鉄道営業線における発生バラストを活用した 路盤改良工法に関する研究

中村貴久¹・桃谷尚嗣²・伊藤壱記³・村本勝己⁴

¹正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

E-mail: takahisa.nakamura.19@rtri.or.jp

²正会員 博士(工) (公財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

³正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 総務部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

⁴正会員 博士(工) (公財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

土路盤上のバラスト軌道において、道床・路盤が不健全な箇所は道床交換すると共に路盤改良を行うことで健全な状態を保持することができる。一方で、そのような箇所の路盤改良ではバラストが発生土として廃棄されることが多い。そこで、筆者らは発生バラストに低強度グラウトを充填する新しい路盤改良工法の開発を行っている。本工法は、道床交換の際に発生する道床バラストを活用することで環境負荷の軽減とともに作業時間の短縮を目指したものである。本研究では、要素試験により発生バラストを用いた改良体の強度特性を把握した。また、路盤剛性の低い粘性土路盤の実物大模型試験を行い、本路盤改良工法の沈下抑制効果を確認した。さらに、路盤剛性の低い鉄道営業線において試験施工を行い、本工法の路盤改良効果を検証した。

Key Words : roadbed improvement method with grout, existing line, deteriorated ballast, ballasted track, soft roadbed

1. はじめに

鉄道の路盤は、昭和 53 年に「建造物設計標準（土構造物編）」¹⁾が制定されて以降、新設線に対しては設計標準に基づいた設計・施工が行われており、現行では、平成 19 年に「鉄道構造物等設計標準・同解説（土構造物）」²⁾が制定されている。現行の設計標準において、軌道および路盤を支持する路床は、敷設する路盤の種類に応じて地盤反力係数（ K_{30} 値）で剛性が定められており、バラスト軌道の場合は 70MN/m^3 以上とされている。また、バラスト軌道用路盤は、通常、重要度の高い線区の場合にアスファルト路盤が、一般的な線区の場合に碎石路盤が選定される。アスファルト路盤は上部路盤にアスファルト混合物を使用し、下部路盤には粒度調整碎石等を用いて十分に締め固めて構築し、碎石路盤は 300mm の路盤厚でクラッシャー等の良質な路盤材料を十分に締め固めて構築することとされている（図-1）。

しかし、日本の鉄道は昭和 53 年以前に建設されたものが大半であり、敷設後数十年が経過して長年の列車の繰返し通過による密な路盤であっても、未だに噴泥などの路盤変状が発生し、慢性的な道床状態の劣化に悩まされ

ている箇所も少なくない（図-2）。また、そのような路盤は、路盤剛性が低い箇所が多く、過去に行われた現地調査から、列車の繰返し荷重により路盤剛性が低い箇所の

図-1 バラスト軌道の概要³⁾

図-2 軟弱路盤上のバラスト軌道の概要

図-3 路盤改良後のバラスト軌道の概要

バラスト軌道は沈下が増大しやすいことがわかっており⁴⁾、タイタンパーを用いた通常の軌道補修では、すぐに沈下が再発して保守費の増大を招きやすい。そのため、軟弱路盤箇所に対しては、新しい道床バラストに交換(以下、道床交換)すると共に、良質な地盤材料を用いた置換工法や安定処理工法などの路盤改良により路盤剛性を増加させ、道床交換することで、道床・路盤の健全化および保守周期の延伸化を図る必要がある(図-3)。

一方で、このような路盤改良工法は、路盤改良材の締め固めが不十分であると、路盤の強度が上がらないために初期沈下が大きくなり、十分な改良効果が得られない。また、軟弱路盤箇所の延長に対して、路盤改良の1晩あたりの延長は、比較的長い作業時間を確保できても10m程度と短く、施工延長の延伸が望まれている。しかし、線路内工事の夜間作業時間には制約があり、さらに線路内で使用する重機には制限があるため、重機の性能向上による一施工あたりの施工延長の延伸は困難である。そこで、上記の課題に対処するため、発生バラストに低強度グラウトを充填する新しい路盤改良工法の開発を行うこととした。本工法は、道床交換の際に発生土となる道床バラストを活用することで環境負荷の軽減とともに、発生土・路盤材の運搬時間を短縮し、道床バラストの交換作業や路盤改良の作業時間を確保することで、1晩あたりの施工延長の延伸を目指したものである。

