

論文 各種配合条件における中流動コンクリートのフレッシュ性状に関する検討

黒木 賢一*1・橋本 紳一郎*2・伊達 重之*3・橋本 親典*4

要旨: 本研究では、明確な基準が存在せず、スランプフローのみでしか管理されていない中流動コンクリートを対象として、本研究で設定した各種配合条件における中流動コンクリートのフレッシュ性状の違いを明らかにするため、振動条件下のブリーディング試験、変形性評価試験、加振ボックス充てん試験を実施した。その結果、加振変形試験の結果が要求性能を満たすかどうかと、ブリーディング試験および変形性評価試験の結果にはそれぞれ相関性が見られた。また、要求性能に対する評価パターンを加振ボックス充てん試験の充てん速度および総粗骨材変化率の結果で示すことができた。

キーワード: スランプ, スランプフロー, 加振変形, ブリーディング, 平均ポンプ油圧, 変動係数

1. はじめに

近年、建設工事における施工の省力化、高品質化および建設コストの削減を目的として、軽微な振動締固めにより充てん可能なスランプフロー35~50cm程度の中流動コンクリートが提案されている。中流動コンクリートをトンネル覆工コンクリートとして使用する場合には、トンネル施工管理要領において様々な試験による要求性能¹⁾が示されているが、トンネル覆工コンクリートを除く他の構造物に使用する場合には、スランプフローの他に要求性能が存在せず、前述したスランプフローの範囲内において中流動コンクリートの管理を行うこととなる。しかしながら、同程度のスランプフローであっても、構成材料や配合の違いによって施工性能が異なることが、近年の研究により明らかとなっている²⁾。また、環境問題や資源の有効利用の観点からもコンクリート用混和材が注目されているが、中流動コンクリートに混和材を混入した際のフレッシュ性状については現段階で十分に研究されていない。

コンクリートのフレッシュ性状を把握するための試験方法は多々存在するが、中流動覆工コンクリートは、トンネル施工管理要領において加振変形試験やU型充てん試験が要求性能の試験項目とされている。しかし、加振変形試験は試験機の汎用性を考慮すると、各地で試験を実施することは難しく、U型充てん試験は、フレッシュコンクリートの充てん性能のみを測定する試験である。そのため、中流動コンクリートの振動性状やポンプ圧送性といった実施工において重要とされるフレッシュ性状を現段階で容易に測定可能な試験方法は存在しない。

本研究では、要求性能のような明確な基準が存在せず、

スランプフローのみでしか管理されていないトンネル覆工コンクリート以外の他の構造物に対して使用される中流動コンクリートを対象として、同程度のスランプフローの範囲であっても配合や混和材混入の有無が異なることによるフレッシュ性状の違いを明らかにするため、振動条件下でのブリーディング試験、変形性評価試験、加振ボックス充てん試験より検討を行った。さらに、要求性能に示されている試験項目の結果と各種試験結果の関係性について把握することにより、スランプフローのみで管理される中流動コンクリートにおいて確認すべきフレッシュ性状について検討を行った。

2. 試験概要

2.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント(記号:C, 密度:3.15g/cm³), 細骨材は玄界灘産海砂(記号:S, 表乾密度:2.58g/cm³, F.M.:2.60), 粗骨材は山口県下関市産砕石(記号:G, 最大寸法:20mm, 表乾密度:2.66g/cm³, F.M.:6.60)である。混和材はフライアッシュ II 種(記号:FA, 密度:2.25g/cm³, 比表面積:3, 990cm²/g, 強熱減量:2.7%), 混和剤はリグニンスルホン酸系とポリカルボン酸エーテル系の複合体である AE 減水剤(記号:Ad-1), ポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤(記号:Ad-2)を使用した。

2.2 配合条件および配合一覧

中流動覆工コンクリートの要求性能¹⁾を表-1, タンピング試験, 加振変形試験-2, ブリーディング試験, 変形性評価試験に用いたコンクリートの配合を表-2, 加振ボックス充てん試験に用いたコンクリートの配合を表-3, 配合条件の種類を表-4, に示す。加振ボックス充てん試

*1 福岡大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (学生会員)

*2 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 助教 博(工) (正会員)

