

# 3次元点群データを用いた締固め管理システムの開発

山田淳夫<sup>\*1</sup>・伊藤歩夢<sup>\*1</sup>・荻原 績<sup>\*2</sup>

低レベル放射性廃棄物処分施設の埋戻し工事では、ベントナイト混合土による覆土を行う計画となっており、その施工管理では、出来形のみならず、所定の密度で締固められているのかを面的に管理することが求められる。こうした要求を満たす目的で、転圧前後の層厚変化を3Dスキャナで測定し、「圧縮率（転圧前の厚さに対する転圧後の厚さ）」を求め、その面的分布より転圧の過不足を求められるシステムを開発した。

施工試験を実施し、本システムの現場への適用性確認を行った。本システムによって圧縮率の分布表示が取得され、転圧の過不足の場所をメッシュ単位で検出できることを確認した。

キーワード：放射性廃棄物処分、ベントナイト混合土、品質管理、締固め、乾燥密度、面的管理

## 1. はじめに

放射性廃棄物処分場の核種漏洩抑制のための人工バリア（本論文では低透水性覆土とする）は、ベントナイト単体もしくはベントナイト混合土を用いて構築する計画となっている<sup>1)</sup>。この低透水性覆土の主要な性能は、浅地中ピット処分の場合、透水係数で $1.0 \times 10^{-10}$  m/s以下という高い水準が求められる。このような低透水性覆土の締固め管理には、一般的な土工事で行われている工法規定方式の管理方法の適用が考えられる。この管理方法を適用する場合には、透水係数と締固め度＝乾燥密度との間に相関関係が認められることを利用する。すなわち、透水係数の代替指標として乾燥密度を管理すれば、透水係数を間接的に管理できるということを前提とする。工法規定方式では、数百 m<sup>3</sup>～数千 m<sup>3</sup>につき1回という測定頻度の現場密度試験から施工後の乾燥密度を確認している<sup>2)</sup>。これは、施工機械・敷均し厚さ・転圧回数が一定の場合に、施工後の品質はあるばらつきの中で確保されるという仮定に基づき測定値が土構造物全体の代表値であるとみなすものである。しかし、近年において現場密度試験位置以外の部分についても施工後の品質を確認する需要が高まってきている。

このような状況に対応するように、トータルステーション（TS）と全地球航法衛星システム（GNSS）による位置情報を活用した転圧回数管理方法<sup>3)</sup>や、転圧時に測定できる加速度応答値CCV（CCV：Compaction Control Value）を利用した品質規定方式による管理方法<sup>4)</sup>のような面的に管理可能な方法が提案されている。

これらの方法のうち、TS・GNSSによる方法は根本的に転圧回数と軌跡管理を行うにとどまる。いわば、工法規定方式の延長線上の方法であるといえる。

CCVによる方法では、トンネル内やクローズド処分施設のような屋根がかけられた施設内での適用が困難であることが欠点として挙げられる。また、本論文で対象とするベントナイト混合土への適用において、応答加速度および飽和度より乾燥密度を評価することが困難であった。

そこで、本論文では、3Dスキャナで取得した3次元点群データを活用し、圧縮率、（転圧前の厚さに対する転圧後の厚さ）の面的分布より転圧の過不足を求められる締固め管理システムを開発することとした。

## 2. 3Dスキャナを用いた締固め管理システム

### 2.1 これまでの関連研究の経緯

3Dスキャナを利用する方法に関するこれまでの関連研究の事例を次に示す。

石濱ら<sup>5)</sup>は、様々な機種種の3Dスキャナを用いて高さ測定を行い、図-1に示すような転圧前の乾燥密度と転圧前後の層厚変化による「圧縮率（転圧前の厚さに対する転圧後の厚さの比率）」から転圧後の乾燥密度を推定した。

この実験では、測定箇所をメッシュで区切り、メッシュ内の点群データの平均値をそのメッシュの平均高さとし、転圧前後の層厚変化をメッシュ毎に求める方法を検討した。この時、一つのメッシュにおける点群データのデータ密度は10点以上とすることや最遠点への照射角を5°以上にするなど3Dスキャナの測定仕様を

