泥土圧シールド工事の掘削土量計測管理システムの開発

戸田建設株式会社　正会員○中山　卓人　正会員　田中　宏典
正会員　茶木　勇太　正会員　本合　弘樹

１．はじめに

シールドトンネル工事において，掘削土の過剰取り込みは近年相次いで発生している地表面陥没事故の主な原因の一つとされており，とくに泥土圧シールド工法では掘削土量を正確に計測・管理する手法の確立が喫緊の課題となっている．そこで当社では，従来の計測方法の課題を解決し，掘削土量をより高精度に把握できる新たな計測管理システム（以下、本システム）を開発した．本稿では，本システムの概要と本システムを検証するための各種基礎実験および現場実証実験の結果について報告する．

２．従来の計測方法の課題

泥土圧シールドにおける土量計測方法は，スケールを用いてズリ鋼車の天端からの下がりを確認して排土の体積を計測する方法や，立坑下から天井クレーンで吊り上げる際にクレーンスケールを用いて重量を計測する方法等があるが（**写真-1, 2**），いずれも計測精度の低さや時間差が生じるといった点で課題がある．一方，近年ではベルトスケール（重量）やレーザースキャナー（体積）を用いた計測技術を活用し，泥水式シールドと同じようにリアルタイムでの計測・管理が可能になった．しかし計測精度においては未だ課題があり，既往技術の計測精度は誤差 5%程度と考えている．泥土圧シールドの場合は，チャンバーに送った水や添加材の地中への逸水量や逸泥量を直接計測できないことや，搬送される排土内の空隙や形状によって死角が生じることなどが正確な掘削土量計測の阻害要因となるため，排土の性状に応じた対策が必要になる．

そこで当社は，上記の課題を解決するために，本システムの開発に着手した．



写真-1 コンベックスを用いた体積計測

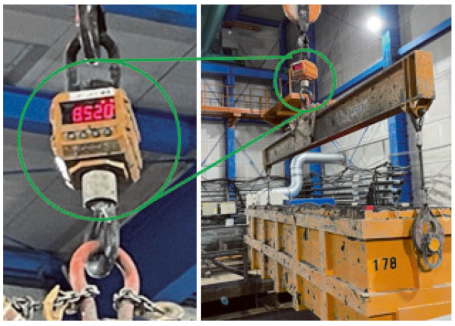


写真-2 クレーンスケールを用いた重量計測

３．システム概要

(1) 全体概要

本システムは，含水比と重量，体積の 3 つの計測値と，土質調査結果などから得られる既知の値を用いて，泥土圧シールドの掘削土量をより高精度で算出して管理するシステムである．現在の泥水式シールドの管理方法と同じように，累積土量を可視化して管理値との比較がリアルタイムで可能となる（**図-1**）．重量の計測には，開発に着手した当時に計測精度が高いとされた海外製のベルトウェイヤーを採用した（**図-2**）．体積の計測には，一般的に経済性で有利な 2D スキャナーが用いられることが多いが，搬送土の速度や複雑な形状を正確に捉えることに適していると判断し，3D スキャナーを採用した（**写真-3**）．含水比の計測には，インライン型近赤外水分計を採用した．主に食品業界の製造ラインで用いられており，非接触でリアルタイム計測が可能であり，搬送される排土表面に多少の凹凸があっても計測可能という特徴がある（**写真-4**）．さらに，排土全体の凹凸を低減して計測しやすい形状に整えること，排土上部を削り取って含水比の計測における適切な計測距離を確保することを目的とした 2 つの敷き均し機構を配置し，計測精度の向上を図っている．

キーワード　シールド，掘削土量，含水比，ベルトコンベア，リアルタイム計測
連絡先　〒104-0032 東京都中央区京橋 1-7-1 戸田建設株式会社 TEL0570-0027-05