*3 日本シーカ株式会社 技術研究所長 博(工) (正会員)

*4 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)

表-1 中流動覆エコンクリートの要求性能

圧縮強度 (N/mm ²)	粗骨材最大寸法 (mm)	スランプおよびスランプフロー (cm)	空気量 (%)	U型充填高さ (流動障害なし) (mm)	加振変形量 (cm)
18	20 および 25	スランプ 21±2.5 スランプフロー 35~50	4.5±1.5	280以上	10秒加振後の スランプフロー の広がり 10±3

験においては、間隙通過性を評価するため FA 混入、無混入に関わらず単位粗骨材量を一定とした。本研究ではすべての配合において、スランプフローは、要求性能である 35~50cm の範囲を満足するものとした。目標スランプフローの範囲については、トンネル施工管理要領に示されている要求性能の下限値と上限値を参考とし、また、振動性状に与える単位水量の影響を検討するため、単位水量を 175kg/m³ および 140kg/m³ の 2 水準とした。配合名は、“単位水量・混和材の有無・細骨材率・(単位混和材量)・水セメント比”を表し、“N は混和材無混入、F は混和材(FA)混入”とする。

2.3 試験方法

2.3.1 品質確認試験

品質確認試験として、スランプ試験を JIS A 1101, スランプフロー試験を JIS A 1150, 空気量試験を JIS A 1128, U 型充てん試験と加振変形試験-1(10 秒加振後のスラン

プフロー変形量測定)を NEXCO 試験方法 733-2008 に準拠して行った。

2.3.2 タンピング試験

タンピング試験は、既往の研究³⁾を参考とした。スランプ試験を実施後、質量 1.2kg の木製棒を 50cm の高さからスランプ板の四隅に順次落下させ、スランプフロー 60cm に達した時点のタンピング回数を計測した。

2.3.3 加振変形試験-2

加振変形試験-2 は、規定の試験である加振変形試験-1 以上に加振を続けることにより、その後のフロー変化量と配合の違いについて検討するため実施した。試験方法としては、加振変形試験-1 の後、スランプフロー 60cm に達するまでの振動時間を計測した。

2.3.4 ブリーディング試験

JIS A 1123 に規定されているブリーディング試験の方法は、静置による試験であることから実施工を模擬したことにはならないため、ASTM C 232 を参考に、振動を与えた際のブリーディングの挙動についても検討を行った。まず、練混ぜ後の試料を三層に分けて容器のふちから 30±3mm 低い位置まで詰めた。試料を容器に詰める際には、各層突き棒で 5 回突く方法、5 秒間または 20 秒間テーブルバイブレータによって振動を与える方法の計 3

表-2 コンクリート配合一覧 その 1

配合名	W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)					Ad-1	Ad-2	スランプフロー	U型充填高さ	加振変形量	種類		
	(%)	(%)	W	C	FA	S	G	(C×%)	(C×%)	cm	cm	cm			
175-N50-58	58	50	175	300	-	883	911	1.75	-	45.5	29.5	13.0	TYPE - 1		
175-F50(80)-58					80	837	963	2.20	-	43.5	29.5	12.5	TYPE - 1		
175-F50(120)-58					120	815	840	2.20	-	43.0	23.5	12.5	TYPE - 1		
175-N48-58					48	-	848	947	1.75	-	45.5	33.0	11.0	TYPE - 1	
175-F48(80)-58						80	804	898	2.20	-	43.0	31.5	13.0	TYPE - 1	
175-F48(120)-58						120	782	873	2.20	-	44.0	32.0	13.0	TYPE - 1	
175-N46-58		46		-		813	984	2.30	-	45.5	31.5	12.0	TYPE - 1		
175-F46(80)-58				80		770	932	2.25	-	45.0	33.0	12.5	TYPE - 1		
175-F46(120)-58				120		749	907	2.60	-	44.5	30.3	10.0	TYPE - 1		
175-N50-50				50	50	350	-	863	890	2.70	-	45.0	32.5	16.0	TYPE - 3
175-F50(80)-50							80	817	842	3.00	-	43.0	32.5	15.0	TYPE - 3
155-N48-52				52	48	155	300	-	874	976	5.00	-	36.0	29.5	18.0
155-F48(80)-52	80	830	927					4.50	3.00	40.0	33.0	14.0	TYPE - 3		
140-N50-58	58	50	140	240	-	953	983	-	3.80	37.0	29.5	14.0	TYPE - 3		
140-F50(80)-58					80	907	935	-	2.30	35.0	30.5	19.0	TYPE - 3		
140-N46-58		46			-	877	1061	-	5.00	35.5	20.5	19.5	TYPE - 4		
140-F46(80)-58					80	835	1010	-	1.80	46.5	28.0	8.5	TYPE - 1		
140-N50-47	47	50		300	-	928	957	-	5.00	44.5	30.0	16.5	TYPE - 3		
140-F50(80)-47					80	883	910	-	1.55	46.5	29.0	10.0	TYPE - 1		
140-N46-47		46			-	854	1034	-	2.00	48.0	32.0	10.5	TYPE - 1		
140-F46(80)-47					80	812	983	-	1.50	36.0	21.0	9.0	TYPE - 2		

