

論文 コンクリート抵抗値による最適な再振動締固め実施時期の判断手法の適用性に関する研究

佐藤 悠士朗*1・榎原 弘貴*2・添田 政司*3・深見 桜*4

要旨: 本研究は、N 式貫入深さからコンクリート抵抗値を求め、その値を指標として最適な再振動の時期について検討をおこなった。その結果、最適な再振動時期のコンクリート抵抗値は、水セメント比の違いにかかわらず、 $17 \times 10^{-3} \text{N/mm}^2$ 程度であった。この時期に再振動を実施することで、ブリーディング発生量が最も増加し、より密実なコンクリートを作製することができる。ただし、 $30 \times 10^{-3} \text{N/mm}^2$ 程度まで凝結した時期に再振動を行うと、コンクリートの品質が低下する可能性がある。落下高さが異なる場合でも N 式貫入深さ試験から求まるコンクリート抵抗値に差はなく、現場状況に合わせた形状での判定が可能であると考えられた。

キーワード: 再振動, 締固め, N 式貫入深さ, 加速度, ブリーディング

1. はじめに

近年では、耐久性設計を導入して、水セメント比、かぶりの妥当性を事前に照査し、単位水量を管理するようになってきた。さらにコンクリートの高耐久化・高信頼化を図る幾多の技術開発がなされてきている。これらは、長期耐久性を確保する上で、適切な施工が行われていることを前提とし、それを期待しつつも、重要な打ち込みや締固めの妥当性を定量的にできる体系化がなされていないため、比較的早期に劣化・変状を呈しているものは少なくない。今でも施工現場では、締固め不足や過度の締固めにより初期欠陥を有するコンクリート構造物は後を絶たない。

一方で、打ち込みや締固め段階にて高耐久化や品質確保を図る手法として、再振動締固め法（以下、再振動とする）がある。土木学会「2017年制定コンクリート標準示方書【施工編】」によると、再振動は、適切な時期に再振動を行うことで、空隙や余剰水が少なくなり、圧縮強度、鉄筋との付着強度の向上および沈下ひび割れの低減に効果があるとされており、コンクリート品質の向上が期待されている¹⁾。これまでの著者らの検討では、再振動の実施時期や加振時間によって、耐久性の向上効果が大きく異なることが明らかになっている。さらに、耐久性向上が最も得られる再振動の最適な実施時期があることが分かっている²⁾³⁾⁴⁾。しかしながら、施工現場では、感覚と経験を基に再振動を行っており、再振動がもたらす効果を十分に付与できているとは言い難い状況にある。加えて、施工段階でも高耐久化や品質確保が期待できるにも関わらず、コンクリートの耐久性の向上に関する定量的な評価や研究もなされていない。そのため、再振動作

業における体系化とそれに伴う耐久性の向上効果を推定する手法を構築することで、コンクリート構造物の品質をこれまで以上に確保し、高耐久化に繋げる必要がある。

本研究では、再振動作業を実施する判断手法として、現場でも簡易に測定できる N 式貫入深さに着目した⁵⁾。貫入深さから適切な再振動実施時期の判断手法を構築することを目的としている。その一環として、本研究では、N 式貫入深さ試験による再振動作業の実施における判断手法への適用性について検討を行った。

具体的には、N 式貫入深さごとに再振動を実施して、パイプレータからの振動伝搬状況やブリーディング量との関係、硬化後の耐久性の指標として比抵抗や細孔空隙量の変化について明らかにした。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1、表-2 には、コンクリートの使用材料および配合をそれぞれ示す。コンクリートは、水セメント比が異なる 45、56% の 2 種類とした。配合は、市中ブランドで作製されている配合を参考とし、目標スランプおよび空気量は、 $10 \pm 2 \text{cm}$ 、 $4.5 \pm 1.5\%$ とした。練り上がり直後におけるスランプ、空気量および材齢 28 日における圧縮強度は、表-2 に示す通りである。

