

# 論文 異なる振動条件における電気炉酸化スラグ細骨材を用いた中流動コンクリートの間隙通過性に関する一考察

山中 啓資\*1・横山 卓哉\*2・橋本 親典\*3・渡辺 健\*4

**要旨：**中流動コンクリートは、スランブフローによって管理されているが、その配合設計の基本指針や定義が曖昧で確立されていないのが現状である。また、本研究で用いた電気炉酸化スラグ細骨材は、形状が滑らかで粒状体であり、所要のフレッシュ性状を得るための単位水量を低減することができる。本研究では、電気炉酸化スラグ細骨材を用いた中流動コンクリートの間隙通過性や粘性について、ボックス形容器やB型回転粘度計を用いて定量的評価を行うことを目的とした。その結果、間隙通過性が向上し、電気炉酸化スラグ細骨材の中流動コンクリートへの適用可能性が示唆された。

**キーワード：**中流動コンクリート、電気炉酸化スラグ細骨材、間隙通過性、粗骨材量変化率、レオロジー定数

## 1. はじめに

近年、トンネル覆工コンクリートに見られるように、中流動コンクリートの採用が高まり、適用実績も多岐に渡る。中流動コンクリートは、普通コンクリートと高流動コンクリートの中間的な性状を示し、スランブフローがおおよそ35cmから60cmの範囲で管理されている。高流動コンクリートの配合選定技術は熟成され、自己充填性までは必要としないが、構造条件や施工条件に応じて軽微な締固めを行うことで充填後の品質を確保し、材料コストの低減を図ったコンクリートの要求が高まっている。その一方で、中流動コンクリートは、締固めを必要とする高流動コンクリートとして呼ばれているが、その配合設計の基本指針が体系化されていないのが現状である。また、混和材の多様化に伴い同一スランブフローでも材料分離抵抗性が異なるコンクリートが存在し、従来のスランブフローによる管理では骨材の影響が考慮されていないことから、本研究においてはスランブフローではなく、間隙通過性による評価法を用いて評価することを検討した。

本研究で用いた電気炉酸化スラグ細骨材は、風砕スラグであり形状が真球に近く、絶乾密度が他の骨材と比較して高く、硬質であることが特徴として挙げられる。図-1に風砕スラグの製造の様子を示す。専用の釜から排出された熔融スラグに後方から風を送り、空气中に飛散させることで真球のスラグ骨材が製造される。電気炉酸化スラグは、鉄スクラップ等を電気炉内で熔融し、粗鋼を生産する際に副産され、酸化スラグと還元スラグを合わせて年間に計350万t程度生産されている。2003年にはJIS化され、同年に土木学会より設計・施工指針(案)

2)も示されている。著者らの一部の研究<sup>3)</sup>から、電気炉酸化スラグ細骨材を高流動コンクリートに使用することにより、所要のフレッシュ性状を得るための単位水量および混和剤の添加量を低減することが明らかになった。本研究では、中流動コンクリートに電気炉酸化スラグ細骨材を使用することで同様な効果が得られると考え、採用した。また、コンクリートの流動性にはモルタルの粘性が関係し、普通コンクリートの塑性粘度および降伏値には相関性があるとされている。中流動コンクリートのフレッシュ性状は、高流動コンクリートと同様に、スランブフロー、加振変形性および自己充填性すなわち間隙通過性で評価される。スランブフローは降伏値に依存するが、間隙通過性は塑性粘度と降伏値に依存し、その定量的評価が困難であり、中流動コンクリートにおいてその関係性を明らかにされていないのが現状である。

以上の背景を踏まえ、本研究では、電気炉酸化スラグ細骨材の適用拡大を見据え、電気炉酸化スラグ細骨材を混入した中流動コンクリートの間隙通過性について、「ボックス形容器を用いた加振時のコンクリートの間隙通過性試験方法(案)(JSCE-F701-2018)」に準拠して定量的評価を行うことを目的とした。さらに、中流動コンクリートをウェットスクリーニングしたモルタルの塑性粘度



図-1 風砕スラグの製造の様子

\*1 清水建設(株) 修(工) (正会員)

\*2 (株)キクノ 品質管理部 部長 博(工) (正会員)

\*3 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 社会基盤デザイン系 教授 工博(正会員)

