

論文 スラブ軌道てん充層に生じる 圧縮ひずみに関する研究

高橋 貴蔵¹・吉川 秀平²・湊上 翔太³・小滝 康陽⁴

¹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

(〒185-0082 東京都国分寺市光町二丁目 8-38)

E-mail: takahashi.takatada.80@rtri.or.jp

²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: kikkawa.syuhei.68@rtri.or.jp

³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

⁴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

軌道スラブはてん充層によって均一に支持されるように設計されている。しかし、一部のスラブ軌道のてん充層では経年によって欠損や隙間が生じ、支持状態が変化している。これまで、隙間が生じたてん充層に生じる圧縮ひずみは明らかにされていなかった。そこで、支持状態が異なるスラブ軌道模型供試体に対する載荷試験を実施し、てん充層に生じるひずみを測定した。試験の結果、軌道スラブを模擬した鉄筋コンクリート梁の両端から 600mm の範囲に隙間を設けたてん充層に生じる圧縮ひずみは、同じ範囲に欠損を設けたものよりは小さいが、健全な支持状態と比較すると 10 倍以上になることを確認した。

Key Words: slab track, CA mortar, compressive strain, gap, defect

1. はじめに

軌道スラブ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設計されている。しかしながら、一部のスラブ軌道ではてん充層に用いている CA モルタルの外周部で凍害によるものと考えられる劣化や欠損が確認されている¹⁾。劣化や欠損の範囲が軌道スラブの側面から 250mm 程度まで達すると、CA モルタルに生じる圧縮ひずみの増加によって塑性変形が生じる可能性が模型スラブ軌道に対する載荷試験によって確認されている²⁾。また、有限要素解析によっても、同程度まで劣化や欠損が生じると、CA モルタルに生じる圧縮応力度が増加し、塑性変形が生じることが指摘されている³⁾。一方で、てん充層の劣化や欠損は少ないものの、軌道スラブに動的な変位、いわゆるあおりが生じている場合がある。3mm 程度のあおりが生じている軌道スラブではてん充層との界面に広い範囲の隙間が確認されている⁴⁾。

隙間が生じているスラブ軌道のてん充層では軌道スラブと接触している箇所でも健全な支持状態よりも大きな圧縮ひずみが生じている可能性がある。しかし、これまで

に隙間があるてん充層で圧縮ひずみが測定されたことは無かった。今後、多くのスラブ軌道が設計耐用年数である 50 年を迎える中、てん充層に生じるひずみを考慮した上で、補修の必要性を適切に判断しながら維持管理していかなければならない。

そこで、本研究ではてん充層に欠損や隙間を設けたスラブ軌道模型供試体に対する載荷試験を実施し、支持状態が CA モルタルのひずみに与える影響について検討した結果について報告する。

2. 実験概要

(1) スラブ軌道模型供試体

本試験ではてん充層を含めたスラブ軌道の終局状態までの評価を目的として、試験装置の設備と載荷能力を考慮した上で、図-1 に示すようなてん充層の側面から欠損や隙間が生じたスラブ軌道に対して、レール直角方向に 1 締結装置分を切り出したような形状のスラブ軌道模型供試体 (以下、「スラブ供試体」と称す。) に対する

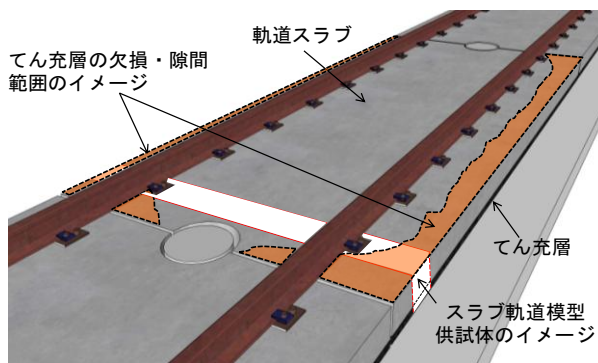
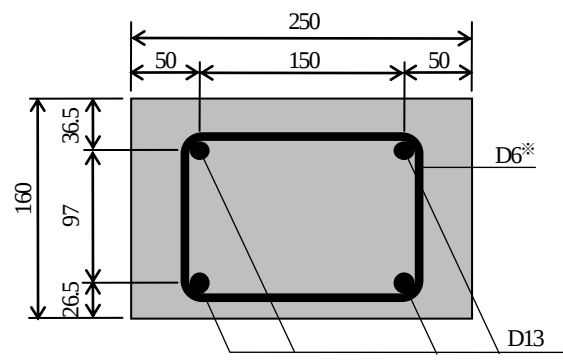


