

スラブ軌道てん充層の大断面補修工法の開発

高橋 貴蔵* 淵上 翔太* 谷川 光*
吉川 秀平* 桃谷 尚嗣*

A Development on Large Section Repair Method for Filling Layer of Slab Track

Takatada TAKAHASHI Shota FUCHIGAMI Hikaru TANIGAWA
Shuhei KIKKAWA Yoshitugu MOMOYA

In some slab tracks laid in cold regions, deterioration due to frost damage of CA mortar filling layer is observed. These slabs have been repaired on the basis of periodic inspection. However, there is a possibility that the deterioration proceeds to a wide range depending on the environment. Therefore, field survey by the impact penetration tests were performed on the CA mortar in cold region to obtain the deterioration range. Furthermore, we developed a large section repair method that assumed a deterioration range to the depth of 600mm from the side. To confirm the availability of proposed repair method, we carried out full scale cyclicloading test. The test result showed that the repair method effectively reduced the deformation of slab track. Finally, we confirmed the improvement effect of the repair method by measurement of dynamic displacement of slab under train load before and after the repairmen.

キーワード：スラブ軌道，てん充層，CA モルタル，大断面補修

1. はじめに

1970年代から1980年代に寒冷地に敷設されたスラブ軌道において、てん充層に使用されたCAモルタルの一部で凍害による劣化が確認されている。この時代に使用されたCAモルタルの種類は、温暖地域である山陽新幹線で用いられてきたNo.8、または消泡剤やAE材を添加したNo.33である¹⁾。報告されている凍害の多くは、てん充層の外周部で生じ、その範囲は側面中央部で100mm程度以内、端部で200mm程度以内であることが多い²⁾。このような劣化に対しては、劣化部を除去し、補修用樹脂や補修用CAモルタルによる「額縁補修」³⁾が行われている。

ただし、凍結と融解が多数回繰り返される環境にある線区では、凍害による劣化範囲が広がる場合がある。このような広い劣化箇所をこれまでの額縁補修用の材料で補修する場合、以下のような課題があった。

- ・補修用樹脂：ヤング率がCAモルタルの1/50程度であり、軌道スラブの支持剛性が小さくなる⁴⁾

- ・補修用CAモルタル：環境条件が厳しい地域に対する耐凍害性が不明

そこで、新設に用いるCAモルタルと同程度の剛性を有するとともに、耐凍害性を有する材料を広く劣化したCAモルタルの補修（以下、「大断面補修」と称する）に適用するための検討を行った。

検討を開始するにあたり、寒冷地に敷設されているスラブ軌道に対してCAモルタルの調査を行い、劣化範囲を評価した。次に、耐凍害性の高い急硬性CAモルタルに対して強度、剛性および凍結融解抵抗性等の材料特性に関する実験を行い、大断面補修への適用可能性を評価した。さらに、実物大スラブ軌道供試体を用いて大断面補修の施工性を確認し、載荷試験により補修効果を確認した。最後に、現地で試験施工を実施し、営業線において効果の確認を行った。

2. CAモルタルの劣化深さの評価^{5) 6)}

CAモルタルの劣化の模式図を図1に示す。劣化によってCAモルタルの外周部が欠損するとともに、内部には強度が低下した範囲が存在するものと考えられる。

そこで、CAモルタル内部の圧縮強度を推定することができる衝撃貫入試験（図2参照⁷⁾）により調査を行った。なお、本試験では、圧縮強度⁸⁾がCAモルタルに要求される値（1.8N/mm²）よりも小さい場合を「劣化」と定義し、その範囲は軌道スラブ側面からの「深さ」で

