ダムコンクリート打設における締固め管理及び打継面処理の高度化

前田建設工業(株)　正会員　○白石　幸基　正会員　秋田　剛
フェロー会員　石黒　健　正会員　平田　昌史
中島　秀樹　正会員　杉野　裕之
中村　満太

１．はじめに

建設業を含む産業界では生産労働人口の減少が急速に進行しており，2024 年度には改正労働基準法が建設業にも適用された．そのような環境の中，労働力不足解消や生産性向上は重要な課題となっている．

国土交通省においても「i-Construction2.0」の施策のもと，「施工のオートメーション化」，「データ連携のオートメーション化」，「施工管理のオートメーション化」が進められている．

とりわけダム工事においては，事業件数がピーク時の約 5 分の 1 まで減少しており，それに伴いダム施工経験者数の減少が加速していくと考えられる．これらの課題から，当社では DX/RX 等の技術を活用し，生産性の向上と品質管理の高度化技術の開発を進めてきた．

本論文では，当社の鳥羽河内ダムで取り組んできた①加速度計を用いたコンクリート締固め管理の高度化，②グリーンカット作業の自動化，③グリーンカット作業の品質管理の高度化について報告する．

２．加速度計を用いたコンクリート締固め管理の高度化

(1)開発背景

コンクリートを打設する際の締固めは，最終的なコンクリート構造物の品質を左右する重要な作業である．特に，粗骨材が大きく，水分量の少ない低スランプのコンクリートが用いられるダムコンクリート施工では，材料の分離や締固め不足を防止し，所定の品質を確保するうえで，締固め作業の重要性は非常に高い．一方で，締固め時間や締固め完了の判断は，熟練オペレータの経験に委ねられているのが実情であり，施工中に締固め状況を客観的かつ定量的に把握することは困難であった．また，バイバックによる締固め作業では，複数本の大型バイブレータを用いて広範囲を施工するため，いつ，どの位置を，どの程度締固めたかを施工履歴として面的に記録することが品質管理上重要となる．

そこで筆者らは，バイバックのバイブレータに加速度計を設置し，計測した加速度データと GNSS による位置情報を組み合わせることで，締固め時間，締固め範囲および締固めエネルギー等を記録・可視化する締固め管理システムの開発を進めてきた．本節では，加速度計を用いたダムコンクリート締固め管理手法の概要と，現場における計測・可視化結果について報告する．

(2)締固め管理手法の概要

本手法は，バイブレータの振動状態がフレッシュコンクリートから受ける負荷によって変化することに着目し，計測した加速度から締固め状況を定量的に評価するものである．本手法における締固め管理の計算フローを**図-1** に示す．まず，計測した加速度波形から 1 秒ごとの加速度振幅αおよび振動数fを算出し，棒部先端加速度α_Tおよび角速度ωに換算する．バイブレータの負荷状態の模式図を**図-2** に示す．バイブレータを空気中で振動させた無負荷状態と，フレッシュコンクリート中に挿入した負荷状態を比較すると，フレッシュコンクリートから受ける抵抗により，加速度および角速度が変化する．本手法では，この変化を用いてフレッシュコンクリートの粘性係数μを推定する．

キーワード　ダムコンクリート，締固め，グリーンカット，自動化，AI 画像判定，品質管理
連絡先　〒102-8151　東京都千代田区富士見２丁目１０番２号　前田建設工業株式会社　ＴＥＬ03-3265-5551

次に，推定した粘性係数μを用いて，距離減衰係数β，乱れ領域dおよび境界減衰係数γを算定し，フレッシュコンクリート中を伝播する加速度の減衰分布を求める．フレッシュコンクリート内の加速度の減衰概念を**図-3** に示す．バイブレータから伝播する加速度は，バイブレータ中心からの距離に応じて減衰するため，バイブレータ近傍の加速度分布を求めることで，締固めの影響が及ぶ範囲を評価することができる．フレッシュコンクリート内を伝播する加速度$\alpha(x,z)$は，式(1)に示すように，バイブレータ中心からの距離 x およびバイブレータ先端からの距離zに応じて減衰するものとして整理する．ここで，xはバイブレータ中心からの距離，zはバイブレータ先端からの距離，βは距離減衰係数，γは境界減衰係数である．本手法では，この加速度減衰分布に対して，締固めが有効に進行すると考えられる締固め限界加速度α_Pを設定し，$\alpha(x,z)$がα_P以上となる範囲を締固め限界範囲x_{lim}として算定する．

