

論文 再振動締固めの強度増進効果および実施方法に関する実験的研究

水田 実^{*1}・加藤 淳司^{*2}・寺澤 正人^{*3}

要旨：本研究は、再振動締固めの強度増進効果の検証と効果を得るための実施方法に関して検討を行ったものである。先ず室内実験において、再振動締固めには強度増進効果があること、再振動実施時期はプロクター貫入抵抗値が 0.1N/mm^2 以前の時期が望ましく、その実施時期の判断は N 式貫入試験法および積算温度を用いて可否判定できることを明らかにした。次に実大部材寸法に近い壁状模擬供試体を用いて実験し、再振動締固め時にコンクリートに発生する最大加速度振幅累計値と圧縮強度増進効果には関係があり、この関係からバイブレータの最適挿入間隔を決定できる可能性があることを確認した。

キーワード：再振動締固め、強度増進、凝結、ブリーディング、N 式貫入試験

1. はじめに

施工欠陥のない高品質なコンクリート構造物を構築するためには、適切な締固めを行うことが重要である。型枠内に打ち込まれたコンクリートを空隙の少ない、緻密なものとするためには、振動や突固めなどにより十分に締固めなければならない。一般に、コンクリートの締固めは、打設直後において振動を加えるものと、コンクリートをいったん締固めた後に、適切な時期に再び振動を加える再振動締固め（以後、再振動という）の 2 種類に大別することができる。

「2007 年制定コンクリート標準示方書[施工編]¹⁾」には、「再振動を適切な時期に行うと、コンクリートは再び流動性を帯びてコンクリート中にできた空隙や余剰水が少なくなり、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などに効果がある」ことが示されている。しかし、再振動が実際の施工現場で適用された事例報告は少ない。その理由として、凝結し始めたセメント硬化体の組織を破壊することに対する不安や再振動時の加振時間、再振動実施時期判断手法などの実施方法に関するデータが不足していることなどが、再振動が一般的に施工されない要因のひとつであると推察される。

本研究では、再振動の強度増進効果の検証と最適な実施方法を確立することを目的として、以下に示す項目について実験・検討を行った。

- (1) 再振動時の加振時間と圧縮強度の関係の確認
- (2) 再振動実施時期と圧縮強度の関係の確認および最適な再振動実施時期の判断手法の検討
- (3) 実大部材寸法に近い模擬体を利用した再振動の効果の確認とバイブレータの最適挿入間隔の検討

本論文は、既に報告している研究成果^{2), 3)}に新たな知見と考察を追記・加筆し取りまとめたものである。

2. 既往研究の概要

再振動に関する既往の研究事例は多くはないが、「まだ固まらないコンクリートに対して適切な時期に再振動を実施した場合には、圧縮強度を改善する効果がある」という報告^{4), 5)}がなされている。竹村らの報告⁵⁾では、「再振動を行う時期は、ブリーディング終了時間を目安にすることができる」とされ、一方、岩瀬の報告⁶⁾では、「コンクリートに指を差し込んでできた穴が壊れない程度に固まり、水が溜まってきた頃が再振動を行う効率の良い時期」としている。ただし、これら既往の研究における、再振動の実施手段の多くは表面振動機⁴⁾や振動台⁵⁾を用いた外部振動によるものであり、実施工で一般に使用される内部振動機（以後、バイブレータという）を用いて再振動の強度増進効果などを定量的に評価した研究事例は見当たらない。

3. 室内実験

3.1 再振動時の加振時間に関する実験（実験 I）

(1) 実験目的・概要

実験 I では、再振動時の加振時間が圧縮強度に及ぼす影響の確認を目的として圧縮強度試験を実施した。

(2) 実験の要因と水準

表-1 に実験の要因と水準を示す。

(3) 使用材料およびコンクリートの調合

ここでは、レディーミクストコンクリート呼び強度 30 の調合を想定した。表-2 に使用材料を示す。表-3 にコンクリートの調合を示す。

(4) 実験方法

気温 20°C の環境下にて、 $\phi 150 \times 300\text{mm}$ の型枠に十分な量のコンクリートを 1 層で打設した後に締固めを実施し、これを供試体とした。打設直後の締固めおよび再振

