

論文 振動締固め時の加速度伝播がかぶりコンクリートの締固め性および品質に及ぼす影響

森山 崇大*1・宇治 公隆*2・上野 敦*3・大野 健太郎*4

要旨：細骨材率が異なるコンクリートを内部振動機の振動によって鉄筋間通過させ、かぶり部を充填した時に鉄筋の干渉によって生じる材料分離がかぶり部のコンクリート間にもたらす品質変化について、充填速度や硬化後の小径コアを用いて検討した。モルタル体積が多く、充填性が高い s/a が 47% のコンクリートは鉄筋あきの大きさや内部振動機からの距離の影響を受けにくい、鉄筋近傍で材料分離が著しく、鉄筋内側とかぶり部で材料組成が大きく異なる可能性を示した。一方 s/a が 42% のコンクリートは、材料分離抵抗性が大きく、鉄筋量が増加に対しても締固め時間の調整で十分に充填できる可能性がある。

キーワード：振動締固め、応答加速度、充填性、小径コア

1. はじめに

コンクリートは打込み直後に適切な締固めを行い、気泡や空隙の少ない密実なものとしなければならない。通常、現場でのコンクリートの締固めには、内部振動機が用いられるが、適切な締固めが行われず、空隙が残存しているコンクリートは、力学的性質、水密性や耐久性などが低下する可能性がある。また、近年のコンクリート構造物は耐震基準の見直しによる鉄筋量の増加が進んでおり、柱や壁などの施工において、構造物の耐久性と密接に関わるかぶり部の締固め作業が困難となる場合が多い。硬化後のコンクリートの耐久性予測は、コンクリートが型枠の隅々まで充填し、かつ計画通りの組成配合となっていることを前提としている。しかしながら、配筋の内側にコンクリートを投入し、内部振動機によってコンクリートをかぶり部に流動させて充填した場合、鉄筋の干渉によりモルタルと粗骨材が分離し、かぶり部のコンクリートが計画段階での配合とは異なるものとなり、本来の品質および耐久性を発揮出来ない可能性がある。

本研究では、同一スランブで配合が異なるコンクリートを内部振動機によって配筋の内側からかぶり部に流動させてかぶり部を充填した場合における、配筋の内側とかぶり部の締固め性および硬化したコンクリートの物性を検討した。

2. 応答加速度測定

2.1 実験概要

(1) 使用材料および配合

本実験の使用材料およびコンクリートの配合を表-1、表-2 に示す。配合は s/a を 37, 42, 47% に変化させた 3

表-1 使用材料

種類		品質	
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm ³ ブレン値 3210cm ² /g	
細骨材	粗目	砕砂(S1)	F.M. 3.06 表乾密度 2.59g/cm ³ 、吸水率 2.59%
	細目	陸砂(S2)	F.M. 1.58 表乾密度 2.65g/cm ³ 、吸水率 2.89%
粗骨材	砕石	F.M. 6.57 表乾密度 2.62g/cm ³ 、吸水率 1.44%	
混和剤	AE減水剤	A1	リゲニンスルホン酸化合物と ポリオール複合体
	AE剤	A2	アルキルエーテル系

表-2 配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤(g)	
					W	C	S1	S2	G	A1	A2
20	8	4.5	55	37	156	284	546	137	1170	3408	2272
				42	164	298	609	152	1059	2980	1788
				47	171	311	671	168	952	2488	1866

水準とした。スランブおよび空気量の目標値をそれぞれ 8±2.5cm、4.5±1.5%と設定した。

(2) 使用型枠

型枠の形状寸法を図-1 に示す。幅 300mm×高さ 300mm×長さ 1000mm とし、内部振動機により加振した時の反射波の影響を低減するため、型枠の側面と底面に緩衝材として発泡スチロールを設置した。また、加振時の応答加速度を測定するため、内部振動機挿入位置からの距離が 100, 200, 300, 400, 500, 600mm で、高さから底面から 125mm となる位置に加速度センサを設置した。内部振動機表面にも加速度センサを設置した。

(3) 実験方法

図-1 に示した型枠に高さが 250mm となる位置までコンクリートを投入し、内部振動機により 60 秒間加振

*1 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 (学生会員)

*2 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域教授 博士(工学) (正会員)

