研究成果報告書 科学研究費助成事業

今和 4 年 6 月 2 4 日現在

機関番号: 37111

研究種目: 基盤研究(C)(一般)

研究期間: 2019~2021

課題番号: 19K04562

研究課題名(和文)再振動締固め法を用いた高耐久コンクリートの作製技術の構築

研究課題名(英文)Construction of manufacturing techniques for highly durable concrete using the re-vibration compaction method

研究代表者

添田 政司 (Soeda, Masashi)

福岡大学・工学部・教授

研究者番号:50148871

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3.300.000円

研究成果の概要(和文): コンクリートの再振動の明確な実施時期や方法に関する情報が少なく、現場では感覚と経験に基づいた加振が行われている。本研究は、最適な再振動締固めの実施時期,加振時間、実施時期の判定法を提案することを目的とした。コンクリートの抵抗値が 17×10 -3N/mm2に到達した時期に再振動を行うのが最も効果的であり、加振時間は $5\sim10$ s程度で行うことでコンクリートの品質は向上する結果となった。一方で、再振動の実施時期が遅い場合や加振時間が長くなると、再振動によるコンクリートの品質の改善が期待できなかった。本結果を基に実現場の床版コンクリート打設にて再振動を実施し、コンクリート品質の向上を確認することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義 コンクリート構造物の初期欠陥や不具合が後を絶たず、コンクリート品質確保が課題となっている。本研究は、 コンクリート品質を施工段階で確保することが期待される再振動締固め法に着目した。再振動締固めの実施時期 や加振時間、実施のタイミングを判定する手法を提示することで、課題とされる建設時のコンクリート構造物の 品質確保の問題解決に寄与することが期待される。

研究成果の概要 (英文): There is no clear information on when and how to re-vibrate concrete, and on-site vibration is performed based on feeling and experience. The purpose of this study was to propose the optimum method for determining the re-vibration compaction implementation time, vibration time, and implementation time. It is most effective to re-vibrate when the resistance value of the concrete reaches $17 \times 10-3N$ / mm2, and the vibration time is about 5 to 10s, which improves the quality of the concrete. rice field. On the other hand, if the re-vibration was carried out late or the vibration time was long, improvement in the quality of concrete by the re-vibration could not be expected. Based on this result, it was possible to confirm the improvement of concrete quality by re-vibrating at the floor slab concrete placement at the realization site.

研究分野: コンクリート工学

キーワード: 再振動締固め N式貫入深さ 高耐久 気泡間隔係数 ブリーディング

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等に ついては、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1.研究開始当初の背景

再振動締固めを実施することは,硬化後の耐久性を確保する上で重要な作業工程の一つであり,現在では標準的な技術となってきている。しかし,再振動を行う際のフレッシュコンクリートの品質や性状に応じた適切な再振動の開始時期や加振時間の設定法に関する情報がないため,施工現場では,感覚や経験を基に再振動を行っている。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。さらに,施工段階でも高耐久化や品質確保が期待できるにも関らず,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きていない。

2.研究の目的

本研究の目的は、 各種フレッシュコンクリートの状態を考慮した最適な再振動の実施時期,加振時間および振動間隔の設定, 再振動締固めによるコンクリートの耐久性向上効果に関する定量的評価, 現場作業における再振動の適切な実施時期,加振時間および振動間隔を設定するための簡易試験を提示した上で,再振動締固め作業における実施マニュアルを構築することである。

3.研究の方法

再振動の最適な実施時期の検討

コンクリートは, 45,56%の2種類とし,目標スラ ンプおよび空気量は ,10±2cm ,4.5±1.5%とした。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 φ20mm のアルミパイプを設置した 600×100×230mm と した。打込みは,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 位置まで打 ち込み,棒状バイブレータ(径:30mm,周波数50Hz~ 60Hz)を用いて5秒間の加振を行った。2層目は,型枠 底面から高さ 230mm の位置まで打ち込み , 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 間の加振を行った。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(最大加速度:2000m/s²)を用い た。加速度センサの設置位置は,図-1に示す通りであ る。センサの設置方法は,高さ115mmの所定の位置に 予め型枠に設置してあるアルミパイプの片側に,鉄板を 樹脂で固定し,鉄板に磁石付きの加速度センサを取付け た。加速度センサで測定したコンクリート振動波形の一

