

制震装置で鋼鉄道橋を地震から守る



和田 一範
Kazunori Wada

鉄道地震工学研究センター
地震応答制御研究室
主任研究員



名波 健吾
Kengo Nanami

前 鉄道地震工学研究センター
地震応答制御研究室
研究員



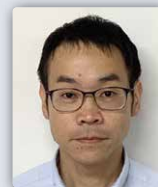
豊岡 亮洋
Akihiro Toyooka

鉄道地震工学研究センター長



土井 達也
Tatsuya Doi

鉄道地震工学研究センター
地震動力学研究室
副主任研究員



福本 守
Mamoru Fukumoto

西日本旅客鉄道株式会社
大阪工事事務所 施設技術課
課長代理

はじめに

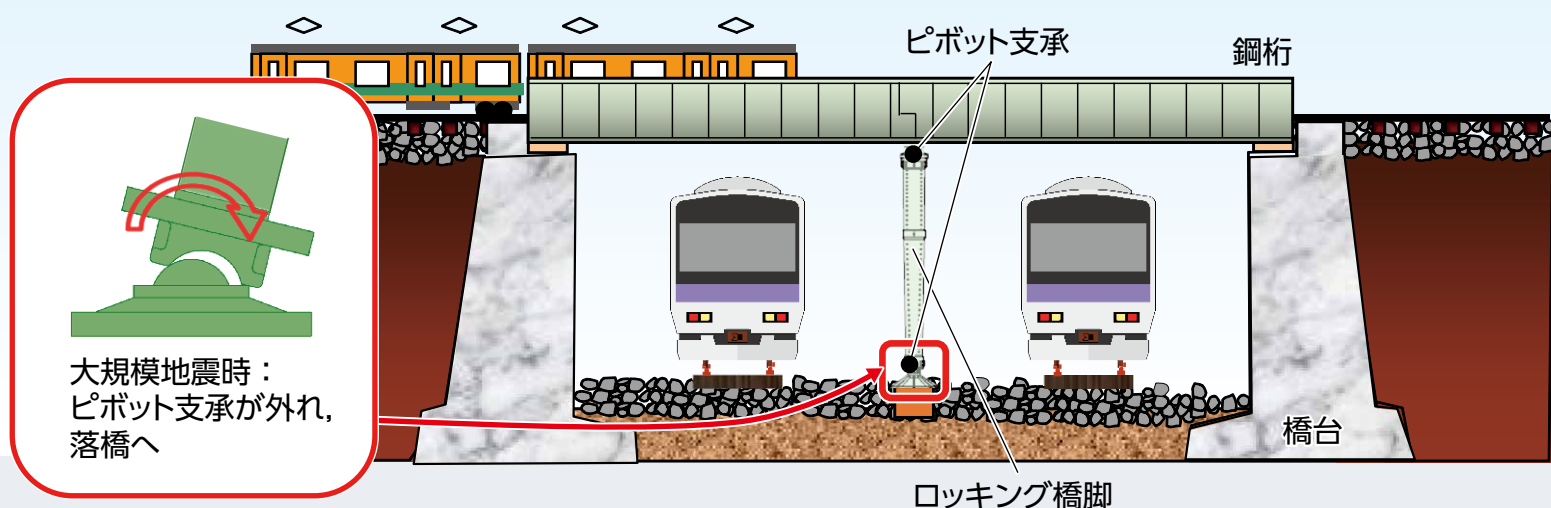
近年発生した大地震を契機として、都市部に多く存在するロッキング橋脚を有する鋼鉄道橋(図1)の耐震対策が求められています。ロッキング橋脚とは橋りょうの中間部分に設置される、上下に**ピボット支承**を設けた鋼製の柱で

す。地震時には鋼桁が変位するとともに、ロッキング橋脚が回転しますが、その回転角が大きすぎるとピボット支承が逸脱し、落橋に至る可能性があります。しかし、このような鋼鉄道橋は、周辺環境によって厳しい施工の制約条件があるため、既存の対策工法が適用できない場合があります。そこで、施工の制約条件をクリアするとともに、必要とされる耐震対策が実施可能な新しい装置を開発しました。本稿では装置の概要、効果検証、取り付け方法、実橋りょうへ適用事例などについて紹介します。