図-1 スラブ軌道の全景とスラブ模型供試体のイメージ



※せん断補強筋の配置間隔: 125mm 単位:mm
図-3 鉄筋コンクリート梁の配筋図

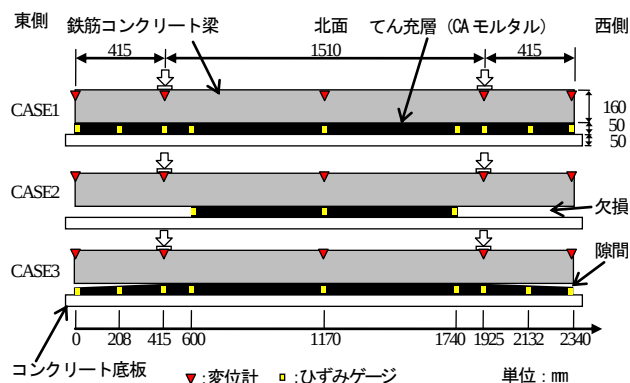


図-2 スラブ軌道模型供試体の形状とセンサ位置

表-1 てん充層の厚さの設定値

	てん充層の厚さ	備考
CASE1	・全面: 50mm	健全
CASE2	・両端 600mm を除く範囲: 50mm ・その他の範囲: 0mm	欠損
CASE3	・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	隙間

載荷試験を実施した。図-2 にスラブ供試体の形状を示す。スラブ供試体は鉄筋コンクリート梁、てん充層およびコンクリート底版で構成している。スラブ供試体は表-1 に示す通りてん充層による鉄筋コンクリート梁の支持状態が異なる 3 種類とした。表-1 に示す欠損はてん充層外周部からの凍害を想定しており、「額縁補修」により多くの補修実績がある。一方、隙間は多くのスラブ軌道で確認されているものの、隙間のみに対する積極的な補修は行われていない。このような状況を踏まえ、鉄筋コンクリートの両端から支持しない範囲を等しくした条件で支持状態が異なる CASE2 と CASE3 を設定した。

CASE1 は鉄筋コンクリート梁底面を全て厚さ 50mm の CA モルタルで支持し、てん充層が健全なスラブ軌道を模擬している。CASE2 は鉄筋コンクリート梁の両端から 600mm を除く範囲を厚さ 50mm の CA モルタルで支持し、てん充層の側面に欠損が生じているスラブ軌道を模擬している。CASE3 は鉄筋コンクリート梁の両端か

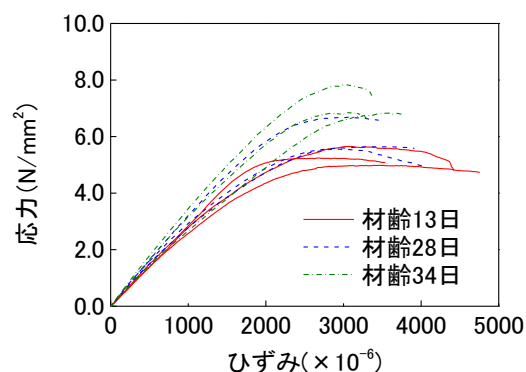


図-4 CA モルタルの応力-ひずみ関係

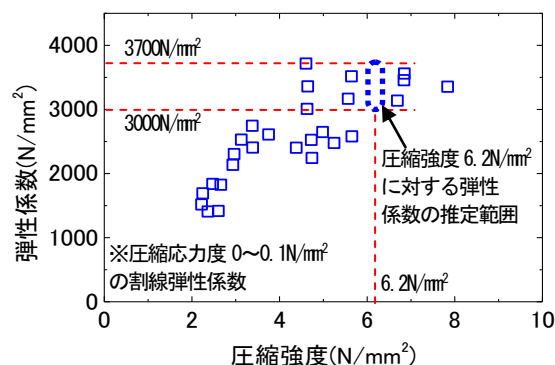


図-5 CA モルタルの弾性係数-圧縮強度関係

ら 600mm を除く範囲を厚さ 50mm の CA モルタルで支持し、両端から 600mm の範囲は CA モルタルの厚さが軌間外に向けて 50mm から 40mm となるように傾斜させ、てん充層と軌道スラブの間に隙間が生じているスラブ軌道を模擬している。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ているためである⁹⁾。

鉄筋コンクリート梁の断面図を図-3 に示す。鉄筋コンクリート梁の寸法は 160×250×2340mm である。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、在来線で用