2.2 再振動の実施方法

図-1 には、実験で作製した供試体概要を示す。供試体は、加振に伴う振動エネルギーを把握するために予め $\phi 20 \text{mm}$ のアルミパイプを設置した $600 \times 100 \times 230 \text{mm}$ とした。打ち込みは、2 層に分けて行っており、1 層目は、コンクリートを型枠の底面から高さ 115mm 位置まで流し

*1 福岡大学大学院 工学研究科資源循環工学 (学生会員)

*2 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 博士 (工学) (正会員)

*3 福岡大学大学院 工学研究科資源循環工学 博士 (工学) (正会員)

*4 福岡大学大学院 工学研究科資源循環工学 (学生会員)

表-1 コンクリートの使用材料

材料	記号	種類	品質・性状・主成分
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度：3.16g/cm ³ 比表面積：3,300cm ² /g
水	W	上水道水	福岡県福岡市
細骨材	S	沓岐産	表乾密度：2.58 g/cm ³ 粗粒率：2.70
		玄界灘産	表乾密度：2.58 g/cm ³ 粗粒率：2.70
粗骨材	G	唐津産	表乾密度：2.80g/cm ³ 粗粒率：6.89
		津久見産	表乾密度：2.70g/cm ³ 粗粒率：6.89
混和剤	Ad	AE減水剤	リグニンスルホン酸塩 オキシカルボン酸塩
		AE剤	ポリカルボン酸系化合物

表-2 実験に用いた各種コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位置 (kg/m ³)					スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	
		W	C	S	G	AE減水剤				AE剤
56	47	168	300	839	979	6.0	0.69	8	4.5	28.3
45	44	164	366	766	1009	7.3	0.84	10	5	34

込み、棒状バイブレータ (径:30mm, 周波数 50Hz~60Hz) を用いて 5 秒加振した。2 層目は、型枠底面から高さ 230mm の位置まで流し込み、棒状バイブレータを深さ 180mm の位置まで挿入して、同様に 5 秒の加振を行った。棒状バイブレータの挿入位置は、図-1 に示す通りである。締固め時の振動エネルギーの測定には、加速度センサーを用いた。加速度センサーの設置位置は、図-1 に示す位置で行った。設置方法は、平面図に示すように高さ 115mm の所定の位置に予め設置していたアルミパイプの片側に、鉄板を樹脂で取り付け、鉄板に加速度センサーを取付けた。なお、アルミパイプは、コンクリートが自力で形状を保持できる状態まで凝結した時点でも取り出し、アルミパイプの跡は、硬化後にモルタルで修復した。

再振動を行った時期は、コンクリートのフレッシュ性状を簡易判定できる N 式貫入深さ試験によって得られる貫入深さを指標とした⁵⁾。図-2 には、N 式貫入深さ試験の方法を示す。コンクリートを内径 250mm, 内高 285mm のブリーディング容器に底面から 250mm まで打込みを行ったものに、φ25mm×1000mm の塩ビ管を打設面と垂直に設置した。その後、φ15mm×500mm の突き棒を 250mm まで塩ビ管内に挿入し、高さ 1000mm の位置から突き棒を自然落下させて貫入深さを測定した。再振動は、N 式貫入深さが 150mm (W/C56%)、120mm (W/C45%)、100mm、70mm (以下、図中では N150・N120、N100、N70 とする) の際の実施した。また、落下高さによる違いについても検討するために、図-2 に示す通り落下高さを 750mm、500mm に設定した条件でも併せて実施している。また、再振動実施時も初期締固め時と同様の位置に棒状バイブレータを挿入し、5 秒間の加振を行った。

