

一般財団法人新潟県建設技術センター

令和6年度 研究助成事業報告書

コンクリート構造物の耐久性向上に資する施工技能の
可視化と標準化に関する事業

令和7年3月

長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 教授 陽田 修 (代表者)
長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 教授 村上 祐貴 (構成員)
長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 教授 井林 康 (構成員)
一般社団法人新潟県コンクリートメンテナンス研究会 幹事 吉原 敬 (構成員)

コンクリート構造物の耐久性向上に資する施工技能の 可視化と標準化に関する事業

本事業では締固め技能者を対象に、スランプ値の異なる試験体を用いたコンクリート施工試験を行い、締固め位置や時間のコンクリート締固めプロセスを可視化し、施工品質との関係を明らかにすることを目的とする。また、締固め中に発生する音声を解析し、その解析結果を基に締固めの度合いを客観的に評価する手法を開発する。加えて、製作された試験体に対して表層品質評価を行い、締固め作業の結果と照合することで、コンクリートの表層品質の向上に有効な締固めプロセスを明らかにする。

Keywords: Concrete Compaction, Surface Quality, Compaction Guideline, Skill Enhanced, Compaction Effectiveness, AR Marker, Audio Processing, Air-Void Evaluation

1. はじめに

コンクリートの締固め作業は、施工品質を左右する極めて重要な工程の一つである。その適切な実施はコンクリートの長期的な耐久性に大きな影響を与える。振動機を用いた締固めにより、コンクリートの流動性を高め、内部の空隙が減少し、密実な構造が形成される。しかし、締固めが不十分であると空隙が残存し、表面気泡や耐久性の低下を招く可能性がある。一方で、過度な締固めは材料分離を引き起こし、施工品質の低下につながる。そのため、締固めの適切な方法や評価手法を確立することが、施工品質の安定化および向上に不可欠である。

現在の施工現場では、締固めの終了判断は作業者の経験や感覚に依存しており、その結果、作業者ごとの技術差による品質のばらつきが発生する懸念がある。特に熟練技能者の高齢化や引退が進行する中締固め技術の継承が課題となっている。このような状況下で、締固め作業の客観的な判断手法を確立することは、施工品質の標準化に向けた重要な取り組みとなる。

本研究では、締固め経験が豊富な技能者を対象に、実験を通じて締固め作業の特徴や傾向を可視化する。具体的には、締固め時間や位置が施工品質に与える影響を分析するとともに、施工中に発生する音を解析し、音響データを用いた締固め度合いの評価手法

を検討する。また、締固め作業後の試験体に対して表層品質評価を行い、締固めプロセスと仕上がりとの相関性を明らかにすることで、より効果的な締固めプロセスを提案することを目指す。

2. コンクリート施工試験

2.1 コンクリート施工試験

コンクリート施工試験では、施工試験時の作業指示条件が異なる試験体を計 2 体作成した。以後、施工順に No.1, No.2 と表記する。試験体の概要を図-1 に示す。試験体の寸法は、幅 2500mm×奥行 600mm×高さ 1500mm である。なお、セメントは高炉セメントを使用し、試験体 No.1 のスランプ値は 8cm、試験体 No.2 のスランプ値は 15cm である。コンクリートの示方配合を表-1 及び表-2 に示す。

2.2 試験条件

被験者は、施工歴 10 年以上の熟練技能者 1 名で、この被験者が試験体 2 体の締固めを担当する。両方の試験体で、一般的なコンクリート打込みで行われる一次締固めと二次締固めの 2 回締固めを行った。また、締固め作業は、新潟県コンクリート品質確保ガイドライン（案）4.2.2 記載の施工状況把握チェックシート「締固め」の 6 項目¹⁾に基づいて締固めを行った。ただし、締固めの位置を事前に指定し、締

表-1 示方配合表（試験体 No.1）

試験体 No.	呼び強度 (N/mm ²)	組骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
							水 <i>W</i>	セメント <i>C</i>	細骨材① <i>S</i>	細骨材② <i>S</i>	粗骨材 <i>G</i>	混和剤 <i>A</i>
1	24	25	8	53.5	4.5 ±1.5	46.7	156	292 (高炉 B)	600	252	1001	2.92

表-2 示方配合表（試験体 No.2）

試験体 No.	呼び強度 (N/mm ²)	組骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
							水 <i>W</i>	セメント <i>C</i>	細骨材① <i>S</i>	細骨材② <i>S</i>	粗骨材 <i>G</i>	混和剤 <i>A</i>
2	24	25	15	53.5	4.5 ±1.5	48.2	170	318 (高炉 B)	600	252	940	3.18

