

論文 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

浦野 真次^{*1}・栗田 守朗^{*2}・江渡 正満^{*3}

要旨: 加振時の間隙通過性能および材料分離抵抗性について、セメントを石灰石微粉末に置き換えた模擬コンクリートを用いて充てん試験装置による方法で検討した結果、スランブだけではなく配合による間隙通過性の相違を評価できた。さらに、高架橋の高密度配筋部をモデルにした試験体で通常のスランブの範囲のコンクリートを打ち込んで締固めを行う場合について、かぶり部分の模擬コンクリートの充てん性について検討した。その結果、未充てん部の発生を防止し粗骨材の材料分離を抑制するうえで、鉄筋量やスランブの大きさに応じて振動機の位置および振動機の挿入時間を決定することが極めて重要であることを示した。

キーワード: 高密度配筋, スランブ, 加振, 間隙通過性, 材料分離抵抗性

1. はじめに

通常のスランブの範囲のコンクリートに関して、型枠内の鉄筋量が高密度となり打込み箇所も限定される場合、設置された鉄筋と型枠で囲まれた空間内にコンクリートを横移動させることなく締固めを行うことは困難となる。また、近年のコンクリート使用材料の多様化や良質の骨材の減少などにより、同一スランブのコンクリートでも加振時の挙動が異なることが指摘されている¹⁾。未充てん部などの不具合の発生を未然に防止するためにも、高密度配筋部の型枠内に通常のスランブの範囲のコンクリートを打ち込んで締固めを行う場合について、事前の適切な配合選定の方法および充てん性評価技術が求められている。

現在、フレッシュコンクリートの施工性能を照査するためには、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)」による方法に従うことが重要である。しかし、高密度配筋の事例の多い高架橋の縦・横梁接合部のような場合には、仕様書のスランブや上記指針案で示された打込みの最小スランブが未充てん部の不具合の発生が防止できるものかどうかについて、実際の施工条件を考慮して施工計画段階で詳細な検討が必要であると考えられる。すなわち、配筋量や鉄筋の最小あきだけでなく、実際の配筋の状況を考慮し、コンクリートの打込み位置や振動機の挿入位置などが充てん性および材料分離に影響がないかどうかを検討しなければならない。

コンクリートの締固め作業の過程は、(1) 自重および振動による拡がり、(2) 鉄筋の間隙通過、(3) 密実化を行う締固めの3種類からなる²⁾。このような締固め作業の過程を経たコンクリートは、かぶり部分まで充てんされることとなる。このうち、高密度配筋部の型枠内では、

間隙通過性状が最も重要な特性と考えられ、加振下でのコンクリート自体の間隙通過性能を定量的に評価することが必要である。したがって、締固めを行う場合のワーカビリティについて、間隙通過性能を把握することにより、同一スランブでも加振時の挙動が異なるコンクリートの性状の相違を把握できるものと考えられる。

そこで、本研究では、経時変化の影響を除外するためにセメントを石灰石微粉末に置き換えた模擬コンクリートを用いて、ボックス形充てん試験装置により、加振時の間隙通過性能と併せて材料分離抵抗性を評価することとした³⁾。ただし、間隙通過性能のみでは、実施工での締固め作業におけるフレッシュコンクリートの充てん性を直接把握することは困難であるため、高架橋の高密度配筋部をモデルにしたケースについて、実際の配筋状況を模擬した試験体での充てん状況に関する実験を行い、かぶり部のコンクリートの充てん性および材料分離抵抗性について検討した。

以上の間隙通過性および模擬型枠での充てん性に関する結果から、事前の適切な配合選定の方法および充てん性評価技術に関して考察した結果を報告するものである。

2. 実験概要

2.1 間隙通過性実験の概要

(1) 使用材料・配合

本実験で使用した粉体材料は、実験中の流動性の経時

表-1 使用材料

粉体	石灰石微粉末 密度 2.71g/cm ³
細骨材	山砂 表乾密度 2.62 g/cm ³ 吸水率 1.51%
粗骨材	碎石 表乾密度 2.66 g/cm ³ 吸水率 0.66%
混和剤	AE 減水剤, AE 助剤

