

# 論文 高強度および超高強度コンクリートを対象とした二次製品用コンクリートの振動充填性に関する基礎的研究

御領園 悠司\*1・渡辺 健\*2・橋本 親典\*3・伊藤 祐二\*4

**要旨:** 高強度および超高強度コンクリートを対象に二次製品用コンクリートの振動充填性について実験的検討を行った。その結果以下のことが明らかになった。通常の二次製品用コンクリートでは、粗粒率の小さい細骨材の使用や、フライアッシュをセメント代替として一部置換することにより、流動性の向上や動的な材料分離の抑制効果によって振動充填時間を短縮できる。高強度コンクリートでは、振動エネルギーを大きくすることによりモルタルの塑性粘度に依らず、振動充填時間を短縮できる。スランブフロー50cm以上の超高強度コンクリートでは、微弱な振動を与えることで材料分離せずに振動充填時間を短縮できる。

**キーワード:** 振動充填性, ボックス形充填試験機, 超高強度コンクリート, 粗粒率, フライアッシュ

## 1. はじめに

近年、構造物の高層化や居住空間の拡充、耐久性の向上といった観点から、低水結合材比で設計基準強度が100N/mm<sup>2</sup>を超えるような超高強度コンクリートの需要が高まっている。これに伴い、二次製品においても現場施工同様、使用される鉄筋の高強度化、高密度化が進んでいる。そのため、高い変形性、流動性を持った高流動コンクリートによって施工される。また、一般にコンクリートの打設においては特殊な場合を除いて、現場打設、プレキャストコンクリートの製造いずれにおいても振動締固めが主流である。この作業が不十分であると、ジャンカや剥落というような不具合を引き起こす。密実かつ均一な構造物の構築のためには対象構造物に使用されるコンクリートに適した締固めを行う必要がある。

一方、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1000万トン以上発生している<sup>1)</sup>。フライアッシュはその化学的、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填性に関する検討は十分とは言えない<sup>2)</sup>。

また建設コストの低減や騒音による周辺環境への負荷低減といった観点から少ないエネルギーで短時間で充填が可能なコンクリートが求められている。このようなコンクリートの施工性能に基づく配合設計を可能とするためには、振動締固め性能とコンクリートの特性を把握しておく必要がある。

本研究では、土木用二次製品および建築用二次製品の

施工条件やコンクリートを構成する材料、産地、モルタルの塑性粘度に着目し、振動締固め性能に及ぼすフレッシュ性状の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

#### (1) 早強ポルトランドセメント

土木用コンクリート二次製品を想定し、セメントはA社製早強ポルトランドセメント(密度 3.14g/cm<sup>3</sup>)を使用した。

#### (2) シリカフュームセメント

建築用超高強度コンクリートを想定し、A社製シリカフュームセメント(密度 3.07g/cm<sup>3</sup>)およびB社製シリカフュームセメント(密度 3.01g/cm<sup>3</sup>)を使用した。

#### (3) フライアッシュ

流動性の改善を目的として、C電力のフライアッシュ(密度 2.29g/cm<sup>3</sup>)を使用した。

#### (4) 骨材

細骨材は静岡県大井川産砕砂(密度 2.64g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 1.31%)および徳島県阿讃山系砕砂(密度 2.57g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 1.97%)を、粗骨材は静岡県大井川産砕石(密度 2.65g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.83%)および徳島県鳴門市撫養産砕石(密度 2.65g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 2.23%)を使用した。

#### (5) 高性能 AE 減水剤

高性能 AE 減水剤は JIS A 6204 高性能減水剤 (I 種) に規定されているもので、土木用には D 社製(密度 1.04g/cm<sup>3</sup>)のものを、建築用には E 社製のもの(密度 1.00g/cm<sup>3</sup>)を使用した。

#### (6) 空気量調整剤

\*1 日本シーカ(株) 技術研究所 基盤技術グループ 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助教 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教授 工博 (正会員)

\*4 石川島建材工業(株) セグメント土木事業部 新事業推進部 部長 工修 (正会員)

