

狭隘箇所を設置可能な落橋防止機能兼用型 制震装置の開発

土井 達也¹・豊岡 亮洋²・斉藤 雅充³・
和田 一範⁴・名波 健吾⁴・福本 守⁵

¹正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター
(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

E-mail: doi.tatsuya.45@rtri.or.jp (Corresponding Author)

²正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 総務部
(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

³正会員 元 (公財) 鉄道総合技術研究所
(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

⁴正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター
(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

⁵正会員 西日本旅客鉄道株式会社 大阪工事事務所 岡山工事所
(〒700-0907 岡山市北区下石井 2-2-5 ニッセイ岡山スクエア 8F)

都市部に多く存在するロッキング橋脚を有する鉄道橋梁の地震時の落橋防止は喫緊の課題である。また、桁の応答変位を制御し、復旧性能を向上させることも重要である。しかし、これらの2つを達成するためには制震装置と落橋防止装置の2つを設置する必要があり、桁座のスペースの制約上、困難な場合がある。そこで著者らは、狭隘な桁座に設置可能で、制震機能と落橋防止機能を兼用できるデバイスを開発した。本研究では、まず要素実験により装置の非線形特性を評価した。さらに、評価した非線形特性を適用し、実際の橋梁モデルを用いて制震機能、落橋防止機能が発揮されることを確認するとともに、提案装置の桁および桁座への取付け部の構造について検討した。

Key Words: rocking pier, damping device, bridge collapse prevention function, plastic bending

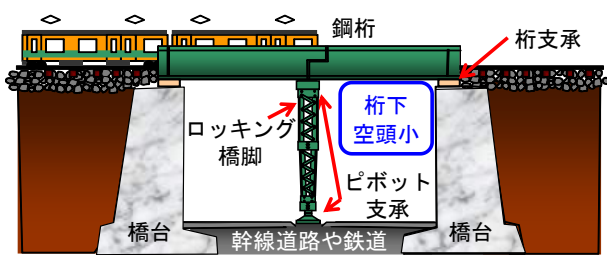
1. はじめに

2016年の熊本地震では桁の過大变位によりロッキング橋脚を有する道路橋が落橋した¹⁾。鉄道においても、図-1(a)に示すようなロッキング橋脚を有する橋梁が都市部の重要箇所などに多数存在するため、国土交通省の省令が改正され、落橋防止対策の推進が求められている²⁾。また、東北地方太平洋沖地震を契機に、鉄道の耐震設計標準において初めて、想定外の地震作用に対して構造物を破滅的な状態に陥らせない「危機耐性」の考え方が示された³⁾。この危機耐性を高める観点においても、落橋防止対策の推進は有効である。

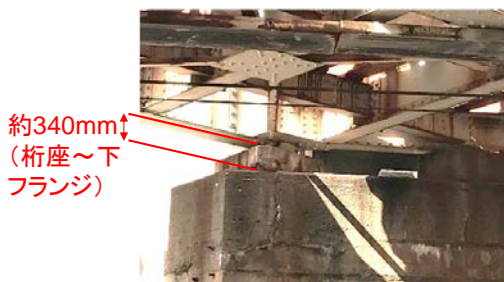
ロッキング橋脚を有する鉄道橋梁は、鋼桁を桁支承およびロッキング橋脚で支持する形式で、図-1(a)に示すように、ロッキング橋脚の上下端がピボット支承を介して

接続されるヒンジ構造となっている。本構造の特徴的な被害事例としては、桁の過大变位によるピボット支承の逸脱⁴⁾が挙げられ、これに対してピボット支承の応答に特化した挙動評価⁵⁾⁶⁾やそれを踏まえたピボット支承の逸脱防止工法の提案⁷⁾などが過去に検討されている。ピボット支承の逸脱防止工法は、ピボット支承の逸脱という事象に対する安全性は担保されるものの、桁座からの落橋という事象への対策を行うには、別途落橋防止装置を設ける必要がある。また、都市内の橋梁は一般には重要構造物であるため、地震時の桁の応答変位を低減させ、復旧性を確保することも重要である。

このような落橋防止対策と復旧性の向上を同時に実現するには、制震ダンパーの設置により桁の応答を低減させる対策と、桁座拡幅やチェーンなどの落橋防止装置を併用することが第一に考えられる。しかし、都市部の橋



(a) 概要図



(b) 支承部周辺が狭隘な箇所例

図-1 ロックンク橋脚を有する鉄道橋梁

梁は施工上の制約がある場合が多い。例えば、図-1(b)に示すように桁支承部周辺が狭隘で施工や装置の設置に十分なスペースが取れない場合や、桁下が鉄道や緊急輸送道路等に使用されており桁下空頭を侵すことができない場合などである。桁座幅やチェーンでは、一般に桁下にブラケットを設ける必要があり、桁下空頭に制約がある場合には適用が難しい。また、制震ダンパーについてもある程度の設置スペースが必要となるため、桁座が狭隘な箇所では適用が難しい。このため、桁下、桁座の施工スペースに制約がある場合には、既存の制震装置や落橋防止装置は設置できない場合が多く、特に両者を設置可能な箇所は限定的であると考えられる。以上から、省スペースかつ、制震機能と落橋防止機能を兼用できる装置の開発が求められる。

制震機能と落橋防止機能を兼用する装置に関する既往の研究として、例えば頭井ら⁹⁾は、単純支持桁を連続支持するロックンク橋脚に対し、レベル2のような大地震に対して支承を意図的に破断させ、支承の破断後は落橋防止構造を兼ねる鋼製ペローズによるエネルギー吸収により上部構造や橋脚の変位を抑えることを提案し、その有効性を有限要素法による地震応答解析によって確認した。一方、頭井らの手法は橋脚上で桁同士を連結する手法であり、桁端部での落橋対策工として適用することは難しい。また、線路直角方向に対する有効性については言及されていない。村田ら¹⁰⁾は、支承周辺が狭隘な箇所に落橋防止装置を設置するための一方策として、L1地震時に対してはFRP (Fiber Reinforced Plastic)で製作した外殻で抵抗させるが、L2地震時には外殻を破壊させ、内

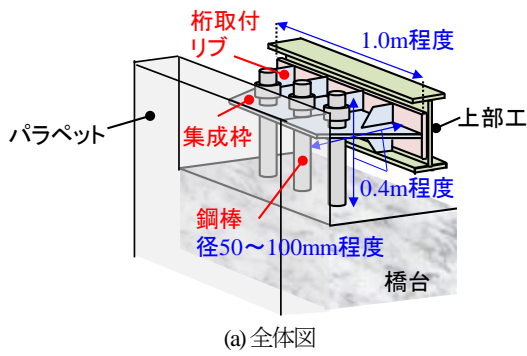
部に配置したエネルギー吸収性能の高い積層繊維ゴムに衝撃力を緩和させる工法を考案し、要素実験や数値解析により有効性を示した。一方、FRPや積層繊維ゴムは一般にコストが大きく、積層繊維ゴムについてはオゾン劣化等の維持管理上の問題も考えられる。

