

第75回

弾性まくらぎ直結軌道

はじめに

一般的な鉄道の軌道は、列車の走行を案内するレール、左右のレールの間隔を一定に保つ締結装置とまくらぎ、そしてまくらぎから路盤や構造物に荷重を伝える道床で構成されます。ちなみに、線路と軌道は同じものと解釈されている方が多いと思いますが、JISにおいて、線路とは「軌道及びこれを支持するために必要な路盤、構造物を包含する地帯」と定義されていますので、正確には軌道は線路の一部ということになります。

鉄道の軌道の例を図1に示します。軌道には大きく分けて、バラスト軌道と直結系軌道に分類されます。バラスト軌道は道床に砂利を用いた軌道で、この砂利を道床バラストあるいは単にバラストと呼んでいます。直結系軌道は、道床にバラストを用いない軌道の総称であり、まくらぎ直結軌道やスラブ軌道などがあります。

ここでは、まくらぎ直結軌道のうち、近年、適用が増加している弾性まくらぎ直結軌道の概要や開発の経緯などについて紹介します。

弾性まくらぎ直結軌道の概要

近年、開かずの踏切の除去による交通渋滞の解消や、鉄道により分断されている市街地の一体化による地域の活性化などを目的として、連続立体交差事業が各地で進められています¹⁾。たとえば、鉄道総研の最寄り駅である国立駅は東京駅から西方向に延びる中央線の駅の一つですが、この一帯も平成22年に高架化され、踏切が除去されたことで交通渋滞が解消されました²⁾。

連続立体交差事業で軌道を新設する際には、バラスト軌道か直結系軌道のどちらかを選択します。バラスト軌道は、列車が繰り返し通過することによって、バラストが崩れてまくらぎが沈下し、軌道のゆがみ（以下、「軌道

変位」という）が生じ、乗り心地が悪くなります。そのため、バラスト軌道は、敷設コストは安いものの、定期的に軌道変位を修復する保線作業が必要となります。一方、直結系軌道のコンクリート製の道床（以下、「コンクリート道床」という）は列車が通過しても沈下しませんので、保線作業を大幅に減らすことができます。なお、連続立体交差事業は都市部で行われることが多く、住居や店舗などが近接していることから、振動・騒音の低減が求められます。そこで、近年の連続立体交差事業では、防振性の高い弾性まくらぎ直結軌道（以下、「弾直軌道」という）が多く採用されています。

弾直軌道のまくらぎ下面には振動を低減する弾性材（合成ゴムなど）が取り付けられ、コンクリート道床によって支持されています。列車がレール上を走行することによって車輪とレール間で振動が生じ、まくらぎを介してコンクリート道床や構造物に伝わりま



