

論文 各種配合条件におけるフレッシュコンクリートの定量的な振動性状評価

橋本 紳一郎^{*1}・伊達 重之^{*2}・橋本 親典^{*3}・江本 幸雄^{*4}

要旨: 本研究では、同一のスランプで単位セメント量やフライアッシュ (FA) 混入など各種配合条件におけるフレッシュコンクリートの振動性状について検討した。その結果、普通コンクリートより FA 混入コンクリートの方が加振ボックス充てん試験では間隙通過性が速くなり、材料分離抵抗性も改善される。タンピング試験では、タンピング 1 回当たりのフロー変化量が大きくなることを示した。また、加振変形試験では、同一粉体量で粉体量が多い場合を除き、FA 混入コンクリートのフロー変化量が加振初期で 1/2 程度小さくなることを示した。

キーワード: スランプ, スランプフロー, 間隙通過性, 材料分離抵抗性, 加振変形試験, タンピング試験

1. はじめに

コンクリートライブラリー126号「施工性能に基づくコンクリートの配合設計・施工指針(案)」では、施工性能を流動性と材料分離抵抗性で決定する指標とし、それぞれを打込み時に必要な最小スランプと配合上の粉体量で照査するシステムが提案されている。これにより、従来の強度や耐久性、要求されたコンクリートの施工性能を、配合や施工方法あるいはレディーミクストコンクリートの種類を選定することによって照査できるようになった。

コンクリートの混和材料を取り巻く状況は、資源の有効利用や環境問題の観点から、高炉スラグやフライアッシュ(以降、FAと称す)に代表されるように産業副産物の多くがコンクリート中で有効利用されている。特にFAは、これまでの内割りや外割りの概念に捉われることなく、その品質特性を活かし、単位混和量として整理する新しい配合設計手法も提案されている¹⁾。化学混和剤に関しても、様々な種類が開発され、混和剤の種類やその添加量により、スランプ値の調整も可能となってきた。そのため、コンクリートの材料の品質や配合条件が異なっても同一のスランプのコンクリートを製造することが比較的容易となっている。また、同一スランプのコンクリートでも、使用する材料により振動時の挙動が異なることが報告²⁾されていることから、同一スランプで同一粉体量のコンクリートでも構成材料により、その性状が異なることが予測される。しかし、現段階ではスランプに代わる試験方法が規定されていないため、これらのコンクリートはスランプ値のみをワーカビリティの判断基準とした場合、同じものとして扱うことになる。

一方で、既往の研究では、スランプで評価できないコンクリートの品質を評価する試験方法がいくつか提案されており、その中でも、タンピング試験やボックス形容器と棒状内部振動機を使用した試験方法は、特殊な試験装置を使用しないで、容易にフレッシュコンクリートの品質を評価できる試験方法として有効である³⁾⁴⁾。

以上から、本研究では、同一のスランプで単位セメント量やFA混入など各種配合条件におけるフレッシュコンクリートに対して、ボックス形容器と棒状内部振動機を使用した試験方法(以降、加振ボックス充てん試験と称す)とタンピング試験により、フレッシュコンクリートの振動時の性状について評価を行った。また、振動条件下の比較検討として中流動覆工コンクリートの品質評価に用いられる加振変形試験でも振動性状の評価を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験で使用した材料は、セメントに普通ポルトランドセメント(密度: 3.15g/cm³)、細骨材は福岡県玄界灘産海砂(表乾密度: 2.58g/cm³, 吸水率: 0.96%, F.M.: 2.60)、粗骨材は福岡県糸島郡志摩町産砕石(最大寸法: 20mm, 表乾密度: 2.66g/cm³, 吸水率: 1.11%, F.M.6.60)である。FAはFAII種(密度: 2.25g/cm³, 比表面積: 3,990cm²/g, 強熱減量: 2.7%)を使用した。混和剤には、リグニンスルホン酸系のAE減水剤及びポリカルボン酸エーテル系の高性能AE減水剤、アルキルエーテル系のAE剤を使用した。

