

# 論文 ポーラスコンクリートの圧縮強度と曲げ強度の関係に関する実験的研究

エルドン オチル<sup>\*1</sup>・三島 直生<sup>\*2</sup>・畑中 重光<sup>\*3</sup>

**要旨**：本報では、空隙率、水セメント比および粗骨材の粒径を変化させたポーラスコンクリートの圧縮および曲げ強度試験を行い、その実験結果から、圧縮強度による曲げ強度の推定の可能性に関する実験的な検討を行った。その結果、ポーラスコンクリートの圧縮強度および曲げ強度は共に空隙率を変数とした指数関数として表すことができること、また、圧縮強度と曲げ強度の関係は累乗関数または線形関数で表すことができることなどが明らかとなった。

**キーワード**：ポーラスコンクリート、圧縮強度、曲げ強度、空隙率

## 1. はじめに

ポーラスコンクリートは、その内包する多量の空隙により、普通コンクリートでは得られない多くの機能を持つことができるため、特に環境共生分野などへの適用が注目されている材料である。

しかし、普通コンクリートと異なり、ポーラスコンクリートは施工時の締固めの程度によりその品質が大きく変動するため、同じコンクリートを用いて作製した型枠試験体などによる品質評価の妥当性が議論となる場合がある<sup>1)</sup>。この対策として、現場施工されたポーラスコンクリートから採取されたコア試験体などによる品質評価が検討されている。

また、ポーラスコンクリートを道路舗装に適用する際には、曲げ強度が必要性能として要求される場合が多い。しかし、現場に施工されたポーラスコンクリートから直接曲げ試験体を採取することは非常に困難であり、現実的でない。一方で、円柱型のコア試験体を採取することは比較的容易であり、品質管理上は、このコア試験体による圧縮強度試験の結果から曲げ強度が推定できれば、作業の軽減が可能となると考えられる。

表-1 実験の要因と水準

| 要因       | 水準                       |
|----------|--------------------------|
| 設計空隙率(%) | 15, <u>25</u> , 35       |
| 水セメント比   | 0.25, <u>0.30</u> , 0.35 |
| 粗骨材種類    | 5号砕石、6号砕石、7号砕石           |

[注]     ：基本水準を示す

これまでに、ポーラスコンクリートの圧縮強度と曲げ強度の関係に関する研究はいくつか報告されており、曲げ強度の圧縮強度に対する割合は概ね 1/5~1/4 であるとする記述<sup>2)</sup>や、透水性舗装コンクリートの曲げ強度と圧縮強度の関係に対してプレキャストコンクリートの関係式が適用できるとの報告<sup>3)</sup>もある。最近では、ポーラスコンクリートに対して以下のような関係式<sup>4)</sup>が提示されている。

$$Fb = 0.563 Fc^{0.658} \tag{1}$$

ここに、 $Fb$ ：曲げ強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $Fc$ ：圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)  
しかし、現時点では検討例も少なく、さらなるデータの蓄積が必要である。そこで筆者らは、空隙率、水セメント比および粗骨材の粒径を変化させたポーラスコンクリ

表-2 ポーラスコンクリート使用材料

| 使用材料 | 種類                | 密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | 実積率 (%) |
|------|-------------------|-------------------------|---------|
| セメント | 普通ポルトランドセメント      | 3.16                    | —       |
| 水    | 上水道水              | 1.00                    | —       |
| 粗骨材  | 南伊勢町産 硬質砂岩 砕石     | 5号砕石 (13~20mm)          | 58.6    |
|      |                   | 6号砕石 (5~13mm)           | 58.1    |
|      |                   | 7号砕石 (2.5~5mm)          | 55.3    |
| 混和剤  | ポリカルボン酸系 高性能AE減水剤 | 1.03~1.13               | —       |
|      | セルロース系増粘剤         | —                       | —       |

\*1 三重大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生 (学生会員)

\*2 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)

