

論文 簡易品質評価試験方法によるコンクリートの型枠内での充填性評価

山田 悠二*1・橋本 紳一郎*2・江本 幸雄*3・橋本 親典*4

要旨: フライアッシュ混入や単位セメント量、細骨材率を増減させた配合に対してタンピング試験、加振ボックス充填試験を実施した。その結果、各種配合条件における材料分離抵抗性や振動締固め性を定量的に評価することができた。またタンピング試験および加振ボックス充填試験の適用性や妥当性を検討するため、実施工を想定した型枠による充填試験を実施した。その結果、加振ボックス充填試験において間隙通過速度が 5mm/s 以下となる配合では実施工においても振動締固め性が低いことや、鉄筋あきによる影響が大きい配合では加振ボックス充填試験の間隙通過速度と実施工の間隙通過速度に差異が生じることを明らかとした。

キーワード: スランプ、間隙通過性、材料分離抵抗性、タンピング試験、加振ボックス充填試験

1. はじめに

スランプ試験はコンクリートのコンシステンシーを評価する試験方法として広く普及している。また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により、照査するシステムが提案されている。これにより、コンクリートの製造から打込みまでの品質を管理し易い環境が整えられた。

しかし、近年では化学混和剤の発展やフライアッシュ(以降、FA と称す)に代表される副産物の有効利用による構成材料の多様化に伴い、異なる配合条件でも同一のスランプを有するコンクリートを製造することが可能となっている。既往の研究¹⁾では同一スランプでも構成材料や配合条件により加振時の挙動が異なることを明らかとしている。スランプは静的な条件下での自重による変形のみを評価しており、振動による広がりや鉄筋間の間隙通過性、密実に充填するための材料分離抵抗性が要求される振動締固め性を定量的に評価できない。これが要因となり、高架橋の取り合い部(柱部材と梁部材の接合部)のように過密な配筋条件での施工において、有効鋼材量・鉄筋あきに対する配合上の粉体量とスランプは適正であるが、充填不良が生じた事例もある。

一方で、土木学会の報告²⁾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、タンピング試験や加振ボックス充填試験(以降、ボックス試験と称す)は、特殊な試験装置を使用せず、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)}。

しかしながら、これらの試験自体の方法や実施工との関係性については検討段階である。

以上のことから本研究では、FA 混入や単位セメント量、細骨材率を増減させた配合でタンピング試験、ボックス試験を実施して試験方法の検討および各種配合条件での性状を確認した。また、実施工を想定した型枠による充填試験(以降、模擬型枠試験と称す)を実施し、実施工での適用性について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合条件

表-1に使用材料、図-1と表-2にそれぞれコンクリートの配合条件および配合を示す。配合シリーズI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8cmの配合を基準配合とした。この基準配合に対

表-1 使用材料

種類	配合シリーズ			
	I	II	III	IV
セメント C	普通ポルトランド 密度:3.15g/cm ³	早強ポルトランド 密度3.14g/cm ³	高炉B種 密度3.04g/cm ³	
フライアッシュ FA	-	JIS II種灰 密度2.25g/cm ³ 比表面積3960cm ² /g 強熱減量1.6%	JIS II種灰 密度2.28 比表面積4030cm ² /g 強熱減量1.6%	-
細骨材 S	海砂 密度2.58g/cm ³ 吸水率0.96% F.M2.60	海砂 密度2.59g/cm ³ 吸水率0.89% F.M2.60	海砂 密度2.60g/cm ³ 吸水率0.64% F.M2.60 砕砂 密度2.75g/cm ³ 吸水率0.89%	海砂 密度2.58g/cm ³ 吸水率0.64% F.M2.96 再生細骨材L 密度2.40g/cm ³ 吸水率0.89% F.M4.34
粗骨材 G	砕石 密度2.66g/cm ³ 吸水率1.11% F.M6.60	砕石 密度2.70g/cm ³ 吸水率0.63% F.M6.61	砕石 密度2.66g/cm ³ 吸水率0.63% F.M6.60	砕石 密度2.70g/cm ³ 吸水率0.48% F.M6.68
混和剤	AE剤 アルキルエーテル AE減水剤 リグニンスルホン酸	AE減水剤 リグニンスルホン酸	高性能AE減水剤 ポリカルボン酸 エーテル	高性能AE減水剤 ポリカルボン酸 エーテル

