

劣化したバラストに対する 低強度安定処理工法による沈下抑制効果

景山 隆弘* 中村 貴久* 北条 優* 田島 史花*

Development of Low Strength Stabilization Method for Fouled Ballasted Tracks

Takahiro KAGEYAMA Takahisa NAKAMURA Masaru HOJO Fumika TAJIMA

As ballast on railway track is more crushed and grained, settlement of the track tends to occur even if after tamping, so that maintenance frequency increases. Although the basic measure to reduce the maintenance frequency is replacing the ballast with new ballast, the cost is high. Then, a low-cost method for reducing the settlement without replacing the ballast has been required. Therefore, the authors developed a low-strength stabilization method for reducing settlement without replacing the ballast. In this study, we confirmed the effectiveness of the developed method for reducing settlement through laboratory tests. In addition, we conducted field tests on a commercial line verify the effectiveness for reducing settlement.

キーワード：低強度安定処理，繰返し三軸圧縮試験，実物大試験，試験施工，劣化バラスト

1. はじめに

バラスト軌道では，列車の繰返し荷重でバラストの沈下が発生する。そのため，定期的な軌道の検測結果に基づき，軌道の沈下が大きい箇所では，タイタンパによるつき固め作業が必要となる。バラストの破碎・細粒化が進行していない健全な状態であれば，つき固め作業後のバラストの沈下は小さいことから，保守頻度は低い。しかし，列車荷重やつき固め作業の繰返しにより，バラストの破碎・細粒化が進行（以下，劣化バラスト）^{1) 2)} すると，つき固め作業を行ってもすぐにバラストの沈下が生じやすくなることで，保守頻度が増大する。そのため，基本的には，保守頻度の低減のために，道床交換が行われる。しかし，道床交換の施工コストが高いことから，劣化バラストの沈下を抑制する低コストな沈下対策工法が求められていた。これまでに劣化バラストの強度を向上させ，バラスト軌道の沈下を抑制する工法として，劣化バラストにグラウト材料を充填し，固化後に破碎して造粒することで，排水性および強度を増加させる造粒化工法³⁾，および劣化バラストを生分解性PVAポリマー水溶液と反応促進材で安定処理するポリマー安定処理工法⁴⁾が開発されている。

造粒化工法では，まくらぎの撤去作業，グラウトの攪拌作業およびグラウトの充填層の破碎作業が必要となり，施工性に課題があった。また，ポリマー安定処理工法では，PVAポリマー水溶液が大量の水を含んでおり，施工直後に劣化バラストの強度が低下して初期沈下が生

じやすいといった課題があった。

そこで，施工が簡易で，劣化バラストの初期沈下を抑制し，固化後も通常のつき固め作業が可能な方法として，超速硬セメントおよび高分子材料の混合材（以下，補修材）を用いる低強度安定処理工法^{5) 6) 7)}を開発した。

本稿では，繰返し三軸圧縮試験および実物大軌道模型を用いた繰返し載荷試験による沈下抑制効果を確認した結果，および営業線で試験施工を実施し，沈下抑制効果を検証した結果について報告する。

2. 低強度安定処理工法の概要と施工手順

低強度安定処理工法は，タイタンパによるつき固め作業時に補修材を投入し，劣化バラストを安定処理することで，軌道の沈下を抑制するものである。補修材の投入箇所はまくらぎ1本当たり8箇所（図1）である。本工法の特徴は，次の通りである。

- ・ハンドタイタンパ（以下，HTT），マルチプルタイタンパ（以下，MTT）およびバックホウタイタンパ（以下，BHHT）を用いて施工可能
- ・施工直後からバラストの沈下を抑制でき，昼間の作業