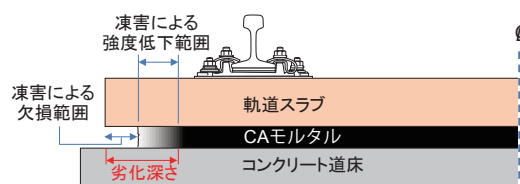


図1 劣化の模式図

* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室



図2 衝撃貫入試験状況

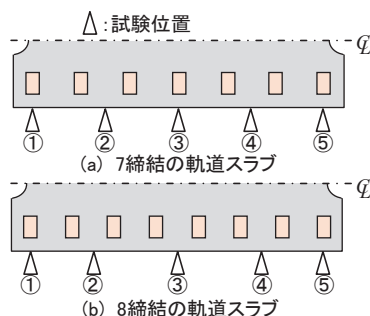


図3 衝撃貫入試験の試験位置

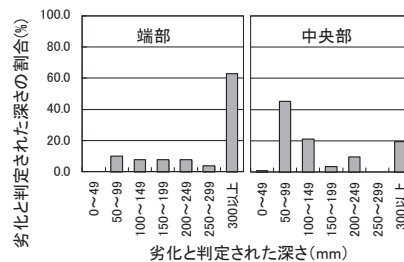


図4 劣化深さの割合

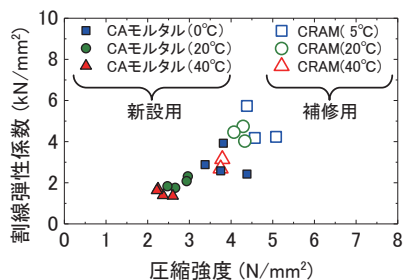


図5 圧縮強度と割線弾性係数の関係

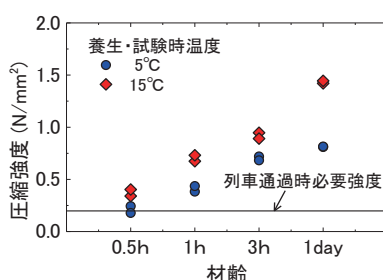


図6 若材齢時の圧縮強度

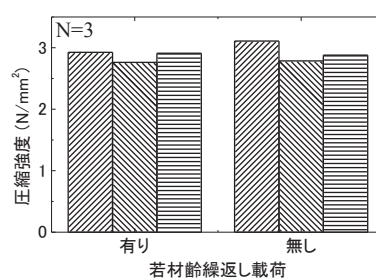


図7 若材齢繰返し載荷と強度の関係

表している。

調査箇所は寒冷地域の高架橋上に敷設されているスラブ軌道である。対象線区は年間通過トン数2190万トンであり、供用年数は30年以上である。調査するCAモルタルは外観上の劣化が顕著な軌道スラブ39枚分とした。衝撃貫入試験は図3に示すように軌道スラブ1枚当たり片側の5か所で実施した。

図3に示した試験位置①と⑤を端部、②～④を中央部と区分し、それぞれに対して衝撃貫入試験で劣化と判定された深さの割合を図4に示す。なお、衝撃貫入試験で用いた貫入棒の長さは300mmであったため、300mmの深さまで健全なCAモルタルが確認されなかった場合は、劣化の深さを「300以上」として整理した。

図4より、端部で最も多い劣化の深さは「300mm以上」であり、中央部では「50～99mm」であった。一方で、中央部においても一部で「300mm以上」の劣化が確認された。

以上より、寒冷地の環境条件によっては、CAモルタルの劣化深さが大きくなる可能性があることがわかった。なお、後述する6章で示すように、一部のてん充層において長い貫入棒で調査した結果、端部において600mm以上の劣化が確認された。

3. 補修用CAモルタルの材料特性⁶⁾

劣化深さがレール直下まで達する場合、既存の健全なCAモルタルと同程度の剛性を有する材料で軌道スラブ底面を均一に支持するように補修するのが理想である。そこで、急硬性を有し、ゴム粉末を添加することで耐凍害性を