そこで著者らは、上述した制震機能と落橋防止機能を兼用可能な従来工法の問題点を解決できる装置として、桁座に複数本の鋼棒を設置し、鋼棒の塑性変形による制震機能と、鋼棒のせん断抵抗による落橋防止機能の双方を有する装置（以下、提案装置）を提案する。本稿では、まず提案装置の概要と全体の検討フローについて述べる。次に、要素実験による装置の非線形特性評価について述べたあと、動的解析による制震効果の検証、落橋防止効果の検証を行う。最後に、FEM解析による装置の桁への取り付け手法の検討について述べる。

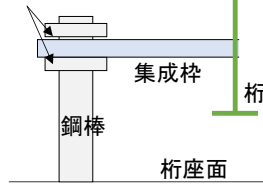
2. 提案装置の概要、要求性能および本研究の構成

(1) 提案装置の概要

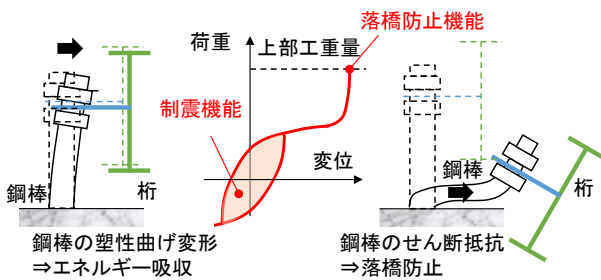
提案装置の概要を図-2に示す。提案装置は図-2(a)に示すように、複数の鋼棒を下部工天端に埋め込んで設置し、集成棒を介して桁に取り付けることで、桁の慣性力を一様に鋼棒群に伝達する構造である。鋼棒と集成棒の接続部分は、図-2(b)のように、ナットで集成棒の上下から、鋼棒上端の回転を拘束しないように若干の遊間を空けて固定することを想定している。提案装置の制震機能および落橋防止機能のイメージを図-2(c)に示す。設計地震動に対しては、鋼棒の塑性化後の曲げ変形によるエネルギー吸収効果で制震機能を発揮し、桁の応答変位を抑制して復旧性を向上させるとともに、ピボット支承の応答回転角を抑制して逸脱を防止する。さらに、設計地震動を超える地震作用に対して図-2(c)右側に示すように鋼棒が幾何学的に大きく変位した場合には、鋼棒のせん断耐力で桁死荷重に抵抗することで落橋防止機能が発揮される。なお、鋼棒径が50~100mm程度、装置は幅1.0m×高さ0.4m程度の小型サイズを想定しているため、図-1(b)や図-2(d)に示すような狭隘な桁座上に設置可能であり、桁下空頭を侵さない。また、提案装置で発揮される制震機能は、鋼棒径、鋼棒本数、鋼棒材料、荷重の作用高さなどを調整することで任意に調整可能である。以上より、提案装置は狭隘な桁支承部に設置可能で、制震機能と落橋防止機能を兼用可能である。なお、提案装置の制震機能は、桁座および桁取り付け部が地震作用に対して損傷しないように設計することを前提としている。また、落橋防止機能は、桁座および桁取り付け部が降伏はしても、破壊には至らないことを前提としている。



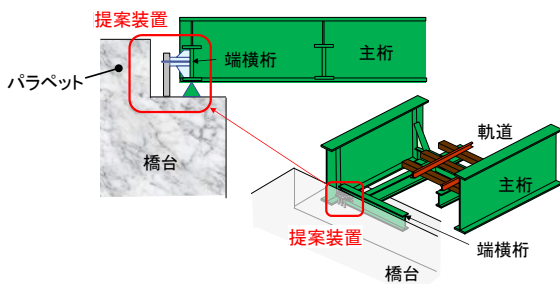
- ナットで集成枠の上下から固定
- 鋼棒上端の回転を拘束しないように若干の遊間をあげる



(b) 集成枠と鋼棒の固定部分の詳細



(c) 制震および落橋防止機能のイメージ



(d) 提案装置の設置方法
図-2 提案装置の概要

(2) 提案装置の要求性能

提案装置の要求性能は、構造物の重要度などに応じて設定する必要があるが、本研究では図-1(a)に示すように桁がピボット支承を有する橋脚で支持されている構造を想定しているため、一例として以下のように設定した。
制震機能：安全性については、設計地震動に対してピボ

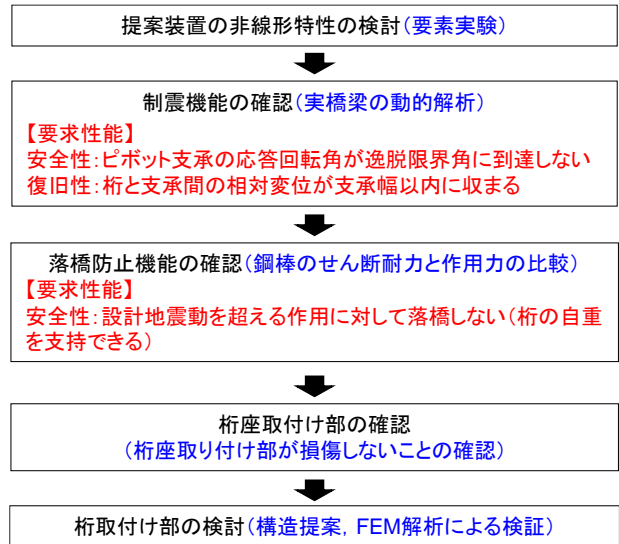


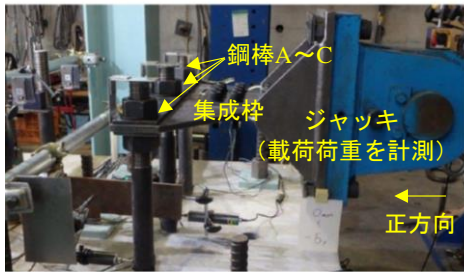
図-3 本研究の構成

ット支承の応答回転角を逸脱限界角以内に抑えること、復旧性については、設計地震動に対して桁と支承間の相対変位が支承幅以内に収まる（桁が支承上に載っている）ことを要求性能とする。

落橋防止機能：設計地震動を超える作用に対して落橋しないことを要求性能とする。

(3) 本研究の構成

図-3に本研究の構成を示す。まず、提案装置の非線形特性を評価する。評価方法としては要素試験、材料の非線形特性をモデル化した FEM 解析、鋼棒を片持ち梁と仮定して弾性勾配と全塑性モーメントから設定する方法などが考えられるが、本研究では要素実験に基づいて評価する。次に、提案装置を設置した場合と設置しない場合の動的解析を行い、要求される制震機能を満足することを確認する。ここで、提案装置の非線形特性については、適用する構造物の桁重量と設計地震動をもとに、文献 10)の手法に基づいて事前に概略検討を行い、実験供試体の諸元と同程度の諸元で桁変位が制限値内に抑制されることが確認されたため、実験から求めた非線形特性を適用する。次に、桁自重による鋼棒のせん断応力の応答値と鋼棒のせん断耐力を比較することにより、要求される落橋防止機能を満足することを確認する。最後に、鋼棒に作用する最大外力に対して、桁座への取付け部についてはあと施工アンカーの設計・施工の手引き¹⁾に基づいて桁座取付け部が損傷しない確認する。また、桁への取付け部については、後述するように取付け部の補強が必要になることがわかったため、補強構造を提案し、FEM 解析により制震機能に対しては損傷しないように、落橋防止機能に対しては破壊しないことを確認する。



