

# 論文 振動作用下におけるコンクリートの充てん性の評価に関する検討

桜井 邦昭\*1・近松 竜一\*2

**要旨：**振動作用下におけるコンクリートの充てん性の評価に関して実験的に検討した。その結果、はりやスラブなどで水平方向に配置された鋼材の間隙を通過させて部材の内部にコンクリートを打ち込むためにバイブレータが必要な場合があること、振動エネルギーを一定とした条件で所要の充てん性を確保するには構造条件のランクに応じて適切なスランブを設定する必要があること、同一スランブで水セメント比が小さい場合ほど鋼材の間隙を通過させて充てんした際の材料分離が小さくなること、などを定量的に示した。

**キーワード：**打込み、締固め、振動作用、充てん性、材料分離抵抗性、評価方法

## 1. はじめに

近年、RC橋脚の耐震補強工事をはじめ、狭あいな部材の中に鋼材が密に配置されたコンクリート構造物の施工事例が増加している。また、良質な天然骨材の枯渇による骨材事情の悪化に伴い、ブリーディングの増大や所要の流動性を付与するために単位水量が増加する傾向にあり、適切なワーカビリティを付与するための対応が求められている。このような状況下において、施工時の初期欠陥を防止し、耐久的なコンクリート構造物を構築するには、施工計画の段階で構造条件や施工条件に応じて、所要とされるコンクリートの充てん性を適正に評価することが重要である。

コンクリート標準示方書・施工編〔2007年制定〕（以下、示方書と称す）によれば、コンクリートの充てん性は、流動性と材料分離抵抗性の相互のバランスによって定まるとしている。また、流動性の指標としてはスランブ、材料分離抵抗性の指標には単位粉体量（単位セメント量）を用いている。さらに、要求される流動性は構造物の配筋条件によって異なるとし、はり、スラブ、柱、壁およびPC部材の部材別に、鋼材量や鋼材あきなどの構造条件と締固め作業高さに応じて打込み時の最小スランブが示されている。

充てん性の評価については、これまでに数多くの研究<sup>1)~4)</sup>が行われているが、現状では、試験方法として標準化されるまでには至っていない。一方で、自己充てん性を有する高流動コンクリートに関しては、JSCE-F511「高流動コンクリートの充てん装置を用いた間隙通過試験方法（案）」が規格化されており、これを準用した研究も行われている<sup>5), 6)</sup>。実施工における打込みや締固め作業を想定し、振動作用下におけるコンクリートの充てん性を合理的に評価できる手法の確立が求められている。

そこで、本研究では、打込みや締固め作業においてバイブレータを用いて振動エネルギーをコンクリートに

加えた場合の充てん性に及ぼす各種要因の影響について実験的に検討した。まず、はりやスラブなどで水平に配置された鋼材の間隙を通過させて部材の内部にコンクリートを打ち込む場合の間隙通過性について検討した。次に、ボックス形充てん試験装置を用いた充てん性試験を実施し、振動エネルギーを一定とした場合に充てん性を確保するための構造条件とコンクリートの流動性の関係について考察した。さらに、鋼材の間隙を通過させて充てんした際のコンクリートの材料分離に及ぼす配合要因の影響についても検討した。

## 2. 打込み時の振動作用による間隙通過性に関する検討

### 2.1 実験概要

はりやスラブ部材にコンクリートを打ち込む場合、水平方向に配置された鉄筋の間隙にホースの筒先を挿入するのが一般的である。しかし、施工条件によっては、鋼材量が多く、配置間隔が密なために開口部の設置など適切な対策を講じることが困難な場合もある。このような場合に、やむを得ず鉄筋上からコンクリートを打ち込むと写真-1に示すように、コンクリートが鉄筋上で山になる場合がある。そこで、本節では、上記のような水平方向に配置した鉄筋上からコンクリートを打ち込む場合を想定し、鉄筋間隙の通過に必要な振動エネルギーと配筋条件や配合条件の関係について検討した。



写真-1 鉄筋上に山になったコンクリート(左)とホースを挿入するための開口部の例(右)

\*1 (株)大林組 土木本部生産技術本部 基盤技術部技術第四課 工修 (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 工博 (正会員)

