

一般財団法人新潟県建設技術センター

令和7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コンクリ
ート締固め作業標準化手法の開発

令和8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)

コンクリート構造物の耐久性向上に資するコンクリート締固め作業標準化手法の開発

本事業では、スランプと締固め時間の異なるコンクリートの試験体を用いた施工試験を行い、音響解析と加速度センサーによる解析から、適切なコンクリート締固め時間の目安を設定する手法の開発を目的とした。締固め中の音声を録画、録音し、音の rms エネルギーと振動数を抽出し、各要素のパラメータが時間経過とともに小さくなっているかを判定することで、締固め中のコンクリート内部の様子を可視化する。加えて、製作された試験体に対して品質評価試験を行い、締固め作業時に記録した音響解析の解析結果、加速度センサーの測定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終了判断の評価手法を検討した。

Keywords: Concrete Compaction, Surface Quality, Compaction Effectiveness, Compaction time, Rms energy, Frequency, Acceleration, Quality assessment

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、内部の空隙が減少し、流動性が増し、適切な振動エネルギーが与えられることで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。また、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、締固め時間の標準化を目標として、

音の安定期に着目し、音響解析から適切なコンクリート締固め時間の目安を設定する手法の検討を目的とする。具体的には、コンクリート締固め時の様子を録画、録音し、python ライブラリを用いて rms エネルギーと振動数を算出し、スランプや締固め時間が施工品質に与える影響を分析するとともに、加速度センサーによる計測によって、締固め度合いを評価する。また、締固め作業後の試験体に対して、品質評価試験を行い、締固めの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終了判断の評価手法を提案することを目指す。

2. コンクリート施工試験

(1) コンクリート施工試験

コンクリート施工試験では、試験時の締固め時間が異なる試験体をスランプごとに 4 体ずつ作成した。以後、スランプ 8cm のコンクリートを No1、スランプ 15cm のコンクリートを No2、スランプ 8cm のコンクリートを No3、スランプ 8cm のコンクリートを No4、スランプ 12cm のコンクリートを No5 と表記する。試験体の寸法は幅 500mm×奥行

表-1 試験体のスランプと締固め時間の関係

	スランプ(cm)	締固め時間(s)
No1	8	15・20・30・40
No2	15	5・10・15・20
No3	8	10・15・20・30
No4	8	10・15・20・30
No5	12	8・10・12・15



図-1 試験体製作状況

500mm×高さ 350mm である。

(2) 試験条件

No1, No2, No3, No4, No5 のスランプと締固め時間のパラメータを表-1 に示す。また、試験体製作状況を図-1 に示す。

3. 解析条件

(1) 音響解析

コンクリート締固め時の様子を録画、録音し、python とそのライブラリを利用し、締固め中に発生した音を解析する。その際、音響解析、信号処理ライブラリである Librosa を用いて、連続的に変動する一定時間の平均的なエネルギーを示す rms エネルギーと、空気中への音の伝達しやすさを評価する振動数を算出しグラフ化する。その後、各近似曲線を求め、近似曲線の傾きが締固め時間の何秒地点から時間経過とともに小さくなっているかを判定し、小さくなっていた場合、運動が減衰しているとし、コンクリート締固め中の音の rms エネルギー、振動数が安定期に入っていると判断する。

(2) 加速度センサーによる解析

加速度センサーをステレンス性の棒状の筒に挿入し、コンクリート型枠の側面に紙テープで固定する。その後、測定中の得られたデータから、締固め作業中の二乗和加速度平方根を求める。次に、下記の式(1)参考文献¹⁾によって求められる、不規則に変化する振動エネルギーの代表値から、締固め度 E_t を求めた。

$$E_t = \rho a^2 t / 4\pi^2 f \quad (1)$$

ここで、 E_t は締固め度、 ρ は単位容積質量、 a は二乗和加速度平方根、 t は締固め時間、 f は振動機の振動数を示す。本研究では、参考文献¹⁾にある、スランプごとに設定される締固め作業が 99.5%完了したと判定される指標である 99.5% E_t を基準として、締固めの度合いを評価した。

4. 品質評価試験

製作された試験体について、超音波伝搬速度試験、密度試験、表層透気試験、気泡間隔係数試験を行い、音響解析と加速度センサーによる解析の結果と照合し、rms エネルギーと振動数の減衰がコンクリート内部の構造にもたらす影響を評価した。

(1) 超音波伝搬速度試験

超音波伝搬速度試験では、製作した試験体の上部、中部、下部の超音波伝搬速度から、平均伝搬速度を算出し、上部と下部の超音波伝搬速度と比較することで、空隙の充填度を評価した。