本工法の開発にあたり、雨水等が滞水する排水性が悪い砂質土路盤に対して、実物大軌道模型を用いた繰返し載荷試験により、改良効果が得られることがわかっている³⁾。本研究では、要素試験により発生バラストを本グラウト材で改良した改良体の強度特性を検討した。また、路盤剛性の低い粘性土路盤に対して本路盤改良工法の実物大模型試験を行い、路盤改良効果を確認した。さらに、FEM解析により実物大模型試験の路盤改良効果を評価するとともに、路盤改良の厚さおよび幅の設定方法を検討し、鉄道営業線における本工法の試験施工により施工性および改良効果を検証した。

2. 新しい路盤改良工法の概要

本工法は、路盤改良材の骨材として道床バラストを活用し、低強度グラウトを充填することで路盤表層に路盤改良層を構築するものである(以下、グラウト充填工法という)(図-4)。骨材には、路盤改良工事の際に発生するバラストを再利用することで環境負荷低減を目的としている。低強度グラウトは、セメント・促進剤・水からなるA液と、硬化剤・水からなるB液の2液を体積比1:1で混合して充填するものであり、瞬結性であることから締め固め作業が不要となる。また、2液式にすることでゲル

図-4 グラウト充填工法の概要

表-1 グラウト材の配合

A液 (40l)	高炉セメントB種	25kg
	促進剤	2.4kg
B液 (40l)	混練水	30.8kg
	硬化剤	4.8kg
	混練水	39.2kg

図-5 グラウトの充填作業手順

タイムを数分程度に調整できることから漏出の恐れが小さいため、充填の際の型枠が不要となる。グラウト材により改良した発生バラストの強度特性は、既往の研究³⁾より、砂質土および粘性土が混入した発生バラストの条件で材齢7日の変形係数が約1,000MPaであった。表-1にA液・B液の配合を示す。また、グラウトの充填作業手順の概要を図-5および以下に示す。

- ①A液用およびB液用の各大型容器(300L程度)に、計量した各材料を投入し、ハンドミキサーで攪拌する
- ②各容器にホースを接続した泥水ポンプを設置し、A液とB液を充填管内で混合して充填する

A液とB液の泥水ポンプの流速は両ポンプの流量が等速になるように調整して充填管内で2液を混合し、流出したグラウト材によるバラストの移動を防止するため、充填管からの排出量を60L/min程度に設定した。

3. 改良土の要素試験

(1) 細粒土混入バラストの粒度分布

本工法は、路盤改良材の骨材に発生バラストを用いることから、発生バラストの粒度分布が、路盤改良層の強度特性に影響を及ぼすことが考えられる。そこで、営業線より道床バラストを採取し、粒度試験を行った。採取

箇所は、列車による繰返し荷重やつき固め補修により磨耗等の影響が比較的小さく、各現場においても粒度分布のばらつきが小さいと考えられる道床肩部のバラストとし、比較として、最も細粒分が混入していると考えられる噴泥発生箇所のまくらぎ間のバラストとした。

採取した試料の粒度分布を図-6に示す。道床肩部は粒径10mm以下の含有率が基準粒度内のバラストと同程度に低いのに対して、噴泥発生箇所は細粒分含有率が16%程度であり、道床の採取箇所により粒度分布が大きく異なることがわかった。

(2) 細粒土含有率と強度特性に関する一軸圧縮試験

a) 試験概要

発生バラストの細粒分含有率が本グラウト材で改良した路盤改良層（以下、グラウト改良土という）の強度特性に及ぼす影響を検討するため、細粒分の影響を考慮したグラウト改良土の一軸圧縮試験を行った。