図1 さまざまな軌道の種類

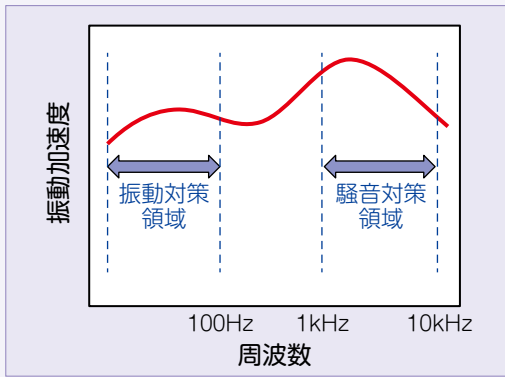


図2 レールに発生する振動の特性³⁾

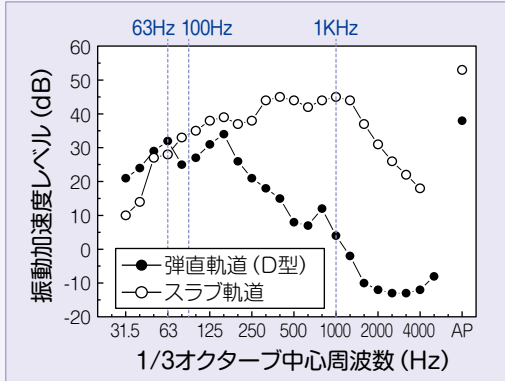


図3 弾直軌道の振動低減効果⁴⁾

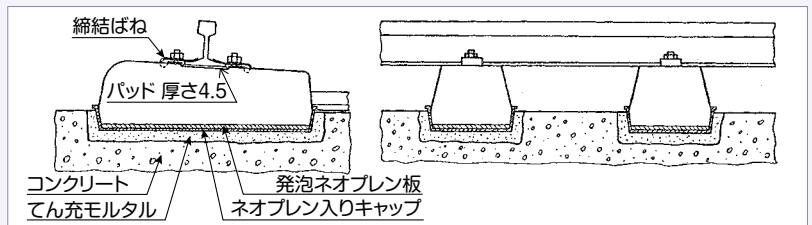


図4 RSまくらぎ直結軌道⁵⁾

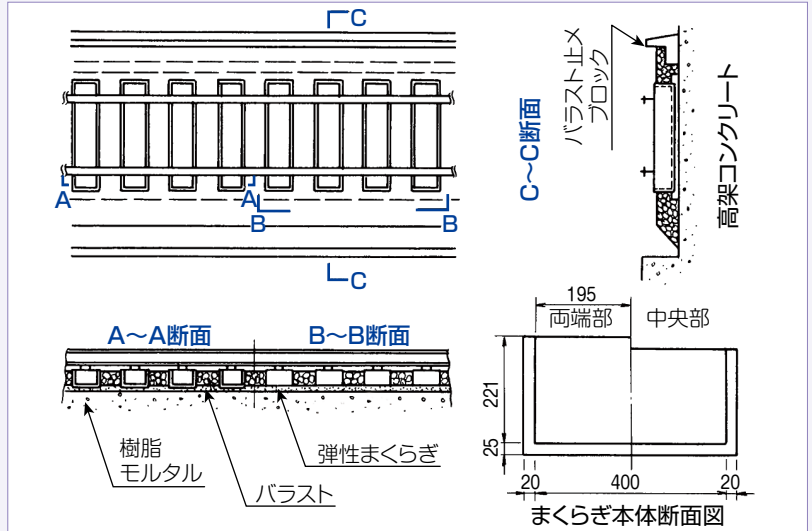


図5 A型弾直軌道⁸⁾

すが、弾直軌道は、弾性材がまくらぎを軟らかく支持しているため、構造物に伝播する振動が小さくなります。

騒音・振動の低減効果

列車によってレールに生じる振動加速度と周波数の関係の概念図を図2に示します。100Hz程度以下の周波数の振動は構造物や地盤の振動に、また1kHz程度以上の周波数の振動は騒音に関係します³⁾。そのため、振動と騒音の両者を抑えるためには、低い周波数から高い周波数までの振動を低減する必要があります。

図3に弾直軌道(D型弾直軌道)とスラブ軌道に対して高架橋の裏側で測定した振動加速度レベルの周波数分析結果を示します。弾直軌道の振動加速度レベルは63Hzより高い周波数でスラブ軌道よりも小さくなり、100Hz程度では約7dB低減します。さらに、1kHz程度よりも高い周波数ではさら

に差が大きくなり、騒音も小さくなることが確認されています⁴⁾。

弾性まくらぎ直結軌道の開発経緯

①海外の弾直軌道

まくらぎを弾性支持する軌道としては1960年代後半から1970年代初頭に開発されたフランスにおけるRSまくらぎ直結軌道があります。この軌道は、図4に示すように左右のレールを個別に支持するブロックを鋼材でつないだまくらぎを発泡ネオプレン板で支持する構造となっています⁵⁾。

②地下鉄の弾直軌道⁶⁾

地下鉄は主に道路の下に建設されていましたが、1970年代以降では地下鉄網が拡充するにしたがって、民地の真下に地下鉄を通す必要が増えてきました。このような場所では、トンネルの振動が地表に伝搬することで、建物が振動することがありました。さら

に、建物の振動が空気に伝わることで騒音ともなりました。そこで、振動・騒音の対策の一環として、1974年に開業した営団地下鉄有楽町線に弾直軌道が国内で初めて敷設されました。この弾直軌道は図4に示したRSまくらぎ直結軌道の実績を踏まえ、より振動の低減効果が得られるように重量が重いPCまくらぎが用いられました。また、弾性材には、ばね係数が15~30MN/mのネオプレンが設置されました。

③A型弾直軌道⁵⁾

1970年代のはじめ頃は、高架橋などのコンクリート構造物上の直結軌道にスラブ軌道が用いられていましたが、振動・騒音の低減が求められ、A型弾直軌道が開発されました(図5参照)。A型弾直軌道の主な特徴は以下のとおりです。