*1 飛島建設（株）技術研究所 第三研究室 修士（工学）（正会員）

*2 飛島建設（株）建築事業本部 建築部（正会員）

*3 飛島建設（株）技術研究所 第三研究室 室長（正会員）

動には、直径 40mm、長さ 400mm の高周波バイブレータ (200V 振動周波数 200Hz) を使用し、まず打設直後の締固めを 10 秒間行い、その後、表-1 に示す加振時間および実施時期で再振動を行った。供試体の養生はコンクリート上端面のみをポリエチレンフィルムで密封した上で、型枠を装着したまま供試体をポリエチレン袋に入れ、これを材齢 7 日まで温度 20℃、R.H.80% に設定した恒温恒湿室に静置する封かん養生によって行った。フレッシュコンクリートに対してはスランプ、空気量、コンクリート温度の測定試験 (以後、フレッシュ試験という) を実施し、硬化コンクリートに対しては材齢 7 日で圧縮強度試験を実施した (試験体数: n=3)。なお、スランプ試験は JIS A 1101、空気量試験は JIS A 1118、圧縮強度試験は JIS A 1108 に準拠して実施した。

(5) 実験結果および考察

コンクリートのスランプは 23.0cm であり、他のシリーズと比べやや高めとなったが、コンクリートの材料分離等がなく、良好な状態であったため、試験に供した。空気量は 4.7%、コンクリート温度は 22.0℃であった。図-1 に再振動実施時期と圧縮強度比の関係を加振時間ごとに示す。ここに圧縮強度比とは、再振動を実施した供試体の圧縮強度を実施しなかった供試体の圧縮強度 (以後、基準強度という) で除した値である。再振動実施時期の違いによらず、加振時間を 40 秒とする方が 20 秒とする場合よりも圧縮強度が高く、実施時期を加水から 150 分、加振時間を 40 秒とする場合には基準強度に対し 11% の強度増進効果が確認された。これは、再振動の強度増進効果を得るためには、再振動の実施時期を適切な時期に設定する必要があることを示唆している。

3.2 最適再振動実施時期に関する実験 (実験 II)

(1) 実験目的・概要

実験 II では、再振動実施時期の判断手法を詳細に検討することを目的として、種々の試験を実施して再振動実施時期と圧縮強度の関係について調べた。再振動実施時期の判断は、竹村らの既往の研究⁵⁾を参考にブリーディング試験およびプロクター貫入抵抗試験により検討した。また、現位置でコンクリートの凝結状況を簡易判定できる N 式貫入試験法⁷⁾および積算温度を用いた評価方法により、再振動実施時期を判断することが可能かどうかについても検討を行った。

(2) 実験の要因、水準、試験項目

実験 II では、試験項目によって 2 つのシリーズに分けて、表-4 に示す要因、水準および試験項目で実験を実施した。なお、実験 I で得られた結果より、再振動時の加振時間は 40 秒に固定することにした。

(3) 使用材料およびコンクリートの調査

実験 II-1 では、呼び強度 21、実験 II-2 では、呼び

表-1 実験の要因と水準 (実験 I)

実験	加振時間 (秒)	再振動実施時期 (分: 加水から)		
		120	150	180
I	20	●	●	●
	40	●	●	●

表-2 コンクリート作製に使用した材料 (実験 I)

材料	記号	種類・仕様
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.15g/cm ³
水	W	上水道水
細骨材	S	砕砂 (鹿島産) 表乾密度 2.58g/cm ³
粗骨材	G-①	砕石 5号 (八王子産) 表乾密度 2.67g/cm ³
	G-②	砕石 6号 (八王子産) 表乾密度 2.68g/cm ³
混和剤	Ad	AE減水剤 標準形

表-3 コンクリートの調査 (実験 I)

実験	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤 Ad (C×%)
			W	C	S	G-①	G-②	
I	50	50	175	350	863	536	357	0.8