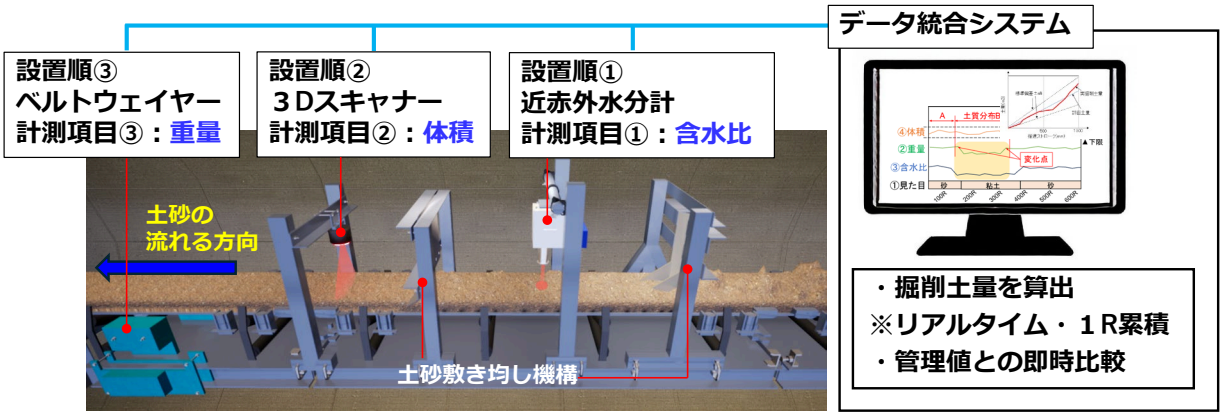


図-1 本システムの概要図

(2) 掘削土量算出の考え方

掘削土量の算出には，「シールドトンネル工事の安全・安心な施工に関するガイドライン[1)]」において，掘削土量の計算例として用いられている基礎式を参考にしつつ，新たに含水比の計測値を取り入れられるように改良を加えている．基礎式では実際の計測が難しい逸水量や逸泥量を推定できる点を評価して採用したが，これまでの経験から，レーザースキャナーを用いて体積を計測する方法では，対象となる排土の形状によっては死角が生じてしまう場合や排土の内部にある空隙が大きい場合に計測精度の低下が懸念された．そのため本システムでは必ずしも体積の計測値に頼らずに，含水比と重量の 2 つの計測値からでも掘削土量を式(2)より算出できるようにした（式(1)～(3)）[2)]．これにより排土の性状に応じて掘削土量の計測精度を維持できると考える．

$$\Delta Ms = \frac{\rho s\ (\rho a - \rho out)}{\rho out\ (\rho a - \rho s)} \times Mout - Ms \qquad (1)$$

$$\rho out = \frac{\mathrm{Mout}}{\mathrm{Vout}} \qquad (2)$$

$$\Delta Ms = \frac{(1+\mathrm{Ws}) \times (\mathrm{Wout} - \mathrm{Wa})}{(1+\mathrm{Wout}) \times (\mathrm{Ws} - \mathrm{Wa})} \times Mout - Ms \qquad (3)$$

ここに　Ms　：理論掘削土の重量
　　ΔMs　：過剰取り込み土の重量
　　Mout　：排土の重量（計測値）
　　Vout　：排土の体積（計測値）
　　Wout　：排土の含水比（計測値）
　　ρs　：理論掘削土の比重
　　ρa　：添加材の比重
　　ρout　：排土の比重
　　Ws　：理論掘削土の含水比
　　Wa　：添加材の含水比

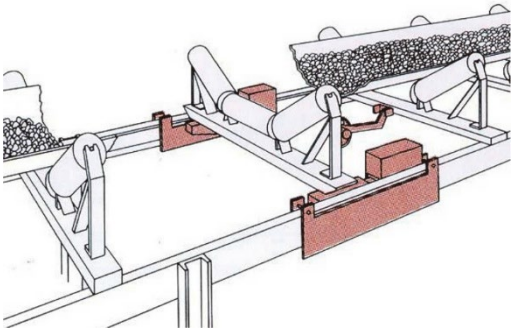


図-2　重量計測（ベルトウェイヤー）



写真-3　体積計測（3D-LiDAR）



写真-4　含水比計測（近赤外水分計）

(3) 本システムの特長

本システムの特長として，泥土圧シールドにおけるリアルタイムで掘削土量を把握できる点，非接触型のため排土の搬送を阻害しない点，計測およびデータの取り込みが全て自動で行える点が挙げられる．中でも，前述

の考えに基づき高精度で掘削土量の計測・管理が可能であることが最大の特長である．また，3 種類の計測データが個々に可視化されるため，1 種類のデータだけでは見落としてしまうような些細な変化にも気付くことができる．過去の掘進データを評価する際も役立つため，多角的な視点に基づく高度な施工管理への活用が期待できる．

