

# 施工が容易で低コストな S型弾性まくらぎ直結軌道の開発

谷川 光\* 高橋 貴蔵\*  
 桃谷 尚嗣\* 吉川 秀平\*

Development of a Solid-bed Track with Resilient Sleepers using the Shear-key  
 to Achieve Efficient Construction Work

Hikaru TANIGAWA Takatada TAKAHASHI  
 Yoshitsugu MOMOYA Shuhei KIKKAWA

The solid-bed track with resilient sleepers (STR) is one of the ballastless tracks in which the sleeper with under sleeper pads is supported directly by the concrete trackbed. The STR is not only very effective in saving maintenance work, but also useful for reducing structure borne noise and ground vibrations. However, there have been demands for increasing the construction speed and reducing its cost. For that purpose, by introducing the shear-key on each side of the sleepers to resist lateral loads, we developed a new S-type STR in which the concrete trackbed was narrowed. Full scale loading tests and non-linear FEM analyses were carried out, and the results confirmed that the new structure had sufficient performance. S-type STR was actually applied to a railway company, and it was confirmed that compared to the existing STR, S-type STR could be built the concrete trackbed at 60% less cost, resulting in reduction of the overall track construction cost down by 20%. In addition, the narrowed concrete trackbed speeded up track laying time 1.7 times, reducing construction time.

キーワード：弾性まくらぎ直結軌道，せん断キー，コンクリート道床，実物大載荷試験

## 1. はじめに

弾性まくらぎ直結軌道（以下、弾直軌道）は、図1に示すように弾性材を介してまくらぎをコンクリート道床で支持する直結系軌道である。コンクリート道床は、輪重の他、横圧やロングレール横荷重といった水平方向の荷重を負担する部材である。構造物音や地盤振動の低減効果を有することから、都市部の高架橋上を中心に敷設され、保守の省力化と沿線環境の改善に貢献してきた。

鉄道総研では、これまでにD型弾直軌道<sup>1)</sup>を開発しているが、鉄筋コンクリート製のコンクリート道床の過密な配筋や型枠の寸法管理に多くの時間を要し、コストも比較的高い状況にあった。また、都市部の施工においては、資材の搬入場所の制約や狭隘な作業空間での施工となることから、今後の適用拡大に向けて更なる低コスト化や施工性の向上が求められていた。

そこで、敷設コストの低減や施工期間の短縮を図ることが可能な、従来の形状とは異なる新たな構造のS型弾性まくらぎ直結軌道（以下、S型弾直軌道）を開発した。本構造は、図2に示すように、まくらぎ側面の突起（以下、せん断キー：Shear-key）で横圧に抵抗し、コンクリー

\* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室

ト道床の肩部がない形状とすることで、スリム化による低コスト化と敷設速度の向上を図ることとした。また、耐荷機構の変更に加えて短繊維補強コンクリートを適用することで、ずれ止め筋以外の配筋を不要とした。本稿では、S型弾直軌道の開発において実施した各種検討結

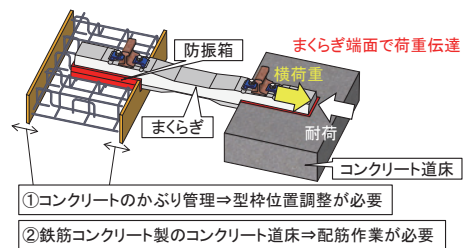


図1 従来の弾直軌道の構造（D型弾直軌道）

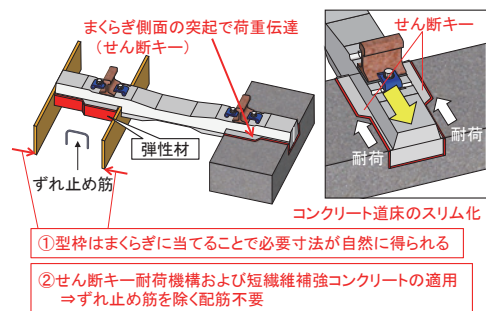


図2 開発した弾直軌道の構造（S型弾直軌道）

特集：軌道技術

果を報告する。

## 2. せん断キー耐荷機構に関する基礎的検討<sup>2)</sup>

### 2.1 非線形 FEM 解析による検討

まくらぎ側面のせん断キーで横圧に抵抗する耐荷機構を検討するため、2次元非線形 FEM 解析によりせん断キー形状の検討を行った（使用ソフト：汎用有限要素解析プログラム ATENA 2D）。

