

水ガラス・ポリマーゲル充填による有道床軌道の補修法の開発

中村 貴久* 村本 勝己* 三田地 利之**

Development of a Repairing Method for Ballasted Track by Filling Composite Gel Consisting of Water Glass and Polymer

Takahisa NAKAMURA Katsumi MURAMOTO Toshiyuki MITACHI

Where ballasted tracks include a high mix ratio of fine-particles, track irregularity tends to increase soon after the maintenance performed by tie tampers since the track maintenance impairs the density of the ballasted layer compacted by cyclic loading for trains. Therefore, in this study, we developed a method filling the gap under the sleepers with fill material for the realignment of tracks without impairing the density of the existing ballasted layer. Furthermore, we performed the test to confirm the validity of the foregoing method. Consequently, we could confirm that the foregoing method is effective for repairing the ballasted tracks.

キーワード：バラスト軌道，細粒土混入バラスト，軌道補修法，充填材，試験施工

1. はじめに

バラスト軌道は列車の繰返し荷重を受けて塑性沈下が生じるため、定期的に軌道変位の測定を行い、基準値を超過した場合には、マルタイやタイタンパー等を用いた軌道補修を行う。この軌道補修は、まくらぎ下に道床バラストを押し込むことで軌道整正を行うものである(図1)。道床バラストの細粒土混入率が低い場合は、締め固めによる密度変化が小さいことから、マルタイ等による補修後の初期沈下は小さい。しかし、細粒土混入率が高い場合は、締め固めによる密度変化が大きく初期沈下も大きいことから、補修後、すぐに軌道変位が増大してしまうことが多い。すなわち、細粒土混入率が高い道床バラストを、道床交換を行わずにマルタイ等で補修を行うのは効率的ではない。

そこで、まくらぎ下の道床を緩めずに軌道補修を行う方法として、空圧によりまくらぎ下に充填材を充填する工法を考案した。これは、英国で実用化されている Stone Blowingや日本での豆砕石敷込み工法と同様の原理で軌道補修を行うものであり、締め固められた道床を緩めずに軌道補修を行うことができる。マルタイ等による補修では、一般に補修作業を行うたびに道床バラストの細粒化や細粒土の混入によって、保守周期は短くなる。これに対し、まくらぎ下に充填材を充填する工法では、保守

周期を延伸することができると考えられる。また、道床交換を行わずに効果的な補修ができるため、保守コストの削減にもつながる。

本研究においては、充填材の材料特性について検討を行い、充填材の強度特性を把握するために一面せん断試験を行った。さらに、実施工に適用できる充填装置の開発を行い、試験施工によって補修工法の効果確認を行った。

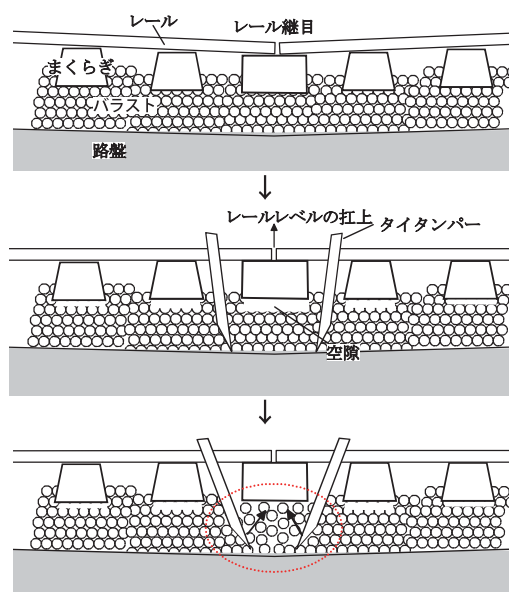


図1 タイタンパーによる軌道整正の概念図

* 軌道技術研究部(軌道・路盤)

