

# ダムコンクリートの締固め完了範囲の推定 と締固め品質管理の可視化

梁 俊\*<sup>1</sup>・張 文博\*<sup>1</sup>・新井 博之\*<sup>2</sup>・太田 兵庫\*<sup>3</sup>

Keywords : dam concrete, compaction completion energy, cumulative energy, Completion range of compaction, surface air permeability

ダムコンクリート, 締固め完了エネルギー, 累積エネルギー, 締固め完了範囲, 表層透気性

## 1. はじめに

ダムコンクリートにおける有スランプコンクリートの締固め作業は、要求される品質を確保するために不可欠であり、充填不足や材料分離を引き起こさないように適切な締固めを行うことが重要である<sup>1) 2)</sup>。しかしながら、土木学会コンクリート標準示方書(ダムコンクリート編)<sup>3)</sup>では、締固め後のコンクリートの表面状態を目視で観察し、粗骨材が表面に露出せず、上面にモルタルがあり、さらに上面に人が載れるという状態を締固め終了の目安とすることに留まっている。

ダムコンクリートの締固めは直径 150 mm に及ぶ大型内部振動機を使用することが普通である。内部振動機でコンクリートを締め固める場合、使用材料および配合、締固め方法および型枠設置状況などが振動の伝達や減衰へ及ぼす影響について従来から重点的に検討され、これまでに多くの研究成果が報告されている<sup>2-6)</sup>。しかしながら、粗骨材の最大寸法、コンシステンシーなどが締固め効果に与える影響に関する知見があるものの、普通コンクリートを対象とした研究結果がほとんどであり、ダムコンクリートの特徴を踏まえた検討は少ない<sup>2) 5)</sup>。

著者らは、粗骨材最大寸法が 20 mm、スランプが 5 cm から 15 cm までの普通コンクリートを対象として、コンクリートが締固めにより示方配合上の理論密度まで充填させるのに必要なエネルギー、いわゆる締固め完了エネルギーを定量的に評価する室内試験方法<sup>7)</sup>および締固め完了範囲の推定方法を提案していた。本研究では、その試験方法を粗骨材最大寸法が 80 mm (以

下、Gmax80)の有スランプコンクリート配合まで展開し、検討を行った。

さらに、上記締固め完了範囲の推定手法を用い、内部振動機からの距離に応じた累積エネルギーの演算処理により、締固め完了エネルギーに対する累積エネルギーの割合によってコンクリート内部の締固め状態を定量的に可視化するシステムを構築し、実施工に適用することで推定手法の妥当性について検討した。

## 2. 締固め完了範囲の推定方法

### 2.1 締固め完了エネルギーの測定

本研究では、Gmax80の有スランプコンクリートを測定対象としたため、従来の推定方法<sup>7)</sup>を参考に試験装置を試作した。その試験装置は、図-1に示すように、加振部、スランプコーン、試料容器および計測部から構成されている。加振部は、単軸垂下式の加振モータを有し、振動テーブルに鉛直方向の縦振動のみを与えるようになっている。また、振動テーブルの振動数に

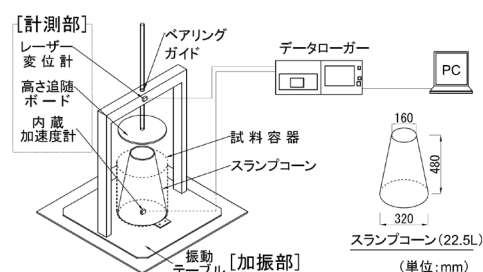


図-1 ダムコンクリート締固め完了エネルギー測定装置  
Fig.1 Measuring device for compaction completion energy of dam concrete

\* 1 技術センター 社会基盤技術研究部 先端基盤研究室

\* 2 土木本部 土木技術部 ダム技術室

\* 3 技術センター 生産技術開発部 スマート技術開発室

については、装置の共振を避けるため予備試験を実施し、30 Hz に設定して試験を行った。スランブコーンは試料充填用であり、試験時の作業性を考慮し、容積を JIS 標準スランブコーンの約 4 倍とした。また、その上径、下径、および高さの比が 1 : 2 : 3 になるように、それぞれの寸法を 160 mm, 320 mm, 480 mm とした。試料容器は同図に示すような直径 330 mm, 高さ 400 mm の円筒状であり、試験開始から締固めが終了するまで治具により振動テーブルの上に固定される。計測部は試験中における試料の高さと加速度を計測する二つの部分から構成される。締固めによる試料高さの変化を連続的に計測するため、試料の頂部に軽量プラスチックで製作した高さ追従ボードを当てて、試料の沈下を追従できるようにし、その高さ変化をレーザー変位計で計測した。また、加速度は振動テーブルの下部中央に内蔵されている加速度計によって計測した。

