

論文 配合が相違するコンクリートの締固め特性に及ぼす配筋ならびに締固め条件の影響

古川 凌輔*1・宇治 公隆*2・上野 敦*3・大野 健太郎*4

要旨: 構造物の耐久性を確保するためには、かぶり部まで密実で均質なコンクリートとしなければならない。本研究では、細骨材率が異なるスランプ 8cm のコンクリートを組み立て鉄筋の内側にのみ打ち込み、内部振動機によってかぶり部へ流動させた場合を対象に、かぶり部の締固め特性に及ぼす配筋条件ならびに締固め条件の影響を明らかにした。径 22mm で芯間隔が 90mm 以下で格子状に組まれた鉄筋の場合、細骨材率が低いほどかぶり部および鉄筋近傍の締固めが不十分となり、未充填部が残る危険性が高く、内部振動機の挿入位置および振動時間を施工条件に応じて適切に定める必要があることを明らかにした。

キーワード: 内部振動機、締固め、充填性、振動伝播特性、締固めエネルギー

1. はじめに

コンクリートは打ち込み後、十分に締固めを行い、空隙を排除して密実なものとしなければならない。締固めが十分でないと、硬化後のコンクリートの力学的性質、水密性、耐久性が損なわれる。一方、過剰な振動は材料分離を生じさせ、コンクリートの品質を低下させる原因となる。

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、振動機を挿入する間隔、振動を加える時間がコンクリートの品質を決定することになる。すなわち、構造物の品質を確保するためには、適切な時間、適切な挿入間隔で締固めを行うことが重要である。土木学会コンクリート標準示方書をはじめとするコンクリートの締固めに関する基準では、内部振動機の挿入間隔、振動時間、締固め終了の目安が記述されている¹⁾が、それらは定性的表現に止まり、内部振動機を用いた締固めは、作業員の経験や判断に委ねられているのが現状である。締固めが適切に行われなかった場合、豆板やあばた、砂すじなどの施工欠陥を引き起こすことになる。施工欠陥を防止し、構造物の品質を確保するためには、施工条件に応じた適切な締固めを行い、密実でかつ均質なコンクリートを形成することが重要である。

近年では、耐震基準の見直しによる配筋の過密化が進行しており、かぶり部の締固め作業が困難となる場合が多い。柱や壁などの施工において、組み立てた鉄筋の内側にコンクリートを打ち込み、締固めを行う場合、かぶり部にコンクリートを流動させ、密実で均質な状態にしておくてはならない。かぶり部の充填性向上は特に構造物の耐久性にとって重要であるが、かぶり部の充填性に着

表-1 使用材料

種類		品質	
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	粗目	S1	神奈川県相模原産砕砂、粗粒率 2.82 表乾密度 2.59g/cm ³ 、吸水率 2.57%
	細目	S2	神奈川県相模原産陸砂、粗粒率 1.58 表乾密度 2.65g/cm ³ 、吸水率 2.89%
粗骨材		G	神奈川県相模原産砂岩砕石、粗粒率 6.62 表乾密度 2.60g/cm ³ 、吸水率 2.06%、実積率 60.2%
混和剤	AE減水剤	A1	リグ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 コンクリートの配

スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤 (C×%)	
				水 W	セメント C	細骨材		粗骨材 G	A1	A2
8	4.5	55	37	160	292	538	138	1150	0.5	0.01
			42	168	305	601	154	1041	0.4	0.008
			47	175	319	661	169	935	0.25	0.006

目した研究^{2)・3)}は比較的少ないのが現状である。また、コンクリートの使用材料の多様化や良質な骨材の入手が困難となっており、スランプが同一であっても締固め性は異なり⁴⁾、スランプ試験のみで施工性能の評価を行うことは困難となっている。

そこで本研究では、細骨材率が異なるスランプ 8cm のコンクリートを内部振動機の振動によってかぶり部へ流動・充填させた場合を対象に、かぶり部の締固め特性に及ぼす配筋条件ならびに締固め条件の影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

使用材料を表-1 に、コンクリートの配合を表-2 に示す。

*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)