2.2 コンクリートの配合条件及び配合

*1 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 助教 博(工) (正会員)

*2 日本シーカ株式会社 技術研究所長 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 教授 工博 (正会員)

*4 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 教授 工博 (正会員)

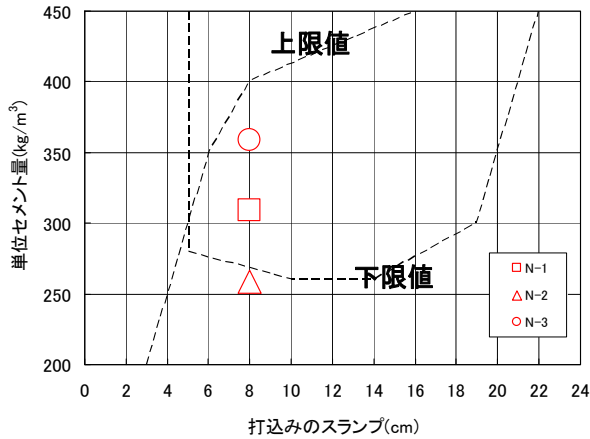


図-1 材料分離抵抗性、振動締固め性に関する単位セメント量の照査図¹⁾

表-1 配合条件

No	配合種類	目標スランプ (%)	目標空気量 (%)	配合条件
1	基準配合	8.0±1.0	4.5±1.0	最適な配合
2	基準配合-50			基準配合と単位粗骨材量を同じとして、単位セメント量を50kg/m ³ 低減した配合
3	基準配合+50			基準配合と単位粗骨材量を同じとして、単位セメント量を50kg/m ³ 増加した配合

本実験で使用したコンクリートの配合条件を表-1と図-1に示す。本実験では市内生コン工場で実際に使用されている一般的な目標スランプ：8.0±1.0cm、目標空気量：4.5±1.0%の配合を基準配合とした。

図-1は既往報告⁵⁾の「材料分離抵抗性、振動締固め性に関する単位セメント量の照査図(対象部材：スラブ、締固め作業高さ：0.5m未満)」を示したものである。材料分離抵抗性と振動締固め性は、構造条件と施工条件において欠陥を発生することなく密実にコンクリートを

型枠内に打ち込むことのできる打ち込みやすさを示しており、破線はスランプに応じた振動締固め性を確保するために必要となる単位セメント量の上限値と材料分離抵抗性を確保するために必要となる単位セメント量の下限値の目安を示す。配合条件は間隙通過性を評価するため、全ての配合の単位粗骨材量を一定で行った。また、基準配合に対して、単位粗骨材量を一定とした場合に製造可能な細骨材率と単位セメント量の範囲で粉体量の影響を検討するため、打込みスランプ8.0cmの際の単位セメント量の上限値と下限値を超えるまたは境界付近となるように単位セメント量を50kg/m³増加及び50kg/m³減少させた配合の3水準で検討した。

コンクリートの種類は、普通コンクリート(N)と普通コンクリートに対してFAをセメントの内割り20%混入したコンクリート(FA内)、普通コンクリートに対して単位セメント量を一定とし、単位FA量を50kg/m³固定で混入したコンクリート(FA固)、単位セメント量の多い高強度コンクリート(H)の4種類で検討した。これらの各コンクリートに対して、単位セメント量を50kg/m³増減させた3水準を適応し(表-1)、合計12配合で検討を行った。使用したコンクリートの配合を表-2に示す。

2.3 試験方法

(1) フレッシュ性状試験

コンクリートのフレッシュ性状試験では、スランプ試験をJIS A1101、空気量試験をJIS A 1128に従い測定した。また、コンクリート温度と外気温も測定した。

