

盛土転圧時の沈下量情報を用いた密度・剛性評価法

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 藤澤真一郎
横山大智 中島進

1. はじめに

鉄道盛土の施工は、密度に関連する締固め度 D_c および剛性に関連する地盤反力係数 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、品質管理のために多数箇所で行われる試験作業が必要となっている。

筆者らは、このような盛土施工の品質管理に要する現場負担の軽減を図るため、転圧時の沈下量情報を活用した盛土の品質管理法の構築に向けて研究を行っている^{2~4)}。ここで、転圧時の沈下量はオートレベルや ICT 機器 (3D スキャナ等) を用いることで、現場で比較的簡易に測定可能な情報である。本稿では、品質管理法構築のための第一段階として、小型試験盛土の施工試験を行い、転圧時の沈下量情報を用いた締固め度 D_c および地盤反力係数 K_{30} 値の評価を試みたので報告する。

2. 小型試験盛土の施工試験²⁾

(1) 施工試験の概要

施工試験で構築した試験盛土 (縦 1.8m×横 8.0m×高さ 0.9m) の概要を **図-1** に示す。盛土材料は笠間砂 (細粒分まじり礫質砂 SG-F) で、最大粒径 $D_{max}=19.0\text{mm}$ 、細粒分含有率 $F_c=11.8\%$ 、土粒子密度 $\rho_s=2.621\text{g/cm}^3$ 、最大乾燥密度 $\rho_d=1.93\text{g/cm}^3$ (B 法: $1.0E_c$)、最適含水比 $w_{opt}=11.6\%$ (B 法: $1.0E_c$) である。盛土は仕上がり厚さを 1 層 30cm とし、盛土高さが 90cm になるよう全 3 層構築した。施工時の含水比は、各層の撒き出し前に、最適含水比を目標に含水比調整をした上で施工を開始した。

施工管理は、締固め度 D_c 、地盤反力係数 K_{30} 値、転圧時の沈下量の 3 項目について、RI 計器と小型 FWD、オートレベルで計測を行い、鉄道構造物等設計標準・同解説 (土構造物)¹⁾ の性能ランク I の規定に準じて締固め度 D_c の平均値 $\geq 95\%$ 、 K_{30} 値の平均値 $\geq 110\text{MN/m}^3$ 、沈下量の収束

を目標に 4t 級コンバインドローラで転圧した。計測点は 1 層あたり 6 測点、3 層で合計 18 測点設け、転圧前・1 回転圧後・2 回転圧後に計測を行った後、その後は 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、オートレベルよりも広範囲を短時間で測定可能な 3D スキャナ (Leica 製 RTC360) を用いて盛土の周辺 2 箇所から点群計測を行い、転圧前後の点群の差分から沈下量を算出した。

(2) 施工試験の結果

図-2 に転圧回数-累積沈下量 (オートレベルで計測)、転圧回数-沈下量増分 (オートレベルで計測)、転圧回数- D_c 、転圧回数- K_{30} 値の関係を示す。**図-2** のように、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みられたが、各測点の沈下量はばらつきが大きい結果となった。これは、盛土各位置における撒き出し厚さの違い (初期の密度分布) が影響した可能性がある。

図-3 にオートレベルで計測した沈下量と、オートレベルと概ね同一箇所における 3D 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、両者の違いは $\pm 5\text{mm}$ 程度以内であった。概ね整合する結果であったが、違いが生じた要因として、両者の測定精度の違いと評価範囲の違いが影響したと考えられる。評価範囲の違い

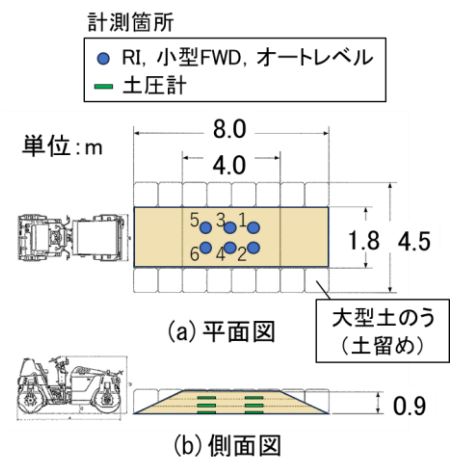


図-1 試験盛土の概要

キーワード 盛土, 締固め度, 地盤反力係数, 転圧時沈下量

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財)鉄道総合技術研究所 基礎・土構造 TEL 042-573-7261