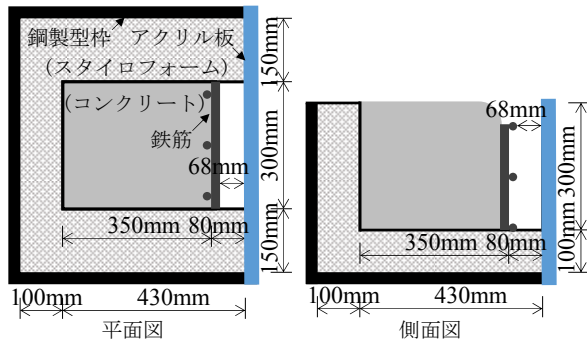


図-1 試験体概要

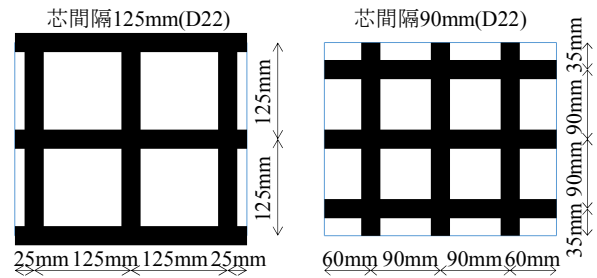


図-2 鉄筋組立図

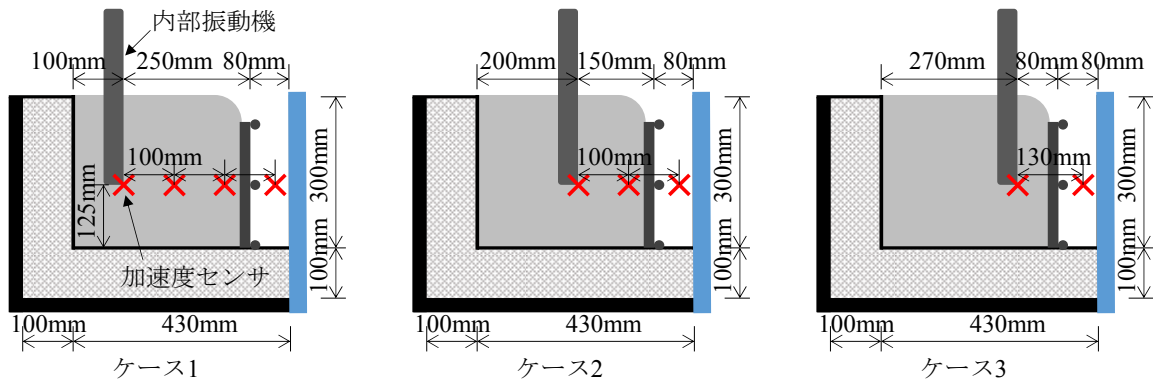


図-3 締め固め条件および加速度センサ配置

本実験では目標スランプ 8cm、水セメント比 55%とし、細骨材率を 37、42 および 47%の 3 水準とした。なお、細骨材率は、「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)」に示されているスランプに応じた細骨材率の最小値の目安を参考に、42%を基準として±5%を含めた 3 水準とした。粗骨材の最大寸法は 20mm である。

2.2 実験方法

試験体の概要を図-1 に示す。反射波の影響を低減するため、型枠の内側にスタイロフォームを設置し、型枠の内部にはかぶり厚さを 68mm として径 22mm の鉄筋を配置した。配筋条件は、壁や柱部材を参考に、芯間隔 125mm と 90mm の 2 種類とした。鉄筋の組立図を図-2 に示す。また、かぶり部表面には透明アクリル板を設置し、充填状況を観察できるようにした。

コンクリートは鉄筋より内側に投入し、内部振動機(出力 280V、電圧 100V、電流 5A、振動数 50Hz、直径 28mm)を加振した状態で型枠底面から 125mm の位置まで挿入した。内部振動機の作用によってコンクリートをかぶり部へ流動させ、締め固めを行った。締め固め条件は、図-3 に示すように、内部振動機を鉄筋から 250、150 あるいは 80mm の位置に挿入したケース 1～3 の 3 種類とした。

2.3 かぶり部充填状況の観察

内部振動機の振動によってかぶり部へ流動させたコンクリートの充填状況を動画として撮影した。さらに、

目視によって充填高さを測定し、式(1)により充填高さ率を算出した。

$$P_t = \frac{H_t}{H_{\max}} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 P_t ：ある時間の充填高さ率(%), H_t ：ある時間の充填高さ(mm), $H_{\max}$ ：投入量から計算により求まる充填完了時の充填高さ(mm)

