

超微粒子セメントを用いたてん充道床軌道の開発

淵上 翔太* 高橋 貴蔵*
 中村 貴久* 桃谷 尚嗣*

Development of Ballastless Track with Super-fine Particle Cement

Shota FUCHIGAMI Takatada TAKAHASHI
 Takahisa NAKAMURA Yoshitsugu MOMOYA

In order to reduce the daily maintenance works and costs of the existing ballasted track, a paved track, a grouted ballasted track and many types of ballastless track have been developed so far. However, the improvement of the existing ballasted track into these developed tracks entails the costly replacement of the existing sleepers and ballast. If the existing ballast is reused for the improvement method, it is necessary to select a grout with high permeability and integrate sleepers and ballast with the selected grout. In order to achieve this, we focused on superfine-particle cement paste, which is mainly used as grouting material for soil and has not yet been applied to railway track construction up to now. In this study, we have carried out the filling performance test of grout materials and cyclic loading test for full-scale track models. As a result of the tests, we have confirmed that the method of improving the ballasted track with superfine-particle cement paste shows a good effect on reduction of settlement of the track.

キーワード：てん充道床軌道，超微粒子セメント，実物大軌道模型，繰返し載荷試験

1. はじめに

これまでに、新設線および既設線における種々のてん充道床軌道や舗装軌道が開発・実用化¹⁾されているが、それらの省力化軌道は既存のまくらぎやバラストを交換した上で、バラスト道床内にグラウト材を注入して軌きようと道床を一体化する工法が多く、材料費および施工費が高価であるため、閑散線区においては適用事例があまり見られない。一方、例えば長大トンネル区間のバラスト軌道において道床交換工事を実施する場合は、バラスト等の搬入出作業に多大な時間を要するために一晩当たりの施工延長が伸びず、施工費が高価となる傾向がある。特に古いトンネルでは、総つき固めやむら直し作業等による継続的な軌道補修により、レール面上昇に伴いトンネル天端と建築限界が近接しており、将来的に軌道の盤下げ等による対策を検討する必要がある。よって、このような区間においては、バラスト軌道の日常的な保守作業を軽減するために、比較的安価な施工費により既設線バラスト軌道を省力化軌道に改良する技術が求められている。

既設線バラスト軌道を低コストに省力化軌道へと改良する方法として、ここでは既存のまくらぎとバラストを活用し、グラウト材を含めた材料費および施工費を抑制する方法を検討した。しかし、経年したバラスト道床は細粒土混入率が高い状態にあり、省力化軌道に用いられ

* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室

る従来のグラウト材ではバラスト道床内へ十分に充てんできないことが課題であった。そこで本研究では、複数のグラウト材について細粒土混入率の高いバラストに対する注入特性試験を実施し、自然流下による経年バラストへの充てん性能を評価した。また、グラウト材として超微粒子セメント^{2) 3)}を適用したてん充道床軌道の構築方法を新たに提案し、実物大軌道模型の繰返し載荷試験により軌道の沈下特性を評価した。さらに、在来線のトンネル区間において本工法の試験施工を実施した結果について報告する。

2. 既設線バラスト軌道の調査

2.1 経年したバラストの粒度分布⁴⁾

在来線のトンネル区間に敷設されているバラスト軌道において、現地のバラスト道床を掘削し、内部の状態を調査した。図1に掘削したバラスト道床の状況を示す。同図より、主にまくらぎより深い位置においてバラストが細粒化し、それらが固結している様子が確認された。そこで、現地のトンネル区間の3地点において、まくらぎ底部のバラストを採取し、粒度試験を実施することとした。図2にバラストの粒径加積曲線を示す。各地点におけるバラストの粒度分布を比較すると、地点1のバラストは、粒径0.2～40mmの含有率が他よりも高く、採取したバラストの中では最大乾燥密度が最も大きくなる