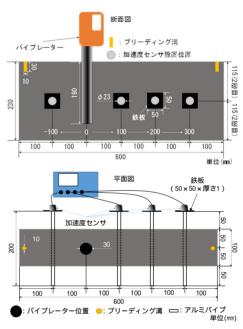


図-1 供試体概要

例を示す。この波形面積を算出し,これを振動エネルギー量と定義した。再振動実施時期の指標には,コンクリートのフレッシュ性状を簡易に判定できる N 式貫入深さ試験によって得られる貫入深さより求めたコンクリート抵抗値を指標とした。

N 式貫入深さとコンクリートの品質の関係を定量的に把握することを目的として,落下高さ 1000mm で貫入深さが 120mm , 100mm , 70mm に達した時期に再振動を行った。各落下高さにおける貫入深さとコンクリート抵抗値を求めた。以降の再振動実施時期は ,求められたコンクリート抵抗値 $10\times10^{-3}\mathrm{N/mm^2}$, $17\times10^{-3}\mathrm{N/mm^2}$, $30\times10^{-3}\mathrm{N/mm^2}$ で表して示す。再振動の実施方法は,初期締固め時と同じ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。この際も加速度センサを用いて振動エネルギー量の測定を行った。 なお , アルミパイプは , コンクリートが自立して形状を保持できる状態まで凝結した時点で取り出し , アルミパイプの跡は , 硬化後にモルタルで修復し , 28 日間の水中養生を行った。測定項目は , ブリーディング水量 , 気泡間隔係数 ,水銀圧入法による細孔容積 , 骨材下部における空気量の測定 , 骨材分布 , 四点電極法による比抵抗測定 , 塩水浸漬による塩化物イオン量分布とした。

最適な加振時間の検討

再振動の実施時期の違いの検討では,水セメント比 45%を中心に詳細な検討を行ってきたため,本検討におけるコンクリートは,水セメント比 45%のみとした。配合は,市中プラント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 ± 2 cm, $4.5\pm1.5\%$ とした。供試体は,図-1 に示すものと同様の寸法のものを用いた。打込みは,同様に 2 層で行い,棒状バイブレータ(径:30mm,周波数 50Hz ~ 60 Hz)を用いて 5 秒間の加振を行った。N 式貫入深さ試験

による落下高さは,500,750,1000mm とした。検討 1 での最適な再振動の実施時期は,落下高さ 1000mm で N 式貫入深さ試験を実施した際の貫入深さが 100mm に達した時期であったことから,貫入深さが 100mm 付近に達した際に 5 秒, 10 秒, 15 秒の 3 水準 で再振動を実施した。再振動を行った際の落下高さご とのコンクリート抵抗値の平均は,15.1×10⁻³N/mm² (以降, コンクリート抵抗値 15×10⁻³N/mm²で示す。) であった。なお,100mm 付近を再振動の実施時期と しているため、最適な再振動の実施時期で実施された コンクリート抵抗値 17×10-3N/mm² と若干ではあるが 異なっている。また,再振動時の加振時間は,5秒, 10 秒,15 秒で実施する供試体と再振動なしの計4体 の供試体を作製した。振動エネルギー量は,加速度セ ンサを用いて図-1 に示す位置に設置して測定を行っ た。打設終了後は,硬化を確認して,28日間の水中養 生を行った。測定項目は,ブリーディング水量,四点 電極法による比抵抗とした。

コンクリート床版における再振動の適用性について の実地試験

コンクリートは,水セメント比53%とし,練りあがり直後におけるスランプおよび空気量は示す通りである。この配合は,実橋で床版打設を行ったものと同様である。供試体は,橋梁床版を模擬して床版厚230mm および330mmの2種類作製した。供試体の寸法は1192×1192×230mm,1067×1192×330mmである。図-2,3には,供試体の平面図をそれぞれ示す。打込みは,トラックミキサから直接行い,初期締固めは,平面図に示すバイブレータの挿入位置において棒状バイブレータ(孔径30mm)を床版厚230mmは深さ200mm,床版厚330mmは深さ300mmの位置まで挿入して,5秒間加振を行った。また,ブリーディング

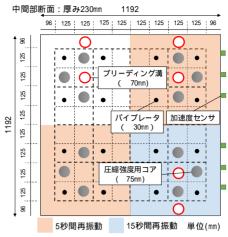


図-2 供試体平面図(床版厚 230mm)

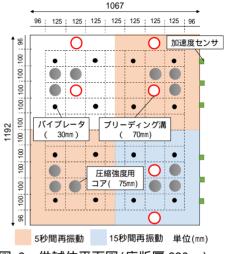


図-3 供試体平面図(床版厚 330mm)

