

# 論文 混和材置換によるフレッシュコンクリートの振動充てん性に関する定量的評価

千賀 年浩\*1・橋本 親典\*2・渡辺 健\*3・石丸 啓輔\*4

**要旨:** フライアッシュ (FA) および高炉スラグ微粉末 (BS) をセメント代替として一部置換したフレッシュコンクリートの振動充てん性について実験的検討を行った。その結果振動充てん性が良好になる条件は、二次製品を想定した高振動エネルギーにおいて、スランブ 20±2 cm では BS4000, FA II 種, IV 種の置換, スランブ 14±2cm, 8±2 cm では FA IV 種の置換の場合である。一方, 通常の棒パイプレーターによる打ち込みを想定した振動エネルギーにおいては, スランブ 20±2 cm では全ての BS, FA II 種, IV 種の置換, スランブ 14±2 cm では FA II 種, IV 種の置換, スランブ 8±2 cm では BS4000, FA II 種, IV 種の置換の場合である。

**キーワード:** 振動充てん性, 比表面積, ボックス形充てん試験機, 高炉スラグ微粉末, フライアッシュ

## 1. はじめに

近年, 環境面への配慮から産業廃棄物の有効利用が積極的に行われている。中でも, 石炭火力発電所で発電時に発生する石炭灰は 2006 年現在で年間 1000 万トン以上、高炉スラグ微粉末に関しては 2008 年では 2280 万トン発生している<sup>1)</sup>。これらの混和材の利点は長期材齢の強度増進やアルカリ骨材反応抑制効果など, その化学的, 物理的性質から数多くの分野で利用されており, 更なる有効利用のため様々な研究が行われているが, コンクリートの一部を置換した場合の充てん性に関する検討は十分とは言い難い<sup>2)</sup>。

また, 最近では良質な骨材資源の枯渇化, 海砂の採取禁止等により砕石・砕砂等の骨材の使用が一般的になっており, 施工性能に関して従来の骨材と比較すると性能的に劣る。砕石・砕砂コンクリートの施工性能の向上を図るには, フライアッシュ, 高炉スラグ微粉末の利用が解決策の一つとして考えられる。

振動充てん性が良好なコンクリートとは, 振動中は粘性が小さくなり充填しやすいコンクリートであり, 振動停止後は材料分離抵抗性が大きく流動しにくいあるいは自立性の高いコンクリートである。換言すれば, チキソトロピー性を有するコンクリートである<sup>3)</sup>。

本研究では, フライアッシュ (以下, FA と示す), 高炉スラグ微粉末 (以下, BS と示す) を使用したコンクリートの振動充てん性の評価に着目し, FA, BS の置換率, 比表面積および振動条件を実験のパラメータとし, 振動充てん時間に及ぼす影響を定量的に評価することを目的とした。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

実験で使用した材料を表-1, 表-2に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。FA, BS は流動性の改善を目的として使用した。空気量調整剤 (以下 AE と示す) は FA 用に高アルキルカルボン酸系のものを, それ以外はアルキルエーテル系のものを使用した。高性能 AE 減水剤 (以下 SP と示す) はポリカルボン酸系のものを使用した。

表-1 使用材料

材料	種類	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	粗粒率	最大寸法 (mm)
細骨材	徳島県阿讃山砕砂	2.53	1.97	2.51	-
粗骨材	徳島県鳴門市撫養産砕石	2.56	2.17	6.66	20
混和剤	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤	1.01	-	-	-
	アルキルエーテル系 AE 剤	1.02	-	-	-
	高アルキルカルボン酸系 AE 剤	1.02	-	-	-

表-2 使用材料

材料	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	強熱減量 (%)	二酸化けい素 (%)
セメント	3.16	3300	-	-
高炉スラグ微粉末 4000	2.91	4120	-	34.20
高炉スラグ微粉末 6000	2.91	5980	0.03	34.66
高炉スラグ微粉末 8000	2.91	7890	0.07	34.24
フライアッシュ I 種	2.40	5360	2.40	58.70
フライアッシュ II 種	2.30	3842	2.30	62.30
フライアッシュ IV 種	1.97	1610	0.30	63.70