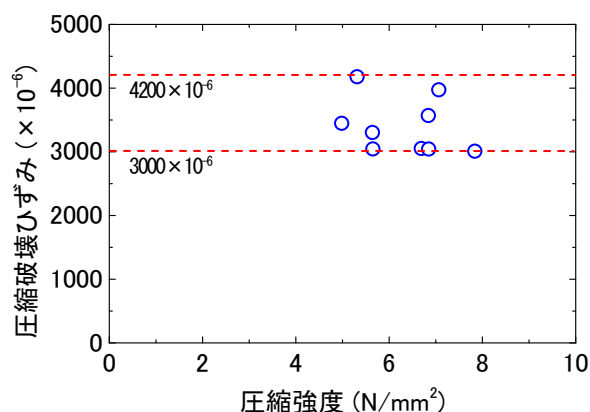


図-6 CAモルタルの圧縮破壊ひずみ-圧縮強度関係

表-2 スラブ軌道模型供試体に用いたCAモルタルの材料特性

材齢	圧縮強度 (実測値)	弾性係数 (推定値)	圧縮破壊時のひずみ (推定値)
20日	6.2N/mm ²	3000~3700 N/mm ²	3000~4200 × 10 ⁶
27日	6.2N/mm ²		

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。

スラブ供試体のてん充層には、補修用のCAモルタルを用いた。φ50×100mmの円柱供試体に対して、材齢13日、28日、34日において変位速度 0.5mm/min で実施した圧縮強度試験によって得られた応力-ひずみ関係を図-4に示す。図-4から得られた弾性係数と圧縮強度の関係を図-5に示す。図-5の弾性係数は圧縮応力度 $0 \sim 0.1\text{N/mm}^2$ における割線弾性係数である。図-5より、圧縮強度が増加すると弾性係数も増加する傾向にあることを確認した。スラブ供試体に対する試験はCASE1、CASE2、CASE3の順に実施し、CASE1およびCASE3に対する載荷試験の前日（材齢20日、27日）のCAモルタルの圧縮強度はいずれも 6.2N/mm^2 となった。圧縮強度 6.2N/mm^2 に対する弾性係数は表-2に示すように $3000 \sim 3700\text{N/mm}^2$ の範囲内にあるものと考えられる。

圧縮強度試験による最大荷重時のひずみ（以下、「圧縮破壊ひずみ」と称す。）と圧縮強度の関係を図-6に示す。図-6より、圧縮破壊ひずみと圧縮強度の間には明確な相関関係は確認されなかった。本研究の範囲内において圧縮破壊ひずみは圧縮強度にかかわらず $3000 \sim 4200 \times 10^{-6}$ の範囲内にあった。

(2) 載荷方法

スラブ供試体への載荷状況を図-7に示す。載荷試験は、CAモルタルの材齢が21日から28日の間で実施した。載荷位置は鉄筋コンクリート梁の両端から415mmとした。この位置は軌道スラブにレールを締結する位置

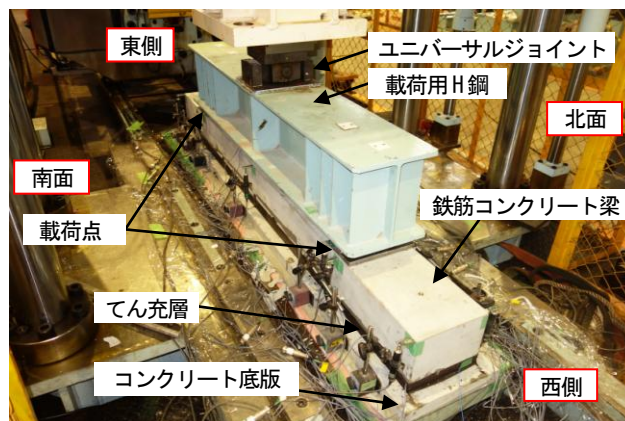


図-7 スラブ軌道模型供試体の載荷状況

と同じである。載荷には1本の油圧ジャッキにユニバーサルジョイントで連結したH鋼を用い、鉄筋コンクリート上に設置した幅 $145\text{mm} \times$ 厚さ $19\text{mm} \times$ 奥行き 250mm の載荷板を介して、スラブ供試体へ荷重を与えた。なお、載荷板の幅は 60kg レールの底部幅と同じである。

スラブ軌道を維持管理する上で、てん充層が終局に達する荷重を把握することは重要である。そこで、載荷試験ではスラブ供試体に用いるCAモルタルの終局状態までを評価することを目的に、通常の列車荷重よりも大きな荷重となる 600kN まで、あるいは鉄筋コンクリート梁が破壊するまで単調載荷した。なお、 600kN は試験装置の容量を考慮して定めた。スラブ軌道における1締結装置当たりの荷重分担率を 50% と仮定すると、荷重 600kN は軸重 1200kN 相当となる。 100% 乗車時の静止軸重が 120kN 程度であることから、荷重 600kN は 100% 乗車時の静止軸重の約10倍となる。

