

# 凍害を受けた軌道スラブの補修方法

高橋 貴蔵\* 北条 優\* 高橋 成汰\*

Method for Repairing Track Slabs with Frost Damage

Takatada TAKAHASHI Masaru HOJO Narita TAKAHASHI

We have clarified the deterioration mechanism of cross-sectional repair sections in track slabs laid in open sections in cold regions. We also evaluated the residual strength of rail fastening systems on track slabs simulating frost damage. Furthermore, we confirmed the effectiveness of silane/siloxane type surface penetrants in suppressing the progression of frost damage by freezing and thawing tests. Based on these results, we proposed a method for repairing track slabs laid in open sections in cold regions.

キーワード：軌道スラブ，凍害，ASR，シラン・シロキサン系表面含浸材，補修方法

## 1. はじめに

スラブ軌道は、軌道スラブ、てん充層、レール、レール締結装置、突起およびコンクリート道床で構成される軌道構造である。明かり区間で用いられているスラブ軌道の模式図を図1に示す。軌道スラブは、軌間を保持するとともに、てん充層を介して列車荷重を構造物に伝達する重要な軌道部材である。そのため、劣化や損傷が生じた場合は、スラブ軌道各部補修の手引き<sup>1)</sup>（以下、「手引き」とする。）に示されている表1に基づいた補修が行われている。

寒冷地の明かり区間に敷設されている軌道スラブでは、凍害（アルカリシリカ反応<sup>2)</sup>（以下、「ASR」とする。）と凍害の複合劣化も含む）によって生じるコンクリートの欠損等が確認されている。このような欠損等に対しては、表1に示した樹脂モルタル（エポキシ樹脂と細骨材による補修材）による断面修復が行われている<sup>1)</sup>。しかし、補修を行った一部の軌道スラブでは、図2に示すような剥落が生じている。

なお、トンネル区間の直線部に敷設されている軌道スラブでは、ASRによるひび割れや内在塩分による鉄筋腐食<sup>3)</sup>によって生じるコンクリートの欠損等が確認されている。このような欠損等に対しても樹脂モルタルによる断面修復が行われており、十分な補修効果が確認されている。トンネル区間の直線部に対しては、樹脂モルタルに加えて、ポリマーセメントモルタルを用いることが可能なことも確認されている<sup>4)</sup>。

以上を踏まえ、凍害を受けた軌道スラブの補修方法を提案することを目的に、断面修復部の劣化メカニズムを検討するための付着強度試験、劣化を模擬した軌道スラブにおけるレール締結部の耐力を評価するための水平載

荷試験、さらに表面含浸材による耐凍害性の向上を評価するための気中凍結水中融解試験を実施し、これらの結果を踏まえて補修方法を提案したので報告する。

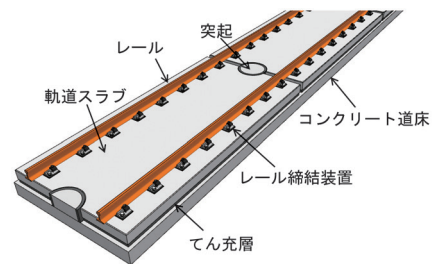


図1 明かり区間用のスラブ軌道の模式図

表1 スラブ軌道各部補修の手引きに示されている補修方法

状況	原因	補修方法	補修材料
欠損	指定なし	断面修復工法	・樹脂モルタル
	指定なし	塗布工法 (0.2mm以下) 充填工法 (5.0mm以下)	・合成樹脂系塗布材 ・合成樹脂系充填剤
ひび割れ	ASR	表面含浸 (0.5mm以下)	・水性シラン系含浸材
		表面被覆 (2.0mm以下)	・シリコーン樹脂系被覆材
	ASR+凍害	ひび割れ低圧注入 + 表面含浸 (0.5mm以下) 表面被覆 (2.0mm以下)	・低粘度エポキシ樹脂 ・セメント・スラグ微粉末 ・水性シラン系含浸材 ・シリコーン樹脂系被覆材

