

論文 加振 BAR フロー試験による強さクラス 32.5 セメントを用いたフレッシュコンクリートのコンシステンシー評価

原田 貴典^{*1}・山川 正泰^{*2}・橋本 親典^{*3}・水口 裕之^{*4}

要旨：欧州規格の強さクラス 32.5 セメントのフレッシュ性状，特に間隙通過性と材料分離抵抗性を定量的に把握するために，加振 BAR フロー試験を用いて，石灰石微粉末と高炉スラグ微粉末を添加した強さクラス 32.5 セメント 2 種類と普通ポルトランドセメントと高炉セメント B 種を用いたフレッシュコンクリートのコンシステンシーを評価した。結果，鉄筋間隙通過性は石灰石微粉末が添加されたセメントと普通ポルトランドセメントが良好であり，高炉セメント B 種を用いたコンクリートは，鉄筋間隙通過性および材料分離抵抗性の観点から 4 種類のコンクリートの内，最も性能が劣っていると判断された。

キーワード：フレッシュコンクリート，強さクラス 32.5 セメント，コンシステンシー

1. はじめに

近年，日本国内でコンクリート構造物の早期劣化現象が頻発しており，これらを機にコンクリート構造物の耐久性が重要視されはじめている。しかし現在日本で使用されているセメントは，少ない粉体量で所定の強度を得ることができるが，その粉体量の減少により耐久性の乏しいコンクリートが製造される懸念が生じている。このため耐久性から定まる水セメント比で適正な単位セメント量のコンクリートとなるセメントの開発が進められており，またそのセメントを用いた 21 世紀における汎用コンクリートの姿を掴む必要があると指摘されている¹⁾。そのセメントの候補として挙げられているのが，欧州規格の強さ 32.5 クラスに相当する，石灰石微粉末，高炉スラグ微粉末が添加された混合セメントである。

一方，著者らは²⁾，フレッシュコンクリートの性能照査型の施工設計を行うため，フレッシュコンクリートの鉄筋間隙通過性および材料分離抵抗性を考慮したコンシステンシー評価試験として，加振 BAR フロー試験を提案している。

粉体量が多くなる強さクラス 32.5 セメントを用いたフレッシュコンクリートの性状は，従来のセメントを用いたフレッシュコンクリートの性状と異なるものと予想される。

本研究では，加振 BAR フロー試験によって得られる，フロー速度，BAR フロー速度，閉そく高さおよび分離指数等の各指標を用いて，従来のセメント 2 種類と強さクラス 32.5 セメント 2 種類の合計 4 種類のセメントを用いたフレッシュコンクリートのコンシステンシーを評価した。また，振動エネルギーを一定とした場合のコンシステンシーを評価するために，振動時間を 10 秒で一定として加振 BAR フロー試験を行い，閉そく高さと分離指数を求め，50cm フロー到達時間まで振動させる加振 BAR フロー試験で得られる結果と比較した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 に本実験における使用材料を示す。セメントは混合セメントとして石灰石微粉末－高炉スラグ微粉末が添加されたセメント(以下 BL

*1 徳島大学 工学部建設工学科 (正会員)

*2 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*3 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

*4 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

表-1 使用材料

セメント(置換率 mass %)	強さクラス	密度 (g/cm ³)	ブレン比表面積(cm ² /g)
BL(高炉スラグ微粉末 15, 石灰石微粉末 20)	32.5N	3.00	4210
LS(石灰石微粉末 30)	32.5N	3.00	4200
BB	42.5N	3.02	3890
N	52.5N	3.15	3390

骨材	産地	密度 (g/cm ³)	粗粒率	AE 減水剤	AE 助剤	水
細骨材	徳島県阿南市 那賀川産川砂	2.62	2.86	リグニン スルホン酸	アルキルアリル スルホン酸化合物系	水道水
粗骨材	徳島県阿南市 那賀川産玉砕石	2.64	6.67	ポリオール 複合体	陰イオン界面活性剤	