** 日本大学(生産工学部 土木工学科)

特集：軌道技術

2. 充填材の開発

2.1 充填材の要求性能

Stone Blowing や豆碎石敷込み工法における軌道補修では、ジャッキアップにより持ち上げられるまくらぎ下の空隙が20mm～30mm程度であることから、9mm程度の小粒径の碎石を用いた補修を行う(図2)。しかし、細粒土混入バラスト区間において、浮まくらぎ状態のまくらぎ下が滞水している場合は、まくらぎのポンプアクションに伴う水流によって、粒径の小さい粒状材料はまくらぎ下より流出してしまうことから、補修効果が低減することがわかっている¹⁾。

そこで、充填材に要求される性能として、以下の条件を満たす必要があると考えられる。

- ① レールを介してまくらぎに作用する荷重を支持する十分なせん断強度を有していること
 - ② 滞水した浮まくらぎのポンプアクションに伴う水流によって流されない粘着力を有していること
 - ③ 簡易な充填装置によって施工可能な粒径であること
- まくらぎ下に適用する充填材の強度には、粒状材料における粒子間の摩擦やかみ合いによる内部摩擦角に起因する成分と、セメンテーションによる粘着力に起因する成分とがある。内部摩擦角に起因する強度成分は拘束圧の影響を受けることから、拘束圧が非常に大きく変化する列車荷重条件下の充填材の耐久性向上のためには、拘束圧に依存しない粘着力に起因する強度成分の向上が必要であることがわかっている。しかし、早強モルタルや合成樹脂のようなセメンテーションによる粘着力に起因した強度を有する材料は、現場において分単位で所定の強度発現をコントロールするのが困難であるため、施工条件が限定されてしまう。したがって、既設線の補修に使用する充填材には、短期的に列車荷重を支持できる程度の内部摩擦角を持ち、なおかつ、滞水時の浮まくらぎに対してもまくらぎ支持強度を発揮する粘着力を合わせ持つ材料が望ましい。

そこで、珪砂および水ガラスを主材とした粒状体と、ポリビニールアルコール水溶液(以下、ポリマー水溶液と称する)とを反応させる複合充填材(以下、水ガラス・

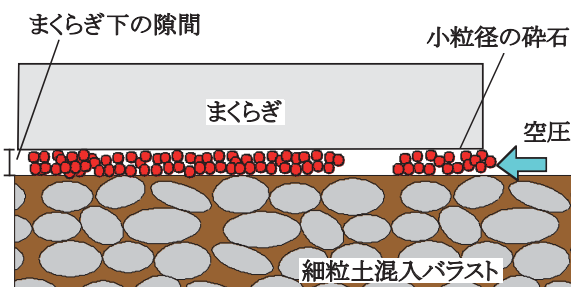


図2 粒状充填材による軌道整正方法

ポリマー複合充填材と称する)について検討することとした。この水ガラス・ポリマー複合充填材は、主材である珪砂による内部摩擦角と、ポリマーと水ガラスとで形成される複合ゲルによる化学的なセメンテーションによる粘着力の双方の材料特性を有するものである。

2.2 水ガラス・ポリマー複合充填材の開発

2.2.1 水ガラス・ポリマー複合充填材の概要

水ガラス・ポリマー複合充填材(図3参照)は、水ガラス(珪酸ソーダ)とポリマー水溶液を混合し、その水溶液に酸を加えてpHを下げると、まず水ガラスがゲル化し、それに刺激されてポリマーのゲル化も促進されることで形成される。水ガラスとポリマーのゲルは互いに独立した物質であるが、構造的に絡み合って繊維状の複合ゲルとなり、じん性ととも引張強度を発揮する。ただし、この複合ゲル自身は、単独では列車荷重を支えるのに十分な圧縮・せん断強度を持たない。列車荷重を支持する圧縮・せん断強度は、骨材として混合している3号珪砂が発揮する。これまでの実物大模型試験や試験施工の結果から、短期的には3号珪砂単独でも十分に列車荷重を支持できることがわかっている¹⁾。したがって、水ガラス・ポリマー複合充填材は、硬化途上であっても列車を通すことが可能であるので、短い列車間合いでも施工が可能となる。

