

発生バラストを活用した既設線路盤改良工法の開発

中村 貴久* 桃谷 尚嗣*
伊藤 壱記* 村本 勝己*

Development of Railway Roadbed Improvement Method for Existing Lines by Reusing Deteriorated Ballast

Takahisa NAKAMURA Yoshitsugu MOMOYA
Kazuki ITOU Katsumi MURAMOTO

Regarding ballasted tracks on soil roadbeds, it is necessary to perform the roadbed improvement at locations where the ballast include 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 by reusing the deteriorated ballast mixed with grout. In this study, we confirmed this validity of the method by full-scale model tests. In addition, we confirmed also that this method is applicable to the existing lines by the field test.

キーワード：路盤改良，既設線，発生バラスト，バラスト軌道，グラウト充填工法

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⁾」が発行されて以降、新設線に対しては技術基準（現行は「鉄道構造物等設計標準・同解説（土構造物）²⁾」）に基づいた設計・施工が行われている。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、路盤改良が逐次行われてきているものの、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。そのような箇所は、通常のタイタンパー補修では補修効果が持続せず保守量が增大するため、新しいバラストに交換（以下、道床交換）すると共に、置換工法や安定処理工法などの路盤改良を行い、道床・路盤の健全化および保守周期の延伸を図る必要がある。

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、路盤の剛性が上がらないため十分な改良効果が得られない。また、線路内工事では使用する重機に制限があり、一晩あたりの施工延長の延伸は困難である。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、発生土の搬出時間を短縮することで施工延長の延伸を目指したものである。本研究では、新しい路盤改良工法についての実物大模型試験により路盤改良効果の検討を行い、試験施工により施工法および改良効果について検証した。

* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室

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使用し、低強度グラウトを充填することで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称す）（図1）。骨材の道床バラストについては、発生バラストを再利用することで環境負荷低減を目的としたもの（以下、グラウト充填工法（発生バラスト方式）と称す）と、新品バラストを用いることで施工性を重視したもの（以下、グラウト充填工法（新バラスト方式）と称す）の2パターンについて検討している。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液を混合して充填するものである。2液式にすることでゲルタイムを数分程度に調整できることから隙間から漏水の恐れが小さく、路盤改良箇所を掘り込むことで充填の際の型枠が不要となる。路盤改良材の強度特性については、文献3を参照されたい。本施工におけるグラウトの充填作業手順の概要を図2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、



図1 グラウト充填工法の充填状況

特集：軌道技術

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

本工法において、グラウト充填に用いる機材は、すべて汎用性の高いものとするにより容易に入手することができる。また、グラウトの充填作業については、作業手順を簡易にしたことにより普通作業員で対応可能となった。

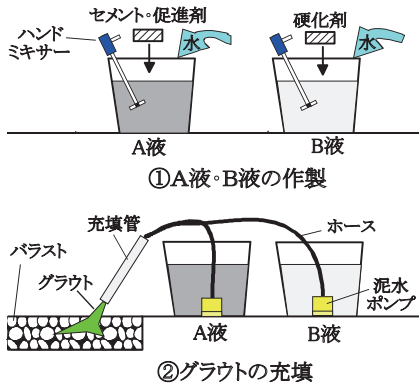


図2 グラウトの充填作業手順

3. 実物大模型試験

3.1 試験概要

本試験は、粘性土路盤および砂質土路盤について路盤改良効果の検討を行うため、実物大模型を用いた繰返し載荷試験を行うものである。試験ケースは表1に示すように、砂質土路盤の場合が4ケース、粘性土路盤の場合が2ケースの計6ケースである。

砂質土路盤の場合（ケース1～4）については、透水性の高い路盤に対して型枠が不要である本工法の適応性

表1 試験ケース

試験ケース名	路盤条件	路盤改良工法
1 砂質土路盤	砂質土路盤	未対策
2 砂・セメント安定処理路盤		セメント安定処理
3 砂・グラウト改良路盤(新)		グラウト充填工法(新バラスト方式)
4 砂・グラウト改良路盤(発生)		グラウト充填工法(発生バラスト方式)
5 粘性土路盤	粘性土路盤	未対策
6 粘・グラウト改良路盤(発生)	粘性土路盤	グラウト充填工法(発生バラスト方式)

