

論文 衝撃落下による材料分離と打込み欠陥を低減できる材料・調合の評価に関する研究

小島 正朗*1・三井 健郎*2

要旨：コンクリートを型枠内に打込む際に、打込み欠陥ができにくい材料・調合を判定する評価手法を実験的に検討した。コンクリートが鉄筋に衝突して落下するときの粗骨材の分離のしやすさは、調合上の粗骨材量と相関が高く、また締固めによる打込み欠陥の修復のしやすさは、振動スランプフロー試験におけるスランプフロー速度と相関があることが明らかになった。打込みによる初期欠陥のできやすさと、欠陥の修復のしやすさおよび骨材分離のしにくさの3つの側面から総合的に評価することにより、打込み欠陥の低減しやすい材料・調合の判定が可能であると考えられた。

キーワード：打込み欠陥，骨材分離，振動フロー試験，振動フロー速度，分離係数

1. はじめに

型枠内にコンクリートを打ち込む際、コンクリートは鉄筋に衝突しながら落下し、粗骨材が分離して偏在すると締固めを行っても柱脚、壁下部には打込み欠陥が生じやすい。打込み時の骨材の分離や、バイブレータによる締固め効果、締固めに必要な振動加速度などの研究はなされているが、打込みによる初期欠陥のできやすさや締固めによる修復のしやすさと材料・調合の関係を検討した研究は少ない。本研究では、コンクリートの材料・調合と打込み欠陥の関係について実験的に検討し、打込み欠陥の低減できる材料・調合の評価法について検討した。

骨材の粒度分布を図-1に示す。コンクリートの調合を表-3に示す。水セメント比は55%、空気量4.5%一定とした。練り混ぜには50ℓパン型ミキサを使用した。1バッチの練り量を35ℓとして、セメント、細・粗骨材を15秒空練りした後注水し、120秒練り混ぜた。同一調合を連続して2バッチ練り混ぜ試験を行った。

表-1 実験因子と水準

因子	水準	
細骨材種類	3水準	海砂+砕砂, 山砂A, 山砂B
スランプ	3水準	15, 18, 21cm
細骨材率	4水準	42, 47, 52, 57%
混和剤種類	2水準	AE減水剤, 高性能AE減水剤

2. 実験概要

2.1 実験因子と水準

実験因子と水準を表-1に示す。粗骨材は一種類とし、細骨材は海砂+砕砂、粒度の異なる山砂2種類の計3種類とした。

2.2 使用材料、コンクリートの調合および練り混ぜ

使用材料を表-2に示す。細

表-2 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 密度 3.16 g/cm ³	
細骨材	海砂 + 砕砂	海砂 + 砕砂 (5 : 5) : 表乾密度 2.53g/cm ³ , 吸水率 2.35%, FM2.74 ・海砂 : 表乾密度 2.52g/cm ³ , 吸水率 2.24%, FM2.46 ・砕砂 : 表乾密度 2.53g/cm ³ , 吸水率 2.45%, FM3.01
	山砂	山砂A (細 : 中 : 粗 = 0.35 : 0.20 : 0.45 混合) : 表乾密度 2.58g/cm ³ , 吸水率 1.98%, FM3.01 山砂B (細 : 中 : 粗 = 0.45 : 0.20 : 0.35 混合) : 表乾密度 2.58g/cm ³ , 吸水率 2.04%, FM2.76 ・細目砂 : 表乾密度 2.60g/cm ³ , 吸水率 2.26%, FM1.59 ・中目砂 : 表乾密度 2.57g/cm ³ , 吸水率 2.13%, FM2.92 ・粗目砂 : 表乾密度 2.56g/cm ³ , 吸水率 1.70%, FM4.16
粗骨材	5号 + 6号砕石 (5 : 5) : 表乾密度 2.62g/cm ³ , 吸水率 0.88%, FM6.67, 実積率 58.1%	
化学混和剤	AE減水剤 (リグニルフォ酸系), 高性能AE減水剤 (ホリカルボン酸系)	

*1 (株)竹中工務店技術研究所建設技術開発部 工修 (正会員)

