

論文 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

佐藤 悠士朗*1・樫原 弘貴*2・添田 政司*3・山田 浩嗣*4

要旨：再振動締固めは、コンクリートの施工において耐久性を向上できる工法の一つである。再振動締固めはできるだけ遅い時間に行なうと良いとされているが、明確な再振動締固めを行う時期の検討は少ない。本研究では、再振動締固めを行うタイミングの指標として、N 式貫入深さを用いて、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について検討を行った。その結果、再振動時期の遅い N 式貫入深さ 100mm の際に、再振動を行うことでコンクリートの比抵抗や透気係数の改善が確認された。また、塩分浸透の抑制および鉄筋腐食の抵抗性の向上にも効果的な方法であり、これらの効果は、長期材齢においても確認することができた。

キーワード：再振動締固め、N 式貫入深さ、比抵抗、塩化物イオン量、分極抵抗

1. はじめに

近年、耐久性設計の導入により、耐久性を確保したコンクリート構造物が建設されてきている。耐久性確保の前提として、適切な施工を期待しつつも、施工方法に関する評価がなされる事例は少ない。施工時にコンクリート構造物の耐久性を向上させる方法の 1 つに、再振動締固め作業がある。この再振動締固めは、コンクリートを一旦締固めた後に適切な時期に再び振動を加えることである。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⁾²⁾。ただし、現状での再振動締固めは、できるだけ遅い時間に行なうと良いとされているが、それ以外に再振動締固めを行う時期による違いや再振動の有無が 1 年以上に渡る長期的なコンクリート品質の向上に与える影響と言った情報がなく、未だに定量的に評価がなされていない³⁾⁴⁾⁵⁾。特に、一般的な高強度コンクリートにおける再振動締固めの使用条件やコンクリート品質向上に及ぼす影響について検討を行ったところ、再振動によるブリーディング発生量が多いものほど、水セメント比が低下したことで圧縮強度やコンクリート表層の品質の向上を確認することができた。しかし、長期材齢に渡る再振動の影響については、未だ明らかにしていない。再振動締固めの時期による違いがコンクリートの品質に与える影響に関する情報は、極めて少ない⁶⁾。

そこで本研究は、再振動締固めの時期の違いが表層部のコンクリートの長期品質に及ぼす影響を検討するため、再振動締固めの実施時期が異なる早強セメント、それに

各種混和材を用いた各種コンクリートを作製した。材齢 400 日を経過した後に、コンクリート表層部の品質として比抵抗、透気係数に評価するとともに、塩化物イオンの浸透特性、分極抵抗を測定し、塩害に対する抵抗性についても検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

実験で用いたコンクリートは、セメントに水結合材比 41%の早強ポルトランドセメント（密度：3.14g/cm³）を用い、このセメントに混和材として高炉スラグ微粉末 6000（略号 BS、密度：3.04g/cm³、比表面積：5750cm²/g）を 50%置換したものと、フライアッシュⅡ（略号 FA、密度 2.34g/cm³、比表面積 3960cm²/g）を 20%置換した計を混和した 3 種を用いた。

表-1 には、コンクリート配合を示す。細骨材には、岐阜産（表乾密度：2.58 g/cm³）と玄界灘産（表乾密度：2.58 g/cm³）の混合砂、粗骨材には唐津市（表乾密度：2.80 g/cm³）と津久見市砕石（表乾密度：2.70 g/cm³）をそれぞれ用いた。（セメント種類ごとに作成したコンクリートは以下、それぞれ HPC、HBS、HFA と称す）。スランブは、8.0±2.0cm、空気量は、4.5%±1.0%とした。

表-1 実験に用いた各種コンクリート配合

略号	W/B (%)	s/a(%)	単位量(kg/m ³)					混和材	混和剤
			W	C	S	G			
HPC	41	42	162	395	729	1063	-	3.36	
HBS		46		218	876	1063	177		
HFA		41		316	1352	416	79		

*1 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 (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 工学部資源循環工学 博士 (工学) (正会員)

*4 福岡大学大学院 工学部資源循環環境工学 (学生会員)

