

施工時情報を活用した盛土の面的品質管理法

公益財団法人鉄道総合技術研究所	正会員	○笠原康平	天野友貴
		阿部寿	杉本英治
		中島 準	

1. はじめに

鉄道盛土の施工は、密度（締固め度 D_c ）および剛性（地盤反力係数 K_{30} 値）を指標として品質管理が行われている¹⁾。一般に、締固め度 D_c は RI 計器等による密度試験で、 K_{30} 値は平板載荷試験・小型 FWD 試験で確認されており、品質管理においては点計測の欠点を補うために多数箇所で人力の試験作業が必要である。

筆者らは、このような鉄道盛土施工の品質管理作業を省力化することを目指し、施工時の沈下量情報を活用した品質管理に関する研究を行っている。ここで、施工時の沈下量は、転圧後にレベル測量や ICT 機器（地上型レーザースキャナ等）を用いて現地で比較的簡易に測定可能な情報である。

既報^{2)~5)}では、施工時の沈下量情報を用いた密度・剛性評価法を提案するとともに、砂質土を用いた盛土の施工試験に提案法を適用し、施工時の沈下量情報から密度・剛性を評価できる可能性があることを示した。本稿では、施工時情報を用いた密度評価法の深度化の一環として、礫質土を用いた盛土の追加施工試験を行い、提案法の異なる盛土材料への適用性を確認するとともに、ICT 機器を活用した盛土の面的な品質管理に関する試行を行ったので報告する。

2. 礫質土を用いた小型試験盛土の施工試験⁶⁾

(1) 施工試験の概要

図-1 に施工試験で構築した試験盛土（盛土天端寸法：幅 3.4m×奥行 8.0m×高さ 0.9m）の概要を示す．盛土材料はクラッシャーラン C-40（砂まじり礫【G-S】）で，最大粒径 $D_{\max}=37.5\text{mm}$ ，細粒分含有率 $F_c=2.5\%$ ，土粒子密度 $\rho_s=2.724\text{g/cm}^3$ ，均等係数 $U_c=12.1$ ，最大乾燥密度 $\rho_d=2.003\text{g/cm}^3$ （E 法： $4.5E_c$ ），最適含水比 $w_{\text{opt}}=7.4\%$ （E 法： $4.5E_c$ ）である．盛土高さは 90cm（1 層当たりの仕上がり厚さ 30cm×3 層）であり，転圧には 4t 級コンバインドローラを用いた．

計測は、締固め度 D_c 、地盤反力係数 K_{30} 値、転圧時の沈下量について、RI 計器と小型 FWD、デジタルレベルで計測を行った。計測点は 1 層当たり 9 測点設け、転圧前および 2 回転圧ごと（転圧機械が 1 往復するごと）に計測を行った。また、デジタルレベルよりも広範囲を短時間で測定可能な地上型レーザースキャナ Leica RTC360（以下、スキャナ）を用いて盛土周辺 2 箇所および盛土上 1 箇所から点群計測を行い、転圧前後における点群の差分から沈下量を算出した。

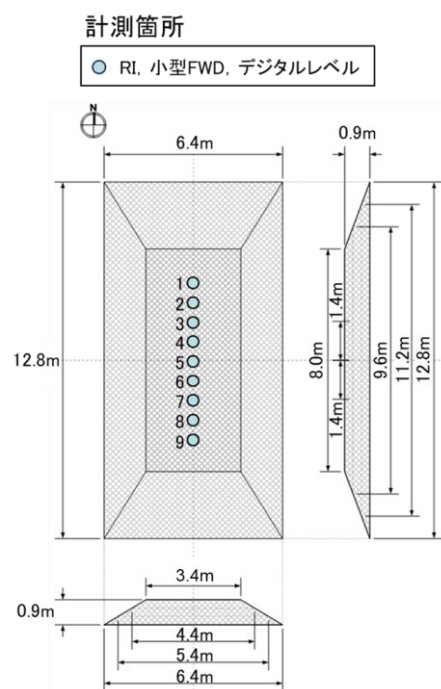


図-1 試験盛土の概要

(2) 施工試験の結果

図-2 に、転圧回数－累積沈下量(デジタルレベルで計測)、転圧回数－沈下量増分(デジタルレベルで計測)、転圧回数－ D_c 、転圧回数－ K_{30} 値の関係を示す。各計測点の結果にはばらつきがみられるものの、転圧回数の増加に伴い累積沈下量・ D_c ・ K_{30} 値の平均値には増加傾向が、沈下量増分の平均値には減少傾向が確認された。

図-3 にデジタルレベルで計測した沈下量とスキャナで計測した沈下量（3 層目）の比較を示す。図-3 より、両者の差は±5mm 程度以内であった。概ね整合する結果であったが、若干の違いが生じた要因としては、レベ

キーワード 盛土、締固め度、施工時沈下量情報

ル測量とスキャナでは機器性能の違いにより測定精度が異なることに加え、レベル測量の結果がスタッフを据えた箇所（スタッフの底面寸法：約 3cm×5cm の範囲）の情報であるのに対し、今回比較に用いたスキャナの結果は、レベル測量の各測点を中心とする半径 50mm の領域内の点群から算出した沈下量の中央値を評価したものであるため、評価範囲の違いにより差異が生じた可能性がある。

(3) 施工時沈下量情報の相関分析

締固め度 $D_c \cdot K_{30}$ 値と施工時沈下量情報の関係を確認するための相関分析を行った（図-4）。相関分析では、沈下量情報として i 回目転圧時の累積沈下量 $CumS_i$ 、沈下量増分 ΔS_i 、 $CumS_i/S_{16}$ 、 $\Delta S_i/CumS_i$ を分析対象とした。ここで、 S_{16} は 16 回転圧時の累積沈下量であり、特別管理規定値 D_s^7 の考え方を参考にすると、使用する転圧機械で到達可能な現場最大乾燥密度が得られる転圧回数と言える。