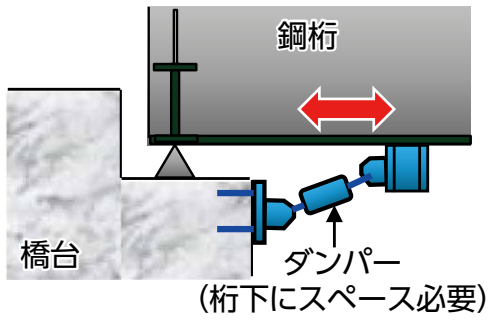
ピボット支承

球面形状をした2つの凹凸型の部品が組み合わせることにより、全方向に回転することができる支承。支承とは、桁の自重を下部構造に伝える支持部分を指します。

図1 ロッキング橋脚を有する鋼鉄道橋のイメージ

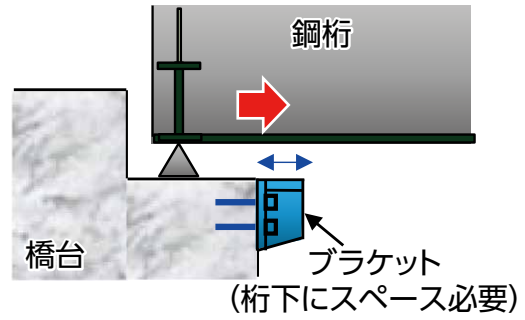


地震時の桁変位をダンパーで低減



(a) ダンパーによる制震装置

地震時に桁が大きくずれても落橋しないように、ブラケットで桁座を拡幅



(b) ブラケットによる落橋防止装置

図2 既存の対策工法の例

装置の開発経緯

2016年に発生した熊本地震においては、ロッキング橋脚を有する道路橋が桁の過大な変位に伴うピボット支承の逸脱によって落橋しました。鉄道においても、同様の構造を有する鋼鉄道橋が明治～昭和初期に建設された都市内の線区に多く存在しています。熊本地震における道路橋の落橋事例を受け、重要線区におけるロッキング橋脚を有する鋼鉄道橋の落橋対策を推進することを目的として、国土交通省により省令が改正され¹⁾、各鉄道事業者で対策が進められることとなりました。

都市部の鋼鉄道橋では、桁下がほかの鉄道路線や緊急輸送道路などで利用されている場合があります。そのため、落橋すると桁下の線路空間や道路空間が桁によって占有されることで、当該路線の被害だけでなく、周辺に大きな影響を与える場合があります。また、落橋しなくともピボット支承や桁に大きな損傷が生じた場合は、復旧に時間がかかり、長期間、運休することが考えられます。重要線区では、落橋を防止するだけでなく、可能な限り桁の変位を低減す

ることで、早期の復旧や運転再開を可能とすることも重要となります。そのための選択肢のひとつとして制震装置の導入が考えられます。

このとき、前述のような桁下の利用状況を踏まえますと、ダンパーを用いた制震装置やブラケットを用いた落橋防止装置といった桁下にスペースが必要な既存の対策工法(図2)が適用できない可能性があります。その場合、橋台上に装置を設置することが考えられますが、橋台上も狭く(図3)、施工や装置の設置に十分なスペースが取れない場合が考えられます。

このような背景から、桁下の空間を侵すことなく、狭い箇所に施工可能という施工の制約条件をクリアするとともに、桁の変位抑制と落橋防止という要求事項を満たす装置の開発が必要とされていました。

