

CSGを対象とした締固め品質の面的管理の実用化と造成工事への展開

鹿島建設(株) 正会員○岡本 遥河 正会員 田中 恵祐
正会員 村上 寛太 正会員 岡本 道孝
正会員 松本 孝矢 正会員 大井 篤
国土交通省東北地方整備局 岡崎 正秀 阿部 恵也

1. はじめに

ダム建設プロジェクトの高い経済効率と環境負荷の低減を実現することを目的とした台形CSGダム技術は、設計・材料・施工の3つの合理化を目指して我が国で開発された¹⁾。2012年に最初の台形CSGダムとして、当別ダム（北海道石狩郡当別町）が完成した。台形CSGダムの建設は、CSGの高速大量連続施工を前提としており、品質管理にも連続性と迅速性が求められる。CSGの打設では、締固めエネルギー管理として振動ローラの転圧回数管理が実施されるが、これと併せて現場密度試験も施工日ごとに行う必要がある。CSGの打設作業そのものに関しては自動化重機の導入といった技術革新²⁾が進められ、生産性が向上した。一方、CSG打設後の品質管理においては、人力による現場密度試験（砂置換法やRI法）が実施されている状況である。これらの試験は試験孔の削孔といった苦渋作業を伴い、実施頻度も高いことから、多くの人員が長時間従事する必要がある。品質管理試験の省人化・省力化と生産性向上が望まれていた。また作業の性質上、抜き取り検査とならざるを得ず、大量に打設されるCSGの品質を数点の試験結果で管理することしかできなかった。これはCSGだけでなく、土構造物の締固め品質管理にも共通する課題である。

そこで、品質管理試験の省人化・省力化とCSGの締固め品質の面的管理の実現を目指して、比抵抗法を用いた「現場密度の面的測定システム（Geo-DX Compaction®）」（以下、本システム）を開発した³⁾。本論文では、本システムの概要および成瀬ダム堤体打設工事への適用実績、今後の造成工事への展開に向けた活用事例について報告する。

2. 成瀬ダムの概要

成瀬ダムは、日本有数の豪雪地帯である秋田県南部の雄物川水系に位置する多目的ダムであり、堤頂長 755m、堤高 114.5m、堤体積 4,850,000m³、総貯水容量 78,500,000m³、有効貯水容量 75,000,000m³ で日本最大の台形CSGダムである。成瀬ダムでは、CSGの打設は2020年6月に開始され、2024年11月20日に完了した（写真-1）。CSGを連続製造するため3ラインのプラント（最大 1,080m³/h）を稼働させ、2023年5月に 281,000m³を打設し、国内ダム建設工事における月間打設量記録を更新した。



写真-1 CSG打設完了後の成瀬ダム

キーワード CSG, 締固め, 品質管理, 比抵抗, 面的管理, 生産性向上

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株) 技術研究所 TEL 042-485-1111

3. 従来の品質管理

C S Gの品質管理では、C S G強度を確保するため、C S G製造プラントにおける計量管理（C S G材の質量、給水量、セメント量）と振動ローラの転圧回数管理（締固めエネルギー管理）、打設されたC S Gの現場密度（湿潤密度）とC S Gの強度の変動傾向の監視が行われている。現場密度の測定は、砂置換法（写真-2）が基本だが、現場密度の計測結果の一致性が確認できた場合、作業がより簡便なRI法（写真-3）に移行することになっている。ただし、RI法によるC S Gの現場密度試験は施工日ごとに3箇所以上で行う必要があり、砂置換法と比べて短時間ではあるものの、成瀬ダムでは3名の試験員を従事させる必要があった。また、RI法による現場密度試験は、前述した試験孔の削孔に加え、試験装置（約20kg）の運搬や放射線量のバックグラウンド値の取得も伴うため、相応の労力と時間を要するものとなっている。



