

特集：軌道技術

# 噴泥したバラスト軌道を対象とした SFC てん充道床軌道の性能評価

測上 翔太\* 中村 貴久\* 高橋 貴蔵\*  
桃谷 尚嗣\*

Evaluation of Settlement Characteristics for Grouted Ballasted Track Applied to Ballasted Track with Mud Pumping

Shota FUCHIGAMI Takahisa NAKAMURA Takatada TAKAHASHI  
Yoshitsugu MOMOYA

When mud pumping begins to generate in ballasted track, frequency of repair work increases. Therefore, several types of ballastless tracks have been developed to reduce the repair work of ballasted track. For example, grouted ballasted track which uses super-fine particle cement (SFC) milk as grout material, can be used with existing aged ballast. However, SFC milk could not be applied to ballasted track which produced mud pumping. In this study, we have proposed several construction methods for grouted ballasted track with SFC milk that can be applied to ballasted track which produced mud pumping, and have evaluated the effectiveness of the track in reducing settlement. As a result of the cyclic loading test on full-scale track model and test construction on commercial lines, it was confirmed that grouted ballasted track with SFC milk had a sufficient settlement reduction effect.

キーワード：バラスト軌道，噴泥，SFC てん充道床軌道，実物大試験，試験施工

## 1. はじめに

軌道はバラスト軌道と省力化軌道に大別され、省力化軌道はバラスト軌道に係る保守量を軽減するために開発された。省力化軌道には、主に新設線を対象としたスラブ軌道や弾性まくらぎ直結軌道、既設線を対象とした舗装軌道<sup>1)</sup> やてん充道床軌道<sup>2)</sup>、TC型省力化軌道<sup>3)</sup>がある。

既設線を対象とした省力化軌道（以下、既設線省力化軌道）のうち、舗装軌道やTC型省力化軌道を敷設する場合は、既存のまくらぎを大判のまくらぎに、またバラストを小粒径の碎石等（TC型省力化軌道の場合は新品バラストを用いる）に交換して道床内にグラウト材を注入する。一方、てん充道床軌道を敷設する場合は、既存のまくらぎとバラストを用いる。ここで、経年劣化したバラストには細粒分が多く含まれており、道床内にグラウト材を注入することが困難であるため、バラストについては道床交換後の比較的新品の状態に近いものを対象としている。

上述した既設線省力化軌道はバラスト軌道の保守を省力化するために非常に有効であり、特にTC型省力化軌道は首都圏の在来線で多くの敷設実績がある。一方、地

域鉄道では施工性や経済性の観点から既設線省力化軌道の導入があまり進んでいないというのが実態である。

以上の背景を踏まえ、筆者らは既設のバラスト軌道を比較的安価に省力化軌道に更新するために、グラウト材に超微粒子セメントミルクを用いたSFC てん充道床軌道<sup>4)</sup>を開発している。超微粒子セメントミルクは噴泥には至っていないものの、経年劣化により細粒分を多く含む道床内にも注入することができ、道床交換を行うことなく既設のバラスト軌道をてん充道床軌道とすることが可能である。SFC てん充道床軌道は、将来的に道床噴泥に至る可能性のある区間や、資機材の搬入出に時間を要するために道床交換の施工延長が短くなる山岳トンネルの区間において導入の効果が期待される。一方、図