試験条件を表-2に示す。試験ケースは計10ケースである。なお、各試験ケースは供試体1本で実施したため、一定のばらつきを含む可能性がある。細粒分含有率の影響を検討するため、粘性土の添加率が5%、10%、20%の3種類とし、養生期間は施工数時間後に列車荷重が作用することから、2時間、7日の2種類とした。また、実軌道において、路盤改良工事が夏季以外の夜間作業で行われることから、比較的低い気温での施工となることを考慮し、環境条件として、練混ぜ水、骨材およびグラウト材の温度（以下、材料温度という）を5℃、10℃、20℃の3種類に設定した。

図-6 細粒土混入バラストの粒度分布

表-2 一軸圧縮試験の試験条件

	供試体寸法	粘性土添加率	材料温度	養生期間
1	φ100mm H200mm	粘性土5%	5℃	2時間
2				7日
3				2時間
4			10℃	7日
5				2時間
6			20℃	7日
7		粘性土10%	5℃	2時間
8				7日
9		粘性土20%	5℃	2時間
10				7日

b) 供試体作製方法

一軸圧縮試験および後述する実物大模型試験に用いる発生バラストは、経年により細粒化したバラストを想定するため、既往の研究³⁾と同様に、新バラストにクラッシュラン(C-30)と粘性土(カオリン)を混合したものである。発生バラストの配合は、新バラストとC-30を乾燥重量比3:7の割合で、密度が1.542t/m³となるように準備し、その乾燥重量に対して各添加率の粘性土を混合して発生バラストを作製した。また、C-30の乾燥重量の5%の水を加えて含水比を調整した。

供試体寸法は高さ200mm、直径100mmで作製し、供試体寸法を考慮して、発生バラストの最大粒径を30mm以下に粒度調整した。ここで、既往の研究³⁾より、粒度調整していない発生バラストを用いたグラウト改良土の一軸圧縮強さは、細粒分含有率、養生期間および材料温度が同一条件の場合に、本研究の粒度調整した発生バラストのグラウト改良土の一軸圧縮強さと概ね同程度であることを確認した。また、図-6より、現場で用いる発生バラストは道床肩部のバラストであり、粒度調整していない粘性土添加率5%の発生バラストよりも細粒分含有率は低いことから、安全側の評価として細粒分含有率の影響を検討できると考えられる。グラウト材と発生バラストを5層に分けて交互にモールドへ投入して、グラウト改良土を作製した。グラウト材の充填量は、発生バラストの空隙率が40%程度であったことから、空隙を満たすために、全体積の40%とした。供試体端面は石膏を用いてキャッピング処理を行い、載荷速度は0.1%/minとした。

c) 試験結果

図-7にグラウト改良土の一軸圧縮応力と軸ひずみの関係を示す。粘性土が5%の場合の材料温度の影響を比較したところ、どの材料温度の場合も一軸圧縮強さは同程度であったことから、材料温度がグラウト改良土に及ぼす影響は小さいと考えられる。また、供試体が1本であることによる強度特性のばらつきは、同じ粘性土の添加率で3種類の温度変化による一軸圧縮強さにばらつきが見られなかったことから、本作製方法による強度特性のばらつきは小さいものと考えられる。一軸圧縮強さは、材齢2時間の場合、どのケースも概ね同程度であるが、材齢7日では、粘性土が20%の場合に、200kPa程度に低下しており、その他のケースでは概ね400kPa程度であることがわかる。これは、細粒分含有率が増加することにより、細粒土混入バラスト内にグラウトが浸透しづらくなり、改良層内の強度にばらつきが生じたことによるものと考えられる。

以上より、本施工にあたっては、細粒分含有率が10%以下の発生バラストを用いることとし、基本的には道床肩部の発生バラストを用いた。また、まくらぎ間および

図-7 一軸圧縮応力と軸ひずみの関係

まくらぎ直下のバラストについては、細粒分含有率が10%以下の場合に使用可能とした。

4. 実物大模型試験による路盤改良効果の検討

(1) 試験概要

路盤剛性の低い粘性土路盤に対して、グラウト充填工法の路盤改良効果を検討するため、実物大模型を用いた繰返し載荷試験を行った。試験ケースは未対策の粘性土路盤を用いた場合（以下、粘性土路盤という）と粘性土路盤をグラウト充填工法により路盤改良した場合（以下、グラウト改良路盤という）の2ケースである。実物大模型試験の概要を図-8に示す。