の検討、および後述する現地試験施工箇所の確認試験として、排水条件が悪い箇所の未対策の砂質土路盤、セメント安定処理工法、グラウト改良充填工法（新バラスト方式）およびグラウト改良充填工法（発生バラスト方式）について試験を行った。

粘性土路盤の場合（ケース5, 6）については、グラウト充填工法（発生バラスト方式）により軟弱路盤を改良した場合の効果について検討を行った。

3.2 実物大模型の作製

試験に用いた土槽は幅3.5m、長さ7m、深さ2.5mであり、繰返し載荷には総合路盤試験装置を用いた。模型路盤は、設定した地盤反力係数（ K_{30} 値）と同等となるよう、FEM解析を用いて層構成を決定した。粘性土路盤の場合は、軟弱路盤として軌道変位進みが比較的大きくなるように K_{30} 値を $50\text{MN}/\text{m}^3$ の条件に設定し、砂質土路盤の場合は、比較的高い路盤剛性を想定し、 K_{30} 値を $90\text{MN}/\text{m}^3$ の条件に設定した。構築した各路盤上に、まくらぎ1本、道床厚200mmのバラスト軌道を設置した。

3.2.1 砂質土路盤の場合

砂質土路盤の場合の試験概要を図3(a)、図3(b)に示す。

砂質土路盤の模型表層300mmは、試験施工を行う予定の現場から採取した路盤土の粒度と比較的近い5号砕砂を用いて（図4）、長年の列車の繰返し通過による密な路盤状態を模擬するため、相対密度80%（密度 $1.66\text{t}/\text{m}^3$ ）で締め固め、その下に遮水シートを敷いた。路床は、土槽底部より厚さ1000mmのEPS（発砲スチロール）を設置することで載荷時の動の変位が比較的大きくなる条件とし、EPSの上には礫質砂を締め固めて構築した。

砂・セメント安定処理路盤については、砂質土路盤を構築後、所定の改良範囲（幅3000mm×長さ3000mm×深さ100mm）の砂質土路盤を掘削し、クラッシュランにセメントを10%添加し、締め固め度98%で締め固めた。なお、路盤厚さについては、セメント安定処理で路盤改良する際は200mm程度で施工されている場合が多いが、支持剛

