

# コンクリートの振動締固め方法の研究

## — 内部振動機の締固め範囲と再振動締固めの実施時期について —

### Study on Concrete Compaction by Vibrator

#### - Range of Concrete Compaction by Vibration and Timing of Re-vibration -

廣中哲也\* 石井敏之\* 塚本耕治\* 川口昇平\*

#### 要 旨

コンクリート構造物の品質向上を目指して均質かつ密実なコンクリートを得るためには、コンクリートの締固めに用いる内部振動機の締固め効果と締固めの実施方法を明確にする必要がある。そこで、締固め範囲に着目した内部振動機の振動締固め方法および締固めの実施時期に着目した再振動締固め方法について、小型試験体を用いた室内試験を実施した。その結果、内部振動機の振動締固め方法では、内部振動機からの水平距離とコンクリート中の振動加速度による内部振動機の締固め範囲を、再振動締固め方法では、コンクリート配合と温度条件に応じた突き棒貫入量による再振動締固めの実施時期および判定方法等を明らかにした。

キーワード：振動締固め、内部振動機、加速度、再振動締固め、貫入試験、沈下ひび割れ

#### 1. まえがき

コンクリート構造物の品質向上には、コンクリートを均質かつ密実に打込むことが重要である。最近のコンクリート構造物には、耐震設計規準の見直し、構造様式の多様化と部材の薄肉化等から、複雑な形状や高密度の鋼材が用いられることが多く、内部振動機を必要な位置と間隔で挿入できない場合や、鋼材によってコンクリートの流動が阻害されることもあり、締固め不足や充填不良等の初期欠陥が発生しやすい。そのため、良好な締固め方法が求められ、特殊な内部振動機や器具等の開発が進められている<sup>1)</sup>。また、従前から再振動締固めには、コンクリート強度および鉄筋との付着強度の増加、沈下ひび割れの防止等の締固め効果があるとされてきた。しかし、コンクリートの配合、温度条件および締固め方法等の影響が多いことや、再振動締固めの実施時期が明らかになっていないことから、具体的な実施方法は示されていない<sup>2)</sup>。

そこで、均質で密実なコンクリートが得られる振動締固めを目的として、内部振動機の振動締固め方法と再振動締固め方法の研究を進めてきた。本報では、内部振動機の締固め方法については、小型試験体を用いた内部振動機の締固め範囲とコンクリート中の振動加速度および圧縮強度を、再振動締固め方法については、再振動締固めの実施時期と判定方法および再振動締固めの効果を述べる<sup>3),4)</sup>。

#### 2. 内部振動機の振動締固め方法

##### 2.1 実験概要

内部振動機の締固め範囲を評価するために、無筋の小型試験体を使用して、主に内部振動機の加振時におけるコンクリート中の加速度および硬化後のコンクリートコアの圧縮強度を測定した。表-1にコンクリートの配合を示す。コンクリートは、呼び強度 24 相当の水セメント比 52.5%、実測値でスランブ 12.0cm、空気量 4.3%の土木工事では一般的な配合とした。

表-2に内部振動機と小型試験体の仕様、図-1に小型試験体形状と測定位置を示す。予備試験結果から内部

表-1 コンクリートの配合と使用材料

骨材 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント 比 W/C (%)	空気量 (%)	細骨材 率 s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
20	12± 2.5	52.5	4.5± 1.5	44.0	165	315	796	1024	C×1.3%
コンクリートの試験結果 (実測値)			スランブ(cm)		空気量(%)			圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> ) (材齢28日)	
			12.0		4.3			37.7 標準水中養生	
【使用材料】									
セメント：普通ポルトランドセメント、密度 3.16g/cm <sup>3</sup>									
細骨材：富津産山砂、密度 2.62g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 1.35%、粗粒率 2.63									
粗骨材：桜川産砕石、最大寸法 20mm、密度 2.65g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 0.78%、粗粒率 6.62									
混和剤：AE 減水剤：変性リグニルスルホン酸化合物、密度 1.06~1.10g/cm <sup>3</sup>									

\* 技術研究所

振動機に、直径 25mm、周波数 240Hz の棒状バイブレータを使用した。なお、内部振動機の振動数は、ダムコンクリートを除くコンクリート工事に採用されている一般的な値とした。試験体の寸法は、既往の研究<sup>3)</sup>を参考にし、型枠から反射する波動の影響が小さくなるように縦 1,000mm、横 1,000mm、高さ 250mm とし、試験体中央に内部振動機を垂直に 200mm 挿入して振動を加えた。

