

論文 加振併用型の高流動コンクリートの材料分離抵抗性の評価に関する一考察

桜井 邦昭*1・近松 竜一*2

要旨：自己充填性は有しないが、軽微な振動締固めにより密実に充填できる高流動コンクリートを対象として、材料分離抵抗性に及ぼす配合条件の影響を実験的に検討した。その結果、コンクリートのブリーディングを左右するモルタルの品質の評価にモルタル漏斗流下時間が適用できること、振動作用下で間隙を通過させた高流動コンクリートの均質性を確保するには、構造条件に応じて単位粗骨材絶対容積を設定する必要があるとともに、適切な振動時間の範囲で充填させる必要があること、などを明らかにした。

キーワード：中流動コンクリート, 単位ペースト容積, 単位粗骨材絶対容積, 材料分離抵抗性, 均質性

1. はじめに

土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕では、施工性能を確保する観点から、部材種類ごとに、構造および施工条件に応じて打込み時の最小スランプを設定している。また、スランプで流動性を評価するコンクリート（以下、通常のコンクリートと称する）で施工性能を確保できない場合には、「高流動コンクリートの適用を検討すること」と記述されている。

流動性と締固めに要する振動エネルギーから分類した場合の各種コンクリートの位置づけの概念を図-1に示す。図中に示す高流動コンクリートとは、土木学会コンクリートライブラリー126「高流動コンクリートの配合設計・施工指針」で対象とするような締固めが不要で自己充填性を有するコンクリート（以下、自己充填コンクリートと称する）である。一方、近年では、より合理的に施工を行う観点から、自己充填性は有しないが、軽微な振動締固めにより密実に充填できる加振併用型の高流動コンクリート（以下、中流動コンクリートと称する）が実用化されている^{1)~3)}。中流動コンクリートは、高い流動性に見合った材料分離抵抗性を確保する手法の違いにより、単位粉体量を増加させる粉体系中流動コンクリートと、増粘剤を用いる増粘剤系中流動コンクリートに大別できる（図-2）。

自己充填コンクリートの配合設計手法は既に多くの研究がなされ、先述の指針に取りまとめられている。一方で、中流動コンクリートの配合設計手法は十分な検討がなされていない。近年では高性能 AE 減水剤が汎用化し、流動性は容易に高められるが、それに見合った材料分離抵抗性の確保に必要な配合条件を明らかにすることが課題である。特に、中流動コンクリートは、軽微な振動締固めにより充填することが前提のため、配合選定に際しては、振動作用下における充填性や間隙通過後の

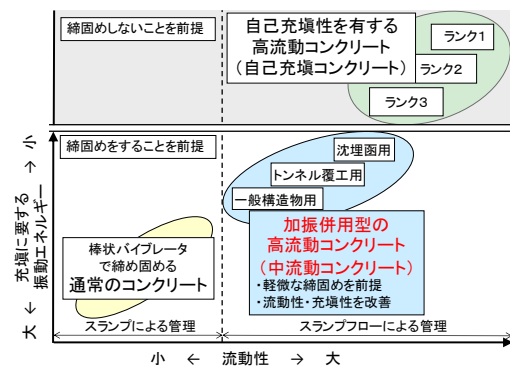


図-1 各種コンクリートの位置づけ

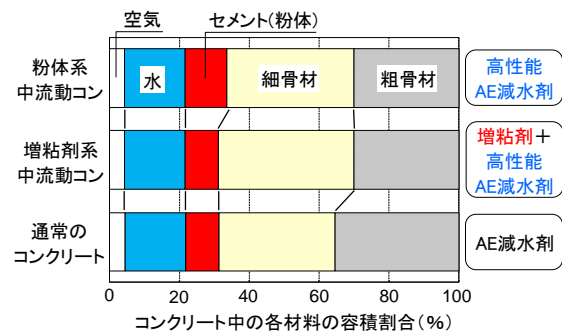


図-2 各種コンクリートの材料構成の概要

コンクリートの均質性についても配慮する必要がある。本研究は、水セメント比が約 50~60%、スランプフロー45cm 程度の中流動コンクリートを対象に、単位ペースト容積 (Vp) や単位粗骨材絶対容積 (Vg) などの配合条件が材料分離抵抗性や振動作用下で充填したコンクリートの均質性に及ぼす影響について実験的に検討した。