試験方法を以下に示す。

- 1) まず、振動テーブルの中心に固定している試料容器の中に上述したスランブコーンをセットする。その中にコンクリート試料をほぼ等しい 5 層に分けて充填し、各層試料は、突き棒でならして 50 回突く。最後に試料の上面をスランブコーンの上端に合わせてならす。
  - 2) 次に、スランブコーンを鉛直に引上げ、高さ追従ボードを試料頂部まで軽く降下させ、振動開始前の初期高さを記録する。
  - 3) その後、120 秒間締固めを行い、締固め中における試料高さと加速度の変化を計測する。締固め完了した後に試料の質量を測定する。ここで、120 秒間締固めしたのは、その時間内でコンクリート試料に与えられるエネルギーが締固め完了エネルギーより大きいことを保証するためである。
- 締固めエネルギーは、式(1)<sup>8)</sup>により求められる。

$$E_t = \frac{\rho_0 \alpha_{\max}^2}{4\pi^2 f} t \quad (1)$$

ここに、 $E_t$  :  $t$  秒間にコンクリートが受ける締固めエネルギー ( $J$ )、 $t$  : 振動時間 (s)、 $\rho_0$  : 配合から算出される試料の単位容積質量 ( $kg/l$ )、 $\alpha_{\max}$  : 最大加速度 (正弦曲線の平均振幅) ( $m/s^2$ )、 $f$  : 振動数 ( $s^{-1}$ )

以上のような試験過程において、試料容器中の試料の最も高い部分を高さとする円筒体積に対するコンクリート試料の真の体積の比として捉え、締固め度<sup>5)</sup>と定義する。締固め度は式(2)により表すことができる。

$$\gamma = \frac{H_0}{h} \times 100 = \frac{m/\rho_0}{Ah} \times 100 \quad (2)$$

ここに、 $\gamma$  : 締固め度(%),  $H_0$  : 配合に基づく理論上の単位容積質量まで締め固められた時の試料の高さ (mm)、 $h$  : 任意の締固め時間における試料の高さ (mm)、 $m$  : 試料の質量 (kg)、 $A$  : 試料容器の底面積 ( $mm^2$ )

本研究では、著者らの既往の検討結果<sup>7)</sup>に基づいて、締固め度が 99.5% の場合に対応するエネルギーを締固め完了エネルギーとした。

## 2.2 累積エネルギーの測定

累積エネルギーの計測状況を写真-1 に示す。振動の伝達に及ぼす型枠の影響をできる限り低減するため、試験体の平面寸法を W3000 mm×D3000 mm とし、試験体の高さについては、実施工の締固め作業を参考に 750 mm とした。

図-2 に内部振動機の振動位置および加速度計の平面位置を示す。4本の内部振動機の中心を繋ぐ中心線(以下、振動中心線と記す)が試験体の平面中心と一致するようにした。加速度計は、内部振動機の表面位置を含めて振動中心線と垂直となるように計 4 列を配置した。また、コンクリートの充填に不均一が発生した場合、測定結果に影響する恐れがあるため、加速度計は振動中心線の両側に設置し、振動の伝達をそれぞれに計測できるようにした。同図に示すように、内部振動機の表面に固着した加速度計以外に、1列目と2列目の加速度計は、振動中心線から 1200 mm の範囲内の加速度を 200 mm ごとに計測するように配置した。また、縦中心付近の列と両端部の列において振動伝播の差異の有無を検証するため、1列目と3列目、または2列目と4列目の加速度計は振動中心線と同じ距離で設置した。加速度計は、試験体の底面より 250 mm 離れた位置の鉛



写真-1 累積エネルギーの計測状況  
Photo.1 Accumulated energy measurement status

直方向に設置した。内部振動機表面の加速度計については、締固め中に内部振動機先端を試験体底面より 50 mm 離れた箇所に設定したため、写真-1 に示すように各内部振動機先端から 200 mm の表面に固着した。なお、コンクリートの打込みや締固め作業中において型枠が変形を避けるため、図-2 に示すように 800 mm 間隔でセパレーター（青線で示す）を設けた。

試験には、直径 150 mm×長さ が 850 mm、遠心力 13.6 ~17.8 kN、隣接する内部振動機の中心間隔 600 mm、振動数 130 Hz（実測値は）の内部振動機を用いた。

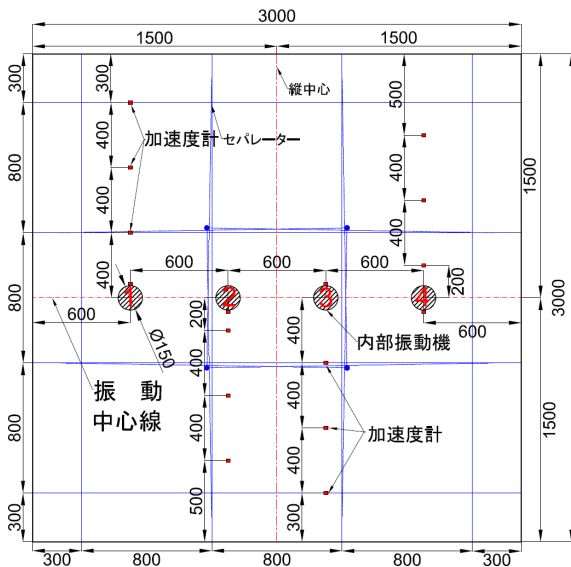


図-2 累積エネルギー測定概要および加速度計の位置  
Fig.2 Cumulative energy measurement summary and accelerometer location