表-2 実験に用いたコンクリートの配合

配合 名	目標スラ ンプ(cm)	目標空 気量(%)	セメント の種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m3)				AE 減水剤 (C×%)	AE 助剤 (C×%)
						W	C	S	G		
BL 2	2±1.5	4.5±1.5	BL	47.8	48.3	149	312	888	958	0.15	0.005
LS 2			LS	44.4	46	151	340	832	985		
BB 4	4±1.5		BB	56.3	50.1	151	268	939	942		0.01
N 4			N	59	50.3	152	258	945	941		
N 6	6±1.5		N	59	50.3	155	263	955	940		0.005
BL 8	8±1.5		BL	47.8	48.3	160	335	865	932		0.008
BL 12	12±2.5		BL	47.8	48.3	164	343	866	924		0.008
LS 12			LS	44.4	46	166	374	801	947		
BB 12			BB	56.3	50.1	158	281	924	927		0.01
N 12			N	59	50.3	161	273	932	928		
BL 16	16±2.5		BL	47.8	48.3	169	354	845	912		0.008
LS 16			LS	44.4	46	174	392	784	927		
BB 16			BB	56.3	50.1	164	291	912	915		0.01
N 16			N	59	50.3	166	281	922	918		0.005
BL 20	20±2.5		BL	47.8	48.3	175	366	833	898		0.005
LS 20			LS	44.4	46	179	403	773	915		0.008
BB 20			BB	56.3	50.1	170	302	899	902		0.008
N 20			N	59	50.3	172	292	910	906		0.005

と略記), 石灰石微粉末が添加されたセメント(以下 LS と略記), また比較対象として従来セメントである普通ポルトランドセメント, 高炉セメント B 種(以下それぞれ N および BB と略記)の 4 種類を使用した。普通ポルトランドセメントを基材とし, セメント質量に対して, BL は高炉スラグ微粉末 15%, 石灰石微粉末 20%を置換したもの, LS は石灰石微粉末を 30%置換したものである。

2.2 示方配合

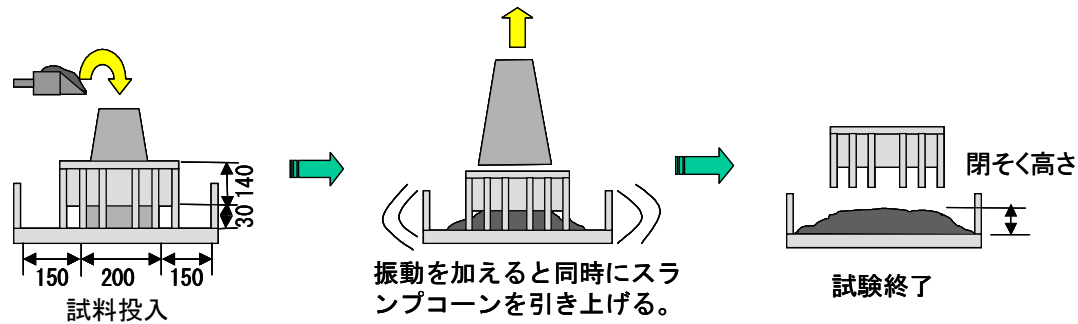
表-2 に本実験で用いたコンクリートの配合を示す。試し練りを行い, 作成された圧縮強度

ーセメント水比(σ -C/W)直線を基に, 目標強度を 28.8N/mm²(呼び強度 24)として, 水セメント比を決定した。また, 最適 s/a は, 各セメントの種類毎に一定とした。

