

αシステムを使用した乱れ率の全数管理の事例

津 田 啓 史^{*1} 岩 谷 隆 文^{*1}
 平 田 昌 史^{*2} 石 黒 健^{*2}
 澤 田 慎太郎^{*3} 鈴 江 康 人^{*3}

要 旨

土堰堤の迅速かつ着実な施工が求められる現場において、50cm仕上りの厚層施工によって施工効率の向上を図った。厚層施工時に、当社保有の盛土締固め管理技術「AtlasX」のうち、加速度応答法（加速度から地盤の剛性を推定する技術）の1つ「αシステム」を適用し、以下2つの品質管理を実施した。①厚層施工の品質管理：厚層施工では下部の品質確保が重要であるため、通常の転圧回数管理に加え、加速度応答値「乱れ率」の層平均値の目安値を設け、全面の剛性を管理した。②相対的弱部の品質管理：αシステムで得た乱れ率のヒートマップから、相対的弱部（周囲よりも乱れ率が小さい箇所）を選定し、RIの計測を実施した。弱部の品質を確認することで、施工面全面としての品質を担保し、管理の合理化を行った。αシステムを導入することで、三次元的な品質情報が取得できるため、その利活用方法の検討も行った。

キーワード 加速度応答法／盛土／振動ローラ／計測技術／品質管理

目 次

- | | |
|--------------|-----------------|
| 1. はじめに | 5. 本施工の計測結果 |
| 2. 工事概要 | 6. 三次元的な品質情報の活用 |
| 3. 試験施工 | 7. おわりに |
| 4. 施工管理方法の決定 | |

CASE STUDY OF TOTAL QUALITY MANAGEMENT USING THE ALPHA SYSTEM

Hiroshi TSUDA	Takafumi IWATANI
Masafumi HIRATA	Takeshi ISHIGURO
Shintaro SAWADA	Yasuhito SUZUE

Synopsis:

In a site where rapid and reliable construction of earthen embankments is required, we aimed to improve construction efficiency by applying a finished thick layer of 50cm. During the thick layer construction, we implemented two quality management utilizing our technology 'α System', which is one of the acceleration response methods (a technique for estimating the ground rigidity from acceleration). 1) Quality management of thick layer construction: Since ensuring the quality of the lower part is important in thick layer construction, in addition to the usual management (count the number of compactions), we set a guideline value for the average layer value of the acceleration response value "disturbance rate" to manage the rigidity of the entire surface. 2) Quality management of relatively weak points: From the heat map of the disturbance rate obtained with the α system, we selected relatively weak points (points with a lower disturbance rate than around the areas) and implemented RI measurements. By introducing the α system, it becomes possible to obtain three-dimensional quality information, and we also examined how to utilize this information.

* 1 本店 土木事業本部 土木技術部 一般土木グループ * 2 本店 ICI テクノロジーセンター 地盤グループ
 * 3 東北支店 原町火力作業所（当時）

1. はじめに

当社は、盛土の締固め管理技術「AtlasX（アトラスエックス）」を保有している。AtlasXでは、3種類のIoT機器「 α システム」「自走式散乱型 RI ロボット」「3D レーザースキャナ」を任意に組み合わせた計測と、クラウドシステム「データ統合解析システム」によるデータの一元管理を行う。このうち、 α システムは振動ローラの加速度応答が転圧の進行に応じて変化する現象を利用した技術で、加速度応答値から地盤剛性値を求め、転圧の進行を判定する「振動ローラ加速度応答法」の1つである。4t～20t級の振動ローラに加速度計と解析装置を設置し（図-1）、取得した波形をFFT解析・計算することによって、転圧の進行に伴う加速度応答の変化を定量化した独自指標「乱れ率」を施工時にリアルタイムに算出する。さらに、建山・藤山による理論式¹⁾を採用し、乱れ率から地盤剛性値（地盤変形係数）の独自指標「 E_{roller} 」を計算することで、盛土の性能に直結する物理的指標を提示することも可能である。また、 α システムと転圧管理システムを連携することで、 α システムで得た値とGNSS位置情報を紐づけ、国交省工事などで採用されている0.5m×0.5mメッシュでの面的管理ができる（図-2）。

α システムの特長として、従来の計測手法と比較して多点のデータが取得できるため、品質管理の高度化が可能である。また、計測の時間や人員が不要（施工時のオペレータのみ必要）のため、計測の省力化が可能である。