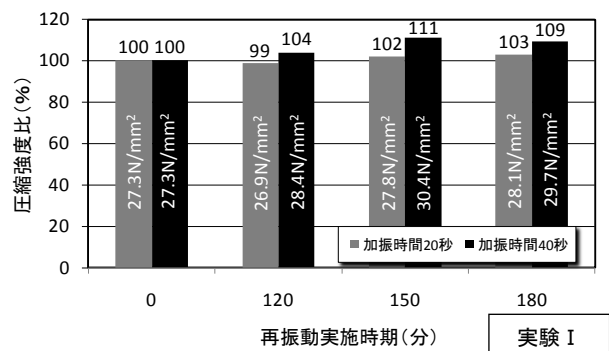


図-1 再振動実施時期と圧縮強度比の関係

表-4 実験 II の要因、水準、試験項目

実験	再振動実施時期 (分: 加水から)						試験項目	
	60	90	120	150	180	210		240
II-1			●	●	●			<ul style="list-style-type: none"> フレッシュ試験 ブリーディング試験 プロクター貫入抵抗試験 圧縮強度試験
II-2	●	●	●	●		●	●	<ul style="list-style-type: none"> フレッシュ試験 N式貫入試験 圧縮強度試験

表-5 コンクリートの製造に使用した材料 (実験 II)

材料	記号	種類・仕様
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³
水	W	地下水・上澄水
細骨材	S-①	砕砂 (佐野産) 表乾密度 2.63g/cm ³
	S-②	陸砂 (成田産) 表乾密度 2.62g/cm ³
粗骨材	G	砕石 (佐野産) 表乾密度 2.70g/cm ³
混和剤	Ad	AE減水剤 標準形

強度 27 のいずれも目標スランブ 18±2.5cm, 目標空気量 4.5±1.5%のレディーミクストコンクリートを実験に供した。表-5 に使用材料, 表-6 にコンクリートの調合を示す。

(4) 実験方法

実験環境気温, 供試体の作製方法, 締固め方法および養生方法は, 3.1 節(4)項に既述した実験 I の内容と同じとした。実験 II-1 の試験項目は, フレッシュ試験, ブリーディング試験, プロクター貫入抵抗試験および材齢 28 日での圧縮強度試験 (試験体数: n=3) とした。ここにブリーディング試験は JIS A 1123, プロクター貫入抵抗試験は JIS A 1147 に準拠して実施した。

実験 II-2 の試験項目は, フレッシュ試験, N 式貫入試験および材齢 28 日での圧縮強度試験 (試験体数: n=3) とした。N 式貫入試験はφ450mm, 深さ 350mm のポリバケツ内に打設したコンクリート打ち上がり面に対し, 文献⁷⁾に準拠して, 内径 25mm, 長さ 1m の塩ビ管を鉛直に立て, これをサヤ管としてスランブ試験に使用する突き棒 (φ15mm, 長さ 50cm) を鉛直方向に 75cm 自由落下させ, コンクリートへの突き棒貫入量を測定した。

(5) 実験結果および考察

実験 II-1 のコンクリートのスランブは 19.0cm, 空気量は 3.8%, コンクリート温度は 15.0°Cであった。実験 II-2 では, スランブ 16.5cm, 空気量 3.0%, コンクリート温度 16.0°Cであった。図-2 に実験 II-1 で得られた再振動実施時期と圧縮強度比の関係を示すが, 再振動実施時期 120 分, 150 分(加水から)で基準強度に比較して 6%程度の強度増進効果が確認できた。これより, 再振動の実施時期は, バイブレーターの挿入が容易で, コンクリートに振動を与えることが可能な時期であると考えられた。しかし, その時期の限界点を定量的かつ明確に示す既往の研究がないため, 限界点がコールドジョイントの発生限界 (=コンクリートを打ち重ねて, 下層コンクリートをも振動させ上下層を一体にできる限界点) とすれば, 文献⁷⁾に示されるコールドジョイントの発生限界であるプロクター貫入抵抗値 0.1N/mm² が再振動可能限界点を定量的に判断する目安値になると本研究では考えた。図-3 にプロクター貫入抵抗値試験結果を示すが, 圧縮強度試験で再振動の強度増進効果が確認された再振動実施時期 120 分, 150 分(加水から)はプロクター貫入抵抗値が 0.1N/mm² に達する以前にあることがわかる。また, 図-3 にはブリーディング試験結果を併記しているが, プロクター貫入抵抗値が 0.1N/mm² に到達する時点でもブリーディングは未完了であった。これより, 再振動実施時期を定量的に判断するには, 竹村⁵⁾や岩瀬⁶⁾らが判断指標としているブリーディングとは別の指標によって評価することが良いと思われた。

