

## 論文 ポーラスコンクリートの空隙率と空隙分布の評価

越 健<sup>\*1</sup>・島崎 磐<sup>\*2</sup>・国枝 稔<sup>\*3</sup>・六郷 恵哲<sup>\*4</sup>

**要旨：**ポーラスコンクリートの供試体では、型枠に接する面の空隙は大きく、連続的であり、供試体中心部の空隙分布とは異なっている。本研究では、型枠に詰めた供試体とコア抜きを行った供試体を用いて、空隙率、透水係数、各種強度を測定した。その結果、ポーラスコンクリートを型枠に詰めた供試体を用いた場合、型枠面に存在する空隙により、空隙率と透水係数の測定結果はコア抜き供試体の結果に比べて大きくなり、圧縮強度と弾性係数の測定結果はコア抜き供試体の結果に比べて小さくなってい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、空隙分布、型枠面、空隙率、透水係数

## 1. まえがき

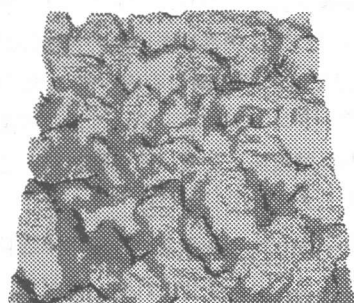
ポーラスコンクリートは、環境負荷低減型コンクリートであり<sup>1)</sup>、幅広く環境問題に適用できるコンクリートとして、近年注目されている。

ポーラスコンクリートは、コンクリート内部に連続空隙を持つことが特徴として挙げられ、供試体レベルでの空隙率や透水係数<sup>2)</sup>がポーラスコンクリートの性能を評価する指標の1つとして用いられる場合が多い。

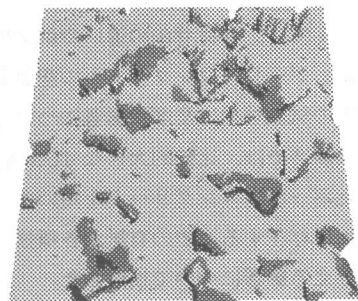
図-1 は、ポーラスコンクリート供試体において、型枠に接する面とコンクリートカッターにより切断した切断面の2種類の表面形状(80×80mmの領域)を示したものである。この図より、切断面における空隙の径は小さく、面に対して平行方向に独立しているのに対し、型枠に接する表面では、空隙の径が大きく、連続的になっていることが特徴として挙げられる。

10×10cmのポーラスコンクリートの供試体断面(3辺：型枠面、1辺：打設面)の写真をもとに2値化した画像の例を図-2に示すとともに、断面中心を一致させて10×10cm、8×8cmならびに6×6cmの範囲内で空隙面積比(対象とする範囲に対する空隙部分の面積の比)を求

めた結果を図-3に示す<sup>3)</sup>。この図より、10×10cmの範囲で計算した空隙面積比が一番大きく、図-1で示した型枠に接する部分に存在する連続的な空隙の影響が表れているものと考え



(a) 型枠に接する面



(b) 切断面

図-1 ポーラスコンクリートの表面

\*1 岐阜大学 工学部土木工学科 (正会員)

\*2 岐阜工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (正会員)

\*3 岐阜大学助手 工学部土木工学科 工修 (正会員)

\*4 岐阜大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

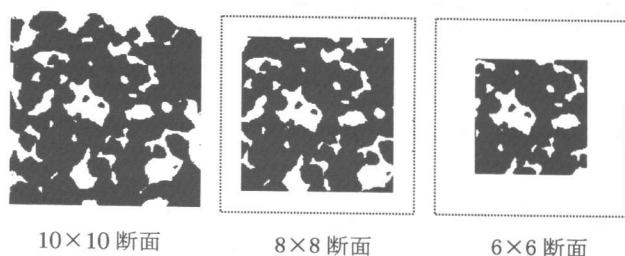


図-2 断面の2値画像<sup>3)</sup>

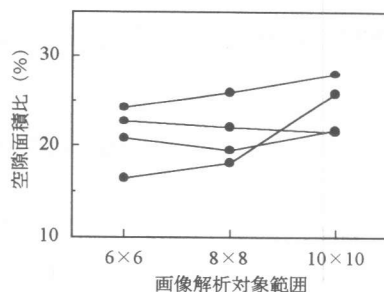


図-3 空隙面積比<sup>3)</sup>

られる。

透水係数は、ポーラスコンクリートの供試体中に存在する連続空隙量のみならず、空隙の径、長さ、形状や分布性状等の影響を受ける。したがって、透水係数の測定に用いる供試体の表面が型枠面である場合、求められた透水係数の値は、型枠に接する部分に存在する連続的な空隙の影響を受けており、供試体内部の空隙の特性が十分には反映されていない可能性がある。

