

論文 振動締め時の応答加速度に着目したフレッシュコンクリートの鉄筋間隙通過性評価

永山 剛*1・宇治 公隆*2・上野 敦*3・大野 健太郎*4

要旨：スランブおよび内部振動機挿入位置を要因とし、コンクリートを鉄筋間通過させてかぶり部に充填することで、かぶり部充填速度と内部振動機挿入位置および応答加速度推定式から求めた応答加速度推定値との関係について検討した。鉄筋あき 35mm では内部振動機挿入位置に関わらず、かぶり部に充填することは難しく、柱部材に対する規定の鉄筋あき 40mm 以上の重要性を確認した。また、今後データを蓄積し、使用する内部振動機の性能が異なる場合でも応答加速度分布を推定することで、適切な挿入位置および振動時間を設定できる可能性を示した。

キーワード：締め固め、応答加速度、かぶり部充填、鉄筋あき

1. はじめに

通常、現場でのコンクリートの締め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、適切な時間および挿入間隔で締め固めを行うことが重要である。また、近年の構造条件は、以前に比べ厳しいものが多くなっている。兵庫県南部地震以降の耐震基準見直しによる配筋の過密化が進んでおり、かぶり部の締め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、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鉄筋間を流動させ、かぶり部に充填する場合においても、密実な状態にしなければならない。コンクリートの締め固め時間について、土木学会コンクリート標準示方書¹⁾および日本建築学会建築工事標準仕様書²⁾では、1カ所あたり5～15秒を目安としている。しかしながら、配筋の内側からかぶり部にコンクリートを流動させて締め固めた場合、この締め固め時間が適切ではなく、所要の品質を満足するコンクリート構造物が得られない危険性がある。

そこで本研究では、配筋の内側にコンクリートを投入し、内部振動機によりコンクリートを流動させる場合を想定し、コンクリートの鉄筋通過速度と応答加速度の関係を明らかにすることで、適切な振動時間および内部振動機挿入位置を設定できるようにすることを目的として基礎的検討を行った。

2. 応答加速度測定

2.1 実験概要

(1) 使用材料および配合

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 3.16 g/cm ³ , ブレン値 3210 cm ² /g
細骨材 (粗)	砕砂(S1)	表乾密度 2.57 g/cm ³ , 吸水率 2.22 %, F.M. 2.76
細骨材 (細)	陸砂(S2)	表乾密度 2.65 g/cm ³ , 吸水率 2.89 %, F.M. 1.58
粗骨材	碎石	表乾密度 2.61 g/cm ³ , 吸水率 1.81 %, F.M. 6.67
化学混和剤	AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
	AE助剤	アルキルエーテル系

表－2 配合

最大寸法 (mm)	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤 (g)	
					W	C	S1	S2	G	AE減水剤 (4倍希釈)	AE助剤 (100倍希釈)
20	5.5	4.5	55	47.3	172	313	683	171	948	2504	1878
	8									3756	1252
	10.5									4382	1878

使用材料を表－1 に、コンクリートの配合条件および単位量を表－2 に示す。

配合は、一般的なスランブ 8.0cm を基本とし、さらに、JIS A 5308 に示されているスランブ購入者が指定した値に対しての許容範囲±2.5cm を考慮して、混和剤量のみを増減させたスランブ 5.5cm およびスランブ 10.5cm の場合も検討対象とした。

(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、振動の反射波の影響を低減するため、型枠壁面と底部に緩衝材として発泡スチロールを設置した。また、

*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)