RCスタブ
(幅1500mm*奥行1500mm*高さ600mm)

図-4 正負交番載荷試験の概要

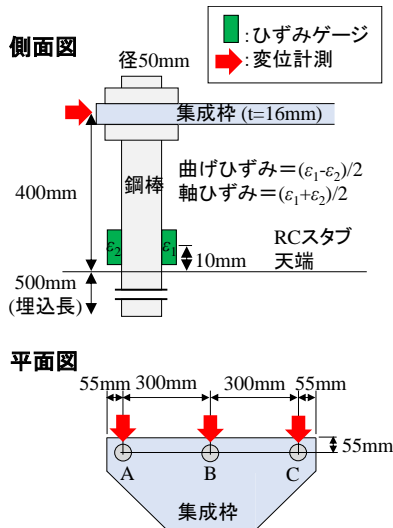


図-5 計測器配置図

3. 提案装置の要素実験による非線形特性の評価

装置を開発するにあたり、まずは、第2章で述べたエネルギー吸収効果や高い延性といった装置の根幹を成す非線形特性を評価する必要がある。そこで、要素実験として提案装置の正負交番載荷試験を実施した¹²⁾。

(1) 正負交番試験の概要

図-4に正負交番載荷試験の概要を示す。図-2(a)や図-2(d)中の橋台を模擬したRCスタブにさき施工アンカーとして500mm深さまで埋め込んだ径50mmのSS400材の鋼棒3本(鋼棒A~C)を集成枠で一体化させて、高さ400mm位置に静的荷重を作用させた。使用した鋼棒の材料定数と化学成分(ミルシート値)を表-1に示す。鋼棒の荷重の作用高さについて、作用高が過度に小さいと、せん断変形が主体となり、制震効果が期待できなくなる。また、作用高さが過度に大きいと、小さい水平荷重で基部が降伏曲げモーメントに到達して制震効果が小さくなる。本研究では、鋼棒が曲げ部材として挙動して十分な制震機能が発揮されるよう、作用高さを400mmに設定した。RCスタブには、試験中にRCスタブ自体が

表-1 鋼棒の材料定数と化学成分

鋼種	径 (mm)	降伏応力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
SS400	50	306	453	24

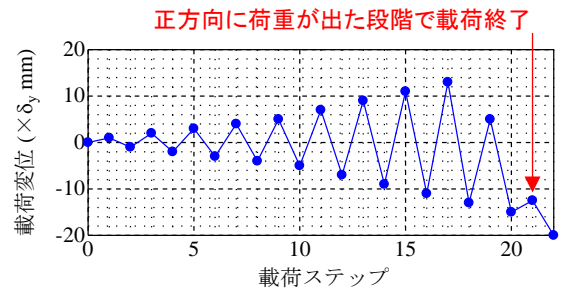


図-6 載荷ステップ

損傷しないように十分な鉄筋を配置した。

図-5に計測器配置図を示す。荷重はジャッキのロードセル、鋼棒の荷重載荷点の水平変位は各鋼棒についてレーザー変位計によって、それぞれ計測した。また鋼棒基部にひずみゲージを貼り付け、軸ひずみと曲げひずみを評価した。図-6に載荷ステップを示す。載荷ステップは荷重-変位関係の最初の折れ点を降伏変位 δ_y (=4mm)とし、 δ_y の整数倍の変位を正負交番で載荷した。ただし、変位および荷重は、図-4でジャッキが押す方向(紙面左方向)を正とした。なお、21ステップ目の載荷は、正方向の荷重が生じた段階で載荷終了とした。最終ステップ(22ステップ目、 $-20\delta_y$)にて、十分な曲げ変形が生じ、非線形特性は十分確認できたと判断して試験終了とした。なお、図-7に示すように、今回使用した載荷装置では、ジャッキが押すときは載荷点が上昇し、引くときはほぼ水平に載荷された。実現象としては、鋼棒の載荷点にほぼ水平方向に荷重が作用すると考えられるため、ジャッキが引くときの結果は補正しないが、ジャッキが押すときの結果に対しては付録に示す方法により、載荷点の上昇の影響を補正した。

(2) 試験結果と考察

試験によって得られた荷重~変位関係を図-8に、荷重作用位置の水平変位と鋼棒基部のひずみの関係を図-9に示す。ここで、図-8、図-9の変位やひずみは各鋼棒の計測結果の平均値とした。図-8には、補正前と補正後の荷重~変位関係と、群鋼棒を片持ち梁と仮定し、初期勾配を片持ち梁の弾性変位量の式から定まる勾配、折れ点を片持ち梁基部で曲げモーメントが全塑性モーメントに到達する際の水平荷重としたバイリニア型の骨格曲線を示している。なお、図-9の結果では、ジャッキが押すときの載荷点の上昇の影響を補正していない。図-8の補正後

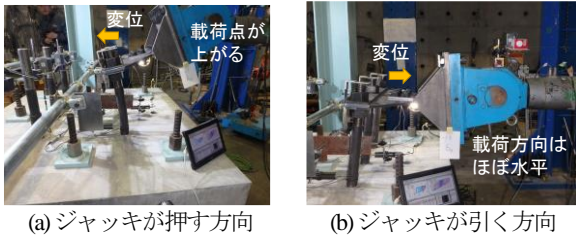


図-7 載荷時のジャッキの状況

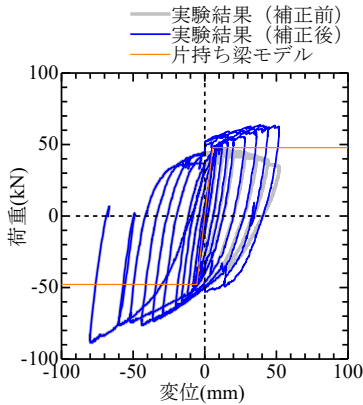


図-8 荷重～変位関係

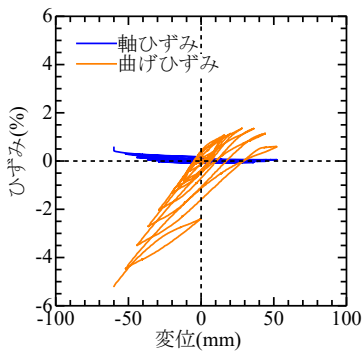


図-9 荷重作用位置の水平変位と鋼棒基部のひずみの関係

の荷重～変位関係は、鋼棒の塑性化が進行するとともに、紡錘型の履歴ループを描くことがわかる。これにより、エネルギー吸収効果が発揮され、制震機能が発揮される。また、図-8より、実験結果では全塑性モーメントから算定される水平荷重よりも大きい荷重が生じている。これは、実際の鋼材では降伏ひずみに到達後もひずみ硬化により、応力度が上昇する影響と考えられる。鋼棒のひずみについては、図-9より、鋼棒に塑性曲げひずみが生じていることがわかる。また、ジャッキが引く方向では、水平変位が80mm程度と大きくなると、軸ひずみが生じていることがわかる。これは、幾何学的非線形性によるものと考えられる。