図3 狭い橋台上の例



制震

構造物に対して、地震時などの振動エネルギーを吸収する装置を設けることで、対象とする構造物の減衰性能を向上させ、応答を低減させることを指します。

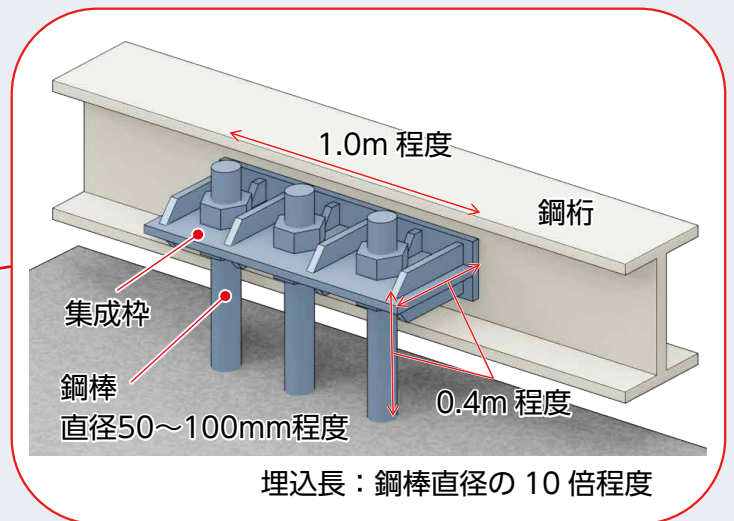
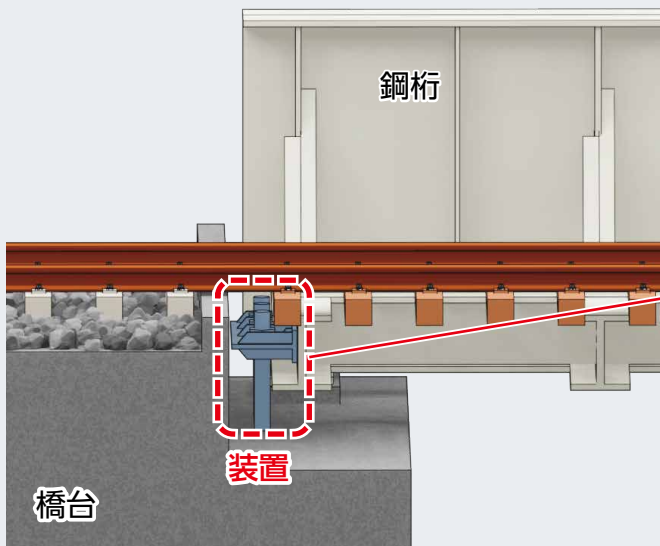


図4 装置の概形と設置イメージ

装置の概要

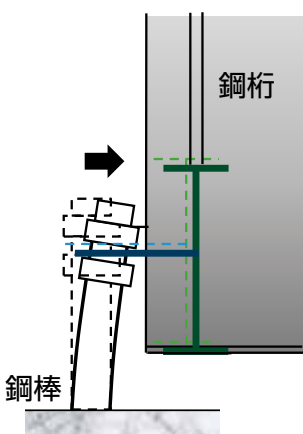
装置の設置イメージと概形を図4に示します。装置は橋台に埋め込んだ複数の鋼棒が配置されており、それらを一体化させるための取り付け治具（以下、集成枠と呼びます）を介して桁に取り付けることで、地震の際に桁にかかる慣性力を一様に鋼棒群に伝える構造としています。鋼棒の直径が50～100mm程度、装置全体でも幅1.0m×奥行0.4m×高さ0.4m程度と小型のため、桁下の空間を侵すことがなく、また狭い橋台上にも設置が可能です。装置の機能を図5

に示します。図5(a)のように、地震時に桁が変位すると集成枠を介して、鋼棒に曲げ変形が生じます。このときに、鋼棒が塑性化してエネルギーを吸収することから、桁の変位を抑制する制震効果が期待できます。また、図5(b)のように、非常に大きな揺れが発生して、桁が落橋しそうになったとしても鋼棒だけで桁の重量を支えることができ、落橋防止を実現しています。

装置による制震効果の検証

装置による制震効果の検証の例として、一般的な複線3主桁、2径間下路プレートガード橋[®]を対象とした動的解析例²⁾を紹介します(図6)。まず、制震効果を検証するうえで目標値はさまざまな観点や要素によって決まりますが、今回の解析ではロッキング橋脚の回転角がピボット支承の逸脱しない大きさとしました。また、別途実施した実