\*1 原子力部 \*2 エネルギー事業技術部

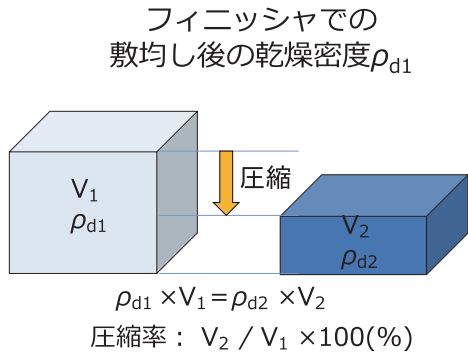


図-1 圧縮率と乾燥密度の変化の概念図

定めている。

田嶋ら<sup>6)</sup>は、3D スキャナの点群データの処理におけるメッシュサイズを検討した。これは、礫材などのエラーデータとなりうる局所的な不陸の影響を低減するというものである。田嶋らはメッシュサイズを 100 mm 平方、250 mm 平方、500 mm 平方の 3 種類の比較を行い、この中で礫材等の影響を排除できるメッシュサイズのうち、小さい方のサイズとして 250 mm 平方程度が最適であることを示した。

これらの既往検討結果より、3D スキャナを用いて、圧縮率による面的な締固め管理が可能であるという見通しを得た。

## 2.2 締固め管理システムの要件

図-2 に締固め管理システムの概念図を示す。締固め管理システムは、3D スキャナと現場に設置した PC (BOX PC) をモバイルルーターで有線接続し、ルーターからクラウドサーバー経由により、遠隔操作で測定～データ処

理・測定結果取得までを事務所でもできるようにすることを目標とした。また、冒頭で紹介した TS・GNSS による方法や CCV による方法のように、転圧施工後に、現場において、速やかに転圧の過不足を把握できることも目標とした。

すなわち、締固め管理システムの要件は、① 3D スキャナデータより、圧縮率の面的な分布を表示すること、② クラウドサーバーを用いて遠隔地での管理をできるようにすること、③ 測定から 10 分以内でデータ取得ができること、④ 圧縮率で締固め管理ができること、とした。

これらのシステムの要件のうち、①は上述の要件に加え、田嶋ら<sup>6)</sup>の検討結果を受けて、施工条件などの計測対象ごとに最適なメッシュサイズがあると考え、任意のサイズのメッシュで測定結果を表示できるようにした。本論文では、メッシュサイズを変更した時の表示結果の差についての議論はしないが、施工試験の結果を圧縮率の面的な分布として表示できるのかを確認した。

②は遠隔操作を想定し、様々な端末からの操作が容易になるようにすること、現場で速やかにデータ取得を可能とすることより、クラウドサーバーを用いたシステムとなるような要件とした。

③は現場において、転圧の過不足を判断できるまでの時間を要件として設定した。計測開始からデータ表示までの目標時間を 10 分間とした。本論文では施工試験を行い、②の要件の確認と合わせて、現場でノートパソコンやタブレット端末から遠隔操作を行い、計測結果表示までを 10 分間以内でできるのかを確認した。