鋼棒3本の許容せん断耐力については、SS400の規格値(短期の許容せん断応力度 136 N/mm²)を参考にするると約800kNであるため、載荷力に対して十分余裕がある。



(a) 全景



(b) 中央の鋼棒付近

図-10 載荷終了時の状況

また、最終載荷時点の供試体全景を図-10(a)に、鋼棒 B 基部の状況を図-10(b)に示す。図-10(a)より、全体としては鋼棒の基部から曲げ変形している。また、図-10(b)より、鋼棒基部に目立った損傷は見られない。

以上より、本装置が塑性曲げ変形によるエネルギー吸収能を有すること、高い延性を有することがわかった。

4. 動的解析による制震機能の評価

(1) 解析モデルおよび解析条件

解析モデルは中間にロッキング橋脚を有する鋼橋梁をモデル化した3次元の梁-ばね系モデルとした。ロッキング橋脚にはブレース材が設置されている。図-11に解析モデルを示す。加振方向は線路直角方向とした。上部工、ロッキング橋脚の重量は実重量(桁重量は1763kN、ロッキング橋脚は15.20kN)を節点重量として考慮した。列車荷重については、EA-17荷重の牽引等分布荷重(50kN/m)の70%¹³⁾として35kN/mの荷重を節点重量として考慮した。ただし、鉄道構造物の耐震設計の手引き¹³⁾に従い、地震慣性力による水平方向の列車荷重が水平震度0.3で頭打ちとなるように、非線形ばねを介して桁と接続させた。鋼桁の線路直角方向の幅は剛域でモデル化し、鋼桁、ロッキング橋脚、ブレース材は弾性の梁要素でモデル化した。

提案装置の非線形特性については、図-12に示すように実験の荷重～変位関係の骨格曲線を双曲線モデルにフィッティングしてモデル化した。履歴則はMasing則を用いた。図-13(a)に提案装置の非線形特性の設定値を示す。

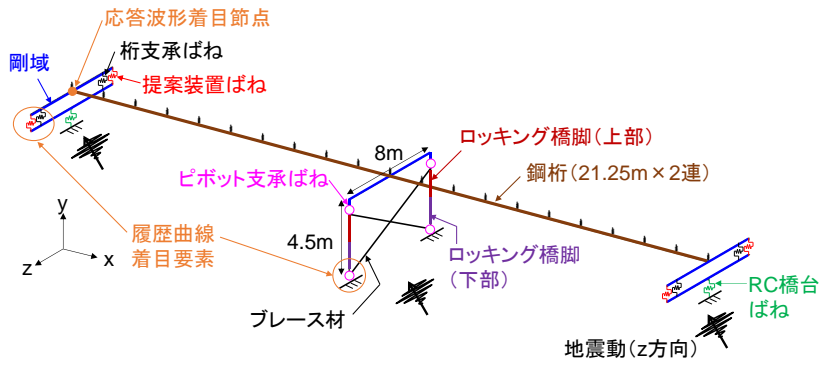


図-11 解析モデル (ばねは線路直角方向に作用)

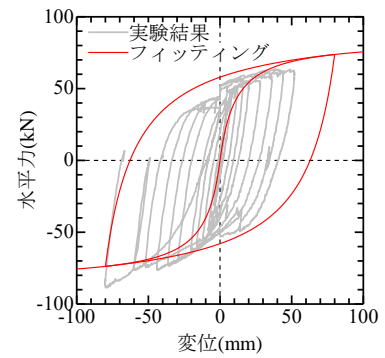


図-12 提案装置の非線形特性のフィッティング

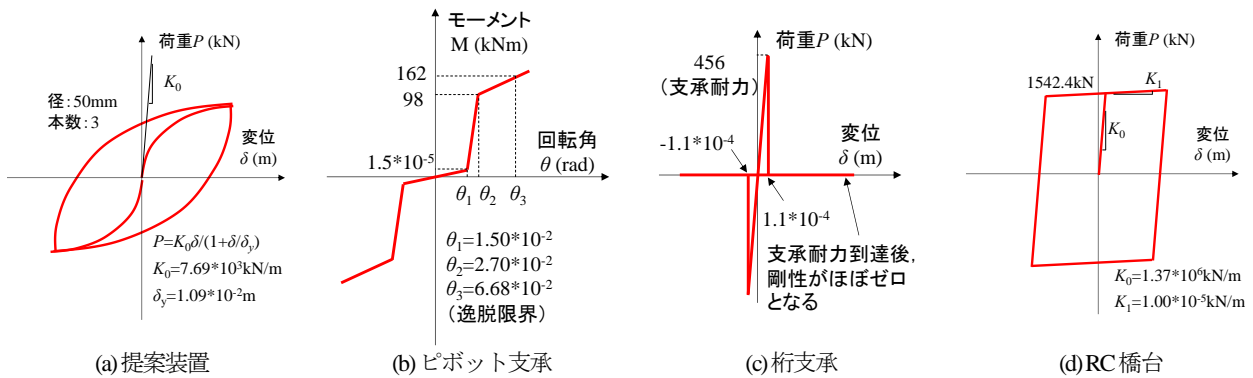


図-13 各部材の非線形特性の設定値

鋼桁およびロックンク橋脚は梁部材でモデル化した。ピボット支承は既往検討²⁾を参考に水平2方向に作用する回転ばね要素でモデル化した。桁支承ばねは破壊後に剛性がほぼ0となるギャップ型要素でモデル化し、初期剛性、耐力は実際の値を使用した。図-13(b)にピボット支承、図-13(c)に桁支承の非線形特性の設定値をそれぞれ示す。なお、対象橋梁の桁支承幅は31.4cmであるため、支承部の応答変位の制限値は31.4cmに設定する。また、RC橋台については降伏荷重に到達後剛性が低下するバイニニア型要素でモデル化した。図-13(d)にRC橋台の非線形特性の設定値を示す。

減衰マトリクスは表-2に示す要素別 Rayleigh 減衰により設定した。列車荷重連結ばね、桁支承ばね、提案装置ばねには、初期剛性の大きい要素に対する減衰の過大評価を防ぎながら計算が安定するよう、剛性マトリクスにのみ検討結果に影響を及ぼさない程度の微小な減衰を設定した。上部工、橋脚、プレース材、橋台には、各モードのモード減衰定数を概ね再現できるように Rayleigh 減衰のパラメータを設定した。ただし α を質量マトリクスにかかる係数、 β を剛性マトリクスにかかる係数と定義した。入力加速度は、図-14に示す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の地表面設計地震動 (G3 (普通) 地盤) とした。解析は Newmark- β 法 ($\beta=0.25$) により行い、積分間隔は0.01sと