*1 福岡大学大学院 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 博(工) (正会員)

*3 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 工博 (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 工博 (正会員)

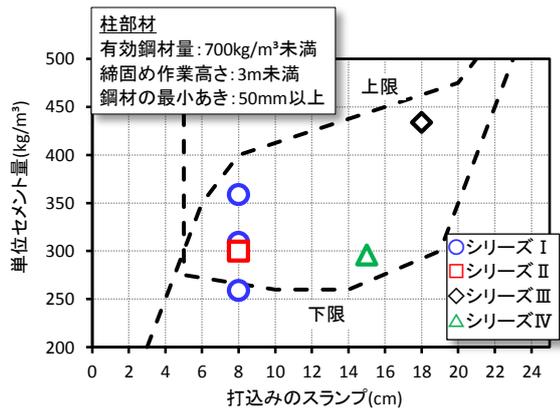


図-1 材料分離抵抗性, 振動締固め性照査図

し, 既往の報告⁵⁾を参考として「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」(図-1)から, スランプ 8cm 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上限值と下限値の目安を参考とし, 単位粗骨材量は一定のもと基準配合に対して単位セメント量を 50kg/m^3 増加させた配合と単位セメント量を 50kg/m^3 減少させた配合の 3 水準とした。配合シリーズ II では単位粗骨材量の違いによる影響を検討するため, 配合 No. II-1 を基準とし, 単位セメント量は一定のもと細骨材率を 5% ずつ増減させた 3 水準の配合と No. II-2 に対して性状の改善を目的とし, FA を 50kg/m^3 外割置換した配合を加えた計 4 水準とした。配合シリーズ III では図-1 の上限付近でまた, 実用性の高いものとするため, 福岡県内の二次製品工場で使用されているプレキャスト部材を対象とした配合 (No. III-1) と, これに FA を内割置換で 20% 混入した 2 水準とした。配合シリーズ IV では図-1 において, 打込みのスランプ 15cm において振動締固め性を確保する為に必要となる単位セメント量の下限值を参考にした配合 No. IV-1 と, これに対し, 再生細骨材を 50% 容積置換した配合 No. IV-2 の 2 水準とした。

2.2 試験方法

2.2.1 性状確認試験 (配合シリーズ I ~ IV)

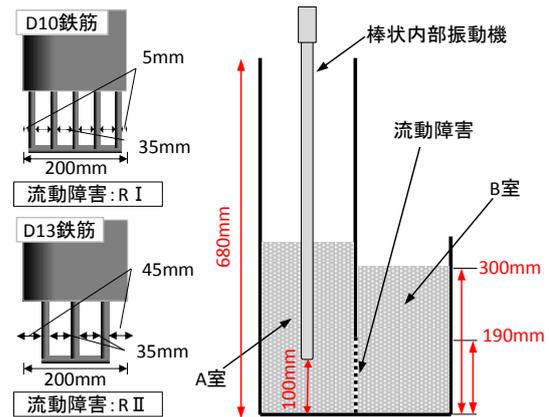


図-2 ボックス試験装置の概要

(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, コンクリート温度および外気温の測定も行った。各目標スランプ, 目標空気量を満たしていることを確認した後, ボックス試験と加振変形試験, タンピング試験, 模擬型枠試験を同時に実施した。スランプ, 空気量の目標値および実測値, コンクリート温度を表-2 に示す。

(2) ボックス試験

ボックス試験は, 高流動コンクリートの充填試験 (JSCF-F 511) のボックス容器 (以降, ボックスと称す) と棒状内部振動機 ($\phi: 28\text{mm}$, 振動数: 280Hz および 140Hz), 流動障害 (R I, R II) を用いて実施した (図-2)。本研究では, 配合条件の違いを評価するうえで最適な条件を検討するため, 配合シリーズ I で流動障害や振動数を変えて性状を確認し, 最適な条件のもと各種配合で試験を実施した。試験方法は既往の報告の試験方法 (試案)¹⁾ に準拠し, 以下の手順で実施した。まず, 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。仕切りゲートを閉じた状態で試料を A 室中央に 3 層に分けて詰める。A 室上面をならし, 棒状内部振動機を A 室に挿入する。仕切りゲ