図1 バラスト道床の状況

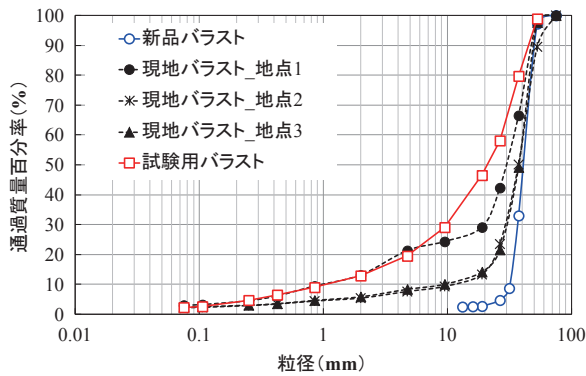


図2 バラストの粒径加積曲線

と推定される。このように、経年したバラスト道床はバラストの破碎や周辺からの土砂等の流入により、新品バラストよりも細粒分を多く含む傾向にあり、てん充用のグラウト材が道床内へ浸透しにくい状態であると考えられる。本研究では、「試験用バラスト」として地点1のバラストに近い粒度分布を再現し、各種試験に用いることとした。試験用バラストは、クラッシュラン (C-30) とバラストを同比率で配合して作製した。なお、試験用バラストの締め固め試験を実施した結果、最大乾燥密度 :1.994g/cm³、最適含水比 :6.5% であった。

2.2 路盤剛性の評価

バラストを採取した3地点において、小型FWD試験により路盤剛性を評価した⁵⁾。本試験は、所定の質量を有する重錘を自由落下させた際の最大荷重と最大変位から地盤反力係数を算定するものである。なお、本試験はまくらぎ間のバラスト道床を路盤面まで掘削した状態で実施した。表1に小型FWD試験の結果を示す。小型FWD試験で測定した地盤反力係数 $K_{P,FWD}$ を式(1)により K_{30} 値に換算した。

表1 小型FWD試験の結果

調査箇所		地点1	地点2	地点3
$K_{P,FWD}$ (MN/m ³)		841	373	932
K_{30} (MN/m ³)	砂系 ($\gamma=1.5$)	561	249	621
	礫系 ($\gamma=2.0$)	421	187	466

$$K_{30} = K_{P,FWD} / \gamma \quad (1)$$

砂系： $\gamma=1.5$ ，礫系： $\gamma=2.0$

表1より路盤材を礫系とした場合、地点2における値が最も小さく $K_{30}=187\text{MN/m}^3$ であったが、省力化軌道における路床の適みなし仕様は $K_{30} \geq 110\text{MN/m}^3$ であり⁶⁾、また現地の軌道はインバートまたは地山の強固な地盤により支持されているため、省力化軌道は十分に適用可能であると考えられる。

3. 各種グラウト材の性能評価

3.1 経年バラストに対する充てん性能の比較⁴⁾

経年したバラストに対する各種グラウト材の充てん性能を評価するため、グラウト材の注入特性試験を実施した。図3に注入特性試験用バラスト供試体の概要を示す。供試体は幅500mm×奥行き500mm×高さ300mmの型枠に試験用バラストを所定の密度で締め固めることにより作製した。また、グラウト材として、無収縮セメント、CAモルタルおよび超微粒子セメントを選定した。超微粒子セメントは平均粒径4 μm (ポルトランドセメントは平均粒径10~20 μm 程度)の超微粒子注入材であり、主に軟弱地盤の改良工事や亀裂性岩盤の止水工事等に用いられ、長期的な強度発現性を有する材料である。一方、これまでに軌道工事への適用事例はないため、本検討では新たに軌道注入用の配合を検討した。具体的には、地盤改良用の配合と比較して水セメント比を小さくし、且つ硬化材と遅延材を添加することにより、可使用時間を15分程度確保しつつ、材齢1~2時間で圧縮強度0.1N/mm²以上となる配合とした。

表2に試験条件と試験結果を併せて示す。バラストの締め固め密度については、最大乾燥密度 (1.994g/cm³) の80%および95%の2ケースとした。なお、バラスト締め固め密度80%は固結したバラストを乱した状態、95%はバラストが固結した状態を想定している。J14およびJ10漏斗によるフロータイムについては、超微粒子セメ