2. 実験概要

実験に用いた材料の概要を表-1に示す。なお、混和剤は、粉体系中流動コンクリートでは高性能 AE 減水剤を、増粘剤系中流動コンクリートでは増粘剤と高性能 AE 減水剤を一液型とした増粘型高性能 AE 減水剤を用いた。

*1 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 副主任研究員 修士(工学) (正会員)

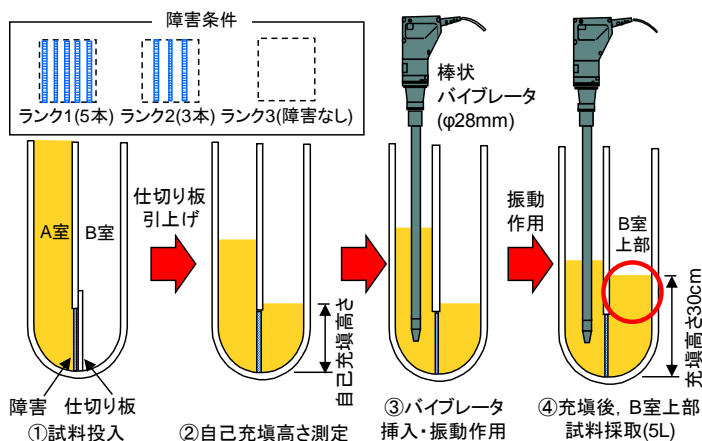
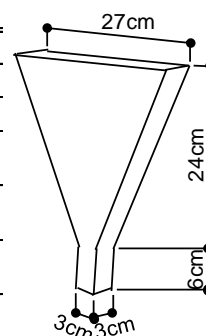
*2 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 博士(工学) (正会員)

表－１ 使用材料

名称	記号	物理的性質など
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm ³
細骨材	S	木更津産陸砂, 表乾密度2.63g/cm ³ 吸水率1.18%, 粗粒率2.49
粗骨材	G	青梅産碎石2005, 表乾密度2.65g/cm ³ 吸水率1.00%, 実積率59.0%
混和剤	SP	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)
	VA	増粘型高性能AE減水剤(増粘剤:グリコール系, 減水剤:ポリカルボン酸系)

表－２ 試験項目および準拠規準

試験項目	準拠規準
スランブフロー	JIS A 1150
空気量	JIS A 1128
ブリーディング率	JIS A 1123
コンクリートの漏斗流下時間	JSCE-F512 (O漏斗流下試験装置)
振動充填性試験	図-3に記載 (JSCE-F511に一部準拠)
モルタルフロー	JIS R 5201 (落下運動を加えない)
モルタルの漏斗流下時間	右図の装置を使用 ⁴⁾



【粗骨材量変化率(ΔG)の測定手順】

- ① 試料を5mmふるいでふるう。
- ② 残留試料を洗い粗骨材を取り出す。
- ③ 試料中の粗骨材量を測定し単位量に換算。

$$\text{粗骨材量変化率 } \Delta G (\%) = \frac{G_s - G_m}{G_m} \times 100$$

ここに,

G_m: 示方配合の粗骨材量(kg/m³)
G_s: 試料中の粗骨材の単位換算量(kg/m³)

- ④ 評価方法

ΔG > 0 : 間隙通過に伴い, 粗骨材量が増加
ΔG < 0 : 間隙通過に伴い, 粗骨材量が減少

図－３ 振動充填性試験の概要

試験項目を表－２に示す。中流動コンクリートの材料分離抵抗性の良否は、コンクリート中のモルタルの品質に大きく影響されると想定されるため、モルタルの品質についても試験を行った。具体的には、コンクリート試料を5mmふるい上でスクリーニングしてモルタルを採取し、モルタルフローおよび漏斗流下時間を測定した。なお、モルタルフローは、落下運動を与えない広がり(0打フロー)とした。本研究では、中流動コンクリートの材料分離抵抗性を評価する指標としてブリーディング率ならびに漏斗流下時間を用いた。コンクリートおよびモルタルの漏斗流下時間は、それぞれの粘性だけでなく、コンクリートレベルにおけるモルタルと粗骨材、モルタルレベルにおけるペーストと細骨材の材料分離を検討する観点から実施した。