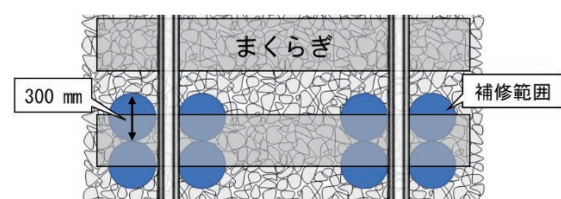


図1 上から見た低強度安定処理工法の補修範囲

* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室

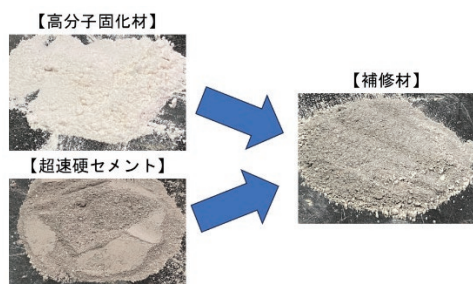


図2 低強度安定処理工法の補修材



(a) 掘削作業 (b) 補修材投入 (c) つき固め作業

図3 低強度安定処理工法の施工方法⁷⁾

間合いでも施工可能

・施工後もタイタンパによるつき固め作業が可能

補修材は、超速硬セメントと高分子固化材の2種類の材料(図2)を1:1(重量比)の割合で混合したものである。超速硬セメントは、普通ポルトランドセメントにカルシウムサルフォアルミネート化合物を添加したものである。劣化したバラストに含まれる水と反応し、養生2時間程度で普通ポルトランドセメントの養生28日に相当する20N/mm²程度の圧縮強度⁸⁾が発現する。

また、高分子固化材は、ポリアクリルアミド系の粉体を主体としたものである。劣化バラストと混合することにより、即時に劣化したバラストに含まれる水を吸水して見かけの含水比を低下させるとともに、架橋作用によりバラストの細粒分を安定化させる効果⁹⁾がある。

これらの材料を仮に単体で使用した場合、超速硬セメントは混合直後の強度発現の不足、また高分子固化材は雨水が流入した時の強度低下が懸念される。そのため、超速硬セメントと高分子固化材を混合する本補修材では、それぞれの欠点を補うことが可能となる。

なお、低強度安定処理工法では、新品のバラストへの交換や発生バラストの廃棄を行わないため、道床交換の1割程度のコストで施工できる。

低強度安定処理工法の施工手順を次に示す。

- 1) つき固め位置においてまくらぎ底面位置の深さまで掘削する(図3(a))
- 2) つき固め位置(まくらぎ1本あたり8箇所)1箇所当たりに補修材を500g投入する(標準添加量)(図3(b))

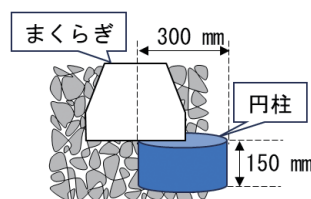


図4 補修材の添加箇所

- 3) バラストを埋め戻してつき固め作業を実施し、劣化バラストを安定処理する(図3(c))

なお、MTTを用いて施工した場合においても、上記の手順の通り、掘削した箇所に補修材を投入する。しかし、後述する5.2節のMTTを用いた試験施工にて、道床表面に補修材を散布した場合においても、沈下抑制効果が見られた。そのため、施工性を考慮して、MTT施工時のみ道床表面に補修材を散布することも可能である。

また、タイタンパでつき固め作業が可能な範囲を直径300mm×高さ150mmの円柱形(図4)と仮定し、式(1)を用いて補修材添加量 A_s (g)を決定した。

$$A_s = \frac{V \rho_d R_s}{100} \quad (1)$$

ここで、 V :円柱の体積(cm³)、 ρ_d :劣化バラストの乾燥密度2.05(g/cm³)、 R_s :補修材の添加割合2%とした。補修材の添加割合は、後述する4章および5章の結果を踏まえて決定した。

なお、補修材投入後に保守作業を行うことが可能か検討するために、標準添加量の4倍の補修材(添加量8%)で安定処理した円形土槽(直径300mm)内の劣化バラストに対して、タイタンパでのつき固め作業を行った。強度が十分に発現したと考えられる気中養生3ヵ月目につき固め作業を行った結果、バラスト内に問題なくタンピングツールを挿入できることを確認した。

3. 繰返し三軸圧縮試験による検討

劣化バラストに対する補修材の添加量を検討するため繰返し三軸圧縮試験を実施した。試験用の劣化バラスト(以下、試料)は、劣化指数 FI (Fouling Index、通過質量百分率0.075mmと4.75mmの合計⁸⁾)を変えた2種類($FI=36\%$ および $FI=52\%$)とした(図5)。また、E法で実施した締固め試験結果として、最大乾燥密度 ρ_{dmax} および最適含水比 w_{opt} を図5に示す。なお、 FI が20%以上になると、バラストの沈下が増大しやすい「劣化」の判定¹⁰⁾となる。現地より採取したバラストと粒度分布が近くなるように、新品バラストにクラッシュランおよびカオリン粘土を混合して試料を作製した。三軸圧縮試験では、JGS 0524(圧密・排水)に準拠して供

