

PC配合における再振動締固めの方法の違いが硬化後の物質移動に与える影響

福岡大学 学生会員 ○三浦 明
福岡大学 樋原 弘貴
福岡大学 添田 政司
福岡大学 久保田崇嗣

Abstract : Studies on re-vibration and vibration time in PC concrete are few. Usually, re-vibration is done by skilled and experienced persons. In this study, considering the mix proportion of PC concrete, effect of time interval between re-vibration and vibration time on concrete quality are examined experimentally. From the results, air permeability of concrete decreases by re-vibration. Especially, this effect confirmed remarkable results in overcrowded rebar arrangement. And, best re-vibration time and interval was about 5 seconds and 10 minutes respectively, after placing of concrete.

Key words : re-vibration , air permeability , porosity, coarse aggregate ratio

1. はじめに

フレッシュコンクリートの締固め作業において、最初に振動を与えてから一定時間置いて再び振動を与える再振動締固めが用いられる場合がある。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、沈下ひび割れ等に効果があると言われている¹⁾。また、再振動締固めの時期や加振時間、コンクリートの品質の改善効果については、これまでも種々の検討がなされており、再振動を行うことで、圧縮強度や付着強度が増加することやバイブレーションの間隔や加振時間等の施工方法に関する知見が得られている^{2) 3)}。しかし、再振動を行う時期に関しては、できるだけ遅い時期に行うと良いとされているが¹⁾、明確な再振動の開始時期と加振時間は検討されていない。また、これまでの検討の多くは水セメント比55%程度と高く、流動性も高いものでしか検討されていない^{2) 3)}。そのため、一般的な高強度コンクリート(PC配合)における再振動締固めの仕様条件やコンクリートの改善効果に関する情報は極めて少なく、感覚と経験に基づいた加振が行われているのが現状である。そこで筆者らは、PC配合における再振動締固めによって得られるコンクリート改善効果について検討を行っている。これまでの知見で、配筋状態の違いによって異なる最適な再振動のタイミングや加振時間によって、コンクリート表面気泡の形成を低減でき、ブリーディング発生量が異なることが分かった。さらに、再振動を行うことでコンクリート表層の品質のバラツキを少なくできることなどを明らかにしてきた⁹⁾。ただし、実際の劣化に対する改善効果については、明らかにしておらず、そこで本研究では、種々の再振動条件で作製したコンクリート供試体からコアを採取して、コンクリート密度、空隙量、透気係数等の測定を実施し、再振動締固めを行うまでの時間および加振時間の違いが物質移動抵抗性に対する改善効果に及ぼす影響について中性化速度係数や塩化物イオン実効拡散係数と高い相関性のある透気係数⁸⁾を用いて検討を行った。

2. 実験概要

実験で用いたコンクリートは、水セメント比46%の早強ポルトランドセメントを用いており7日での設計強度 28N/mm^2 のものである。表-1および表-2には、実験で用いたコンクリート配合および使用材料の物性を示す。打設時のスランプと空気量は、加水後40分にて、それぞれ8.0cmと4.5%であった。

図-1には、型枠および配筋状況を示す。実験に用いた型枠は、 $1500 \times 900 \times 600\text{mm}$ のものであり、D10異形鉄筋を用いて型枠内に密配筋域、粗配筋域、無筋域を設け、それを3体作製した。写真-1は、打設状況を示しており、生コン車から直接コンクリートを投入しながら、孔径3.0cm、周波数50Hz~60Hzの棒状バイブレータを用いて、深さ500mm位置まで挿入し、全体的に均一に締め固めるため、1型枠辺り12箇所(15秒/1箇所)に振動を与えた。1層で高さ550mmのコンクリートを打設して金コテにて整形した。なお、本実験を行った際の大気環境は、気温 23.7°C 、湿度66%であった。図-2には、型枠ごとの再振動までの時間および加振時間を示しており、1型枠ごとに、2つのエリアに分けて異なる再振動締め固め方法を行った。その内訳として、再振動なし域(略号A)、打設後から再振動を行うまでの最適な時間を検討するため、打設終了後からの再振動までの時間を10分(略号B)、20分(略号C)、30分(略号F)とし、それぞれ図-1に示したバイブレータ挿入箇所において5秒の加振を行ったものと、加振時間の影響を検討するため、打設後から再振動までの時間を20分と一定とし、加振時間を5秒(略号C)、10秒(略号D)、15秒(略号E)に変化させたケースを設けた。なお、既往の研究により、今回用いたバイブレータの径および周波数において、挿入位置からの影響範囲は、最大で半径300mm程度と報告されており⁴⁾、今回の再振動においては、加振エリアごとのバイブレーションの影響を限りなく