本研究では、型枠面に存在する連続的な空隙が、ポーラスコンクリートの性能（空隙率、透水係数、強度等）に及ぼす影響について実験的に検討した。

型枠面に存在する空隙量は、使用する骨材径にも依存することが予想される。ただし、供試体寸法が大きくなれば、型枠面に存在する空隙の影響は小さくなると考えられる。したがって、実験1では、骨材寸法の違いや供試体寸法の違いが、ポーラスコンクリートの空隙率、透水係数等の試験結果に及ぼす影響について検討した。実験2では、比較的大きな寸法の骨材を使用したポーラスコンクリートを用いて、前述の型枠面に存在する空隙の有無が各種強度試験結果に与える影響について検討した。

## 2. 実験1

### 2.1 実験1の概要

#### (1) 供試体の概要

実験1で用いたポーラスコンクリートの示方配合を表-1に示す。粗骨材には、揖斐川産の

玉砕石（表乾比重2.61）を、JIS 5号砕石（20～13 mm）、6号砕石（13～5 mm）の範囲内に収まるよう粒度調整を行なったものを使用した。空隙率を測定するための円柱供試体は、 $\phi 15 \times 15\text{cm}$  および  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  の2種類について2本ずつ作製した。各供試体について4層に分けて型枠につめ（以後、型枠供試体と呼ぶ）、手による突き固めを行なうとともに、2層に一回の割合でハンドバイブレーターによる締固めを行なった。同様の方法にて作製した直方体供試体から、前述の供試体寸法のコア（以後、コア抜き供試体と呼ぶ）を  $\phi 15 \times 15\text{cm}$  については1本、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$  については2本抜いた。

#### (2) 空隙率の測定

本研究では、連続空隙（以後、空隙と呼ぶ）を対象とし、空隙率の測定は、「ポーラスコンクリートの空隙率試験方法（案）」の容積法<sup>2)</sup>に準じて行なった。

#### (3) 透水係数の測定

透水係数の測定は  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  のみを対象とし、「ポーラスコンクリートの透水試験方法（案）」<sup>2)</sup>に準じて行なった。透水係数を算定する際の水頭差については、2.5、5.0、7.5、10cmとし、それぞれの水頭差における流量を測定し、透水係数を算定した。

## 2.2 実験結果

### (1) 空隙率

$\phi 15 \times 15\text{cm}$ 、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$  の各供試体から求めた空隙率を図-4に示す。

5号砕石を用いた場合、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$  の型枠供

表-1 ポーラスコンクリートの配合

| 配合名  | 骨材の種類          | 空隙率<br>(%) | P/G*<br>(%) | W/C<br>(%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |      |
|------|----------------|------------|-------------|------------|-------------------------|-----|------|
|      |                |            |             |            | W                       | C   | G    |
| 配合 1 | 5 号<br>20~13mm | 18.3       | 30          | 30         | 91.3                    | 303 | 1635 |
| 配合 2 | 6 号<br>13~5mm  | 14.0       | 30          | 30         | 96.4                    | 321 | 1713 |

\*ペースト粗骨材比

試体とコア抜き供試体の空隙率の平均はそれぞれ 28.5%, 18.3% となり,  $\phi 15 \times 15 \text{cm}$  の型枠供試体とコア抜き供試体の空隙率はそれぞれ 25.0%, 17.0% となった。型枠供試体よりもコア抜き供試体の方が大幅に空隙率が小さい(およそ 2/3) ことが分かる。さらに直径が大きい供試体を用いた空隙率の測定結果の方が, 小さい供試体の空隙率の測定結果に比べて小さくなり, 空隙率の測定結果が供試体寸法の影響を受けていることが明らかとなった。

6 号碎石を用いた場合においても, 型枠供試体とコア抜き供試体の空隙率の差が存在した。ただし, 5 号碎石に比べるとその差は小さい。このことは, 骨材寸法が大きいほど型枠に接する面の空隙寸法が大きく, しかも連続的に存在することにより, 空隙率が大きくなったものと考えられる。以上より, 空隙率の測定結果は骨材寸法および供試体寸法の影響を受けることが明らかとなった。