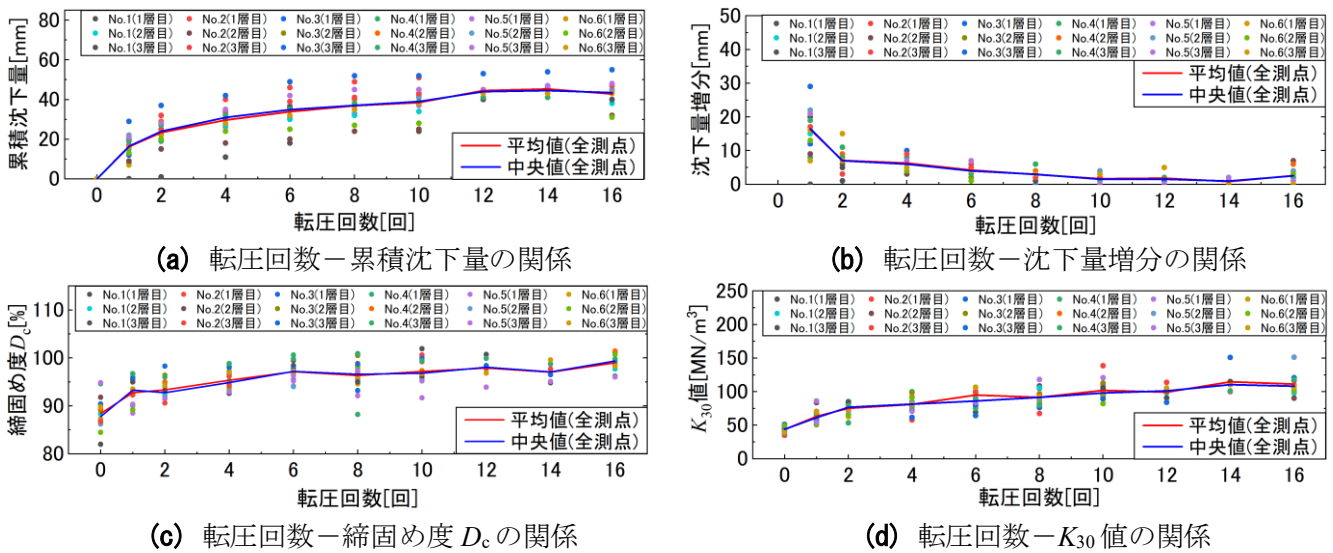


図-2 施工試験の計測結果

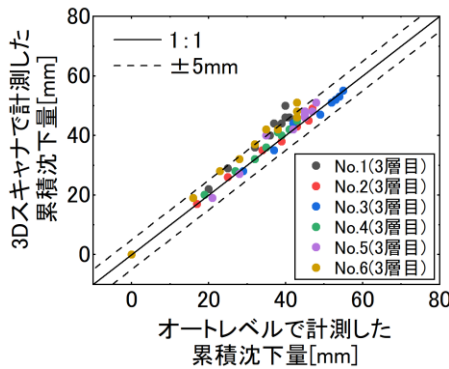


図-3 3D スキャナとオートレベルの計測結果の比較(3層目の結果)

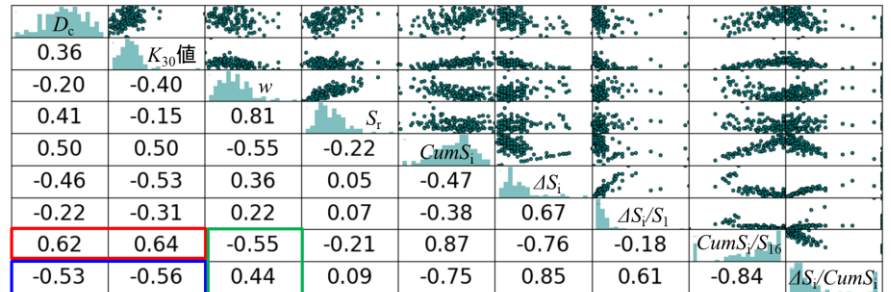


図-4 締固め度 D_c ・ K_{30} 値とオートレベルの沈下量情報の対散布図 (図中の数字は各変数同士の相関係数を示す)

については、オートレベルは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、今回の 3D スキャナの結果は 20cm 四方でメッシュを作成してメッシュ内に含まれる点群の差分の平均値を評価したものであるため、この評価範囲の違いが計測結果の差異に影響したと考えられる。