表-1 コンクリートの配合

セメント比 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	スランプ (cm)	単用量 (kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
46	45.2	4.5	8	164	357	780	1043	3.57

表-2 使用材料および物性

	種類	産地及び品名	粗粒率	密度 (g/cm ³)
細骨材	砂	吉岐・粗砂	2.70	表乾 2.55
		吉岐・細砂	2.20	2.55
粗骨材	碎石	波多津2005	59.0	2.81
セメント	早強	—	—	3.14
混和剤	AE減水剤標準形I種	チューポールEX20	—	—

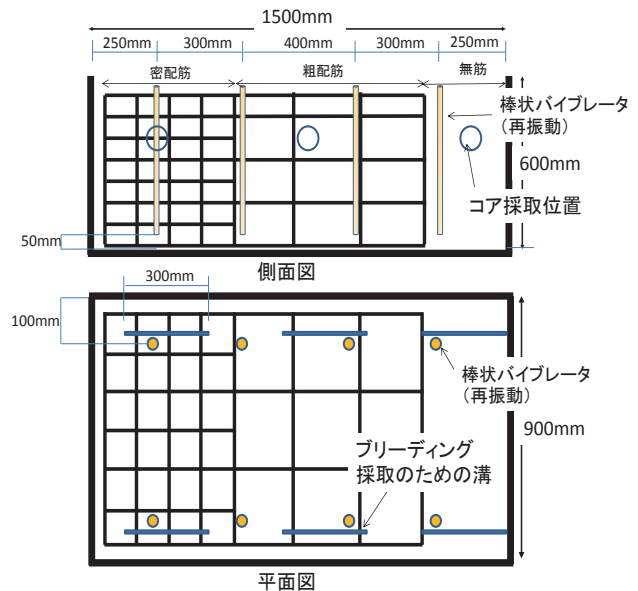


図-1 型枠形状および配筋状況

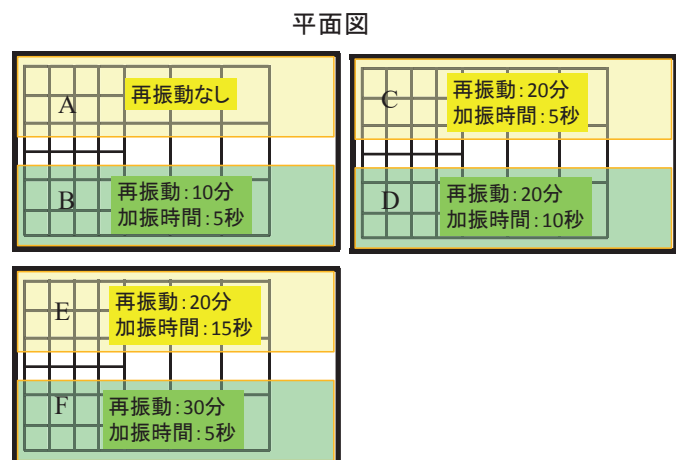


図-2 各エリアの再振動までの時間および加振時間

少なくするため、さらに安全側に他エリアとのパイプ
レータ挿入間隔を700mm設けている。また、再振動を
行うタイミングの指標として、コンクリートのフレッ
シュ性状は、既往の研究を参考に⁴⁾、N式貫入深さ
を用いた。今回の打設後から再振動を行った10分、20
分、30分でのN式貫入深さは、それぞれ200mm、
150mm、100mmであった。