(3) 計測項目

載荷試験の計測項目は載荷荷重、鉄筋コンクリート梁の鉛直変位、CAモルタルの鉛直ひずみであり、センサの設置位置は図-2に示した通りである。変位計とひずみゲージは北面と南面の両側面に設置した。荷重は載荷試験機の油圧ジャッキと載荷フレームの間に設置したロードセルで測定した。

3. 試験結果および考察

(1) スラブ軌道模型供試体の荷重-変位関係

図-8に鉄筋コンクリート梁の荷重-変位関係を示す。ここで、変位の値は同断面における南面と北面の平均値である。また、図-9に載荷終了後のひび割れ状況を、表-3に荷重-変位関係から推定した初期ひび割れ発生荷重および鉄筋降伏荷重を示す。図-9中の太線は初期

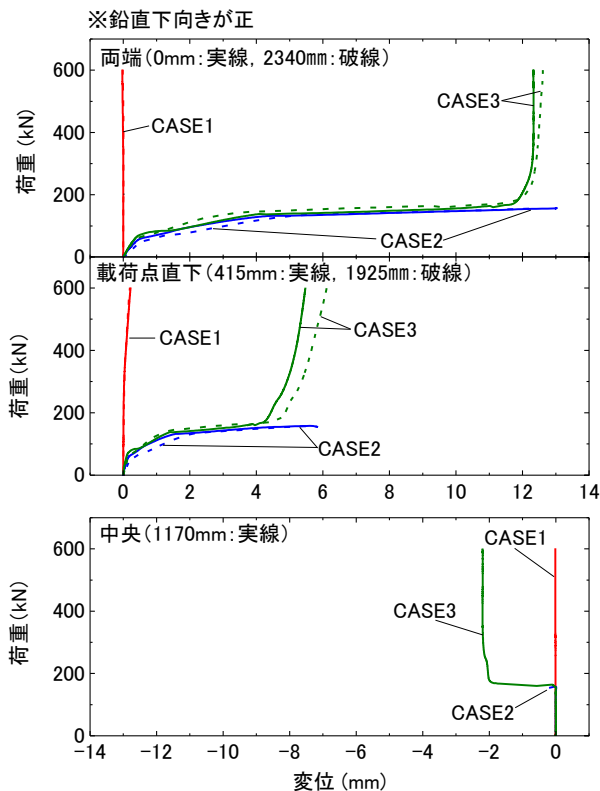


図-8 鉄筋コンクリート梁の荷重変位関係

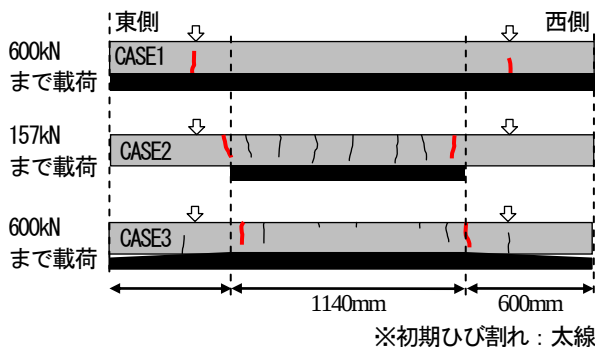


図-9 載荷終了後のひび割れ状況

表-3 初期ひび割れおよび鉄筋降伏荷重

	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	降伏なし	破壊なし
CASE2	約 50kN	約 130kN	157kN
CASE3	約 60kN	約 135kN	破壊なし

ひび割れを表している。

CASE1 では荷重約 200kN で載荷点直下の下縁側からひび割れが発生した。その後、荷重 600kN まで載荷したが、ひび割れは分散せず、鉄筋は降伏しなかった。

CASE2 では荷重約 50kN で両端から約 600mm の上縁側からひび割れが発生した。その後、中央部にひび割れが分散し、荷重約 130kN で上側鉄筋が降伏した。最終的には、荷重 157kN で鉄筋コンクリート梁が曲げ破壊し、終局に至った。

CASE3 では荷重約 60kN で両端から約 600mm の上縁側からひび割れが発生した。その後、中央部に向かってひび割れが分散し、荷重約 135kN で上側鉄筋が降伏した。変位の挙動は CASE2 と同様であったが、荷重約 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、鉛直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た。

なお、実際のスラブ軌道で用いられている軌道スラブは版形状であり、本試験で使用了梁形状と異なる。そのため、軌道スラブにひび割れ等が発生する荷重は、本試験で得られた値よりも大きいと考えられる。