(3) 転圧時沈下量情報の相関分析

締固め度 D_c ・ K_{30} 値と転圧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)。前節より、累積沈下量と沈下量増分は各測点のばらつきが大きかったため、これらの絶対値を用いて D_c および K_{30} 値を推定することは難しいと考えられた。そこで相関分析では、沈下量情報として i 回目転圧時の累積沈下量 $CumS_i$ と沈下量増分 ΔS_i に加えて、 $\Delta S_i/S_1$ 、 $CumS_i/S_{16}$ 、 $\Delta S_i/CumS_i$ を分析対象に含めた。ここで、 S_1 は転圧による初期沈下量である。また、 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 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。

相関分析の結果、 D_c および K_{30} 値との相関が最も高かったのは(i) $CumS_i/S_{16}$ (図-4 の赤枠内が相関係数)、次いで(ii) $\Delta S_i/CumS_i$ (図-4 の青枠内が相関係数)であった。(i)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の情報、(ii)は転圧による沈下の収束程度の情報であり、本結果を踏まえると、沈下量情報として(i) $CumS_i/S_{16}$ 、(ii) $\Delta S_i/CumS_i$ を用いることで D_c と K_{30} 値を評価できる可能性があると考えられる。

なお、含水比と(i) $CumS_i/S_{16}$ には負の相関、含水比と(ii) $\Delta S_i/CumS_i$ 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。ただし、今回の施工試験は、計測や工程の関係で 1 層目の構築に 3 日、2 層目の構築に 6 日、3 層目の構築に 4 日を要しており、各層の転圧前と最終転圧後の含水比を比較すると平均 2.6%程度低下した。そのため、本相関分析結果には、転圧の繰

返しにより沈下量増分が小さくなる現象と、日数の経過に伴い含水比が低下した状態で転圧することで、みかけ上転圧時の沈下量増分が小さくなる現象の両者の影響が含まれていると考えられる。

3. 沈下量情報を用いた締固め度の代替指標の検討³⁾

(1) 提案する代替指標の概要

本章では、沈下量情報を用いた締固め度の代替指標の検討について述べる。前章の試験結果を踏まえ、式(1)に示す(i)正規化沈下量指標 $S_{norm} = CumS_{iave} / S_{16ave}$ 、および式(2)に示す(ii)沈下量増分指標 $\Delta S_{norm} = \Delta S_{ij} / S_{ij}$ の2指標を締固め度の代替指標とすることを試みた。

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

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

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。各沈下量指標と転圧回数の関係を図-5～図-6に示す。

本検討では、これらの沈下量指標を以下に示す手順により締固め度の代替指標として用いる。なお、以降で示す図中の結果は、試験盛土3層目のオートレベルでの計測結果である。

Step1: 事前試験 (試験施工時に実施)