表-6 コンクリートの調合 (実験 II)

実験	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤 Ad (C×%)
			W	C	S-①	S-②	G	
II-1	63.5	47.6	173	272	522	347	986	1
II-2	53.5	46.8	181	338	492	327	959	1

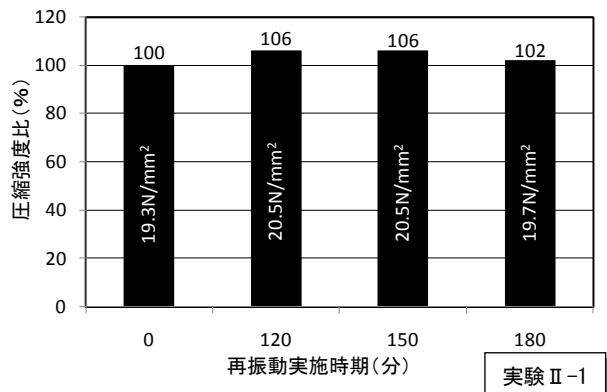


図-2 再振動実施時期と圧縮強度比の関係

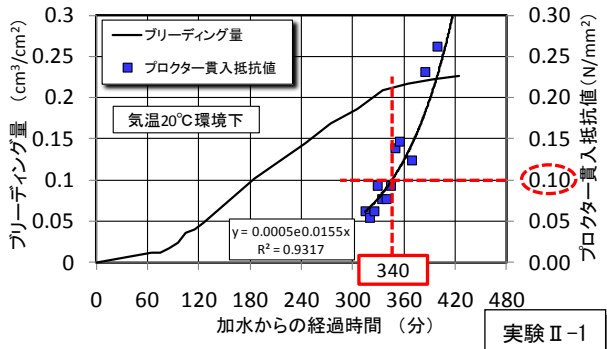


図-3 ブリーディングとプロクター貫入抵抗値試験結果

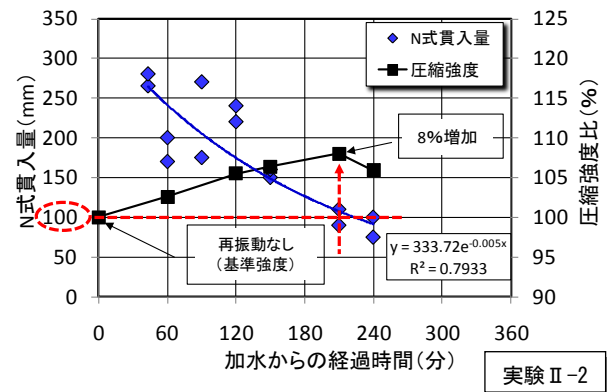


図-4 N 式貫入量と圧縮強度比の関係

図-4 に実験 II-2 で得られた N 式貫入試験の試験値である突き棒貫入量 (以後, N 式貫入量という) と圧縮強度比の関係について示す。N 式貫入量が 100mm の時点(加水から 210 分)で再振動を実施した場合において, 基準強度と比べて最も高い 8%の強度増進効果があることが確認できた。図-5 には, これまでに著者らが別途試験した種々の事例のプロクター貫入抵抗値と N 式貫入量の関係を示すが, 本図によればプロクター貫入抵抗値 0.1N/mm² に対応する N 式貫入量の上限値は概ね 100mm

であることが分かる。この事と実験Ⅱ-2においてN式貫入量が100mmとなる時点で再振動を実施した場合に最も圧縮強度が増進していることから、「プロクター貫入抵抗値 0.1N/mm²が再振動実施限界点を定量的に判断する目安値である」とする前述の考え方は適切であるといえる。凝結状態を示すN式貫入量を指標とする再振動実施時期の判断手法は、定量値を指標として可否判定できることから、有効なものといえるが、図-5が示すように同一のプロクター貫入抵抗値に対するN式貫入量値には幅がある点を考慮すると、N式貫入量値は一定の誤差を持っていると考えられる。よって、再振動の最適実施時期の判定指標を決定するには、本施工の前に確認実験をするのが望ましいと考えられる。