一方、先述のように、中流動コンクリートは、軽微な振動締め固めにより鉄筋間隙を通過させて型枠の隅々まで充填することが前提のため、振動作用下において均質な状態で充填できる性能が要求される。そこで、図－３に示す振動充填性試験を実施した。試験は、①JSCE-F511に準じた試験を行いコンクリート自体の充填性(自己充填高さ)を測定する、②その後、A室内に棒状パイプレータ(φ28mm, 振動数200~234Hz)を挿入し、B室でのコンクリートの充填高さが30cmに達するまで振動を作用させる、③B室内上部において試料を5L採取

し、5mmふるい上で試料を洗い粗骨材を採取して間隙通過に伴う粗骨材量の変化率を測定する、手順で行った。

練混ぜには強制二軸練りミキサ(公称容量60L)を用い、1バッチの練混ぜ量は50Lとした。練混ぜ方法は骨材およびセメントを投入して10秒間練り混ぜた後、予め混和剤を溶解させた練混ぜ水を投入して90秒間練り混ぜた。ミキサ内で5分間静置後、試料を排出して十分に練り返した後、各種品質試験を行った。実験は20±1℃に管理された室内で実施した。

なお、本研究では中流動コンクリートの配合条件が、材料分離抵抗性や振動作用下における充填性に及ぼす影響を明らかにする観点から、スランブフローが45±2cmの範囲となるように各種減水剤の添加量を調整した。

3. 単位粗骨材絶対容積の影響

水セメント比を58.3%で一定として、単位粗骨材絶対容積を300~380L/m³の範囲で変化させた増粘剤系中流動コンクリートを製造し、各種試験を行った。コンクリート配合をスランブフローおよび空気量測定結果と合わせて表－３に示す。

3.1 ブリーディング率およびモルタルの品質

単位粗骨材絶対容積とブリーディング率、コンクリートの漏斗流下時間の関係を図－４に、スクリーニングしたモルタルのフロー、漏斗流下時間を図－５に示す。

表-3 コンクリートの配合および試験結果 (単位粗骨材絶対容積の影響)

No.	W/C (%)	s/a (%)	Vp (L/m ³)	Vg (L/m ³)	単位量(kg/m ³)				混和剤(C×%)		スランプフロー (cm)	空気量 (%)
					W	C	S	G	SP	VA		
1	58.3	56.2	315	300	175	300	1013	795	—	1.7	45.0	4.6
2		53.3		320			960	848	—	1.4	46.0	4.0
3		50.4		340			908	901	—	1.2	43.5	5.6
4		47.5		360			855	954	—	1.0	43.8	5.1
5		44.5		380			802	1007	—	0.9	45.0	5.3

