

## 論文 ポーラスコンクリートに適用する結合材の性質に関する研究

松川 徹<sup>\*1</sup>・玉井 元治<sup>\*2</sup>・山林 彰宏<sup>\*3</sup>

**要旨：**現場における合理的施工に必要なデータを得ることを目的として、ポーラスコンクリートに使用する結合材の流動特性をレオロジー量によって評価した。そして、レオロジー量とフロー値の相関性から、ポーラスコンクリートに適応できる結合材の定量的なデータを得た。さらに、振動台に取り付けた分割型の特殊円筒内にフレッシュなポーラスコンクリートを充填して振動締固め時における結合材の分離性状を調べ、振動周波数や振動時間と結合材の垂れ落ち挙動との関係を明らかにした。これらの結果より、結合材が分離を起こさないための条件（配合、製造方法、振動周波数、振動時間等）を示した。

**キーワード：**ポーラスコンクリート、結合材、流動性、レオロジー量、分離性状

## 1. はじめに

ポーラスコンクリート（以下、PoC）は、その多孔質な構造のため、従来のフレッシュコンクリートの品質管理試験が適用できず、また乾燥等の影響を受けやすいことから、打設前の結合材の管理が非常に重要である。また、PoCの品質は、振動エネルギー下における結合材の流動挙動の影響を大きく受ける。

2001年刊行の「ポーラスコンクリート河川護岸工法の手引き」により、PoCの製造が体系化され、その品質管理について一定の管理基準が定められた<sup>1)</sup>。今後、合理的施工と品質向上のために統一的な製造管理が必要であり、結合材の流動挙動に基づいた定量的な判断基準が求められている。

結合材であるセメントペーストは高懸濁物質であるが、他分野で発達してきたレオロジーの理論を適用することが可能である。本研究は、PoCの各種配合および製造方法におけるレオロジー定数の比較試験を通じて、PoCに用いる結合材性状の定量化を図るものである。また、フレッシュなPoCにおける振動試験により、振動締固め下の結合材の分離挙動について調べ、

最適な結合材性状と施工条件について検討した。

## 2. PoCの構成

結合材の流動形式は、せん断応力とせん断ひずみ速度の関係曲線（図-1参照）より、ビンガム流体に近似できる。この場合のレオロジー定数として、降伏値と塑性粘度が算出される。

PoCとしての構成条件は、固相、液相、気相の3要素がそれぞれ連続かつ均質となるFunicular(ファニキュラー)の第一領域を形成している必要がある。PoCの施工において、結合材のレオロジー量(降伏値、塑性粘度)が小さいと結合

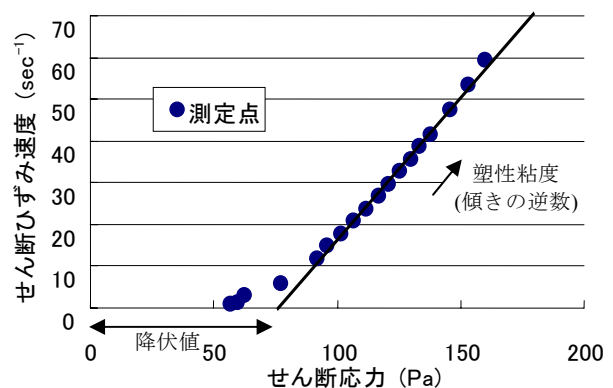


図-1 代表的なコンシステンシー曲線

配合：普通セメント，W/(C+SF)=30%  
SF/(C+SF)=10%，SP/(C+SF)=1.00%

\*1 (株)建設技術研究所 大阪支社 水工部 工修（正会員）

\*2 近畿大学 理工学部土木工学科教授 工博（正会員）

\*3 堺市水道局 配水部工務第二課 工修

材が骨材から垂れ落ち、打設した PoC の下層部は閉塞する。またレオロジー量が大きいと結合材が骨材に均一に付着せず、連続した空隙が保持されない状態となる。PoC の結合材には、適当な厚さで骨材に均一に付着し、分離しない性状が求められる。