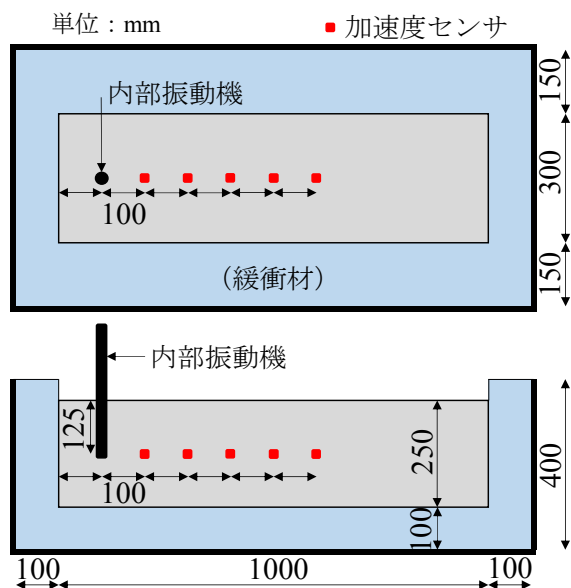


図-1 型枠の形状寸法

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 100, 200, 300, 400, 500mm で、高さが型枠底面から 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 となる位置まで表-2 に示したコンクリートを投入し、内部振動機により加振した。内部振動機挿入位置は型枠端から 100mm とし、型枠底面から 125mm の位置に内部振動機の先端が位置するようにした。60 秒間加振し、その間の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 50Hz である。

2.2 実験結果

(1) 応答加速度測定結果

応答加速度波形の一例として、スランプ 5.5cm のコンクリートを用いた実験での内部振動機表面の波形を図-2 に示す。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その時点の内部振動機の応答加速度とし、秒単位で解析を行った。

図-3 に振動開始から 5, 10, 15 および 20 秒の時点での各位置における応答加速度を示す。すべてのスランプにおいて、応答加速度の値は各時点で異なる値を示した。振動による応答加速度の値は一定ではなく変化する。特に、スランプ 5.5cm についてはばらつきが大きい。一方で、スランプ 10.5cm の場合は他のスランプの場合と比較して全体的に低い値を示した。また、スランプ 10.5cm では、振動開始から 15 秒時点で、内部振動機から 50cm の位置における平均最大応答加速度が 40cm の位置よりも

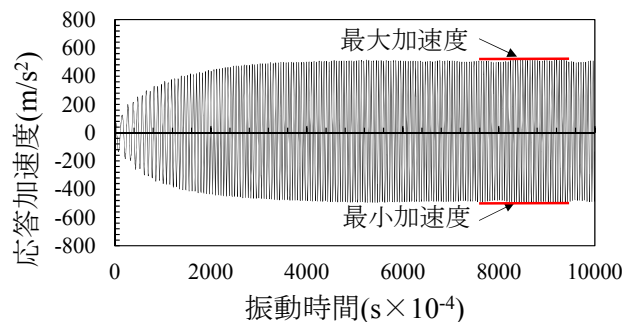


図-2 応答加速度波形

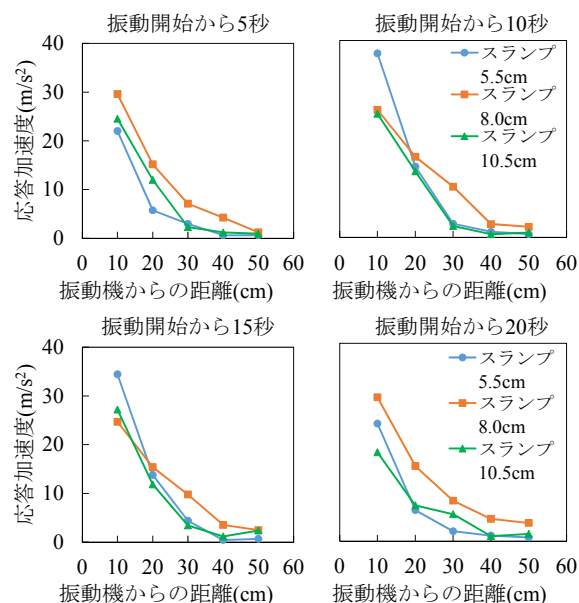


図-3 5～20 秒時点での最大応答加速度

大きくなっている。これは振動の反射波が緩衝材の表面から発生し、それが影響したものと考えられる。他にも、10 秒時点でスランプ 8.0cm、振動機から 30cm および 20 秒時点でスランプ 10.5cm、振動機から 30cm の位置でも反射波の影響とみられる加速度の増大を示している。