本報では、 α システムを現場に適用し、施工効率の向上・管理の合理化を行った事例を報告する。

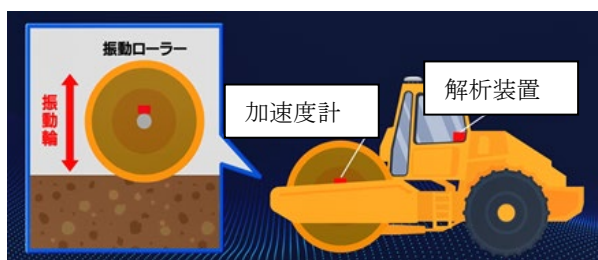


図-1 α システムの概略図



図-2 α システムの管理状況

2. 工事概要

本工事は、火力発電所から排出される石炭灰の埋立処分場の築堤工事である。石炭灰を埋め立てる外周に土堰堤を構築する（図-3）。発電所からの石炭灰の排出速度に応じて、迅速な土堰堤の施工が求められた。そこで、大型振動ローラを使用して厚層（50cm 仕上がり）で施工することで、通常施工（30cm 仕上がり）より4割の工程短縮を図った²⁾。一般的に、振動ローラの転圧効果は深度方向に対して低下するため、厚層施工では層下部の品質の確保が重要である。そのため、通常の転圧回数管理に加え、 α システムで取得される乱れ率を活用した面的管理を実施することとした。盛土の要求品質は締固め度 $D_c=85\%$ 以上（層平均値）である。土堰堤は現地発生土を使用し、ブルドーザおよび10t振動ローラを使用して、図-4中の赤枠部を造成した。盛土には採取場所の異なる現地発生土（盛土材A・盛土材B）を使用した。施工初期は盛土材Aを使用し、盛土材Aが無くなり次第、使用材料を盛土材Bに切り替えて施工を行った。両者の物性値を表-1、粒度分布を図-5、締固め曲線を図-6に示す。盛土材A・Bともシルト分が主体の粘性土である。盛土材Aは自然含水比と最適含水比が近く、締固めしやすい土といえる。盛土材Bの自然含水比は最適含水比よりも10%程度湿潤側にある材料であった。

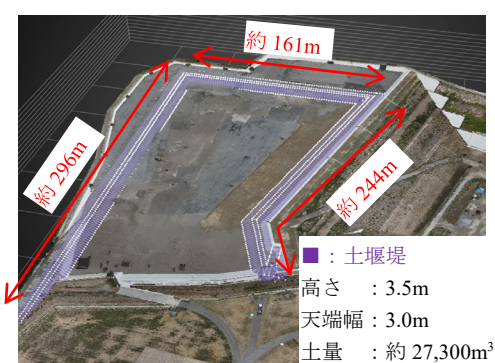


図-3 石炭灰埋立地

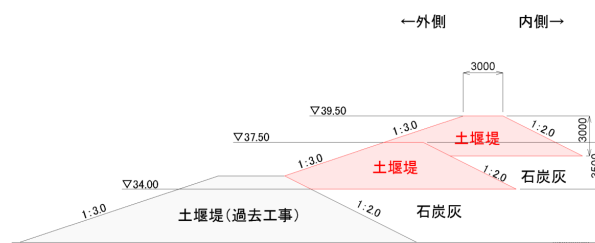


図-4 土堰堤の構造と施工仕様

表-1 使用材料の物性値

物性値	盛土材A	盛土材B
土粒子密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.502	2.475
自然含水比 $w_n(\%)$	45.5	55.1
最大粒径 $D_{\max}(\text{mm})$	53	19
細粒分含有率 $F_c(\%)$	60.6	76.5
平均粒径 $D_{50}(\text{mm})$	0.064	0.047
最大乾燥密度 $\rho_{d\max}(\text{mm})$	1.102	1.024
最適含水比 $w_{\text{opt}}(\%)$	45.0	44.5
地盤材料の分類	砂礫質細粒土	礫まじり砂質細粒土