\*3 三重大学大学院工学研究科建築学専攻 教授 工学博士 (正会員)

表-3 ポーラスコンクリートの調合表及びペーストフロー値

| 粗骨材種類 | W/C  | 設計VR (%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |       |      | SCA/C (%) | HAE/C (%) | FL(mm) |     | ペーストの垂れ |
|-------|------|----------|-------------------------|-------|------|-----------|-----------|--------|-----|---------|
|       |      |          | W                       | C     | G    |           |           | 目標     | 実測  |         |
| 5号    | 0.3  | 25       | 79.8                    | 266.1 | 1557 | 0.02      | —         | 150    | 156 | 中       |
| 6号    | 0.25 | 25       | 74.6                    | 298.3 | 1554 | —         | 0.4       | 190    | 185 | 小       |
|       | 0.3  | 15       | 130.9                   | 436.4 | 1554 | 0.075     | —         | 150    | 149 | 中       |
|       |      | 25       | 82.3                    | 274.1 | 1554 | —         | —         | 190    | 186 | 大       |
|       |      | 35       | 33.6                    | 111.9 | 1554 | —         | —         | 190    | 186 | 小       |
|       | 0.35 | 25       | 88.8                    | 253.6 | 1554 | 0.02      | —         | 200    | 196 | 大       |
| 7号    | 0.3  | 25       | 95.9                    | 319.6 | 1469 | —         | 0.1       | 210    | 203 | 小       |

[注]VR:空隙率, SCA/C:セメント質量に対する増粘剤添加率, HAE/C:セメント質量に対する高性能AE減水剤添加率, FL:ペーストフロー値, \*: 大は供試体底部面積の70%以上, 中は供試体底部面積の40%~70%, 小は供試体底部面積の40%以下



(a) 目標 FL=150 (6号, W/C=0.30, 設計 VR=15%) (b) 目標 FL=190 (6号, W/C=0.30, 設計 VR=25%) (c) 目標 FL=210 (7号, W/C=0.30, 設計 VR=25%)

写真-1 セメントペーストのフロー試験結果の例

ートの圧縮および曲げ強度試験を行い, その結果から, 圧縮強度による曲げ強度の推定の可能性を検討するための実験を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験の要因と水準

表-1 に, 本実験の要因と水準を示す。本実験では, ポーラスコンクリートの特性に大きく影響すると考えられる, 空隙率, 水セメント比および粗骨材粒径を要因とし, ポーラスコンクリートの幅広い調合に対して, 強度特性を評価するために取り上げた。

### 2.2 使用材料および調合

表-2 に, ポーラスコンクリートの使用材料を示す。粗骨材には, 粒径の異なる3種類の単粒度砕石を用いた。また, セメントペーストのフロー値を調節するために, 高性能 AE 減水剤および増粘剤を用いた。

表-3 に, ポーラスコンクリートの調合表およびペーストフロー値の測定結果を示す。本実験では粗骨材をセメントペーストで結合することとし, 細骨材は使用していない。セメントペーストの流動性は, 過去の研究実績

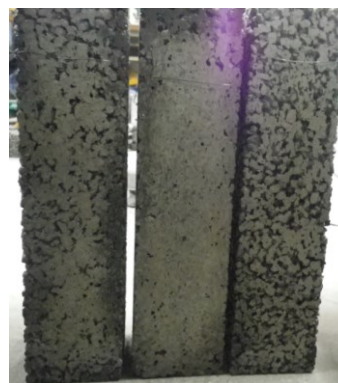


写真-2 試験体の底部の垂れの状況の例

に基づき, 適切と考えられる目標フロー値を設定した。ここで, 許容差は±10mm とした。セメントペーストのフロー値は, JIS R 5201 に準拠して測定した。写真-1 に, フロー試験結果の例を示す。また, 同表中には, 試験体底部のセメント垂れの程度を示す。垂れが大きかったのは6号砕石の W/C が 0.3 で 空隙率が 25%の試験体と, 6号砕石の W/C が 0.35 で 空隙率が 25%の試験体である。締固め時に行ったジャギング(後述)により, 垂れが発生したと考えられる。写真-2 に, 試験体の底部のセメントペーストの垂れの状況の例を示す。