図-4 より、各沈下量情報（ $CumS_i$ 、 ΔS_i 、 $CumS_i/S_{16}$ 、 $\Delta S_i/CumS_i$ ）は、締固め度 $D_c \cdot K_{30}$ 値と一定の相関性を有することが確認された。特に、締固め度 D_c に着目すると、相関が最も高かったのは① $CumS_i/S_{16}$ （図-4 の赤枠内が相関係数）、次いで② $\Delta S_i/CumS_i$ （図-4 の青枠内が相関係数）であり、これは笠間砂（砂質土）を用いた既報の試験結果²⁾と同様の結果であった。①は使用する転圧機械で到達可能な最大沈下量に対する沈下の進行程度を示す情報、②は転圧による沈下の収束程度を示す情報であり、本結果を踏まえると、礫質土を用いた盛土の場合も、沈下量情報として① $CumS_i/S_{16}$ 、② $\Delta S_i/CumS_i$ を用いることで D_c を評価できる可能性があると考えられる。また、図-4 より、含水比と① $CumS_i/S_{16}$ には負の相関が、含水比と② $\Delta S_i/CumS_i$ には正の相関がみられたことから（図-4 の緑枠内が相関係数）、これらの沈下量情報は含水比の影響を受けると考えられる。したがって、沈下量情報を用いて締固め管理を行う上では、含水比の影響を考慮することが重要だと考えられる。

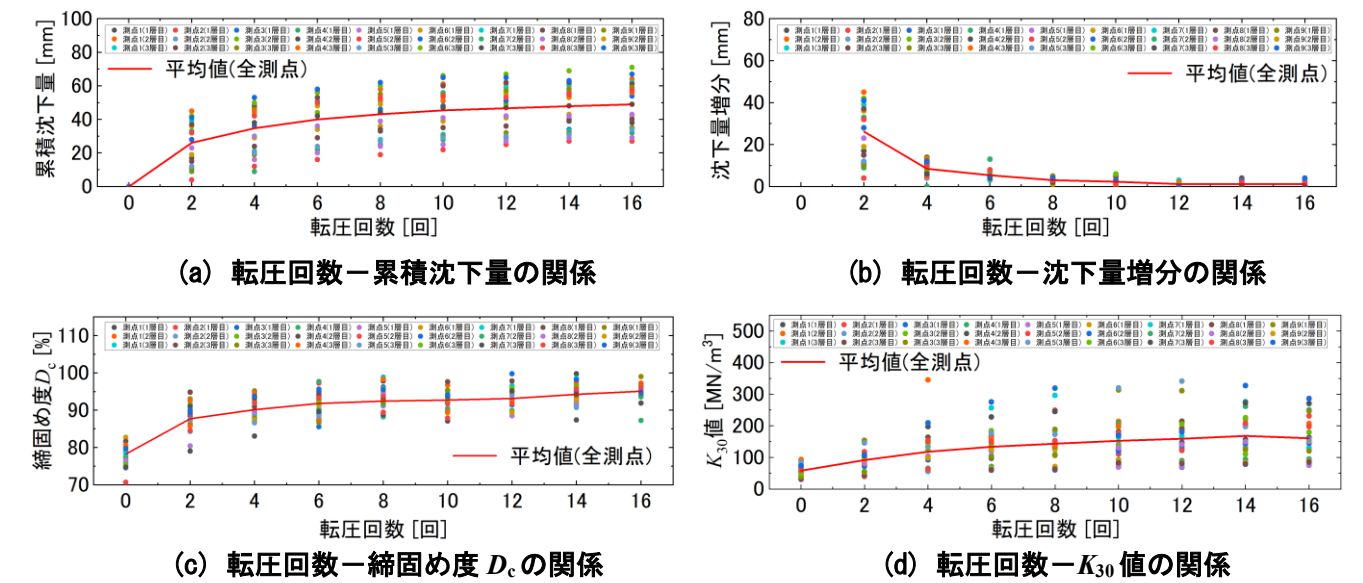


図-2 施工試験の計測結果

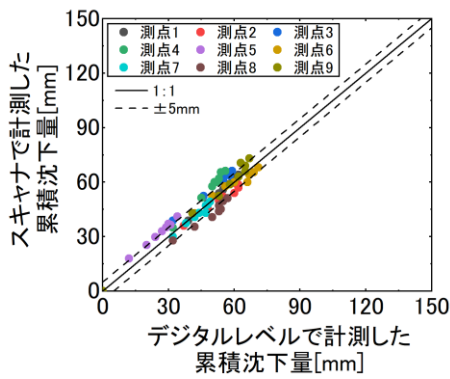
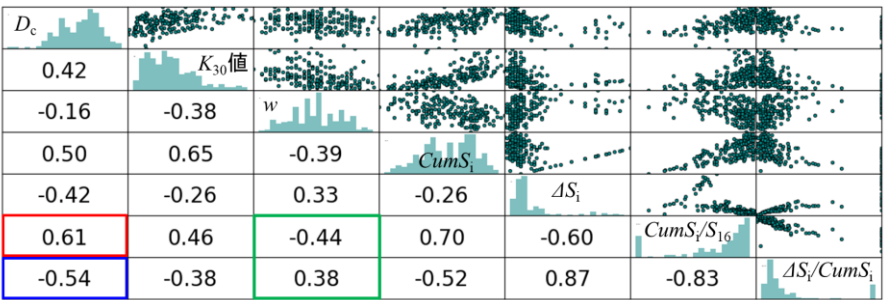


