

既設線省力化軌道用路盤改良の設計法

伊藤 壱記* 桃谷 尚嗣* 景山 隆弘*

Design Method for Roadbed Improvement for Existing Ballastless Track

Kazuki ITO Yoshitsugu MOMOYA Takahiro KAGEYAMA

In order to reduce the cost of track maintenance, ballastless track for existing line where ballast voids are filled with cement grout has been developed and put into practical use. However, there is a problem that some constructed ballastless tracks laid on soft roadbed require repair within a few years after operation. Therefore, we developed an improvement method for the ballastless tracks which are laid on soft roadbed and conducted construction to verify the developed method at existing line. In the construction, roadbed improvement thickness was determined according to the proposed design flow. This paper describes the improvement method developed for ballastless tracks for existing line and its results of verification test.

キーワード：既設線省力化軌道，路盤改良，設計法

1. はじめに

バラスト軌道は列車の繰返し通過によって道床部の変形により塑性沈下が生じるため、定期的な軌道保守が必要である。軌道保守の低コスト化を図るため、バラストの間隙に加熱アスファルトを充填することで、道床部における沈下を抑制した舗装軌道¹⁾が開発された。その後、施工性の向上を目的に、加熱アスファルトの代わりにセメントアスファルトモルタルを充填したE型舗装軌道²⁾が開発されたが、さらなる施工費の低コスト化が求められた。そこで、バラストの間隙に低コストのセメント系グラウト材を充填することで道床部をプレパックドコンクリート化する軌道（以下、既設線省力化軌道）（図1）が開発³⁾された。

既設線省力化軌道は、主に首都圏の既設の在来線を中心に敷設されており現在も敷設範囲を拡大している。その一方で、首都圏域では関東ローム等の粘性土が広く分布しているため、一部の既設線省力化軌道では路盤の軟弱化や雨水の排水不良等と相まって、供用後数年で補修が必要となる場合があり、バラスト軌道と比べて保守費が高くなることもある⁴⁾。

これまでの敷設や補修等の経験から、軟弱路盤上に既設線省力化軌道を新たに敷設する場合には排水設備の設置が必須とされており、排水設備を設けることにより排水不良による既設線省力化軌道の損傷が少なくなったとの報告がなされている⁵⁾。また、既設線省力化軌道の損傷の多くは、地盤反力係数 K_{30} 値が 30MN/m^3 程度の路盤上に敷設された箇所である⁶⁾との報告がなされているが、最も有用な対策であると考えられる路盤改良は実

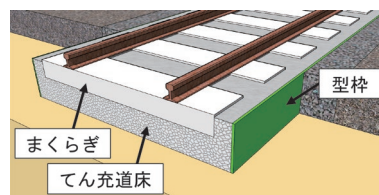


図1 既設線省力化軌道の構造

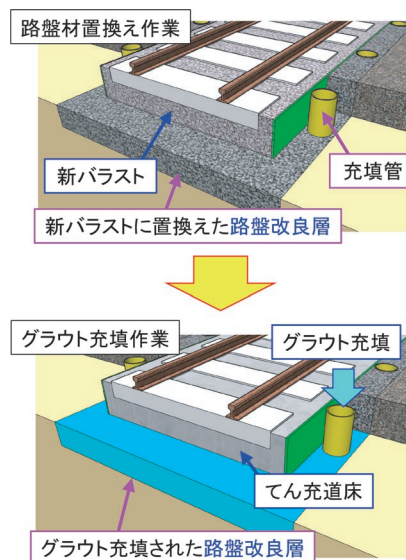


図2 グラウト充填路盤改良工法（あと充填方式）

施されていない現状がある。その理由の一つとして、既設線省力化軌道の施工は、夜間の作業間合い（終電から始発の間）で行うことから、従来の締め固めを必要とする路盤置換工法やセメント安定処理工法では、コストに見合った施工延長を確保することが困難であったことが挙げられる。