### 2.3 試験体の作製方法

ポーラスコンクリートの練混ぜには、容量 30L の揺動攪拌型ミキサを用いた。練混ぜ方法は、セメントペースト先練りとし、セメント、水および混和剤をミキサに投入して、低速で 30 秒間練り混ぜた後に、ミキサ内壁に付着したセメントを掻き落とし、高速で 90 秒間練り混ぜた。練り上がったセメントペーストを採取してフロー試験を行い、所定のフロー値が得られたことを確認した後に、フロー試験に供したセメントペーストをミキサに戻し、粗骨材を投入して、高速で 120 秒間練り混ぜた。

練り上がったフレッシュポーラスコンクリートは、プラスチック製の練り船に排出し、3本の角柱鋼製型枠(100×100×400mm)と3本のプラスチック製円柱型枠(φ100×200mm)に打ち込んだ。

型枠への打ち込みに際しては、空隙率のばらつきを抑えて設計値に近い試験体を作製するために、調合表から計算した型枠サイズごとの所定の質量を計量しながら打ち込んだ。ここで、予備試験の結果から、6号砕石および5号砕石を用いたポーラスコンクリートでは、型枠面の壁効果により設計空隙率まで充填するのが困難であったため、型枠に対する充填質量締固め率を計算値の97%として打ち込んだ。

締固めは、2層に分けて打ち込んだポーラスコンクリートに対して、各層を突き棒で突き固め、所定質量を充填した後に、ジグギングおよび型枠振動機による上面からのタンピングを行った。

打ち込み後は、型枠上面にビニルシートをかけて乾燥を防ぎ、材齢5日目に脱型した後に、材齢28日まで20℃の水中養生を行った。ただし、材齢1週には、空隙率の測定を2日間行い、また材齢18日にはキャッピングを行ったため、その間は養生水槽から試験体を出している。

ポーラスコンクリート試験体とは別に、ポーラスコンクリートで用いたものと同じ調合のセメントペースト試験体も作製した。練混ぜには容量 2L のモルタルミキサを用い、3種類の水セメント比(0.25, 0.30, 0.35)でそれぞれ3本の円柱試験体(φ50×100mm)と3本の角柱試験体(40×40×160mm)を作製した。水セメント比 0.30 の調合では、混和剤は無添加とした。養生は材齢 28 日まで 20℃ の水中養生とした。

### 2.4 試験方法

#### (1) 空隙率試験

ポーラスコンクリートの円柱試験体に対する空隙率試験は、日本コンクリート工学会によるポーラスコンクリートの空隙率試験方法(案)<sup>5)</sup>に準拠して、質量法および容積法の二種類を行った。質量法からは全空隙率を、容積法からは全空隙率および連続空隙率を算出した。ここで、上記の空隙率試験方法(案)<sup>5)</sup>では、角柱試験体