*1 清水建設(株) 技術研究所 安全安心技術センター 博(工) (正会員)

*2 清水建設(株) 技術研究所 安全安心技術センターグループ長 博(工) (正会員)

*3 清水建設(株) 土木事業本部 土木技術本部 先端技術部グループ長 博(工) (正会員)

表-2 コンクリートの配合

No.	目標 スランプ (cm)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
			水 W	石灰石 微粉末 LP	細骨材 S	粗骨材 G
1	8	45.0	150	257 (C=300)	847	1038
2	12		160		835	1024
3	18		170		823	1010
4	8		150	300 (C=350)	828	1016
5	12		160		816	1001
6	18		170		804	987
7	8		150	343 (C=400)	809	993
8	12		160		797	978
9	18		170		785	963

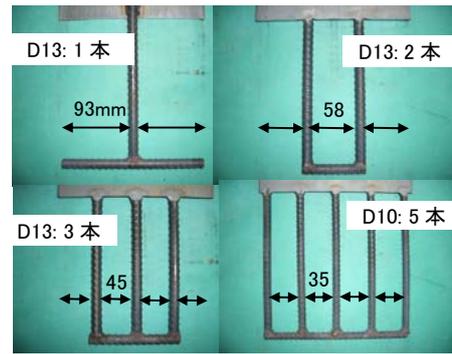


図-1 間隙通過試験の障害鉄筋の種類

変化の影響を除くための材料として化学的に不活性でセメントと比表面積が同程度の石灰石微粉末 (Lp) を用いた。粉体以外の材料については、表-1 に示すように、通常のコンクリート用材料を用いた。模擬コンクリートの配合は、単位セメント量 300, 350, 400kg/m³ のコンクリートの配合についてセメントの体積を石灰石微粉末で置換した。表-2 に示すように、単位水量を 150, 160, 170 kg/m³ として、粉体量一定としてスランプを 8~18cm に変化させる、あるいはスランプを一定として粉体量を変化させるコンクリートを製造した。

(2) 加振時の間隙通過性能に関する実験方法

本実験では、高流動コンクリート充てん装置を用いた間隙通過試験 (JSCE-F 511) のうちボックス形充てん装置を用いて、スランプの範囲のコンクリートの加振下での間隙通過性を評価することを試みた。間隙条件が及ぼす影響を把握するため仕切りゲート部に設置する流動障害は、図-1 に示すように 1, 2, 3, 5 本 (鉄筋あき各 93, 58, 45, 35mm) の 4 ケースについて実験を行った。A 室にコンクリート試料を上端まで投入し、A 室中央部に内部振動機 (棒径 28mm, 振幅 1.4mm, 振動数 200~258Hz) を挿入した後 (写真-1 参照)、仕切りゲートを開き内部振動機を作動させて、B 室の充てん高さ 300mm に達するまでの時間を測定した。達すると同時に内部振動機を停止した。充てん高さ 300mm を充てん時間で除して充てん速度 V(mm/s) とした。

ここで、同一時間で充てんした場合でも、A 室から B 室に流動する際に障害鉄筋部において材料分離を生じている可能性があるため、材料分離抵抗性についても検討した。内部振動機を停止させた状態において、A 室最下部および B 室上部の 2 箇所からコンクリート試料 2 リットルを採取し、それぞれ洗い分析試験を実施し、各試料中の粗骨材量を測定した。採取した粗骨材量と示方配合から算出される粗骨材量の差を示方配合量に対する百分率で表し、その絶対値の平均を材料分離抵抗性の指標 (粗骨材量変化率 δ (%)) とすることとした。粗骨