図-1には、型枠及び配筋状況（上記は側面図・下記は平面図）を示す。実験に用いた型枠は800×600×500mmのものであり、鉄筋はD10の異形鉄筋を用いて密配筋域、無配筋域を設けて、かぶりは3cmとし、HPC、HBS、HFAの3種類の配合で、それぞれ3体ずつ計9体を作成した。打設方法は、生コン車から直接投入した後、棒状バイブレータ（孔径30mm、周波数50Hz～60Hz）を用いて、深さ500mmの位置まで挿入し、1型枠当たり6箇所（5秒/1箇所）に5秒間の振動を与えた。その後、金ゴテにて成形を行った。棒状バイブレータの挿入位置は、図-1に示す通りである。

図-2には、各種コンクリートにおける再振動を行った際のN式貫入深さと成形後からの再振動締め固めまでの時間を示す。再振動締め固めを行った時期は、コンクリートのフレッシュ性状を簡易判定できるN式貫入試験によって得られる貫入深さを指標とした²⁾。N式貫入試験の概要は、図-3に示しており、その方法はフレッシュコンクリートを別途に容器に打設して、φ25mm×1000mmの塩ビ管をコンクリート面と垂直に設置した。その後、φ15mm×500mmの突き棒を250mm位置まで塩ビ管内に挿入し、突き棒を自然落下させて貫入した深さを測定した。再振動を行ったタイミングとしては、N式貫入深さが150mm、100mmとなるコンクリートのフレッシュ性状時とした。なお、N値貫入深さが100mmの際に最も再振動の効果が大きかったことや⁹⁾、本実験での配合では、水セメント比が小さいこともあり粘性が高く100mm未満で再振動を行うと、バイブレータをスムーズに深部に挿入できないことや、バイブレータ跡が残る恐れが懸念されたため、N式貫入深さ100mmの時のフレッシュ性能を再振動が行える上限に設定した。打設終了後は、硬化を確認して、型枠に水を張り7日間の養生を行った。その後は、3%濃度のNaCl水溶液を染込ませた吸水シートで打設底面以外を覆った。

2. 2 試験方法

2. 2. 1 コンクリート表層品質に及ぼす影響

再振動締め固め時期の違いが、長期材齢コンクリートの表層品質に与える影響について評価を行うために、以下の試験を行った。

(1) 四点電極による比抵抗測定

四点電極法を用いて材齢14、126、238、413日目にて、コンクリート面の比抵抗の測定を行った。測定面は、500mm×800mmの側面において上端下端10mm、左端右端40mmを除く、高さ480mm×長さ720mmの範囲を測定対象面とした。高さ方向に6分割、長さ方向に3分割して、高さ80mm×長さ240mmの面を1つの測定範囲として、計18箇所の測定を行った。