④は、ある圧縮率以下の層厚になるまで転圧を行えば、目標の乾燥密度となることより、圧縮率で締固め管理を

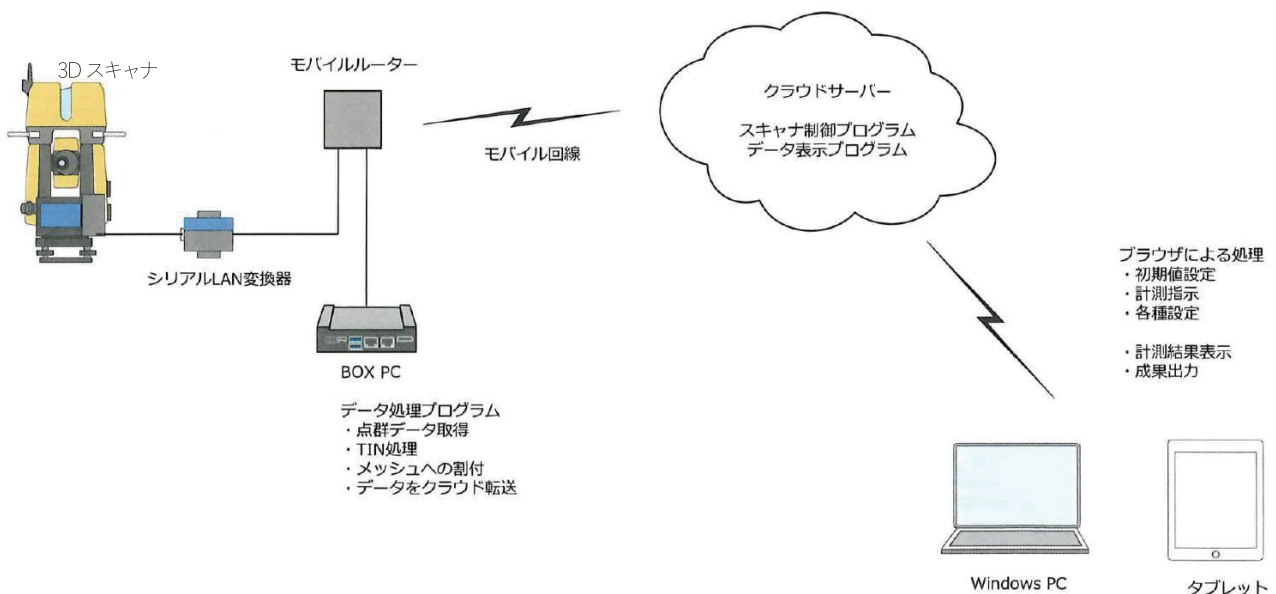


図-2 締固め管理システムの概念図

行うことを要件とした。本論文では、所定の圧縮率以下になった箇所現場密度試験を行い、目標の乾燥密度に到達しているかを確認した。

要件①～④のうち、④の要件については、設定の根拠として圧縮率と乾燥密度の関係を示す必要があると考えた。次節にて、既往の検討で示された施工試験<sup>7)</sup>結果を参照し、圧縮率と乾燥密度の関係を示すとともに、圧縮率のしきい値の設定を行う。

### 2.3 圧縮率と乾燥密度の関係

著者らの行った既往の施工試験結果<sup>7)</sup>を参照し、圧縮率と転圧後の乾燥密度との関係を整理する。まずはその施工試験の概要を以下に示す。

既往の施工試験<sup>7)</sup>に用いた材料は、Ca型ベントナイトとコンクリート用細骨材である。これらを乾燥質量比30:70で混合し、ベントナイト混合土を製造した。この時の含水比は $w = 19\%$ とした。敷均しは小型フィニッシャーを用いて延長10m、幅2m、厚さ100mmで実施した。その後、コンパインドローラによる予備転圧（無振動）、小型振動ローラ（1.5t級、振動転圧）の順に転圧した。転圧途中でレベル測定を行い、高さの変化が無くなるまで振動転圧を繰り返した。高さ変化が無くなる振動転圧回数は6回であった。施工状況のうち、転圧状況を写真-1に示す。

施工後に、コアカッター法<sup>8)</sup>で1層あたり20点の現場密度試験を実施した。この時、コアカッター法での測定点においてもレベル測定を行っているため、その結果より圧縮率を算出した。コアカッター法による乾燥密度とレベル測定結果による圧縮率の関係を図-3に示す。

圧縮率は40～55%の範囲に収まった。この時の乾燥密度は1.65～1.75 Mg/m<sup>3</sup>の範囲に分布する結果となった。この範囲の圧縮率の間では、乾燥密度はあるばらつき幅を持っているものの、平均値付近の一定値とみなせる。高さが変化しなくなるまで、すなわち振動転圧により高さの変化が無くなるまで材料を圧縮することで、その施工条件での最大の乾燥密度に収束したと考えられる。この収束した乾燥密度が目標の乾燥密度以上であれば、目標の品質を確保したとみなせる。

このことより、既往の施工試験<sup>7)</sup>と同じような材料条件（ベントナイトと砂の混合土で、その混合比率が乾燥質量比でベントナイト30:砂70程度）、同じような施工条件（材料の敷均し厚さ;100mm程度、転圧後厚さ;50mm程度）であれば、ある圧縮率以下まで転圧を繰り返した時の圧縮率を確認することで、目標の乾燥密度に

到達したかの確認ができるといえる。

本論文では、暫定目標として、ベントナイトの混合率（乾燥質量比）が20～30%、敷均し厚さ100mm～150mmの時の圧縮率を50%以下とすることとした。

その他の施工条件、特に敷均し厚さが150mmを超過する場合には、別途圧縮率を設定する必要があると考えられる。これは、既往の検討<sup>9)</sup>で敷均し厚さ200mm、転圧後の厚さ100mmで施工を行った事例で、同一層内でも鉛直方向に乾燥密度の分布が認められたためである。