写真-1 振動機を挿入した間隙通過試験状況

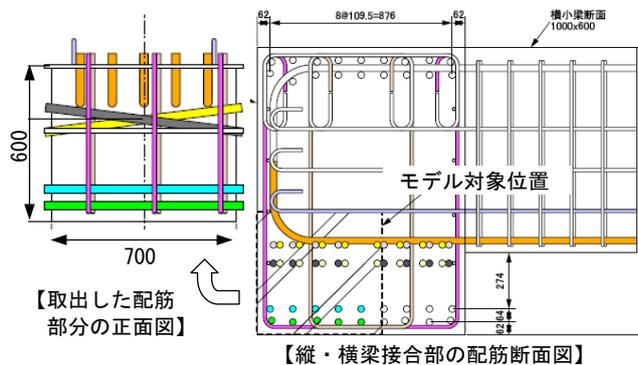


図-2 配筋モデル試験体の概要

材量変化率が大きいほど、障害鉄筋の通過前後で材料分離の程度が大きいことを示す。

2.2 モデル型枠内の充てん性状に関する検討

(1) 使用材料・配合

本実験で使用した使用材料および配合は、表-1 およ

び表-2に示すものと同一である。ただし、より多くのスランプの値に関する実験ケースを実施するため、表-2に示す配合を基本として任意のスランプ（6~21cm）のコンクリートを製造した。表-2に示していないスランプのコンクリートは、各単位量を一定としてAE減水剤の添加量を変化させて製造した。

(2) モデル型枠内の充てん性状に関する実験方法

実施工での締固め作業においては、配筋条件は各種構造部材によって多様に存在するため、本研究で用いた配筋条件は、高密度配筋の事例の多い高架橋の実配筋を参考にし、縦・横梁接合部の一部を取り出しモデル化したものを用いた。配筋モデル試験体の寸法は、縦60cm×横70cm×幅60cmである。主筋はD32、帯筋はD16が配置されており、取り出した対象部分の配筋量は約490kg/m³である（図-2参照）。前面の型枠はアクリル板とし、かぶり部分のコンクリートの充てん状況を目視で観察できるようにした。

任意のスランプの模擬コンクリートの投入位置は、かぶり部型枠側面から50cmの中央1カ所て高さ70cmとし、投入終了後、棒形振動機（棒径28mm、振幅1.4mm、振動数200~258Hz）を用いて締固めを行った。本実験で振動機は棒径28mmのものを用いており、一般に施工で用いられる棒径50mm程度のもので比較して小さい。これは、配合やスランプの影響が顕著にあらわれて充てん性に相違が生じやすくなるものと考え使用した。振動機の挿入位置は、かぶり部型枠側面から50cmの1箇所とした。コンクリートがかぶり部分まで充てんされない配合のコンクリートに対しては30cmの位置に挿入した。振動時間は10秒を1回として振動時間を増加させ、10秒ごとに型枠正面のアクリル板から観察されるかぶり部分のコンクリートの充てん状況を測定した。

充てん性状は、かぶり部前面を覆ったコンクリートの面積で評価した。すなわち、かぶり部分に未充てん部が発生して充てんされていない場合には、充てん面積から除外されることとなる。この振動途中の面積を、コンクリートが全量充てんされ完全に充てんされた状態の面積で除した値を充てん率S(%)とした。次に、加振後の最終状態でのかぶり部分のコンクリートを採取し、材料分離性状を把握するため粗骨材量変化率δ(%)を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 加振時の間隙通過性能の評価

配合No.4~6について、ボックス形試験装置の障害鉄筋の本数と充てん速度の関係の例を図-3に示す。充てん速度が大きいほど、B室の充てん高さ300mmに達するまでの時間が短いことを示す。配合No.4~6は、単位粉