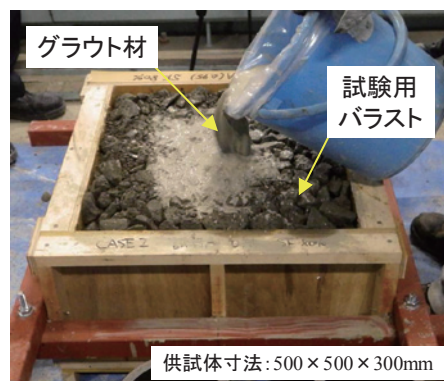
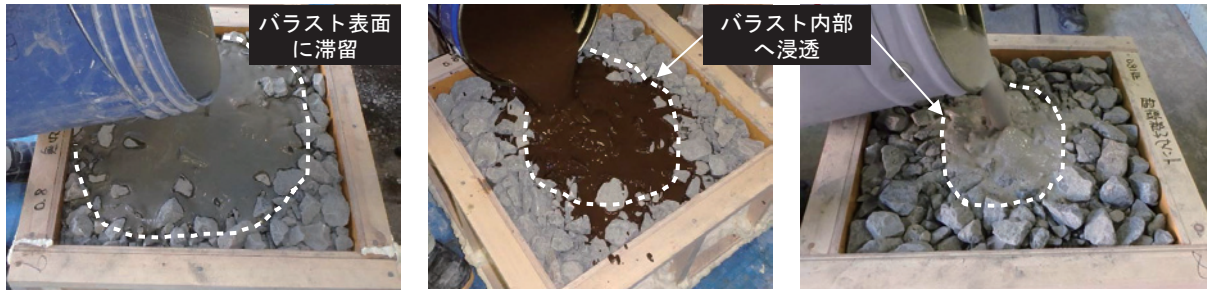


図3 注入特性試験用バラスト供試体

表2 グラウト材の注入特性試験の結果

試験ケース	バラスト 締固め密度 (%)	グラウト材種別	フロータイム (秒)		空隙率 (%)	グラウト材 注入量 (L)	グラウト材 充てん率 (%)
			J14 漏斗	J10 漏斗			
CASE1	80	無収縮セメント	3.3	10.2	41	19.8	65
CASE2	80	CA モルタル	2.9	7.5	41	25.0	82
CASE3	80	超微粒子セメント	2.1	4.1	41	22.0	71
CASE4	95	CA モルタル	-	-	30	16.4	72
CASE5	95	超微粒子セメント	-	-	30	13.9	61



(a) CASE1_無収縮モルタル (b) CASE2_CAモルタル (c) CASE3_超微粒子セメント

図4 各種グラウト材の注入状況

表3 圧縮強度試験の結果

試験ケース	供試体寸法	バラスト 締固め密度 (%)	グラウト材種別	材齢 (日)	圧縮強度 [※] (N/mm ²)
CASE1	φ150 × 300mm	80	CA モルタル	3	0.97
CASE2	φ150 × 300mm	80	超微粒子セメント	3	4.4
CASE3	φ150 × 300mm	90	CA モルタル	3	1.5
CASE4	φ150 × 300mm	90	超微粒子セメント	3	5.7
CASE5	φ50 × 100mm	ホモゲル	CA モルタル	28	6.8
CASE6	φ50 × 100mm	ホモゲル	超微粒子セメント	28	25.2

※供試体本数 N=3 の平均値

ントが最も短く、良好な流動性を示すことを確認した。なお本試験では、供試体の空隙量（計算値）に対するグラウト材注入量（実測値）の割合を算出し、「グラウト材充てん率」と定義して比較した。CASE1～CASE3を比較すると、CAモルタルの充てん率が最も高く、次いで超微粒子セメント、無収縮モルタルの順に充てん率が低下することが分かった。なお、CASE1の無収縮セメントの場合は、注入したグラウト材が供試体表面に滞留し、型枠面に沿って流下する様子が確認され、その他の試験ケースと比較して注入状況に明確な違いが見られた（図4参照）。また、CASE4とCASE5においては、バラスト締固め密度80%の場合と比較して、CAモルタルおよび超微粒子セメントともに充てん率が10%程度低下する結果となった。