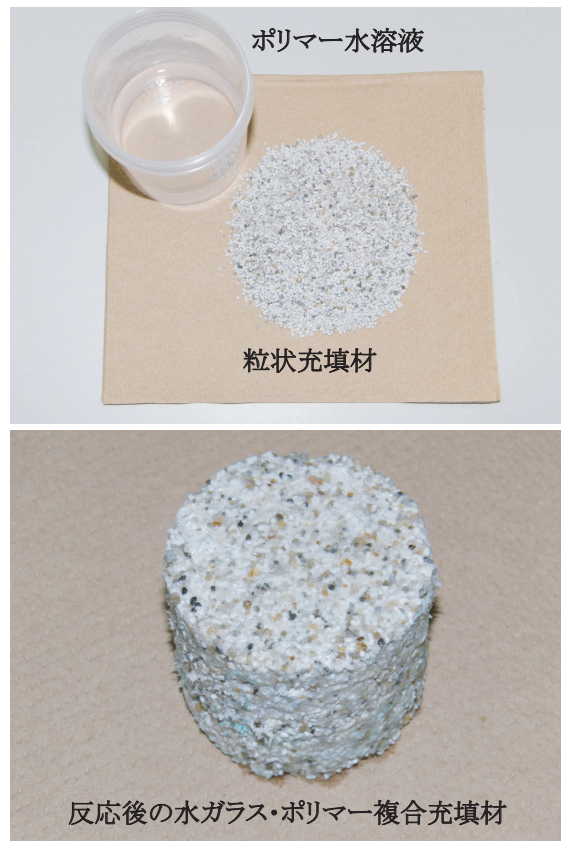


図3 水ガラス・ポリマー複合充填材

水ガラス・ポリマー複合充填材の形態として、ポリマーは充填材だけでなく、細粒土混入バラストの改良材としても機能する²⁾ことから、水溶液として使用することとした。また、水ガラスと酸は水溶液と固体の両形態での使用が可能であるが、できるだけ粒状充填材として使用したいため、固体として珪砂と混合してまくらぎ下に充填して使用することとした。なお、固体の水ガラスは通常は粉末であるが、施工性や安全性を考慮して粘土鉱物を用いて特殊な造粒処理をした粒状水ガラスを新たに開発した。また、珪砂については、これまでの試験施工の結果から自然珪砂は細粒化しやすいことがわかっているため、硬度の高い人工珪砂（珪石を砕石した砕砂）を採用した。表1に水ガラス・ポリマー複合充填材の基本構成を示す。

なお、本工法で使用するポリマー水溶液は生分解性を持つ土壌改良材として認可されている。また、水ガラスは地盤改良材として土木工事に一般的に使用されており、スルファミン酸は食品添加物であることから、水ガラス・ポリマー複合充填材は環境負荷が小さい材料で構成されているといえる。

表1 水ガラス・ポリマー複合充填材の基本構成

材料	諸元	備考
ポリマー水溶液	ポリビニールアルコール (PVA) 12% 水溶液	土壌改良材
粒状水ガラス	3号珪酸ソーダ造粒体	地盤改良材
有機酸粉末	スルファミン酸粉末	食品添加物
珪砂	3号人工珪砂	

2.2.2 一面せん断試験による強度特性の検討

水ガラス・ポリマー複合充填材の列車荷重に対する強度を確認するために、一面せん断試験により強度特性の評価を行なった。図4に一面せん断試験の概要を示す。試験ケースは表2に示す3ケースである。水ガラス・ポリマー複合充填材の強度特性を比較検討するため、CASE1は水浸させた珪砂、CASE2はポリマー水溶液のみを混合した