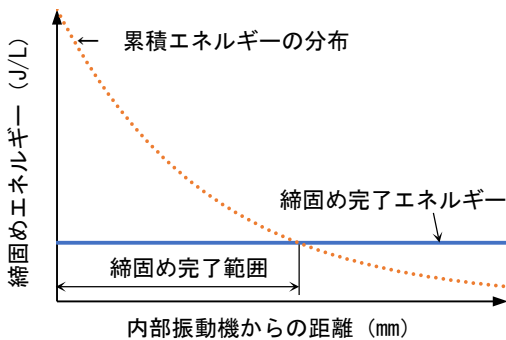


図-3 締固め完了範囲の推定方法  
Fig.3 Estimation method of compaction completion range

コンクリート試料をほぼ平らになるように打ち込んだ後、所定の位置に内部振動機を挿入して締固めを行った。また、上記締固め完了エネルギーと同様な理由で、締固め時間を 180 秒に設定した。

既往の研究<sup>5)</sup>と同様に各加速度計の最大加速度は、その波形曲線における周期ごとの最大変位量と最小変位量の絶対値を平均した値（平均振幅）とした。振動中心線から各箇所の最大加速度値を求め、当該箇所における任意時間での累積エネルギーを式（1）により算出すると、内部振動機からの距離による累積エネルギーの分布を図-3 の破線のように指数関数で表すことができる<sup>3)</sup>。適用したコンクリートの特性値である締固め完了エネルギーを直線で表すと累積エネルギーが締固め完了エネルギー以上となる範囲を締固め完了範囲として求めることができる。

2.3 配合および使用材料

本研究の各試験に用いたコンクリートの示方配合を表-1 に示す。結合材には密度 2.88 g/cm<sup>3</sup>、比表面積 3,400 cm<sup>2</sup>/g の中庸熟フライアッシュセメントを使用した。細骨材は、密度 2.66 g/cm<sup>3</sup>、吸水率 1.75%、最大粒径 5 mm、粗粒率 2.62 の混合砂を使用した。粗骨材は、最大寸法 80 mm、密度 2.76 g/cm<sup>3</sup> の砕石を用いた。減水剤は、リグニンスルホン酸塩とオキシカルボン酸塩を主成分とした AE 減水剤、AE 剤は樹脂酸系界面活性剤を使用した。

各試験におけるコンクリートのフレッシュ性状を確認するため、ウェットスクリーニングによって 40 mm を超えた骨材を除去し、JIS A1101:2020 および JIS A 1128:2019 に準拠してそれぞれスランプ試験と空気量試験を実施した。その結果、練混ぜ直後のスランプ値が 3.5~3.7 cm、空気量が 3.6~4.2%の範囲であり、いずれも目標値範囲に入っていたことを確認している。

3. 締固め完了範囲の計測結果

3.1 締固め完了エネルギーの計測結果

前述した通り、締固め完了エネルギーは、締固め度が 99.5%の場合に対応するエネルギーである。そこで、

表-1 試験に用いたコンクリートの示方配合

Table 1 Indicated mix of concrete used in the test

粗骨材 最大寸法 (mm)	目標 スランプ (mm)	目標 空気量 (%)	水結合 材比 (%)	細骨材 率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						AE 減水剤 (C×%)	AE 剤 (C×%)
					水 W	中庸熟フライ アッシュセメント MF	細骨材 S	粗骨材				
								8040 G1	4020 G2	2005 G3		
80	3±1	3.5±1	47.6	29.0	100	210	612	522	506	506	1.00	0.034

締固め完了エネルギー試験で得られた最大加速度および試料高さの変化値をそれぞれに式(1)と式(2)に代入し、締固めエネルギーと締固め度の経時変化を求めた。得られた締固め度の变形進行曲線を図-4 に、相関関係の回帰式を式(3)に示す。

$$\gamma = 100 - 47.9 \exp(-0.0156 E_t^{1.15}) \quad (3)$$

図-4 より、式(3)の回帰曲線は、実験値とほぼ一致していることが窺える。したがって、締固め度が 99.5% の時に対応した締固めエネルギーを式(3)によって計算して締固め完了エネルギーとし、その値は 139.5 J/L であった。

### 3.2 累積エネルギーの計測結果

コンクリート中の最大加速度の計測結果を図-5 に示す。振動中心線から同じ距離の 2 箇所で測定した値はほとんど変わらないことが見られるので、コンクリートの充填作業や材料の不均一などによる影響は小さいことがわかった。