そこで、本研究では、既設線省力化軌道を軟弱路盤上

* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室

に施工する場合を対象として、既設線省力化軌道の施工と同時に路盤改良を行うことができる、グラウト充填路盤改良工法（あと充填方式）⁷⁾を開発した（図2）。この工法は、路盤改良を2段階（路盤置換え作業とグラウト充填作業）に分けて施工することで、各作業の効率化が図れ、1日あたり施工延長の延伸が期待できる。既設線省力化軌道に路盤改良を適用することで、路床に生じる鉛直応力を低減できるため塑性沈下を抑制できるとともに、てん充道床下面に生じる曲げ応力が低減できるため路盤改良を適用しない場合と比べて、てん充道床の疲労破壊のリスクを低減することが期待される。

本研究で開発した路盤改良の設計法は、設計供用年数において、設定した塑性沈下量以下、かつてん充道床自体が列車荷重の繰返しにより疲労破壊が生じない路盤改良厚を決定するものである。

本報では、営業線での施工を通じ、開発した路盤改良の設計法により改良厚を決定する手順を概説するとともに、本工法の沈下抑制効果を確認した結果を報告する。

2. 路盤改良厚の設計法

2.1 設計手順

路盤改良の設計フローを図3に示す。①にて路床剛性を把握し、②にて設計条件を設定する。③にて①の調査結果を基に、路盤改良を適用した際の設計応答値を求める。④にて②で設定した設計条件を満足する改良厚を選定し、⑤にて選定した改良厚が実際に施工可能であるか検討し、設計路盤改良厚を決定する。本設計法により、設計供用年数および目標沈下量に対して、既設線省力化軌道の沈下量とてん充道床の疲労破壊を照査することで、適切な路盤改良厚を決定することができる。

以下では、上記の設計手順に従って、その内容を詳述する。ここでは、既設線省力化軌道が既に敷設されている営業線において、既存の既設線省力化軌道を撤去し、既設線省力化軌道の再構築と併せて、開発したグラウト充填路盤改良工法（あと充填方式）を図3の設計フローに従って改良厚を設計して施工した事例に沿って内容を説明する。

2.2 路床剛性の調査

図4に示した施工箇所は、関東ローム上に直接敷設された既設線省力化軌道であり、事前調査は上下線間で行った。事前調査は、簡易動的コーン貫入試験および路床土（不攪乱試料）の採取である。後日、採取した路床土の繰返し三軸圧縮試験を実施した。

簡易動的コーン貫入試験から求めた深さ方向の K_{30} 値の分布を図5に示す。深さ2500mmまでの軟弱層の K_{30} 値は20MN/m³前後であり、2500mm以深の K_{30} 値は最