\*1 日本国土開発株式会社 工修 (正会員)

\*2 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門教授 博(工) (正会員)

\*3 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門准教授 工博 (正会員)

\*4 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部総合技術センター 専門職員 (正会員)

表-3 配合表

配合	W/P (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
				W	C	FA,BS	S	G	SP (P*×%)	AE (P*×%)
プレーン	50	47	4.5±1.5	175	350	0	796	908	1.3	0.025
FA I 20%					280	70	787	899		
FA II 20%							786	897		
FA IV 20%							780	890		
FA I 30%					245	105	783	893		
FA II 30%							781	891		
FA IV 30%							772	881		
BS4000 24%	47.5			280	88	786	897	1.0	0.003	
BS6000 24%								1.0	0.004	
BS8000 24%								1.4	0.010	
BS4000 35.2%	46.3			245	133	781	891	1.0	0.003	
BS6000 35.2%								1.4	0.010	
BS8000 35.2%										

P\*はC+FAまたはC+BSを意味する

## 2.2 コンクリートの配合

本研究で使用した配合を表-3に示す。表のプレーンは本研究での基本配合である。FA, BSはフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を示す。配合名の数字はFAのI種, II種, IV種をそれぞれ20%, 30%内割りで置換した。BSは4000, 6000, 8000をそれぞれ24%, 35.2%内割りで置換したものを示す。単位骨材量・単位粉体量を一定にし、FAとBSを比較した。すなわち、FA II種20%置換した配合の単位骨材量とBS24%置換した配合の単位骨材量を同量にし、FA II種20%置換した単位粉体量と同じ体積分BSを置換することとし、BS24%置換とした。BS35.2%置換は、FA II種30%置換に対応させた。さらに骨材とセメントペースト間の材料分離を懸念してs/aを47%に設定した。

## 2.3 試験方法

各配合において60リットルの二軸強制練りミキサーを使用し練り混ぜを行った後、以下に示す試験を行い、各種特性を評価した。1度目の計測を行った後、コンクリートを練り板に戻し、経時変化によってスランプロスさせ、2度目以降同じく測定を繰り返し、1配合につき20±2cm, 14±2cmおよび8±2cmの3水準のスランブにおいて測定を行った。スランブロスは最大1時間半の範囲で行った。

### (1) フレッシュ性状に関する試験

練り上がり直後にフレッシュコンクリートのスランブと空気量を、スランブ試験(JIS A 1101)および空気量試験(JIS A 1128)に従い測定した。

### (2) 振動下におけるボックス充てん試験

コンクリートの振動下での振動充てん性を評価するため、高流動コンクリートの間隙通過性を評価する際に用いられる図-1および写真1に示すボックス型容器<sup>4)</sup>

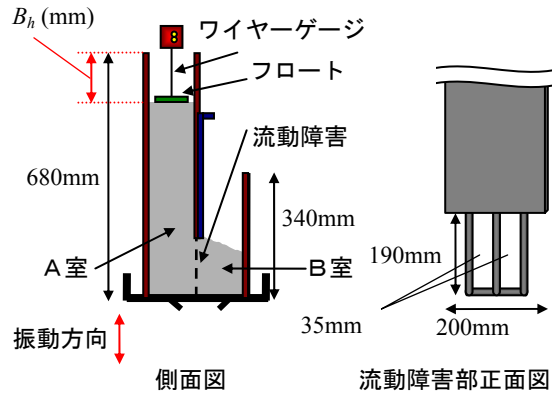


図-1 ボックス型試験装置および障害部分



写真-1 振動台上に設置したボックス形充てん試験容器 (B室側から撮影)

表-4 振動エネルギー水準

条件	想定した使用条件	周波数 (Hz)	振幅 (mm)	加速度 (m/s <sup>2</sup> )
A	二次製品	50	0.45	44.4
B	現場打ち	50	0.37	36.5

およびF社製振動加振式打設機 {周波数: 1~100Hz(分解能 1Hz), 振幅: 0.05mm~5.00mm(分解能±0.01mm)} を用いた試験を行った。容器は、土木学会規準「高流動コ