*2 (株)竹中工務店技術研究所建設技術開発部 主席研究員 工修 (正会員)

2.3 コンクリートのフレッシュ性状の評価実験

(1)試験項目および試験方法
打込み欠陥のできにくいコンクリートの判定に有効な試験方法の検討を目的に、以下の(a)~(c)の試験を実施した。

(a)スランプ試験,スランプフロー試験

スランプ試験はJIS A 1101,スランプフロー試験はJIS A 1150により実施した。同一調合に対し2回試験を実施した。

(b)振動ロート試験

図-2の形状のV型ロート(幅100mm)にコンクリートを軽く突き棒でつきながら充填し,2台の振動モーター(KM3S-2P,50Hz,起振力0.26kN)で加振を開始してから5秒後に下部のシャッターを一気に開いて自由落下させた。シャッターを開いてから完全に試料が流下するまでの時間を計測した。同一調合のコンクリートに対し,3回の試験を行った。

(c)振動フロー試験

図-3に示す振動テーブルにスランプ,スランプフロー試験終了後の試料をスランプ板ごと静かに載せ,振動モーター(KM3S-2P,50Hz,起振力0.26kN)により加振を開始した時点からフローが50cmに到達するまでの時間を計測した。50cmから初期のスランプフローを減じ,その1/2の距離を計測時間で除して振動フロー速度(cm/s)を求めた。なお,振動モーター起振力は,予備試験により調整した。

2.4 鉄筋への衝突による材料分離の実験

(1)実験方法

鉄筋に衝突するコンクリートの分離のし易さの評価および振動締固めによる打込み欠陥の低減のしやすさの評価を目的に実験を行った。試験装置を図-4に示す。鉄筋の空き間隔,角度,段数を変化させて予備試験を行い,1mの落下高さでコンクリートが適度に分離する条件(@70mm,水平とな

表-3 コンクリートの調合

No	細骨材種類	スランプ(cm)	空気量(%)	W/C(%)	S/a(%)	粗骨材かさ容積(m ³ /m ³)	単位重量(kg/m ³)				混和剤	
							水	セメント	細骨材	粗骨材		
1-1	海砂+ 砕砂	15	4.5	55.0	47	0.62	176	320	804	939	SP	
1-2					52	0.56	177	322	888	849		
1-3					42	0.68	175	318	720	1030		
1-4		18			18	47	0.61	182	331	793	926	AE
1-5						52	0.55	184	335	873	835	
1-6						52	0.53	201	365	838	801	
1-7		21			21	57	0.49	190	345	944	737	SP
1-8						47	0.60	187	340	784	915	
1-9						52	0.54	190	345	861	823	
2-1	山砂A	15	4.5	55.0	52	0.58	160	290	943	883	AE	
2-2					57	0.51	166	302	1018	780		
2-3					47	0.63	172	313	828	948		
2-4		18			18	52	0.58	162	295	937	878	SP
2-5						52	0.58	160	290	943	883	
2-6						57	0.51	171	311	1007	771	
2-7		21			21	52	0.56	174	315	913	856	AE
3-1	山砂B	15	4.5	55.0	47	0.64	164	298	845	966	AE	
3-2					42	0.69	169	307	746	1045		
3-3		18			47	0.63	172	313	829	948		
3-4					52	0.56	175	318	911	853		
3-5					47	0.62	178	324	818	935		

混和剤 SP:高性能AE減水剤(セメント量×1%) AE:AE減水剤(セメント量×0.25%)