測定開始直後、内部振動機がコンクリートに挿入されて、内部振動機表面の応答加速度は急激に低下する。また、内部振動機がコンクリートに挿入されることで、挿入位置から 10～50cm での応答加速度は振動が伝わり始めることにより急激に増加するため、応答加速度は安定しない。

また、内部振動機振動時間の目安が 5～15 秒であることから、本研究において測定開始から 5～15 秒の間の最大加速度を平均した値(平均最大応答加速度)を用いて、以降では、検討する。

図-4 にスランプ 5.5cm, 8.0cm および 10.5cm の振動機からの距離 10～50cm での平均最大応答加速度を示す。いずれのスランプにおいても振動機から離れるほど平均最大応答加速度は減少する。振動機から 10cm の位置で、スランプ 8.0cm および 10.5cm の平均最大応答加速度は

同程度の値を示しているのに対し、スランプ 5.5cm は 10m/s^2 程大きな値を示した。また、20～40cm の位置ではスランプ 5.5cm および 10.5cm の平均最大応答加速度は同程度、スランプ 8.0cm は若干大きな値を示している。50cm の位置ではすべて同程度の値となった。振動締め固めにおける既往の研究³⁾では、スランプの大きさによる振動減衰の差が報告されているが、本研究において、明確な傾向は認められず、一因として、配合条件などが考えられるが、今後の課題としたい。

(2) 応答加速度推定

図-4 に示した応答加速度分布から近似曲線を求め、その式を応答加速度推定式とした。求めた近似曲線を図-5 に示す。実務での適用を想定して、5～15 秒間の平均最大応答加速度の結果から次の(1)～(3)の推定式を求めた。

$$y = 95e^{-0.1x} \quad (\text{スランプ } 5.5\text{cm の場合}) \quad (1)$$

$$y = 45e^{-0.058x} \quad (\text{スランプ } 8.0\text{cm の場合}) \quad (2)$$

$$y = 54e^{-0.076x} \quad (\text{スランプ } 10.5\text{cm の場合}) \quad (3)$$

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)

ただし、 $10\text{cm} \leq x \leq 50\text{cm}$ とする。

この式により、スランプの変化を考慮して応答加速度の推定を行うことができる。

3. コンクリートの鉄筋通過性

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-6 に示す。幅 300mm×高さ 300mm×長さ 350mm とし、内部振動機により加振した時の、振動の反射波の影響を低減するため、型枠壁面と底部に緩衝材として発泡スチロールを設置した。また、かぶりが 60mm となる位置に鉄筋を配置した。型枠のかぶり側の端(表面)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-7 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⁴⁾では、「はりにおける軸方向鉄筋の水平あきは、20mm 以上、粗骨材最大寸法の $4/3$ 倍以上、鉄筋の直径以上とし、柱における軸方向鉄筋のあきは、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

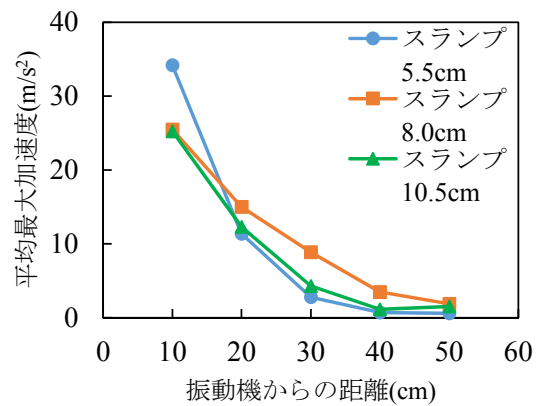


図-4 平均最大応答加速度(5～15 秒)