(2) 供試体作製方法

粘性土路盤およびグラウト改良路盤は、幅3.5m、奥行き7m、深さ2.5mの土槽内に構築した。

粘性土路盤は、路盤剛性の低い軟弱路盤を想定し、載荷荷重に対して、路盤表面における地盤反力係数（ K_{30} 値）が 50MN/m^3 で一般的な剛性の地盤と同等の変形量となるように、FEM解析を用いて層構成を設定して構築した。土槽底部より1850mm位置まで礫質砂を締め固めて構築し、その上に発泡スチロール（以下、EPSという）層250mmを設置して粒度調整碎石300mmを締め固めて構築した。さらにその上に遮水シートを設置し粘性土層100mmを構築した。粘性土層は、載荷試験前にまくらぎ2本を設置して載荷荷重相当の荷重を与え、十分に圧密を行った。EPS層は地盤反力係数を小さくするために、荷重の影響範囲が大きい路盤上部に設置することとし、その上下層は粒度調整碎石および礫質砂を用いることで、粘性土層以外の塑性変形を極力抑える層構成とした。

グラウト改良路盤は、粘性土路盤上に発生バラストを投入しながら、第2章に示した手順にてグラウトを注入し、幅3.0m×長さ3.0m×深さ0.3mのグラウト改良層を構築した。発生バラストは、細粒分含有率が10%以下となるように、新バラストおよびC-30を第3章と同じ乾燥重量比3：7で、密度が 1.54t/m^3 となるように準備し、その乾燥重量に対して5%の粘性土を混合して作製した。また、第

図-8 実物大模型試験の概要

3章では最大粒径を30mm以下に粒度調整したが、実物大模型試験では、作製した発生バラストをそのまま用いた。グラウト材の充填量は、発生バラストの空隙率が40%であったことから、全空隙をグラウト材で満たすために、グラウト改良層の全体積の40%とした。なお、試験後のグラウト改良路盤のコア抜きはできなかったものの、切断面から発生バラストの空隙がグラウト材で概ね満たされていることを確認した。改良厚は K_{30} 値が新設線の路盤剛性と同等となるように300mmとした。構築した路盤改良層の養生期間は7日とした。

構築した各路盤上に、まくらぎ1本、道床厚200mmのバラスト軌道を構築した。バラスト道床は、粒度調整していない新バラストを用いて、密度 1.57t/m^3 となるように振動バイブレーターで締め固めて作製した。

(3) 試験条件

実軌道で列車荷重が作用した際に、レールの曲げ剛性でまくらぎ1本に作用する荷重が分散され、車輪直下のまくらぎには軸重の半分程度が作用すると仮定し、軸重 160kN として最大荷重 85kN 、最小荷重 5kN 、荷重振幅 80kN とした。載荷周波数は、準静的な挙動を示す⁵⁾と考えられる 5Hz とし、台車車軸間距離2.1mの場合の列車速度で 40km/h 程度に相当する。載荷回数は100万回の繰返し載荷とし、1年間のある区間を通過する全車両の総重量を500万tとした場合の3年間分に相当する。試験開始時には、水位が概ねバラスト層下面位置となるように、粘性土路盤およびグラウト改良路盤の表面に散水し、滞水させた。また、降雨による路盤面の滞水の影響を検討するため、既往の研究³⁾と同様に繰返し載荷試験中にじょうろでバラスト軌道に散水を行った。散水は、30万回で150リットル、45万回、75万回および85