コンクリートは、目標スランプ：8.0±1.0cm、目標空気量：4.5±1.0%を満たしていることを確認した後、加振ボックス充てん試験と加振変形試験、タンピング試験を同時に実施した。実際のスランプと空気量、コンクリート

表-2 コンクリート配合一覧

コンクリートの種類	配合種類	配合No.	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					AE減水剤 /(C×%) AE剤 (C×%) Ad	スランプ	空気量	コンクリート温度		
					W/C	S/A	W	C	FA					S	G
					cm	%	°C								
普通コンクリート	基準配合	N-1	55	45	170	309	-	798	1005	C×0.2000 C×0.0041	8.0	4.0	18.7		
	基準配合-50	N-2	66	46	170	259	-	839	1005	C×0.3000 C×0.0041	8.5	4.5	18.4		
	基準配合+50	N-3	47	43	170	359	-	756	1005	C×0.3000 C×0.0041	8.0	4.0	17.5		
FA内割20% 置換	基準配合	FA内-1	69	44	170	247	62	777	1005	C×0.2000 C×0.0080	8.0	3.5	16.2		
	基準配合-50	FA内-2	82	46	170	207	52	820	1005	C×0.2000 C×0.0100	8.5	3.5	16.4		
	基準配合+50	FA内-3	59	43	170	287	72	732	1005	C×0.2500 C×0.0150	8.0	4.0	11.7		
FA=50kg/ m ³ 固定	基準配合	FA固-1	55	42	170	309	50	740	1005	C×0.1000 C×0.0800	9.0	3.5	11.5		
	基準配合-50	FA固-2	65	44	170	259	50	781	1005	C×0.0500 C×0.0150	8.0	4.0	11.5		
	基準配合+50	FA固-3	47	41	170	359	50	699	1005	C×0.0500 C×0.0100	8.0	3.5	16.1		
高強度	基準配合	H-1	30	42	140	467	-	746	1005	C×10000/* C×0.0600	7.0	5.0	15.3		
	基準配合-50	H-2	33	44	140	417	-	787	1005	C×0.8700/* C×0.0410	7.0	5.0	13.6		
	基準配合+50	H-3	27	42	140	517	-	704.3	1005	C×1.1000/* C×0.0600	7.0	3.5	16.0		

*: sp 高性能AE減水剤

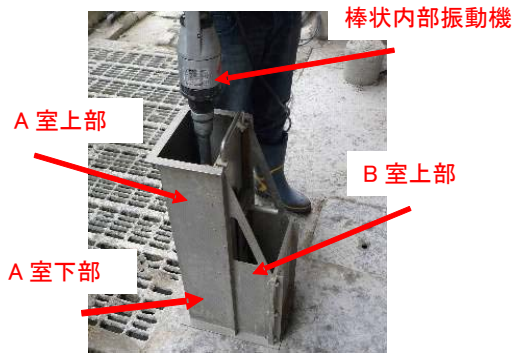


写真-1 加振ボックス充てん試験

の温度を表-2 に示す。

(2) 加振ボックス充てん試験

本研究は、高流動コンクリート充てん装置を用いた間隙通過試験方法(案) (JSCE-F 511) のボックス形容器(以降、ボックスと称す)と棒状内部振動機(以降、振動機と称す)を用いて、既往の研究³⁾で提案されている試験方法を参考とし、以下の手順で行った。既往の研究では、仕切りゲート部に設置する流動障害について様々に検討されているが、本研究では流動障害 R2 のみで試験を行った。