向上した補修用CAモルタル（以下、「CRAM」と称する）の大断面補修への適用性を検討するために、各種材料試験を実施した。以下に各種材料試験の結果と考察を示す。

① CRAMの圧縮強度と割線弾性係数の関係を新設線に用いるCAモルタルの結果と併せて図5に示す。同一の温度で比較すると、CRAMの割線弾性係数はCAモルタルの2倍以内となった。これは、従来の補修用樹脂と比較した場合に比べてCAモルタルとの剛性の違いが十分小さく、大断面補修にCRAMを用いることで軌道スラブを概ね均一に支持できるものと考えられる。

② 圧縮強度と材齢（30分、1時間、3時間および1日）の関係を図6に示す。CRAMの可使用時間を10分とすることで、温度5°C以上の条件において材齢30分以降に列車を通過させるのに必要な圧縮応力度⁹⁾である0.2N/mm²を概ね満足できることを確認した。ただし、供試体の1つにおいて圧縮強度が0.18N/mm²となったことから、温度5°Cの条件では材齢40分以降に列車を通過させる方がよいと考えられる。

③ 若材齢時に繰返し載荷を行った円柱供試体の材齢28日における圧縮強度を、荷重履歴のない場合と比較した結果を図7に示す。ここで、若材齢時の繰返し載荷は材齢30分以降に1時間間隔で8回に分けて実施した。1回当たりの繰返し回数は600回とし、応力振幅は0.2N/mm²とした。試験の結果、若材齢時に繰返し載荷を受けても、28日後の圧縮強度に影響を与えないことを確認した。したがって、CRAMの施工が完了した30分後に列車が通過しても、圧縮強度への影響はないと考えられる。

④ CRAMの繰返し載荷試験の結果を、新設線に用いるCAモルタルの結果⁹⁾と併せて図8に示す。なお、同図

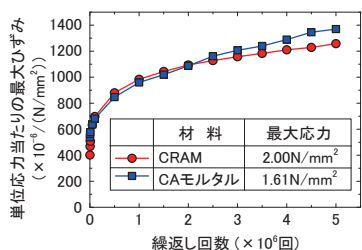


図8 繰返し載荷試験結果

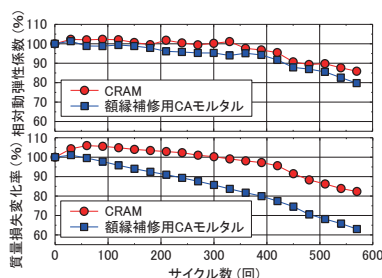


図9 凍結融解試験結果

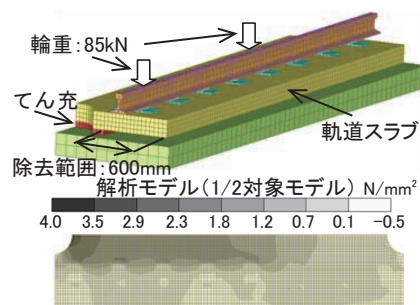


図10 軌道スラブの主応力コンター

の縦軸は最大ひずみを載荷応力で除した単位応力当たりの最大ひずみとして示した。繰返し載荷試験の結果、繰返し載荷によって蓄積されるCRAMのひずみはCAモルタルと同程度となった。したがって、大断面補修でレール締結装置直下をCRAMで補修した場合、健全なCAモルタルと同様に軌道スラブを支持できると考えられる。

⑤凍結融解試験によって得られたCRAMと額縁補修用CAモルタルの相対動弾性係数と質量損失変化率の結果を図9に示す。CRAMは額縁補修用CAモルタルと比べて、両者の低下が小さかった。したがって、寒冷地域で使用する場合、CRAMの方が適していると考えられる。