*3 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域准教授 博士(工学) (正会員)

*4 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域助教 博士(工学) (正会員)

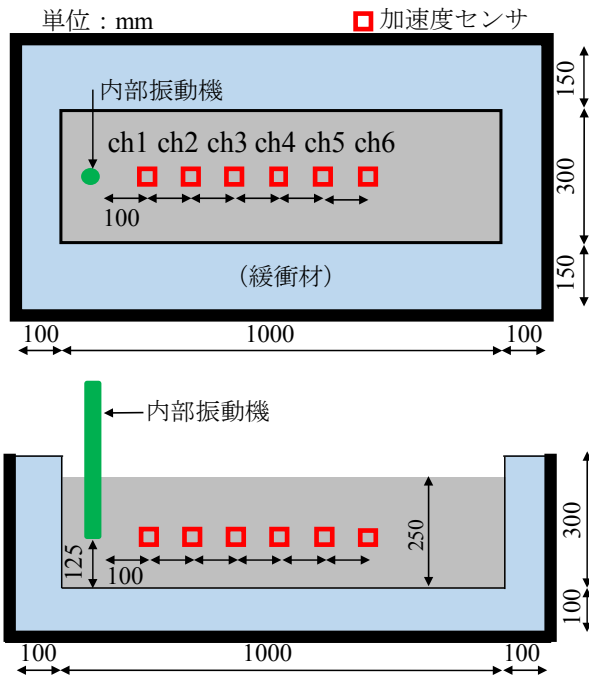


図-1 型枠の形状寸法

し、応答加速度を測定した。使用した内部振動機は、直径 28mm、出力 280W、電圧 100V、電流 5A、振動数 500Hz である。

2.2 実験結果

(1) 応答加速度測定結果

応答加速度の測定は、サンプリング間隔 1.00×10^{-4} 秒で行った。各時点の前後 0.5 秒間における最大加速度と最小加速度の絶対値を平均した値を応答加速度とし、秒単位で解析を行った。

図-2 に各配合における振動開始から 60 秒間の応答加速度を示す。図-2 において ch1 は内部振動機挿入位置からの距離が 100mm の位置にある加速度センサを示し、ch2 は距離が 200mm、ch3 は距離が 300mm と ch6 までそれぞれ対応している。結果から、s/a が 42% の配合においては、振動開始 1 秒程度から最も離れた位置に配置した ch6 まで加速度伝播が確認でき、コンクリートの材料分離抵抗性が大きい可能性がある。一方 s/a が 37% の場合、ch5、ch6 で加速度の値は極めて小さく、60 秒間変化が見られなかった。s/a が 47% の配合においても同様の傾向を示したが、振動開始から 20 秒が経過した時点で ch4～ch6 で加速度伝播が確認できた。さらに s/a が 37.47% の場合では、振動開始から 40 秒程度までの間 ch1 と ch2 の応答加速度の差が大きいことから、内部振動機からの距離が 100～200mm の間で加速度伝播の減衰が著しいと考察できる。この結果から、スランプ性状が同一のコンクリートでも細骨材率の違いが加速度伝播に与える影響は顕著であることが明らかとなった。