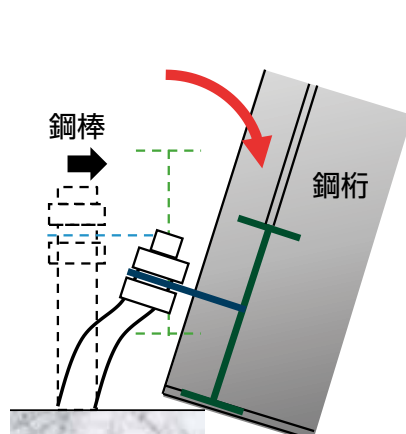
図5 装置の機能



鋼棒の曲げ変形による
塑性化、エネルギー吸収

制震機能

(a) 制震機能



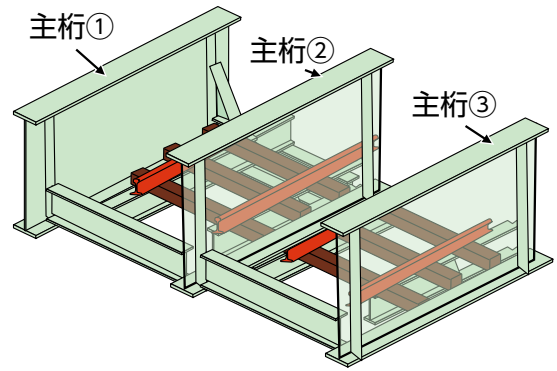
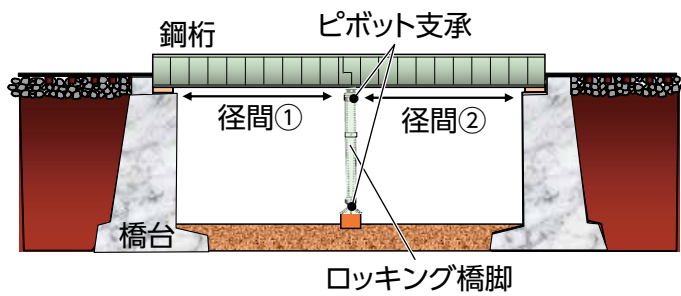
装置による桁の自重支持

落橋防止機能

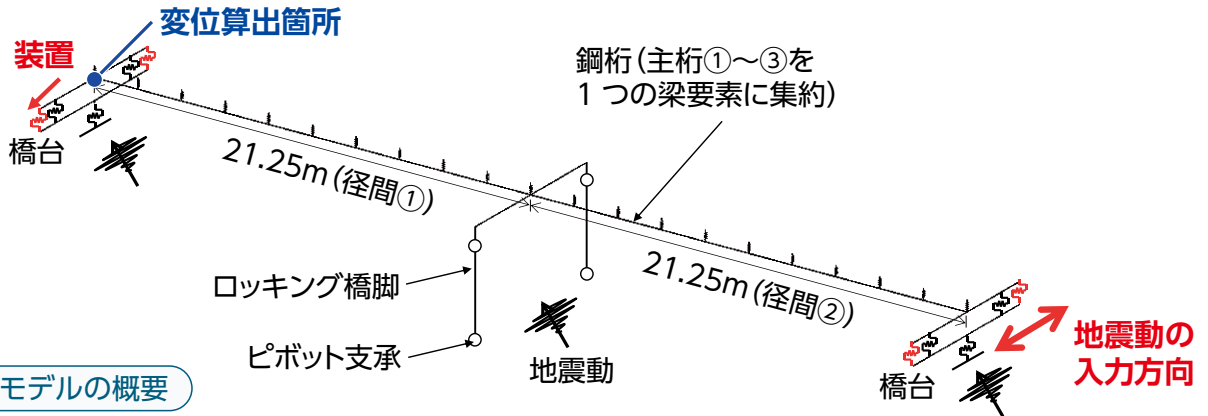
(b) 落橋防止機能

下路プレートガード

プレートガードは、鋼板や形鋼の組合せによって構成される桁をいいます。線路が橋桁の下方によるプレートガードを下路プレートガードといいます。通常は、道路や鉄道の上を乗り越すような場合で桁下のスペースに制約がある場合に採用されます。



