論文　再振動締固めによるPCT桁間詰部の品質向上に関する実験的検討

吉次　優祐[*1]・徳光　卓[*2]・杉江　匡紀[*3]・幸　利和[*4]

要旨：プレキャストコンクリート工法は作業の省力化等の観点から効果的な工法として期待されているが，一体化を行う際は打継ぎが必要である。プレキャスト部材と間詰部の打継部は耐久性上の弱点となりやすいため，打継界面一体性の確保，後打ちコンクリートの密実性の確保が重要となる。本試験は，再振動締固めに着目し，PCT 桁の間詰部を対象としてコンクリートの密実性の向上と一体化効果の確認を目的に試験を行った。その結果，再振動締固めによって圧縮強度や静弾性係数が向上し，微細な連行空気の減少や材料分離は見られなかったが，打継界面の一体性を向上させる効果は小さいことが確認できた。

キーワード：　再振動締固め，間詰部，密実性，一体性

1.　はじめに

近年，プレキャストコンクリート工法は構造物の高品質化，作業の省力化の観点から効果的な工法として期待されているが，現場にて一体化を行う必要がある。

このようなプレキャスト部材と間詰部の打継部は耐久性上の弱点となりやすい。特に，橋梁床版で橋面に滞水を生じると，間詰床版と主桁の打継界面からの漏水の発生や，凍結防止剤を散布する地域では塩害による床版劣化が懸念される。このため，打継界面の一体性と，後打ちコンクリートの密実性の確保が重要となる。

コンクリート標準示方書では,「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，沈みひび割れの防止等に効果がある。」[1)]と記載されており, 既往の研究[2),3)]においても, さまざまな効果が確認されている。一方で, 不適切な再振動を行うことにより, 空気量の減少に伴う, 凍結融解抵抗性の低下や，骨材の沈降による材料分離なども懸念される。

本試験は, プレキャスト PCT 桁橋の間詰部を対象とし, 再振動締固めが間詰めコンクリートの品質や主桁との打継界面の一体性に与える影響を実験的に検証した。

2.　再振動実施時期判断のための予備試験

2.1 目的

再振動締固めは再振動を行う時期や振動時間の管理が非常に重要となる。再振動の時期が早すぎると過振動による材料分離が生じる恐れがあり，時期が遅すぎると，十分な締固め効果が得られない。予備試験は本試験における再振動の適切な実施時期を判断する手法の確立を目的として実施した。

2.2　試験方法

予備試験は既往の研究[4)]を参考にし，コンクリートの打ち込み・締固め直後から 10 分間隔でブリーディング量と N 式貫入試験での貫入量を測定した。

供試体寸法は 1550mm×950mm×250mm であり，合板型枠を用いて 2 体製作した。使用材料を**表-1**，コンクリートの配合を**表-2**，に示す。試験は 20℃に温度調整した室内にて打込みと計測を行った。

表-1　予備試験コンクリート使用材料

種類	記号	密度 (g/cm³)	内容，商品名	産地，メーカー
水	W	1.0	地下水	―
セメント	H	3.14	早強ポルトランドセメント	太平洋セメント
混和材	AD	3.16	ハイパーエクスパン	太平洋マテリアル
細骨材1	S1	2.60	砂(除塩海砂)	福岡県北九州市白鳥沖
細骨材2	S2	2.67	砂(石灰砕砂)	福岡県田川市弓削田新関の山鉱山
粗骨材1	G1	2.67	砕石2013	福岡県若宮市宇宮田
粗骨材2	G2	2.67	砕石1305	福岡県若宮市宇宮田
混和剤	Ad	1.10	チューポール EX50	竹本油脂

表-2　予備試験コンクリート配合

	f'_{ck} (N/mm²)	W/B (%)	s/a (%)	単位量（kg/m³）							
				H	W	AD	S1	S2	G1	G2	Ad
予備	30	47.5	43.7	343	172	20	455	313	604	401	3.63

(1) ブリーディング試験

ブリーディング試験は JIS A 112 に規定されているが，今回の配合は水セメント比が小さく，ほとんどブリーディングを生じないため，本方法では測定が困難である。そこで以下のような試験方法を用いてブリーディング量

