

CSG 海岸堤防における ICT 施工の取組み

前田建設工業(株) 正会員 ○秦 宗之
前田建設工業(株) 小山直輝

関根 智之 松浦 亜祐美
正会員 笹倉 伸晃

1. はじめに

仙台湾南部海岸は、東北地方太平洋沖地震による大津波に襲われ、海岸堤防がほぼ全域で全壊・半壊し、沿岸地域では甚大な被害が発生した。そのため、国土交通省は、既設直轄区間 12km と「代行法」による権限代行区間約 17km を合わせた約 29km に及ぶ海岸堤防の復旧を実施した。

堤防復旧においては、「粘り強い構造」を特徴とした 3 面張の傾斜堤が標準構造として採用されていたが、海と潟湖(井土浦)に挟まれた地形特性である井土浦地区(図-1)では、当該地区に最も適した構造として「CSG (Cemented Sand and Gravel) 構造」が採用された。

本稿では、国土交通省として初となる CSG 工法による海岸堤防復旧の概要と施工時の取組みについて紹介する。



図-1 施工位置図

2. 井土浦地区における CSG 構造採用の経緯

井土浦地区の堤防を復旧するにあたっては、津波により大幅に汀線が後退したため、海と潟湖(井土浦)に挟まれた地形特性から堤防の復旧箇所が狭隘(約 40～60m)であり、堤防の安全上必要となる前浜幅 30m を確保するため、汀線の回復状況を踏まえた堤防法線・堤防構造が求められた。また、希少な井土浦の汽水環境に隣接し、動植物が生息していることから、自然環境への配慮も必要であった。さらに、他工区の災害復旧工事における工事用道路等で使用した敷設材など、大量の現地発生材の処理の問題も抱えており、CSG 構造を含めた様々な構造による比較検討が行われた。

その結果、堤体底面幅を狭くすることが可能となり、必要前浜幅を確保できない区間を減少でき、砂浜の改変面積等、自然環境への影響も極力抑えられること。加えて、CSG の母材(材料)として、大量の現地発生材の有効活用が可能となることなどから、CSG 構造が最も優位であると判断し、井土浦地区の堤防復旧構造に採用されることとなった。

3. CSG(Cemented Sand and Gravel)とは

(1) CSG および CSG 工法について

CSG(Cemented Sand and Gravel)とは、建設現場近傍で容易に入手できる岩石質材料を分級、洗浄を行うことなく、セメントと水を添加し、簡易な混合設備を用いて製造したものである。また、CSG 工法は、CSG をブルドーザで敷き均し、振動ローラで転圧することによって構造物を造成する工法である。本工法は、台形 CSG ダムの堤体構築方法として実績を有し、永久構造物として必要強度が確保される。また、近年は、海岸堤防でも採用され、「粘り強い海岸堤防方式」としても実績を有する。

キーワード CSG, 堤防, 運行管理, ICT

連絡先 〒102-8151 東京都千代田区富士見 2-10-2 前田建設工業株式会社 土木技術部 TEL 03-5276-5166

(2)CSG 強度とひし形理論

CSG 材は、オーバーサイズカット後、分級、洗浄を行わないため、CSG 材粒度及び CSG 単位水量は変動し、その結果として、CSG の強度も変動する．このため、CSG 材粒度及び CSG 単位水量の範囲から求められる強度の範囲を単位水量との関係で整理した「ひし形理論」における強度の最低値が「CSG 強度」と定義される．(図-2)

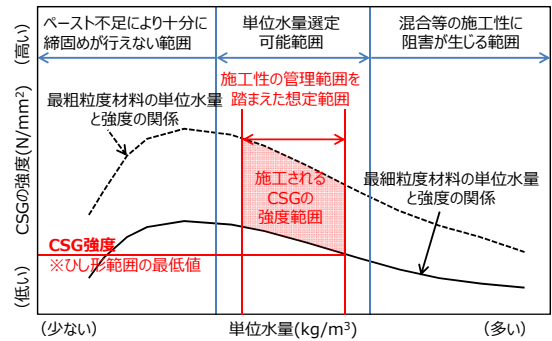


図-2 CSG のひし形理論

4. 工事概要

工事概要および主要工種の数量を表-1に示す．また、CSG堤の断面図を図-3に示す．

表-1 工事概要

工事名称	仙台湾南部海岸深沼南工区 井土浦地区堤防復旧工事
施工者	前田建設工業(株)
発注者	国土交通省 東北地方整備局
工事場所	宮城県仙台市若林区井土地先
工事概要	・ CSG 堤 延長:1,173m, CSG:61,900m³, 法勾配:1 : 0.8, 端幅:4.0m ・ 傾斜堤 延長: 86m, 盛土量:4,330m³, 法勾配:1 : 2.0, 天端幅:4.0m

5. CSG 施工仕様の検討

以下に本工事における施工仕様決定までの概要を示す．

(1)CSG 母材および必要 CSG 強度

各所に仮置きされていた CSG の母材(岩ズリ)は、CSG 材として最大粒径が 80mm 以下となるように全量破碎を行った．また、これら CSG 母材の粒度は一定ではないため、3 種類に分類(以下、A～C 材)した．さらに、CSG 母材(岩ズリ)のみでは必要な CSG 材量を確保できないことから、CSG 材に砂(名取川河口部の浚渫砂)を混合させることで CSG 材の全体量を確保した．なお、各 CSG 材は、砂の混合比率を変化させることで、一定の粒度範囲に調整し、1 つの「ひし形」での CSG の品質管理を行うものとした．