表-3 コンクリート配合一覧 その 2

配合名	W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)					Ad-1	Ad-2	スランプフロー	U型充填高さ	加振変形量	種類
	(%)	(%)	W	C	FA	S	G	(C×%)	(C×%)	cm	cm	cm	
175-N50-58	58	50	175	300	-	883	911	1.30	-	43.5	29.0	13.0	TYPE-1
175-F50(80)-58		47			80	792		1.70	-	45.5	34.0	12.5	TYPE-1
175-N50-50		50			-	863	890	1.75	-	45.0	29.5	16.0	TYPE-3
175-F50(80)-50		46			80	771		1.50	-	43.0	26.0	17.0	TYPE-4
140-N50-58	58	50	140	240	-	953	983	2.70	-	37.0	28.0	17.5	TYPE-3
140-F50(80)-58		47			80	861		3.00	-	46.0	23.0	9.0	TYPE-2
140-N50-47	47	50		300	-	928	957	-	4.00	43.5	31.0	16.5	TYPE-3
140-F50(80)-47		47			80	837		-	1.50	43.0	27.0	6.5	TYPE-4

※ Ad-1 : AE減水剤 Ad-2 : 高性能AE減水剤

水準の締め固め方法を用い試験を実施した。ブリーディング水の採取方法は JIS A 1123 に準拠し、すべての配合において 300 分まで同様の操作を繰り返した。

2.3.5 変形性評価試験

変形性評価試験は、フレッシュコンクリートの変形性試験(JSCE-F509-2000)に準拠して行った。テーパ管を有する小型変形性試験装置を使用して、仰角 9.9 度、ピストン速度 1.25cm/s で実施し、平均ポンプ油圧および油圧の変動係数(変動係数)を測定した。また、平均ポンプ油圧と変動係数の関係および目視観察によりコンクリートの圧送状態の確認を行い、順調、不安定、閉塞の3段階の評価を行った。ピストンと管壁との摩擦およびコンクリートの自重による影響を排除するため、管先端にテーパ管を取り付けた場合の油圧(P1)と直管のみの場合の油圧(P2)を差し引いてテーパ管部の油圧(P1-P2)とした。

2.3.6 加振ボックス充てん試験

加振ボックス充てん試験方法は、ボックスを水平となるよう設置し、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 室分けて詰める。A 室上面をならし、振動機をコンクリート局面底部から 10cm 上まで挿入する。仕切りゲートを引き上げた際、B 室側に流出したコンクリートのボックス高さを測定後、内部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 室隅角部の試料高さが 190mm と 300mm に達した時間を測定し、ボックス高さ 190mm から 300mm までの充てん速度を算出した。試験終了後、A 室下部、B 室上部の試料を採取し、JIS A 1112 に従い洗い分析試験を実施し、A 室と B 室の粗骨材変化率を算出した。その後、A 室の粗骨材変化率-B 室の粗骨材変化率より総粗骨材変化率を算出し、こちらの結果より試験の評価を行った。既往の研究³⁾では、仕切りゲート部に設置する流動障害について様々な検討がされているが、本研究では、予備実験の結果を踏まえ、流動障害 R-I(D13-5)のみで検討を行った。振動機の振動数につい