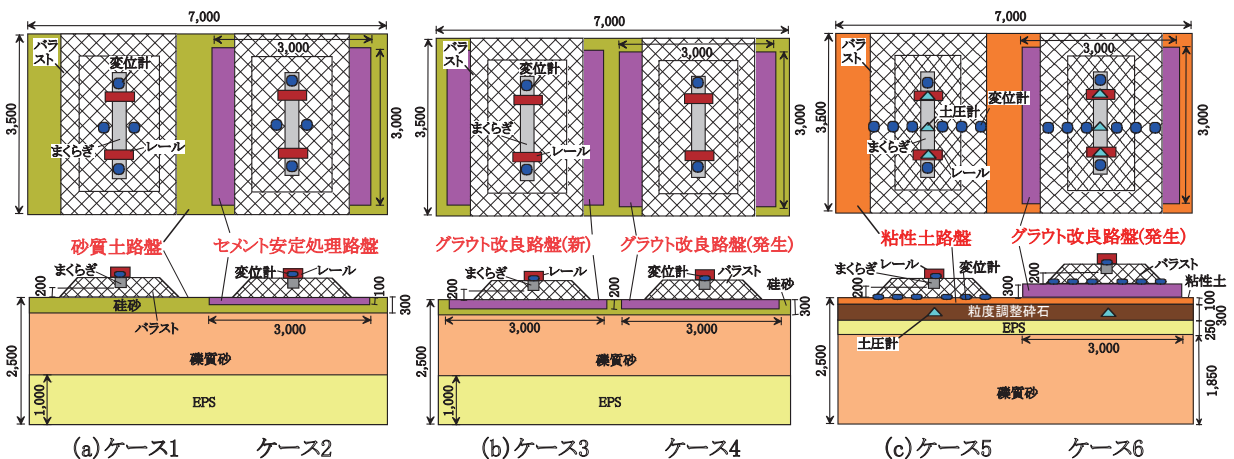


図3 実物大模型試験概要

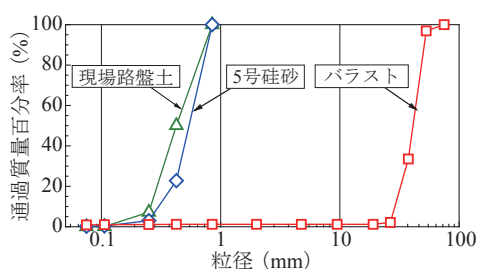


図4 粒度分布

性の比較的高い砂質系の路盤を想定していること、およびグラウト改良路盤と同程度の施工時間およびセメント使用量となるよう、一層で締め固められる100mmとした。

砂・グラウト改良路盤（新）は、所定の改良範囲（幅3000mm×長さ3000mm×深さ200mm）の砂質土路盤を掘削し、新バラストを厚さ200mmに撒き出した。その後、撒き出したバラスト表面を振動ランマ等で締め固め、バラスト間の空隙にグラウト材を注入した。

砂・グラウト改良路盤（発生）は、所定の改良範囲（幅3000mm×長さ3000mm×深さ200mm）の砂質土路盤を掘削し、バックホウおよび人力により発生バラストを投入しながらグラウトを注入し、改良厚さが200mmとなるよう作製した。なお、発生バラストは、試験施工における現地のバラストの状態を想定し、バラストと5号珪砂を乾燥重量比1:1で混合したものをを用いた。

模型路盤全体の剛性を評価するため、直径750mmの載荷板を用いた平板載荷試験を行った。地盤反力係数 K_{75} 値は、砂質土路盤 52.8MN/m^3 (K_{30} 値換算= 116.2MN/m^3)、セメント安定処理路盤 120.8MN/m^3 (K_{30} 値換算= 265.8MN/m^3)、砂・グラウト改良路盤（新） 80.0MN/m^3 (K_{30} 値換算= 176MN/m^3)、砂・グラウト改良路盤（発生） 106MN/m^3 (K_{30} 値換算= 233.2MN/m^3)であった。

3.2.2 粘性土路盤の場合

粘性土路盤は、図3(c)に示すように、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EPSブロック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。EPSブロックは路盤の動的変位を比較的大き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。また、粘性土層は、載荷試験前にまくらぎ2本を隙間なく締結した軌きょうを用いて載荷荷重相当の荷重で十分に圧密を行った。

粘・グラウト改良路盤（発生）については、クラッシュランとバラストを乾燥重量比7:3で混合し、さらにその骨材の乾燥重量に5%のカオリン粘土とクラッシュランの乾燥重量の5%の水を添加して混合することにより劣化した発生バラストを模擬し、発生バラストを投入しな

からグラウトを注入した。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。

地盤反力係数 K_{75} 値は、粘性土路盤 36.3MN/m^3 (K_{30} 値換算= 79.9MN/m^3)、粘・グラウト改良路盤（発生） 121.4MN/m^3 (K_{30} 値換算= 267.1MN/m^3)であった。

3.3 試験条件

載荷周波数5Hz、最大荷重85kN、最小荷重5kNとし、100万回の繰返し載荷を行った。試験開始時の水位は、砂質土路盤の場合（ケース1～4）、路盤表面から約200mm下がった位置とし、粘性土路盤の場合（ケース5、6）については路盤表面とした。繰返し載荷試験中については、全ケースとも、約30万回で150L、約45万回、約75万回および約85万回で各75Lをバラスト軌道に散水した。散水後の水位は路盤表面と同程度となった。また80～90万回の間は、路盤からポンプで水を汲み上げてまくらぎ上に散水する「水循環」を行った。なお、各路盤改良の養生期間は7日とした。

3.4 試験結果

3.4.1 砂質土路盤の場合

図5に繰返し載荷による路盤の残留変位を示す。100万回載荷後の路盤の残留変位は、砂・グラウト改良路盤（発生）が3.3mm、砂・グラウト改良路盤（新）が3.0mm、砂・セメント安定処理路盤が1.0mm、砂質土路盤が4.0mmとなった。砂質土路盤は、散水後に残留変位が増大したものの、各改良路盤ともに、残留変位量に対する散水の影響はみられなかった。