コンクリートの充てん装置を用いた間げき通過性試験方法(案) (JSCE-F 511-2007)のボックス形容器と同寸法である。流動障害は、D13 鉄筋を 3 本配置した障害 R2 である。この試験は図-1 に示す異形棒鋼 D13 を 3 本柵状に配置した流動障害 (R2)を有するボックス型容器にコンクリートを満たし、設定した振幅と周波数の振動を与えると同時にシャッターを開け、右側の B 室に高さ 300mm 以上になるまで充てんを行う。流動障害部分をコンクリートが通過するのに要した時間によって、型枠に充てんされるコンクリートの振動充てん性を評価するものである。図-1 の A 室のコンクリート天端沈下量  $B_h$  を測定し、これを充てん高さ(以後  $B_h$  と表記)と定義した。

本研究で設定した振動条件を表-4 に示す。コンクリートの二次製品の充てんを想定した振動レベルを周波数 50Hz、振幅 0.45mm と設定した。通常の棒パイプレーターによる打ち込みを想定した周波数 50Hz、振幅 0.35mm と設定した。ボックス試験機に作用する加速度と振動台上面における加速度を等しくするためにボックス試験機は振動台と剛結した。また周波数と振幅の関係から得られる加速度を、与える振動エネルギーとした。関係式を式(1)に示す。

$$a = (2\pi f)^2 A \quad (1)$$

$a$  : 加速度 ( $m/s^2$ )  
 $f$  : 周波数 (Hz)  
 $A$  : 振幅 (mm)

充てん時間は  $B_h$  が振動開始および充てん完了後の影響を受けないよう充てん開始時間を  $B_h=10\text{cm}$  に達するまでに要した時間、充てん完了時間を  $B_h=30\text{cm}$  に達するまでに要した時間とし、その差の時間を本研究における充てん時間の定義とした。

### 2.4 振動下でのフレッシュコンクリートの流動特性

一般の流動特性の概念<sup>5)</sup>を図-3 に、本研究でのコンクリートのフレッシュ性状の概念を図-4 に示す。本研究では、振動下におけるコンクリートの流動特性として、せん断応力を与えることにより、セメントペーストの動的な粘性が下がりせん断速度が増大する曲線を示す流動特性を、チキソトロピー性を有する流動、逆に動的な粘性が上がリせん断速度が低下する曲線を示す流動特性を、ダイレタンシー性を有する流動と定義した。

### 3. 実験結果および考察

振動下におけるボックス充てん試験で得られたボックス充てん時間を振動充てん性の指標として、充てん時間に及ぼすフレッシュ性状の影響を評価した。配合等の要因ごとに充てん時間とスランプ、比表面積、加速度の