なお、井土浦地区 CSG 堤の必要 CSG 強度は、CSG 堤と基礎地盤を一体とした解析モデルによる 2 次元 F E M 解析結果から、0.81N/mm 2 と設定された．

(2)CSG 材粒度範囲の決定

CSG 材の粒度範囲は、実施工で使用する自走式破碎機(30t 級)を用いた破碎試験と破碎後の粒度試験により決定した．また、粒度試験結果より、異なる CSG 材(A～C 材)毎の現地発生砂の混合率を検討し、ひし形作成のための試験粒度(最細粒度、平均粒度、最粗粒度)を決定した．その結果、砂の混合率(重量割合)は、A 材に対して 4 割、B 材に対して 2 割、C 材は、そのまま利用することとした．

(3)室内標準供試体試験

室内試験では、(2)において決定した試験粒度における CSG のフレッシュ性状を把握し、施工可能な単位水

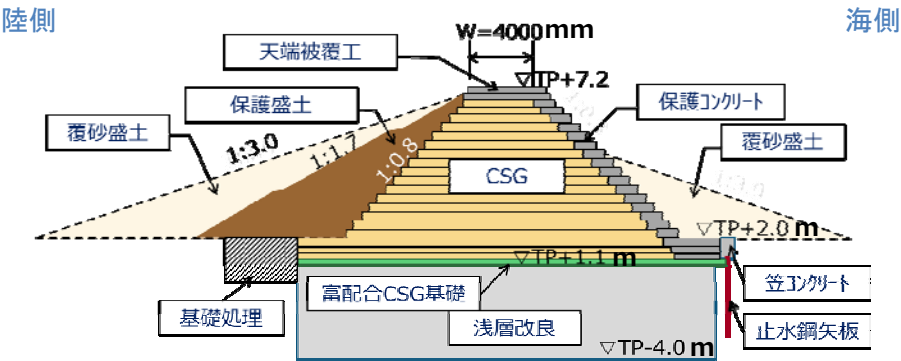


図-3 CSG 堤の断面図

量範囲を決定し、CSG 単位水量範囲を、120～150 kg/m³ とした。また、標準供試体（直径 150mm×高さ 300mm）の材齢 28 日圧縮強度から CSG 単位セメント量が 40 および 60kg/m³ の標準供試体による「ひし形」を作成した。

(4) 試験施工による CSG 施工仕様の決定

CSG 施工仕様は、実機混合設備の性能確認および実施工時の締固めエネルギー（転圧回数）、品質管理手法の決定を目的として、実施工で使用する混合設備および敷き均し、転圧機械を用いて以下の試験施工により決定した。

a) CSG 単位セメント量の決定

必要単位セメント量は、まず、同一材料を用いて実機混合設備と室内試験混合ミキサ（ポットミキサ）を用いて大型供試体（直径 300mm×高さ 600mm）と標準供試体の 28 日圧縮強度結果から、大型：標準供試体強度比およびポットミキサ：実機混合設備強度比を算出し、これらの強度比から、標準供試体による「ひし形」を補正し、大型供試体による「ひし形」を決定した。本工事における CSG 強度は、単位セメント量 60 kg/m³ 配合で 1.58N/mm²、単位セメント量 40 kg/m³ 配合で 0.90N/mm² となり、設計上の必要 CSG 強度（0.81N/mm²）との比較によって、単位セメント量は 40 kg/m³ に決定した。

b) 施工仕様と品質管理標準

CSG 施工仕様は、試験施工における現場密度および沈下量収束の観点から、転圧回数を無振動 2 回、有振動 8 回に決定した。また、現場密度と同等となる大型供試体の締固め機種および締固め秒数を決定し、これらの組合せを施工仕様および品質管理標準とした。

6. CSG 堤の施工概要と取組み

図-4 に CSG 堤の施工フローを示す。また、以下に CSG 堤構築概要と施工時における取組みについて紹介する。

(1) CSG 材混合および CSG 製造

CSG 材混合および CSG 製造は、CSG の高速製造および品質の安定化、環境負荷低減を目的として、プラント方式（当社が開発した重力利用型連続式混合装置「M-Y ミキサ」を用いた CSG 製造プラント）を採用した。

「M-Y ミキサ」の混合イメージおよび本工事の CSG 混合設備の外観を図-5 および写真-1 に示す。

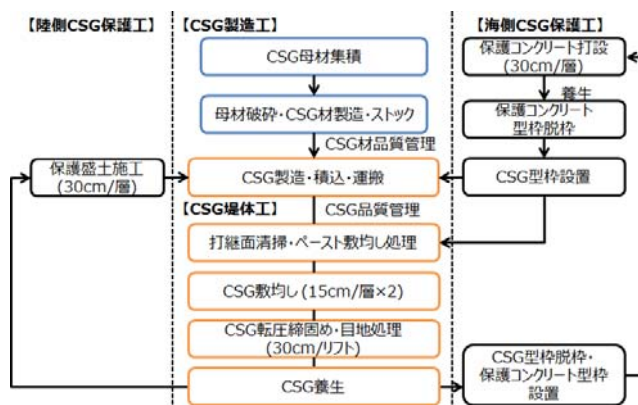


図-4 CSG 堤の施工フロー



写真-1 CSG 製造プラント「M-Y ミキサの外観」

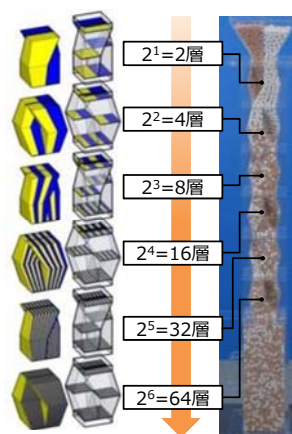


図-5 M-Y ミキサの混合イメージ

「M-Y ミキサ」は、CSG 材およびセメントが6つのユニットを通過する際に給水し、ユニットの「分割」と「重ね」の2つの作用により、均質に混合することができる。また、連続計量設備を有し、CSG 材に応じて混合砂の比率を変化させる際においてもブレンドヤードを設ける必要が無く、安定的に高品質な CSG の連続製造が可能である。なお、本工事では、本プラント方式により CSG 最大製造量 135m³/h を記録した。