以上より、CRAMの各種材料特性を評価した結果、大断面補修に適用できると判断した。

4. スラブ軌道供試体に対する載荷試験⁶⁾

4.1 試験概要

大断面補修作業は夜間の列車間合いで実施する必要がある。特に、貨物列車等が通過する在来線で実施する場合は、列車の走行安全性を確保しながら作業しなければならない。図4に示したように、てん充層には側面から深さ300mm以上の劣化が発生し、中には深さ600mm以上に達しているスラブ軌道もある。なお、深さ600mmは軌道スラブ側面からタイプレートの軌間側の端部までの距離と同じである。

一律に深さ600mmの範囲を除去した状態で列車が通過すると、図10の有限要素解析の結果に示すように、軌道スラブの突起周辺部には曲げひび割れ強度を超える4.0N/mm²程度の引張応力が生じる可能性がある。そこで、補修作業の途中に列車を通過させることが可能な

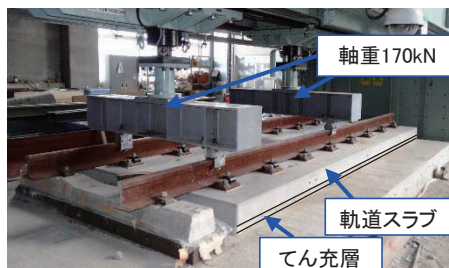


図11 実物大スラブ軌道供試体に対する載荷状況

施工方法を開発するため、広範囲に劣化したCAモルタルを部分的に除去する方法について、図11に示す実物大スラブ軌道供試体（以下、「スラブ供試体」と称する）に対する載荷試験により検討を行った。なお、十分な作業時間を確保できる場合は、補修作業を分割して実施しなくてもよい。

スラブ供試体は在来線を想定し、てん充層にはNo.33と同様なCAモルタルを用いた。なお、軌道スラブの両側面から600mmの範囲は圧縮強度が0.8N/mm²のセメント改良砂を用いて劣化したCAモルタルを模擬した。

載荷条件を表1に、てん充層の施工手順を図12に示す。本試験では劣化したCAモルタルの補修前、部分除去後、部分除去した箇所への支持材設置後（図13参照）、部分補修後、全面補修の完了後に静的載荷試験および繰返し載荷試験を実施した。静的載荷試験ではアクチュエータ1本当たり170kN（軸重相当）の荷重を載荷速度10kN/secで載荷した。また、繰返し載荷試験ではアクチュエータ1本当たりの荷重振幅を170kN（最低荷重5kN）とし、載荷周波数を8～10Hzとした。

4.2 スラブ軌道供試体に対する載荷試験の結果

静的載荷試験によって得られた荷重と軌道スラブ隅角

表1 実物大スラブ軌道供試体に対する載荷条件

試験順番	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ケース名	S-(a)	S-(b)	S-(c)	D-(c)	D-(b)	D-(d)-30	S-(d)-30	D-(d)_60	S-(d)_60	D-(f)_7d	S-(f)_11d
てん充層	(a) 補修前	(b) 部分除去	(c) 支持材設置	(b) 部分除去		(d) 部分補修			(f) 全面補修		
載荷方法	静的			繰返し		繰返し	静的	繰返し	静的	繰返し	静的
材齢	-					30分		60分		7日	12日
回数	-			400回	400回	400回	-	8000回	-	200万回	-