したがって、転圧後に同一層内でも鉛直方向に乾燥密度が分布するような厚さとなる場合は、圧縮率の設定値の検討を行う必要がある。



写真-1 既往検討<sup>7)</sup>における転圧状況

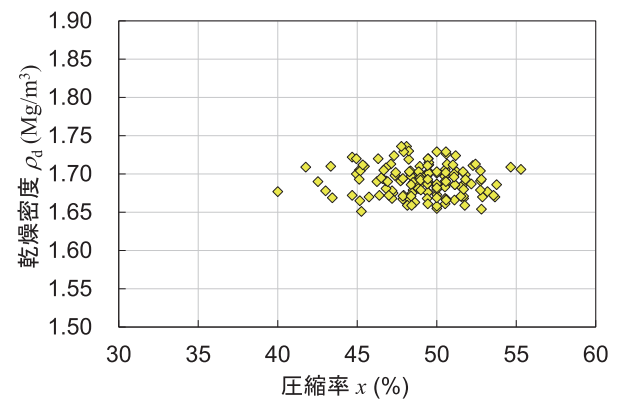


図-3 既往検討<sup>7)</sup>における乾燥密度と圧縮率の関係

## 3. 開発したシステムの現場での適用確認試験

本章では、開発した締固め管理システムの現場への適用性を確認するために実施した施工試験の結果について述べる。2章で説明した施工試験とは異なる条件での施工試験を行ったので、まず施工試験の概要について次節で説明する。

### 3.1 適用性確認試験の概要

写真-1で示した施工試験<sup>7)</sup>とは異なる施工条件で適

表-1 ベントナイトの材料特性

産地	青森県黒石
土粒子密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	2.59
pH	10.2
MBC (mmol/100g)	89
モンモリロナイト含有量 (%)	59.3
膨潤力 (ml/2g)	19

表-2 砂の材料特性

産地	青森県三沢
土粒子密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	2.73
細粒分含有率 (%)	0.2
最大粒径 (mm)	4.8
均等係数 $U_c$	4.2
曲率係数 $U'_c$	0.85



写真-2 施工試験の状況

用性確認試験を実施した。適用性確認試験に用いた材料として、表-1に示したベントナイトと表-2に示した砂を燥質量比ベントナイト 25 : 砂 75 で混合し、ベントナイト混合土を製造した。材料の撤出しは小型バックホウで、敷均しは人力でレーキを用いて行った。

施工延長 5 m のうち、延長方向の施工端部の 1 m ずつを除いた 3 m を試験区間とした。幅は 2m とした。層

厚は敷均し厚さ 150 mm (転圧後の仕上がり厚さ 72 mm 程度) で施工した。転圧は小型振動ローラ (1.5t 級) で行った。転圧は、高さ変化がなくなるまで行った。高さ変化が無くなるまでの転圧回数は、適用性確認試験でも 6 回であった。

転圧後に 3D スキャナで高さ変化を、コアカッター法で各層の乾燥密度を測定した。コアカッター法で 6 点を測定し、その測定位置における圧縮率を算出した。3D スキャナはニコトリンブル製 SX10 を使用し、照射密度は 20 m 先で 25 mm ピッチ (今回の最遠箇所 300 mm 平方メッシュ内で 150 点程度)、1 回のスキャニングにおいて約 35,000 点で照射した。施工試験の状況を写真-2 に示す。

### 3.2 締固め管理システムでの測定結果

締固め管理システムにより得られた 300 mm 平方のメッシュ毎の圧縮率の平面分布を図-4 に示す。図-4 に示したような圧縮率分布を取得できたことにより、システムの要件の一つである「①測定後に圧縮率の面的な分布を表示すること」が満足できた。

スキャニングデータは BOX PC での処理を経てクラウドサーバー経由でタブレット端末に表示され、測定開始・データ転送の指令も全てタブレット端末から行うことができるのを確認した。これにより、システムの要件「②クラウドサーバーを用いて遠隔地での管理をできるようにする」ことが確認できた。

