鉄 道 総 研 報 告

特集：軌道技術

軌道スラブの動的変位に基づくてん充層の補修箇所の選定手法

高橋　貴蔵*　　渕上　翔太*

吉川　秀平*　　小滝　康陽*

A Selection Method of Repair Spot of CA Mortar Layer Based on Track Slab Displacement

Takatada TAKAHASHI　　Shota FUCHIGAMI

Shuhei KIKKAWA　　Yasuharu KOTAKI

When the supporting condition of the track slab by CA mortar layer changes, the track slab may be cracked, cause its need of repair. Because, the laid extension of the slab track is very long, the amount of necessary repair may become very large. Therefore, railway operators need to decide the priority of repair, and carry out preventive maintenance repair. Firstly, we measured the slab track state on the business line and found that the gap between track slab and CA mortar layer increased the displacement of the track slab. Next, we confirmed that as a loading test on slab track model specimens with different support conditions and an analysis by FEM, the load at which the track slab reaches a limit state becomes smaller at the gap. Furthermore, we have developed a FEM model of the slab track so that we can calculate the displacement of the track slab when it reaches the limit state. We proposed a method to select the position requiring repair based on the displacement calculated by this FEM model.

キーワード：軌道スラブ，てん充層，隙間，限界状態，変位，補修箇所

1．はじめに

山陽新幹線の岡山－博多間以降の新幹線では，高速走行に対する安全性を有し，施工速度が速く，さらに日々の保守の省力化が可能という理由により，標準的な軌道構造としてスラブ軌道が用いられている。スラブ軌道は，東北・上越新幹線において寒冷地にも敷設され，厳しい環境の中でも新幹線車両の走行を支えている。

一方で，一部の寒冷地の明かり区間では，図１に示すように軌道スラブとてん充層の界面に隙間が生じていることが確認されている。今後，隙間の範囲が拡大すると，軌道スラブに生じる応力が増加し，ひび割れ等が生じる可能性がある。しかし，列車通過時の軌道スラブの挙動は一部報告されているもの[1) 2) 3)]，隙間の状態が軌道スラブの限界状態に達する荷重に与える影響については不明な点が残されている。さらに，スラブ軌道を今後も持続させていくためには，隙間に対して，予防保全的な補修を実施していく必要があると考えられるが，補修箇所を定量的な判断に基づいて選定することができない状況であった。

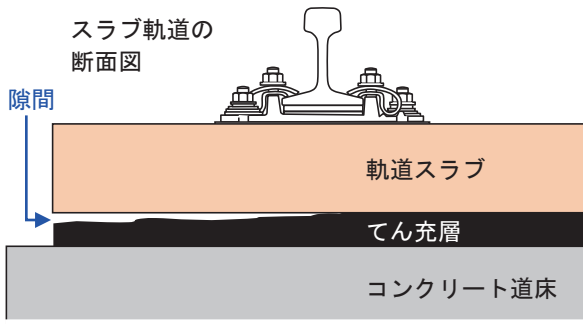

図１　軌道スラブとてん充層界面の隙間の模式図

そこで，載荷試験により隙間の状態が軌道スラブに与える影響を評価するとともに，隙間を設けたスラブ軌道の三次元有限要素解析を行った。さらに，解析によって輪重と軌道スラブ隅角部の変位の関係を算出し，軌道スラブが限界状態に達する際の変位からてん充層の補修箇所を選定する方法を提案した。

2．スラブ軌道模型供試体の載荷試験[4) 5)]

2.1　載荷試験の目的

寒冷地に敷設されているスラブ軌道で軌道スラブの隅角部の変位を測定した結果，2.5mm の動的な変位が確認されている[3)]。この変位は隙間が原因で生じていると考えられる。隙間の大きさや範囲によっては，軌道スラブに生じる曲げモーメントが増加し，健全なてん充層で支持しているよりも小さな荷重で限界状態に達する可能性がある。