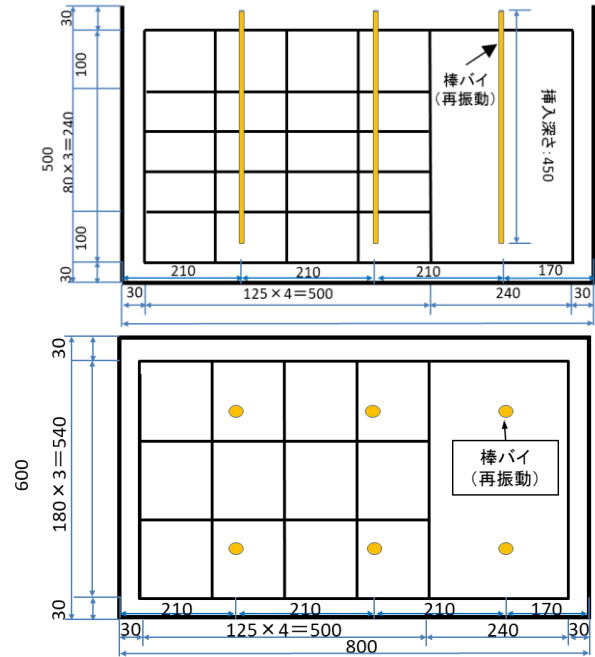


図-1 型枠形状および配筋状況

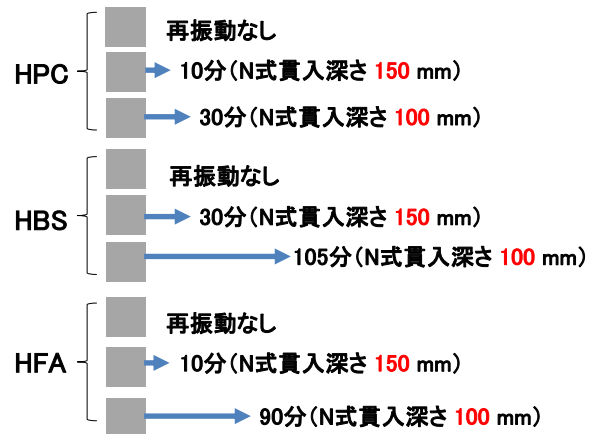


図-2 各種コンクリートの再振動水準

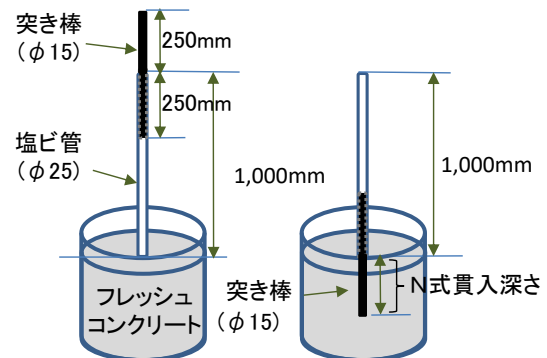


図-3 N式貫入深さ試験状況

(2) トレント法による透気係数測定

材齢 420 日にて、透気試験機を用いてトレント法により、コンクリート表層の透気係数の測定を行った。測定箇所は、500mm×800mm の側面において、高さ方向に上層、中層、下層で 3 分割し、それぞれ長さ方向に 3 箇所計 9 箇所にて測定を行った。

2. 2. 2 塩分浸透性に及ぼす影響

再振動締固め時期の違いが、コンクリートの塩分浸透性に与える影響についての評価を行うために、以下の塩分浸透試験を行った。塩分浸透試験は、供試体を養生終了後に、写真-1 に示す様に 3%濃度の NaCl 水溶液を染込ませた吸水シートで打設底面以外を覆った。また、水分の蒸発を防ぐためにビニール製のシートで覆った。吸水シートは、28 日ごとに同濃度の NaCl 水溶液を吸水させた。粉体採取位置は、材齢 430 日にて、無配筋部の測定面に対して、底面から高さ方向に 30mm, 210mm, 470mm とし、φ10mm のコンクリートドリルを用いて、供試体表面より深さ 10mm ごとに深さ 50mm 位置まで採取した。その後は、JIS- A1154 「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠して、電位差滴定装置によって全塩化物イオン量を深さごとに採取した。可溶性塩化物イオン量の測定には、採取した粉体試料が測定に必要な規定量に達しなかったため、全塩化物イオン量の測定後の全残存試料を用いた。電位差測定装置により可溶性塩化物イオン量の測定を行った。(全塩化物イオン量-可溶性塩化物イオン量)/全塩化物イオン量により固定化割合を算出した⁷⁾。

2. 2. 3 鉄筋腐食特性に及ぼす影響

再振動締固め時期の違いが、長期材齢コンクリート内部の鉄筋の腐食性に与える影響について以下の試験を行った。

(1) 分極抵抗法

材齢 420 日にて、鉄筋腐食診断機を用いて、測定面にアルミ板と電極を設置してコンクリート内部鉄筋の分極抵抗を測定した。測定面は、500mm×800mm の側面の 2 面において上端下端 10mm, 左端右端 40mm を除く、高さ 480mm×長さ 720mm の範囲を測定対象面とした。高さ方向に 3 分割、長さ方向に 2 分割した計 6 箇所×2 面の 12 箇所にて測定を行った。

(2) 自然電位法

マルチメーターと鉛照合電極を用いて自然電位の経時測定を行った。測定面は、500mm×800mm の二面と、500mm×600mm の一面とし、測定面に対し、高さ方向に 3 分割、長さ方向に 6 分割した計 18 箇所×3 面の 45 箇所を測定箇所とした。