(2) 密度試験

密度試験では、製作した供試体を、上部と下部に切断し、密度を比較することで、試験体の上部と下部における構成材料の偏りや、材料分離が起きているかを検討した。

(3) 表層透気試験

表層透気試験では、試験体の表面に測定位置を設定し、透気係数 (KT 値) を測定し、スランプや締固め時間の違いによる透気性の変化を分析した。

(4) 気泡間隔係数試験

気泡間隔係数試験では、加速度センサーによる解析から、 a を締固め中の最大加速度と定義して締固め度 E_t を算出した際に、最も E_t が規定値に近い値

となった No1 の締固め時間 20 秒のコンクリートと、規定値よりやや大きい値となった No2 の締固め時間 10 秒のコンクリートと、規定値より大幅に大きい値となった No2 の締固め時間 15 秒のコンクリートの気泡間隔係数を求め、材料分離が起きているかを判定した。

5. 実験結果及び考察

(1) 音響解析，加速度センサーの解析結果

No1 から No5 のコンクリートの音響解析と、加速度センサーによる計測から得られた Et の結果をまとめた表を表-1 から表-5 に示す。

(2) 音響解析による解析

rms エネルギーは、No1 の締固め時間 15 秒の試験体を除くすべての供試体で、グラフ化して近似曲線を引いた際に、締固め中のある地点から、時間経過とともに近似曲線の傾きが小さくなっていったため、減衰が確認された。振動数は、No2 の締固め時間 10 秒、15 秒、20 秒の試験体と No4 の 4 体の試験体でのみ、近似曲線の傾きがある地点を過ぎてから時間経過とともに小さくなっていく減衰が確認された。締固め初期は内部の空隙が多いが、振動機の振動をかけることで、内部の比較的大きな空気で形成される空隙が充填され、rms エネルギーが減衰していくと考えられる。また、rms エネルギーは外気温、空気量、スランプの異なる条件においても減衰したことから、コンクリートの打ち込み時の条件に関係なく減衰するといえる。軟らかいコンクリートは液体に近く、粘性による抵抗が硬いものに比べて小さいため、振動を吸収しやすく、振動数をグラフ化した際に近似曲線の傾きが時間経過とともに小さくなりやすく、減衰しやすい傾向にあると考える。下記の図-2 に rms エネルギーの減衰のグラフを、図-3 に振動数の減衰のグラフを示す。

(3) 加速度センサーによる解析

加速度センサーから得られた加速度から、加速度の二乗和平方根を算出し、締固め度 Et を求めた。その結果、締固め時間が長くなるにつれ Et は大きくなる傾向が見られた。しかし、丸屋らが示す¹⁾ スランプごとに設定された 99.5% の締固め度を判定する指

表-1 No1 のコンクリートの音響解析結果

締固め時間	rmsエネルギー(db)	振動数(hz)	Et
15秒	減衰なし	減衰なし	0.058<1.78
20秒	減衰あり14.14秒	減衰なし	0.40<1.78
30秒	減衰あり12.04秒	減衰なし	0.41<1.78
40秒	減衰あり22.12秒	減衰なし	0.20<1.78

表-2 No2 のコンクリートの音響解析結果

締固め時間	rmsエネルギー(db)	振動数(hz)	Et
5秒	減衰あり1.6秒	減衰なし	0.166<0.78
10秒	減衰あり2.01秒	減衰あり8.26秒	0.185<0.78
15秒	減衰あり2.92秒	減衰あり3.32秒	0.207<0.78
20秒	減衰あり0.49秒	減衰あり8.59秒	0.14<0.78

表-3 No3 のコンクリートの音響解析結果

締固め時間	rmsエネルギー(db)	振動数(hz)	Et
10秒	減衰あり4.07秒	減衰なし	0.071<1.78
15秒	減衰あり8.90秒	減衰なし	0.11<1.78
20秒	減衰あり6.87秒	減衰なし	0.24<1.78
30秒	減衰あり5.22秒	減衰なし	0.073<1.78

表-4 No4 のコンクリートの音響解析結果

締固め時間	rmsエネルギー(db)	振動数(hz)	Et
10秒	減衰あり1.24秒	減衰あり9.09秒	0.056<1.78
15秒	減衰あり1.87秒	減衰あり13.76秒	0.12<1.78
20秒	減衰あり2.19秒	減衰あり12.52秒	0.13<1.78
30秒	減衰あり1.75秒	減衰あり10.21秒	0.31<1.78