解析モデルの諸元を図3および図4、表1に示す。2次元の1/2対称モデルとし、コンクリート道床は施工目地部を想定して軌道延長方向の寸法が小さくなる条件とした。解析モデル（要素数：約400）は、ずれ止め筋を離散型棒要素とし、それ以外は平面要素とした。まくらぎおよびコンクリート道床要素は、粗骨材の寸法を考慮して要素1辺の基本長さを20mmと設定した。コンクリートの引張軟化モデルは、まくらぎ要素は破壊エネルギーに基づく指数型とし、コンクリート道床要素は短繊維補強コンクリートを想定して破壊エネルギーに基づく直線型とした。せん断キーは、角度を8°～45°の範囲で5段階に変化させた。まくらぎ側面の弾性材要素とコンクリート道床要素の間には、引張力を伝達しない接合要素を設け、載荷時における滑りを考慮した。まくらぎ上部の載荷用鋼材に強制変位を与えることでまくらぎに載荷し、コンクリート道床へ荷重を伝達させて伝達可能な最大荷重を評価した。

コンクリート道床は、呼び強度27MPaのレディミクストコンクリート（以下、生コン）をベースとした短繊維補強コンクリートを想定した。混入する合成繊維は、土木分野で広く使用されているポリプロピレン繊維（断面7100dtex、長さ30mm。以下、PP繊維）またはポリビニルアルコール繊維（直径0.66mm、長さ30mm。以下、PVA繊維）のいずれかを想定した。混入量は、繊維混入によるフレッシュ性状の変動が小さく、繊維の種類によらず曲げタフネスの向上効果が同等となるように、既往の検討結果<sup>3)</sup>を参考に設定した（PP繊維：0.5vol.%、PVA繊維：0.375vol.%）。FEM解析では、破壊エネルギーの入力により短繊維補強コンクリートを表現することから、事前に破壊エネルギー試験<sup>4)</sup>を行った（使用生コン：普通-27-18-20N）。その結果、PP繊維で131.3N/m、PVA繊維で133.3N/mの値が得られ、繊維の種類によらず同等であったことから解析においては破壊エネルギーを131N/mと入力した。

解析結果を図5に示す。せん断キーの角度が大きいほど伝達可能な荷重も大きく、27°以上では一定となった。終局時は、コンクリート道床要素の斜めひび割れ進展により破壊に至ったが、まくらぎ要素にはひび割れは発生しなかった。横圧に対する設計作用（破壊）は、急曲線部