率の測定は,コンクリートの打ち込み終了後に速やかに表面をコテで成形し,平面図に示す箇所にて,ブリーディング水の採取を行った。再振動は,貫入深さ試験による貫入深さが $100\,\mathrm{mm}$ に達した時期に 5 秒, 15 秒の加振で行った。バイブレータの挿入位置は,平面図に示す位置とした。振動エネルギーの測定は,加速度センサを用いて行った。加速度センサの設置は,平面図に示す様に,5 秒間再振動の範囲の型枠に3 箇所,15 秒間再振動の範囲の型枠に3 箇所とし,バイブレータから伝搬される振動エネルギーの測定を行った。圧縮試験は,図-3,4に示す位置よりコンクリートコア($\phi75\,\mathrm{mm}$)を採取し,材齢 36 日目にて試験を実施した。

4. 研究成果

再振動の最適な実施時期の検討

水セメント比 45 , 56%のブリーディング量は , 再振動の実施時期が遅いものほど , 骨材やアルミパイプの下部に既に蓄積されている余剰水が多いことから , ブリーディング量も多くなると予想されたが , 実際のブリーディング量は , コンクリート抵抗値が $17\times10^{-3} > 10\times10^{-3} > 30\times10^{-3} N/ \, \mathrm{mm}^2 > \mathrm{再振動なしの順で多くなる傾向を示した。参考値として , JIS A1123 試験によるブリーディング量は , 水セメント比 45%で <math>0.075 \, \mathrm{cm}^3 / \mathrm{cm}^2$, 水セメント比 56%で $0.225 \, \mathrm{cm}^3 / \mathrm{cm}^2$ であった。 次に , 再振動によってブリーディング水の増加が , 気泡間隔係数および骨材分布等に与える影響について検討を行った。空気量は , 再振動なしと比べてコンクリート抵抗値 $17\times10^{-3} > 30\times10^{-3} N/ \, \mathrm{mm}^2$ の順で減少する結果を示し , 再振動による実質の空気量の低減を確認できた。一方の , 気泡間隔係数は , 空気量と同様に再振動なしと比べてコンクリート抵抗値 $17\times10^{-3} > 10\times10^{-3} > 30\times10^{-3} N/ \, \mathrm{mm}^2$ の順で減少している。いずれも再振動を実施したコンクリートでは , 十分な耐凍害性を確保するための目安とされる気泡間隔係数 $250 \, \mu \mathrm{m}$ 以下を満足する結果が得られた。気泡直径 $25 \sim 250 \, \mu \mathrm{m}$ の範囲では , いずれの供試体も空気量の増減は極めて小さかったのに対し , $250 \sim 1000 \, \mu \mathrm{m}$ の気泡直径では , コンクリート抵抗値 10×10^{-3} , $17\times10^{-3} N/ \, \mathrm{mm}^2$ において明確な減少を確認することができた。再振動による内部空気の減少量は , ブリーディング量が多いものほど増加しており , ブリーディング水の上昇に伴って排出されると推察できる。さら

に, 250μm 以下の微細な空気は再振動を行っても減少しておらず,むしろ粗大な空気のみを排出されていることから,再振動は, 耐凍害性を低減することなく,むしろコンクリートの品質を確保する上でも有効な方法とも言える。

次に ,物質移動抵抗性に影響を及ぼすとされる細孔構造について検討を行った結果から ,実質の単位水量が低下したことで ,緻密な組織になることを確認できた。以上のことから ,今回の検討を行った範囲では ,コンクリート抵抗値 17×10^{-3} N/mm² を示した時期に再振動を実施することで ,耐凍害性を確保する上で必要な 25μ m から 250μ m の範囲のエントレインドエアを消失させることなく ,最も骨材下部に蓄積したブリーディング水が除去される結果が得られた。さらに ,ブリーディングの増加により実質の水セメント比が低下することによって , 高耐久のコンクリートを作製できることが分かった。

材齢 1,36 週における測定位置ごとに得られた比抵抗分布の結果では,バイブレータ挿入位置を中心として離れるにつれて減少傾向にあることが分かった。ただし,コンクリート抵抗 30×10^{-3} N/mm²程度での比抵抗は,むしろ再振動なしよりも低下していた。これは,再振動時に既に,コンクリートの流動性が低下していたため,バイブレータの引抜き痕が十分に充填されなかった可能性や余剰水がバイブレータ跡に蓄積して,粗な組織となった可能性がある。一方で,コンクリート抵抗値 17×10^{-3} N/mm²の比抵抗値は,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とともに,広範囲に渡って再振動の効果が付与されているのが分かる。