写真-2 砂置換法



写真-3 RI法

4. 開発技術の概要

本システムは、C S Gの現場密度が大きくなるに伴い比抵抗が小さくなる相関関係（以下、検量線）を利用している（図-1）。試験施工などで予め検量線を取得しておき、これを用いて、現場で測定したC S Gの比抵抗から現場密度を算出する。比抵抗の測定には、キャパシタ型電極（図-2）を使用する。これは、1組（2枚）の平板電極を搭載した誘電体を地盤に2組（送信用、受信用）設置し、一定の離隔（電極間隔）を保持して牽引しながら連続的に比抵抗を測定するものである。1組の電極を電流電極とし、もう1組を電位電極とするもので、電流電極に交流電流を印加させたときに、電位電極側に励起される電圧をもとに地盤の比抵抗を測定でき、測定中にリアルタイムに現場密度を算出する。なお、電極間隔を変えることで比抵抗の測定深度を調整できるため、本システムは1層あたりの平均的な密度を求めることができる。

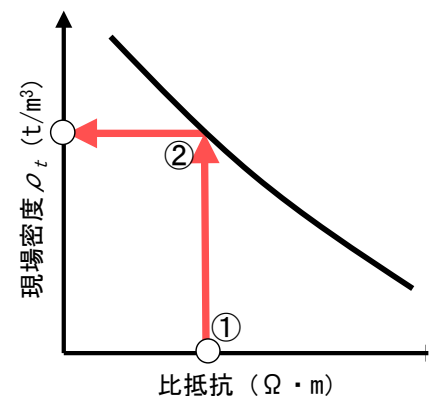


図-1 比抵抗と密度の相関関係

5. 成瀬ダムへの適用実績

(1) 検量線の取得

前述のとおり、事前に検量線を取得する必要があるため、C S G打設面上の同一箇所において、直流電気探査⁹⁾とRI法を実施し、比抵抗と現場密度を取得する。検量線の取得状況を写真-4に示す。直流電気探査では、4本のピン型電極を0.3m間隔で打設面に直線状に打ち込み、比抵抗を測定する。このときの測定深度は0.3mとなる。また、RI法でも線源棒の挿入深さを0.3mとして現場密度を測定する。試験施工などにお

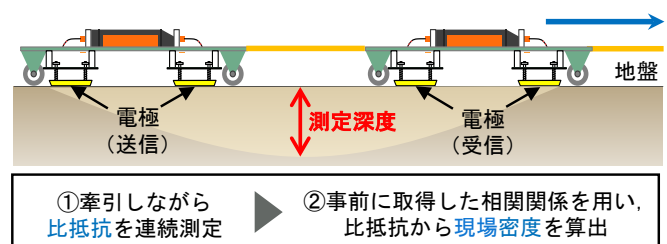


図-2 キャパシタ型測定装置の概要



写真-4 検量線の取得状況

いて、CSGの敷均し完了直後や各回数の転圧終了後にこれらの測定を行うことで、図-3に示す検量線を取得することができる。

台形CSGダムでは、低標高部から高標高部に至るまでに様々な配合のCSGが打設される⁵⁾。更に、成瀬ダムでは、段丘材と破砕材の2種類の材料を混合してCSG材として使用している。また、段丘材が4種類に細分されるため、段丘材の種類や、段丘材と破砕材の配合比、単位セメント量に応じて検量線を取得し、各配合でこれらを使い分けすることとした。

(2) 測定概要

本システムを用いた現場密度の測定状況を写真-5に示す。測定装置を四輪バギーによって2~3km/hの速度で牽引しながら、CSG打設後の転圧面全域を走査してCSGの現場密度の面的測定を行った。このとき、CSGの1リフト(75cm)の平均的な密度を測定できるように電極間隔を調整した。また、測定結果は測定用PCボックス内のモニターにリアルタイムに表示される。

(3) 試験導入時の測定結果

成瀬ダムでは、CSGの締固め品質管理手法として、従来法と併用しながら2022年に本システムを試験導入し、測定精度の向上や牽引方法の改良を重ねてきた。試験導入時の測定結果を図-4に示す。同一エリア内で本システムと従来の現場密度試験を実施した結果、両試験の測定深度は異なるものの、その誤差は $\pm 0.05 \text{ t/m}^3$ と小さく、従来の現場密度試験と同等の精度を有することを確認した。上記の結果から本システムを利用したCSGの締固め品質管理が可能と判断し、2024年4月から従来の現場密度試験であるRI法の代替としてCSGの締固め品質管理に採用した。

