

(49) ダムコンクリート締固め自動判定技術の開発 - 3次元計測による評価 -

竹内 啓五¹・宇野 昌利²・藤内 隆²・加瀬 俊久²・長谷川 悦央²

¹ 非会員 清水建設株式会社, 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3丁目 4番 17号)

E-mail: takeuchikeigo@shimz.co.jp

² 正会員 清水建設株式会社 土木技術開発本部 (〒104-8370 東京都中央区京橋 2丁目 16番 1号)

E-mail: uno@shimz.co.jp, t_tohnai@shimz.co.jp

kase.t@shimz.co.jp, e.hasegawa@shimz.co.jp

ダム施工においては、コンクリート締固めに専用の機械（バックホウにダム用バイブレータを数本装着した機械、以下バイバック）を使用して締固めを行う。従来、コンクリートの締固め程度や範囲は、バイバックオペレータが目視で判断し、それを打設管理技術者が確認してきた。これに対し我々は、オペレータの熟練度等による個人差のない客観的な締固め完了指標を得る手法として 3D スキャナの適用を行った。これにより締固め作業をリアルタイムで記録するシステムを開発したので報告する。

Key Words: viback, dam, concrete, 3-dimensional scanner, point cloud.

1. はじめに

ダム用の有スランブコンクリートは、最大骨材寸法が 150mm あるいは 80mm でスランブが 3~5cm の硬練りコンクリートである。これを大量に施工するため、ダム用コンクリート締固め機械バイバックを使用する。従来、コンクリートの締固め程度や範囲は、バイバックオペレータが目視で判断し、それを打設管理技術者が確認している。同現状下では、施工の評価が主観的になり易く、事後検証に有効な記録を残せていない。そこで、オペレータによる個人差のない客観的な締固め完了指標の構築と、状態の可視化ならびにリアルタイムで記録するシステムを開発することを活動の目標とした。

客観的な締固め指標としては、コンクリート標準示方書¹⁾ダムコンクリート編記載の『有スランブコンクリートが十分に締固められたかどうかは、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状態で確認できる』の下線部に着目した。つまり打設の完了は、コンクリートの上面が平滑になることが目安となる。この評価を機械的に実施できれば、打設完了を自動的に検知することが可能になる。平面を検知する手段としては、3次元形状を計測できる 3D スキャナと呼ばれる製品が有効であると考えられる²⁾³⁾。そこで、評価に相当となるスキャナの検証を行い、実証試験を通して、締固め判定が実施できることの確認を行った。

2. 予備検証

市販されている製品を中心に、比較的廉価で運用が容易なものをピックアップし、実際のコンクリート打設状況を計測することで、今回の目的を達成できるか検証を行った。

(1) 装置の評価

今回評価を行った装置を表 1 に示す。

表 1 評価用デブスカメラ

	外観	特徴
装置 A (マイクロソフト社製)		リアルタイム観測 範囲 3m max 8m 視野 70×60deg 解像度 512×424 精度 10mm (1m 内観測値)
装置 B (日本電子製)		リアルタイム観測 範囲 5m 視野 60×50deg 解像度 100×60 精度 ±20mm
装置 C (自社開発)		1 スキャン 20 秒 範囲 10m 視野 180 度 解像度 0.25 度 精度 ±20mm (5m 内観測値)

装置 A と B は市販のデプスカメラで、リアルタイムに 3D 形状情報を取得できる。装置 C は、社内で開発している形状計測装置である。2 次元レーザーレンジファインダをサーボモーターで回転させることで 3 次元の情報を取得することができる。

当初、締固めの判定はリアルタイム性を重視したため、装置 A から評価を行った。図 1 に装置 A を用いた実験の様子と評価を示す。型枠に入れたコンクリートをバイブレータで締固める様子を真上から撮影し、取得した形状点群を評価した。

図 1 における評価では、計測した形状点群に基づき、点群を最も含む可能性のある平面を推定し、その平面からの距離に応じて色分けをしている。赤は±1cm に入る点を表し、距離が遠くなるにつれ、±3cm 黄、±5cm 水色と表示している。この結果において『粗骨材が表面に露出せず、上面にモルタルがある』状態と 3D スキャナ画像の平坦性確認範囲 2 がほぼ一致することを確認した。

これらの結果によりデプスカメラにより締固め判定の可能性を見出すにいたった。しかし、装置 A は日光による外影響を多大に受けることが確認されたため、続けて装置 B の評価を行った。