図-6 CSG 出荷・運行管理システムの概要

(2) CSG の運搬

CSG は、グラントホッパーを介して、10t ダンプトラックに積み込み・打設箇所まで運搬した。

CSG 工法は、「CSG 製造から転圧完了までの時間」及び「打設前の打継ぎ処理のモルタル敷設から CSG を打ち継ぐまでの時間」の制約がある。そのため施工時は、ダンプトラックの運行状況等をリアルタイムに確認するため、運搬車両の位置情報、荷積み時間、荷下し時間、CSG の転圧完了時間を把握できる CSG 出荷・運行管理システム(図-6)を開発・導入し、製造から転圧までの時間管理を徹底した。



写真-2 21t 級湿地式ブルドーザ

(3) CSG の打設

CSG の打設は、海側に H 形鋼型枠(H350)を設置し、陸側は保護盛土を先行させ、これを型枠とした。CSG の敷均しは、堤幅が 7.4m 以上のリフトまでは、21t 級湿地式ブルドーザ、堤幅が 7.4m 以下のリフトでは 7t 級湿地式ブルドーザを使用した。敷均しは、モルタル敷設箇所へのダンプトラック乗入れ及びモルタルの乾燥防止等を考慮し、2 層(リフト厚 30 cm=約 15 cm×2 層)とした。さらに、「日当たり施工量の増大」及び「CSG 混合から締固め完了までの時間短縮」、「CSG の平滑性確保」を目的として、マシーンコントロールブルドーザ(写真-2)を採用した。

CSG の転圧は、4t 級コンバインドローラ(写真-3)を使用し、面的な締固め管理を目的として、締固め転圧管理システムを採用した。なお、打設中の CSG 乾燥防止のため、散水を適宜実施し、打設完了後は、ブルーシートで表面を覆い養生(写真-4)を行った。

以上のように、本工事では、CSG 製造から運搬、転圧までの管理においては、多くの ICT を積極的に導入することにより、品質確保と生産性向上を実現している。



写真-3 4t 級コンバインドローラ



写真-4 CSG 養生状況

(4) 保護コンクリート

CSG の風化・浸食を防止するための保護コンクリート工は、CSG 型枠脱型後、速やかに実施しなければならない。また、本堤防の法勾配 1 : 0.8 の形状では、保護コンクリートの打設が完了していないと上層の CSG を打設することができず、保護コンクリート型枠は、設置および撤去効率が高い必要性があった。そのため、H 形鋼 (H300, 1 ユニット : L=6m) にメタルフォームを取り付けた鋼製型枠を全延長分製作し、クレーンによる上層へのスライド作業のみとして、型枠の設置・撤去の効率化 (写真-5) を図った。



写真-5 鋼製型枠のスライド作業状況

(5) 保護盛土

保護コンクリートと同様の目的で設置される保護盛土は、法勾配 1 : 1.7 の形状であったが、CSG の施工に必要な工事用道路としての機能も持たせるため、法勾配 1 : 1.5、天端幅 3.5m の暫定形状にて築造し、暫定形状箇所については、天端被覆工完了後に本形状である法勾配 1 : 1.7 に再整形を実施した。保護盛土 1 層の厚さは CSG 打設リフト厚と同一とし、11t 振動ローラを使用した。本工種においても、締固め転圧管理システムを採用した。また、法面再整形には、マシンコントロールバックホウを採用し、施工の効率化を図った。



写真-6 完成全景

(6) 天端被覆工

堤防法面の海側・陸側と同様に CSG を保護することを目的として、堤防天端においてもコンクリート被覆を実施した。階段形状となることから、施工の効率化を図るため、コンクリート二次製品による型枠を採用した。

7. CSG の品質管理

施工時における CSG の品質管理について以下に示す。CSG 材の品質管理は、打設前日までに当日の CSG 配合決定に必要な CSG 材の密度・吸水率および粒度試験により、その変動傾向を当日の初期配合に反映させた。

打設当日は、CSG 材の表面水の変動を迅速に反映させることが重要である。そのため、試験施工時に簡易法として確認した自然粒度試験および電子レンジ法による含水率試験を迅速法として 1 時間に 1 回実施し、粒度及び表面水量の変動傾向を監視し、施工当日の配合修正を行った。

CSG の品質管理は、製造時における計量管理と打設現場における締固めエネルギー管理 (転圧回数管理) を実施した。また、現場密度と供試体強度の変動傾向を監視するため、現場密度試験 (砂置換法及び RI 法) により密度を、試験室において作成した当日の CSG 標準供試体及び大型供試体により CSG 強度を監視することにより、混合設備の性能および締固めエネルギーに異常が無いことを確認しながら、品質を確保した。

8. おわりに

本工事では、国土交通省として初となる CSG 工法による海岸堤防工事において、材料および設計、施工の合理化による海岸堤防を構築した。また、施工に際しては、ICT を多数導入し、品質を確保した上での生産性向上を実現させるなど、復旧事業の難条件を克服し、円滑かつ安全に工事を進めた。