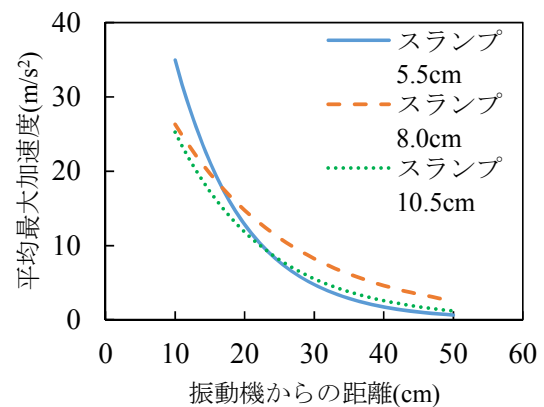


図-5 応答加速度近似曲線

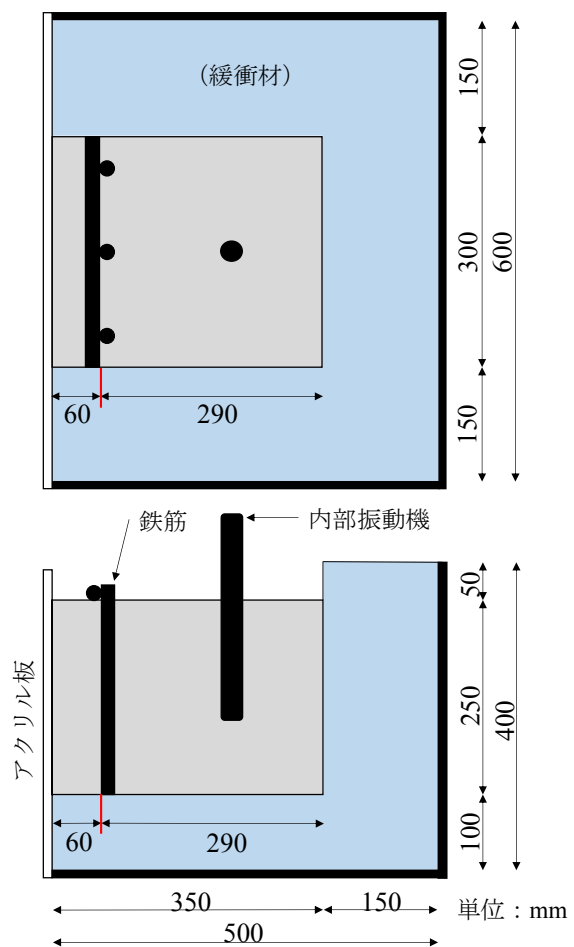


図-6 型枠の形状寸法

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3種類とし、鉄筋直径の1.5倍が33mmであることを考慮し、鉄筋あき35mm、さらに、規定に適合する50mmおよび65mmとした。また、型枠に固定するため、図-7に示すように上部の水平方向にも鉄筋を配置し、縦方向の鉄筋の長さが250mmとなるようにした。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、今回は検討対象外とした。

(4) 実験方法

図-6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、かぶり部まで締め固まった時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。内部振動機により振動締め固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固めを行った。締め固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(3ケース)を図-8に示す。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、端(アクリル板)から150mm、200mmおよび250mm(かぶり部から90mm、140mmおよび190mm)とした。使用した内部振動機は2.1と同じである。

3.2 実験結果および考察

(1) コンクリートのかぶり部充填高さの時間変化

内部振動機による締め固め開始後の、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、かぶり部に充填した高さを測定した。また、充填高さはアクリル板全体の平均充填高さを充填高さとした。そして、各時間における充填高さを締め固め完了後の充填高さに対する割合で表し、それを充填高さ率とした。図-9に充填高さ率と振動時間の関係を示す。内部振動機挿入位置(a)はアクリル板から250mm(かぶり部から190mm)、(b)200mm(かぶり部から140mm)、(c)150mm(かぶり部から90mm)である。また、図-9中の鉄筋3、4、5は鉄筋の本数を表しており、それぞれ鉄筋あき65mm、