(a) 対象構造物のイメージ



(b) 解析モデルの概要

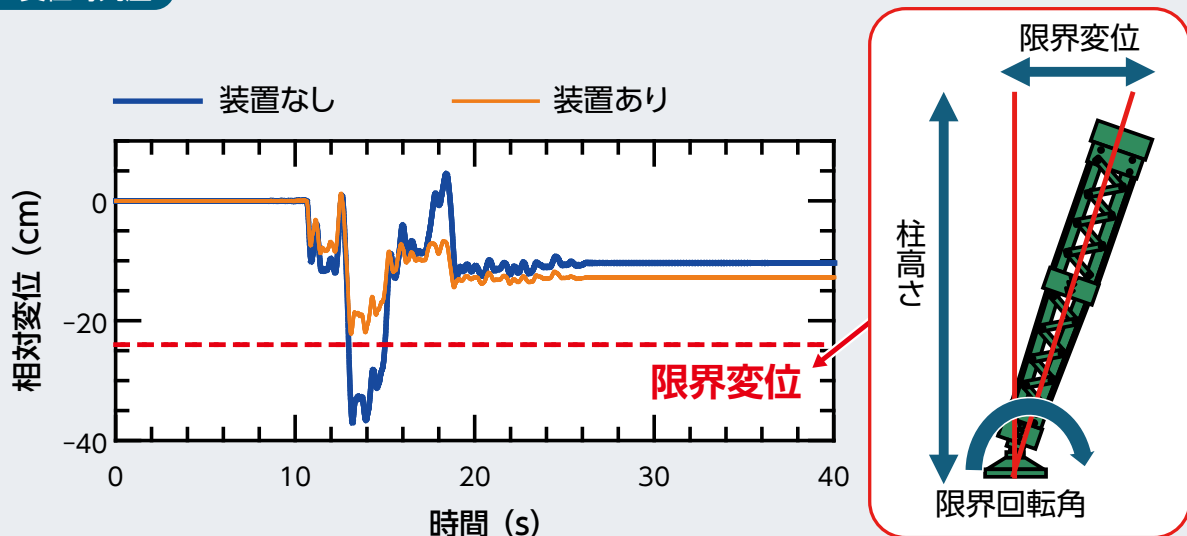
図6 制震効果の検証に用いた解析的検討の概要

験での評価結果²⁾に基づき、直径50mmの鋼棒3本の構成の装置を用いた場合と、用いない場合で解析を行いました。想定する地震は「鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)」³⁾のL2地震動スペクトルII(内陸活断層型の地震)とし、この波形を解析モデル(図6(b))に入力したケースで解析を行いました。

解析結果の例を図7に示します。装置がない

場合は、桁の変位が37.0cmであり、ピボット支承が逸脱する角度を超過する大きさでした。しかし、装置がある場合は22.1cmであり、変位が40%程度低減するとともに、ピボット支承が逸脱する角度を下回ることが確認できました。このように、装置を設置することで、制震機能により橋りょうの応答を目標値以内に収めることができます。