図6に路盤の変位振幅（全振幅）を示す。100万回載荷後の路盤の変位振幅は、砂・グラウト改良路盤（発生）が0.80mm、砂・グラウト改良路盤（新）が0.63mm、セメント安定処理路盤が0.58mm、砂質土路盤が0.87mmとなった。すなわち、砂質土路盤を路盤改良することにより路盤の変位振幅が小さくなることが確認された。

図7にまくらぎ残留変位を示す。まくらぎ残留変位は、砂・グラウト改良路盤（発生）が10.9mm、砂・グラウト改良路盤（新）が9.9mm、砂・セメント安定処理路盤が7.1mm、砂質土路盤が18.7mmとなった。すべてのケースにおいて、散水とともにまくらぎ残留変位が大きくなった。散水を始めた約30万回載荷後から100万回載荷後までの残留変位量で比較すると、未対策路盤は7.7mmであったのに対し、発生バラスト改良路盤が3.4mm、新バラスト改良路盤が3.7mm、セメント安定処理路盤が3.5mmとなり、路盤を改良することで概ね同じ変位量となった。

文献4によれば、列車走行時の1.0mm程度以上の路盤変位振幅と軌道沈下の進みには高い相関関係があるが、1.0mm以下ではその関係は見られないとされている。本結果では、路盤変位振幅は4ケースとも1.0mm以下

特集：軌道技術

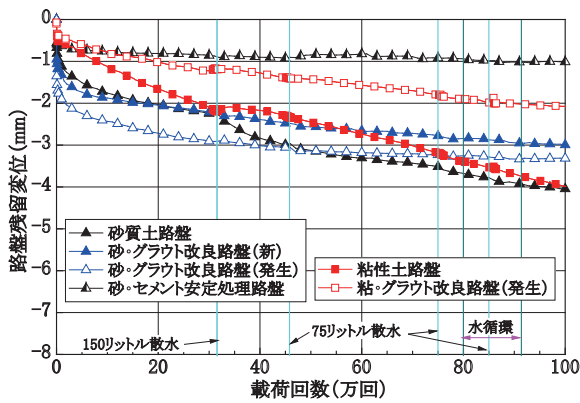


図5 路盤残留変位の推移

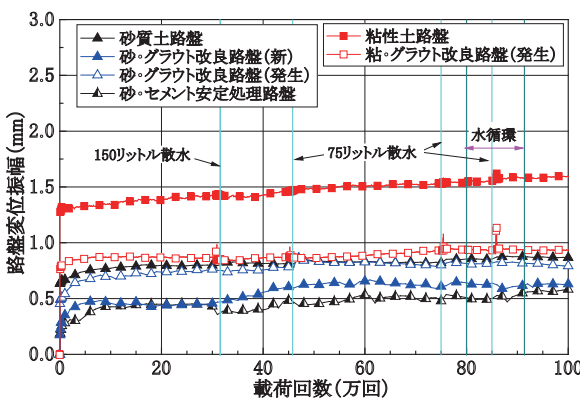


図6 路盤変位振幅の推移

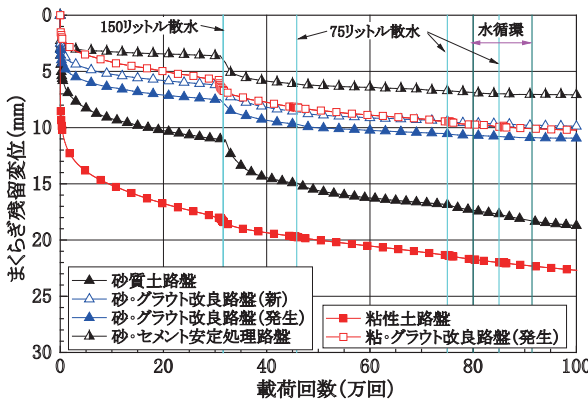


図7 まくらぎ残留変位の推移

であり、支持剛性としては比較的高い条件であることがわかる。しかしながら、散水後の砂質土路盤において、路盤変位振幅は1.0mm以下であるものの、路盤残留変位およびまくらぎ残留変位は増加した。以上の結果から、支持剛性が比較的高い路盤においても、排水条件が悪いと路盤残留変位の増加により軌道沈下も増加する場合があります。また、排水不良箇所に対して路盤改良を行うことにより、改良効果が得られることがわかった。