加振ボックス充てん試験方法は、防振用のゴムマットの上にボックスを水平となるよう設置し、ボックスに仕切りゲートおよび流動障害を取り付ける。仕切り板を差し込み、仕切りゲートを閉じた状態で試料をA室中央に3~4層程度に分けて詰める。A室上面をならし、振動機を静かにA室に挿入する。挿入深さ位置は下端から10cm上で固定し、振動機先端がゲート中央辺りにくるようにする。仕切りゲートを引き上げ、振動機による加振を開始する。加振を開始した直後からB室隅部の試料高さが190mmと300mmに達した時間を測り、これを到達時間とした。A室下部、B室上部の試料を約2リットル採取し、JIS A 1112 に従い洗い分析試験を実施して粗骨材量を測定し、A室とB室の粗骨材変化率を算出した。振動機は、棒径:28mm, 振幅:1.4mm, 振動数:200~258Hzのものを使用した。(写真-1)

(3) 加振変形試験

加振変形試験はNEXCO JHS 733-2008「中流動覆工コンクリートの加振変形試験方法」に準拠して実施した。加振変形試験器上でスランプ試験を行った後、10秒間の振動を行い、加振前のスランプフローと加振後のスランプフローから加振後のスランプフローの広がりを出算した。また、本研究は普通コンクリートを対象としているため、更に変形性状を把握するため再振動を加振時間30秒、60秒、90秒までを行い、再振動後のスランプフローの広がりを出算した。予備実験より、スランプ8cmのコンクリートは再振動90秒以降のスランプフローの広