万回で各 75 リットルとし、80～90 万回の間は、路盤からポンプで水を汲み上げ、水を循環させながら散水した。

(4) 試験結果

図-9より、100万回载荷後の路盤残留変位は、粘性土路盤が4.0mm程度に対して、グラウト改良路盤では2.0mm程度に半減していることがわかる。どちらのケースも散水の影響は顕著に見られないが、粘性土路盤の方が载荷回数とともに路盤残留変位が増加していることがわかる。

図-10より、100万回载荷後の路盤変位振幅は、粘性土路盤が1.6mmに対してグラウト改良路盤では0.9mmに低減しており、図-11より、100万回载荷後のまくらぎ残留変位は、粘性土路盤が22.7mmに対してグラウト改良路盤では10.2mmに半減していることがわかる。これは、路盤剛性の低い粘性土路盤を路盤改良して路盤の剛性が増加

図-9 路盤残留変位の推移

図-10 路盤変位振幅の推移

図-11 まくらぎ残留変位の推移

したことから、路盤変位振幅の低減とともに、まくらぎ残留変位が低減したものと考えられる。以上の結果から、路盤剛性の低い粘性土路盤を適切な改良厚で路盤改良することでバラスト軌道の沈下量が低減し、グラウト充填工法による路盤改良効果が発揮されることを確認した。

5. FEM 解析による評価

(1) 解析モデル

実物大模型試験の路盤改良効果を評価するため、FEMによるシミュレーション解析を行った。比較対象の試験結果は、20万回载荷時の路盤変位振幅と粒度調整砕石層中間部の鉛直応力振幅である。実物大模型試験の载荷周波数は5Hzであり、文献5)より载荷周波数がバラスト道床の変形特性に及ぼす影響は小さい準静的な挙動であると考え、FEM解析はNastranを用いた静的な線形解析とした。解析モデルを図-12に示す。解析モデルは、実物大载荷試験の模型を基に作成した。まくらぎ側面に接するバラストについては、連続した要素でモデル化すると荷重作用時にまくらぎ側面付近で発生するせん断応力を過大に伝達する可能性があるため、要素を作成していない。

解析に用いた物性値を表-3に示す。グラウト改良路盤は、既往の研究³⁾において微小ひずみレベルの変形係数が得られていることから、PC まくらぎ、バラスト道床および礫質砂と同様に、既往の研究³⁾の物性値を用いた。EPSは、既往の研究³⁾と同様のものを用いているが、本研究ではEPSを既往の研究³⁾よりも浅い位置に埋設していることから、作用する鉛直応力の増加とともに鉛直ひ

図-12 解析モデル

表-3 物性値一覧

項目	変形係数(MPa)	ポアソン比
PCまくらぎ	35,000	0.17
バラスト道床	100	0.3
グラウト改良路盤(発生)	1,050	0.3
礫質砂	70	0.3
EPS	5	0.1
クラッシュラン	200	0.3
一様剛性地盤(K_{30} 値=50MN/m ³)	30.5	0.3
一様剛性地盤(K_{30} 値=70MN/m ³)	42.6	0.3

ずみも増加するため、既往の研究³⁾よりも変形係数が小さくなることが考えられる。そのため、図-10の路盤変位振幅のシミュレーション解析による応力とひずみをもとにEPSの物性から、変形係数を設定した。クラッシュランは既往の研究⁶⁾を参考に設定した。比較対象とした一様剛性地盤は「鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物²⁾」に記載されている K_{30} 値から地盤の変形係数を求める式を用いて設定した。

(2) 実物大模型試験における路盤改良効果の評価

解析モデルの精度の検証を行うため、実物大載荷試験との比較を行った。図-13に路盤変位振幅分布を示す。路盤変位振幅分布は載荷点直下で変位が最大となり、試験結果とFEM解析結果で最大変位がほぼ一致していることがわかる。図-14に粒度調整碎石層中間部の鉛直応力分布を示す。鉛直応力分布は、応力値および分布形状が試験結果よりもFEM解析結果の方がやや小さいものの、概ね一致していることがわかる。以上の結果から、FEM解析により、路盤改良前後における路盤の強度・変形特性を概ね適切に評価できることを確認した。