ては、多少の充てん性を有する中流動コンクリートであることから、既往の研究³⁾の振動条件では評価できない可能性を考慮し、通常の振動数(振動数: 200~258Hz)、変圧器を用いて振動数を 1/2(振動数: 100~129Hz)とした際の 2 水準とした。

3. 試験結果および考察

3.1 品質確認試験結果

各配合のスランブフロー、U 型充てん高さ、加振変形量の実測値を表-2、表-3 に示す。また、要求性能に示されている試験項目から配合条件を 4 つに分類し、品質確認試験の結果を基に、表-4 の TYPE - 1 から TYPE - 4 までの配合条件を各配合に当てはめた。

表-4 配合条件の種類

種類	内容
TYPE - 1	スランブフロー、U型充てん高さ、加振変形量が要求性能を満たす配合
TYPE - 2	スランブフロー、加振変形量が要求性能を満たす配合
TYPE - 3	スランブフロー、U型充てん高さが要求性能を満たす配合
TYPE - 4	スランブフローのみ要求性能を満たす配合

3.2 タンピング試験結果

タンピング試験の結果を図-1 に示す。図中のフロー増加量は、タンピング 1 回当たりのフローの伸び量(単位:mm/回)を表している。図-1 より、 $W=175\text{kg/m}^3$ 、細骨材率 46%の配合において FA 混入によるフロー増加量は、FA 無混入と比較して同等もしくは向上する傾向が見られているが、細骨材率 48%および 50%では、FA 混入、無混入によるフロー増加量の結果が異なる傾向を示した。細骨材率 50%の配合については、もとの粘性が高いために FA 混入によるフローの増加量は小さくなったが、細骨材率が 48%より小さい配合については、FA 混入量と細骨材率の適切な組み合わせが異なると考えられる。これは、細骨材率が大きい配合 $W=140\text{kg/m}^3$ の配合においても同様の傾向となった。 $W=155\text{kg/m}^3$ の配合は、FA 混入によ