3.2 バラスト硬化体の圧縮強度の比較

グラウト材の注入特性試験において、経年バラストに対する良好な充てん性能を示したCAモルタルと超微粒子セメントについて、円柱供試体の圧縮強度試験を行っ

た。表3に試験条件と試験結果を併せて示す。同表より、いずれの条件においても超微粒子セメントを用いた円柱供試体の圧縮強度の方がCAモルタルよりも4倍程度大きくなるという結果であった。なお、CASE2およびCASE4より、超微粒子セメントを用いたバラスト硬化体の圧縮強度は4.0～6.0N/mm²であった（材齢3日は後述する実物大軌道模型供試体による繰返し載荷試験の試験時材齢）。

4. 実物大軌道模型供試体の繰返し載荷試験⁴⁾

4.1 実物大軌道模型供試体の構築方法

図5に実物大軌道模型供試体の概要を示す。本供試体はコンクリート製の試験ピット内に厚さ100mmの路盤(C-30)を敷設した後、幅3000×奥行き1000×高さ400mm（道床厚：200mm）のバラスト軌道(PCまくらぎ1本分)を構築して作製した。バラスト道床には試験用バラストを使用し、所定の密度で締固めた。また、注入したグラウト材の漏れ防止として、まくらぎ端部か

特集：軌道技術

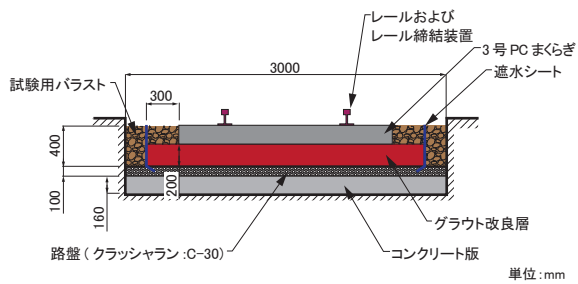


図5 実物大軌道模型供試体

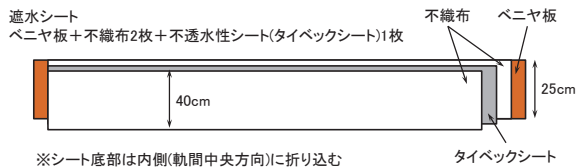


図6 遮水シートの構成

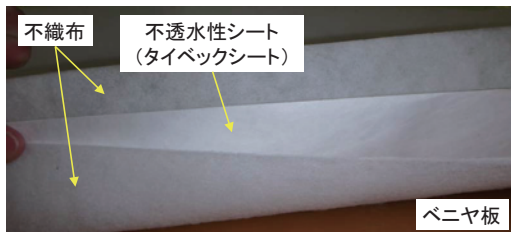


図7 グラウト材の注入状況

ら 300mm の位置に遮水シートを設けた。遮水シートはベニヤ板 :1 枚，不織布 :2 枚および不透水性シート（タイベックシート）：1 枚で構成される（図 6 参照）。なお，グラウト材が路盤材に浸透しないことを確認した場合はバラスト道床—路盤間の遮水シートは不要であり，本供

試体においても省略した。図 7 に示すように，グラウト材はレール下のバラストを掘削した注入口から自然流下により注入した。また，グラウト材はまくらぎ底面の位置まで注入（目標改良厚さ：200mm）することとし，注入完了後，まくらぎ間のバラストを埋め戻した。このように，本工法では注入したグラウト材によりまくらぎが強固に固定されないため，改良後のまくらぎ交換や通り変位の整正が容易であり，再注入により高低変位の調整も可能である。