コンクリートの配合計算においても, 特に練上がりコンクリートの容積を適切に計算するためには, コア抜き供試体から求めた空隙率を用いることが望ましいと考えられる。

## (2) 透水係数

$\phi 10 \times 20 \text{cm}$  の供試体を用いて算定した透水係数を図-5, 6 に示す。図より透水係数は, すべてのシリーズにおいて, 型枠供試体のほうがコア抜き供試体より大きくなり, 表面部分の影響が認められた。骨材寸法が透水係数に及ぼす影響については, 例えば動水勾配が 0.25 におけるコア抜き供試体の透水係数に対する型枠

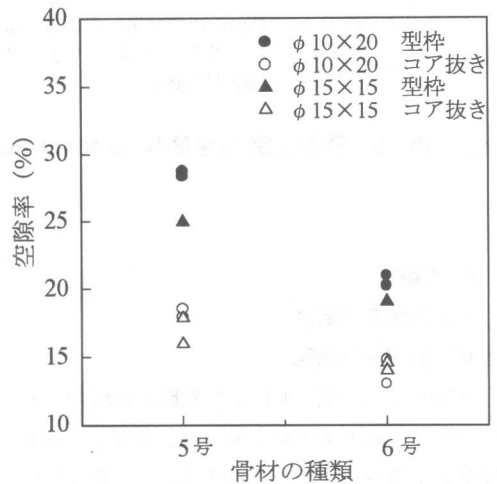


図-4 空隙率の測定結果

供試体の透水係数の比は, 5 号碎石で 2.8, 6 号碎石で 4.9 となった。

## 2.3 実験1のまとめ

寸法の異なる 2 種類の骨材を用いてポーラスコンクリートを作製し, 骨材寸法の違いや供試体寸法の違いが, ポーラスコンクリートの空隙率, 透水係数等の測定値に及ぼす影響について検討した結果, 以下の結論を得た。

- (1) 型枠供試体の空隙率に比べて, コア抜き供試体の空隙率は 2/3 程度となった。型枠供試体とコア抜き供試体の空隙率の差は, 骨材寸法が大きいほど大きく, さらに供試体寸法が小さいほど大きい結果となった。配合計算にあたっては, こうした空隙率の違いを考慮する必要がある。
- (2) 型枠供試体の透水係数は, コア抜き供試体の透水係数に比べて, 3~5 倍大きいことが明らかとなった。

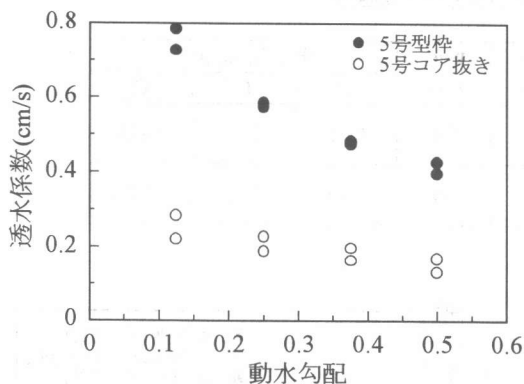


図-5 透水係数 (5号碎石,  $\phi 10 \times 20\text{cm}$ )

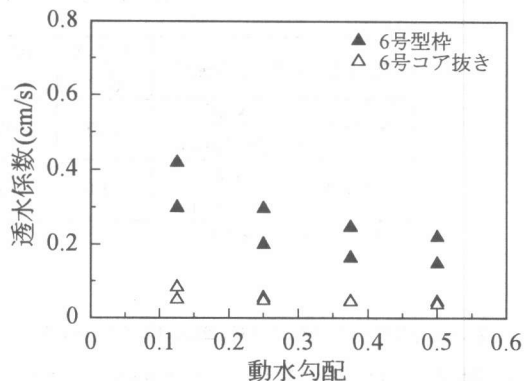


図-6 透水係数 (6号碎石,  $\phi 10 \times 20\text{cm}$ )

### 3. 実験2

#### 3.1 実験2の概要

##### (1) 供試体の概要

実験2では、表-1に示す実験1の配合1を使用して、各供試体を作製した。空隙率、透水係数および各種強度を測定するため、表-2に示す数の供試体を、実験1に準じて作製した。曲げ強度試験用供試体については、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の型枠供試体と、コンクリートカッターを用いて切出した供試体（以後、中心部分を抜き出したという意味で、これもコア抜き供試体と呼ぶ）を作製した。

すべての供試体は打設後2日にて脱型し、 $20^\circ\text{C}$ の恒温室にて湿布養生を行った。なお、コア抜き作業は材齢7～9日の間にて行った。

##### (2) 空隙率および透水係数

空隙率および透水係数については、 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ および $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の2種類の供試体を対象とした。具体的な計測方法は、実験1で用いたものと同様とした。ただし、透水係数試験の水頭差については、供試体直径の $1/3$ 、 $1/2$ 、 $1$ の長さとした。