Step1-1: 16回転圧時の累積沈下量の平均値 S_{16ave} を求める (図-7)。

Step1-2: i回目転圧時での累積沈下量の平均値 $CumS_{iave}$ を求める (図-7)。

Step1-3: 各測点での沈下量増分 ΔS_{ij} (図-8)と累積沈下量 S_{ij} を求める (図-9)。

Step1-4: 式(1)および式(2)より正規化沈下量指標 S_{norm} と沈下量増分指標 ΔS_{norm} を求める。

図-10に正規化沈下量指標 S_{norm} と締固め度の関係の例を、図-11に沈下量増分指標 ΔS_{norm} と締固め度の関係の例

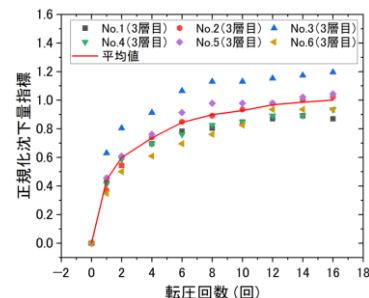


図-5 S_{norm} と転圧回数の関係

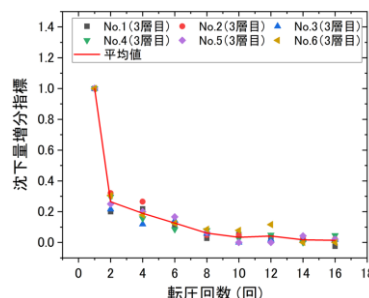


図-6 ΔS_{norm} と転圧回数の関係

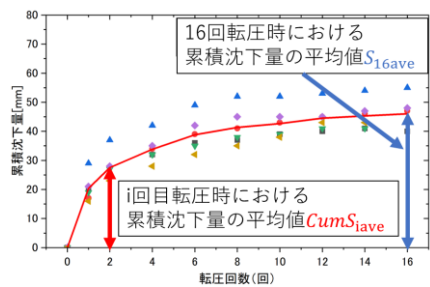


図-7 S_{16ave} , $CumS_{iave}$ の算出

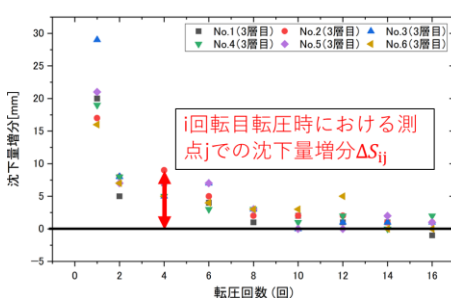


図-8 ΔS_{ij} の算出

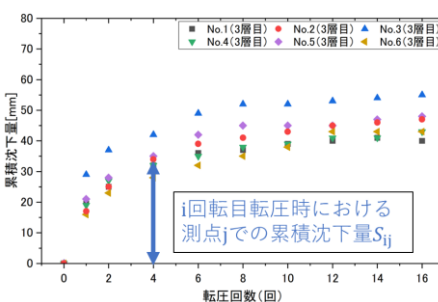


図-9 S_{ij} の算出

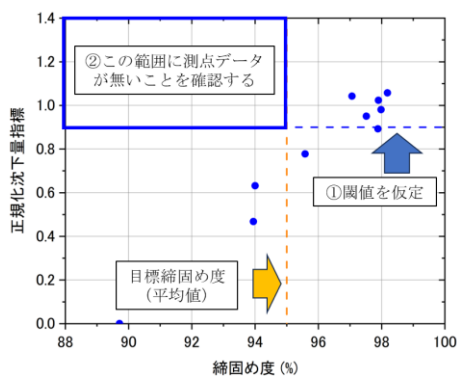


図-10 S_{norm} と締固め度の関係の例

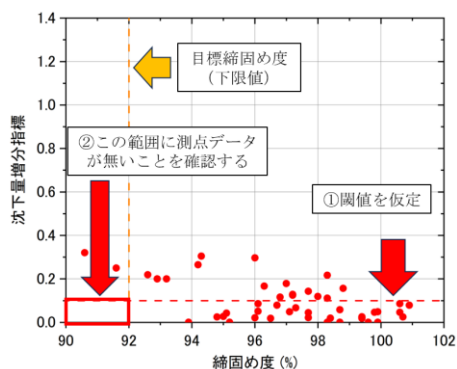


図-11 ΔS_{norm} と締固め度の関係の例

例を示す。図-10～図-11 より、締固め度の増加に伴い正規化沈下量指標は 1 に近づく傾向が、沈下量増分指標は 0 に近づく傾向がみられる。次に、正規化沈下量指標と沈下量増分指標の 2 指標を締固め度の代替指標とするため、2 指標の閾値を以下の手順で設定する。

- Step1-5：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：平均値 95%，下限値 92%，性能ランクII，III：平均値 90%，下限値 87%)を目標締固め度に設定する。
- Step1-6： S_{norm} と ΔS_{norm} の閾値を仮定する(図-10 の①，図-11 の②)。
- Step1-7： S_{norm} の閾値以上の測点のうち、目標締固め度(平均値)以下の測点の有無を確認する(図-10 の②)。
- Step1-8： ΔS_{norm} の閾値以下の測点のうち、目標締固め度(下限値)以下の測点の有無を確認する(図-11 の②)。
- Step1-9：Step1-7 または Step1-8 に該当する測点がある場合、再度 Step1-6～1-8 を実施する。
- Step1-10：Step1-7 または Step1-8 に該当する測点がない場合の閾値の組合せを、本施工で用いる閾値に設定する。

Step2：本施工

本施工時では沈下量情報を用いて以下の手順で締固め管理を行う。

- Step2-1：i 回目転圧時での累積沈下量の平均値 $CumS_{iave}$ を求める。
- Step2-2：各測点での沈下量増分 ΔS_{ij} と累積沈下量 S_{ij} を求める。
- Step2-3：式(1)および式(2)より正規化沈下量指標 S_{norm} と沈下量増分指標 ΔS_{norm} を求める。
- Step2-4： S_{norm} が閾値以上かつ② ΔS_{norm} が閾値以下であるか確認し、条件を満たさない場合は、再度転圧して Step2-1～2-3 を行う。

なお、 S_{norm} を求める際の 16 回転圧時の累積沈下量の平均値 S_{16ave} は、試験施工で算出した値を用いる。

(2) 試験盛土への適用例

提案手法を 2 章の試験盛土に適用する。ここで、沈下量指標の閾値は、実務では試験施工時の沈下量情報から設定することを想定しているが、今回は基礎的検討として試験盛土 3 層目の結果を用いて Step1 の手順にしたがい設定した(表-1)。