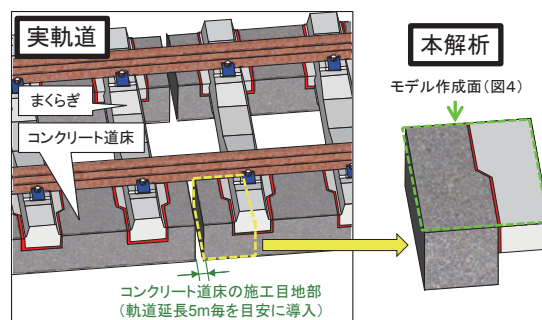


図3 解析モデルの形状条件

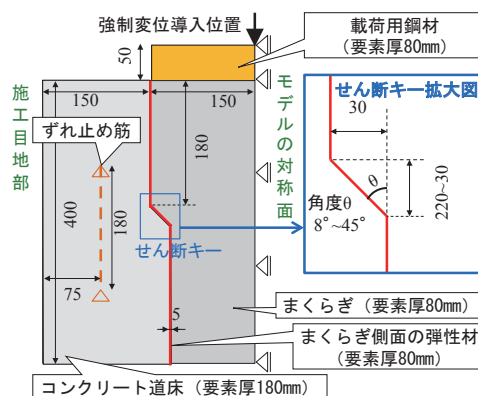


図4 解析モデルの寸法（単位：mm）

表1 各要素の代表的な物性値

要素種類	圧縮強度	弾性係数	備考
まくらぎ	50MPa	33000MPa	破壊エネルギー 100N/m
まくらぎ側面の弾性材	-	64MPa	ポアソン比 0.49
コンクリート道床	27MPa	26500MPa	破壊エネルギー 131N/m
ずれ止め筋および鋼材	-	200000MPa	降伏強度 345MPa

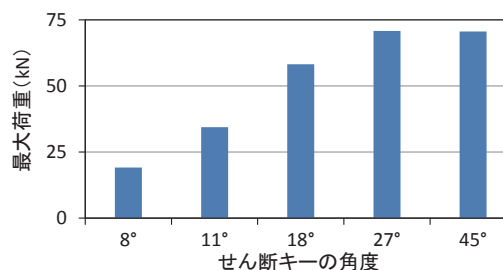


図5 せん断キーの角度と荷重の関係

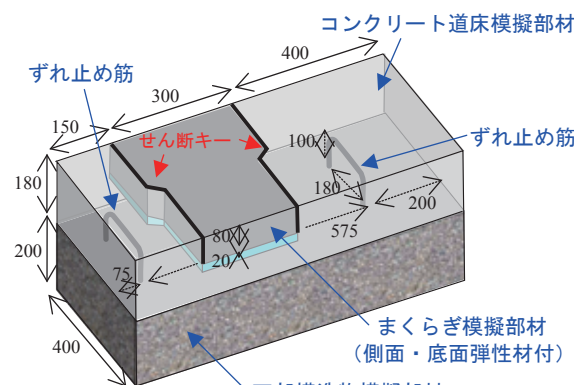


図6 供試体の形状（単位：mm）

で約 50kN<sup>5)</sup> であることから、せん断キースの角度が 18° 以上であれば十分に荷重を伝達できると考えられた。

## 2.2 実物大要素実験による検討

前節は、せん断キースの形状に着目した 2 次元での検討であったため、せん断キースを有するまくらぎを模擬した供試体に対する要素実験を実施した。

供試体の形状を図 6 に示す。供試体の作製では、はじめに、ずれ止め筋（全高 250mm、露頭高さ 100mm、鉄筋種別：D13-SD345）を設けた下部構造物模擬部材（呼び強度 40MPa の生コンを使用）を作製した。その後、まくらぎ模擬部材を所定の位置に固定し、コンクリート道床模擬部材の打込みを行った。まくらぎ模擬部材には、呼び強度 50MPa の生コンを使用し、前項の結果を参考に、側面に 18° または 45° の角度のせん断キースを設けた。

コンクリート道床模擬部材には、前項の FEM 解析で想定した短繊維補強コンクリートを使用した。PP 繊維を 0.5vol.%, PVA 繊維を 0.375vol.%, それぞれアジテータ車に投入して高速攪拌した。攪拌後は、いずれの繊維においても 4cm 程度スランプが低下（13～16cm）したが、容易に打込むことができ、型枠取外し後にも充填不足といった施工不良は見られなかった。

作製した 4 体の供試体（材齢 28 日）に対して、図 7 に示すような載荷治具（SS400 材）を用いてまくらぎ模擬部材を鉛直方向に圧縮することで載荷した。段階的に載荷と除荷を繰り返し、供試体が破壊するまで荷重を増加させた。

図 8 に荷重とまくらぎ変位（各載荷段階で変位の初期値を 0 とした）の関係を示す。せん断キース角度を 18° としたケースでは、繊維の種類によらず、最大荷重は 35kN 程度となり、コンクリート道床のひび割れ発生・進展により終局に至った。せん断キースを 45° としたケースでは、最大荷重は PVA 繊維で 70kN、PP 繊維で 80kN となり、18° のケースに比べて最大荷重が大きくなった。せん断キースを 18° としたケースで、前節の FEM 解析の結果より最大荷重が小さくなったのは、前節は 2 次元での検討であったため、最大荷重をやや過大に評価したものと考えられる。なお、まくらぎ変位が大きいのは、本要素実験で使用した側面弾性材の硬度が小さいことによるものと考えられる（市販 SBR シート、デュロメータタイプ A 硬度 60 度）。