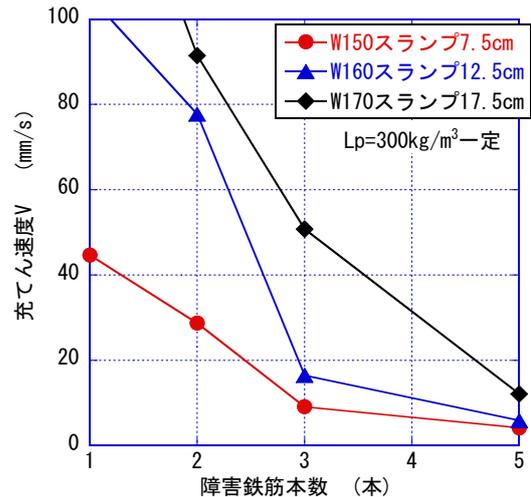


図-3 充てん速度（単位粉体量一定）

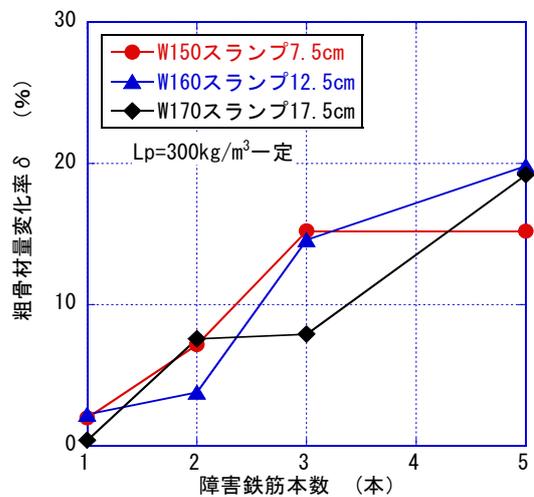


図-4 粗骨材量変化率（粉体量一定）

体量Lpを300kg/m³（セメント量換算で350kg/m³）で一定とし、単位水量を150, 160, 170 kg/m³とした場合のケースである。各ケースのスランプは、それぞれ7.5, 12.5, 17.5cmであった。図より、障害鉄筋の本数が増えるほど充てん速度が小さくなり、間隙通過に時間を要していることがわかる。スランプの範囲のコンクリートに振動を与える場合について、障害鉄筋の間隔が小さくなるほど間隙通過に時間を要することが確認された。同一の障害鉄筋本数の場合では、単位水量が小さくスランプの小さなケースほど、充てん速度が小さくなった。これは、スランプが小さい場合に加振時の流動性が低下することに加え、細骨材率を一定として単位水量を小さくすると同時に粗骨材量も多くなり鉄筋間を通過しにくくなるためと考えられる。このような傾向は、他の単位粉体量の場合においても同様であった。

図-4に、配合No.4~6についての障害鉄筋の本数と粗骨材量変化率の関係の例を示す。図より、障害鉄筋の本数が増えるほど、粗骨材量変化率が大きくなり、材料分離の程度が増大していることがわかる。間隙通過

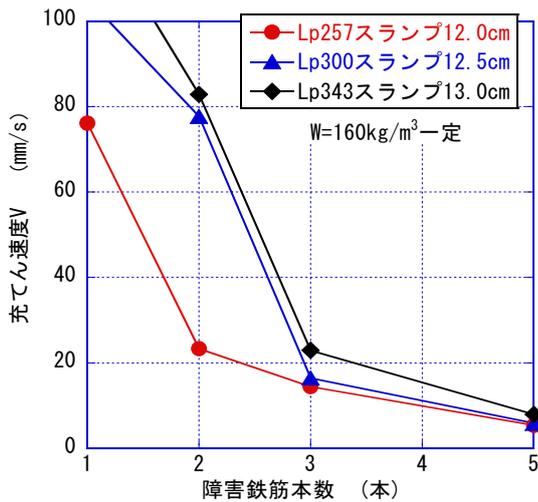


図-5 充てん速度(単位水量一定)

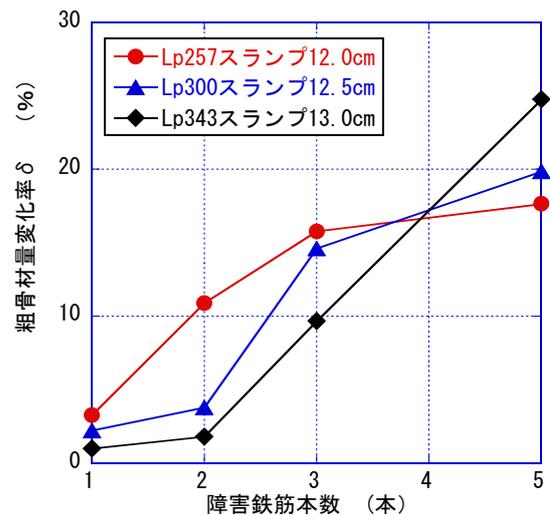


図-6 粗骨材量変化率(単位水量一定)