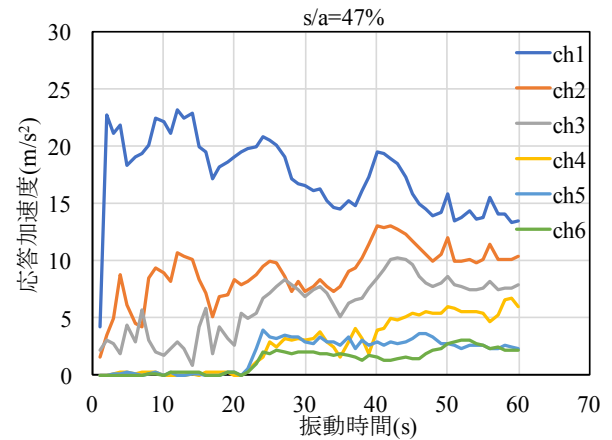
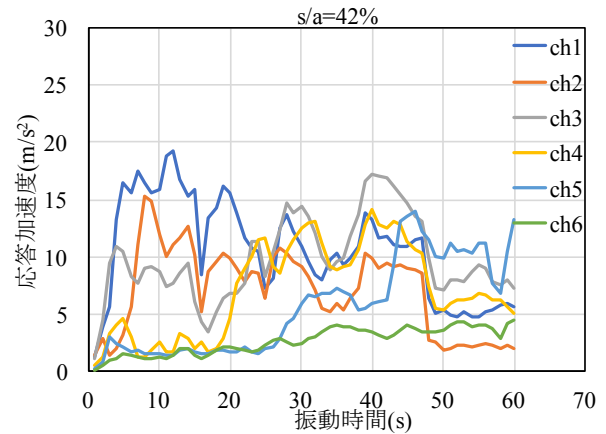
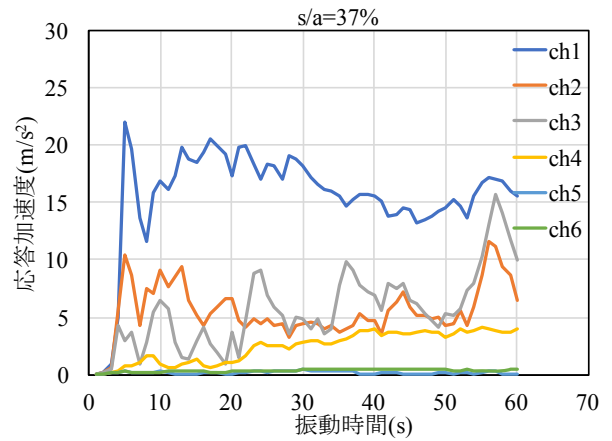


図-2 各配合における応答加速度

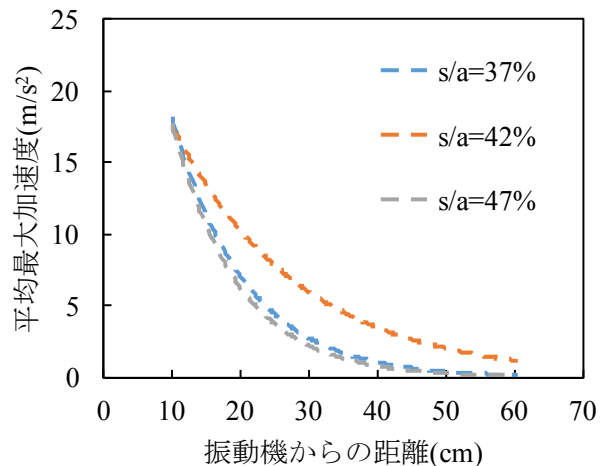


図-3 応答加速度近似曲線

(2) 応答加速度推定

コンクリートの締固め時間について、土木学会コンクリート標準示方書では、1カ所あたり5～15秒を目安としている。図-3に本実験で使用した3配合のコンクリートにおける各センサ位置の5～15秒間の平均応答加速度から求めた応答加速度推定式の近似曲線を示す。また、次の(1)～(3)を図-3の近似曲線から得られた応答加速度推定式とする。

$$y = 46.53e^{-0.104x} \quad (s/a=37\% \text{の場合}) \quad (1)$$

$$y = 30.128e^{-0.054x} \quad (s/a=42\% \text{の場合}) \quad (2)$$

$$y = 49.989e^{-0.104x} \quad (s/a=47\% \text{の場合}) \quad (3)$$

ただし、 $10\text{cm} \leq x \leq 60\text{cm}$ とする。

ここに、

y : 応答加速度推定値 (m/s^2)

x : 内部振動機挿入位置からの距離 (cm)

$s/a=37, 47\%$ の場合、加速度伝播のメカニズムは異なるが、応答加速度推定式は、ほぼ同様の傾向を示し、配合設計における適切な細骨材率選定の重要性が示された。

3. コンクリートの鉄筋通過性および硬化後の物性

3.1 実験概要

(1) 使用材料および配合

使用材料および配合は、2. 応答加速度測定で用いたものと同様である。

(2) 使用型枠

型枠の形状寸法を図-4に示す。幅600mm×高さ400mm×長さ650mmとし、内部振動機により加振した時の反射波の影響を低減するため、型枠の側面と底面に緩衝材として発泡スチロールを設置した。