配合	W/C	s/a	Air	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
	(%)	(%)	(%)	W	C	FA	S	G	SP
N	40.8	49	2.0	155	380	0	911	951	2.28
N-FM					266	114	893	933	2.58
N-FA									

配合	W/C	s/a	Air	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
	(%)	(%)	(%)	W	C	FA	S	G	SP
H35-0	35	47	2.0	150	430	0	853	973	2.58
H35-25					322	108	837	954	2.58
H35-50					215	215	820	935	2.58
H25-0	25	47	2.0	150	600	0	787	897	4.20
H25-25					450	150	763	861	4.00
H25-50					300	300	740	844	3.60

配合	W/C	s/a	Air	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
	(%)	(%)	(%)	W	C	S	G	SP	AE
SF-PC50	15	36.5	2.0	150	1000	483	848	9.00	0.05
SF-PC60								10.00	
SF-PC70								15.00	
SF-CS60								467	

条件	周波数 (Hz)	振幅 (mm)	振動エネルギー (m/s <sup>2</sup> )
無振動	0	0	0
A	30	0.35	8.9
B	30	0.76	16.0
C	50	0.48	24.7
D	50	0.68	34.5
E	50	1.00	44.4

過剰に混入される空気量を調整するために E 社製空気量調整剤 (密度 1.00g/cm<sup>3</sup>) を使用した。

## 2.2 コンクリートの配合

本研究で使用した配合を以下に示す。土木用二次製品を想定した配合を表-1に、建築用高強度および超高強度二次製品を想定したものを表-2、表-3に示す。

## 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 3~4 水準のスランブにおいて測定を行った。

表-3 に関しては、配合名における数字がそれぞれの目標スランブフローを示しており、各スランブフローを得るために高性能減水剤を用いて調整をおこなった。

### (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) 圧縮強度試験

表-2 の高強度コンクリートにおいては脱型後および各養生条件における強度特性を把握するため圧縮強度試験方法(JIS A 1108)に従い圧縮強度を測定した。

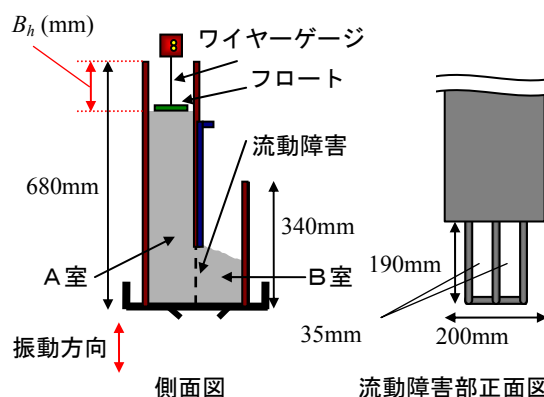


図-1 ボックス型試験装置および障害部分



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)

### (3) 振動下におけるボックス充填試験

コンクリートの振動下での締固め性能を評価するため、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>3)</sup>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、土木学会標準「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) (JSCE-F 511-2007)」のボックス型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、左側の A 室にコンクリートを詰めておき、右側の B 室に高さ 300mm 以上になるまで充填を行う。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、型枠に充填されるコンクリートの締固め性を評価するものである。

充填試験における加振源として、容器内部に棒パイプレータを挿入し、充填高さと同積加速度により充填性を評価する事例<sup>4)</sup>が報告されているが、本研究ではコンクリートの二次製品の充填を想定し、型枠全体へ振動を与える方法を用いた。実際の製品工場の振動レベルを想定して、基本振動レベルを周波数 50Hz, 振幅 1.0mm と設定し、周波数と振幅を調整し、表-4に示す無振動から振動条件 E までの 6 条件によって試験を行った。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。関係式を以下に示す。

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

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

充填時間は図-1中の充填高さ(以後  $B_h$  と示す)が振動開始および充填完了後の影響を受けないよう充填開始時間を  $B_h=10cm$  に達するまでに要した時間、充填完了時間を  $B_h=30cm$  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填時間の定義とした。