打込みから5時間後には、コンクリートのある程度の
硬化を確認した上で、型枠内に水を張り養生を行った。
脱型は、いずれも7日後に行い、その後は材齢14日まで
屋外静置させた。写真-2および図-1に示す位置にて
φ7.5cm×90cmの断面を貫通させたコンクリートコアを
採取した。コンクリートの品質を把握する目的として、
加圧透気試験、空隙量の測定、粗骨材率の測定を行っ
た。いずれの試験も採取したコンクリートコアの端部
50mmまでの範囲を使用した。まず、採取したコンクリ
ートコア周囲の粗骨材のマッピングを行い、画像解析
により粗骨材率を算出した。その後、加圧透気試験を
行い、同じ供試体を用いて空隙量の測定を実施した。

加圧透気試験は、側面部からの空気の流失を防ぎ気
密性を確保するために円周部をアルミテープで被覆し
た後、メタル管の内部に供試体を設置し、メタル管と
供試体の隙間をブチルテープ性の両面テープおよび速
効型硬化樹脂で被覆してから行った。測定方法を図-3
に示す様に、供試体の設置後コンプレッサーから任意の
圧縮空気を注入して水を張った容器とメスシリンダー
を用いた水中置換法により透気量を測定しダルシー則
にて透気係数を算出した⁵⁾⁶⁾。空隙量試験は、飽水処理
と絶乾処理を行った場合の重量差を飽水処理時の重量
で除して算出した。

3. 結果および考察

図-4には、打設後から20分後に再振動を行っ
た場合の透気係数と加振時間の関係を配筋状況ご
とに示す。無筋の加振5秒での透気係数は、再振
動なしに比べて僅かに減少しているが、それより
も加振時間が長くなると、むしろ増加する結果と
なった。粗配筋でも、同様の傾向が確認され、加
振時間5秒で一旦は透気係数が低下したが、それ
以降は増加に転じている。一方の、密配筋におけ
る加振時間による透気係数への影響は、他のもの
よりも小さかった。今回のコア採取位置は、試験
体の上部であったため、配筋が少ない状況では、



写真-1 コンクリートの打設状況



写真-2 コンクリートコア採取状況

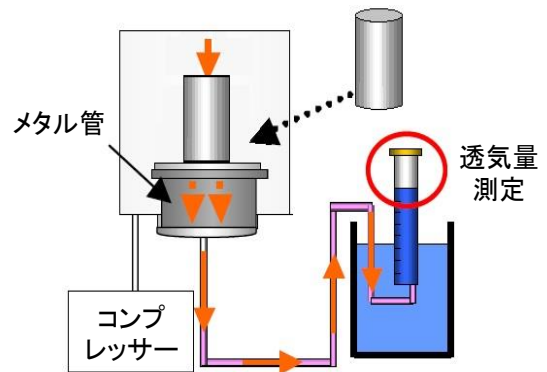


図-3 加圧透気試験

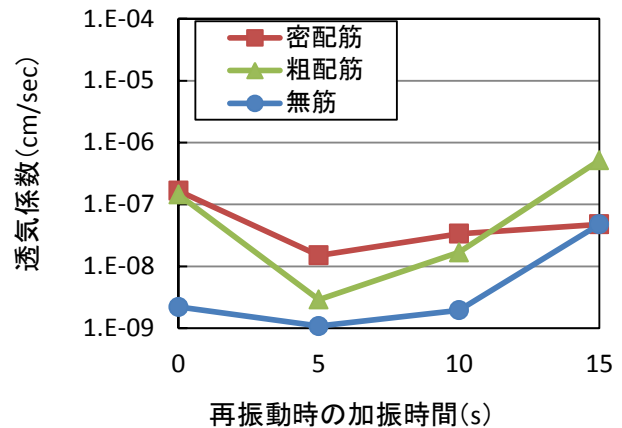


図-4 透気係数と再振動時の加振時間の関係

加振時間が長くなると再振動によって下層の空気が上昇することで、コンクリートの透気係数が増加したものと考えられる。一方の、密配筋では、再振動を行った場合でも鉄筋が上昇する空気を阻害したことで顕著な透気係数の加振時間による透気係数の変動は確認されなかったものと考えられる。