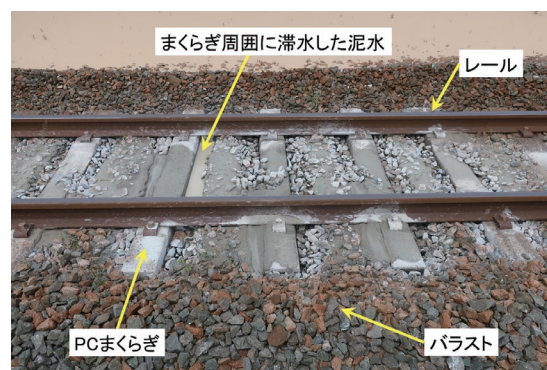


図1 噴泥したバラスト軌道の例

\* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室

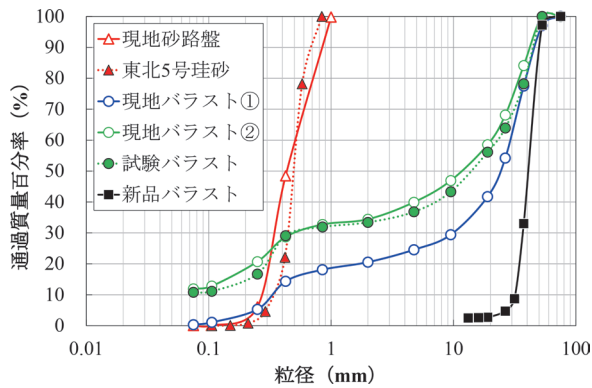


図2 粒径加積曲線

1に示すような既に道床噴泥を生じているバラスト軌道に対してはSFCてん充道床軌道を適用することができなかった。

そこで筆者らは、噴泥を生じたバラスト軌道においても部分的な道床交換を行うことにより適用可能なSFCてん充道床軌道を新たに提案し、実物大試験等によって軌道の沈下抑制効果を評価した<sup>5)</sup>。本稿では、営業線におけるバラスト軌道の現地調査、提案するSFCてん充道床軌道の実物大試験および営業線における試験施工の内容について報告する。なお、筆者らは既往の研究<sup>6)</sup>において、沿岸部の砂路盤上に敷設されたバラスト軌道に対するSFCてん充道床軌道の適用可能性について検討しており、本稿では同区間において道床噴泥（主に海砂の侵入によるもの）を生じているバラスト軌道を対象とした。

## 2. 噴泥したバラスト軌道の調査

### 2.1 バラストの粒度分布

沿岸部の砂路盤上に敷設された噴泥したバラスト軌道に対してSFCてん充道床軌道の適用を検討するにあたり、検討対象とした営業線（年間通トン：3.1百万トン）において砂路盤およびバラストの粒度分布を確認した。

図2に現地の砂路盤およびバラストの粒径加積曲線を示す。なお、同図には後述する室内試験において現地の砂路盤やバラスト軌道を再現するために用いた東北5号珪砂および試験バラストに加え、新品バラストの粒径加積曲線も併せて示す。同図に示すように、現地の砂路盤は東北5号珪砂と近い粒度分布であった。現地バラスト①は噴泥を生じていない箇所のみから採取したものである。一方、現地バラスト②は図3に示すように噴泥している箇所においてまくらぎ下の泥土化したバラスト層（厚さ100mm程度）よりも下部の固結したバラスト層から採取したものである。

現地バラストはいずれも粒径0.3～0.5mm程度の含有率が高くなっており、これは砂が混入したことによるも

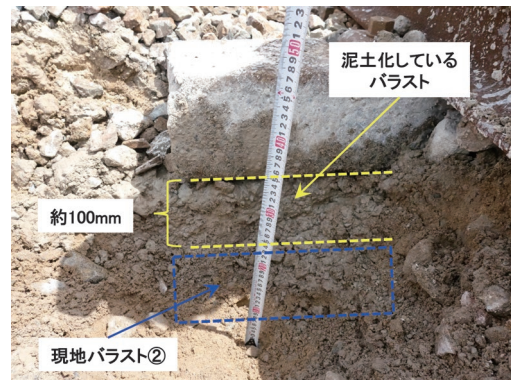


図3 現地バラスト②の採取位置の状況

のと考えられる。また、細粒分含有率（粒径0.075mm以下の含有率）は現地バラスト①で0.3%、現地バラスト②で11.9%であり、細粒分含有率の違いが噴泥の発生の有無に影響を与えたと考えられる。