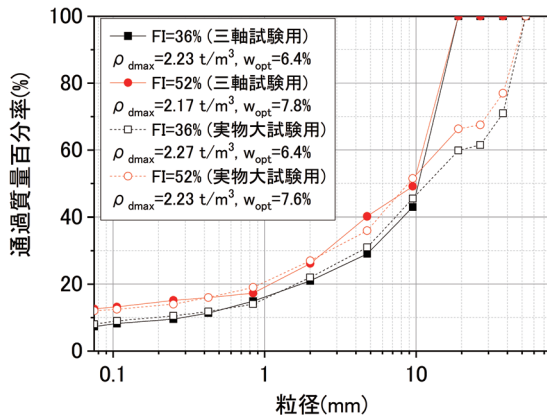
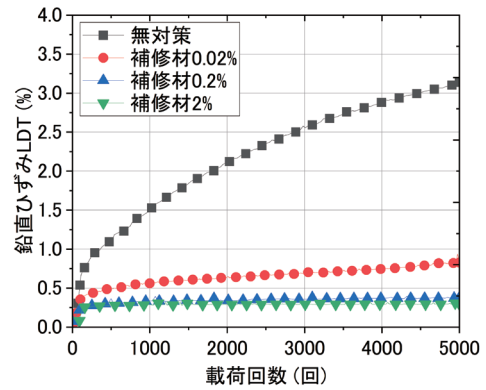


図5 試料の粒度分布

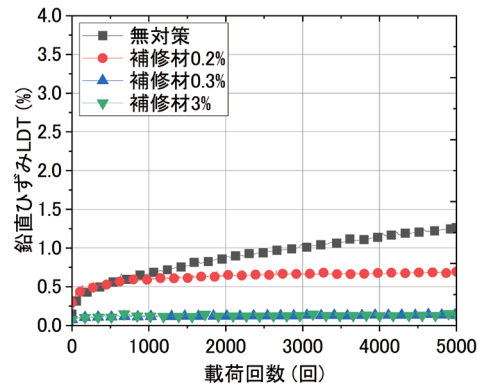
試体寸法を直径 100mm、高さ 200mm の円柱形とし、供試体寸法と最大粒子径を考慮して試料のせん頭粒度を調整した。含水比 8% ($FI=36\%$ 、飽和度 $S_r=68\%$) もしくは 10% ($FI=52\%$ 、飽和度 $S_r=77\%$) に含水調整した試料と図 6 に示す添加量の補修材を混合し、5 層に分けて円柱モールドに入れ、締め固め度 $D_c=92\%$ ⁽¹¹⁾ を目標に締め固めることで供試体を作製した。含水比は最適含水比より 2% 程度湿潤側とし、沈下量が大きくなる条件とした。補修材の添加量は、乾燥試料に対する質量%で示す(図 6)。

試験の手順としては、最初に負圧 20kPa で等方圧密させた後、ハーバーサイン波で繰返し載荷を行った。載荷条件は、載荷回数 5000 回、載荷周波数 0.5Hz、拘束圧 20kPa とした。鉛直応力振幅は、列車荷重 160kN に対してレールによる荷重分担率を 0.4⁽¹²⁾ とし、次章の実物大試験に使用するまくらぎの底面積で除した値とした。ここで、列車荷重 160kN に関して、実列車の軸重は在来線で 9t 程度⁽¹³⁾、新幹線で 11t 程度⁽¹⁴⁾ であり、新幹線では速度衝撃率⁽¹²⁾ を、在来線ではレール継目部の衝撃率⁽¹²⁾ を考慮して設定した。次章において、 $FI=36\%$ のケースは在来線に敷設されている PC3 号まくらぎを、 $FI=52\%$ のケースは新幹線に敷設されている PC3H まくらぎ(PC3 号まくらぎの 1.5 倍の底面積)を使用し試験を行った。そのため、鉛直応力振幅は、 $FI=36\%$ が 133kPa、 $FI=52\%$ が 88.6kPa とした。本工法の養生時間は、夜間の作業間合で初列車までの時間を考慮して 2 時間とした。

$FI=36\%$ と $FI=52\%$ の沈下量と載荷回数の関係をそれぞれ図 6 (a) および図 6 (b) に示す。図 6 より、無対策のケースと比較して、 $FI=36\%$ のケースの沈下量は補修材を 0.2% 以上添加することで約 1/8、 $FI=52\%$ のケースの沈下量は補修材を 0.3% 以上添加することで約 1/7 に低減した。