鉄筋のかぶりについては、土木学会コンクリート標準示方書(設計編)りや日本建築学会「鉄筋コンクリート造配筋指針」²⁾では、最大のかぶりについては具体的な表記はなく、柱・梁・耐力壁で屋外にある場合の設計かぶりは50mm以上と規定されている。したがって本実験では、硬化後のかぶり部からコア供試体を採取し圧縮強度試験を行うため、JIS A 5307「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」に規定されている「コア直径は粗骨材最大寸法の3倍以上」を満たすため、かぶりが70mmとなる位置に鉄筋を配置し、かぶり部には底面から125mmの高さに加速度センサを設置した。型枠のかぶり側の端面はアクリル板とし、かぶり部へのコンクリートの流動の様子を観察できるようにした。

(3) 配筋条件

型枠に設置する鉄筋の概要を図-5に示す。D22の異形鉄筋を使用した。鉄筋あきに関し、土木学会コンクリート標準示方書^りでは、「柱における軸方向鉄筋のあきは、

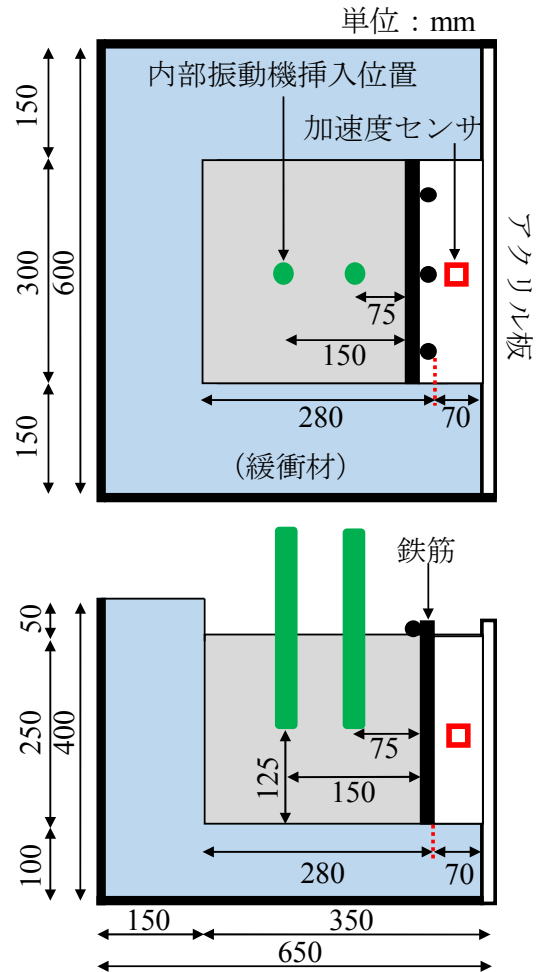


図-4 型枠の形状寸法

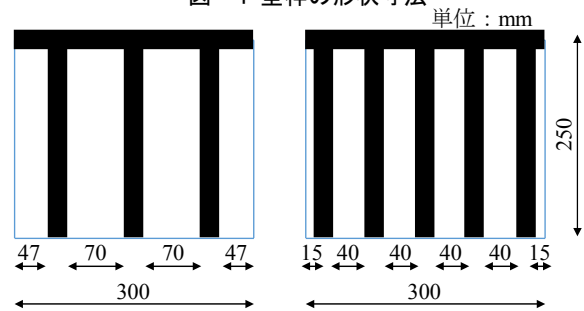


図-5 配筋概要図

40mm以上、粗骨材最大寸法の4/3倍以上、鉄筋直径の1.5倍以上」と規定している。本研究においては、柱部材を主な対象として実験を行った。設置する鉄筋は縦方向のみに配列された2種類とし、鉄筋のあきはそれぞれ40mmおよび70mmとした。すべての型枠において型枠の都合上、鉄筋あきが異なる部分があるが、中央付近の挙動が卓越すると考え両側部のあきについては、今回は検討の対象外とした。

(4) 実験方法

図-4に示した型枠にコンクリートを投入する際、かぶり部にコンクリートが流入しないように仕切り板を設置した。型枠のかぶり部内側に、全体の高さが型枠底面から約250mmとなるようにコンクリートを投入した。