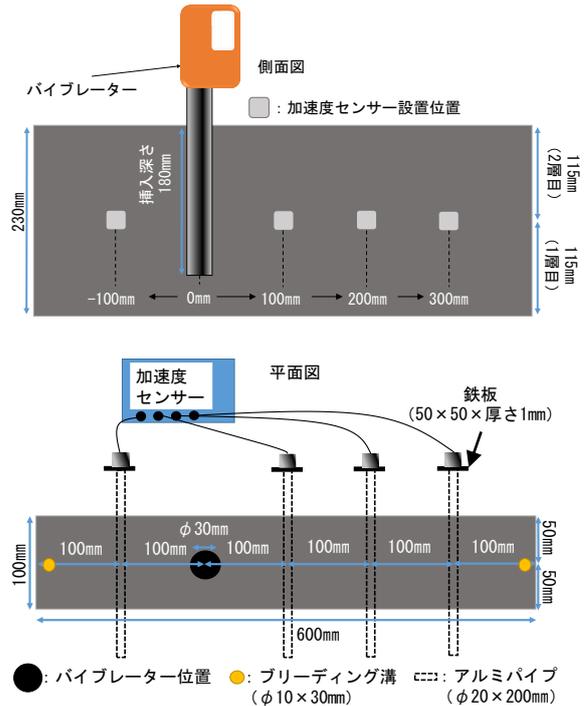


図-1 供試体形状および測定箇所

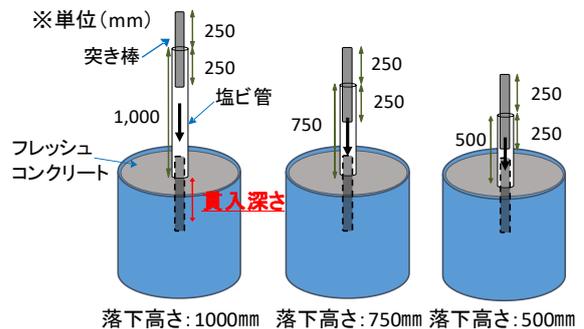


図-2 N 式貫入深さ試験状況

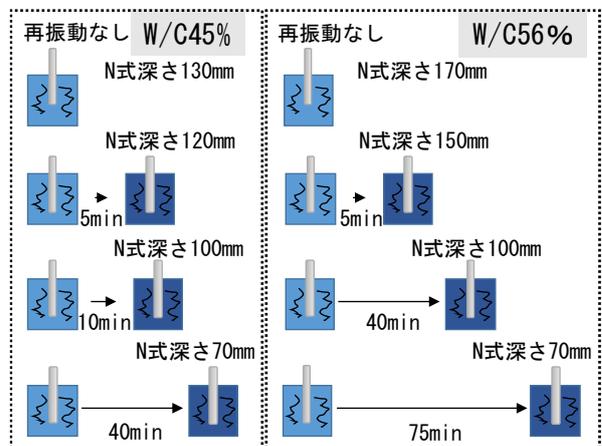


図-3 各種コンクリートの再振動水準

図-3には、各種コンクリートにおける落下高さ1000mmで実施した際に、所定のN式貫入深さに到達するまでに要した時間を示す。なお、初期締固めが終了しコテによる成形完了後を0分としている。また、本試験ではN式貫入深さを指標とするため、目標のN式貫入深さに到達するまでの時間は、配合ごとに異なっている。

2.3 再振動時のフレッシュ性状の評価

スランブは、練り上がり直後以外にも、落下高さ1000mmにおいてN式貫入深さが150, 100, 70mmに達した際にもスランブ試験を実施した。なお、スランブ試験に用いた試料は、練り上がったコンクリートをコンテナボックスでビニールシートを覆い保管し、試験前には再度練り返しを行って試験を実施した。スランブ試験を行ったコンクリートは、コンテナボックスには戻さずに破棄した。ブリーディング試験は、図-1の平面図に示すφ10×30mmのブリーディング溝を2箇所、振動締固め完了後に成形し、ブリーディング水が認められなくなるまでスポイトで採取した。ブリーディング発生量は、式(1)を用いて算出した。

$$B_p = V/A \quad (1)$$

B_p : ブリーディング発生量 (cm³/cm²)

V : 最終時まで累計したブリーディングによる水の容積 (cm³)

A : コンクリート上面の面積 (cm²)

また、併せてJIS-A1123試験によってブリーディング量の測定も行っており、参考値として、水セメント比45%で0.075cm³/cm²、水セメント比56%で0.225cm³/cm²であった。