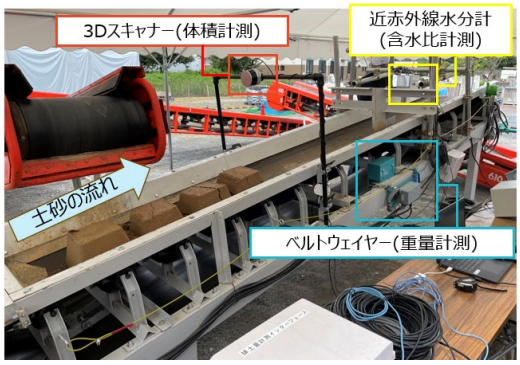
４．システム検証実験

ベルトコンベアに各計測機器を取付けた状態でベルトコンベア上を移動する土砂量を計測し，各計測データの連携やシステム不具合の有無の確認，計測精度検証を実施した．

(1) 実験装置

写真-5 に実験装置の概要を示す．計測用ベルトコンベア（長さ 7m，幅 0.6m）1 台を製作し，計測機器として 3D スキャナー（体積計測），近赤外水分計（含水比計測）を架台に固定し，ベルトウェイヤー（重量計測）をベルト下部に設置した．3D スキャナーはベルトコンベア上の土砂から 470mm 程度，近赤外水分計は 260mm 程度の離隔を確保できるように架台に固定した．計測用ベルトコンベアのほかに運搬用ベルトコンベア 3 台を用意し，井桁型に設置することで土砂が周回するようにして連続して土量を計測できる構造とした．

過年度実施した近赤外水分計の性能確認試験 [2)]の結果，近赤外水分計の計測精度の確保には計測対象の土砂との適切な計測距離（260mm±30mm）を確保する必要があることを確認した．そこで，土砂との適切な計測距離を確保するため，土砂上部の余剰分を削り取る装置（以下，敷き均し機構）を近赤外水分計の前面に設置することとした（**写真-6**）．また，ベルトコンベア上の土砂との適切な計測距離を連続して計測し，土砂との離隔が適切な場合の含水比計測値のみ採用できるようにレーザー距離計を近赤外水分計の近傍に設置し，土砂と近赤外水分計との距離を計測することとした（**写真-7**）．





(a) 3D スキャナー　(b) ベルトウェイヤー　(c) 近赤外水分計

写真-5　実験における各計測器の配置状況





写真-6　敷き均し機構の配置状況

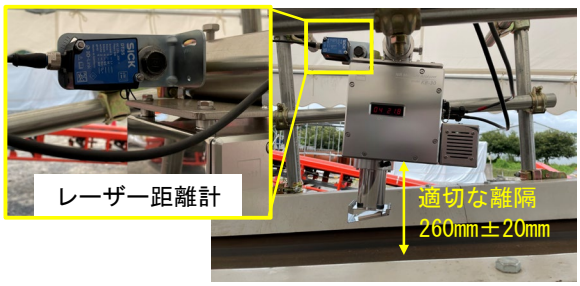


写真-7　レーザー距離計の配置状況

(2) 実験方法

表-1 に試験用模擬土の物性を示す．試験用模擬土として砂質土を想定し，真砂土とトチクレーを重量比 2:1 の割合で混合したものに水を加え含水比を 17.5%に調整した．

表-1　模擬土の物性

配合	真砂土：トチクレー =2:1 （重量比）	
比重	2.28	
含水比	17.5%	

試験手順として，容積が既知の容器（容積 7L）に模擬土を敷き詰め重量を計測したのち計測用ベルトコンベアに容器 4 個分の土砂を配置した．ベルトコンベアを稼働させて 10 周連続して土砂を搬送し，各周回時の土砂の含水比，重量，体積，土砂と近赤外水分計との距離を計測した．

５．システム検証実験の結果・考察

図-3 に 10 周周回時の土砂の含水比，積算重量，積算体積，土砂と近赤外水分計との距離の計測結果を示す．

(1) データ連携

各計測項目の経時変化を示しており，リアルタイムに計測できていることが確認できた．また，実験中もシステムの不具合は確認されず，本システムに問題はみられなかった．

(2) 計測精度検証

土砂と近赤外水分計との距離の計測結果をみると，100mm～300mm の範囲でばらつきがみられるが土砂通過時は 240mm～280mm 程度であることが確認できた．