さらに，GNSS により取得した施工位置情報と組み合わせることで，バイブレータの移動軌跡に沿って，締固め作業を行った位置，締固め時間および締固め範囲を面的に記録する．また，加速度分布を基に締固めエネルギーを算定し，締固め時間の累積値とあわせてコンター表示することで，施工範囲全体の締固め状況を可視化する．以上により，従来はオペレータの経験に依存していた締固め作業について，締固め時間，締固め範囲および締固めエネルギーを定量的な施工管理情報として整理することが可能となる．

$$\alpha(x,z)=\alpha_T\left(1-\frac{z}{L_0}\right)\gamma\sqrt{\frac{\varphi}{2x}}\cdot\exp\left\{-\beta\left(x-\frac{\varphi}{2}\right)\right\} \tag{1}$$

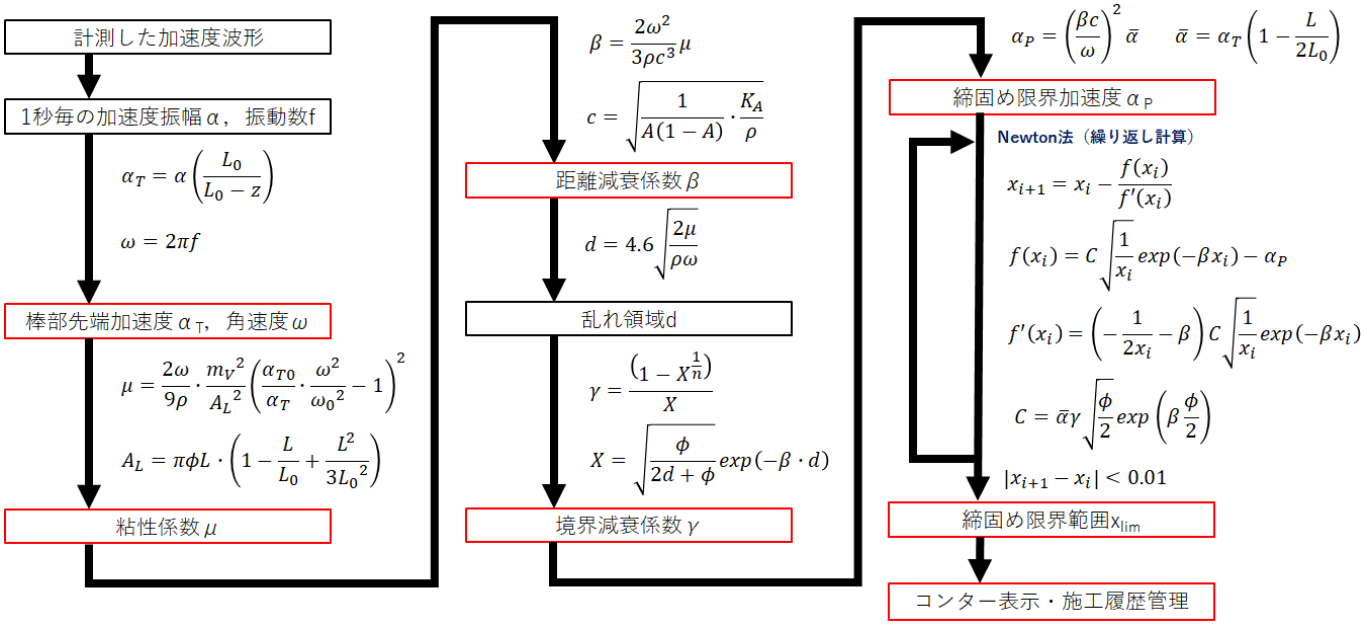


図-1　締固め管理の計算フロー

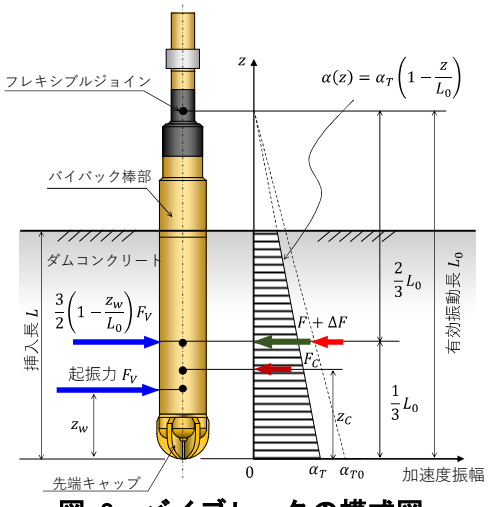


図-2　バイブレータの模式図

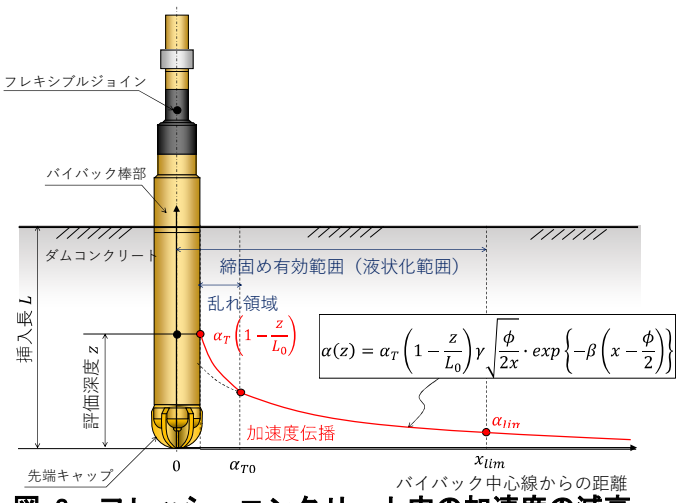


図-3　フレッシュコンクリート内の加速度の減衰

(3)システム構成

本システムの構成を**写真-1** に示す．本システムは，バイバックのバイブレータに設置した加速度計，施工位置情報を取得する GNSS，計測データを収集・処理する締固め判定装置，および締固め状況を表示する可視化装置により構成される．加速度計により取得した振動データと，GNSS により取得した施工位置情報を組み合わせることで，締固め作業位置，締固め時間，締固め範囲および締固めエネルギーを記録する．