図-3 スキャナとレベル測量の比較（3層目の結果）



※ D_c : 締固め度, K_{30} 値 : 地盤反力係数, w : 含水比, $CumS_i$: i 回目転圧時の累積沈下量
 ΔS_i : i 回目転圧時の沈下量増分, S_{16} : 16 回転圧時の累積沈下量

図-4 締固め度 $D_c \cdot K_{30}$ 値とレベル測量による沈下量情報の対散布図（図中の数字は各変数同士の相関係数を示す）

3. 施工時沈下量情報を用いた締固め度の代替指標の提案⁸⁾

(1) 提案する代替指標の概要

前章の相関分析結果を踏まえ、締固め度の代替指標として、式(1)に示す①正規化沈下量指標 $S_{\text{norm}} = \text{Cum}S_{\text{iave}}/S_{16\text{ave}}$ 、および式(2)に示す②沈下量増分指標 $\Delta S_{\text{norm}} = \Delta S_{ij}/\text{Cum}S_{ij}$ の2指標を提案する。

$$S_{\text{norm}} = \frac{\text{Cum}S_{\text{iave}}}{S_{16\text{ave}}} = \frac{i \text{ 回目転圧時の累積沈下量の平均値}}{16 \text{ 回目転圧時の累積沈下量の平均値}} \cdots (1)$$

$$\Delta S_{\text{norm}} = \frac{\Delta S_{ij}}{\text{Cum}S_{ij}} = \frac{i \text{ 回目転圧時の測点 } j \text{ での沈下量増分}}{i \text{ 回目転圧時の測点 } j \text{ での累積沈下量}} \cdots (2)$$

ここで、 S_{norm} は使用する転圧機械で到達可能な最大沈下量に対する沈下の進行程度を、 ΔS_{norm} は転圧による沈下の収束程度を意味する指標である。提案指標の詳細については文献3を参照されたい。

各沈下量指標と転圧回数の関係を図-5、図-6に示す。図中には2章で示したC-40（礫質土）の試験結果、および笠間砂（砂質土）の試験結果²⁾を示しているが、これらはいずれも4t級コンバインドローラを用いた試験盛土の結果である。図-5、図-6より、C-40 および笠間砂ともに、転圧回数の増加に伴い正規化沈下量指標は1に、沈下量増分指標は0に近づく傾向が確認された。

(2) 沈下量指標の閾値の設定方法の深度化

沈下量指標の閾値の設定方法を既報^{3), 5)}よりも深度化し、以下の手順で設定することとした。なお、本節で示す図中の結果は、2章で示したC-40の試験盛土2層目において、デジタルレベルを用いて計測した沈下量の結果である。

(i) 線区の重要度等から定まる性能ランク¹⁾に応じた締固め度の基準値（性能ランクI：平均95%，下限92%，性能ランクII，III：平均90%，下限87%）を目標締固め度に設定する（図-7の(a)および図-8の(a)）。

(ii) S_{norm} と ΔS_{norm} の閾値を仮定する（図-7の(b)および図-8の(b)）。ここで、既報^{3), 5)}では、閾値の設定方法を明確に示していなかったが、本稿では以下の基準により S_{norm} と ΔS_{norm} の閾値を仮定することとした。

- ・目標締固め度を越えた測点のうち、最も小さい S_{norm} の値を閾値と仮定する（図-7の(b)）。
- ・目標締固め度を越えた測点のうち、最も大きい ΔS_{norm} の値を閾値と仮定する（図-8の(b)）。