2.4 応答加速度の測定

内部振動機の表面および型枠の内部には加速度センサを設置し、応答加速度を測定した。加速度センサは図-3 に示すように、振動機表面およびそこから 100mm 間隔で設置した。ただし内部振動機を鉄筋から 80mm の位置に挿入した場合は、加速度センサは振動機の表面ならびにそこから 130mm の位置に設置した。応答加速度の測定はサンプリング間隔を 1.00×10^{-4} 秒として行った。測定開始から 0.5～1.5 秒の間での最大加速度と最小加速度の絶対値を平均したものを 1 秒時点での内部振動機の応答加速度とし、秒単位で解析を行った。応答加速度から式(2)によって締め固めエネルギーを算出した⁵⁾。

$$E_t = \frac{\rho \alpha_{\max}^2 t}{4\pi^2 f} \quad (2)$$

ここで、 E_t ：t 秒間にコンクリートが受ける締め固めエネルギー(J/L), t ：振動時間(s), $\alpha_{\max}$ ：最大加速度, f ：振動数(Hz), ρ ：単位容積質量(kg/L)

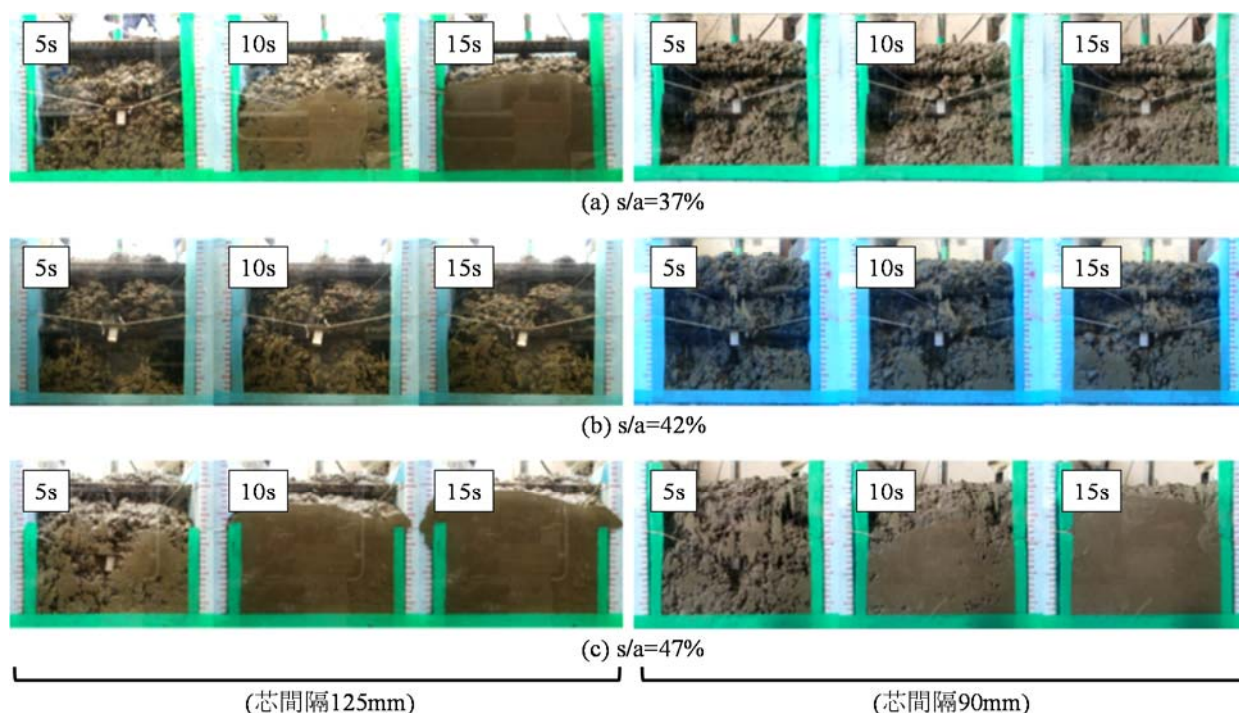


図-4 かぶり部充填状況(ケース1, 内部振動機挿入位置: 250mm)