※締固め試験はB法で実施

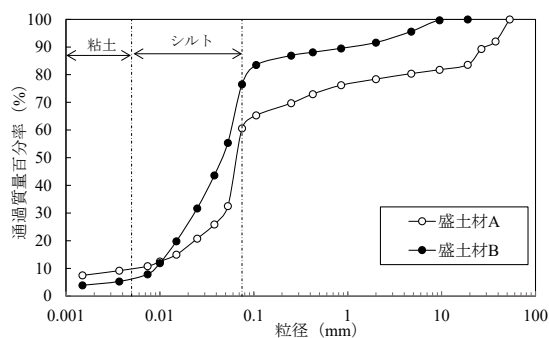


図-5 粒度分布

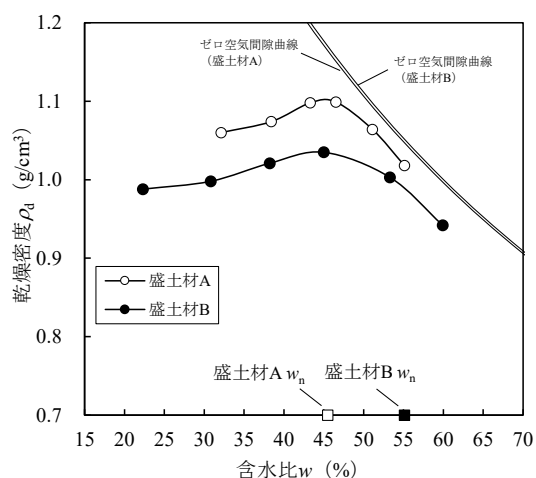


図-6 締固め曲線

3. 試験施工

3.1 試験施工概要

本施工での10t級振動ローラの転圧回数と管理方法の決定のため、試験施工を実施した。試験盛土の形状を図-7に示す。試験盛土は振動ローラ2レーン分程度の5m幅、乗り入れ部の斜路込みで延長39mとして使用材料ごとに構築した。基盤層(1層目)を30cm仕上がりで入念に締め固めて構築したあと、試験層(2層目)を50cm仕上がり目標で撒き出した。計測項目を表-2に示す。RIにより乾燥密度および含水比の計測、レベルにより沈下量の計測、 α システムにより乱れ率の計測を実施した。RIで計測可能な深度は30cmであり、施工表面から計測した際に

50cm厚の試験層下部の品質が確認できない。そこで、転圧終了後に施工面を20cm掘り下げた地点でRIを実施することで、試験層の下部の品質を確認した。掘り下げる作業があるため、ヤードを区分して転圧回数 $N=4, 6, 10$ の3エリアを設定し、転圧完了後にそれぞれのエリアで3か所ずつ20cm掘り下げて下部の密度を計測した。転圧回数ごとの沈下量や締固め度の変化を同一地点の計測値で比較確認することを目的として、 $N=10$ エリアにて転圧回数 $N=0$ (撒き出し後)、2, 4, 6, 8, 10で計測を実施した。また、前述のとおり α システムでは乱れ率と、乱れ率から換算した E_{roller} が得られる。どちらであっても管理指標とすることができるが、今回は乱れ率を日常管理に活用する計画とした。

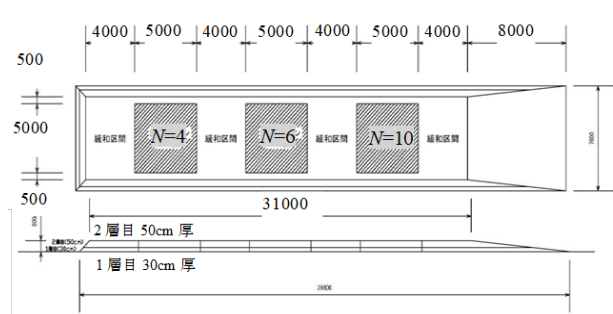


図-7 試験盛土の形状

表-2 計測項目

計測機器	計測項目	計測点数	備考
RI	乾燥密度	3点×3エリア	20cm 下げ
	含水比		面も計測
レベル	標高		—
α システム	乱れ率	転圧面全体	平均値

3.2 試験施工結果

転圧回数と締固め度の関係を図-8・図-9に示す。盛土材A・Bとも、 $N=0$ 時点でブルドーザの転圧効果により目標の $D_c=85\%$ を達成している。 $N=2$ で増加したのち、以降は漸増している。 $N=4, 6, 10$ のいずれのエリアにおいても、20cm掘り下げた地点の品質を達成した。また、 $N=6$ 以降は試験盛土の表面に過転圧によるひび割れが観察された。