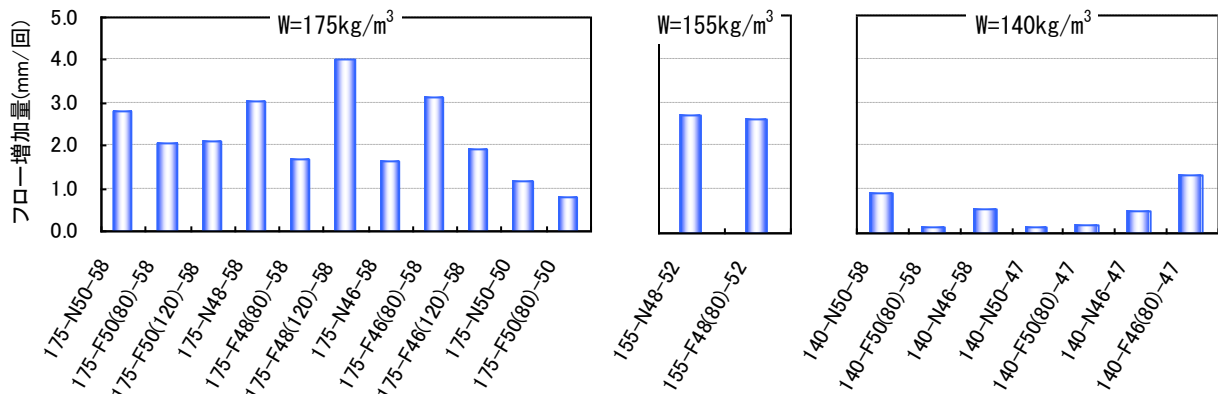


図-1 タンピング試験結果

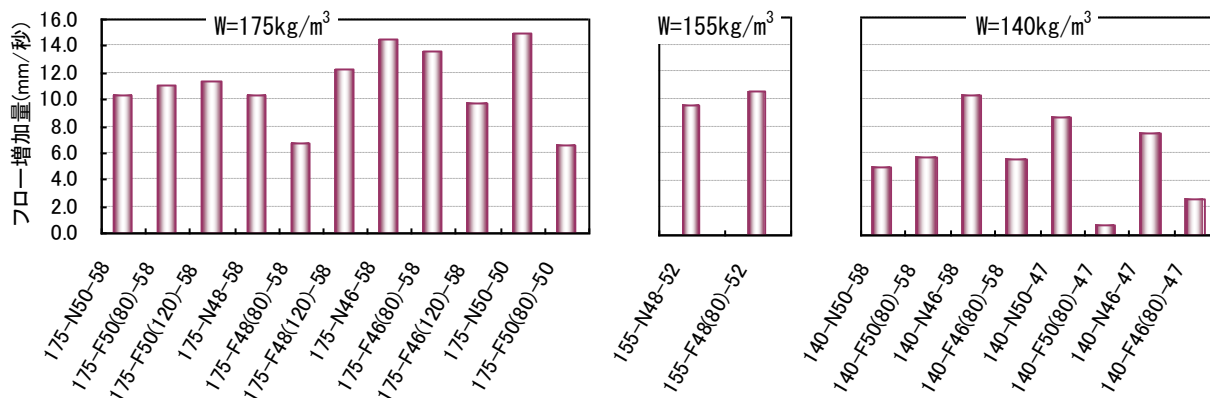


図-2 加振変形試験-2 結果

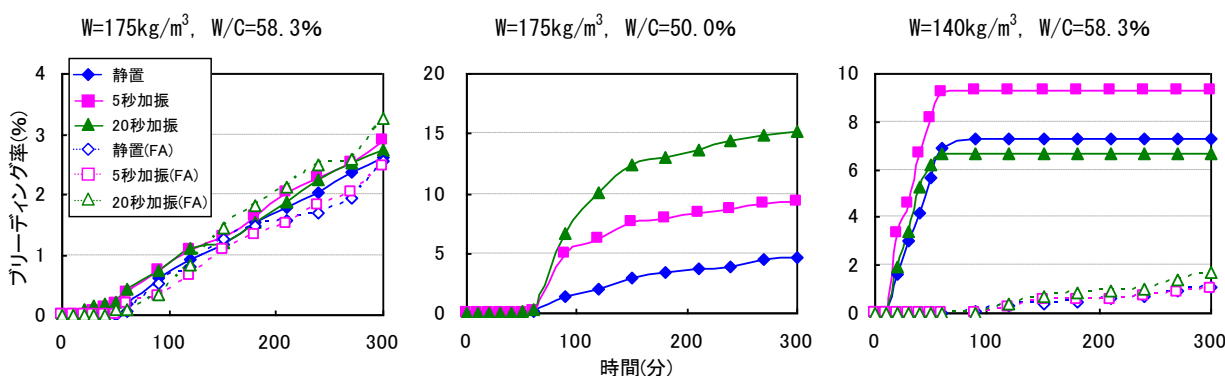


図-3 ブリーディング試験結果 その1

りフロー増加量の低下が見られた。これは、単位水量、細骨材率、水セメント比といった配合の違いによりそれぞれ異なるフロー増加量の結果を示したと考えられる。以上より、FA 混入量が流動性に与える影響は、細骨材率や単位水量の違いによって大きく異なる。また、 $W=140\text{kg/m}^3$ の配合は、試験終了後のスランブフローが60cm に到達しなかった。 $W=175\text{kg/m}^3$ および 155kg/m^3 の配合と比べて、練混ぜ後30分以内のスランブフロー低下量が大きかったことが影響していると考えられる。

3.3 加振変形試験-2 結果

加振変形試験-2の結果を図-2に示す。図中のフロー増加量は、振動時間1秒当たりのフローの伸び量(単位:mm/秒)を表している。図-2より、加振変形試験-2においてもFA混入がフロー増加量に与える影響は、単位水量や細骨材率の違いによって異なる結果となった。加振変形試験-2においては試験時間が短いため、ほとんどの配合において試験後のスランブフローが60cmに到達した。試験方法としては非常に簡便であるが、試験機の汎用性、スランブ試験後の形状が試験結果に影響を与えるなど、今後も検討が必要である。