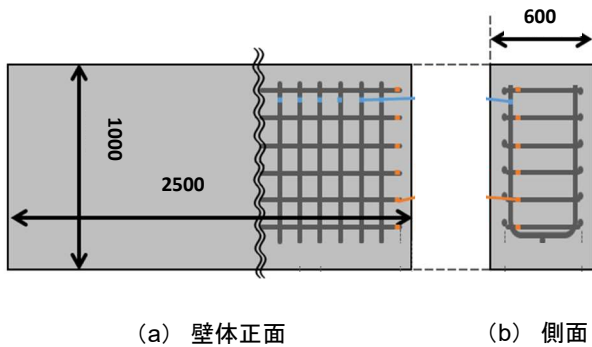


図-1 試験体の概要

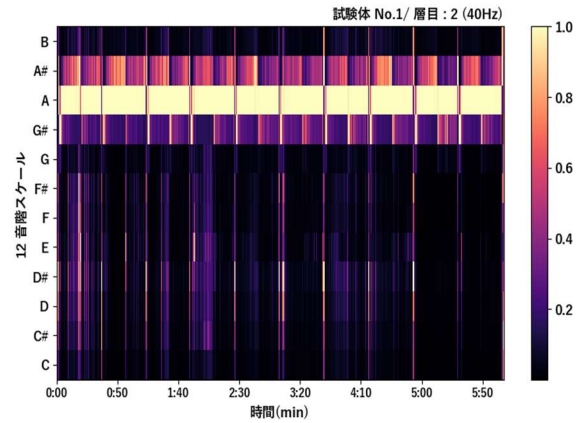


図-2 締固め時間の推定クロマグラム

固め時間は1体目の試験体では1回あたり15秒、2体目の試験体では10秒とした。この条件で、施工した試験体の表層品質評価を行い、ガイドラインで推奨する締固めの定量的目安を評価した。

3. 解析方法

被験者はウェアラブルカメラを付帯したヘルメットを装着し、締固め中の打込み面の様子はウェアラブルカメラで撮影した映像から取得した。振動機は、コンクリートへの挿入から引き抜きが完了するまで、動かないものとしたとき、打込み面における振動機の平面位置 (x, y) を締固め位置、その一連の動作を締固め回数1回、かかった時間を締固め時間と本研究本では定義する。ウェアラブルカメラの画像データからは締固め回数1回あたりの締固め位置を推定

した。また、ウェアラブルカメラの音声データからは締固め時間と締固め回数の推定を行った。

3.1 締固め時間の推定

Python の音響解析・信号処理ライブラリである Librosa を用いて、ウェアラブルカメラの音声データを基に図-2 に示すクロマグラムからバイブレータの挿入と引抜きのタイミングを求め、締固め時間の推定を行った。図-2 のカラーバーは音声のパワーを示しており、y 軸に示す12音階において、A (440 Hz) のパワーが1.0程度であるときの時間が締固め時間であることを示す。

3.2 締固め位置の推定

締固め位置の推定には、AR マーカー (ArUco)



図-3 締固め位置の推定の様子

を既知点として型枠上面の縁に 800 mm 間隔で敷設した。画像内において選択した振動機の位置から各既知点マーカーまでの平面変位 (X pix, Y pix) を算出し、マーカー間の画像内距離と実距離との比率をかけることで、型枠内部における振動機の平面位置座標 (X mm, Y mm) から締固め位置を計算した。締固め位置の推定の様子を図-3 に示す。

3.3 音響解析

Python とそのライブラリを利用し、締固めプロセス中に発生した音を解析する。この音から音の周波数と音の振幅という 2 つの必要な特徴を抽出し、それぞれを組み合わせることで、音の変化を示すグラフを作成する。このグラフは、締固めの終了タイミングを判断するために利用する。音の変化を示すグラフの例を図-4 に示す。

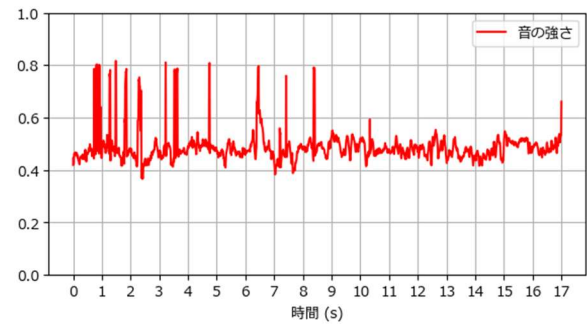
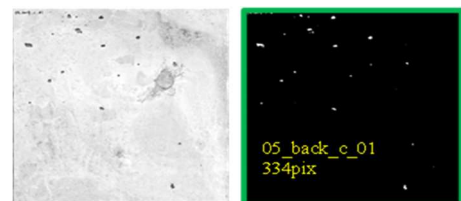