いずれのケースにおいても、まくらぎのせん断キース部付近のひずみは十分に小さく、載荷試験後の観察の結果、まくらぎ自体の損傷も見られなかった。そのため、まくらぎ側面のせん断キースは終局状態まで十分に荷重伝達機能を果たしていたと考えられる。横方向の設計作用の観点から見ると、横圧に対する設計作用（破壊）約 50kN を満足したのは、せん断キースが 45° のケースとなった。

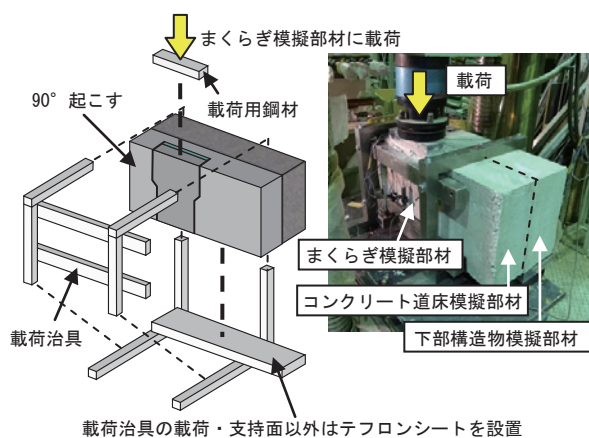


図 7 載荷試験の状況

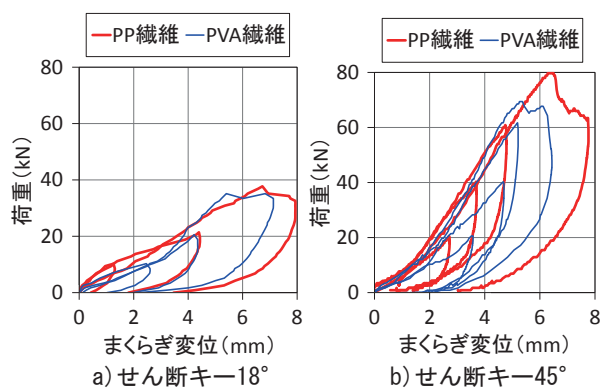


図 8 荷重とまくらぎ変位の関係

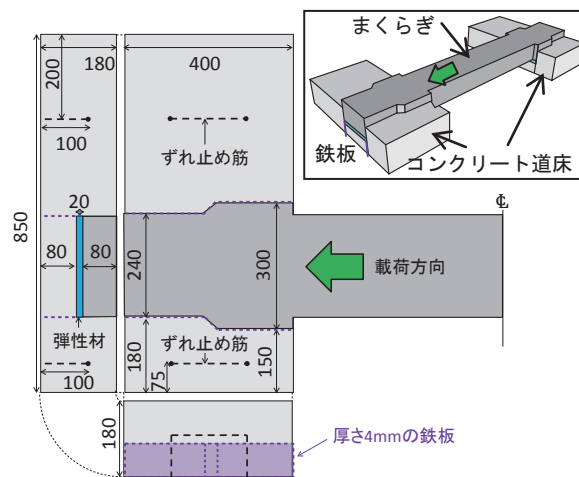


図 9 実物大軌道模型の形状（展開図。単位：mm）

## 3. まくらぎ 1 本分の実物大軌道模型に対する載荷試験<sup>6)</sup>

軌道としての耐荷性能を確認するため、まくらぎ 1 本分の実物大軌道模型を構築し、水平載荷試験を実施した。実物大軌道模型の形状を図 9 に示す。水平載荷試験では、まくらぎ長手方向およびレール長手方向それぞれの耐荷性能を確認<sup>6)</sup>しており、本稿ではまくらぎ長手方向の載