3. 実験結果及び考察

3. 1 コンクリート表層品質に及ぼす影響

図-4 には、各材齢における比抵抗の平均値をコンクリート種類ごとに示す。比抵抗は、いずれも材齢の進展に伴って増加する傾向を示し、再振動を行うことでさらに増加する結果を示した。また、再振動の時期による違いで見ると、N 式貫入深さが小さいものほど比抵抗が増加する結果を示した。一方、既往の研究で行ったブリーディング試験では、いずれのコンクリートにおいてもブリーディング量は N 式貫入深さ 100mm>150mm>再振動なしの順で多くなっていた³⁾。ブリーディングが多いもの程、実質の W/B が低下したことで、より緻密になり比抵抗が大きくなったと考えられた。また、材齢 126 日目になると、HBS と HFA の比抵抗は、顕著な増加を示した。これは、潜在水硬性やポゾラン反応によりコンクリートがより緻密化されたものと考えられる。材齢 413 日目と長期になると、再振動を行った HPC は、測定時のコンクリート表面が乾燥状態にあったため、比抵抗は若干高い値を示しているが、再振動による比抵抗の増加傾向が確認することができた。また、HBS, HFA においても長期的な比抵抗の増加は、材齢 413 日において再振動無と比べると N 式貫入深さ 150mm で 105% (HBS) 107% (HFA) となり、N 式貫入深さ 100mm