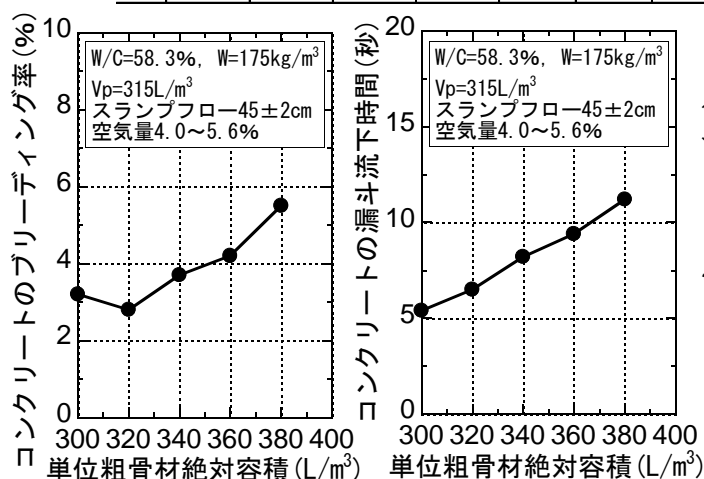


図-4 単位粗骨材絶対容積とブリーディング率, 漏斗流下時間

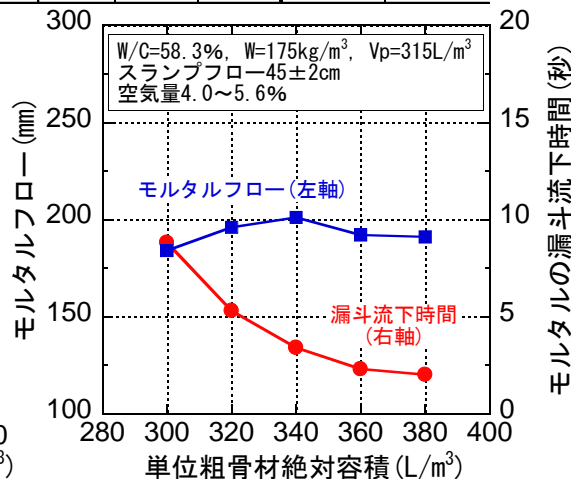


図-5 単位粗骨材絶対容積とモルタルの品質

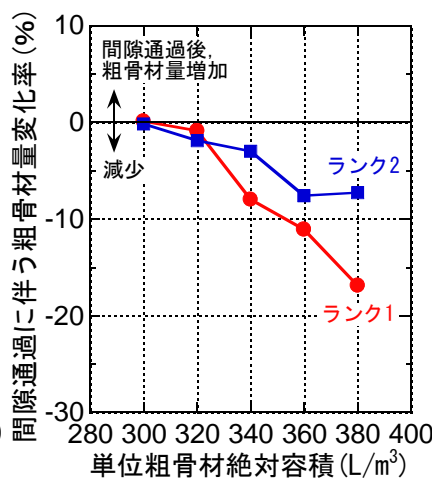
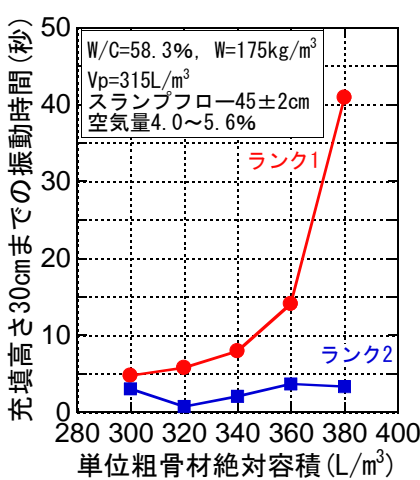
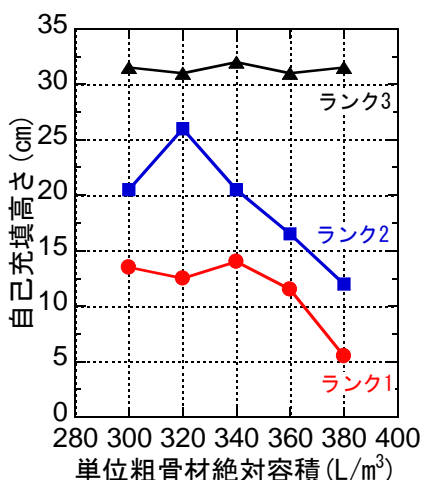


図-6 振動充填性試験結果 (単位粗骨材絶対容積の影響)

単位粗骨材絶対容積が大きくなるに従い、所定の流動性確保に必要な混和剤添加量は減少できる(表-3)が、ブリーディング率は増加した。本実験の条件では、単位粗骨材絶対容積の増加に伴いモルタル中の細骨材容積が減少するため細骨材に拘束される水量が少なくなること、および少ない混和剤添加量で流動性を確保できていることから、相対的に水量が余剰となったモルタルとなっていることなどが原因と考えられる。

一方、漏斗流下時間は、単位粗骨材絶対容積の増加に伴い、コンクリートでは遅くなり、モルタルでは速くなった。単位粗骨材絶対容積の増加に伴いモルタル中の細骨材容積が減少するため、細骨材の噛み合いによる影響が生じ難くなり、モルタルレベルでは流下時間が速くな

った考えられる。一方、コンクリートレベルでは粗骨材絶対容積の増加に伴い、漏斗通過時に粗骨材の噛み合いが生じやすくなり、流下時間が遅延したと考えられる。

これらの結果から、中流動コンクリートの材料分離抵性を確保するには、モルタルを構成するペーストおよび細骨材の容積比率ならびに混和剤添加量を適切に設定する必要があると言える。

3.2 振動作用下で充填したコンクリートの均質性

振動充填性試験結果を図-6に示す。障害無し(ランク3)の場合は、単位粗骨材絶対容積によらず自己充填高さ30cm以上を確保できた。一方、障害鉄筋を有する場合は、いずれも30cmを確保できず、単位粗骨材絶対容積の増加に伴い自己充填高さは小さくなった。充填高