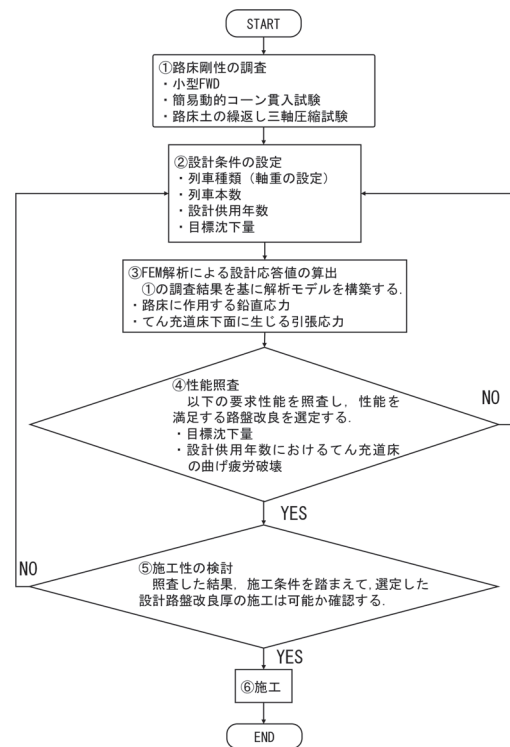


図3 設計フロー

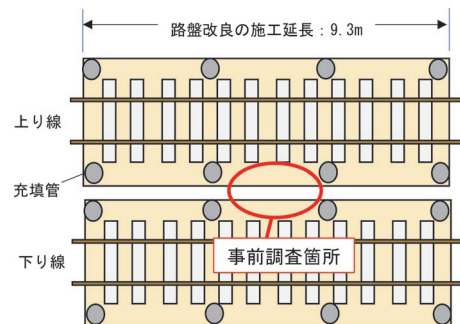


図4 路盤改良の施工範囲

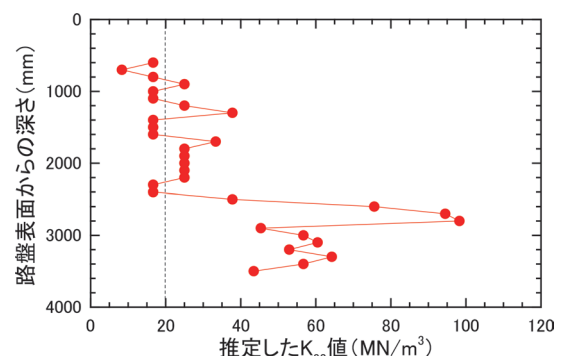


図5 深さ方向の K_{30} 値の分布

大で100MN/m³程度、平均で60MN/m³程度であった。

採取した路床土に対して土質試験を実施した結果、自然含水比 w_n 47.7%、飽和度 S_r 78.8%、塑性指数 I_p 32.4であり、塑性指数が比較的高いことから、雨水による含水

応力の深さ方向の分布をFEM解析により推定した（図10）。路盤表面（0mm）が23.7kPaであったのに対して、深さ2500mmでは16.2kPaであり、鉛直応力が29%程度低減した。これを踏まえ、路床の塑性沈下量は、鉛直ひずみの推定式から深さ500mm毎の沈下量を求め、沈下量の合計値を算出して求めることとした。

図11に路盤改良厚とてん充道床下面に生じる曲げ応力の関係を示す。てん充道床下面に生じる曲げ応力は改良厚の増加とともに低減し、改良厚350mmを適用することで路盤改良なしの場合と比較して約48%低減した。

2.5 性能照査

2.5.1 沈下量の照査

旅客列車と貨物列車が混在する場合は、各列車荷重に対する沈下量をそれぞれ推定して、それぞれの沈下量を累積する必要がある。その場合、载荷初期で生じる大きな沈下量を重複して足し合わせることになるため、累積した沈下量が過大に評価される。そこで沈下量の推定では、先に旅客列車が通過することから、旅客列車で生じる沈下量に対し、貨物列車による沈下量として最初の1編成分の沈下量を除いた値を加えることとした。

図12に路盤改良なし、改良厚200mm、250mm、300mm、350mmにおける既設線省力化軌道の沈下量と供用年数の関係を示す。同図より、供用20年後の沈下量は、路盤改良なしで23.97mm、改良200mmで20.69mm、改良250mmで18.30mm、改良300mmで16.94mm、改良350mmで15.94mmとなった。照査結果より、供用20年で沈下量が16mm以内となる改良厚は350mmとなった。

2.5.2 てん充道床の疲労破壊の照査

てん充道床の疲労強度を検討するため、貨物列車用のグラウト材よりも曲げ強度が低い旅客列車用のグラウト材を用いた曲げ試験および曲げ疲労試験を行った。

図13に旅客列車用のグラウト材を用いたてん充道床の試験結果およびコンクリートの疲労強度の推定式⁹⁾から得た破壊回数と荷重振幅の関係を示す。同図より、式(1)および式(2)から求めたコンクリートの曲げ疲労強度は試験結果と概ね一致した。てん充道床の曲げ疲労強度はコンクリートの疲労強度の推定式を適用できることから、貨物列車用のグラウト材を用いたてん充道床の曲げ疲労強度は、曲げ破壊強度31.2kNを基に推定することとした。