\*4 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 社会基盤デザイン系 准教授 博(工) (正会員)

と降伏値を、B型回転粘度計を用いて実験的に評価した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

表-1 に、本実験に供した使用材料の物性値を示す。電気炉酸化スラグ細骨材（以下、EFS）、フライアッシュ（以下、FA）共に、JIS に適合するものを用いた。

表-2 に、本実験に供した中流動コンクリートの配合の一覧を示す。

本実験は3つのシリーズから構成される。実験シリーズ1では、水セメント比(W/C)55%、単位水量(W)170kg/m<sup>3</sup>、水結合材比(W/P)42.5%の一定とし、単位粗骨材かさ容積(Gm)を変化させ(0.490~0.560m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)、EFSを砕砂に対し0、25、50、100%容積置換した。実験シリーズ2では、水セメント比(W/C)55%、単位水量(W)170kg/m<sup>3</sup>、水結合材比(W/P)42.5%、単位粗骨材かさ容積(Gm)0.530m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>の一定とし、EFSを砕砂に対し0、25、50%容積置換した。実験シリーズ3では、水セメント比(W/C)55%、単位水量(W)170kg/m<sup>3</sup>、水結合材比(W/P)48.6%、単位粗骨材かさ容積(Gm)0.560m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>の一定とし、EFSを砕砂に対し0、25、50%容積置換した。コンクリートの目標スランプフローは45±7.5cm（JIS A 1150 に準拠）、目標空気量は4.5±1.5%（JIS A 1128 に準拠）とし、それらを満足するように、高性能AE減水剤とAE剤の使用量を調整した。

### 2.2 コンクリートの練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜには、強制2軸練りミキサ(容量:100リットル)を用いて練混ぜ量40リットルとして練り混ぜた。最初にセメント、FA、細骨材を5秒間空練りした後、混和剤を溶解した水を加えて60秒間の練混ぜを行い、さらに粗骨材を加えて60秒間の練混ぜを行った。ミキサ停止後、5分間の静置を行い、30秒間練り混ぜた後排出した。

### 2.3 試験項目および方法

#### (1) 間隙通過性試験

表-1 使用材料物性値

材料名	記号	種類および物性値
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.16(g/cm <sup>3</sup> ), 比表面積 3470(cm <sup>2</sup> /g)
混和材	FA	フライアッシュⅡ種, 強熱減量 2.60% 密度 2.22(g/cm <sup>3</sup> ), 比表面積 3420(cm <sup>2</sup> /g)
細骨材	S	徳島県産砕砂 表乾密度 2.57(g/cm <sup>3</sup> ), 粗粒率 2.63, 吸水率 1.77(%)
	EFS	電気炉酸化スラグ 5-0.3 表乾密度 3.52(g/cm <sup>3</sup> ), 粗粒率 3.38, 吸水率 0.36(%)
粗骨材	G15	徳島県産砕石1505 表乾密度 2.57(g/cm <sup>3</sup> ), 粗粒率 6.39, 吸水率 1.62(%)
	G20	徳島県産砕石2010 表乾密度 2.57(g/cm <sup>3</sup> ), 粗粒率 7.08, 吸水率 1.62(%)
混和剤	SP	高性能AE減水剤Ⅰ種 ポリカルボン酸エーテル系
	AE	AE剤 変形ロジン酸化化合物系陰イオン界面活性剤

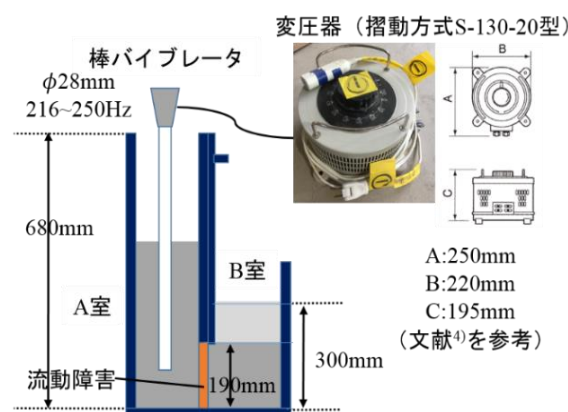


図-2 間隙通過性試験の概要

間隙通過性試験は目標スランプフローおよび目標空気量を満足したコンクリートを用いて、JSCE-F 701-2018 に準拠して実施した。試験の概要を図-2 に示す。まず、ボックス形容器（JSCE F 511 に準拠）を設置し、仕切りゲートを閉じた状態で試料をA室に充填した後、A室上面を均し、棒バイブレータ（φ28mm、振動数216~250Hz）をA室中央に底面から棒バイブレータの先端までの高さが100mmとなるように挿入した。仕切りゲートを引き上げ、棒バイブレータによる加振を行い、B室側に試料を充填させた。その際変圧器（摺動式S-130-20型）を使