※ASR：アルカリシリカ反応 ( ) 内の数字：ひび割れ幅

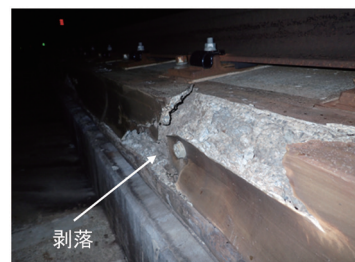


図2 樹脂モルタルによる断面修復部の劣化状況

\* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室

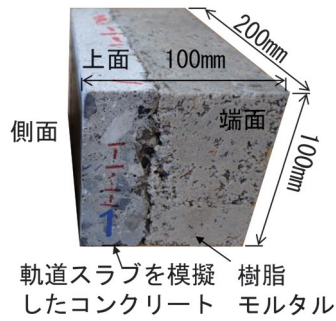


図3 付着供試体の外観<sup>5)</sup>

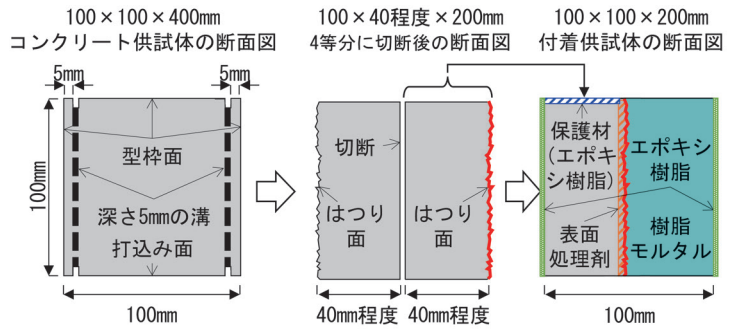


図4 付着供試体の作製手順

## 2. 断面修復部の劣化メカニズム

### 2.1 付着強度試験の方法

寒冷地の明かり区間に敷設されている軌道スラブで断面修復部が剥落する劣化メカニズムを検討するため、付着強度試験を実施した。

付着強度試験用の供試体（以下、「付着供試体」とする。）の寸法は100×100×200mm（図3参照）とし、図4に示す手順で作製した。はじめに、100×100×400mmのコンクリート供試体の両側面から5mmの位置に溝を掘る。次に、電動ハンマーで両側面をはつり取った後、コンクリート供試体を横断・長手方向中央断面で切断する（4等分：100×40程度×200mm）。ここで、切断後のコンクリート供試体は軌道スラブを模擬している。最後に、スラブ軌道各部補修の手引き<sup>1)</sup>に基づいて、はつり面に表面処理剤を塗布し、樹脂モルタル（以下、「RM」とする）で断面修復する。なお、軌道スラブ上面からの吸水を防止するため、スラブ軌道各部補修の手引き<sup>1)</sup>にはRMで用いられているものと同じエポキシ樹脂を保護材として塗布することが示されている。そのため、付着供試体のコンクリート上面にエポキシ樹脂を塗布した。また、付着供試体の側面からの凍害を防止するためコンクリート側面に対してもエポキシ樹脂を塗布した。

コンクリートの配合を表2に示す。コンクリートの配合は配合1と配合2の2種類とし、粗骨材および細骨材にはASRに対して反応性を有する骨材を用いた。配合1に対してはASRが生じないようにアルカリ分は添加せず、配合2に対してはASRが生じるようにアルカリ分としてNaClを添加した。なお、コンクリートの材齢28日における目標圧縮強度は軌道スラブの設計基準強度と同じ40N/mm<sup>2</sup>とし、NaClの添加による圧縮強度の低下を考慮して配合を決定した。コンクリートの空気量は、新幹線建設時に軌道スラブに対して定められた管理値の下限である2%とした<sup>6)</sup>。

付着強度試験の方法を図5に、付着強度試験の状況を図6に示す。付着供試体のコンクリート側から直径50mmのコアを削孔し、図5に示すようにコア上面に接

表2 コンクリートの配合

	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	NaCl (kg/m <sup>3</sup> )	空気量 (%)
配合1	45.0	45.0	0.0	2.0
配合2			10.0	