内部振動機表面の最大加速度を除いた他の応答加速度は振動中心線からの距離の増加とともに緩やかに低減していることがみられるので、両者の関係について回帰分析を行い、図-5 に示す回帰曲線が得られた。この回帰曲線は、指数分布に従うことを示しており、式(4)により表すことができる。

$$\alpha_{\max} = 237.88 \exp(-0.003L), \quad R^2 = 0.924 \quad (4)$$

ここに、 $\alpha_{\max}$  : 最大加速度 (m/s<sup>2</sup>)、 $L$  : 振動中心線からの水平距離 (mm)

式(4)より、内部振動機の締固め有効半径内における任意位置の最大加速度を計算することは可能である。そこで、式(4)より 100 mm ごとの加速度を計算し、式(1)に代入することで、振動時間を 30 秒ずつ増加したときの累積エネルギーを求めた。その結果を図-6 に示す。締固めエネルギーは振動中心線からの距離に応じて次第に減少し、振動時間の増加とともに大きくなっていることがみられる。また、3.1 節で求めた締固め完了エネルギーの結果も同図に示しており、その直線と各累積エネルギー曲線の交点は異なる振動時間における締固め完了範囲を示すことになる。締固め完了範囲は、振動時間の増加とともに大きくなっているが、時間が長くなるにつれてその増加量が減少していることを説明している。

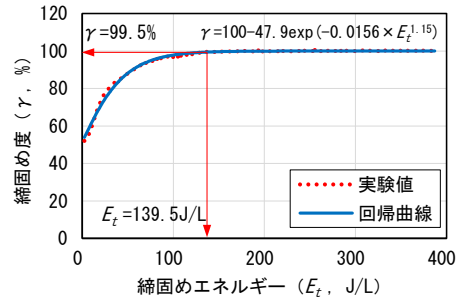


図-4 締固め度の变形進行曲線  
Fig.4 Compaction progress curve

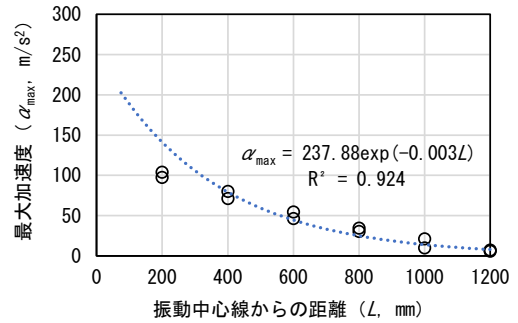


図-5 異なる位置の最大加速度  
Fig.5 Maximum acceleration for different positions

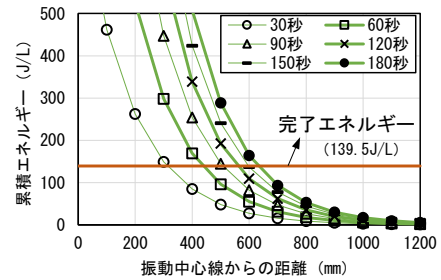


図-6 締固め時間が異なる場合の累積エネルギー分布  
Fig.6 Cumulative energy distribution for different compaction times

## 4. 締固め完了範囲の検証

### 4.1 検証試験の概要

図-7 は締固め完了範囲の検証試験におけるコア採取と試験体切断の概略を示すものである。コンクリートの製造、運搬および打込みは前述した累積エネルギー評価試験と同様な方法で行った。試験体の寸法は W3000 mm×D3000 mm×H750 mm、使用した試料の容積は 6.75m<sup>3</sup> であった。締固め完了範囲の検証を目的としたので、締固め時間を 60 秒にした。締固め後のコンクリート試験体は、養生シートで覆って養生を行った。材齢 63 日に脱型してコアの採取および切断作業を実施し、材齢 91 日で確認試験を行った。

コアの採取は、JIS A1107 : 2012 (コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法) を参考とし、

コアドリルによって湿式法で行った。JIS では、コンクリート構造物の圧縮強度を推定するために、採取されるコアの径は粗骨材最大寸法の 3 倍以上が推奨されている。本研究では、主にコアの圧縮強度や単位容積質量の相対比較によってコンクリートの品質が保証できる範囲を判断することを目的としたため、採取したコアの直径を 200 mm とした。試験体を貫通して採取したためコアの長さは 750 mm であった。採取箇所は図-7 に示す通り 3 列×7 箇所とした。コアの採取平面位置について、同図に示す推定した締固め完了範囲 (435 mm) の内部において 1 番と 2 番コアを採取し、その範囲外の至近箇所に 3 番コアを採取した。また、4 番～7 番のコアは、振動中心線の両側における締固めエネルギーの分布が同様であることを考慮し、振動中心線からの距離が 200 mm ずつ順に離れていくように採取した。