図-5は、加振時間5sと一定条件での透気係数と再振動までの時間の関係を配筋状況ごとに示す。無筋の場合には、成形から20分までの加振によって、透気係数が低下しているが、それ以降では、むしろ大きく増加に転じている。また、粗配筋、密配筋では、同様の傾向を示し、加振10分にて透気係数が最も減少し、それ以降は緩やかに増加する傾向を示した。なお、今回の実験で物質移動の評価の指標とした透気係数は、中性化速度係数や塩化物イオン実効拡散係数と正の相関性があるため、中性化や塩化物イオンの浸透に対する抵抗性についても最適な条件下で再振動を実施することで向上すると言える⁶⁾。ただし、既往の研究で報告されているW/C55%程度の結果では、再振動のタイミングは、打設後から120分(N式貫入深さ100mm)程度と比較的に時間が長い場合に耐久性の向上が確認されている³⁾。しかしながら、今回検討したPC配合(W/C46%)においては、フレッシュ性が高い状態(N式貫入深さ150mm~200mm)で5秒程度の比較的短時間の加振を行うことにより、透気係数の低下が確認されたことから、配合によって物質移動抵抗性における最適な再振動のタイミングが異なってくるのが分かった。

図-6は、打設後から20分後に再振動を行った場合の見かけの空隙率と加振時間の関係を示す。再振動を行わなかった加振時間0sの空隙率は、密配筋が最も大きく、無筋および粗配筋は同程度であった。配筋状況による加振時間の影響の違いについてみると、無筋と粗配筋の空隙率は、あまり大きな変化はなく、いずれの加振時間においても同程度であったのに対し、密配筋では、再振動を行うことによって空隙率が減少し、加振時間が長くなるに従って低下傾向を示した。

図-7は、見かけの空隙率と再振動までの時間の関係を示す。無筋および粗配筋の空隙率は、打設後から再振動までの時間が長くなるに従って、増加する傾向を示したのに対し、密配筋では、むしろ逆