3. 実験結果および考察

3.1 かぶり部充填状況

内部振動機を鉄筋から 250mm の位置に挿入した場合における, 加振後 5, 10, 15 秒の時点におけるかぶり部の充填状況を図-4 に示す。実測スランブは, 細骨材率 37, 42 および 47% の配合に対し, それぞれ 7.5, 7.0 および 8.0cm であった。芯間隔 125mm では, かぶり部の充填高さはどの時点においても細骨材率 47% の場合が最も高い。また, 充填も速く, 特に加振後 10 秒間で充填が大きく進行している。一方細骨材率 42% の場合, コンクリートが鉄筋の間隙を通過する速度が遅く, 15 秒間振動を加えてもほとんど充填されていない。逆に細骨材率 37% の場合では, 比較的充填の速度が大きく, また加振後 10 秒の時点では空隙が認められるが, 15 秒の時点では空隙はほぼ確認されない。細骨材 42 および 37% の傾向については今後更に検討が必要となるが, 細骨材率 47% の場合, 粉体量が多く粘性が高いため, 試料が一体となって鉄筋の間隙を通過したと考えられる。細骨材率 42% の場合では, 再実験を行ったが同様の結果を示しており, 試料が一体となってかぶり部へ流動しようとし, 粗骨材のかみ合わせにより流動を阻害したものと考えられる。また細骨材率 37% の場合は, 材料分離抵抗性が低いため材料が分離し, ペーストが先行してかぶり部へ流動したと考えられる。

芯間隔を 90mm とした場合では, 細骨材率が低いほど充填高さが低く, 空隙が多くなっている。この結果は配筋が過密である場合, 細骨材率が低いほど粗骨材による

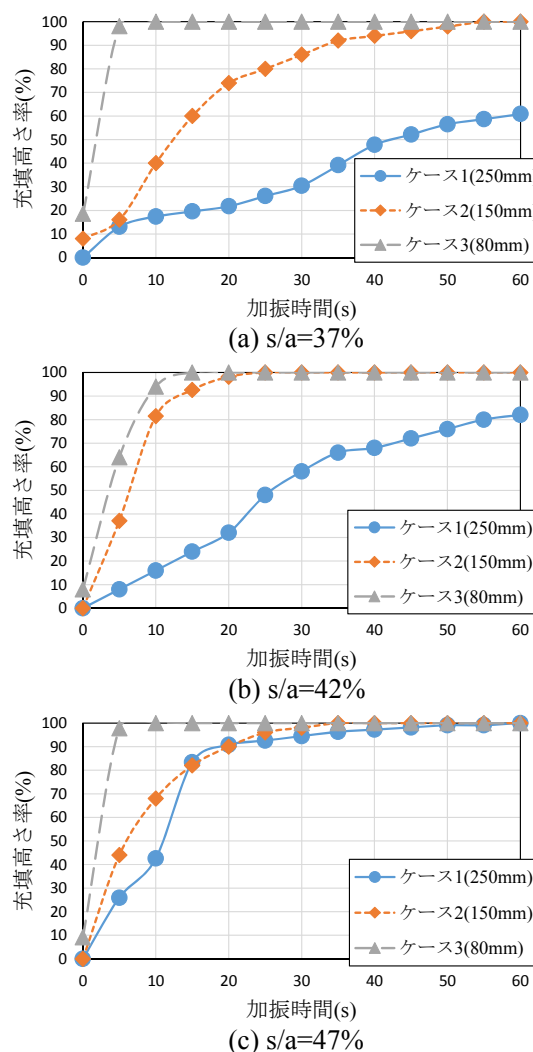


図-5 充填高さ率(芯間隔 90mm)