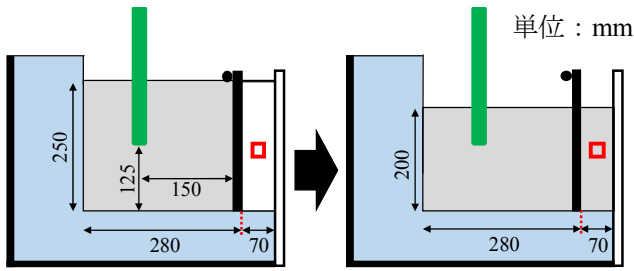


図-6 加振前後の様子

図-6 のとおり、内部振動機により振動締めめを開始すると同時に仕切り板を引き上げ、かぶり部にコンクリートを流動させながら締めめを行った。

予備試験として $s/a=42\%$ 、鉄筋あき 70mm の条件で内部振動機挿入位置を鉄筋からの距離 150mm で行ったところ、振動開始から約 8 秒で投入したコンクリートはかぶり部に流動し、全体として高さ約 200mm となった(図-6)。この結果より、本実験では内部振動機による加振時間を 8 秒間とし、かぶり部の充填高さ率 100% を 200mm に設定した。

締めめ開始から終了までのかぶり部にコンクリートが流動する様子をデジタルビデオカメラで撮影した。内部振動機挿入位置の距離によるコンクリートのかぶり部充填の変化を比較するため、内部振動機挿入位置は、鉄筋から 75, 150mm の 2 箇所とした。使用した内部振動機は 2.1 と同じである。

図-7 に硬化後の試料からのコアの採取および供試体の作製方法を示す。コアの採取は湿式にて行った。内径 62mm のコアビットを使用し、供試体を 14 日間湿布養生した後、鉄筋前後から各 3 本ずつ計 6 本採取し、さらに 14 日間水中養生した。打設から 28 日後、コアの上部と下部を均等にカットし、高さ 120mm となるように供試体を作製した。各供試体について寸法と質量を測り、圧縮強度試験を行った。小径コア圧縮強度試験では $\phi 100\text{mm}$ コアに比べ試験値の最小値が低くなり、平均圧縮強度が小さくなることが指摘されている³⁾。よって、小径コアを用いた圧縮強度試験では、コア 6 本による圧縮強度の推定精度が $\phi 100\text{mm}$ のコア供試体 3 本による測定精度と同等であると報告されている⁴⁾。本実験においては、型枠の寸法上、コアの採取がかぶり部、鉄筋内側部分から 3 本ずつとなっているため、圧縮強度はあくまで各配合、配筋条件および振動機挿入位置による影響を比較するための参考値として扱っている。