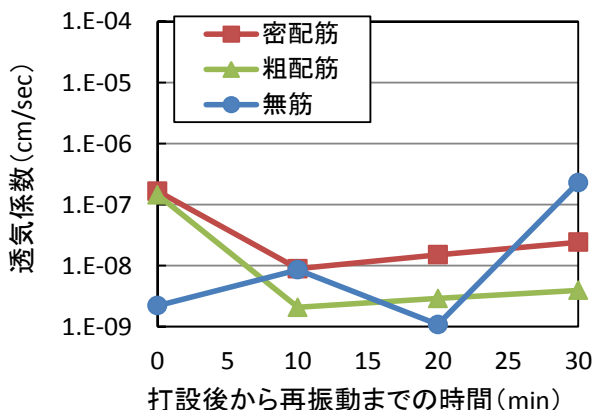


図-5 透気係数と再振動までの時間の関係

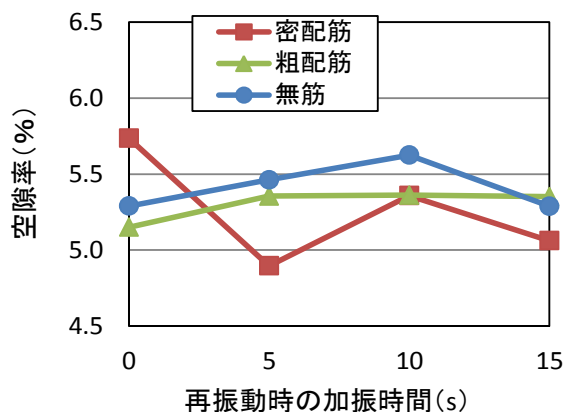


図-6 見かけの空隙率と加振時間の関係

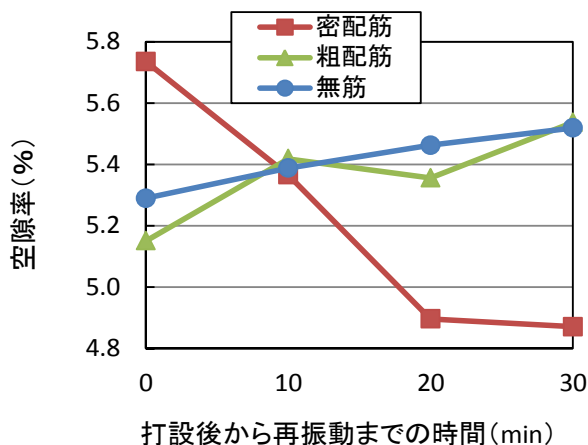


図-7 見かけの空隙率と再振動までの時間の関係

に低下する結果を示した。無筋および粗配筋における空隙率の増加については、今回の試験体コアは、供試体の上部から採取しているため、再振動によって低層部の空気が上昇したことで、結果として空隙率が増加したものと考えられる。一方の、密配筋の場合には、実験に用いたコアは鉄筋を貫通しているため、再振動までの時間が長くなるとそれまでに鉄筋下部に堆積した空気量が多くなるため、その量に伴って除去される鉄筋下部の空気量も多く⁷⁾、また上昇する空気を鉄筋が阻害したことで空隙率が明確に低下したものと考えられる。この結果は、事前の検討で実施したテストハンマーによる表面強度においても上部付近において、密配筋エリアに顕著な強度増進が確認されている⁹⁾。

図-8、図-9は、一例として粗配筋および密配筋における打設後から再振動までの時間ごとの透気係数と空隙率の関係を示す。粗配筋においては、いずれのタイミングにおいても再振動を行なった場合には、空隙率は増加しているが透気係数は低下している。一般的に、空隙率と透気係数の間には相関性があると考えられるが、今回の結果ではこの関係性は見られていない。透気係数に大きく影響を与える空隙径は、比較的粗大な1000nm以上⁸⁾と言われており、再振動の前後によって空隙径が異なっていると推察される。つまり、1000nm以上の空隙径が分散し、200nm以下の透気係数に影響しない空隙径が増加したものと考えられる⁸⁾。この点については、水銀圧入による空隙量測定によって確認する予定である。一方の密配筋においては、上記で記述した空気の分散による空隙径の変化以外にも、鉄筋下部に形成された空隙量が除去されたことで、空隙率も減少し結果として透気係数も低下したものと考えられた。

図-10は、粗骨材率と加振時間の関係を示す。無筋の場合には、加振時間が長くなるにつれて粗骨材率が低下しており、加振時間の増加に伴って材料分離が生じやすくなることが示唆されたが、一方の密配筋および粗配筋は、加振時間が長くなっても粗骨材率に大きな変化が見られておらず、鉄筋の存在によって材料分離が生じにくいことが示された。

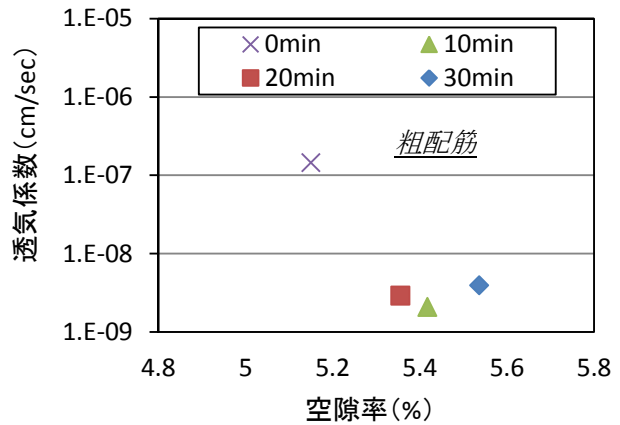


図-8 透気係数と空隙率の関係 (加振：5秒間)