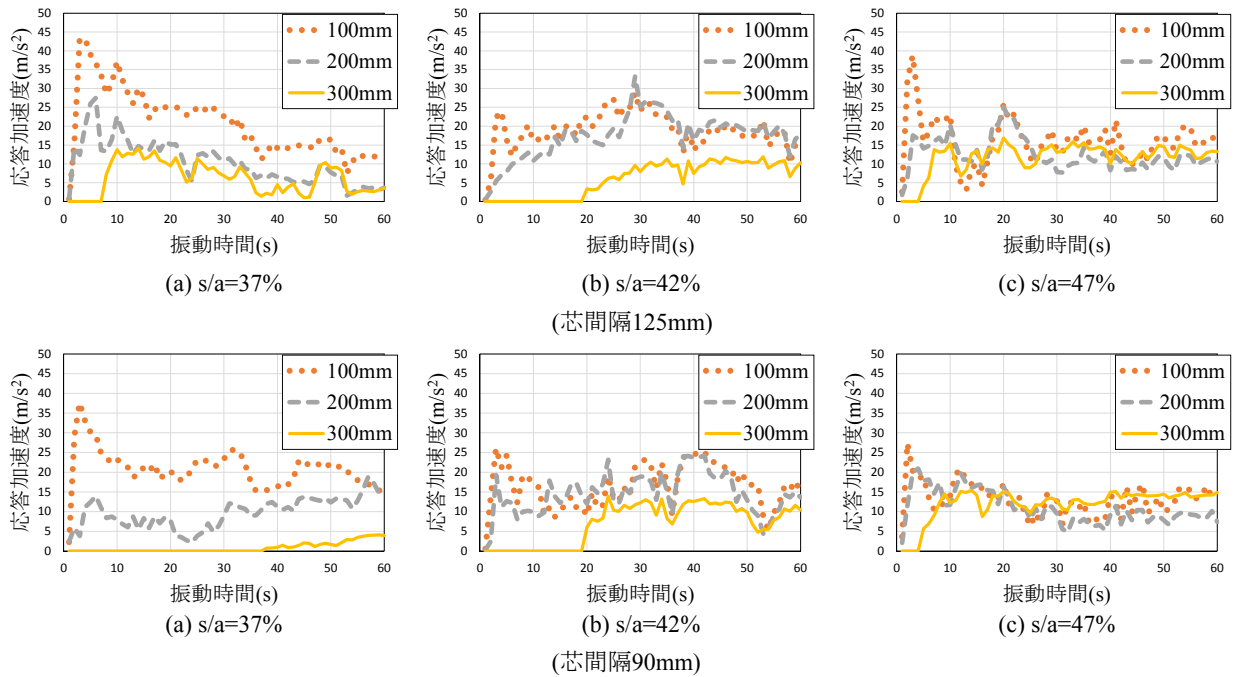


図-6 応答加速度(ケース 1, 内部振動機挿入位置 : 250mm)

鉄筋間隙での閉塞が生じ、流動の障害となりやすいことを示している。細骨材率 47%の場合、芯間隔を 125mm から 90mm に変更したことによって充填の速度がやや低下しており、細骨材率が 42%の場合では芯間隔の変更による充填性の変化ほとんど確認することができない。一方、細骨材率 37%の場合では芯間隔を 90mm としたときの充填高さが大きく低下している。これらの結果より、細骨材率を小さくしすぎると配筋条件の影響を受けやすくなるといえる。

鉄筋の芯間隔を 90mm とした場合の充填高さ率を図-5 に示す。いずれの配合においても、振動機の挿入位置を鉄筋に近づける(ケース 1 からケース 3 の順)ことで同一締め固め時間における充填高さ率は高くなり、充填性が向上したことがわかる。振動機の挿入位置を鉄筋から 150mm としたケース 2 において、細骨材率 42 および 47% の場合は約 20 秒で充填がほぼ完了しているが、細骨材率 37% の場合では充填完了に約 60 秒の振動時間を必要とした。振動機の挿入位置を鉄筋から 80mm としたケース 3 の場合には、配合によらず同等の充填挙動を示しており、約 10 秒で充填が完了した。振動機の挿入位置を鉄筋に近づけることによって、鉄筋近傍への粗骨材のブロッキングを解消しながら、コンクリートが鉄筋間隙を通過したためと考えられる。

3.2 応答加速度測定

内部振動機を鉄筋から 250mm の位置に挿入した場合の応答加速度の推移を図-6 に示す。細骨材率 47%では、配筋条件によらず加振後 10 秒以降の応答加速度は概ね 10m/s² 前後で推移しており、振動機からの距離に伴う減