含水比の計測結果をみると，連続して計測している値（青線）の中から土砂との距離が最適な場合の値（紫線）を選択的に採用していることが確認できる．しかし，土砂が通過する直前に計測値が 0%や 50%以上と大きくぶれ，事前測定値（真値）から 17.5%乖離する場合がみられた．この理由として，ベルトと土砂の境界面において計測対象の性状の変化により装置の性質上値がばらついてしまうためと考えられる．

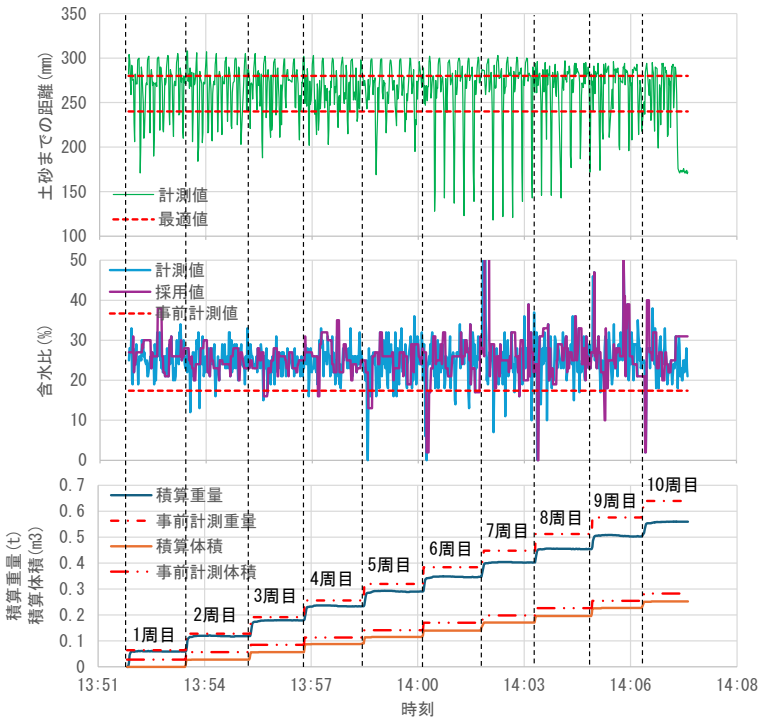


図-3　各計測結果

積算重量の計測結果をみると，3 周目までは事前計測値の積算値と同程度で比較的精度が良い結果となったが，4 周目から事前計測値より小さくなる傾向があり，10 周後で 0.08t（12%）の差がみられた．積算体積の計測結果をみると積算重量と同様の傾向があり，10 周後で事前計測値と比較して 0.032m^3（11%）の差がみられた．この理由として，周回数が増えるごとにベルトへの土砂の付着などによりベルトコンベア上の土砂が減少したためと考えられるが，実施工においてはこの要因は排除されることから，3 周目までと同様に高精度な計測が期待できる．

６．含水比の計測精度検証

システム検証実験では，ベルトコンベア上を流れる土砂の含水比の計測値は，事前測定値（真値）17.5%に対して 0%や 50%以上と大きく乖離する場合がみられた．この理由として，ベルトと土砂の境界面において計測対象の性状の変化により装置の性質上値がばらついてしまうこと等が考えられた．そこで，含水比計測の誤差要因を確認するための検証実験を行った．

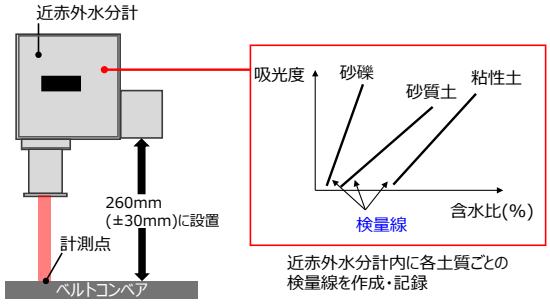


図-4　近赤外水分計の概要

(1) 近赤外水分計の概要

図-4 に水分計の概要を示す．水分計は，測定対象物の近赤外線の吸収度合い（吸光度）を測定し水分値に換算する．そのため吸光度から水分値を換算する変換式（検量線）が必要となる．土質や加泥材の添加量の変化により測定対象物ごとに吸光度が異なるため，測定対象物ごとに検量線を作成する．また，適正な計測を行うために，水分計は底面から対象までの距離を推奨範囲（260mm±30mm）内となる高さに設置する必要がある．