(a) $FI=36\%$ のケース



(b) $FI=52\%$ のケース

図6 鉛直ひずみの推移

4. 実物大試験による沈下抑制効果の検討

実施工における補修材の適切な添加量を検討するため実物大軌道模型に対する繰返し載荷試験を実施した。実物大軌道模型はまくらぎ 1 本のバラスト軌道とした。試験ケースは、 $FI=36\%$ で PC3 号まくらぎ(在来線用)を用いた模型(ケース 1)と $FI=52\%$ で PC3H まくらぎ(新幹線用)を用いた模型(ケース 2)の 2 ケースとした。バラストの粒度分布は、図 5 に示した通りである。載荷条件は、載荷回数 30 万回、載荷周波数 5Hz、載荷荷重は最小荷重 5kN および最大荷重 85kN とした。ケース 1 およびケース 2 の試験条件をそれぞれ図 7 に示す。低強度安定処理工法の施工手順について、はじめにまくらぎ 1 本あたり 8 箇所ツール形状が円筒型のタイタンパでまくらぎ下までバラストを掘削し、そこに補修材を投入した。その後バラストを埋め戻して、ツールの形状がへら型のタイタンパで通常のつき固め作業を実施した。また、PC3 号まくらぎ(在来線用) 1 本を用いて、新品バラストに対する繰返し載荷試験を別途実施した。

図 8 (a) にケース 1 のまくらぎ沈下量を示す。無対策のケースでは、載荷開始から沈下が急進し、その後も沈下がなだらかに増加して、30 万回の繰返し載荷で 32mm 程度の沈下が生じた。それに対し、繰返し三軸圧

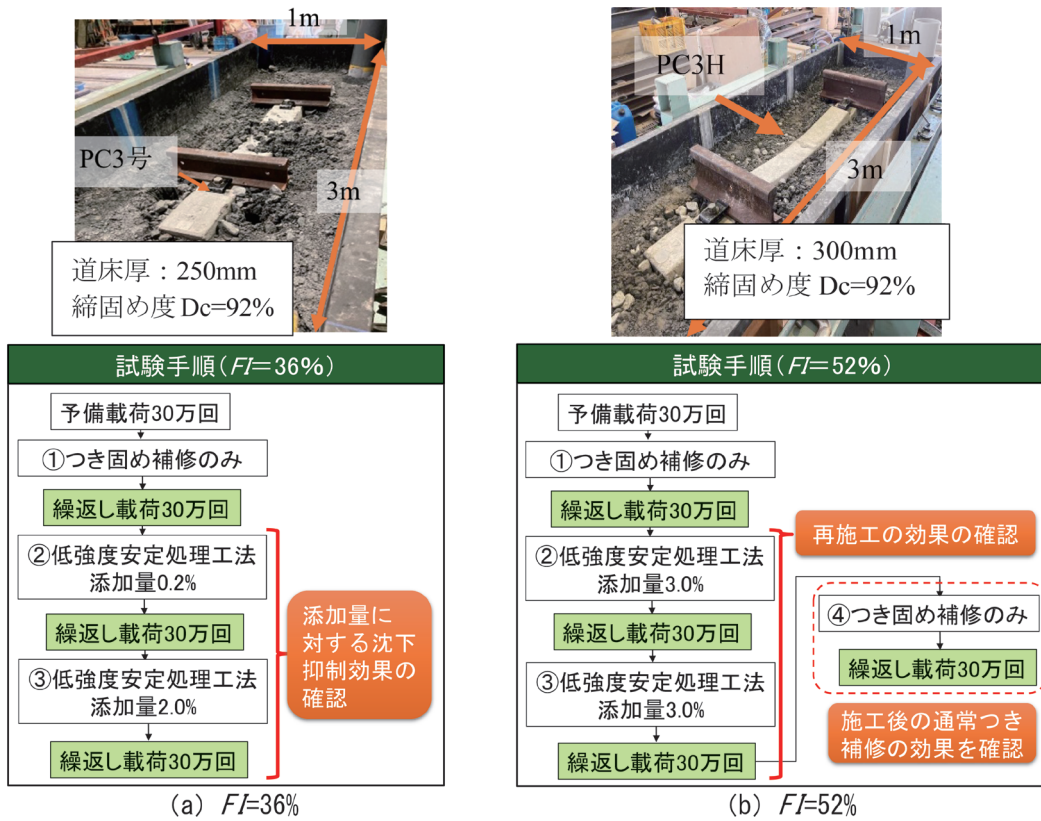
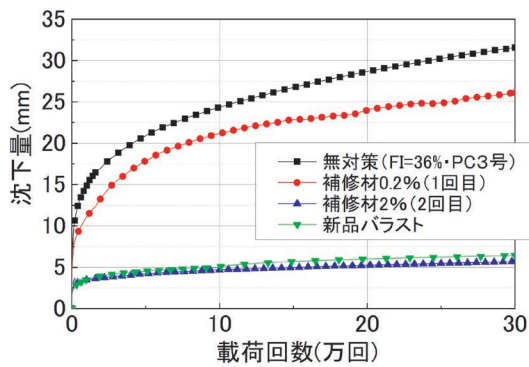
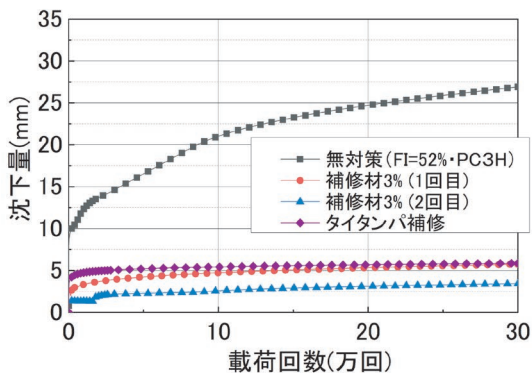