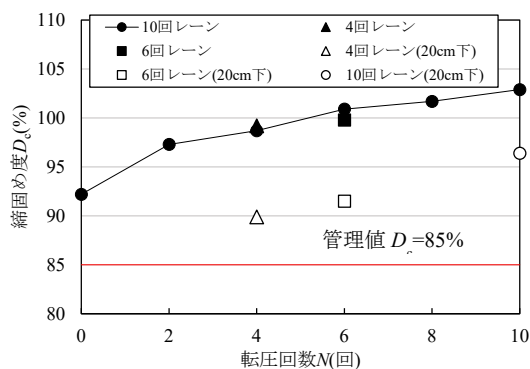


図-8 転圧回数と D_c の関係 (盛土材 A)

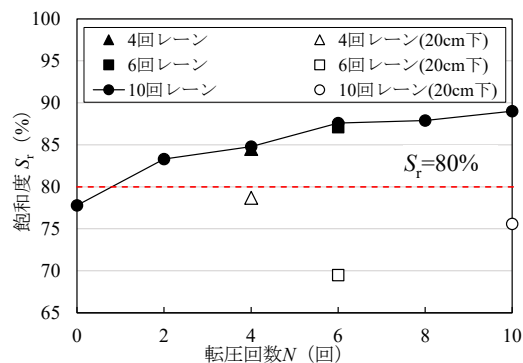


図-11 転圧回数と飽和度の関係 (盛土材 A)

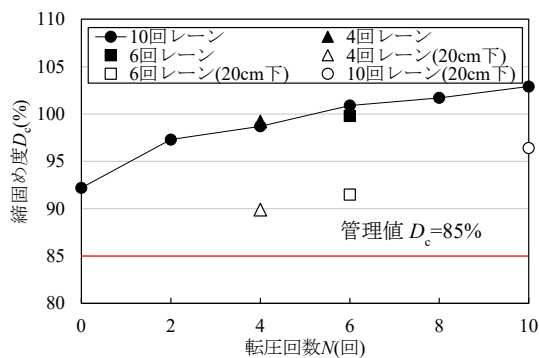


図-9 転圧回数と D_c の関係 (盛土材 B)

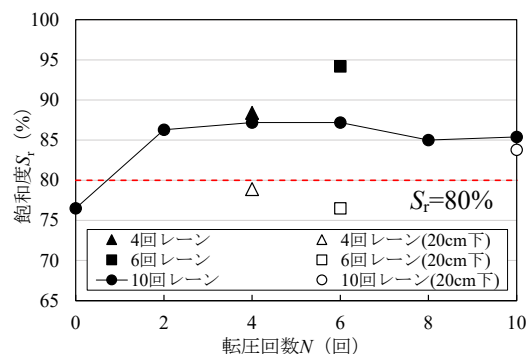


図-12 転圧回数と飽和度の関係 (盛土材 B)

転圧回数と乱れ率 (平均値) の関係を図-10 に示す。

$N=2$ 以降の乱れ率は、A は 0.10~0.11 程度、B は 0.086~0.099 程度と、転圧回数に対してほぼ変化しなかった。本盛土材は自然含水比が高く、転圧早期にゼロ空隙曲線に近づき、転圧が収れんしたとみられる。振動ローラの加速度応答値は、飽和度 $S_r=80\%$ 程度になると一定値に収れんする (顕著に増加しない) 傾向がある³⁾。今回の試験盛土も 2 回転圧以降は $S_r=80\%$ を超えており (図-11・図-12)、乱れ率が転圧回数に対してほとんど変化しない結果となった。

要求品質である締固め度 $D_c=85\%$ を達成したこと、乱れ率や飽和度から転圧が収れんしていると判断できることから、本施工での規定転圧回数を 2 回に決定した。

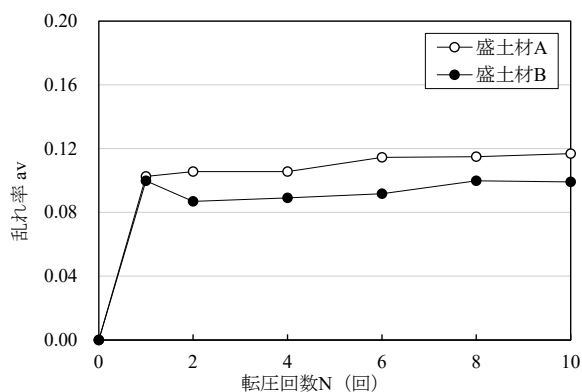


図-10 転圧回数と乱れ率の関係

厚層施工のため、層下部においても $D_c=85\%$ を達成する自主管理値を設定した。RI で計測されるのは 30cm 深度までの平均の密度であるため、転圧表面で計測したときは 15cm の密度、20cm 掘り下げた面で計測したときは 35cm の密度として、計測深度と D_c の関係を整理した (図-13・図-14)。試験盛土の $N=4, 6, 10$ エリアでの計測値のうち、最も安全側になる傾きから、RI の自主管理値 (層平均値) を盛土材 A は $D_c=94.3\%$ 、盛土材 B は $D_c=96.7\%$ として日常管理を実施した。