さ 30cm に達するまでの振動作用時間は、ランク 2 の場合は単位粗骨材絶対容積に関わらずほぼ一定であるが、ランク 1 の場合は単位粗骨材絶対容積の増加に伴い増大した。また、間隙を通過し充填したコンクリート中に含まれる粗骨材量は、ランク 2 の場合では単位粗骨材絶対容積が 340L/m³ 以上、ランク 1 では 320L/m³ 以上となると低下が顕著となり、均質性が損なわれる結果となった。適用する構造条件（ランク）に応じて単位粗骨材絶対容積を設定する必要があることを示す結果と考えられる。

高流動コンクリート施工指針に示されるランクごとの単位粗骨材絶対容積の標準値を表-4 に示す。本実験結果から判断すれば、中流動コンクリートを用いて補助的な振動締固めを行うことを前提とした場合には、同一ランクに使用する高流動コンクリートに比べて粗骨材絶対容積を 10~20L/m³ 程度多くできるものと考えられる。高流動コンクリートが重力の作用のみで充填するのに対し、中流動コンクリートは振動作用を与えることで鉄筋間隙を通過し充填しているためと考えられる。しかしながら、使用する粗骨材の実積率により適正な単位粗骨材絶対容積は変化すると想定されるため、実用的には指針に示される高流動コンクリートの単位粗骨材絶対容積を目安とすることが望ましいと考えられる。

表-4 高流動コンクリート施工指針での各ランクの単位粗骨材絶対容積の標準値 (L/m³)

高流動コンクリートの種類	自己充填性のランク*		
	ランク1 (35~60mm)	ランク2 (60~200mm)	ランク3 (200mm以上)
粉体系	280~300	300~330	320~350
増粘剤系	280~310	300~330	300~360
併用系	280~300	300~330	300~350

*自己充填性のレベル。()内の数値は最小鋼材あきを示す。

4. 単位ペースト容積の影響

単位骨材容積を 320L/m³、水セメント比を 50 および 58.3%で一定として、単位ペースト容積（空気 45L/m³+水+セメント容積）を変化させた増粘剤系および粉体系中流動コンクリート（水セメント比 50%のみ）を製造して各試験を行った。コンクリート配合をスランプフローおよび空気量測定結果と合わせて表-5 に示す。

4.1 ブリーディング率およびモルタルの品質

(1)単位ペースト容積とブリーディング率

水セメント比の水準や中流動コンクリートの種類によらず、単位ペースト容積が小さくなるに従い、所定の流動性確保に必要な混和剤添加量は増大した（表-5）。

単位ペースト容積とブリーディング率およびコンクリートの漏斗流下時間の関係を図-7 に示す。ブリーディング率は、増粘剤系中流動コンクリートの場合、水セメント比によらず、単位ペースト容積が約 310L/m³、粉体系中流動コンクリートは約 320L/m³ を下回ると増大する結果が得られた。増粘剤系中流動コンクリートは、増粘剤の混和によりペーストの粘性が高められるため、より少ない単位ペースト量でも材料分離抵抗性を確保できたと考えられる。

漏斗流下時間は、単位ペースト容積が少なくなるに従い遅くなった。単位ペースト容積の減少に伴い、モルタル中の細骨材容積が増加し粗骨材との摩擦が生じ易くなることや、混和剤添加量の増大に伴いペースト分の粘性が低下したことが原因と推測される。

(2)単位ペースト容積とモルタルの品質

スクリーニングしたモルタルのフローおよび漏斗流下時間との関係を図-8 に示す。本実験は、単位粗骨材容積を一定（単位モルタル容積を一定）としたスランプフローの等しいコンクリートであり、モルタルの流動性