装置 B は装置 A 同様リアルタイムに形状点群を取得でき、日光下 20 万 Lux においてもその影響を受けない。装置 B についても装置 A 同様に型枠に入れたコンクリートの締固めの様子を観測した。

図 2 に装置 B の計測結果の例を示す。同装置においても平滑度の評価は行えると考えられる。しかし、観測密度は粗い。また装置の設置位置はコンクリートの打設位置に近ける必要があり、コンクリートや骨材の飛散が多く確認されたため、汚れ、破損への対策が必須となった。汚れの課題は装置 A でも同様であるが、運用面での支障が大きいと考えられる。

装置 C についてはバイバック重機の操縦室の上に設置し、平面となる床を検出することにより評価を行った。同装置は 10m 程度の遠距離から観測が行えるが、リアルタイム処理はできない。しかし運用は、先の 2 つの装置に比べ容易と考えられた。

装置 C による評価結果である図 3 から、平面評価の可能性は十分あることが確認された。実装する場合も、風雨から保護するカバーをすることで運用することができることを確認した。

計測は処理を含め最短で 20 秒ほどで完了するため、締固め作業の終盤での記録としての運用を想定し、時間的ストレスなく利用できると予想した。

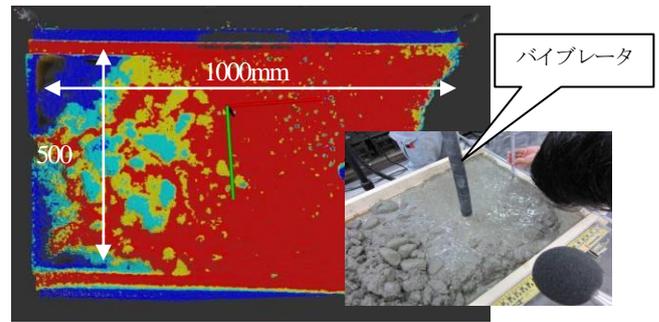


図 1 装置 A 評価結果

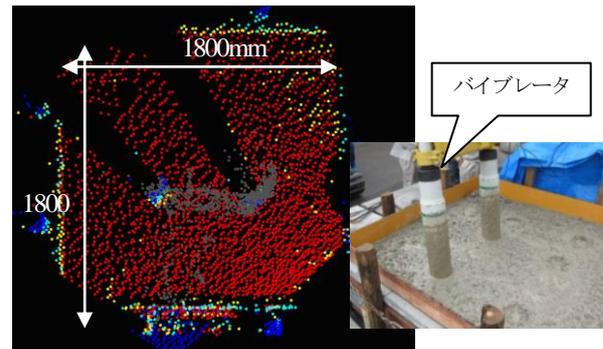


図 2 装置 B 評価結果

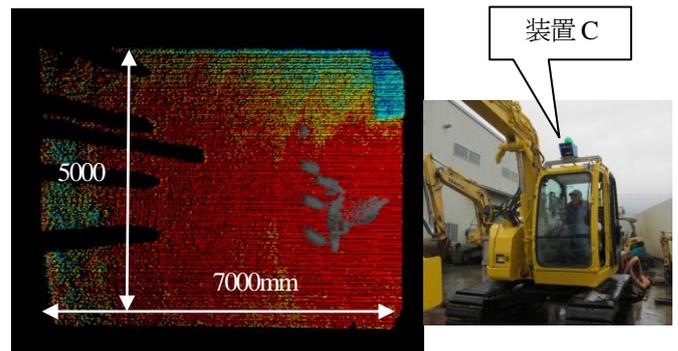


図 3 装置 C 評価結果

(2) 精度検証と平面推定

前節における評価で装置 C が最も有力となったが、締固めを評価できる性能があるか検証する必要がある。ダム用のコンクリートの場合、骨材は 15～数センチ程度である。コンクリート表面に骨材がない状態を評価する場合、理想的には数 mm の精度が必要と考えられる。しかし、同精度を達成するには数 1 千万円クラスの 3D 計測機が必要となり、現場運用として成立し難い。また、実際の打設においては完全に平面状態を求めてはいない。そこで、評価としては、骨材が半分以上表面から沈み、凸凹を 1cm 程度で観測できることを目安とした。

装置 C は当社内での開発品であるため、この検証は平面を実験的に計測することで行った。平らな床平面を装置 C と高精度の 3D スキャナの計測、比較することで評価した。用いた高精度 3D スキャナは 2 mm 精度の計測