表-3 に振動締め固め方法の測定項目を示す。内部振動機から伝播するコンクリート中の加速度により締め固め範囲を評価するために、内部振動機先端と先端から 100mm の位置に 3 軸圧電式加速度計およびコンクリート中の深さ 125mm で試験体中央から 100mm 間隔の位置に 1 軸圧電式加速度計を設置した。また、硬化後のコンクリート圧縮強度を測定するために、試験体中央から 100mm 間隔で直径 75mm、高さ 150mm のコンクリートコアを採取した。

2.2 実験結果

スラブ 12cm のコンクリートに直径 25mm、周波数 240Hz の内部振動機を使用した場合の加振時間とコンクリート中の最大加速度の関係を図-2、内部振動機からの水平距離とコンクリート中の最大加速度の関係を図-3 に示す。内部振動機の加振時間の経過に伴ってコンクリート中の加速度は低下し、加振時間 20 秒以降でほぼ一定の値を示していることがわかる。これは、締め固めが進行し、コンクリートが密な状態になったことに対応している。また、内部振動機から離れるにしたがってコンクリート中の最大加速度は低下し、コンクリート中の振動が振動機からの距離によって減衰することがわかる。これは、コンクリートの粘性に起因する材料による減衰と振動が空間に拡散する幾何学的な減衰とからなる距離減衰であると考えられる<sup>3)</sup>。

図-4 に内部振動機からの水平距離と「JIS A 1132 コンクリート強度試験用供試体の作り方」に準拠した円柱試験体（以後、標準試験体と称す）に対するコア試験体の硬化特性の比を示す。標準試験体に対するコア試験

表-2 内部振動機と小型試験体の仕様

項目	仕様ほか
内部振動機	<ul style="list-style-type: none"> <li>棒状バイブレータ：電圧 100V、直径 25mm、周波数 240Hz</li> <li>設置位置：試験体中央のコンクリート表面から垂直に 200mm 挿入</li> </ul>
小型試験体	<ul style="list-style-type: none"> <li>無筋：縦 1,000mm×横 1,000mm×高さ 250mm</li> <li>型枠面から反射する振動を防止するため、型枠内面に 50mm の発泡スチロール板を貼付した</li> </ul>

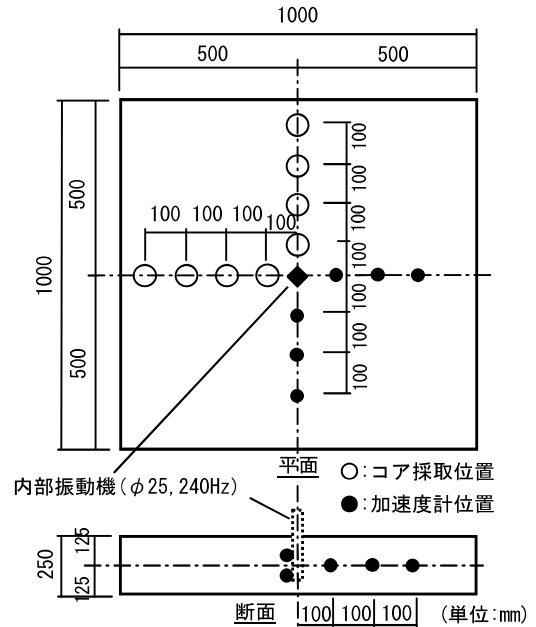


図-1 小型試験体形状と測定位置

表-3 振動締め固め方法の測定項目

測定項目		測定方法ほか
加速度	内部振動機	<ul style="list-style-type: none"> <li>3 軸圧電式加速度計（最大測定加速度 10,000m/s<sup>2</sup>、測定周波数 3Hz~3kHz）</li> <li>内部振動機先端と先端から 100mm に設置</li> <li>試験体中央に内部振動機先端を 200mm 挿入</li> </ul>
	コンクリート中	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 軸圧電式加速度計（最大測定加速度 20m/s<sup>2</sup>、測定周波数 1Hz~1kHz）</li> <li>深さ 125mm で試験体の中央から 100mm 間隔に設置</li> </ul>
コアの密度、圧縮強度、静弾性係数		<ul style="list-style-type: none"> <li>材齢 28 日で直径 75mm×高さ 150mm のコア</li> <li>試験体中央から 100mm 間隔で採取</li> </ul>

