

再振動締固めによる長期的な塩害劣化抵抗性の向上効果に関する研究

| | | | | |
|---------|-----|----|-----|-----|
| 福岡大学大学院 | | | ○佐藤 | 悠士朗 |
| 福岡大学大学院 | | | 深見 | 桜 |
| 福岡大学 | 正会員 | 工博 | 櫛原 | 弘貴 |
| 福岡大学大学院 | | 工博 | 添田 | 政司 |

Abstract : In construction practice, after initial placement of concrete, re-vibration is done at intervals not clearly defined. The intervals differ at every site by experience and feeling, due to lack of clear method and knowledge. Information on the re-vibration, especially, appropriate timing and intervals between re-vibrations are not clear. Experimental examination was carried out to study the effect of re-vibration timing on the quality of concrete surface. It was found that concrete durability increased with longer time interval between first vibration and re-vibration. And, as for the timing of re-vibration is concerned, re-vibration time was effective in increasing the concrete quality for an experimentally determined penetration concrete resistance value of $R=15 \times 10^{-3} \text{N/mm}^2$, which corresponds to the longest time interval for re-vibration. In addition, it is an effective method to control salt penetration and to improve resistance to rebar corrosion, and these effects could be confirmed even at long age.

Key words : Re-vibration, Durability, N value

1. はじめに

高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物の早期の劣化が顕在化している。当時は、大量に急速な施工が必要とされ機械化が進められていた。それに加え、近年、耐震設計により過密配筋が導入されるようになり、締固め不足などの施工不良が散見されるようになった。一方で、平成 17 年には、「公共工事の品質確保の促進に関する法律」が施行され、コンクリート品質を確保する認識が高まっている。その方策の一つとして、施工時にコンクリート品質の向上が期待できる再振動締固め（以下、再振動とする）がある。この再振動は、コンクリートを一旦締固めたのち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。ただし、現状での再振動は、できるだけ遅い時間に行うと良いとされているが、再振動の施工技術や使用条件については、未だに定量的評価に至っていない。それに加え、これまでの検討の多くは、P C 配合相当の高強度コンクリートで水セメント比 55% 程度と高く、流動性も高いもので記載されていない^{2) 3)}。そこで、一般的な高強度コンクリートにおける再振動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。また、再振動の時期の違いがコンクリート品質に与える影響に関して検討を行ってきた^{4) 5) 6)}。しかし、長期的なコンクリート品質の向上効果については、不明な点が多く、検討課題も多い。

そこで本研究は、再振動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、早強ポルトランドセメント、それに各種混和材を用いた再振動の実施時期が異なる各種コンクリートを作製した。材齢 980 日目を経過したのちに、コンクリート表層部の品質として比抵抗より評

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

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。実験で用いたコンクリートは、水結合材比 41%とし、セメントに早強ポルトランドセメントを用い、このセメントに混和材として高炉スラグ微粉末 6000 を 50%置換したものと、フライアッシュIIを 20%置換した計を混和した 3 種を用いた。(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)。スランプは、8.0±2.0cm, 空気量は、4.5%±1.0%とした。図-1 には、型枠および配筋状況(上記は平面図・下記は側面図)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。なお、無配筋域は、コンクリートコアを採取し、既往の研究で行った圧縮試験を実施するために設けた⁴⁾。打設方法は、生コン車から直接投入したのち、棒状バイブレーター(孔径 30mm, 周波数 50Hz~60Hz)を用いて、深さ 500mm の位置まで挿入し、1 型枠あたり 6 箇所(5 秒/1 箇所)に 5 秒間の振動を与えた。そののち、金ゴテにて成形を行った。棒状バイブレターの挿入位置は、図-1 に示すとおりである。再振動終了後は、速やかに成形して、図-1 に示した箇所にてブリーディング採取のため、所定のエリアごとに幅 1cm, 深さ 1cm, 長さ 400 mm の溝を掘り、そこに溜まったブリーディング水をスポイトで経時的に採取した。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 式貫入深さ試験より求めたコンクリート抵抗値を指標とした⁷⁾。コンクリート抵抗値は、式(1)を用いて算出した。

$$R = (mgh/L)/A \quad (1)$$

R:コンクリート抵抗値 (N/mm²)

m:突き棒質量 (g) g:重力加速度 (m/s²)

A : 貫入した部分の突き棒の表面積 (mm²) h:落下高さ (mm) L:貫入深さ (mm)

N 式貫入深さ試験の概要は、図-2 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。そののち、φ15mm×500mm の突き棒を 250mm 位置まで塩ビ管内に挿入し、突き棒を自由落下させて貫入した深さを測定した。