### 3. 実験概要

#### 3.1 使用材料

セメント：普通ポルトランドセメント(C<sub>N</sub>；密度=3.15g/cm<sup>3</sup> [SO 社製])，高炉セメント B 種(C<sub>B</sub>；密度=3.04g/cm<sup>3</sup> [T 社製])，粗骨材：6 号砕石(G；表乾密度=2.70g/cm<sup>3</sup> [高槻産])，細骨材：7 号珪砂(S；表乾密度=2.60g/cm<sup>3</sup> [土岐産])，混和材：シリカフューム(SF；密度=2.30g/cm<sup>3</sup> [K 社製])，混和剤：高性能 AE 減水剤(SP；密度=1.02g/cm<sup>3</sup> {20℃}[カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物，K 社製])，水：一般水道水(W)

#### 3.2 配合

レオロジー試験および振動試験は、表－1に示す代表的な配合で各混入率を変えて行った。また、基本配合を表－2に示す。

#### 3.3 試験方法

(1) 骨材試験：骨材のふるい分け試験は JIS A 1102-1989，比重および吸水率試験は JIS A 1134-1995，単位容積質量および実積率試験は JIS A 1104-1993 にそれぞれ準じて行う。

(2) フロー試験：JIS R 5201 に準じる。レオロジー測定および振動試験の毎に行い、所定のフロー値が出る SP 混入率を求める。

(3) レオロジー測定試験：二重円筒型回転粘度計（外円筒回転式，表面凹凸型特殊内外筒使用，外筒φ22±0.5 mm，内筒φ12±0.5 mm，浸液長70 mm）（写真－1，2参照）を用い，図－3に示す定常流測定法の手順に従って測定する。なお，練混ぜからレオロジー測定までの作業は20±0.5℃の室内で行い，試料はフロー試験と同一のものを使用する。また，練混ぜ方法は図－4の手順とし，練混ぜ時間については図－5に示した手順で行う。

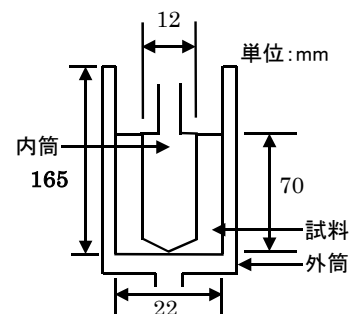
表－1 代表的な配合

| セメントの種類                                     | W/B<br>[wt.%] | SF/B<br>[wt.%] | S/B<br>[wt.%] | フロー値    |
|---------------------------------------------|---------------|----------------|---------------|---------|
| C <sub>N</sub> (普通)<br>C <sub>B</sub> (高炉B) | 25～35         | 0～15           | 0～100         | 180～250 |

注) B=(G+SF):結合材量を示す。

表－2 基本配合

| 基本配合 | W/B<br>[wt.%] | SF/B<br>[wt.%] | フロー値    |
|------|---------------|----------------|---------|
|      | 30            | 5              | 180～250 |



写真－1 回転粘度計

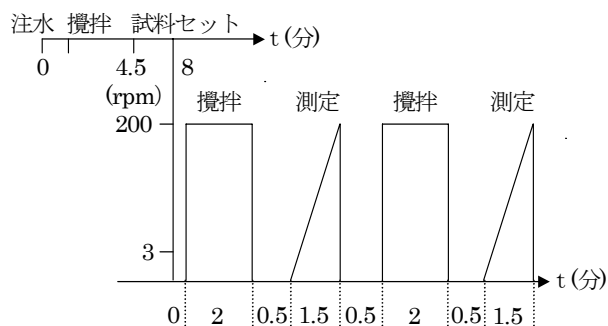
図－2 測定部の形状

(4) レオロジー量の算出：セメント質結合材は降伏値を有することからビンガム流体と見なすことができる。そこでレオロジー測定結果よりコンシステンシー曲線を描き（10 測点以上；図－1 参照）その回帰式から塑性粘度および降伏値を算出する。