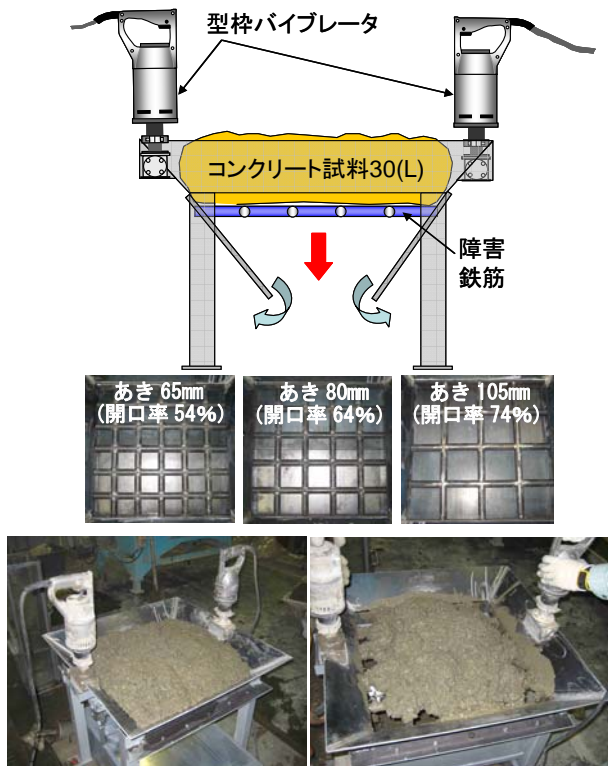


図-1 打込みにおける間隙通過性の検討実験の概要

試験装置の概要を図-1に示す。開口幅は50cmで、底面に障害鉄筋が設置されている。振動は左右2箇所を設置した型枠バイブレータ（振動数150～167Hz）により装置全体に作用させる仕組みとした。なお、実施工では棒状バイブレータによりコンクリートに直接振動を作用させるが、予備実験において棒状バイブレータを用いたところ試料全体に振動を行き渡らせることが困難であったことから、型枠バイブレータを用い装置自体を振動させる仕組みとした。

障害鉄筋の条件は、一般的なポンプ施工で使用される4～5インチのフレキシブルホースが挿入できない配筋状態を想定し、あき65mm（開口率54%）、80mm（開口率64%）および105mm（開口率74%）の3種類とした。なお、いずれも直径22mmの丸鋼鉄筋を用いた。コンクリート試料30Lを装置に投入し、底蓋を開くと同時に加振を開始し、試料が鉄筋間隙を通過するまでの振動時間（以下、間隙通過に要する振動時間という）を測定した。

検討要因を表-1に、使用材料を表-2に示す。水セメント比を55%で一定として、スランブを8～18cmに変化させた場合、およびスランブを12cmで一定として、水セメント比を45～65%に変化させた場合について試験した。なお、鉄筋間隙通過性に及ぼす粗骨材量の影響を排除するために、全ての配合で粗骨材の単位量を一定とした。

コンクリートの練混ぜには、強制二軸練りミキサ（公

表-1 検討要因

検討要因	配合条件		
	スランブ (cm)	水セメント比 (%)	単位粗骨材容積 (L/m <sup>3</sup> )
スランブ	8, 12, 15, 18	55	396
水セメント比	12	45, 55, 65	396

表-2 使用材料

種類	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 <sup>3</sup> )
細骨材	S	木更津産陸砂 (表乾密度2.62g/cm <sup>3</sup> , 吸水率1.96%, 粗粒率2.56)
粗骨材	G	青梅産砕石(最大粗骨材寸法20mm) (表乾密度2.65g/cm <sup>3</sup> , 吸水率0.76%, 粗粒率6.71)
混和剤	WR	AE減水剤(リグニンスルホン酸)
	AE	AE助剤(変性アルキルカルボン酸化合物)