特集：軌道技術

荷試験について報告する。まくらぎ下のコンクリート道床厚さは、コンクリートの打込み上、最も薄い条件となる 80mm と設定した。また、軌道模型は、コンクリート道床の施工目地部を想定した。

まくらぎは、側面に角度 45° のせん断キヤを設け、JIS 規格<sup>7)</sup>を満足するポストテンション式 PC まくらぎを設計・製作した。まくらぎの底面には、D 型弾直軌道と同じばね定数 (30MN/m) に設定した底面弾性材を使用した。また、前章では硬度の小さい側面弾性材を使用した。また、デュロメータタイプ A 硬度 90 度に調整した硬質 SBR 製の側面弾性材を新たに製作して使用した。

コンクリート道床には、PP 繊維または PVA 繊維を混入した 2 種類の短繊維補強コンクリートを使用した。また、乾燥収縮ひび割れが貫通した場合を想定して、図 9 に示す位置に離型剤を塗布した鉄板を設置し、コンクリート道床のまくらぎ側面下部位置の縁を完全に切り、厳しい条件での荷試験とした。荷試験は、油圧ジャッキを用いてまくらぎを押すことで、コンクリート道床に荷重を与えた。荷と除荷を繰り返しながら破壊するまで試験を行った。

まくらぎ長手方向の荷試験の結果を図 10 に示す。いずれの繊維の場合も、最大荷重は 105kN 程度となった。いずれのケースにおいても、最大荷重に達した後、コンクリート道床に斜めひび割れが発生・進展し破壊に至った。要素実験と同様、まくらぎや側面のせん断キヤには損傷は見られなかった。

急曲線部の横圧に対する設計作用 (破壊) 約 50kN に対しても満足する結果となった。また、営業線の D 型弾直軌道で測定されたまくらぎ端部横荷重の最大値が 9kN であった<sup>8)</sup> ことから、せん断キヤで横圧に抵抗する本構造は、十分な耐力を有していると考えられる。

なお、レール長手方向の荷試験も同様に実施し、レール長手方向の設計作用 (破壊) に対しても十分な耐力を有していることを確認している<sup>6)</sup>。

4. 試験線軌道における性能確認試験<sup>9)</sup>

前章までの検討結果を元に、実用化に向けた検討を行った。試験線高架橋上にまくらぎ 7 本分の延長の軌道を構築し、水平荷試験およびモーターカー走行試験、インパクトハンマー加振試験を行った。

構築した軌道の構造を図 11 に示す。軌道条件は、直線区間、60kg レールとし、まくらぎ下部のコンクリート道床の厚さは、前後区間の取り付けの関係から 400mm とした。軌道の構築では、はじめに、高架橋上にずれ止め筋を設置した。次に、レールにまくらぎを締結し、軌きょう支承装置と呼ばれる高さを調整する治具を用いてレール高さを仕上がり位置に保持した。まくらぎ間隔は