4.2 試験条件

表 4 に繰返し載荷試験ケースを示す。本試験では，グラウト材として前章で試験用バラストに対して良好な充てん性を示した CA モルタルおよび超微粒子セメントを適用した。なお，本試験では各試験ケースにおいて PC まくらぎ 1 本分の供試体に対して載荷試験を行った（載荷荷重 :80kN, 載荷周波数 :10Hz）。載荷回数については，グラウト改良層を設けた CASE1～CASE3 は，施工後の材齢 2 時間において 1500 回，材齢 3 日において 30 万回とした。若材齢における載荷について，材齢 2 時間は実施工において施工完了後に初列車が通過するまでの養生時間とし，載荷回数（1500 回）は軸重を 16 トンと想定し，列車通過トン数（約 700 万トン/年）から 1 日に軌道上を車軸が通過する回数として設定した。CASE4 については，より実際の列車運行に近い状況を想定し，材齢 2 時間以降において 1500 回を 9 時間に分けて載荷することとし，材齢 3 日目からは 100 万回の載荷を行った。CASE5 の未対策の場合については，載荷回数を 30 万回とした。図 8 に載荷試験の状況を示す。測定項目として，PC まくらぎの鉛直変位（図 8 中の変位計 No.1～No.3）を測定した。

4.3 試験結果

4.3.1 まくらぎ最大変位の比較

図 9 に材齢 2 時間における 1500 回載荷の試験結果を示す。図中のまくらぎ端部の最大変位は変位計 No.1 と No.3 の平均値である。なお，同図には CASE5 の未対策の場合における 1500 回載荷までの結果も併せて示した。

表 4 繰返し載荷試験ケース

試験ケース	バラスト 締固め密度 (%)	グラウト改良層 の厚さ (mm)	グラウト材	載荷荷重 (kN)	載荷周波数 (Hz)	載荷回数 (回)	
						材齢 2 時間	材齢 3 日
CASE1	80	200	CA モルタル	80	10	1500	30 万
CASE2	80	200	超微粒子セメント	80	10	1500	30 万
CASE3	95	200	超微粒子セメント	80	10	1500	30 万
CASE4	95	200	超微粒子セメント	80	10	1500*	100 万
CASE5	95	0 (未対策)	なし	80	10	30 万	

*材齢 2 時間以降：100 回×3 時間（1 時間毎）+ 200 回×6 時間（1 時間毎）合計 1500 回（9 時間）

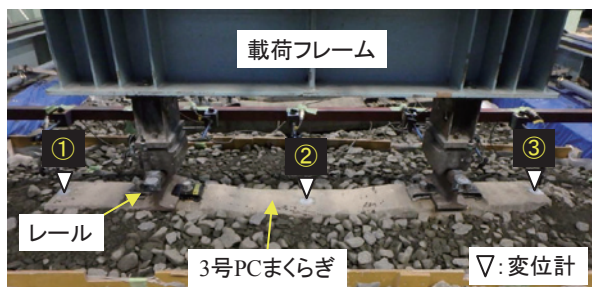


図8 繰返し荷重試験の状況

バラスト締固め密度を80%としたCASE1とCASE2を比較すると、1500回荷重時の最大変位はCASE1の方がやや大きくなる結果となった。これは、注入したグラウト材の早期強度の違いによるものと考えられる。前章より、グラウト材の充てん率としてはCAモルタルの方が良好であるという結果であったが、軌道の初期沈下を抑制するためには、若材齢時の硬化性に優れた超微粒子セメントによる改良が有効であると考えられる。次に、CASE2とCASE3を比較すると超微粒子セメント同士においてバラスト締固め密度の違いによる初期沈下量には有意な差は認められなかった。一方、1500回を9時間に分割して荷重したCASE4においては、初めの100回で0.4mm程度の変位が生じたが、以降の荷重においては変位がほぼ進展しなかった。また、1500回荷重時の最大変位を比較するとCASE3:1.18mm, CASE4:0.42mmとなり、CASE4では沈下量が65%程度小さかった。よって、実際の列車運行を想定した場合、施工直後における軌道の初期沈下は微量であると考えられる。なお、1500回荷重後の除荷時の残留変位はCASE1:0.91mm, CASE2:0.73mm, CASE3:0.66mm, CASE4:0.22mmであった。