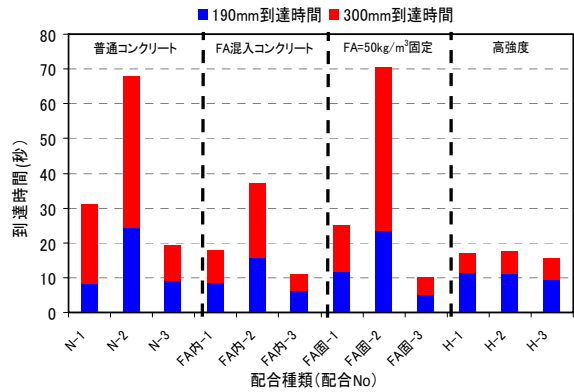


図-2 加振ボックス充てん試験結果 その1

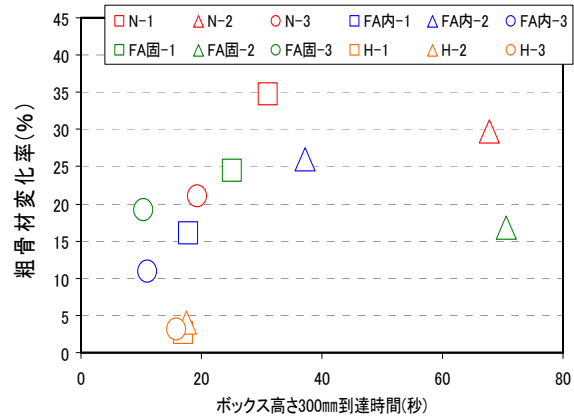


図-3 加振ボックス充てん試験結果 その2

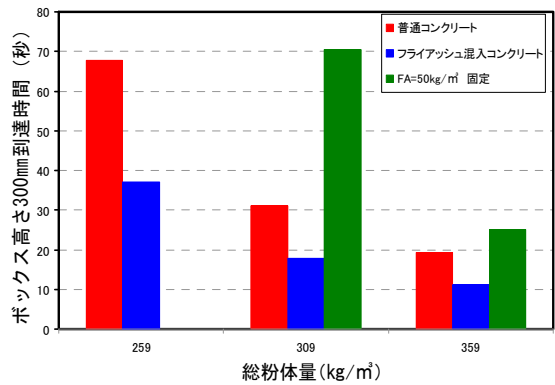


図-4 加振ボックス充てん試験結果 その3

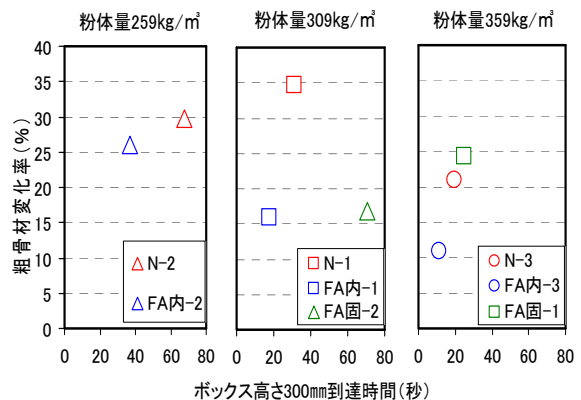


図-5 加振ボックス充てん試験結果 その4

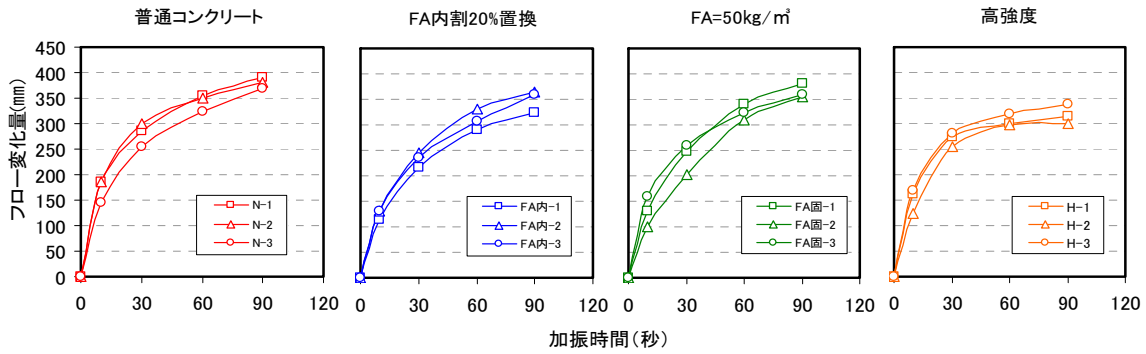


図-6 加振変形試験結果 その1

がりが見られなかったため、再振動時間を 90 秒までとして評価した。加振変形試験器に取り付ける振動機は、加振ボックス充てん試験に使用したものと同様のものを使用した。

(4) タンピング試験

タンピング試験は既往の研究⁴⁾を参考とし、以下の手順で行った。表乾状態の細骨材を 1~2cm 程度の厚さで敷き均し、その上にスランプ板を設置し、スランプ試験を実施する。木製棒（質量 1.2 kg）を 50cm の高さからスランプ板の四隅に順次落下させる。木製棒を落下させる位置はスランプコーンの中心から 30 cm とした。タンピングはフローが 350mm 達した時点で終了とした。その際のスランプとスランプフローの測定、崩れ方の確認を目視により行った。

3. 結果及び考察

3.1 加振ボックス充てん試験結果

図-2 から図-5 に加振ボックス充てん試験の結果を示す。図-2 に各配合シリーズとボックス高さ 190mm 及び 300mm の到達時間の関係、図-3 に各配合シリーズのボックス高さ 300mm の到達時間と粗骨材変化率の関係、図-4 に総粉体量とボックス高さ 300mm の到達時間の関係、図-5 に総粉体量別のボックス高さ 300mm の到達時間と粗骨材変化率の関係を示す。

各配合シリーズで比較すると、各基準配合（配合名：N-1, FA 内-1, FA 固-1）に対して、基準配合より単位セメント量の少ない配合（配合名：N-2, FA 内-2, FA 固-2）は約 2 倍程度の到達時間になり、基準配合より単位セメント量の多い配合（配合名：N-3, FA 内-3, FA 固-3）の到達時間は短くなった。単位セメント量の多い高強度コンクリートの配合に関しては、ボックス高さ 190mm 及び 300mm の到達時間が全ての配合条件でほぼ同一であった。これらの傾向は、粗骨材変化率でも確認でき、各配合シリーズの単位セメント量の増加とともに、粗骨材変化率は小さくなっており、材料分離を起こしにくくなっている。また、高強度コンクリートの配合に関しては、同

