# 論文 てん充層の劣化状態が軌道スラブの応答 に与える影響に関する基礎的研究

高橋 貴蔵1・小滝 康陽2・渕上 翔太3・板倉 真理佳4

 <sup>1</sup>正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道·路盤 (〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目 8-38)
 E-mail:takahashi.takatada.80@rtri.or.jp

<sup>2</sup>正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道·路盤(同上) E-mail: kotaki.yasuharu.40@rtri.or.jp

<sup>3</sup>正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道·路盤(同上) E-mail: fuchigami.shota.84@rtri.or.jp

<sup>4</sup>正会員 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター テクニカルセンター 線路構造グループ

(〒331-8513 埼玉県さいたま市北区日進町二丁目 479 番地) E-mail: marika-itakura@jreast.co.jp

スラブ軌道の一部では軌道スラブとてん充層の境界に隙間が生じている場合がある.このような隙間が 生じると列車荷重等によって軌道スラブの変位やひずみが増加すると考えられるが、てん充層の劣化状態 が軌道スラブの応答に与える影響については不明な点も多く残されている.そこで、本研究において隙間 が生じているてん充層で支持されている軌道スラブの変位とひずみを測定した結果、列車の通過で生じる 軌道スラブの変位量は隙間の範囲によって異なることを確認した.また、軌道スラブ表面の温度変化によ って軌道スラブにはそりが生じるものの、1日を通して軌道スラブの変位振幅とひずみとの間に強い相関 があることを明らかにした.

Key Words: slab track, track slab, CA mortar, gap, displacement, strain

#### 1. はじめに

A形スラブ軌道における軌道スラブの設計では、底面 がてん充層によって均一に支持されているものとしてい る <sup>1</sup>. しかし、新幹線の一部のスラブ軌道では、てん充 層に用いている CA モルタルに劣化が生じ、軌道スラブ とてん充層の境界に隙間が生じている <sup>2</sup>. 支持状態が変 化することによって軌道スラブに生じる応力は増加し、 設計で想定していたよりも小さな荷重で限界値に達する 可能性がある <sup>3</sup>. したがって、隙間が生じているてん充 層で支持されている軌道スラブの変位やひずみを測定し、 支持状態の影響を評価することはスラブ軌道の維持管理 を行う上で重要と考えられる.

既往の研究では、スラブ軌道供試体に対する載荷試験 を恒温室内で行っており、温度が上昇した場合に軌道ス ラブは上側に凸の形状に変形し、支持状態が変化するこ とによって、荷重による変形や応力も変動することが確 認されている<sup>4</sup>.また、営業線において軌道スラブの端 部に生じるレール直角方向のひずみ(応力)および近傍 の鉛直変位を測定しており、応力と変位は温度の影響を 受けることを確認し、応力は変形量の影響を受けている と推定している<sup>9</sup>.

以上の結果を踏まえ、本研究では、軌道スラブの限界 状態に影響を与えるような隙間が生じているスラブ軌道 を抽出する新しい手法を開発することを想定し、てん充 層の劣化状態が軌道スラブの応答に与える影響を明らか にすることを目的として、てん充層と軌道スラブの境界 部に隙間が生じている営業線のスラブ軌道で軌道スラブ の変位とひずみを測定した結果について報告する.

## 2. 軌道スラブの測定

#### (1) 測定対象となる軌道スラブ

本測定では、てん充層の補修が行われておらず、列車 の通過によって動的な変位が生じる軌道スラブを対象と



図-1 測定対象の軌道スラブ

R	26	1	and a	Rő			I	24	R3			R2	-	6-513		R1
		53	59	59	<b>1</b> 29	59	<b>5</b> 9	59	59	<b>5</b> 3	59	<b>C</b> 1	<b>6</b> 7	<b>5</b> 9	59	
0	Ce	3					C4			3	-		行方	句	C1	
14440		59		59	58	59	59	58	1	53	619	53		59	100	
	_			-				-	-			-		-	-	_

■ : CDP-25 ■: CE-10

図-2 変位計の設置位置



し、東北新幹線の下り線における直線区間に連続して敷設されている図-1に示す2枚の軌道スラブを対象とした。2枚の軌道スラブに対して列車進行方向の手前側からスラブA、スラブBとする。下り線に敷設されている軌道スラブを対象としたのは、計画的な補修に向けた維持管理を実施する中で、下り線側にある高架橋内通路から目視によって列車通過時の軌道スラブの変位とてん充層の補修状況を確認できたためである。

#### (2) 測定項目

2 枚の軌道スラブに対して変位計およびひずみゲージ の設置を行った.変位計の設置位置を図-2に,ひずみゲ ージの設置位置を図-3に示す.