3.2 実験結果および考察

(1) かぶり部充填高さ率とかぶり部コアの圧縮強度

内部振動機による締めめ開始後の、かぶり部にコンクリートが流動する様子を撮影したデジタルビデオカメラの映像から、かぶり部のコンクリート高さを測定した。

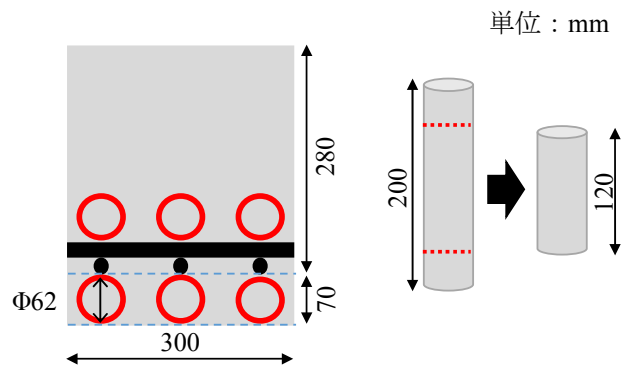


図-7 コア供試体の作製方法

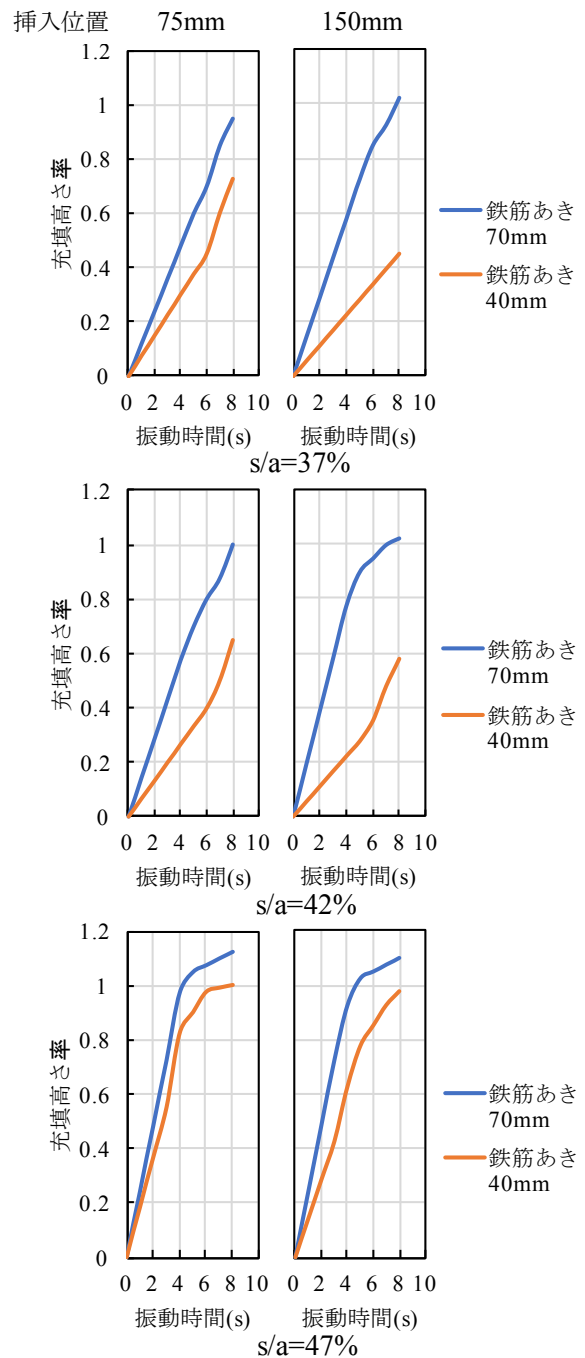


図-8 充填高さ率と振動時間の関係

なお、この充填高さは、アクリル板全体の平均充填高さである。

図-8 に充填高さ率と振動時間の関係、図-9 に内部振動機挿入位置 75mm の時のかぶり部コアの圧縮強度の結果を示す。配合、振動機挿入位置に関わらず、鉄筋あき 70mm の場合はいずれのケースでも 8 秒間で充填高さ率が 95%を超えた。s/a=47%では、いずれの配筋、内部振動機挿入位置でも振動開始から約 5 秒間で充填高さ率 80%に達し、高い充填性を示したが、挿入位置 75mm のケースにおいて、鉄筋あきが小さくなることにかぶり部の圧縮強度が低下した。このことは、見かけの充填性は良好でも、実際のかぶり部の材料組成が異なる可能性を示していると考えられる。また、充填高さ率が 8 秒間で 80%に満たなかった s/a=37%においても同様の傾向となり、鉄筋あき 40mm、内部振動機挿入位置 150mm とした時、写真-1 のように明らかに充填不良が生じ、圧縮強度試験が行えなかった。

以上の結果から、鉄筋あきが小さくなる影響により、s/a=37 および 47%では粗骨材が鉄筋近傍にて滞留し、特に s/a=47%においては、モルタルだけがかぶり部へ流動していると考察できる。なお、s/a=42%に関しては、2.2 の結果から材料分離抵抗性が大きいことが考察できたが、本実験の結果からも、内部振動機挿入位置と鉄筋あきの差異による鉄筋内側およびかぶり部の圧縮強度の値の誤差範囲が s/a=37, 47%と比較して小さいことが示された。