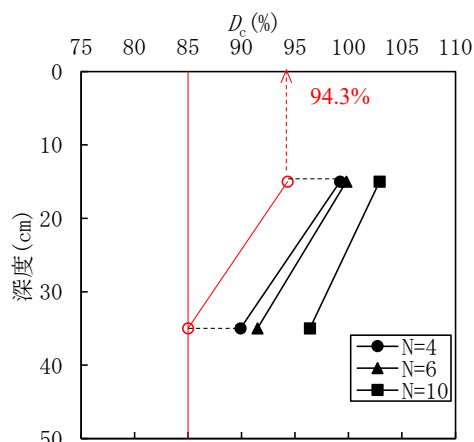


図-13 深度と D_c の関係 (盛土材 A)

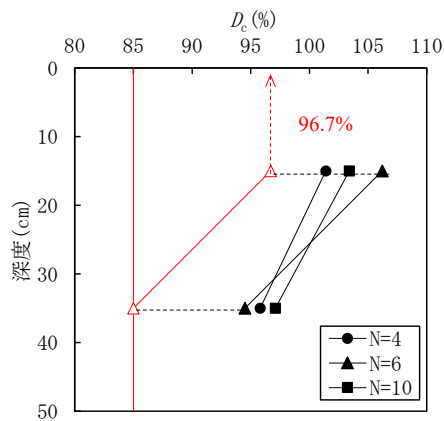


図-14 深度と D_c の関係（盛土材 B）

4 施工管理方法の決定

転圧回数の決定と締固め度の自主管理値を設定したが、RI の計測値は個々の計測値が離散（点）的である。そこで、より高度な品質管理を目的として、 α システムによる面的な品質管理を実施した。管理フローを図-15 に示す。この品質管理手法の要点は以下の2つである。

4.1 乱れ率の層平均の管理

1 つ目は、乱れ率の層平均値を用いた品質管理を行うことである。1 層の施工完了後、乱れ率の層平均値を計算する。試験施工の結果から、乱れ率の日常管理の目安値を盛土材 A では 0.100、盛土材 B では 0.086 とし、各層の平均値を管理する。乱れ率の平均値が目安値を下回った場合はデータの検証を行い、乱れ率の低い箇所の置換え処理や再転圧など、適切な処置を行う。例えば降雨の翌日は含水比が高く、乱れ率が小さくなることが予想される。試験施工時には、雨天の影響によって局所的に含水比が高まった箇所において、乱れ率は 0.077、締固め度は 69.3%、ウェービングが生じており、転圧効果の低下が観察された（図-16）。施工初期は盛土材 A を使用したため、乱れ率の管理目安値を 0.100 として、盛土材 B に切り替わり次第、管理目安値を 0.086 として施工した。



図-16 試験施工時の高含水比箇所

4.2 相対的弱部の品質管理

2 つ目は、 α システムと RI を組み合わせて相対的弱部（周囲よりも乱れ率が小さい箇所）の品質管理を行うことである。管理状況を図-17 に示す。各層の施工完了後、事務所にて乱れ率のヒートマップを確認し、相対的弱部を選定する。選定した箇所の座標を確認した後、事務所から現場に連絡し、選定した弱部を含む複数地点で RI の計測を実施する。通常の品質管理では施工面積に応じた点数を任意の地点で計測するが、 α システムを活用することによって、地盤剛性が相対的に低い箇所における締固め度が確認できる。地盤剛性が低い地点で要求品質（締固め度）を達成していれば、それ以外の地点、即ち施工層全面で品質を達成したといえる。同様の考え方はドイツの道路土工品質管理要領のうち「M3 手法」で導入されており、加速度応答法を用いた弱部の抽出によって、品質管理の合理化を図っている⁴⁾。 α システムと組み合わせて RI の計測を実施し、締固め度が管理値未満の場合は、現地の目視確認（ウェービングや過転圧の有無など）を行い、高含水比の場合は置き換え、転圧不足の場合は再転圧など、適切な処置を行う。