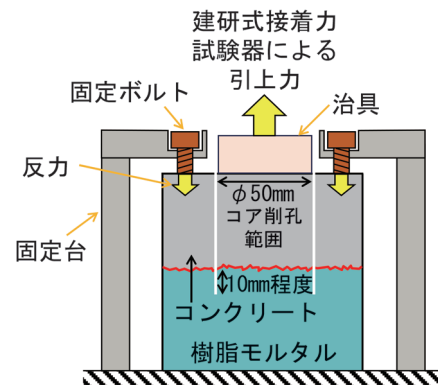


図5 付着強度試験の方法

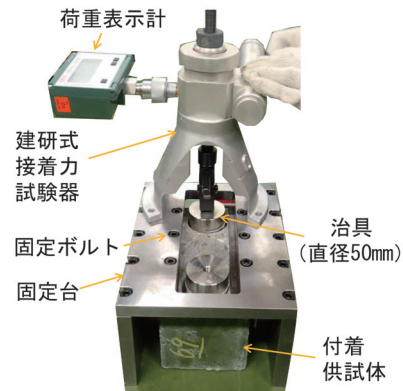


図6 付着強度試験の状況

着した治具（直径50mm）を、図6に示すように建研式接着力試験機で引き上げた際の最大荷重をコアの面積で除算することで付着強度を算出した。各ケースにおける試験数は付着供試体1体に対して3回とした。

付着供試体の条件および付着強度試験のタイミングを表3に示す。表3中に示す「事前凍結融解」、「ASR」および「底面吸水凍結融解」に関する内容を以下に示す。

表3 付着供試体の条件および付着強度試験のタイミング

CASE	付着供試体の条件		付着強度試験のタイミング		
	配合	事前凍結融解	ASR	底面吸水凍結融解	
				50回	100回
1-1	1	—	—	○	○
1-2	1	○	—	○	○
2-1	2	—	○	○	○
2-2	2	○	○	○	○

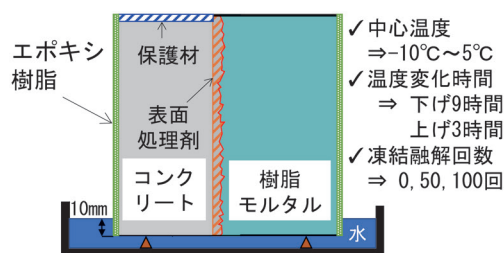


図7 底面吸水凍結融解試験

- ・事前凍結融解：コンクリートが事前に受けている凍害の影響を想定し、コンクリート供試体をはつる前に相対動弾性係数が80%程度となるように水中凍結水中融解試験（JIS A 1148（A法））を行う。
- ・ASR：ASRによる膨張を想定し、付着供試体のコンクリート部分の膨張量が0.05%となるように40℃の高湿度環境下に保管する。なお、CASE2-2については、事前凍結融解後に上記した環境に保管した。ここで、ASRが原因で別途現地より撤去した軌道スラブから採取した直径50mmのコアに対して促進膨張試験（JCI-S-011：40℃、湿度95%以上の環境）を実施した結果、測定材齢91日における膨張率は0.040～0.055%であったことから、付着供試体のコンクリート部分の膨張量を0.05%に設定した<sup>4)</sup>。
- ・底面吸水凍結融解試験：軌道スラブ底面から断面修復材とコンクリートの界面に吸水される水に起因する凍害の影響を想定し、図7に示すように付着供試体の底面を浸水させた状態で供試体の中心温度を $-10 \pm 3^\circ\text{C}$ ～ $5 \pm 3^\circ\text{C}$ となるように変化させる。

## 2.2 付着強度試験の結果および考察

付着強度試験の結果としてASRによる膨張を与えないケース（配合1）における付着強度（平均値）を図8（a）に、ASRによる膨張を与えるケース（配合2）における付着強度（平均値）を図8（b）に示す。なお、図8（a）および図8（b）における凍結融解回数0回の付着強度を比較すると、配合2の付着強度の方が小さくなった。また、配合1と配合2の圧縮強度は、それぞれ $54.6\text{N/mm}^2$ および $44.8\text{N/mm}^2$ であり、配合2の圧縮強度の方が小さかった。したがって、配合2の付着強度の方が小さくなった要因の一つとして、コンクリートの圧縮強度が影響していた可能性がある。以下に、本試験で得られた結果を示す。