(2) 鉄筋コンクリート梁の変形とてん充層のひずみ

荷重 60, 135, 157, 200, 400, 600kN における鉄筋コンクリート梁の変位分布を図-10 に、てん充層のひずみ分布を図-11 に示す。ここで、60kN は CASE2 および CASE3 の初期ひび割れ発生後、135kN は CASE2 および CASE3 の鉄筋降伏後、157kN は CASE2 の曲げ破壊後、200kN は CASE1 の初期ひび割れ発生後の荷重に相当する。スラブ軌道における 1 締結装置当たりの荷重分担率を 50%と仮定すると、荷重 60kN は軸重 120kN 相当となり、100%乗車時の静止軸重と同程度となる。ただし、本試験に用いたスラブ供試体に生じる変形量やひずみ量は版形状である軌道スラブを用いる実際のスラブ軌道よりも大きな値になると考えられる。

CASE1 では、両端および中央部の変位は、最大荷重に達するまでほぼ変化しなかった。載荷点直下の変位は 200kN 以降でわずかに増加し、600kN で 0.2mm まで達した。最終的な変位の分布形状は「W 字型」となった。ひずみの分布形状も「W 字型」であり、200kN 以降で載荷点直下に生じる圧縮ひずみが増加し、600kN で 1500×10^6 となった。この値は圧縮破壊ひずみとして推定された $3000 \sim 4200 \times 10^6$ よりも小さく、載荷荷重は鉄筋コンクリートを介して広くてん充層に分散されているものと考えられる。

CASE2 では、載荷初期から鉄筋コンクリート梁が曲げ破壊するまで、両端および載荷点直下の変位が増加した。最終的な変位の分布形状は「逆 V 字型」となった。ひずみの分布形状も「逆 V 字型」であり、てん充層の端部となる両端から 600mm におけるてん充層の圧縮ひずみは、荷重 135kN で 3400×10^6 となった。この値は圧縮破壊ひずみとして推定された $3000 \sim 4200 \times 10^6$ に達していた。鉄筋コンクリート梁の両側は片持ち梁になっており、両端から 600mm の位置のてん充層が支点となったため圧縮ひずみが大きくなったものと考えられる。

CASE3 では、載荷初期から 157kN まで、両端および

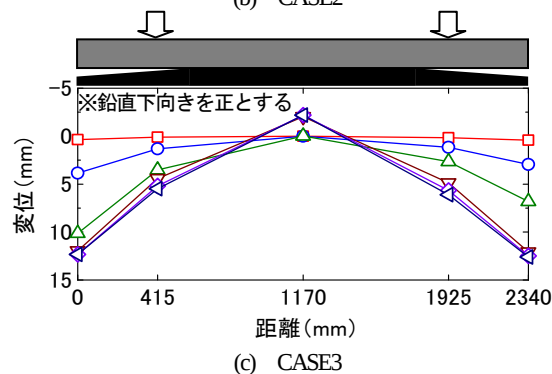
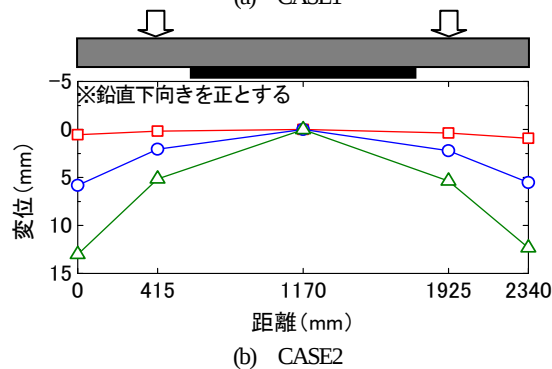
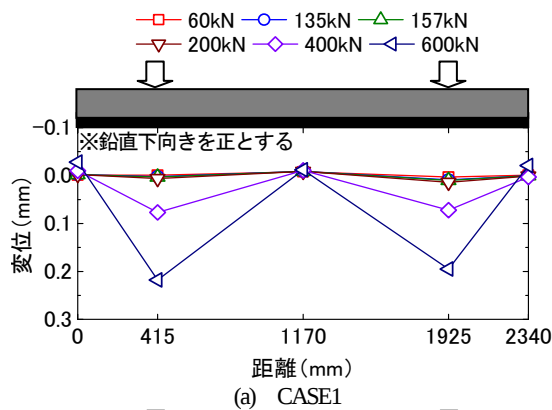