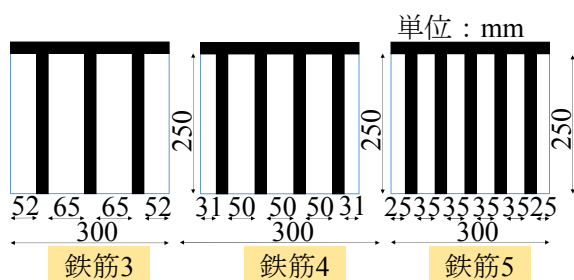


図-7 鉄筋概要図

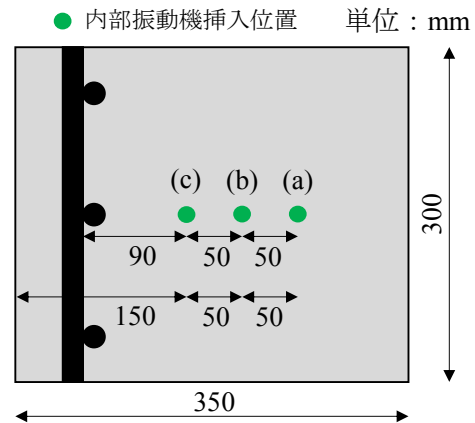


図-8 内部振動機挿入位置

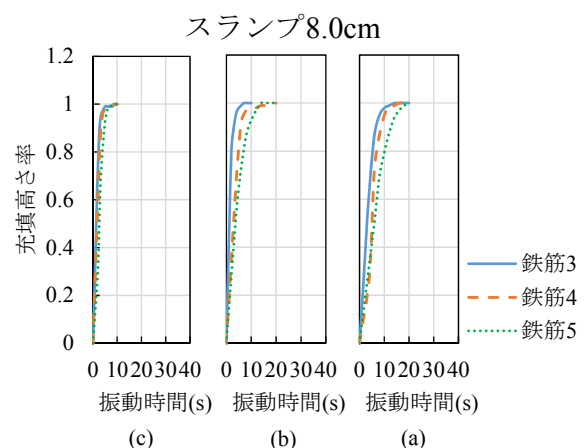
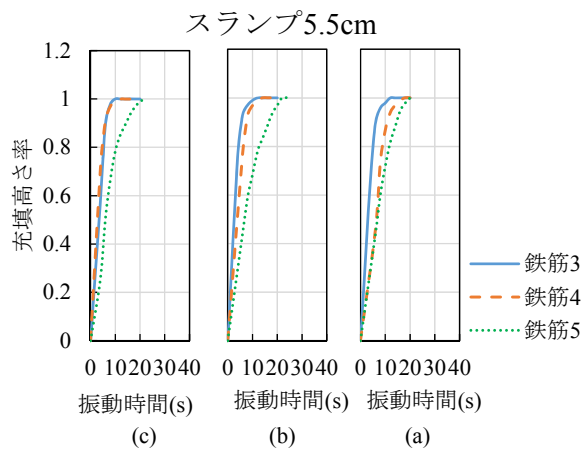
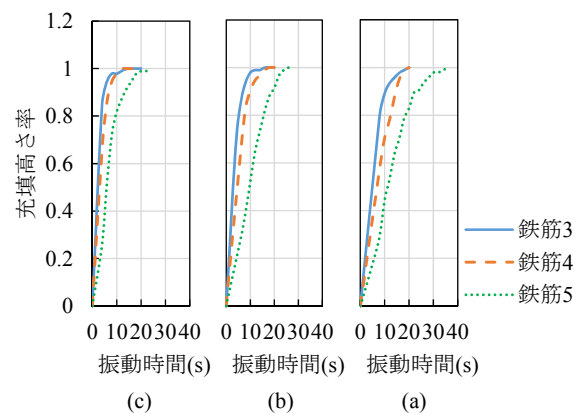


図-9 充填高さ率と振動時間の関係

50mm, 35mm である。スランプの値が大きくなるほど鉄筋間を流動しやすくなり、短い時間で充填完了することがわかる。また、スランプ 10.5cm の場合、振動機挿入位置による、充填完了時間の差が顕著であった。