① 現場事務所における乱れ率の確認 ② 相対的弱部における現地 RI 計測

図-17 乱れ率の確認と弱部での RI 計測状況

5 本施工の計測結果

本施工での RI の計測結果を図-18 に示す。試験施工時のウェービング発生箇所（図-16）の計測値は、締固め曲線から大きく外れている。本施工の RI 計測値は締固め曲線の近傍に位置していることから、本施工においては盛土材料のばらつきは少なく、想定した通りの転圧が行われたことが分かる。また、 α システムで得た乱れ率のヒートマップから選定した、相対的弱部での RI 計測値を図中の着色したプロットで示した。相対的弱部での RI 計測値

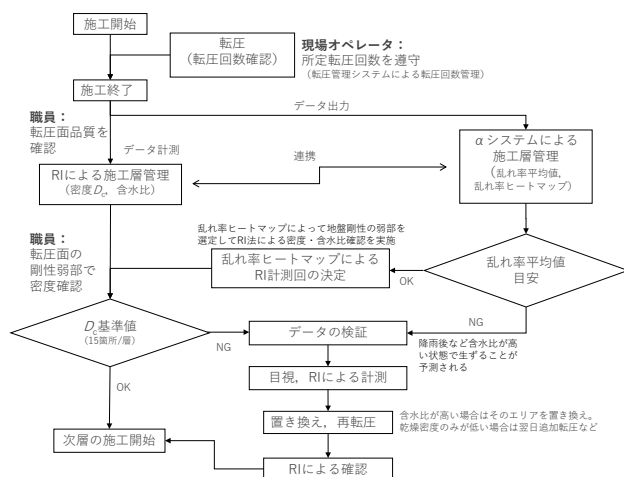


図-15 α システムを活用した品質管理フロー

は高含水比・低乾燥密度の箇所に分布しており、効率的に弱部を選定して RI の計測を実施できたことが分かる。続いて、含水比と乱れ率の関係を図-19 に示す。含水比が高くなると乱れ率が低くなる傾向がみられる一方で、同じ含水比であっても乱れ率が倍半分以上異なる地点があった。このことから、含水比だけでなく締固め密度も乱れ率に影響していると考えられる。龍岡⁵⁾は、締め固めた土の剛性や強度が締固め時の乾燥密度と飽和度の両者の影響を受けて変化することを明らかにしている。そこで、本施工で取得した全 RI データ ($n=220$) に対して、締固め度と飽和度のヒストグラムを作成した。締固め度のヒストグラムを図-20、飽和度のヒストグラムを図-21 に示す。それぞれのヒストグラムに、相対的弱部での計測データをオレンジ色で併記した。2つのヒストグラムを確認すると、相対的弱部での計測結果は低締固め度・高飽和度に分布している。龍岡の指摘通り、乾燥密度と飽和度の両者の影響を受けて、図-22 中の低乱れ率部が形成されたと考えられる。今回は実現には至らなかったが、RI の計測データを蓄積し、弱部の締固め度が管理値に対して十分に余裕があることを確認できれば、計測点数を減じて品質管理の効率化も可能と考えられる。