$$f_{\text{crd}} = k_{\text{cr}} \cdot f_k \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{\text{min}}}{f_k}\right) \cdot \left(1 - \frac{\log N}{K}\right) / \gamma_c \quad (1)$$

$$f_b = \frac{P_b \cdot L}{Bh^2} \quad (2)$$

ここに、

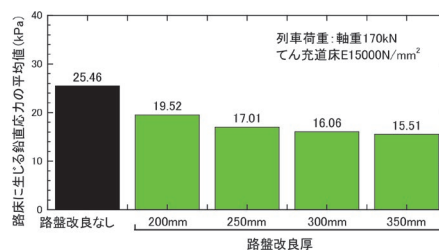


図9 路床表面に生じる鉛直応力

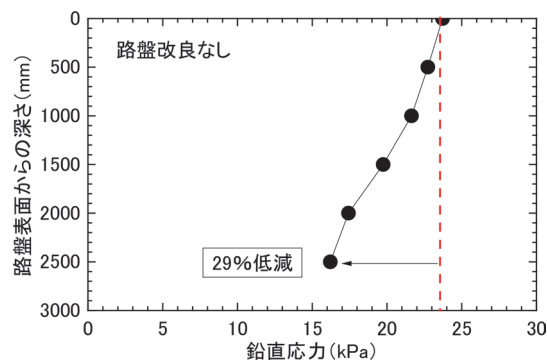


図10 深さ方向の鉛直応力の分布

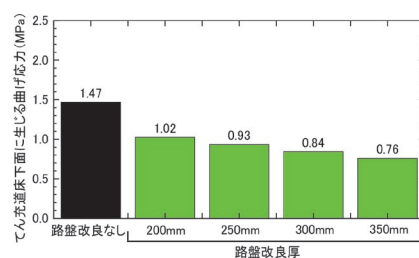


図11 てん充道床に生じる曲げ応力

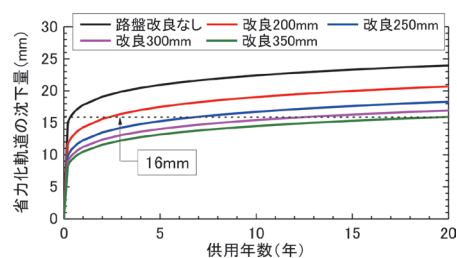


図12 推定した省力化軌道の沈下量

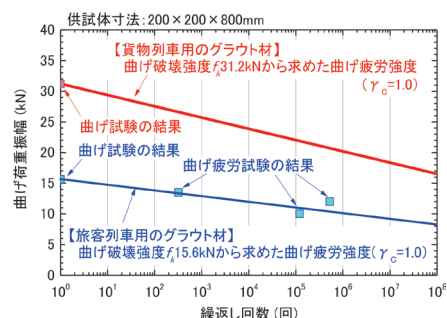


図13 旅客列車用および貨物列車用のグラウト材を用いたてん充道床の疲労強度

f_{crd} : コンクリートの疲労強度
 f_k : コンクリートの強度特性値
 K : 17, k_{cr} : 1.0, σ_{min} : 最小応力
 N : 疲労寿命 (回)
 γ_c : コンクリートの材料係数
 f_b : コンクリートの曲げ強度
 P_b : コンクリートの破壊荷重
 L : 支点間距離, B : 供試体の幅
 h : 供試体の高さ

FEM 解析で得られたたてん充道床の曲げ応力に対して、貨物線用のグラウト材の疲労強度特性を基にたてん充道床の疲労破壊の照査を行った。本照査では、「鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物」⁹⁾に記載されている総等価繰返し回数を参考に旅客列車および貨物列車が両方通過する際の疲労破壊回数の算出を行った。