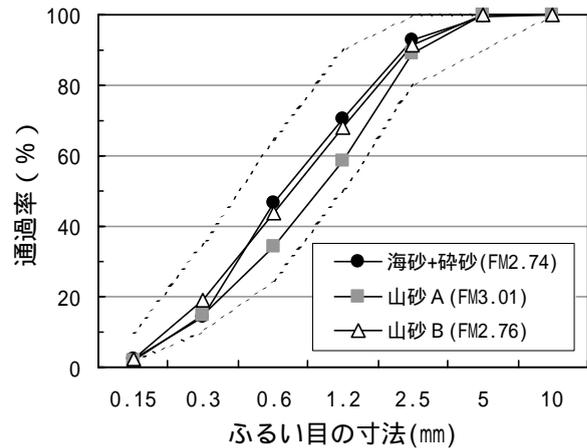


図-1 細骨材の粒度分布

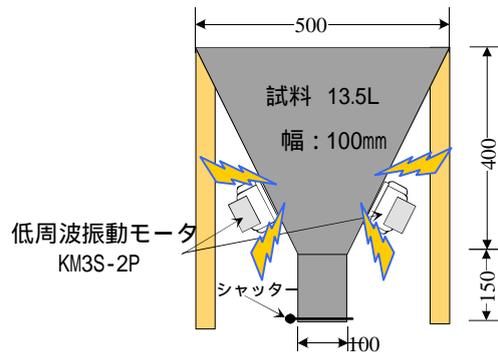


図-2 振動ロート試験

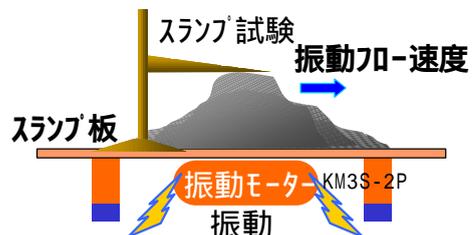


図-3 振動フロー試験

す角 50°、2 段配置) を決定した。

鉄筋上部に設置したコンクリート投入用ロートは振動ロート試験と同じであり、振動ロート試験と兼用した。投入量は 1 回 13.5ℓ、3 回繰り返して合計 40.5ℓ のコンクリートを自由落下させた。鉄筋に衝突して飛散したコンクリートを回収し、鉄筋に衝突しながら鉄筋間を通過したコンクリートは下部の内寸 125 × 300 × 高さ 250mm の型枠 4 体 (ウレタン塗装合板) に打込んだ。

(2)測定項目および測定方法

(a)コンクリートの分離係数

鉄筋に衝突して分離した飛散コンクリートの重量、飛散コンクリートのうち 5mm ふるいに残る骨材量を測定し、吉本らの研究¹⁾を参考に式(1)により分離係数を求めた。