図8（a）の凍結融解回数0回より、事前凍結融解を与えたCASE1-2の付着強度はCASE1-1と比較すると35%小さく、 $1.9\text{N/mm}^2$ となった。図8（b）の凍結融解回数0回（ASR前）より、事前凍結融解を与えたCASE2-2の付着強度はCASE2-1と比較すると10%小さく、 $1.7\text{N/mm}^2$ となった。事前凍結融解で付着強度が

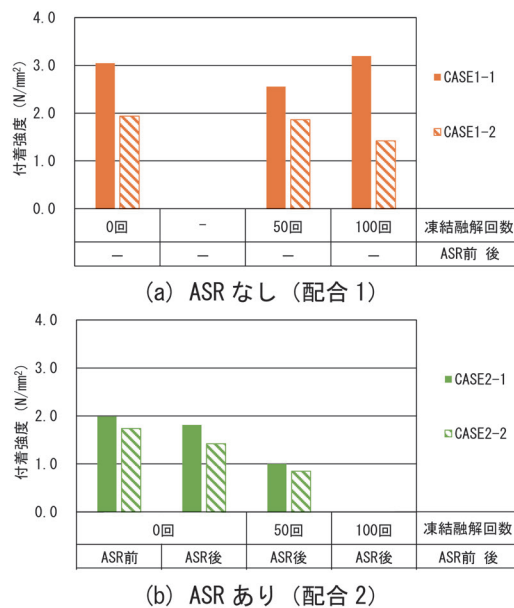


図8 付着強度試験の結果<sup>5)</sup>

低下した要因の一つとして、RMの流動性が低いことから、はつり面の脆弱な層の内部まで浸透することができず、RMが脆弱な層と接着したためと考えられる。

図8（a）の凍結融解回数0, 50, 100回より、CASE1-1の付着強度は、凍結融解回数50回でやや低下するものの、0回と100回の付着強度は概ね一定であり、底面吸水凍結融解を受けることによる明確な付着強度の低下は確認されなかった。一方、CASE1-2は凍結融解回数の増加により付着強度が低下する傾向を示した。図8（b）の凍結融解回数0, 50, 100回より、CASE2-1およびCASE2-2の付着強度は、底面吸水凍結融解を受けることで低下する傾向を示し、凍結融解回数100回後における付着強度は $0\text{N/mm}^2$ となった。

以上の結果より、ASRのあり・なしにかかわらず、事前凍結融解の影響により付着強度が小さくなり、さらに底面吸水凍結融解によって付着強度が低下することが分かった。付着強度試験の結果に基づいて想定される断面修復した箇所が剥落するメカニズムを図9に示す。

- ① 凍害が単独あるいはASRと複合して生じている軌道スラブにおいて劣化部のはつり作業後に脆弱部が残存する。

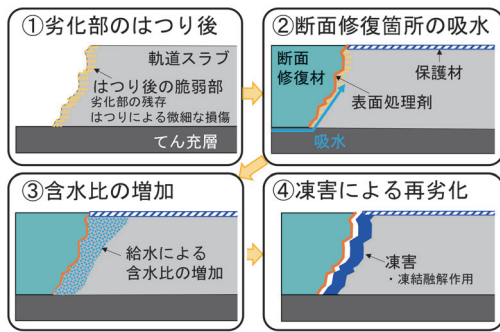


図9 断面修復部の劣化メカニズム<sup>5)</sup>

- ② 軌道スラブ底面から断面修復部とコンクリートの界面に吸水される。
- ③ 断面修復部の界面付近におけるコンクリートの脆弱部において含水率が增加する。
- ④ 断面修復部の界面におけるコンクリートの脆弱部で凍害が生じ、断面修復部が剥落する。

なお、図8(b)の凍結融解回数0回においてASRの前・後でCASE2-1の付着強度を比較すると、ASRによって付着強度は9%低下して1.8 N/mm<sup>2</sup>となったが、十分な付着強度を有していた。供用年数40年以上が経過した軌道スラブにおいてASRによる残存膨張量が減少していると考えられること、また敷設環境が変化しない場合はASRの膨張に必要な水分量も変化しないと考えられることから、促進膨張試験で確認された0.05%の膨張が今後生じる可能性は低い。また、0.05%の膨張が生じた場合でも付着強度が確保される。したがって、凍害が生じない場合、スラブ軌道各部補修の手引き<sup>1)</sup>に示されている通り、ASRが生じている軌道スラブに対してRMを用いることは可能であると考えられる。