表-2 コンクリートの配合

シリーズ	配合		W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)						混和剤 (B%)			スランプ (cm)		空気量 (%)		コンクリート温度 (°C)	
	種類	No.			W	C	FA	S			G	AE剤	AE減水剤	高性能AE減水剤	目標	実測	目標		実測
								海砂	砕砂	RS									
I	基準配合	I-1	55	45	309		798			1005	C×0.0041			8.0		4.0	18.7		
	基準配合-50	I-2	66	46	170	259	-	839	-	1005	C×0.0041			8.5		4.5	18.4		
	基準配合+50	I-3	47	43		359		756		1005	C×0.0041			8.0		4.0	17.5		
II	基準配合	II-1	52	45	158		818			1042				8±1	7.5	4.5±1.5	4.2	24.0	
	基準配合-5%	II-2	50	40	152	300	-	733	-	1148		C×0.8		8.5		4.2	26.0		
	基準配合+5%	II-3	54	50	164		901			1148				9.0		5.2	27.0		
	基準配合-5%+FA外割	II-4	43.4	40	152		50	683		1148		B×0.8		8.5		3.8	27.0		
III	基準配合	III-1	38	45	165	434	-	395	418	-	990			18±2		2.0±1.5	2.5	21.4	
	基準配合+FA内割20%	III-2				347	113	390	413	-	974		B×1.0			1.8	20.4		
IV	基準配合	IV-1	56	48	166	296	-	851	-	-	1004		C×1.0		15±2	17.0	4.5±1.5	6.0	12.8
	再生細骨材50%	IV-2						425	-	398				15.0		5.0	12.8		

ートを引き上げ、加振を開始する。加振開始から B 室隅角部の試料平均高さが 190mm と 300mm に到達するのを目視により確認し、その時の時間を計測して 190mm から 300mm の移動速度を算出し、これを間隙通過速度 V_{pass} (mm/s) とした。加振を終了した後、A 室下部、B 室上部の試料を約 2 リットル採取し、JIS A 1112 に従って洗い分析試験を実施して粗骨材量を測定した。A 室と B 室の粗骨材量変化率を算出し、A 室と B 室の粗骨材変化率の相対変化を総粗骨材量変化率とした。

(3) 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。細骨材を 1~2 cm 程度の厚さで敷き均し、その上にスランプレートを設置し、スランプレートを設置する。木製棒（質量 1.2 kg）を 50cm の高さからスランプレートの四隅に順次落下させる。このとき、木製棒を落下させる位置はスランプレートの中心から 30 cm とした。また、タンピング回数は 48 回とし、その際のスランプレートおよびスランプレートを測定、崩れ方の確認を目視により行った。結果についてはタンピング回数 32 回のときのフローとタンピング開始前のフローから単位スランプレート変形量 K_{sf} (mm/回) を算出した。

2.2.2 運搬時間に伴う性状変化の検討(配合シリーズIV)

コンクリートの製造後、アジテータ車により 90 分の攪拌を行った。計測時間は、アジテータ車到着時間を 0 分として経過時間 0 分、45 分、90 分とし、前項 2.2.1 に示す性状確認試験を行った。なお、コンクリートの製造場所から試験現場への移動時間は 1~2 分程度であるため、移動時間は影響しないものとする。コンクリートの配合はシリーズIVを使用した。

2.2.3 模擬型枠試験(配合シリーズ I, II)