一方、再振動を実施工で確実にを行うためには、最適再振動実施時期や再振動可能限界点の予測が必要となる。前述のとおり再振動の効果には、コンクリートの凝結状態が影響するものであるが、凝結は打設環境条件などによって異なる。ここでは打設環境条件のうち気温に着目して、(1)式によって積算温度を算定し、積算温度MとN式貫入量の関係について整理した。

$$\text{積算温度 } M = \sum [(T+10) \cdot \Delta t] \quad (1)$$

ここに、T：気温（℃）、Δt：気温Tである時間

図-6に積算温度とN式貫入量の関係を示す。材齢が若くコンクリートの凝結が進行していない領域においては、N式貫入量が大きくなり測定貫入量が大きくばらつく傾向が見られるが、材齢が経過しN式貫入量が小さくなるほど貫入量が安定する傾向が認められた。また、両者の相関性は比較的高いことから、積算温度を用いて、最適再振動実施時期や再振動可能限界点を予測することができると考えられる。例えば、最適再振動実施時期がN式貫入量100mmの時点であるとする場合の積算温度は、本実験の場合では86.7（℃・hr）と推定することができる。

4. 壁状模擬供試体実験

4.1 再振動の効果の確認、バイブレータ最適挿入間隔の決定手法（実験Ⅲ）

(1) 実験目的・概要

実験Ⅲでは、室内実験で得られた知見を基に、実大部材レベルの模擬供試体にて、再振動の強度増進効果の確認と再振動実施時の最適バイブレータ挿入間隔決定方法の検討を目的に、再振動時にコンクリートに生じる振動加速度計測や強度試験等を実施した。

(2) 使用材料およびコンクリートの調合

使用材料は、表-5に示す実験Ⅱで使用了したものと同様である。表-7にコンクリートの調合を示す。

(3) 実験方法

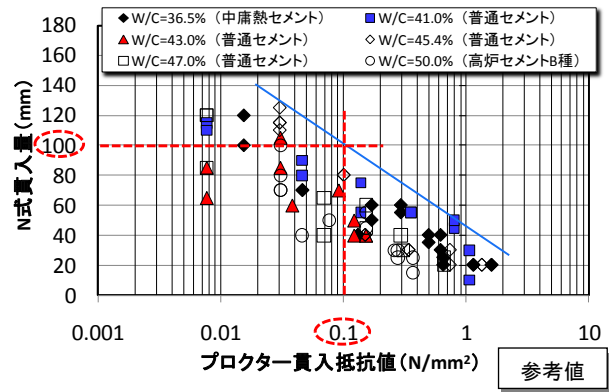


図-5 プロクター貫入抵抗値とN式貫入量の関係

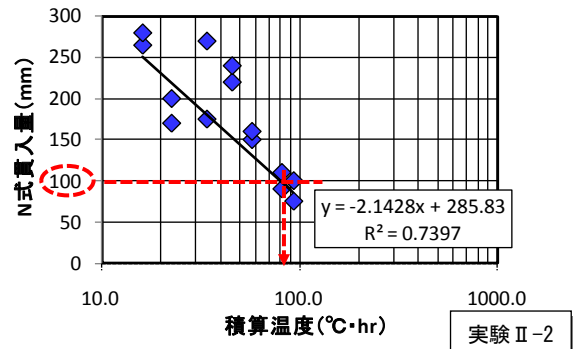


図-6 積算温度とN式貫入量の関係

表-7 コンクリートの調合（実験Ⅲ）

実験	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤
			W	C	S-①	S-②	G	Ad (C×%)
Ⅲ	49.1	45.6	184	375	469	311	959	1

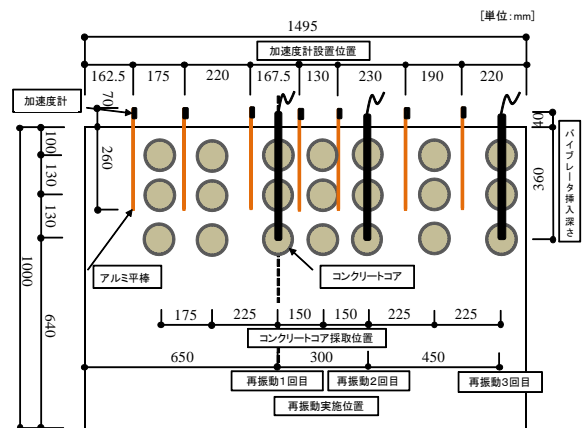


図-7 壁状模擬供試体側面形状、再振動実施位置、加速度計測位置、コア供試体採取位置

実大部材を模擬して高さ1000mm、長さ1495mm、厚さ210mmの壁状に打設したコンクリートに対し、再振動を実施して供試体（以後、壁状模擬供試体という）とし、再振動時にコンクリートに発生する振動加速度計測値と硬化後に採取したコア供試体の圧縮強度試験値をもとに再振動の強度増進効果の検証と再振動実施時の最適