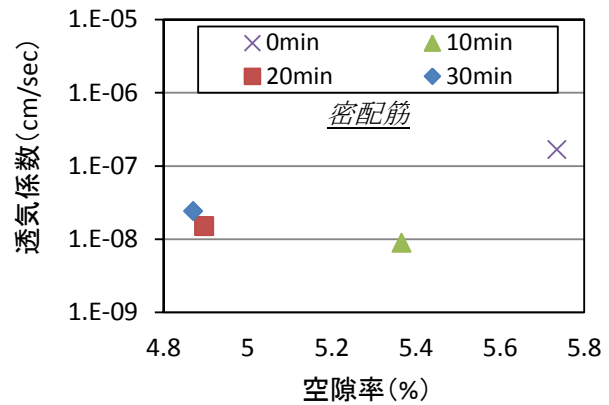


図-9 透気係数と空隙率の関係 (加振：5秒間)

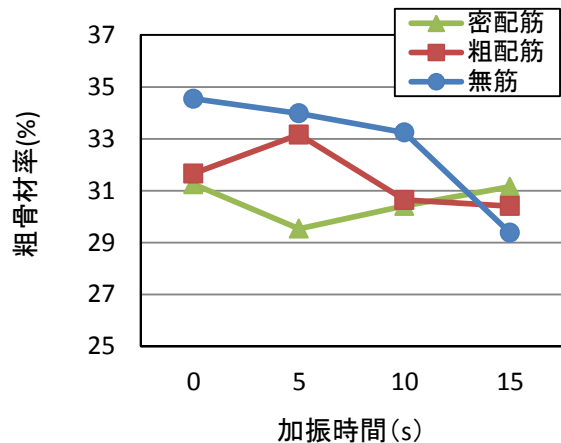


図-10 粗骨材率と加振時間の関係 (再振動：20分後)

4. まとめ

種々の配筋条件のもとで再振動締固めの施工方法を変えて、加圧透気試験、空隙量の測定、粗骨材率の測定から硬化後の物質移動抵抗性について検討を行った結果、以下の知見を得られた。

- 1) PC 配合においては W/C55%のものに比べて、コンクリートのフレッシュ性が高い状態 (N 式貫入深さ 150mm~200mm) で、5 秒程度の比較的短時間の加振を行うことにより、物質移動抵抗性の向上が図られる。
- 2) 再振動を行うことで鉄筋下部に堆積した空気を除去できると考えられ、その効果は、配筋が多いほど物質移動抵抗性の効果が顕著である。
- 3) W/C46%程度において、無筋域では再振動の加振時間が長くなると材料分離が起こる可能性が高くなるが、今回の検討範囲での再振動では、配筋域において材料分離が生じにくいことが示された。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、株式会社安部日鋼工業、本松様には、多大なるご支援とご協力を頂いた。ここに感謝の意を記す。

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) 田畑壮典，成島誠一，二村憲太郎，伊代田岳史：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， V-20
- 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，
- 4) 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
- 5) 河野俊一，氏家勲：乾燥によるコンクリートの透気係数の変化に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集， Vol.21， No.2， pp.847-852,1999
- 6) 林亮太，櫛原弘貴，添田政司ら：透気係数による各種コンクリートの物質移動抵抗性評価方法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集， Vol.35， pp.745-750， 2013.7
- 7) 白川順菜，二村憲太郎，伊代田岳史：再振動締固めがコンクリートの諸特性に与える影響，土木学会第67回年次学術講演会， V-563
- 8) 三浦明，櫛原弘貴，添田政司ら：透気係数による各種コンクリートの塩化物イオン浸透性の評価に関する研究，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， Vol.15， pp.253-258， 2015.10
- 9) 三浦明，櫛原弘貴，添田政司ら：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， Vol.38， 2016