表-1 各性能ランクでの沈下量指標の閾値

	S_{norm}	ΔS_{norm}
性能ランク I	0.8以上	0.2以下
性能ランク II	0.7以上	0.3以下

提案手法の適用結果を表-2 に示す。表-2 には、提案手法を

適用した場合の必要転圧回数と、その時の締固め度の実測値を示している。適用結果から、従来手法と比べ転圧回数は増加するが、実測値は性能ランクに応じた締固め度の基準値を満足する結果となった。

表-2 検討手法の適用結果(左：性能ランクIを目標とした場合、右：性能ランクIIを目標とした場合)

沈下量指標の閾値 $S_{norm} : 0.8$ $\Delta S_{norm} : 0.2$	転圧回数	平均 締固め度	最小 締固め度	沈下量指標の閾値 $S_{norm} : 0.7$ $\Delta S_{norm} : 0.3$	転圧回数	平均 締固め度	最小 締固め度
従来手法	4回	95.6%	92.6%	従来手法	1回	94.0%	90.3%
今回提案手法	6回	97.9%	96.3%	今回提案手法	4回	95.6%	92.6%

4. 沈下量情報を用いた剛性評価の検討

(1) 剛性評価法の考え方

本研究では、転圧を機械重量と起振力に応じた荷重一定条件の動的な載荷試験とみなし、転圧時の沈下量情報から地盤反力係数 K_{30} 値の評価を行う。具体的な手順を以下に示す。

Step1：事前試験(試験施工時に実施)

- Step1-1：2 回転圧ごとに小型 FWD 試験を行い、除荷時の地盤反力係数 k_{NUL_FWD} を求める(図-12)。
- Step1-2：載荷圧力-除荷時地盤反力係数 k_{NUL_FWD} 関係を整理して近似式を求める(図-13 の(a), (b))。

Step2：本施工

Step2-1：Step1-2 で求めた近似式に転圧機械の載荷圧力 p_m を代入し、転圧時の除荷時地盤反力係数 k_{NUL_R} を

推定する(図-13 の(c)).

Step2-2 : 転圧を行い, 転圧前の沈下量 $\delta_{(N-1)_R}$ と転圧後の残留沈下量 $\delta_{N,R}$ を計測する(図-14).

Step2-3 : 推定した除荷時地盤反力係数 $k_{NUL,R}$ を式(3)に代入し, 転圧時の最大沈下量 $\delta'_{N,R}$ を算出する. また, 式(1)から求めた転圧時の最大沈下量 $\delta'_{N,R}$ を式(4)に代入し, 転圧時地盤反力係数 $k_{NL,R}$ を算出する.

$$k_{NUL,R} = \frac{p_m}{\delta'_{N,R} - \delta_{N,R}} \cdots (3), \quad k_{NL,R} = \frac{p_m}{\delta'_{N,R} - \delta_{(N-1)_R}} \cdots (4)$$

ここで, p_m : 転圧機械の転圧圧力, $\delta_{N,R}$: 転圧後の残留沈下量, $\delta_{(N-1)_R}$: 転圧前の沈下量である.

Step2-4 : 転圧時地盤反力係数 $k_{NL,R}$ から, 地盤反力係数の非線形性を考慮して転圧機械による地盤反力係数 K_{Roller} を算出する(式(5)). 具体的には, 非線形性の主要因である(a)変位レベル依存性の影響, (b)転圧幅依存性の影響, (c)作用継続時間について, (a)および(b)は基礎標準⁶⁾に, (c)は土構造標準¹⁾に準じて補正を行う.

$$K_{Roller} = k_{NL,R} \cdot \left(\frac{1.25}{\delta'_{N,R} - \delta_{(N-1)_R}} \right)^{-1/2} \cdot \left(\frac{0.3}{B_m} \right)^n / \gamma \cdots (5)$$

ここで, $k_{NL,R}$: 転圧時地盤反力係数, $\delta'_{N,R}$: 転圧時の最大沈下量, $\delta_{(N-1)_R}$: 転圧前の沈下量, B_m : 転圧機械の換算転圧幅 (= $\sqrt{\text{ローラ幅} \times \text{締固め奥行き幅}}$), n : 転圧幅依存性の補正值(砂質土は $n=-1/2$, 砂質土と粘性土の互層は $n=-3/4$, 粘性土は $n=-1$), γ : 作用継続時間の影響を考慮した補正值(礫質土は $\gamma=2$, 砂質土は $\gamma=1.5$, 粘性土は $\gamma=1$) である. なお, 変位レベルの補正は, 転圧時の増分沈下量 $\delta'_{N,R} - \delta_{(N-1)_R}$ から K_{30} 値の基準変位 (1.25mm) への変位レベルの補正として, 基礎標準に準じて変位の-1/2 乗に比例するという仮定で補正を行う. また, 転圧幅依存性の補正は, 転圧機械の換算転圧幅から K_{30} 値の基準転圧板直径 (300mm) への転圧幅依存性の補正として, 基礎標準に準じて転圧幅の n 乗に比例するという仮定で補正を行う.