表-2 要素別 Rayleigh 減衰の設定

要素	要素別 Rayleigh 減衰
上部工、橋脚、プレース材、橋台	$\alpha=0.267$ $\beta=1.76 \times 10^{-4}$
列車荷重連結ばね、桁支承ばね、提案装置ばね	$\alpha=0.0$ $\beta=1.00 \times 10^{-5}$ *

*計算の安定のため、検討結果に影響を及ぼさない程度の微小な減衰を設定した。

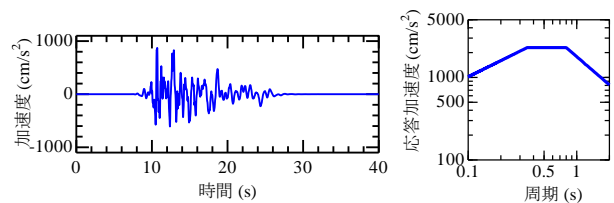


図-14 入力地震動

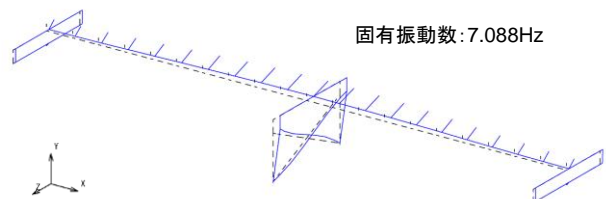


図-15 加振方向に有効質量比が最大となるモードのモード図と弾性固有振動数

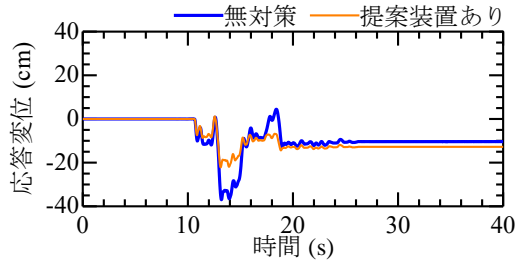


図-16 桁端部の応答変位時刻歴

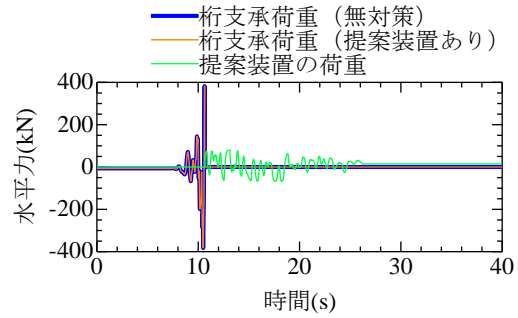


図-17 桁支承および提案装置の水平荷重時刻歴

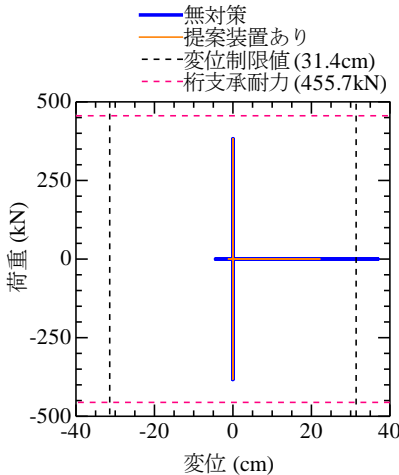


図-18 桁支承の履歴曲線

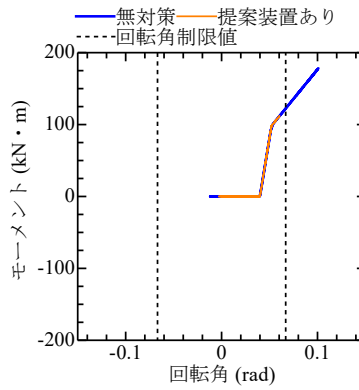


図-19 ピボット支承の履歴曲線

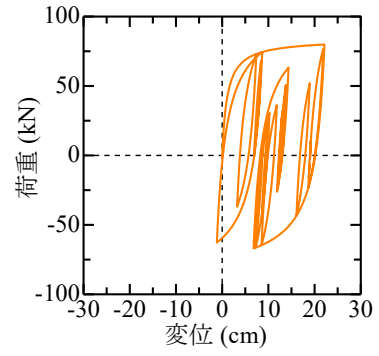


図-20 提案装置の履歴曲線

した。

(2) 解析結果および考察

固有値解析から得られた、加振方向に有効質量比が最大となるモードのモード図と弾性固有振動数を図-15に示す。加振方向において、ロッキング橋脚部が回転し、桁支承部では水平方向に滑動するモードを示すことがわかる。

次に、動的解析結果から得られた桁端部の応答変位時刻歴を図-16に示す。無対策時の応答変位（絶対値）の最大値は 37.0 cm、提案装置ありの応答変位（絶対値）の最大値は 22.2 cm であり、装置の設置により最大応答変位を約 40%低減できている。また、図-17に、桁支承および提案装置の水平荷重時刻歴を示す。提案装置を設置したケースでは、桁支承が破壊して荷重がゼロになった後に、提案装置が水平荷重を分担するようになっていくことがわかる。図-18に桁支承の履歴曲線を、図-19にピボット支承の履歴曲線を、図-20に提案装置の履歴曲線をそれぞれ示す。図-18より、桁支承はどちらのケースも耐力を超過しているものの、提案装置の設置により桁と桁支承の間の相対変位を制限値（支承幅 31.4 cm）以内に抑制できている。また、図-19より、無対策ではピボット支承の最大回転角は 0.101 rad となり逸脱限界角 0.0668 rad を超過するが、提案装置ありの条件では最大回

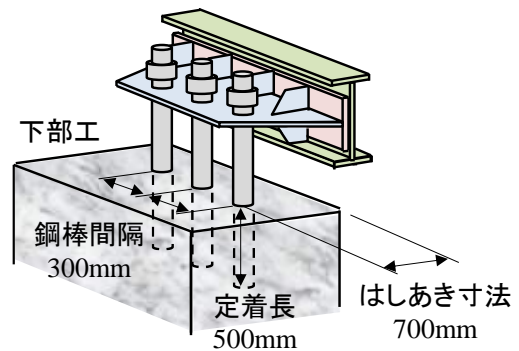


図-21 桁座取付け部概要図

転角は 0.0605 rad となり逸脱限界角を超過していない。図-20より、提案装置の履歴曲線はループを描き、履歴減衰による制震効果が発揮されることが確認できる。以上より、設計地震動に対して、提案装置が目標とする制震効果を発揮できることを確認した。なお、RC 橋台については、無対策、提案装置ありとも、降伏には至らなかった。