表-5 No5 のコンクリートの音響解析結果

締固め時間	rmsエネルギー(db)	振動数(hz)	Et
8秒	減衰あり1.98秒	減衰なし	0.13<1.03
10秒	減衰あり5.95秒	減衰なし	0.14<1.03
12秒	減衰あり3.11秒	減衰なし	0.24<1.03
15秒	減衰あり3.51秒	減衰なし	0.091<1.03

標からは離れた結果となってしまった。

原因としては、コンクリートの型枠への投入作業を統一しなかったことで、振動エネルギーの伝わり方にばらつきが生じてしまったことや、振動機の振動によって加速度センサーが浮き上がったことの影響で、正確な値が測定できなかったことがあげられる。

(4) 超音波伝搬速度試験結果

No1 から No5 の製作したコンクリートに行った超音波伝搬速度試験の、平均伝搬速度と、試験体の上部と下部における平均値との差をまとめた表を表-6 から表-10 に示す。

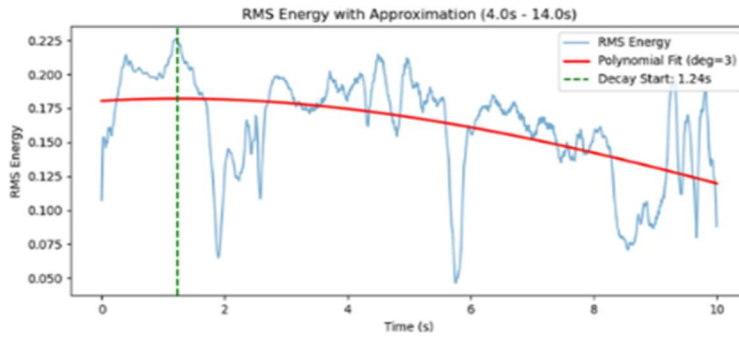


図-2 rms エネルギー減衰のグラフ

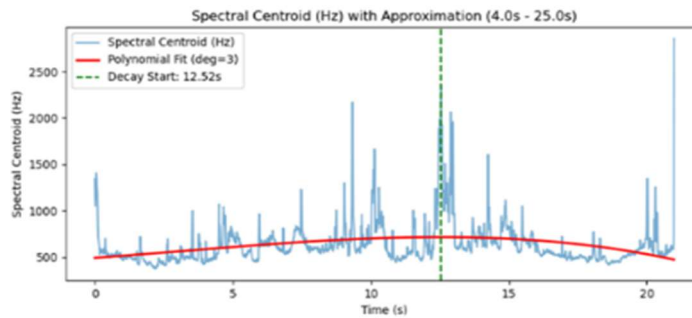


図-3 振動数減衰のグラフ

No2 の超音波伝搬速度試験の結果より、振動数の近似曲線の傾きが時間経過とともに小さくなっていき、減衰が確認された試験体では、試験体の上部と下部で超音波伝搬速度の差が大きく出ていることを確認できる。振動数の近似曲線の傾きが、時間経過とともに変化せず、減衰が確認されなかった締固め時間 5 秒の試験体は、超音波伝搬速度が、締固め時間 10 秒、15 秒、20 秒の 3 体の試験体と比較して最も速く、試験体自体の平均超音波伝搬速度と、上部と下部の超音波伝搬速度のばらつきも確認されなかった。このことから、振動数の近似曲線の傾きがある地点を超えてから時間経過とともに小さくなり、減衰が確認された地点以降で締固めを継続することで、水や微細な空気の上昇が引き起こされ、内部の材料分離や密実性低下を引き起こす可能性があると考えられる。No4 と No5 のコンクリートの超音波伝搬速度が No1, No2, No3 のコンクリートの超音波伝搬速度と比較して遅くなっている要因として、No4 と No5 のコンクリートは材料に高炉セメントを使っており、打設を外気温 2.9℃から 0.9℃の寒いなかで行ったため、水和反応が促進されなかった影響で、4 週間で強度が発現しなかったことが挙げられる。

表-6 No1 の超音波伝搬速度試験結果

締固め時間(秒)	15		20		30		40	
平均伝搬速度	4725.80		4724.00		4519.00		4545.00	
対象部	上部	下部	上部	下部	上部	下部	上部	下部
平均との差(%)	-0.42	-1.15	+2.34	-2.14	-1.08	+0.91	+0.91	-0.83