Step2-5 : Step2-4 で求めた K_{Roller} は, (a)小型 FWD 試験の残留沈下量の計測における不確実性, (b)転圧時の除荷時地盤反力係数を近似式で推定する際の不確実性, (c)締固め奥行き幅の不確実性等を有するため, これらの不確実性の補正係数 β を設定し, K_{Roller} を β で除すことで K_{30} 値を求める(式(6)).

$$K_{30} = \frac{K_{Roller}}{\beta} \cdots (6)$$

ここで, β は補正係数であり, 試験施工におけるキャリブレーション結果から設定する.

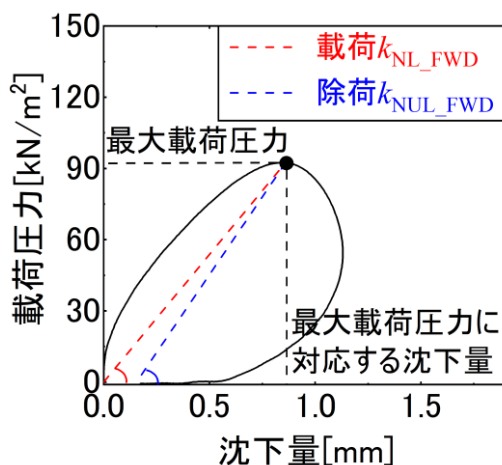


図-12 小型 FWD 試験の荷重-沈下量関係の例

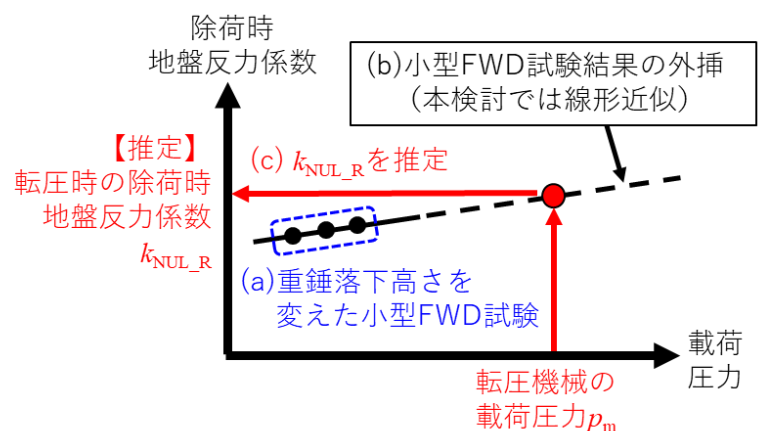


図-13 除荷時地盤反力係数-転圧圧力関係の模式図

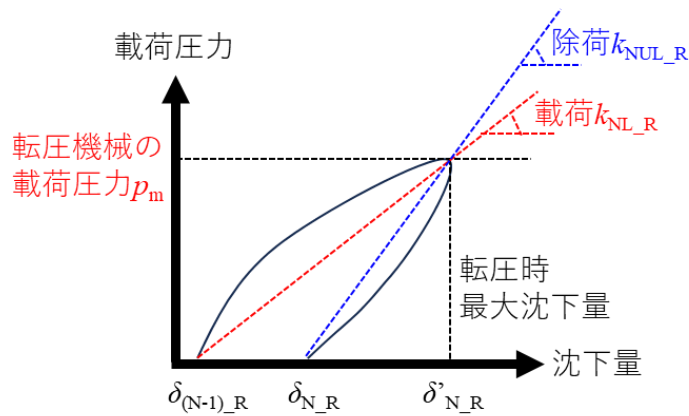


図-14 転圧時の荷重－沈下量関係の模式図

(2) 試験盛土への適用例

剛性評価法を2章の試験盛土に適用した例を示す。本検討では、試験盛土3層目の測点1, 5の試験結果を対象に、オートレベルで計測した転圧時の沈下量から推定した K_{30} 値と、小型 FWD 試験で計測した K_{30} 値の実測値を比較した。剛性評価法 Step1 の小型 FWD 試験について、実務では本施工前の試験施工時に実施することを想定しているが、今回は基礎的検討として、試験盛土3層目の測点1, 5の小型 FWD 試験結果より Step1 の載荷圧力－除荷時地盤反力係数の関係を求めた。

