

免震・制震装置で 鉄道橋りょうを耐震補強する



豊岡 亮洋
Akihiro Toyooka
前 鉄道地震工学研究センター
地震応答制御研究室長



中田 裕喜
Yuki Nakata
構造物技術研究部
コンクリート構造研究室
主任研究員



宇野 匡和
Masakazu Uno
四国旅客鉄道株式会社
工務部工事課
担当課長



菊地 佳誉
Yoshitaka Kikuchi
四国旅客鉄道株式会社
徳島保線区
区長

はじめに

ここでは、地震後の損傷をなるべく小さく留め、地震後早期に構造物を使用可能とする復旧性向上を実現可能な工法として、免震・制震装置¹⁾²⁾を取り上げ、その原理や装置の概要を紹介いたします。さらに、特集記事1(本四備讃線橋りょうを耐震補強する)で紹介した本四備讃線の北浦港橋りょうを対象として、鉄道橋りょうの補強ではほとんど例のない免震・制震構造を活用した耐震補強の事例についても紹介します。

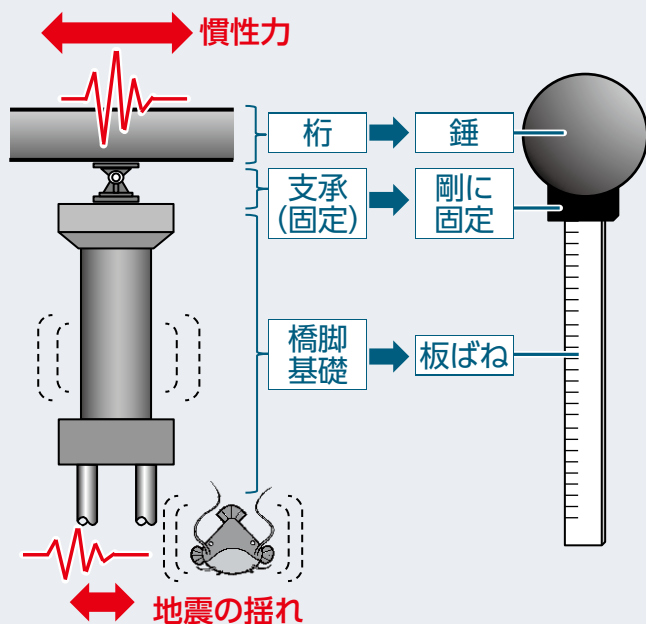
免震・制震構造による地震対策の原理

橋りょうの揺れ方と耐震補強

以降の説明のため、図1(a)のように、比較的重量の大きな桁が支承を介して橋脚と連結された橋りょうを想定し、この橋りょうの地震時の挙動を考えます。現象を分かりやすくするため、図1(b)のように、橋脚をプラスチック物差しのような板ばねに置き換え、先端に桁を模した^{おもり}錘を取り付けた模型を用意します。支承は、桁と橋脚をしっかりと固定するため、硬い金属板などを用いて板ばねと錘を接続します。

地震が起きると橋は慣性力^①を受けて揺れますが、この水平の力を簡易的に発生させるため、図2(a)のように、模型の板ばねの根元を保持して素早く90度回転させ、横倒しにしてみます。すると、図2(b)のように錘の重量が剛な支承を介して板ばねに伝達し、板ばねは振動・変形して根元に特に大きな力(モーメント)が作用します。錘の重量によっては板ばねの強度を超えてしまい、板ばねに折損や曲がりなどの

図1 桁-橋脚の概念図(支承部固定)とその模型



(a) 桁・支承・橋脚基礎の構成

(b) 桁-橋脚模型

① 慣性力

地震の際に構造物にかかる力(N)で、構造物に作用する加速度(単位:m/s²)に質量(kg)を乗じて算定されます。電車が発車・停車する際に、加減速の方向とは逆に力を受けるように感じますが、これが慣性力です。