本稿執筆に当たっては、国土交通省東北地方整備局仙台河川国道事務所をはじめ、関係者の方々からご指導、資料提供を頂いた。この場をかりて感謝の意を表する。

放射性廃棄物処分施設におけるベントナイト混合土の施工技術 および 3D レーザー測量による品質管理技術の開発

安藤ハザマ 正会員 ○山田 淳夫 正会員 田嶋 宏之
正会員 千々松 正和 正会員 荻原 績

1. はじめに

低レベル放射性廃棄物の浅地中ピット処分施設における難透水性覆土として低混合率のベントナイト混合土を用いることが計画されている¹⁾。所要の性能（低透水性）を確保するためには、適切な品質（モンモリロナイト含有率）のベントナイトを用いて適切な仕様（混合率、含水比）となるように製造した材料を所定の密度に締固めて難透水性覆土を構築することが重要である。

これまでの検討で、Ca 型ベントナイト（クニミネ工業製、クニボンド RW）を乾燥質量比（内割り）で 30% 混合したベントナイト混合土を用いた施工確認試験を実施し、撒出し時において、人力による撒出しよりも、小型フィニッシャーによる敷均しを行った方がより高品質（ばらつきが少なく高密度）に施工できる可能性があることを示唆する結果が得られた^{2) 3)}。そこで、より高品質な施工を目指し、新たに開発した小型フィニッシャーおよび小型トレンチローラを用いた施工試験を実施し、敷均し精度や転圧後の乾燥密度を比較した。また、吹付け工法⁴⁾の高度化も行い、転圧施工と同等の施工密度の達成を目指した。さらに、施工後の品質管理の一環として、3D レーザー測量結果による密度管理方法を検討した。本方法は、即時的・高頻度・面的に連続したデータを取得することを目的とした。

2. ベントナイト混合土の施工技術

(1) 材料の製造

施工試験に用いた材料の施工時乾燥密度（締固め規定値 C 値）および含水比の設定は、突固めによる土の締固め試験（C-c 法）を行い、取得した締固め曲線と透水係数の関連性より、所要の性能を満足する透水係数が得られる条件を抽出して設定した。具体的には、締固め規定値 C 値が平均値で 95%以上、含水比 $w_{opt}+4\%$ （20%）とした。通常の盛土工事で用いられる締固め度 D_c ではなく締固め規定値 C 値を用いたのは、設定含水比が最適含水比 w_{opt} よりも 4% 程度高い値であり、この設定含水比の管理とその含水比における達成密度の管理が重要であるためである。

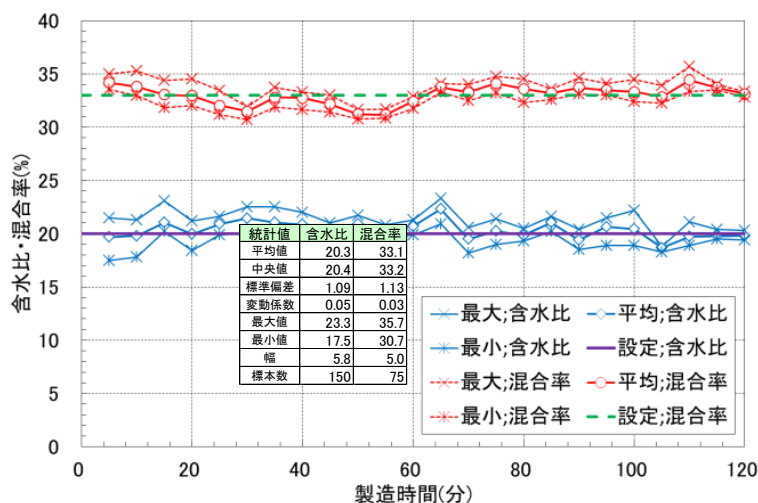


図-1 GeoTom10 での製造結果：製造量約 9t/hr

材料の製造は、バッチ式の攪拌付回転容器型ミキサー（アイリッヒミキサー）および連続式二軸強制ミキサー（GeoTom10、公称製造能力 10m³/hr⁵⁾）を用いて実施した。連続式二軸強制ミキサーの場合、材料（水・砂・ベントナイト）の時間当たりの供給量を管理して製造した。バッチ式の攪拌付回転容器型ミキサーは、混合率 28.8～30.6%，含水比 18.6～19.3%で製造できた。連続式の二軸強制ミキサーでの製造時の経時変化を図-1 に示す。混合率 30.7～35.7%，含水比 17.5～23.3%で製造できた。比較的安定した結果が得られた。

キーワード 低レベル放射性廃棄物処分、ベントナイト混合土、転圧施工、吹付け工法、3D スキャナ
連絡先 〒305-0822 茨城県つくば市荻間 5 1 5 - 1 株式会社安藤・間 技術本部原子力部 TEL 029-858-8810

(2) 材料の敷均しの高度化

これまで既存の機械を改良して実験を行って²⁾³⁾きたが、これまでの改良に加えて、①材料比重への対応のため、スクリーンをシリンダーの圧力調整によりフロートさせ、圧力の変化を抑制させる機能を強化し、他のシリンダー圧の変化影響を防止する、②材料送り出しのチェーンコンベア部へのセラミック焼付け塗装により材料付着を防止する、③材料供給箇所とスクリーンの間にブレードを設置し、敷均し時の密度（かさ密度）のばらつきを低減させる、④レーザーレベルにより、容易に、かつ精度良く敷均し高さを管理する、という4つの改良を加えた。既存の機械を改良した機械（旧型）と新規開発の機械（新型）の敷均し結果の比較を図-2に示す。旧型に比べて新型の方が敷均し高さの平均値との差の分布幅が小さく、敷均し精度が良くなっていることが分かる。図-3に、敷均し後のかさ密度を示す。旧型で敷き均した後に測定した4点と比較すると、新型の方が若干高めのかさ密度となった。