図7 実物大試験の試験条件



(a) $FI=36\%$ のケース



(b) $FI=52\%$ のケース

図8 実物大試験の沈下量

縮試験では沈下抑制効果が得られた補修材 0.2% の添加では、30 万回後の沈下量が 26mm 程度であり、無対策のケースと比較して約 20% の低減であった。繰返し三軸圧縮試験と比較して沈下抑制効果が低下した理由は、実施工において、タイタンパを用いてバラストに補修材を混合する際に、補修材を均一にバラストと攪拌できないためと考えられる。そこで、現場での強度のばらつきを考慮し、補修材 0.2% の 10 倍である補修材を 2% 添加した。その結果、30 万回後の沈下量が 5.6mm 程度となり、無対策と比較して約 1/6 になった。また、新品バラストの沈下量と同程度となった。

図 8 (b) にケース 2 のまくらぎ沈下量を示す。無対策のケースでは、ケース 1 と同様に荷重開始から沈下が大きく、30 万回の繰返し荷重で 27mm 程度の沈下が生じた。また、ケース 2 の FI が 52% と高いため、ケース 2 では標準添加量よりも添加量を増やした 3% の補修材を添加した。その結果、30 万回後の沈下量が 6mm 程度となり、無対策のケースと比較して約 1/5 になった。再度、補修材を 3% 添加すると、30 万回後の沈下量が 3.5mm 程度となり、無対策のケースと比較して約 1/8 になった。さらに、タイタンパを用いた通常につき固め作業を行ったところ、30 万回後の沈下量が 6mm 程度となった。そのため、低強度安定処理後も問題なくつき固め作業を実施できると考えられる。

5. 営業線における試験施工

5.1 ハンドタイタンバ (HTT) を用いた試験施工

HTTを用いた試験施工は年間通トン数1700万トンの直線区間において実施した(図9)。当該箇所は、バラストのFIが24%であり、沈下量が大きくなり、保守量が増大していた。本施工では、掘削を手作業で行った(図9(a))。本施工では、噴泥が生じていた継目部の前後のまくらぎ15本分に対して、補修材を2%添加した。

図10に施工前後の高低変位を示す。通常につき固め作業の2ヵ月後の高低変位は最大-11mm程度であった。一方、低強度安定処理工法の施工16ヵ月後の高低変位は-5mm程度であった。低強度安定処理工法の施工範囲内における施工16ヵ月後までの高低変位は施工前に比べて1/2程度に低減し、従来につき固め作業よりも高い沈下抑制効果が得られることを確認した。

継目部直下の高低変位進みは、施工1週間後から16ヵ月後の間で-7mm程度であった。一方、施工16ヵ月後に施工範囲の境界部外側(水平位置7m付近)において最大-6mm程度の高低変位が生じた。これは、施工範囲内の上げ越し量が10mm程度とやや大きく、施工箇所が施工範囲外と比較して相対的に高くなったことが影響したと考えられる。