### 3. 劣化を模擬した軌道スラブにおけるレール締結部の耐力

#### 3.1 軌道スラブに対する水平載荷試験の方法

軌道スラブの欠損がレール締結部の耐力に与える影響を検討するため、営業線から撤去した図10に示す人工的に欠損を与えた軌道スラブ(A-55:厚さ160mm)に対する水平載荷試験を行った。欠損の範囲は、タイプレートよりも軌間外側の軌道横断方向210mm×軌道長手方向815mm×高さ160mmとし、範囲内のコンクリートをはり落とすとともに、鉄筋を切断した。なお、線路長手方向のはり面と埋込カラー部の間には線路長手方向の鉄筋が上段および下段にそれぞれ1本残存している。水平載荷試験の状況を図11に示す。水平載荷試験では、図12に示すようにタイプレートを模擬した載荷治具に対して、軌道横断方向の横圧を想定した荷重を与えた。レール締結装置の固定部は健全な状態と欠損を与

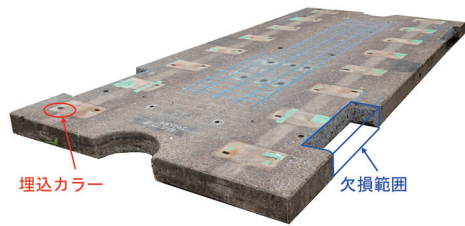


図10 営業線から撤去した軌道スラブに人工的な欠損を与えた状況

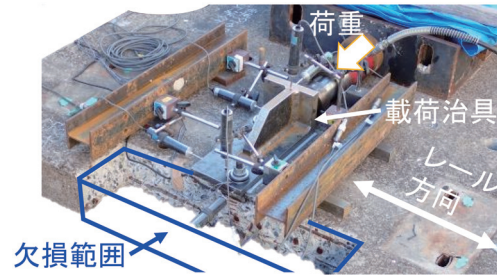


図11 水平載荷試験の状況

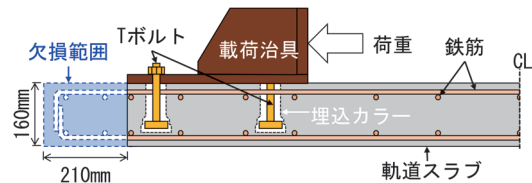


図12 水平載荷試験の方法(欠損あり)

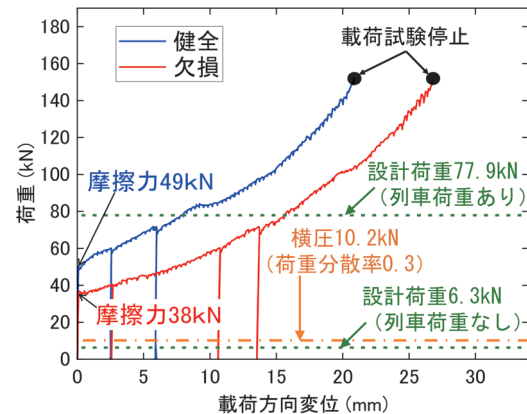


図13 明かり区間用軌道スラブの荷重—載荷方向変位関係<sup>5)</sup>

えた状態の2種類とした。載荷試験の最大荷重は150kNを上限とした。また、載荷治具は2本のTボルトで埋込カラーに締結し、ボルト軸力は63kNを目標とした。

#### 3.2 水平載荷試験の結果

図13に水平載荷試験で得られた荷重と載荷治具の載荷方向変位の関係を示す。健全な状態における摩擦力は

表 4 気中凍結水中融解試験の試験ケース

No.	供試体種別	塗布範囲	表面含浸材の塗布	塗布量 (g/m <sup>2</sup> )
1	S1	上面全面	あり	350
2		上面半面		
3	S2	切断面	なし	—
4			あり	350
5			あり	500