##### (3) 強度試験

空隙率、透水係数を測定した後、円柱供試体の両端面のキャッピングをセメントペーストで行ない、材齢18～19日にて載荷試験を行な

ゲージ貼付位置

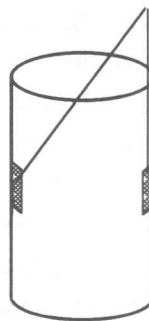


図-7 弾性係数の測定方法 ( $\phi 15 \times 30\text{cm}$ )

た。弾性係数の測定にあたって、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の供試体は、コンプレッソメーターを使用して変位を測定した。 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ の供試体については、図-5に示すように、供試体側面（幅20mm、長さ50mmの領域）の相対する2面にあらかじめセメントペースト（水セメント比30%）を塗り付けておき、表面を平滑に処理した後、長さ30mmのひずみゲージを貼り付けて直接ひずみを計測した。

### 3.2 実験結果

#### (1) 空隙率および透水係数

$\phi 15 \times 30\text{cm}$ 、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の供試体から得られた空隙率を表-3に示す。実験1で得られた空隙率と同程度の空隙率の値となり、型枠供試体の方が、コア抜き供試体に比べて空隙率が大きくなった。

表-2 作製した供試体の数

|         | 円柱供試体                        |                              |                              | 角柱供試体                             |
|---------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
|         | $\phi 15 \times 30\text{cm}$ | $\phi 10 \times 20\text{cm}$ | $\phi 15 \times 15\text{cm}$ | $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ |
| 型枠供試体   | 3                            | 3                            | 3                            | 3                                 |
| コア抜き供試体 | 3(2) *1                      | 3                            | 2*2                          | 3                                 |

\*1: 強度試験のみ2体とした

\*2:  $\phi 15 \times 30\text{cm}$  の供試体のうちの1体を切断して作製した

$\phi 15 \times 30\text{cm}$ ,  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  の供試体から得られた透水係数を図-8, 9 に示す。図より,  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  の供試体を用いた透水係数は, 実験 1 で得られた透水係数 (図-5 参照) と同程度の値となり, 型枠供試体の透水係数に比べてコア抜き供試体の透水係数が小さくなった。型枠供試体の場合,  $\phi 15 \times 30\text{cm}$  の供試体を用いて求められた透水係数は,  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  の供試体を用いて算出された透水係数に比べて小さくなり, 透水係数の計測結果は, 供試体寸法の影響を受けることが明らかとなった。一方, コア抜き供試体を用いて算出された透水係数は, 供試体寸法によらず同程度の透水係数が得られた。

## (2) 各種強度試験

表-4 に各ポーラスコンクリートの強度試験結果を示す。なお, 表中のカッコ書きは, 型枠供試体の値に対するコア抜き供試体の値の比を示す。

圧縮強度および弾性係数について, コア抜き供試体の方が, 型枠供試体に比べて大きくなっており, 圧縮強度は最大で 17% 大きくなった。この理由としては, 型枠供試体の側面には連続的な空隙が存在しているにもかかわらず, 圧縮強度の値の算定には, 型枠供試体, コア抜き供試体ともに見かけの直径 (約 15cm または約 10cm) を使用しているため, 型枠供試体から求めた圧縮強度の値が相対的に小さくなったものと考えられる。柳橋ら<sup>4)</sup>は, ポーラスコンクリートにおいても, コアボーリングによるマイクロクラックの発生, ならびに切断面付近の脆弱

表-3 空隙率の測定結果

|          | 供試体寸法                        | 空隙率 (%) |      |
|----------|------------------------------|---------|------|
|          |                              | 型枠      | コア抜き |
| 5号<br>碎石 | $\phi 15 \times 30\text{cm}$ | 26.3    | 20.9 |
|          | $\phi 10 \times 20\text{cm}$ | 26.8    | 19.5 |

化による強度 (圧縮強度) 低下があり得ることを指摘しているが, 本研究の範囲内においては明確ではなかった。

一方, 曲げ強度, 割裂強度に関しては, 型枠供試体に比べてコア抜き供試体の方が小さくなった。曲げ強度ならびに割裂強度については, 供試体本数が少ないため, データの充実が望まれる。

## 3.3 実験2のまとめ

ポーラスコンクリートの型枠供試体とコア抜き供試体とを用いて, 表面部分の有無が透水係数ならびに各種強度試験結果に与える影響について検討した。その結果, 以下の結論を得た。