#### (4) 塑性粘度試験

ウェットスクリーニングによって得られたモルタルの粘度の測定には、比較的水セメント比が小さく、漏斗もしくは管方式では閉塞して測定できないようなモルタルにも適応可能で操作が簡便な羽根沈入型粘度計<sup>5)</sup>を用いて見かけの塑性粘度と降伏値を計測した。

本粘度計の概要を図-2示す。練り上がったコンクリートをウェットスクリーニングによってモルタルと粗骨材とに分ける。図-2に示す、3枚の羽根に錘をのせ自重により所定の長さ沈入させて粘度を測定するもの

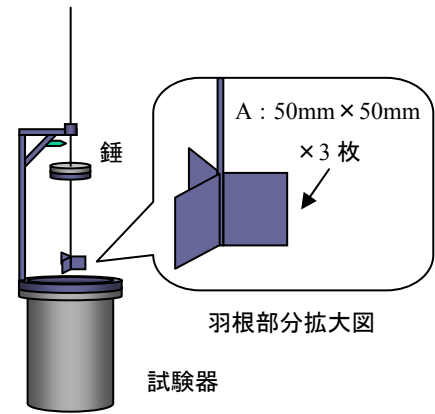


図-2 試験器の概要

である。

1 試料につき数種類の錘の重量  $W$  を用いて試験を行うことにより、沈入距離  $L$  と沈入時間  $T$  の関係から、せん断速度  $L/T$  とせん断応力度  $\tau=W/A$  の関係が得られる。得られた試験結果をグラフ上にプロットし、それらのデータから求めた回帰線の傾きの逆数を見かけの塑性粘度とし、 $x$  切片の値を降伏値とした。

流体の中で物体が重力の基に沈降する場合、物体の質量、重量、浮力、流体抵抗の関係から物体は一定速度の運動をする。よって羽根の沈入速度は  $L/T$  となり、せん断速度をモルタルのせん断領域の幅  $h$  で除した値  $L/(T \cdot h)$  がせん断ひずみ速度  $\dot{\gamma}$  となる。しかし、このせん断領域の幅  $h$  は塑性粘度の増大に伴い、増加する値で、計算に忠実に反映させるのは困難であり、経験的には誤差による影響は少ないことから、 $h=一定=1.0$  とした。

なお、本試験ではモルタル中を沈降する羽根の質量、浮力が沈降中、常に一定になるように、また、せん断面積が一定になるように、羽根がモルタルに完全に埋まった状態から沈降させた。羽根が取付けられている軸の影響は非常に小さいと考えられるため無視した。

得られた値と既知の流体(シリコンオイル:塑性粘度 10～300Pa・s)を用いた実験結果と比較する方法により塑性粘度を算出した。

### 3. 実験結果および考察

振動下におけるボックス充填試験で得られたボックス充填時間を振動締固め性の指標として、充填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填時間とスランプ、塑性粘度、加速度の関係から検討を行った。

#### 3.1 粗粒率が充填時間に及ぼす影響

表-1の配合における実験結果を図-3に示す。Nを基本配合(F.M.=2.54)とし、Nの配合に対し、細骨材の粒度調整を行い、Nに比べ細骨材の粗粒率が低いもの(F.M.=2.32)をN-FM、Nの配合に対し、フライアッシュ

を内割で30%置換した配合をN-FAとした。

Nに比べN-FMは同程度のスランプでも充填に要する時間が短くなっていることがわかる。これは、粗粒率が小さいため、粒径の大きな細骨材が含まれている割合が少なく、骨材間の摩擦や衝突が相対的に少なくなったため、流動性の改善に寄与したものと考えられる。さらに微粒分が増加することにより、材料分離抵抗性も増加し、振動下における動的な材料分離を抑制した効果もあるのではないかと考えられる。さらにN-FAの配合においても同様の結果が得られた。これも、フライアッシュの動的な材料分離抑制効果が顕著に現れているものと考えられる。以上のことから振動充填性はスランプのみで必ずしも評価することはできないことが確認され、細骨材の粗粒率、フライアッシュの添加により振動充填性が向上する結果が得られた。