軌道スラブの側面の変位は高感度変位計(分解能 0.002mm)で、また両端の軌間中央の突起部の変位はカ ンチレバー型変位計(分解能 0.002mm)で測定した.1 枚の軌道スラブに対して変位の測定位置は8箇所である.





(a) 線路直角方向のひずみ (b) 線 いっついずみ 図-4 てん充層による軌道スラブの支持範囲の想定



図-5 各種センサの設置状況 高感度変位計は軌道スラブの側面に設置したL型鋼をタ

ーゲットとし、高感度変位計の先端を10mm程度押し込んだ位置でコンクリート道床に固定した.カンチレバー 型変位計は軌道スラブ表面にエポキシ樹脂で固定したガ ラス板をターゲットとし、カンチレバー型変位計を 3mm程度押し込んだ位置で突起に固定した.これらの 変位計の押し込み量は事前の目視によって想定した変位 量と温度変化による軌道スラブのそりを考慮して定めた.

軌道スラブ表面のひずみはひずみゲージ(ゲージ長 60mm) で測定した. ひずみの測定はスラブ A に対して行 い,10枚のひずみゲージを貼り付けた.軌道スラブの ひずみはてん充層による支持状態の影響を受けると考え られる. そのため、外周部から内部に向けて隙間が広が っているとすれば、てん充層によって軌道スラブを支持 している箇所がたわみの支点となり、大きなひずみが生 じると考えられる. 突起部の周囲に設置したひずみゲー ジ SC1, SC2, SC3 は、図-4(a)に示すようなてん充層に よる軌道スラブの支持状態を想定し、線路直角方向のひ ずみを対象としている. ひずみゲージ SL1~SL7 は、図-4(b)に示すようなてん充層による軌道スラブの支持状態 を想定し、線路長手方向のひずみを対象としている.図 -3に示すようにひずみゲージの貼付け位置を分布させた のは、てん充層による軌道スラブの支持範囲が不明なた めである.ひずみゲージの貼り付け後、2種類のブチル ゴム系感圧型テープでコーティングした.

軌道スラブの表面の温度を測定するため、スラブAの 表面中央に K 熱電対を設置した.また、スラブAとそ の手前の軌道スラブとの境界部に位置する左レールの底 部上面に1枚のひずみゲージ(ゲージ長3mm)を貼り付 けた.

各種センサの設置状況は図-5に示すとおりである.こ こで、列車通過時には高架橋の振動が生じるが、測定し た変位は高架橋と一体となっているコンクリート道床や 突起との相対変位のため、列車通過時の高架橋の振動が 測定値に与える影響は少ないものと考えられる.各種セ ンサのケーブル類は列車通過時の風圧で飛ばされないよ うに、あと施工アンカーで高架橋に固定したアイボルト 等に結束した.

#### (3) 測定時期および測定方法

各種センサを設置した翌日である2017年9月27日(曇時々晴)に変位,ひずみおよび温度を測定した.測定箇所を通過した列車本数は79本であり,全列車通過時に 測定を行った.列車が通過した時間は6時48分から23時1分であった.

··· C3 - - - R3 0 0 1 1 2 2 257km/h  $07 \cdot 1^{-1}$ ٥ n 1 1 (mm) (mm) 257 km/h 257 km/h 2 2 资 1 (1) (1) 匂 0 炙 1 1 2 2 16.54 16.54 250km 0 0 MORN CAPACITAL CAL WW 1 1 2 22:22 2 22:22 273km/h 273km/h 4.5 5.0 5.5 6.0 6.5 7.0 7.5 8.0 8.5 9.0 4.5 5.0 5.5 6.0 6.5 7.0 7.5 8.0 8.5 9.0 時間 (sec) 時間 (sec) スラブ Aの起点方 (b) スラブ Aの終点方 (a) 1 4 ..... C4 R4 L6 · - C6 -R6 0 0 2 1 257 km/h 2 4 257km/h 07:17 .07:17 0 0 min 2 1 (mm) (mm) 257 km/h 257 km/l 2 4 泊 0 数 1 口 0 刻 2 1 2 4 16:54 250km/h 16:54 250km/ł 0 0 2 1 2 4 22:22 22:22 273km/h 273km/h 4.5 5.0 5.5 6.0 6.5 7.0 7.5 8.0 8.5 9.0 4.5 5.0 5.5 6.0 6.5 7.0 7.5 8.0 8.5 9.0 時間 (sec) 時間 (sec) スラブ B の起点方 スラブ Bの終点方 (c) (d)