(4) 実運用時の品質管理概要

2024年に施工した40リフト(804,681 m^2)を対象に本システムによる品質管理を実施した。成瀬ダムでは、CSGの打設制限時間内(6時間)でCSGの製造から転圧までの1サイクルを完結させるための作業エリア(打設ブロック)を管理単位としており、CSGの現場密度試験によってCSGの製造~打設の各プロセスにおけるCSGの品質管理システムが有効に機能していることを確認している。そのため、本システムでは、打設ブロックごとに現場密度の平均値を求めて、品質管理を実施することとした(図-5)。

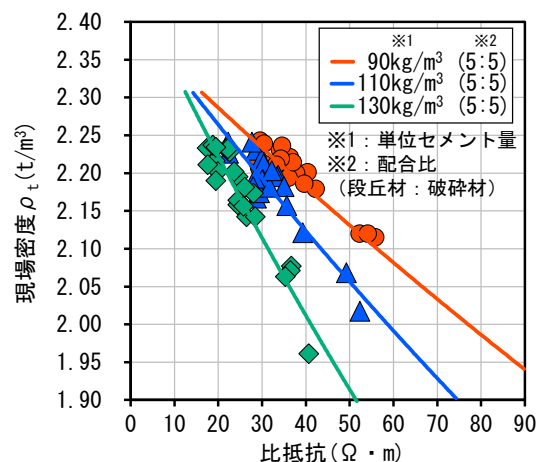


図-3 検量線(比抵抗と現場密度の相関)



写真-5 成瀬ダムにおける測定状況

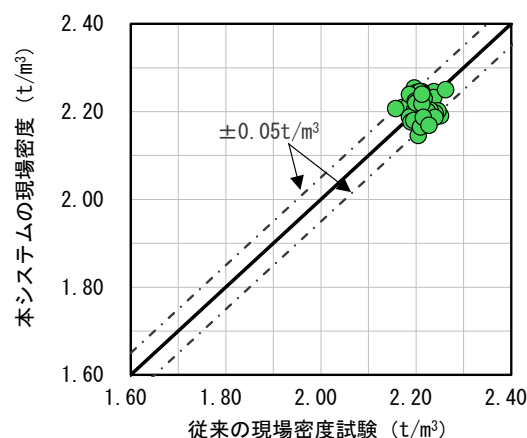


図-4 従来法と面的測定システムの比較

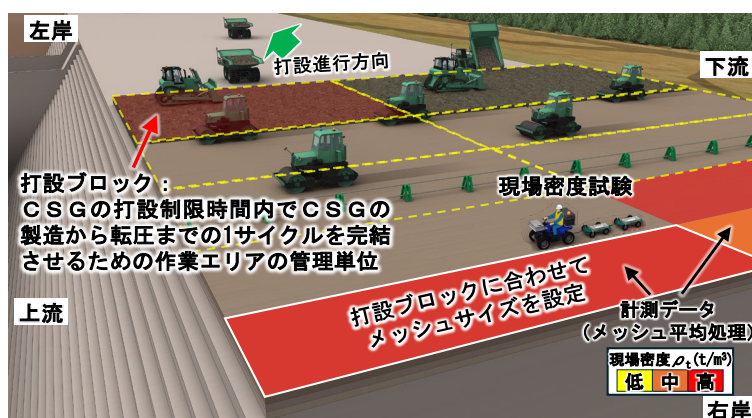


図-5 従来法と本システムの比較

5) 実運用時の品質管理結果

C S G打設後の品質管理結果一例を図-6 に示す。抜き取り検査では不可能であった締固め品質の面的な分布が可視化されていることが分かる。またこの図から、打設面全域で高い現場密度が得られていることも確認できる。図-7 に40 リフト分の現場密度のヒストグラムを示す。全体に占める割合は僅かだが、今回の測定範囲には現場密度が目標よりも小さい箇所 ($\rho_t=2.15\text{t/m}^3$ 未満) が生じている。これら全ての箇所で RI 法を行ったところ、全てで目標密度を満足する結果が得られた。現場密度が小さい箇所では、礫分の集中に伴う空隙が確認され、この影響で比抵抗が大きくなったため、現場密度が小さく評価されたものと考えられる。今後は、このような影響を把握して計測結果を補正する方法についても検討を進めている 9)。