図-15, 図-16 に小型 FWD 試験の載荷圧力－除荷時地盤反力係数の関係および近似曲線を示す。ここで、文献4の検討では線形近似を行っていたが(図-15)、実際の除荷時地盤反力係数には荷重レベルに応じた非線形を有すると考えられることから、本検討では Weibull モデルを用いて外挿を行った(図-16)。

転圧時の載荷時地盤反力係数 k_{NUL_R} の推定は、Weibull モデルの近似式に転圧機械の載荷圧力 p_m を代入して行った ($k_{NUL_R} = k_u \{1 - \exp(-p_m/p_s)^m\} = 150.0 \text{ MN/m}^3$)。ここで、Weibull モデルのパラメータは最小二乗法から $k_u = 150$, $p_s = 41$, $m = 1.0$ と求めた。また、今回用いた転圧機械の載荷圧力は $p_m = 442.3 \text{ kN/m}^2$ (= (前軸重量 19.5kN + 起振力 26.5kN) / (ローラ幅 1.3m × 締固め奥行き幅 0.08m)) であった。なお、締固め奥行き幅は土質や締固め状況等で変化する可能性のある値であるが、今回は文献7を参考に転圧輪直径 800mm の 1/10 と仮定した。

これらの条件の下、転圧時の沈下量情報を用いて式(5)から計算した K_{Roller} と、小型 FWD 試験の K_{30} 値の実験値の比較を図-17 に示す。ここで、式(5)の K_{Roller} の計算に用いた補正值は、盛土材料が笠間砂(砂質土)であるため、載荷幅依存性の補正值 $n = -1/2$ 、作用継続時間の影響を考慮した補正值 $\gamma = 1.5$ とした。また、転圧機械の換算載荷幅は、 $B_m = 0.322 \text{ m}$ (= $\sqrt{(\text{ローラ幅 } 1.3\text{m}) \times (\text{締固め奥行き幅 } 0.08\text{m})}$) とした。図-17 より、計算した K_{Roller} は実測値を過大評価する結果となった。これは、小型 FWD 試験の残留沈下量の計測に関する不確実性や締固め奥行き幅の仮定に関する不確実性等が影響している可能性がある。

これに対して、式(6)より、これらの不確実性の補正係数 β (=1.4) を設定して K_{30} 値を求めた。図-18 に推定した K_{30} 値と小型 FWD 試験の K_{30} 値の実験値の比較を示す。図-18 より、補正係数 β を設定することで $\pm 25 \text{ MN/m}^3$ の精度で実測値が推定された。載荷圧力－除荷時地盤反力係数の関係を線形近似した文献4では、 K_{30} 値の推定結果が $\pm 30 \text{ MN/m}^3$ の精度(補正係数 $\beta = 1.7$)であったことから、本検討のように除荷時地盤反力係数の非線形を考慮したことで、推定精度の向上が確認できた。なお、図-18 の赤丸で示した点は実測値と推定値の乖離が大きいが、当該の実測値は他の計測点の2倍以上の値であり、スミルノフ・グラブス検定により外れ値と判定された(外れ値はないという仮定のもと、当該の実測値以上の値が得られる確率 p 値は 5%以下であった)ことから、小型 FWD 試験の計測不良が原因と推測される。

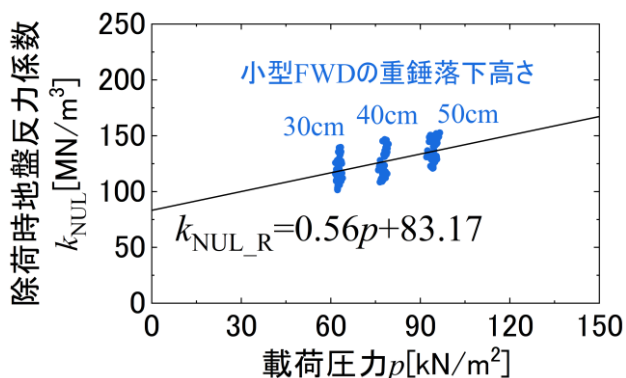


図-15 小型 FWD 試験の载荷圧力-除荷時地盤反力係数の関係
(文献 4：線形近似直線)