2.3 加振 BAR フロー試験方法

図-1 に加振 BAR フロー試験方法の概要を, 図-2 に加振 BAR フロー試験装置を示す。以下に実験手順を示す。

- (1) スランプコーン, 流出障害装置を設置し, スランプコーンの内面および振動台上面を湿布等で拭き, スランプコーンを動かないようにしっかりおさえる。



図－1 加振 BAR フロー試験方法

- (2) 試料がスランプコーンの容積の約 1/3 ずつ 3 層に分けて詰める。各層は突き棒でならした後、25 回均一に突く。突く深さは前層に達する程度とし、1 層目は水密性平板を突かないようにする。なお、材料分離が生ずるおそれがある場合は、分離を生じない程度に突き数を減らす。
- (3) 試料を詰め終わった後、こて等を用いてスランプコーンの上端に合わせてならす。
- (4) コンクリートをスランプコーンに詰め始めてから、詰め終わるまでの時間は 3 分以内とする。
- (5) 上面をならした後、直ちにスランプコーンを静かに鉛直に引き上げる。スランプコーンを引き上げると同時に、このコンクリートに一定の振動条件で加速度を与え、このとき振動時間を測定し始める。引き上げる時間は、高さ 300mm で 2～3 秒とする。
- (6) コンクリートの全自由表面が振動台の外枠に到達した時点で振動を停止する。このとき振動時間の測定を終了し、500mm フロー到達時間(以下 BF 時間と略記)とする。スランプフローの流動距離 150mm を BF 時間で除した施工速度を BF 速度(mm/s)とする。BF 速度と区別するために、流出障害装置がない加振スランプフロー試験での施工速度を F 速度(mm/s)とする。
- (7) 振動停止後、流出障害装置内に残留するコンクリートの高さを測定し、閉そく高さ(mm)とする。さらにそのコンクリートを $\Phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱型枠供試体に充てん



図－2 加振 BAR フロー試験装置



図－3 障害装置内の堆積状況の一例

し、この容積分のコンクリート試体について洗い分析試験を行う。図－3 に 50cm フロー到達後の障害装置を除去したあとのコンクリートの堆積状況の一例を示す。

- (8) 洗い分けた粗骨材を表乾状態にした後、その質量を測定する。これを単位量に換算し、配合上の単位粗骨材量との差をとり、これを単位粗骨材量で除した値を分離指数とする。

2.4 振動時間一定の加振 BAR フロー試験

加振 BAR フロー試験終了後、フレッシュコンクリートに与える振動エネルギーを一定とし

表-3 実験に用いたコンクリートのフレッシュ性状

配合名	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
BL 2	1.5	3	12.8
LS 2	1	2.8	13.1
BB 4	5	4.8	11.9
N 4	3	3.8	12.5
N 6	5.5	5.2	9.2
BL 8	8	4.6	10.2
BL 12	10	5.8	10.6
LS 12	11	5.7	12.3
BB 12	14.5	5.2	12.1
N 12	14	8.2	12.3
BL 16	18	6.9	12.9
LS 16	16.5	6.6	11.2
BB 16	18	7	9.3
N 16	17.5	6	8.5
BL 20	22	3.8	13.6
LS 20	21	5.7	11.7
BB 20	21.5	7	10.1
N 20	22	6.4	13

た場合のコンシステンシーを評価するために、2.3の(1)~(6)までを実施したのち、加振時間を10秒として、閉そく高さおよび分離指数を求める。この際、コンクリートのスランプの大小に関係なく10秒間振動を与えるため、コンクリートが流出障害装置を超えてスランプする大きさは一様ではない。よって、F速度やBF速度は求められない。

3. 実験結果および考察

本配合で製造したコンクリートのフレッシュ性状を表-3に示す。18配合ともに目標スランプおよび空気量の範囲をほぼ満足する結果となった。コンクリート温度は実験室の設備の関係から10℃前後である。セメントの種類による相対的なコンシステンシーの評価を行うため、温度の影響は無視できると判断した。