そこで，スラブ軌道の一部を模擬した鉄筋コンクリート梁をてん充層で支持した模型供試体の載荷試験を行

＊　軌道技術研究部　軌道・路盤研究室

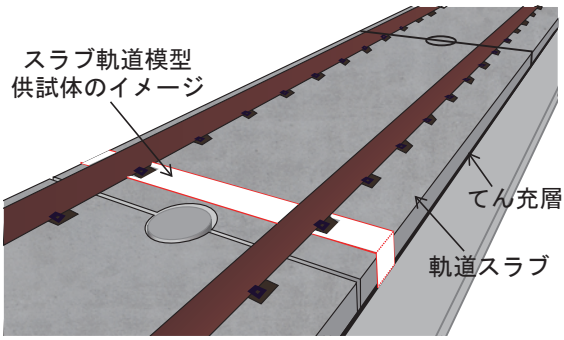

図２　スラブ軌道模型供試体のイメージ

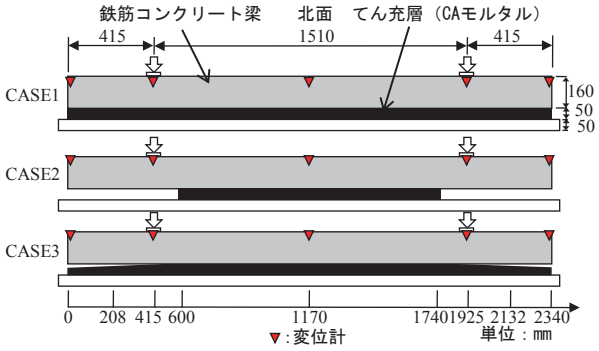

図３　スラブ軌道模型供試体の形状とセンサ位置

表１　てん充層の厚さの設定値

試験ケース	てん充層の厚さ
CASE1（健全）	・全面：50mm
CASE2（欠損）	・両端 600mm を除く範囲：50mm ・その他の範囲：0mm
CASE3（隙間）	・両端 600mm を除く範囲：50mm ・両端から 600mm の範囲：軌間外に向けて 50mm から 40mm に傾斜

い，軌道スラブが限界状態に達する荷重に対するてん充層の支持状態の影響について検討した。

2.2　試験方法

2.2.1　供試体および試験ケース

本試験に用いたスラブ軌道模型供試体は，図 2 に示すようにスラブ軌道の端部の 1 締結分をレール直角方向に切り出した形状とした。このような形状としたのは，試験装置の最大載荷荷重 600kN で軌道スラブの終局状態までを評価することを目的としたためである。スラブ軌道模型供試体は，図 3 および表 1 に示す 3 ケースとした。CASE1 はてん充層が健全な状態，CASE2 はてん充層の

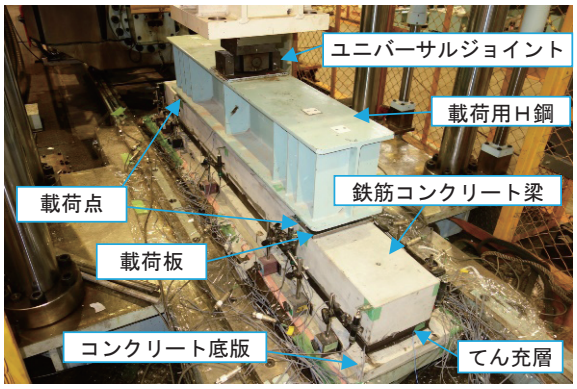

図５　スラブ軌道模型供試体の載荷状況

両端から 600mm の範囲を欠損させた状態，CASE3 は CASE2 と同じ範囲に隙間を設けた状態である。ここで，欠損および隙間の範囲を両端から 600mm としたのは，一部の営業線におけるスラブ軌道のてん充層では端部において 600mm 以上の劣化が確認されたためである[6)]。