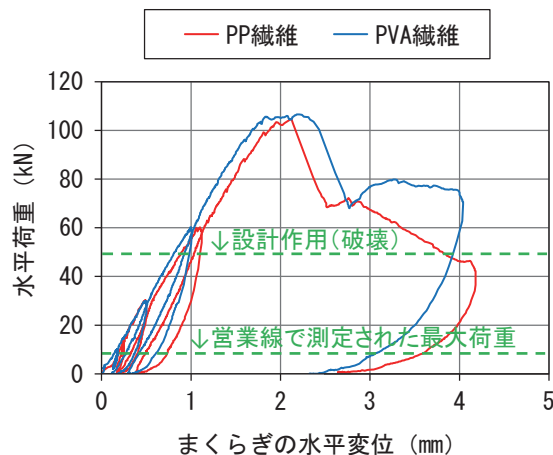


図 10 まくらぎ長手方向の荷試験の結果

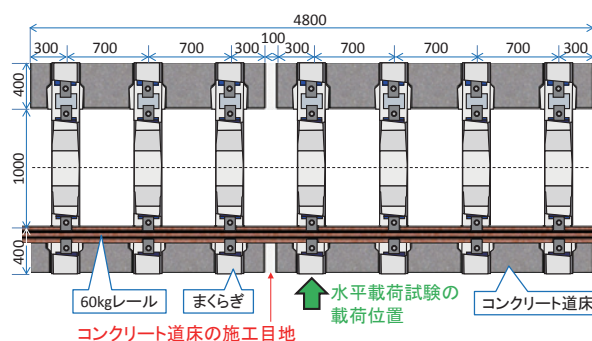


図 11 試験線軌道の形状 (上面図 単位: mm)



図 12 ポンプ圧送の状況

700mm とし、レール締結装置には、D 型弾直軌道に用いられている特殊形 60 着脱式弾直用一般レール締結装置を使用した (軌道パッドのばね定数: 60MN/m)。

まくらぎ締結後、コンクリート道床の型枠を設置し、コンクリートの打込みを行った。厳しい条件での水平荷試験とするため、荷位置近傍にコンクリート道床の施工目地部 (100mm 幅の隙間) を設けた。また、打込み前に、高架橋上面 (コンクリート道床下面位置) にビニールシートを敷設し、コンクリート道床と高架橋との付着を除去した。そのため、完成後の軌道と高架橋は、ずれ止め筋のみで接続している条件となっている。

コンクリート道床の打込みにおいては、ベースコンクリート（普通-27-18-20N，空気量  $4.5 \pm 1.5\%$ ）を積載したアジテータ車に、PP 繊維を  $0.5\text{vol}\%$  で混入・高速攪拌し、短繊維補強コンクリートを作製した。その後、コンクリートポンプ車によって水平換算距離 60m で圧送し、打込みを行った（図 12）。前章までの検討において繊維種類による耐荷力の違いは見られなかったため、ここでは、PP 繊維を混入した短繊維補強コンクリートを使用した。コンクリート道床の打込み性は良好で、ポンプ配管の閉塞も確認されなかった。型枠取外し後も、コンクリート道床に充填不足といった施工不良は確認されなかった（図 13）。なお、PP 繊維または PVA 繊維を混入した 2 種類の短繊維補強コンクリートに対して、実施工を想定して水平換算距離 150m でのポンプ圧送試験を別途実施しているが、ポンプ配管の閉塞は見られず、良好に圧送できることを確認している。

コンクリート道床の材齢 28 日以降に、水平載荷試験およびモーターカー走行試験、インパクトハンマー加振試験を実施した。水平載荷試験では、締結装置を撤去した軌きょう中央のまくらぎ 1 本に対して、横圧に対する設計作用（破壊）約 50kN を目標に載荷と除荷を 3 回繰り返し荷重を与えた。

図 14 に水平載荷試験の結果を示す。載荷位置近傍にコンクリート道床の施工目地を設け、軌道と高架橋の付着も除去した厳しい条件であるが、設計作用（破壊）約 50kN に対して十分な耐力を有していることを確認した。また、レールを締結した状態でレールに対する載荷も同様に実施し、十分な耐力を有していることを確認した。

次に、モーターカー走行試験では、S 型弾直軌道と隣接スラブ軌道区間を走行させ、輪重（30kN）とそれぞれの区間におけるレール鉛直変位の最大値により軌道の支持剛性（軌道ばね係数）を算出した（図 15）。S 型弾直軌道の軌道ばね係数は  $36\text{MN/m}$  となり、スラブ軌道（ $68\text{MN/m}$ ）より約 50% 小さい結果となった。S 型弾直軌道の軌道パッドや底面弾性材のばね定数は、D 型弾直軌道と同じ値に設定していることから、過去に測定された D 型弾直軌道の軌道ばね定数  $38\text{MN/m}^{1)}$  と同等の値となった。