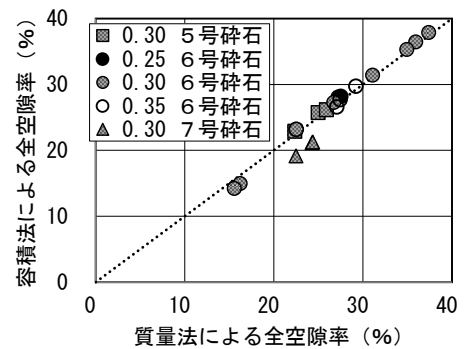


(a) 硫黄で端面をキャッピングした円柱試験体

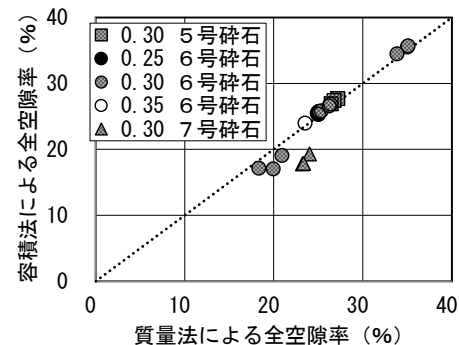


(b) 止水セメントで支点をキャッピングした角柱試験体

写真-3 キャッピングした試験体の例



(a) 円柱試験体



(b) 角柱試験体

図-1 質量法と容積法による全空隙率の比較

は対象としていないが、本実験では角柱試験体に対しても円柱試験体と全く同じ方法を適用している。空隙率の測定は、本実験で作製した全てのポーラスコンクリー

ト試験体（円柱試験体および角柱試験体の各3本ずつ）に対して行った。

### (2) 圧縮強度試験

ポーラスコンクリートの圧縮強度試験は、円柱試験体の上下端面に硫黄でキャッピングしたものを使用した。写真-3(a)に、キャッピングしたポーラスコンクリート円柱試験体を示す。試験は、JIS A 1108（コンクリートの圧縮強度試験方法）に準拠して行い、試験材齢は28日とした。

ポーラスコンクリートとは別に、セメントペーストで作製した円柱試験体に対しても、材齢28日において圧縮強度試験を行った。試験体の端面は研磨して試験に供した。

### (3) 曲げ強度試験

ポーラスコンクリートの曲げ強度の測定は、JIS A 1106（コンクリートの曲げ強度試験方法）に準拠して、打込み時の試験体側面を載荷面とした3等分点載荷で行った。試験体の支点および載荷点の位置に止水セメントでキャッピングを施して試験を行った。試験材齢は28日とした。写真-3(b)に、試験体のキャッピングの例を示す。

ポーラスコンクリートとは別に、セメントペーストで作製した角柱試験体に対しても、JIS R 5201（セメントの物理試験方法）に準拠して、材齢28日において曲げ強さの測定を行った。

## 3. 実験結果とその考察

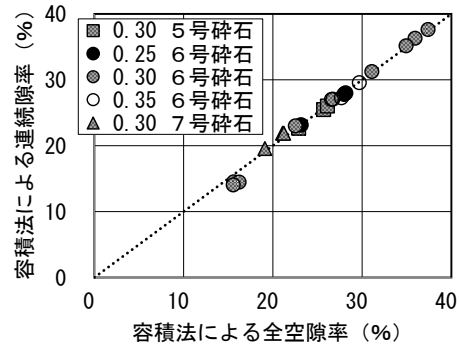
### 3.1 空隙率試験結果

図-1に、質量法と容積法で測定した全空隙率の比較を、円柱試験体と角柱試験体に分けて示す。同図によれば、円柱試験体および角柱試験体のいずれにおいても、7号砕石の空隙率25%および6号砕石の空隙率15%の場合に、容積法による測定値が質量法と比べて小さくなっている。これは、容積法の水中重量の測定時に、7号砕石などの細かい粒径の粗骨材を使用した場合や、空隙率が小さい場合には、試験体内部の気泡が抜けづらく、試験体内部に気泡が残ったままとなるために、水中重量が低く測定されたこと、また、空隙率が小さい場合にはこれに加えて、水を満たすタイプの容積法では測定できない外部から完全に独立した空隙が存在したことなどによる誤差と考えられる。

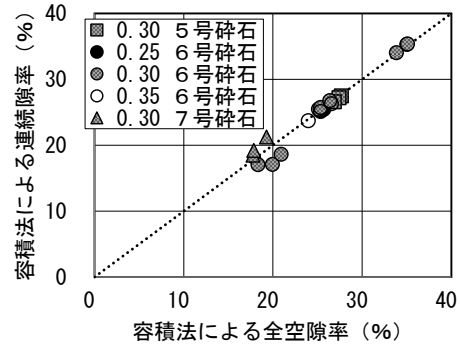
図-2に、容積法による全空隙率と連続空隙率の比較を示す。図によれば、6号砕石の空隙率15%のみ、全空隙率に対して連続空隙率が小さくなる傾向が見られており、他の試験体は全空隙率と連続空隙率がほぼ同じ値となった。