続いて、塑性粘度と充填時間の関係を図-4に示す。塑性粘度と充填時間には相関があることが分かる。また粗粒率が低い配合の方が、塑性粘度が低くなっている理由として、モルタルの塑性粘度測定時に羽根と細骨材の摩擦、衝突が相対的に少なかったことが挙げられる。

またNとN-FAの実験結果を20cmから5cmまで各スランプレベルにまとめ、与えた振動エネルギーと充填時間の関係で整理したものをそれぞれ図-5、図-6に示す。Nの配合ではスランプが小さい場合、与える振動エネルギーが小さくなる程充填に時間を要していることがわかる。しかしながら、N-FAの配合の場合、スランプレベル10cm以上の場合において、スランプの違いによる充填時間の差がほぼなくなっていることが分かる。

ここからもフライアッシュを一部置換することによる充填性の向上が認められる。しかしながらスランプレベルが大きくなると、フライアッシュを一部置換した場合においても充填時間の短縮がさほど見られないことから、高スランプ時には充填性向上効果は期待できないことが考えられる。またNの配合において振動条件別にスランプと充填時間の関係にまとめたものを図-7に

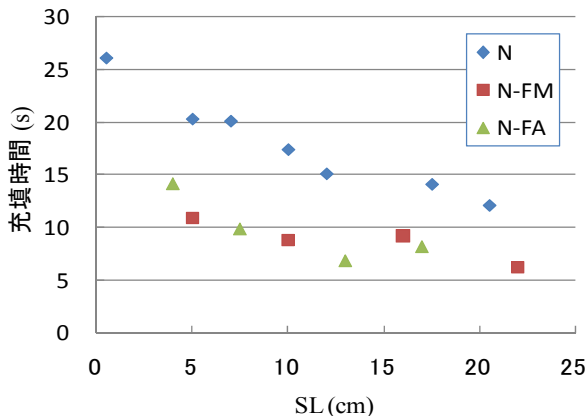


図-3 スランプと充填時間の関係

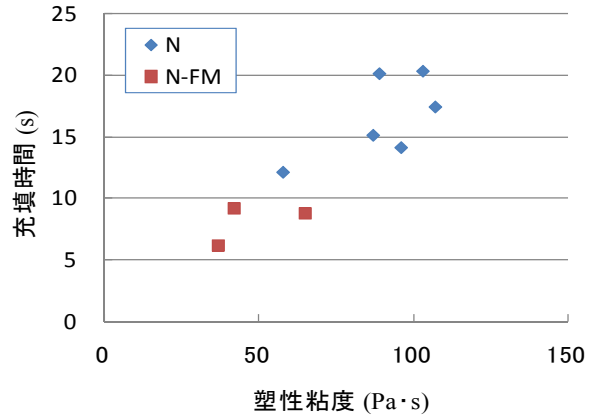


図-4 塑性粘度と充填時間の関係

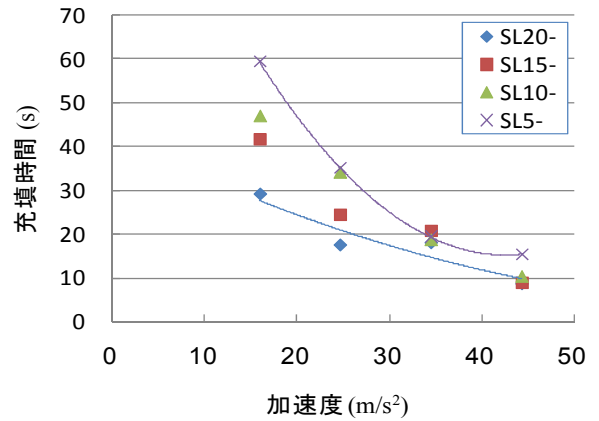


図-5 加速度と充填時間の関係(N)