図-4 音響解析

表-2 目視評価結果

評価項目 / 試験体番号	No.1	No.2
(1) 沈みひび割れ	4.0	4.0
(2) 表面気泡	3.3	3.5
(3) 打重ね	4.0	4.0
(4) 型枠継ぎ目のノロ漏れ	3.6	3.7
(5) 砂すじ	3.3	3.6



(a) 検出前 (b) 検出結果

図-5 気泡検出の概要

評価を行った。表面気泡検出の様子を図-5 に示す。試験体周面に格子状の線を引くことで、横 500 mm、縦 500 mm の領域を形成する。その後、各領域に対して写真を撮影する。左右の側面については、横 600 mm、縦 500 mm の領域を形成した。OpenCV を用いて、画像の射影変換およびトリミングを行った後、二値化処理によって各領域における表面気泡の総表面積を求めた。なお、求めた気泡面積の単位は、ピクセル (pix) であり、射影変換後の気泡面積算出の処理にかける写真サイズは 500 pix×500 pix に統一した。色の閾値は HSV 系で決定した。ピーコン等の誤検出がある場合は結果から減算した。

4.3 表層透気係数評価

本試験では、スランプ値の異なる 2 種類の試験体を対象に表層透気試験を実施した。

4. 表層品質の評価方法

4.1 表層目視評価

細田らの提唱した目視評価法²⁾の 5 つの評価項目に基づき、沈みひび割れ、表面気泡、打ち重ね、ノロ漏れ、砂すじについて 0.5 点刻みに 4 点満点で点数を付け試験体全体の評価を行った。学生 1 名、教員 1 名、建設企業 2 社から 17 名の計 19 名で表層目視評価を行った。各試験体の施工条件の違いは明示せず、評価者の主観的な判断によって行った。19 名の評価結果の平均点を表-2 に示す。

4.2 表面気泡評価

製作された試験体について、画像処理を用いた領域ごとの定量的評価手法を考案し、表面気泡の面積

各試験体の表面に複数の測定位置を設定し、各位置の透気係数（kT 値）を測定し、スランプ値の違いによる透気性の変化を分析した。

4.4 コア試験

各試験体から試験体を貫通する 600 mm の長さのコアを 2 本採取し、これを 200 mm の長さで 3 本のコアに切断した。各コアを対象に密度および超音波伝播速度の測定を行い、コンクリート内部の密実性と締固めの影響を評価した。また、各試験体の密度及び超音波伝播速度のデータを比較し、透気試験の結果とも照合した。

229	153	195	457.5	289
80	167.5	280	96	281

(a) 正面

314.5	169	168.5	204.5	301
69.5	181	168	195.5	403

(b) 背面

図-6 表面気泡評価の結果（試験体 No.1）

149.5	163	19.5	193	179.5
38.5	175	264	81.5	136.5

(a) 正面

196	61	66	103	134.5
43	50	42	275	113

(b) 背面

図-7 表面気泡評価の結果（試験体 No.2）

5. 実験結果及び考察

5.1 表層品質評価の結果

5.1.1 表層目視評価について

19 名の表層目視評価の平均結果を表-2 に示す。

「(1) 沈みひび割れ」と「(3) 打重ね」の項目において、評価点数が全ての試験体で高い結果となった。また、試験体 No.2 は No.1 よりも評価が高いことが分かる。このことから、スランプが高いコンクリートは流動性が高いため、自然に締め固まりやすく、表面気泡や砂すじといった仕上がりの問題が改善されることがあると考えられる。

5.1.2 表面気泡評価について

各試験体における表面気泡評価の結果を図-6 及び図-7 に示す。なお、数値はその領域内における気泡の総和表面積を指す。色の濃い領域であるほど気泡密度が大きいことを示す。また、ここでの正面とは図-1 (a) に示す壁体正面において、被験者が締固め作業を行う際に使用する架台から遠い方の面を指す。また、背面は被験者から近い側の面を指し、左右両側面は、正面から見た時の左右の短手側の面を指す。