特集：軌道技術

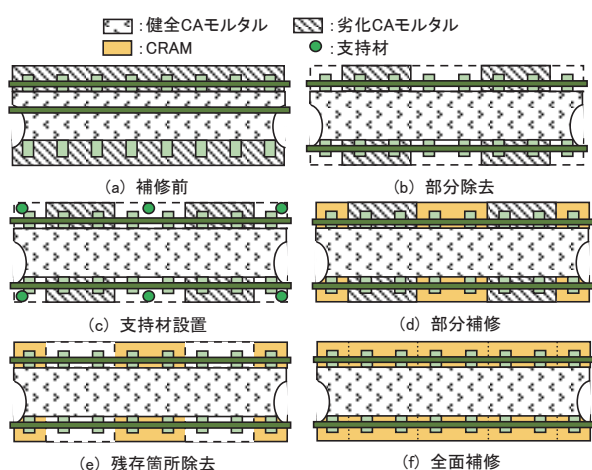


図 12 てん充層の施工手順

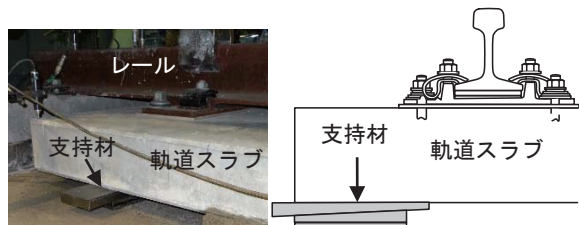


図 13 支持材の設置状況と断面図

部の鉛直変位の関係および荷重と線路直角方向ひずみの関係を図 14 に示す。ここで、鉛直変位は 2 箇所の隅角部の平均であり、線路直角方向ひずみは軌間中央の突起に隣接する端部の値であり、各段階の荷重前の値を 0 とした。試験の結果、図 14 に示すとおり「(a) 補修前」の最大変位は 0.45mm であったものが、「(b) 部分除去」では 0.68mm まで増加した。その後、「(c) 支持材設置」では最大変位は 0.30mm となった。さらに、「(d) 部分補修」の施工後 30 分の最大変位は 0.25mm、60 分後は 0.22mm となり、「(f) 全面補修」では 0.28mm となった。

ひずみに着目すると、「(a) 補修前」の最大ひずみが 16×10^{-6} であったものが、「(b) 部分除去」では 35×10^{-6} まで増加した。その後、「(c) 支持材設置」では、 -34×10^{-6} の圧縮のひずみが生じた。また、「(d) 部分補修」の施工後 30 分には -7×10^{-6} 、60 分には -18×10^{-6} の圧縮ひずみが生じ、最終的に「(f) 全面補修」では 4×10^{-6} となった。「(c) 支持材設置」において軌道スラブに生じるひずみが引張りから圧縮に転じたが、これは支持材を軌道スラブ側面の下部に挿入することにより軌道スラブ両側面が支点となったためと推察され、実施工では支持材を過度にたたき込まないよう注意が必要である。

なお、本報告では、紙面の都合上、静的荷重試験の結果を中心に示したが、繰返し荷重試験では以下の結果が得られている。

①「(c) 支持材設置」の状態に 400 回 (20 両編成 5 本分)

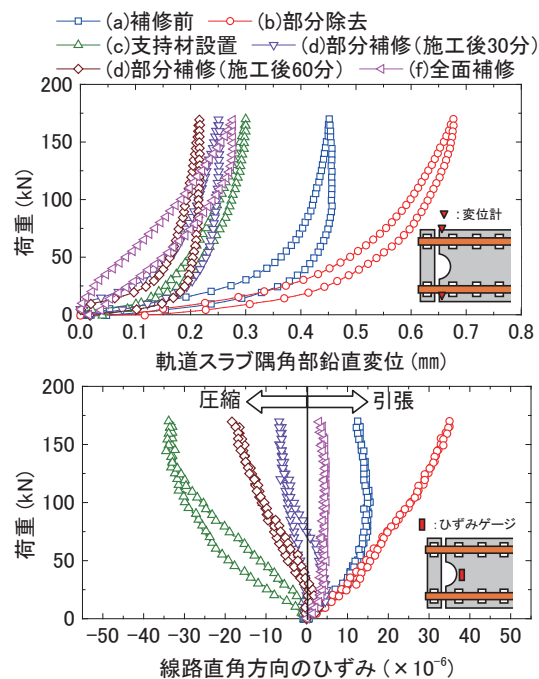


図 14 静的荷重試験結果

の繰返し荷重を実施した結果、軌道スラブの変位の増加量は 0.05mm 程度と微小であることを確認した。

②「(d) 部分補修」の施工後 30 分に 400 回 (20 両編成 5 本分) および 60 分に 8000 回 (10 両編成 200 本分：1 日分) の繰返し荷重を実施した結果、軌道スラブの変位の増加量が最大 0.23mm 程度と微小であることを確認した。部分補修 30 分後および 60 分後に列車が通過しても問題が無く、図 6 に示した結果を踏まえれば長期的な支持力についても問題ないと考えられる。