$$\text{分離係数} = (G_A - G_0) M_A / M_0 \quad (1)$$

M_A, G_A : 飛散コンクリートの重量および
飛散コンクリートの粗骨材比

M_0, G_0 : 落下させたコンクリートの全量および
び調合上の粗骨材比

分離係数は、元のコンクリートに対する飛散コンクリートの粗骨材率の増分に、前落下コンクリート量に対する飛散量の比率を乗じた値である。

(b)コンクリート表面の充填率

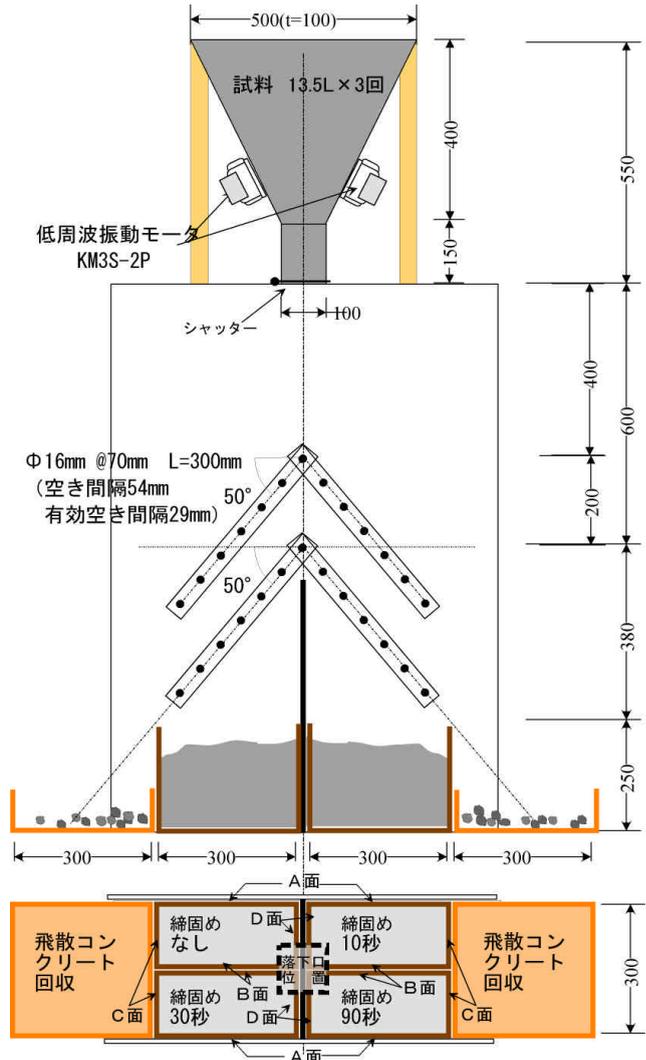


図 - 4 試験装置

表 - 4 試験結果一覧

No	細骨材種類	スラフ (cm)	S/a (%)	混和剤	フレッシュ性状の評価試験					分離試験				充填性試験		
					スラフ (cm)	フー (cm)	フー/スラフ	振動ロート流下時間 (s)	振動フー速度 (cm/s)	飛散コンクリート全重量 M_a	飛散粗骨材比 G_a	調合粗骨材比 G_0	分離係数 ($\times 10^{-2}$)	初期充填率 (%)	最終充填率 (%)	締固め効果係数
1-1	海砂 + 砕砂	15	47	SP	14.3	25.9	1.82	16.8	0.53	4.98	0.84	0.42	2.1	30.5	75.9	-0.06
1-2			52		13.8	24.6	1.79	23.7	0.43	4.07	0.82	0.38	1.8	27.9	68.7	-0.06
1-3			42		20.3	38.3	1.89	7.1	0.55	6.11	0.87	0.46	2.5	31.9	74.4	-0.18
1-4		18	47	AE	20.3	35.9	1.77	11.2	0.72	4.28	0.83	0.41	1.7	31.2	68.4	-0.20
1-5			52		18.3	30.4	1.66	4.7	0.70	3.25	0.80	0.37	1.4	58.3	85.3	-0.24
1-6			57		19.3	30.3	1.57	2.7	0.97	1.52	0.80	0.36	0.6	79.6	96.6	-0.16
1-7		21	47	SP	18.5	28.1	1.52	7.4	0.58	2.20	0.75	0.33	0.9	62.0	94.1	-0.06
1-8			52		20.8	37.6	1.81	4.1	1.12	3.93	0.82	0.41	1.6	78.4	94.9	-0.06
1-9			52		21.5	33.4	1.55	3.4	0.71	3.02	0.78	0.37	1.2	66.8	92.1	-0.22
2-1	山砂 A	15	52	AE	14.0	24.6	1.76	21.3	0.74	4.34	0.79	0.39	1.7	29.6	75.4	-0.12
2-2			57		14.5	26.0	1.79	6.3	1.04	2.07	0.73	0.34	0.8	43.8	98.2	-0.56
2-3			47		20.0	37.4	1.87	7.9	1.26	6.45	0.83	0.42	2.6	48.5	85.3	-0.17
2-4		18	52	SP	17.8	29.4	1.65	9.5	1.01	4.88	0.78	0.39	1.9	33.8	84.4	-0.09
2-5			57		16.3	26.6	1.64	18.4	0.39	5.59	0.78	0.39	2.1	27.3	77.7	-0.06
2-6			52		19.0	30.5	1.61	2.7	1.09	1.85	0.76	0.34	0.8	89.3	99.2	-0.21
2-7			52		21.0	34.8	1.65	2.7	1.50	3.49	0.80	0.38	1.4	82.2	97.4	-0.17
3-1	山砂 B	15	47	AE	14.5	24.0	1.66	20.8	1.16	3.53	0.79	0.42	1.2	34.5	86.4	-0.18
3-2			42		19.0	31.4	1.65	7.3	1.32	5.53	0.85	0.46	2.1	35.0	98.1	-0.08
3-3		18	47		19.5	30.5	1.56	3.6	0.84	2.39	0.82	0.42	0.9	61.9	97.7	-0.21
3-4			52		18.8	29.4	1.57	3.1	1.08	1.34	0.77	0.38	0.5	72.4	98.3	-0.10
3-5			21		21.0	34.9	1.66	2.5	1.33	3.12	0.82	0.41	1.2	77.3	99.1	-0.12