2.4 コンクリート表層品質の評価方法

(1) 四点電極法による比抵抗測定

四点電極法を用いて材齢8週目にて、各種コンクリート表層の比抵抗を測定した。測定面は、230mm×600mmの側面として、測定箇所は、パイプレータ挿入位置を基準に-100, 0, 100, 200, 300mmの計5箇所で行った。

(2) 水銀圧入法による細孔容積測定

積算細孔径容積は、W/C45%の供試体を用いて材齢8週目にて、水銀圧入式ポロシメータにより測定した。測定箇所は、パイプレータ挿入位置の供試体底面より高さ85mmの位置において、φ50×50mmのコアドリルを用いてサンプルを採取した。その後は、測定試料をハンマーで砕き、ふるいにかけ、ふるいの呼び寸法5mmを通過し、なおかつ2.5mmに残るモルタル部のみ取り出した。アセトンでふるい洗いを2回行ってから、アセトンに1日間浸漬させて、真空環境で脱気を行った。

3. 実験結果および考察

図-4には、N式貫入深さの結果から算出したコンクリート抵抗値の経時変化を示す。なお、図中の初期抵抗値とは、初期振動締固めが終了し、コテでの成形完了と同時に測定したものである。コンクリート抵抗値は、式(2)を用いて算出した。

$$R = mgh/L/A \quad (2)$$

R : コンクリート抵抗値 (×10⁻³N/mm²)

m : 突き棒質量 (g) g : 重力加速度 (m/s²)

h : 落下高さ (mm) L : 貫入深さ (mm)

A : 貫入した部分の突き棒の表面積 (mm²)

コンクリート抵抗値は、いずれの水セメント比においても時間の経過に伴って高くなっている。水セメント比の違いでは、水セメント比が低いものほど、凝結が早いため、経過に伴う抵抗値の増加も大きいことが分かる。N