- ・1締結装置当たりのまくらぎを支持するばね係数を40MN/m程度とする。
- ・PCまくらぎの重さを通常の2倍程

度(540kg)にする。

A型弾直軌道を大阪環状線に敷設し、施工前のバラスト軌道(バラストマットなし)と比較した結果、振動レベルでは高架橋の裏側で約10dBの低減効果が確認され、騒音では高架橋の裏側と真下で約4~5dB(A)の低減効果が確認されました。

④B型弾直軌道

営業線に敷設されたA型弾直軌道で1レール締結装置当たりのまくらぎを支持するばね係数を測定したところ、設計した値(40MN/m)の4倍程度になることが確認されました。この原因は弾性材が樹脂モルタルで拘束され、変形しにくくなったためと考えられました⁷⁾。そこで、図6に示すようにA型弾直軌道で用いた弾性材よりも軟らかく安価なウレタン発泡エラストマーを取り付けたPCまくらぎを用いたB型弾直軌道が開発されました⁸⁾。

各種試験を行った後、小山試験線に

敷設した結果、1レール締結装置当たりのまくらぎを支持するばね係数はおおむね40MN/mとなりました。バラスト軌道(バラストマットあり)と振動・騒音を比較した結果、振動レベルでは高架橋の裏側で7dBの低減効果が確認され、また騒音では高架橋の裏側で7dB(A)、真下で4dB(A)の低減効果が確認されました。

⑤最近の弾直軌道

1994年に開発された弾性バラスト軌道の建設状況を図7に示します⁹⁾。この軌道はB型弾直軌道よりも安価で、バラスト軌道と同程度の騒音となるように設計されました。PCまくらぎを支持する位置はレール直下部のみとすることで、弾性材とコンクリート道床の量を減らし、さらにPCまくらぎをスリム化することでコストダウンが図られました。なお、コンクリート道床からの反射音を減らすために、まくらぎ回りに吸音バラストが散布されています¹⁰⁾。

ます¹⁰⁾。

1998年には図8に示すD型弾直軌道が開発されました(図1のまくらぎ直結軌道がD型弾直軌道です)。この弾直軌道では、PCまくらぎをコンクリート製の道床に埋設した防振箱の中に設置します。そのため、コンクリート道床を痛めることなくPCまくらぎを防振箱から取り出せるので、PCまくらぎや弾性材を容易に交換することができます⁴⁾。

2010年には図9に示す低コスト化した着脱式弾直軌道が開発されました。この弾直軌道は、コンクリート道床に埋め込んだ防振キャップ(ゴム)とPCまくらぎとの境界面に縁切材を挟み込むことにより、防振箱を用いなくてもPCまくらぎ下の弾性材を交換することができます¹¹⁾。