*1　（株）富士ピー・エス　技術研究センター　工修　(正会員)
*2　（株）富士ピー・エス　技術研究センター　工博　(正会員)
*3　（株）富士ピー・エス　技術研究センター　(正会員)
*4　（株）富士ピー・エス　関西支店

の測定を行った。

試験方法の概念図を**図-1** に示す。試験ではバケツ内に床版厚と同等の 250mm の高さにコンクリートを打ち込み，φ12.7mm の PC 鋼より線を挿入して毛細管現象により余剰水を吸い上げ，高分子吸水シートで採取し，吸水量を質量で計測した。

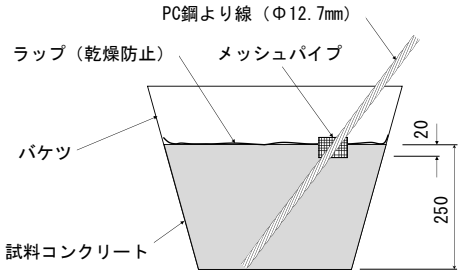


図-1　ブリーディング試験概念図

（2）N 式貫入試験

試験方法の概念図を**図-2** に示す。試験器具として一般的なコンクリート用の突き棒（φ16mm，L=50cm）と塩化ビニル製パイプ(φ25mm，L=1m）を用いた。

試験は,鉛直にセットしたパイプ内の突き棒を75cm自由落下させ，突き棒の貫入量を計測した。貫入量は貫入試験前のコンクリート表面高さからの差を基準とした。測定はコンクリート打込み，振動締固め後，10 分間隔で貫入量が 5cm を下回るまで実施した。

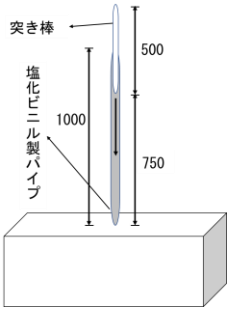
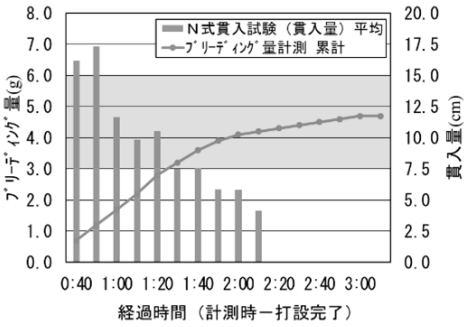


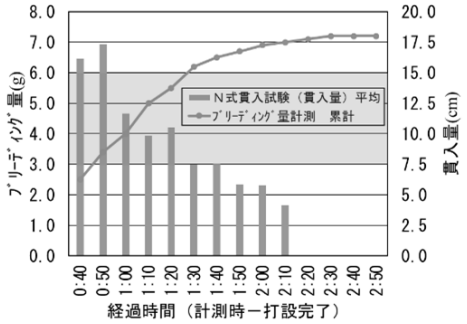
図-2　N 式貫入試験概念図

2.3　予備試験結果

荷卸し時のスランプは 13.5cm，空気量は 5.6%，コンクリート温度は 14.0℃であった。時間経過に伴う N 式貫入量とブリーディング量の関係を**図-3** に示す。供試体 1，2 ともに N 式貫入試験の貫入量は時間経過に従って減少した。参考文献[4] に示される再振動開始の目安である貫入量 75～150mm は，本試験では，打込み後 1 時間から 1 時間 30 分の間となった。ブリーディング量の増加率が低下し始める変化点は約 1 時間 30 分であり，貫入量が 75mm となるタイミングに一致した。このことから，再振動開始のタイミングは N 式貫入試験の値で判断でき，貫入量 100mm 前後を再振動開始の目安として，75～150mm の範囲で管理すればよいと判断した。



（a）供試体 1



（b）供試体 2

図-3　時間経過に伴う N 式貫入量とブリーディング量の関係

3.　再振動締固め効果検証試験

3.1　供試体作成

試験は床版を模擬した試験体を用いて実施した。供試体形状は**図-4** に示す通り 250mm×1000mm×1500mm であり，各水準 1 体を製作した。床版供試体の名称と実験水準の対比を**表-3** に示す。打継目処理は，縞鋼板模様を基本とし，洗い出しは凝結遅延材(ディスパライト DV)で処理を行った。

