垂れを避けるため、起振力を大きくし、締固め時間を短くすることが肝要である。

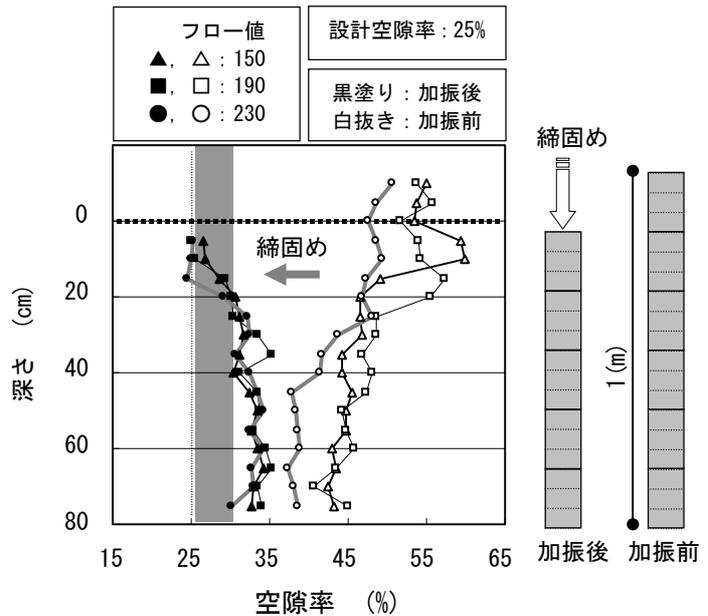


図-7 長柱供試体の空隙率分布

### 3. 実験 II

#### 3.1 実験概要

図-5に示した空隙分布から、表面振動機を用いた場合に、供試体の深さ方向に明らかな空隙率の勾配が発生することがわかった。このため、ここでは振動エネルギーの到達深さを調査するため、 $\phi 10 \times 100 \text{cm}$ の長柱供試体を実験 I と同様の手順で作製し、深さ方向の空隙率分布を測定した。取り扱うペーストのフロー値は実験 I と同様 150, 190, 230 とし、締固めは起振力 735N で振動エネルギーは  $90 \text{N/mm}^2$  (締固め時間 : 25s) とした。また、比較のために、振動締固めを行わない供試体も作製した。

#### 3.2 実験結果と考察

##### (1) 空隙率分布

図-7に空隙率と深さの関係を示す。同図より、加振前の状態において、既に下層ほど空隙率が低下していることが分かる。これは、試料の自重で締め固まったことによると考えられ、特にペーストの降伏値の小さいフロー値 230 の場合に、低い空隙率となった。

一方、加振後の空隙率は上層から徐々に大きくなり、深さ 25cm の付近でほぼ一定値となっ

ている。また、加振後の空隙率分布はペーストのフロー値によらず、ほぼ同様となった。

このことから、供試体中の位置が深くなるに従い、振動エネルギーが十分に伝わらないために、骨材を包むペースト膜が変形せず、25cm を超える深さ位置ではペーストの連続性を得るだけの十分な締固めは行えていないと考えられる。

また、 $\phi 10 \times 20 \text{cm}$  供試体の結果 (図-4) と比較すると、 $\phi 10 \times 100 \text{cm}$  供試体の上層 20cm 部分の方が大きい空隙率となった。これは深さ 20cm より深い部分の試料に振動エネルギーが吸収されていることに起因していると考えられる。

## (2) 空隙率の変化率

図-8 は、自重による締固めの影響を取り除くために、加振前後の空隙率の差を求め、その変化率を示したものである (加振前の空隙率は供試体を 15 等分した場合に換算している)。一般に、フロー値が大きいほど空隙率の変化率は小さい。これは、降伏値が小さいものほど振動締固めの前に自重だけでよく締まるためであるといえる。図中に示したライン a は、空隙率の変化率の勾配が変わる点を結んだものであるが、図-7 で深さ 25cm 程度から空隙率がほぼ一定の値を示すことから、ライン a より上層においてのみ、骨材が接触する程度までペーストが流動化しているといえる。また、ライン a で示した折曲点は、フロー値が大きいものほど深い位置にくる。つまり、以下のようなことが言える。