加速度計は，**写真-2** に示す固定治具を用いて，バイブレータ棒部上部に外付けで固定した．従来は，バイブレータ先端側に加速度計を設置する構成としていたが，実施工においては加速度計の交換や配線確認が容易ではなく，保守性に課題があった．そこで，バイブレータ棒部上部に外側から取り付け可能な固定治具を製作した．本治具は，施工時の支障となりにくい位置に設置できるとともに，加速度計の着脱および点検を容易に行える構成としている．締固め判定装置では，計測した加速度波形から 1 秒ごとの加速度振幅および振動数を算出し，締固め管理に必要な各指標を算定する．また，締固め判定装置と連携する可視化装置では，締固め作業中の加速度減衰分布，締固め時間および締固めエネルギーを算定し，GNSS 座標に基づいて施工範囲上にコンター表示する．可視化結果は，バイバックのキャビン内に設置したタブレット端末に表示し，オペレータが施工中に締固め状況を確認できる構成とした．



写真-1　システム構成

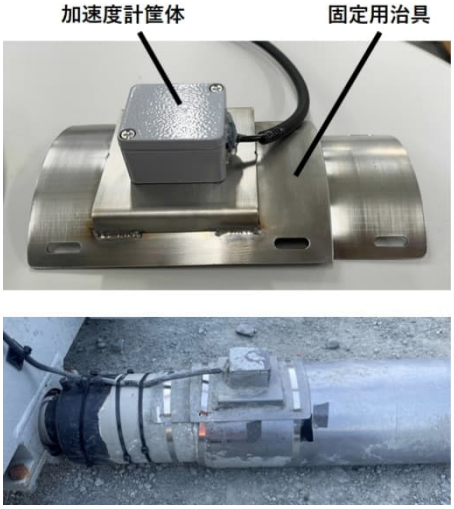


写真-2　加速度計固定治具

(4)締固め作業の判定方法

バイバックのバイブレータが振動している状態には，コンクリートの締固め作業だけでなく，空運転，コンクリートの均し作業，バイブレータの挿入・引抜き，移動時の振動なども含まれる．そのため，振動データをすべて締固め作業として累積すると，締固め時間や締固めエネルギーを過大に評価する可能性がある．

そこで本システムでは，計測した加速度波形から算定した棒部先端加速度α_Tおよび角速度ωに閾値を設定し，締固め作業とその他作業を判別することとした．具体的には，施工動画および計測データを照合し，実際にバイブレータがコンクリート中で締固めを行っている時間帯のα_Tおよびωの範囲を整理したうえで，締固め作業の判定条件を設定した．判定処理は 1 秒ごとに実施し，α_Tおよびωが設定した判定条件を満たす場合を締固め作業，条件を満たさない場合を非締固め作業として分類する（**図-4**）．締固め作業と判定されたデータのみを可視化対象とすることで，締固め時間および締固めエネルギーを施工位置情報と紐づけて累積し，施工範囲全体の締固め状況を面的に評価することが可能となる．