(2) 充填速度と充填完了時間の比較

コンクリートがかぶり部に流動する際に、鉄筋の干渉により材料分離が生じると鉄筋の内側とかぶり部で材料組成が異なる可能性がある。図-10 に鉄筋内側のコアとかぶり部のコアの圧縮強度の変化を示す。なお、s/a=37%、鉄筋あき 40mm、内部振動機挿入位置 150mm では、充填不良により採取したコアから圧縮強度を測定することができなかった。いずれのケースにおいても s/a=42%の圧縮強度の鉄筋前後における変化率が小さい傾向となっている。図-8 の結果と合わせて検討すると、s/a=42%のコンクリートは、鉄筋あきの大小が充填速度に与える影響は他の 2 配合と比較して顕著であるが、充填速度が低下してもコンクリートが分離せず、一体となって鉄筋間通過しているため、鉄筋前後における材料組成の変化も少ないと考察できる。

唯一、鉄筋あき 70mm、内部振動機挿入位置 75mm のケースにおける s/a=37%のコンクリートでかぶり部の圧縮強度試験値が鉄筋内側の試験値を上回る結果となった。このような結果となった原因は明確ではないが、内部振動機挿入位置 75mm の場合、挿入位置とコア採取位置が一部重なることによる影響も考えられる。

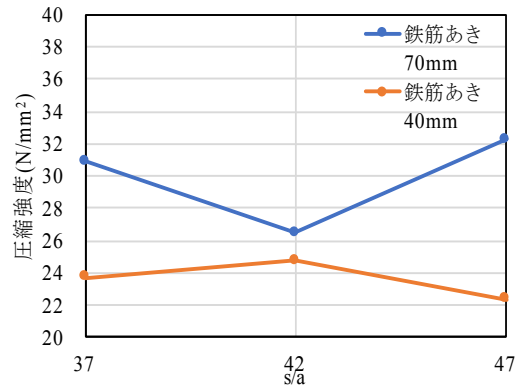


図-9 内部振動機挿入位置 75mm, かぶり部コアの圧縮強度



写真-1 s/a=37%, 鉄筋あき 40mm, 内部振動機挿入位置 150mm

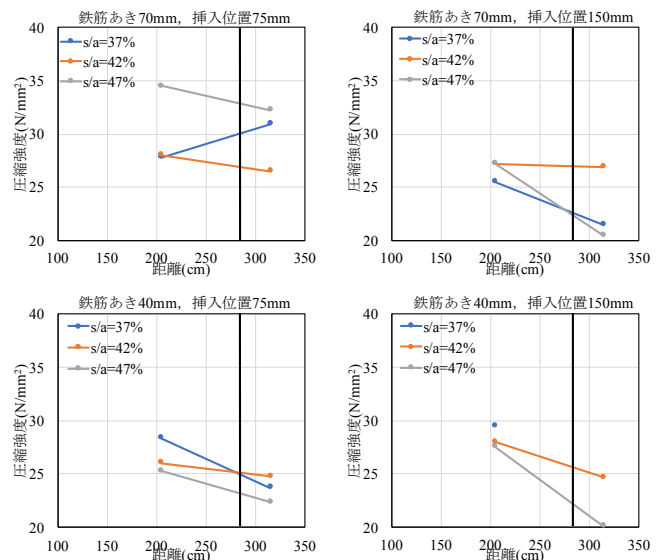


図-10 鉄筋前後における圧縮強度の変化

(3) 硬化後のコア断面による比較

コア供試体断面の観察による骨材含有率の差異を比較するために、採取したかぶり部のコアの内、中央に位置するコア供試体をコンクリートカッタにより縦に切断した(図-11)。カットしたコア供試体の断面をデジタルビ

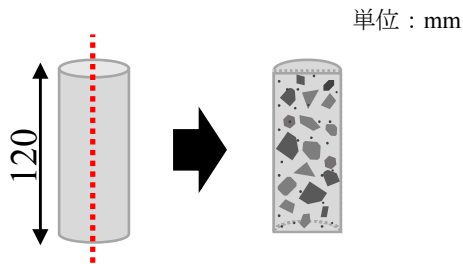


図-11 コア供試体の断面確認方法

デオカメラで撮影したものの内、最も骨材面積率に差が出た内部振動機挿入位置 75mm，鉄筋あき 40mm を写真-2 に示す。

目視による結果から，写真-2 に示したものの以外でも $s/a=47\%$ では，断面に含まれる骨材が他の 2 つの配合と比べ少なく，モルタル部の占める割合が多い傾向が見られた。 $s/a=42$ および 37% においては，明確な骨材量の差異は認められなかったが， $s/a=42\%$ では微細な空隙は見られるものの， $s/a=37\%$ では微細なものから大きな空隙まで観察された。元々，ペースト体積の少ないコンクリートの $s/a=37\%$ は，鉄筋の内側にコンクリートを投入した時点からエントラップトエアが多いと考えられ，内部振動機によって振動を加えた際にそのエントラップトエアが試料の上方から抜けることなく，集合したことによってできた空隙であると考察している。