### 3.2 圧縮強度試験結果

#### (1) セメントペースト



(a) 円柱試験体



(b) 角柱試験体

図-2 容積法による全空隙率と連続空隙率の比較

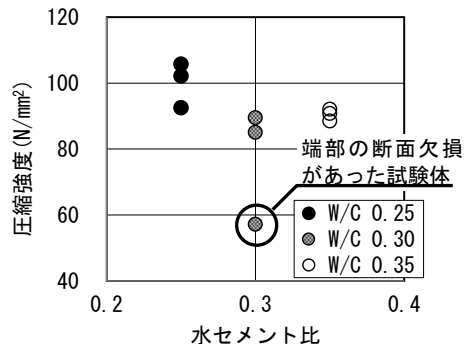


図-3 セメントペーストの圧縮強度と水セメント比の関係

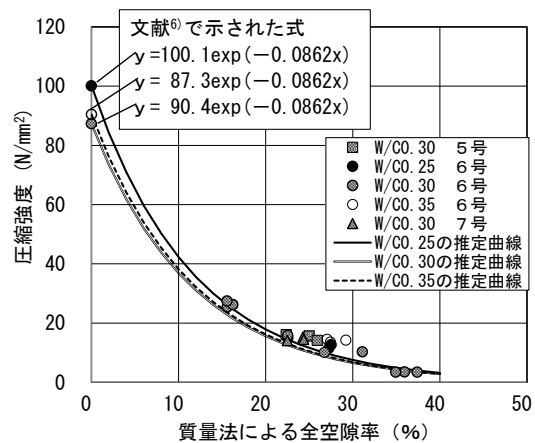


図-4 ポーラスコンクリートの圧縮強度と空隙率の関係

図-3 に、セメントペーストの圧縮強度と水セメント比の関係を示す。水セメント比 0.30 の試験体のうち 1 体で極端に低い圧縮強度となっているが、これは脱型の時点で端部に断面欠損が発生した試験体であるため、以後の考察からは除外して考える。その他の試験結果からは、水セメント比 0.30 と 0.35 の圧縮強度が逆転しており、また水セメント比 0.25 も含めても全体としてそれほど大きな圧縮強度の差は現れない結果となった。

## (2) ポーラスコンクリート

図-4 に、ポーラスコンクリートの圧縮強度と全空隙率の関係を示す。ここで、空隙率の値には質量法による結果を採用した。また、図中には、既報<sup>6)</sup>で提案したポーラスコンクリートの圧縮強度と空隙率の関係式も併示した。空隙率 0%における圧縮強度は図-3 に示した実測結果の平均値とした。

実験結果からは、ポーラスコンクリートの圧縮強度と空隙率の関係は、既報の提案式により概ね近似可能であるが、本実験では、空隙率 25~30%の範囲で、圧縮強度が大きくなる傾向が見られた。また、水セメント比の影響に関しては、セメントペーストの圧縮強度試験結果と同様に、ポーラスコンクリートの圧縮強度においても、水セメント比による圧縮強度の違いは明確には見られなかった。粗骨材粒径の影響についても、本実験結果からは明確な傾向は見られていない。

## 3.3 曲げ強度試験結果

### (1) セメントペースト

図-5 に、セメントペーストの曲げ強さと水セメント比の関係を示す。ばらつきはあるものの、圧縮強度と異なり、水セメント比が小さくなるほど曲げ強さが大きくなる傾向が得られた。