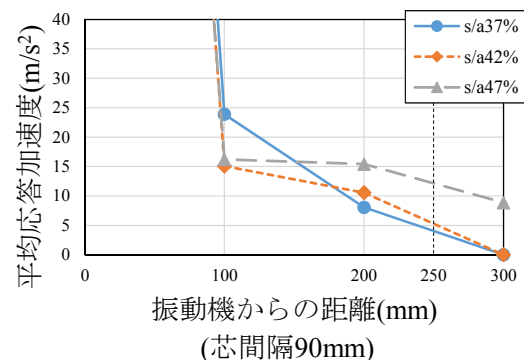
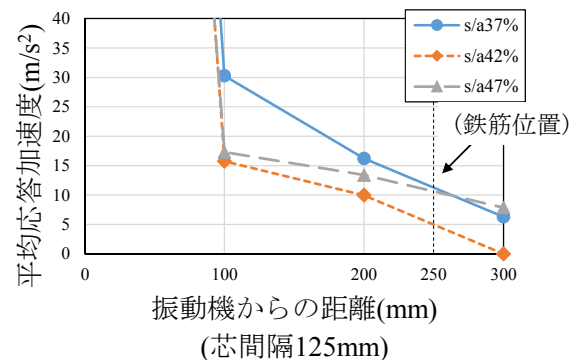


図-7 応答加速度分布
(ケース 1, 内部振動機挿入位置 : 250mm)

衰もほとんど確認できない。また細骨材率 42%の場合、振動機から 200mm の位置までは配筋条件によらず応答加速度は 15~20m/s² で推移している。振動機から 300mm の位置、すなわちかぶり部における応答加速度はやや減衰していることが確認できるが、配筋条件による相違は認められない。一方、細骨材率 37%の場合、振動機から

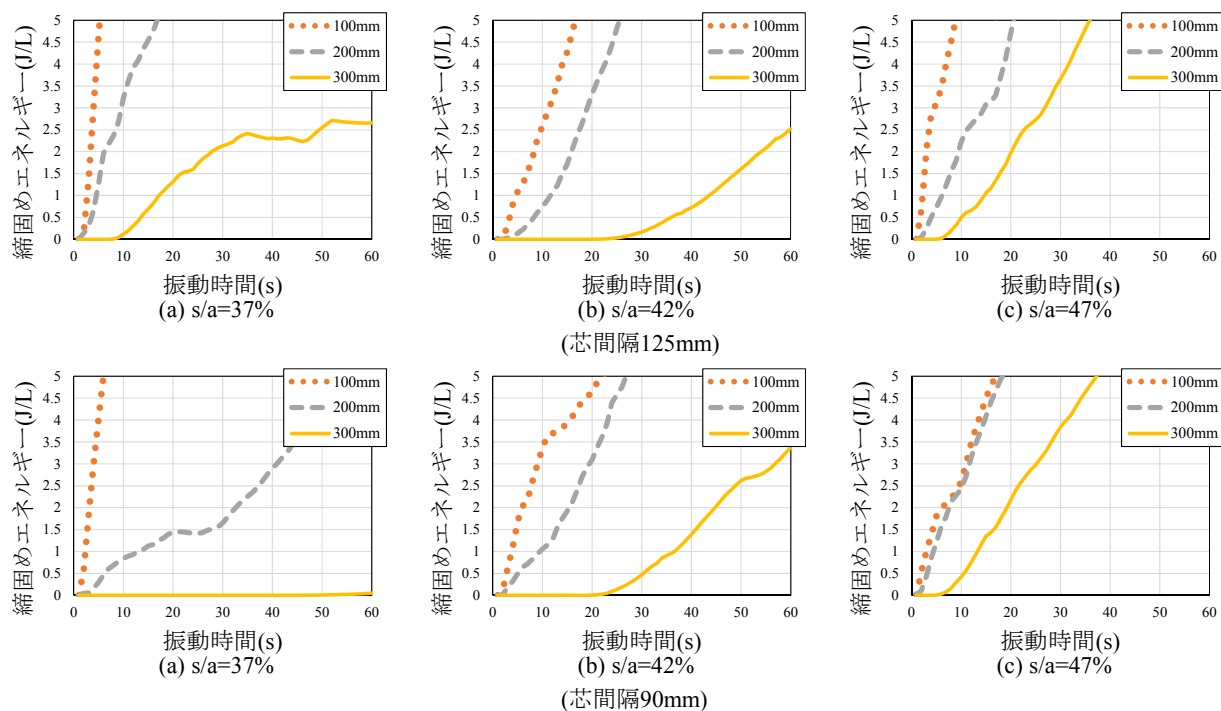


図-8 締固めエネルギー(ケース 1, 内部振動機挿入位置: 250mm)