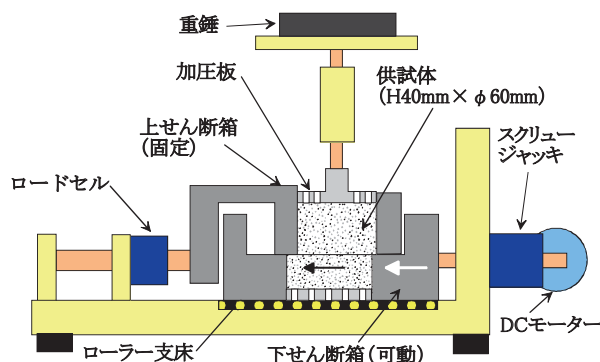


図4 一面せん断試験の概要

表2 試験ケース

CASE1	3号珪砂+水
CASE2	3号珪砂+ポリマー水溶液
CASE3	水ガラス・ポリマー複合充填材

珪砂とした。水ガラス・ポリマー複合充填材の配合としては珪砂が固形分の約7割を占めている。供試体寸法は高さ40mm、直径60mmであり、せん断変位は接触型変位計により、せん断力は上せん断箱に接触するロードセルによって測定を行った。せん断時の垂直応力は、それぞれの試験ケースごとに5kPa（軌道自重相当）および100kPa（列車荷重相当）の2種類とし、圧密時間は1時間とした。なお、せん断変位速度を1mm/minとした。

図5～図7にせん断応力とせん断変位の関係を示す。CASE1ではせん断応力にピークがみられ、垂直応力100kPaにおいて最大せん断応力は約100kPaである。これに対し、CASE2のせん断応力にはピークがみられず、変位の進行とともに徐々に増加するがCASE1に比べて小さい。CASE3においては、垂直応力100kPaの場合、せん断変位2mm付近に変曲点がみられるが、変位の進行と共にその後再びせん断応力が増加している。一方、垂直応力5kPaの場合は、明確な変曲点はみられずにせん断応力が増加している。すなわち、CASE3の変曲点は、拘束圧が高い場合に顕著になることから、骨材である珪砂の噛み合わせが破断することにより生じる降伏現象であると考えられる。したがって、水ガラス・ポリマー複合充填材のせん断強さは、せん断変位が小さい領域では内部摩擦角が支配的であり、せん断変位が増大するとじん性の大きい水ガラス・ポリマー複合ゲルによる粘着力が支配的になると推測される。

図8に各ケースの垂直応力とせん断強さの関係を示す。CASE2およびCASE3のせん断強さおよびCASE1の残留強度は、地盤工学会基準³⁾にしたがって、せん断変位7mmの際のせん断応力とした。50kgNレール、PC3号まくらぎからなるバラスト軌道に軸重160kNの列車荷重が作用する時のまくらぎ下の道床に作用するせん断応力は、荷重分散を考慮すると概ね66kPa（無拘束状態で、せん断方向を45度と仮定した場合）であり、垂直応力100kPaの場合、CASE2以外は概ね列車荷重を支持する強度を有していると考えられる。しかし、垂直応力5kPaの場合では、CASE3は60kPa程度のせん断強さを発揮するのに対し、CASE3以外の試験ケースはせん断強さが15kPa程度とCASE3の1/4程度であった。また、図8の垂直応力とせん断強さの関係より求めた各試験ケースの内部摩擦角を図9に示す。同図より、CASE2、CASE3およびCASE1残留強度の内部摩擦角はほぼ同程度であることから、CASE2およびCASE3の内部摩擦角は水浸珪砂の残留状態の内部摩擦角と同程度であるものと推測され

特集：軌道技術

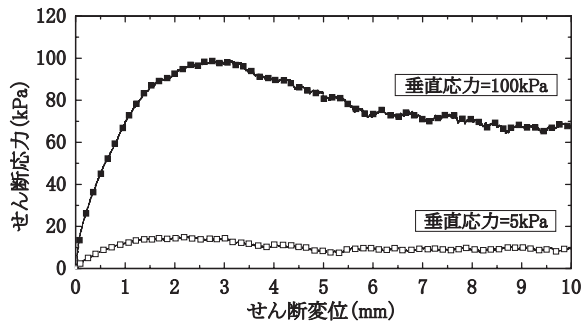


図5 せん断応力とせん断変位の関係 (CASE1)