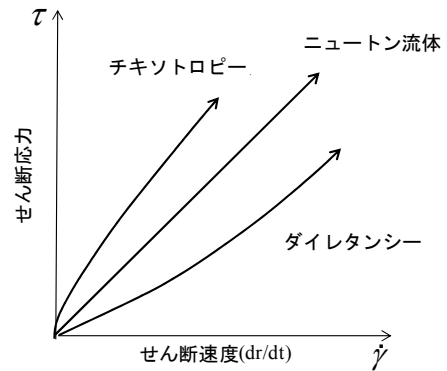


図-3 一般の流動特性

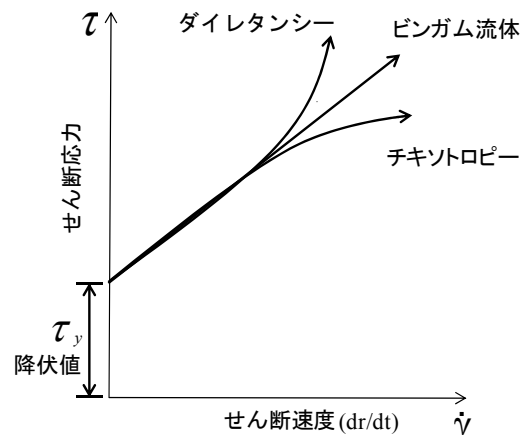


図-4 振動下におけるフレッシュコンクリート流動特性

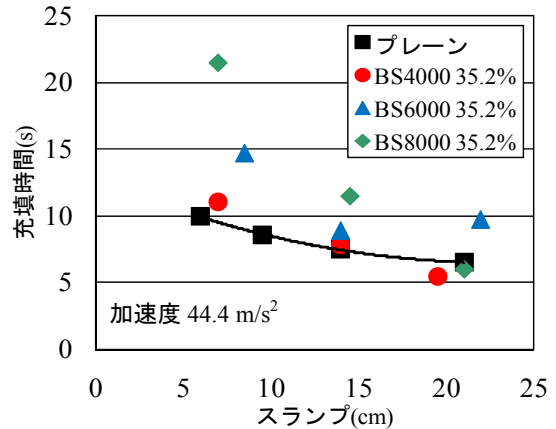


図-5 スランプと充てん時間の関係(a)

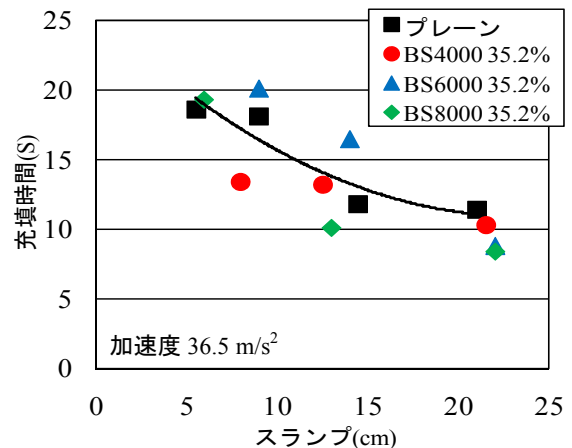


図-6 スランプと充てん時間の関係(b)

関係から検討を行った。

### 3.1 高炉スラグ微粉末が充てん時間に及ぼす影響

BS の影響による実験結果の一例を図-5、図-6に示す。図-5は振動条件が周波数 50Hz、振幅 0.45mm、加速度  $44.4\text{m/s}^2$  の二次製品を想定した高振動エネルギーにおいての BS の影響を示す。図の曲線はプレーンに対応する二次多項式の近似曲線を示す。図-5においてプレーンと比べて BS4000 35.2%は全スランプの範囲において同等の充てん時間となった。しかし BS6000 35.2%、BS8000 35.2%ではプレーンと比較するとスランプ領域  $14\pm 2\text{cm}$ 、 $8\pm 2\text{cm}$  の低スランプになるに従って充てん時間が遅くなり、さらに同程度のスランプにおいて比較すると BS の比表面積が高くなるにつれて充てん時間が遅くなるのがわかる。これらは低スランプになり水和反応が進行することでセメントペーストの粘性の増大により振動充てん性が低下したもので、BS の比表面積が高くなるにつれ粘性が増大したことが考えられる。しかし BS4000 の比表面積  $4120\text{m}^2/\text{g}$  は二次製品を想定した高振動エネルギーでは粘性において振動充てん性に影響がないことが得られた。

続いて通常の棒パイプレーターによる打ち込みを想定した周波数 50Hz、振幅 0.37mm、加速度  $36.5\text{m/s}^2$  においての BS の影響を図-6に示す。BS4000 35.2%はプレーンと比べてスランプ  $8\pm 2\text{cm}$  の範囲において充てん時間が速い。これは二次製品を想定した条件 A では差が表れなかったが、振動エネルギーを下げた加速度  $36.5\text{m/s}^2$  においては振動を与えることにより動的な粘性が下がり振動充てん性が向上するチキソトロピー性の効果によるものと考えられる。BS6000 35.2%においてはスランプ  $14\pm 2\text{cm}$  以下の範囲ではプレーンより充てん時間が遅い。しかし スランプ  $20\pm 2\text{cm}$  の範囲では充てん時間が速いことがわかる。スランプ  $20\pm 2\text{cm}$  の範囲において BS6000 は二次製品を想定した条件 A では充てん時間が遅いが振動エネルギーを下げた加速度  $36.5\text{m/s}^2$  においては充てん時間が速い。これは振動を与えることにより動的な粘性が上がるダイレタンシー性の効果によるものと考えられ、高振動では動的な粘性が上がり振動充てん性は低下したが、振動エネルギーを下げるにより、動的な粘性が下がり振動充てん性能が向上したものと考えられる。BS8000 35.2%においてはスランプ  $8\pm 2\text{cm}$  の範囲ではほぼプレーンと同等の充てん時間となり、スランプ 13cm 以上では充てん時間が速いことがわかる。二次製品を想定した条件 A では充てん時間が遅いが振動エネルギーを下げた加速度  $36.5\text{m/s}^2$  においては充てん時間が速い。これも振動を与えることにより動的な粘性が上がるダイレタンシー性の効果によるものと考えられ、高振動では動的な粘性が上がり振動充てん性は低下し