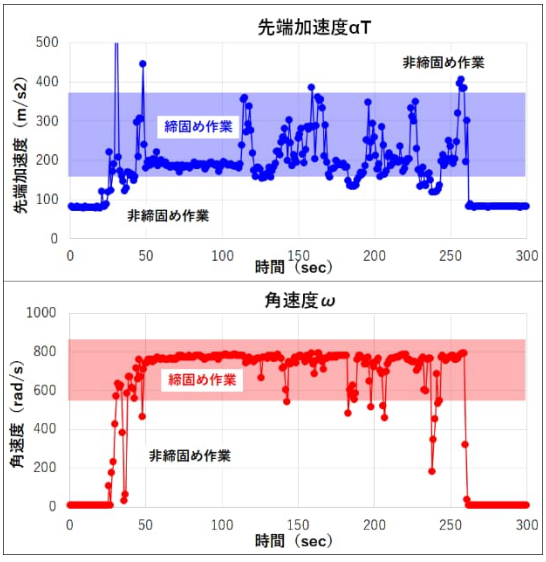


図-4　締固め作業の判定イメージ

(5)現場計測結果

加速度計固定治具および可視化装置を実際のダム施工現場に適用し，バイバックによる締固め施工時の計測および可視化を行った．本計測および締固め管理計算に用いた主な諸元を**表-1** に示す．計測では，前述した判定条件により締固め作業と判定された時間帯のデータのみを可視化対象とし，GNSS により取得した施工位置情報と組み合わせて，締固め状況を面的に整理した．**図-5** に，バイブレータの棒部先端加速度α_T および締固め限界範囲x_{lim} の経時変化の一例を示す．バイブレータの挿入・引抜きや均し作業時には加速度および角速度が大きく変動する一方，締固め作業時には比較的安定した波形を示した．本システムでは，このような計測値の変化を基に締固め作業を抽出し，施工位置ごとに締固め時間および締固めエネルギーを累積した．**図-6～図-8** に，締固め状況の可視化結果を示す．加速度コンターは，締固め限界範囲内における加速度減衰分布を示すものであり，バイブレータ複数本分の分布を同時に表示することができる．また，締固め時間の累積コンターは，締固め作業と判定された位置における作業時間の累積値を示し，締固めエネルギーの累積コンターは，加速度分布を基に算定した締固めエネルギーの累積値を示す．これらの可視化結果は，バイバックのキャビン内に設置したタブレット端末上で表示切替が可能であり，オペレータは施工中に締固め作業の軌跡および締固め状況を確認することができた．これにより，従来は施工後に事務所内で確認していた締固め状況を，施工中に把握できるようになり，締固め管理の即時性および施工判断の客観性向上に寄与するものと考えられる．

表-1 計算に用いた諸元

フレッシュコンクリート				
スランプ		cm	:	4.0
水		kg/m^3	:	119
セメント		kg/m^3	:	210
細骨材		kg/m^3	:	609
粗骨材		kg/m^3	:	1482
水セメント比	W/C	%	:	56.7
細骨材率	s/a	%	:	31.0
密度	ρ	kg/m^3	:	2420
空気量	A	%	:	2.5
バイブレータ諸元				
直径	ϕ	m	:	0.150
バイブレータの重量	m_v	kg	:	73.00
バイブレータの有効長さ	L_0	m	:	0.884
締固め時の挿入長さ	L	m	:	0.650
加速度計位置	z	m	:	0.800
無負荷時加速度	α_0	m/s^2	:	46.8
無負荷時先端加速度	α_{T0}	m/s^2	:	493.0
無負荷時周波数	f	Hz	:	130.0
無負荷時角速度	ω_0	rad/s	:	816.8