5. 落橋防止機能および桁座取付け部の評価

提案装置の落橋防止機能については、以下の設計荷重

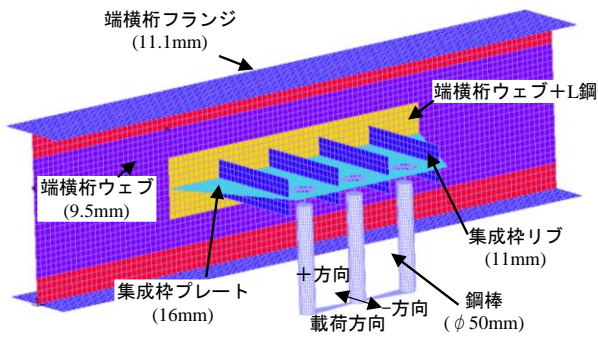


図-22 桁取付け部の有限要素モデル（補強なし）

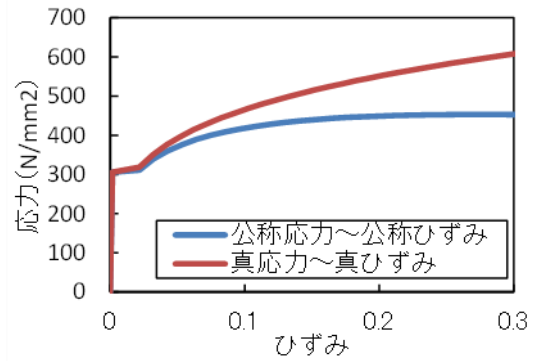
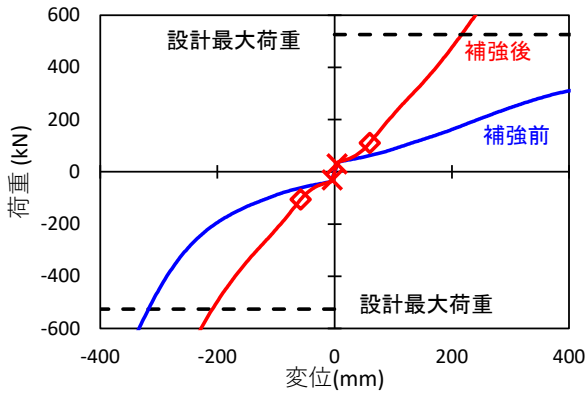
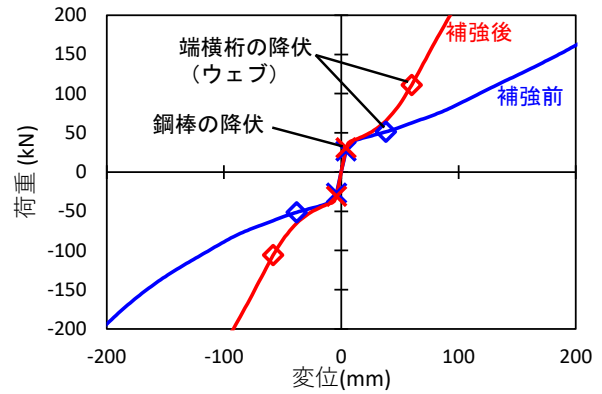


図-23 鋼材の応力ひずみ関係（鋼棒）



(a) 全体



(b) 拡大

図-24 荷重変位関係

に対して検証した。

(設計荷重) = (桁 2 連分の死荷重) × (各個撃破の割増係数 k) / (提案装置設置基数)

ここで、桁 2 連分の死荷重は、実重量より 1763 kN とした。各個撃破の割増係数 k は、それぞれの提案装置の荷重分担のばらつきを考慮した割増係数であり、鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物¹⁴⁾より 1.3 とした。提案装置設置基数は、起点方、終点方 2 箇所ずつ、計 4 箇所とした。結果として、落橋防止機能に対する設計荷重は 573 kN/基となる。第 3 章より、今回実験を行った提案装置の 1 基あたりのせん断耐力は約 800 kN であったため、落橋防止機能を満足することがわかる。

桁座取付け部については、あと施工アンカーの設計・施工の手引き¹⁵⁾により埋込み長、はしあき寸法を照査し、図-21 のような諸元で制震機能、落橋防止機能の双方に対して損傷しないことを別途確認しており、第 2 章で述べた桁座取付け部の前提条件を満足している。これにより、仮に設計地震動で想定するレベルを超える応答が生じたとしても、落橋は防止できる。

6. FEM 解析による桁取付け部の評価

5 章に示した落橋防止機能が確実に機能するためには、

提案装置の桁への取付け部が、制震機能が発揮されている間には損傷せず、落橋防止機能が発揮される際には破壊に至らないことが前提となる。そこで、このような前提条件を満たす設置ディテールを検討する。提案装置の取付け位置は、支承周辺に狭隘な箇所が多いため、端横桁と橋台パラペットの間の位置とした。桁への取付けは、集成枠を介して端横桁に取付けることを想定した。桁取付け部の評価項目および評価方法についてであるが、線路直角方向については、設計荷重に対して端横桁と集成枠の取付けボルトのせん断に対して十分な本数のボルトを確保すればよいと考えられる。一方、線路方向については、端横桁にとって弱軸となる水平方向の曲げやウェブの面外変形などが想定されるため、必要な設置ディテールを FEM 解析により検討する。

提案装置から受ける力は、第 4 章の制震機能の評価における提案装置の荷重の最大応答値と、第 5 章の落橋防止機能の評価における設計荷重の大きい方を採用して、573 kN/基とした。この提案装置から受ける力に対して、取付け部と端横桁が破壊せずに主桁や縦桁などの周辺の部材に力を伝達できるか FEM 解析により確認し、その上で必要な補強を提案することとした。取付け部の要件は、提案装置の降伏（鋼棒の降伏）より前に取付け部や端横桁が降伏しないこと、落橋防止装置としての設計最大荷重として桁の死荷重相当以上の力を伝達できること

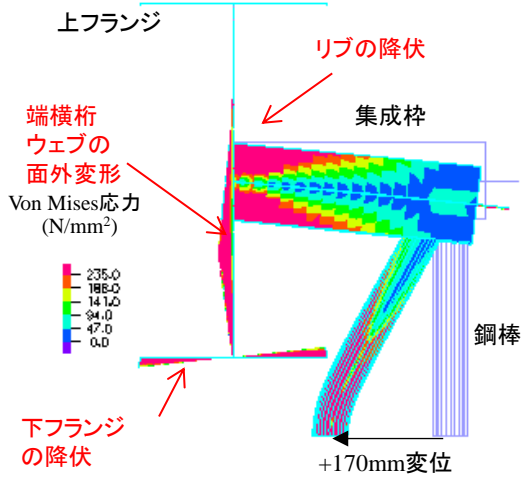


図-25 変形・応力図 (補強前)

の2点とした。本来、落橋防止機能としては、引張側載荷（桁が橋台から離れる側）の載荷のみ設計荷重を考慮すればよいが、制震装置が機能しているあいだは桁取付け部が破壊しないよう、圧縮側載荷にも同じ設計荷重とした。