表-5 コンクリートの配合および試験結果（単位ペースト容積の影響）

コンクリート種類	W/C (%)	s/a (%)	Vp (L/m ³)	Vg (L/m ³)	単位量(kg/m ³)				混和剤(C×%)		スランプフロー(cm)	空気量 (%)
					W	C	S	G	SP	VA		
増粘剤系中流動	58.3	52.7	323	320	180	309	939	849	—	1.1	43.5	4.9
		53.3	315		175	300	959		—	1.4	46.0	4.0
		53.7	307		170	292	979		—	1.6	45.5	4.2
		54.2	300		165	283	999		—	1.8	43.5	5.0
	50.0	52.2	331	320	175	350	919	849	—	1.0	46.5	4.9
		52.8	323		170	340	940		—	1.2	47.0	5.2
		53.3	314		165	330	962		—	1.5	46.0	5.3
		53.9	306		160	320	983		—	1.9	45.0	5.8
		54.4	298		155	310	1004		—	2.4	43.0	6.0
		54.4	298		155	310	1004		—	2.4	43.0	6.0
粉体系中流動	50.0	51.6	339	320	180	360	897	849	0.9	—	45.0	4.0
		52.2	331		175	350	919		1.1	—	44.0	4.1
		52.8	323		170	340	940		1.5	—	46.5	4.0
		53.3	314		165	330	962		1.6	—	47.0	5.0
		53.9	306		160	320	983		1.8	—	44.0	5.6
		54.4	298		155	310	1004		2.5	—	43.5	5.9
		54.4	298		155	310	1004		2.5	—	43.5	5.9

はほぼ同じになると考えられる。しかし、単位ペースト容積が、増粘剤系中流動コンクリートの場合 310L/m³程度、粉体系の場合 320L/m³程度を下回るとモルタルフローが急激に低下した。また、漏斗流下時間も同様の単位ペースト容積を境に、急激に遅くなる傾向が認められる。見掛け上、コンクリートの流動性が等しい場合でも、コンクリート中のペースト量の割合によりモルタルの性質が大きく異なることを示す結果である。

(3)材料分離抵抗性の確保に必要なモルタルの品質

水セメント比 58.3%の増粘剤系中流動コンクリートのブリーディング率とスクリーニングしたモルタルの漏斗流下時間の関係を、前章の結果と共に図-9に示す。

単位ペースト容積が一定の場合、単位粗骨材絶対容積の増加に伴いモルタルの漏斗流下時間は速くなり、ブリーディング率は大きくなった。本実験条件では、単位粗骨材絶対容積の増加に伴いモルタル中の細骨材容積が減少し、相対的にペースト分の多いモルタルとなる。そのため、モルタルレベルでは、細骨材の噛み合いによる影響が生じ難くなりモルタルの漏斗流下時間は速くなり、コンクリートレベルでは、モルタルの保水性が低下するためブリーディング率が増大したと考えられる。

一方、単位粗骨材絶対容積が一定（単位モルタル容積が一定）の場合、単位ペースト容積の減少に伴いモルタルの漏斗流下時間は遅くなり、ブリーディング率は増大した。単位ペースト容積の減少に伴いモルタル中の細骨材容積が増大するため、モルタルとして同じ流動性を確保するにはペーストの流動性を大きくする必要があり、混和剤添加量が増大することとなる。そのため、モルタルレベルでは、細骨材の噛み合いによる影響が生じ易くなりモルタルの漏斗流下時間が遅延するとともに、コンクリートレベルではペースト相の粘性が低下するためブリーディング率が増加したと考えられる。

これらの結果は、ブリーディングの少ない材料分離抵抗性に優れた中流動コンクリートを得るには、コンクリート中のモルタルを構成するペーストと細骨材の容積割合ならびに混和剤添加量を適切に設定し、ある適正な粘性を有するモルタルとする必要があると言える。また、単位粗骨材絶対容積も上記の適正なモルタルが得られる範囲に設定する必要があると考えられる。本実験によれば、モルタル漏斗流下時間が5~10秒程度のモルタルとすることで、ブリーディングの少ない中流動コンクリートが得られると考えられる。ただし、使用材料の違いなどにより、適正な漏斗流下時間は相違すると考えられるため、今後さらなる検討が必要である。