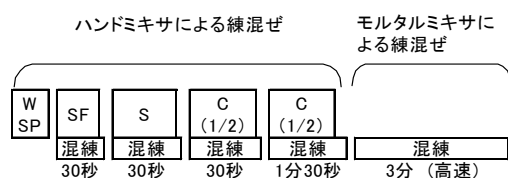
(5) 振動試験：底面に鋼製の網を装着させ，鉛直方向4層に分割できるアクリル製特殊円筒（φ10×20cm：写真－2参照）を可変振動試験装置のテーブルバイブレーター（M 社製：振動数:1500～5000r.p.m，振幅:約0.1～2.0mm）に取り付ける。円筒内にフレッシュな PoC を充填させ，可変振動試験装置にて振動数を2000～5000r.p.m に変化させて振動を与える。そして，底面から垂れ落ちた結合材量を測定する。

なお，本試験では振幅を1mmとし，また実際の PoC の製造時間を考慮して，振動時間は10秒間とする。

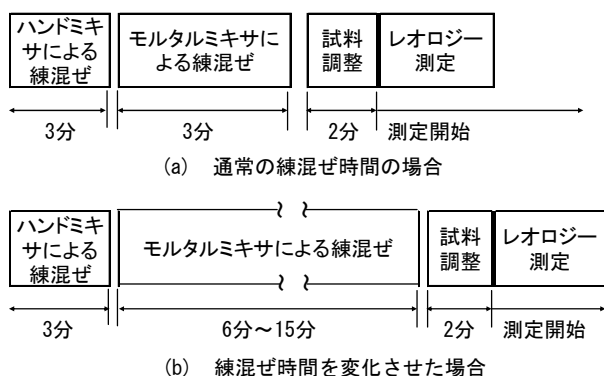
(6) 洗い分析試験：振動試験後、円筒内の試料を各層毎に分け洗い分析試験を行う。その結果より変動係数と空隙保持率を算出する。



図－3 定常流測定手順の概要



図－4 結合材の練混ぜ方法(先練り)



図－5 結合材の練混ぜ時間



写真－2 特殊円筒

(7) 供試体作製と養生方法：可変振動試験装置を用いて、基本配合( $C_N$ )でフロー値  $200 \pm 5$  のもと、振動数を  $2000 \sim 5000 \text{ r.p.m}$ 、振動時間を  $5, 10$  秒と変化させて振動を与え、強度試験用の供試体を作製する。24 時間湿潤養生後、脱型して湿潤養生( $20^\circ\text{C}$ )を 28 日間行う。

(8) 圧縮強度試験：供試体上下両面にキャッピングを行った後、JIS A 1108 に準じて行う。

(9) 空隙率試験：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<sup>2)</sup>に準じて行う。

## 4. 実験結果と考察

### 4.1 温度がレオロジー量に及ぼす影響

図－6は、基本配合( $C_N$ )において、設定温度を  $10 \sim 30^\circ\text{C}$  とした場合の、水結合材比別の塑性粘度と降伏値の関係を示す。これより、降伏値と塑性粘度はほぼ比例の関係を示し、温度上昇と共に水和反応が進みそれぞれの値が大きくなることが分かる。また、レオロジー量の変化量は水結合材比の低いものほど大きくなる傾向を示す。これは、水結合材比が低い場合、水和反応に使用されず結合材の流動性に要する自由水量が少なくなり、粘度の増加が早まるためと考えられる。さらに、ポリエーテル系 SP が高温になるにつれてセメント分散効果が減少することも原因の一つと考えられる。