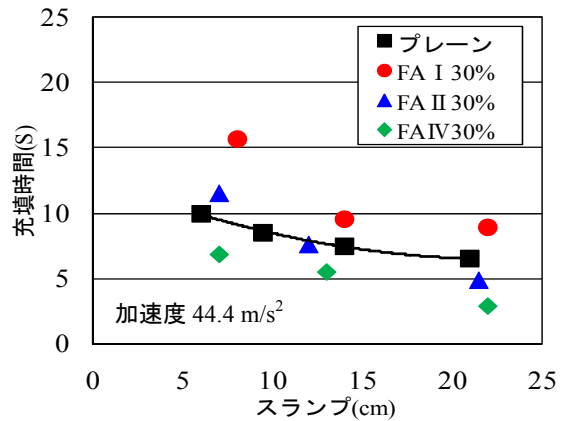


図-7 スランプと充てん時間の関係 (a)

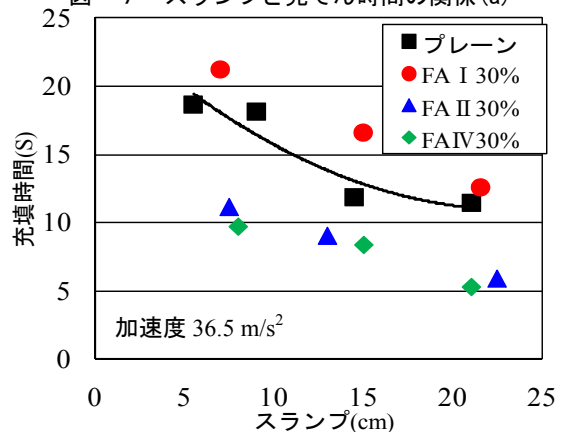


図-8 スランプと充てん時間の関係 (b)

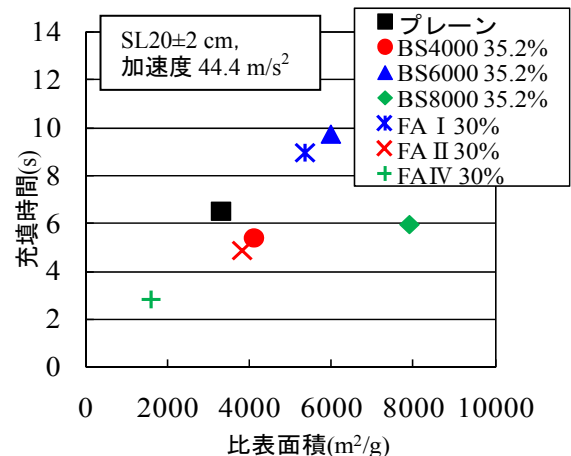


図-9 比表面積と充てん時間の関係 (a)

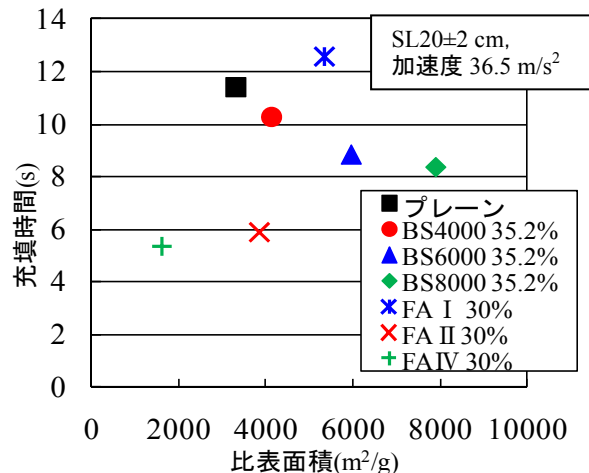


図-10 比表面積と充てん時間の関係 (b)