### (2) ポーラスコンクリート

図-6 に、ポーラスコンクリートの曲げ強度と全空隙率の関係を示す。ここで、空隙率の値には圧縮強度と同様に質量法による結果を採用した。また図中には、圧縮強度試験結果にならい、空隙率 0%における曲げ強度をセメントペーストの曲げ強さとして、指数関数で近似した曲線も示す。

実験結果からは、ポーラスコンクリートの曲げ強度と空隙率の関係も、ばらつきは大きいものの、指数関数により概ね近似可能であること<sup>4)</sup>がわかった。また、水セメント比および粗骨材粒径の影響についても、圧縮強度試験結果と同様に、本実験結果からは明確な傾向は見られていない。

## 3.4 圧縮強度と曲げ強度の関係

### (1) ポーラスコンクリート

図-7 に、ポーラスコンクリートの曲げ強度と圧縮強度の関係を示す。ここで、実験結果は同一水準の 3 体の

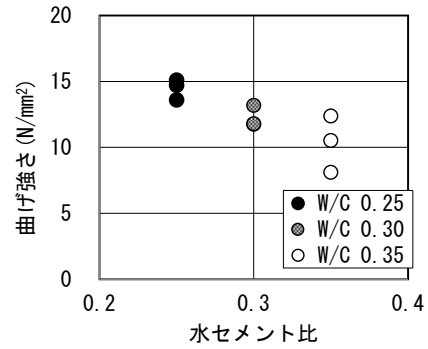


図-5 セメントペーストの曲げ強さと水セメント比の関係

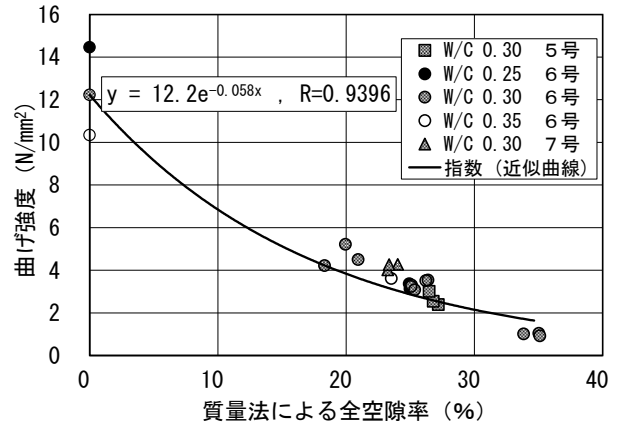


図-6 ポーラスコンクリートの曲げ強度と空隙率の関係

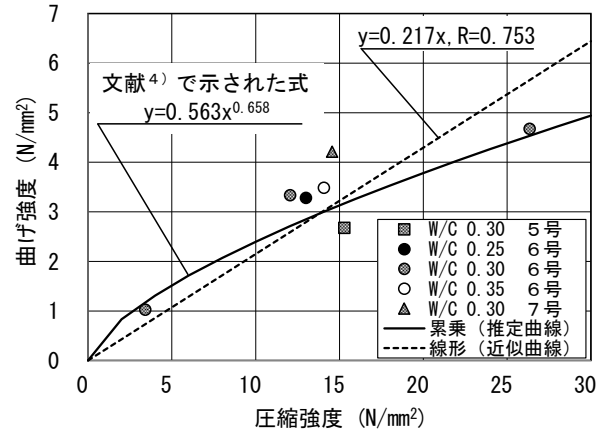


図-7 ポーラスコンクリートの曲げ強度と圧縮強度の関係

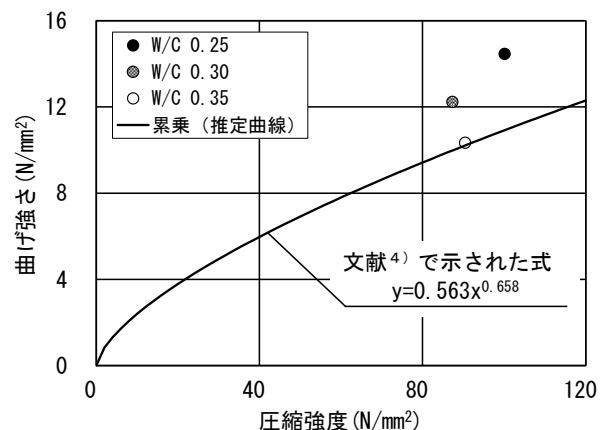


図-8 セメントペーストの曲げ強さと圧縮強度の関係

平均値で示す。また、各水準ごとに曲げ試験体と圧縮試験体の実測空隙率に差はあるが、ここではその影響は無視している。

図によれば、既往の研究<sup>4)</sup>で提案されている式(1)でほぼ推定できている。また、同図中には、参考として線形で近似した直線も示すが、この結果からは、曲げ強度が圧縮強度の 1/4.7 となり、既往の研究<sup>3)</sup>にある 1/5~1/4 の範囲にも入っている。

各種要因の影響に関しては、粗骨材粒径が大きいほど、同一圧縮強度レベルにおける曲げ強度が低下する傾向が見られる。これは本実験に使用した試験体が型枠に打ち込まれたものであり、粗骨材の粒径が大きいほど型枠面の壁効果による骨材の充填の不均一性が大きくなり、曲げ試験時の引張縁付近の空隙率が大きくなる、すなわち、断面欠損の影響によりこのような結果になったと考えられる。ただし、本実験では粗骨材粒径の影響に関するデータは不十分なため、今後の検討が必要と考えられる。

水セメント比の影響に関しては、本実験の範囲では、強度の差が大きくなかったこともあり、明確な影響は見られなかった。