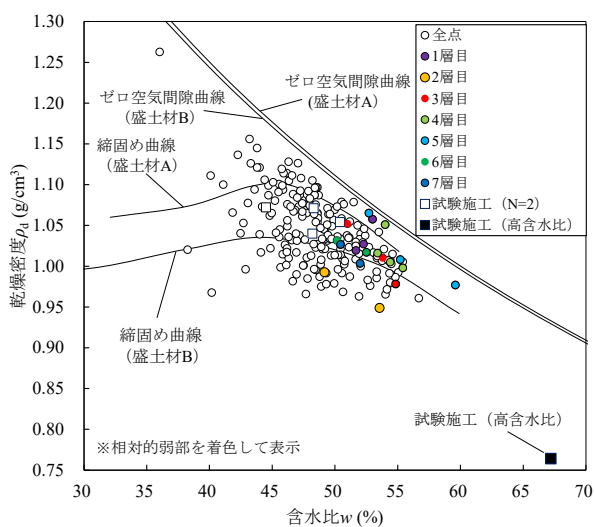


図-18 RI の現場計測結果

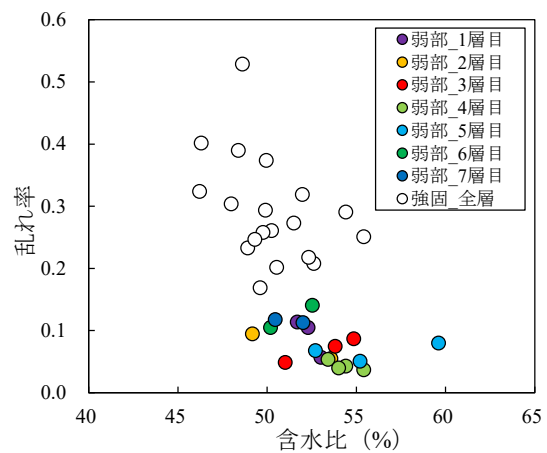


図-19 含水比と乱れ率の関係

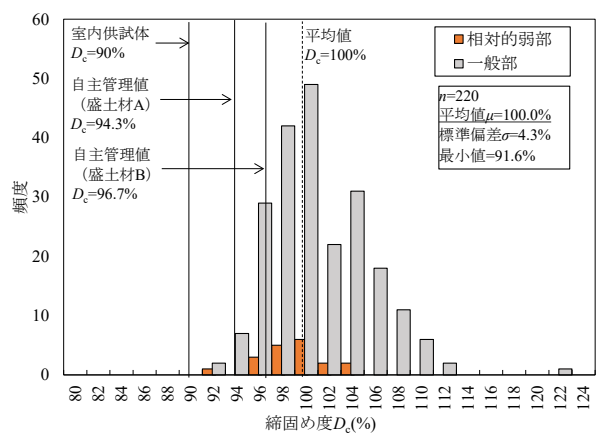


図-20 締固め度のヒストグラム

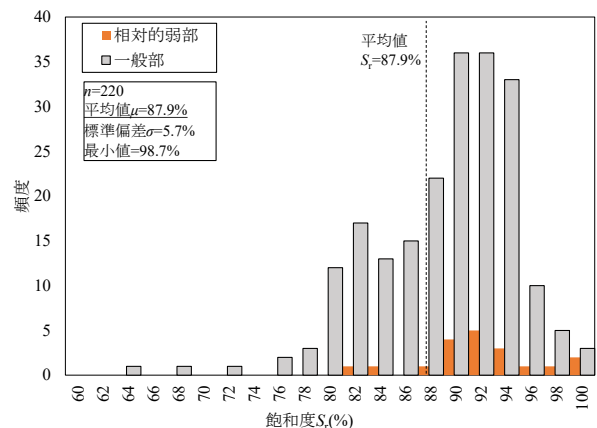


図-21 飽和度のヒストグラム

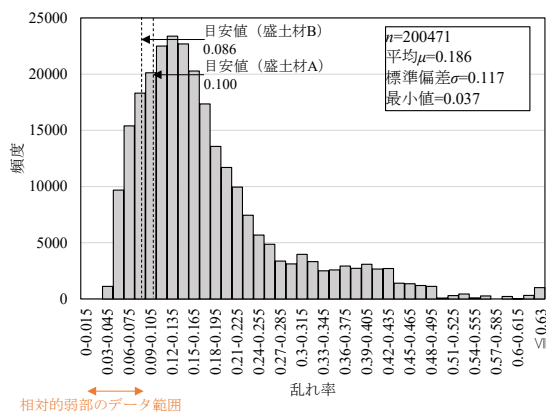


図-22 乱れ率のヒストグラム

6 三次元的な品質情報の活用

α システムによる面的管理によって、図-22 のような統計情報が得られることに加えて、積層方向も含めた三次元的な品質情報を取得できる。この利活用方法を 2 つ述べる。

6.1 すべり安定性の評価

活用方法の 1 つ目は、すべり安定性の評価である。本施工と同じ盛土材を使用して供試体を作製し、三軸圧縮試験を実施した。試験結果を図-23 に示す。三軸試験では締固め度 90%、飽和度 100%の供試体を使用した。試験によって得た粘着力（有効応力）とせん断抵抗角（有効応力）から、堤体外側の 1:3 斜面のすべりへの安定性を計算したところ、安全率が 1.629 と、十分に安全側であった。なお、堤体内側の 1:2 斜面は石炭灰を埋め立てるため検討対象から除外した。実際の現場の盛土（図-20）は供試体よりも締固め密度が大きく（締固め度が 95%~100%程度で管理基準を満たす）、不飽和土であるためサクションによって強度が大きい。また、低乱れ率部は全面を占めることはなく、点在している（図-24）。施工面全面が供試体と同等の品質、即ち相対的弱部以下の品質と仮定しても、すべりに対して安定であることが確認された。そのなかでも、どの地点が相対的にすべりやすいか、 α システムの活用によってリアルタイムに確認することができる。