自由落下によりコンクリートを充填した4個の型枠に対し、図-4に示すよう1体は締固め無しとし、残る3体を図-3に示す振動テーブルでそれぞれ10秒、30秒、90秒間締固めた。コンクリートの硬化後に型枠を解体し、A～Dの4面のコンクリートの充填状況を写真に記録した。未充填部と充填部に2値化し、各面について充填部の面積割合を充填率を求めた。締固め時間と充填率の関係を式(2)の締固め関数²⁾にあてはめ、非線形最小2乗近似により C_0 (初期充填率)、 C_m (最終充填率)、 $G \cdot t \cdot f \cdot k$ (締固め効果係数)を求めた。

$$C = C_m - (C_m - C_0) \cdot \exp(-G \cdot t \cdot f \cdot k) \quad (2)$$

ここで、 C : 締固め度、 C_0 、 C_m : 初期および可能な最大締固め度、 G : 振動加速度(g)、 t : 締固め時間(s)、 f : ワークビリティに関わる係数、 k : 定数(1/s)

3. 実験結果および考察

表-4に試験結果一覧を示す。

3.1 コンクリートのフレッシュ性状

図-5にスランプとスランプフローの関係を示す。スランプが同等でも材料・調合によりスランプフローは4cm程度の違いがあった。

図-6にスランプと振動フロー速度の関係を、図-7にスランプと振動ルート流下時間の関係を示す。スランプが同等でも振動下での変形速度である振動フロー速度や振動ルート流下時間は広範囲な値となっており、振動下での変形のしやすさは大きく異なる。スランプだけでコンクリートのフレッシュ性状の評価を行うことは困難であり、加振時の変形特性なども含めて評価する必要があると考えられる。

3.2 鉄筋衝突による骨材分離

図-8に粗骨材かさ容積と分離係数の関係を示す。いずれの細骨材を使用した調合でも、粗骨材かさ容積が多いほど分離係数は大きくなった。細骨材種類による差異もみられ、山砂Bは他の骨材と比べて分離係数が小さい傾向であった。