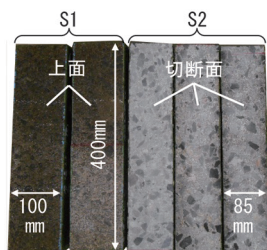


図 14 角柱供試体の外観図<sup>5)</sup>

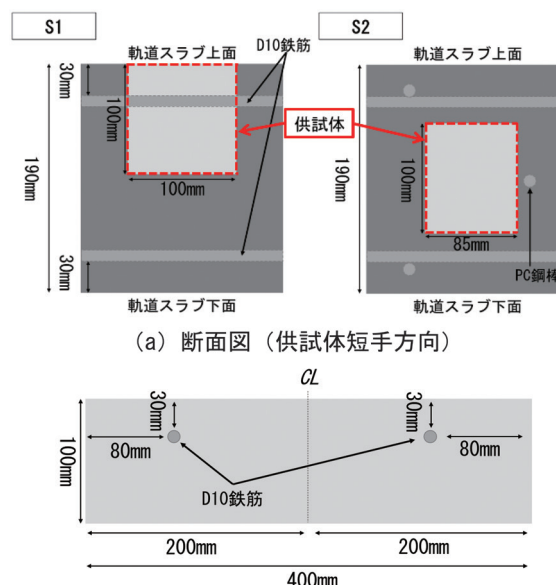
49kN, 欠損を与えた条件における摩擦力は 38kN となり, 最大荷重は両条件共に 150kN 以上となった。摩擦力は列車荷重がない場合の設計荷重 6.3kN<sup>7)</sup> よりも大きく, また最大荷重は列車荷重がある場合の設計荷重 77.9kN<sup>7)</sup> よりも大きくなり, 欠損を与えた条件でも十分な耐力を有していた。なお, 欠損を与えた条件の摩擦力の方が小さくなったのは, 荷重の増加に伴い徐々に載荷治具が傾斜し, T ボルトの軸力が低下したことが要因として考えられる。常時に生じる横圧を輪重 85kN × 変動横圧係数 0.4 の 34kN とし, 軌道横断方向の荷重分担率を 0.3 とした場合における 1 締結装置あたりに作用する横圧は 10.2kN と求められる<sup>7)</sup>。38kN 以上の荷重では健全よりも欠損の条件における変位の方が大きい, 横圧 10.2kN は摩擦力以下となり, 載荷治具の変位はほぼ 0mm であった。なお, 変位は主に載荷治具の滑動によって生じており, 欠損の条件における変位の方が大きい理由は, 欠損の条件における摩擦力の方が小さく, 健全よりも小さい荷重で滑動が生じたためである。

以上より, タイプレート式のレール締結装置が用いられている軌道スラブについては, タイプレート端部までコンクリートが劣化しても摩擦力によってタイプレートは滑動せず, 設計上の最大荷重が作用しても耐力上の問題がないと考えられる。なお, 列車荷重が作用する場合にはタイプレートと軌道スラブ間の摩擦力はさらに増加するため, 安全性はさらに高まる可能性がある。

#### 4. 表面含浸材による耐凍害性の向上

##### 4.1 気中凍結水中融解試験の方法

凍害が単独あるいは ASR と複合して生じている軌道スラブの耐凍害性を向上させる方法を検討するため, 寒冷地の明かり区間より撤去した軌道スラブ (4950 × 2340



(a) 断面図 (供試体短手方向)

(b) 断面図 (S1 供試体長手方向)

×190mm) から切り出した角柱供試体 (以下, 「供試体」とする) に対する気中凍結水中融解試験を実施した。耐凍害性を向上させる方法として, コンクリート内の水分の蒸発を阻害しない一方, コンクリート表面に撥水機能を付与することが可能なシラン・シロキサン系含浸材 (以下, 「シラン」とする) を塗布する方法を用いた。

供試体の条件を表 4 に示す。供試体の寸法は 100 × 100 × 400 (S1) と 100 × 85 × 400mm (S2) の 2 種類である (図 14 参照)。軌道スラブの高さ方向に対する供試体の切り出し位置は図 15 (a) の通り, 上面 (S1) と中央 (S2) とした。S1 については, 図 15 (b) に示すように軌道長手方向の 2 本の鉄筋 (D10) が供試体を横断する方向に貫通している。2 本の鉄筋は供試体の両端面からそれぞれ 80mm の位置にあり, 鉄筋のかぶりは 30mm である。S2 については, 供試体内部に軌道横断方向の鉄筋を含まないようにするため幅を 85mm とした。なお, S2 には供試体を横断する鉄筋は含まれていない。