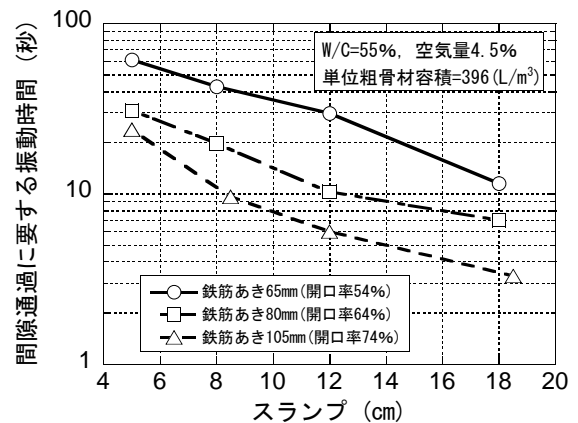


図-2 間隙通過に要する振動時間とスランブの関係

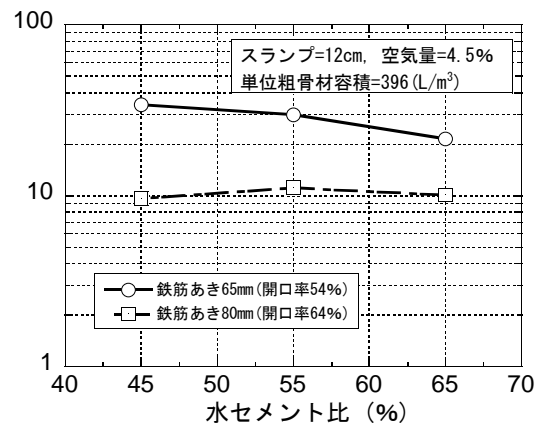


図-3 間隙通過に要する振動時間と水セメント比の関係

称容量60L)を使用し、1バッチの練混ぜ量は30Lとした。練混ぜ方法は、セメントおよび骨材を投入して10秒間練混ぜた後、予め混和剤を溶解させた練混ぜ水を投入して60秒間練り混ぜた。

## 2.2 実験結果および考察

スランブおよび水セメント比を変化させた場合の実験結果を図-2および図-3に示す。

水セメント比を55%としてスランブを5~18cmに変化させた場合、間隙通過に要する振動時間は、スランブの増加に伴い短くなっている。スランブ8cmでの振動時間を基準とすると、スランブを12cm, 18cmに増加させることで、鉄筋間隙の通過に要する振動時間はそれぞれ1/2, 1/4程度となっている。スランブが大きい方が、コンクリートを打ち込むのに有利である。

一方、スランブを12cmで一定として水セメント比を変化させた場合、鉄筋のあきが小さく開口率が小さい開口条件では、水セメント比が小さく粘性が増加するほど、間隙通過に要する振動時間が増加する傾向が認められた。

なお、本実験の範囲内では、いずれの配合条件や配筋条件の場合でも、振動作用を与えないとコンクリートは鉄筋上で山になる状況が認められた。鉄筋上のコンクリートを部材内に打ち込むには、バイブレータが必要な場合があり、部材内に打ち込まれたコンクリートを締め固めるために用いるバイブレータとは区別して、施工計画において考慮する必要があると考えられる。

## 3. 振動作用下における充てん性の評価に関する検討

### 3.1 実験概要

部材内に打ち込まれたコンクリートが、鉄筋間隙を通過して型枠の隅々に充てんするのに必要な内部振動機による振動時間は、構造条件や配合条件によって相違する。充てん不良の発生するリスクを低減する観点からは、施工条件に応じて適切なワーカビリティを有するコンクリートとすることが望ましい。

また、振動作用によりコンクリートが型枠の隅々まで行き渡った場合でも、鉄筋間隙を通過する際にモルタルと粗骨材が分離したり、過振動によりペーストと骨材が材料分離を生じ、コンクリートの品質が低下する場合も考えられる。特に、部材接合部などの高密度配筋部では、その傾向が顕著になると考えられる。

そこで、本研究では、「高流動コンクリートの充てん装置を用いた間隙通過試験方法(案)」のうちボックス形容器を用いて、コンクリートの充てん性の評価を試みた。試験の概要を図-4に示す。障害条件も上記試験方法(案)に準じて、ランク1~3の3水準とした。

試験は、まずA室にコンクリート試料(17L)を投入し、棒状バイブレータ(φ28mm, 振動数200~234Hz)を挿入した後、仕切り板を引き上げると同時に振動を作用させ、コンクリートがB室の充てん高さ30cmに達するまでの振動時間を測定した。