(iii) S_{norm} が(ii)で仮定した閾値以上の測点のうち、目標締固め度以下の測点があるか確認する（図-7の(c)）。

- ・該当測点がない場合

(ii)で仮定した S_{norm} の値を本施工で用いる閾値に設定する。

- ・該当測点がある場合

該当測点のうち最も大きい S_{norm} の値を本施工で用いる閾値に設定する。

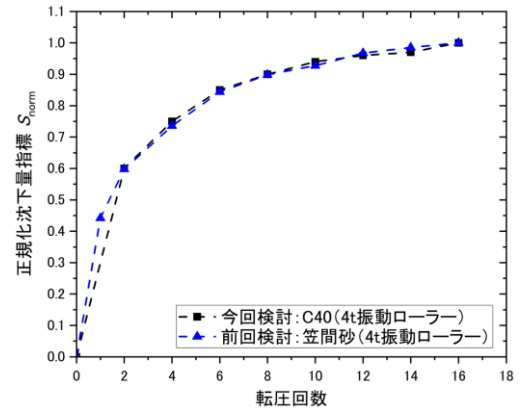


図-5 S_{norm} と転圧回数の関係

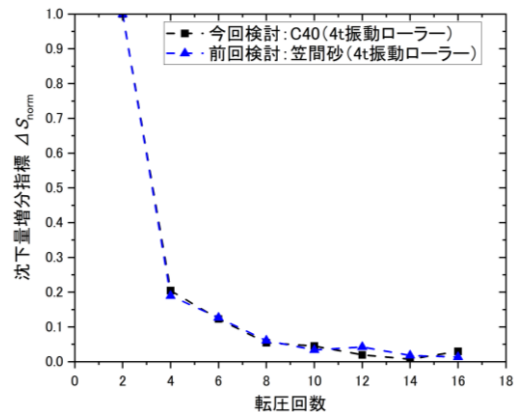


図-6 ΔS_{norm} と転圧回数の関係

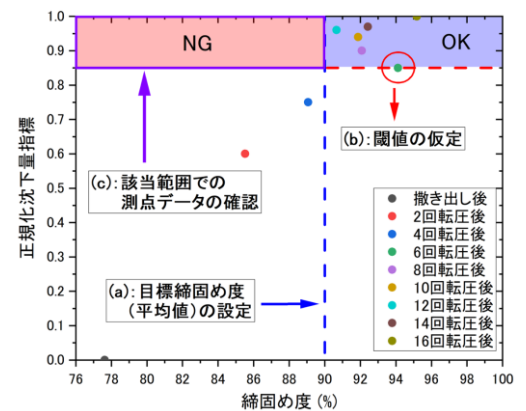


図-7 S_{norm} と締固め度の関係

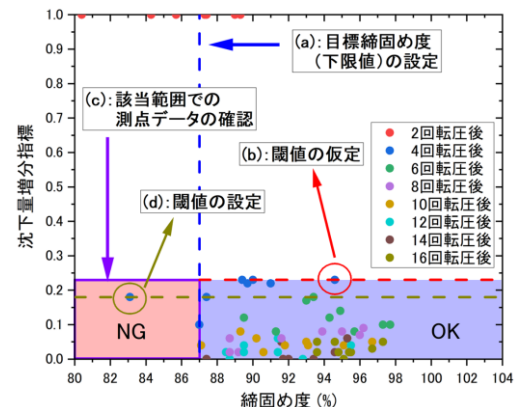


図-8 ΔS_{norm} と締固め度の関係

(iv) ΔS_{norm} が(ii)で仮定した閾値以上の測点のうち、目標締固め度以下の測点があるか確認する(図-8の(c)).

- ・該当測点がない場合

(ii)で仮定した ΔS_{norm} の値を本施工で用いる閾値に設定する.

- ・該当測点がある場合

該当測点のうち最も小さい ΔS_{norm} の値を本施工で用いる閾値に設定する(図-8の(d)).

表-1 に性能ランクIIの締固め度(平均 90%, 下限 87%)を目標とした場合の沈下量指標の閾値を示す. 表には, 2 章で示した C-40 の試験盛土 2 層目の結果, および笠間砂の試験盛土 3 層目の結果²⁾を元に, 上記手順で設定した閾値を記載した. 表-1 より, C-40 と笠間砂では閾値が異なる結果となった. これは, 図-5,

図-6 のように各沈下量指標の推移が C-40 と笠間砂で同様であっ

た一方, 到達する締固め度(RI で計測)が両者で異なったことが要因と考えられる. このように, 転圧機械が同じでも材料条件が異なると閾値が変わる可能性があるため, 本手法の適用に当たっては, 施工試験を行い現場条件に応じた閾値を設定することが重要と考えられる. なお, 盛土施工時に施工試験を行うことは従来も一般に実施されているため, 本手法の適用により現場負担が大幅に増加することにはならない.

4. 試験盛土に対する提案法の適用結果

(1) レベル測量で取得した沈下量情報を用いた場合

3章で設定した閾値を用いて, C-40 の試験盛土 3 層目および笠間砂の試験盛土 2 層目³⁾に提案法を適用する.

ここでは, 施工時の沈下量情報を用いた密度評価の第一段階として, 点計測であるレベル測量で取得した沈下量情報から密度評価を行うことを試みた. 図-9, 図-10 は, 各盛土材料に本手法を適用した時の沈下量指標と

表-1 沈下量指標の閾値

使用材料	正規化沈下量指標 S_{norm}	沈下量増分指標 ΔS_{norm}
C-40	0.85	0.18
笠間砂	0.44	0.32

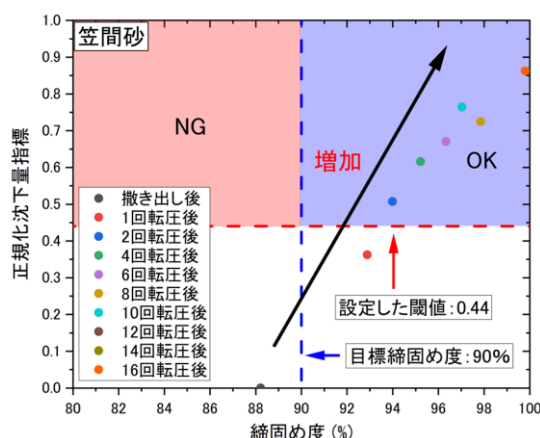
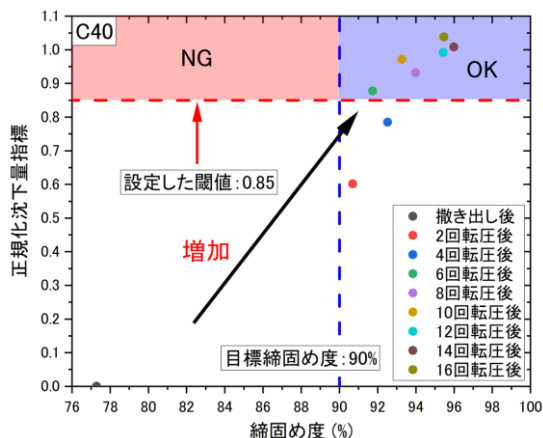


図-9 S_{norm} と転圧回数の関係(左: C-40, 右: 笠間砂)