5.1.3 目視評価結果との照らし合わせ

試験体 No.2 は目視評価・表面気泡評価のいずれも No.1 の試験体よりも高い評価となった。前述した表層目視評価の結果と併せ、評価値の高い試験体は、コンクリートの流動性が良く、表面気泡などの仕上がりが良くなる傾向があると考えられる。

5.2 表層品質評価の結果

試験体 No.1 及び No.2 の表層透気試験の測定結果を、図-8 及び図-9 に示す。結果から、No.2 の透気係数は全体的に均一である一方、No.1 の値はばらつきが見られることがわかる。また、No.2 の透気係数は No.1 よりも相対的に高いことが確認された。目視評価結果と表面気泡評価の結果から表層部の出来栄は No.2 が良好であるが透気性では劣ることが示唆される。

5.3 コア試験評価の結果

コア試験の結果により、コア密度の平均値は、No.1 が 17.83 g/mm、No.2 が 17.48 g/mm であることが確認された。また、超音波伝搬速度の平均値は、No.1 が 4245.76 m/s、No.2 が 4231.98 m/s であり、

	0.0099	0.0532	0.0194	
	0.0076	0.0076	0.0023	

(a) 正面

	0.0630	0.0107	0.0076	
	0.0027	0.0183	0.0046	

(b) 背面

図-8 表層透気係数 kT 値($\times 10^{-6} \text{m}^2$) (試験体 No.1)

	0.0334	0.0668	0.0253	
	0.0228	0.0172	0.0152	

(a) 正面

	0.0152	0.0124	0.0266	
	0.0162	0.0142	0.0099	

(b) 背面

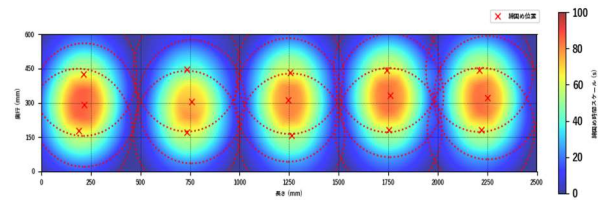
図-9 表層透気係数 kT 値($\times 10^{-6} \text{m}^2$) (試験体 No.2)

No.2 の値が No.1 よりも相対的に低いことが明らかになった。これらの結果から、両方の試験体はどちらも良好な品質を示しているものの、試験体 No.2 の方が試験体 No.1 よりもわずかに劣る品質であることが分かる。前述した表層透気試験の結果と併せ、その原因として試験体 No.1 では過度な締固めによる材料分離が疑われる。

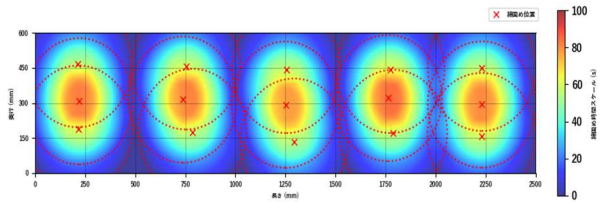
5.4 締固め作業の可視化

5.4.1 締固め位置と影響範囲

打込み面における締固め位置とその場所での作業時間による締固めの影響を示した様子を図-10 及び図-11 に示す。なお、バイブレータの影響範囲は、一次締固めでは直径 600 mm、二次締固めでは直径 450 mm とし、締固め位置からの影響が範囲内で均一に現れると定義した x 軸は正面から見たときの左端からの長さに、 y 軸は奥行きにそれぞれ対応する。図は、2 層分の打込み面を上から見た際の平面的な

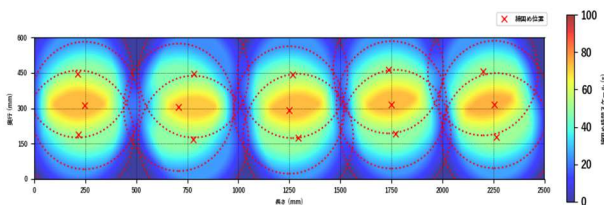


(a) 1 層目

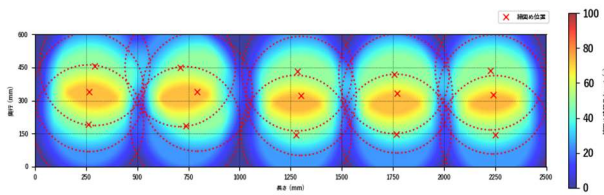


(b) 2 層目

図-10 締固めによる影響 (試験体 No.1)



(a) 1 層目



(b) 2 層目

図-11 締固めによる影響 (試験体 No.2)