解析モデルは図-22 に示す端横桁の主桁～縦桁間とし、シェル要素により端横桁、集成枠をモデル化した。鋼棒はソリッド要素とし、図-23 赤線に示す弾塑性特性を与え、他の部材には 400 N/mm² 材相当の弾塑性特性を与えた。解析コードには汎用有限要素解析ソフト ADINA を用い、図-22 に示すように鋼棒の基部の節点に強制変位を与えた。載荷方向は、端横桁にとって最も不利となる弱軸方向である橋軸方向とした。

解析結果として、鋼棒基部の載荷点における荷重変位関係を図-24 青線に示す。補強前のモデルでは、変位＋方向（端横桁に近づく方向）において、載荷途中から荷重が増加しなくなり、落橋防止装置としての設計最大荷重（破線）に満たないまま減少を始めた。これは、図-25 に示すように、鋼棒が水平方向の抵抗だけでなく、引張力となる抵抗力を示すため、大変形領域では端横桁ウェブの面外変形や、集成枠の曲げ変形が進行していくためである。引張側載荷では、このような現象はみられない。

これを踏まえ、端横桁の横剛性、ねじり剛性、ウェブの面外剛性を高めるため、図-26 に示す補強を提案した。再び解析した結果、図-24 赤線に示すように、途中で荷重が減少することなく、設計最大荷重以上の耐力を有することを確認した。これは、図-27 に示すように、補強によって端横桁の横曲げ変形、ねじり変形、ウェブの面外変形などが抑えられた結果である。途中、端横桁の降

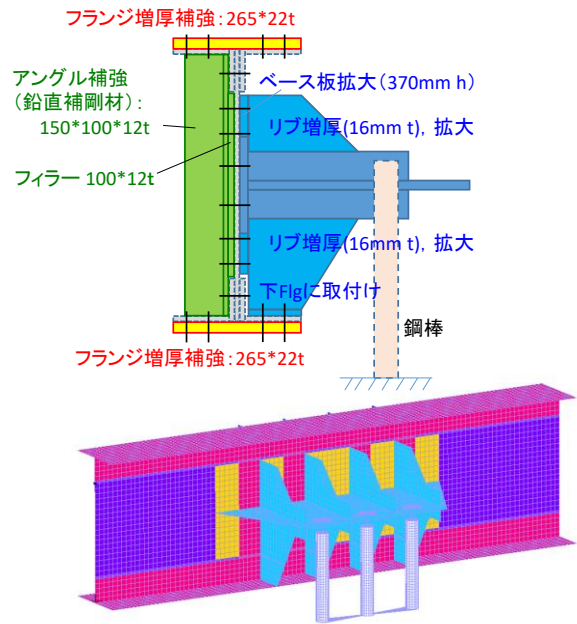


図-26 補強方法と解析モデル (補強後)

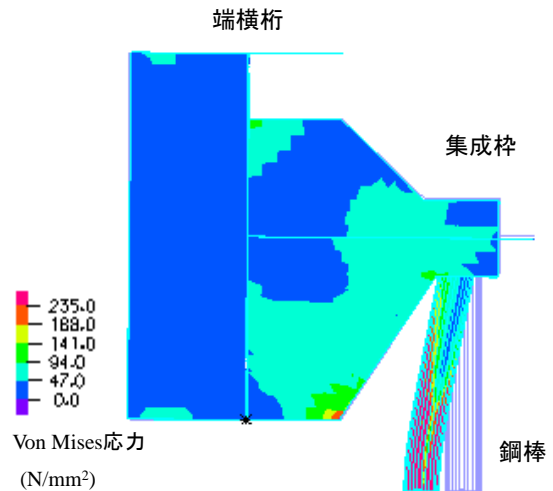


図-27 変形・応力図 (補強後)

伏がみられるが、提案装置の鋼棒の降伏に先行することではなく、また降伏後も座屈や破壊に至ることはなかった。

以上より、提案装置の桁への取付け部が、制震機能が発揮されている間には損傷せず、落橋防止機能が発揮される際には破壊に至らないような設置ディテールを決定できた。

7. まとめ

狭隘箇所を設置可能で、鋼棒の塑性曲げ変形による制震機能と、高い延性による落橋防止機能を兼用可能な装置について、要素実験による非線形特性の評価、実橋梁を対象とした制震機能および落橋防止機能の検証、桁取

付け部の評価を実施した。本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 提案装置の正負交番載荷試験により、制震機能を確認した。その結果、荷重-変位関係は双曲線型の履歴曲線を描き、エネルギー吸収効果が発揮されることを確認した。また、落橋防止機能に必要な高い延性を有することが確認できた。
- (2) 提案装置を導入した実橋梁をモデル化した3次元骨組モデルの動的解析を行った。その結果、今回要素実験を実施した提案装置の設置により、設計地震動に対してピボット支承の応答回転角を逸脱限界角以内に抑制できることを確認した。また、桁の応答変位も無対策時に比べて約40%抑制できることを確認した。
- (3) 提案装置の落橋防止機能については、落橋防止機能が発揮される状況を踏まえ、鋼棒のせん断耐力が桁自重を支持できるか否かを検討した。検討の結果、今回実験を行った提案装置は設計荷重に対して十分なせん断耐力を有し、落橋防止機能を有することを確認した。
- (4) 提案装置を既設鋼橋の端横桁に取り付ける方法として、端横桁をねじりやウェブ面外変形に対して補強しながら設置する方法を提案し、FEM解析により効果を検証した。その結果、提案した補強方法により、桁への取り付け部が、制震機能が発揮されている間には損傷せず、落橋防止機能が発揮される際には破壊に至らないことを確認した。

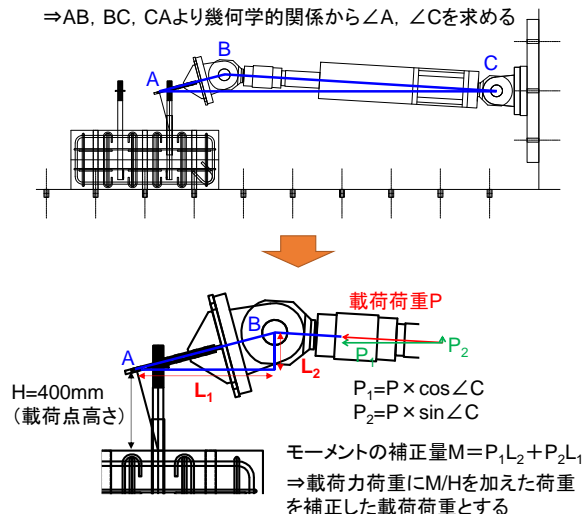
付録 提案装置の荷重～変位関係に対してジャッキ荷点が上昇する影響の補正方法

実験から得られた提案装置の荷重～変位関係に対して、ジャッキの荷点が上昇する影響を補正する方法の概要を付図-1に示す。付図-1のABと、BC、CAの初期長は既知である。また、ジャッキストロークと鋼棒の水平変位も計測から得られるため、幾何学的関係より三角形ABCに対して $\angle A$ 、 $\angle C$ が求まる。 $\angle A$ の値より、付図-1中の L_1 、 L_2 が求まる。また、 $\angle C$ の値より、載荷荷重 P の水平方向分力 P_1 と鉛直方向分力 P_2 が求まる。ジャッキが上昇することにより、ジャッキが上昇しない場合に比べ、鋼棒には $M = P_1L_2 + P_2L_1$ だけモーメントが大きくなるため、載荷荷重 P に M/H を加えた値（ここで H は載荷高さで、400mmである）を加えた値を補正後の載荷荷重とした。