③「(f) 全面補修」の後、CRAM が最終強度に達したと考えられる材齢 5 カ月で 200 万回の繰返し荷重を実施した結果、軌道スラブの変位の増加量は 0.15mm 以下となることを確認した。図 7 に示した結果を踏まえれば、大断面補修後においても健全な CA モルタルと同等の支持状態を維持できると考えられる。

以上の結果より、列車を通過させながらの補修が可能であること、また大断面補修による効果が十分に得られることを確認した。

5. 劣化した CA モルタルの除去方法⁶⁾

CA モルタルの除去に広く用いられている電動ピック等を大断面補修における CA モルタルの除去作業に用いた場合、作業時間が長くなり、さらにピックの先端が劣化の最深部に届かない可能性がある。そこで、除去作業の効率化を図るため、ウォータージェットを用いることを検討し、スラブ供試体で施工性を確認した。なお、ウォータージェットには高圧洗浄機 (最大吐出圧力：



図 15 劣化 CA モルタル除去の状況

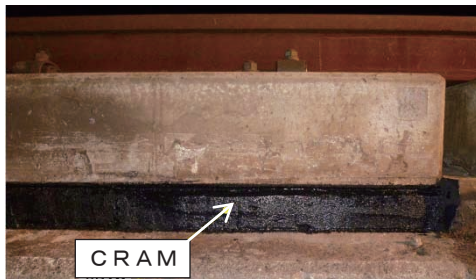


図 16 施工後の状況

25MPa, 吐水量 13 ℓ/分, 直射ノズル (角度 0 度) を用いた。

スラブ供試体に対してウォータージェットを使用した結果, CA モルタルの劣化を模擬したセメント改良砂は適切に除去され, 内部の健全な CA モルタルはほとんど除去されないことを確認した。

セメント改良砂をウォータージェットで除去するのに要する時間は, 軌道スラブの隅角部 (幅 450mm) で 1 箇所あたり 5 分程度 (水量 70 ℓ 程度), 中央部 (幅 1250mm) で 1 箇所あたり 9 分程度 (水量 110 ℓ 程度) であった。これらの値を平均すると幅 1m で奥行き 600mm を除去するのに要する時間は 9 分程度となる。この作業時間は従来の額縁補修における CA モルタルの除去作業と同等であることを確認した。

6. CA モルタル大断面補修の試験施工

6.1 試験施工の概要

室内試験で評価した大断面補修に対して, 作業スペースや作業時間の制約が大きい営業線における施工性を検討するため, 試験施工を行った。なお, 試験施工は 2 章に示した CA モルタルの調査を実施した線区のスラブ軌道で実施した。また, 試験施工の前後に列車通過時の軌道スラブの変位を測定し, 補修効果の確認も行った。

6.2 施工手順

試験施工では, 夜間列車間合いによる制約と作業の安全性を考慮し, 補修範囲を軌道スラブ長手方向に対して端部と中央部 (施工境界部は第 1 締結と第 2 締結の間および第 7 締結と第 8 締結の間) に分けて 2 日間で施