表-3　床版供試体の名称と実験水準の対比

再振動	打継目処理		
	水湿し	吸水防止剤	洗い出し
あり	供試体 WR	供試体 PR	供試体 RR
なし	供試体 WN	供試体 PN	供試体 RN

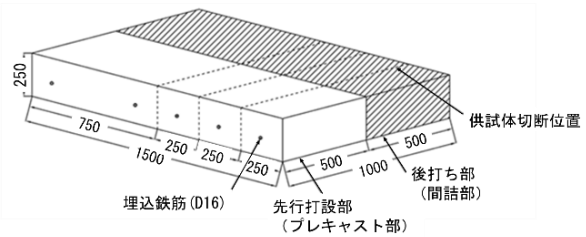


図-4　供試体形状図

供試体は実際の施工を想定して，先行打設部（プレキャスト部）(f'_{ck} =50N/mm^2)を打設し，1 週間湿潤養生後，17 日間気中養生を行った。その後，後打ちコンクリート（間詰部）を想定した後打ち部(f'_{ck}=30N/mm^2)を打設し，1 週間湿潤養生後，15 日間気中養生を行った。気中養生後，供試体はコア抜き，切断を行い，各試験に用いた。先行打設部の使用材料を**表-4**，コンクリートの配合を**表-5** に示す。後打ち部の使用材料，配合は予備試験と同じである。

表-4　先行打設部の使用材料

種類	記号	密度 (g/cm^3)	内容，商品名	産地，メーカー
水	W	1.0	地下水	―
セメント	H	3.14	早強ポルトランドセメント	太平洋セメント
細骨材1	S1	2.61	砂(除塩海砂)	福岡県北九州市白鳥沖
細骨材2	S2	2.68	砂(砕砂)	朝倉市下渕字桜ヶ葉山産
粗骨材1	G1	2.72	砕石2005	福岡県若宮市字唐人町
混和剤	Ad	―	マスターグレニウム8000P	BASFジャパン

表-5　先行打設部コンクリート配合

	f'_{ck} (N/mm^2)	W/B (%)	s/a (%)	単位量（kg/m^3）					
				H	W	S1	S2	G1	Ad
先行	50	38.0	41.0	434	165	363	367	1085	5.21

3.2　試験方法

表-6 に検証試験の試験項目を示す。

表-6　試験項目

試験目的	評価指標	試験方法
密実性の向上効果	圧縮強度 静弾性係数	供試体の間詰想定部から切り取ったコアの圧縮強度試験と静弾性係数測定試験
打継目の接着性及び密着性の評価	打継部の透水深さ 打継面の曲げ耐荷特性	供試体の打継部から切り取ったコアの透水試験 供試体の打継部を跨いで切出した梁の曲げ試験
凍結融解抵抗性の評価	気泡間隔係数	ASTM C 457に準じ，リニアトラバース法により測定
材料分離の評価	高さ方向の骨材分布	画像解析による供試体の間詰想定部から切り取ったコアの側面の粗骨材の面積率測定

(1)　圧縮強度試験・静弾性試験

試験は供試体 WR，WN を対象とし，各 3 体の後打ち部からコアを採取して，圧縮強度試験は JIS A 1108，静弾性係数試験は JIS A 1149 に基づいて実施した。

(2)　透水試験

透水試験は打継部より抜き出したコアを用いて実施した。打設面側のコア周囲 20～30mm にエポキシ樹脂を塗布しシーリングした。透水試験時にはバットに台木を並べ，コア供試体のエポキシ樹脂を塗布した打設面を浸透面とし，赤インク 10%水溶液を張り 3 日間静置した。浸透試験状況を**図-5** に示す。