3.4 ブリーディング試験結果

ブリーディング試験の結果を図-3、図-4に示す。図-3に、 $W=175\text{kg/m}^3$ および 140kg/m^3 の配合のブリーディン

グ率、図-4に、要求性能に対する評価と試験結果の関係を示す。

図-3より、 $W=175\text{kg/m}^3$ 、 $W/C=58\%$ の配合では、振動条件の違いおよびFA混入の有無によるブリーディング率の差は小さいことが分かるが、 $W=175\text{kg/m}^3$ 、 $W/C=50\%$ の配合では、振動条件の違いによるブリーディング率の結果に約5%ずつの差が見られた。以上より、同一の単位水量であっても、水セメント比が小さくなることにより振動条件の違いによるブリーディング率の差がより明確となった。 $W=140\text{kg/m}^3$ 、 $W/C=58\%$ の配合では、FA混入により大きなブリーディングの抑制効果が確認された。これは、単位セメント量が 240kg/m^3 と比較的少ないことにより、FA無混入の配合では高いブリーディング率を示したと考えられる。さらにFAを混入することにより、振動条件間の差が小さくなるという結果も得られた。また、各層20秒間加振を行った場合に初期ブリーディング率が最も大きくなる傾向にある。これは、振動を与えることで内部構造がより緻密になり、自由水が早い段階で上昇することにより、20秒加振の条件で初期ブリーディング率が最も高くなったと考えられる。終局ブリーディング率については、配合の違いによって最大となる振動条件が異なる結果となった。これらの結果より、ブリーディングの発生挙動の違いや振動時間の長さにブリーデ

イング率比例しないこと、配合によってブリーディングの発生が収束するタイミングが異なることが示された。しかし、振動付与の条件も含めて現段階では検討数が少ないため、より詳細なブリーディング性状については今後も検討が必要である。

図-4より、TYPE-1、TYPE-2は、比較的ブリーディング率は小さいが、TYPE-3、TYPE-4についてはブリーディング率が大きくなるという結果が得られた。これは、加振変形量が多いことにより材料分離を生じた配合である可能性があり、終局ブリーディング率が高くなったと考えられる。以上より、加振変形量が要求性能を満たすかどうかと終局ブリーディング率の結果に相関性が見られた。

3.5 変形性評価試験結果

変形性評価試験の結果を図-5 から図-8 に示す。図-5に、順調圧送状態と判定した中流動コンクリートの平均ポンプ油圧と変動係数の関係、図-6に、中流動コンクリートの順調圧送状態領域の検討、図-7に、要求性能に対する評価と試験結果の関係、図-8に、平均ポンプ油圧および変動係数と加振変形量の関係を示す。

図-5より、FAを混入することにより平均ポンプ油圧は小さく、変動係数は大きくなる傾向を示した。図-6中の赤枠は、既往の研究⁴⁾によって示されているスランブ5.5cm~22.5cmのコンクリートの順調圧送領域であり、その範囲は平均ポンプ油圧が0.20MPa、変動係数が15%である。順調圧送状態と判定した中流動コンクリートは、既往の研究によって示されている順調圧送状態領域と比較して平均ポンプ油圧は小さく、変動係数は大きい値となった。このように平均ポンプ油圧が小さい場合には、計測時の平均ポンプ油圧の少しの変動が大きく影響して変動係数が大きくなるが、図より、順調圧送状態と判定した配合間の差は小さいと考えられる。

図-6より、中流動コンクリートの順調圧送状態領域(図-6中の青枠)は、順調圧送状態と不安定圧送状態あるいは閉塞状態の平均ポンプ油圧および変動係数、目視観察により比較したところ、平均ポンプ油圧0.15MPa程度、変動係数30%程度の範囲であれば順調に圧送可能であると考えられる。

図-7より、TYPE-1は、平均ポンプ油圧0.10MPa程度、変動係数30%程度に試験結果が集中しているが、ブリーディング試験と同様、特にTYPE-3、TYPE-4については、平均ポンプ油圧および変動係数ともに大きくなる傾向にある。

図-8より、すべての配合条件ではないが、試験結果の近似曲線から判断すると、加振変形量が要求性能を満たしている配合は、12cmのときに平均ポンプ油圧、変動係数ともに最も小さくなり、8cm程度でやや大きくなる。