今回の測定条件では、3D スキャナの測定からデータ

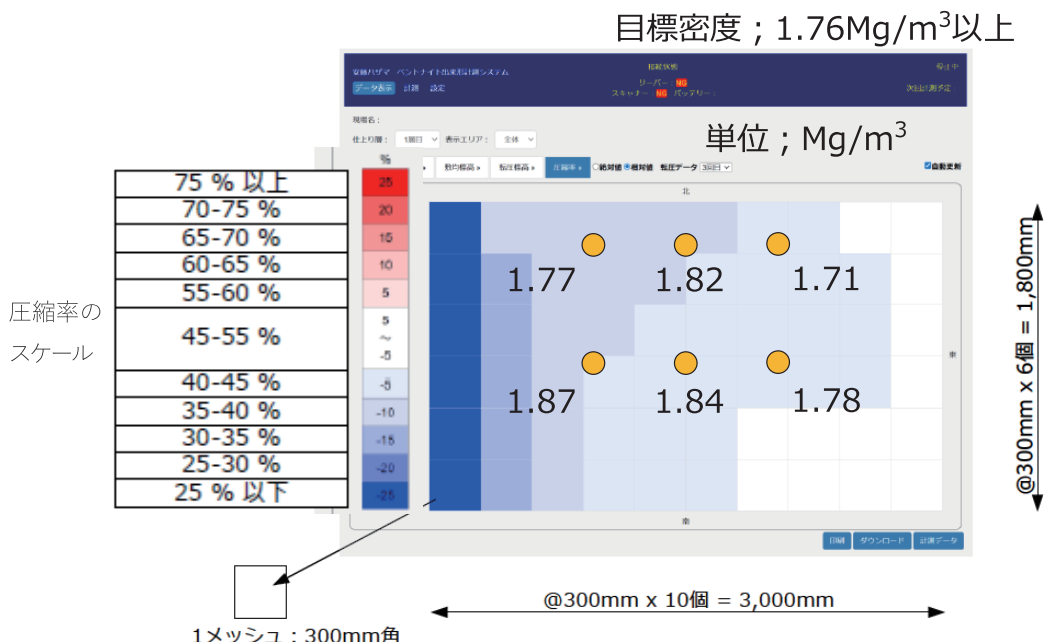


図-4 圧縮率の平面分布



取得・タブレットでの表示まで5分間であり、現場での速やかな確認ができることを確認した。1回のスキヤニングでの取得点群数は約35,000点程度であったが、データ取得までの時間は10分間以内を満足できることが確認できた。このことより、システムの要件の一つである「③測定から10分以内でデータ取得ができること」も満足できた。

次に、「④圧縮率で締固め管理ができること」を満足できたかの確認をする。図-4に示した圧縮率の平面分布では、図中左端の部分に圧縮率が35%未満の部分がある。これは、材料が転圧によって引き延ばされ、想定以上に薄く転圧されたことに加え、施工基盤のコンクリート床に図-4の左から右に向かって水が流れるような排水勾配がついていたためである。転圧による圧縮以外の影響によって層厚が想定以上に薄くなったので、この部分は評価対象から外すこととした。

圧縮率の分布は端部を除き概ね40～45%程度で分布している。この圧縮率まで転圧した場合の乾燥密度の測定値を、図-4上の測定位置に表示した。図-4に示した黄色の○印はコアカッター法での測定位置を示しており、○印周囲に付した数字はコアカッター法による乾燥密度の測定結果である。また、乾燥密度の目標値は、別途実施した透水試験結果より、十分に透水性能を担保できる乾燥密度の目標値として、暫定的に $1.76\text{Mg}/\text{m}^3$ と設定した。

圧縮率が50%を下回る場合、目標の乾燥密度を満足することも確認できた。すなわち、圧縮率のしきい値を50%とすれば目標の乾燥密度にできるといえる。このことより、システムの要件「④圧縮率で締固め管理ができること」を確認できた。

#### 4. まとめ

本論文で得られた成果を以下にまとめる。

締固め管理システムの4つの要件（①測定後に圧縮率の面的な分布を表示すること、②クラウドサーバーを用いて遠隔地での管理をできるようにすること、③測定から10分以内でデータ取得ができること、④圧縮率で締固め管理ができること）の全てを満足できるシステムの開発ができた。

本論文で適用性の確認を行った施工試験では、カバーしきれていない施工条件も考えられる。本論文で示した締固め管理システムの現場への適用性に関する現状での

課題を以下に示す。

- ・施工層厚が厚くなった場合、本論文で示した締固め管理システムが適用できない条件がある可能性がある。今回の層厚は敷均し厚さ150mm、転圧後厚さ70mm程度であった。これよりも転圧後厚さが厚くなる場合、層内での乾燥密度分布が生じることが考えられる<sup>11)</sup>。この層内の密度分布により乾燥密度と圧縮率の関係が損なわれ、圧縮率のみにより締固め管理ができない恐れがある。施工仕様が異なる条件で施工試験を実施し、層厚が異なる場合への適用性を確認する必要がある。
- ・既往の検討の知見<sup>7),10),11)</sup>を用いれば、圧縮率の面的分布のみならず、乾燥密度の面的分布を取得できる。この点も含めて、現場への適用事例を増やす必要がある。