(3) 路盤改良効果の検討

実物大模型試験を FEM 解析で評価することにより、路盤改良効果を検討した。実物大模型試験の路盤改良厚さは、未改良路盤に載荷荷重を作用させた場合に、必要な地盤反力係数を有する一様剛性地盤と同等の路盤変位となるように改良厚さを設定した。

図-13の路盤変位振幅分布より、粘性土路盤は K_{30} 値で 50MN/m^3 の一様剛性地盤と同程度の路盤変位であったことから、適切な改良厚さで路盤改良を施すことで、「鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物²⁾」に規定されている、新設線の碎石路盤(路盤(クラッシュラン・300mm厚)＋一様剛性路床・ K_{30} 値 $=70\text{MN/m}^3$)と同程度まで路盤変位が抑制され、路盤剛性が増加したことがわかる。

図-14の鉛直応力振幅分布より、粒度調整碎石層内で高い鉛直応力が発生している範囲は、まくらぎ中心位置よりまくらぎ長手方向に前後1.5m程度であることから、路盤改良幅は3m以上あれば荷重分散効果が得られると考えられる。

実物大模型試験において、グラウト改良路盤の路盤変位振幅が小さくなった理由について、図-15の粘性土層表面位置における鉛直応力コンターにより考察した。粘性土路盤の場合は、粘性土層表面位置において載荷点直下に大きな鉛直応力が発生しているのに対し、グラウト改良路盤の場合では、路盤改良層の下に粘性土層表面位置の鉛直応力が小さいことがわかる。グラウト路盤改良の場合は、路盤剛性が高くなることに加え、粘性土層が載荷点から深さ方向に離れることも応力の低減に寄与し

図-13 路盤変位振幅分布(まくらぎ直角方向)

図-14 鉛直応力振幅分布(まくらぎ長手方向)

図-15 鉛直応力コンター

ていると考えられる。このように、剛性の高い路盤改良層を設けることで、剛性の低い粘性土層に作用する応力が低減したことにより、路盤変位振幅が抑制されたものと考えられる。

6. グラウト充填工法の現地試験施工による検討

(1) 試験施工箇所の概要

新しい路盤改良工法改良効果を検証するため、営業線において試験施工を行った。

図-16に試験施工箇所の軌道の状況を示す。試験施工箇所は、浮きまくらぎおよび噴泥が発生しており、図-6の噴泥発生箇所と同程度に細粒土含有率が高いと考えら

図-16 試験施工箇所の軌道の状況

図-18 解析モデルの概要

図-17 試験施工箇所の換算 N 値

れる。軌道は、50kgN レール、木まくらぎ、道床厚 200mm の直線区間であり、路盤は粘性土である。

試験施工の路盤剛性を検討するため、道床法尻付近の 2 箇所で簡易動的コーン貫入試験および軌間中央と道床のり尻において小型 FWD 試験を実施した。図-17 に、簡易動的コーン貫入抵抗値より換算した⁷⁾路盤以深の N 値を示す。路盤表面から深さ 0.8m までは N 値が 1~3 と非常に小さく、低い路盤剛性であった。また、小型 FWD 試験より、軌間中央の K_{30} 値が $40 \sim 130 \text{ MN/m}^3$ とばらつきが大きいものの、道床法尻付近では K_{30} 値が 35 MN/m^3 程度と低い路盤剛性であった。路盤剛性の低い粘性土路盤の場合、列車の繰返し荷重により、軌道中央部付近の路盤表面にバラストが貫入し（以下、バラスト貫入層という）、路盤剛性にばらつきが生じることが考えられる⁴⁾。そこで、バラスト貫入層以深と道床のり尻付近の路盤剛性は同等であり、バラスト貫入層の剛性は道床のり尻付近よりも高い可能性があるが設計上は安全側の評価になると考え、路盤剛性のばらつきが小さい道床のり尻の小型 FWD 試験および簡易動的コーン貫入試験を用いて路盤剛性を評価することとした。その結果、路盤表面から深さ 0.8m までの路盤剛性を K_{30} 値 $= 35 \text{ MN/m}^3$ 、0.8m 以深を基盤として K_{30} 値 $= 150 \text{ MN/m}^3$ とし、路盤剛性の低い路盤表面から深さ 0.8m に対して路盤改良厚を設計することとした。