スラブ軌道模型供試体に用いた鉄筋コンクリート梁の配筋図を図 4 に示す。寸法は高さ 160 ×幅 250 ×長さ 2340mm とし，軸方向鉄筋には D13（SD345）を用い，上側および下側に 2 本ずつ配筋し，それぞれのかぶりを 30mm および 20mm とした。鉄筋コンクリート梁の高さと長さは，新幹線で用いられている軌道スラブの高さとレール直角方向の幅と同じである。また，かぶりや鉄筋比も軌道スラブに合わせている。コンクリートの設計基準強度は 40N/mm^2 とした。てん充層には，補修用の CA モルタルを用いた。なお，φ 50 × 100mm の CA モルタル円柱供試体に対して変位速度 0.5mm/min で行った圧縮強度試験の結果，圧縮強度は 6.2N/mm^2 となった。

2.2.2　載荷方法

スラブ軌道模型供試体に対する載荷試験では，幅 145mm ×厚さ 190mm ×奥行き 250mm の載荷板を介して，図 3 に示したように供試体両端から 415mm の位置に対して載荷を行った。載荷状況を図 5 に示す。載荷点の間隔は新幹線におけるレール中心間距離と等しい 1510mm とし，載荷板の幅はレール底部幅に合わせた。荷重は単調載荷とし，鉄筋コンクリート梁が破壊するまで，あるいは試験装置の容量の上限である 600kN まで加力した。