コンクリート試験体は、図-7 に示す端部から 1200 mm 離れた箇所ワイヤソーを用いて切断し、得られた W3000 mm×H750 mm の切断面を対象に表層透気試験を行った。その計測位置は図-8 に示す。横方向の計測位置について、振動中心線的位置を含め、その両側に振り分けて 220 mm ずつ離れる箇所とした。振動中心線の両側の計測位置は、180°回転して一致するように配置した。縦方向の計測について、切断面の上縁と下縁に近い場所で実施した。図示上段の計測位置は、試験後に試料表面を仕上げしなかったため不陸が認められた (後述写真-2 参照) ので、それを避けるため上縁から 200 mm 離れた箇所計測を行った。下段の計測位置は、内部振動機が試料底部から離れて振動したこと、および計測器の取り付けに必要な空間を考慮したうえで下縁から高さ 200 mm の箇所で実施した。一方で、試験結果の精度を向上させるため、図-8 において破線で示す箇所を含め、推定した締固め完了範囲の近傍を中心に計測回数を増やした。ここで、同じ箇所でも複数回の計測をするので、コンクリート内の圧力が通常状態まで回復するのに時間が必要と考えられるので、計測間隔を 30 分以上とした。なお、計測結果はコンクリートの表層含水率に影響されること<sup>10)</sup>が知られているので、試験する直前に計測箇所の表層含水率を計測した。

#### 4.2 検証試験の結果

##### (1) 圧縮強度と単位容積質量

試験体の打込み面に直交する方向に採取した  $\phi 200 \text{ mm} \times h 750 \text{ mm}$  のコアの一例を写真-2 に示す。全体的にみると、A3 コアまでその側面に大きな空隙がなく十分に締め固められたように見えるが、A4 コアからは充填不十分な部分が目立つようになっている。これは、

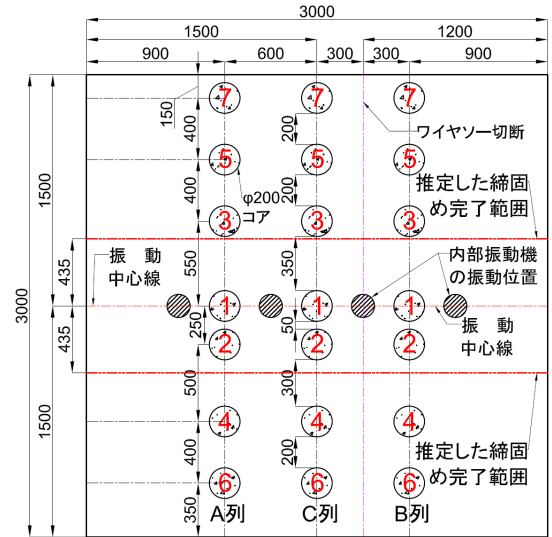


図-7 締固め完了範囲の検証試験概略  
Fig.7 Outline of verification test of compaction completion range

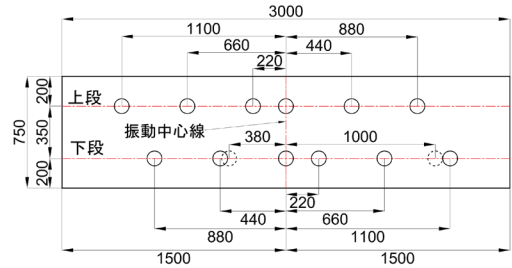


図-8 表層透気試験と表面吸水試験の位置 (切断面)  
Fig.8 Position of surface air permeability test and surface water absorption test (cut surface)

内部振動機からの距離が大きくなるほど締固め状況が悪くなっていることを示している。また、締固め不足はコンクリート試料の底部から発生していることが見られる。これは液状化による量が限られたペーストの流れが下部より上部のほうが早いことを示している。コンクリートの品質が保証できる締固め完了範囲を検証することを念頭において、コアの下部を評価対象とした。

高さとの比が 2.00 になるように、コアの下端から長さ 400 mm の円柱体を切出して圧縮強度試験と単位容積質量試験に用いた。圧縮強度と単位容積質量の結果をそれぞれに図-9 と図-10 に示す。圧縮強度試験は、供試体の両端面をキャッピングしてから行った。また、単位容積質量は、計測した供試体の質量を、測定した直径と高さの平均値から算出した容積で除した値としたため、空隙も含めた単位容積での質量であった。図-9 に示すように、振動中心線から 550 mm 以内にあるコアの圧縮強度には大差なく、ウェットスクリーニング