表-2 コンクリートの配合

実験シリーズ	配合名	W/C (%)	W/P (%)	P(=C+FA) (kg/m <sup>3</sup> )	Gm (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						SP (P×%)	AE (P×%)	
						W	C	FA	S	EFS	G15			G20
1	EFS0	55	42.5	400	0.560	170	309	91	797	-	518	345	1.600	0.010
	EFS25				632				289	490	327	1.200		
	EFS50				429				588	481	321	0.800		
	EFS100				-				1239	453	302	0.200		
2	EFS0	55	42.5	400	0.530	170	309	91	843	-	490	327	1.600	0.014
	EFS25								632	289	490	327	1.000	0.013
	EFS50								421	577			0.500	0.012
3	EFS0	55	48.6	350	0.560	170	309	41	856	-	518	345	1.700	0.003
	EFS25								642	293	518	345	1.050	
	EFS50								428	586			0.700	

用して、実験シリーズ1では出力を40, 60, 80%に、実験シリーズ2では60, 80, 100%のそれぞれ3段階に、実験シリーズ3では60, 80%の2段階に変化させ間隙通過速度  $V_{pass}$  (mm/s) を算出した。変圧器を用いて振動出力を調節したのは、軽微な締固めを必要とする中流動コンクリートの再現性を図るためである。流動障害のランクはR2 (D13の鉄筋×3本) およびR3 (障害なし) の2水準とした。

結果の整理としては、以下の2つの方法により行った。障害ランクR3の場合は、仕切りゲート引き上げ後の流入高さが190mmを超えたため式(1)を用い、障害ランクR2の場合は、流入高さが190mmに達しなかったため式(2)を用いてそれぞれ  $V_{pass}$ (mm/s)を算出した。なお  $V_{pass}$ (mm/s)は、R3の場合の方がR2の場合と比較して相対的に大きくなった。

$$V_{pass}(\text{mm/s}) = \frac{300-h}{t_{300}} \quad (1)$$

$$V_{pass}(\text{mm/s}) = \frac{110}{t_{300}-t_{190}} \quad (2)$$

ここに、 $h$ : 流入後高さ(mm)

$t_{300}$ : 300mm 到達時間(s)

$t_{190}$ : 190mm 到達時間(s)

#### (2) ブリーディング試験

ブリーディング試験は、JIS A 1123 に準拠し、EFS を100%置換した配合を有する実験シリーズ1およびFAの単位量を低減した実験シリーズ3に対して行った。

#### (3) 洗い試験

間隙通過性試験後のB室の試料を採取し、5mmふるいを用いて粗骨材量を測定し (JIS A 1112 に準拠)、以下の式(3)より粗骨材量変化率  $\delta_B$ (%)を算出した。粗骨材量変化率が正であれば、粗骨材がモルタル分と比較して多く間隙を通過しており、負であればモルタル分が粗骨材と比較して多く間隙を通過していることを意味する。

$$\delta_B(\%) = \frac{G_B' - G_0}{G_0} \times 100 \quad (3)$$

ここに、 $G_B'$ : 粗骨材換算量(kg/m<sup>3</sup>) ( $=\frac{1000}{V} \times G_B$ )

$V$ : 容器容積(L)

$G_B$ : 粗骨材採取量(kg)

$G_0$ : 示方配合粗骨材量(kg/m<sup>3</sup>)