表-7 No2 の超音波伝搬速度試験結果

締固め時間(秒)	5		10		15		20	
平均伝搬速度	4405.00		4253.80		4392.00		4236.00	
対象部	上部	下部	上部	下部	上部	下部	上部	下部
平均との差(%)	-0.55	+0.15	-1.10	-1.34	-5.94	+6.02	-1.10	+2.31

表-8 No3 の超音波伝搬速度試験結果

締固め時間(秒)	10		15		20		30	
平均伝搬速度	4440.20		4480.00		4377.50		4340.40	
対象部	上部	下部	上部	下部	上部	下部	上部	下部
平均との差(%)	-0.64	+2.42	-2.75	+0.65	-2.60	+0.72	-2.15	+3.19

表-9 Np4 の超音波伝搬速度試験結果

締固め時間(秒)	10		15		20		30	
平均伝搬速度	4251.86		4189.45		4202.86		4101.82	
対象部	上部	下部	上部	下部	上部	下部	上部	下部
平均との差(%)	-2.63	+1.16	-3.81	+2.54	-3.57	+2.47	+0.16	-0.32

表-10 No5 の超音波伝搬速度試験結果

締固め時間(秒)	8		10		12		15	
平均伝搬速度	3921.66		3992.68		4013.33		4052.68	
対象部	上部	下部	上部	下部	上部	下部	上部	下部
平均との差(%)	-1.92	-0.01	+0.77	+0.77	-5.01	+4.86	+2.45	+1.54

(5) 密度試験

No1 から No5 の製作したコンクリートに行った密度試験の、上部と下部の密度をまとめた表を表-11 から表-15 に示す。緑で塗られている箇所は、試験体の上部の密度が、下部の密度に比べて 5%以上高い試験体を示しており、構成材料の不均一化が起きていると考えられる。黄色で塗られている箇所は、試験体の下部の密度が上部の密度に比べて 5%以上高い試験体を示しており、材料分離の疑いが示唆される。表-12 の No2 の密度試験の結果より、締固め中に発生した音の振動数をグラフ化し、近似曲線を引いた際に、時間経過とともに近似曲線の傾きが小さくなり、減衰が確認された締固め時間 10 秒、15 秒、20 秒のコンクリートは、上部と下部での密度差が確認される一方で、時間経過とともに近似曲線の傾きが変化せず、減衰が確認されなかった締固め時間 5 秒の試験体は、コンクリートの上部と下部での密度差が見られなかった。また、時間経過とともに振動数の近似曲線の傾きが小さくなり、減衰が確認された No4 のコンクリートも、試験体の上部と下部で密度差がある傾向があることが確認できる。このことから、密度試験の結果においても、音の振動数の近似曲線の傾きが、ある地点を超えてから時間経過とともに小さくなり、減衰が確認された地点以降で締固めを継続することで、内部の構成材料の不均一化や、材料分離を引き起こす可能性があると考えられる。

(6) 表層透気試験

No1 から No5 の製作したコンクリートについて表層透気試験を行い、KT 値を算出した。No1 から No3 の KT 値をまとめた表を表-16 に、No4 と No5 の KT 値をまとめた表を表-17 に示す。すべてのスランブのコンクリートについて、締固め時間を最長にして打ち込みを行った試験体については、KT 値が 0.1 以下となり、表層部の緻密性が向上していることから、長時間の締固めを行うことによって、表層部の構造が緻密になることが確認された。締固め中に発生した音の rms エネルギーと振動数について、時間経過とともに近似曲線の傾きが小さくなっていき、減衰が確認された試験体と、時間経過とともに近似曲線の傾きが変化せず、減衰が確認されなかった試験体

表-11 No1 の密度試験結果

締固め時間(秒)	15		20		30		40	
対象部	上部	下部	上部	下部	上部	下部	上部	下部
密度(g/cm ³)	2.361	2.172	2.159	2.302	2.517	2.336	2.513	2.343

表-12 No2 の密度試験結果

締固め時間(秒)	5		10		15		20	
対象部	上部	下部	上部	下部	上部	下部	上部	下部
密度(g/cm ³)	2.509	2.394	2.383	2.238	2.396	2.231	2.348	2.520

表-13 No3 の密度試験結果

締固め時間(秒)	10		15		20		30	
対象部	上部	下部	上部	下部	上部	下部	上部	下部
密度(g/cm ³)	2.523	2.313	2.414	2.202	2.372	2.415	2.309	2.231

表-14 No4 の密度試験結果

締固め時間(秒)	10		15		20		30	
対象部	上部	下部	上部	下部	上部	下部	上部	下部
密度(g/cm ³)	2.250	2.267	2.196	2.262	2.179	2.171	2.201	2.246