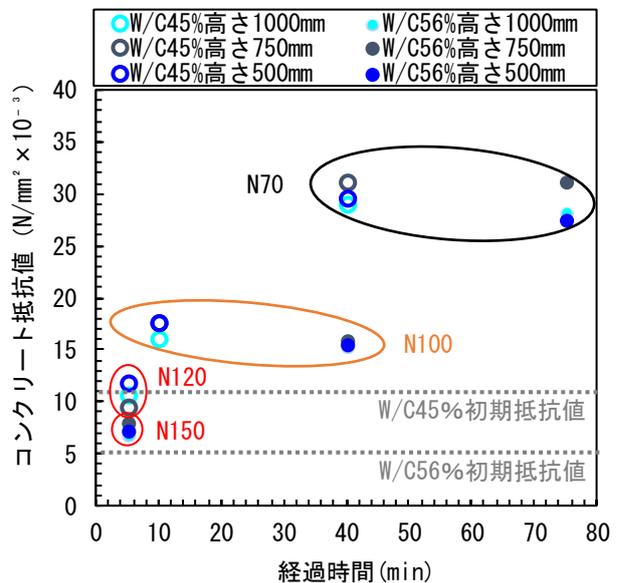


図-4 N式貫入深さの結果から算出したコンクリート抵抗値の経時変化

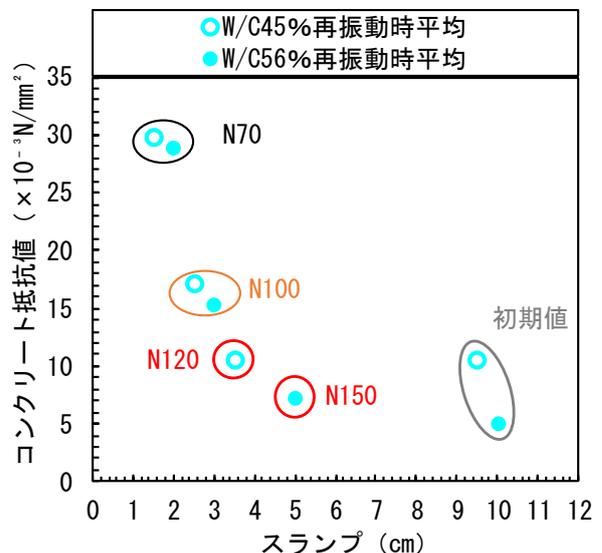


図-5 コンクリート抵抗値とスランブの関係

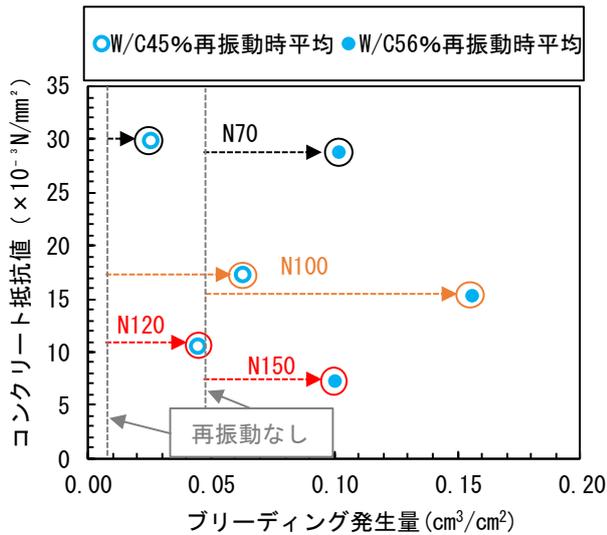


図-6 コンクリート抵抗値とブリーディング発生量の関係

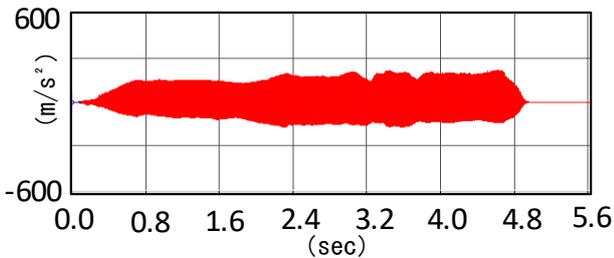


図-7 コンクリート振動波形一例

式貫入深さ試験における落下高さの違いでは、1000mm、750mm、500mmのいずれから落下させても、貫入深さの値は変化するが、コンクリート抵抗値という指標として算出すると落下高さの条件に関係なく評価が可能である。よって、落下高さによる違いは、確認できなかったことから以降のコンクリート抵抗値は、落下高さ 1000 mm、750 mm、500 mmの平均値で示している。N式貫入深さ試験によってコンクリートの抵抗値を算出する本手法は、明確な落下高さの規定を設けずに、現場ごとの条件等を考慮して実施が可能であると考えられる。

図-5 は、コンクリート抵抗値とスランプの関係を示す。貫入深さが 120mm 以上までの範囲で得られるコンクリート抵抗値は、スランプが低下してもあまり変化を示さなかった。コンクリートは、時間の経過に伴ってセメントの凝集や水和が進行し、こわばりが生じてくるが、N式貫入深さ試験を実施した容器内では、ブリーディングの上昇により貫入域のコンクリートでのこわばりは、比較的に低減されていたと思われる。ただし、スランプが 3cm 以下になると、貫入域でも徐々にこわばりが生じ始めたことで、コンクリート抵抗値は、スランプの低下に従って急激な増加を示したと考えられる。