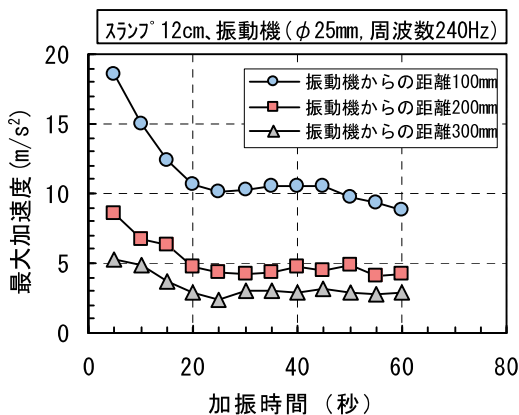


図-2 内部振動機の加振時間と最大加速度

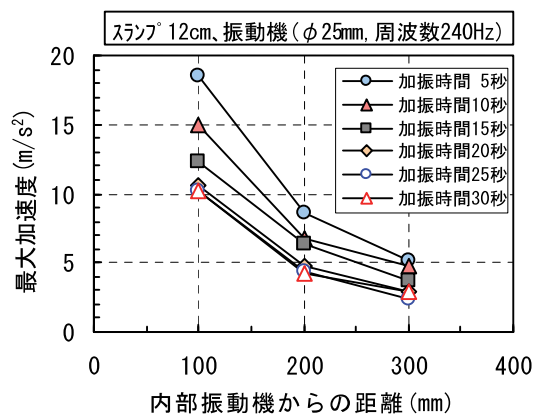


図-3 内部振動機からの水平距離と最大加速度

体の比は、密度および圧縮強度では内部振動機からの水平距離で 200mm 以降、静弾性係数では 300mm 以降でほぼ一定の値を示している。また、標準試験体の硬化特性に対するコア試験体の比が 1.0 以上を示す内部振動機からの水平距離は 100mm となっている。したがって、スランプ 12cm のコンクリートに直径 25mm、周波数 240Hz の内部振動機を使用した場合、図-3を参照すると、締固めが影響する範囲は内部振動機からの水平距離 200mm 程度で、コンクリート中の加速度は 4m/s<sup>2</sup> 以上、締固めにより硬化特性が標準試験体と同等以上になる範囲は 100mm 程度で、コンクリート中の加速度は 10m/s<sup>2</sup> 以上であることがわかる。これにより、内部振動機からの水平距離とコンクリート中の振動加速度の関係から、締固めにより硬化特性が標準試験体と同等以上となる範囲を判定できる。

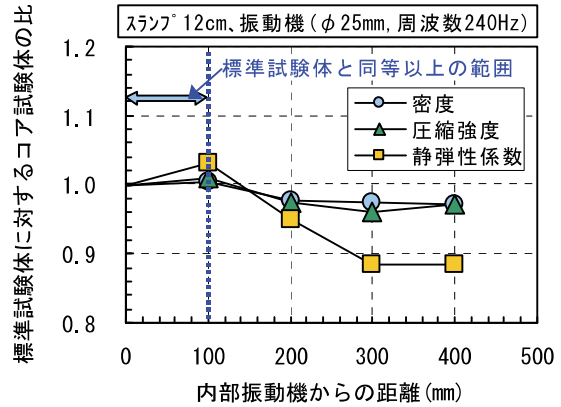


図-4 内部振動機からの水平距離と硬化特性の比

### 3. 再振動締固め方法

#### 3.1 実験概要

再振動締固めの実施時期と判定方法について、再振動締固めの有無と実施時期、コンクリートの配合と養生温度をパラメータとした室内試験を実施し、コンクリートの貫入抵抗、突き棒貫入量および圧縮強度を測定した。また、再振動締固めの効果について、鉄筋下面のコンクリート厚をパラメータとした室内試験を実施し、コンクリート表面に発生した沈下ひび割れを測定した。

表-4に再振動締固めに用いたコンクリートの配合を示す。コンクリートは、土木工事のコンクリート構造物に用いられる呼び強度 21~27 相当の水セメント比 50~55%とスランプ 8~15cm を組み合わせた 5 種類の配合とし、単位水量は 165kg/m<sup>3</sup> の一定とした。なお、各配合のスランプおよび空気量の実測値は目標値を満足した。

表-5に再振動締固めの実験条件を示す。内部振動機には、再振動締固めの実施時期と判定方法の実験および再振動締固め効果の実験の両方で直径 25mm、周波数 240Hz の棒状バイブレータを使用した。