### 2.2 路盤剛性

一般に、既設線省力化軌道は敷設後に路盤あるいは路床が沈下することによって道床のグラウト改良部に変状が生じることを防ぐため、十分な支持力を有する地盤上に適用される。ここで、文献1では舗装軌道を敷設する路盤の条件として、地盤反力係数 $K_{30}$ 値が $110\text{MN/m}^3$ 以上であることが望ましいとされており、SFCてん充道床軌道においても同条件を適用している。

本調査では、簡易動的コーン貫入試験と小型FWD試験<sup>7)</sup>により、現地の砂路盤の剛性を評価した。各試験による測定の結果、簡易動的コーン貫入試験から推定した $K_{30}$ 値は $25\sim 60\text{MN/m}^3$ （深さ2000mm程度まで）となり目標値（ $K_{30}$ 値 $\geq 110\text{MN/m}^3$ ）を下回るが、小型FWD試験による $K_{30}$ 値は $122\sim 140\text{MN/m}^3$ となり目標値を満足する結果となった。なお、測定方法の違いによる $K_{30}$ 値の測定結果が異なった原因は解明できていないが、現地の砂路盤は土質材料の工学的分類体系<sup>8)</sup>として「砂(S)」に分類されており、均等係数が小さい材料であったことが影響していると考えられる。

## 3. 提案した既設線省力化軌道の概要

図4にSFCてん充道床軌道の構造を示す。同図(a)の「噴泥していない場合」は従来工法（以下、通常工法）の構造であり、まくらぎの端部側に遮水板を設置した後、既存の道床内にSFCミルクを注入してSFC改良層を構築する。その際、SFCミルクの注入高さはまくらぎ底面位置までとし、まくらぎ周囲のバラストは固化しない。

一方、同図(b)は新たに提案した「噴泥している場合」に適用する構造である。前章に示した調査箇所において、噴泥を生じているバラスト軌道ではまくらぎ下の厚さ

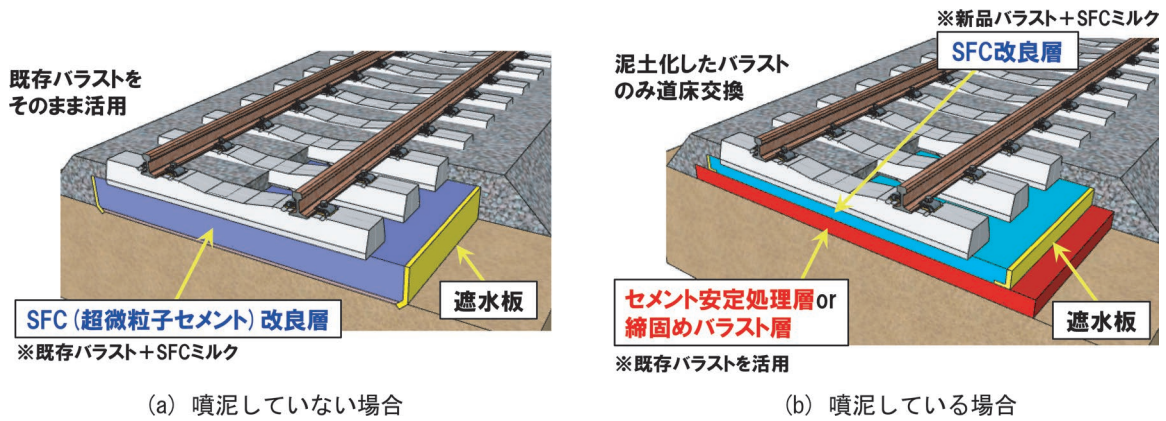


図4 SFC 珪充道床軌道の構造

100mm 程度のバラストが泥土化しており、それよりも下層のバラストは固結していた。そこで、噴泥している場合は、まくらぎ下の泥土化したバラストのみ道床交換を行って SFC ミルクを注入することとした。また、道床下部の泥土化していないバラストはそのまま活用し、セメント安定処理あるいは強固に締め固めを行うことで支持力を増大させることとした。

ここで、既存バラストをセメント安定処理する場合を道床下部安定処理工法、強固に締め固める場合を道床下部締め固め工法と呼ぶ。なお、通常工法と同様にまくらぎの端部側には遮水板を設置し、遮水板の高さは SFC ミルクを注入する新品バラスト層の厚さとした。