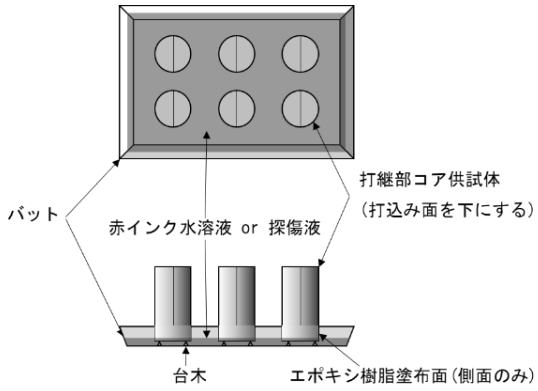


図-5　供試体形状図

(3)　曲げ試験

曲げ試験は**図-4** に示す供試体から 250mm×250mm×1000mm の梁供試体を 3 体切り出し，支間 750 mm，載荷点間 250 mm，パイ型変位計の標点間距離は 50mm として静的載荷を行った。載荷位置図を**図-6** に示す。

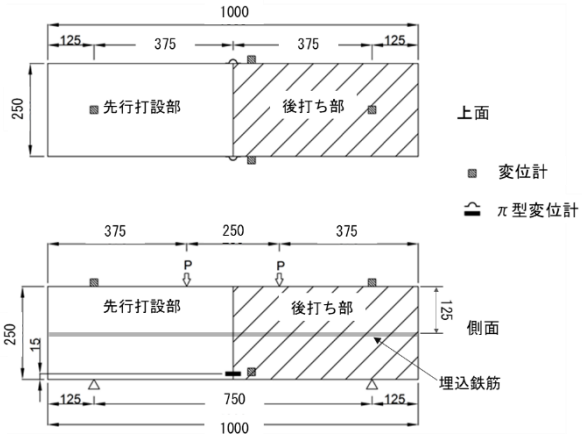


図-6　供試体載荷位置および変位計・パイゲージ取り付け位置図

(4)　気泡間隔係数試験

試料は供試体 RR，RN の後打ち部から採取したコアを用いた。コアは打設面から 20mm，125mm の位置でそれぞれ厚さ 10mm 程度になるように切断し，ASTM C 457 のリニアトラバース法により，気泡を測定した。

(5)　骨材分布測定

試料は供試体 RR，RN の後打ち部から採取したコアを用いた。**図-7** に示すように，コアの上・中・下の各区間の側面に露出した直径 5mm 以上の骨材の面積を計測し，各区間に占める粗骨材の面積率を求めて相対評価することで材料分離に与える影響を評価した。

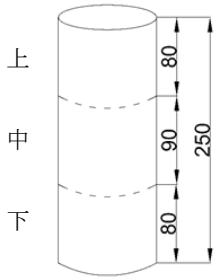


図-7　計測区間概要図

3.3　試験結果

(1) 圧縮強度と静弾性係数

圧縮強度と静弾性係数の測定結果を**表-7** に示す。圧縮強度の平均値は供試体 WR で 42.4N/mm^2，供試体 WN で 38.5N/mm^2 となり，圧縮強度は再振動により 10%程度向上した。

また，静弾性試験においては静弾性係数の平均値は供試体 WR が 31,733N/mm^2，供試体 WN が 29,933N/mm^2 となり，再振動により静弾性係数が 8%程度向上した。

既往の研究でも再振動を行うことで，強度が向上することが知られている [2)]。よって，本試験も妥当な結果と言える。強度向上の理由としては，再振動を行うことで，エントラップドエアの排出によるコンクリートの密実性の向上が考えられる。

表-7　圧縮強度と静弾性係数

供試体	圧縮強度（N/mm2）		静弾性係数（N/mm2）	
	供試体毎	平均	供試体毎	平均
WR	41.2	42.4	31,700	31,733
	43.0		31,500	
	43.1		32,000	
WN	38.0	38.5	29,600	29,933
	37.3		30,100	
	40.1		30,100	

(2) 透水試験

試験結果を**図-8** に示す。供試体 PR，PN は透水深さが平均で 20mm 以下となり，最大でも 26mm という結果であった。しかし，供試体 WR，WN は透水深さが平均で 175mm，192mm，最大が 252mm となり，コア全厚にわたっての透水が確認された。また，供試体 RR，RN は透水深さが平均で 65mm,88mm，最大で 192mm となった。洗出し処理した供試体 RR，RN は，吸水防止剤を使用した供試体 PR，PN に比べると，透水を防止する効果は小さい結果となった。