図-10 に鉄筋 5 で内部振動機挿入位置(a)の場合の各スランプにおける充填高さ率と振動時間の関係を、また、図-11 にスランプ 8.0cm の場合の鉄筋 3 および 5 における充填高さ率と振動時間の関係を示す。図-10 からスランプが大きくなることにより充填しやすくなることがわかる。また、図-11 に示すように、鉄筋あきが狭くなると（鉄筋 3→5）、充填しにくくなっており、振動機挿入位置の影響よりも鉄筋あきの影響が卓越していることがわかる。鉄筋あき 35mm は、規定にある粗骨材最大寸法の 4/3 倍以上、鉄筋径の 3/2 倍以上を満たしているが、鉄筋あき 40mm 以上という規定には適合しない。今回の 3 種類の鉄筋あきを考えると鉄筋あき 40mm 程度を境に充填状況が大きく変化すると考えられ、今後、鉄筋あきに関してはさらに検討していく必要がある。

(2) 充填速度と充填完了時間の比較

充填高ささと締め固め時間の関係から充填速度を算出した。充填速度の算出方法を図-12 に示す。既往の研究⁵⁾から、鉄筋を配置した時の締め固め時間－充填高さ曲線は図-12 に示すように締め固め開始直後は下に凸であるが、その後直線となる部分がある。この直線の勾配は、コンクリートが鉄筋間を通過してかぶり部を定常的に打ち上がる速度を表しており、この直線の勾配を本研究においても充填速度と定義した。

図-13 に充填速度とかぶり部から内部振動機挿入位置までの距離との関係を示す。内部振動機挿入位置がかぶり部に近いほど充填速度は増加する傾向が認められる。スランプ 10.5cm の場合には、特に内部振動機挿入位置の影響が顕著である。スランプ 5.5cm および 8.0cm では、鉄筋 5 本（鉄筋あき 35mm）の場合、内部振動機挿入位置による充填速度の増加が比較的小さく、この程度の鉄筋あきの場合、鉄筋間を流動させて締め固めを行うのは難しいことがわかる。

この充填速度から、本研究における型枠の充填完了時間を推定したところ、スランプ 5.5cm で鉄筋あき 35mm では、内部振動機挿入位置がかぶり部から 14cm および 19cm において締め固めの目安である 15 秒をこえる結果となった。充填速度から求めた充填完了推定時間を表-3 に、実際に充填完了までにかかった時間を表-4 に示す。表-3 に示した充填完了までの推定時間の時点で、実際の充填高さはすべて最大値（完了時の充填高さ）の 90% 程度となった。なお、表-4 に示すように 15 秒以上かかる場合も多く存在し、本研究における鉄筋あきは厳しい条件であることがわかる。また、このような厳しい条件