- ・ 上面～折曲点 a: 締固めにより、ペーストが十分に流動化している領域。
- ・ 折曲点 a～底面: 締固めによるペーストの流動化が不十分な領域。

ライン b は、自重で締め固まったために生じた勾配の折曲点を示すが、フロー値の大きいものほど空隙率の変化率は小さく、ライン b で示

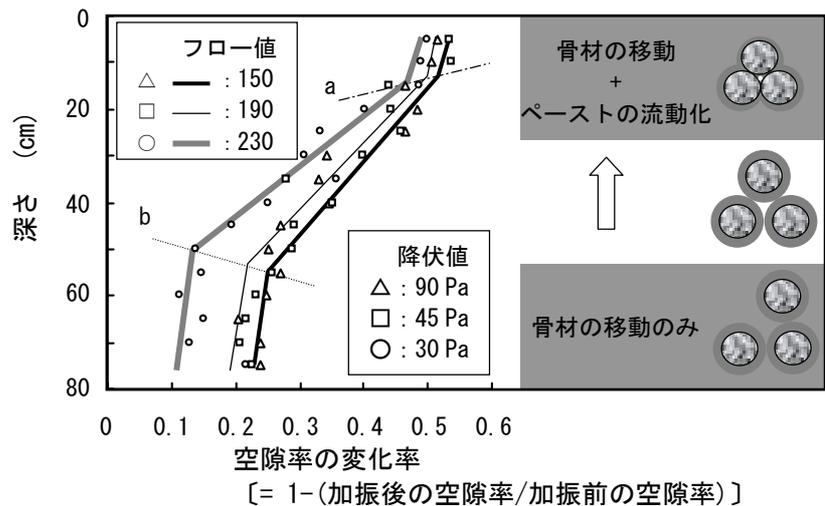


図-8 深さ方向の空隙率の変化率  
[ = 1 - (加振後の空隙率 / 加振前の空隙率) ]

した折曲点は浅い位置となる。

すなわち、表面振動機による深さ方向の締固め効果は、フロー値によって異なることがわかった。ただし、調合設計に準じたポーラスコンクリートを作製するには、深さ 20~30cm 程度以内の範囲で締固めを行うべきである。

## 4. ポーラスコンクリートの圧縮強度

ポーラスコンクリートは、調合上の空気量を大きく設定することで連続した空隙を形成させることが特徴であり、骨材のかみ合わせと骨材を架橋するペーストの性状がポーラスコンクリートの性能を左右する。特に、空隙率はポーラスコンクリートの強度性能を大きく決定づけるものである。

実験 I で得られた圧縮強度と空隙率の関係を図-9 に一括して示す。図から、締固めの進行に伴い空隙率は低下し、圧縮強度が増加することが分かる。この時の強度変化は、従来多くの研究で表現されていた直線的なもの<sup>3)</sup>ではなく、空隙率の低下に伴い急激に増大する曲線的な傾向を示した。図中の黒塗り点はペーストの垂れが著しかった供試体を表しているが、図-5 で示したペーストの垂れは、本実験の条件である設計空隙率: 25%、使用粗骨材: 6号碎石の範囲では、圧縮強度の低下に繋がるものではなかった。同様の結果は、文献3)における実験からも得られており、骨材間を架橋するペーストは垂