#### 4. 実物大軌道供試体の繰返し載荷試験

##### 4.1 試験条件

図5に実物大軌道供試体の概要を示す。本試験では試験土槽内に構築された既設の路床、路盤およびアスファルト混合物から成る層（路盤の  $K_{30}$  値は  $110\text{MN/m}^3$  以上）の上に設置した鋼製の型枠内に、同図左の供試体①を道床下部安定処理工法で、同図右の供試体②を道床下部締め固め工法で作製した（いずれもまくらぎ1本分）。

砂路盤には東北5号珪砂を用い、層厚は供試体の製作場所の寸法上の制約から300mmとした。砂路盤の含水比は、現地から採取した試料をもとに4%とした。なお、現地の砂路盤にはバラストの貫入層があり、路盤の正確な密度を測定することができなかつたため、本試験では小型FWD試験による換算  $K_{30}$  値が現地の砂路盤と近い値となるように東北5号珪砂の相対密度を調整して路盤を作製した。砂路盤の乾燥密度は  $1.709\text{g/cm}^3$ （相対密度90%に相当）とし、小型FWD試験により測定した換算  $K_{30}$  値は  $182\text{MN/m}^3$  であった。

バラストについては図2に示した試験バラストを使用した。試験バラストは新品バラスト、クラッシュラン C-30、東北6号珪砂およびカオリンを 35 : 35 : 20 : 10

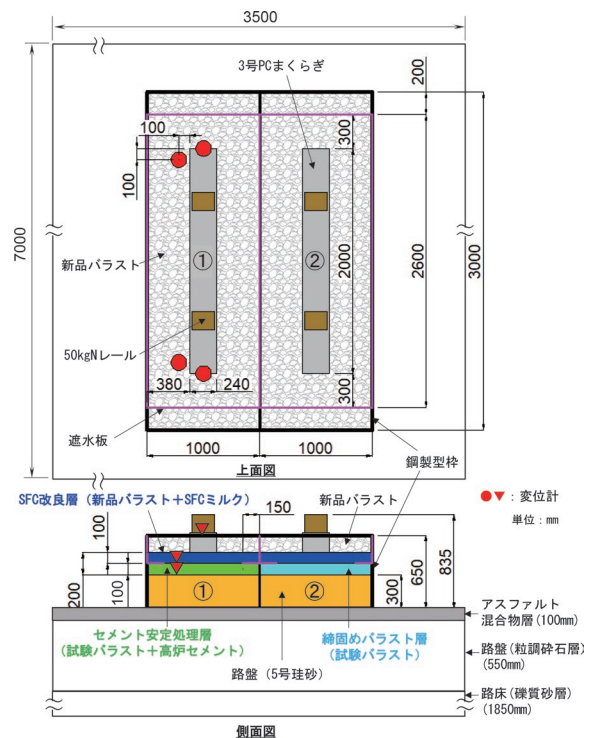


図5 実物大軌道供試体の概要

（乾燥重量比）の割合で混合して現地バラスト②の粒度分布を再現した。

供試体①については、高炉セメントB種を用いて試験バラストの安定処理を行い、セメント安定処理層の厚さは100mm、密度は  $2.169\text{g/cm}^3$ （最大乾燥密度の95%）、含水比は6.3%（最適含水比）とした。また、高炉セメント添加量は路盤改良として実績のあるセメント安定処理工法（クラッシュラン C-30 + 高炉セメント）<sup>9)</sup> を参考に、試験バラストの重量比を10%とした。供試体②については、締め固めバラスト層（試験バラスト）の厚さを100mm、密度は  $2.144\text{g/cm}^3$ （最大乾燥密度の95%）、含水比は5.0%とした。なお、セメント安定処理層および締め固めバラスト層は縦ランマーで2往復、プレートランマーで1往復締め固めた。SFC改良層の厚