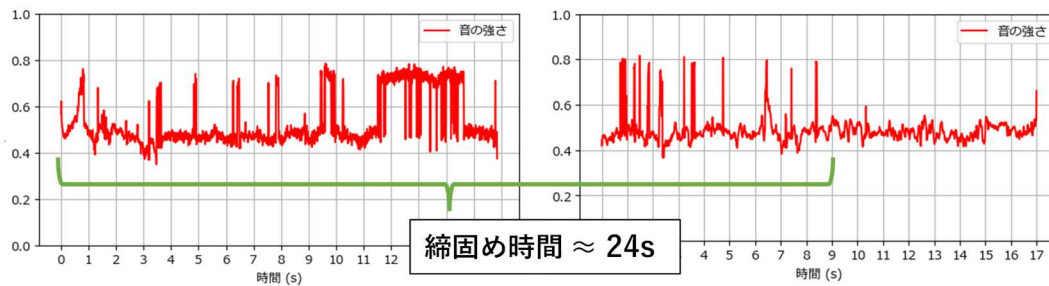
位置を示し、各領域で受ける締固め時間の総和をカラーマップで表現した。

5.4.1 音響解析の評価

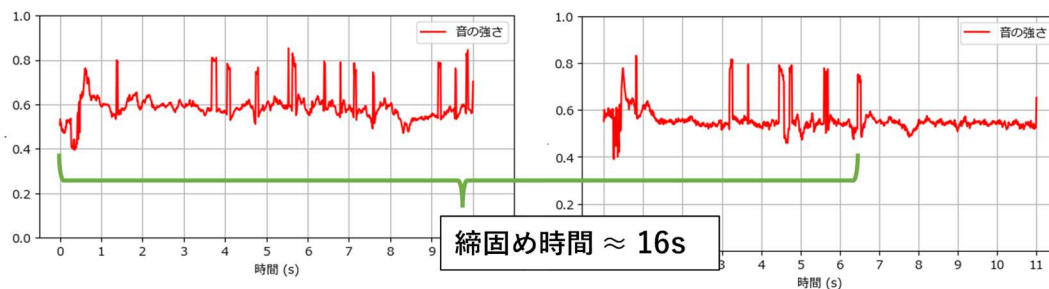
各試験体に対して一次締固めと二次締固めを実施し、その影響を分析した。音響解析の評価の結果を図-12 に示す。一次締固めでは締固めの安定化が確認されず、二次締固めを行うことでようやく安定化が確認された。この結果から、2 回の締固めを実施することが必要であることが分かった。試験結果として、1 体目の試験体では全体の締固め時間が約 24 秒、2 体目では約 16 秒であった。特に、2 体目の試験体では約 16 秒の時点で締固めの安定化が始まったことが確認されたが、実験では 20 秒まで作業を継続した。この追加の締固め作業により、過度な締固め

一次締固め

二次締固め



(a) 試験体 No.1 (スランプ 8cm)



(b) 試験体 No.2 (スランプ 15cm)

図-12 音響解析の評価

が行われた可能性が高く、前述し指摘した材料分離などの問題につながったと疑われる。

この結果から、適切な締固め時間の設定が施工品質に大きく影響を及ぼすことが示唆され、過度な締固めを防ぐための基準設定が重要であると考えられる。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) ガイドラインに従った締固め作業により、試験体の表層品質が全体的に良好であることが確認された。また、締固め時間の違いが施工結果に影響を与えることが明らかになった。
- (2) 音響解析による締固めプロセスにより、締固め終了タイミングを客観的に評価する手法を確立した。この手法は、技能者の経験に依存せず、締固め作業の品質向上に寄与するが期待される。今後、この手法を改良し、他の評価方法と組み合わせることで、締固め終了タイミングをより正確に判断し、コンクリート品質の向上に貢献する技術を開発する必要がある。
- (3) 表層目視評価および透気係数評価の結果、スランプ値が高いコンクリート No.2 は流動性が高

く、自然な締固めが進みやすい一方で、過振動の影響で内部の空隙率の増加や材料分離が生じる傾向が見られた。これにより、表層品質が良好であるが透気性が劣る結果が得られた。

参考文献

- 1) 新潟県, 新潟県コンクリート品質確保ガイドライン(案), <https://www.pref.niigata.lg.jp/>, (閲覧 2023-01-20)
- 2) 細田 暁 他, 目視評価法を活用したコンクリート構造物の品質確保の取組み, コンクリート工学, Vol.54, No.10, pp.1005-1014 (2016).