の距離の増大に伴い応答加速度が減衰する傾向があり、芯間隔 90mm では鉄筋近傍における応答加速度の減衰がより顕著となっていることがわかる

内部振動機からの距離と加振後 15 秒間の平均応答加速度の関係を図-7 に示す。細骨材率 47% の場合、振動機からの距離の増大に伴う応答加速度の減衰は小さく、配筋条件の影響も認められない。一方、細骨材率 42 および 37% の場合、鉄筋近傍における応答加速度の減衰が顕著である。また振動機から 100mm の位置における応答加速度は、細骨材率 42 および 47% では同程度の値を示しているが、細骨材率 37% とした場合はやや大きい値を示している。これらの結果より、細骨材率が低い配合では、配筋が過密であると鉄筋近傍に粗骨材が集まり、鉄筋間隙の閉塞が生じることによって、振動が伝播しにくい状況になると考えられる。一方、細骨材率が高く粉体量の多い配合では、粘性が高いため応答加速度の値は比較的低いが、配筋が過密であってもコンクリートが分離しにくく、一体となって通過することにより、加速度の減衰が比較的少なくなると考えられる。

観測された応答加速度をもとに、内部振動機を鉄筋から 250mm の位置に挿入したケース 1 の締固めエネルギーの推移を算出すると図-8 のようになる。当然ながら、いずれの場合においても、締固めエネルギーは振動機からの距離の増大に伴い減少する。また、細骨材率が小さいほどかぶり部における締固めエネルギーは小さくなる傾向があり、芯間隔 90mm の場合では、その傾向がより顕著となっている。細骨材率 37% の場合、芯間隔 90mm

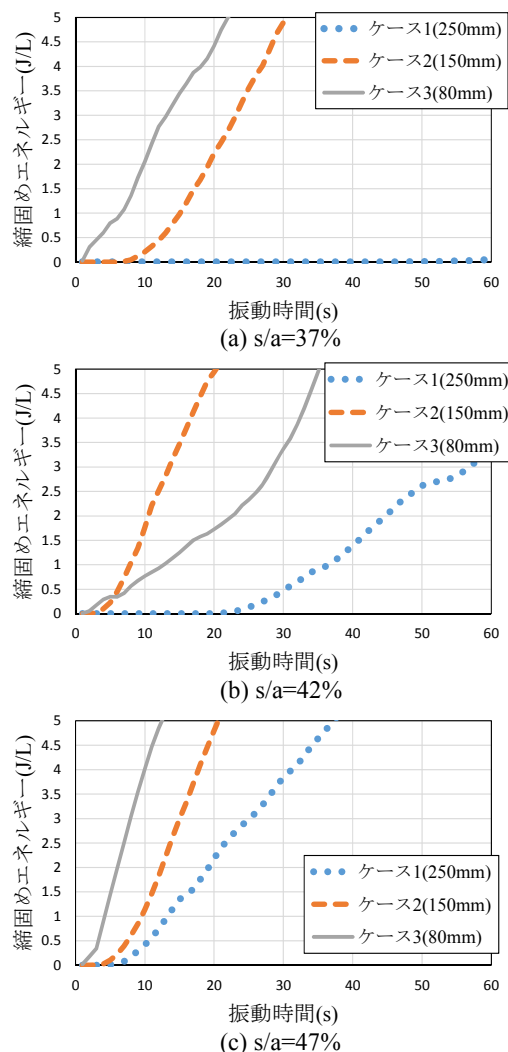


図-9 かぶり部の締固めエネルギー(芯間隔 90mm)

の鉄筋を配置することによって振動機から 200mm の位置においても締固めエネルギーの値が低くなっている。

図-9 に芯間隔 90mm とした場合の、かぶり部における締固めエネルギーの推移を細骨材率ごとに示す。内部振動機の挿入位置を鉄筋から 250mm としたケース 1 では細骨材率が小さいほど締固めエネルギーは低くなっている。振動機の挿入位置を鉄筋位置に近づけたケース 2 および 3 では、細骨材率 42% の場合において他と異なる傾向を示すが、細骨材率 37 および 47% の場合には、鉄筋に近いほど締固めエネルギーが早期に増加している。これは、内部振動機を鉄筋位置付近に挿入することによって、鉄筋近傍における粗骨材のブロッキングが抑制され、加速度の減衰が抑えられたことを示している。