(2) 路盤改良範囲の設計

路盤改良範囲を設計するにあたり、改良幅および改良

表-4 物性値一覧

項目	変形係数(MPa)	ポアソン比
PCまくらぎ	35,000	0.17
バラスト道床	100	0.3
グラウト改良路盤	1,050	0.3
路盤表面から0.8mまで(K_{30} 値 $=35 \text{ MN/m}^3$)	21.3	0.3
0.8m以深(K_{30} 値 150 MN/m^3)	91.4	0.3
クラッシュヤラン	200	0.3
一様剛性地盤(K_{30} 値 $=70 \text{ MN/m}^3$)	42.6	0.3

図-19 路盤改良厚と路盤変位の関係 (FEM 解析結果)

深さをFEM解析により検討した。路盤改良幅は、「5.(3) 路盤改良効果の検討」で示したようにまくらぎ長手方向の 3m程度が列車荷重の影響範囲であることから²⁾、本施工における路盤改良幅は3mとした。路盤改良深さは、列車相当荷重を作用させた場合に新設線の路盤と同等の路盤変位となるように改良厚を設定することとした。試験施工箇所の路盤の剛性は、「6.(1) 試験施工箇所の概要」より、路盤表面から深さ0.8mまでを K_{30} 値 $=35 \text{ MN/m}^3$ とし、0.8m以深を K_{30} 値 $=150 \text{ MN/m}^3$ として検討した。

解析モデルは、図-18に示すように、まくらぎ1本からなるバラスト軌道であり、列車荷重の影響が大きい路盤表面から下3m²⁾についてモデル化した。解析は静的な線形解析であり、まくらぎ1本に作用する荷重は、軸重 160kNを想定してレールによる荷重分散を考慮して80kNとした。物性値を表-4に示す。既往の研究³⁾の一軸圧縮試験に用いた発生バラストは、現場で用いる道床肩部の発生バラストよりも細粒分含有率が高いことから(図-6)、現場の発生バラストを用いるよりもグラウト改良路盤の強度および剛性が小さくなると考えられるため、グラウト改良路盤の物性値は、既往の研究³⁾で用いた表-3の物性値を用いることで、安全側の評価になると考えられる。

バラスト道床は、道床交換後の新品バラストであり、「鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物²⁾」を参考に設定した。路盤剛性は、「鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物」に記載されている K_{30} 値から地盤の変形係数を求める式を用いて設定した。

図-19にFEM解析による路盤改良厚と路盤変位の関係を示す。グラウト充填工法による路盤改良厚を250mmに設定することで、新設線の碎石路盤（路盤（クラッシャーラン・300mm厚）＋一様剛性路床・ K_{30} 値=70MN/m³）と同等の路盤変位になることから、本施工における路盤改良厚は250mmとした。

(3) 路盤改良効果の確認

路盤改良は、道床掘削時に発生した道床肩部のバラストを線路脇に仮置きし、路盤を250mmの深さまで掘削した。その後、一層あたりの改良厚さが100mm程度となるように、発生バラストを投入してグラウトを充填する手順を繰り返し、所定改良厚さまで路盤改良層を構築した。道床肩部の発生バラストの粒度分布は図-6に示している。

本試験施工は初施工にも関わらず、従来の路盤改良工法と実働時間および実働人工は概ね同程度であり、発生バラストを路盤改良の骨材に活用することで環境負荷を軽減できることを確認した。今後の熟練により、作業時間の短縮が期待できる。