REFERENCES

- 1) 高橋良和：2016年熊本地震による橋梁被害と前震後の調査を踏まえた被害メカニズム推定，土木学会論

AB=683mm(一定)
 BC=ジャッキ初期長(2637mm)+ジャッキストローク
 CA=初期長(3320mm)+鋼棒水平変位(3本平均)
 ⇒AB, BC, CAより幾何学的関係から $\angle A$ 、 $\angle C$ を求める



付図-1 補正方法の概要

- 文集 A1 (構造・地震工学)，Vol.73, No.4, I-225-I_235, 2017. [Takahashi, Y.: Damage of bridges caused by the 2016 Kumamoto earthquake and estimation of failure mechanism based on field survey after foreshock and mainshock, *Proceedings of JSCE*, Vol. 73, No.4, I-225-I_235, 2017.]
- 2) 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. [Railway Bureau of the Ministry of Land, Infrastructure and Transport: *To-kuteitetsudoushisesetsuni kakaru taishinhokyouuni kansuru shouei, kokuj, shishin*, 2018.]
- 3) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善，2012. [Railway Technical Research Institute: Design standards for railway structures and commentary (Seismic Design), Maruzen, 2012.]
- 4) 鉄道総合技術研究所：兵庫県南部地震鉄道被害調査報告書，鉄道総研報告特別号，1996. [Railway Technical Research Institute: Reconnaissance Report on Damage of Railway Facilities in Hyogo-ken Nanbu Earthquake, *RTRI Report*, 1996]
- 5) 黒田智也，池田学，杉舘政雄，齋藤聡，工藤伸司：ポスト形式橋脚を有する鋼鉄道橋の地震時挙動に関する基礎的検討，構造工学論文集，Vol. 55A, pp. 643-652, 2009. [Kuroda, T., Ikeda, M., Sugidate, M., Saito, S. and Kudo, S.: Fundamental examination of earthquake-behavior of steel railway bridge with pillar form piers, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 55A, pp. 643-652, 2009.]
- 6) 和田一範，池田学，青木千里，工藤伸司，齋藤聡，黒田智也：ピボット支承を有する旧式鋼鉄道橋の構造形式の違いによる地震時挙動への影響，構造工学論文集，Vol. 60A, pp. 303-315, 2014. [Wada, K., Ikeda, M., Aoki, C., Kudo, S., Saito, S. and Kuroda, T.: Effects on seismic behavior of various structural types of old steel railway bridges with pivot bearings, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 60A, pp. 303-315, 2014.]
- 7) 池田学，芝寛，吉田直人，黒田智也：ピボット支承

- を有する旧式鋼橋の耐震性評価および補強法, 鉄道総研報告, Vol. 25, No. 2, pp. 23-28, 2011. [Ikeda, M., Shiba, H., Yoshida, N. and Kuroda, T.: The evaluation of earthquake-resistance and reinforcement method of the steel bridge of old type adopting the pivot bearings, *RTRI Report*, Vol. 25, No.2, pp.23-28, 2011.]
- 8) 頭井洋, 中野将志, 大谷修, 岡本安弘: 単純鋼桁・橋脚系のエネルギー吸収型落橋防止構造に関する一検討, 鋼構造論文集, Vol. 6, No. 24, pp. 55-64, 1999. [Zui, H., Nakano, M., Ohtani, O. and Okamoto, Y.: A study on an energy absorbing bridge restrainer for simple steel girders and piers system against heavy earthquakes, *Steel construction engineering*, Vol. 6, No. 24, pp. 55-64, 1999.]
 - 9) 村田清満, 高山智宏, 後藤貴士, 山田正人, 生駒信康, 浮島徹: エネルギー吸収機能を有する落橋防止装置による耐震補強効果, 土木学会論文集 No. 689/I-57, pp. 275-288, 2001. [Murata, K., Takayama, T., Gotoh, T., Yamada, M., Ikoma, N. and Ukishima, T.: Seismic retrofit effect by a bridge restrainer with energy absorption, *Proceedings of JSCE*, No. 689/I-57, pp. 275-288, 2001.]
 - 10) 名波健吾, 和田一範, 土井達也, 豊岡亮洋: 狭い箇所施工可能な制震機能を有する落橋防止装置の提案と制震効果の試算, 第23回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp. 147-154, 2021. [Nanami, K., Wada, K., Doi, T. and Toyooka, A.: Proposal of bridge collapse prevention device with damping function that can be installed in narrow spaces and estimation of its damping effect, *Proceedings of the 23rd symposium on bridge earthquake engineering*, pp. 147-154, 2021.]
 - 11) 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. [Railway Technical Research Institute: *Atosekou anchor no sekkei, sekouno tebiki*, 2018]
 - 12) 和田一範, 土井達也, 豊岡亮洋, 名波健吾, 齊藤雅充, 福本守: 狭隘箇所に設置可能な落橋防止機能を有する制震装置の開発(その1: 装置概要と要素実験による非線形特性評価), 第76回土木学会年次学術講演会論文集, 2021. [Wada, K., Doi, T., Toyooka, A., Nanami, K., Saito, M. and Fukumoto, M.: Development of a damping device with bridge collapse prevention function that can be installed in narrow spaces (Part1: Outline of the device and evaluation of non-linear characteristics by element experiments), *Japan Society of Civil Engineers 2021 Annual Meeting*, 2021.]
 - 13) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計(平成24年度版) 橋梁および高架橋耐震照査の手引き~静的非線形解析による照査~, 2017. [Railway Technical Research Institute: Design standards for railway structures and commentary (Seismic Design), Guide for seismic verification of bridges and viaducts ~ verification by static nonlinear analysis ~, 2017.]
 - 14) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物, 丸善, 2009. [Railway Technical Research Institute: Design standards for railway structures and commentary (steel/composite structure), Maruzen, 2009]

DEVELOPMENT OF SPACE-SAVING TYPE DAMPING DEVICE WITH BRIDGE COLLAPSE PREVENTION FUNCTION

Tatsuya Doi, Akihiro Toyooka, Masamichi Saito, Kazunori Wada, Kengo Nanami and Mamoru Fukumoto

There are many railway bridges with rocking piers in urban areas. Preventing collapse of those bridges during earthquakes is an urgent concern. It is also important to improve the recovery performance by controlling the response displacement of the girders. However, to achieve both goals, it is necessary to install two different devices, damping devices and bridge collapse prevention devices, which is sometimes difficult due to limitations of space around the girders. Therefore, we developed a space-saving type device with damping and bridge collapse prevention functions. We firstly evaluated the nonlinear characteristics by elemental experiments. Then we verified the damping function, the bridge collapse prevention function, and the girder attachment part on an actual bridge.