表1 SFCミルクの配合（1セット当たり）

水セメント比 (%)	SFファイラー (kg)	硬化材 (kg)	分散剤 (kg)	水 (kg)	遅延剤 (kg)
80	20	5.15	0.19	20.15	0.155



図6 SFCミルクの攪拌手順

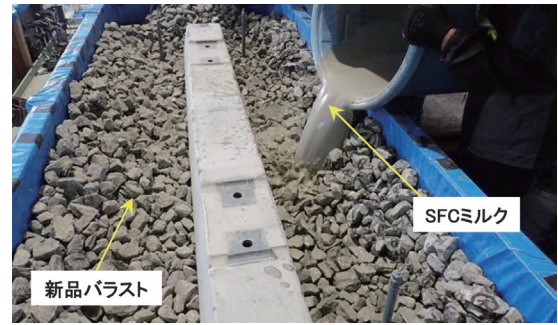


図7 SFCミルクの注入

表2 試験条件

供試体 No. <sup>※1</sup>	試験ケース	SFCミルク材齢	荷重振幅(kN) <sup>※2</sup>	載荷周波数(Hz)	載荷回数	備考
①	CASE1-1	2時間	95	10	1500回 <sup>※3</sup>	セメント安定処理層：材齢10日
	CASE1-2	3日	95	10	30万回	
	CASE1-3	21日	95	10	70万回	散水：90L（材齢15日）
	CASE1-4	24日	95	10	70万回	散水：90L（材齢24日）
②	CASE2-1	2時間	95	10	1500回 <sup>※3</sup>	10万回の予備載荷を実施
	CASE2-2	3日	95	10	30万回	
	CASE2-3	21日	95	10	70万回	散水：90L（材齢15日）
	CASE2-4	24日	95	10	70万回	散水：90L（材齢24日）

※1：供試体①（道床下部安定処理工法），供試体②（道床下部締固め工法）

※2：最小荷重5kN～最大荷重100kN

※3：1500回の内訳・・・材齢2時間以降，1時間毎に100回載荷を3回+200回載荷を6回=1500回

さは100mmとし、まくらぎ下の新品バラスト層（密度：1.6g/cm<sup>3</sup>）には表1に示す配合のSFCミルクを図6に示す手順で攪拌し、まくらぎ下面位置まで注入した（図7参照）。

表2に試験条件を示す。載荷荷重については、設計軸重160kNに対してレールおよびまくらぎによる列車荷重の分散およびレール継目部における速度衝撃率<sup>2)</sup>を考慮し、式(1)により算定した。

$$L = P \times \alpha \times i \quad (1)$$

ここに、L：載荷荷重（kN）、P：設計軸重（車両の軸重）160kN、α：荷重分担率0.4、i：速度衝撃率（i = 1 + 0.5V/100（レール継目部）※V = 110km/hを想定）である。式(1)より、載荷荷重Lは99.2kN（≒100kN）となる。本試験では最大荷重を100kNとし、載荷装置の制御の都合上、荷重振幅を95kN（最小荷重5kN）として載荷を行った。また、載荷周波数は10Hzとした。

本試験では、まずSFCミルクの若材齢時における軌道の沈下特性を把握するため、CASE1-1、CASE2-1においてSFCミルクの材齢2時間後から9時間をかけて、適用対象区間の1日分の列車荷重に相当する1500回の繰返し載荷を行った。なお、既存の道床を締固め層とす

る道床下部締固め工法について実施工を想定した場合、営業線における既存の道床部は荷重履歴を受けていると考えられる。供試体②の製作時には前述した方法で締固めバラスト層（試験バラスト）の締め固めを行っているものの、上記の荷重履歴を考慮するため、通常の手順とは異なるが、本試験ではSFCミルクを注入する前のバラスト軌道に対して10万回の載荷を行った。