再振動締固めの実施時期と判定方法の実験では、コンクリートの養生温度を 10、20、30℃の 3 種類とし、再振動締固めの実施時期を再振動締固めなしの場合を含めて、練混ぜ完了後から 1 時間ピッチで 5 時間後までの 6 種類とした。なお、練混ぜ完了から 5 時間前後の通常のコンクリートは、凝結の始発状態にあり、再振動締固めを行うことができる限界の硬さにほぼ等しいとされている<sup>5)</sup>。締固め方法は、「コンクリート標準示方書 施工編」の締固めの目安を参考<sup>2)</sup>に、予備試験により決定した。所定の実施時間が経過した試験体の中央から底面直前までバイブレータを挿入後、5 秒間締固めを行い、引き抜いた。なお、比較用に再振動締固めを実施しない試験体も作製した。再振動締固め効果の実験では、図-

表-4 再振動締固めのコンクリートの配合と使用材料

骨材最大法 (mm)	スランプ (cm) *1	水セメント比 W/C (%)	空気量 (%) *1	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> ) *2
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤	
20	12±2.5 10.5	50.0	4.5±1.5 4.2	43.0	165	330	772	1032	C×1.3%	43.3
20	12±2.5 12.5	52.5	4.5±1.5 4.9	44.0	165	314	796	1021	C×1.3%	38.3
20	12±2.5 11.5	55.0	4.5±1.5 4.7	45.0	165	300	820	1009	C×1.3%	38.4
20	8±2.5 9.0	52.5	4.5±1.5 4.4	46.0	165	314	832	984	C×1.3%	36.7
20	15±2.5 14.5	52.5	4.5±1.5 4.2	42.0	165	314	760	1057	C×1.3%	38.8

【使用材料】  
 セメント：普通ポルトランドセメント、密度 3.16g/cm<sup>3</sup>  
 細骨材：富津産山砂、密度 2.62g/cm<sup>3</sup>、吸水率 1.35%、粗粒率 2.63  
 粗骨材：桜川産碎石、最大寸法 20mm、密度 2.65g/cm<sup>3</sup>、吸水率 0.78%、粗粒率 6.62  
 混和剤：AE 減水剤、変性リグニンスルホン酸化合物、密度 1.06~1.10g/cm<sup>3</sup>

\*1) 上段：目標値、下段：実測値 \*2) 材齢 28 日、標準水中養生

表-5 再振動締固めの実験条件

区分	項目	実験条件
共通	内部振動機	棒状バイブレータ：電圧 100V、直径 25mm、周波数 240Hz
	配合	水セメント比 (50%, 52.5%, 55%) スランプ (8cm, 12cm, 15cm)
再振動締固めの実験時期と判定方法	再振動の実施時期	6 水準 (なし、練混ぜ完了後 1, 2, 3, 4, 5 時間)
	養生温度	3 水準 (10℃, 20℃, 30℃)
	締固め方法	・コンクリート標準示方書施工編の締固めの目安を参照 ・試験体底面までバイブレータを挿入後、5 秒間締固めを行い、引き抜く ・バイブレータの挿入速さは、1 秒間に 100mm 程度 ・比較用に再振動締固めを実施しない試験体を作製
再振動締固めの効果	配合	水セメント比 52.5%一定
	再振動の実施時期	練混ぜ完了後から 2 時間
	養生温度	20℃
	締固め方法	・再振動締固めの実験時期と判定方法の実験と同様 ・内部振動機が鉄筋に接しないように実施 ・表面仕上げは実施しない

5に示すように試験体を縦200mm、横200mmとし、かぶり厚50mmの位置に直径13mmの異形鉄筋を水平に設置して、鉄筋下面からのコンクリート厚を100mm、200mm、300mmの3種類とした。異形鉄筋は、リブを左右並行、フシを上下方向となるように設置した。コンクリートの養生温度を20℃の一定、再振動締固めの実施時期を再振動締固めの実施時期と判定方法の実験結果を参考に、練混ぜ完了後から2時間後の一定とした。締固め方法は、内部振動機が鉄筋に接しないように、再振動締固めの実施時期と判定方法の実験と同様に実施し、コンクリートの表面仕上げは、硬化後の沈下ひび割れを測定するために実施しなかった。