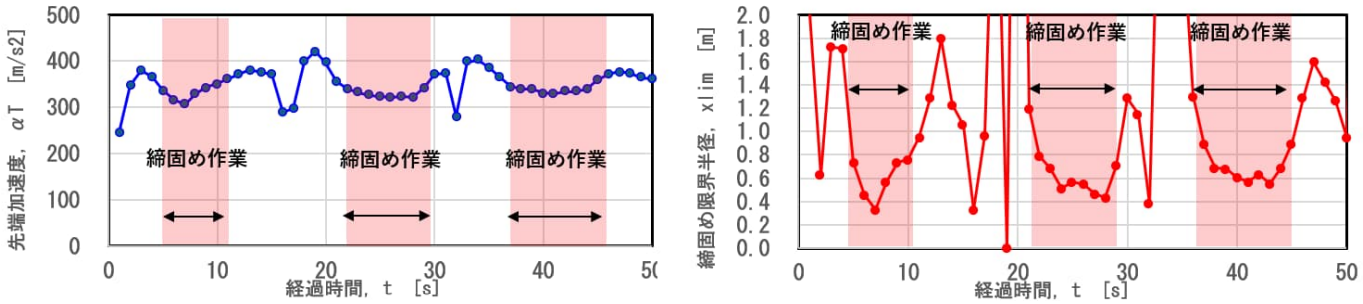


図-5 加速度と締固め範囲の経時変化

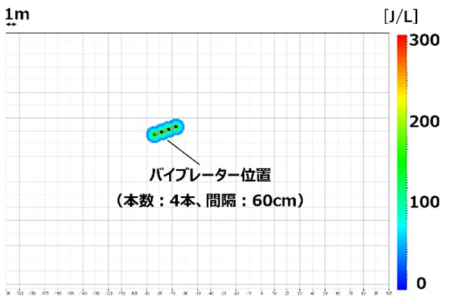


図-6 加速度コンター

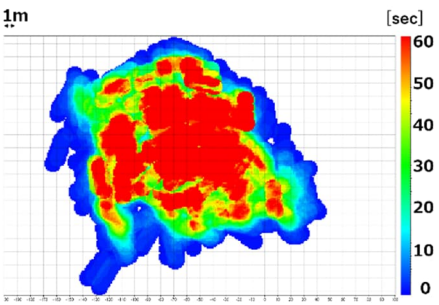


図-7 締固めエネルギーの累積

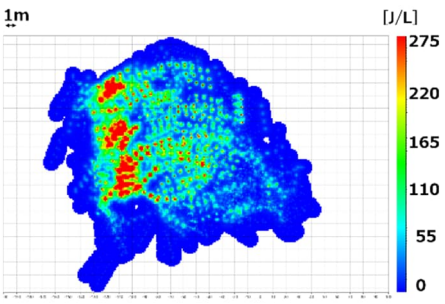


図-8 締固め時間の累積

(6)課題と今後の展望

本システムにより，バイバックによる締固め作業時の加速度データと位置情報を組み合わせ，締固め状況を面的に可視化できることを確認した．一方で，締固め作業と非締固め作業の判定条件は，施工条件，コンクリート配合，バイブレータの使用状態等により変動する可能性があるため，今後も現場計測データを蓄積し，判定閾値の最適化を進める必要がある．また，締固め時間および締固めエネルギーを品質管理指標として活用するためには，計測結果とコンクリート品質との関係を整理し，管理基準値の設定に向けた検証が必要である．

３．グリーンカット作業の自動化

(1)開発背景

グリーンカット作業は，一般的にダムコンクリート打設翌日に脆弱なコンクリート面をハンドポリッシャーや機械を用いて除去するレイタンス処理のことを指す（図-9）．ダムの打継面は非常に広く，切削作業に 2～3 人配置している．特に人力での作業では，作業者の負担が大きく重労働である．そこで，広域な打設面に対して，作業員の負担軽減を目的に自動施工可能なグリーンカットマシン（以下，本マシン）を開発した．

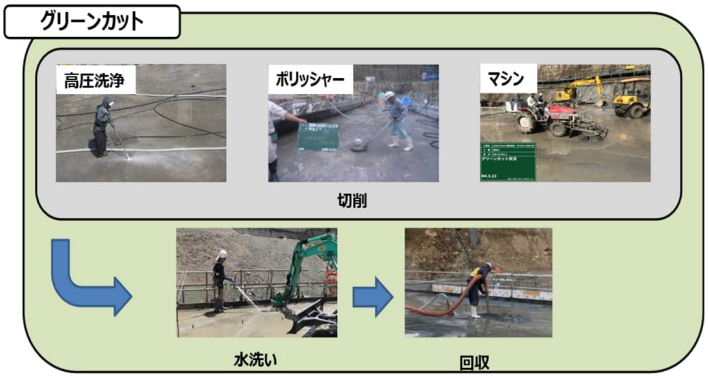


図-9　従来のグリーンカット作業

(2)マシン構成

本マシンの基本構造は，ベースマシンの草刈り機と，専用のアタッチメントによって構成されている（写真-3）．アタッチメントはブラシを 2 個搭載し，自重によりコンクリート面に接地するようになっており，多少の不陸にも対応している．ブラシの回転は，両ブラシともに外回りに回転させる仕様となっている．これは，同方向に回転する場合，車体が回転方向に流される可能性があり，マシンの制御に影響を及ぼすことを防ぐためである．