変位およびひずみの測定は、動ひずみ計を介して、レ コーディングユニットのプリトリガを用いて行った.サ ンプリング周波数を1kHz、プリトリガを5秒、記録時間 を20秒とした.6時40分における変位とひずみの値を 初期値とした.トリガにはレールのひずみを用いた.温 度は初列車通過前から1分ごとに熱電対データロガーで 測定した.

#### (4) 軌道スラブ-てん充層境界部の隙間範囲の測定

てん充層による軌道スラブの支持状態を確認するため, スラブ軌道の側面から軌道スラブとてん充層の境界部に 生じている隙間の深さを測定した.隙間の測定には角を 丸めた幅 50mm×厚さ 0.5mmのステンレス製の薄板を用



図-6 厚さ0.5mm以上の隙間の範囲



い,側面からの挿入深さを厚さ0.5mm以上の隙間の範囲 とした.隙間に挿入する薄板の厚さは薄いほど良いもの の,折れ曲がらずに挿入する必要があることから,現地 にて事前確認を行い,本測定では0.5mmの薄板を用いる こととした.隙間の測定は2017年9月21日の0~3時頃 に行い,気象庁データに基づく郡山の同時間帯の平均気 温は17℃であり,CAモルタルの温度は16℃であった. なお,変位等の測定を行った日の同時間帯の平均気温は 167℃であり,隙間範囲の測定時とおおむね等しかった.

隙間の測定はスラブAおよびスラブBの両側面に対し て行った.測定箇所は軌道スラブの両端部,レール締結 装置部,両端から1番目と2番目のレール締結装置の中 間部とし,1側面当たり12箇所とした.

#### 3. 測定結果と考察

#### (1) 隙間の範囲

厚さ0.5mmの薄板で測定した隙間の範囲を図-6に示す. 0.5mm 以上の厚さの隙間は軌道スラブの隅角部の周辺に 生じていた.特に,範囲の広い隙間は,列車進行方向に 対してスラブAでは左奥,スラブBでは右奥の隅角部で 生じていた.

てん充層が劣化した場合,てん充層の側面から深さ 100mm 程度までを除去し,その範囲を補修材で跡埋め する「額縁補修」が行われる.スラブAおよびBを支持 するてん充層では既設の CA モルタルが確認されたこと から,額縁補修は行われていないものと考えられる.

#### (2) 軌道スラブの変位

軌道スラブの変位の測定結果の例として,7時,12時, 17時および22時頃に通過した速度250~270km/hの10両 編成の列車によって生じたスラブAおよびBに対する両 端部の変位と時間の関係を図-7に,両側面中央部の変位 と時間の関係を図-8に示す.これらの図中には通過時刻 と速度を示してあり,鉛直下向きを正とした.列車速度 は先頭台車通過時のレールひずみのピーク時間と軸距 2.5mから算出した.

図-7 より、列車が通過する前の時間 4.5 秒における変位(以下、「静的変位」とする)に着目すると、7 時および 17時頃は全ての測定点で 0mm 程度であるのに対して、12 時頃は沈下側に、また 22 時頃は上昇側にシフトした.そこで、軌道スラブ隅角部の変位の変化を確認するため、図-9に示すように軌道スラブ隅角部の変位と時刻の関係を整理した.ここで、図-9の下段は先頭軸に対する変位振幅(以下、「動的変位」とする)、中段は静的変位、上段は静的変位と動的変位を合わせた変位(以下、「最大変位」とする)である.



各軌道スラブともに,最大変位は 12 時頃に向けて増加し,その後減少した.この傾向は静的変位でも同様である.図-10 に静的変位と温度の関係を示す.各軌道スラブともに静的変位は温度との相関が高かった.特に隅角部の4点の静的変位と温度の関係に対する傾きは大きく,静的変位に与える温度の影響が大きいことを確認し



図-11 動的変位と隙間の深さの関係

た.したがって、12 時頃に向けて増加し、その後減少 する最大変位の変動は温度の影響によるものと考えられ る.一方で、動的変位は逆の傾向を示し、12 時頃に向 けて減少し、その後に増加した.12 時頃に動的変位が 減少したのは、隅角部の変位が温度変化によって鉛直下 向きに変位し、隙間の範囲が狭くなったためと考えられ る.