まくらぎの形は一般的な弾直軌道と異なりますが、図10に示すフローティング・ラダー軌道が1998年に開発さ

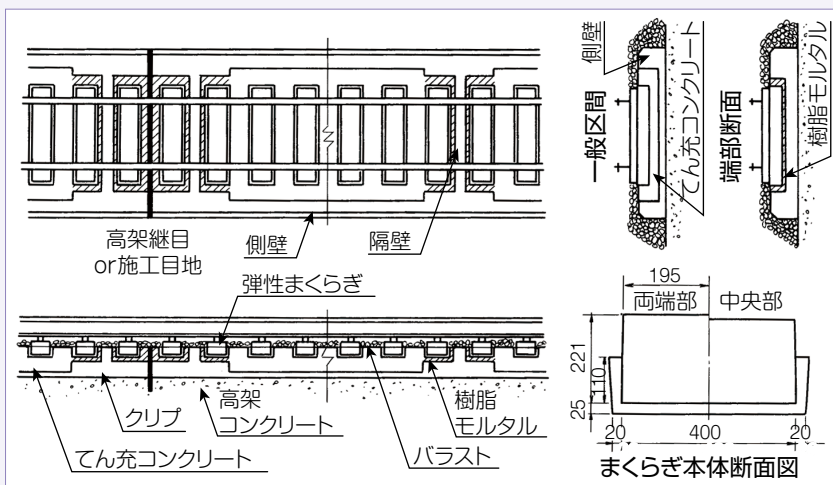


図6 B型弾直軌道⁸⁾

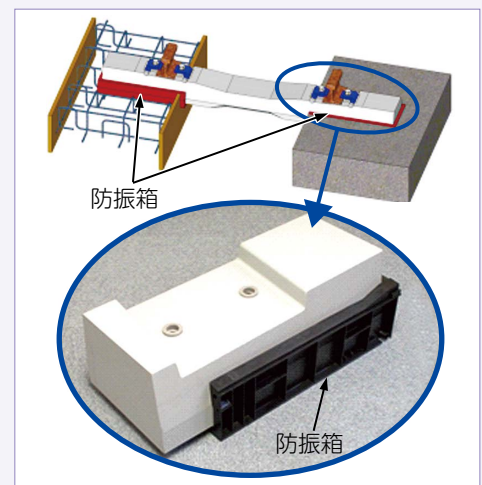


図8 D型弾直軌道

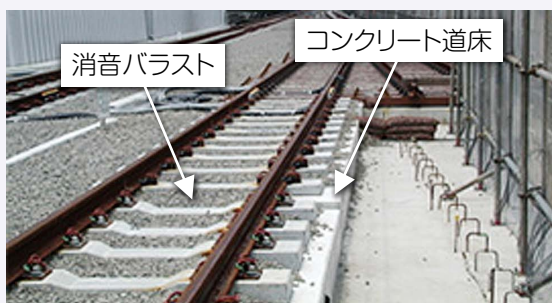


図7 弾性バラスト軌道の建設状況⁹⁾

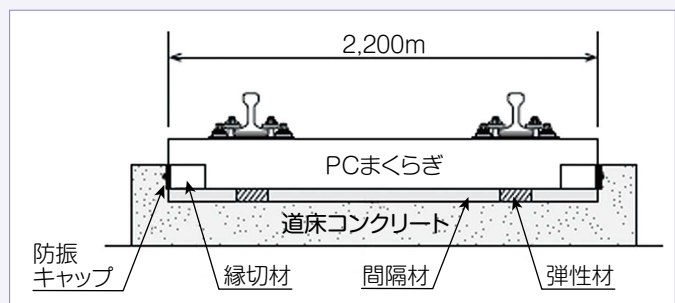


図9 着脱式弾性まくらぎ直結軌道¹²⁾

れました。この軌道は、レール長手方向に長いラダーマクラギを防振装置や弾性材で支持した構造となっており、レールとラダーマクラギの両方で荷重を分散することができるため、振動・騒音の低減効果が高いのが特徴です¹²⁾。

⑥最新の弾直軌道¹³⁾

これまでの一般的な弾直軌道に用いられているコンクリート道床には、**図11**に示すような鉄筋が配置されていますが、鉄筋の形を設計図に合わせ加工したり、PCま

くらぎのまわりに正確に鉄筋を配置したりするには時間とコストがかかっていました。

そこで、2017年に開発されたのが**図12**に示すS型弾直軌道です。S型弾直軌道のコンクリート道床には短繊維を混入して補強したコンクリートが用いられ、さらにコンクリートの収縮で生じる可能性があるひび割れを、強度に影響しない位置に誘導するための目地が設けられています。また、**図13**に示すようにPCまくらぎの側面にはせん断キーがあり、この部分で横方向（まくらぎ長手方向）の荷重に抵抗する構造となっています。このような構造とすることで、コンクリート道床をスリム化でき、鉄筋も不要となることから、敷設速度の向上とコストの削減が可能となりました。