(2) 回転装置による近赤外水分計の計測傾向分析

a) 回転装置の概要

泥土圧シールド工法のベルトコンベアでの排土環境を再現するため，検量線作成用回転装置（以下，回転装

置）を製作した（**写真-8**）．回転装置は，任意に回転速度を設定可能であるほか，土砂敷き均し箇所にゴム板を敷くことでベルトコンベアのベルトを再現した．この回転装置を使って検量線を作成することで，検量線の精度向上を図った．

b）検量線の作成

本検証では，試料土として実証実験を予定しているシールド工事での掘削土砂（粘土混り砂礫）を使用した．検量線作成のため，試料土（自然含水比 29.9%）を 4 日間抜気したものに加水して 25.5～35.3%の 5 水準を設定した（**表-2**）．回転装置の回転速度は，実証実験予定のシールド工事のベルトコンベアの搬送速度と同じ 60m/min とした．1 水準当り 30 回吸光度を測定し，5 水準の吸光度の回帰分析により検量線を作成した（**図-5**）．回転装置を回転させた状態で土砂の吸光度を計測するため 1 水準内における吸光度にもばらつきがみられるが，実工事でも同様のばらつきが生じるものと考え，計測した吸光度をそのまま採用して検量線を作成した．

(3) 検証実験

本検証では，計測値がばらつく要因として，要因①：土砂と水分計の距離の影響，要因②：土砂とベルトの境界面の影響を想定し，この 2 つの要因に関する検証を行った．

a）検証①：土砂と水分計の距離の検証

表-3 に検証①における実験ケースを示す．土砂と水分計の最適な距離 260mm を基準として-100mm～+100mm の 7 ケースとした．各ケースの含水比の計測方法として，回転速度 60m/min にて 5 分間の計測を 3 回実施し，3 回の計測値の平均値を計測結果とした．

図-6 に各ケースの計測値の経時変化をおよび計測値の平均値を示す．計測値の経時変化は適正範囲内であるケース 3～5 では 27.0～27.5%，全ケースでも 24.0～29.1%の範囲であることから，適正範囲内であれば高精度であるうえ，土砂と水分計の距離の影響は誤差要因として小さいと考えられる．また，計測値の傾向をみると，土砂と含水比計の距離と含水比の計測値に負の相関がみられ，土砂に近づくほど誤差が乖離することが確認できた．

b）検証②：土砂とベルトの境界面の影響の検証

本検証では、土砂とベルト（土砂がない状態）との境界面で計測値にどのような影響が生じるかを確認した．**表-4** に検証②における実験ケースを示す．土砂（含水比計との距離を適正範囲内で敷均した）とベルトの面積比率をパラメータとし，0.25～1.00（すべて土砂を敷均した場合 1.00）の 4 ケースとした．各ケースの含水比の計測方法は，検証①と同じとし