たが、振動エネルギーを下げることにより、動的な粘性が下がり振動充てん性能が向上したものと考えられる。

### 3.2 フライアッシュが充てん時間に及ぼす影響

FA の影響による実験結果の一例を図-7、図-8に示す。図-7は振動条件が周波数 50Hz, 振幅 0.45mm, 加速度  $44.4\text{m/s}^2$  の二次製品を想定した高振動エネルギーにおける FA の影響を示す。FAIV 30%はプレーンと比べて全スランプの範囲において充てん時間が速い。これは FAIV 種の比表面積が  $1610\text{m}^2/\text{g}$  と小さく、セメントペーストの粘性が低いことより振動充てん性が向上したものと考えられる。FA II 30%はプレーンと比べてほぼ同等の充てん時間となったが FA I 30%は全スランプにおいて充てん時間が遅いということがわかる。これも比表面積が高くなるにつれセメントペーストの粘性が増大したことにより振動充てん性が低下したものと考えられる。

続いて通常の棒バイブレーターによる打ち込みを想定した周波数 50Hz, 振幅 0.37mm, 加速度  $36.5\text{m/s}^2$  における FA の影響を図-8に示す。FA II 30%および FA IV 30%はプレーンと比較して全スランプにおいて充てん時間が速いということがわかる。これは振動を与える事により動的な粘性が下がり振動充てん性が向上するチキソトロピー性の効果によるものと考えられる。しかし FA I 30%は全スランプにおいて充てん時間が遅いということがわかる。これは比表面積が高いことによるセメントペーストによる粘性の増大が考えられるが、後述で考察する。

### 3.3 比表面積が充てん時間に及ぼす影響

比表面積による BS と FA による影響を図-9から図-14に示す。図-9はスランプ  $20\pm 2\text{cm}$ , 加速度  $44.4\text{m/s}^2$  を、図-10はスランプ  $20\pm 2\text{cm}$ , 加速度  $36.5\text{m/s}^2$  を示す。図-9よりプレーンと比較して比表面積が 4000 以下のものは充てん時間が速い。BS8000 35.2%はプレーンと同等の充てん時間とわかる。しかし比表面積が 6000 程度のもは充てん時間が遅い。高振動エネルギーにおいてまだ硬化していない、スランプ  $20\pm 2\text{cm}$  においても比表面積によって充てん時間に差が表れるという結果となった。図-10においては FA I 30%はほぼプレーンと同等の充てん時間となったが、これ以外においては充てん時間が速い。本研究では BS と FA は単位水量、骨材量を同等に配合したことから、比表面積がセメントペーストの粘性に影響を及ぼすことが考えられる。これよりスランプ  $20\pm 2\text{cm}$  の範囲において、比表面積が 4000 以下になるとチキソトロピー性の効果、比表面積が 6000 以上になるとダイレタンシーの効果が強まると考えられる。通常の棒バイブレーターによる打ち込みを想定した加速度  $36.5\text{m/s}^2$  では混和材を置換する事により振動充てん性

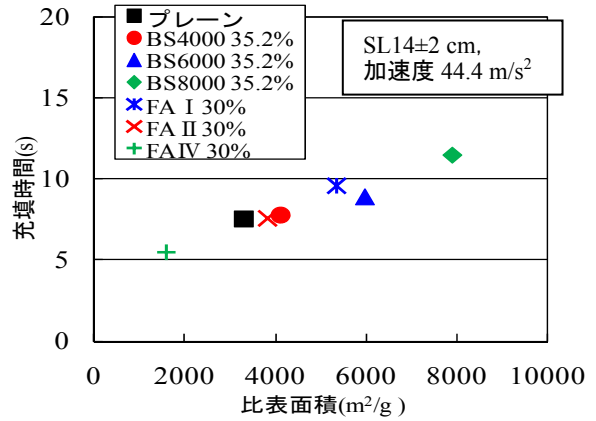


図-11 比表面積と充てん時間の関係 (a)