#### (4) 粘度試験

5mmふるいでウェットスクリーニングしたモルタルに対し、B型回転粘度計を用いて、各せん断速度(rpm)における絶対粘度(mPa·s)を測定した。さらに、せん断応力(N/m<sup>2</sup>)を式(4)によって算出した。

$$\tau = \frac{1}{15000} \times \mu \times n \quad (4)$$

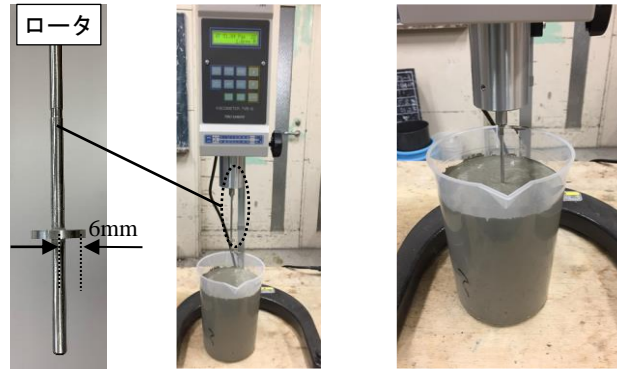


図-3 B型回転粘度計の概観および計測状況  
(文献<sup>5)</sup>より引用)

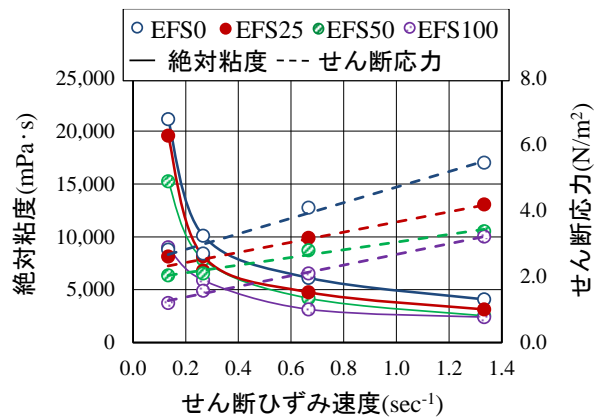


図-4 粘度試験結果の一例 (実験シリーズ1)

ここに、 $\tau$ : せん断応力(N/m<sup>2</sup>)

$\mu$ : 絶対粘度(mPa·s)

$n$ : せん断速度(rpm)

B型回転粘度計の測定手順を以下に示す。まず、ウェットスクリーニングしたモルタルをサンプルカップに1リットル入れる。次に、使用するロータを取り付け、浸液マークの箇所までモルタルが浸漬するように、スタンドの昇降ハンドルを回し、ロータがサンプルカップの中央に位置するように粘度計本体を上下に調整する。電源を入れた後、ウォーミングアップ時間として10分以上放置する。粘度計本体に取り付けたロータコードおよびロータの回転速度の設定を行う。回転速度は、2, 4, 10, 20rpmとし、測定時間はそれぞれ30, 15, 10, 10秒とした。回転粘度計での測定状況を図-3に示す。

粘度試験結果から、せん断ひずみ速度(1/s)とせん断応力(N/m<sup>2</sup>)の関係を示した直線の傾きを求めることにより、塑性粘度(Pa·s)を決定し、 $y$ 切片の値を降伏値(N/m<sup>2</sup>)として求めた。一例として、図-4に実験シリーズ1の試験結果を示す。また、粘度試験後のモルタルを用いてゼロ打フロー試験をJIS R 5201に準拠し、実施した。

#### (5) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準拠し、標準水中養生

の円柱供試体に対し、材齢 28 日において実施した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 フレッシュコンクリートの性状

(1) 各種混和剤添加率とスランプフローおよび空気量  
 全実験シリーズにおける EFS 置換率と各種混和剤添加率の関係を図-5 に示す。EFS 置換率の増加に伴い SP 剤および AE 剤ともに、添加率が減少する傾向が認められた。全実験シリーズにおける各種混和剤添加率の関係を図-6 に示す。スランプフローおよび空気量に関しては、全実験シリーズにおいて各目標値の範囲内に収まっているが、AE 剤添加率と空気量の間には正の相関性が認められる。真球状である EFS を混入することによりコンクリートに流動性が付与され、各種混和剤の添加率の低減に影響したと考えられる。