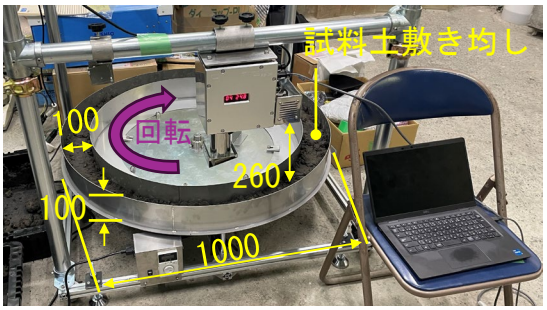


写真-8　検量線作成用回転装置

表-2　検量線作成時の水準

水準	1	2	3	4	5
含水比（%）	25.5	26.3	29.9	31.4	35.3

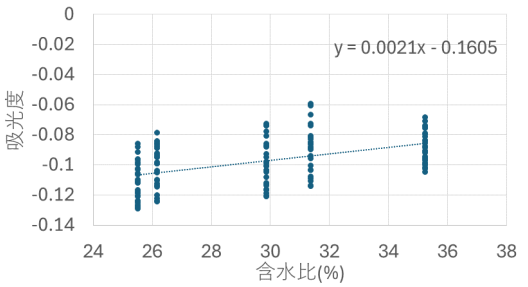


図-5　本検証での検量線

表-3　検証①の実験ケース

Case	1	2	3	4	5	6	7
距離（mm）	-100	-50	-20	0	20	50	100

※最適な距離を 0 とし，土砂から離れると「+」

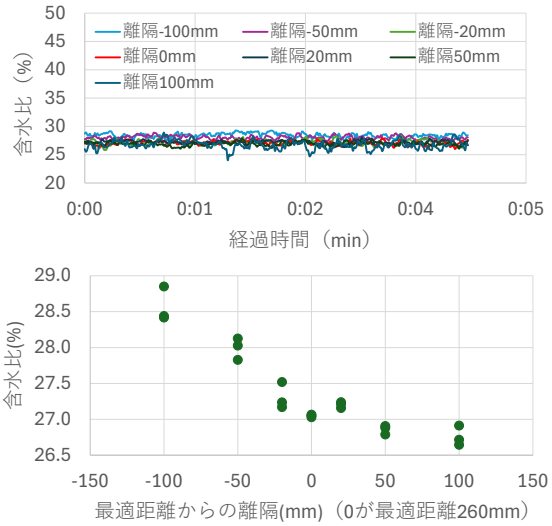
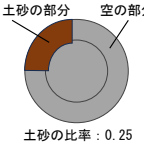


図-6　検証①の実験結果
（上：経時変化，下：平均値）

表-4　検証②の実験ケース



Case	1	2	3	4
面積比率	0.25	0.50	0.75	1.00

※土砂をすべて敷き均した場合を 1.00

た．

図-7 に各ケースの計測値の経時変化および計測値の平均値を示す．計測値は面積比率が小さくなるほどばらつきが大きくなり，面積比率 0.25 で 28～45%の範囲となった．したがって，計測値のばらつきは，要因①よりも要因②の影響の方が大きいものと考えられる．つまり，ベルトコンベア上の土砂量が少なく土砂とベルトの境界面が頻繁に現れる場合では，計測値のばらつきが大きくなり，計測誤差の主要因となると考えられる．

また，面積比率による計測値の傾向をみると，面積比率と含水比の計測値に負の相関がみられた．

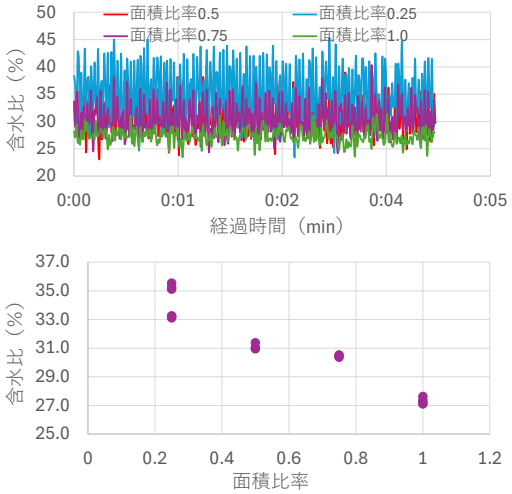


図-7　検証②の実験結果
（上：経時変化，下：平均値）

c）まとめ

計測値がばらつく要因として考えられる 2 つの要因に関する計測精度検証を行った．その結果，「要因①：土砂と水分計の距離の影響」よりも「要因②：土砂とベルトの境界面の影響」の方が大きいことがわかった．したがって，ベルトコンベア上の土砂量が少なく土砂とベルトの境界面が頻繁に現れる場合では，計測値のばらつきが大きくなり，計測誤差の主要因となると考えられる．

今後は，要因②の対策を検討するとともに，本検証による回転装置にて作成した検量線による実シールド現場での実証実験を行い，本システムの精度検証を行うこととした．

7．現場実証実験

(1) 現場概要

実証実験を行った現場の工事概要を**表-5** に示す．掘進延長約 2,500m，シールド外径 3,330mm，セグメント内径 2,800mm の泥土圧シールド工事であり，ベルトコンベアにより後続台車区間まで掘削土砂を搬送して，以降はズリ鋼車にて地上へ搬出する排土方式であった．今回の実証実験中の掘削対象土質は，想定土質縦断図によると掘削断面の 90%程度が砂礫層，10%程度が粘性土層の条件であった．