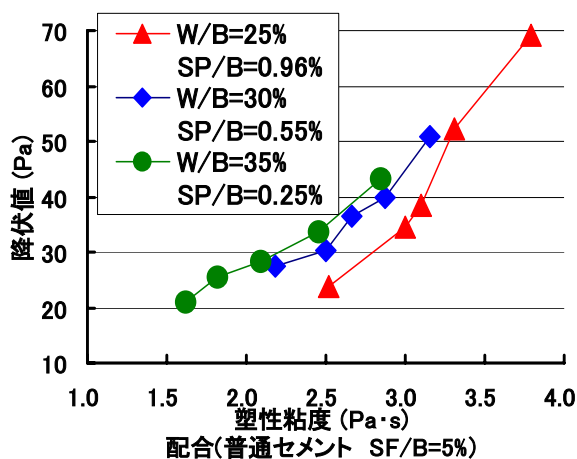


図-6 温度変化がレオロジー量に及ぼす影響  
注)プロット点は左から10、15、20、25、 $30^\circ\text{C}$ をそれぞれ示す。

## 4.2 珪砂混入による影響

基本配合 (C<sub>B</sub>) において、珪砂(S)混入率別に、図-7は SP 混入率とフロー値の関係を、図-8、9はフロー値と塑性粘度および降伏値の関係をそれぞれ示す。

図-7より、所定のフロー値 (180~250) を得るための SP 混入率は、S 混入率の増加に伴い増えることが判る。これは、S 混入率が増加すると結合材内の水分が S の表面に付着・吸水され、結合材の流動性に要する自由水が減少することが原因と考えられる。

また、図-8、9より、レオロジー量は S 混入率の増加に伴って大きくなることが分かる。これは、結合材内の自由水が減少すると、セメント懸濁系の濃度が高まることで粒子同士の間隔が狭くなり、粒子間摩擦の影響が大きくなり粘度が増加するものと考えられる。

また、SP 混入率およびレオロジー量は、S 混入率 75~100%間で急激に増加し、特に低フロー時のレオロジー量の増加が著しいことが判る (図-8、9に S 混入率 100%における回帰直線を示す)。これは、S 混入率 75%以上になると、同一単位水量 (W/B=30%) における自由水量が、流動性を維持する限界に近付いていることを示している。このように水量が限界付近になると、セメント懸濁系内の粒子構造が塑性化し、粒子の移動に対する抵抗が急激に増大するものと考えられる。なお、S 混入率が 100%以上になると、施工に必要な流動性は得られなくなる。

以上のことから、レオロジー量の向上を目的に S を混入する場合、その混入率を 75~100%程度にすると比較的大きな効果が得られるものと考えられる。

## 4.3 SF 混入による影響

基本配合 (C<sub>N</sub>)、先練り法において、SF 混入率を 0~15%に変えた場合の、図-10 は練混ぜ時間とフロー値の関係を、図-11、12 は練混ぜ時間と塑性粘度および降伏値の関係をそれぞれ示す。