バイブレータ挿入間隔の決定方法を検討した。図-7に壁状模擬供試体形状、再振動実施位置、加速度計測位置およびコア供試体採取位置を示す。コンクリート打設直後の締固めは、直径40mm、長さ400mmの高周波バイブレータ(200V 振動周波数200Hz)を用いて壁軸線上にて600mmの挿入間隔で10秒間実施した。再振動は、壁状模擬供試体コンクリートに対するN式貫入量が100mmになった時点(加水から260分)で、同様の高周波バイブレータを用いて、壁軸線上の図-7に示す位置で3か所、1箇所当たり40秒間の加振時間で連続的に実施した。なお、ブリーディング等を起因とする脆弱部は一般に構造体の上部で発生するため、再振動の対象は壁上部とし、バイブレータのコンクリートへの挿入深さは振動棒先端で360mmとなるようにした。再振動実施時に、頭部に加速度計(許容加速度10Gまたは20G)を設置固定したアルミ平棒(厚さ2.9mm、幅30mm、長さ330mm)を壁軸線上の図-7に示す位置にてコンクリートに挿入して、コンクリートに発生する振動加速度(壁長手軸直角方向)を測定した。加速度の測定はすべての再振動実施時を対象とし、再振動開始から10秒間、サンプリング間隔1/10000秒で実施した。再振動の強度増進効果の確認は、材齢28日において壁状模擬供試体から採取したコア供試体に対する圧縮強度と再振動をせずに作製し、壁状模擬供試体の近傍にて養生した円柱供試体(φ100×200mm、試験体数:n=3)に対して圧縮強度試験を実施して得られた基準強度とを比較することで実施した。また、再振動実施時の最適バイブレータ挿入間隔の決定方法は、振動加速度と圧縮強度の関係から検討した。

(4) 実験結果および考察

コンクリートのスランプは18.5cm、空気量は3.8%、コンクリート温度は9.7℃であった。図-8に再振動実施時に計測されたコンクリート振動加速度時刻歴波形の一例を示し、図-9には時刻歴波形を高速フーリエ変換し、バンド幅1HzとしてParzenウィンドウ⁸⁾にて平滑化した加速度スペクトルの一例を示す。なお、加速度スペクトルは、振動の初期段階とそれ以降では振動特性が変化する可能性が考えられたため、便宜的に2.0秒区間ごとに区切って求めた。その結果、いずれの再振動実施箇所、振動加速度計測位置および再振動実施中のいずれの時間においても、振動周波数に大きな違いはないことが確認され、再振動1回目の1次振動数(波形に対する影響度が最も高い振動数)は176~179Hz、再振動2回目の1次振動数は176~177Hz、再振動3回目の1次振動数は176~180Hzとなった。これらの1次振動数はほぼ同等であったことから、いずれにおいても同様の振動特性にてコンクリートを加振したと判断された。

図-10に壁状模擬供試体コンクリートのコア圧縮強

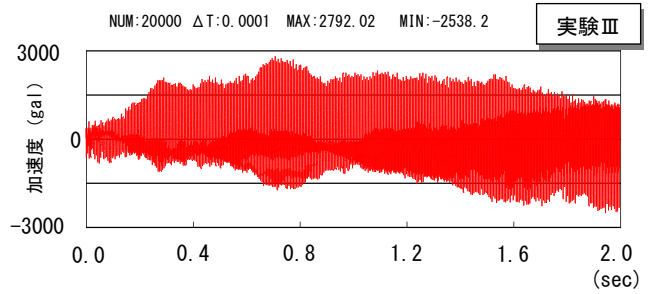


図-8 再振動時のコンクリート振動加速度時刻歴波形例 (0.0~2.0秒の区間表示)