2.2.3　測定項目

載荷試験の測定項目は載荷荷重，鉄筋コンクリート梁の鉛直変位であり，変位計の設置位置は図 3 に示した通りである。変位計は鉄筋コンクリート梁の両側面に設置

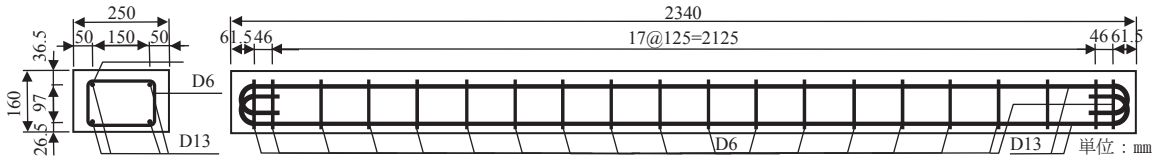

図４　スラブ軌道の一部を模した鉄筋コンクリート梁の寸法および配筋図

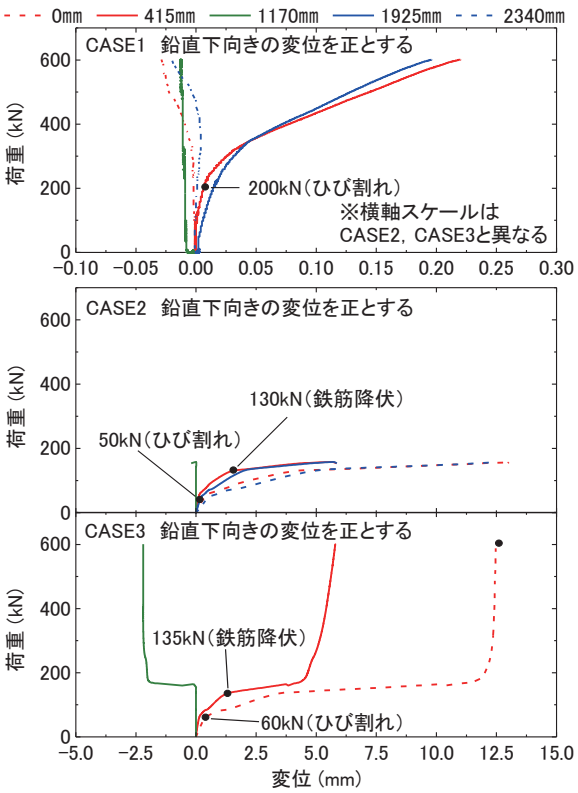

図６　荷重 - 変位関係

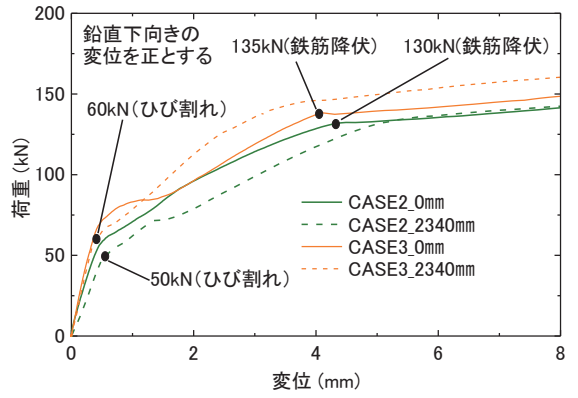

図７　CASE2 および CASE3 の荷重 - 変位関係の拡大図

し，同じ位置における値を平均した。荷重は試験装置のロードセルで測定した。

2.3　試験結果

スラブ軌道模型供試体に対する載荷試験によって得られた荷重 - 変位関係を図 6 および図 7 に示す。なお，図 7 は CASE2 および CASE3 に対する荷重 - 変位関係の拡大図である。また，図 8 は載荷試験終了後における鉄筋コンクリート梁に生じたひび割れの状況であり，赤太線は初期ひび割れである。

CASE1 は載荷点直下の下縁側のみにひび割れが発生した。ひび割れの発生荷重は約 200kN であり，その後 600kN まで荷重を増加したが，他の個所にひび割れは

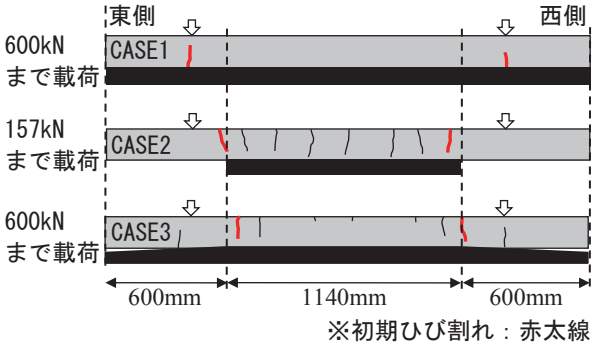

図８　載荷終了後のひび割れ状況

表２　鉄筋コンクリート梁が各種耐力に達する荷重

	初期ひび割れ発生荷重	鉄筋降伏荷重	曲げ破壊荷重
CASE1	約 200kN（下側）	降伏なし	600kN 以上
CASE2	約 50kN（上側）	約 130kN（上側）	157kN
CASE3	約 60kN（上側）	約 135kN（上側）	600kN 以上

発生せず，鉄筋の降伏や曲げ破壊も生じなかった。

CASE2 は両端から 600mm の上縁側に初期ひび割れが発生した。図 7 より，初期ひび割れの発生荷重は 50kN 程度であり，その後荷重の増加とともにひび割れが中央部に分散し，130kN 程度で上側の鉄筋が降伏した。最終的には 157kN で曲げ破壊が生じた。破壊した位置は初期ひび割れの発生位置と同じであった。

CASE3 は CASE2 と同様に両端から 600mm の上縁側に初期ひび割れが発生した。図 7 より，初期ひび割れの発生荷重は 60kN 程度であり，その後荷重の増加とともにひび割れが中央部に分散し，135kN 程度で上側の鉄筋が降伏した。CASE3 の荷重と変位の関係は約 135kN までは CASE2 と同様であったが，約 135kN 以後は隙間が生じていた箇所の鉄筋コンクリート梁の底面がてん充層に接触し，下向きの変位の増加が小さくなった。載荷点直下の下縁側から生じたひび割れは，鉄筋コンクリート梁の底面がてん充層に接触した後に発生し，600kN まで載荷したが下側の鉄筋は降伏せず，曲げ破壊も生じなかった。

以上の結果より，CASE1 ～ CASE3 の鉄筋コンクリート梁が各種曲げ耐力に達する荷重を整理すると，表 2 に示す通り，てん充層の支持状態によって異なることを確認した。てん充層の隙間についても鉄筋コンクリート梁の各種曲げ耐力に影響を与えており，軌道スラブの限界状態を評価するためには，隙間を適切にモデル化した解析モデルを用いる必要があると考えられる。