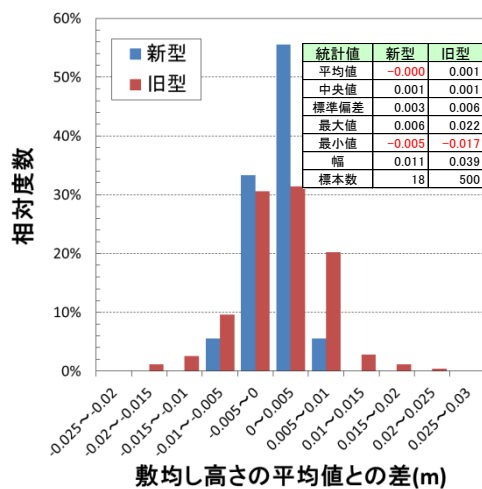


図-2 敷均し結果の比較

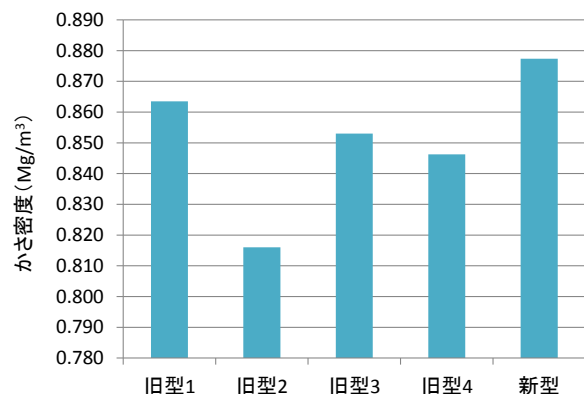


図-3 敷均し後のかさ密度

(3) 転圧締固め法の高度化

転圧締固めによる施工法についても、1.5t級の小型トレンチローラおよび11t級の大型振動ローラによる施工試験の結果をこれまでに報告している³⁾。本検討では、これらの転圧機械に加えて、7t級と9t級の中型振動ローラの適用性の検討を行った。図-4に、既往の検討結果³⁾に加えた施工後の含水比と乾燥密度の関係を示す。同図にC-c法で行った締固め曲線も示す。既往の検討で示した1.5t級の小型トレンチローラおよび11t級の大型振動ローラと同様に、7t級と9t級の中型振動ローラでも締固め規定値C値は95%程度を達成できた。また、概ね飽和度 $Sr=80$ ~90%の等飽和度曲線上の含水比・乾燥密度で施工できたことが分かった。

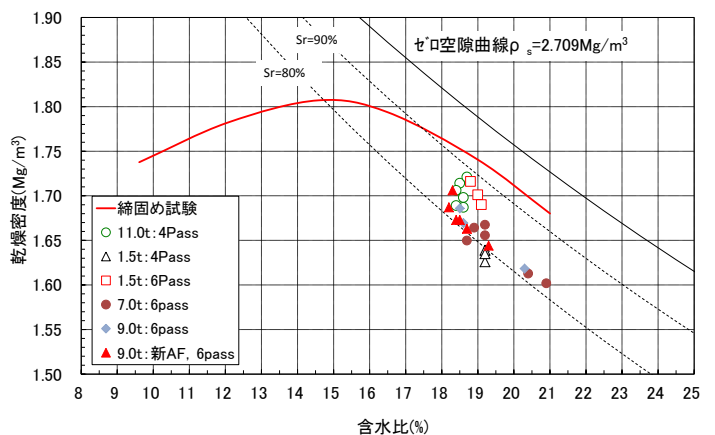


図-4 転圧後の含水比と乾燥密度の関係

(4) 吹付け工法の高度化

ベントナイト混合土の吹付け工法として、事前に混合加水した材料を強制的に吹き付けるための施工機械として圧力釜式吹付け機を用いた工法を開発してきた。その際、施工性および施工後品質を向上させるために、吹付け機への材料供給に際して材料をほぐす機構を設けた材料供給機を開発したが、これを用いることにより

ローター式吹付け機でも施工が可能であることが分かった⁴⁾。そこで、さらなる施工品質の向上を目指して、①ノズル径、②Y字管の有無（筒先付近での再加圧）、③材料の製造方法（二軸強制（GeoTom10）とアイリッヒ）をパラメータとして実験を実施した。写真-1 に吹付けシステム（材料ほぐし機構付き定量供給装置）、写真-2 に使用した吹付け機械（ローター式吹付け機）、写真-3 に吹付けの状況を示す。実験結果を図-5～図-7 に示す。ノズル径が細くなるほど施工密度は高くなり、 $\phi 26\text{mm}$ のノズルを用い Y 字管を適切な位置に配置することにより、締固め試験 C 法に対して締固め規定値 C 値 95%程度での施工が可能であることがわかった。なお、材料の製造方法としては、アイリッヒ製造の方が吹付けには好ましく、GeoTom で製造した材料は、吹付けの際にも詰まりやすく材料分離の程度も大きいことが分かった。