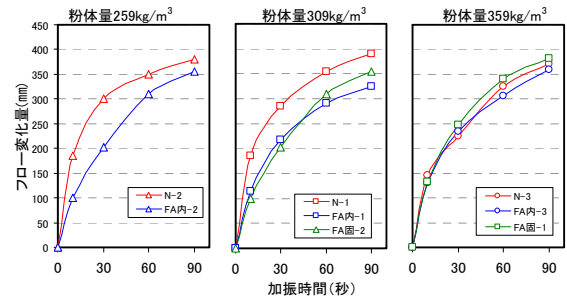


図-7 加振変形試験結果 その2

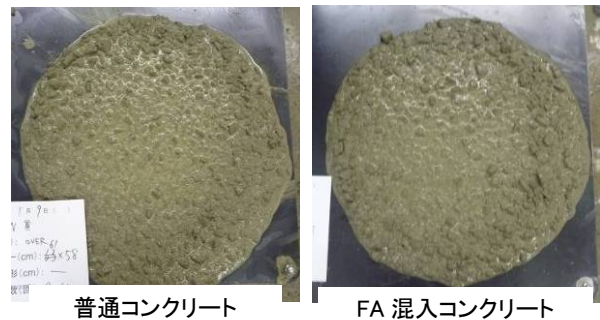


写真-2 加振 90 秒後のフロー状況

到達時間と同様に全て粗骨材変化率も低く、ほとんど同程度であった。これは、図-1 の「材料分離抵抗性、振動締固め性に関する単位セメント量の照査図」から、加振ボックス充てん試験はスランプ 8.0cm の振動締固め性を確保するために必要となる単位セメント量の下限値を超えた場合や基準配合に対して単位セメント量の少ない配合を明確に示しており、振動締固め性を確保するために必要となる単位セメント量の上限値を超えた場合や基準配合に対して単位セメント量の多い配合に対する評価には適していない。

粉体量別で比較した場合、どの粉体量でも普通コンクリートと比較した場合、FA を内割り置換した結果は、ボックス高さ 300mm の到達時間が普通コンクリートの 1/2 程度短くなっており、また、粗骨材変化率も 5~20% 程度小さくなっていることから FA を内割り置換したことによる間隙通過性と材料分離抵抗性の改善を確認することが出来た。単位 FA 量を固定の配合に関しては、同