梁らはスランプ 8cm、水セメント比 50% のコンクリートを対象として、細骨材率が締固め完了エネルギーに及ぼす影響について検討を行っており、細骨材率 33、43 および 48% の場合、締固め完了エネルギーはそれぞれ 3.194、2.372 および 2.089(J/L) であると報告している⁹⁾。使用材料等が相違するので直接的には評価できないが、この結果を参考に、かぶり部の締固め完了に必要な時間を算出した結果を図-10 に示す。細骨材率 37% の場合、振動機を 250mm の位置に挿入したケース 1 では、芯間隔 90mm のとき 60 秒間加振しても十分に締め固まらないことになる。また振動機の挿入位置を鉄筋から 150mm の位置に近づけたケース 2 では、配筋条件によらず 17 秒間の振動でほぼ締固めが完了し、さらに振動機を鉄筋の近く(80mm)に挿入することによって 10 秒程度で締固めが完了することがわかる。締固め完了に必要な時間は細骨材率が高いほど短くなる傾向があり、細骨材率 47% の場合、振動機の挿入位置を鉄筋から 150mm とすれば 15 秒以下で締固めを完了できる。また内部振動機の挿入位置を鉄筋に近づけることで締固め完了に必要な時間はさらに短くすることが可能となり、振動機の挿入位置を鉄筋から 80mm としたケース 3 では、細骨材率が小さい場合も含め必要な加振時間は 15 秒程度となっている。

図-10 は一例ではあるが、このように各種条件でのデータを蓄積することで、コンクリートの配合および配筋条件に応じて内部振動機の挿入位置および振動時間を適切に定めることが可能となる。

4. まとめ

本研究では、コンクリートを鉄筋内部に打ち込み、内部振動機的作用によってかぶり部へ流動させた場合を対象とし、細骨材率が異なるコンクリートの締固め特性に及ぼす配筋ならびに締固め条件の影響を検討した。本研究の条件下で得られた知見を以下にまとめる。

(1) スランプが同一であっても細骨材率によってかぶ

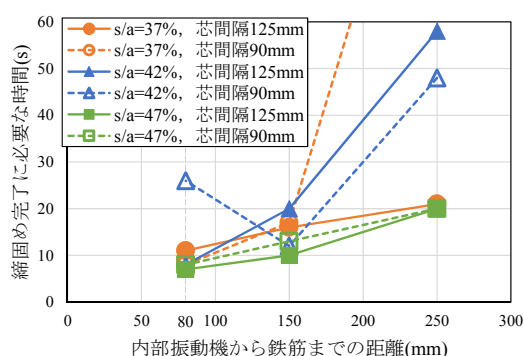


図-10 かぶり部の締固め完了に必要な時間

り部の充填性は大きく異なる。芯間隔が 90mm 以下の場合、細骨材率が小さいほどかぶり部に未充填部が残る危険性が高く、内部振動機の挿入位置を鉄筋位置に近づける必要がある。

- (2) 鉄筋近傍およびかぶり部においては応答加速度の減衰が生じ、締固めが不十分となりやすい。特に、配筋が過密である場合、細骨材率が低い配合では応答加速度の変化が大きく、鉄筋前後の締固めには注意が必要である。
- (3) 内部振動機的作用によってコンクリートをかぶり部へ流動・充填させる場合、鉄筋近傍の締固めには十分注意し、配筋条件ならびに配合条件を考慮して内部振動機の挿入位置および締固め時間を適切に変化させる必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会編:2012年制定コンクリート標準示方書[施工編], pp.117-119, 2012.3
- 2) 尾上幸造, 亀澤靖, 松下博通: 鉄筋間通過によるコンクリートの配合変化, 土木学会論文集, Vol.62, No.1, pp.119-128, 2006.2
- 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.37-42, 2008.6
- 4) 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
- 5) 村田二郎: フレッシュコンクリートの挙動に関する研究, 土木学会論文集, Vol.6, No.378, pp.21-33, 1987.11
- 6) 梁俊, 宇治公隆, 国府勝郎, 上野敦: 配合の相違がフレッシュコンクリートの締固め完了エネルギーに与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1221-1226, 2004