表-5　工事概要

項目	諸元値
工法	泥土圧シールド
シールド外径	3,330mm
セグメント内径	2,800mm
セグメント種類	RCセグメント
排土方式	ベルコン+ズリ鋼車

(2) 実証実験方法

計測機器の設置状況を**図-8** に示す．スクリューゲートに近い方から，近赤外水分計，3D スキャナーを設置し，後続台車区間にはベルトウェイヤーを取り付けた．それぞれの計測機器で含水比，体積，重量をリアルタイムに計測しつつ，計測データを中央管理室まで送信し 1 リングごとに一括管理した．また，各計測機器の計測精度を検証するため，**表-6** に示す手段で各項目の真値を計測した．1 リングごとに土砂サンプルを採取し，含水比および比重を計測するほか，現場の掘削土量管理でも使用しているクレーンスケールによる重量計測値を取得し，ベルトウェイヤーなどの精度検証に使用することと

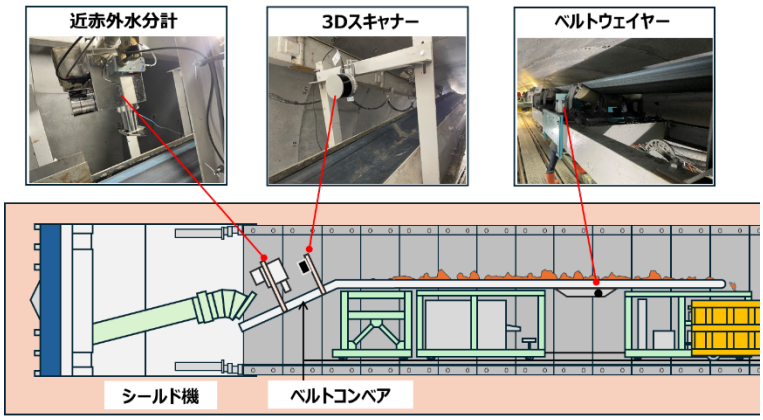


図-8　計測機器設置イメージ図

表-6　精度検証方法

精度検証項目	本システム計測機器	真値計測手段（精度比較対象）
重量	ベルトウェイヤー	クレーンスケール
体積	3Dスキャナー	クレーンスケール重量と比重から算出
含水比	近赤外水分計	土砂サンプルを採取し計測

した．

(3) 実証実験結果

今回の実証実験で使用する検量線は，６章で説明した方法で作成した．**図-9** に実証実験の結果として，含水比と体積の計測結果を示す．

a) 含水比

含水比計測結果をみると 18～23%（標準偏差σ=0.38）となり，システム検証実験時から含水比計測の振れ幅に大幅な改善が確認された．また，計測値平均と真値との差は-1.3%であった．したがって，現場条件に合わせた方法で検量線を作成したことで，計測値の振れ幅を抑制し安定した計測が可能になったと考えられる．

b) 排土の体積

本システムの特徴の一つとして，ベルトコンベア上を流れる排土の体積を計測する際に，土砂の性状に合わせて①排土の体積を直接計測する，②重量と含水比の計測値を利用して排土の体を推定する，のどちらかの方法を選択できる点が挙げられる．実証実験時の排土の様子を**写真-9** に示す．今回は砂礫層の掘進により礫径 200mm 程度の大きな礫が頻繁に排出され，土砂表面の凹凸が激しく変化する性状であったため，3D スキャナーによる体積計測が困難な条件であった．実際に，今回の実証実験では 3D スキャナーの計測精度が確保できず，1 リング当たり最大 20%程度もの誤差が生じてしまっていた．そこで，上記②の方法で推定した排土の体積（以下，システム計算値）と，クレーンスケールによる実測重量を実測比重で除して求めた排土の体積（以下，真値）を比較し，システム計算値の精度検証を行った．なお，今回のベルトウェイヤーおよび近赤外水分計による計測値は，それぞれ実測値の±3%，±5%以内程度の精度であった．



写真-9　排土の様子

図-9 よりシステム計算値（青実線）と真値（赤破線）との誤差は 1.4%（+0.2m^3），3D スキャナー計測値（緑実線）真値との誤差は 16.8%（+2.0m^3）であった．したがって，①の方法よりも非常に高い精度で掘削土砂の体積を推定することができた．なお，他のリングでも同様の検証を行ったところ，大きくても 4%程度の誤差に収まっていた．このことから，本システムは直接体積を 3D スキャナーで計測することが困難な排土性状であったとしても，重量と含水比の計測値を利用する方法