4.2 振動作用下で充填したコンクリートの均質性

(1)振動充填性試験結果

単位ペースト容積を変化させた場合の振動充填性試

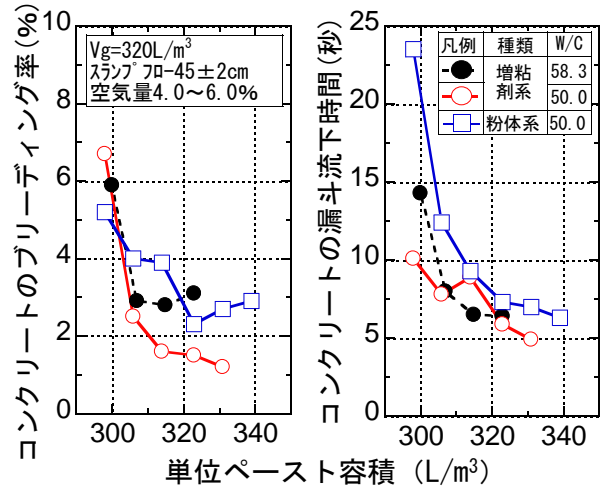


図-7 単位ペースト容積とコンクリートの品質

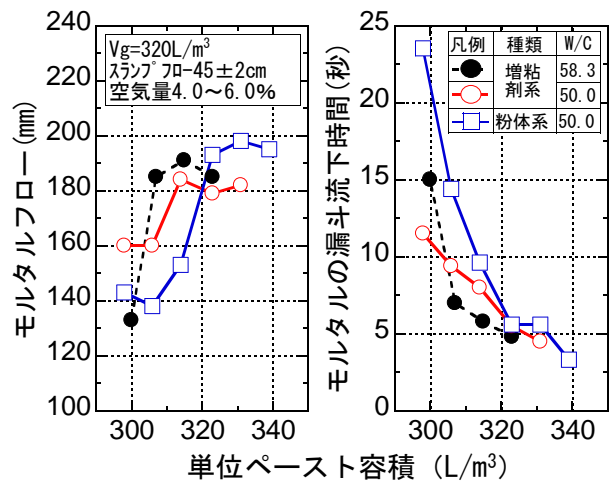


図-8 単位ペースト容積とモルタルの品質

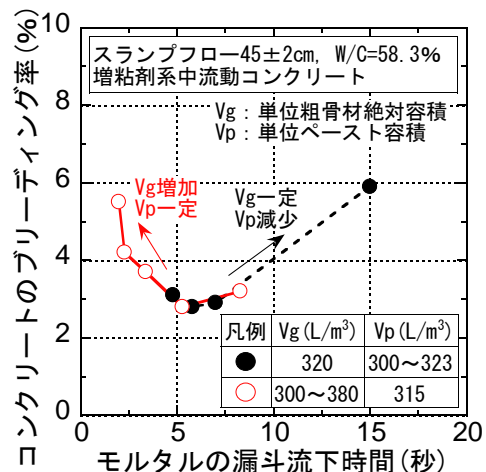


図-9 ブリーディング率とモルタル漏斗流下時間

験結果（障害条件はランク 1）を図-10に示す。

水セメント比や中流動コンクリートの種類によらず単位ペースト容積が少なくなると自己充填高さは低くなり、充填高さ 30cm に達するまでの振動作用時間は増加した。また、間隙通過後のコンクリート試料に含まれる粗骨材量も、単位ペースト量の少ないコンクリートほど減少し、均質性が損なわれる結果となった。