写真-3　自動グリーンカットマシン

また，本マシンは自動施工を目的としており，施工時の自己位置と進行方向確認のため，GNSS を 2 基設置している．GNSS から取得した情報を本マシン上部に搭載した制御用 PC により処理し，自動施工を行っている．さらに，「自動施工」と「遠隔施工」を判別するために表示灯を具備している．

(3)施工方法

施工方法は上記にも示したが，「自動施工」と「遠隔施工」を選択可能である．

「自動施工」は，事前に指示用 PC で施工範囲を設定し，同 PC から制御用 PC へ指示を送ることで施工を開始する．現時点では，指示できる施工エリアは四角形となっており，複雑な形状には対応していない．本マシンは上述したように設置した 2 つの GNSS により，自己位置と進行方向を確認し，スイッチバックを繰り返しながら施工を行う．施工中の GNSS の情報と施工エリア，監視用のカメラ映像を指示用 PC から確認が可能である（図-10）．

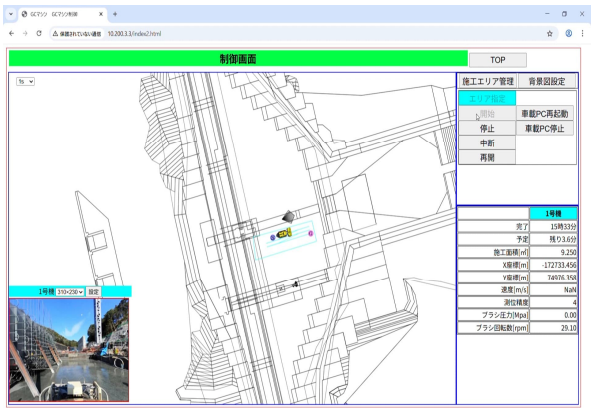


図-10　指示 PC 画面

「遠隔施工」は，ラジコンによる施工が可能となっており，走行やブラシ回転等を自由に変更できるが，操縦者によって切削状況や時間に差が出てしまう．

(4)実施内容

2025 年 3 月より，本マシンが十分に稼働可能な施工エリアを対象に，自動施工を実施している．自動施工を実施した

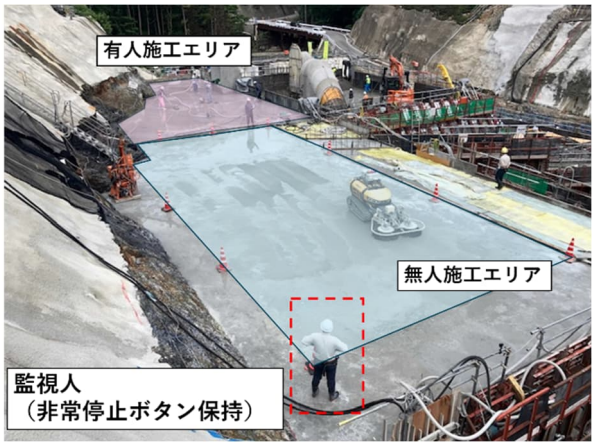


写真-4　自動施工の状況（下流側から撮影）

状況の例を**写真-4** に示す．打設から 14 時間経過後に，グリーンカット作業を実施した．施工時には，「自動施工における安全ルール ver1.0」[7]を基に，有人エリアと無人施工エリアをカラーコーンで区分けし，監視人を配置している．監視人は，非常停止ボタンを保持しており，エリアを逸脱しそうになった場合などに対応できるようにしている．実施時の施工エリアは，右岸側の地山状況を考慮して 134m^2（6.7m×20m）で設定した．設定エリアを 0.85m ピッチで 6.5 往復し，11 分間で施工を完了した．人力での作業であれば，同エリアの切削作業だけで，2 時間程度かかるため，90%以上短縮したこととなる．



写真-5　切削後の打継面状況

この時の打継面の切削状況を**写真-5** に示す．骨材の露出が確認でき，実施工に適用可能であることを確認した．しかし，部分的に不足箇所も存在した．この原因は，コンクリート面の不陸に対して，アタッチメントが対応できない箇所があり，ブラシの回転トルクが足りず，不足部分が発生したと考えられる．ブラシのトルクは，ベースマシンのエンジン回転数に影響されるため，オーバーカットと不足箇所を最小限にするバランスを見極める必要がある．不足部分と上流側に関しては，人力にて施工を行った．人力で全面実施することに比べ，不足箇所のみを人力で実施するため作業員の身体的負担の軽減に寄与すると考えられる．