- (1) 型枠供試体を用いて算出した透水係数は, 供試体寸法が大きいほど小さくなる傾向にあった。一方, コア抜き供試体を用いて算出された透水係数は, 供試体寸法によらず同程度の透水係数が得られた。
- (2) 圧縮強度, 弾性係数については, コア抜き供試体の方が型枠供試体に比べて大きくなった。一方, 曲げ強度, 割裂強度に関してはコア抜き供試体の方が小さくなった。

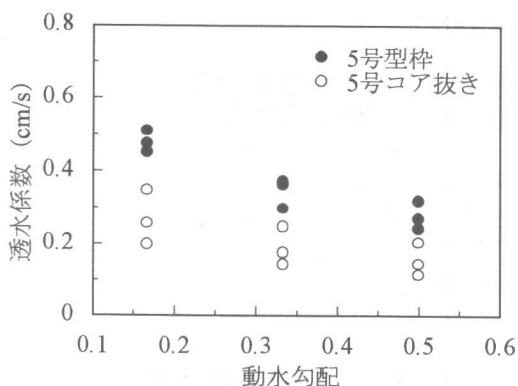


図-8 透水係数の測定結果 ( $\phi 15 \times 30\text{cm}$ )

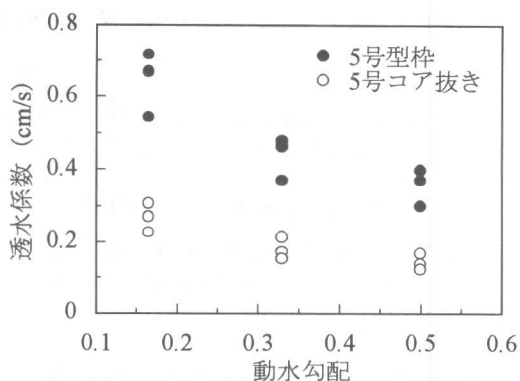


図-9 透水係数の測定結果 ( $\phi 10 \times 20\text{cm}$ )

表-4 5号碎石を用いたポーラスコンクリートの強度試験結果

| 供試体  | 圧縮強度 (MPa)                   |                              | 弾性係数 (GPa)          |                              | 曲げ強度 (MPa)                        | 割裂強度 (MPa)                   |
|------|------------------------------|------------------------------|---------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
|      | $\phi 15 \times 30\text{cm}$ | $\phi 10 \times 20\text{cm}$ | $\phi 15 \times 30$ | $\phi 10 \times 20\text{cm}$ | $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ | $\phi 15 \times 15\text{cm}$ |
| 型枠   | 16.3                         | 16.0                         | 15.2                | 15.0                         | 2.60                              | 2.02                         |
| コア抜き | 19.1<br>(1.17)               | 18.0<br>(1.13)               | 16.1<br>(1.06)      | 16.4<br>(1.09)               | 2.51<br>(0.97)                    | 1.80<br>(0.89)               |

\*カッコ内の数字は、型枠供試体に対するコア抜き供試体の比を示す

#### 4. あとがき

本研究では、ポーラスコンクリートの空隙率、透水係数を測定する際、型枠に詰めた供試体を用いた場合には、型枠面に存在する空隙により、空隙率と透水係数の測定結果はコア抜き供試体の結果よりも大きくなることが明らかとなった。

型枠に詰めた供試体を用いた場合の圧縮強度と弾性係数の測定結果は、コア抜き供試体を用いた場合に比べて小さくなっていることが明らかとなった。

今後ポーラスコンクリートを実構造物に適用する場合、構造物や製品の寸法が小さい場合（例えばブロック等）には、型枠供試体を用いた日本コンクリート工学協会の空隙率や透水係数の試験方法の適用が可能であるが、寸法が大きい場合には、補正係数等を用いて補正する必要があると考える。さらに配合計算においても、適切に評価した空隙率を用いる必要があると考える。

#### 参考文献

- 1) 水口裕之：エココンクリートとは、コンクリート工学, Vol.36, No.3, pp.9-12, 1998
- 2) 日本コンクリート工学協会：エココンクリート研究委員会報告書, 1995
- 3) 鎌田敏郎, 国枝稔, 島崎磐, 六郷恵哲：超音波によるポーラスコンクリートの内部組成の評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.20, pp.733-738, 1998
- 4) 柳橋邦生, 米澤敏男, 安藤慎一郎, 山田敏昭：ポーラスコンクリートの締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