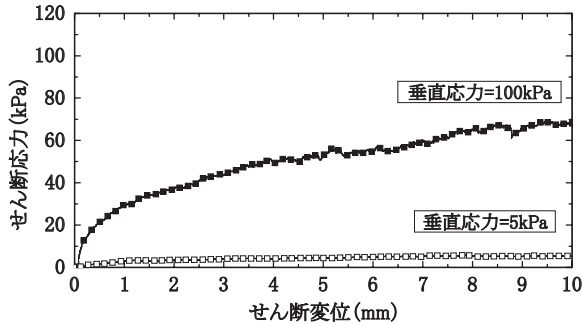


図6 せん断応力とせん断変位の関係 (CASE2)

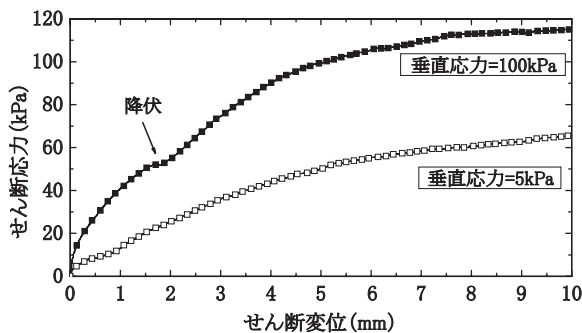


図7 せん断応力とせん断変位の関係 (CASE3)

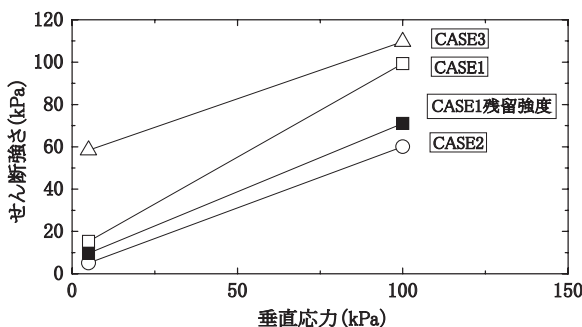


図8 垂直応力とせん断強さの関係

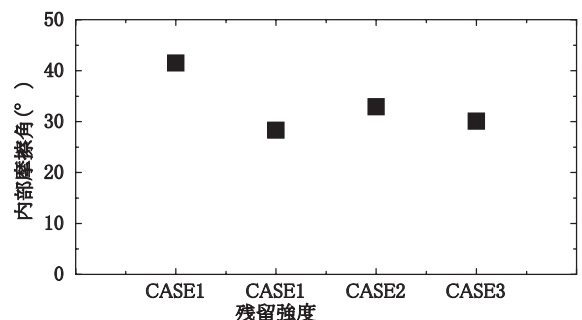


図9 各試験ケースにおける内部摩擦角

る。すなわち、CASE2のせん断強さは水浸珪砂の残留強度と同程度であり、CASE3の水ガラス・ポリマー複合充填材の強度は、水浸珪砂の残留強度に水ガラス・ポリマー複合ゲルの粘着力を付加したものであると考えられる。

以上の結果より、セメンテーションを持たない小粒径の粒状体をまくらぎ下に充填した場合、短期的には列車荷重を支持できるが、滞水した浮まくらぎによってポンプアクションが発生すると、その水流で充填材が流出してしまう可能性がある。一方、水ガラス・ポリマー複合充填材は、列車荷重を支持できる十分な強度を有しており、軌道自重相当の低拘束圧下においても、高いせん断強さおよび粘着力を有していることから耐流動性を持つ材料であると考えられる⁴⁾。