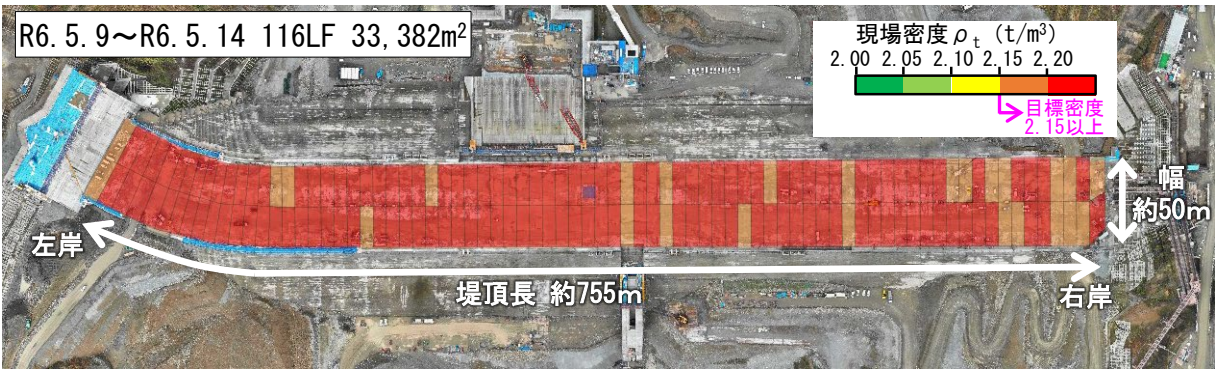


図-6 現場密度ヒートマップ例

6. 本システムの導入効果

本システムの導入前後の比較を図-8 に示す。従来の現場密度試験で要していた3名の試験員を、本システムでは測定装置を牽引するバギーの運転者1名に削減し、C S Gの締固め品質管理試験の約7割の省力化を実現した。また、従来の現場密度試験では、広域な施工面に対して、試験孔数点の現場密度しか得ることができなかったが、本システムでは連続測定した地盤の比抵抗をもとにリアルタイムに現場密度を面的に算出できる。さらに、測定深度についても前述のとおり、電極間隔を調整することで変更可能であるため1リフト分の平均的な現場密度を測定でき、従来よりも実効性の高い品質管理を実現した。

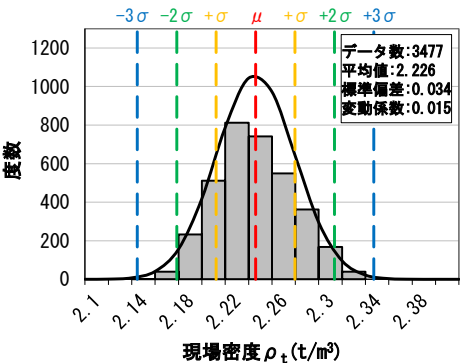


図-7 現場密度のヒストグラム

	導入前（従来法）	本システム導入後
試験状況		
作業人員	昼夜を問わず、7～8名の試験員（RI法の場合：3名） （昼夜で14～15名（RI法の場合） 昼夜で6名）	昼夜1名ずつの牽引機の運転員 （昼夜で2名）
試験時間 測定頻度	3点／時間 3点／日	1秒／回（4000～5000m²／時間） リアルタイムかつ面的に現場密度を把握できる。
測定材料	1日に施工した膨大なC S Gを対象に、3点のみで試験を実施。	1日に施工したすべてのC S Gを対象として現場密度を測定可能。
測定深度	30cm	75cm（電極間隔を調整することで深度を変更可能）

図-8 従来法の現場密度試験と面的測定システムの比較

7. 造成工事への展開に向けて

今後は、本システムを道路盛土や敷地造成などの一般的な造成工事にも展開し、土構造物の品質管理の省人化・省力化を進める予定である。造成工事における盛土の締固め品質は、空気間隙率や乾燥密度で管理することが一般的であり、この管理を実現するためには、比抵抗法に加えて、地盤の水分量を把握する必要がある。このため造成工事の品質管理では、移動式散乱型 RI 水分計と比抵抗法を併用したシステムを使用する（写真-6）⁷⁾。ここでは、以下、移動式散乱型 RI 水分計と締固め品質管理のフローを説明するとともに、測定結果例を紹介する。