3.4.2 粘性土路盤の場合

図5より100万回載荷後の路盤残留変位は、粘性土路盤が4.0mmに対して、粘・グラウト改良路盤（発生）では2.0mmに低減していることがわかる。また、両ケース

とも散水の影響は顕著に見られないが、粘性土路盤の方が載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。また、図6より100万回載荷後の路盤変位振幅は、粘性土路盤が1.6mmに対して粘・グラウト改良路盤（発生）が0.9mmに低減しており、図7より100万回載荷後のまくらぎ残留変位は、粘性土路盤が22.7mmに対して粘・グラウト改良路盤（発生）が10.2mmに低減していることがわかる。

粘性土路盤の路盤変位振幅は1.0mm以上であり、路盤剛性が低いことからまくらぎ残留変位が増大したものと考えられる。また、粘・グラウト改良路盤（発生）は、砂質土路盤の場合の各改良路盤と同程度の路盤変位振幅となっており、まくらぎ残留変位も同様の傾向を示している。以上の結果から、軟弱路盤を適切な厚さで路盤改良することにより、路盤改良効果が発揮されることを確認した。

4. 実物大模型試験の解析による評価

4.1 繰返し載荷試験との比較

図8に示す解析モデルを用いた有限要素解析（静的線形弾性解析）を行い、実物大模型試験との比較を行った。試験ケースは、粘性土路盤と粘・グラウト改良路盤（発生）であり、散水の影響がない10万回載荷時の路盤変位と粒度調整碎石層中間部の鉛直応力について検討した。解析に用いた物性値を表2に示す。

図9に路盤変位分布を示すが、実験値とFEM解析値は概ね一致していることがわかる。図10に粒度調整碎石層中間部の鉛直応力分布を示す。実験値は土圧計による局所的な鉛直応力の測定値であり、正確な応力分布の測定は困難であるため参考値とするが、解析値と概ね応力分布の傾向が一致していると考えられる。

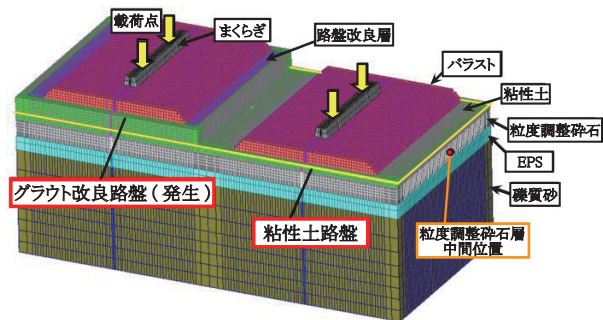


図8 解析モデル（粘性土路盤）

表2 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
パラスト道床	100	0.3
グラウト改良路盤（発生）	1,000	0.3
礫質砂	70	0.3
EPS	9	0.1
粒度調整碎石	180	0.3
K ₃₀ 値一様地盤 (50, 70MN/m ³)	30 5, 42 6	0.3