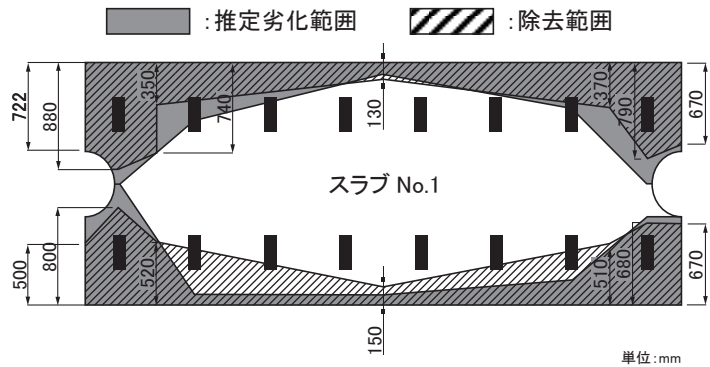


図 17 CA モルタルの劣化範囲と除去範囲の比較

工した。本施工では劣化した CA モルタルの除去作業にウォータージェットを用いた (図 15)。なお, 除去作業中に列車が通過する場合は, 軌道スラブとコンクリート道床の間に図 13 と同じ鋼製の支持材を設置して列車荷重を支持した。CRAM の打込みを完了してから約 1 時間後に型枠を撤去し, 表面整正をした後に防水性および耐候性の向上のために保護材を塗布した。図 16 に施工後の状況を示す。

6.3 CA モルタル劣化範囲の除去状況

施工対象箇所 of CA モルタルについては, 衝撃貫入試験により事前に劣化深さを推定し, その結果をもとに, ウォータージェットによる除去作業を行った。図 17 に推定した劣化範囲と実施工で実際に除去した範囲を示す。軌道スラブ中央部において推定した劣化範囲と実際に除去した範囲に多少の差が見られるが, 全体的には両者は概ね一致していた。

6.4 補修前後における軌道スラブ鉛直変位の推移

本施工による補修効果の確認を目的として, 補修前後における列車通過時の軌道スラブの変位を測定した。測定対象は施工対象箇所 (スラブ No.1) およびそれに隣接する軌道スラブ (スラブ No.2) である。軌道スラブの変位はコンクリート道床を不動点として固定した接触式変位計で測定した。なお, 補修後の測定については, 施工完了後 4 日目に実施した。

図 18 に補修前後における軌道スラブ鉛直変位と位置の関係を示す。補修前後ともに夜間の列車通過前における測定値を変位の初期値とし, 沈下方向の鉛直変位を負値として示す。列車通過時の変位も夜間の測定で得られた値である。

まず, 補修前の測定値については, スラブ No.1 および No.2 ともに列車通過時における動変位が中央部で 0.2mm 程度, 端部で 1mm 程度であり, 施工対象箇所であるスラブ No.1 の動変位振幅は端部において最大 1.13mm であった。