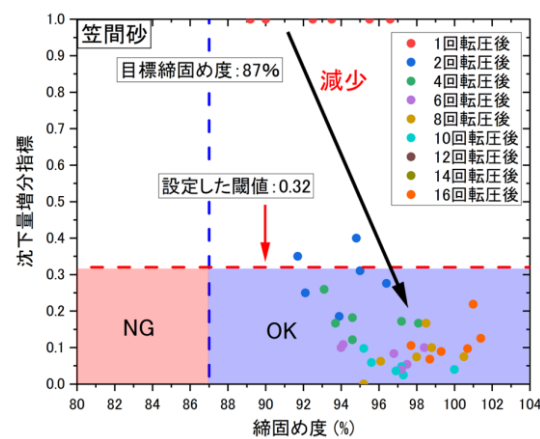
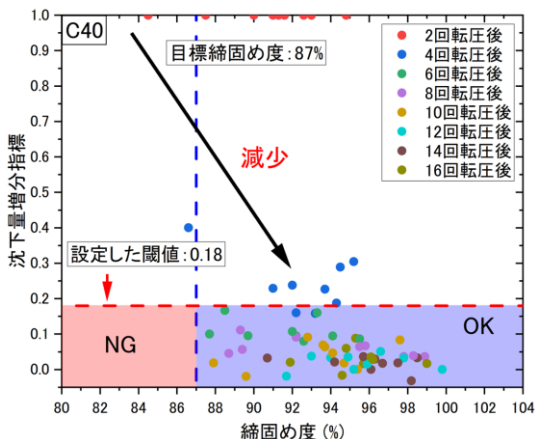


図-10 ΔS_{norm} と転圧回数の関係(左: C-40, 右: 笠間砂)

締固め度の関係である。図-9、図-10 より、C-40 および笠間砂ともに締固め度の増加に伴い正規化沈下量指標は 1 に、沈下量増分指標は 0 に近づく傾向が確認された。

表-2 に提案法の適用結果を示す。表には、提案法を適用した場合の必要転圧回数と締固め度の実測値を記載した。表-2 より、提案法は従来法と比較して必要転圧回数が若干増加する場合があるものの、締固め度の実測値は性能ランクに応じた基準値を満足する結果となった。このことから、盛土材料が礫質土の場合であっても、締固め度が管理基準値以上となることを評価する品質管理手法として本手法を適用可能なことが示された。

表-2 提案法の適用結果

沈下量指標の閾値 $S_{norm} : 0.85$ $\Delta S_{norm} : 0.18$	密度管理手法	締固め度の 実測値 (平均値)	締固め度の 実測値 (最小値)	密度管理 完了時の 転圧回数
C40	従来手法	91.7	87.7	6
	提案手法	91.7	87.7	6
沈下量指標の閾値 $S_{norm} : 0.44$ $\Delta S_{norm} : 0.32$	密度管理手法	締固め度の 実測値 (平均値)	締固め度の 実測値 (最小値)	密度管理 完了時の 転圧回数
笠間砂	従来手法	94.0	91.7	2
	提案手法	95.2	93.1	4

(2) スキャナで取得した沈下量情報を用いた場合（面的品質管理への拡張）

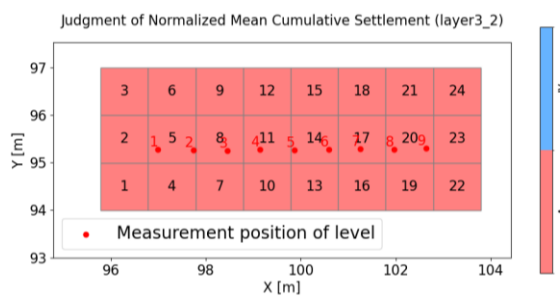
(1) ではレベル測量による点計測の情報を用いた検討結果を示したが、レベル測量による点計測はコンバインドローラの転圧境界に生じる轍の影響や、盛土材料が巨礫を含む場合の局所的な凹凸の影響を受けやすい。したがって、施工条件によっては適切な沈下量計測が困難な場合があると考えられる。さらに、レベル測量は点計測であるため、多数箇所の計測を行う必要があるという課題は解決していない。

一方、昨今は ICT 技術が発達しており、面的計測が容易になっている。面的計測の実施により盛土の平均的な沈下挙動を確認することが可能となるため、転圧境界の轍の影響や巨礫の局所的な凹凸が計測結果に及ぼす影響を低減できる可能性がある。そこで本稿では、提案法の面的品質管理への拡張に向けた試行として、スキャナで取得した沈下量情報を用いた面的評価を試みた。

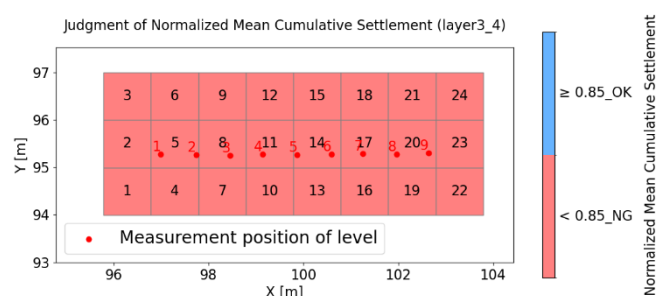
図-11～図-14（赤点：レベル測量の測点位置）は、C-40 の試験盛土 3 層目を 1m×1m のメッシュに分割した際の正規化沈下量指標 S_{norm} および沈下量増分指標 ΔS_{norm} のヒートマップと、それらの超過率の推移である。本稿では、各メッシュにおける沈下量の代表値として中央値を用いて沈下量指標を算出した。これは、代表値に平均値を用いた場合、点群データ取得時に周囲の作業や計測機器等がノイズとして映り込むと、評価結果に大きな影響を及ぼす恐れがあるためである。一方、中央値はこのようなノイズの影響を受けにくいことから、本検討では中央値を採用した。沈下量情報の閾値、および式(1)から正規化沈下量指標 S_{norm} を算出する際の S_{16ave} （16 回目転圧時の累積沈下量の平均値）は、基礎的検討として 3 章でレベル測量結果から得られた値を用いて評価を行った。また、図-12 および図-14 で示す超過率は、全メッシュ数に対する閾値を満たさないメッシュ数の割合から計算した。