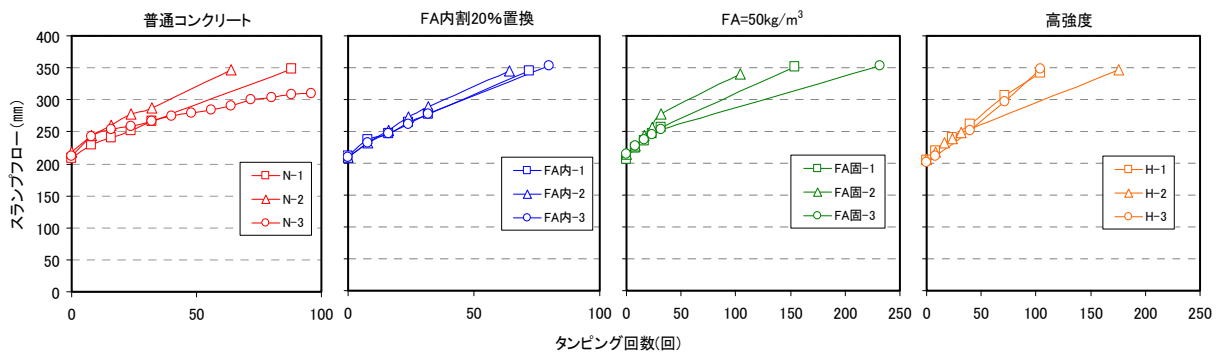


図-8 タンピング試験結果 その1

一の粉体量でFAを内割り置換した場合の結果と異なり、到達時間が長くなった。本実験の配合は間隙通過性を評価するため粗骨材を一定としたため、実際に製造可能なコンクリートの範囲であるが細骨材率が変動したことも影響していると考えられる。また、総粉体量ではなく同一の単位セメント量で比較した場合、300mmの到達時間は同程度であったが、粗骨材変化率が小さくなることを確認できた。これらについては、振動締固め性を確保するために必要となる単位セメント量の上限値を超えた場合や基準配合に対して単位セメント量の多い配合の評価とともに今後の検討課題とする。

以上から、加振ボックス充てん試験では、同一粉体量の普通コンクリートとFAを内割り置換したコンクリートを比較した場合、FAを内割り置換したコンクリートの間隙通過性が2倍程度速くなり、材料分離抵抗性も5~20%程度小さくなることを示した。

3.2 加振変形試験結果

図-6と図-7に加振変形試験の結果、写真-2に加振後の変形の状態を示す。図-6は各配合シリーズの加振時間とフロー変化量の関係、図-7に総粉体量別の加振時間とフロー変化量の関係を示す。

各配合シリーズで比較すると、加振ボックス充てん試験の結果と異なり、各配合シリーズの配合条件(単位セメント量)によるフロー変化量の違いは見られなかった。フロー変化量は加振時間30秒までに大きな変形を示し、それ以降は緩やかな変形を示した。また、高強度コンクリートの配合シリーズに関しては、加振時間30秒以降の変化量がほとんど見られなかった。高強度コンクリートの配合シリーズは粉体量が最も多く、粘性が大きいことに加え、初期の振動でコンクリート内部が緻密になり、粘性が増したためと考えられる。

粉体量別で比較した場合、粉体量 359kg/m^3 では普通コンクリートとFA混入コンクリートのフロー変化量は同等であるのに対して、粉体量 309kg/m^3 と 259kg/m^3 の場合、加振時間10秒でFA混入コンクリートのフロー変化量は普通コンクリートの1/2程度であることを示した。

これらについて、目視確認より加振時間初期から終了までFA混入コンクリートは粘性を保った状態で一体となってフローが広がるのに対して、普通コンクリートは加振時間初期でフローの外からペーストのみの広がりが大きくなったと考えられる。

以上より、加振変形試験では、同一粉体量の普通コンクリートとFA混入コンクリートを比較した場合、FA混入コンクリートのフロー変化量が加振初期で1/2程度小さくなることを示した。ただし、粉体量が多くなった場合は、その違いを示すことが出来ない。

3.3 タンピング試験結果

図-8と図-9にタンピング試験の結果、写真-3にタンピング試験による形状の変化を示す。図-8は各配合シリーズのタンピング回数とスランプフローの関係、図-9に粉体量とタンピング1回当たりのフロー変化量の関係を示す。

各配合シリーズで比較すると、各基準配合(配合名:N-1, FA内-1, FA固-1)に対して、単位セメント量の少ない配合(配合名:N-2, FA内-2, FA固-2)はスランプフロー350mmの到達タンピング回数が少なく、単位セメント量の多い配合(配合名:N-3, FA内-3, FA固-3)はスランプフロー350mmの到達タンピング回数が増える傾向となった。これは粉体量の増加とともに粘性が増し、フローが広がりにくくなったのに対して、単位セメント量の少ない配合は粘性が低く、分離した状態でペーストのみが大きく広がったためと考えられる。

粉体量別でタンピング1回当たりのフロー変化量を比較した場合、粉体量の増加とともにタンピング1回当たりのフロー変化量は小さくなり、図-8の結果とも相関性を示した。また、各粉体量でFAを内割り置換で混入したコンクリートの方が普通コンクリートよりフロー変化量が大きくなっており、特に粉体量が多い場合にタンピング1回当たりのフロー変化量が2倍程度になることを示した。