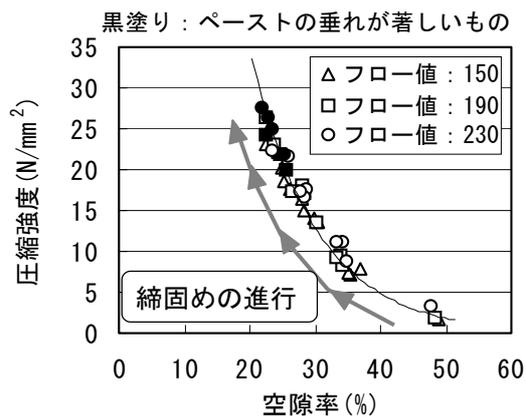


図-9 空隙率と圧縮強度の関係

れを生じる程度の方がポーラスコンクリートとしては良好な強度性能が得られることを示唆している。

本実験の範囲では、フロー値や締固め時間の違いがポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響はほとんど見られなかった。しかし、ポーラスコンクリートでは連続空隙を確保することが重要であるため、その機能に問題が生じる可能性が高くなるような著しい垂れは避ける必要がある。

## 5. まとめ

ポーラスコンクリートの内部構造に及ぼす振動締固めの影響について検討した結果、以下に示すような知見を得た。

- (1) 本実験の範囲では、振動エネルギーのみにより締固め終了以前の空隙率を評価できる。
- (2) 表面振動機により、締固め作用を直接受ける上層部と受けない下層部には空隙率に著しい差が生じる。
- (3) 調合設計に準じたポーラスコンクリートを製造・施工するには、深さ 20~30cm 程度以内の範囲で締め固め、かつ締固め時間はなるべく短くすべきである。
- (4) 調合が同一の場合、ポーラスコンクリートの空隙率と圧縮強度の関係は、締固めの程度に関わらず一つの曲線上に存在する。

## 参考文献

- 1) エココンクリート研究委員会報告書：日本コ

- ンクリート工学協会, 1995
- 2) 玉井元治：連続空隙を有する固化体の透水性, セメント技術年報, 第 42 巻, pp.591-594, 1988
- 3) 湯浅幸久, 別府智子, 宮本高秀, 畑中重光：セメントペーストの流動性がポーラスコンクリートの振動締固め性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.1, pp. 133-138, 2001
- 4) 平岩睦, 田中清人, 谷川恭雄, 森博嗣：ポーラスコンクリートの調合設計法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.1, pp.121-126, 2001
- 5) 柳橋邦生, 米澤敏男, 佐久間護, 池尾陽作：緑化コンクリートに関する研究および施工, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.871-876, 1994
- 6) 添田政司, 大和竹史, 江本幸雄：ポーラスコンクリートへの再製骨材の適用性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.1117-1122, 1998
- 7) 湯浅幸久, 村上和美, 前川明弘, 畑中重光：ポーラスコンクリートの製造方法に関する基礎的実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.1, pp.235-240, 1999
- 8) 田中博一, 今井実：緑化コンクリートの強度特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.1, pp.283-288, 1999
- 9) 柳橋邦生, 米澤敏男, 安藤慎一郎, 山田敏明：ポーラスコンクリートの締め固め方法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.589-594, 1998
- 10) 大谷俊浩, 村上聖, 佐藤嘉昭, 三井宜之：結合材の分布状態がポーラスコンクリートの強度特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.1, pp.139-144, 2001
- 11) 井上正一, 黒田保, 吉野公, 田中秀一：再生骨材の緑化コンクリートへの適用性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.1, pp.181-186, 1999
- 12) 水口裕之, 伊藤禎彦, 村上仁士, 入倉雅人：沿岸水中に浸漬した連続空隙を持つポーラスコンクリートにおける付着物の発達特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.1023-1028, 1996
- 13) 張日紅, 中澤隆雄, 新西成男：ポーラスコンクリートの空隙率が圧縮強度と応力-ひずみ関係に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.51, pp.864-869, 1997
- 14) 石黒哲, 湯浅幸久, 畑中重光：ポーラスコンクリートの物理的性質に及ぼす各種要因の影響, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第 38 号, pp.73-76, 2000
- 15) 超硬練り研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, pp.155-162, 1998
- 16) 柳橋邦生, 米澤敏男, 岡田正美, 安藤慎一郎：ポーラスコンクリートの振動締め固め方法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.1, pp.241-246, 1999