40℃ の恒温槽に供試体を 5 日間保管して乾燥させた後, 表面含浸材を塗布しない 5 面をエポキシ樹脂でコーティングした。表面含浸材を塗布した面は実際の施工手順を想定して, S1 に対して上面, S2 に対して切断面をディスクサンダーで 1~2mm 程度研磨した面とした。No.1, 2, 4, 5 にはシランを塗布し, No.3 は無塗布とした。なお, No.2 で塗布範囲を半面としたのは, 無塗布範囲の影響を確認するためである。また, シランの塗布量は標準量 (350g/m<sup>2</sup>) を基本とし, 塗布量と耐凍害性の関係を把握するため, 標準量の約 1.5 倍となる 500g/m<sup>2</sup> を塗布した条件でも検討を行った (No.5)。な

表5 気泡組織

空気量(%)	気泡間隔係数(μm)
3.6	198

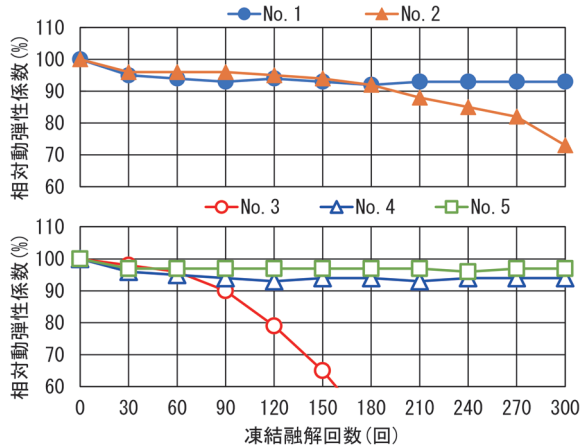


図16 気中凍結水中融解試験の結果<sup>5)</sup>

お、一度の塗布作業でコンクリートに含浸させることが可能な量として 500g/m<sup>2</sup> を設定した。

凍結融解試験の方法は気中凍結水中融解試験 (JIS A1148 (B法)) とした。表面含浸材を塗布した3日後から3日間の水中養生を行った後、凍結融解試験を開始した。

同じ軌道スラブから採取したコンクリートコア (φ100×190mm) の圧縮強度 (3本の平均) は 52.0N/mm<sup>2</sup> であり、設計基準強度である 40 N/mm<sup>2</sup> を上回っていた。また、中性化深さ (3本の最大値) は 0.4mm であり、中性化はほとんど進行していなかった。また、リニアトラバース法 (ASTM C457) に準拠して測定した気泡組織を表5に示す。一般的に耐凍害性を有していると判断される気泡組織を満足していた<sup>8)</sup>。

#### 4.2 試験結果および考察

気中凍結水中融解試験で得られた相対動弾性係数を図16に示す。

図16より、No.1、No.4およびNo.5は相対動弾性係数が低下せず、高い耐凍害性を有していることが分かった。特に、切断面の塗布量を1.5倍程度に増やしたNo.5の凍結融解回数300回における相対動弾性係数は標準量を塗布したNo.4よりも3%であるが大きくなり、軌道スラブに対して凍害の進行を遅らせる効果が高いと考えられる。上面の半分にシランを塗布したNo.2については、無塗布範囲で凍害が進行することによって、凍結融解回数180回以降で相対動弾性係数が低下した。