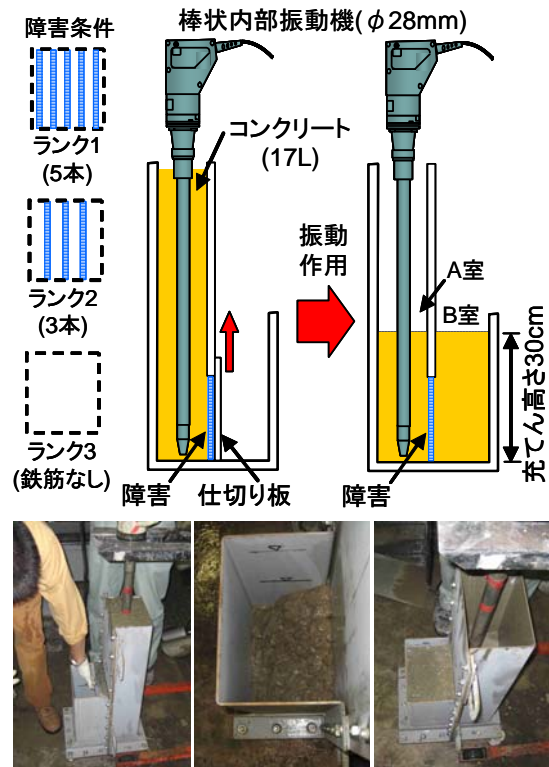


図-4 コンクリートの充てん性試験の概要

表-3 間隙通過前後の材料分離の試験方法の概要

試験項目	試験方法および準拠規準
ブリーディング試験	JIS A 1123に準拠 試験容器にはφ100×200mmを使用
粗骨材量の変化率	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。 $\text{粗骨材変化率(\%)} = \frac{G_m - G_s}{G_m} \times 100$ G <sub>m</sub> : 示方配合の粗骨材量(kg/m <sup>3</sup> ) G <sub>s</sub> : 試料中の粗骨材の単位換算量(kg/m <sup>3</sup> )

表-4 コンクリートの配合

検討要因	スランブ(cm)	空気量(%)	W/C(%)	s/a(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				WR(C×%)	
					W	C	S	G		
充てん性の評価	粗骨材容積	12	55.0	48.0	165	300	874	958	0.25	
				45.9			835	997		
				43.0			783	1050		
				40.1			731	1103		
	スランブ	4.5	55.0	44.9	150	273	845	1050	0.25	
				43.9	158	287	812			
				41.4	177	322	733			
				45.0	165	300	728			1050
	水セメント比	12	65.0	44.5	165	300	821	1050	0.25	
				45.0			354			768
	材料分離の評価	水セメント比	18	4.5	50.0	177	354	768	988	0.25
					55.0		322	779	1003	
60.0					295		789	1016		

また、一部の配合については、間隙通過前後のコンクリートの材料分離抵抗性の評価も行った。充てん性試験を行った後、間隙通過前の試料としてA室下部、間隙通

過後の試料として B 室上部のコンクリートをそれぞれ 6L ずつ採取した。採取した試料は、均質となるように混合した後、3L ずつに取り分けて、ブリーディング率および粗骨材量の変化率の測定を行った。試験方法の概要を表-3 に示す。

使用材料を表-2 に、コンクリートの配合を表-4 に示す。コンクリートの充てん性の評価に関する検討では、検討要因を単位粗骨材容積 5 水準、スランプ 4 水準および水セメント比 3 水準とした。材料分離の評価に関する検討では、高密度配筋部を想定して障害条件はランク 1 とし、スランプ 18cm のコンクリートを対象に水セメント比を 50%、55%および 60%に変化させた配合で試験した。コンクリートの練混ぜ方法は前節と同様である。

### 3.2 充てん性を確保するための構造条件とコンクリートの流動性の関係

#### (1) 単位粗骨材容積の検討

土木学会「コンクリートライブラリー93 高流動コンクリート施工指針」では、構造条件のランクに応じて単位粗骨材容積の範囲が示されている。コンクリートが間隙を通過する際に粗骨材がかみ合うことが、充てん性に大きく影響するためと考えられる。