2.4　載荷試験結果のシミュレーション

てん充層による支持状態が異なる軌道スラブが各種曲げ耐力に達する荷重を評価することを目的として，前

表３　コンクリートおよび CA モルタルの材料諸元

	圧縮強度※ N/mm²	引張強度 N/mm²	ヤング率 kN/mm²
コンクリート	49.1	3.11	35.0
CA モルタル	6.2	1.09	2.9

※実験値

表４　鉄筋の材料諸元

種別	用途	鋼種	降伏強度 N/mm²	ヤング率 kN/mm²
D13	軸方向鉄筋	SD345	379※	194※
D6	スターラップ	SD345	345	200

※実験値

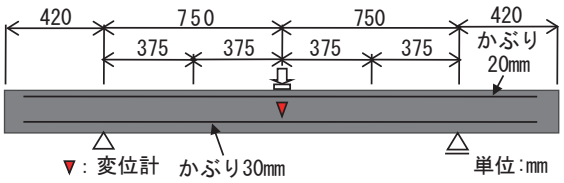

図９　曲げ載荷試験のセンサ位置

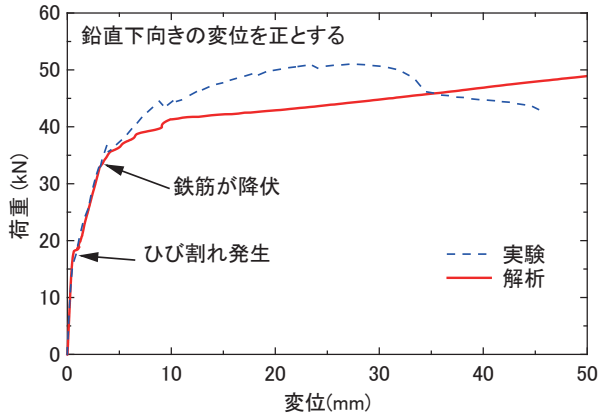

図 10　鉄筋コンクリート梁の荷重 - 変位関係

述したスラブ軌道模型供試体に対する載荷試験をシミュレートすることが可能な解析モデルを構築した。解析には汎用構造解析ソフトウェア LS-DYNA を用いた。解析に用いた材料諸元は表 3 および表 4 のとおりである。

はじめに，鉄筋コンクリート梁の解析モデルを作成するため，図 9 に示す支点間距離 1500mm，せん断スパン 750mm とする鉄筋コンクリート梁の 3 点曲げ載荷試験結果のシミュレーションを実施した。コンクリートは 6 面体ソリッド要素，鉄筋はビーム要素とした。鉄筋とコンクリートは完全付着とした。コンクリートには LS-DYNA に搭載されているひび割れ進展を模擬することが可能な Winfrith モデル，鉄筋には塑性硬化係数をヤング率の 1/100 とする弾塑性モデルを用いた。図 10 に荷重 - 中央変位関係を示す。解析値の最大荷重は実験値とやや異なるものの，ひび割れが発生し，鉄筋が降伏する荷重と変位は，解析値と試験結果がおおむね等しくなることを確認した。

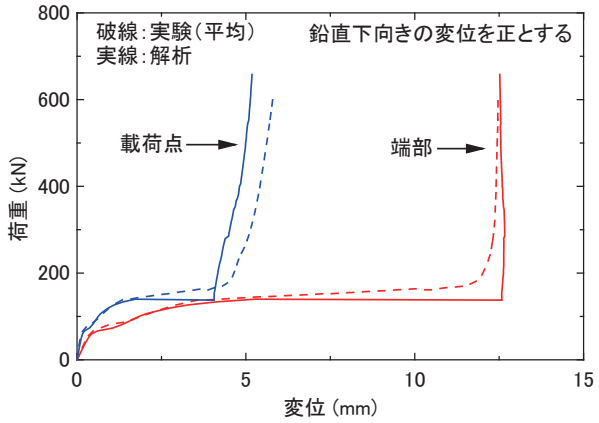

図 11　CASE3 の荷重 - 変位関係

表５　CASE3 に対する試験結果と解析結果の比較

		試験結果	解析結果
初期ひび割れ	荷重	約 60kN	60.0kN
	端部変位	0.39mm	0.44mm
鉄筋降伏	荷重	約 135kN	140.0kN
	端部変位	3.42mm	5.27mm