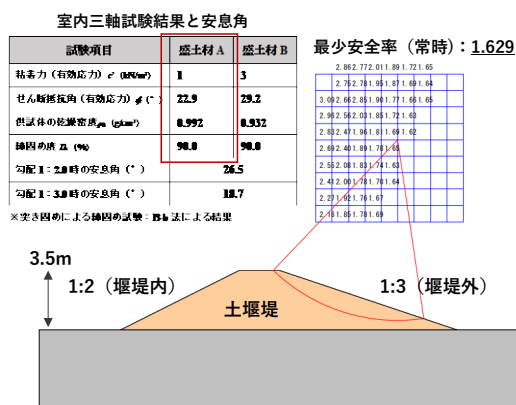


図-23 飽和三軸試験結果を用いた円弧すべり計算結果

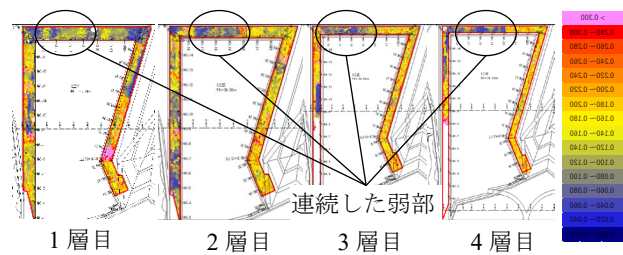


図-24 乱れ率ヒートマップ（1～4 層目）

6.2 相対的弱部の連続性の確認

活用方法の 2 つ目は、相対的弱部の 3 次元的な連続性の確認である。図-24 中の黒丸を付した箇所では、締固め度の基準値を満足しており、前節で述べたとおり斜面のすべりへの安定性にも問題ない。その一方で、乱れ率のヒートマップ上では積層方向にも弱部が連続する箇所であり、相対的には最も安定性の低い箇所である。今回の結果を踏まえて、施工者がヒートマップを随時確認し、弱部が平面的・立体的に連続しないような適切な処置（例えば施工含水比の調節など）を行えば、より高品質な盛土を構築できる。また、施工時に得られた空間的な品質データを盛土の維持管理部門に継承・利活用することによって、維持管理箇所の選択と集中が行えるため、維持管理業務の効率化も実現できる。

7 おわりに

本報では、施工効率が求められる現場において厚層施工を実施し、品質管理に α システムを適用した事例を紹介した。厚層施工は施工速度が向上する一方で、転圧効果が層下部まで十分に発揮されない場合がある。当現場においては締固め度の自主管理値の設定に加えて、 α システムの乱れ率の面的管理を行うことで、厚層施工の品質を確保し、施工効率の向上を実現した。また、乱れ率のヒートマップ上の弱部において RI の計測を実施し、締固め度を確認することで、施工層全面の品質を担保し、品質管理の合理化も実現した。さらに、施工時だけでなく維持管理時にも施工データの利活用の可能性が示唆された。今後も本技術を様々な現場に展開し、より品質の良い盛土の施工につなげていきたい。

謝辞：本報の作成にあたり、原町火力割田造成作業所の職員および東北電力の皆様にも多大なご協力をいただきました。感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 藤山哲雄，建山和由：振動ローラの加速度応答を利用した転圧地盤の剛性評価手法，土木学会論文集 No.652/Ⅲ-51，pp.115-123，2000。
- 2) 佐近翔，米谷明紀，木村浩二，永井志功：原町火力発電所割田石炭灰埋立地における ICT 土工管理システムを用いた工事工程短縮計画について，土木学会

東北支部技術発表会，2022.

- 3) 石黒ら：ICT 土工現場締固め品質管理手法「次世代 α システム」の開発－国土交通省 PRISM 大石龍門実証工事の実施概要－，土木学会土木建設技術発表会，2022.
- 4) 橋本毅：ドイツにおける ICT を利用した締固め管理技術，建設の施工企画，pp.29-33，2010.
- 5) 龍岡文夫：土の締固め管理－現状・新たな展望・展開－1 章 土の締固めの目的・意義・方法，総合土木研究，2022.