図-10 鉄筋コンクリート梁の変位分布

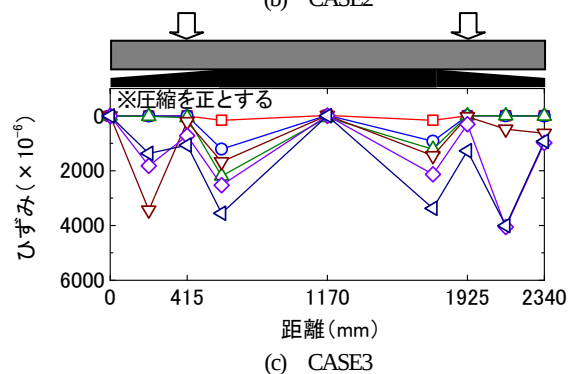
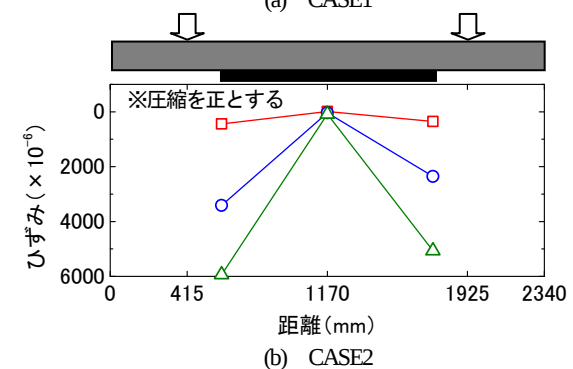
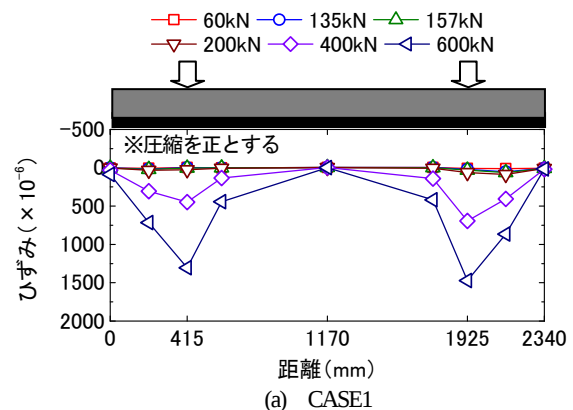


図-11 てん充層のひずみ分布

載荷点直下の変位が増加した。200kN 以降では、両端および載荷点直下の変位が増加する割合が減少した。これは、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たためである。また、中央部が上向きに変位した。変位の分布形状は CASE2 と同様に「逆 V 字型」となった。ひずみの分布形状は荷重 157kN を境にして変化した。157kN までは CASE2 と同じように片持ち梁の状態のため、両端から 600mm 以内の範囲のひずみはほとんど生じておらず、ひずみの分布形状も「逆 V 字型」となった。片持ち梁の支点となった両端から 600mm の位置のてん充層のひずみは、荷重 135kN で 1200×10^6 となった。この値は圧縮破壊ひずみとして推定された $3000 \sim 4200 \times 10^6$ に達しておらず、CASE2 よりも小さかった。

200kN 以降では鉄筋コンクリート梁の底面がてん充層に接触することで両端から 600mm よりも外側の圧縮ひずみが増加した。ただし、端部から 415mm および 1925mm の圧縮ひずみはあまり増加しなかった。鉄筋コ

ンクリート梁の曲率を有するたわみによって両端から 200mm 付近が先に接触したため、あるいは表-1 に示したような完全な直線状の勾配をてん充層の隙間に設けることが出来ず、これらの位置における隙間が想定よりも厚くなったため鉄筋コンクリート梁とてん充層が強く接触しなかったのではないかと考えられる。

なお、400kN 以降で鉄筋コンクリート梁の中央部が上方に変位したものの、同位置のてん充層には引張ひずみが生じなかった。これは、鉄筋コンクリート梁とてん充層の間の付着がはがれたためと考えられる。

(3) てん充層の圧縮ひずみの比較

てん充層の支持状態によってひずみの大きさが異なることが確認されたことから、100%乗車時の静止軸重と同程度である荷重 60kN に対して、てん充層に生じる圧縮ひずみの最大値を比較した結果を図-12 に示す。

CASE1 における圧縮ひずみの最大値は載荷点直下である 1925mm の位置で生じた 11×10^6 であり、非常に小

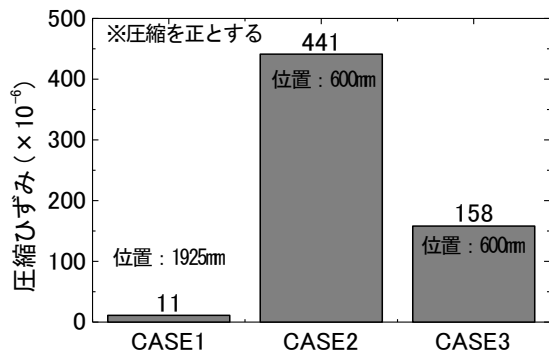


図-12 荷重 60kN におけるてん充層の圧縮ひずみの最大値

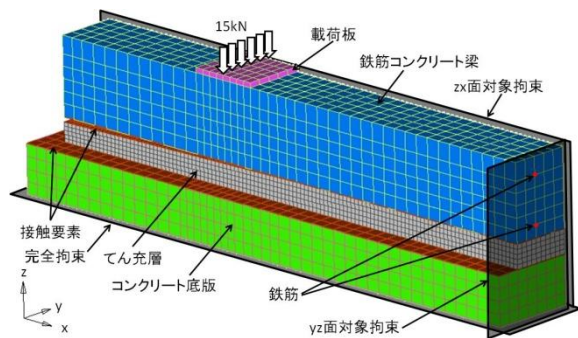


図-13 解析モデル (1/4 対象モデル)