次に，てん充層に隙間を設けた CASE3 に対して解析を行った。鉄筋コンクリート梁は前述した解析モデルを用い，てん充層には両端部から 600mm の範囲に隙間を設けた。CASE3 の載荷試験で設定した隙間は表 1 に示したように端部で 10mm を目標としたものの，スラブ軌道模型供試体を作製する際の施工誤差により試験結果としては図 6 に示したように 12.5mm の変位が確認された。そのため，解析モデルでは端部の隙間を 12.5mm とした。

解析によって得られた CASE3 の荷重 - 変位関係を載荷試験の結果とともに図 11 に，初期ひび割れと鉄筋が降伏する際の荷重と変位を表 5 に示す。てん充層による軌道スラブの支持状態を適切にモデル化することで，試験値と解析値はほぼ等しくなることを確認した。

３．スラブ軌道の解析モデルの構築

スラブ軌道の解析モデルを構築するにあたり，温暖地用の RC 構造と寒冷地用の PRC 構造について検討を行った。RC 構造においてはひび割れ幅あるいは鉄筋の降伏や疲労破壊を補修用の限界状態として設定することが考えられるため，コンクリートのひび割れ進展を考慮可能な非線形モデルとした。PRC 構造においてはひび割れの発生の有無あるいはコンクリートの疲労破壊を補修用の限界状態として設定することが考えられるため，線形モデルとした。