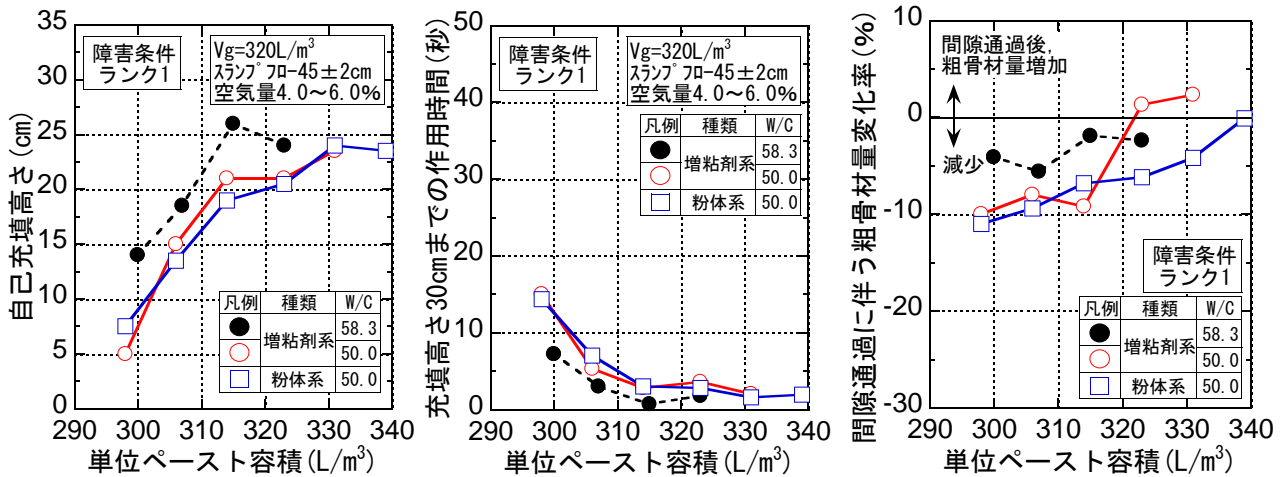


図-10 振動充填性試験結果（単位ペースト容積の影響）

本実験において、自己充填性や振動作用下における均質性の低下が顕著となる単位ペースト容積は 310～320L/m³ 以下であり、前節で検討したブリーディング率の増加やモルタルの品質変化が顕著となる単位ペースト容積と概ね一致している。ブリーディングが少なく適切な粘性を有するモルタルから構成される中流動コンクリートが、自己充填性に優れるとともに、振動作用下でも均質な状態で型枠の隅々まで充てんできることを示す結果と考えられる。

(2)振動作用時間が均質性に及ぼす影響

振動充填性試験における充填高さ 30cm に達するまでの振動作用時間と間隙通過後の粗骨材量変化率の関係を、前章の結果と合わせて図-11 に示す。

本研究で検討した単位ペースト容積および単位粗骨材容積の範囲では、中流動コンクリートの種類や水セメント比などの配合条件ならびに障害条件のランクによらず、充填に要する振動作用時間が長くなるほど間隙通過に伴い粗骨材量が減少し均質性が損なわれる傾向にある。特に、振動作用時間が 10 秒程度以上となると均質性の低下が顕著である。中流動コンクリートの配合選定に際しては、振動作用下における充填性の照査も重要であることを示す結果と考えられる。

5. まとめ

軽微な振動締固めにより充填する高流動コンクリート（中流動コンクリート）を対象に、ブリーディング特性や振動作用下における均質性に及ぼす配合条件の影響を実験的に検討した。水セメント比 50～60%程度、スランプフロー45cm 程度の中流動コンクリートに関して得られた知見を以下に示す。

- (1) ブリーディング率の小さい中流動コンクリートを得るにはモルタルの流動性と粘性を制御する必要がある。落下運動を与えないモルタルフローが 180～200mm 程度で、漏斗流下時間が 5～10 秒程度のモ

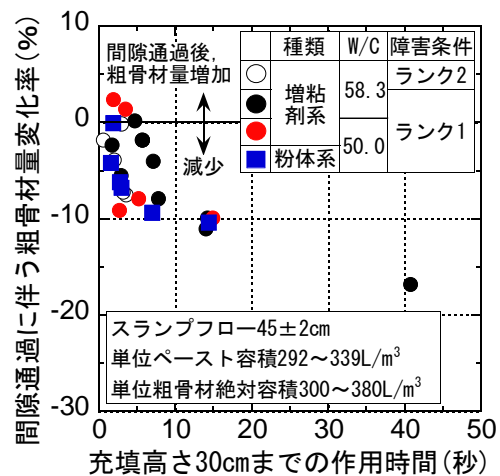


図-11 振動作用時間と粗骨材量変化率

ルタルから構成される中流動コンクリートは、ブリーディング率を約 3%以下に低減できる。

- (2) 振動作用下で間隙を通過させた中流動コンクリートの均質性を確保するには、構造条件に応じて単位粗骨材絶対容積を設定することが肝要で、標準的な構造条件（鋼材のあき 60～200mm 程度）の場合には、単位粗骨材絶対容積を 340L/m³ 以下にする必要がある。また、過剰な振動作用は均質性の低下を招くため、振動時間 10 秒程度以下で充填できる配合とする必要がある。

参考文献

- 1) 作井孝光他；加振併用型充てんコンクリートを用いた合成構造沈埋函の施工，セメント・コンクリート，No.714，pp.33-39，2006.8
- 2) 中間祥二他；中流動コンクリートを用いたトンネル覆工の施工—北海道横断自動車道久留喜トンネル—，コンクリート工学，Vol.48，No.6，pp.25-30，2010.6
- 3) 例えば，日刊工業新聞；2011.10.07 記事
- 4) 岡村甫他；ハイパフォーマンスコンクリート，p.42，技法堂出版，1993.9