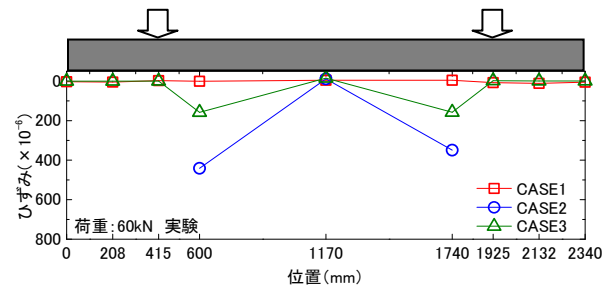
表-4 材料特性

材料	弾性係数	ポアソン比
コンクリート	32.8 kN/mm ²	0.2
鉄筋 (D13)	193.5 kN/mm ²	0.3
CA モルタル	4.3 kN/mm ²	0.3
鋼材	200 kN/mm ²	0.3

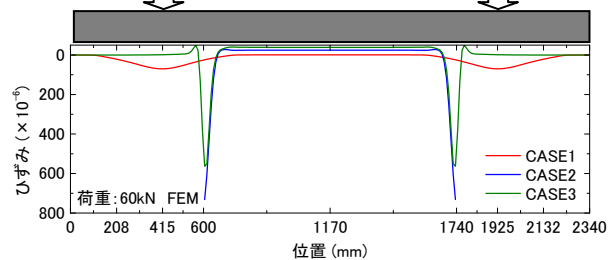
さい結果となった。一方、CASE2 および CASE3 のてん充層に生じた圧縮ひずみは 600mm の位置で最大となり、それぞれ 441×10^6 および 158×10^6 となった。CASE2 および CASE3 とともに鉄筋コンクリート梁は片持ち状態であったものの、てん充層に生じるひずみが異なった。

そこで、CASE2 と CASE3 のてん充層に生じるひずみの状況を比較するため、有限要素解析を実施した。解析には NX Nastran ver8.1 を使用した。解析モデルを図-13 に、材料特性を表-4 に示す。解析モデルでは、鉄筋コンクリートとてん充層、コンクリート底板とてん充層の界面に接触要素を用いて摩擦を定義した。ここでは、摩擦係数を 0.7 としたが、摩擦係数 0.3~1.0 の範囲で出力されるひずみの傾向に差がないことを確認している。

実験と有限要素解析によって得られたてん充層の鉛直ひずみの分布を図-14 に、解析で得られたてん充層の鉛直ひずみのコンターを図-15 に示す。ここで、図-14 の鉛直ひずみは図-15 に示すてん充層の中央高さの要素に生じる値である。図-14 より、解析によって得られた圧縮ひずみは実験結果より大きいものの、実験結果と同