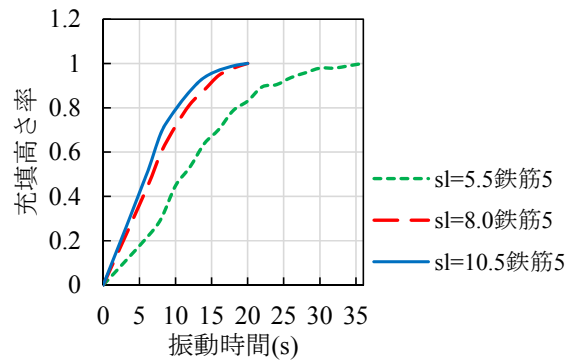


図-10 挿入位置 (a) 鉄筋 5 での充填高さ率と振動時間

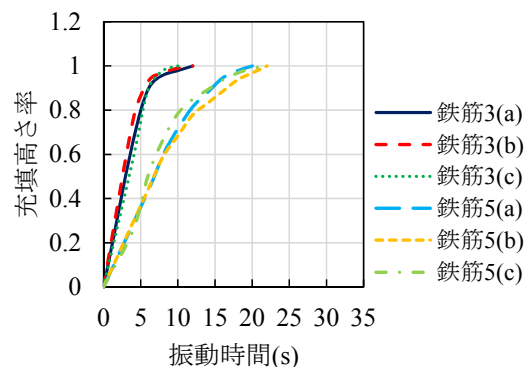


図-11 スランプ 8.0cm の充填高さ率と振動時間の関係

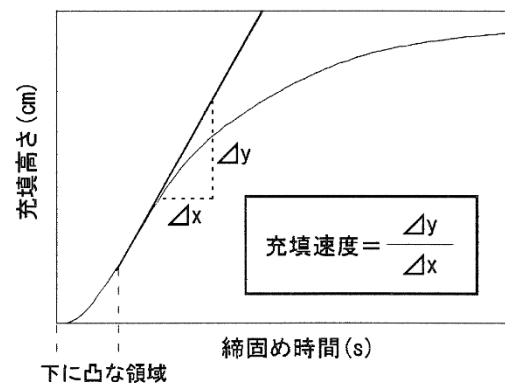


図-12 充填速度の算出方法⁵⁾

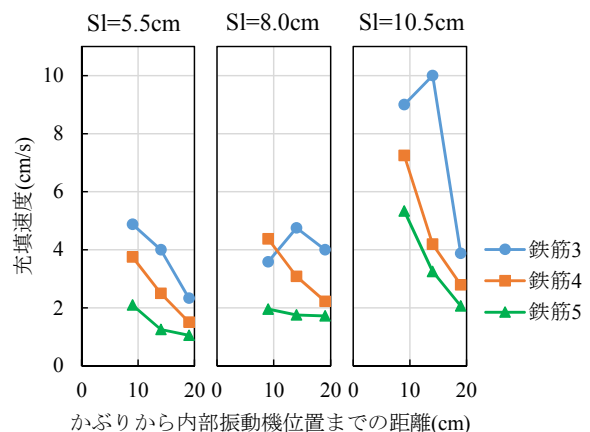


図-13 充填速度とかぶり部から内部振動機位置までの距離の関係

表－3 かぶり部充填完了推定時間

単位：秒

		sI=5.5完了時間			sI=8.0完了時間			sI=10.5完了時間		
		鉄筋3	鉄筋4	鉄筋5	鉄筋3	鉄筋4	鉄筋5	鉄筋3	鉄筋4	鉄筋5
振動機挿入位置	a	10 (89)	14 (88)	22 (90)	6 (90)	11 (90)	13 (88)	6 (91)	8 (90)	12 (88)
	b	6 (85)	9 (90)	19 (90)	5 (93)	8 (93)	14 (83)	3 (90)	6 (92)	7 (87)
	c	5 (90)	6 (90)	11 (87)	7 (93)	6 (91)	12 (85)	3 (94)	3 (96)	5 (93)

()内は推定時間時における実際の充填高さ率：％

表－4 実際のかぶり部充填完了時間

単位：秒

		sI=5.5完了時間			sI=8.0完了時間			sI=10.5完了時間		
		鉄筋3	鉄筋4	鉄筋5	鉄筋3	鉄筋4	鉄筋5	鉄筋3	鉄筋4	鉄筋5
振動機挿入位置	a	20	20	36	12	18	20	14	16	20
	b	16	18	26	12	14	22	7	18	14
	c	14	12	24	10	12	22	9	7	8