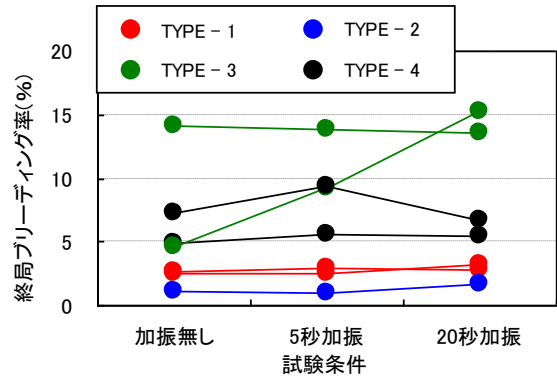


図-4 ブリーディング試験結果 その2

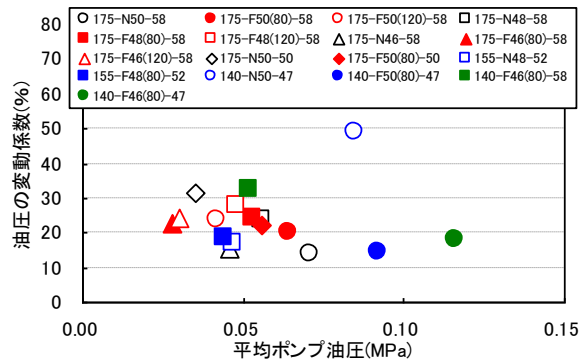


図-5 変形性評価試験結果 その1

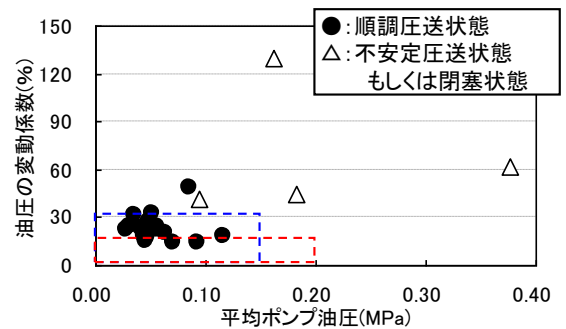


図-6 変形性評価試験結果 その2

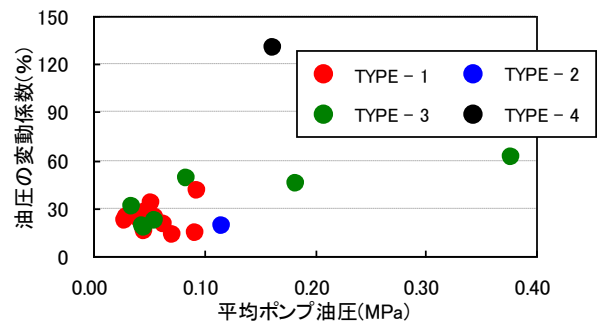


図-7 変形性評価試験結果 その3

これは、加振変形量が多い配合は粘性が小さいために材料分離の傾向にあり、加振変形量が少ない配合は粘性が高いため、平均ポンプ油圧および変動係数ともに大きくなると考えられ、加振変形量が12cmの配合はポンプ圧送しやすい、すなわち平均ポンプ油圧および変動係数

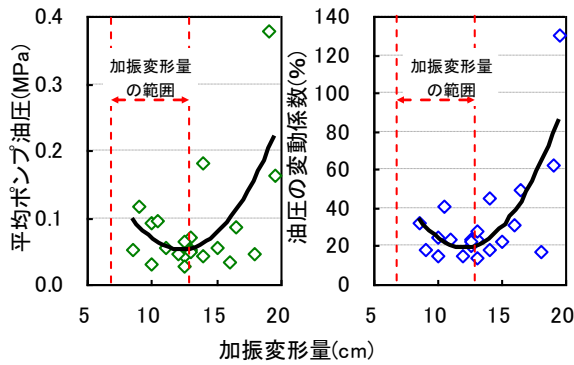


図-8 変形性評価試験結果 その4

が小さくなると考えられる。要求性能よりも加振変形量が大きくなることで平均ポンプ油圧、変動係数ともに高くなる。これは、粘性が小さく、コンクリートが変形しやすいことから、ポンプ管内における乱れが大きくなることに繋がり、変動係数が高くなったと考えられる。平均ポンプ油圧については、0.20MPa以下にほとんどの結果が集中しているため、加振変形量による影響は小さいと考えられる。以上より、加振変形量が要求性能を満たすかどうかと、変動係数の結果には相関性が見られる。