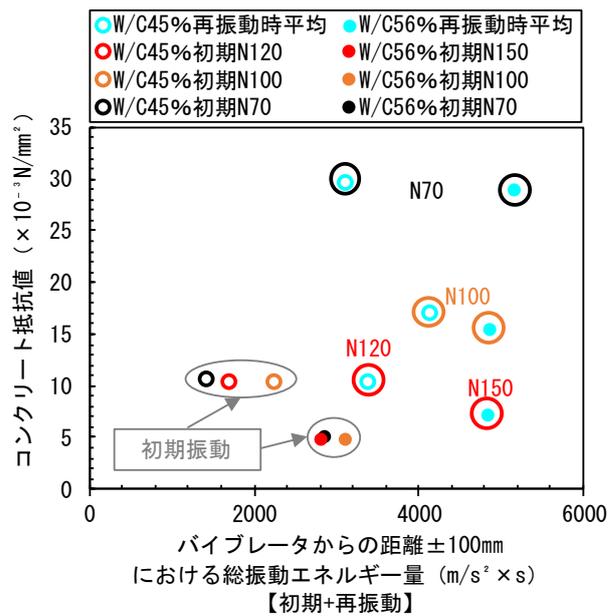


図-8 コンクリート抵抗値とバイブレータからの距離±100mmにおける総振動エネルギー量(初期+再振動)の関係

図-6 には、コンクリート抵抗値と再振動を実施した供試体における最終ブリーディング量の関係を示す。再振動を実施した供試体のブリーディング量は、いずれの場合も再振動なしよりも多くなっている。再振動を実施したことで、骨材やアルミパイプの下部に蓄積していた余剰水が排出されたものと考えられる。また、ブリーディング発生量は、いずれの水セメント比においてもコンクリート抵抗値が $17 \times 10^{-3} \text{N/mm}^2$ 程度の時に最も増加する結果を示しており、再振動を実施する際に最も余剰水が上昇しやすい、コンクリートのフレッシュ状態が存在すること分かった。

そこで、バイブレータの振動の伝搬特性に何らかの違いがあると推察し、加速度に着目した。図-7 は、加速度センサーで測定された再振動における加速度波形の一例を示す。この波形面積を算出し、これを総振動エネルギー量と定義して、再振動の実施時期による締固めの相違について検討を行った。

図-8 には、バイブレータ挿入位置を基準として、±100mm 位置で計測した総振動エネルギー量(初期+再振動)とコンクリート抵抗値の関係を初期振動のものとして併せて示す。総振動エネルギー量は、全体的に水セメント比が高いものが大きくなる結果となった。これは、振動が水を伝って伝搬していると考え、作製したコンクリートの単位水量の違いが影響していると思われる。この点については、明確な考察が現時点ではできないため、今後、単位水量を一定とした配合を作製して、より詳細な検討を実施する予定である。この結果、水セメント比