## (2) セメントペースト

図-8 に、セメントペーストの曲げ強さと圧縮強度の関係を示す。同図では、各水準の試験結果の3体の平均値を示す。同図中には、ポーラスコンクリートで得られた近似曲線も併示した。図によれば、セメントペーストの結果は累乗関数の延長上にあることが分かる。ポーラスコンクリートの強度範囲とセメントペーストの強度範囲に隔たりがあるため、詳細な検討は今後の課題とした。

## 4. まとめ

本研究から得られた知見を以下に示す。

- (1) ポーラスコンクリートの圧縮強度および曲げ強度と全空隙率の関係は、指数関数により近似することが可能であることを確認した。
- (2) ポーラスコンクリートの圧縮強度と曲げ強度の関係は、累乗関数または線形関数で近似することが可能である。
- (3) ポーラスコンクリートの圧縮強度と曲げ強度の関係には、型枠境界の壁効果の影響により、粗骨材粒

径が大きくなるほど曲げ強度が低下する傾向が見られた。

以上の結果からは、ポーラスコンクリートの圧縮強度と曲げ強度の間にはある一定の関係があり、圧縮強度から曲げ強度を推定することは可能と思われるが、推定精度および影響要因に関してさらに検討を進める必要がある。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、夏目実穂さん（三重大学修了生）、濱田悠一君（三重大学学生）の助力を得た。本実験は、コンクリート工学会「性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立研究委員会」（委員長：畑中重光）の共通実験の一環として行われた。また、本研究費の一部は、同共通実験経費および共同研究経費（株式会社アムラックス）によった。付記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 畑中重光, 三島直生, 森鼻泰大, 中川武志: ポーラスコンクリートの施工標準(案)の作成に向けて, コンクリート工学, Vol.49, No.4, pp.30-37, 2011.4
- 2) 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, 日本コンクリート工学協会, pp.4-5, 2003.5
- 3) ACI COMMITTEE REPORT : 522R-10 Report on Report on Pervious Concrete, P.9, 2010.3
- 4) 梶尾聡, 國府勝郎, 上野敦, 宇治公隆: 舗装用ポーラスコンクリートにおける空隙率と強度に関する研究, 第66回セメント技術大会講演要旨, pp.84-85, 2012.5
- 5) 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, 日本コンクリート工学協会, pp.179-180, 2003.5
- 6) 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