3.6 加振ボックス充てん試験結果

加振ボックス充てん試験の結果を図-9、図-10に示す。図-9に、充てん速度と総粗骨材変化率の関係、図-10に、要求性能に対する評価と試験結果の関係を示す。

図-9より、通常の振動数で加振ボックス充てん試験を行った場合、充てん速度および総粗骨材変化率において配合間の違いが確認できた。また、一部の配合において、FA混入による充てん速度の上昇および材料分離抵抗性の向上といった傾向を示すことができた。振動数1/2の場合には、材料分離抵抗性の差は見られているが、充てん速度において配合間の差が小さいことがわかる。本試験は、振動付与によってB室上部への充てんを行う特殊な試験方法であるため、振動数を小さくすることで配合間の違いを確認することは難しいことから、中流動コンクリートに対しては、振動条件を通常の振動数、流動障害をR-Iとすることにより適用可能であると考えられる。

図-10より、通常振動数の場合、TYPE-1は充てん速度も速く、総粗骨材変化率も小さくなるという結果が得られた。一方、TYPE-2、TYPE-3、TYPE-4については、充てん速度も遅く、総粗骨材変化率も大きくなった。以上より、要求性能に対する評価パターンを加振ボックス充てん試験の結果で示すことができた。振動数1/2の場合、TYPE-4のみ差は見られているが、その他の配合条件については結果に明確な差は見られていない。

4. まとめ

本研究の結論を以下に示す。

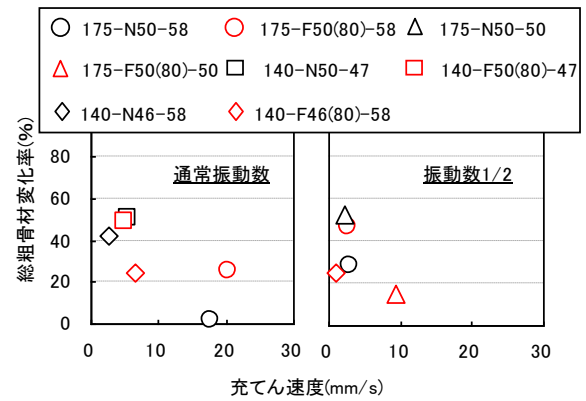


図-9 加振ボックス充てん試験結果 その1

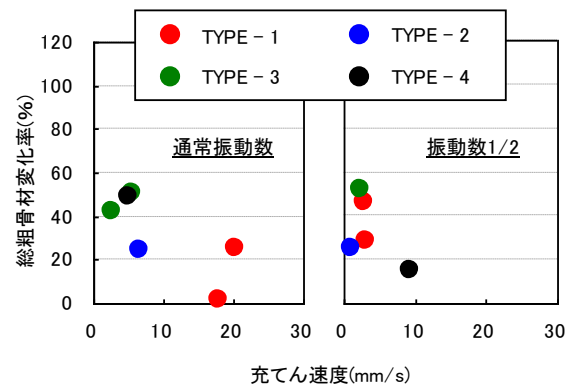


図-10 加振ボックス充てん試験結果 その2

- (1) 単位水量、細骨材率、水セメント比といった配合の条件の違いにより、異なるフロー増加量の傾向を示した。
- (2) 中流動コンクリートは、平均ポンプ油圧 0.15MPa程度、変動係数 30%程度の範囲であれば順調に圧送可能である。
- (3) 加振変形試験-1の結果が要求性能を満たすかどうかと、ブリーディング試験および変形性評価試験の結果にはそれぞれ相関性が見られた。
- (4) 要求性能に対する評価パターンを加振ボックス充てん試験の結果で示すことができた。

参考文献

- 1) 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社:トンネル施工管理要領 [平成22年7月]
- 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) 土木学会編:コンクリート技術シリーズ No.94,コンクリートの施工性能の照査・検査システム研究小委員会(341委員会)委員会報告書
- 4) 土木学会編:コンクリートポンプ施工指針 [平成12年制定]