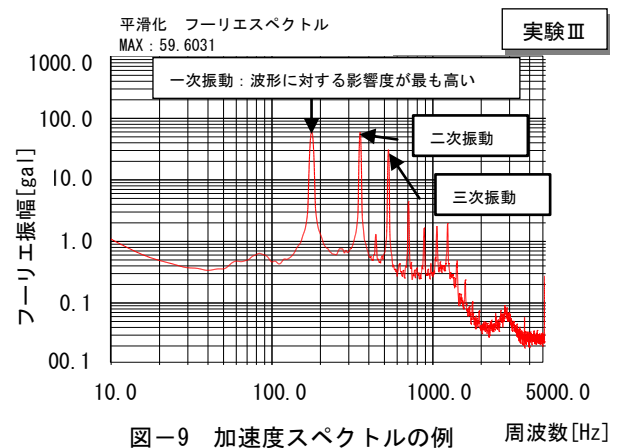


図-9 加速度スペクトルの例 周波数[Hz]

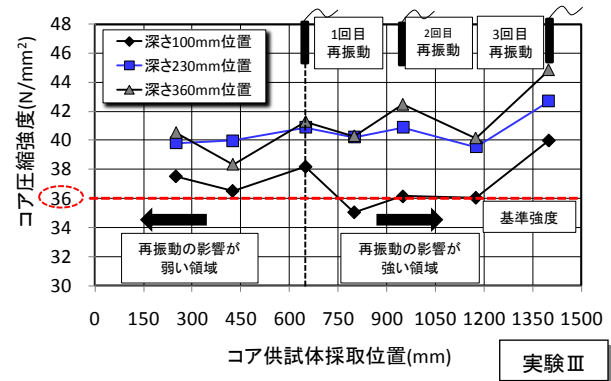


図-10 壁状模擬供試体のコア圧縮強度分布図

度分布図を示す。再振動を実施した場合、バイブレータの中央部(深さ230mm位置)から先端部(深さ360mm位置)において、基準強度36N/mm²よりも圧縮強度が最大で20%程度大きくなり、特にバイブレータ挿入箇所近傍での強度増進効果は顕著であることが確認された。これに対して、バイブレータの上方部(深さ100mm位置)では再振動による強度増進効果が認められない箇所が確認された。再振動を実施した後に、コンクリート上面にバイブレータの抜き跡が残存することがあるが、これが起因となって強度増進を阻害している可能性が考えられる。これより、再振動の強度増進効果を深さ方向で一様に得るためには、バイブレータを上下動させる、コンクリートの上面にバイブレータの抜き跡を残存さ

せないなどの工夫が必要であると判断された。

図-11には再振動実施時にコンクリートに発生した最大加速度振幅分布図を示す(図中に示したプロット点は、コア供試体採取位置において計測された最大加速度振幅の分布から線形補間して求めた値である)。最大加速度振幅は、前述したコア強度分布の傾向と同様に、概ねパイブレータ挿入箇所をピークとして最大となる傾向がみられた。このことから、ここでは、再振動によって発生するコア供試体採取位置での最大加速度振幅の累計値とコア圧縮強度の関係について整理した。最大加速度振幅累計値とコア圧縮強度の関係を図-12に示す。最大加速度振幅累計値とコア圧縮強度の関係には相関性があること、最大加速度振幅累計値が3000galを超えた時点から圧縮強度が増大する傾向があること、また最大加速度振幅累計値が5000gal程度以上となると、1000gal程度に比較して圧縮強度が約10%程度高くなることが確認できた。今後、さらに最大加速度振幅累計値と圧縮強度増進量の関係を示すデータを蓄積することにより、所要の圧縮強度増進量に対する最大加速度振幅累計値の指標を求めることが可能になれば、再振動実施時の最適パイブレータの挿入間隔は、図-13に示すように、着目する点の強度増進量が所要値を満足する最大加速度振幅累計値(a+b+c)になるようにパイブレータ位置を設定することで決定できる可能性があると考えられる。