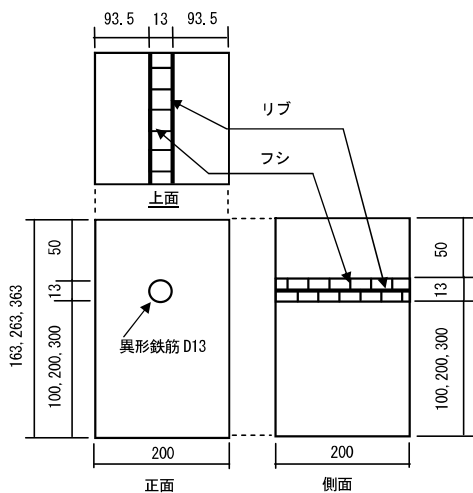


図-5 再振動締固めの効果用の試験体形状と寸法

表-6に再振動締固めの測定項目と方法を示す。再振動締固めの実施時期を判断するために、現場でも容易にコンクリートのワーカビリティを測定できる貫入抵抗および突き棒貫入量を練混ぜ完了後から測定した。貫入抵抗は、「JIS A1147 コンクリートの凝結時間試験方法」に準じてプロクター貫入試験機で測定した。突き棒貫入量は、図-6に示すようにコンクリート面に突き棒を自由落下させて、その貫入量を測定した<sup>9)</sup>。沈下ひび割れは、スケールによるひび割れ長さの測定と写真およびスケッチによる記録を実施した。

表-6 再振動締固めの測定項目と方法

測定項目	試験方法ほか
貫入抵抗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・JIS A 1147 コンクリートの凝結時間試験方法に準拠</li> <li>・試験体寸法 150×150×530mm</li> <li>・練混ぜ完了後から60分間隔で測定</li> </ul>
突き棒貫入量	<ul style="list-style-type: none"> <li>・試験体寸法 300×300×300mm</li> <li>・JIS A 1101 に準じた突き棒を自由落下させて、貫入量を測定</li> <li>・練混ぜ完了後から30分間隔で測定</li> </ul>
圧縮強度	<ul style="list-style-type: none"> <li>・試験体寸法 直径125×250mmの円柱試験体</li> <li>・材齢28日の水中養生後に圧縮試験を実施</li> </ul>
ひび割れ長さ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・スケールによるひび割れ長さの測定</li> <li>・試験体寸法 図-5参照</li> <li>・写真およびスケッチによる記録</li> </ul>

3.2 実験結果

図-7に水セメント比、スランブおよびコンクリートの養生温度をパラメータとした場合の練混ぜ完了からの再振動締固め実施時期と圧縮強度の関係を示す。再振動締固めの実施時期の経過に伴って圧縮強度は10~20%増加し、最大値を示した後に低下傾向を示している。圧縮強度が最大となる再振動締固めの実施時期は、水セメント比、スランブおよび養生温度の影響により練混ぜ完了後から1~3時間と変動しており、水セメント比およびスランブに比べて養生温度の影響が大きいことがわかる。これは、セメントの水和反応の温度依存性が高いことに起因する。また、最大値以降の圧縮強度低下の原因として、写真-1のようにセメントの凝結の進行によりコンクリート表面がブリーディング水で覆われて内部振動機を引き抜いた穴が残らない状態から、ブリーディン