照査では「鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造」¹⁰⁾を参考に、変動輪重係数は 90km/h に相当する速度衝撃率 1.27 を用い、輪重の作用係数を 1.0、構造解析係数を 1.0、コンクリートの材料係数を 1.3、軌道部材係数を 1.1、軌道構造係数を 1.1 とした。

表 2 に示す照査結果より、照査結果が 1.0 未満となる路盤改良厚さは 350mm となった。

2.6 施工性の検討

前節の照査結果において、設計条件を満足する路盤改良厚は全て 350mm となった。本施工で可能な施工時間は 0:30~4:30 の 4 時間であり、既存の既設線省力化軌道を撤去してから路盤改良層および省力化軌道の敷設を行う必要がある。これに対して、事前の施工検討より、上下線の総施工延長 18.6m に対して、既存の既設線省力化軌道の撤去作業および敷設作業を考慮し、一晚あたりの路盤材置換え作業の施工延長を 4.65m とすることで、路盤改良厚 350mm は十分に施工可能であると判断した。したがって、本施工における設計路盤改良厚を 350mm とした。

3. 営業線における施工と効果分析

施工状況を図 14 に示す。路盤改良層のグラウト充填作業は一晚あたりの施工延長を 9.3m とした（計 2 日間）。路盤材の置換え作業では、バラスト軌道の状態における路盤部の沈下を極力小さくするため、改良範囲に敷き詰めた新バラストを路盤改良厚の 1/2 (175mm) ごとタンピングランマで念入りに締め固めた。グラウト充填作業では、施工延長 9.3m に対する充填時間は充填装置 1 セット（充填性能：約 400L/min）で 1 時間程度であった。

表 2 疲労破壊の照査結果

	case1	case2	case3	case4	case5
路盤改良厚 (mm)	0	200	250	300	350
照査結果	1.91	1.33	1.21	1.09	0.99

1.0 未満：照査を満足する



(a) 路床土の掘削



(b) 路盤改良層の締め固め



(c) 省力化軌道に用いる型枠の設置



(d) グラウト材の充填作業

図 14 施工の状況

路盤改良箇所における下り線および上り線の高低変位の進みを図 15 および図 16 に示す。

下り線の高低変位進みは、既設線省力化軌道の路盤改良前 (2019.11-2020.8) が 0.025mm/日であった。路盤置換え後（路盤充填前の 6 日間）が 0.052mm/日、路盤充填後（路盤充填後の 6 日間）のバラスト軌道の状態が 0.027mm/日であり、路盤充填により路盤剛性を向上させることで、高低変位進みが 48% 程度低減した。路盤改良後の省力化軌道 (2021.1.9) の高低変位は -4.9mm、充填 10 ヶ月後で -5.3mm であり、検証期間が短いものの、高低変位進みは 0.002mm/日程度と路盤改良前の