表-15 No5 の密度試験結果

締固め時間(秒)	8		10		12		15	
対象部	上部	下部	上部	下部	上部	下部	上部	下部
密度(g/cm ³)	2.333	2.317	2.217	2.195	2.375	2.330	2.221	2.277

で、KT 値に大きな差が見られなかったことから、締固め中に発生する音の rms エネルギー、振動数と、製作したコンクリートの表層部の緻密さに相関性は見られないと考える。

(7) 気泡間隔係数試験

No1 の締固め時間 20 秒の試験体、No2 の締固め時間 10 秒、15 秒の試験体を対象として行った気泡間隔係数試験の結果を下記の表-18 に示す。今回試験を行った 3 体の試験体はすべて、コンクリートの耐久性を担保するために必要な気泡間隔係数の 200um 参考文献²を上回る結果となった。No1 の締固め時間 20 秒の試験体で気泡間隔係数が大きくなった要因として、No1 の締固め時間 20 秒の試験体は 3 体の中で最も空気量が 2.3%と大きかったが、コンクリートの粘性が高く、振動が伝わりにくい条件下で、締固めが不足している状態で締固めを終了したため、エントラップドエアが抜けきらず、気泡間隔係数が大きくなったと考えられる。気泡の平均波長が 0.234mm と比較的大きいことから、エントラップドエアが存在していることを確認できる。No2 の締固め時間 10 秒と 15 秒の試験体で気泡間隔係が大きい

表-16 No1, No2, No3 の表層透気試験結果

試験体名	No1				No2				No3			
締固め時間(秒)	15	20	30	40	5	10	15	20	10	15	20	30
KT値	0.114	0.449	0.053	0.011	0.148	0.167	0.098	0.073	0.164	0.288	0.039	0.077

表-17 No4, No5 の表層透気試験結果

試験体名	No4				No5			
締固め時間	10	15	20	30	8	10	12	15
KT値	0.2	0.091	0.042	0.062	0.127	0.381	0.086	0.064

表-18 気泡間隔係数試験結果

試料名		No.1	No.2	No.3
全トラバース距離(mm)	T	2603.8	2603.8	2603.8
気泡の数(個)	N	261	349	292
気泡弦長の総和(mm)	Y	61.0	55.4	48.5
気泡の平均弦長(mm)	λ	0.234	0.159	0.166
気泡の比表面積 (mm^2/mm^3)	α	17.1	25.2	24.1
単位長さあたりの気泡個数(個/mm)	n	0.100	0.134	0.166
空気量(%)	A	2.3	2.1	1.9
セメントペースト体積百分率(%)	P	22.9	25.0	25.0
P/A	-	9.96	11.9	13.2
気泡間隔係数(um)	L	370	272	298

かった要因としては、振動数が減衰し、過度な流動化による構成材料の不均一化、微細空気の上昇が起こる過程で、微細空気の衝突や偏在が生じてしまったことで、微細空気であるエントレインドエアの構造が崩れ、気泡間隔係数が大きく出たと考える。これらの試験結果から、コンクリート締固め中の音の振動数が減衰することで、コンクリート表層部の気泡構造が崩れる可能性があることが示唆される。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1)コンクリート締固め中の音を録音し、締固め中に発生する音の rms エネルギーと音の振動数を抽出することで、内部の大きな空気の充填される様子や、水や微細な空気が上昇する様子を可視化することができる。
- (2)コンクリート締固め中に発生する音の rms エネルギーの減衰によって、内部の大きな空隙が充填され、締固め初期段階の内部構造の形成を確認で

きる。コンクリート締固め中に発生する音の振動数の減衰によって、水や微細な空気が上昇し、コンクリート内部の構成材料が不均一になることで、材料分離や密実性の低下を引き起こす可能性があると考えられる。今後、加速度センサーの設置方法や試験中の固定方法を見直し、配合やスランプの異なるコンクリートの締固めについて、この評価手法を検討し、サンプル数を増やすことで、締固め終了タイミングをより正確に判断できる評価手法を確立し、コンクリートの表層品質の向上に貢献する技術を開発する必要がある。

参考文献

- 1) 丸屋剛 他, 大成建設技術センター報第 44 号(2011)締固め完了エネルギーによるコンクリートの締固め性の評価手法
- 2) 阿波稔 他, 土木学会東北支部技術研究発表会(平成 19 年度)コンクリートの凍結融解抵抗性データベースによる材料要因の評価