3.3 締固めによる充填率の変化

図-9に打設面の観察の一例を示す。図-10に調

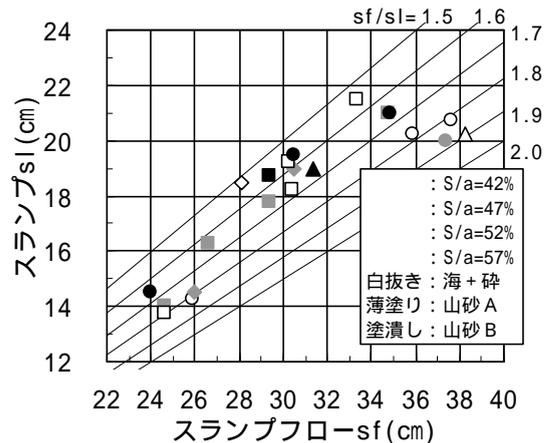


図-5 スランプフローとスランプの関係

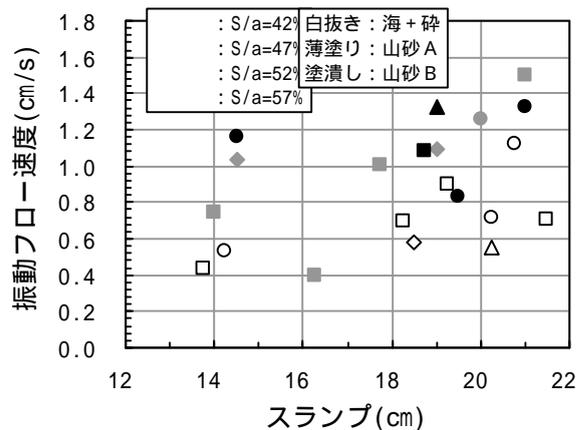


図-6 スランプと振動フロー速度の関係

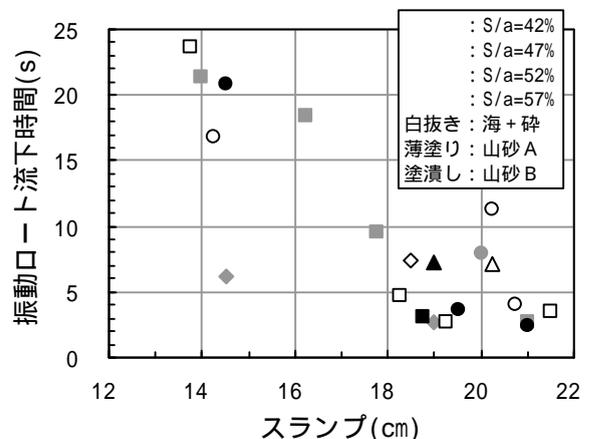


図-7 スランプと振動ルート流下時間の関係

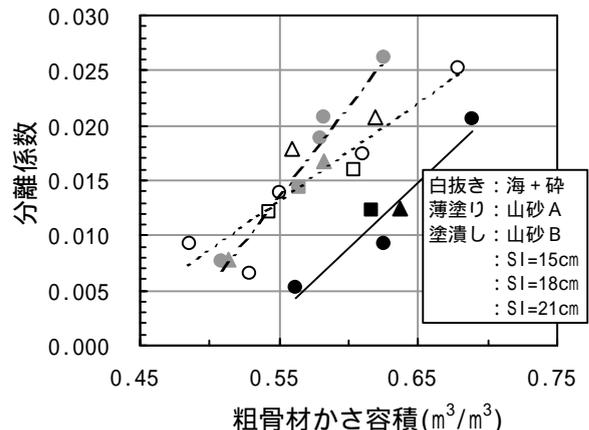


図-8 スランプと分離係数の関係

合 2-1 の場合の、締固め時間と試験体の A ~ D 面の充填率の関係を一例として示す。コンクリートの落下中心に近く流動元となる B 面, D 面の充填率は大きく、流れの下方方向となる A 面, C 面の充填率は B 面, D 面より小さかった。いずれの材料・調合においても同様の傾向であり, A 面, C 面の充填率は材料・調合による差異が大きかった。充填状況が実部材に近いと考えられる A 面, C 面のうち面積の大きい A 面を対象として, 式(2)の締固め関数にあてはめて回帰係数を求めた。図-11に締固め時間と充填率の関係を得られた締め固め曲線の一例を示す。表-4に回帰分析により得られた初期充填率, 最終充填率, 締固め効果係数を示す。いずれの場合も締め固め関数の形で良く近似できた。

図-12に初期充填率と最終充填率の関係を示す。振動フロー速度が小さい海砂+砕砂を細骨材とした調合では, 同じ初期充填率に対して得られる最終充填率は他の細骨材を用いた調合より小さい傾向がある。材料・調合に起因する充填性の違いを評価することができる判定手法が必要と考えられる。

3.4 打込み欠陥の改善に影響を及ぼす材料・調合の評価法

(1) 初期充填率

図-13にコンクリートの各種フレッシュ性状評価指標と, 初期充填率および最終充填率の関係を示す。スランプ 18cm 以下では初期充填率が低くなっている。また, 振動ルート流下時間が短いほど初期充填率は大きくなっている。振動ルート流下時間が短いと, 単位時間あたりの落下物の質量が大きいため, 衝撃により締め固められることが一因と考えられる。

(2) 最終充填率

最終充填率は 3 つの指標のうち, 振動フロー速度と正の相関が認められる。加振による流動のし易さが充填率の向上に影響する要因の 1 つと考えられる。

打込み欠陥を低減できる材料・調合を判定するには, 初期欠陥できにくさ, 加振による欠陥の修



図-9 充填面積率の観察例(調合2-4, A面)