(1) 移動式散乱型 RI 水分計の概要

散乱型 RI 水分計は、線源から放出される速中性子線が土構造物中の水素原子と衝突した際に運動エネルギーを失って熱中性子に変化する特性を利用したもので、水素原子と衝突して跳ね返った熱中性子線の数を検出管によってカウントして体積含水率に換算する⁸⁾。既製の散乱型 RI 水分計では、移動測定時において計測精度が低下してしまうことから、本システムでは検出管を増設することで、移動計測時でも静置計測と同等の精度を確保できるようにした移動式散乱型 RI 水分計を使用している（写真-7）。

(2) 面的管理における締固め品質管理フロー

図-9 に、造成工事における締固め品質の算出フローを示す。盛土材はC S Gよりも含水比の変動が大きく、湿润密度 ρ_t よりも空気間隙率 v_a の方が比抵抗と高い相関性を示すことが多いため、検量線を用いて比抵抗から v_a を算出する。次に、散乱型 RI 水分計を用いて体積含水率 θ を計測する。これらの測定値を用いることで、式(1)、(2)から乾燥密度 ρ_d と含水比 w を算出することが可能となる。このとき、 ρ_s は土粒子密度、 ρ_w は水の密度を示す。

(3) 品質管理結果例

図-10 に乾燥密度と含水比の面的測定結果の例を示す。

こちらは振動ローラの転圧輪幅約2mに合わせて、2m×2mのメッシュで平均化処理した結果である。このように比抵抗法と散乱型 RI 水分計を組み合わせることで、乾燥密度 ρ_d と含水比 w の面的分布を可視化できる。