写真-1 吹付けシステム



写真-2 吹付け機



写真-3 吹付け状況

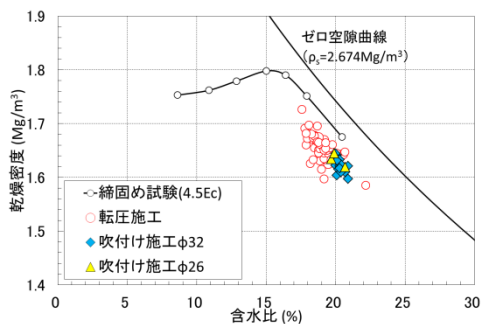


図-5 吹付け施工結果;密度

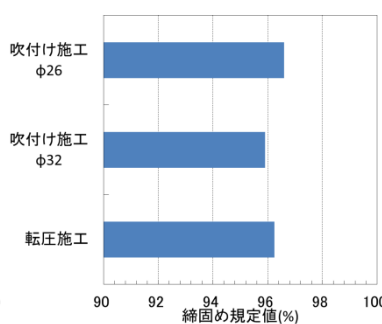


図-6 吹付け施工結果;締固め規定値

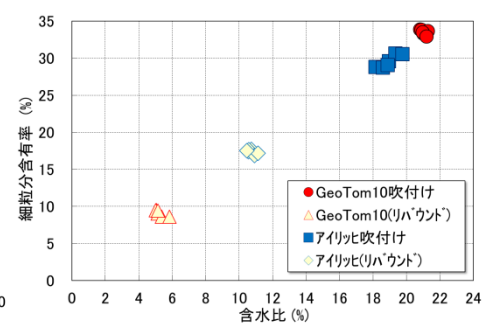


図-7 リバウンド材の比較

3. 3D レーザー測量による施工後の乾燥密度の測定の検討

(1) 検討の概要

施工後の乾燥密度の管理を行うことを目的とした、即時的・高頻度・面的に連続したデータを取得する方法を開発した。低レベル放射性廃棄物の埋設事業における品質管理方法として、従来のようにサンプリング試料を用いた透水試験や密度測定および RI 密度計等による現位置密度測定等を行うことも必要となる。しかし、これらの方法で測定頻度を上げることは施工箇所を乱すことにつながり、また、測定時間も長くなるため即時性があるとは言い難い。このような問題を解消する方法の一つとして、レベル測量による高さ管理を用いた密度の推定が挙げられる。これは、転圧前後の密度変化と層厚変化の相関性を利用したもので、測量結果より得られる高さ変化から転圧後の密度を推定するというものである⁶⁾。しかしながら、施工範囲が広くなると、測量を行い、標高を算出するためにはかなりの時間を要し即時性があるとは言えない。また施工範囲内の予め設定（測量）した地点のみの管理となる。一方、3D レーザースキャナによる測量は、施工範囲内全体が対象となり、測量後に任意の地点の情報を得ることができる。そこで、レベル測量に変わる高さ管理方法として、3D レーザー測量結果による点群を用いて即時性のある管理方法を開発し、その適用性について検証を行った。

(2) 使用した 3D レーザースキャナの概要

スキャナは、レーザークラス 1 で 600m までの測定が可能で LAN ポートをもった RIEGL 社製地上型レーザースキャナを使用した。スキャナは最遠箇所までレーザーの入射角 20 度、10cm×10cm のメッシュ内に 40 点程度の母数が確保できるように高さ約 5m の位置に設置した。また、試験範囲は、10m×2.5m の範囲とし、H 鋼で周囲を囲んだ。使用機器の仕様を表-1 に、使用したスキャナの外観を写真-4 に、測定状況を写真-5 に示す。また、測定後の点群データの表示例を図-8 に示す。既往検討⁶⁾でレベル測量との比較を行っているが、概ね一致する結果が得られている。これら点群データより、本報告では、レベル測量と比較を行った、2m²/点（横断方向に 0.5m、進行方向に 1.0m 間隔）を抽出して整理した結果を事例として示す。なお、抽出点は 10cm 平方の点群データを平均した値をその点の測定データとしている。