写真-6　ノロの回収状況

(5)課題と今後の展望

夏場の日中作業では，コンピュータ内の温度が上昇し，PC の電源が切れる，通信が接続されないなどの現象が見られた．対策として，空調ファンを増やすなどし，一時的に回復したが，気温が高すぎると温風を循環させるだけになってしまった．現在は，冷却材を用いることで対応している．

グリーンカットは作業終了後に，切削後の水洗い・ノロ回収が必要となり，これらの作業は現在も人力で行われている（**写真-6**）．特に切削後のノロの回収は 1.5mm 程度切削すると仮定すると，今回例に挙げた 134m^2 で考えると 0.2m^3 程度発生することとなる．これらを鋤簾やバキュームホースで回収すると非常に身体的負荷が大きい．これらの関連作業の省力化も目指し，グリーンカット作業全体のさらなる生産性向上を目指す．

４．グリーンカット作業の品質管理の高度化

(1)開発背景

グリーンカット作業後，打設前検査時に打継面の切削状況を目視にて確認する．切削度合いについては，工事開始時に受発注者間にて，過去の資料を参考に基準を決めている．しかし，工事を進める中で，担当者が変わることもあり，基準が曖昧になっている．また，従来は目視にて確認をしており，打設前の打継面状況の記録があまり残っていない．ダム経験者が少なくなっている中で，記録を残していくことも必要となっていると考えた．そこで，担当者によって判定結果のばらつきがなく，結果を保存することが可能な「良否判定システム」を開発した．

(2)システム概要

良否判定システムは，撮影ロボットで打継面を撮影し，AI 判定システムにて良否判定を行う．以下にそれぞれの概要を示す．

a)撮影ロボット

撮影ロボット（以下，本ロボット）は，アルミフレーム，制御用 PC，Web カメラ，GNSS，クローラー，転倒防止治具で構成されている（**図-11**）． 撮影面は 600mm × 1200mm になるようにロボットフレームを設定している．また，転倒防止治具を付けることにより，釜場やホースなどがあった場合も走行を可能としている．

本ロボットは，自動撮影を可能としている．自動撮影時は，走行エリアを指示用の PC で事前に 4 点指定することで走行・撮影が可能となる．撮影は 500mm ごとに行い，撮影前後 2 秒間静止することで，撮影時のブレを抑制する．自己位置の推定は，自動グリーンカットマシンと同様に 2 基の GNSS を設置し，位置と角度を計測する．

また，打継面は湿潤状態を保つために常に散水しており，撮影時にロボットの影や太陽光などが反射する可能性がある．そこで，光量を調整するために偏光レンズと 2 種類のシートを使用し，影等の映り込みを抑制した（**写真-7**）．駆動部上部に使用したシートは，光拡散を目的としたもので，完全に光を遮断するシートではない．完全に光を遮断してしまうと，シート内部で撮影するため，光量が足りず照明等が必要となり，その照明が水面に反射してしまう．また，駆動部には，ゴムシートを活用した．これにより，ロボット周辺からの反射した光の侵入を防ぐとともに，撮影面への水の侵入を防ぐ．これらのシートを活用することで，自然光を取り込みながら，打継面からの反射による影響（フレームの影等）を抑えることができる（**写真-8**）．



図-11　グリーンカット撮影マシン



写真-7　遮光シート着用



写真-8　遮光対策による打継面撮影状況

b)AI 判定システム

システム概要図を**図-12** に示す．撮影ロボットで取得した画像を AI 判定システムへ取り込み，対象画像を事前に設定した分割数で分割する．この時，1 パターンの分割方法では，分割した写真の端部の影響が反映されにくいため，端部をフォローできるように分割する．

次に，分割した各画像について AI が特徴量を分析し，教師データと比較する．その比較結果から，最終的に対象画像に対して，最も多い分類を全体の判定結果とする．判定区分は「オーバーカット」，「良好」，「不足」の 3 種類を基本とし，対象の画像が「水たまり」や「異物」になった場合は後述の判定結果のマッピング（集合状況）により，職員での目視確認を推奨する運用としている．

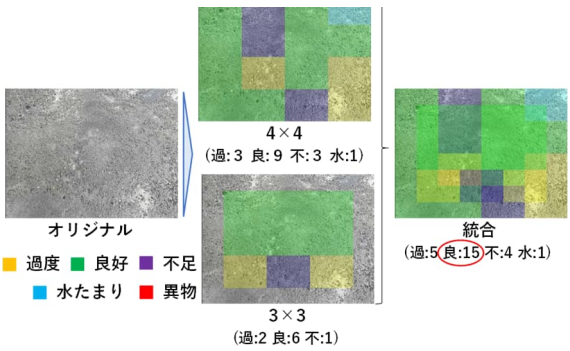


図-12　AI 判定システム概要図

(3)マッピング機能

AI 判定システムにて判定した画像データとロボットの GNSS からの位置情報を紐づけることにより，打継面の品質を面的管理することを可能としている（**図-13**）．これにより，従来は目視確認のみに留まっていた品