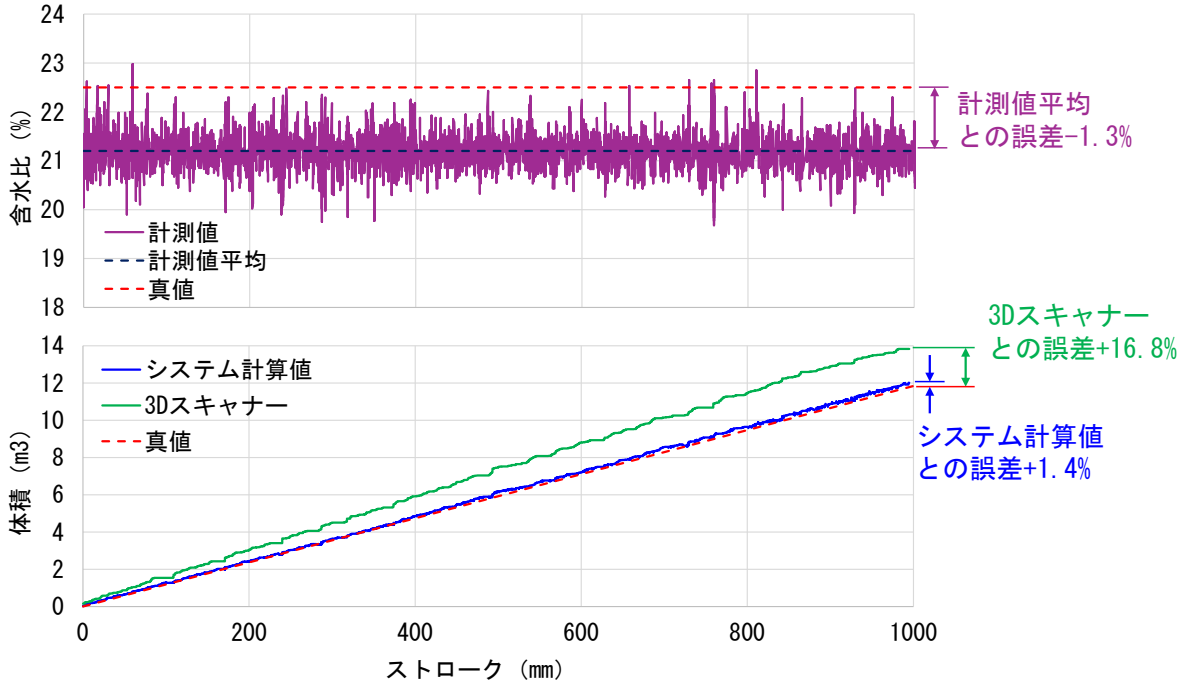


図-9　実証実験での計測結果（上：含水比、下：体積）

により精度よく排土の体積を把握できることが確認できたことから，システムの有用性が確認されたと考える．

また，②の方法で排土の体積を推定する過程において，掘削土砂の過剰取り込み量や添加材の逸泥量も理論上算出される．現状ではこれらを直接確認する方法がないため，本システムの計算によりリアルタイムで推定できるようになることは，泥土圧シールドの掘削土量管理において非常に重要であると考える．

８．まとめ

泥土圧シールド工法では掘削土量を正確に計測・管理する手法の確立が喫緊の課題となっている．そこで当社では，従来の計測方法の課題を解決し，掘削土量をより高精度に把握できる新たな計測管理システムを開発した．本稿では，本システムの概要，本システムを検証するための各種基礎実験および現場実証実験の結果について報告した．

本システムを検証するための各種基礎実験および現場実証実験を実施した結果，直接体積を 3D スキャナーで計測することが困難な排土性状であったとしても，重量と含水比の計測値を利用する方法により精度よく排土の体積を把握できることが確認され，システムの有用性が確認されたものと考える．

今後の展望として，近赤外水分計による含水比計測には，事前に検量線を作成することが不可欠であることから，掘進中の土質変化に合わせて複数の検量線を適切に切り替える手法が必要である．そこで，AI カメラを用いた土質自動判別技術の開発を進めていく予定である．また，並行して開発中のシールド機自動運転技術と連携させ，掘進管理の高度化の実現に向け技術開発を推進していく．

参考文献

1) シールドトンネル工事の安全・安心な施工に関するガイドライン，シールドトンネル施工技術検討会，2021.

2) 中山ら：含水比計を活用したベルトコンベア方式による掘削土量計測システム，土木学会全国大会講演概要集，Vol.79，2024