以上のことから ,再振動の実施時期は ,N 式貫入深 さ測定によりコンクリート抵抗値 17×10^{-3} N/mm² を示した際に ,再振動の付与効果が最も期待でき ,滞りなく施工もできるための現実的なタイミングの 1 つの目安になると思われる。ただし ,コンクリート抵抗値 30×10^{-3} N/mm² 程度で再振動を実施すると むしろ再振動なしよりもコンクリートの品質の低下が懸念された。

最適な加振時間に関する検討

図-5には,ブリーディング量の経時変化を示す。ブリーディング量は,加振時間 5 秒 > 10 秒 > 15 秒 > 再振動なしの順で増加する結果となった。参考値として,JIS A1123 試験によるブリーディング量は,0.098 cm^3/cm^2 であった。また,ブリーディングは,再振動実施直後から増加する傾向を示した。特に 15 秒間の加振を行ったものは,再振動なしと同等程度のブリーディング量となった。これは,加振時間が長くなると,材料分離によって,引抜き後のバイブレータ痕が形成

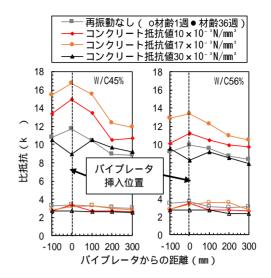


図-4 比抵抗分布

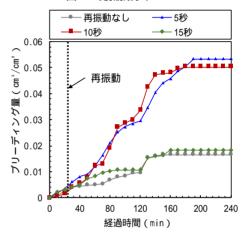


図-5 ブリーディング量の経時変化

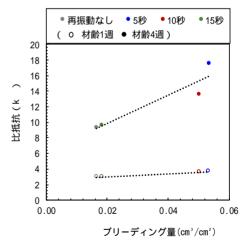


図-6 比抵抗とブリーディングの関係

され易くなるため,その挿入痕に余剰水が集積したと思われる。そのため,挿入痕に集積したブリーディング水を採取することができれば,最終ブリーディング量は,加振時間による大きな差は,あまりないものと推察している。一方の,5秒,10秒間の加振を行った場合のブリーディング量は,再振動なしと比べて顕著に増加する結果を示した。ただし,両者には,明確な違いは確認できなかった。

総振動エネルギー量は,加振時間が長いもの程,大きくなっていたが,1 秒間あたりの振動エネルギー量では,逆に加振時間が短いもの程,大きくなっていた。このことから,振動伝搬エネルギー量は,加振時間に伴ってバイブレータ挿入位置において材料分離が生じはじめ,徐々に減衰していくと考えられた。バイブレータ挿入位置から 100mm における加振時間 15 秒の振動波形を確認したところ,時間の経過に伴い振幅が減少傾向にあることが確認された。

図-6には,材齢1,4週間における各測定位置の比抵抗値の平均とブリーディング量の関係を示す。比抵抗は,シリーズ1の結果と同様に,ブリーディングが多い加振時間5秒>10秒>15

秒 > の順で大きくなる結果となった。また比抵抗値は,バイブレータ挿入位置を中心から離れるにつれて減少傾向にあり,加振時間が15秒になると,比抵抗値は,バイブレータ挿入位置においてむしろ再振動なしよりも低下しており,材料分離によってバイブレータ痕が粗になり,比抵抗値が低下していた。

以上の結果より、再振動時の加振時間は 5 秒 ~ 10 秒で最もブリーディング水が増加し、比抵抗値が増加することが分かった。また、再振動の場合には、フレッシュコンクリートとは異なり、既に凝結が始まっているため、加振時間が 15 秒程度と長くなると、材料分離が生じる危険性が懸念された。

コンクリート床版における再振動の適用性につい ての実地試験

図-7 には,橋梁床版の中央部模擬供試体および端支点部模擬供試体のブリーディング率の経時変化を示す。ブリーディング率は,いずれの供試体においても,再振動を実施することで増加する結果を示した。これは,再振動によって骨材や鉄筋下部に蓄積されていた余剰水がブリーディング水として排出されたため大きくなったと考えられた。また,再振動時の加振時間については5秒間再振動を実施したものが高いブリーディング率を示した。再振動15秒では,加振時間が長くなると,材料分離によって,引抜き後のバイブレータ痕が形成され易くなるため,その挿入痕に余剰水が集積したと思われる。

図-8には,材齢35日目の圧縮試験の結果を示す.