模擬型枠試験は、配合シリーズ I および配合シリーズ II のコンクリートを使用して行った。また、配合シリーズ II については試験条件を変化させて実施し、配合条件と試験条件の関係について検討した。模擬型枠の形状を図-3 に示す。形状は高周波フレキシブル型パイププレート（以降、高周波パイププレートと称す）φ50 を用いた標準的な締固め間隔 50cm を想定した平面上の大きさとし、また、試験室のコンクリートミキサの容量を考慮した試料の量 60 リットルが締固め前に収まる高さとした。模擬型枠はかぶり近傍の鉄筋が配置されている箇所を想定しており、かぶり近傍の鉄筋は柱部材において打込みの最小スランプレートが 8cm となる配筋条件(表-3)とした。試験の手順は、投入口から 60 リットルの試料を打込み、高周波パイププレートを所定の位置に挿入して加振を 15 秒間行い、かぶり部の充填された試料高さを透明枠側にて 5 秒間隔で測定する。また、加振時間 15 秒で型枠充填高さ 200mm を超えなかった試料については、充填高さ 200mm

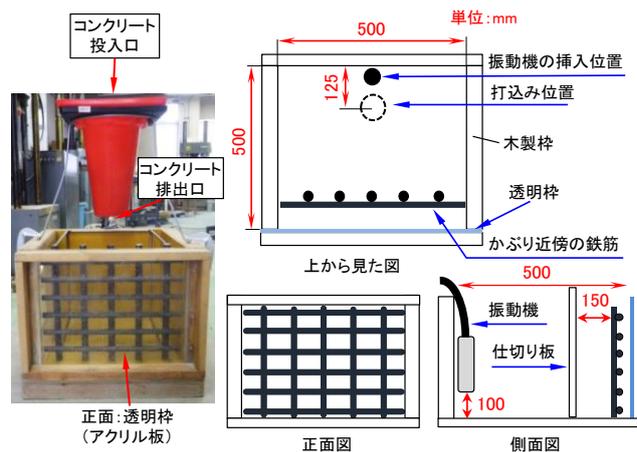


図-3 模擬型枠概要

表-3 配筋条件

主配筋の配置	D25, ctc100, 型枠までの距離75mm
帯鉄筋の配置	D19, ctc60
有効鋼材量	675kg/m ²
かぶり	53.5mm
最小あき	41mm

表-4 試験条件

試験条件	検討項目	振動方法	配筋の配置	打込み
A (基準)	-	高周波パイププレート (棒径50mm)	・主鉄筋 D25を5本 ・帯鉄筋 D19を6本 (表-3を参照)	仕切り版を挿入した後、試料を打込む
B (振動が小さい)	振動条件による影響	棒状内部振動機 (棒径28mm)		
C (鉄筋あきが狭い)	配筋条件による影響	高周波パイププレート (棒径50mm)	・主鉄筋 D25を7本 (ctc65) ・帯鉄筋 D19を6本 (ctc60)	仕切り版無しで試料を打込む
D (仕切り版無し)	打込み後の流動による影響		・主鉄筋 D25を5本 ・帯鉄筋 D19を6本 (表-3を参照)	

に到達するまで加振を行い、その時に要した時間を測定した。また、試験を行う際、振動条件、配筋条件、打込み時の自重による変形の影響を検討するため表-4 に示す試験条件 A~D の 4 水準で実施し、基準とした試験条件 A に対して、各種試験条件による影響を検討した。

3. 結果および考察

3.1 ボックス試験およびタンピング試験の結果

図-4 および図-5 にそれぞれ流動障害（振動数：280Hz）、振動数（流動障害：R II）ごとのボックス試験結果を示す。流動障害 R I, R II の双方において、単位セメント量が多くなるに従い、間隙通過速度は速くなり、総粗骨材量変化率は小さくなる傾向が見られた。また、流動障害 R II の間隙通過速度は、流動障害 R I の 3 倍か

ら4倍程度となる値を示しており、配合条件による違いがより明確となった。振動数を変化させた場合、振動数280Hzに比べ140Hzでは充填が厳しい条件となったため、配合間の違いが明確に表れなかった。このことから、振動数は280Hzのもと流動障害RⅡを使用して試験を行うことが配合条件の違いを評価するのに有効であると考えられる。以降、ボックス試験結果は振動数280Hz、流動障害RⅡとして行ったものを示す。