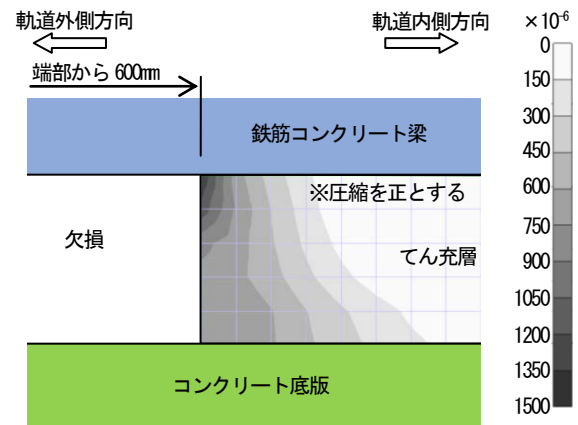


(a) 載荷試験

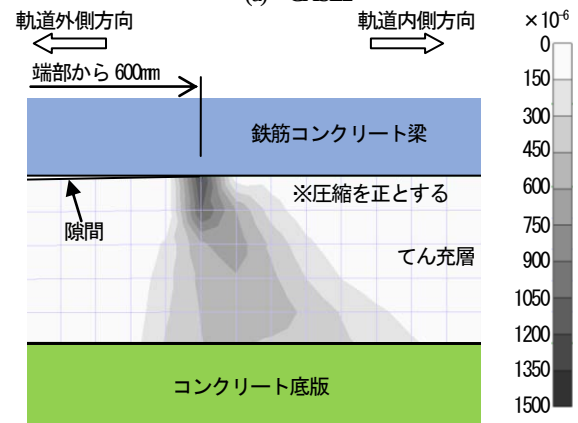


(b) 有限要素解析

図-14 荷重 60kN に対するてん充層のひずみ分布



(a) CASE2



(b) CASE3

図-15 解析で得られたてん充層のひずみのコンター

様に CASE2 よりも CASE3 の圧縮ひずみの方が小さくなった。図-15 より、CASE2 は鉄筋コンクリート梁とてん充層の界面で圧縮ひずみが局所化したのに対し、CASE3 はてん充層が連続していたことによって軌道外側に圧縮ひずみが分散することで小さくなったと考えられる。

以上より、スラブ供試体のてん充層に生じる鉛直方向

のひずみは支持状態によって異なり、欠損や隙間が生じることで圧縮ひずみが大きくなることを確認した。また、鉄筋コンクリート梁の両端から支持しない範囲を600mmとした場合、支持しない範囲が同じであっても、てん充層に生じる圧縮ひずみは欠損よりも隙間の方で小さくなることが分かった。したがって、隙間に対しては、簡易かつ低コストに補修することが可能な「隙間注入補修」⁹⁾を行うことで、てん充層を健全な支持状態に改善することが可能と考えられる。

5. まとめ

てん充層による支持状態が異なるスラブ軌道模型供試体に対する載荷試験を行い得られた結果を以下に示す。

(a)鉄筋コンクリート梁の底面を全ててん充層で支持するCASE1の場合、荷重600kNを載荷してもてん充層に生じる圧縮ひずみは圧縮破壊ひずみに達しないことを確認した。

(b)てん充層に欠損させることで鉄筋コンクリート梁の両端から600mmの範囲の底面を支持しないCASE2の場合、荷重135kNを載荷した際にてん充層に生じる圧縮ひずみは圧縮破壊ひずみに達することを確認した。

(c)てん充層に隙間を設けることで鉄筋コンクリート梁の両端から600mmの範囲の底面を支持しないCASE3の場合、荷重135kNを載荷した際にてん充層に生じる圧縮ひずみは圧縮破壊ひずみに達しないことを確認した。

(d)100%乗車時の静的軸重に相当する荷重60kNを載荷した際のてん充層の圧縮ひずみを比較すると、CASE1に対してCASE2は40倍、CASE3は14倍となった。

(e)鉄筋コンクリート梁の底面を支持しない範囲が同じCASE2とCASE3において、CASE3の圧縮ひずみの方が小さくなることを検討するため、有限要素解析による鉛直ひずみのコンターを比較した。その結果、CASE2は圧縮ひずみが局所化するのに対して、CASE3は連続す

るてん充層内で分散するため圧縮ひずみが小さくなるものと考えられる。

(f)隙間によっててん充層に生じる圧縮ひずみは欠損が生じた場合よりも小さいことから、簡易かつ低コストに補修することが可能な「隙間注入補修」によりてん充層を健全な支持状態に改善することが可能と考えられる。

以上に示す結果を踏まえ、今後は実物大のスラブ軌道の解析モデルを構築し、版構造である軌道スラブの影響も考慮した上で、てん充層に生じるひずみや軌道スラブのひび割れ等に対する検討を行い、隙間に対する「隙間注入補修」の要否に関する検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 高橋貴蔵, 洲上翔太, 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・政策連合シンポジウム, S2-3-6, 2014.
- 3) 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.
- 4) 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, 土木学会第72回年次学術講演会(投稿中), 2017.
- 5) 洲上翔太, 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) 洲上翔太, 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.

(2017.4.7 受付)

STUDY ON COMPRESSIVE STRAIN OF CA MORTAR FOR SLAB TRACK

Takatada TAKAHASHI, Syuhei KIKKAWA,
Shota FUCHIGAMI and Yashuharu KOTAKI

The slab-tracks are designed to be uniformly supported by the CA mortar layer. However, in some slab tracks, defects and gaps occurred in the CA mortar layer, and the supporting situation of the track slab by CA mortar layer changed. The value of compressive strain occurring in the CA mortar layer where gaps occurred was not clarified.

Therefore, we carried out a loading test on slab track model specimens with different support conditions, and measured the strains occurring in the CA mortar layer. As a result of the test, we confirmed that the compressive strain occurred in the CA mortar layer with gaps was smaller than that of the defective support state, but it was larger than that of the healthy support state.