図10に材齢3日における荷重試験結果を示す。ここで、CASE1～CASE4については、材齢2時間以降における1500回荷重後の残留変位を初期値とした。CASE1とCASE2において荷重開始～1万回荷重までのまくらぎの沈下量を比較すると、CASE1:0.85mm, CASE2:0.44mmとなり、超微粒子セメントによる沈下抑制効果が優れていることを確認した。また、1万回荷重以降の最大変位に着目すると、グラウト改良層を有するCASE1～CASE4については、未対策の場合のCASE5と比較して変位の進展が緩やかになっていることが確認できる。1万回～30万回荷重までのまくらぎの沈下量はCASE1～CASE4で約0.5mm以下、CASE5で約2.0mmであった。また、30万回荷重時の最大変位を比較すると、CASE4:0.35mm, CASE5:4.6mmとなり、まくらぎの沈下量を未対策の場合の1/10以下に低減できることを確認した。なお、CASE4における100万回荷重時の最大変位は0.51mmであった。除荷後の最終的な残留変位についてはCASE1:1.80mm, CASE2:1.08mm,

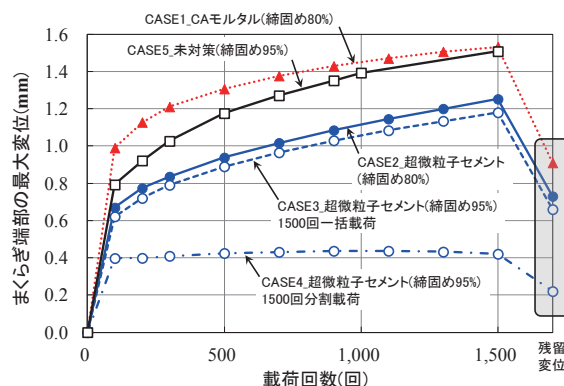


図9 まくらぎの最大変位－荷重回数（材齢2時間）

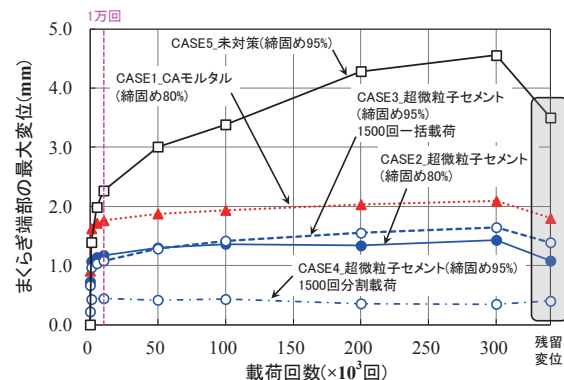


図10 まくらぎの最大変位－荷重回数（材齢3日）

CASE3:1.39mm, CASE4:0.40mm, CASE5:3.5mmであった。

4.3.2 グラウト材の充てん状況

繰返し荷重試験終了後にグラウト改良層を掘削し、まくらぎ下部におけるグラウト材の充てん状況を確認した。図11に例としてCASE4におけるグラウト材の充てん状況を示す。同図より、まくらぎ底部から100～150mm程度の深さの範囲にグラウト改良層が形成されていることが確認できる。グラウト材充てん率は平均で65～75%程度であり、バラスト道床内において細粒分が集まっている箇所においては、一部でグラウト材が十分には充てんされていない状況が確認された。しかし、繰返し荷重試験の結果を考慮すると、本工法によりまくらぎ下部のバラスト道床に100～150mm程度のグラウト改良層を形成できれば、省力化軌道として十分に性能を満足すると思われる。

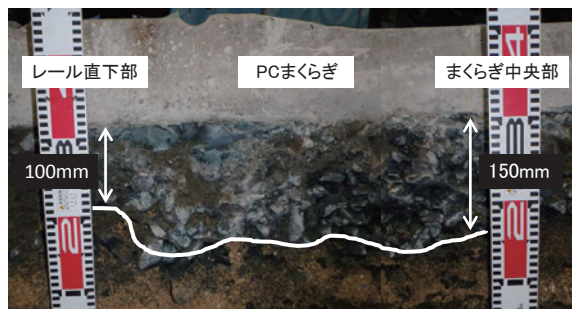


図11 グラウト材の充てん状況（CASE4）

特集：軌道技術

5. 営業線における試験施工⁷⁾

2章に示した現地調査したトンネル区間において、比較的レール高低変位の大きな箇所を選定し、本工法の試験施工(施工延長:7m)を実施した。図12に施工フロー、図13に施工状況を示す。なお、本施工では施工区間の前後5mのむら直し作業も実施した。本施工手順により、問題なく改良工事を実施でき、改良後の軌道変位も進展していないことを確認している(図14参照)。また、本工法により同トンネル区間における道床交換工事と同等