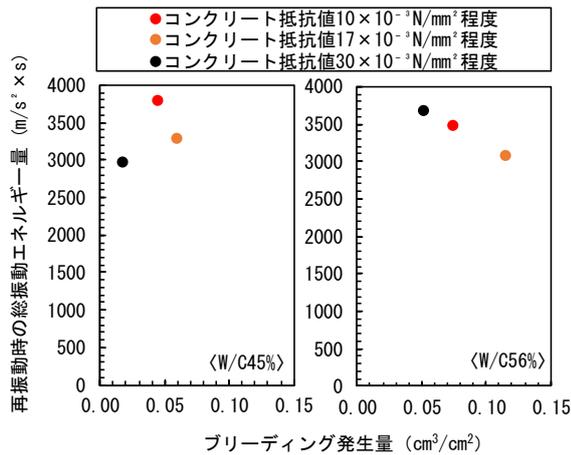


図-9 再振動時の総振動エネルギー量とブリーディング量の関係

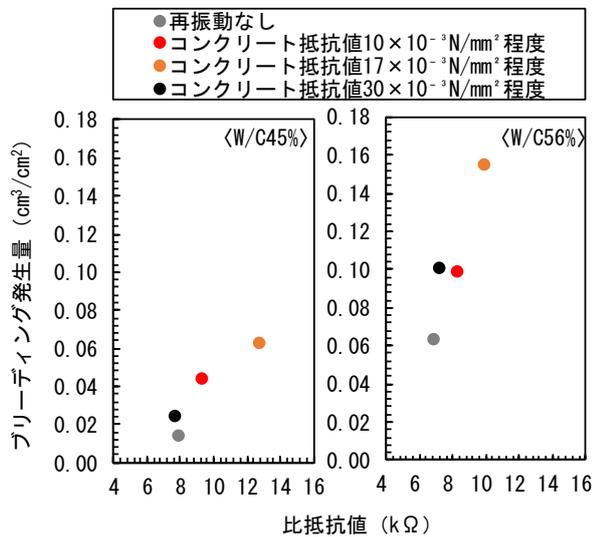


図-10 ブリーディング発生量と比抵抗値の関係

45%の総振動エネルギー量は、コンクリート抵抗値が $17 \times 10^{-3} \text{N/mm}^2$ 程度で実施したものが最も大きくなっている。しかし、初期振動の総振動エネルギー量が他よりも大きかったことを考慮すると、再振動によって与えた総振動エネルギー量はいずれも同程度になると言える。

一方の、水セメント比 56%の再振動時に与えた総振動エネルギー量は、初期振動を考慮するとコンクリート抵抗値にかかわらず、水セメント比 45%と同程度であった。コンクリート抵抗値が異なっても、再振動時に伝搬される総振動エネルギー量は同程度であるため、実施時期による締固め程度に相違をこの結果から確認することはできなかった。以降の凡例は、N式貫入深さよりもコンクリート抵抗値の方が汎用性があることから再振動の実施時期は、コンクリート抵抗値で表している。

次に、図-9には、再振動時の総振動エネルギー量とブリーディング量の関係を示す。この結果、多少の総振動エネルギー量に差はあるものの、ブリーディング量は、

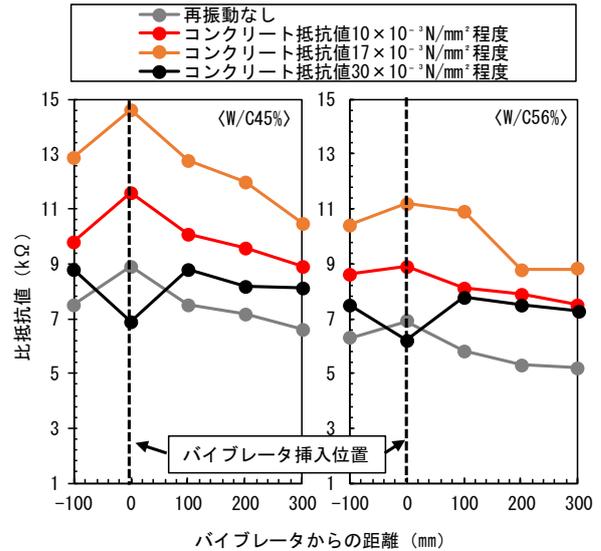


図-11 比抵抗値分布

いずれの水セメント比においてもコンクリート抵抗値が $30 \times 10^{-3} \text{N/mm}^2$ 程度で実施したものが最も低く、 $17 \times 10^{-3} \text{N/mm}^2$ 程度で実施したものが最も多くなっている。再振動の時期の違いが、ブリーディング量に与える影響は明らかであるが、再振動時の総振動エネルギー量とブリーディング量の関係性は見られなかった。

図-10には、ブリーディング発生量と測定位置ごとに得られた比抵抗の平均値との関係を示す。比抵抗値は、いずれの水セメント比においてもブリーディング量が多くなるに従って増加しているのが分かる。これは、余剰水が減少したことで、供試体内の水セメント比が低下したものと考えられる。また、比抵抗によって、耐久性を間接的に把握することができるため³⁾、この結果からコンクリート抵抗が $17 \times 10^{-3} \text{N/mm}^2$ 程度の際に再振動を行うことで耐久性の向上が最も期待できると思われた。

また、図-11に示す比抵抗分布を見ると、パイブレータ挿入位置を中心として比抵抗値が増加傾向にあることが分かる。ただし、コンクリート抵抗 $30 \times 10^{-3} \text{N/mm}^2$ 程度での比抵抗値は、むしろ再振動なしよりも低下していた。これは、すでに、コンクリートの流動性が低下していたために、パイブレータを引抜いた跡に空洞が形成された可能性がある。一方で、コンクリート抵抗が $17 \times 10^{-3} \text{N/mm}^2$ 程度のものが、やはり分布を見ても全体的に高くなっており、効果的な再振動の実施時期であると言える。