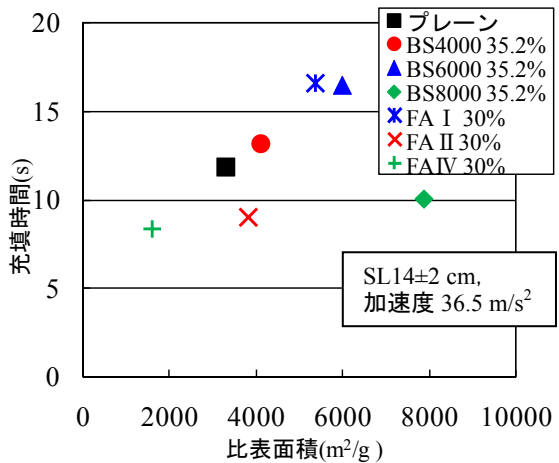


図-12 比表面積と充てん時間の関係 (b)

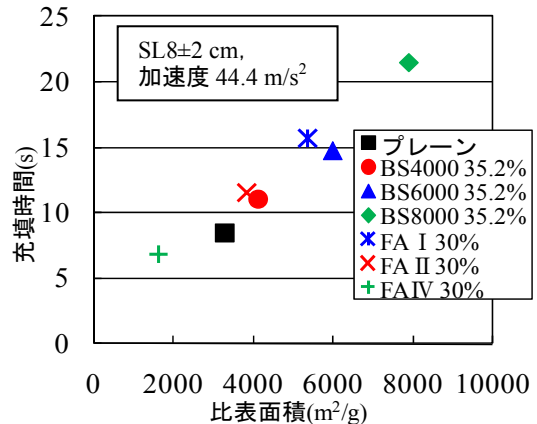


図-13 比表面積と充てん時間の関係 (a)

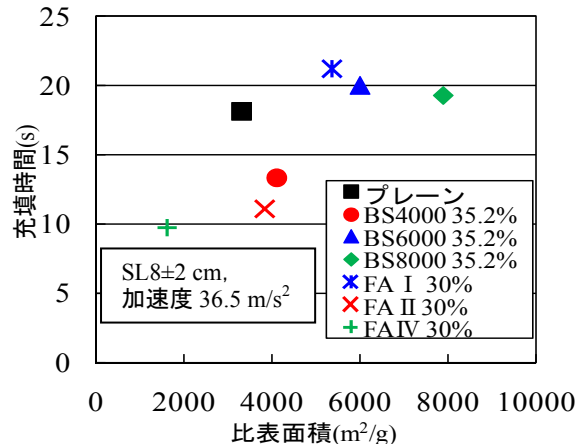


図-14 比表面積と充てん時間の関係 (b)



が向上する結果となった。

続いて図-11はスランブ 14±2cm, 加速度 44.4m/s<sup>2</sup>を, 図-12はスランブ 14±2cm, 加速度 36.5m/s<sup>2</sup>を示す。図-11より, 加速度 44.4m/s<sup>2</sup>の二次製品を想定した高振動エネルギーにおいては, BS, FA 共に比表面積が低くなるにしたがって充てん時間が速くなる。これより比表面積と充てん時間には相関があることがわかる。加速度 44.4m/s<sup>2</sup>の二次製品を想定した高振動エネルギーにおいて, プレーンより振動充てん性能を向上させるためには, 使用するセメントの比表面積より低い比表面積の混和材を使用することが良好という結果が得られた。