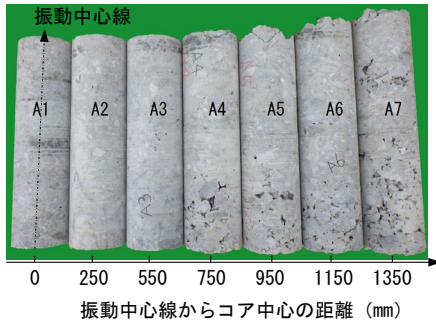


写真-2 採取した A 列のコア  
Photo.2 Collected cores in row A

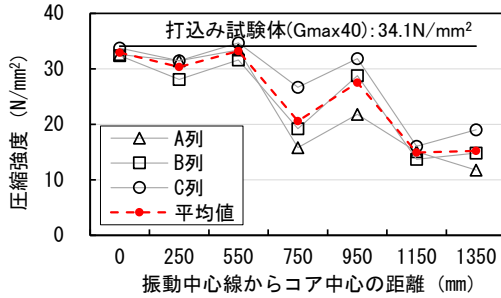


図-9 コアの圧縮強度分布  
Fig.9 Core compressive strength distribution

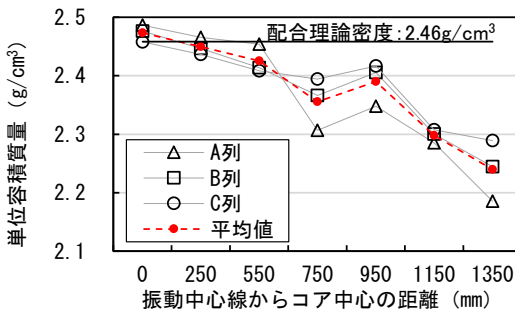


図-10 コアの単位容積質量分布  
Fig.10 Unit volume mass distribution of the core

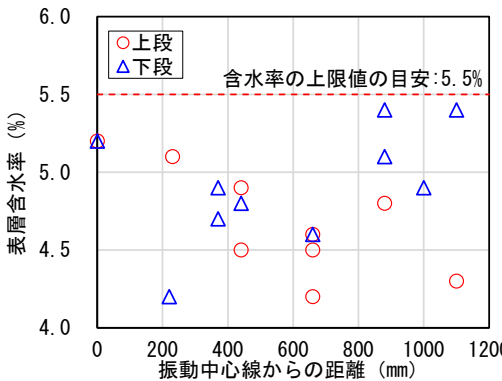


図-11 計測箇所における表層含水率の計測結果  
Fig.11 Measurement result of surface water content at the measurement point

した  $\phi 150 \times h 300$  mm の打込み試験体の材齢 91 日の圧縮強度  $34.1 \text{ N/mm}^2$  とほぼ同程度であった。550 mm 以上のコアの圧縮強度は明らかに低下し、バラツキも大きくなった。図-10 に示す見かけの単位容積質量も圧縮強度

と同様な傾向であった。振動中心線からの距離が 550 mm 以内のコアの単位容積質量は配合に基づいて計算した理論密度の  $2.46 \text{ g/cm}^3$  とほぼ同じであるが、550 mm を超えると徐々に小さくなっていく傾向が見られる。これは、振動中心線から 550 mm 範囲内の圧縮強度と単位容積質量は確保されたことを示唆する。

(2) 表層透気試験

各試験箇所計測した表層含水率の結果を図-11 に示す。いずれも東北地整の品質確保の手引き<sup>9)</sup>に規定されているコンクリート含水率の上限値の目安である 5.5% 以下になったことが示している。

切断面計測した表層透気係数 (Torrent 法) の試験結果を図-12 に示す。全体的に見ると、推定した締固め完了範囲 435 mm 以内であれば、透気係数が「優」か「良」の範囲に収められているが、600 mm を超えると、透気係数がばらついて品質が不安定になっていることが示唆される。ここで、写真-2 に示すコア下部で未充填部が確認されて品質の低下につながると判断したが、透気係数では下段の品質が逆に良いとの結果になった。この結果は、ペーストが十分充填された箇所試験したことで、上段より下段の方がペーストの緻密さが高いことを示したものと考えられ、締固めによって追い出された空気が下段から上段に上昇し、上段ペーストの透気性が高くなったことに起因していると推測される。

以上のコアおよび切断面の表層での評価結果は、締固め完了エネルギーが  $139.5 \text{ J/L}$  の有スランプコンクリートに対して 60 秒締固めする場合、硬化後コンクリートの品質は振動中心線から 450~650 mm 程度離れた箇所より先では明らかな品質変化が発生していることを示している。この範囲は、室内試験で得られた締固め完了範囲 435 mm より若干広くなっている。しかし、締固め完了エネルギーと累積エネルギーにより推定したこの締固め完了範囲は、硬化試験で確認した締固め完了範囲の下限値に近いので、安全側の評価であると考えられる。そこで、今回提案した締固め完了エネルギーによる締固め完了範囲の判定方法は、有スランプコンクリートの締固め評価に適用できると考えられる。