表-1 レーザースキャナの仕様

機器名	RIEGL VZ-400
精度	5mm
正確度	3mm
測定レート	毎秒 122,000 回
測定範囲	100° × 360°



写真-4 使用したスキャナの外観



写真-5 測定状況

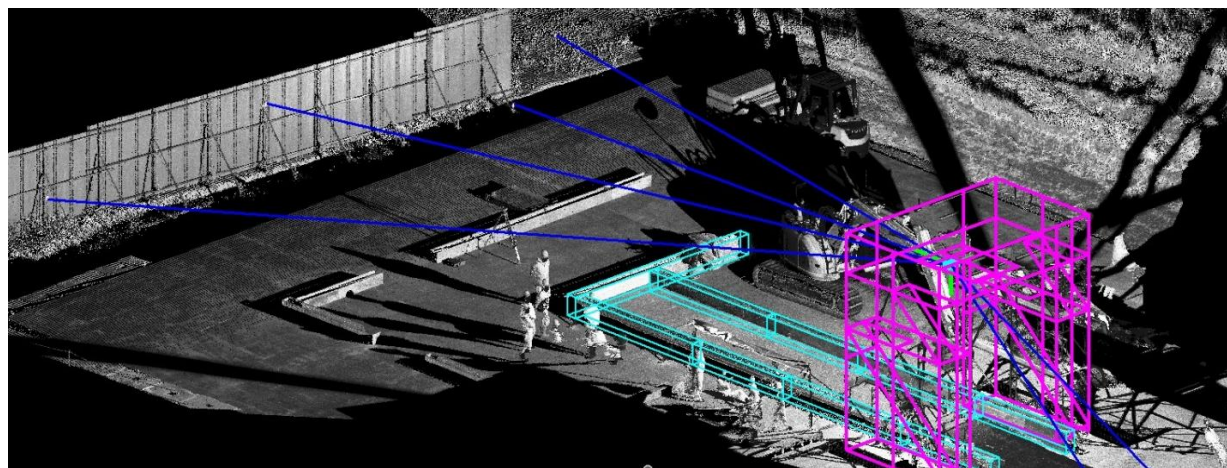


図-8 点群データの表示例

(3) 3D レーザースキャナの測量結果から乾燥密度を推定する手法の概要

これまでに、3D レーザースキャナやレベルの測量データ等の出来形測定結果より、施工後の密度を推定する手法の検討を進めている⁷⁾。3D スキャナにより施工範囲の出来形測定を行い、施工前後での標高差から施工層厚を求め、敷均し後のかさ密度の測定値とこの施工層厚の変化率を用いて転圧後の密度を推定するというものである。これまでの施工結果より、転圧前後の層厚変化率は 0.5 程度であることがわかっているので、敷均し後のかさ密度 (0.85～0.88 (Mg/m³) 程度) を用いると、乾燥密度の換算値は 0.85～0.88 (Mg/m³) / 0.5 = 1.70 ～ 1.76 (Mg/m³) となる。ところが、図-9⁷⁾に示すとおり、3D 測量で推定した乾燥密度とコア採取試料を用いて測定した乾燥密度の比が転圧前後の層厚

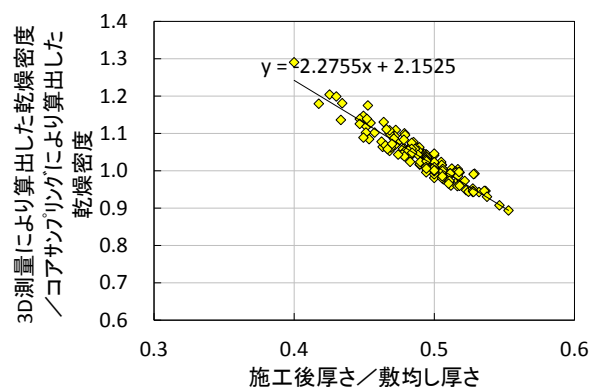


図-9 3D 測量結果より求めた層厚変化率

変化率ごとに变化するため、層厚変化率を 0.5 程度で固定して換算することは大きな誤差を伴う⁷⁾。そこで、式-1 および式-2 に示すとおり補正を含めた転圧後の乾燥密度の推定を行った。

$$\rho_{3D} = \frac{\rho_{dr}}{x}, x = \frac{d_c}{d_r} \quad \text{式-1}$$

$$\rho'_{3D} = \frac{\rho_{3D}}{ax + b} \quad \text{式-2}$$

ρ_{3D} : 換算乾燥密度 (Mg/m³)

ρ'_{3D} : 補正後の換算乾燥密度 (Mg/m³)

ρ_{dr} : 敷均し後のかさ密度 (Mg/m³)

x : 層厚変化率

d_r : 敷均し後の厚さ (m)

d_c : 転圧後の厚さ (m)

a : 係数 (図-9 の相関直線より, -2.2755 とした)

b : 係数 (図-9 の相関直線より, +2.1525 とした)

(4) 3D レーザースキャナの測量結果からの乾燥密度の推定事例

図-10 に施工箇所を 3D レーザースキャナで測量した点群データの例を示す。施工箇所は H 鋼をコの字型に囲んだ幅 2.5m, 延長約 13m (有効長 11m) の直線土槽とした。測定点の抽出は前述のとおり 2m²/点, 横断方向は図-10 に示した A~E の 5 行 (0.5m 間隔), 延長方向は 0~12 で示した 13 列 (1.0m 間隔) とした。施工は 0 列目から 12 列目に向かって施工し、妻壁側である 0 列目よりも上流側は機械による敷均しおよび振動ローラによる転圧ができなかった箇所なので検討対象より除外した。また、11 列目, 12 列目は乗り込み口であるため、材料が引き伸ばされ層厚が相対的に薄く施工され、締固めが大きくなる傾向となったので、今回はこの部分も検討対象より除外した。点群データでの測定結果はコンターの連続性が滑らかで、ほぼ連続とみなせる程度のデータ密度を示している。

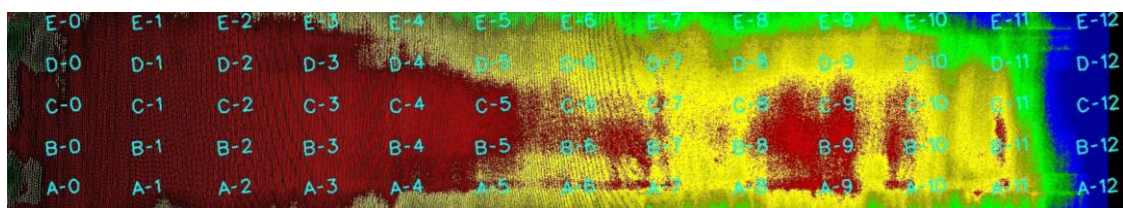


図-10 施工箇所の点群データの例

図-10 で示したようなデータ群より、2m²/点を抽出しプロットした結果を図-11 および図-12 に示す。図-11 と図-12 では施工後の厚さを示しているが、コンターの階層間隔はともに 0.010m であるので、凹凸の有無 (滑らかさ) の比較はできる。敷均し後よりも転圧後の表面の方が同一層内の高低差が小さくなり滑らかになっていることがわかる。