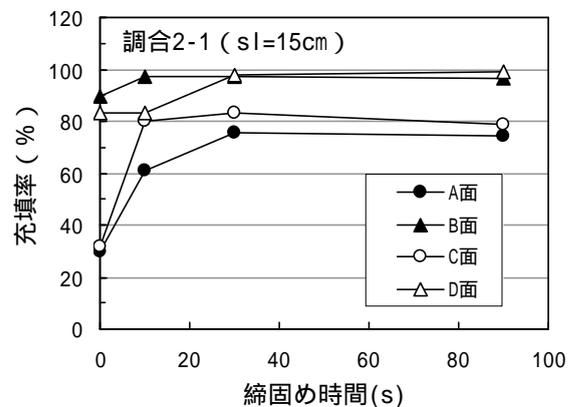


図-10 測定面の締め固め時間と充填面積率の関係の例(調合2-1)

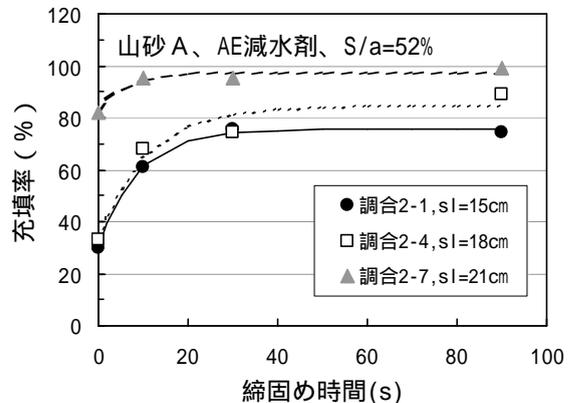


図-11 締め固め時間と充填面積率の関係(スランプが異なる場合)