続いて, 通常の棒パイブレーターによる打ち込みを想定した加速度 36.5m/s<sup>2</sup> 図-12の FA II 30%は BS4000 35.2%と比較して同程度の比表面積に関わらず充てん時間が速い。これは BS と比較して FA の方がチキソトロピー性の効果が強いと考えられる, 加えて FA の粒子が球形であることからボールベアリングの効果によるものも考えられる。FAIV 30%は図-11, 図-12共に振動エネルギーに関わらずプレーンと比較して充てん時間が速い。これより FAIV種は比表面積1610m<sup>2</sup>/gと低く, 比表面積が低いほど振動を与えることにより動的な粘性が下がり振動充てん性が向上するチキソトロピー性の効果が強められると考えられる。BS8000 35.2%はプレーンと比較して図-11の高振動エネルギーでは充てん時間が遅いが振動エネルギーを下げた図-12加速度 36.5m/s<sup>2</sup>においては充てん時間が速い。これは比表面積 7890m<sup>2</sup>/g と高い比表面積であれば振動を与えることにより動的な粘性が上がるダイレタンシー性の効果が強められると考えられる。FA I 30%, BS6000 35.2%は共に振動エネルギーに関わらず, プレーンと比較して充てん時間が遅い。これらは比表面積が 6000 程度であるが, この程度の比表面積の場合, チキソトロピー性とダイレタンシー性の両方の性質を持っていると考えられ, 本研究で設定した振動レベルでは振動充てん性の向上は見られなかった。今後最適な振動エネルギーによる検討が必要となる。

続いて図-13はスランブ 8±2 cm, 加速度44.4m/s<sup>2</sup>を, 図-14はスランブ 8±2 cm, 加速度 36.5m/s<sup>2</sup>を示す。図-13より加速度 44.4m/s<sup>2</sup>の二次製品を想定した高振動エネルギーにおいては, BS, FA 共に比表面積が低くなるにしたがって充てん時間が速くなる。スランブ 8±2 cm においても比表面積と充てん時間には相関があることがわかる。図-14よりプレーン比較して, 比表面積が 6000 前後かそれ以上では充てん時間はほぼ同等という事がわかる。しかし, 4000 前後かそれ以下では充てん時間が速い。これより図-13と比較して, 通常の棒パイ

ブレーターによる打ち込みを想定した加速度 36.5m/s<sup>2</sup>, スランブ 8±2 cm においても 4000 前後かそれ以下ではチキソトロピー性の効果, 6000 前後かそれ以上ではダイレタンシー性の効果が強まるということが考えられる。

#### 4. まとめ

本実験の範囲内で, 得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 加速度 44.4m/s<sup>2</sup>の二次製品を想定した高振動エネルギーにおいて, スランブの範囲別で以下の混和材を置換することにより振動充てん性が向上する。スランブ 20±2 cm では BS4000, FA II 種および FAIV種。スランブ 14±2 cm, 8±2 cm では FAIV種。
- 2) 加速度 36.5 m/s<sup>2</sup>の通常の棒パイブレーターによる打ち込みを想定した振動エネルギーにおいて, スランブの範囲別で以下の混和材を置換することにより振動充てん性が向上する。スランブ 20±2 cm では全ての BS, FA II 種およびIV種。スランブ 14±2 cm では FA II 種およびIV種。スランブ 8±2 cm では BS4000, FA II 種およびIV種。
- 3) 比表面積によってセメントペーストの動的な粘性に影響を及ぼし, 比表面積 4000 前後かそれ以下ではチキソトロピー性の効果, 6000 前後かそれ以上ではダイレタンシー性の効果が強まる。

謝辞: 本研究の一部は, 日本学術振興会平成 21 年度科学研究費補助金の基盤研究(B)(2) (課題番号 20360193, 研究代表者: 橋本親典) に基づき実施されたものである。ここに付記し, 深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 長谷川登: フライアッシュを混和材として用いたコンクリート, アース&eco コンクリートマガジン, 第1号, pp.61-62, 2008. 5
- 2) 橋本 親典ほか: 振動充てん時間を用いたフライアッシュコンクリートの施工性能の評価に関する基礎的研究, セメント・コンクリート研究討論会論文報告集(論文), Vol.35, pp.19-24, 2008
- 3) Toshihiro Senga Chikanori Hashimoto : Experimental study on the construction placement related performance evaluation of fly ash concrete with vibration filling time, ConMat'09 S4-6-5 2009.8
- 4) 土木学会: 高流動コンクリートの充てん装置を用いた間げき通過性試験方法 (案), コンクリート標準示方書 (規準編), pp.195-197, 2007pp.195-197
- 5) 丸善株式会社: 化学工学, 機械的操作の基礎, pp.1-5, 1980