各抽出点で層厚変化率を算出し、当該施工層で 4 点から採取して測定した敷均し後のかさ密度の平均値 0.842 (Mg/m³) を式-1 に代入して推定した乾燥密度をプロットした結果を図-13 に示す。乾燥密度の平均値は 1.772 (Mg/m³)、分布幅は 1.927~1.592 (Mg/m³) と大きく、また最大値が 1.927 (Mg/m³) と、現実的ではない値を示す結果となった。

この結果からさらに式-2 で示した補正を行ってプロットした乾燥密度のコンターを図-14 に示す。乾燥密度

の平均値は 1.662 (Mg/m^3)、分布幅は 1.678~1.654 (Mg/m^3) であり、施工後に計 17 点よりシンウォールサンプリングを行い採取した試料を用いて測定した乾燥密度の平均値 1.650 (Mg/m^3) と分布幅 1.726~1.605 (Mg/m^3) と比較しても、平均値は大きな乖離が無く、分布幅は実際よりは若干小さくなる事を確認できた。3D レーザースキャナによる測量結果と敷均し後のかさ密度の平均値から得られる推定値より、およその施工後の乾燥密度の評価が可能であり、数~数十 m^2 に 1 点ずつ採取するシンウォールサンプリング試料等から測定される乾燥密度と適切に比較・評価することによって、平面的に連続的な乾燥密度のデータの取得が可能になると考えられる。

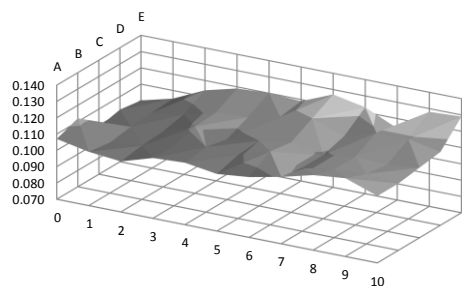


図-11 敷均し後の高さコンター

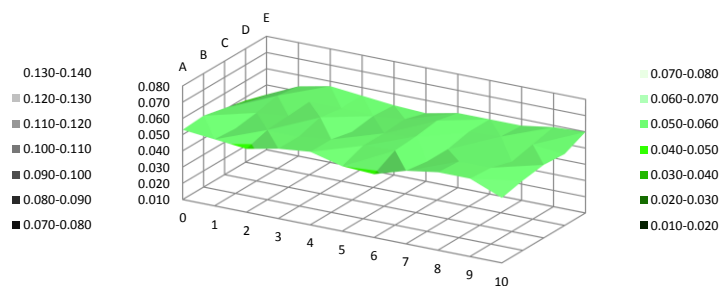


図-12 転圧後の高さコンター

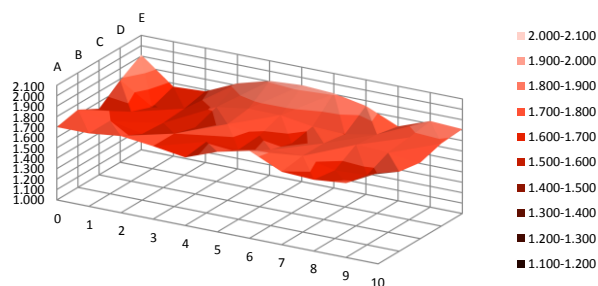


図-13 補正前の乾燥密度のコンター

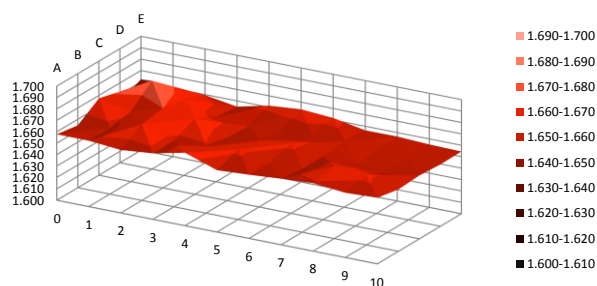


図-14 補正後の乾燥密度のコンター

4. まとめ

低レベル放射性廃棄物の浅地中ピット処分施設における難透水性覆土を構築する方法として、材料を敷き均して転圧する転圧工法と、材料を圧縮空気で吹き付ける吹付け工法の開発・高度化に関する検討を行った。材料の製造も含めて、既存技術やその高度化によって、所定の性能を有する高品質な難透水性覆土を構築できることを示すことができた。また、施工後の品質確認手法の一つとして、3D レーザースキャナによる出来形測定結果（点群データ）と簡易的な推定式より、連続的とみなせる乾燥密度のデータを取得できることを示すことができた。今後、広範囲な施工完了箇所を対象とした場合、取得時間と測定精度とのトレードオフの関係があるため、合理的な測定方法に関する検討を進めたい。

【参考文献】

- 1) 伊藤ほか：低配合ベントナイト混合土の長期状態変化を踏まえた設計手法に関する一考察，第 65 回年次学術講演会講演概要集，土木学会，CS7-017，2010，2) 工藤ほか：低レベル放射性廃棄物処分施設における難透水性覆土の施工性試験，第 68 回年次学術講演会講演概要集，土木学会，CS11-018，2013，3) 山田ほか：低レベル放射性廃棄物処分施設における難透水性覆土の施工の高度化の検討，第 71 回年次学術講演会講演概要集，土木学会，CS13-018，2016，4) 千々松ほか：ベントナイト混合土の吹付け施工の効率化に関する検討，第 71 回年次学術講演会講演概要集，土木学会，CS13-019，2016，5) 石濱ほか：混合率 30~50%のベントナイト混合土の練り混ぜに関する検討，第 66 回年次学術講演会講演概要集，土木学会，CS3-030，2011，6) 田嶋ほか：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) 山田ほか：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-052，2017