質情報をデジタルデータとして記録可能となり，再施工が必要な箇所への指示や施工履歴管理への活用が期待される．

(4)判定精度

現場にて撮影した画像を本システムに取込み，AI による判定結果と当社ダム施工経験者の目視判断結果との比較検証を行った．その結果，両者の判定の一致率は 75%であり，現場適用可能であると考えられる．今後は，教師データの再選定や追加学習を継続的に実施することで，さらなる判定精度の向上に努めていく．

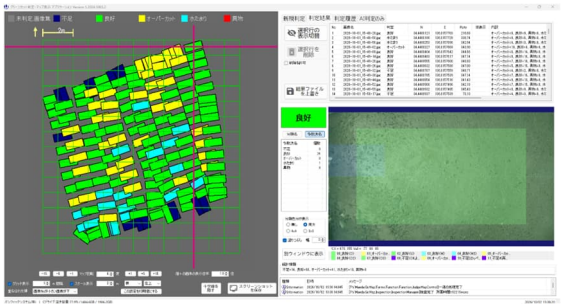


図-13　AI 判定システムマッピング機能

(5)課題と今後の展望

現在のグリーンカット AI 判定システムは，現場での撮影部と AI 判定部については開発に着手しているが，それぞれが独立したシステムになっている．今後は，データ回収や判定結果の通知などをシームレスに行えるよう開発を進めていく（図-14）．

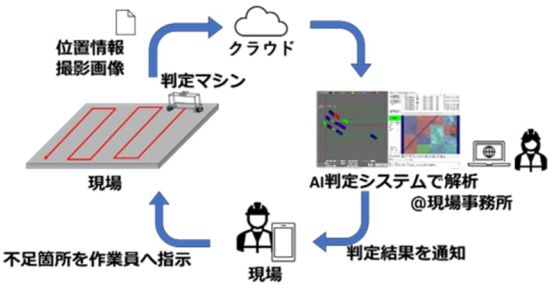


図-14　AI 判定システム将来図

５．おわりに

本論文では，実現場におけるダムコンクリート施工の生産性向上および品質管理高度化を目的として，加速度計を用いた締固め管理，自動グリーンカットマシンによる作業の自動化，AI 良否判定システムによる打継面品質管理の高度化について報告した．今後は，締固め管理における判定閾値および管理基準値の検証を進めるとともに，グリーンカット作業における水洗い・ノロ回収等の未着手項目にも対応し，ダム工事全体の生産性向上および品質管理の高度化に寄与する技術開発を継続していく．

参考文献

1) 畠山峻一，新井博之，太田兵庫，梁俊，張文博: ダムコンクリート締固め状況可視化システムの導入効果に関する検証，第 79 回土木学会年次学術講演会講演集, 2024.
2) 天明敏行，齋藤淳，寺田幸男: ダムコンクリートのバイバックによる締固め評価システム，コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1618-1623, 2014.
3) 古屋弘，上高克弘，久保貴士: ダム用コンクリート締固め判定手法の開発，大林組技術研究所報，No.78, pp.1-8, 2014.
4) 平田昌史，白根勇二，南浩輔，笹倉伸晃，中島良光: 棒状バイブレータを用いたフレッシュコンクリート締固め管理法の検討，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造）, Vol.73, No.2, pp.165-178, 2017.
5) 中野孝威，平田昌史，石黒健，杉野裕之，上馬場靖，西條圭祐，内山信: 加速度を用いた締固め管理手法のダムコンクリートへの適用性評価，第 79 回土木学会年次学術講演会講演集, 2024.
6) 秋田剛，白石幸基，平田昌史，石黒健: バイブレータ加速度を用いたダムコンクリート締固め品質管理システムの開発，第 80 回土木学会年次学術講演会講演集, 2025.
7) 国土交通省大臣官房参事官(イノベーション)グループ：「自動施工における安全ルール ver1.0」, 2024 年
8) 白石幸基，濱島彩織，中野孝威:類似画像 AI を活用したグリーンカット判定システムの開発: 第 79 回土木学会年次学術講演会講演集, 2024.
9) 白石幸基，秋田剛: グリーンカット判定ロボットの開発:第 80 回土木学会年次学術講演会講演集, 2025.