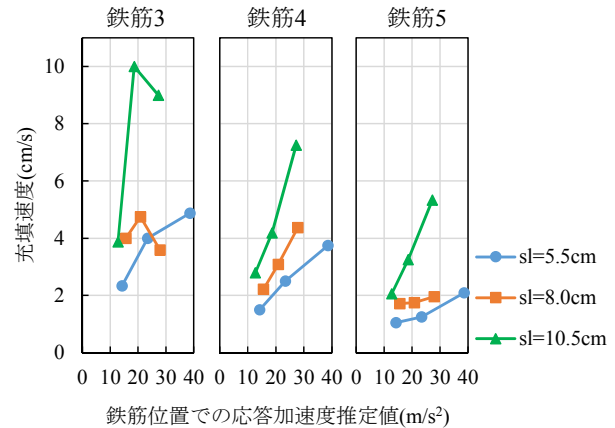
の場合には内部振動機挿入位置が特に重要となり、本研究においては、鉄筋あき 50mm(鉄筋 4)の場合にかぶり部から 9cm の位置に内部振動機を挿入することにより、いずれのスランプの場合においても 15 秒程度で十分に締固めを行うことができることが明らかとなった。

3.3 充填速度と応答加速度推定値の関係

2.2 で求めた応答加速度推定式と各内部振動機挿入位置をもととして、スランプ 5.5cm, 8.0cm および 10.5cm での鉄筋位置における応答加速度を推定した。図－14 に応答加速度推定値と充填速度の関係を示す。

応答加速度が大きいほど充填速度は増加する傾向が認められる。特に、スランプ 10.5cm の場合、応答加速度の変化に伴い大幅に増加している。なお、鉄筋あき 35mm の場合、スランプ 5.5cm および 8.0cm では、応答加速度の変化に対する充填速度の変化は非常に小さく、5.5cm～8.0cm 程度のスランプの場合、内部振動機挿入位置をさらに近くしても充填速度の増加は見込めず、充填完了までの締固め時間が長くなり材料分離を引き起こす危険性がある。なお、鉄筋あき 65mm の場合、スランプ 8.0cm および 10.5cm で応答加速度が増加しているにもかかわらず充填速度が低下している箇所があるが、これは、コンクリートが流動するとき鉄筋が流動障害となりにくく、また、振動機位置に対応した応答加速度の値による充填速度の差もわずかであることによる誤差と考えられる。

図－13 および図－14 に示すように、鉄筋位置での応答加速度推定値と充填速度の関係は、内部振動機挿入位置と充填速度の関係と密接に関係していることがわかる。今後、さらにデータを蓄積して、使用するコンクリートのフレッシュ性状を考慮した、鉄筋位置での応答加速度の値とコンクリートの鉄筋間隙通過速度（充填速度）の関係が明らかになることで、かぶり部にコンクリートを充填する時間を予測することが可能となる。また、内部振動機の性能により応答加速度の値は異なるため、使用する内部振動機の距離による応答加速度分布を推定することで、適切な内部振動機挿入位置および振動時間を設



図－14 応答加速度推定値と充填速度の関係

定することができると考えられる。

4. 結論

今回の実験条件の下、次のことが明らかとなった。

- (1) 振動による応答加速度の値は一定ではなく各時間で変化する。なお、本研究では、スランプ 8.0cm が概ね同様の加速度分布を示し、スランプ 5.5cm の変動が大きい。
- (2) スランプが増加すると、鉄筋間を流動しやすくなるため充填にかかる時間は短くなる。また、鉄筋あきが狭いほど充填速度は遅く、特に鉄筋あき 35mm で充填にかかる時間の増加は顕著であり、内部振動機挿入位置やスランプを厳格に管理する必要がある。
- (3) スランプ 5.5 および 8.0cm の場合、内部振動機挿入位置に関わらず鉄筋あき 35mm を流動させて締固めを行うことは難しい。なお、鉄筋あき 50mm の場合に、スランプ 5.5～10.5cm ではかぶり部から 9cm の位置に内部振動機を挿入すると目安の 15 秒以内で充填できることが明らかとなった。
- (4) 今後データを蓄積することにより、使用する内部振動機の性能が異なる場合でも応答加速度分布を推定することで、適切な内部振動機挿入位置および振動時間を設定できると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕，2012
- 2) 日本建築学会：日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説（JASS 5）鉄筋コンクリート工事，1997
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの振動締固めに関する実験報告書，1990.3
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕，2012
- 5) 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 E，Vol.62，No.1，pp119-128，2006.