3.1 加振 BAR フロー試験におけるコンシステンシー評価

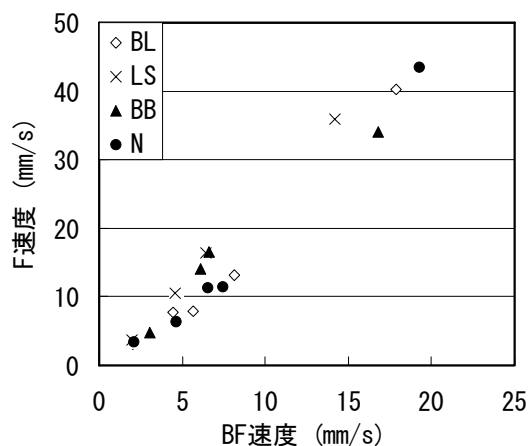


図-4 BF速度とF速度の関係

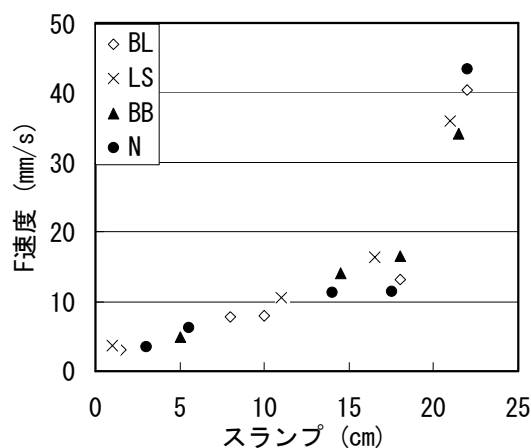


図-5 スランプとF速度の関係

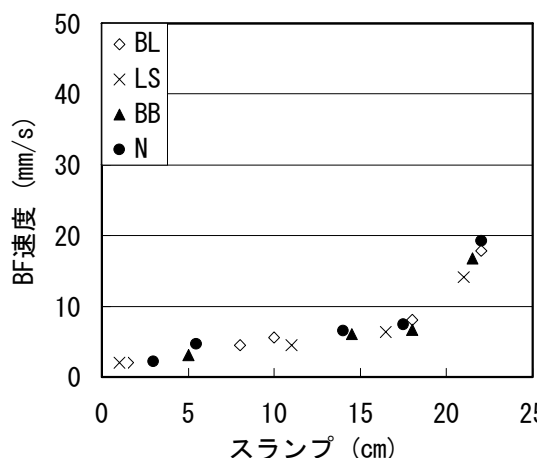


図-6 スランプとBF速度の関係

図-4にBF速度とF速度の関係を示す。セメントの種類に関係なく比例関係にある。

図-5にスランプとF速度、図-6にスランプとBF速度の関係を示す。共にスランプが20cm程度まではセメントの種類に関係なく比

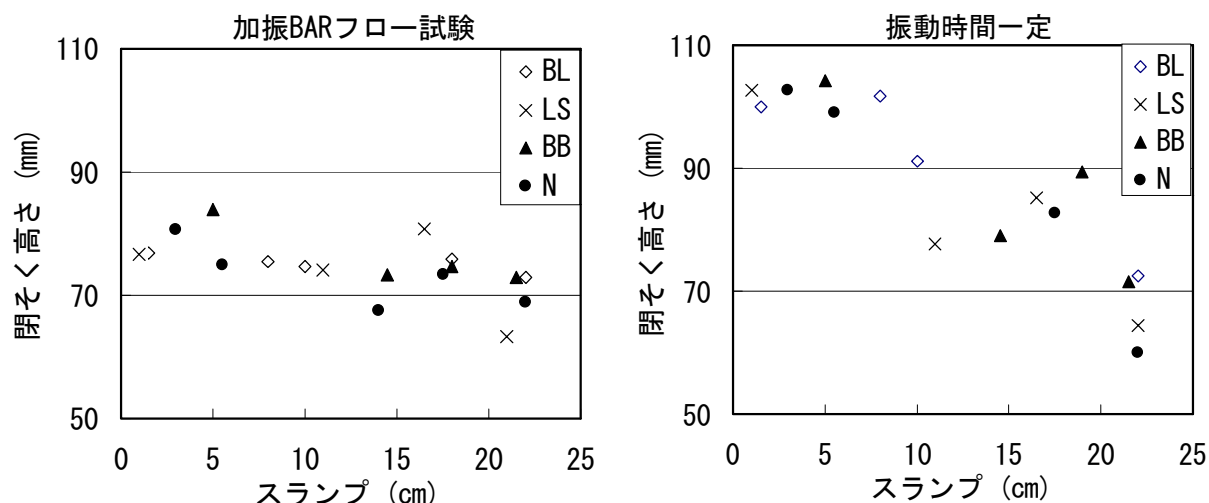


図-7 スランプと閉そく高さの関係

例関係にある。しかし、スランプが 20cm を超えると、同一スランプにおいてセメントの種類によって、両速度には顕著な差が出た。ここから、スランプが 20cm 以上のものは、スランプで評価できなかったものが、加振することによって評価できると考えられる。

LS20 は N20 に比べて、BF 速度が 5mm/s 以上低減している。これは石灰石微粉末混入による粘性の増大の影響が大きいと思われる。加えて、LS20 は単位水量が 179kg と 4 つの配合うち最も大きいにもかかわらず、BF 速度が遅く非常に粘性があることから、材料分離抵抗性が良好であると判断される。なお、これらの事実は、三谷らの研究報告³⁾と一致する。

3.2 閉そく高さ

図-7 に、加振 BAR フロー試験および振動時間一定の加振 BAR フロー試験のスランプと閉そく高さの関係を示す。