CASE1-2、CASE2-2ではSFCミルクの材齢3日で30万回の載荷を行った。さらにCASE1-3、CASE1-4、CASE2-3、CASE2-4では供試体の上面に累積30mmの雨量（激しい雨（1時間雨量30mm以上50mm未満）に相当、気象庁より）に相当する水（90L）を散水し、試験期間中を通して供試体に水が滞留する条件で各70万回の載荷を行った。ここで、適用対象区間における年間通トン（3.1百万トン）を考慮すると、30万回の載荷は約1.5年分、70万回の載荷は約3.6年分の荷重履歴に相当する。

測定項目はまくらぎ両端部の鉛直変位（2点）、セメント安定処理層上面の鉛直変位（2点、供試体①）、締固めバラスト層上面の鉛直変位（2点、供試体②）および路盤層上面の鉛直変位（2点）とした（図5参照）。なお、別途作製した円柱供試体（φ150×300mm）の圧縮強度試験（N=3）を行った結果、SFC改良層の圧縮強度は材

齢3日で8.2N/mm<sup>2</sup>、材齢28日で12.0N/mm<sup>2</sup>、セメント安定処理層の圧縮強度は材齢10日で4.5N/mm<sup>2</sup>、材齢28日で5.6N/mm<sup>2</sup>であった。

#### 4.2 試験結果

図8に各試験ケースにおける試験結果を示す。ここで、変位は各2測点の平均値とした。

同図(a)(b)より、CASE1-1、CASE2-1ともに載荷直後に僅かに初期沈下を生じたが、その後の繰返し載荷における変位の増加は小さく、1500回載荷時のまくらぎの最大変位はCASE1-1で0.39mm(残留変位0.24mm)、CASE2-1で0.47mm(残留変位0.30mm)と微小であった。

同図(c)(d)より、170万回載荷時の最大変位は道床下部安定処理工法の場合(CASE1-4)はまくらぎで1.29mm、セメント安定処理層で1.10mm、路盤で1.00mm、道床下部締固め工法の場合(CASE2-4)はまくらぎで1.50mm、締固めバラスト層で1.04mm、路盤で0.99mmであった。

本試験では供試体の製作場所の寸法上の制約から砂路盤の厚さを300mmとしたため、路盤の沈下量に関しては現地の状況を厳密には再現できていないと考えられる。既往の研究<sup>6)</sup>では、本稿で紹介した通常工法のSFCてん充道床軌道を同条件の砂路盤上に適用するための検討を行っており、路盤の深さ3mまでの応力分布を考慮した繰返し三軸圧縮試験から、現地の砂路盤の沈下量を試算している。この研究によると、数値解析により算出した通常工法によるSFCてん充道床軌道直下の

砂路盤表面に作用する鉛直応力は54.8kPaであり、この載荷応力をもとに繰返し三軸圧縮試験により推定した40年後の砂路盤の沈下量は4.6mmであった。ここで、円柱供試体の圧縮強度試験により物性値を取得した道床下部安定処理工法の場合について同様の解析を行ったところ、軌道直下の砂路盤表面に作用する応力は49.7kPaとなり、通常工法の場合よりも小さくなることを確認した。よって、道床下部安定処理工法の場合における砂路盤の沈下量は通常工法の場合よりも小さくなる考えられる。一方、道床下部締固め工法については、道床部の剛性の違いから道床下部安定処理工法よりも軌道直下の砂路盤表面に作用する応力が大きくなると考えられるが、前述した実物大試験の結果より、砂路盤の沈下量は同程度と推察される。

以上のように、実物大軌道供試体の繰返し載荷試験の結果、供試体②の道床下部締固め工法の方がまくらぎの沈下量はやや大きく、散水によってまくらぎの沈下量はやや増加したものの、噴泥等の外観上の変化は確認されなかった。ここで、適用対象区間における軌道の高低変位に関する整備目標値<sup>2)</sup>は11mmであり、上記の結果から、本研究で提案したSFCてん充道床軌道は既設線省力化軌道として適用可能であると考えられる。