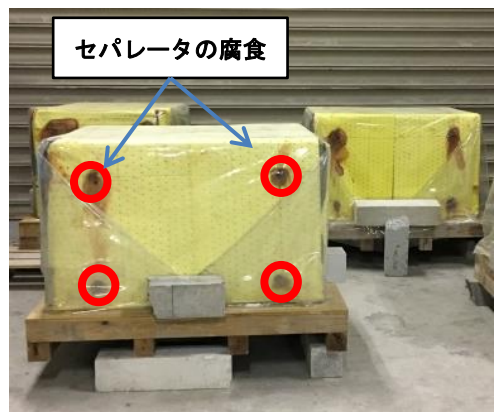


写真-1 塩化物イオン量の浸透実験の様子

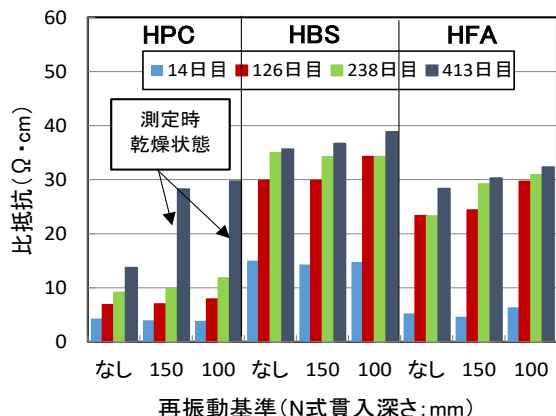


図-4 比抵抗の経時変化

になると 111% (HBS), 116% (HFA) であった。

図-5 には、各種コンクリートにおける透気係数の測定結果を高さ方向ごとに示す。この結果、トレント法に

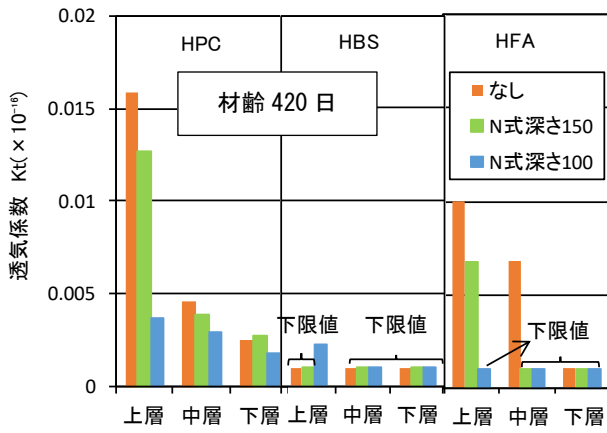


図-5 トレント法による透気係数の測定結果

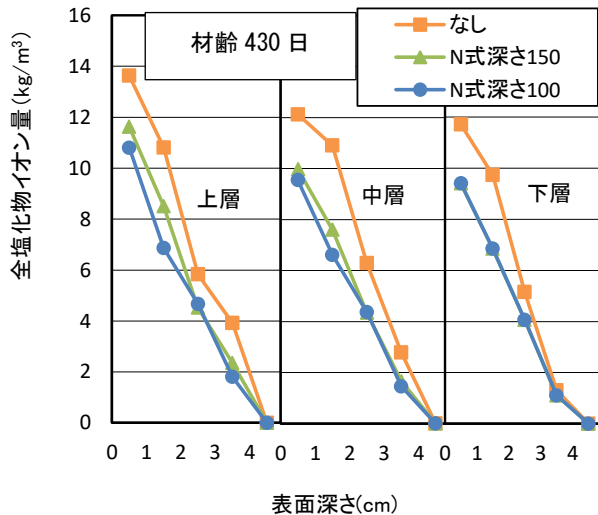


図-6 HPC 全塩化物イオン量

おいて測定できる透気係数の下限値を示したのものもあるが、透気係数は、N式貫入深さが小さいほど、また下層になるに従っていずれも低下する傾向を示した。透気係数の測定結果からも再振動を行うことでコンクリートの透過性を改善できることが分かった。以上のことから、再振動締めを行うことで、長期的にもコンクリート表層品質の向上に繋がることが分かった。

3. 2 塩分浸透性に及ぼす影響

図-6 には、一例として材齢 430 日目における HPC の全塩化物イオン量分布を示す。いずれの深さにおいても再振動締めを行うことで、塩化物イオン量が減少しているのが分かる。また、これまでの結果と同様に N 式貫入深さが小さくなるほど、また下層になるに従って、塩化物イオン量も減少する結果を示した。

図-7 には、各種コンクリートにおける全塩化物イオンの見かけの拡散係数を示す。この結果、いずれのコンクリートにおいても見かけの拡散係数は、再振動を行うことで低下する傾向を示した。また、再振動の時期による違いは、N 式貫入深さが小さいものほど拡散係数も小さくなる傾向を示した。N 式貫入深さ 100mm で再振動を行うことで、見かけの拡散係数は、HPC で 60~70%、HBS で 30~50%、HFA65~90%程度となった。さらに、再振動を行ったものは、上層と下層による差も小さくなり、均質なコンクリートになるとともに、塩化物イオンに対する抵抗性の向上も確認できた。

次に、図-8 には、一例として、HPC における可溶性塩化物イオン量分布を示す。可溶性塩化物イオンは、全塩化物イオンに比べていずれの深さにおいても減少している。再振動を行ったものは、再振動無しに比べると可溶性塩化物イオン量が少ないことが分かる。そこで、可