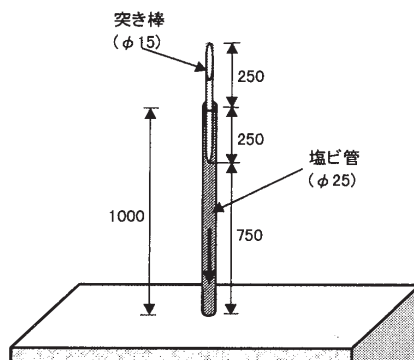


図-6 突き棒を用いた貫入試験方法

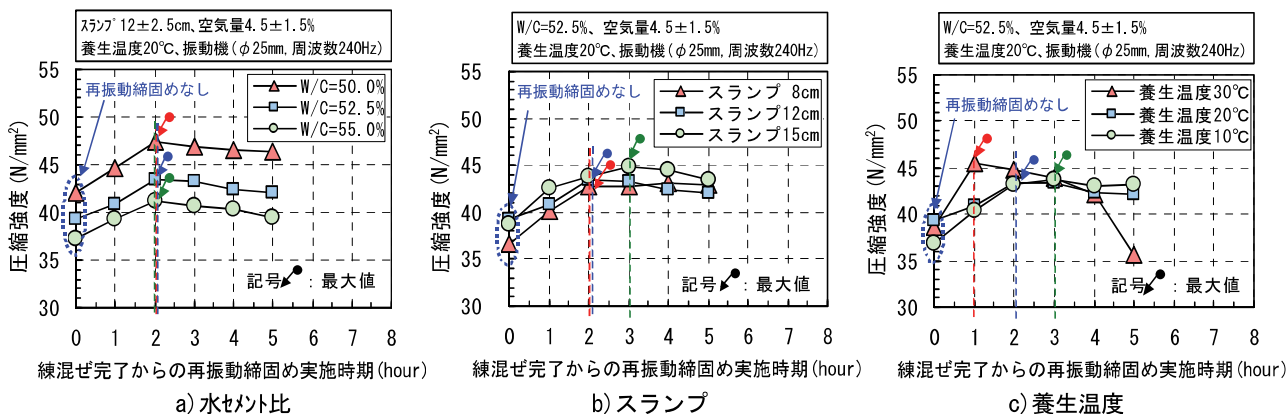
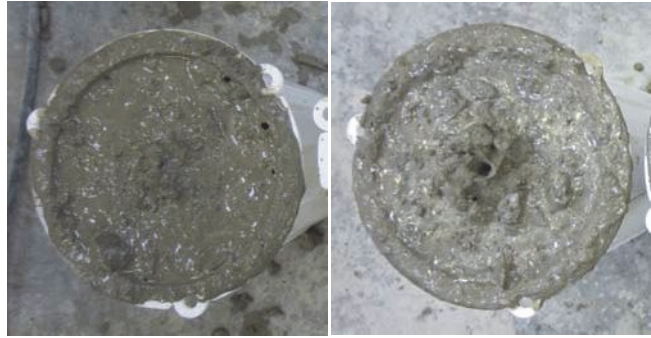


図-7 各種要因における再振動締固めの実施時期と圧縮強度

グ水がなくなり内部振動機を引き抜いた穴が残る初期欠陥となることが考えられる。なお、再振動締固め後の圧縮強度が最大値以降も再振動締固めなしよりも大きな値を示しており、内部振動機を引き抜いた穴が残る状態でも、再振動締固めによりコンクリート中の空気や余剰水が抜け出すことがわかる。

図-8 に水セメント比をパラメータとした練混ぜ完了からの経過時間と貫入抵抗の関係、図-9 に水セメント比をパラメータとした練混ぜ完了からの経過時間と突き棒の貫入量の関係を示す。コンクリートの凝結時間の判定に用いられる貫入抵抗は、練混ぜ完了から5時間以降で明確な増加を示し、水セメント比が小さいほど貫入抵抗の増加傾向が大きくなっている。コールドジョイント防止の判定に用いられる突き棒の貫入量は、練混ぜ完了直後から3時間程度まで大きな減少傾向を示し、その後は収束している。また、水セメント比が小さいほど突き棒の貫入量の減少傾向が大きくなっている。さらに、スランブおよび養生温度をパラメータとした場合も同様な結果が得られたことから、再振動締固めの実施時期を判定する方法として、再振動締固めにより圧縮強度が最大となる練混ぜ完了後から1~3時間に測定値の変化割合が大きい突き棒貫入量を採用する。

図-10 に水セメント比をパラメータとした場合の再振動締固めによる圧縮強度最大時の突き棒貫入量と練混ぜ完了からの経過時間の関係、表-7 に内部振動機を引き抜いた穴が残る時期を考慮した水セメント比、スランブおよび養生温度による再振動締固めの実施時期と突き棒貫入量を示す。圧縮強度が最大となる再振動締固めの



1) 練混ぜ完了直後 2) 練混ぜ完了から2時間後  
写真-1 内部振動機を引き抜いた穴の状況

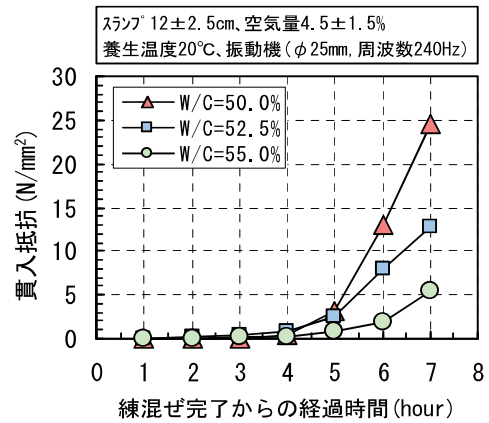


図-8 練混ぜ完了からの経過時間と貫入抵抗(水セメント比)