加振 BAR フロー試験における AE コンクリートの閉そく高さは、75mm 付近に集中するという報告²⁾とほぼ同様の結果が得られた。

50cm フロー到達時間まで加振する変形量一定の加振 BAR フロー試験の場合、LS、BB、N は、スランプが大きくなるに従い、閉そく高さが低くなる。特に LS と N に関しては、閉そく高さが 70mm 以下になっており、間隙通過性が非常に良好である。これに対し、BB はスラン

プが小さくなれば閉そく高さが極端に高くなっているため、間隙通過性が悪く障害装置内に多量のコンクリートが残留している状態、つまり閉そく状態であると考えられる。また、BL はスランプの大小にかかわらず閉そく高さが 75mm 程度で一定の値となっていることから、充てんが安定していると判断される。

振動時間一定の場合、スランプと閉そく高さの関係は、セメントの種類に関係なく右下がりの曲線群となる。加振 BAR フロー試験と同様に、全体的に N と LS の閉そく高さが低くなっているため、間隙通過性が良好であると判断することができる。

3.3 分離指数

図-8 に、加振 BAR フロー試験および振動時間一定の加振 BAR フロー試験のスランプと分離指数の関係を示す。この分離指数が零に近ければ、障害装置内の粗骨材量が配合上のそれに近似していることを意味する。よって、今回の実験に用いたコンクリートは全て材料分離している。これは、障害装置の流出口断面積が、間隙通過性および材料分離抵抗性をより鋭敏に捕えることができるように設定された⁴⁾ことと、本実験で使用した加振装置の加速度を 40m/s^2 という大きい加振力であることに因る。