これらより、SF を混入した場合は、練混ぜ時

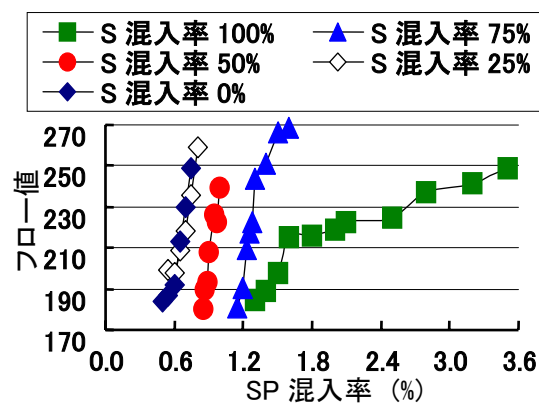


図-7 SP 混入率とフロー値の関係

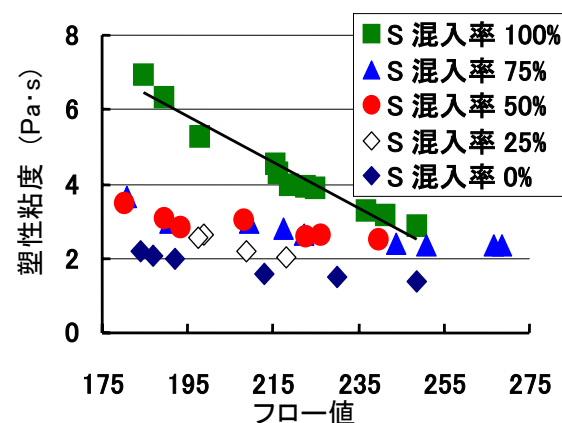


図-8 フロー値と塑性粘度の関係

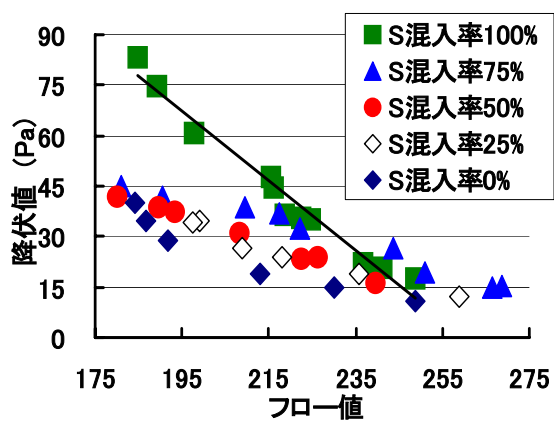


図-9 フロー値と降伏値の関係

間の増加に伴いフロー値も増加し、また、この増加率は SF 混入率に比例して大きくなることが判る。これは、練混ぜ時間の増加に伴い超微粒子である SF の分散が十分に行われ、SF の特性であるボールベアリング作用が働いたためと考えられる。そして、SF 混入率の増加に伴いこの作用は大きくなり、結合材の流動性が増加 (レオロジー量は減少) することが分かる。

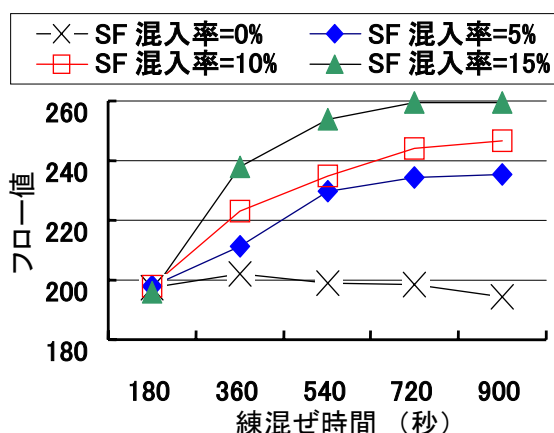


図-10 練混ぜ時間とフロー値の関係

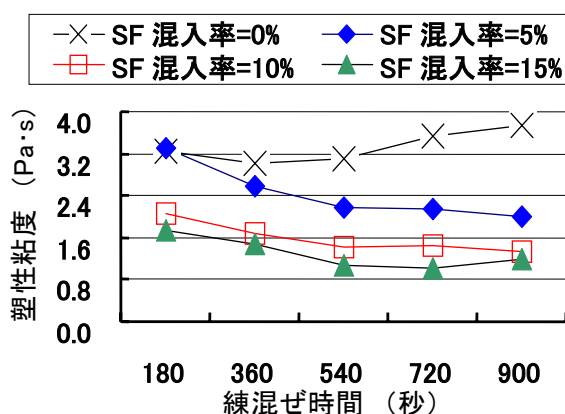


図-11 練混ぜ時間と塑性粘度の関係

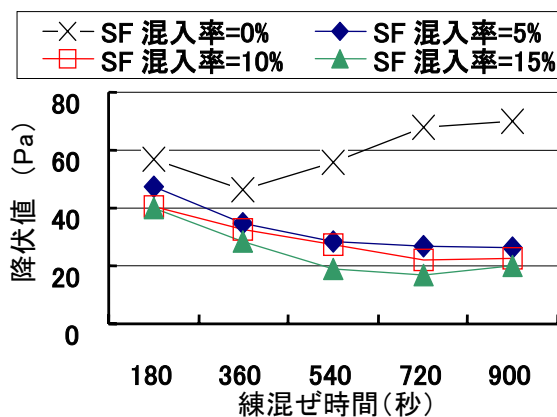


図-12 練混ぜ時間と降伏値の関係

また、練混ぜ時間が 540 秒以下ではフロー値は上昇し続けるが、720 秒を越えるとその上昇が止まり安定することから、720 秒が SF の分散に必要な練り混ぜ時間と考えられる。一方シリカフューム無混入の配合は、練混ぜ時間の増加に伴い流動性が低下する傾向にある。これは、時間経過と共にセメントの水和反応が進み、セメント懸濁系の粘度が増加するためと考えられる。