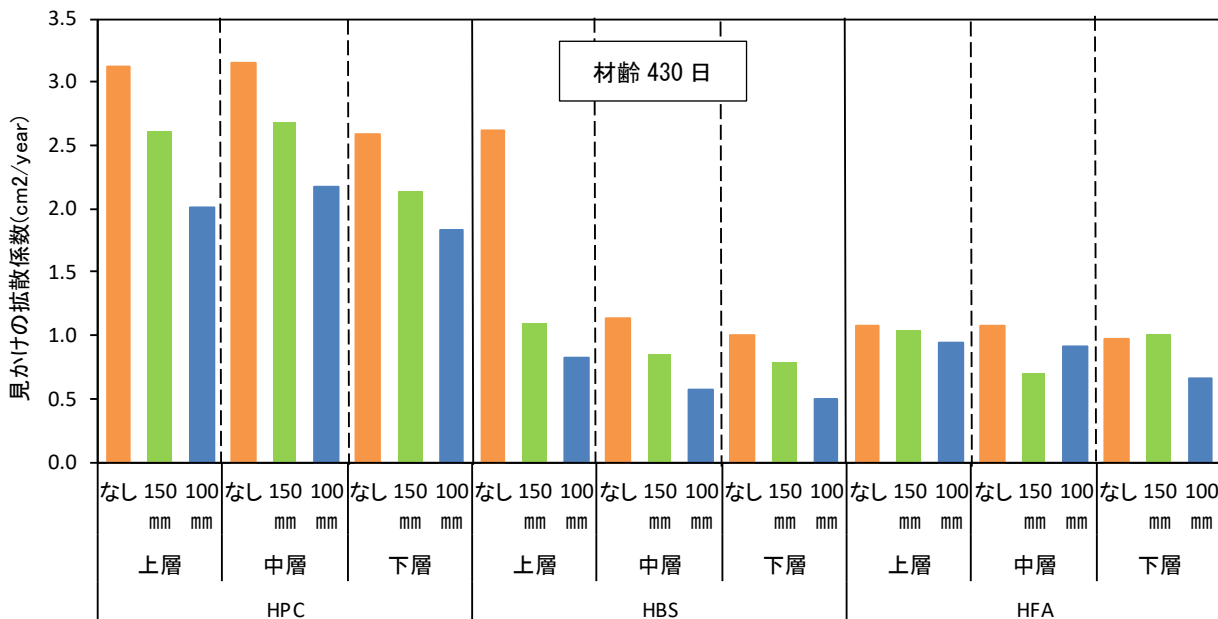


図-7 見かけの拡散係数

溶性塩化物イオン量が確認された 2.5cm までの範囲で全塩化物イオン量に対する固定化塩化物イオン量の割合を深さごとに算出して平均したものを図-9 に示す。塩化物イオン量の固定化割合は、いずれのコンクリートにおいても再振動締めを行ったものが再振動なしに比べて高い値を示す傾向となった。これは、再振動を行ったことで、ブリーディングが増加したことで、水粉体比が低下し、水和生成物の増加に伴って、塩化物イオンの固定化量も多くなったと考えられた。また、コンクリート種類の違いについて見ると、塩化物イオンは、アルミネート相に取りこまれて固定化されると一般的に解釈されている通りに、アルミネート相が最も多い HBS において、最も固定化割合が大きくなっていった。