3. 充填装置の開発

珪砂、水ガラス、酸からなる粒状充填材をまくらぎ下に充填する装置として、ロングノズル方式 (図10) およびエアガン方式 (図11) の2種類を開発した。ロングノズル方式は、ロングノズルをまくらぎ下に差し込み、空圧で粒状充填材を装置本体から移送してまくらぎ下に充填する装置である。エアガン方式は、まくらぎ下にノズルを差し込まずに、まくらぎ側面からエアジェットによって粒状充填材を充填できる装置である。レールレベルの扛上量とノズル径によって、各充填装置を選定する。なお、ポリマー水溶液は、粒状充填材を充填後に各まくらぎの周囲に散布して用いることとした。

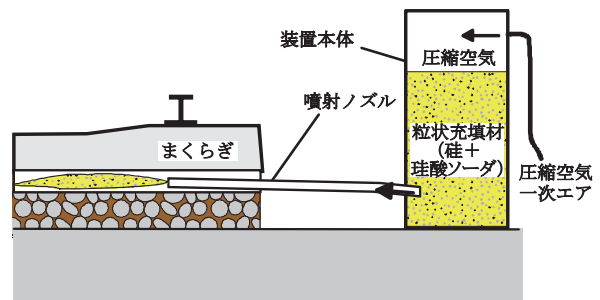


図10 充填装置 (ロングノズル方式)

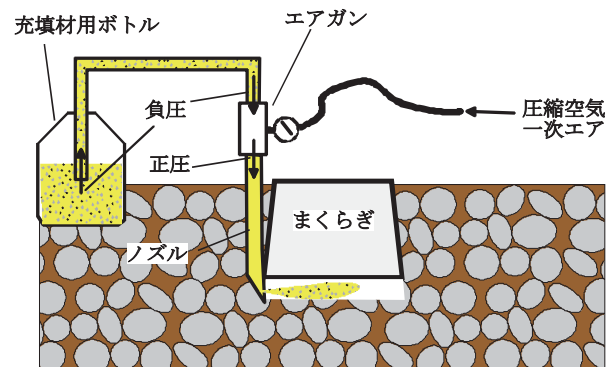


図11 充填装置 (エアガン方式)

4. 水ガラス・ポリマーゲル充填工法の現地試験施工

2008年5月に鹿児島貨物線において試験施工を行った。施工箇所は、浜小倉～黒崎間（北九州市）の軌道変位が大きく、浮まくらぎおよび噴泥が発生している箇所である（図12）。当該区間のレールは50kgNレール、まくらぎはPC3号（継目は継目用並まくらぎ）であり、年間通トンは約1000万トンである。

図13に施工範囲における施工前後の復元高低変位を示す。この図より、施工前においては、14k275m付近をピークに軌道変位が増大していることから、本施工では14k270m～14k280mの10m程度の軌道延長について、水ガラス・ポリマーゲル充填工法による軌道補修を行うこととした。なお、本施工は昼間の列車間合いで行った。

施工は、扛上量が比較的大きくてノズルの挿入が可能な箇所にはロングノズル方式（図10）を、扛上量が小さくてノズルの挿入が困難な箇所にはエアガン方式（図11）を適用することとした。

施工結果を図13および図14に示す。図13は施工2週間後の復元高低変位を示したものである。この時点では計画線よりも若干高くなっているが、軌道変位が増大していた箇所が効果的に修正されていることがわかる。図