5.2 マルチプルタイタンバ (MTT) を用いた試験施工

MTTを用いた試験施工は年間通トン数が520万トンの直線区間で実施した。本施工では、噴泥が生じている継目部前後のまくらぎ合計6本分に対して、補修材を2%添加した。当該箇所は、バラストのFIが46.5%であり、保守量が増大していた。

ここで、本施工では掘削作業をせず、道床表面に補修材を散布した。通常 MTT のつき固め作業では、タンピングツールを大きく開いて挿入し、まくらぎの外側から直下に向かってバラストを強制的に押し込むようにつき固める。そのため、まくらぎ周辺に補修材を散布してもまくらぎ直下のバラストに補修材を十分に混合できないことが懸念された。そこで、補修材をまくらぎ下のバラストと混合しやすくするために、MTTのタンピングツールを予めまくらぎに沿う程度に狭めてつき固め位置に挿入し、まず補修材をまくらぎ下まで押し込んだ(図11)。最後にタンピングツールを開いて再び挿入し、通常のMTTの施工と同様につき固めた。

図12に施工前後の高低変位を示す。通常 MTT の補修3ヵ月後の高低変位は、-20mm程度であった。一方、本工法の施工8ヵ月後の高低変位は-3mm程度であり、施工前に比べて1/7程度に低減した。

また、施工4ヵ月後から8ヵ月後の間では、ほとんど沈下が進行せず、良好な軌道状態を維持していることを



(a) 掘削作業



(b) 補修材投入



(c) つき固め作業

図9 試験施工状況 (HTT)⁵⁾

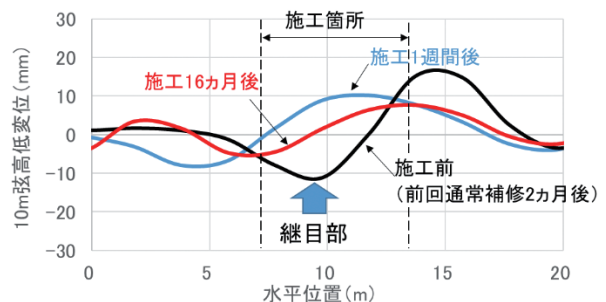


図10 試験施工前後の高低変位 (HTT)

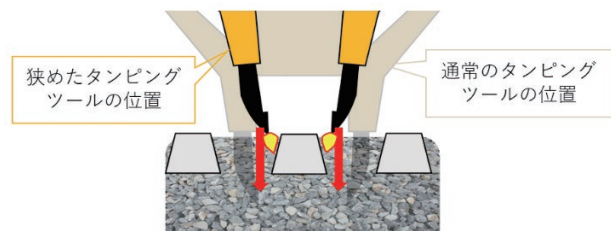


図11 まくらぎとMTTのツール位置

確認した。

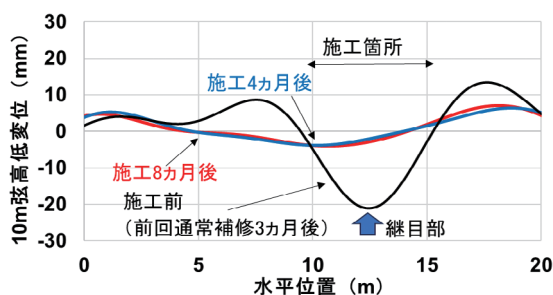


図 12 試験施工前後の高低変位 (MTT)⁵⁾

6. まとめ

劣化バラストに対して、超速硬セメントと高分子材料からなる補修材をつき固め作業時に混合することで沈下を抑制する低強度安定処理工法を開発した。本研究では、繰返し三軸圧縮試験および実物大軌道模型を用いた繰返し載荷試験により沈下抑制効果を確認した。さらに、営業線で試験施工を実施し、沈下抑制効果を検証した。得られた主な知見を以下に示す。