図-6に各種配合におけるボックス試験結果を示す。ボックス試験では、間隙通過速度が速くなるに従い、総粗骨材量変化率は低くなる傾向が見られた。配合条件で比較すると、照査図(図-1)において単位セメント量が下限付近もしくは下限値より低くなる配合(シリーズⅣ、Ⅰ-2)では間隙通過速度および材料分離抵抗性の低下が見られた。また、Ⅳ-1およびⅣ-2はスランブがそれぞれ17cm、15cmであり、他のスランブ8cm程度の配合に比べ流動性は高いものの、間隙通過速度は遅くなっており、スランブに依存しない結果となった。この傾向は照査図の上限付近に分布する配合シリーズⅢ(スランブ18cm程度)においても同様であり、相対的に見て間隙通過速度は速いが、スランブ8cm程度で良好な結果を示したものの(Ⅰ-3、Ⅱ-1、Ⅱ-3)と同程度の範囲であった。

FA混入による影響を見ると、Ⅱ-2と比べてⅡ-4では、間隙通過速度が2倍以上速くなる傾向が見られた。Ⅲ-1とⅢ-2においても同様にFAを混入したⅢ-2の方が間隙通過速度は速くなり、高粉体の配合においてもFA混入による改善が見られた。これに対し既往の研究⁶⁾では、粉体量が照査図の上限値を超える場合、FA混入による流動性の改善効果は小さいとしている。本研究で使用了配合シリーズⅢでは、細骨材に砕砂を使用しており、骨材粒子の形状や粗粒率が相対的に見て良好ではなく、改善効果が表れ易いことや、粉体量が上限値の範囲内であったことで改善されたと考えられる。

図-7に各種配合と単位スランブフロー変形量の関係を示す。ボックス試験で間隙通過速度が速く、総粗骨材量変化率は低い値を示したⅡ-3やⅢ-2では、タンピング試験においても単位スランブフロー変形量は大きくなった。一方、間隙通過速度が遅く、総粗骨材量変化率も高くなった配合シリーズⅣでも単位スランブフロー変形量は大きい値を示した。この要因として、前者はモルタル相の粘性により材料分離することなく広がるのに対し、後者は材料分離を伴いながら変形し、骨材が崩れたため広がりが大きくなったと考えられる。