また、写真-3は、粉体量 417kg/m^3 の高強度コンクリートと粉体量 309kg/m^3 のその他のコンクリートのスラ

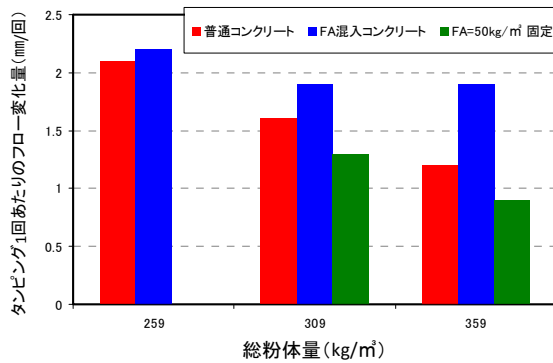


図-9 タンピング試験結果 その2

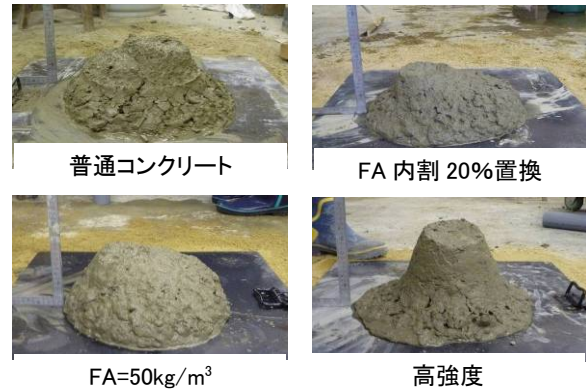


写真-3 スランプフロー350 mmの形状

ンプフロー350mmの到達時の状態を示す。普通コンクリートと高強度コンクリートはスランプ下部にひび割れが生じているのに対して、FAを混入したコンクリートにはスランプ下部にひび割れの発生がなく、タンピング試験の変形状態にもフロー変化量の違いが表れている。

以上から、タンピング試験では、同一粉体量の普通コンクリートとFAを内割り置換したコンクリートを比較した場合、FAを内割り置換したコンクリートのタンピング1回当たりのフロー変化量が大きくなり、特に粉体量が多い場合に2倍程度大きくなることを示した。

5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 加振ボックス充てん試験では、同一粉体量の普通コンクリートとFAを内割り置換したコンクリートを比較した場合、FAを内割り置換したコンクリートの間隙通過性が2倍程度速くなり、材料分離抵抗性も5~20%程度小さくなる。
- (2) 加振変形試験では、同一粉体量の普通コンクリートとFA混入コンクリートを比較した場合、FA混入コンクリートのフロー変化量が加振初期で1/2程度小さくなる。ただし、粉体量が多い場合の評価は、困難である。
- (3) タンピング試験では、同一粉体量の普通コンクリートとFAを内割り置換したコンクリートを比較し

た場合、FAを内割り置換したコンクリートのタンピング1回当たりのフロー変化量が大きくなり、特に粉体量が多い場合に2倍程度大きくなる。

謝辞：本研究の一部は、社団法人九州建設技術管理協会研究助成にて実施されたものである。ここに付記し、深く感謝の意を示す。

参考文献

- 1) 土木学会編：コンクリートライブラリー132, 循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術, 2009.12
- 2) 土木学会編：コンクリート技術シリーズ No.54, フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価に関する技術の現状と課題 (II), 2003.7
- 3) 浦野真次, 栗田守朗, 江渡正満：高密度配筋部におけるコンクリートの充てん性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.31-36, 2008
- 4) 石井佑大, 宇治公隆, 上野敦：タンピング試験におけるワーカビリティの簡易評価方法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.37-42, 2008
- 5) 土木学会編：コンクリートライブラリー126, 施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針 (案), 2007.3