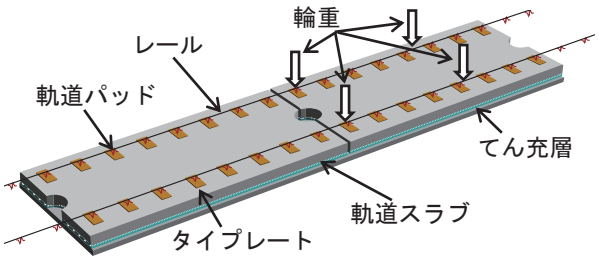

図 12　RC 構造の軌道スラブを対象とした解析モデル

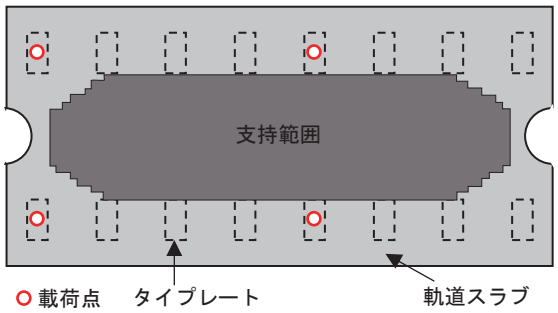

図 13　てん充層による RC 構造の軌道スラブの支持状態

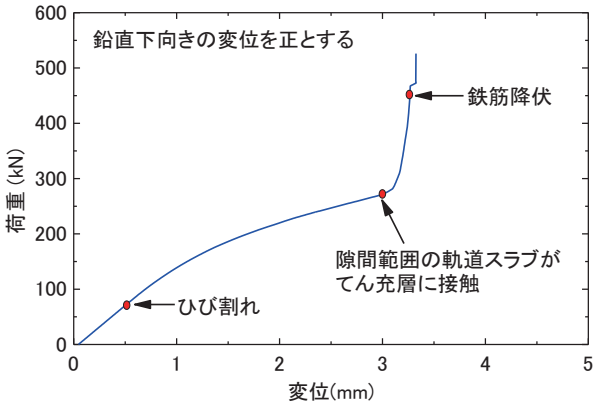

図 14　解析による荷重 - 変位関係

3. 1　RC 構造の軌道スラブ

載荷試験のシミュレーションに基づいた RC 構造の軌道スラブを用いたスラブ軌道の解析モデルを図 12 に示す。解析には LS-DYNA を用い，材料モデルは 2.4 節と同じである。解析モデルの延長は軌道スラブ 4 枚分としたが，両端の軌道スラブ 2 枚分についてはタイプレートの底部を完全固定とし，軌道スラブはモデル化しなかった。解析モデルでは，軌道パッドのばね係数を 60kN/mm，レールの種別を 60kg レール，レール締結装置の間隔を 625mm とした。軌道スラブの形状と配筋は実際の RC 構造の軌道スラブと同じとし，厚さ 160mm × 長さ 4930mm × 幅 2340mm とした。てん充層の厚さは 50mm とした。なお，軌道スラブの側面からの隙間の範囲が図 3 に示した CASE3 と同じ 600mm となるように図 13 に示す範囲の軌道スラブをてん充層で支持するものとし，支持範囲よりも外側の範囲に隙間を設けた。隙間の高さの最大値は軌道スラブの外周部において 3mm とし，支持範囲から外周部の間には直線勾配で隙間を設けた。荷重は図 12 に示した箇所に与えた。

解析で得られた荷重 - 変位関係を図 14 に，初期ひび割れの発生位置および鉄筋の降伏位置を図 15 に示す。なお，変位の評価位置は最大変位が生じた軌道スラブの隅角部である。本条件で軌道スラブにひび割れと鉄筋の降伏が生じる輪重は，表 6 に示すようにそれぞれ 69kN および 455kN となり，これらの輪重は 100% 乗車時の静止輪重を 56kN [7] とした場合の 1.23 倍および 8.13 倍であった。

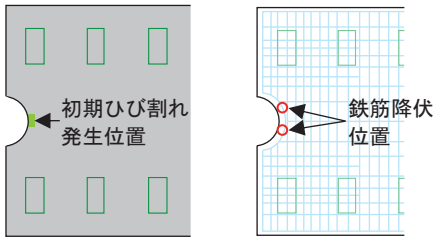

図 15　解析による初期ひび割れ・鉄筋降伏位置

表 6　RC 構造の軌道スラブの解析結果

		解析結果	静止輪重との比※
初期ひび割れ	輪重	69kN	1.23
	変位	0.49mm	—
鉄筋降伏	輪重	455kN	8.13
	変位	3.27mm	—

※静止輪重：56kN

3. 2　PRC 構造の軌道スラブ

寒冷地の明かり区間で使用されている PRC 構造の軌道スラブは，通常の使用状態においてひび割れが開口しないように制御することによって，耐凍害性を向上させている。したがって，PRC 構造の軌道スラブに対する補修用の限界状態としてはコンクリートのひび割れの発生の有無を対象とする必要がある。そこで，PRC 構造の軌道スラブの解析は汎用構造解析ソフトウェア NASTRAN により行い，材料は線形弾性体とした。スラブ軌道の解析モデルは図 12 とほぼ等しく，軌道スラブの厚さのみが異なっている。軌道スラブの形状は，実際の PRC 構造の軌道スラブと同じとし，厚さ 190mm × 長さ 4930mm × 幅 2340mm とした。ただし，鉄筋および PC 鋼棒はモデル化していない。荷重は図 12 に示している箇所に静止輪重と同じ 56kN [7] を与えた。軌道部材および材料諸元は表 3 および表 4 と同じとした。てん充層の厚さは 50mm とした。なお，現地で確認された軌道スラブ隅角部の動的な変位は 2.5mm であり [3]，図 13 に示した軌道スラブの支持範囲ではこの変位は生じない。そこで，2.5mm 以上の変位が生じるように図 16 に示す範

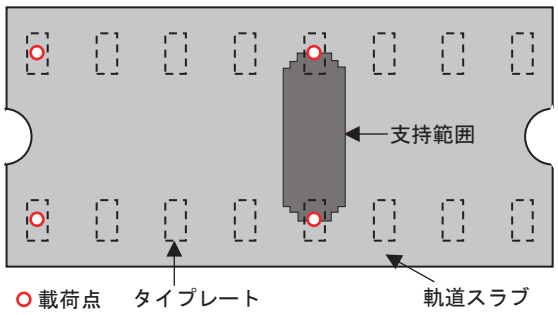

図 16　てん充層による PRC 構造の軌道スラブの支持状態

表 7　PRC 構造の軌道スラブの解析結果

	変位	応力	合成応力
輪重 56kN	3.03mm	3.63N/mm^2	2.73N/mm^2

※有効プレストレス：-0.9N/mm^2

囲の軌道スラブをてん充層で支持するものとし，支持範囲よりも外側の範囲に隙間を設けた。隙間の高さの最大値は軌道スラブの外周部において 3mm とし，支持範囲から外周部の間には直線勾配で隙間を設けた。