再振動の効果を見ると，供試体 WR，WN では最大透水深さは小さくなっているが，平均値は大きい。洗出しを行った供試体 RR，RN では平均透水深さは小さくなっているが，最大値は大きい。供試体 PR，PN の透水深さはほぼ変わらない結果となった。このことから打継面の透水深さに与える再振動締固めの効果は小さいと考えられる。

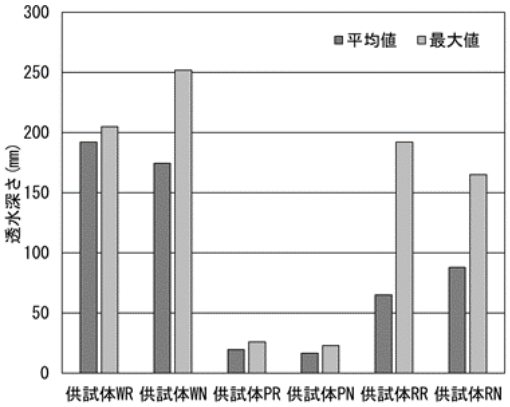


図-8　透水試験結果

(3) 曲げ試験

曲げ試験の結果を**図-9** に示す。また，各供試体の荷重とパイ型変位計の変位の関係を**図-10** に示す。荷重とパイ型変位計の変位の関係は，載荷初期は載荷荷重の増加にも関わらずほとんど変位を示さず，ある荷重に達した時点で微小な破壊音とともに打継目が開口して開口変位が一気に増加した。その後は荷重の増加と共に開口変位が増加する傾向を示したが，打継目の開口変位が増加するだけであり，最大荷重時においてもひび割れは発生せず，打継目の開口以降の開口変位の増分は供試体種別によらず一定となった。

曲げ引張強度は再振動を行い，それぞれ吸水防止剤を塗布，洗出し処理した供試体 PR，RR が大きく，次に再振動をせず，それぞれ吸水防止剤を塗布，洗出し処理した供試体 PN，RN，最も小さいのは打継面を水湿しした供試体 WR，WN の順となった。

曲げ試験について考察すると，供試体 PR，PN は吸水防止剤を塗布することによって，ドライアウト現象が防止され，接着性の向上が見られた。供試体 RR，RN は洗出し処理を行うことで，打継面の接触面積の増加が接着力向上につながったと考えられる。

再振動が打継ぎ面の接着力に与える効果について検討すると，吸水防止剤の効果が比較的安定した値が得られるものと仮定すれば，セメントペーストの接着強度は再振動により約 1.4 倍向上したことになる。同様に，供試体 RR，RN で違いをみると，接着強度は再振動により約 1.5 倍向上したことになる。しかし，供試体 WR，WN では同様な傾向が見られなかった。これは，**図-8** の透水試験結果において，供試体 WR，WN の打継面は明らかな剥離傾向を示しているが，供試体切り出し前の打継面に

は，目視で確認できる程度の目開きが生じていた。目開きを生じた主な要因はその状況から乾燥収縮が疑われる。供試体 RR，RN においても，供試体中央部付近の浸透深さは 45～36mm 程度に留まっているが，再振動を実施した供試体 RR の方が浸透深さは大きい結果となった。

総合的に考えると，再振動により打継界面の接着力の向上は期待できるが，吸水防止措置が不十分な場合，乾燥収縮による引張応力の方が接着力を上回るため，再振動の効果が明確に得られなかった可能性が考えられる。