3.2 運搬時間に伴う性状変化の検討

図-8にスランブおよび空気量の経時変化を示す。各配合とも経時に伴うスランブおよび空気量の変化は小さく、また各配合での変化量も同程度であった。

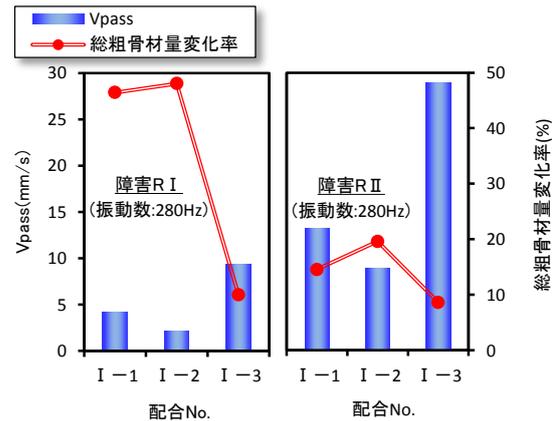


図-4 ボックス試験における流動障害の検討結果

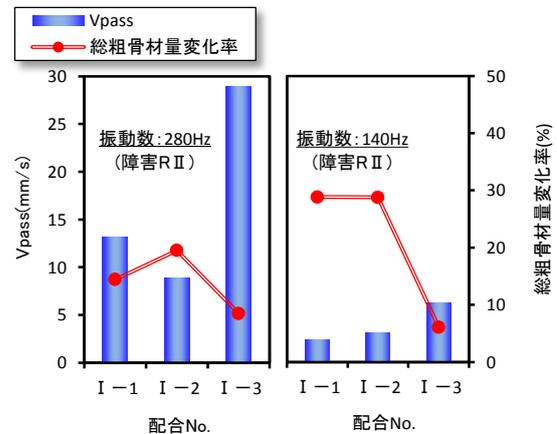


図-5 ボックス試験における振動数の検討結果

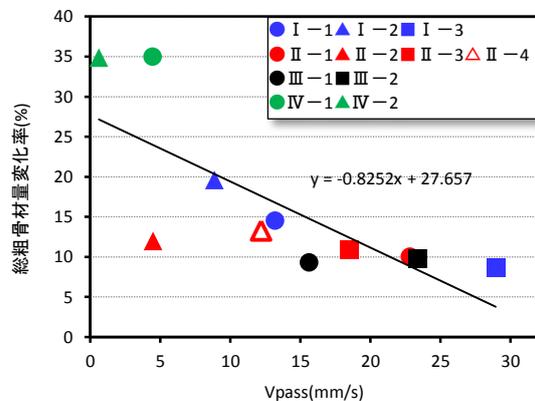


図-6 各種配合のボックス試験結果

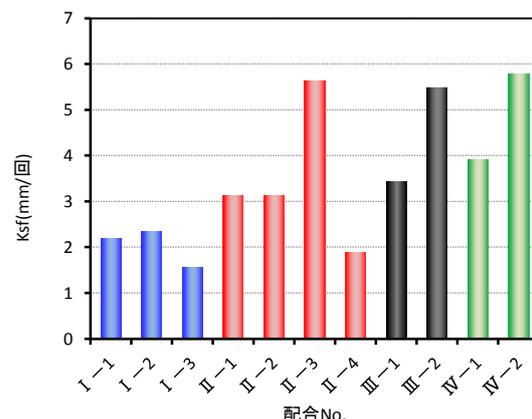


図-7 各種配合のタンピング試験結果

図-9 にスランプと単位スランプフロー変形量の関係、図-10 にスランプと間隙通過速度の関係を示す。IV-1 では経過時間 90 分でのスランプの変化は 2cm の範囲で、単位スランプフロー変形量および間隙通過速度の変化はそれぞれ 1mm/回および 1.5mm/s 程度であった。IV-2 ではスランプの変化は 2.5cm の範囲で、単位スランプフロー変形量は 0 分に対して 90 分では 1/2 程度になっており、変化が大きくなった。また、間隙通過速度においても 0 分に対して 90 分では 5 倍程度速くなった。IV-1 と IV-2 の配合上の違いとして、IV-2 では再生細骨材を置換している。これより、同程度のスランプで経時に伴うスランプ変化が同程度であっても、単位スランプフロー変形量および間隙通過速度の経時変化は、骨材種類によって異なり、また、これらの経時変化をタンピング試験およびボックス試験によって確認することができた。

3.3 実施工での適用性に関する検討

図-11 に試験条件 A における加振 10 秒と 15 秒後の型枠充填高さおよびボックス試験の間隙通過速度の関係、図-12 に型枠充填高さおよびボックス試験の総粗骨材量変化率との関係、図-13 に型枠充填高さおよび単位スランプフロー変形量との関係を示す。加振 10 秒後の結果では、単位セメント量や細骨材率が大きくなるに従い、型枠充填高さが高くなる傾向が見られた。さらに、型枠充填高さが高くなるにつれて間隙通過速度は速くなり、総粗骨材量変化率は低くなる傾向を示したことから、間隙通過性が向上していることが分かる。この傾向は単位スランプフロー変形量においても同様であり、型枠充填高さが高くなるに従い、単位スランプフロー変形量は大きくなる傾向が見られた。配合条件で見ると、細骨材率の小さい配合である II-2、II-4 では、加振を 15 秒行っても 200mm を超えることができなかった。特に II-2 では加振 15 秒後の型枠充填高さが 140mm 程度であり、他の配合と比べて間隙通過性が非常に低いものと考えられる。このとき、ボックス試験の間隙通過速度は 5mm/s 以下となっていることから、ボックス試験において間隙通過速度が 5mm/s 以下の場合、実施工における間隙通過性が十分でないと考えられる。