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 | H | 早強ポルトランドセメント | 密度: 3.16g/cm ³ 比表面積: 3.300cm ² /g |
| 混和材 | BS | 高炉スラグ微粉末6000 | 密度: 3.04g/cm ³ 比表面積: 5750cm ² /g |
| | FA | フライアッシュII | 密度: 2.34g/cm ³ 比表面積: 3960cm ² /g |
| 水 | W | 上水道水 | 福岡県福岡市 |
| 細骨材 | S | 吉岐産 | 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

| 略号 | W/B (%) | s/a (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | | |
|-----|---------|---------|-------------------------|-----|-----|------|-----|------|
| | | | W | C | S | G | 混和材 | 混和剤 |
| HPC | 41 | 42 | 162 | 395 | 729 | 1063 | - | 3.36 |
| HBS | 41 | 46 | 162 | 218 | 876 | 1063 | 177 | |
| HFA | 41 | 41 | 162 | 316 | 737 | 1063 | 79 | |

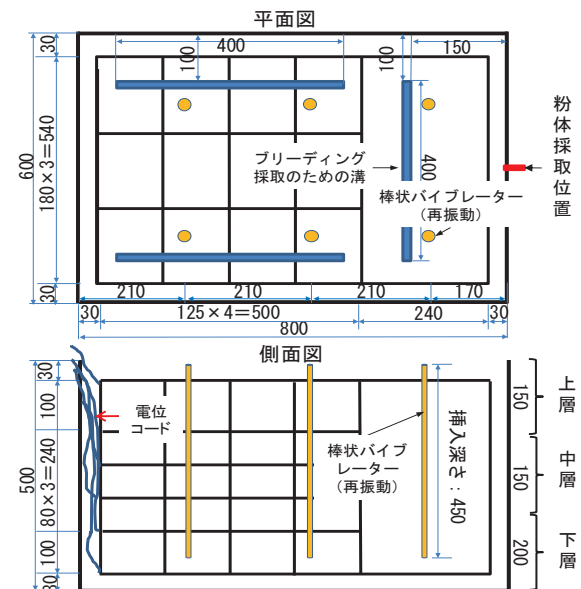


図-1 型枠形状および配筋状況

再振動を行った時期としては、コンクリート抵抗値が 7×10^{-3} , $15 \times 10^{-3} \text{N/mm}^2$ となるコンクリートのフレッシュ性状時とした。なお、 $\phi 30 \text{mm}$, $50 \sim 60 \text{Hz}$ の棒状バイブレーターを用いた場合、コンクリート抵抗値が $15 \times 10^{-3} \text{N/mm}^2$ の際に再振動を実施したものがもっとも再振動の効果が大きかったことや、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コンクリート抵抗値が $15 \times 10^{-3} \text{N/mm}^2$ 以上で再振動を行うと、バイブレーターをスムーズに深部に挿入できないことや、バイブレーター跡が残る恐れが懸念されたため⁸⁾、コンクリート抵抗値が $15 \times 10^{-3} \text{N/mm}^2$ のとき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。

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、四点電極法を用いて材齢 14, 28, 126, 238, 413, 980 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、 $500 \text{mm} \times 800 \text{mm}$ の側面において上端下端 10mm, 左端右端 40mm を除く、高さ $480 \text{mm} \times$ 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 $80 \text{mm} \times$ 長さ 240mm の面を 1 つの測定範囲として、計 18 箇所での測定を行った。

2. 2. 2 塩化物イオン浸透性に及ぼす影響

再振動時期の違いが、コンクリートの塩化物イオン浸透性に与える影響についての評価を行うために、塩化物イオン浸透試験を行った。塩化物イオン浸透方法は、供試体を養生終了後に、写真-1 に示すように 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。吸水シートには、染み込む可能量を染み込ませており、正確な値はわからないが、いずれも同じ吸水シートを使用していることから供試体間の塩水量は大差ないと考えている。一方で、吸水シート取り替え時においてもシートには十分に塩水で湿っていたことから、C0 を一定とした拡散方程式で算出しても適切に拡散現象を評価できると判断した。粉体採取位置は、材齢 994 日目にて、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、 $\phi 10 \text{mm}$ 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。そののちは、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。

2. 2. 3 鉄筋腐食特性に及ぼす影響

再振動時期の違いが、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検討を行う目的としては、自然電位および分極抵抗の測定を行った。自然電位の測定は、鉛照合電極を用いた DC/AC デジタルマルチメータにより経時測定を行った⁹⁾。測定したのちは、銅硫酸銅電極 (CSE) に