図7 桁の変位時刻歴



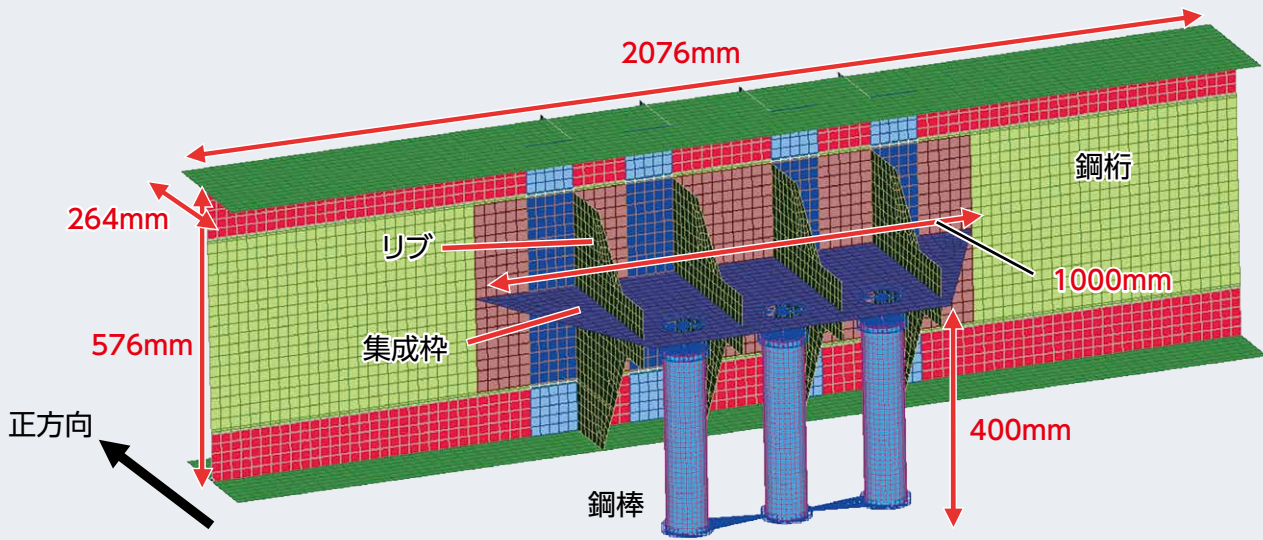


図8 桁の取り付け部に関するFEM解析モデル

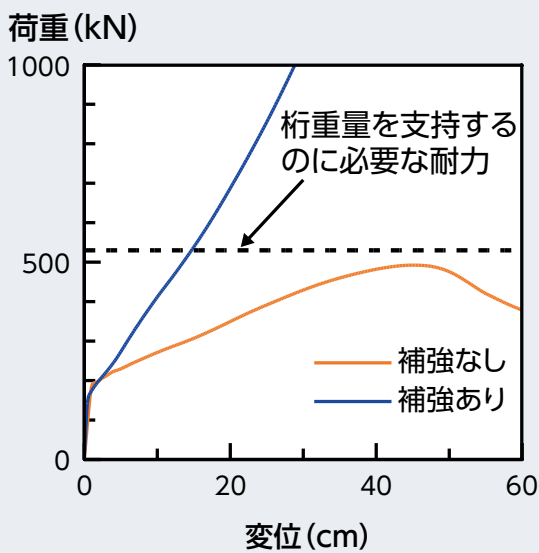


図9 桁の荷重-変位関係

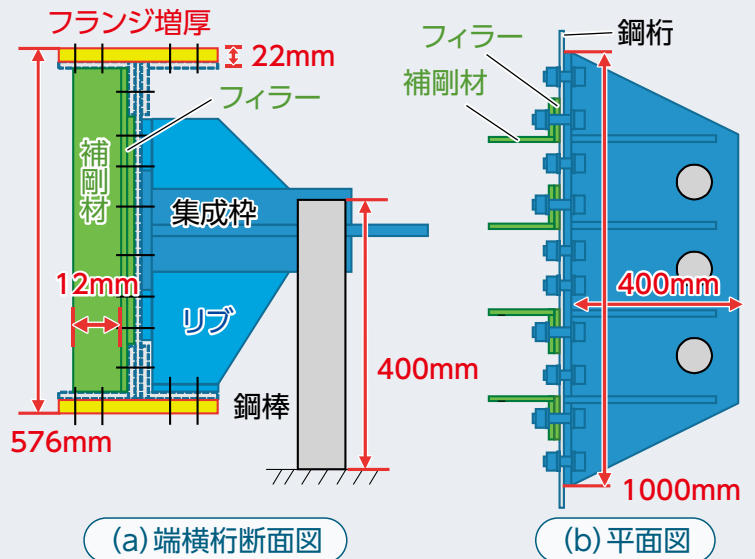


図10 桁の取り付け部の補強例

装置の取り付け方法

装置は、集成樑を用いて鋼桁に鋼棒を取り付けることとなります。集成樑の設置に際しては、鋼棒からの力を、鋼桁を介して桁に円滑に伝える必要があります。このとき、取り付ける鋼桁によっては鋼棒からの力を桁に十分伝えることができず集成樑が損傷する場合があります。