図-14 に各種試験条件における加振 15 秒後の型枠充填高さおよび間隙通過速度の関係を示す。型枠充填高さが 200mm を超える結果が多いほど間隙通過速度は速くなっており、各種試験条件におけるボックス試験の適用性が確認された。試験条件ごとに見ると、棒状内部振動機により振動締めを行った条件 B や鉄筋あきを小さくした条件 C において型枠充填高さが低くなる傾向が見られた。特に配合 II-3 は、条件 A、B、D では型枠充填高さ 200mm を超えているのに対し、条件 C での充填高さは 150mm 程度以下となった。既往の研究⁷⁾では、鉄筋あき

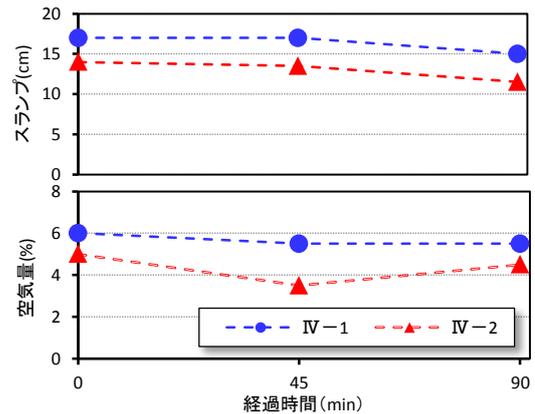


図-8 スランプ・空気量の経時変化

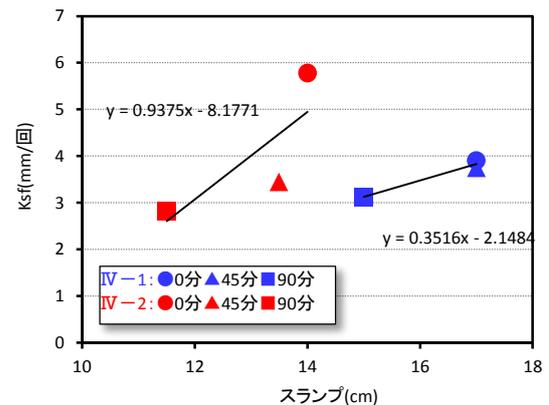


図-9 スランプと単位スランプフロー変形量の関係

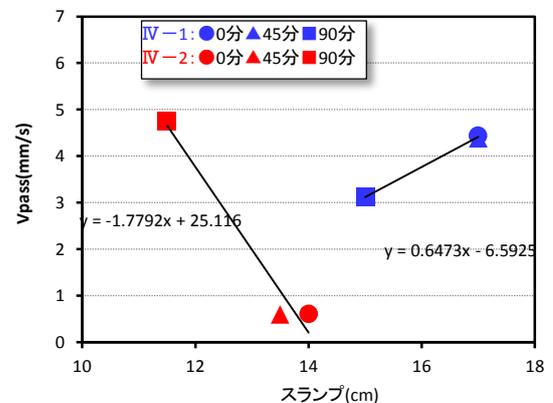


図-10 スランプと間隙通過速度の関係

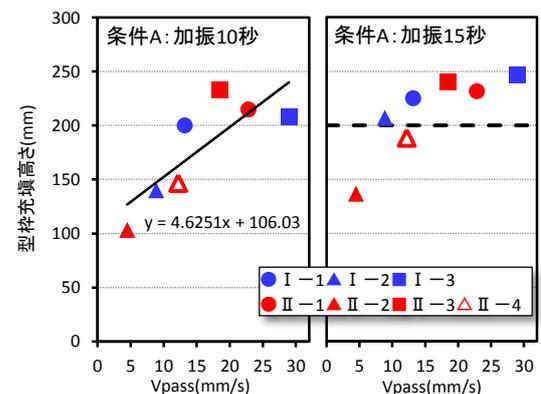


図-11 充填高さと同隙通過速度の関係

が、振動充填性に与える影響はモルタルの粘性によるものが大きいことを明らかとしている。これより、配合Ⅱ-3は細骨材率が高いため、モルタルの粘性が高く、鉄筋を通過する際にモルタルが鉄筋に付着して閉塞を起こしたと推測される。今回の実験ではボックス試験を行う際、流動障害 RⅡを使用したため、このような条件を再現出来ず、ボックス試験の間隙通過速度と条件 C での型枠充填高さに差異が生じた。また、Ⅱ-1 のように細骨材率が適正である配合では、振動締固めの際に下方向から上方向に向かってコンクリートがかぶり部へ密実に充填されているのに対し、細骨材率が低い配合では、上方向からコンクリートが被さるように充填される様子が確認された。配合条件 D ではすべての配合で充填高さ 200mm を超える結果となった。これは、打込み時の自重による流動がかぶり部にコンクリートが到達し、充填が容易となったためと考えられる。ボックス試験では、試料投入時の流動を仕切り板により拘束しているため、間隙通過性のみ評価される。このため、タンピング試験によってコンクリートの広がりも同時に確認することで、より正確に実施工での振動締固め性を把握できると考えられる。