図-12には、一例として水セメント比 45%における累積細孔容積分布を示す。この結果からもコンクリート抵抗 $17 \times 10^{-3} \text{N/mm}^2$ 程度で最も細孔容積が低下していることが分かる。物質移動抵抗性に影響を及ぼすとされる $50 \text{nm} \sim 1000 \text{nm}$ の範囲を見ても⁶⁾、大きく細孔容積が減少していた。

以上のことから、耐久性向上に最も効果的な再振動の

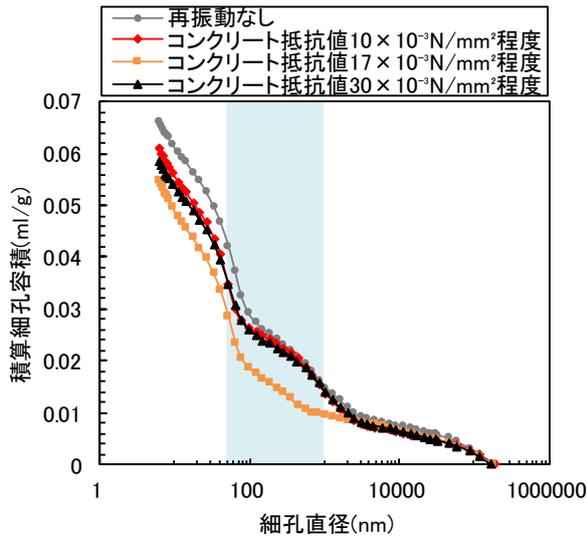


図-12 W/C45%における累積細孔容積分布

タイミングが存在する可能性が考えられた。再振動の耐久性の向上効果とブリーディング発生量の間には、関連性があるため、ブリーディング量が最も発生するコンクリートの凝結過程で実施するのが望ましいと考える。また、現場でも簡易に測定可能と思われる本手法は、落下高さが異なっても同程度のコンクリート抵抗値を算出することができるため、凡用性があるものと思われる。以上の結果、再振動の実施時期としてコンクリート抵抗値が $17 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ 程度を示す時期に実施するのが望ましいと言える。

4. まとめ

本研究では、再振動の最適な実施方法を確立するため、N式貫入深さ試験により求めたコンクリート抵抗値を基に、フレッシュ性状や振動伝搬特性、表層品質の関係性等について検討を行った結果、以下の知見が得られた。

(1) コンクリート抵抗値が $17 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ 程度の時期

に再振動を実施することで、ブリーディング水が増加し、結果として耐久性の向上に効果的であることが分かった。

- (2) 再振動時期は、 $30 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ 程度で実施した場合には、再振動による効果は得られるが、バイブレータの周部の品質が低下する恐れが示唆された。
- (3) N式貫入深さ試験において、落下高さを変化させても得られるコンクリート抵抗値に大きな差は見られなかった。
- (4) いずれの再振動時期においても再振動時にコンクリートに伝搬された総振動エネルギー量は同程度であった。再振動を実施する際に最も余剰水が上昇しやすい、コンクリートのフレッシュ状態が存在すること分かった。

参考文献

- 1) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書【施工編】，pp.119，2017
- 2) 佐藤悠士朗ほか：再振動締固め時期の違いがコンクリートの長期品質に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，p.1209，Vol.40，No.1，2018
- 3) 阿部稜ほか：再振動締固め方法の違いが強度特性および塩分浸透に及ぼす影響に関する基礎的研究，土木学会第72回年次学術講演会，V-130，2017
- 4) 三浦明ほか：高強度コンクリートにおける再振動締固め方法の違いがブリーディングおよび表層品質に及ぼす影響に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，p.6，Vol.38，「2016」
- 5) 土木学会編：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 [2010年版]，pp.22，2010.7
- 6) 金堀雄伍ほか：長期間浸透した実構造物と各種促進試験による塩化物イオンの浸透性状に関する研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第14巻，pp.247-252，2015.10