3. 3 鉄筋腐食性に及ぼす影響

図-10 には、各種コンクリートにおける鉄筋の分極抵抗

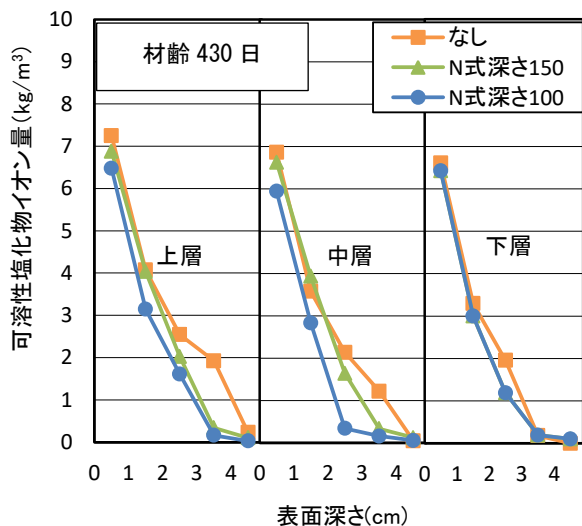


図-8 HPC 可溶性塩化物イオン量

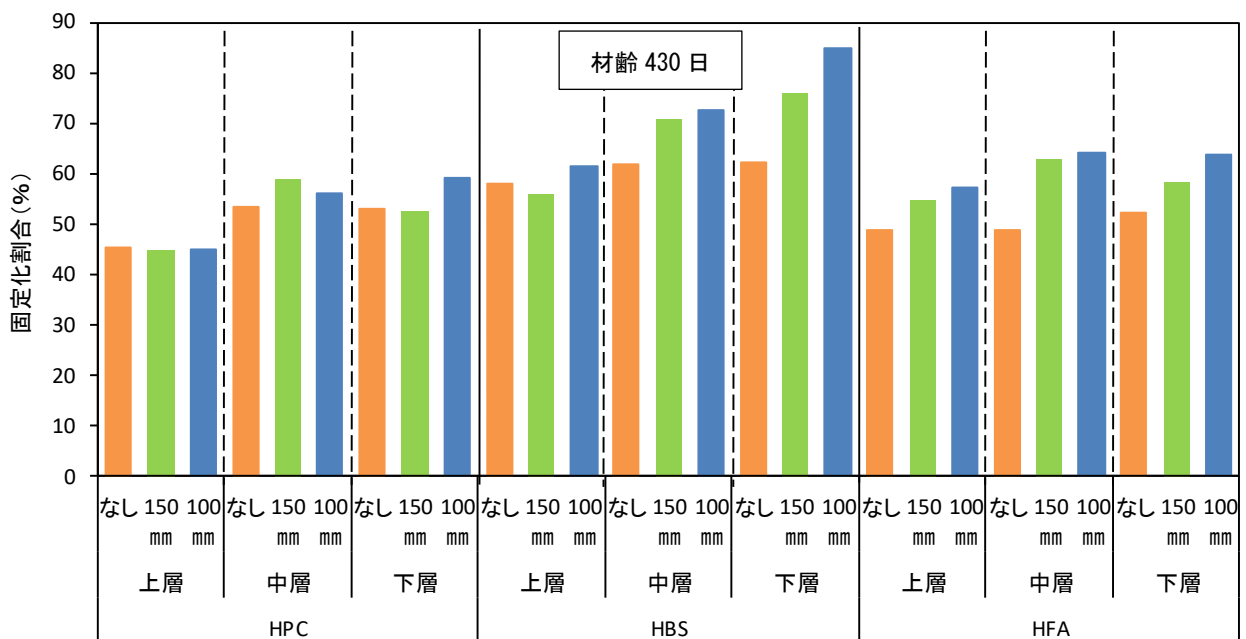


図-9 固定化割合

抗の測定結果を示す。いずれの供試体も再振動までの実施時期が遅くなる程、また下層になるに従って分極抵抗も増加する結果を示した。N式貫入深さ 100 mmにおける分極抵抗は、再振動なしに比べて 20%~50%程度の範囲で増加する結果を示した。分極抵抗の逆数は、腐食速度を表しているため、腐食の進展は、難い状態にあると推察できる。なお、本実験においては、経時的な自然電位も測定していたが、いずれも ASTM における腐食判定基準-350mV を下回っておらず、コンクリート種類や再振動の有無による違いは確認されていない。

性能向上と鉄筋腐食速度を抑制できることから、高耐久以上のことから、再振動締め作業は、物質移動抵抗のコンクリート構造物を造る上で、有効な手段であると考えられる。また、今回実施した水結合材比 40%程度のコンクリートにおいては、粘性も高くスランプロスも大きいことからN式貫入深さが 100mmの時の滞りなく作業できる範囲であると考えられ、耐久性向上も大きいことから再振動締め作業を行うタイミングの1つの目安になると考えられた。

4. まとめ

3種の配合条件のもとでN式貫入深さを再振動締め時期の指標とした長期材齢コンクリートの表層品質、塩分浸透、鉄筋腐食抵抗性に及ぼす影響について検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 再振動を実施することで、比抵抗、透気係数および塩分浸透性は改善され長期的にもその効果は認められた。
- (2) 分極抵抗により腐食速度の観点からも、再振動による効果が確認された。

- (3) 再振動時期が遅い方が長期材齢コンクリートにおいても、コンクリートの品質が改善される傾向を示しているが、N式貫入深さが100mmよりも大きい場合には、パイプレータの挿入が困難な状況となるため、品質改善と施工性の両者の観点からN式貫入深さ100mmが再振動締固め作業を行う目安であると考えられた。
- (4) 再振動の効果は、配合条件で比較すると、ブリーディング発生量が多いものほど、品質向上が確認された。

参考文献

- 1) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書【施工編】，pp.119，2012
- 2) 水田 実，加藤 淳司：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.1，2011
- 3) 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」
- 4) 田畑壮典ほか：再振動締固めがコンクリートの強度・耐久性に与える影響，第38回土木学会関東支部技術研究発表会，p.1，V-20「2011」

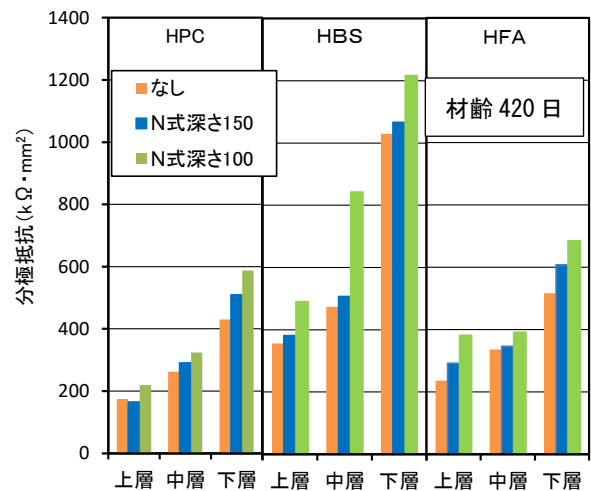


図-10 分極抵抗法

- 5) 三坂岳広，宇野洋志城，守山亨，森下全人：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，土木学会第66回年次学術講演会，VI-114
- 6) 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
- 7) 森裕介ほか：早強ポルトランドセメントに各種混和剤を用いたコンクリートの諸特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，p.139，Vol.39，「2017」