最後に、インパクトハンマー加振試験により、振動特性を評価した。高架橋スパン中央位置において、片レールに対して加振を行い、加振点下の高架橋床版裏に設置した加速度計により振動加速度レベルを得た。図 16 に示した周波数分析結果より、スラブ軌道と比較して、10Hz 以下（地盤振動に寄与）および 300Hz 以上（構造物音に寄与）の周波数帯域で振動加速度レベルが小さいことがわかる。本構造においても、弾直軌道として従来と同等の防振性能を有していることを確認した。

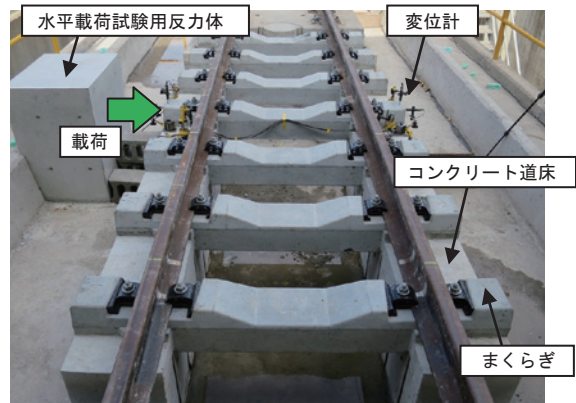


図 13 完成後の試験線軌道

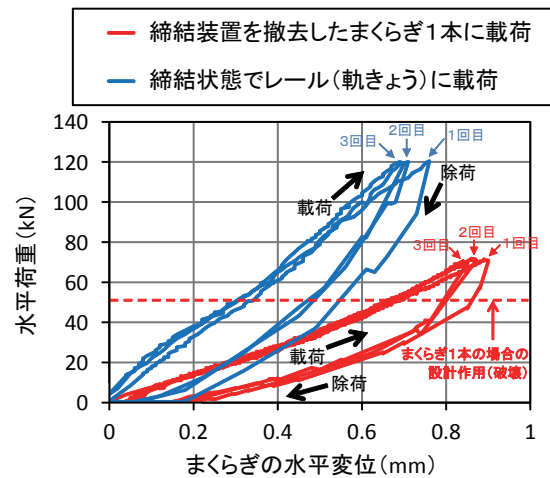


図 14 水平載荷試験の結果



図 15 モーターカー走行試験の状況

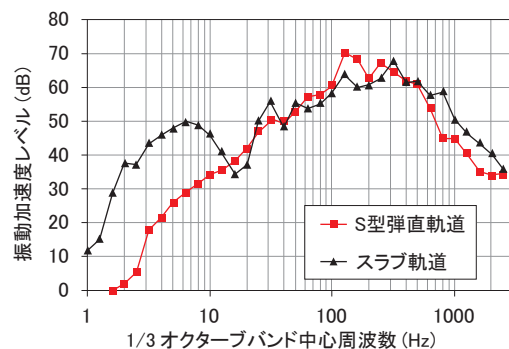


図 16 インパクトハンマー加振試験の結果

特集：軌道技術

5. 現地施工

四国旅客鉄道株式会社の高架化事業の先行工事区間において現地施工が行われ、実際の施工環境での施工性およびコストの確認を行った。

現地施工の状況を図17および図18に示す。型枠は、まくらぎに当てることで必要寸法が容易に得られ、コンクリート道床の打込みもスムーズに行えることが確認された。型枠取外し後に表面観察を行った結果、コンクリートの充填不良等は確認されなかった。

コスト積算の結果を図19に示す。高架橋上での延長940mの軌道施工を想定して、高架上への材料吊上げ作業からロングレール設定替えまでの作業を積算した。コンクリート道床の施工コストを見ると、型枠構築が容易で、打込み量も削減できることから、60%のコスト削減となった。レール溶接費用などを含めた軌道全体の敷設コストとしても見て、20%の削減となることを確認した。また、従来は75mを施工単位として軌道を施工していたが、人工・工数の削減効果により、施工単位を少なくとも125mに延長できることがわかった（敷設速度1.7倍）。