5. 評価システムの開発および試験施工への適用結果

5.1 評価システム

有スランプコンクリートの施工では、内部振動機の

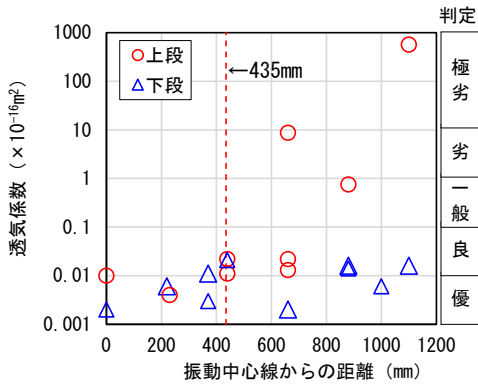


図-12 透気係数の計測結果

Fig.12 Measurement result of permeability coefficient

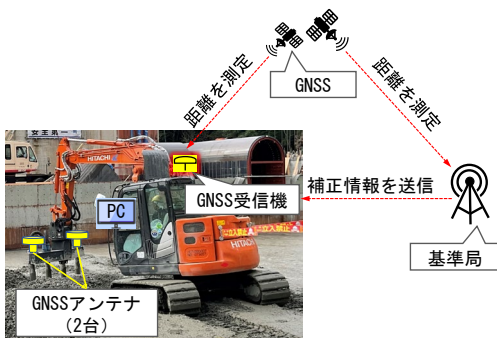


図-13 評価システムの機器構成イメージ

Fig.13 Equipment configuration image of the evaluation system

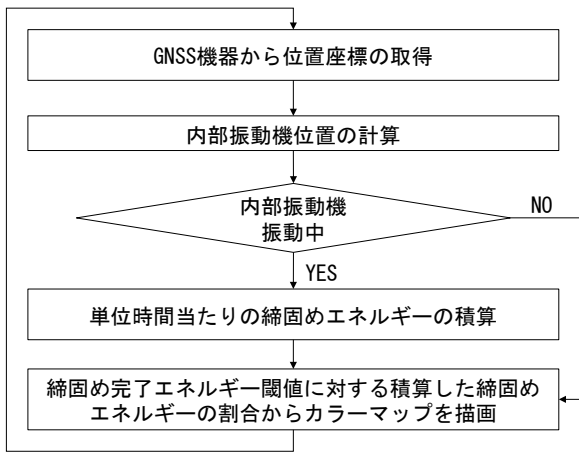


図-14 プログラムのフロー

Fig.14 Program flow

振動位置を指定することは非常に難しいので、コンクリートの表面状況を目視確認しながら締め固めるのが一般である。すなわち、打ち込んだコンクリートを万遍なく適切に締め固めるためには、内部振動機の挿入位置を変更して繰り返して締め固めることが少なくないが実状である。この場合、締め固め間隔や締め固め時間がランダムであるので、品質保証のために単純に場所ごとの締め固め時間をコントロールすることは、実務

上オペレータの熟練度に大きく依存されると考えられる。したがって、前述した締め固め完了範囲の推定方法を利用し、コンクリートの品質を管理対象に評価システムを構築し、さらに施工現場での効果を確認した。

このシステムでは、コンクリート中の締め固めエネルギーの伝播特性を利用し、内部振動機からの距離に応じて振動時間ごとの累積エネルギーを計算し、締め固め完了エネルギーに対する割合を求めることで目標箇所の締め固め程度を定量化する。また、締め固め程度を異なる色で表現することで締め固めの進行状況や結果を可視化する。

評価システムの機器構成イメージを図-13に示す。内部振動機の加振位置はRTK-GNSS測位方法によって取得した。これは衛星測位に基準局の補正情報を加えたため、水平2~3cm、鉛直3~4cm程度のセンチメートル級精度を実現できる。搭載型内部振動機には通常複数本(標準は4本)の内部振動機が装着されており、機体の移動方向を確定するため、2台のアンテナをアタッチメント両端に設置した。このように、GNSSアンテナからのオフセット距離計算で複数本の内部振動機の位置を特定できる。また、内部振動機の加振時間は、そのスイッチのオンオフ電気信号をコンピュータに送信することによって取得した。コンクリート中に内部振動機が挿入されていないスイッチがオンに設定されている時間は抜き差し1、2秒程度であるが、それらをカウントしないために、高さ情報を使用してコンクリート範囲内での加振時間となるような機能を付け加えた。

プログラムは、図-14に示す通り、内部振動機の位置を特定した後、振動時間内における単位時間(ここでは、1秒とする)当たりの締め固めエネルギーを積算し、その値が締め固め完了エネルギーに対する割合を計算し、最後にカラーマップの描画にする。

## 5.2 システム導入の結果および効果

有スランプコンクリートの施工現場における締め固め中のカラーマップの一例を図-15に示す。ここでは締め固め完了エネルギー値以下を緑色系の濃淡表示、同エネルギー値を超えた範囲をオレンジ系の濃淡表示とした。このようにカラーの濃淡表示としたのは、本システムが従来の締め固め完了・未完了の二値を表現することのみ目的ではなく、目標箇所において累積エネルギーと締め固め完了エネルギーの関係から締め固めの程度を表現し、コンクリートに与えた締め固めエネルギーの強弱を視覚的に表すためである。また、図-15から幾つか加振過剰の箇所が認められる。内部振動機を用いた場合、