今後は、これら技術を用いてデータを蓄積するとともに、土構造物の性能評価に活用する方法についても検討する予定である。

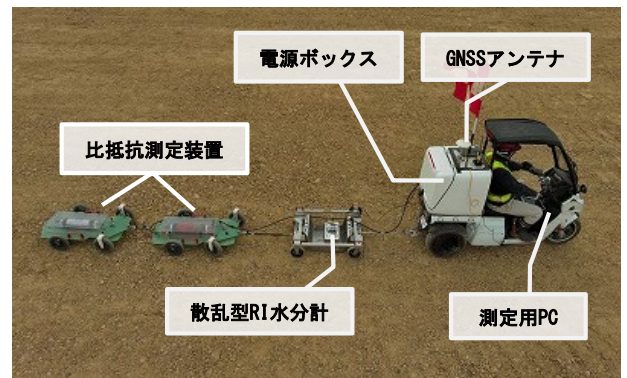


写真-6 造成工事における測定状況

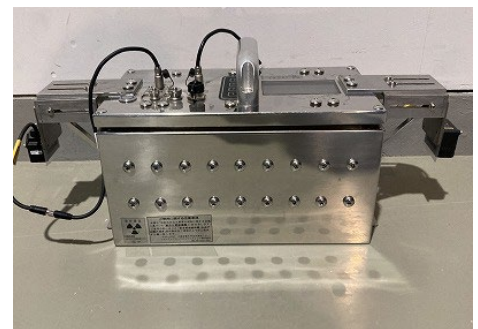


写真-7 移動式散乱型 RI 水分計

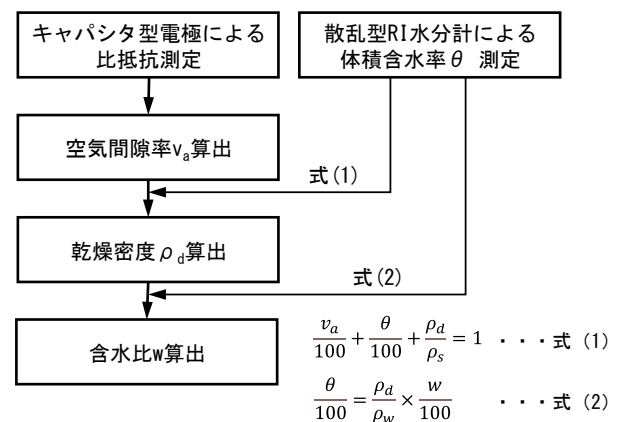


図-9 造成工事における締固め品質管理フロー

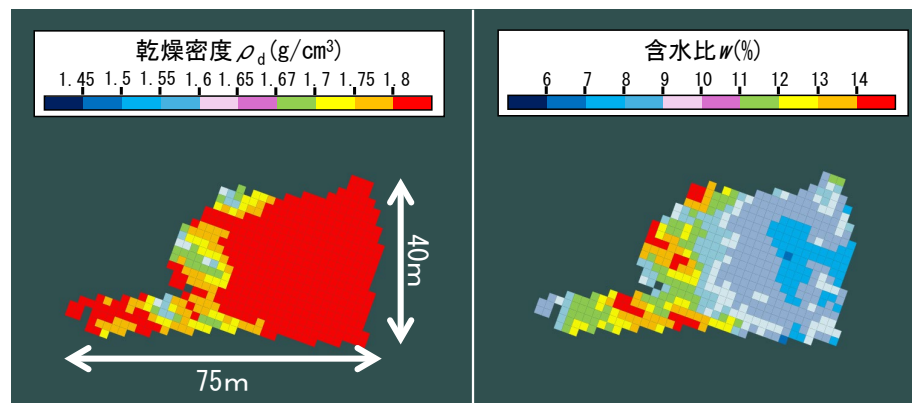


図-10 品質管理結果例（左：乾燥密度 ρ_d 、右：含水比 w ）

8. おわりに

建設業界では入職者の減少や高齢化という課題が深刻であり、ICT や AI 技術を駆使して、建設工事全体の省力化および自動化を進めることが重要である。本システムは、最先端のセンシング技術によって得られるデジタルデータを活用することによって台形CSGダム建設における品質管理の人的労力や苦渋作業を削減するもので、国内最大級の台形CSGダムを建設する成瀬ダム堤体打設工事において品質管理技術として適用し、安全で生産性の高い建設現場の実現に寄与した。成瀬ダムでは、開発技術を導入して、品質管理試験の省人化・省力化を実現しつつ、CSGの強度についても所定の性能を確保できていることを確認した。さらに、今後は測定装置の自動化を進め、より一層の省人化・省力化を図る予定である。

なお、面的管理の導入によって膨大な品質データが取得されることになり、その一部に規格を満足しない結果が含まれることも想定される。本システムの導入を推進する上で、このようなデータに適した品質管理の考え方を整理することも重要である。

最後に開発技術の現場導入に際し、(一財)ダム技術センターから多大なるご指導いただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

9. 参考文献

- 1) (財)ダム技術センター：台形CSGダム設計・施工・品質管理技術資料，2012.
- 2) 菅井貴洋，三浦悟，出石陽一，浜本研一，青木恒，尾村大輔，佐藤周平：成瀬ダムにおける完全自動化システムの実現，令和 6 年度土木学会第 79 回学術講演会，VI-101，2024.
- 3) 田中恵祐，岡本遥河，村上寛太，岡本道孝，松本孝矢，大井篤，小林弘明，佐藤尚司，福沢翔，工藤陸：台形CSGダムにおける締固め品質の面的計測（その 2）－新キャパシタ型電極と牽引機を用いた広域計測－，令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会，VI-502，2024.
- 4) 岡本遥河，小原隆志，松本聡碩，福島陽，岡本道孝：比抵抗と盛土締固め品質の相関関係の評価方法，令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会，III-402，2023.
- 5) 岡本遥河，田中恵祐，村上寛太，岡本道孝，松本孝矢，大井篤，小林弘明：台形CSGダムにおける締固め品質の面的計測（その 1）－検量線（比抵抗と現場密度の相関関係）の取得－，令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会，VI-501，2024.
- 6) 岡本遥河，大竹雄，柴田大河，田中恵祐，岡本道孝，肥後陽介：非定常ノイズ除去による比抵抗の空間分布推定，第 64 回地盤工学シンポジウム，p.144-147，2024.
- 7) 山地伸弥，岡本遥河，田中恵祐，村上寛太，岡本道孝，松本聡碩，小原隆志，モウ大喜：散乱型 RI 水分計と比抵抗計測を併用した盛土締固め品質の面的測定，令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会，VI-515，2024.
- 8) 松本聡碩，岡本道孝，小原隆志，福島陽，岡本遥河：盛土締固め品質の全量管理のための体積含水率の面的計測手法，令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会，VI-898，2023.