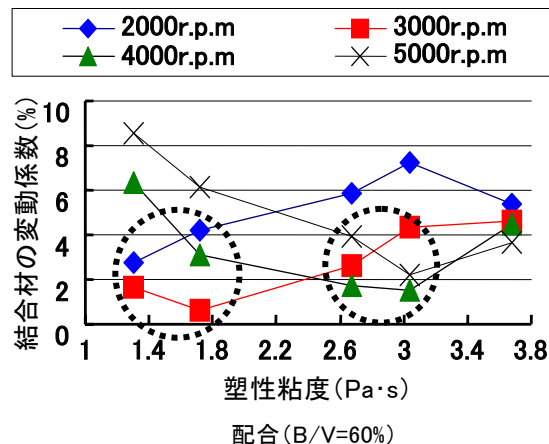


図-13 結合材の塑性粘度と変動係数の関係

注) プロット点は右からフロー値 170, 190, 210, 230, 250 を示す。

#### 4.4 振動締め固めの PoC のフレッシュ性状

ここでは、主に強度面を重視した PoC を対象とし、可変振動試験装置を用いたコンシステンシー試験を行い、PoC のフレッシュ性状の把握および評価を行った。また、同装置を用いて PoC 供試体を作製し、圧縮強度および空隙率との比較検討を行った。

基本配合(C<sub>N</sub>)において充填率を 60%とした結合材について、図-13 に塑性粘度と結合材の変動係数を、図-14 にフロー値と骨材の変動係数および空隙保持率との関係をそれぞれ示す。なお、ここで用いる変動係数と空隙保持率の定義を以下の通りとする。

$$\text{結合材の変動係数}(\%) = \frac{\text{各層における (ペースト重量/骨材重量) の標準偏差}}{\text{各層における (ペースト重量/骨材重量) の平均}} \times 100$$

$$\text{骨材の変動係数}(\%) = \frac{\text{各層における骨材重量の標準偏差}}{\text{各層における骨材重量の平均}} \times 100$$

$$\text{空隙保持率}(\%) = \frac{\text{供試体の空隙体積 (最下層)}}{\text{設計時の空隙体積 (最下層)}} \times 100$$

図-13 より、高振動数 (4000, 5000r.p.m) では、塑性粘度が小さいと変動係数が大きくなり材料分離が生じていることが判る。結合材の均一性が最も高まるのは塑性粘度 3 Pa·s 程度である。一方、低振動数 (2000~3000r.p.m) では、塑性粘度が大きいと十分に締め固められず、結合材のまだらな状態が伺える。結合材の均一性が最も高まるのは塑性粘度 1.5 Pa·s 程度である。

なお、塑性粘度  $3.5\text{Pa}\cdot\text{s}$  以上になると、振動数に関わらず変動係数がある一定値付近となることから、結合材が固すぎて振動の影響を受けず、振動前のまだらな状態が残るものと考えられる。

図-14 より、振動数  $2000\text{r.p.m}$  では骨材の変動係数が大きく、空隙保持率は  $100\%$  以上となることから、締固めが不十分であることが判る。一方、振動数  $4000\sim 5000\text{r.p.m}$  では骨材の変動係数が小さいことから、骨材は均一に充填されていることが判る。また、各振動数でフロー値の増加に伴い空隙保持率が低下し、フロー値  $210$  以上でこの傾向が顕著に表れている。これは、材料分離による結合材の垂れ下がりが原因と考えられる。以上より材料分離と空隙保持の観点から、適切なフロー値は  $190$  程度といえる。

結合材のフロー値を  $200\pm 5$  としたときの PoC の圧縮強度、空隙率と振動数との関係を図-15 に示す。これより、振動数が増加すると圧縮強度は上昇し空隙率は低下する傾向が判る。しかし、振動数  $5000\text{r.p.m}$  ではこれと逆の傾向を示すことから、骨材に結合材が均一に付着せず垂れ落ちている状態が伺える。なお、振動数  $4000\text{r.p.m}$ 、振動時間  $10$  秒間のときに設計時の空隙率 ( $24.8\%[\text{B/V}=40\%]$ ,  $16.5\%[\text{B/V}=60\%]$ ) に近くなり、また圧縮強度が最大となった。