#### (2) ブリーディング量

実験シリーズ 1 および実験シリーズ 3 におけるブリーディング試験結果を図-7 に示す。ブリーディング量の目安としては、JASS5 凍結融解作用を受けるコンクリートを参考に、破線を図中に示した。両シリーズともに、EFS 置換率の増加に伴いブリーディング量が増大する傾向が見られた。実験シリーズ 1 に関しては、EFS100 が大幅に増加し、規定量を上回る結果となった。これは、EFS 自体の吸水率が小さいことにより保水性が低下したことや、コンクリート中の骨材密度が大きくなったことが原因として考えられる。SP 剤の添加量が比較的少ないにも関わらず、上記の EFS の性状を受け、ブリーディング量が増大した。実験シリーズ 3 は、シリーズ 1 と比較して FA 混入量が低下したにも関わらず、ブリーディング量の

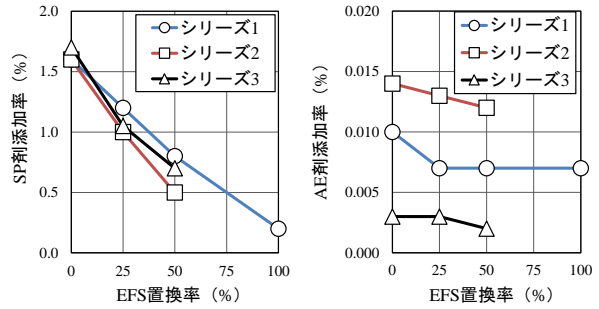


図-5 EFS 置換率と各種混和剤添加率の関係

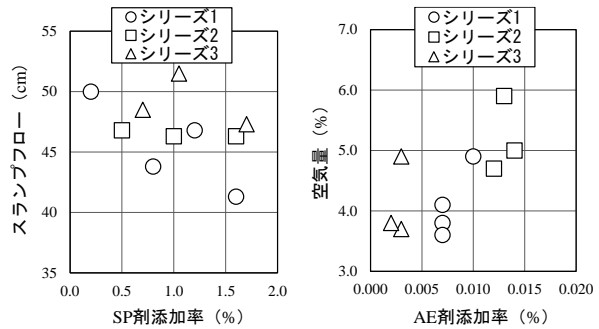


図-6 各種混和剤添加率と各フレッシュ性状の関係

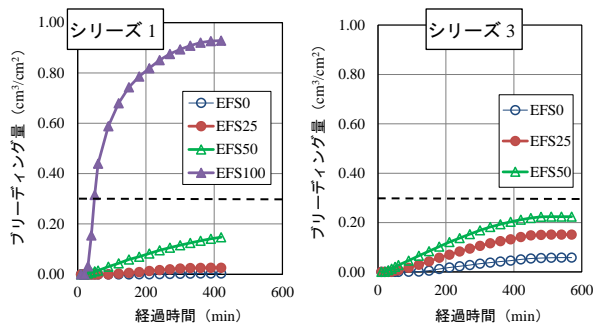


図-7 ブリーディング試験結果

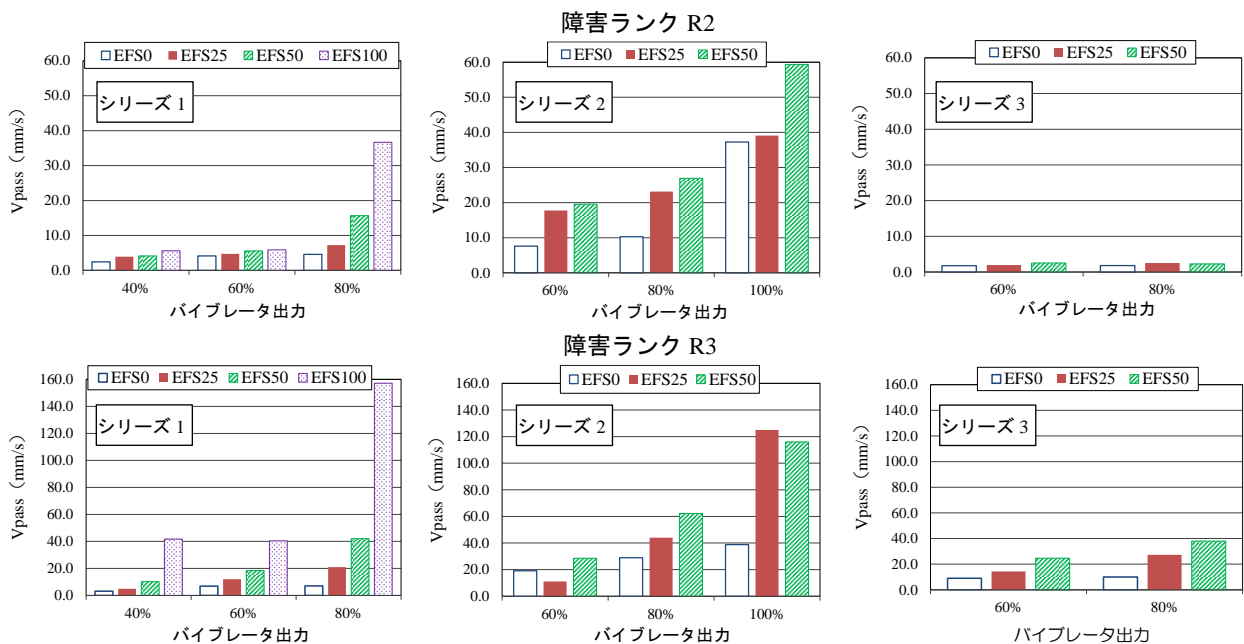


図-8 各種要因と間隙通過速度の関係

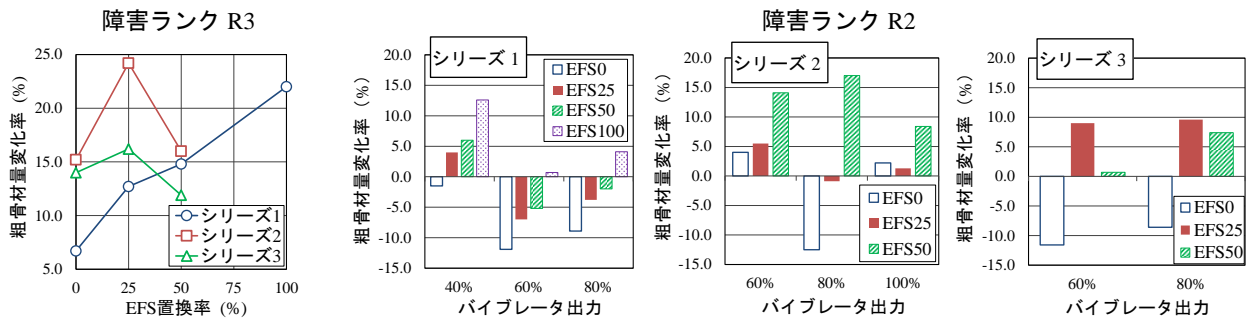


図-9 各種要因と粗骨材量変化率の関係

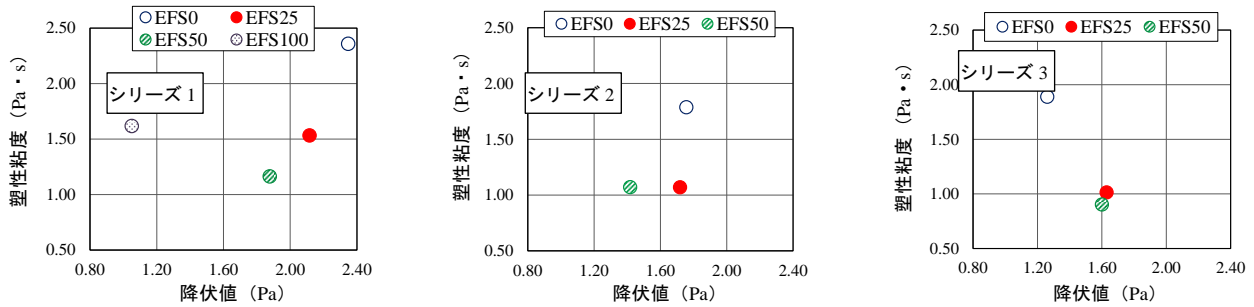


図-10 塑性粘度と降伏値の関係

増加に大きな影響を及ぼさなかった。EFS を用いた中流動コンクリートの場合は、ブリーディングを抑制させるためのFAの単位量は少なくともよいと考えられる。