図12 施工箇所の状況（起点方）

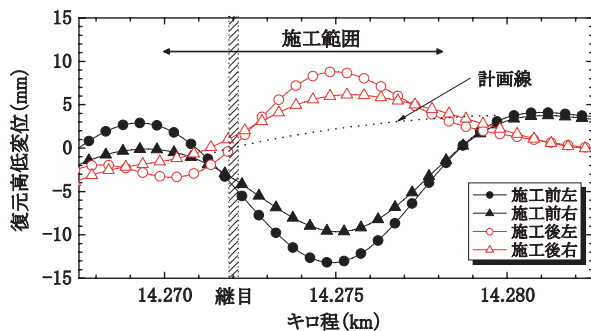


図13 施工前後における復元高低変位

14は、当該箇所における軌道のレベル測定の結果である。施工後数週間で軌道沈下進みは小さくなり、3ヶ月が経過しても良好な軌道状態を保っている。しかしながら、6ヶ月が経過すると継目付近で軌道沈下が増大している。調査の結果、これは、既設の継目用並まくらぎが腐食していたため、タイプレートがまくらぎにくい込んで軌道変位が増大し、継目周辺のまくらぎが浮まくらぎとなって噴泥が発生していたことが判明した。そのため、当該まくらぎを交換するとともに、同工法による当該区間の再施工を行った。再施工区間は、継目部のまくらぎと継目部より終点方にまくらぎ6本分である。再施工前後における軌道のレベル測定結果を図15に示す。施工1週間後から軌道沈下は収束しており、3ヶ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。

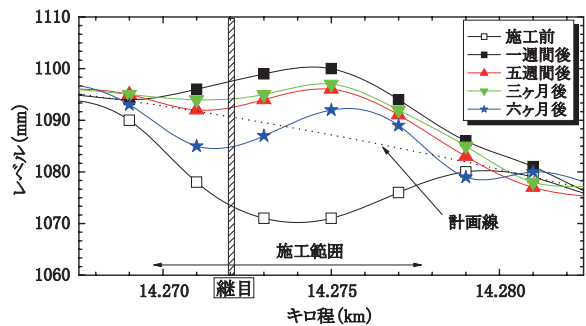


図14 施工箇所のレベル測定結果

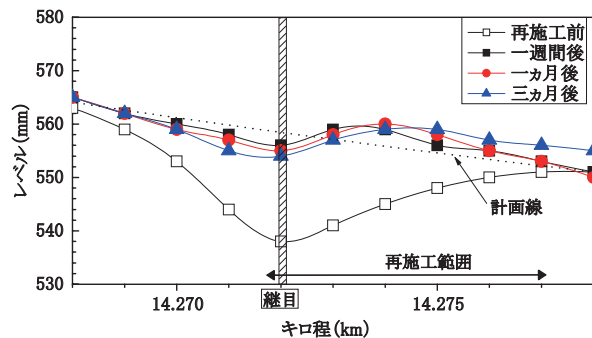


図15 再施工箇所のレベル測定結果

5. まとめ

水ガラス・ポリマーゲル充填工法について、充填材および充填装置の開発を行い、試験施工を行った。以下に得られた結果を示す。

- (1) 水ガラス・ポリマー複合充填材を開発し、一面せん断試験から、列車荷重に耐える強度とともに粘着力による耐流動性を有していることがわかった。
- (2) 水ガラス・ポリマーゲル充填工法に使用する施工装置について、扛上量により、ロングノズル方式とエアガン方式の2種類の施工装置を開発した。

特集：軌道技術

(3) 水ガラス・ポリマーゲル充填工法について、昼間の列車間合いにより10m程度の範囲にわたって軌道変位が大きい箇所を試験施工を行った。また、施工後の経過観察より、良好な軌道状態を保持していることを確認した。

文献

- 1) 中村貴久, 村本勝己, 鳥井原誠, 須藤賢, 中嶋隆: 生分解性ポリマーを用いた軌道補修材の繰返し載荷試験, 第63回土木学会年次学術講演会概要集, 4-134, pp.267-268, 土木学会, 2008
- 2) 村本勝己, 中村貴久, 鳥井原誠, 須藤賢, 中嶋隆: 生分解性ポリマーを用いたバラスト軌道の路盤噴泥対策, 第63回土木学会年次学術講演会概要集, 4-299, pp.595-596, 土木学会, 2008
- 3) (社)地盤工学会編: 土質試験の方法と解説(第一回改訂版), 「第7編 第4章 一面せん断試験」, pp.563-600, 2000
- 4) 村本勝己, 中村貴久, 三田地利之, 大木茂貴, 菅沼辰彦: ポパールを用いた軌道補修材料の一面せん断試験, 第44回地盤工学研究発表会, D-06, pp.442-443, 地盤工学会, 2009