5. 結論

再振動の強度増進効果と実施方法に関して実験を通じて検討した。以下に本研究で得られた主な知見を示す。

- (1) 再振動には強度増進効果があり、5~20%程度の圧縮強度増進が期待できる。
- (2) 加振時間を40秒として再振動を実施すると、圧縮強度の増進効果が高くなる。
- (3) 再振動実施時期はプロクター貫入抵抗値が0.1N/mm²以前の時期が望ましく、その実施時期の判断はN式貫入試験法および積算温度を用いて実施できる。
- (4) 再振動実施時にコンクリートに発生する最大加速度振幅累計値を指標として、パイブレータの最適挿入間隔を決定できる可能性がある。

今後は、再振動の強度増進メカニズムの解明などを実施し、より効果的な再振動実施方法の確立をするとともに、最適な加振時間とコンクリートの材料分離への影響などについて研究を継続する必要があると考えている。

参考文献

- 1) 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, 2007.
- 2) 加藤淳司, 水田実:コンクリートの再振動締固めの

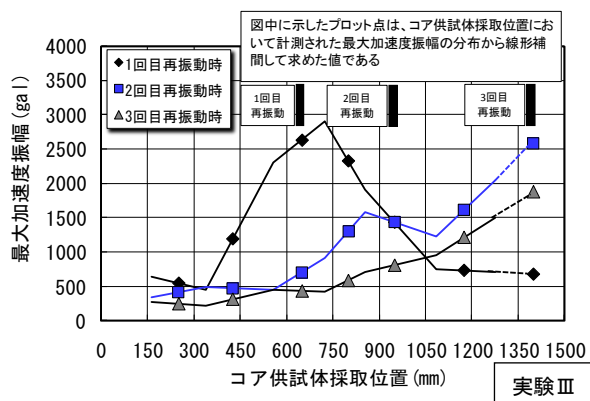


図-11 コンクリートの最大加速度振幅分布図

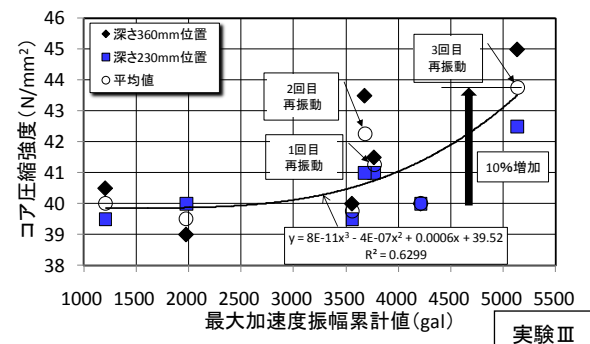


図-12 最大加速度振幅累計値とコア圧縮強度の関係

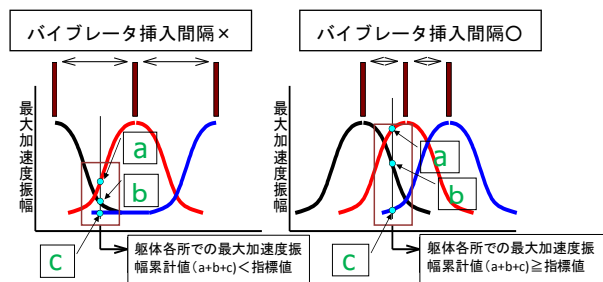


図-13 パイブレータの最適挿入間隔の決定法イメージ

実施工適用性に関する研究(その1)適用範囲, 施工法, 実施時期判断基準, 得られる効果についての室内実験結果, 日本建築学会学術講演梗概集(北陸), pp.673-674, 2010.9

- 3) 水田実, 加藤淳司:コンクリートの再振動締固めの実施工適用性に関する研究(その2)壁状模擬試験体による再振動締固め効果等の確認実験結果, 日本建築学会学術講演梗概集(北陸), pp.675-676, 2010.9
- 4) 三島直生, 畑中重光, 小林広実, 犬飼利嗣:透水性型枠を使用したコンクリートの性能改善, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.363-368, 2004
- 5) 竹村和夫, 阿部康俱:再振動締固めによる強度の増進効果について, セメント技術年報, Vol.39, pp.249-252, 1985
- 6) 岩瀬文夫:ひび割れのないコンクリートのつくり方第6回「確実な充てんと締め固め」, 日経アーキテクチュア, No.735, pp.90-93, 2003.1
- 7) 土木学会:コンクリートライブラリー103 コンクリート構造物のコールドジョイント問題と対策, 2000
- 8) 大崎順彦:新・地震動のスペクトル解析入門, 2004.6