図-11～図-14 より、転圧回数の増加に伴い正規化沈下量指標および沈下量増分指標の閾値を満足するメッシュ数が増加し、6 回目転圧で全てのメッシュが両指標の閾値を満足した。これは、表-2 で示した従来手法およびレベル測量で評価した場合の必要転圧回数と一致する結果である。このことから、本手法を面的品質管理に拡張できる可能性が示された。しかしながら、面的計測による評価結果に影響する以下の事柄については今回検討できていないため、これらは今後の課題である。

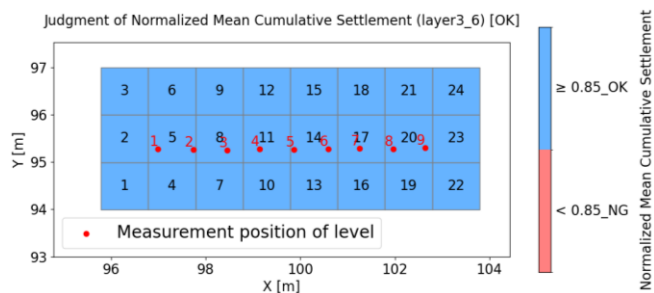
- ・超過率の許容値の設定に関して
- 一般に、面的計測のように計測点数を増やした場合、データの分布の裾野が広がり従来基準を満足しない割合（本稿では超過率と定義）が発生することが指摘されている⁹⁾。本検討では全てのメッシュで閾値を満足する結果となったが、この理由として試験盛土が小規模でありメッシュ数が少なかったことが要因と考えられる。今後、様々な規模の盛土に本手法を適用するに当たっては、この超過率の許容値をどのように設定するかの検討が重要であると考えている。