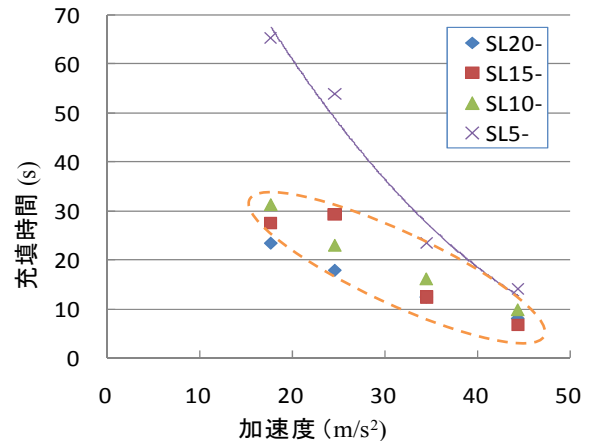


図-6 加速度と充填時間の関係 (N-FA)

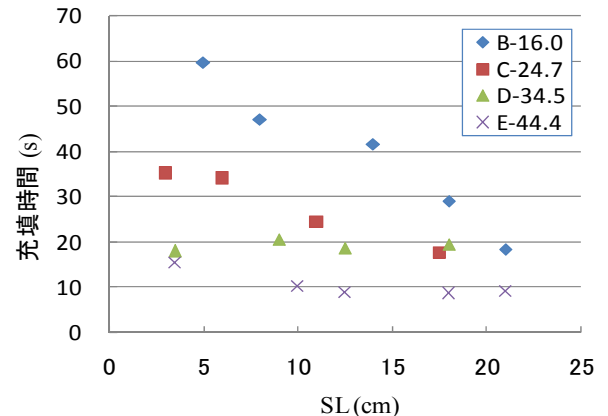


図-7 スランプと充填時間の関係 (加速度別)

示す。

与える振動エネルギーが小さい場合、スランブに依存して充填に時間を要していることがわかる。しかしながら、 $34.5\text{m}^2$  および  $44.4\text{m}^2$  のようなエネルギーの大きな振動条件になると、スランブに関わらず、ほぼ一定の時間で充填できる傾向にある。

### 3.2 高強度コンクリートにおける充填性評価

W/C=35%を下回るような高強度コンクリートを対象に充填性の評価を行った。フライアッシュを一部セメントに置換することにより低水セメント比のコンクリートの振動充填性がどのように変化するかを評価するために、W/C=35%の配合に対し、内割で25%および50%、またW/C=25%の配合に対し、内割で25%フライアッシュを置換し振動充填性試験を行った。その結果を図-8に示す。W/C=35%の場合、フライアッシュを混入していない配合においては、高スランブにも関わらず充填に時間を要している。これはアーチングによる骨材が動的な条件において材料分離を起こしているためであると考えられる。しかしながら、フライアッシュを25%および50%添加した場合、高スランブ時においてもアーチングの影響を受けず、素早い充填が可能であることがわかる。これはフライアッシュの添加が動的な材料分離を抑制した結果であると考えられる。しかしながら、フライアッシュを25%添加した場合と50%添加した場合には、充填時間に差がないことから、フライアッシュ添加による充填性向上の効果には限界があるものと考えられる。

W/C=25%の場合、W/C=35%の場合と比べて充填時間が短い結果となった。フライアッシュ添加による充填性の向上効果が少ないことがわかる。W/C=25%の場合粉体量が多いにも関わらず、充填時間が短いのはW/C=35%の場合と比較して骨材容積が小さいことが考えられ、今後検討を行う必要がある。