が可能である。床素材は、塩化ビニルの艶消し、硬質仕上で、表面に1mmの凹凸はない。

重機に設置する高さ2.5m位置に装置を配置し床平面を計測した。この計測値の偏差が、設定した精度1cmに収まれば、今回の目的を達成できると考えられる。

表2の評価は、バイバックが締固めを行う範囲、重機前方1m～6m、左右は両方向2mの範囲について、1m四方のエリア毎に、高さ方向の計測値の標準偏差を評価した結果である。各枠内上段太字が装置C、下段細字が高精度3D計測による結果である。高精度スキャナの計測結果が1mmほどであることから対象の面は十分平面であると考えられる。装置Cでの計測結果からは、その偏差が概ね10mm以下であることが示された。これにより、今回の締固め評価に装置Cが十分な性能を持つことが示された。

平面の推定は取得された点群を分析することで行っている。基本的な考え方としては、計測値にもっともよくあてはまる平面を計算し、その平面から各計測点群がどの程度離れているかを評価することで行う。

平面推定は、3次元における回帰分析で求めている。いわゆる回帰直線推定と同様に、各点からの偏差が最小となる平面 $0 = ax + by + cz + d$ の各係数を求める問題として解く。今回の分析においては、点群処理のライブラリとして利用可能なPCL¹⁰内の上記関数を処理プログラムに実装することで、係数計算を実現している。

平面推定後、求めた平面から一定の範囲内の点を赤表示し、遠くなるにつれて黄、緑、青と色分けをした表示を行っている。評価する領域は、バイバックのバイブレータをかけている部分を中心に評価を行えるように、1m四方を最小の単位として、ブロックごとに評価を行えるようにしている。

3. 実証試験

このセンサを用い実環境(図4)にて、コンクリートを打設の様子を評価した。図5にコンクリートの締固め経過毎の、計測点群と、その評価結果を示す。

表2 平面計測値の標準偏差
上段:装置C / 下段:高精度3Dスキャナ

Y (奥行) X (左右)	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6[m]
-2~-1	9.6 2.6	11.0 2.7	10.2 1.2	9.1 0.5	9.4[mm] 0.8[mm]
-1~0	7.4 1.1	7.7 0.8	8.5 0.6	8.9 0.4	9.3 0.6
0~1	5.4 1.6	5.9 0.9	7.0 0.7	8.0 0.9	9.5 1.1
1~2[m]	7.5 2.4	6.9 2.3	6.5 1.4	6.9 1.2	6.3 0.5



図4 打設試験の様子

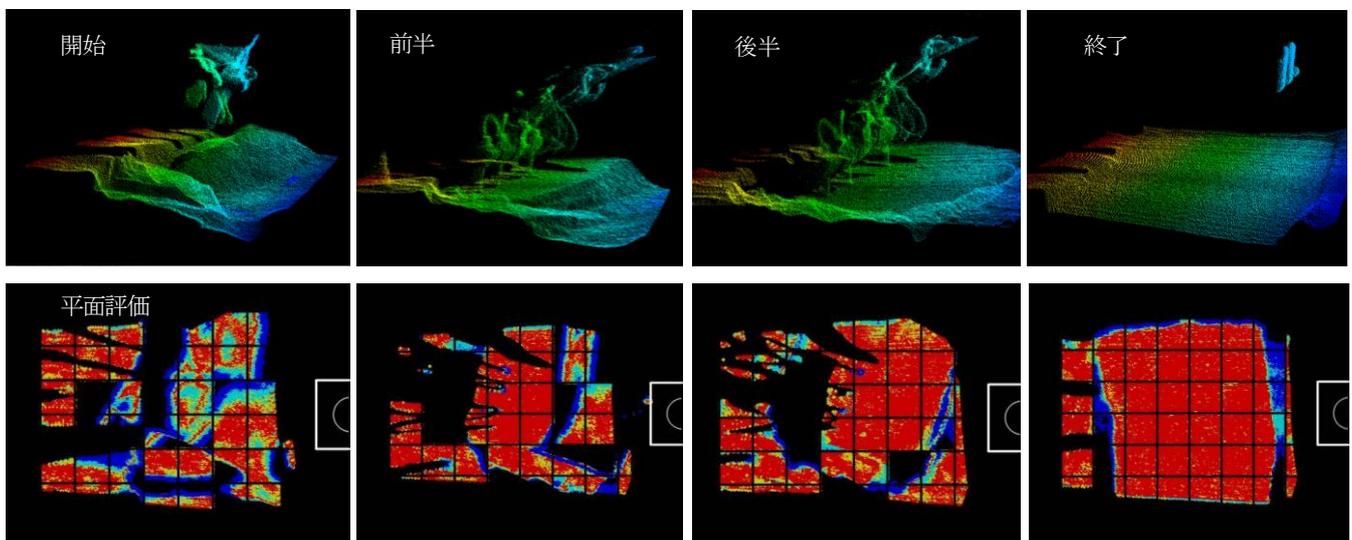


図5 計測形状と評価結果の推移
上段:計測点群 下段:平面評価(赤が平面判定部)