時の観察の結果、障害鉄筋の間隔が小さくなるほど鉄筋間で粗骨材が停滞する現象が認められた。このためモルタルあるいはセメントペーストが多くB室に流入して材料分離の程度が増大したものと考えられる。配合は、単位粉体量一定で単位水量を増加させてスランプを大きくしているが、そのスランプと粗骨材量変化率の間には明確な関係が認められず、また図-3の結果との関連性も認められなかった。

配合 No.2, 5, 8 について、単位水量を 160 kg/m^3 で一定とし単位粉体量 L_p を 257, 300, 343 kg/m^3 とした各ケースの充てん速度を図-5に示す。各ケースのスランプは、12.0, 12.5, 13.0cm であった。スランプがほぼ一定にもかかわらず、特に障害鉄筋本数 1, 2 本の範囲において、単位粉体量の相違により障害鉄筋の本数と充てん速度の関係は異なる傾向を示した。鉄筋本数 1, 2 本では、配合の相違による充てん速度の変化が顕著となり、単位粉体量の小さな配合ほど充てん速度が小さくなる傾向となった。ペーストの性状や量、それに伴う粗骨材の量の変化などが影響しているものと考えられる。鉄筋本数 3 本以上では、単位粉体量の影響は比較的小さくなる傾向となった。これは、配合の影響よりも鉄筋のあきの影響が卓越したことにより充てん速度の差が小さくなったものと考えられる。他の単位水量で単位粉体量を変化させてスランプを一定としたケースにおいても、同様の傾向が認められた。

材料分離抵抗性については、図-6に示すように、単位水量を一定として、粉体量を変化させてスランプをほぼ一定とした条件では、単位粉体量と粗骨材量変化率の間に関連性が認められた。鉄筋 3 本までの範囲では、単位粉体量が小さい配合ほど粗骨材量変化率が大きくなる結果となった。またこの傾向は、図-5の充てん速度の結果とも相関がある結果となった。単位粉体量が多い配合

ほど鉄筋間での粗骨材の停滞を回避することができ、加振下での粗骨材の材料分離を抑制できるものと考えられる。

以上のことから、本試験方法により、スランプだけではなく使用材料や配合による間隙通過性の相違を評価できると考えられ、粗骨材の材料分離を抑制した間隙通過性のよい配合の選定が可能であると考えられる。

3.2 モデル型枠内の充てん性状に関する検討

写真-2および写真-3に、スランプが12cmの場合とスランプが17.5cmの場合において10秒間振動を与えた後のかぶり部分の充てん状況の例を示す。両者とも、振動機挿入位置はアクリル面から50cmの位置1箇所の場合である。充てん率は、目視により観察し、かぶり部前面を覆ったコンクリートの面積で評価した。

スランプ6~21cmのコンクリートの充てんの結果から、形枠内への打込みは、一般にスランプが小さいほど投入箇所でも山形に堆積しやすく、鉄筋に流動を拘束されて自重で拡がりにくい状況が観察された。その結果、振動を10秒与えた後も、スランプが小さいほど写真-2に示すようにかぶり部分までコンクリートが流動せず、未充てん部を生じさせる状況となった。このようにコンクリートがかぶり部分まで充てんされない配合のコンクリートに対しては、振動機をかぶりから30cmの位置に近付けて挿入し、充てん状況の観察を行った。

図-7および図-8に、振動機挿入位置がそれぞれかぶりから30cmおよび50cmの場合における、モデル形枠内でのスランプとかぶり部分充てん率の関係を示す。図-7はスランプが比較的小さい場合(6~16.5cm)であり、振動秒数が0秒の場合はほとんど充てん率0%である。これはコンクリートを投入したのみの状態では、かぶり部分にコンクリートが到達していない状態を示すもの



写真-2 モデル型枠内のかぶり部分の充てん状況
(配合 No. 2 スランプ 12cm 振動秒数 10 秒後の状態)



写真-3 モデル型枠内のかぶり部分の充てん状況
(配合 No. 9 スランプ 17.5cm 振動秒数 10 秒後の状態)