4. 結論

- (1) スランプが同じコンクリートでも，細骨材率の相異により加速度の伝播性状は異なる。本研究の結果では， $s/a=37\%$ の加速度伝播範囲は，振動機より約 400mm である。また， $s/a=47\%$ の場合，加速度が振動機より 300mm 以上離れた場所に伝播するためには，約 20 秒程度を必要とする。
- (2) 5～15 秒間の平均応答加速度から求めた応答加速度近似曲線では， $s/a=37$ および 47% でほぼ同様の傾向を示し，配合設計における適切な細骨材率選定の重要性が示された。
- (3) $s/a=47\%$ のコンクリートは充填速度に関しては，内部振動機挿入位置や鉄筋あきによる影響を受けにくい傾向にあるが，本研究で用いた $\phi 62\text{mm}$ のコア供試体の圧縮強度試験値の結果は，鉄筋内外で著しく変化した。また，鉄筋あきによる影響でも同様の傾向を示した。一方 $s/a=42\%$ のコンクリートは，鉄筋あきの影響による充填速度の低下は顕著であるが，鉄筋前後での圧縮強度の変化が小さいことから，

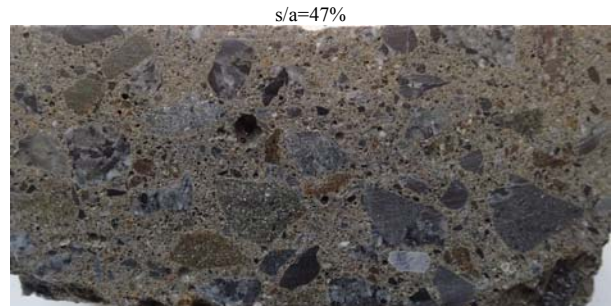
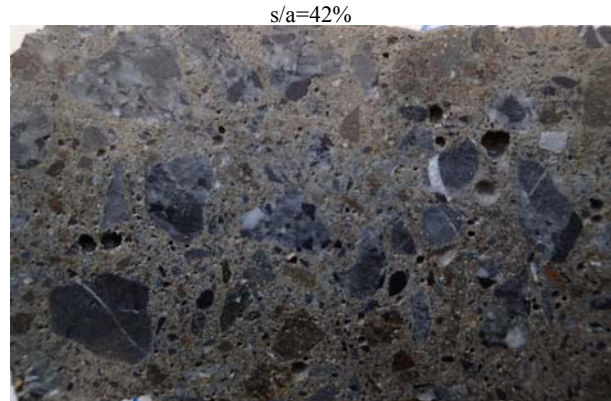
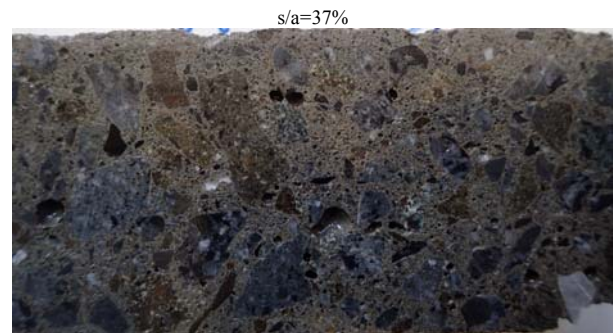


写真-2 内部振動機挿入位置 75mm，鉄筋あき 40mm

材料分離抵抗性が大きいことが示された。

- (4) コア供試体断面の骨材面積率を解析する手法を確立する必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕，2012
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造配筋指針・同解説，2010
- 3) 清水厚年ら：コアの寸法の違いによる試験値の差に対する各種要因の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，pp805-810，2008
- 4) (財)土木研究センター：建設技術審査証明報告書 土木系材料・製品・技術 小口径コアによるコンクリート構造物の調査技術「ソフトコアリング C⁺」，2003.12