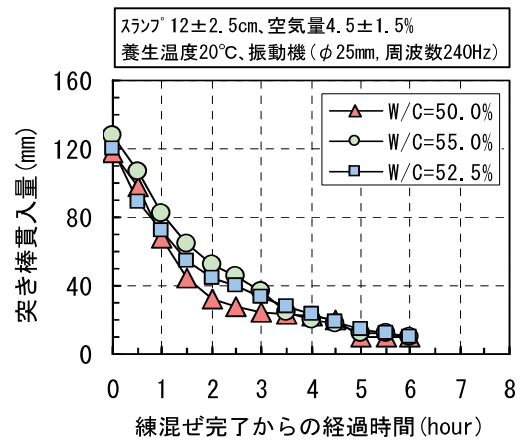


図-9 練混ぜ完了からの経過時間と突き棒貫入量(水セメント比)

表-7 再振動締固めの実施時期と突き棒貫入量

要因	水セメント比	練混ぜ完了からの経過時間 (hour)		③ 再振動締固めの実施時期 (hour) (①または②の短い方)	④ 突き棒貫入量 (③の時期)
		① 圧縮強度の最大時	② 振動機の引抜き穴が残る時期		
水セメント比	50.0%	2.0	2.0	2.0	35mm
	52.5%	2.0	2.5	2.0	45mm
	55.0%	2.0	3.5	2.0	50mm
スランブ	8cm	2.0	2.5	2.0	40mm
	12cm	2.0	2.5	2.0	45mm
	15cm	3.0	2.5	2.5	50mm
養生温度	10°C	3.0	3.5	3.0	40mm
	20°C	2.0	2.5	2.0	45mm
	30°C	1.0	1.5	1.0	40mm

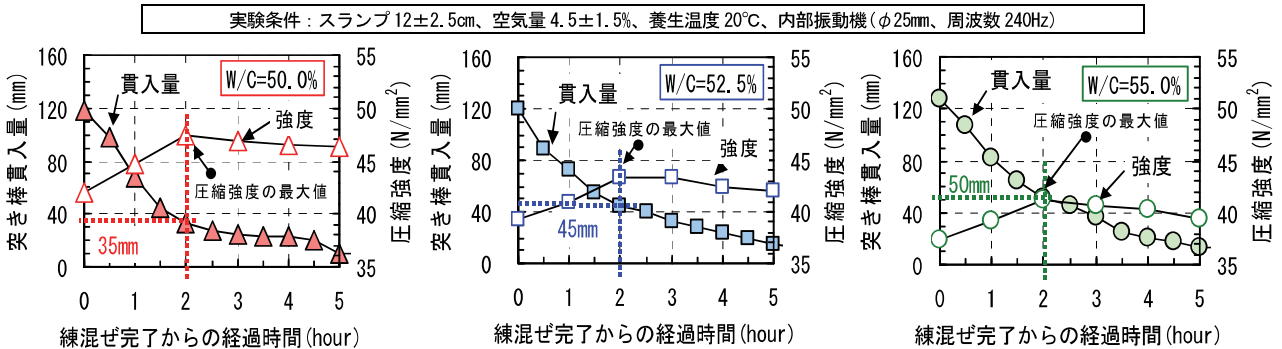


図-10 再振動締固めによる圧縮強度最大時の突き棒貫入量と練混ぜ完了からの経過時間(水セメント比の影響)