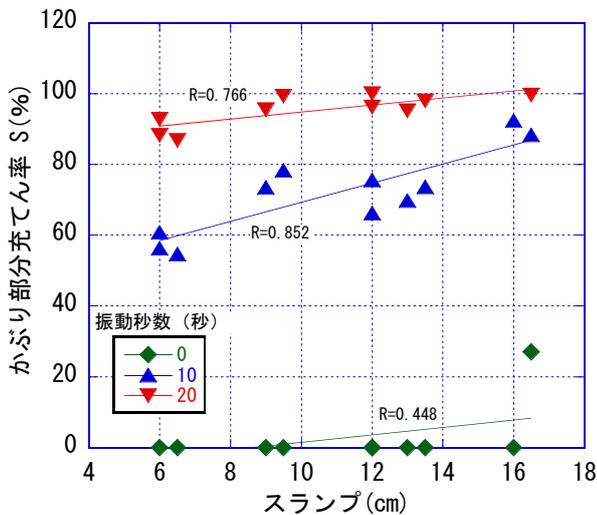


図-7 スランプとかぶり部分の充てん率の関係
(振動機の位置 : かぶりから 30cm)

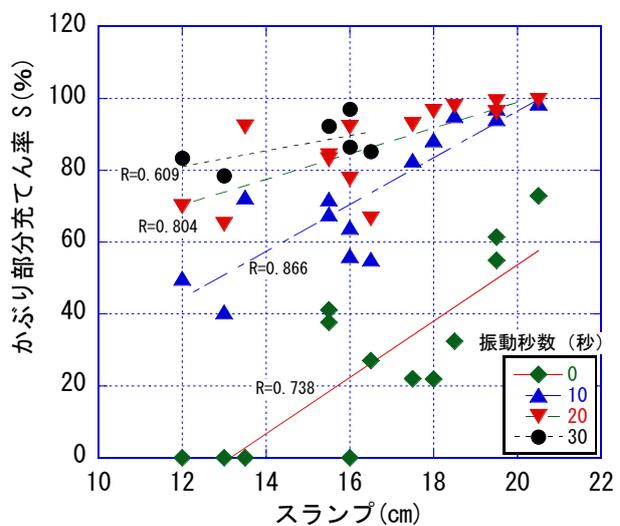


図-8 スランプとかぶり部分の充てん率の関係
(振動機の位置 : かぶりから 50cm)

である。かぶりから30cmで振動を10秒、20秒と増加させるに伴い、かぶり部分の充てん率が増加し、スランプ8cm程度以上では振動秒数20秒でほぼ100%の充てん率となった。

図-8は、スランプが比較的大きい12~20.5cmの範囲について、かぶりから50cmに振動機を挿入した場合のかぶり部分の充てん率を示したものである。スランプが大きくなると、投入したコンクリートの自重のみでかぶり部分まで達するため、振動秒数0秒でもスランプが大きくなるほど充てん率は増加する傾向となった。また、振動機挿入位置がかぶりから30cmの場合と同様に、振動を10秒、20秒と増加させるに伴い、かぶり部分の充てん率が増加した。しかしながら、スランプ18cm程度以上では振動秒数20秒でほぼ100%の充てん率となるものの、それ以下では振動秒数30秒でも充てん率100%とならない場合もあった。これは、振動機の位置が50cmであるため、スランプが比較的大きい場合には振動が伝達して流動化させる有効範囲も大きくなるが、スランプが小さい配合の場合には、かぶりの位置が振動の効果の有効範囲外