加振 BAR フロー試験の場合、N の分離指数が小さくなる傾向にある。これは、N の BF 速

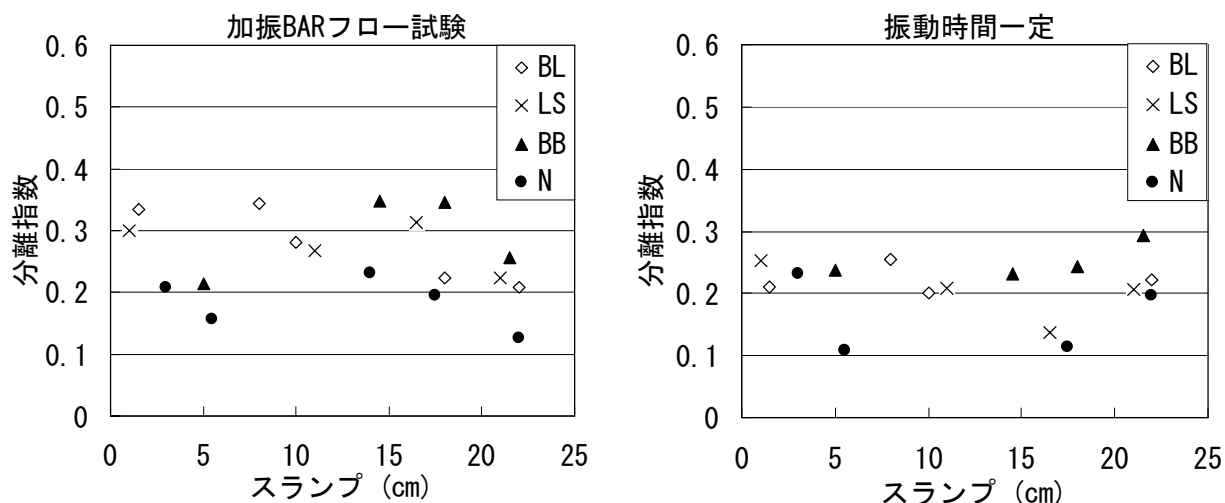


図-8 スランプと分離指数の関係

度が速く、他の種類のセメントを用いた場合に比べて振動時間が短かったために、あまり加振されなかったためと考えられる。また BL は、スランプが 12cm～20cm 程度では N とほぼ同等の材料分離抵抗性を有している。これに対し、BB は、材料分離抵抗性が低いと判断することができる。

振動時間一定の場合、BB は全体的に分離指数が大きいため、材料分離を生じやすい。スランプが 16cm～22cm において、LS は N と同程度の分離指数であるために材料分離抵抗性が高いと判断することができる。

4. まとめ

本研究の範囲で得られた成果を以下に記す。

- (1) スランプが 20cm 程度のコンクリートでは、セメントの種類による粘性の影響を、スランプよりも施工速度の方がより明確に評価することができる。また BF 速度による評価では、石灰石微粉末系の強さクラス 32.5 セメントは、粉体混入による粘性の増大により、単位水量が多いにも関わらず、材料分離抵抗性が高い。
- (2) 石灰石微粉末系の強さクラス 32.5 セメントと普通ポルトランドセメントは、加振 BAR フロー試験および振動時間一定の加振 BAR フロー試験、いずれの場合においても、

間隙通過性が良好である。

- (3) 高炉セメント B 種を用いたコンクリートは、間隙通過性および材料分離抵抗性において、4 種類のセメントのうち、最も劣っている。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、山田一夫氏(太平洋セメント(株)中央研究所セメント化学グループリーダー)には、セメントの提供ならびに強さクラス 32.5 セメントの配合設計方法について御助言を頂きましたことをここに付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 城国省二，沢木大介，山田一夫：21 世紀に求められるセメント像・欧州汎用セメントの解析をとおして，太平洋セメント研究報告，140 号，pp.4-24,2001.6
- 2) 石丸啓輔，橋本親典，渡辺健，水口裕之：加振 BAR フロー試験によるコンシステンシー評価試験方法の検討，第 56 回セメント技術大会講演要旨，pp.128-129，2002
- 3) 三谷裕二，小早川真，大森啓至，山田一夫：強さクラス 32.5 セメントを使用した汎用コンクリートのフレッシュ性状および材料分離抵抗性，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.879-884，2002
- 4) 原田和樹，山本泰彦：コンクリートの自己充てん性の新しい評価方法に関する研究，土木学会論文集 No.627/V-44，pp.179-192，1999.8