FEM解析

桁や橋脚などを小さな有限個の要素に分割し、要素ごとの力の釣り合いを考えた連立方程式をコンピューターで数値解析的に解くことで、桁や橋脚などの応力分布や変形などを近似的に求める方法を有限要素法 (Finite Element Method, FEM) 解析と呼びます。

このような場合は、取り付け部の補強が必要となります。どのような補強を行うかは、**FEM解析**®などを用いて、各橋りょうの状況に応じて適切な方法を検討することが必要です。検討の一例²⁾を図8に、補強効果の評価結果を図9に示します。解析例では、補強しない場合は落橋防止装置として求められる荷重に達する前に取り付け部分の損傷が進み、取り付け部分が桁重量を伝えることができないことがわかります。一方で、図10に示す補強 (鋼材) を設置することにより、桁重量を支持する耐力が得られることがわかります。なお、橋台への鋼棒の設置は「あと施工アンカーの設計・施工の手引き」⁴⁾に従って行います。

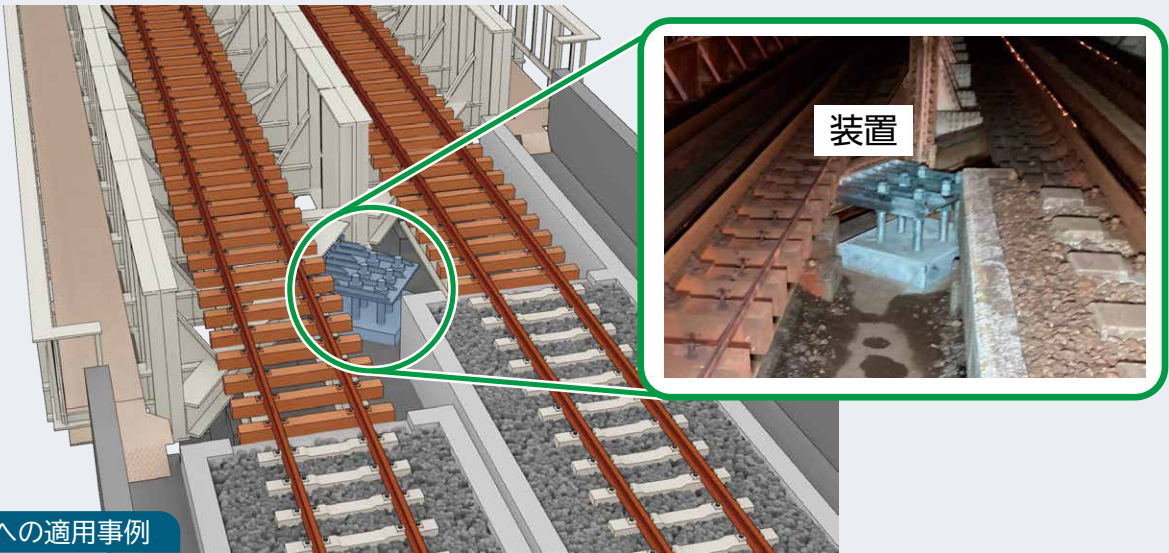
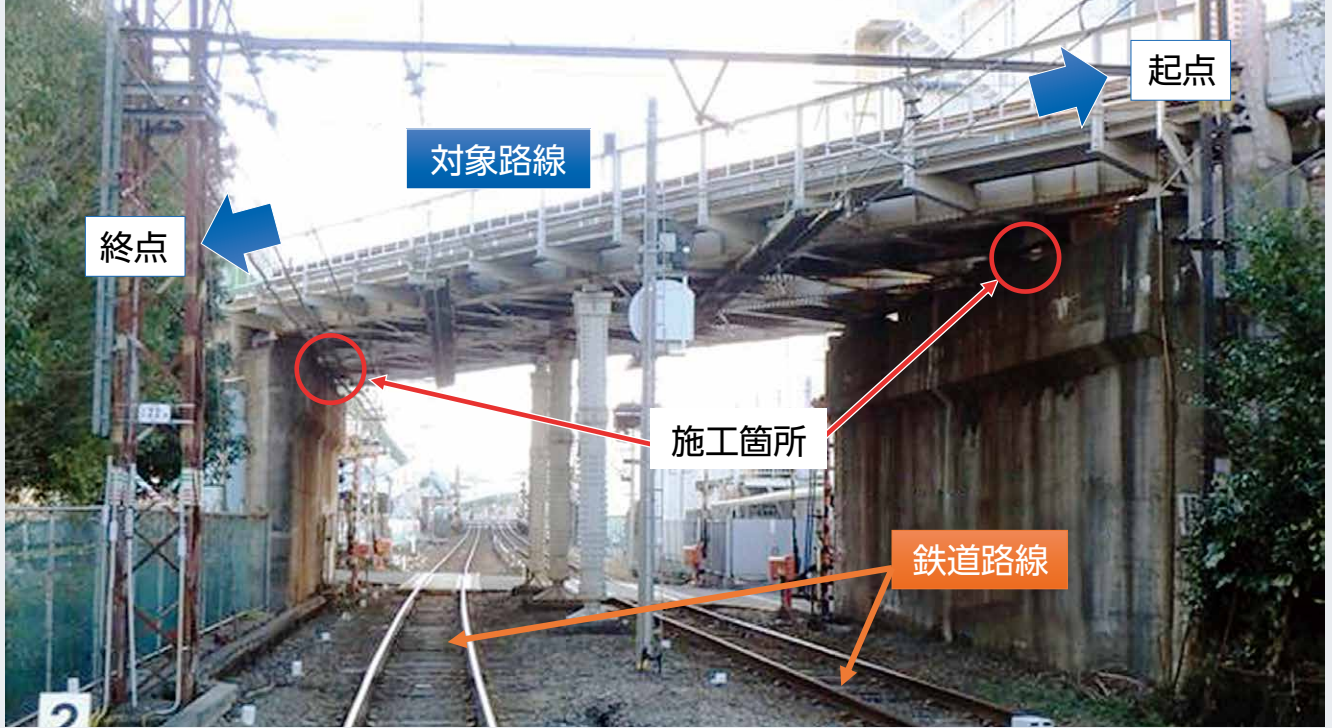