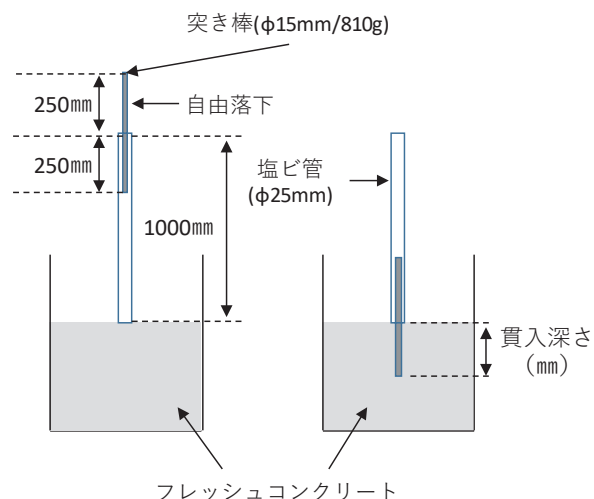


図-2 N式貫入深さ試験状況



写真-1 塩化物イオン浸透状況

電位換算した。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。分極抵抗の測定は、材齢420, 980日目にて、鉄筋腐食診断機を用いて、コンクリート内部鉄筋の測定を行った。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2分割、長さ方向に2分割した計4箇所×2面の8箇所にて測定を行った。なお、コンクリート表層は、測定時以外吸水シートで覆っているため湿潤状態である。

3. 結果および考察

3.1 コンクリート表層品質に及ぼす影響

図-4には、比抵抗の経時変化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、コンクリート抵抗値が高いものほど比抵抗が増加する結果を示した。また、HBSとHFAの比抵抗は、潜在水硬性やポズラン反応によりコンクリートがより緻密化されたことでHPCと比較すると高い値を示した。さらに、材齢980日目と長期になっても、再振動による比抵抗の増加は、再振動なしよりも高くなっている。また、図-5には、材齢28日目および材齢980日目における比抵抗とブリーディング量の関係を示す。ブリーディング量は、いずれのコンクリートにおいてもコンクリート抵抗値 $15 \times 10^{-3} > 7 \times 10^{-3} \text{N/mm}^2 >$ 再振動なしの順で多くなっている。また、ブリーディングが多いもの程、比抵抗は、測定材齢に関らず高くなる傾向を示した。これは、ブリーディングが増加したものほど、実質のW/Bが低下するため、より緻密なコンクリートになった結果、比抵抗が大きくなると考えられた。以上のことから、再振動を行うことで、コンクリート表層品質を向上させ、長期的な品質確保に繋がることが分かった。

3.2 塩化物イオン浸透性に及ぼす影響

図-6には、全塩化物イオン量の測定結果の一例として、材齢994日目のHPCのものを示す。図-7には、材齢420, 994日目における全塩化物イオンの見かけの拡散係数を配合ごとに示す。見かけの拡散係数は、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減少する結果を示した。とくに、いずれのコンクリートにおいても下層のものほど、再振動による見かけの拡散係数の減少が大きく、再振動を実施することで見かけの拡散係数は、長期的に見ても再振動なしの約1/2程度に改善されているのが分かる。