4. まとめ

- (1) 振動数は 280Hz のもと流動障害 RⅡを使用してボックス試験を行うことが配合条件の違いを評価するうえで有効である。
- (2) タンピング試験の単位フロー変形量が大きい配合ではボックス試験の間隙通過速度も速くなる。
- (3) タンピング試験およびボックス試験により、骨材種類によって異なる振動による広がりや間隙通過性の経時変化を評価できる。
- (4) ボックス試験の間隙通過速度が 5mm/s 以下となる配合では、実施工において間隙通過性が十分でない。

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

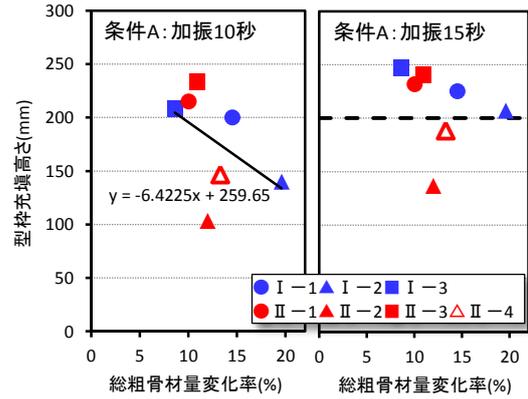


図-12 充填高さと総粗骨材量変化率の関係

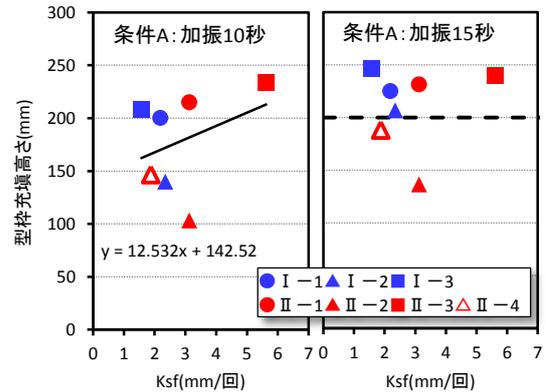


図-13 充填高さと単位スランプフロー変形量の関係

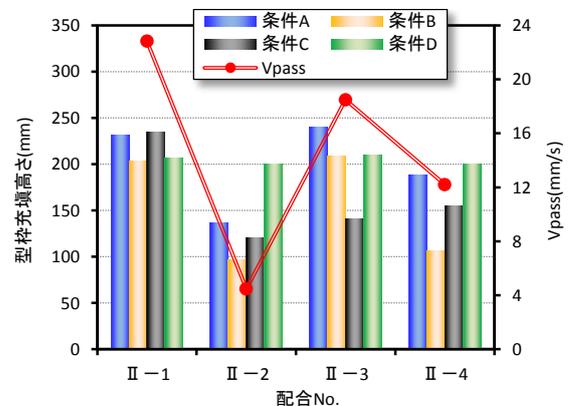


図-14 各種試験条件における充填高さと間隙通過速度の関係

- 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
- 6) 土木学会編：コンクリート技術シリーズ 102，コンクリートの施工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第二期委員会報告書，2013.11
- 7) 橋本 親典ほか：ボックス形充填装置の鉄筋障害が振動充填性に与える影響，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，pp.Ⅱ-17-22