6. まとめ

せん断キーで横圧に抵抗し、コンクリート道床の肩がない形状とすることで、スリム化による低コスト化と敷設速度の向上を図ることが可能な弾直軌道の開発を行った。非線形FEM解析、要素実験および実物大試験の結果、まくらぎ側面のせん断キーで横圧に抵抗する構造が十分な性能を有することを確認した。また、試験線に軌道を構築し、従来と同等の防振性能を有していることを確認した。

さらに、現地施工が行われ、実際の施工環境での施工性およびコストを確認した結果、良好に施工できることを確認し、D型弾直軌道と比較して、軌道全体の敷設コストを20%削減でき、敷設速度も1.7倍にできることがわかった。

文献

- 1) 堀池高広, 高尾賢一, 須永陽一, 安藤勝敏, 福井義弘, 内田一男: 着脱式弾性まくらぎ直結軌道 (D型弾直軌道) の開発, 鉄道総研報告, Vol.12, No.6, pp.25-30, 1998
- 2) 谷川光, 高橋貴蔵, 椿龍哉, 朝野茜: まくらぎ側面の突起で横圧に抵抗する弾性まくらぎ直結軌道の構造に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.1285-1290, 2016
- 3) 川又篤, 高橋貴蔵, 堀越哲郎, 松岡茂: 繊維補強セメント系複合材料の基礎性状に関する実験的研究, コンクリート

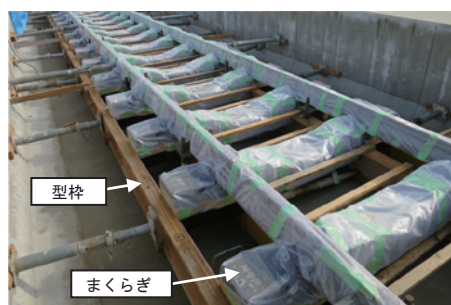


図17 軌きょうおよび型枠の構築状況

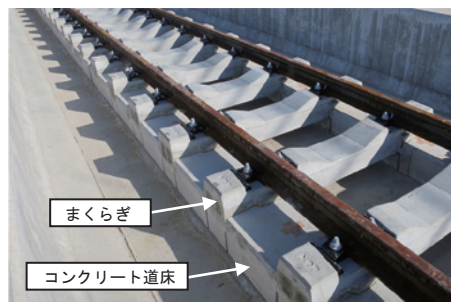


図18 完成状況

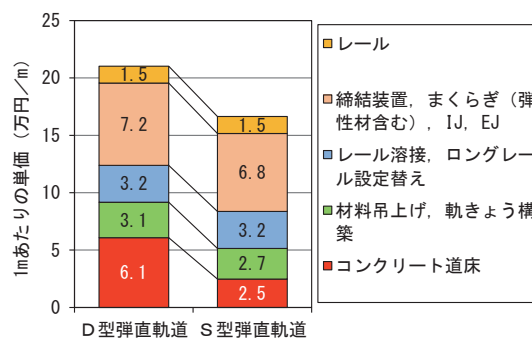


図19 コストの積算結果

工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.389-394, 2006

- 4) 公益社団法人日本コンクリート工学会: 附属書 (参考) コンクリートの引張軟化曲線の推定方法, JCI-S-001-2003, JCI 規準, 2004
- 5) 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, 2012
- 6) 谷川光, 高橋貴蔵, 桃谷尚嗣, 椿龍哉, 小松怜史, 朝野茜: まくらぎ側面の突起で横圧に抵抗する弾性まくらぎ直結軌道の水平方向の耐荷力の検討, 土木学会年次学術講演概要集, VI-095, pp.189-190, 2016
- 7) 一般財団法人日本規格協会: ポストテンション式 PC まくらぎ, JIS E 1202, 1997
- 8) 谷川光, 高橋貴蔵, 桃谷尚嗣: 弾性まくらぎ直結軌道におけるまくらぎ端部横荷重の測定, 日本鉄道施設協会誌, 54巻, 2016
- 9) 谷川光, 高橋貴蔵, 桃谷尚嗣, 吉川秀平: S型弾性まくらぎ直結軌道の性能確認試験, 土木学会年次学術講演概要集, VI-129, pp.257-258, 2017