### (3) 間隙通過速度

各実験シリーズにおける、各種要因と間隙通過速度  $V_{pass}(mm/s)$  の関係を図-8 に示す。実験シリーズ 1 および 2 においては、棒バイブレータ出力の増加に伴い  $V_{pass}$  が増加し、EFS 置換率が高くなるに従いその傾向は顕著になった。実験シリーズ 1 のランク R2 の場合は、棒バイブレータ出力が比較的小さい範囲において(40%, 60%),  $V_{pass}$  に与える影響が小さいことが明らかになった。実験シリーズ 2 における  $V_{pass}$  は、実験シリーズ 1 と比較して全体的に値が増大したが、これは AE 剤の使用量が増加し、流動性が付与されたことが原因として推察される。実験シリーズ 3 においては、単位粗骨材かさ容積が大きいことや FA 混入量が少ないことが原因で、 $V_{pass}$  が比較的小さくなる傾向が認められた。なお本研究では、全ての要因において充填高さが 300mm 以上に達したわけではないことを考慮する必要がある。また、近松ら<sup>6)</sup>が、流動障害条件が同じ場合でも充填装置の形状が異なれば、間隙通過性の評価が相違する場合があると報告している。本研究においては U 形ではなくボックス形を採用していることから、U 形と比較して間隙通過の難易度が高く、配合要因の影響をより受けやすかったものと考えられる。本研究の範囲では、棒バイブレータ出力 80% の場合が EFS 置換率毎の  $V_{pass}$  において最も顕著な違いが見られたことや、2mm/s 以上の値を取り、十分な間隙通過性を有する中流動コンクリートであると見なすこと

ができるため、棒バイブレータ出力 80% において適切な定量的評価が可能であると結論付けた。

### (4) 粗骨材量変化率

各実験シリーズにおける、各種要因と粗骨材量変化率の関係を図-9 に示す。障害ランク R3 の場合は、全実験シリーズにおいて粗骨材量変化率が正の値を示し、モルタルが粗骨材も巻き込み、間隙を通過していることが明らかになった。実験シリーズ 2 および 3 では、EFS25 と比較して EFS50 の方が粗骨材量変化率が小さくなる傾向にある。