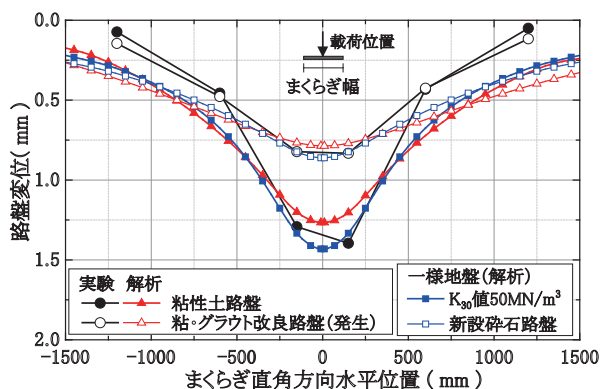


図9 路盤変位分布

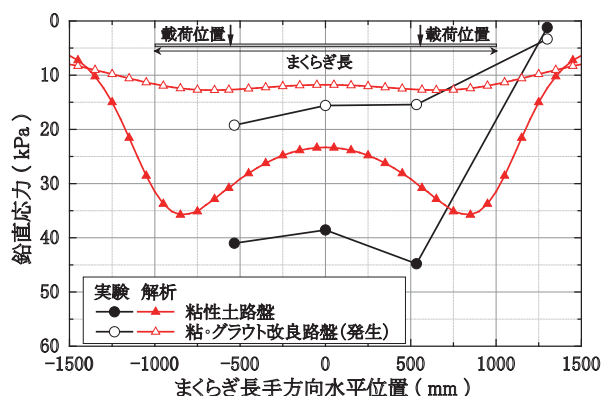
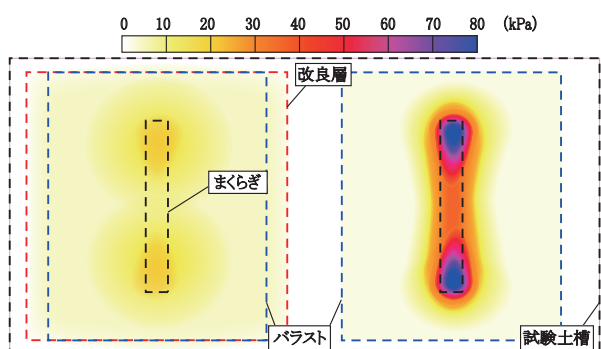


図10 鉛直応力分布（粒度調整碎石層中間位置）



(a) グラウト改良路盤(発生) (b) 粘性土路盤
図11 鉛直応力カウンター

4.2 路盤改良効果の検討

図9の路盤変位分布より、粘性土路盤は K_{30} 値で $50\text{MN}/\text{m}^3$ の一樣地盤と同程度の路盤変位であったが、適切な改良厚さで路盤改良を施すことにより、新設線の碎石路盤（路盤（クラッシュラン・300mm厚）+路床 K_{30} 値 $70\text{MN}/\text{m}^3$ 一樣剛性）と同程度まで路盤剛性が増加することがわかった。

また、図10の鉛直応力分布より、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以上あればよいと考えられる。

次に、載荷時に作用する粘性土表面の鉛直応力を比較した。図11に路盤表面の鉛直応力カウンターを示す。粘

性土路盤の場合は（図11（a））、まくらぎ両端部直下を中心に最大で 81kPa 程度の鉛直応力が発生しているが、粘・グラウト改良路盤（発生）では（図11（b））、最大でも 18kPa 程度であった。この結果から、路盤改良を行うことにより、路盤改良層下の粘性土路盤に作用する最大応力が1/4以下に低減することがわかった。

5. 試験施工

5.1 施工概要

新しい路盤改良工法の作業性および改良効果の確認を行うため、営業線において試験施工を行った。図12に試験施工箇所の概要を示す。施工箇所は土砂混入率が高く、浮まくらぎおよび噴泥が発生している箇所である。当該区間の軌道は、 50kg N レール、PCまくらぎの直線区間であり、路盤は砂質土である。また、年間通過トン数は370万トンである。本施工では、噴泥箇所に対してグラウト充填工法（発生バラスト方式）およびグラウト充填工法（新バラスト方式）の2種類による路盤改良を行った。路盤改良厚さは各200mm、施工延長は各5mとした。

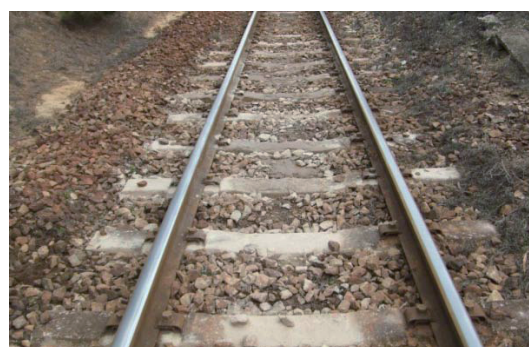


図12 試験施工箇所の概要

5.2 施工手順

図13～図15にA液・B液の作製作業および道床と路盤の掘削作業状況、グラウトの充填状況、路盤改良層の構築後の状況を、図16に施工手順を示す。発生バラスト方式では、道床掘削時に発生したバラストを線路脇に仮置きし、路盤を所定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からグラウトを充填する手順を繰り返す。新バラスト方式では、道床・路盤を掘削後にホッパー車で新バラストを所定改良厚さまで一度に投入し、グラウトを充填した。