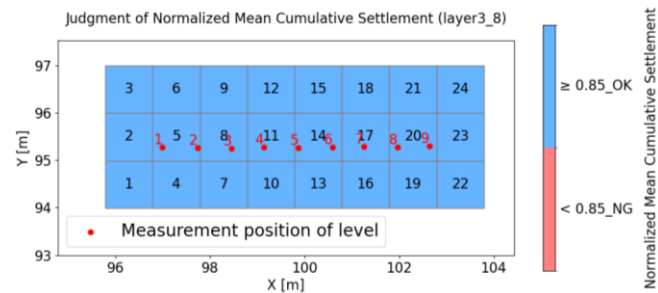
(a) 2 回目転圧後



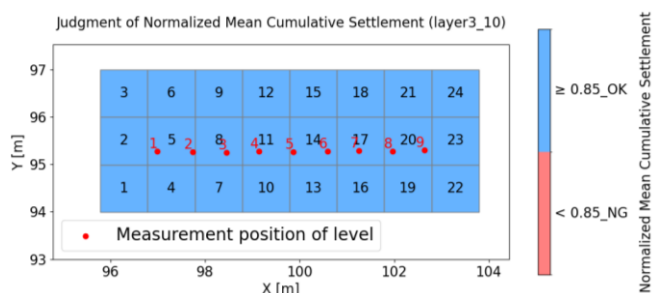
(b) 4 回目転圧後



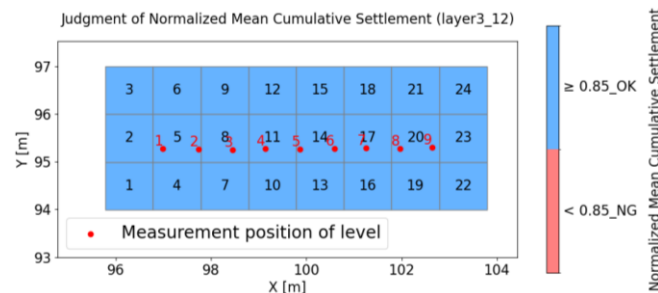
(c) 6 回目転圧後



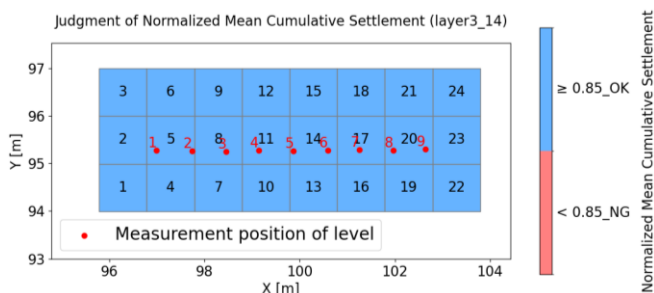
(d) 8 回目転圧後



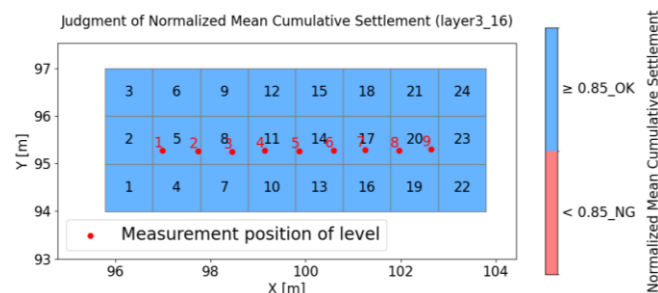
(e) 10 回目転圧後



(f) 12 回目転圧後



(g) 14 回目転圧後



(h) 16 回目転圧後

図-11 正規化沈下量指標 S_{norm} のヒートマップ

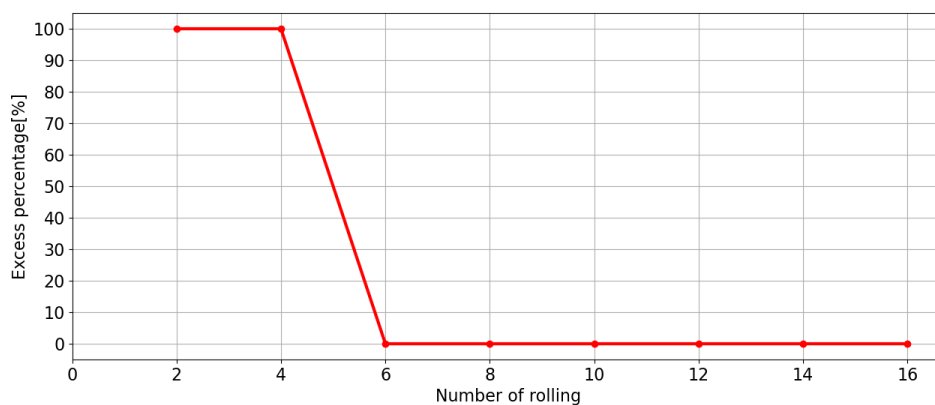
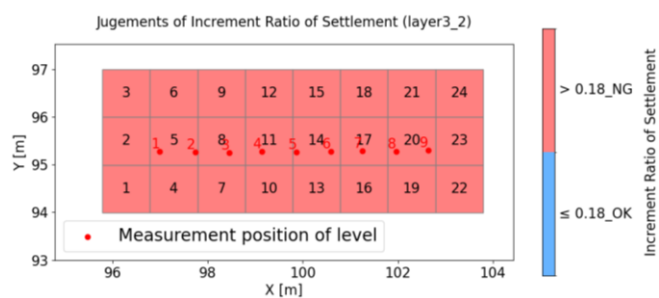
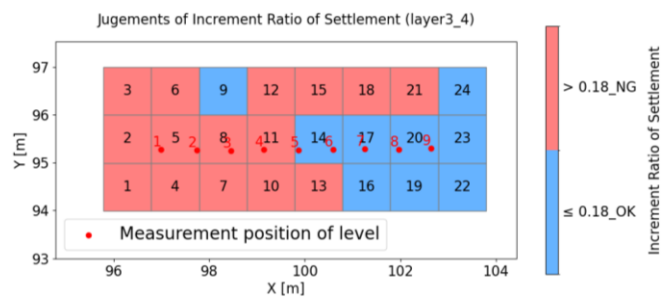