これは AE 剤の使用量の増加に加え、EFS 置換率が高くなるとモルタル分の流動性が増加するため、粗骨材よりもモルタルが先行したと考えられる。障害ランク R2 の場合は、実験シリーズ 1 においては棒バイブレータ出力が増加するに伴い粗骨材量変化率が負の値を示し、粗骨材よりもモルタルが間隙を先行したと考えられる。実験シリーズ 2 は、シリーズ 1 と比較して全体的に値が正側に移行する傾向が見られた。振動出力に関しては、EFS50 の振動出力 100% の場合が出力 80% の場合よりも粗骨材量変化率が小さくなった。これは EFS50 の単位粗骨材かさ容積がシリーズ 1 と比較して大きく、振動出力が大きい範囲においては粗骨材がアーチングを起こし間隙を通過しにくいことが影響として考えられる。実験シリーズ 3 は、シリーズ 2 同様にシリーズ 1 と比較して値が正側に移行する傾向が見られたが、単位粗骨材かさ容積が比較的大きいため、シリーズ 2 と比較して粗骨材量変化率は小さくなる傾向が認められた。

### (5) モルタルの塑性粘度と降伏値の関係

各実験シリーズにおける、塑性粘度と降伏値の関係を

図-10 に示す。実験シリーズ 1 は、EFS0, 25, 50 に関しては相関性が高い一方、EFS100 はブリーディングの影響を受けたため、相関が得られなかった。実験シリーズ 2 は、シリーズ 1 と比較して塑性粘度および降伏値が小さくなったが、これは単位粗骨材かさ容積を  $0.530\text{m}^3/\text{m}^3$  で一定にした場合、砂および EFS の影響が大きくなり、シリーズ 1 と比較してモルタルの粘性が低下、即ち流動性が増加したことを意味する。実験シリーズ 3 は、単位粗骨材かさ容積が  $0.560\text{m}^3/\text{m}^3$  と大きく、他のシリーズと比較して逆相関となった。一般的に、モルタルの塑性粘度と降伏値の間には正の相関性があるとされており、シリーズ 3 においては以上の傾向から外れる結果となった。