これらの課題解消のためには、適用事例を増やすとともに、転圧後の層厚が厚く、層内の鉛直方向に乾燥密度が分布する場合の補正方法を検討する必要がある。

#### 参 考 文 献

- 1) 経済産業省・資源エネルギー庁ホームページ：放射性廃棄物について、低レベル放射性廃棄物、放射性廃棄物の区分と発生、[http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity\\_and\\_gas/nuclear/rw/gaiyo/gaiyo01.html](http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/gaiyo/gaiyo01.html), 2023.3.10 参照
- 2) 国土交通省；土木工事施工管理基準及び規格値（案）、<https://www.mlit.go.jp/tec/sekisan/sekou/pdf/300327kouji-sekoukanrikiun01.pdf>, 2018, 2023.9.19 参照
- 3) 国土交通省；TS・GNS Sを用いた盛土の締固め管理要領、<https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/content/001612921.pdf>, 2020.3, 2023.9.19 参照
- 4) 永井裕之、菊池喜昭、野田翔兵、兵動太一、龍岡文夫、小葉はるな、眞壁淳：迅速に測定した地盤剛性指標による盛土の締固め管理の合理化、地盤工学ジャーナル Vol.16, No.1, pp.75-85, 2021.1.
- 5) 石濱裕幸、田嶋宏之、永井裕之、千々松正和；レーザースキャナによる放射性廃棄物処分施設の遮水層の非破壊密度推定、第70回年次学術講演会講演概要集、土木学会、CS12-016, 2015.
- 6) 田嶋宏之、千々松正和、山田淳夫、荻原績；放射性廃棄物処分場における施工管理方法（その2. 3D レーザー測量による高さ管理）、第72回年次学術講演会講演概要集、土木学会、VII-053, 2017.
- 7) Atuso Yamada, Masakazu Chijimatsu, and Hideo Kominé; Method for Measuring Dry Density of Compacted Bentonite Mixture Soil Using 3D Laser Scanner data, WM2019 Conference, March 3 - 7, 2019, Phoenix, Arizona, USA, 19119, 2019.

- 8) 地盤調査規格・基準委員会；地盤調査の方法と解説 - 二分冊の2-, 第5章 コアカッターによる土の密度試験, pp. 801-807, 地盤工学会, 2013.
- 9) 山田淳夫, 千々松正和, 藤原斉郁, 矢田勤, 秋山吉弘, 小峯秀雄, 飯塚敦：放射性廃棄物の地下空洞型処分施設に用いる底部低透水層の転圧工法による施工品質の評価, 土木学会論文集C (知見工学), Vol. 71, No. 3, pp. 147-162, 地盤工学会, 2015.
- 10) 山田淳夫, 永井裕之, 千々松正和, 浪岡翔吾, 工藤淳, 増田良一, 矢込吉則；難透水性覆土の施工後品質測定における簡易手法による乾燥密度測定と補正に関する検討, 第72回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, VII-057, 2017.
- 11) 山田淳夫, 小栗光, 千々松正和, 伊藤歩夢：3D スキャナによる締固め密度推定方法の推定尤度に関する考察, 第57回地盤工学研究発表会概要集, 地盤工学会, 21-8-2-05, 2022.

---



---

## Development of finished dimensions and quality control system for compaction using 3-dimensional point cloud data

Atsuo YAMADA, Ayumu ITO and Isao OGIHARA

In the backfilling work for the low-level radioactive waste disposal facility, it is planned to cover soil with a bentonite mixture soil. In construction management, it is necessary to control not only the finished product, but also whether it is compacted to a predetermined density. In order to meet this requirement, we have developed a system that can determine the excess or deficiency of compaction based on the area distribution of “Compressibility (thickness after rolling compared to thickness before rolling)”. Compressibility is determined by measuring the change in layer thickness before and after compaction using a 3D scanner.

A construction test was conducted to confirm the applicability of this system to the field. We confirmed that this system can display the distribution of compressibility and detect areas of excess or deficiency in compaction on a mesh-by-mesh basis.