3.3 鉄筋腐食性に及ぼす影響

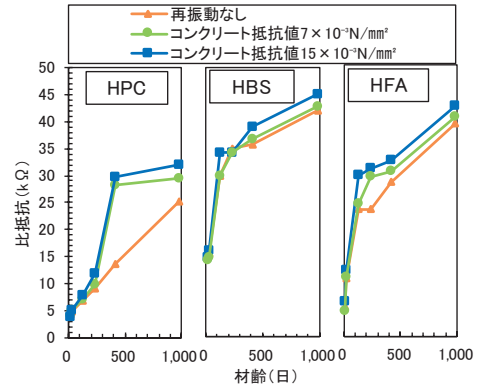


図-4 比抵抗経時変化

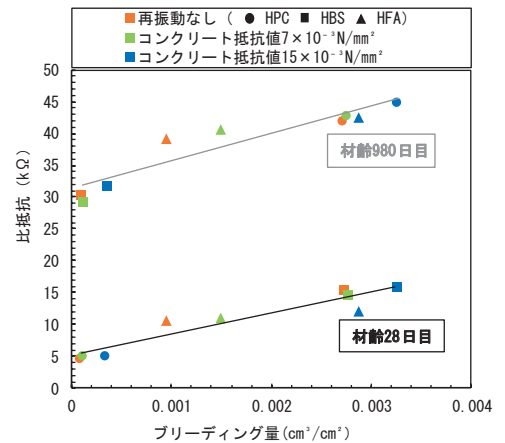


図-5 比抵抗値とブリーディング量の関係

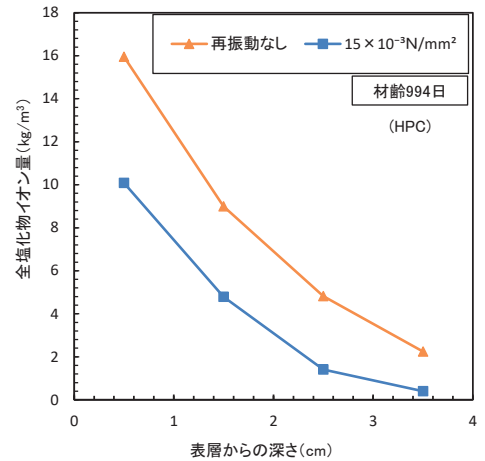


図-6 全塩化物イオン量一例

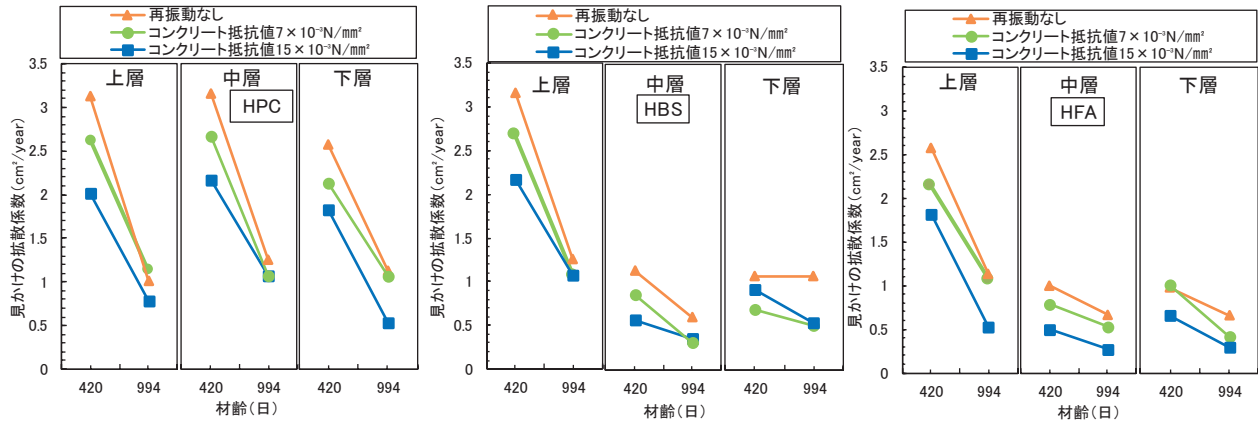


図-7 見かけの拡散係数

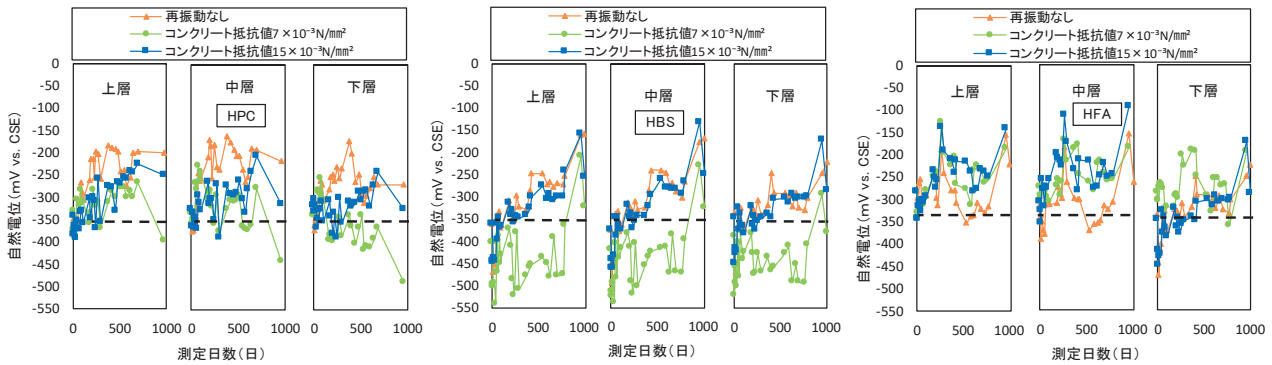


図-8 自然電位

図-8には、各種コンクリートにおける鉄筋の自然電位の測定結果を示す。なお、自然電位が-350mVよりも卑な値となった際には、ASTEM C876の腐食判定基準において鉄筋に腐食が90%以上の確率で発生していると判断される⁹⁾。ASTEM C876の腐食判定基準に基づくと、コンクリート抵抗値 $7 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ で再振動を行ったHPCは、そこで、鉄筋レーダー探知機を用いて鉄筋かぶりを確認したところ2.0cmとなっており、ほかの供試体のかぶり3.0cmよりも薄くなっていた。振動締め時のパイプレーターからの振動により鉄筋が移動したと考えられる。一方で、コンクリート抵抗値 $7 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ で再振動を行ったHBSは、電位が初期から低く、貴化傾向が長期にわたって示されなかったため、測定用コードと鉄筋の接続不良と判断し、測定用コードを取り替えて接続しなおした。そのほかの供試体の自然電位は、材齢980日目までに、いずれも多少の変動はあるものの、腐食はほとんど進行していないと思われる。

図-9には、各種コンクリートにおける鉄筋の分極抵抗の測定結果を示す。いずれの供試体も再振動振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。分極抵抗は、コンクリート抵抗値 $15 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ に再振動を行うことで、もっとも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、しがたい状態にあると推察できる。しかし、分極抵抗は、いずれのコンクリートにおいても、材齢とともに減少する結果を示している。これは、試験材齢に伴って浸透する塩化物イオンの増加によって、鉄筋の腐食速度が増加したと考えられる。

以上のことから、再振動を実施することで、硬化後の物質移動抵抗の向上が期待され、施工段階でコンクリート品質を確保する上で、有効な手段の一つであると考えられた。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コンクリート抵抗値 $15 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ のときが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。