路盤改良効果の検証には、軌道上を走行しながら連続的にレール変位を測定する車両を用いて、10m離れた2点に張った弦の中央とレールとの距離（以下、高低変位という）を測定した結果を用いた。図-20に、試験施工箇所（継目部）における高低変位の推移を示す。試験施工箇所は、レールの継目部において局所的な高低変位が発生しており、過去にタイタンパーを用いた通常のつき固め補修を行い、高低変位が0mmとなるように軌道整正を行った。その結果、補修1カ月後に高低変位が9.5mmに増加し、施工7カ月後の高低変位は11.1mmとなった。補修前と比較して施工7カ月後の改善率は10%程度であり、通常のタイタンパー補修では、補修効果が十分には保持できていないことがわかる。一方、グラウト充

填工法により路盤改良を行い、高低変位が0mmとなるように軌道整正を行ったところ、施工4カ月後に高低変位が8.0mmとなり、その後は高低変位進みがわずかでであり、施工11カ月後の高低変位は8.7mmであった。施工前と比較して施工11カ月後の改善率は50%程度であり、良好な軌道状態を保持することがわかった。また、列車荷重走行時の路盤変位振幅と高低変位進みには相関があることがわかっており⁴⁾、路盤改良後の高低変位進みが小さいことから、路盤改良効果により路盤変位が抑制されたものと考えられる。

7. まとめ

本研究では、新しい路盤改良工法に関して、グラウト改良土の要素試験、本路盤改良工法の実物大載荷試験および試験施工を行った結果、以下に示す知見が得られた。

- (1) 一軸圧縮試験より、材料温度が20℃から5℃に低下しても、本工法によるグラウト改良土の強度が低下しないことがわかった。また、骨材に使用する発生バラストの細粒分含有率が10%程度までは、グラウト改良土の強度特性に及ぼす影響が小さいことがわかった。
- (2) 実物大模型試験およびFEM解析より、路盤改良を行うことにより、路盤変位振幅の低減とともにまくらぎ残留変位を低減できることを確認した。
- (3) 実物大模型試験およびFEM解析より、路盤剛性の低い路盤をグラウト充填工法により、適切な厚さで路盤改良を行うことにより、新設線の碎石路盤と同程度まで路盤剛性を増加できることを確認した。
- (4) 営業線における現地試験施工により、本工法を営業線で適用でき、施工後の軌道状態が良好であることを確認した。

謝辞：最後に、本試験施工にご協力いただいたJR四国工務部保線課、高知保線区の皆様に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 日本国有鉄道編：建造物設計標準解説土構造物，1978。
- 2) （財）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，2007。
- 3) 伊藤老記，中村貴久，桃谷尚嗣，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，Vol.68，No.3，I_79-I_87，2012。
- 4) 関根悦夫，村本勝己：営業線路盤の支持力特性に関する研究，鉄道総研報告，Vol.9，No.7，pp19-24，1995。
- 5) 石川達也，名村明，堀池高広：道床バラスト部の繰返し変形特性の定量化に関する検討，鉄道総研報告，Vol.8，

図-20 施工箇所の継目部における軌道変位の推移

No.11, pp31-36, 1994.

Vol.68, No.1, pp1-13, 2012.

6) 伊藤壱記, 桃谷尚嗣, 関根悦夫: 荷役機械の荷重を受ける軌道の設計方法に関する研究, 土木学会論文集E1,

7) 地盤工学会: 地盤調査の方法と解説, 2004.

A STUDY ON RAILWAY ROADBED IMPROVEMENT METHOD TO REUSE DETERIORATED BALLAST OF EXISTING LINE ON SOFT ROADBED

Takahisa NAKAMURA, Yoshitsugu MOMOYA, Kazuki ITOU
and Katsumi MURAMOTO

Regarding ballasted tracks on soil roadbeds, it is necessary to perform the roadbed improvement at locations where the ballast includes a high mix ratio of fine-particles and the bearing capacities of roadbeds are insufficient. In the roadbed improvement of such locations, the deteriorated ballast is discarded as surplus soils in most cases. Then, we have developed a new method able to be executed simply and in short working time to reuse the deteriorated ballast mixed with grout. In this study, we confirmed a settlement reduction effect of the method by full-scale model tests for soft clay roadbed. In addition, we performed also the field test on an existing line laid on soft roadbed to validate a roadbed improvement effect of this method.