#### 5. 営業線における試験施工

2章に示した調査箇所付近において、噴泥を生じたバラスト軌道区間でSFCてん充道床軌道の試験施工を実

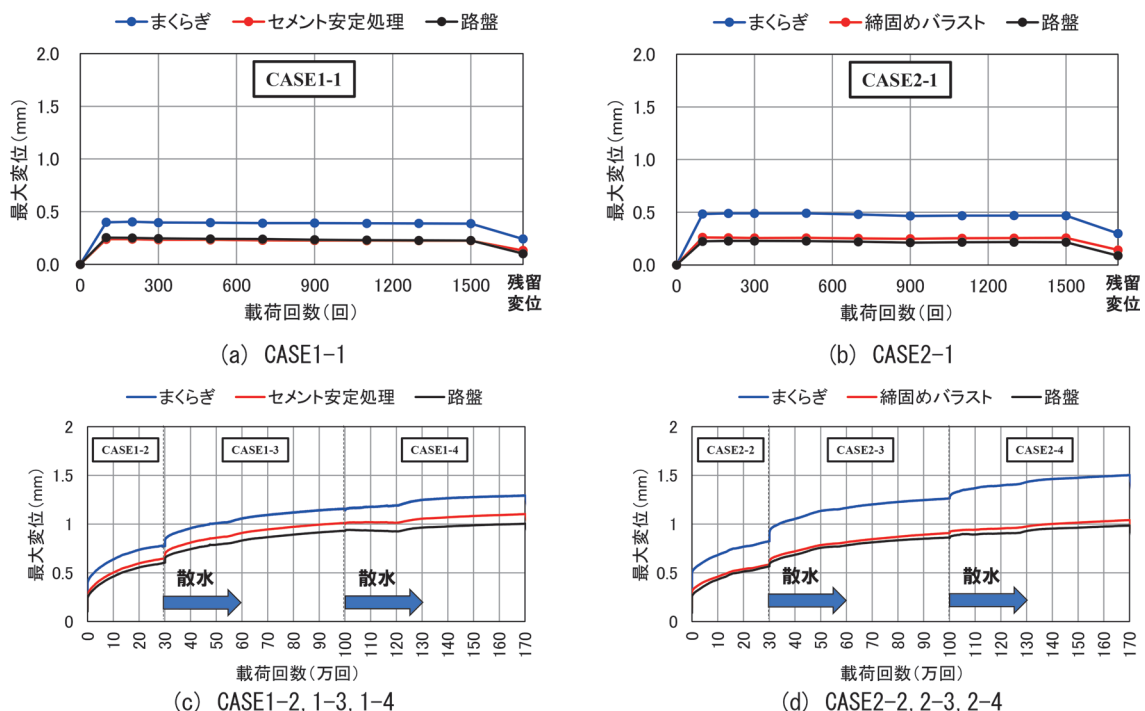


図8 試験結果 (最大変位-載荷回数)

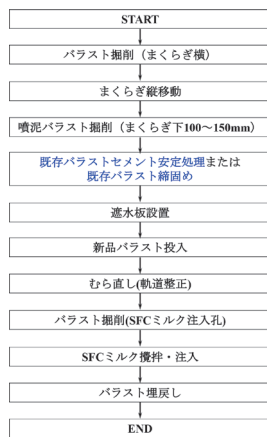


図9 施工フロー

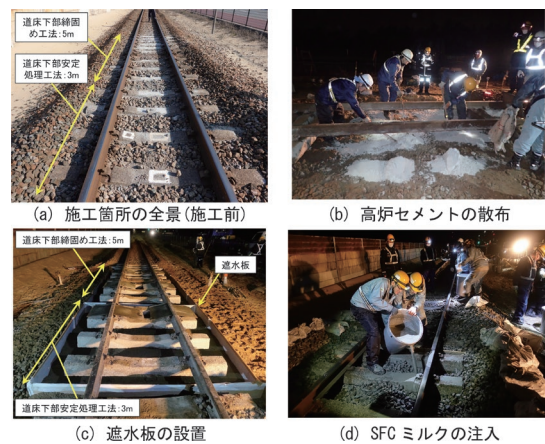


図10 施工状況

施した。

図9に施工フロー，図10に施工状況を示す。本施工では道床下部安定処理工法を3m，道床下部締固め工法を5m施工した。はじめに，まくらぎを縦移動させてまくらぎ周囲の泥土化したバラスト（まくらぎ下100～150mmまで）を撤去し，それよりも下層のバラストをセメント安定処理もしくは強固な締め固めを行った。続いて，遮水板をまくらぎ端部に設置し，新品バラストを投入した。その後，むら直しを行ってからSFCミルクを新品バラスト層に注入した。