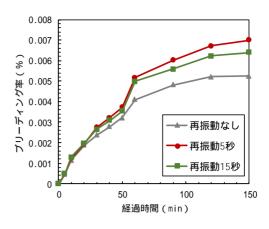


図-7 ブリーディング率(床版厚 230mm)

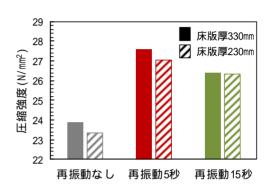


図-8 コア採取による圧縮強度

圧縮強度は,再振動なし<再振動 15 秒間 < 再振動 5 秒間の順で増加した。圧縮試験の結果からも再振動 15 秒間では,材料分離の発生等が原因で 5 秒間のものと比べ強度が低下していることが確認された。この結果は,異なる配合で実施した室内施設の結果と同様であった。しかし,5 秒 15 秒共に再振動を行うことで強度は増加している。

以上の結果から,再振動は,実構造物を模擬したコンクリートにおいても N 式貫入深さが 100mm を示した際に ,5 秒間の加振をすることで ,再振動の付与効果が最も得られることが示された。また ,再振動の場合には ,フレッシュコンクリートの締固めとは異なり ,既に凝結が始まっているため , 加振時間が 15 秒程度と長くなると , 品質が低下する恐れが懸念された。

5 . 主な発表論文等

土木学会全国大会 第75回年次学術講演会

4 . 発表年 2020年

〔雑誌論文〕 計3件(うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件)	
1.著者名 佐藤悠士朗,櫨原弘貴,添田政司,深見桜	4.巻 31
2.論文標題 コンクリートの最適な再振動の実施に向けた実験的検討	5 . 発行年 2020年
3.雑誌名 コンクリート工学論文集	6.最初と最後の頁 11-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3151/crt.31.11	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著
1.著者名 佐藤悠士朗,深見桜,櫨原弘貴,添田政司 	4.巻 28
2.論文標題 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	5 . 発行年 2019年
3.雑誌名 プレストレストコンクリート工学会,シンポジウム論文集	6 . 最初と最後の頁 169-174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著
	-
	4 . 巻 41
オープンアクセスとしている(また、その予定である) 1.著者名	4 . 巻
オープンアクセスとしている(また、その予定である) 1.著者名 佐藤悠士朗,櫨原弘貴,添田政司,深見 桜 2.論文標題	- 4 . 巻 41 5 . 発行年
オープンアクセスとしている(また、その予定である) 1 . 著者名 佐藤悠士朗,櫨原弘貴,添田政司,深見 桜 2 . 論文標題 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 3 . 雑誌名	- 4 . 巻 41 5 . 発行年 2019年 6 . 最初と最後の頁
オープンアクセスとしている(また、その予定である) 1.著者名 佐藤悠士朗,櫨原弘貴,添田政司,深見 桜 2.論文標題 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 3.雑誌名 コンクリート工学年次論文集 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子)	- 4 . 巻 41 . 巻 41 . 巻 41 . 巻 41 . 巻 5 . 発行年 2019年 6 . 最初と最後の頁 1283-1288
オープンアクセスとしている(また、その予定である) 1 . 著者名 佐藤悠士朗,櫨原弘貴,添田政司,深見 桜 2 . 論文標題 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 3 . 雑誌名 コンクリート工学年次論文集 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) なし オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) [学会発表] 計1件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)	- 4 . 巻 41 . 巻 41 . 巻 41 . 巻 5 . 発行年 2019年 6 . 最初と最後の頁 1283-1288
オープンアクセスとしている(また、その予定である) 1 . 著者名 佐藤悠士朗,櫨原弘貴,添田政司,深見 桜 2 . 論文標題 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 3 . 雑誌名 コンクリート工学年次論文集 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) なし オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	- 4 . 巻 41
オープンアクセスとしている(また、その予定である) 1 . 著者名 佐藤悠士朗,櫨原弘貴,添田政司,深見 桜 2 . 論文標題 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 3 . 雑誌名 コンクリート工学年次論文集 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) なし オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) 【学会発表】 計1件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件) 1 . 発表者名	- 4 . 巻 41 . 巻 41 . 巻 41 . 巻 5 . 発行年 2019年 6 . 最初と最後の頁 1283-1288

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6.研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
	櫨原 弘貴	福岡大学・工学部・准教授	
研究分担者	(Hazehara Hirotaka)		
	(70580182)	(37111)	

7.科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------