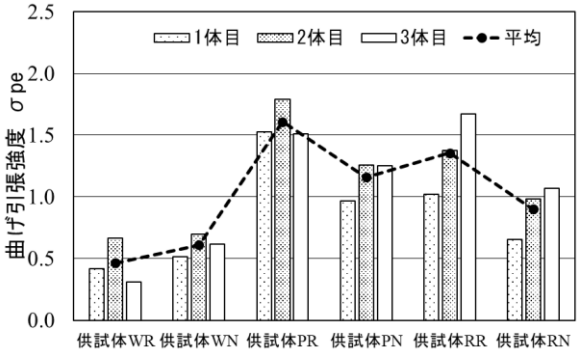
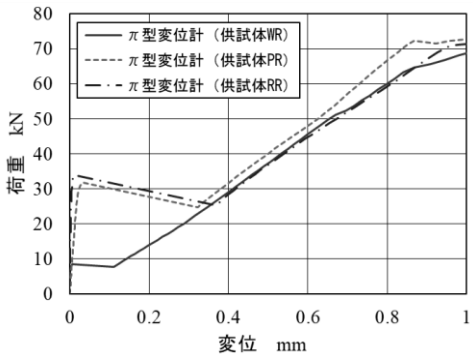
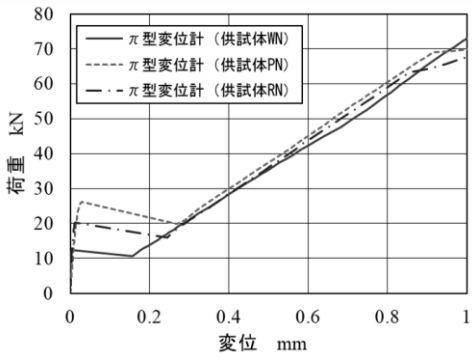


図-9　曲げ試験結果



(a) 再振動あり供試体



(b) 再振動無し供試体

図-10　曲げ載荷試験における荷重-変位図

(4) 気泡間隔係数と空気量

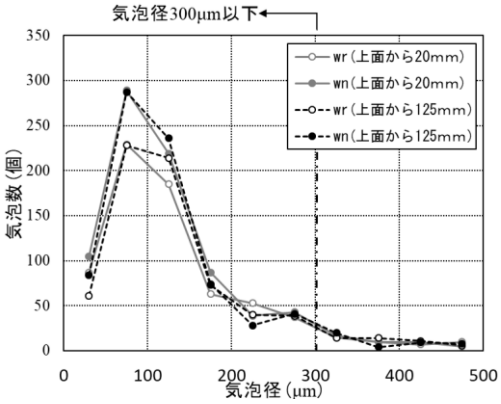
気泡間隔係数試験の測定結果を**表-8** に示す。再振動を実施した供試体 RR は空気量・気泡全数が減少しており，再振動によりコンクリート中から空気が排出されたことが確認できる。また，気泡間隔係数は再振動を行わない場合に対して 20～30μm 程度大きくなる結果となった。

一般に，良好な凍結融解抵抗性を得るには，気泡間隔係数を 200～250μm 程度以下とするのがよいとされている。**表-8** に示した気泡間隔係数を見ると，良好な凍結融解抵抗性が得られるとされる 200～250μm の範囲に収まっていることから，凍結融解抵抗性に与える影響は小さいと考えられる。

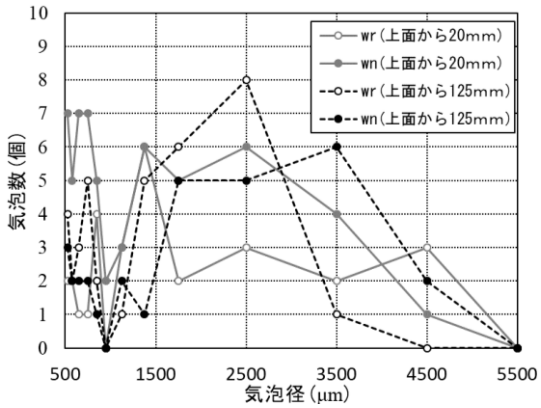
図-11 に気泡数量分布を示す。気泡径 300μm 以下の気泡に着目すると，上面から 20mm，125mm のいずれにおいても再振動による気泡数の低下が認められるが，再振動による気泡数は 85%程度の低下に留まっている。このことから，再振動締固めにより排出される気泡は，主に美観に影響する 500μm 以上のものが多く，凍結融解抵抗性に関係する微細な気泡の排出量は少ないと判断される。

表-8　気泡間隔係数

供試体	打設面からの深度 (mm)	総トラバース長 (mm)	気泡を通過したトラバース長 (mm)	硬化コンクリートの空気量 (%)	気泡全数 (個)	気泡間隔係数 (μm)
RR	20	2469.0	150.4	6.1	725	233
	125	2469.0	156.9	6.4	737	235
RN	20	2469.0	191.0	7.7	882	201
	125	2469.0	170.9	6.9	822	216