またフライアッシュを添加していることから強度の低下が懸念されるため、その程度を把握しておくために圧縮強度を測定した。養生条件として、型枠から脱型する際に重要な指標となる脱型時、効率的な生産を可能にするため気中養生28日間後、初期の水中養生が強度に及ぼす影響を評価するために初期の5日間のみ水中、残りの材齢を気中で計28日間養生する3種類の養生方法で比較を行った。その結果を図-9に示す。フライアッシュを添加した場合W/C=35%の場合25%置換のものは28日強度で、約5%程度の強度低下にとどまっている。W/C=25%の場合においては約13%程度の低下である。50%置換した場合にはどちらの場合も27%程度の強度低下がみられた。また、養生別に比較すると、W/C=35%の場合20~30%程度の強度低下、W/C=25%の場合4~11%の強度低下という結果になった。

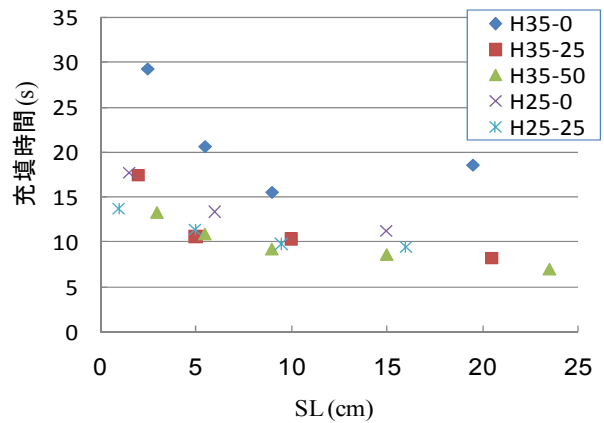


図-8 高強度コンクリートの充填性試験結果

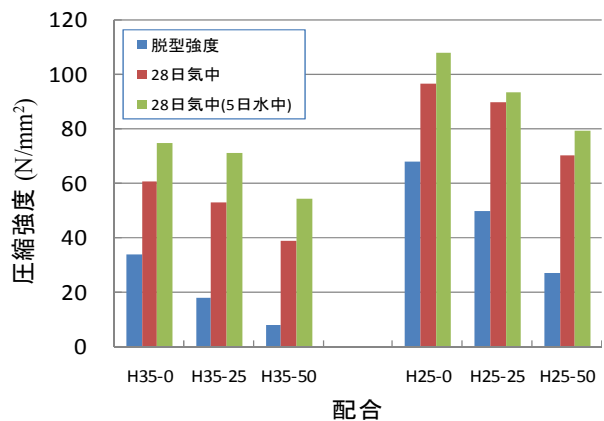


図-9 圧縮強度試験結果

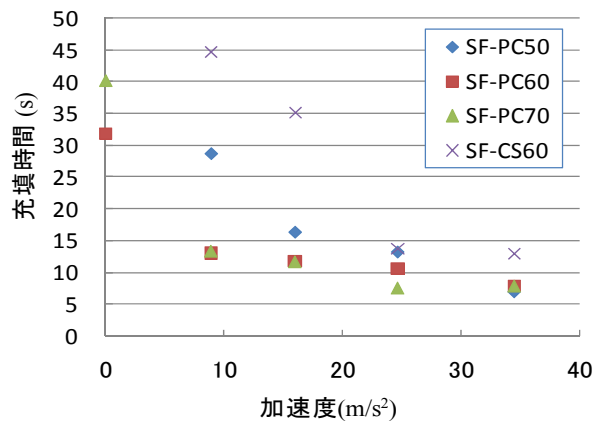


図-10 超高強度コンクリートの充填性試験結果

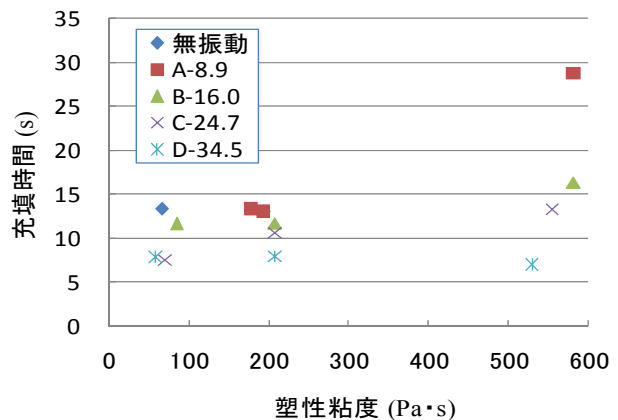


図-11 塑性粘度と充填時間の関係

振動充填性、強度ともにフライアッシュの産地や品質等の影響を受けるものと考えられたため更なるデータの蓄積が必要である。

### 3.4 超高強度コンクリートにおける充填性評価

超高強度コンクリートを用いた非常に高密度配筋のコンクリート二次製品を対象として、表-3に示す水結合材比が15%の高流動かつ高粘性なコンクリートを想定した。また骨材や、セメントの物性値の違いにより施工性は大きく異なることが予想される。本研究では、高流動コンクリートにおける充填性を評価すると共に骨材産地、セメントの種類によって大きく変化すると思われる充填性を、ボックス型試験機を用いて比較した。

スランプフローが60cmであるSF-PC60を基本配合としてスランプフローが50cm, 70cmの場合で比較した。また基本配合において、骨材の産地を変更し比較した。与えた振動エネルギーと充填時間の関係を図-10に示す。SF-PC配合において振動エネルギーが大きい場合、どのスランプフローにおいてもほぼ同じ時間で充填が可能であるが、加速度が小さくなるとスランプフロー50cm前後の配合においては、充填に時間を要することが分かるが、スランプフローが60cmを超えると、流動性が向上し、低加速度の場合でも十分素早い充填が可能であることが分かる。一般的に高流動コンクリートを使用し施工するには材料分離等が懸念されることから、振動を加えずに施工されるが、本研究においてSFが60を超えるような配合であれば微弱であっても振動を加えることにより、素早い充填が可能であることが明らかになった。