5.3 施工結果

本工法は従来の路盤改良工法と比較して、路盤改良材の運搬作業および締め固め作業が削減された。一方、グラウト作製作業および充填作業が追加されたが、グラウト作製作業は道床・路盤の掘削作業と並行して行い、作

特集：軌道技術



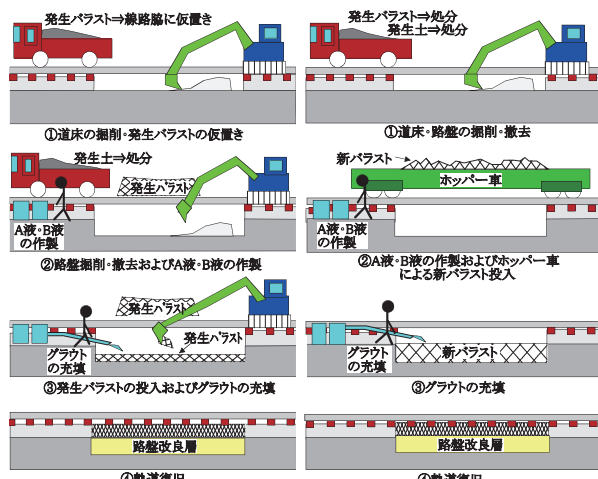
図 13 A液・B液の作製状況



図 14 グラウト充填状況



図 15 路盤改良層構築後



(a) 発生バラスト方式 (b) 新バラスト方式

図 16 グラウト充填工法の施工手順

業の効率化を図った。その結果、初めての施工で十分な経験を積んでいないにも関わらず、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った。

図 17 に施工 8 カ月後までの軌道変位波形を示す。施工後 8 カ月が経過しても良好な軌道状態を保っていることがわかる。

6. 結論

本研究では、新しい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) 路盤剛性が高い砂質土路盤でも、排水条件が悪いと軌道変位進みが大きくなることもあり、そのような箇所でも路盤の改良効果があることがわかった。
- (2) 軟弱路盤をグラウト充填工法により適切な厚さで路盤改良することにより、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。
- (3) FEM 解析の結果から、路盤改良を行うことにより、改良層以深の粘性土路盤に作用する応力を低減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、夜間の作業間合いでグラウト充填工法による路盤改良を施工でき、施工後の軌道状態も良好であることを確認した。

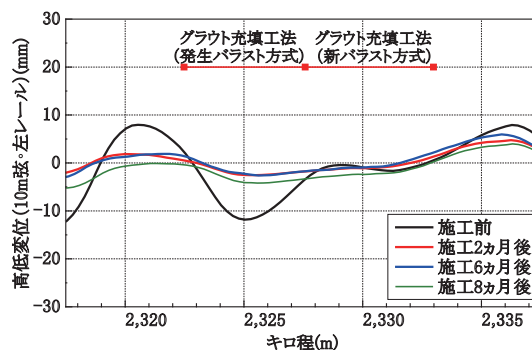


図 17 軌道変位波形（施工 8 カ月後まで）

7. おわりに

営業線の夜間作業における路盤改良工法として、発生バラストを活用したグラウト充填による新しい工法の試験施工を行った。今後は、改良効果の確認を行うとともに、実用化に向けて施工性を更に向上させ、施工延長の延伸を目指す。

謝辞

最後に、本実物大模型試験にご協力いただいた住友大阪セメント株式会社の皆様、本試験施工にご協力いただいた JR 九州施設部保線課および博多保線区の皆様に感謝の意を表す。また、本研究の一部は、国土交通省の補助金を受けて実施した。

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) 伊藤竜記，桃谷尚嗣，村本勝己：劣化したバラストを再利用した路盤改良材の強度特性の評価，第 47 回地盤工学研究発表会，2012 年 8 月
- 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, pp.19-24, 1995