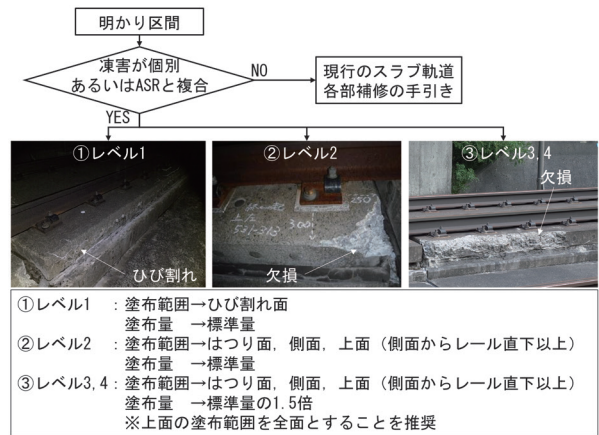


図17 シラン・シロキサン系含浸材による軌道スラブの補修範囲と塗布量

### 5. 凍害を受けた軌道スラブに対する補修方法の提案

凍害を受けた軌道スラブに対して提案する補修方法を図17に示す。提案する補修方法では、断面修復を実施せず、軌道スラブの劣化の進展を抑制することを目的として、シラン・シロキサン系含浸材を塗布することとした。凍害が個別あるいはASRと複合することで生じる劣化は、はじめに軌道スラブ側面とその周辺にひび割れが発生し、その後、軌道スラブの隅角部に欠損が生じ、次第に軌道長手方向に進展するのが一般的である。

そこで、提案する補修方法では、劣化の状態 (レベル1~4) に対応して補修方法を選定できるようにした。レベル1はひび割れが生じている状況、レベル2は隅角部、レベル3は隅角部から2締結装置未満、レベル4は隅角部から2締結装置以上の欠損が生じている状況とした。

ひび割れが生じている場合 (レベル1) は、シラン・シロキサン系含浸材をひび割れが生じている面を覆うように塗布する。隅角部 (レベル2) や2締結装置以上 (レベル2~3) の範囲に欠損が生じている場合は、欠損部のはつり面、軌道スラブの側面および上面に対してシラン・シロキサン系含浸材を塗布する。塗布量は標準の塗布量とする。さらに、レベル3以上の劣化の場合、耐凍害性のレベルが低いコンクリートが用いられている、あるいは環境条件が厳しい可能性があることから、撥水効果を高めるために塗布量を標準の1.5倍にする。軌道スラブ上面に対する塗布範囲は軌道スラブ側面からレール直下までの範囲以上とする。特に、劣化が進んでいる軌道スラブに対しては、全面に塗布することを推奨する。

## 6. まとめ

凍害を受けた軌道スラブの補修方法を提案することを目的に各種検討を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) 付着強度試験の結果、断面修復部と脆弱部を有するコンクリートの界面に対して軌道スラブ底面から吸水されることでコンクリートの脆弱部の含水率が増加し、コンクリートに凍害が生じることで断面修復材が剥落するメカニズムを示した。
- (2) 水平載荷試験の結果、タイプレート端部まで軌道スラブのコンクリートが劣化しても摩擦力によってタイプレートは滑動せず、設計上の最大荷重が作用しても耐力上の問題がないことが分かった。
- (3) 凍結融解試験の結果、耐凍害性が低い軌道スラブから切り出した供試体に対してシラン・シロキサン系含浸材を塗布することで、耐凍害性が向上することが分かった。
- (4) 以上より、断面修復は実施せず、シラン・シロキサン系含浸材を塗布することで軌道スラブの劣化の進展を抑制する補修方法を提案した。提案した補修方法には、劣化の状態に応じた含浸材の塗布範囲と塗布量を示した。

なお、本論文は文献5をもとに内容を加筆・修正したものである。

## 文 献

- 1) 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き，2021.6
- 2) 山根寛史，森山陽介：山陽新幹線における軌道スラブの変状実態調査結果，新線路，Vol.65，No.12，pp.12-14，2011.12
- 3) 高橋貴蔵，測上翔太，関根悦男，飯島亨：経年軌道スラブの劣化原因と耐力の評価，日本鉄道施設協会誌，pp.28-31，2011.4
- 4) 高橋貴蔵，北条優，高橋成汰：ポリマーセメントモルタルを用いたトンネル区間用軌道スラブの断面修復，鉄道総研報告，Vol.37，No.10，pp.15-22，2023.10
- 5) 北条優，高橋貴蔵，高橋成汰：軌道スラブ種別および劣化機構に対応した補修方法，第28回鉄道工学シンポジウム論文集，Vol.28，No.1，pp.62-94，2024.7
- 6) 日本国有鉄道：軌道工事標準示方書（総則及び新幹線新設線）軌道スラブ製作運搬工事示方書，日本鉄道施設協会，1979.8
- 7) 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，2012.1
- 8) 長谷川寿夫，藤原忠司：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 凍害，技報堂，pp.65-66，1988.2