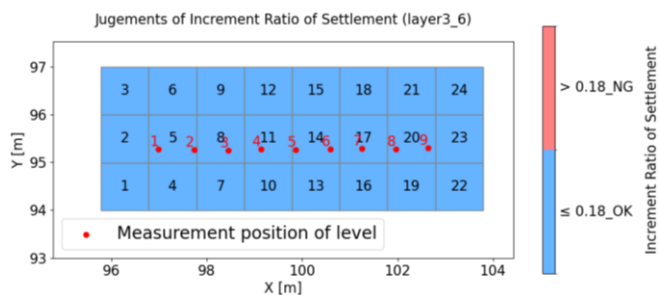
図-12 正規化沈下量指標 S_{norm} の超過率の推移



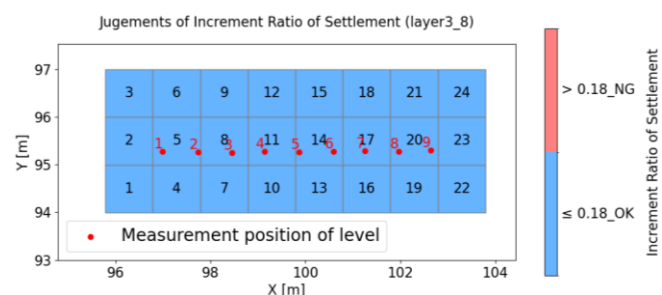
(a) 2 回目転圧後



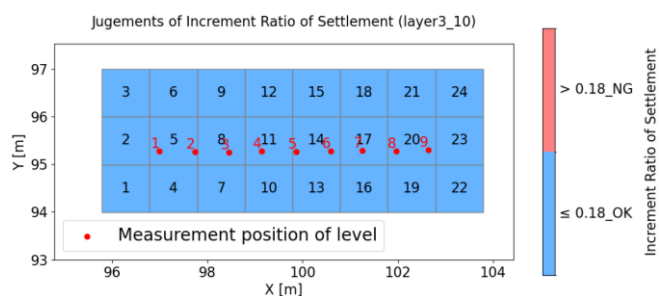
(b) 4 回目転圧後



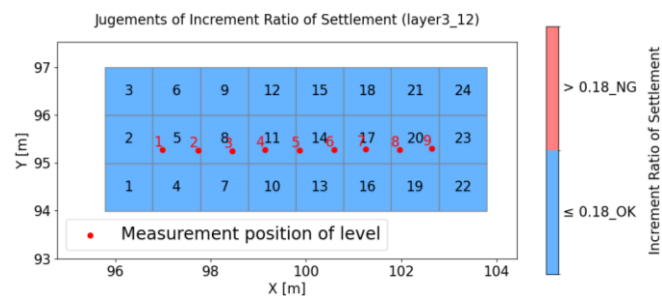
(c) 6 回目転圧後



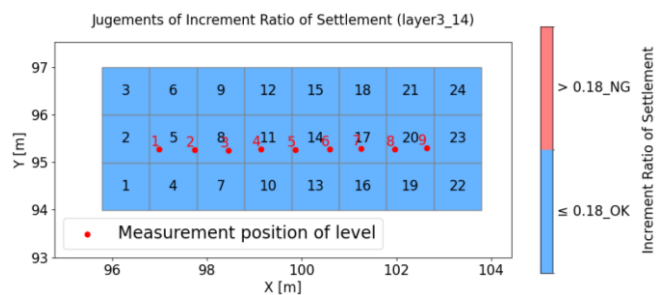
(d) 8 回目転圧後



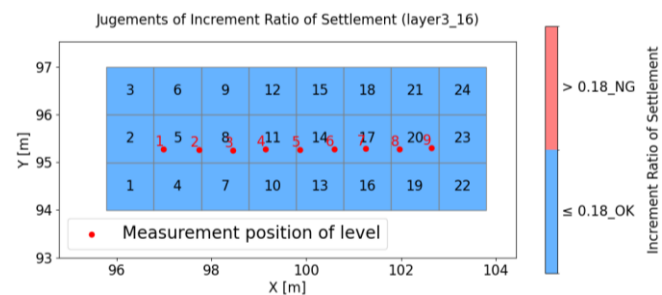
(e) 10 回目転圧後



(f) 12 回目転圧後



(g) 14 回目転圧後



(h) 16 回目転圧後

図-13 沈下量増分指標 ΔS_{norm} のヒートマップ

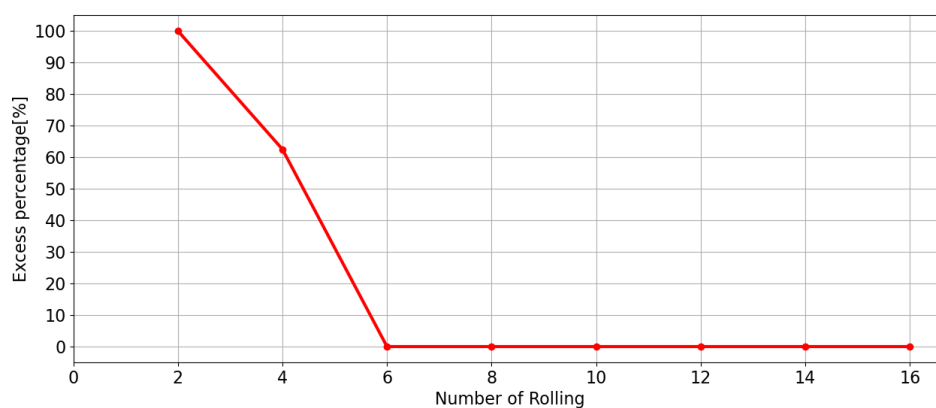


図-14 沈下量増分指標 ΔS_{norm} の超過率の推移

- ・メッシュサイズの感度に関して

今回の試験で使用した 4t 級コンバインドローラのローラ幅が 1.3m であり概ね 1m 幅で転圧していることを踏まえて、本検討ではメッシュサイズを 1m×1m とした。しかしながら、メッシュサイズを変化させた時の影響については未検討であるため、今後メッシュサイズの違いによる評価法の感度を確認することを考えている。

- ・計測機器精度の考慮に関して

本検討では計測機器の性能（正確度および精密度）の違いを考慮していないため、性能の低い計測機器と性能の高い計測機器を一律に評価している。その結果、場合によっては実際のばらつきを過小または過大に評価し、危険側の判断となる恐れがある。今後は、計測機器の性能に応じたばらつき程度を適切に反映できる方法の検討を進めたいと考えている。

5. まとめ

本稿では、施工時情報を用いた密度評価法の深度化の一環として、礫質土を用いた盛土の施工試験を行った。その結果、提案法が今回使用した礫質土 C-40 に適用可能であることを確認した。さらに、地上型レーザースキャナで計測した沈下量情報を用いた面的品質管理を試行した結果、提案法を面的品質管理に拡張できる可能性が示された。ただし、「超過率の許容値の設定」「メッシュサイズの感度」「計測機器精度の考慮」については今回未検討であり、今後の課題である。

また、沈下量指標の閾値は、転圧機械・材料・含水状態の 3 要因の影響を受けると考えられる。したがって、提案手法の適用に当たっては、施工試験により現場条件に応じた閾値を設定することが重要であると考えられる。今後は異なる施工機械・含水状態における提案手法の適用性についても検討したい。

【参考文献】

- 1) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（土構造物），丸善，2007.
- 2) 笠原康平，天野友貴，森裕昭，藤澤真一郎，中島進，木口峰夫：転圧時沈下量情報を活用した鉄道盛土の締固め管理に関する研究 その 1 ～施工試験による沈下量情報の相関分析～，第 79 回土木学会年次学術講演会，2024.
- 3) 天野友貴，笠原康平，藤澤真一郎，中島進，木口峰夫：転圧時沈下量情報を活用した鉄道盛土の締固め管理に関する研究 その 2 ～沈下量情報を用いた締固め度の代替指標に関する一検討～，第 79 回土木学会年次学術講演会，2024.
- 4) 笠原康平，中島進，天野友貴，藤澤真一郎，木口峰夫：盛土転圧時の沈下量情報を用いた剛性評価法に関する一検討，第 59 回地盤工学研究発表会，2024.
- 5) 笠原康平，天野友貴，阿部寿，藤澤真一郎，横山大智，中島進：盛土転圧時の沈下量情報を用いた密度・剛性評価法，土木建設技術発表会，2024.
- 6) 笠原康平，天野友貴，横山大智，阿部寿，藤澤真一郎，中島進，飯島正敏，橋本悠紀：施工時沈下量指標に基づく鉄道盛土の品質管理に関する研究 その 1 ～施工試験による沈下量情報の相関分析～，第 80 回土木学会年次学術講演会，2025.
- 7) 高速道路総合技術研究所：土工施工管理要領，2020.
- 8) 天野友貴，笠原康平，阿部寿，藤澤真一郎，中島進，飯島正敏，橋本悠紀：施工時沈下量指標に基づく鉄道盛土の品質管理に関する研究 その 2 ～礫質土に対する提案手法の適用性の検討～，第 80 回土木学会年次学術講演会，2025.
- 9) 地盤工学会関東支部 土構造物の要求性能の実現を目指した盛土締固め管理の合理化に関する研究委員会：土の締固め管理－現状・新たな展開・展望－，総合土木研究所，P116，2022.