#### (6) モルタルフローと降伏値の関係

全実験シリーズにおける、モルタルフローと降伏値の関係を図-11 に示す。中流動コンクリートのスランプフローはすべて同程度であるが、モルタルフローは配合間で異なる。モルタルフローが小さくなるに伴い降伏値は大きくなる傾向が認められた。EFS 置換率に関しては、置換率が高くなるに伴いモルタルフローは増加しており、EFS の真球である性状を受け、モルタルの流動性が向上しているものと考えられる。

#### 3.2 圧縮強度

全実験シリーズの材齢 28 日における圧縮強度試験結果を図-12 に示す。全実験シリーズにおいて、圧縮強度は  $30\sim 50\text{N}/\text{mm}^2$  程度であった。EFS 置換率が増加するに伴い若干強度が低下する傾向があったが、これは EFS の形状が球形に近く、圧縮応力に対して骨材とセメントペースト間の遷移帯が脆弱になるためと考えられる<sup>7)</sup>。

#### 4. 結論

本研究では、EFS を用いた中流動コンクリートの間隙通過性について検討した。本研究の範囲内で明らかになったことを以下に記す。

- 1) EFS を用いることで間隙通過性が向上し、中流動コンクリートへの適用可能性が示唆された。
- 2) 中流動コンクリートの間隙通過性は、棒パイプレータ出力を変化させることで定量的に評価でき、出力 80% においても十分な間隙通過性を有する。
- 3) EFS を用いた中流動コンクリートをウェットスクリーニングしたモルタルは、フローが小さくなるに伴い降伏値が大きくなる。

#### 謝辞

本研究を実施するにあたり、徳島大学理工学部理工学科社会基盤デザインコースコンクリート工学研究室の大学院生や卒業生諸氏の協力を得ました。また、ポゾリスソリューションズ(株)松田氏には実験に際し多大な協力

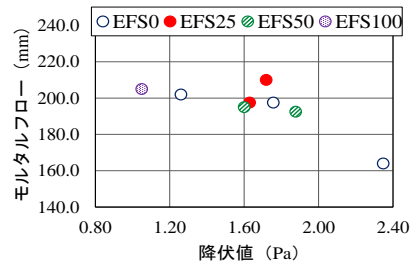


図-11 モルタルフローと降伏値の関係

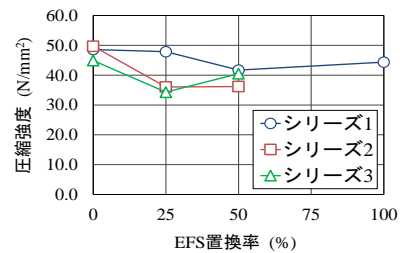


図-12 圧縮強度 (材齢 28 日)

を頂きました。電気炉酸化スラグ細骨材は(株)星野産商から、フライアッシュは四電ビジネス(株)からそれぞれ提供して頂きました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 桜井 邦昭, 近松 竜一: 加振併用型の高流動コンクリートの材料分離抵抗性の評価に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1180-1185, 2012
- 2) 土木学会編: 電気炉酸化スラグ骨材を用いたコンクリートの設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー110, pp.2-3, 2003.1
- 3) 横山 卓哉, 橋本 親典, 渡邊 健, 石丸 啓輔: 電気炉酸化スラグ細骨材とフライアッシュを用いた粉体系高流動コンクリートのフレッシュ性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1157-1162, 2019
- 4) 入力電圧 単相 100V 出力電圧 単相 0~130V/V-130・S-130 シリーズ参照:  
<http://www.yamabishidenki.co.jp/product/item03/v-s-s3p/v-130-3/> (閲覧日: 2019年12月20日)
- 5) 山中 啓資, 横山 卓哉, 橋本 親典, 渡邊 健: 混和材の種類が粉体系高流動モルタルの塑性粘度に与える影響に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1163-1168, 2019
- 6) 近松 竜一, 三浦 律彦, 十河 茂幸: 高流動コンクリートの間げき通過性試験方法に関する一考察, コンクリート工学年次報告集, Vol.21, No.2, pp.523-528, 1999
- 7) 橋本 親典, 山中 啓資, 渡邊 健, 石丸 啓輔: 骨材の種類が電気炉酸化スラグ細骨材を用いた舗装用コンクリートの耐摩耗性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1391-1396, 2019