そこで、まず単位粗骨材容積を変化させたコンクリートで充てん性試験を行い、粗骨材量が振動作用下のコンクリートの充てん性に及ぼす影響について調べた。

試験結果を図-5 に示す。単位粗骨材容積が 410 (L/m<sup>3</sup>) 程度となると、障害条件がランク 1 およびランク 2 の場合とも、充てん高さ 30cm に達するまでの振動時間が増加し、B 室上部にはモルタル分のみが充てんされる状況が認められた。間隙を通過する際に、粗骨材同士が噛み合い、アーチングにより閉塞が生じたものと考えられる。このような状態では、コンクリートの流動性や粘性の違いによる充てん性の相違を適切に評価できないことから、以降の試験では、単位粗骨材容積をアーチングの影響がない範囲として、スランプおよび水セメント比を変化させた配合で試験することにした。

#### (2) スランプの影響

高流動コンクリート施工指針では、高流動コンクリートの充てん性のランク区分と対象構造物および鋼材量の関係を表-5 のように示している。一方、示方書では、部材別に鋼材量や鋼材の最小あきなどの構造条件に応じて打込み時の最小スランプが示されている。そこで、両者を照らし合わせて、示方書に記載されている各部材の打込み時の最小スランプをランク別に整理した結果を表-6 に示す。なお、ここでは、各部材において締め作業高さが最も低い場合の最小スランプを抽出した。

表-6 より、ランク 3 に相当する配筋条件の打込みに

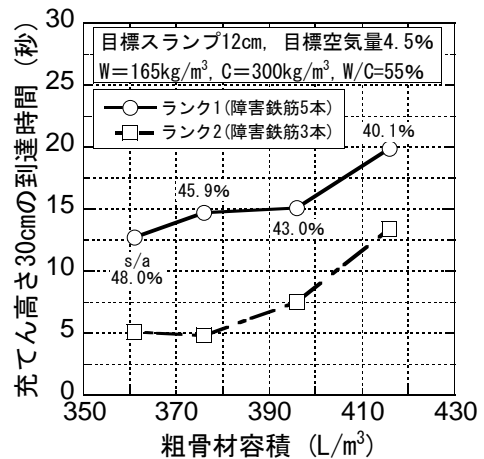


図-5 粗骨材容積と充てん高さ 30cm に達するまでの振動時間の関係

表-5 高流動コンクリート施工指針におけるランク区分と対象構造物および鋼材量の関係

	主な対象構造物	鋼材の最小あき (mm)	鋼材量の目安 (kg/m <sup>3</sup> )
ランク1	高密度配筋部、複雑・異形型枠を使用した構造物	35~60程度	350以上
ランク2	通常のRC構造物や複合構造物	60~200程度	100~350
ランク3	配筋量の少ないマスコンクリート構造物や無筋構造物	200程度以上	100以下

表-6 示方書における各部材の打込み時の最小スランプと JSCE-F511 の障害条件(ランク)の関係

部材の種類	打込み時の最小スランプ(cm)		
	ランク1相当	ランク2相当	ランク3相当
壁	15	8~12	該当なし
はり	14	8	5
柱(接合部)	12	5~9	該当なし
スラブ	該当なし	7	該当なし
PC部材	15	9~12	該当なし

はスランプ 5cm 程度、ランク 2 では 8~12cm 程度、ランク 1 では 15cm 程度のコンクリートが必要であることが分かる。なお、表中のスランプは最小値であり、標準的な RC 構造物(ランク 2)の施工にスランプ 8cm のコンクリートを適用した場合、スランプが許容差の下限である 5cm 程度となると充てんが困難になる可能性があることを示唆している。

水セメント比を 55%としてスランプを 5~18cm に変化した場合の試験結果を図-6 に示す。いずれの障害条件でも、スランプが大きいほど充てん高さ 30cm に達するまでの振動時間は短くなっている。一方、ほぼ一定の振動時間(5~15 秒)に充てん高さが 30cm となるスランプを抽出すると、ランク 3 の場合にはスランプ 5cm、



ランク 2 の場合にはスランブ 8~12cm, ランク 1 ではスランブ 15~18cm 程度となる。

実施工において、コンクリートの充てんに要する振動時間は、振動機の種類や径、締固め間隔などにより相違する。本実験は小径の振動機 (φ28mm) を用いており、締固め箇所も一箇所であることから、一概に結論付けることはできないが、本試験において、ランクごとに、ほぼ一定の振動エネルギーで充てん性を確保するのに必要なスランブは、示方書で示される部材別の構造条件に応じた最小スランブと概ね対応している。この結果は、示方書に記載されている最小スランブが、一定の振動エネルギーで充てん性を確保するために必要な流動性を表していることを裏付けるものであり、効率良く施工を行うには、構造条件に応じてコンクリートの流動性を設定する必要があることを示すものと考えられる。