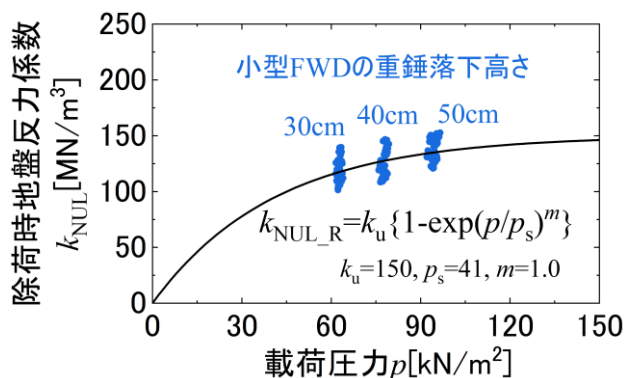


図-16 小型 FWD 試験の载荷圧力-除荷時地盤反力係数の関係
(本検討：Weibull モデル)

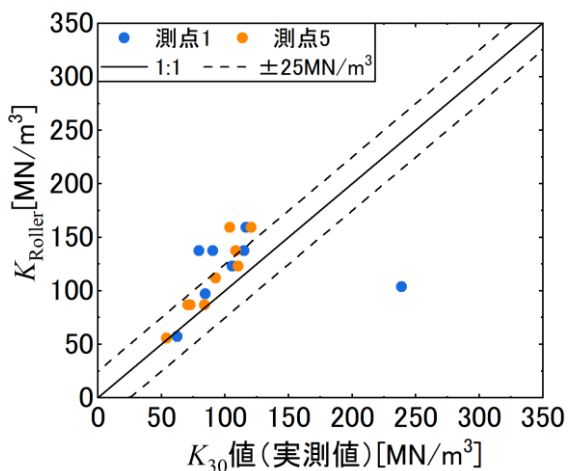


図-17 K_{Roller} と K_{30} 値の実測値の比較

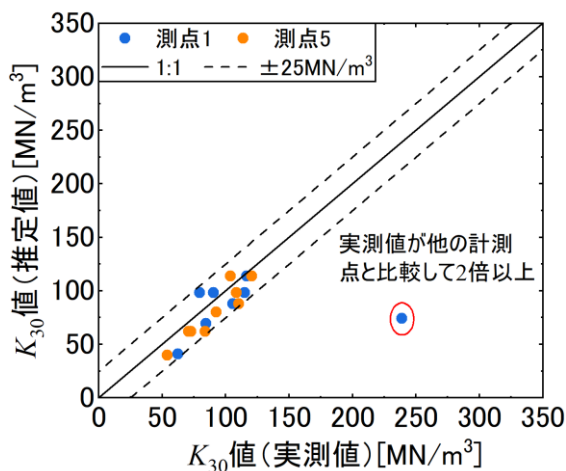


図-18 K_{30} 値の推定値と実測値の比較

5. まとめ

本稿では、小型試験盛土の施工試験を行い、転圧時の沈下量情報を用いた締固め度 D_c および地盤反力係数 K_{30} 値の評価を試みた。その結果、以下が得られた。

- (1) 締固め度 D_c の代替指標として、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正規化沈下量指標 S_{norm} 、および転圧による沈下の収束程度を示す沈下量増分指標 ΔS_{norm} の 2 指標を提案し、この 2 指標を用いて小型試験盛土の品質管理を試みた。その結果、提案する 2 つの沈下量指標に基づく品質管理を行った場合、従来の密度試験結果に基づく品質管理と比較して必要な転圧回数は増加するものの、締固め度の実測値は所要の基準値を満足する結果となった。
- (2) 地盤反力係数 K_{30} 値に関して、転圧を機械重量・起振力に応じた荷重一定条件の動的な载荷試験とみなし、転圧時の沈下量情報から地盤反力係数 K_{30} 値を推定することを試みた。その結果、提案法を用いることで K_{30} 値の実測値を $\pm 25 \text{MN/m}^3$ の精度で推定できた。

以上のように、限定的な条件ではあるものの、転圧時の沈下量情報を用いることで盛土の密度・剛性を評価できる可能性が示された。今後は、盛土材料・施工時の飽和度の違いが密度・剛性評価に及ぼす影響について検討する予定である。さらに、剛性評価に関して、静的载荷試験である平板载荷試験を実施して小型 FWD 試験結果との相互比較を行い、载荷条件の違いによる剛性評価への影響を確認したいと考えている。

【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) 高速道路総合技術研究所：土工施工管理要領，2020.
- 6) 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（基礎構造物），丸善，2012.
- 7) 建山和由ら：振動ローラを用いた現場締固めと室内突固め試験との対応に関する理論的考察，土木学会第44回年次学術講演会，1989.