図11 実橋りょうへの適用事例

橋りょうへの設置事例

開発した装置は、2022年に西日本旅客鉄道株式会社に初めて採用されました。設置状況を図11に示します。1928年しゅん功の鋼鉄道橋（下路プレートガーダー橋）で、桁下に鉄道路線が交差しており、桁下に十分なスペースがなく、既存の対策工法が適用できないことから、本装置が設置されました。この設置を行う際には、前述したような動的解析による効果検証や桁との取り付け部、橋台への設置方法の検討などが行われました。

おわりに

本稿では狭い箇所へ施工が可能で制震機能と

落橋防止機能を兼ね備えた装置の概要と、制震効果の検証、取り付け方法、実橋りょうでの設置事例について紹介しました。開発装置については、今後も都市内など耐震対策の実施が困難な箇所への対策工法のひとつとして広く実用展開を図りたいと考えています。RRR

文献

- 1) 国土交通省鉄道局：特定鉄道等施設に係る耐震補強に関する省令・告示・指針，2018
- 2) 土井達也，豊岡亮洋，斉藤雅充，和田一範，名波健吾，福本守：狭隘な箇所へ設置可能な落橋防止機能兼用型制震装置の開発，土木学会論文集，Vol.79，No.13，22-13003，2023
- 3) 国土交通省監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，2012
- 4) 鉄道総合技術研究所：あと施工アンカーの設計・施工の手引き，2018