最大変位の中で最も大きな値を示したのは、スラブ A では L3、スラブ B では R6 であった.これは、動的変位 でも同様である.静的変位については隅角部の位置によ らず同程度の値であった.図-11 に動的変位と隙間の深 さの関係を示す.図中の動的変位は全列車の平均値であ り、隙間の深さは変位を測定した隅角部近傍のレール締 結装置部での測定値である.図-11 より、動的変位は隙



図-12 動的変位と列車速度の関係



間が深いほど大きくなることを確認した.次に,動的変 位が大きいL3とR6に対する動的変位と列車速度の関係 を図-12に示す.図中の線形近似曲線の通り列車速度に 対する動的変位の増加量は 0.002mm/(km/h)程度とわずか であった.したがって,速度の増加に伴う輪重変動の増 加が軌道スラブの動的変位に与える影響は小さいことか ら,L3とR6の最大変位が大きいのは,隙間の範囲の影 響によるものと考えられる.

図-8より、軌道スラブの両側面の中央部における列車 通過時の変位振幅は小さく、スラブBのR5の0.35mm程 度が最も大きかった. L2, R2, L5およびR5の静的変位 は12時頃にわずかに沈下側にシフトし、その中でR5が 最もシフト量が大きかった. R5の変位振幅と静的変位 が大きいのは、R5~R6の周囲に広がっている隙間の範囲 が広いためと考えられる.

### (3) 軌道スラブのひずみ

1日間の測定におけるひずみの範囲を図-13に示す.こ こで、図-13に示す静的ひずみは列車が通過する前であ る時間4.5秒におけるひずみであり、動的ひずみはL3の 変位が最大となる時のひずみである.また、最大ひずみ



図-14 軌道スラブ上面のひずみ波形



図-15 軌道スラブのひずみと時刻の関係

は静的ひずみと動的ひずみを合わせたひずみである.

最大ひずみが最も大きいのは線路直角方向が SC2 で、 線路長手方向は SL7 であった. SC2 の最大ひずみに与え る影響が大きいのは  $50 \times 10^6$ 程度まで達する静的ひずみ であり、SL7 については  $60 \times 10^6$ 程度まで達する動的ひ ずみであった.

そこで、SC2 と SL7 のひずみの挙動を確認するため、 図-14 に時間とひずみの関係を示す. SC2 の動的ひずみ は非常に小さく、静的ひずみは 17 時頃に引張側 (25× 10<sup>6</sup>) ヘシフトした.一方、SL7の動的ひずみはSC2より も大きく、静的ひずみは 12 時頃に圧縮側 (-63×10<sup>6</sup>) へ 比較的に大きくシフトした.

軌道スラブの最大ひずみの変化を確認するため、各方 向の最大ひずみが最も大きい SC2 と SL7 に対するひずみ と時刻の関係を図-15 に示す.ここで、図-15 の上段は最 大ひずみ、中段は静的ひずみ、下段は動的ひずみである. SC2 の最大ひずみは15時頃に向けて増加し、その後減少 した.SL7 は 12 時頃に向けて減少し、その後 18 時頃に 向けて増加した後に、再度わずかに減少した.これらの



図-16 動的ひずみと動的変位の関係

傾向は静的ひずみも同様であった.

長手方向の SL7 の静的ひずみが 12 時頃に圧縮となっ たのは、温度変化や収縮等による自由な軌道スラブの変 形が自重や摩擦によって拘束されることで軸拘束応力、 内部拘束応力および曲げ拘束応力が生じたためと考えら れるが、今後さらなる検討が必要である<sup>9</sup>.

SC2 の動的ひずみについては変化が小さく、一日を通 して 25×10<sup>6</sup>程度であり、SL7 は 30×10<sup>6</sup>~70×10<sup>6</sup>程度 の範囲で変化した. SL7 の動的ひずみが測定した中で最 も大きいことから、隙間は SL7 を貼り付けた付近まで広 がっているものと想定される.また、SC2 の動的ひずみ が一日を通して変動していないことから、列車荷重が作 用しても軌道スラブの端部側の隙間は閉じなかったもの と考えられる.