## 5. まとめ

- ① PoC の施工性への影響が大きい結合材の流動性状は、レオロジー量を用いた定量的な評価が有効である。
- ② 珪砂の混入により、結合材の降伏値および塑性粘度は大きくなる。S 混入率 (S/B) は  $75\sim 100\%$  程度が望ましい。
- ③ 結合材の流動性を得るためには SF の混入が有効である。SF の効果を十分に発揮できる練混ぜ時間は  $720$  秒以上である。
- ④ 材料分離を少なくするためには、結合材の塑性粘度を、高振動数 ( $4000\sim 5000\text{r.p.m}$ ) の場合は  $3\text{Pa}\cdot\text{s}$  程度、低振動数 ( $2000\sim 3000\text{r.p.m}$ ) の場合は  $1.5\text{Pa}\cdot\text{s}$  程度にする必要がある。

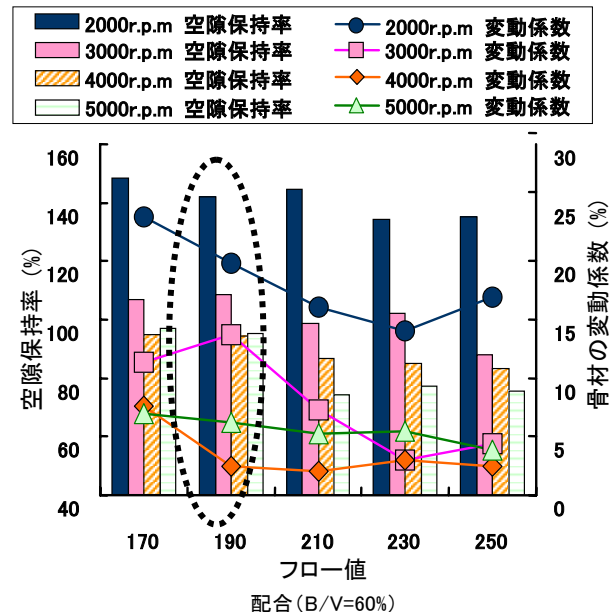


図-14 骨材の変動係数と空隙保持率の関係

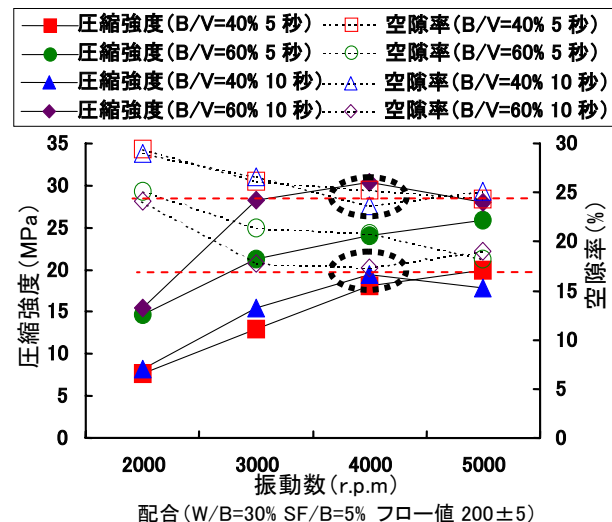


図-15 振動数の違いによる圧縮強度および空隙率の関係

- ⑤ 6号砕石を用いた場合、PoC の強度および空隙率の面から、締固め振動数  $4000\text{r.p.m}$ 、振動時間  $10$  秒間が最適と考えられる。
- ⑥ 今後の課題として、今回のような懸濁系材料のレオロジー測定手法、振動試験の手順と評価方法の確立が挙げられる。

## 参考文献

- 1) (財) 先端建設技術センター：ポーラスコンクリート河川護岸工法の手引き, 山海堂, 2001
- 2) (社) 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, pp.54-56, 1995.11