障害条件 (ランク) と充てん高さ 30cm に達するまでの振動時間の関係をコンクリートのスランブの値ごとに整理した結果を図-7 に示す。ランク 3 の場合での振動時間を基準とすると、ランク 2 の場合には3 倍程度の振動時間が必要であり、ランク 1 では 5~7 倍程度の振動時間が必要である。なお、振動時間が長い場合には、モルタル分と粗骨材が材料分離を生じたり、障害鉄筋部でアーチングを生じている場合が大半である。図-7 は、構造条件に適さないスランブのコンクリートを用いても、長時間振動作用を与えることで均質なコンクリートが充てんできることを表すものではない。

### (3) 水セメント比の影響

スランブを 12cm として水セメント比を変化させた場合の試験結果を図-8 に示す。充てん高さ 30cm に達するまでの振動時間は、水セメント比が小さく粘性の高いコンクリートほど長くなっている。また、この傾向は、障害条件が厳しくなるほど顕著である。これらの結果は、コンクリートの充てん性が、配合条件と構造条件の両者の影響を受けることを示すものと考えられる。

### 3.3 間隙通過による材料分離に及ぼす配合要因の影響

高密度配筋部への充てんを想定し、スランブを 18cm として水セメント比を 50~60% に変化させたコンクリートを対象に、充てん性試験を行い、間隙通過前後のコンクリートのブリーディング率および粗骨材の変化量を測定した。なお、いずれの水セメントの比の場合でも充てんに要する振動時間は 10 秒程度であった。測定結果を図-9 に示す。

間隙通過前のコンクリートのブリーディング率は水セメント比によらず 2~3% である。一方、通過後のブリーディング率は水セメント比が大きくなるに伴い増加している。水セメント比 60% の場合には約 5% と間隙通