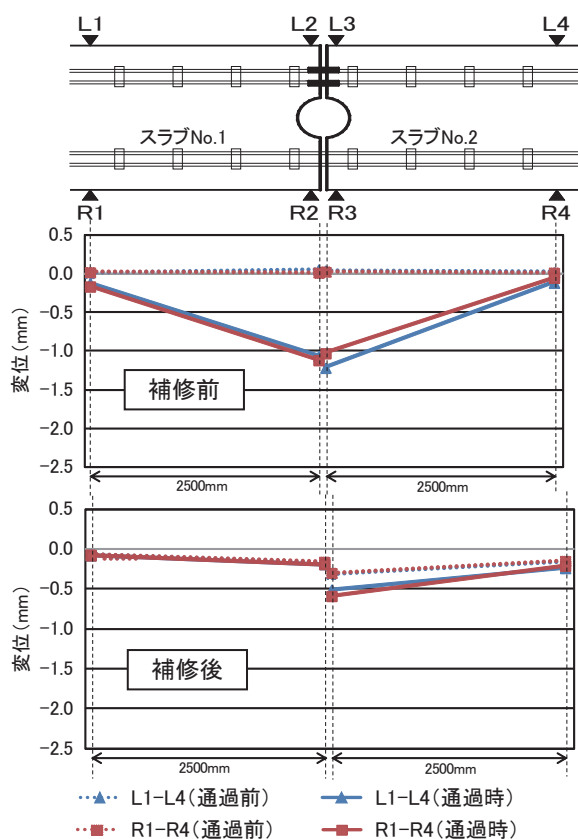


図 18 軌道スラブ鉛直変位と位置の関係

次に、補修後の測定値については、スラブ No.1 の列車通過時における動的変位振幅が中央部で最大 0.01mm、端部で最大 0.04mm であり、補修前と比較して変位量が大幅に低減されている。なお、大断面補修を行っていないスラブ No.2 でも端部の動的変位が補修前と比較して半減している。これは、隣接するスラブ No.1 を補修した結果、支持状態が改善した効果によるものと考えられる。

以上より、補修後における鉛直変位の測定結果より、営業線においても大断面補修の効果が十分に得られることを確認した。

7. 結論

スラブ軌道てん充層の劣化範囲が広い場合の補修方法に対する検討を行い得られた結論を以下に示す。

- (1) 衝撃貫入試験により、てん充層側面からの劣化範囲は中央部よりも端部の方が深い傾向にあることを確認した。一方で、中央部においても 300mm 以上の劣化が生じている箇所があることも確認した。
- (2) 劣化範囲が広いてん充層の補修材料として、ゴム粒子を配合した補修用 CA モルタルが補修材として十分な強度と剛性を有していることを確認するとともに、額縁補修用 CA モルタルよりも優れた凍結融解抵抗性を有し

ていることを確認した。

- (3) 劣化範囲が広いてん充層を除去する方法としてウォータージェットを用いる方法を検討し、劣化した CA モルタルのみを効率的に除去できることを確認した。
- (4) 列車を通過させながら補修できる方法として施工範囲を分割する方法を検討し、実物大スラブ軌道に対する載荷試験によって問題なく施工できることを確認した。
- (5) てん充層の劣化範囲を軌道スラブの両側面から深さ 600mm とした実物大スラブ軌道模型に対して大断面補修を行った結果、十分な補修効果が得られることを確認した。
- (6) 営業線での試験施工により、ウォータージェットを用いて広範囲に劣化した CA モルタルを効率的に除去し、ゴム粒子を配合した補修用 CA モルタルで補修することにより、軌道スラブの支持状態を改善できることを確認した。

謝 辞

スラブ軌道の調査および試験施工において多大なるご協力をいただいた北海道旅客鉄道株式会社各位に深甚なる感謝の意を表します。

文 献

- 1) 宮田尚彦, 上野真, 板井則之: 改良型寒冷地用 CA モルタルの開発試験, 鉄道技術研究所速報, No.A-86-4, 1986
- 2) 稲荷久弥, 小西俊之: 効率的なスラブ下面補修工法の開発, JR EAST Technical Review, No.25, pp.55-60, 2008
- 3) 公益財団法人鉄道総合技術研究所: スラブ軌道各部補修の手引, pp.1-6, 2015
- 4) 高橋貴蔵, 淵上翔太, 桃谷尚嗣, 藪中嘉彦: スラブ軌道てん充層の補修効果に関する研究, 第 21 回鉄道技術・政策総合シンポジウム, 2014
- 5) 淵上翔太, 高橋貴蔵, 桃谷尚嗣, 谷川光: スラブ軌道における CA モルタル大断面補修方法に関する検討, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.19, pp.15-20, 2015
- 6) 高橋貴蔵, 淵上翔太, 桃谷尚嗣, 谷川光: スラブ軌道てん充層の大断面補修に関する研究, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.20, pp.111-118, 2016
- 7) 高橋貴蔵, 桃谷尚嗣, 藪中嘉彦, 長沼光: 貫入試験による CA モルタルの劣化評価, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.17, pp.127-132, 2013
- 8) 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, pp.384-387, 2012
- 9) 高橋貴蔵, 桃谷尚嗣, 長沼光: スラブ軌道てん充層の疲労寿命に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.619-624, 2015