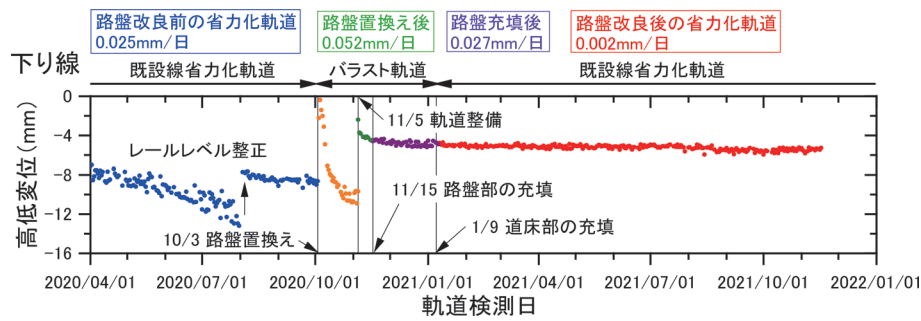


図15 高低変位進み（下り線）

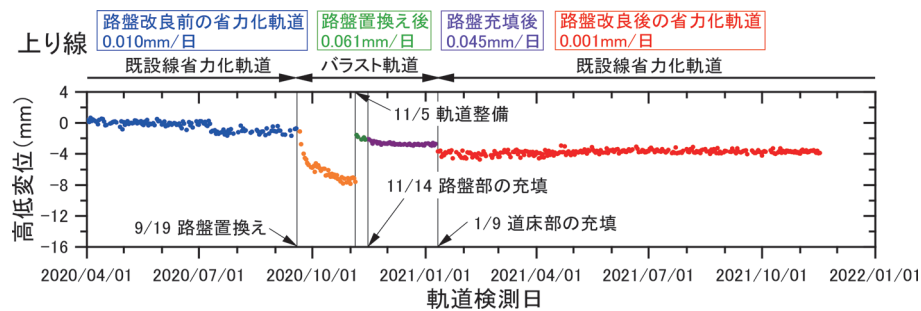


図16 高低変位進み（上り線）

1/10 以下に改善した。

上り線の高低変位進みは、既設線省力化軌道の路盤改良前が0.010mm/日（2020.4-2020.9の間）であった。路盤置換え後のバラスト軌道の状態（路盤充填前から9日間）が0.061mm/日、路盤充填後（路盤充填後から9日間）のバラスト軌道の状態が0.045mm/日であり、路盤充填によって高低変位進みが26%程度低減した。さらに、路盤充填後から充道床充填までの高低変位進みの平均値は0.007mm/日となった。路盤改良後の省力化軌道（2021.1.9）の高低変位は-3.7mm、充填10ヶ月後で-3.9mmであり、下り線と同様に、検証期間が短いものの、高低変位進みは0.001mm/日程度と路盤改良前の1/10以下に改善した。

4. まとめ

本稿に述べた結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 営業線での施工により、提案した路盤改良厚の設計フローに従い路盤改良厚を350mmと決定した。また、グラウト充填路盤改良工法（あと充填方式）は問題なく既設線省力化軌道と同時に路盤改良層を敷設できることを確認した。
- (2) 路盤改良効果は、路盤改良前後における高低変位進みで比較すると、上下線ともに1/10以下に改善した。現在の高低変位量および高低変位進みを踏まえると、20年間後の高低変位は16mm以内に抑制できる見込みが得られた。

謝 辞

営業線での施工を行うにあたり、東日本旅客鉄道株式会社テクニカルセンターおよび新宿保線技術センターの関係者に多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

文 献

- 1) 有道床軌道保守省力化グループ：舗装軌道の開発-既設営業線用軌道強化方法-，鉄道技術研究報告，No.862，1973
- 2) 爪長徹，多田逸雄：E型舗装軌道の開発試験，鉄道技術研究所速報，No.A-83-56，1983
- 3) 北条重幸：第二期TC型省力化軌道工事の取組み，新線路，Vol.57，No.7，pp.8-11，鉄道現業社，2003
- 4) 堀雄一郎，萩尾泰弘，岩田誠，有馬重治：インターバル式圧力注入による軌道の沈下修繕工法の開発，土木学会第65回年次学術講演会，2010.9
- 5) 萩尾泰弘，久保村公一，関口晃弘：TC型省力化軌道における排水不良箇所対策の実施について，土木学会第63回年次学術講演会，2008.9
- 6) Akitoshi OMODAKA, Takao KUMAKURA & Toshiyuki KONISHI: Influence of road condition and soil consistency on track irregularity advance, Railway Engineering-2017.
- 7) 伊藤孝記，桃谷尚嗣，木次谷一平，高橋貴蔵：路盤改良を適用した既設線省力化軌道の変形特性に関する研究，土木学会論文集E1（舗装工学），Vol.76，No.2，I_305-I_313，2020
- 8) 伊藤孝記，桃谷尚嗣，木次谷一平：既設線省力化軌道と同時に施工可能な路盤改良工法の開発，鉄道総研報告，Vol.34，No.4，2020
- 9) (財) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，2004
- 10) (公財) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造，2012