なお、軌道スラブに用いるコンクリートの設計基準強 度は 40N/mm<sup>2</sup>であり、ヤング率と引張強度はそれぞれ 31kN/mm<sup>2</sup>と 3.14N/mm<sup>2</sup>となる.今回測定した軌道スラブ の最大ひずみは 75×10<sup>6</sup>であり、この全てが応力度にな ると仮定した場合、ひずみにコンクリートのヤング率を 乗じて算出した応力度は 2.4N/mm<sup>2</sup>となる.軌道スラブ の設計で考慮されている有効プレストレス<sup>70</sup>は-0.9N/mm<sup>2</sup> であり、上述した応力度と合成した応力度は 1.5N/mm<sup>2</sup> となる.合成した応力度は引張強度よりも十分小さいこ とから、曲げひび割れは生じないと考えられる.

#### (4) 動的変位と動的ひずみの関係

図-11 に示したように隙間の影響を受ける軌道スラブの動的変位から、軌道スラブの限界状態を評価することが可能となれば、隙間補修の要否も判定することができるようになると考えられる.そこで、図-16 に示すように、ひずみゲージを設置したスラブAで最も動的変位が大きい L3 と最も動的ひずみが大きい SL7 の関係を比較した.その結果、図-16 内に示すように動的変位と動的ひずみの決定係数は0.67とった.、図-9に示したように動的変位は時刻によって変化するものの、両者の間には

相関関係があり、軌道スラブの応力状態を示す指標であ る動的ひずみも隙間と温度の影響を受けて変動している といえる.

したがって、夜間から早朝にかけて最大となる軌道ス ラブ隅角部の動的変位を用いることによって、てん充層 の隙間によって生じる軌道スラブの動的ひずみの最大値 を推定することができるものと考えられる.

# 5. まとめ

隙間が生じているスラブ軌道に対して変位とひずみの 測定を行って得られた知見を以下にまとめる.

- (1) 軌道スラブの変位は温度変化によって変動するものの,隙間の深さの影響は小さい.
- (2) 列車通過時の軌道スラブの変位は隙間が深いほど 大きくなる.
- (3) 列車通過時に生じる軌道スラブのひずみは隙間の 範囲の影響を受け、軌道スラブのたわみの支点と なる箇所でひずみは大きくなると考えられる.
- (4) 列車通過時における軌道スラブ隅角部の変位とひ ずみの相関が大きいことを確認した.

隙間の範囲が拡大すると列車荷重によって軌道スラブ に生じる曲げモーメントは増加し、ひび割れなどの損傷 が生じる可能性がある.したがって、隙間の補修の要否 は軌道スラブの限界値に基づいて定量的に判定する必要 があると考えられる.今後は、列車通過時の軌道スラブ の動的ひずみと相関が高い軌道スラブ隅角部の動的変位 を用いて,隙間補修の要否を判定する手法の検討を進め る予定である.

#### 参考文献

- 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, pp.119-144, 2012
- 佐藤靖紀,原口征人,赤川敏:スラブ軌道における CAモルタルの経年劣化,土木学会第56回年次学術 講演会,pp.548-549,2001
- 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,コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.506-510, 2017.7
- 安藤勝敏, 堀池高広, 三浦重:温度変化時におけるスラ ブ軌道の荷重変形特性, 鉄道総研報告, Vol.13, No.10, 1989.10
- 5) 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,第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集,日本 機械学会,pp.175-178,2009.12
- 6) 尾関孝人:空港コンクリート舗装版の温度応力に着目した疲労度設計手法の合理化に関する研究,京都大学博士 論文,2011
- 7) 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

(2018.4.6 受付)

# BASIC STUDY ON RESPONSE OF TRACK SLAB SUPPORTED CA MORTAR LAYER WITH GAPS

# Takatada TAKAHASHI, Yasuharu KOTAKI, Shota FUCHIGAMI and Marika ITAKURA

The slab-tracks are designed to be uniformly supported by the CA mortar layer. However, in some slab tracks, gaps occurred in the CA mortar layer, and the supporting situation of the track slab by CA mortar layer changed. In this situation, a displacement and a strain of the track slab are considered to increase. The effect of the gap of the CA mortar layer on the response of the track slab has not been clarified. Therefore, we measured the displacement and strain of the track slab supported by the CA mortar layer with gap. As a result, we confirmed that the amount of displacement by the train differs depending on the spread of the gap. In addition, the track slab deformed by temperature change, but revealed that there is a strong correlation between displacement amplitude and strain throughout one day.