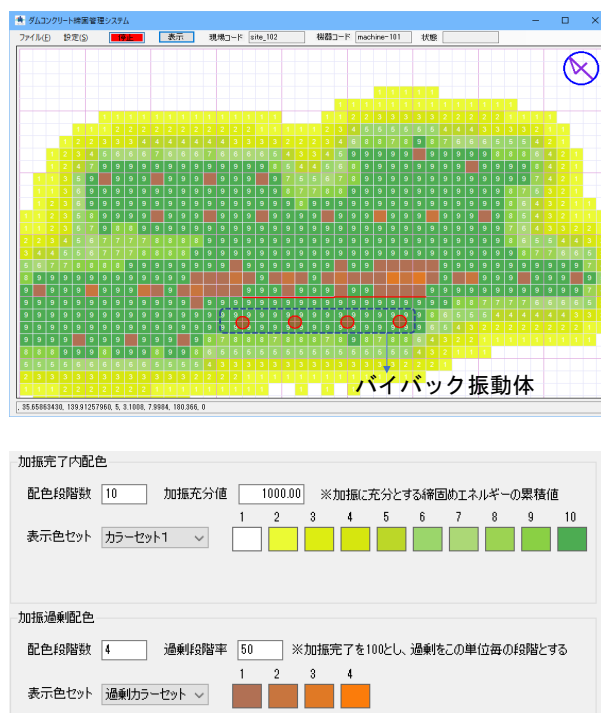


図-15 カラーマップ表示画面の一例

Fig.15 Example of color map display screen

実務上加振過剰の発生を避けられないと考えられるため、今後、コンクリートの品質保証に対する加振過剰の許容範囲について検討し、実際運用の際にさらに議論する必要があると思われる。

本システムは、振動箇所および箇所ごとの振動回数を限定せず、締固め完了エネルギーに対する累積エネルギーの割合を利用して各箇所での締固め程度を表すものである。このことによって、オペレータを制限することなくほぼ従来通り締固め作業ができ、締固め完了程度を参考に内部振動機の移動経路や締固め時間を決めることで効率的に施工できると推測される。さらに、エネルギーの伝達と累積に基づいてシステムを構築することは、締固めエネルギーが到達できる箇所まで評価でき、過剰な締固めを防ぐことができるため生産性向上に繋がれると考えられる。なお、図-15に示すPCの画面をオペレータだけでなく、工事管理者、元請管理職員とも共有することにより締固め状況の遠隔施工管理等にも活用できる。

## 6. まとめ

本研究では、粗骨材最大寸法 80 mm の有スランブコンクリートの締固め完了範囲の推定を行い、推定範囲の可視化システムを開発して実施工に適用した。本研究の範囲内で得られた結果を以下に示す。

(1)粗骨材最大寸法 80 mm の有スランブコンクリートの締固め完了エネルギーを測定可能な試験装置を開発した。

(2)有スランブコンクリート中の加速度の減衰は指数分布に従うことがわかった。この特徴を利用して任意位置において締固め時間の経過に伴う累積エネルギーを算出した。

(3)締固め完了エネルギーと累積エネルギー分布の相関関係から、締固め完了範囲を精度よく推定できることがわかった。

(4)コンクリートの締固め程度をリアルタイムで判定することで、有スランブコンクリート締固め程度を可視化できる品質管理システムが完成した。それを用いて適切な締固め作業ができ、生産性向上に寄与できると思われる。

今後、ダム建設現場における本システムを長期使用時の適用性を検証するとともに、コンクリートフレッシュ性状の変動が締固めエネルギーに与える影響を検討し、システムの汎用性を図る予定である。

## 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書（ダムコンクリート編），2013
- 2) ACI Committee 309, Report on behaviour of fresh concrete during vibration, American Concrete Institute, Detroit, ACI 309.1R-08, 2008.8
- 3) 村田二郎：フレッシュコンクリートの挙動に関する研究，土木学会論文集，No. 378/V-6, pp. 21-33, 1987.11
- 4) 岩崎訓明：振動によるフレッシュコンクリートの液状化と内部振動機の作用領域に関する考察，土木学会論文集，Vol.14, No.426, pp.1-18, 1991.11
- 5) 梁俊，丸屋剛，坂本淳，等：締固め完了エネルギーに基づくコンクリートの締固め完了範囲の評価方法に関する研究，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol. 69, No. 4, 438-449, 2013.
- 6) Banfill, PFG, Teixeira, MAOM & Craik, RJM : Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation, Cement and Concrete Research, vol.41, no.9, pp. 932-941, 2011.4
- 7) 梁俊，國府勝郎，宇治公隆，上野敦：フレッシュコンクリートの締固め性試験法に関する研究，土木学会論文集E, Vol.62, No.2, pp. 416-427, 2006.6
- 8) 國府勝郎，上野敦：締固め仕事量の評価に基づく超硬練りコンクリートの配合設計，土木学会論文集，No. 532/V-30, pp. 109-118, 1996.2
- 9) 国土交通省 東北地方整備局：コンクリート構造物の品質確保の手引き（案）（トンネル覆工コンクリート編），2021年改訂版，pp.46-47, 2021.6
- 10) 澤村淳美，大橋英紀，土師康一，田中徹：各種コンクリート配合に対する表層品質試験評価に関する一考察，戸田建設株式会社技術研究報告第 44 号，pp.13-1~13-4, 2018.11