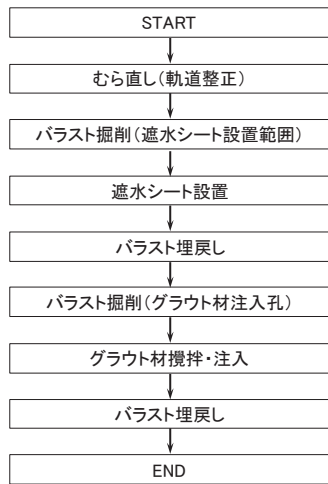


図12 施工フロー



図13 試験施工の状況

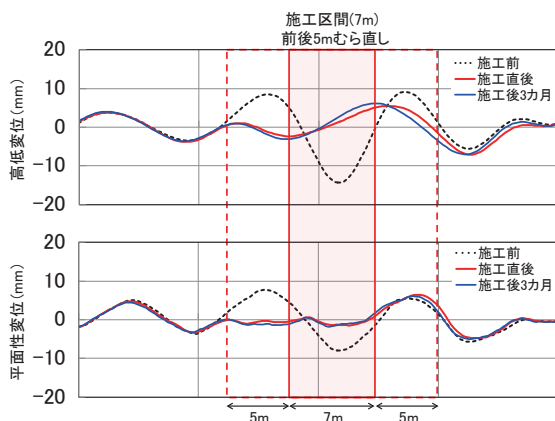


図14 施工前後における軌道検測データ

の施工費用で改良工事を実施できることを確認した。

6. まとめ

本研究において得られた知見を以下に示す。

- (1) 各種グラウト材の注入特性試験の結果、経年して細粒分を含むバラストに対し、CAモルタルと超微粒子セメントが良好な充てん性を示した。
- (2) 既存のまくらぎとバラストを活用して省力化軌道とする新たな工法を提案した。本工法では、グラウト改良層の高さを路盤面からまくらぎ底面までとしているため、まくらぎ交換や通り変位の整正が容易であり、再注入により高低変位の調整も可能である。
- (3) 超微粒子セメントによるグラウト改良層を有する実物大軌道模型の繰返し載荷試験の結果、1万回載荷以降のまくらぎ変位の増加量は微小であり、30万回載荷時の最大変位は未対策の場合の1/10以下(0.4mm程度)に低減できることを確認した。
- (4) 営業線のトンネル区間において、本工法の試験施工を実施し、同トンネル区間における道床交換工事と同等の施工費用で省力化軌道に改良できることを確認した。

文献

- 1) 安藤勝敏, 三浦重, 須長誠, 関根悦夫, 小関昌信, 高木言芳, 原田豊: 既設線用舗装軌道の開発・実用化, 舗装工学論文集, Vol.1, pp.111-120, 1996.12
- 2) 米田俊一, 中川浩二: 粒子径を変えた各種セメントグラウトの基礎的性質と浸透性比較, 土木学会論文集, No.462, VI-18, pp.101-110, 1993.3
- 3) 米田俊一, 岡林茂生, 田村昌二, 森麟: 微粒子セメントを用いたグラウトの細砂地盤への間隙浸透形態に関する微視的研究, 土木学会論文集, No.493, III-27, pp.109-118, 1994.6
- 4) 涸上翔太, 高橋貴蔵, 中村貴久, 桃谷尚嗣: 超微粒子セメントを用いた既設線バラスト軌道の改良工法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, 2016.7
- 5) 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, 2002.12
- 6) 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, 2015.5
- 7) 涸上翔太, 高橋貴蔵, 中村貴久, 桃谷尚嗣: 超微粒子セメントミルクを適用したてん充道床軌道に関する研究, 土木学会第71回年次学術講演会, 2016.9