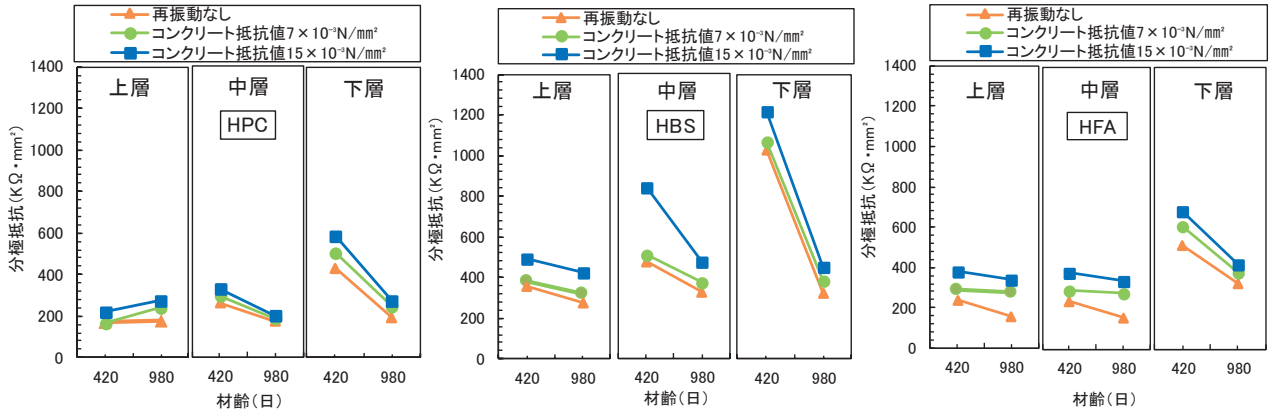


図-9 分極抵抗

4. まとめ

3種の配合条件のもとでコンクリート抵抗値を再振動時期の指標とした長期材齢コンクリートの表層品質、塩化物イオン浸透、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、比抵抗および塩化物イオン浸透性は改善され長期的にもその効果は認められた。
- (2) 材齢980日を超えるコンクリートにおいても、ブリーディング量が多いもの程コンクリート品質は向上することが明らかとなった。また、その傾向は材齢の増加に伴って大きくなった。
- (3) 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。
- (4) 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、コンクリート抵抗値 $15 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ よりも大きい場合には、バイブレーター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コンクリート抵抗値 $15 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ が再振動作業を行う目安であると考えられた。

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.119，2012
- 2) 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」
- 3) 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，pp.227-228，2011
- 4) 佐藤悠士朗，樫原弘貴ほか：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
- 5) 三浦明，樫原弘貴ほか：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」
- 6) 阿部稜，樫原弘貴ほか：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) 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
- 8) 佐藤悠士朗，樫原弘貴ほか：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，コンクリート工学年次論文集，pp.1209，Vol.41，No.1，2019
- 9) ASTM C-876:Standard Test Method for Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete,1980.