(a) 気泡径 500μm 以下

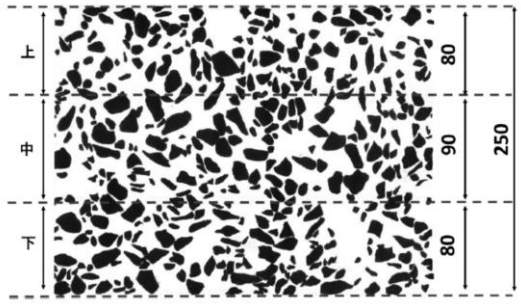


(b) 気泡径 500μm 以上

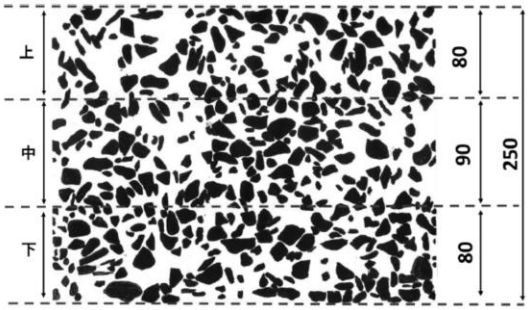
図-11　気泡数量分布

(5) 骨材分布

骨材の分布状況を**図-12** に，試験結果を**表-9** に示す。平均粗骨材面積率に対する各測定区間の粗骨材面積率の比は，上部，中部，下部の順におのおの，再振動を行った供試体 RR が 90.5%，103.4%，105.3%であり，再振動を行っていない供試体 RN では 90.5%，100.9%，108.2%となっている。いずれの供試体も，粗骨材面積率は中部，下部に比べて上部ではわずかに小さくなっているが，再振動の有無による有意な差は認められなかった。



(a) 供試体 RR



(b) 供試体 RN

図-12　骨材の分布状況

表-9　粗骨材面積率

供試体	測定区間	区間粗骨材面積率(%)	平均粗骨材面積率(%)	平均値に対する比(%)
RR	上	34.3	37.9	90.5
	中	39.2		103.4
	下	39.9		105.3
RN	上	40.9	45.2	90.5
	中	45.6		100.9
	下	48.9		108.2

4.　まとめ

本試験で得られた知見を以下に示す。

1. N 式貫入試験の貫入量が 75mm となる時期とブリーディング量の増加率が低下し始める時期は一致することから，再振動開始のタイミングは N 式貫入試験の貫入量 100mm 前後を再振動開始の目安とし，管理は 75～150mm の範囲で行えばよい。
2. 再振動の実施により，再振動を行わない場合に比べて，圧縮強度と静弾性係数は向上する。本実験では，平均圧縮強度で 10%程度，静弾性係数は 8%程度向上した。
3. 漏水防止の観点からみた再振動による打継部の接着性の改善効果はほとんど認められない。
4. 曲げ引張強度の観点からみると，再振動により打継界面の接着力の向上は期待できるが，吸水防止措置が不十分な場合，乾燥収縮による引張応力の方が接着力を上回るため，再振動の効果が明確に得られなかった可能性が考えられる。
5. 間詰コンクリートに対する再振動の実施はコンクリート中の空気量を全体的に低下させるものの，凍結融解抵抗性の確保に対して問題を生じるレベルではなく，微細な気泡に比べて粗大な気泡がより多く排出されるため，腐食促進物質の透過に対する抵抗性の確保や美観の向上という面で有効である。
6. 今回の試験で実施したタイミングで再振動を行えば，再振動が材料分離に与える影響はほとんどないと判断できる。

謝辞

本実験の実施に際し，福岡大学添田政司教授には貴重なご助言を賜りました。ここに深謝の意を表します。

参考文献

1) 土木学会：コンクリート標準示方書【施工編】，pp.129-132，2017

2)水田実，加藤淳司，寺澤正人：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1373-1378，2011

3)宮田敦典・中田善久・大塚秀三・新妻尚祐：再振動における振動方法の違いとコンクリートの力学的性質に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No1，2014，pp.1564-1569

4) 品田健太ほか：再振動締固めによる鉛直打継目の品質向上，土木学会第 72 回年次学術講演会，2017，VI-565，pp.1129-1130