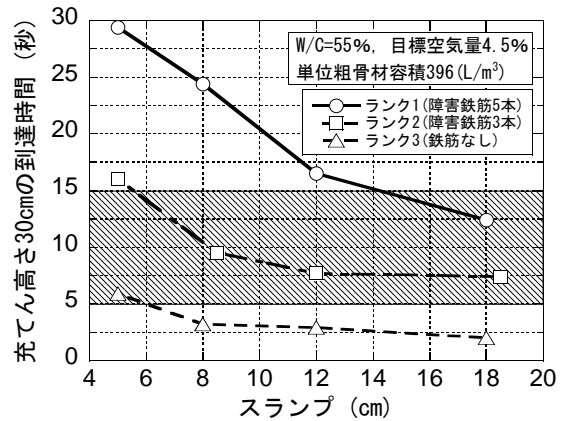


図-6 スランブと充てん高さ 30cm に達するまでの振動時間の関係

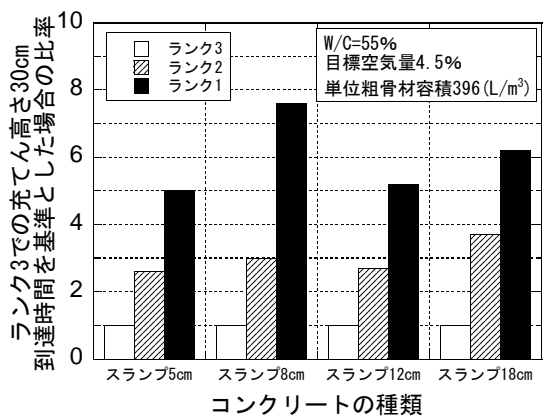


図-7 障害条件(ランク)と充てん高さ 30cm に達するまでの振動時間の関係

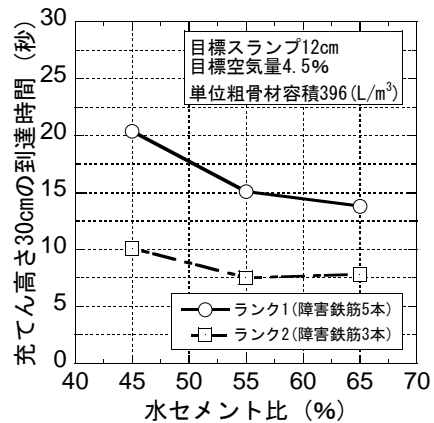


図-8 水セメント比と充てん高さ 30cm に達するまでの振動時間の関係

過前に比べ 2 倍以上多くなっている。ブリーディングの低減には、ペーストの粘性を増加させる対策が効果的であることを裏付けるものと考えられる。

間隙通過前後での粗骨材量の変化率を測定した結果を図-10 に示す。いずれの配合においても、試料中の粗骨材量は、間隙通過前は示方配合中の粗骨材量よりも多く、間隙通過後は少ない結果が得られている。間隙通過後の試料に含まれる粗骨材の割合は、水セメント比が

小さい場合ほど多い。水セメント比を小さくして粘性を増加させることで、間隙通過に伴う材料分離を抑制できることを示すものと考えられる。

なお、以上の結果を踏まえると、ボックス形充てん試験装置を用いることで、振動作用下におけるコンクリートの充てん性や間隙通過後の材料分離を評価できる可能性があるものと考えられる。

#### 4. まとめ

振動作用下におけるコンクリートの充てん性の評価について実験的に検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) はりやスラブ部材において、水平方向に配置された鋼材の間隙を通過させて部材の内部にコンクリートを打ち込むために、バイブレータが必要となる場合がある。
- (2) 振動エネルギーを一定とした条件で、所要の充てん性を確保するには、構造条件のランクに応じて適切なスランプを設定する必要がある。
- (3) 同一スランプのコンクリートにおいて、水セメント比が小さい場合ほど、鋼材の間隙を通過させて充てんした際のコンクリートの材料分離が抑制される。

#### 参考文献

- 1) 近松竜一, 竹田宣典, 十河茂幸;フレッシュコンクリートの間隙通過性に関する一考察, 土木学会第50回年次学術講演会概要集, V-498, 1995.9
- 2) 梁俊ほか;フレッシュコンクリートの締固め性試験方法に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.2, pp.416-427, 2006.6
- 3) 府川徹ほか;異なるスランプに対するコンクリート施工性能の定量評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1061-1066, 2006.7
- 4) 藤代勝ほか;フレッシュコンクリートの粘性評価手

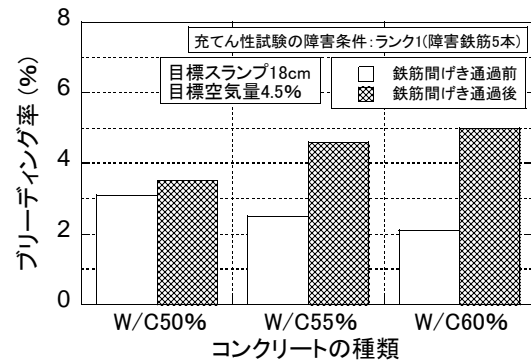
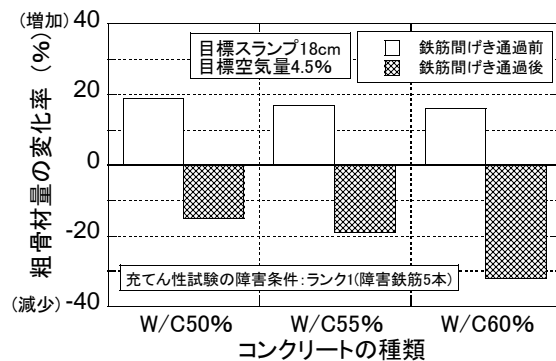


図-9 間隙通過前後のブリーディング率の変化



- \* 変化率>0% : 示方配合に比べ粗骨材量が増加
- \* 変化率<0% : 示方配合に比べ粗骨材量が減少

図-10 間隙通過前後の粗骨材量の変化

法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp1073-1078, 2006.7

- 5) 加賀谷誠, 大野誠彦;ボックス形充てん装置を用いた振動加速度計測による普通コンクリートの締固め性能評価, 土木学会論文集, No.788, V-67, pp.1-11, 2005.5
- 6) 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, 2008.7