しかしながら、SF-CSの配合においてSF-PCの基本配合における結果と比較すると、最大で30秒以上多く充填に時間を要していることがわかる。

使用した骨材の粗粒率、実績率を表-5に示す。使用した骨材の粗粒率、実績率はほぼ同じであることから、使用したセメントおよび混和剤に関して更なる検討が必要である。

また塑性粘度と充填時間の関係で整理したものを図-11に示す。塑性粘度と振動の伝導性の関係から、塑性粘度が高くなると、振動のエネルギーが伝わりにくくなり充填に時間を要することが知られている<sup>6)</sup>。

振動エネルギーが小さい場合、塑性粘度が高い程充填

に時間がかかる傾向があり、整合性が確認できる。しかしながら振動エネルギーが大きい場合、塑性粘度が高いにも関わらず、早い充填が可能であることがわかる。

### 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。

- ・ 細骨材の粗粒率を小さくすることで振動下における充填性を向上する。
- ・ フライアッシュを一部置換することで、動的骨材分離を抑制し、充填性の向上を図ることができる。
- ・ 配合に応じた振動エネルギーを加えることにより、低スランプであっても高スランプ時と同等の時間での締固めが可能である。
- ・ 一定の振動エネルギーを与えると、塑性粘度が高いにも関わらず、早い時間で締固めが可能である。

謝辞：本研究の一部は、日本学術振興会平成20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) 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, 2007
- 4) 加賀谷誠ほか：ボックス型充てん装置を用いた加速度計測による普通コンクリートの締固め性評価, 土木学会論文集, No.788, V-67, pp.1-11, 2005
- 5) 室賀陽一郎ほか：モルタルの粘性試験装置の開発, 土木学会年次学術講演概要集, Vol.55, 部門5, V-406, 2000
- 6) 伊達重之ほか：コンクリートの振動充てん性能に及ぼすフレッシュ性状の影響コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.25-30, 2007

表-5 骨材試験結果

配合	細骨材		粗骨材		
	産地	F.M.	産地	F.M.	実績率
SF-PC	大井川産	2.54	大井川産	6.92	62.8
SF-CS	阿讃山	2.57	-	-	-
	-	-	撫養産	6.82	63.0