図5において各ステップの評価は上下で対応している。同図にて、右側の半円の位置が、バイバック重機の位置を表し、平面判定は1mごとのグリッドで示している。平面判定幅は、現場係員の目視認識との差異が最も適していた±20mmを設定している。

同結果から、締固めが進むに連れて、平らになっている領域（赤）が広がっていく様子がわかる。

装置Cは、防水ケースで保護した形で重機への搭載を行っている。同装置のデータを処理は、WindowsPCを用い、同PCを重機のオペレータ室内に設置した。このPCで、装置Cの観測制御と分析表示までを行っている。

同重機はさらにGPSアンテナを2台搭載し、重機の位置ならびに方向を取得することができる。実際に運用する場面では、これらの情報を統合し、図6に示すような表示画面を用意し、締固めが随時どの程度進んでいくかを確認できるシステムとして提供する。

4. 考察

今回開発した機能により、下記の効果が期待される。

- ・締固め完了、未完了箇所が明示されるため、締固め不足箇所を速やかに見つけて、対処できる。
- ・バイバックオペレータの熟練度等の個人差が解消され均質、安定した締固め品質を確保できる。
- ・締固め作業のトレーサビリティの記録が残る。

今回利用した3Dスキャナは屋外でも十分機能し運用も容易であった。一方スキャン時間は20秒以下に設定することが難しく、今後の高速化が望まれる。

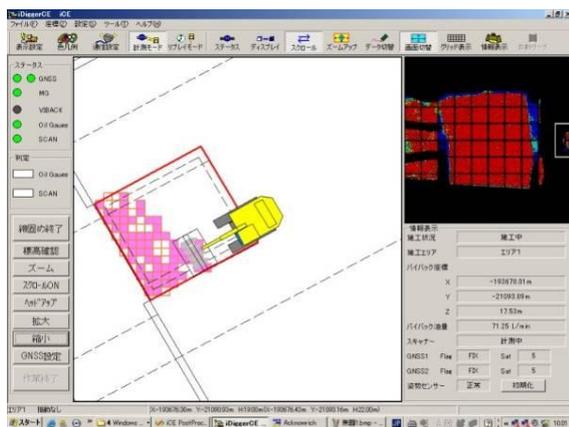


図6 表示インターフェース例

5. おわりに

我々は、3Dスキャナを用いた締固め評価方法を見出し、実際の重機に実装・評価試験を通して同装置の有効性を確認した。

今後、打設が本格化するダム現場にて本システムの実証を進めて行く。さらに、油圧系の評価を加え、位置計測精度、締固め判定精度の検証、改良を行い、締固め管理システムとしての有効性を高めていく予定である。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書（施工編），2011.
- 2) 菊池雄一，和田孝史他：レーザー光を用いた自動掘削システム，第2回建設ロボットシンポジウム論文集，pp.283-290，1991.
- 3) 皿田滋，小谷内範穂他：ステレオビジョンとレーザーレンジファインダによる積み込み作業のための堆積位置及び形状の計測，第11回建設ロボットシンポジウム論文集，pp.315-320，2008.
- 4) 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，第15回建設ロボットシンポジウム論文集，2015.
- 5) 浜本 研一，黒沼 出他：自律型自動振動ローラの開発とダム工事での実用，第15回建設ロボットシンポジウム論文集，2015.
- 6) 田中雅博：デプスセンサによる路面と壁面の検知方法，View2013 ビジョン技術と実利用のワークショップ講演概要集，pp.94-95，2013.
- 7) 橋本学：物体認識のための3次元データ処理，View2015 ビジョン技術と実利用のワークショップ講演概要集，pp.22-23，2015.
- 8) 金崎朝子：ロボットの目を作る RGBD画像処理による三次元世界の物体認識，第21回画像センシングシンポジウムダイジェスト集，2015.
- 9) 竹内啓五他：小型ハンディスキャナによる文化財の計測，2013年日本建築学会学術講演梗概集，pp.193-194，2013.
- 10) PCL：<<http://pointclouds.org/>>（入手 2016.4.1）.