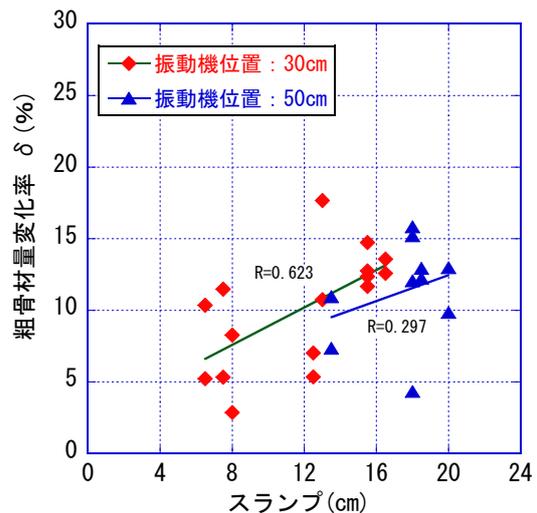


図-9 かぶり部分のコンクリートの粗骨材量変化率

になることを示すものである。したがって、本実験のような配筋条件の例では、仮に内部振動機の位置が50cmの位置に限定された場合、未充てん部の発生を防止するためにはスランプ18cm程度以上のコンクリートを選定する必要がある。一方、内部振動機を30cmの位置に挿入す

ることが可能な場合には、8cm程度以上のものを選択することが可能となる。

かぶり部分のコンクリートの材料分離について、スランプと粗骨材量変化率の関係を図-9に示す。ばらつきが大きいため、振動機の挿入位置を30cmと50cmとに分類することで若干の傾向が認められた。いずれの振動機の挿入位置でもスランプが大きくなるに伴い、粗骨材量変化率が大きくなり材料分離の程度が大きくなる傾向を示していると考えられる。これは、スランプの大きなコンクリートのほうが投入時の落下、振動の付与および鉄筋間の通過により、より材料分離しやすい傾向にあるものと考えられる。しかしながら、同一のスランプでも粗骨材量変化率にばらつきがあることは、間隙通過性に関する図-4および図-6の結果で示したように、スランプの大きさと粗骨材量変化率には明確な関係がないこと、および同一のスランプでも粉体量の相違によって粗骨材量変化率が異なることと同様の現象が型枠内の充てんにおいても生じたためと考えられる。

粗骨材の材料分離については、図-9に示すように3~20%程度以下の変化量が生じていたが、何%以下の変化量であればよいかについては、硬化後の品質も考慮して⁴⁾粗骨材量変化率の許容値について今後検討を行う必要がある。

以上のことから、かぶり部分の充てん性と材料分離抵抗性を併せて考慮すると、鉄筋量やスランプの大きさに応じて振動機の位置（挿入間隔）および振動機の挿入時間を決定することが未充てん部の発生を防止し、材料分離の程度をより低下させるうえで極めて重要であることが確認された。

4. まとめ

経時変化の影響を除外するためにセメントを石灰石微粉末に置き換えた模擬コンクリートを用いて、ボックス形充てん試験装置を用いて加振時の間隙通過性能および材料分離抵抗性を評価し、さらに高架橋の高密度配筋部をモデルにした型枠モデルでの充てん状況に関する実験を行い、かぶり部のコンクリートの充てん性および材料分離抵抗性について検討した。その結果、以下の

ことが明らかとなった。

- (1) ボックス形充てん試験装置を用いた加振時の間隙通過性能に関する試験により、スランプだけではなく使用材料や配合による間隙通過性の相違を評価できると考えられ、粗骨材の材料分離を抑制した間隙通過性のよい配合の選定が可能である。
- (2) 型枠モデルでの充てん状況に関する実験では、内部振動機の位置が50cmの位置に限定された場合、未充てん部の発生を防止するためにはスランプ18cm程度以上のコンクリートを選定する必要があり、内部振動機を30cmの位置に挿入することが可能な場合には、8cm程度以上のものを選択することが可能となる。
- (3) かぶり部分の充てん性と材料分離抵抗性を併せて考慮すると、鉄筋量やスランプの大きさに応じて振動機の位置（挿入間隔）および振動機の挿入時間を決定することが未充てん部の発生を防止し、粗骨材の材料分離を抑制するうえで極めて重要である。

今後さらに施工条件を変化させた実験を行い、事前の適切な配合選定の方法および充てん性評価技術を構築する予定である。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会コンシステンシー評価指標小委員会編：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), pp.11-17, 2003.7
- 2) 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), pp.58-64, 2007.3
- 3) 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
- 4) 日本コンクリート工学協会フレッシュコンクリートの挙動研究委員会編：コンクリートの振動締固めに関する実験報告書, 1990.3