- (1) FI が 20% 以上となる条件で作製したバラストに対して、補修材で安定処理し、繰返し三軸圧縮試験を実施した。無対策のケースと比較して、 $FI=36\%$ のケースの沈下量は補修材を 0.2% 以上添加することで約 1/8 に、 $FI=52\%$ のケースの沈下量は補修材を 0.3% 以上添加することで約 1/7 に低減した。
- (2) FI が 20% 以上となる条件で作製したバラストに対して、補修材で安定処理し、バラストの実物大試験を実施した。 $FI=36\%$ のケースにおいて、繰返し三軸圧縮試験で沈下抑制効果が得られた補修材を 0.2% した添加したケースでは、無対策のケースと比較して約 20% の低減であった。タイタンパでの施工による強度のばらつきにより、沈下抑制効果が低減したものと考えられる。また、無対策のケースと比較して、 $FI=36\%$ のケースの沈下量は補修材を 2.0% 以上添加することで約 1/6 に、 $FI=52\%$ のケースの沈下量は補修材を 3.0% 以上添加することで約 1/8 に低減した。
- (3) FI が 20% 以上の現地の劣化バラスト区間において、ハンドタイタンパを用いて補修材を 2% 添加した試験施工を実施した。その結果、施工範囲内における施工 16ヵ月後までの高低変位は、通常につき固めの 2ヵ月後の高低変位の 1/2 程度に低減し、従来のつき固め作業よりも高い沈下抑制効果が得られることを確認した。
- (4) FI が 20% 以上の現地の劣化バラスト区間において、マルチプルタイタンパを用いて補修材を 2% 添加した試験施工を実施した。その結果、施工 8ヵ

月後までの高低変位は通常につき固めの 3ヵ月後の高低変位の 1/7 程度に低減することを確認した。

謝 辞

本試験施工にご協力いただいた西日本旅客鉄道株式会社および四国旅客鉄道株式会社の関係各位に感謝の意を表す。

文 献

- 1) 中村貴久, 桃谷尚嗣, 木次谷一平: バラストの破砕・細粒化メカニズムの解明と余寿命予測方法の提案, 鉄道総研報告, Vol.35, No.4, pp.35-40, 2021
- 2) Jose, P., André, D., "Railway ballast degradation," In 15 th Swiss Transport Research Conference, pp.1-26, 2015.
- 3) 中村貴久, 桃谷尚嗣, 木次谷一平: 道床交換せずに劣化したバラストの性能を取り戻す, RRR, Vol.76, No.7, pp.16-19, 2019
- 4) 中村貴久, 木次谷一平, 伊地知卓也: 細粒土混入率の高いバラスト軌道に対する生分解性ポリマーを用いた沈下抑制対策, 日本鉄道施設協会誌, Vol.55, No.6, pp.26-29, 2017
- 5) 景山隆弘, 中村貴久: 劣化したバラストの沈下を抑制する低強度安定処理工法, 日本鉄道施設協会誌, Vol.60, No.8, pp.27-30, 2022
- 6) Kageyama T, Nakamura T, Kijiya I, Momoya Y, Akagi H, Saito R., "Development of low-strength stabilization method for fouled ballasted tracks," Transportation Geotechnics, Vol.34, 100765, 2022.
- 7) 景山隆弘, 中村貴久: 大規模降雨で被災した鉄道バラスト軌道の道床交換判定方法, 日本鉄道施設協会誌, Vol.61, No.8, pp.21-24, 2023
- 8) 樺山好幸, 大友弘志, 半田実, 五味秀明: 床版上面増厚工法に関する超速硬 SF コンクリート付着強度発現機構に関する研究, 土木学会論文集, Vol.1996, No.540, pp.241-250, 1996
- 9) Romel, G., Rayya, H., Robert, E., Piratheepan, J., "Effect of the Use of a Polymeric Stabilizing Additive on Unconfined Compressive Strength of Soils," Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol.2473, No.1, pp.200-208, 2015.
- 10) Selig, E.T., "Ballast for heavy duty track. In: Track Technology," Proceedings of a Conference organized by the Institute of Engineers (ICE), Nottingham, pp.245-252, 1985.
- 11) 青柳智之, 石川達也, 松屋真吾, 中村貴久, 木次谷一平: 鉄道バラストの繰返し変形特性に及ぼす細粒分と含水状態の影響評価, 第 53 回地盤工学研究発表会, pp.1185-

- 1186, 2018
- 12) 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－軌道構造, 丸善出版, pp.363-371, 2012
- 13) 株式会社総合車両製作所 総合車両製作所技報：https://www.j-trec.co.jp/company/070/04/jtr04_088-093.pdf（参照日：2024年4月4日）
- 14) 新星出版社編集部：徹底図解 新幹線のしくみ 改訂版, 新星出版社, p.21, 2010