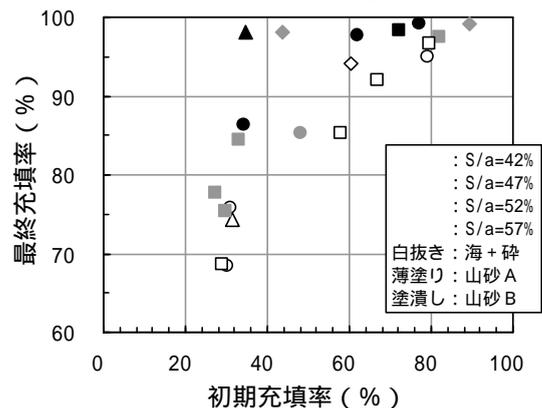


図-12 初期充填率と最終充填率の関係

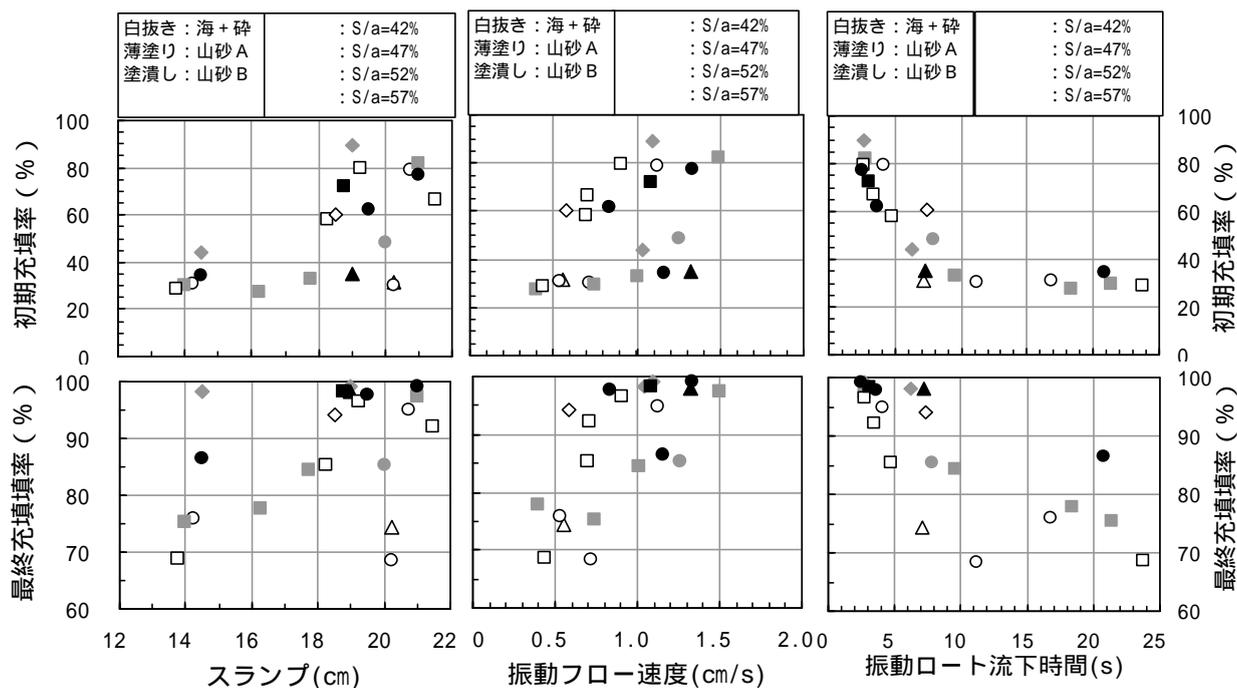


図 - 13 初期充填率および最終充填率とコンクリートのフレッシュ性状評価指標の関係

復のしやすさ, 衝撃落下時の骨材の分離のしにくさの側面から総合的に評価する必要があると考えられる。一例として初期欠陥のできにくさの指標としてスランプ, 欠陥の修復のしやすさの指標を振動フロー速度, 骨材分離のしにくさの指標を1/分離係数とし, 各指標を乗じて求めた総合指標と最終充填率の関係を図 - 14 に示す。スランプ×振動フロー速度/分離係数の値がある閾値を超えると最終充填率は95%以上と大きくなり, それ以下では最終充填率は急激に低くなる。このような総合指標を用いることにより, 一定の締固め条件のもとで打込み欠陥を低減しやすい材料・調合の判定が可能になると考えられる。総合指標は, 分離係数を粗骨材かさ容積等により推定すれば, 従来のスランプ試験と, 比較的容易な振動フロー試験のみから得ることができるため, 比較的容易に材料・調合の評価に適用できると考えられる。

4. まとめ

衝撃落下による材料分離と締固め打込み欠陥のでき易さの判定手法を実験的に検討した結果, 実験の範囲で以下の知見が得られた。

- (1) 衝撃落下による材料分離は粗骨材量の影響が大きい。
- (2) 振動フロー速度が大きいほど締固めによる充

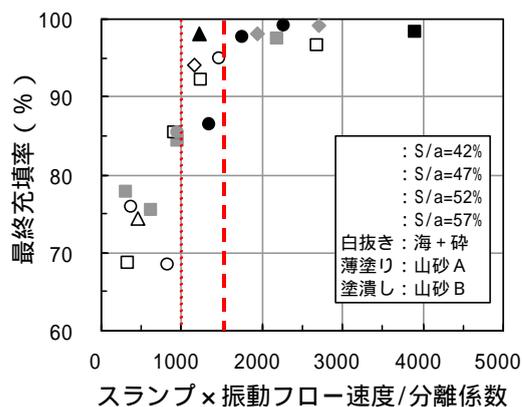


図 - 14 スランプ×振動フロー速度/分離係数と最終充填率の関係

填率の向上は大きく, 打込み欠陥は修復されやすいと考えられる。

- (3) 初期欠陥のできにくさ, 加振による欠陥の修復のしやすさおよび材料分離のしにくさを総合的に評価することにより, 打ち込み欠陥の低減しやすい材料・調合の判定が可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 吉本彰, 湯口啓: 落下によるコンクリートの分離 - その測定法と2, 3の実験, セメント・コンクリート, No.282, pp.22-29.1970
- 2) Kolek J: Reserch on the vibration of fresh concrete, Reports Conference on Vibrations Compaction Tequiques 1963