なお，本試験施工では隣接する箇所でも通常工法による施工を合わせて実施したことから，1日目は新品バラストの投入作業までを行い，2日目にSFCミルクの注入を行った。現場での作業性にもよるが，道床下部安定処理工法および道床下部締固め工法は，1晩の作業間合い4～5時間当たり8m程度の施工が可能と考えている。

図11に施工前後に測定した10m弦高低変位を示す。同図より，施工範囲に隣接するバラスト軌道において高低変位の進みが見られ，これらの箇所は噴泥箇所に隣接して道床状態が悪化していたため，高低変位が生じやすかったと推察される。この影響を受けて施工範囲内で波形の変化が見られるが，軌道の変形は生じていないと考えられる。

## 6. まとめ

本稿では，噴泥したバラスト軌道に適用可能なSFCでん充道床軌道を提案し，実物大軌道供試体の繰返し載荷試験により，既設線省力化軌道として十分な沈下抑制効果を確認した。また，営業線にて試験施工を行い，施工性および施工後の軌道状態に問題がないことを確認した。

## 文献

1) 安藤勝敏，三浦重，須長誠，関根悦夫，小関昌信，高木言

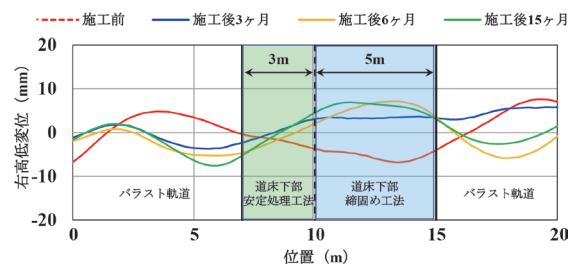


図11 軌道検測データ

芳，原田豊：既設線用舗装軌道の開発・実用化，土木学会論文集E1（舗装工学），Vol.1，pp.111-120，1996  
 2) 須田征男，長門彰，徳岡研三，三浦重：新しい線路-軌道の構造と管理-，日本鉄道施設協会，1997  
 3) 奥村悠樹，熊倉孝雄，堀雄一郎：TC型省力化軌道のでん充層補修および強化工法について，第20回鉄道技術連合シンポジウム J-RAIL2013，2013  
 4) 測上翔太，中村貴久，高橋貴蔵，桃谷尚嗣：細粒分含有率が高いバラストを活用したでん充道床軌道に関する研究，土木学会論文集E1（舗装工学），Vol.73，No.3，pp.I\_179-I\_187，2017  
 5) 測上翔太，中村貴久，高橋貴蔵，桃谷尚嗣：噴泥したバラスト軌道に適用可能なSFCでん充道床軌道の沈下特性の評価，土木学会論文集E1（舗装工学），Vol.77，No.2，pp.I\_189-I\_197，2021  
 6) 測上翔太，中村貴久，高橋貴蔵，桃谷尚嗣：砂路盤上に敷設したでん充道床軌道の沈下特性の評価，土木学会論文集E1（舗装工学），Vol.76，No.2，pp.I\_315-I\_323，2020  
 7) 舗装工学ライブラリー2：FWDおよび小型FWD運用の手引き，社団法人土木学会，2002  
 8) 公益財団法人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，2015  
 9) 伊藤孝記，桃谷尚嗣，中村貴久，村本勝己：発生バラストを再利用した鉄道路盤の改良工法に関する研究，土木学会論文集E1（舗装工学），Vol.68，No.3，pp.I\_79-I\_87，2012