おわりに

弾性まくらぎ直結軌道は地下鉄や高架橋などの振動・騒音の低減に効果を発揮してきました。

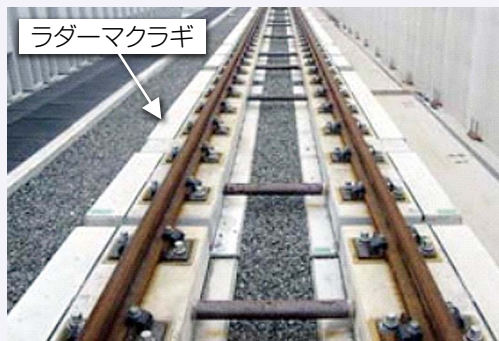


図10 フローティング・ラダー軌道

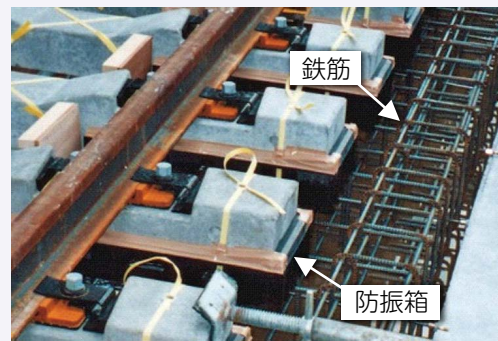


図11 D型弾直軌道の鉄筋の状況



図12 S型弾直軌道¹³⁾

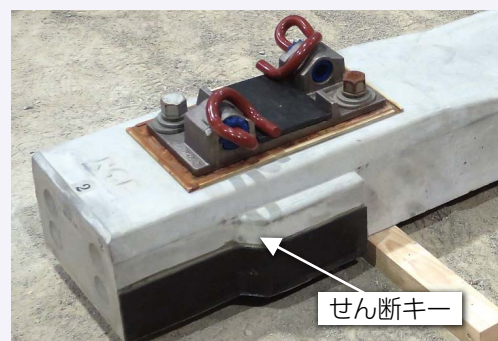


図13 S型弾直軌道用PCまくらぎ¹⁴⁾

一方で、とくに超高速鉄道においてはさらに低い周波数帯域の振動の低減が必要とされる場合があります。それが可能な軌道構造としては、軌道の質量が重く、通常の弾直軌道よりもさらに軟らかく支持されるフローティング

スラブ軌道が有力です¹⁵⁾。鉄道総研では、超高速走行でも振動低減が可能なフローティングスラブ軌道の実用化を目指し、今後も研究開発を進めてまいります。

(高橋貴蔵／軌道技術研究部
軌道・路盤研究室)

文献

- 1) 川口泉：連続立体交差事業等に関する最近の動向2015.11, http://www.renritsukyo.com/01Renritsukyo/pdfs/SaishinDoko_0.pdf, 2015
- 2) 東京都建設局：連続立体交差事業（連立事業）ポータルサイト 事業の効果, <http://www.kensetsu.metro.tokyo.jp/content/000031083.pdf>
- 3) 須永陽一：防振軌道の開発, RRR, Vol. 45, No. 12, pp. 13-18, 1988
- 4) 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
- 5) 佐藤吉彦, 平田一男, 小井土八十一, 岩崎岩雄, 宇佐美民雄：弾性まくらぎ直結軌道の提案とその敷設試験, 鉄道技術研究所速報, No. 76-1005, 1976
- 6) 渡辺時男, 中村繁之：地下鉄の騒音・振動, 土木学会誌, Vol. 60, No. 3, pp. 25-31, 1975
- 7) 平田五十, 大櫛淳, 石井太一, 小井土八十一：弾性まくらぎ直結軌道の営業線敷設効果試験, 鉄道技術研究所速報, No. 77-141, 1977
- 8) 佐藤吉彦, 大石不二夫, 平田五十, 宇佐美民雄, 長藤敬晴, 岩崎岩雄：コンクリートでん充式弾性まくらぎ直結軌道（B型弾直軌道）の開発, 鉄道技術研究報告, No. 1170, 1981
- 9) JR東日本コンサルタンツ：業務紹介 施工技術, <https://www.jrc.jregroup.ne.jp/gyomu/seko/>
- 10) 永谷健, 米倉頼夫, 三幣高吉, 中山弥須夫：弾性バラスト軌道の開発, SED, No. 3, pp. 72-77, 1994
- 11) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構設備部軌道課：最近の軌道構造, 鉄道・運輸機構だより, No. 36, pp. 4-7, 2013
- 12) 渡辺勉, 後藤恵一, 涌井一：軌道の性能向上を目指して-ラダーマクラギの開発-, RRR, Vol. 73, No. 6, pp. 12-15, 2016
- 13) 谷川光, 高橋貴蔵, 桃谷尚嗣, 吉川秀平：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, 鉄道総研報告, Vol. 31, No. 12, pp. 23-28, 2017
- 14) 谷川光, 吉川秀平, 高橋貴蔵, 桃谷尚嗣：弾性まくらぎ直結軌道で騒音・振動を低減する, RRR, Vol. 75, No. 7, pp. 20-23, 2018
- 15) 桃谷尚嗣, 鈴木健司, 名村明, 藤井光治郎, 安藤勝敏, 芦谷公稔, 堀池高広：コイルばね防振軌道の性能と評価, 鉄道総研報告, Vol. 15, No. 4, pp. 27-32, 2001