解析で得られた軌道スラブ隅角部の変位と線路長手方向の応力を表 7 に示す。なお，表 7 には軌道スラブの設計で考慮した有効プレストレス[8)] である -0.9N/mm^2 を考慮した合成応力も示している。軌道スラブ隅角部の変位は 3.03mm であり，図 16 の条件では現地で確認された変位である 2.5mm よりも 0.5mm 程度大きな値となった。この際の合成応力は 2.73N/mm^2 となり，表 3 に示したコンクリートの引張強度よりも小さいことを確認した。

4．補修箇所の選定手法の提案

スラブ軌道のてん充層に対する補修箇所を選定する手順を以下に示す。

①供用中の軌道スラブに対して維持管理上の限界値を設定する。②てん充層の支持状態をモデル化したスラブ軌道解析モデルを構築する。③列車荷重を載荷し，限界状態に達しているか評価する。④限界状態に達していない場合，支持状態の変更と限界状態の評価を繰り返す。⑤限界状態に達した際の軌道スラブの隅角部変位を記録する。⑥記録した変位に達する軌道スラブを営業線から選定し，補修対象の候補とする。

ここで，RC 構造の軌道スラブに対する維持管理上の限界値としては，例えばコンクリートのひび割れ幅あるいは鉄筋の疲労破壊や降伏を対象とすることが考えられる。なお，スラブ軌道各部補修の手引きでは，0.1mm 以上のひび割れに対して補修することとしている[9)]。

PRC 構造の軌道スラブに対する維持管理上の限界値としては，例えばコンクリートの応力度を対象とすることが考えられる。PRC 構造の軌道スラブは通常の列車荷重に対してコンクリートに引張応力が生じないように設計されているためである。ひび割れの開口を想定する場合は，維持管理上の限界値として鉄筋の応力度を 100N/mm^2 とすることが考えられる。この値は設計において損傷に関する使用性の照査に用いられる制限値と同じである。

5．おわりに

スラブ軌道模型供試体に対する載荷試験に基づいたスラブ軌道の解析モデルを用いて軌道スラブに対する維持管理上の限界値を評価し，その際の軌道スラブ隅角部の変位を用いて補修箇所を選定する方法を提案した。今後は，補修が必要な変位の基準の具体的な数値を提案する予定である。

文　献

1）輪田朝亮：新幹線軌道スラブに作用する応力に関する調査，鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp.175-178，2009
2）渕上翔太，高橋貴蔵，吉川秀平，桃谷尚嗣：高流動 CA ミルクを適用したスラブ軌道てん充層隙間注入補修に関する研究，鉄道工学シンポジウム論文集，Vol.20，pp.119-124，2016
3）吉川秀平，高橋貴蔵，小滝康陽：軌道スラブ下に隙間が生じたスラブ軌道の挙動特性把握，土木学会年次学術講演会概要集，Vol.72，pp.929-930，2017
4）高橋貴蔵，吉川秀平，桃谷尚嗣，渕上翔太：底面支持された鉄筋コンクリート梁の耐力に関する基礎的研究，コンクリート工学論文集，Vol.39，No.2，pp.506-510，2017
5）高橋貴蔵，吉川秀平，渕上翔太，小滝康陽：スラブ軌道てん充層に生じる圧縮ひずみに関する研究，鉄道工学シンポジウム論文集，Vol.21，pp.197-204，2017
6）渕上翔太，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
7）鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，丸善，pp.482-494，2004.
8）寺島優：東北新幹線用軌道スラブの設計，構造物設計資料，No.51，pp.20-25，1977
9）鉄道総合技術研究所：スラブ軌道各部補修の手引き，p.60，2015