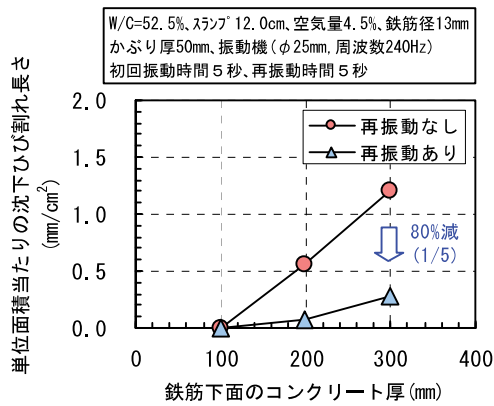


図-11 鉄筋下面のコンクリート厚と沈下ひび割れ長さ

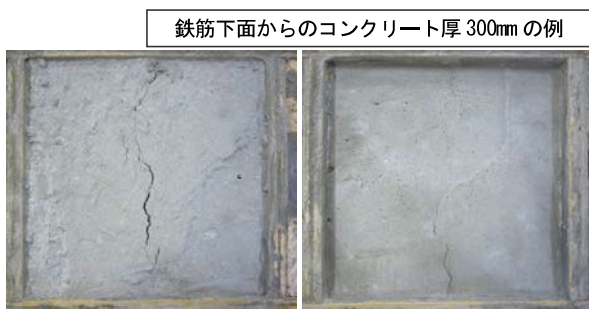


写真-2 再振動締固めの有無による沈下ひび割れ状況

実施時期は練混ぜ完了後から 1~3 時間、突き棒貫入量は 35~50mm となり、各種要因に応じた再振動締固めの実施時期と突き棒貫入量を整理できた。これにより、今回の実験の範囲では、突き棒貫入量を 50mm 以上とすることでコンクリート配合および養生温度に関係なく、内部振動機を引き抜いた穴による初期欠陥のない良好な圧縮強度となる再振動締固めを実施できる。

図-11 に再振動締固めの有無による鉄筋下面のコンクリート厚と単位面積あたりの沈下ひび割れ長さの関係、写真-2 に再振動締固めの有無による沈下ひび割れ状況を示す。単位面積あたりの沈下ひび割れ長さは、試験体表面の沈下ひび割れ総延長を試験体の表面積で除して算出した。鉄筋下面のコンクリート厚の増加に伴って単位面積あたりの沈下ひび割れ長さも増加している。再振動締固めにより、単位面積あたりの沈下ひび割れ長さは、再振動締固めなしに比べて 80%減少した。これにより、鉄筋下面に発生するブリーディング水による空隙も減少し、鉄筋の付着力も改善すると考えられる<sup>7)</sup>。

#### 4. まとめ

小型試験体を用いた内部振動機の締固め範囲、再振動締固めの実施時期と判定方法およびその効果に関する室内試験を行い、以下の結果を得た。

- i. 呼び強度 24 相当のコンクリートに一般的な内部振動機 (直径 25mm、周波数 240Hz) を用いた場

合、内部振動機からの水平距離とコンクリート中の加速度の関係から、締固めにより硬化特性が標準養生試験体と同等以上になる範囲を判定できる

- ii. 再振動締固めの実施時期を判定する方法として、再振動締固めにより圧縮強度が最大となる練混ぜ完了後から 1~3 時間に測定値の変化割合が大きい突き棒貫入量を採用した
- iii. 圧縮強度が最大となる再振動締固めの実施時期と突き棒貫入量の関係から、突き棒貫入量を 50mm 以上とすることで、コンクリートの配合および養生温度に関係なく、初期欠陥のない良好な圧縮強度が得られる再振動締固めを実施できる
- iv. 再振動締固めにより圧縮強度は 10~20%増加し、単位面積当たりの沈下ひび割れ長さは 80%減少する

以上の結果から、コンクリート中の振動加速度から得られる適切な締固め間隔で内部振動機による振動締固めを行い、再振動締固めの実施時期を突き棒貫入量により管理することで、均質かつ密実なコンクリートが得られ、コンクリート構造物の品質が向上する。

#### 5. あとがき

コンクリートの振動締固め方法について、内部振動機の締固め範囲、再振動締固めの実施時期と判定方法およびその効果をまとめることができた。今後は、振動締固めによるコンクリートの品質向上を目指して、現場等の施工部門への展開を図りたい。

#### 【参考文献】

- 1) 近松竜一ほか、「コンクリートの締固め作業を効率化-新型高性能パイプレータの開発」、セメント・コンクリート、No.766、pp.33-39、2010.12
- 2) 土木学会、「2007年制定 コンクリート標準示方書 施工編」、pp.121-122、2008.3
- 3) 村田二郎、「コンクリート振動機の知識」、コンクリート工学、Vol.33、No.8、pp.26-34、1995.8
- 4) 三坂岳広ほか、「再振動締固めによるコンクリートの均一性の確保に関する考察」、佐藤工業技術研究所報、No.36、pp.21-26、2011
- 5) 西林新蔵ほか、「コンクリート工学ハンドブック」、朝倉書店、pp.309-310、2009.10
- 6) 土木学会、「103 コンクリートライブラリー コンクリート構造物のコールドジョイント問題と対策」、pp.53-54、2000.7
- 7) 大塚晋也ほか、「鉄筋とコンクリートの付着応力-すべり関係に及ぼすブリーディングの影響」、日本建築学会四国支部研究報告集、pp.11-12、2010.4