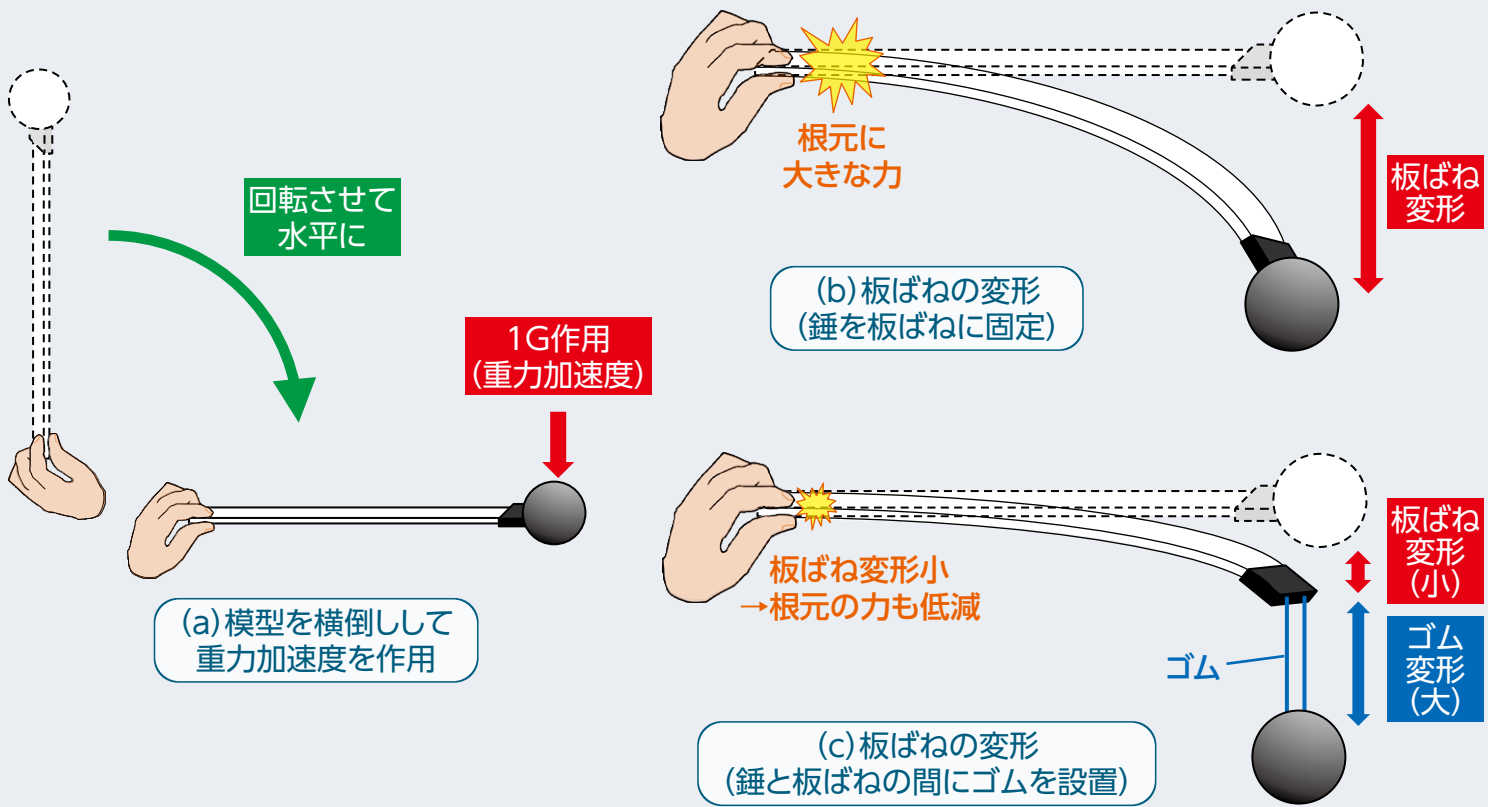


図2 板ばねの変形

損傷が生じる可能性があります。橋でいえば橋脚が損傷することになります。さらに、この例では重力加速度 (1G) を錘に作用させましたが、実際の地震は加速度 (慣性力) が時間的に変動して複雑に振動します。このとき、地震動の揺れる速さと橋の振動が合致した場合、静的な場合より何倍も大きな揺れが生じます。図2(b)の模型の根元を持ち、手で振動を与えると、揺れの速さに応じて模型が大きく振動する場合があります。これを共振といい、大きな損傷につながる可能性があります。

それではこうした損傷を生じさせないためにはどうすればよいのでしょうか。もっとも簡易な対策として、板ばね、すなわち橋脚の強度を上げることが考えられます。模型の例では、厚さや幅など板ばねの断面を増加させる、プラスチックの代わりに鉄板を用いる、などが考えられます。実際の構造物でも、橋脚に鉄筋コンクリートなどを巻き、断面を増加させる補強が行われることがあります。しかし、河川橋脚な

どでは、橋脚の周りに枠を設けて水を抜く大規模な締め切り工事が必要となり、予算的にも期間的にも実施が非常に困難な場合があります。

免震構造とは

そこで、橋脚自体の強度を上げる以外の対策を考えます。先の模型では、板ばねと錘の間を剛に接続しましたが、これをゴムなどの柔らかい素材に変更してみます。再び横倒しにしてみると、図2(c)のようにゴムが錘による変形のほとんどを吸収し、板ばねに生じる変形は非常に小さくなります。ゴムに置き換えた部分は、橋でいえば支承部 (図1(a)参照) ですので、図3のように支承を剛から柔らかく変形する装置に変更することで、橋脚本体が桁から受ける影響を緩和できます。また逆に、模型の根元を持ち、手で振動を与えてみるとわかるように、橋脚自体の揺れの影響が桁に伝わりにくくする効果も期待できます。このように、水平方向に柔らかく変形する装置で重い桁を支持し、桁や橋脚の揺れを「免」れる構造を免震構造とよび、

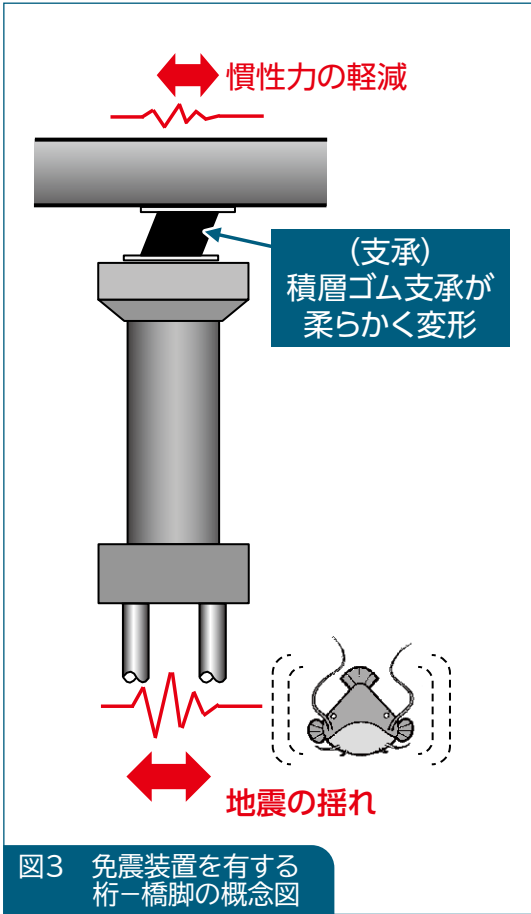


図3 免震装置を有する桁-橋脚の概念図

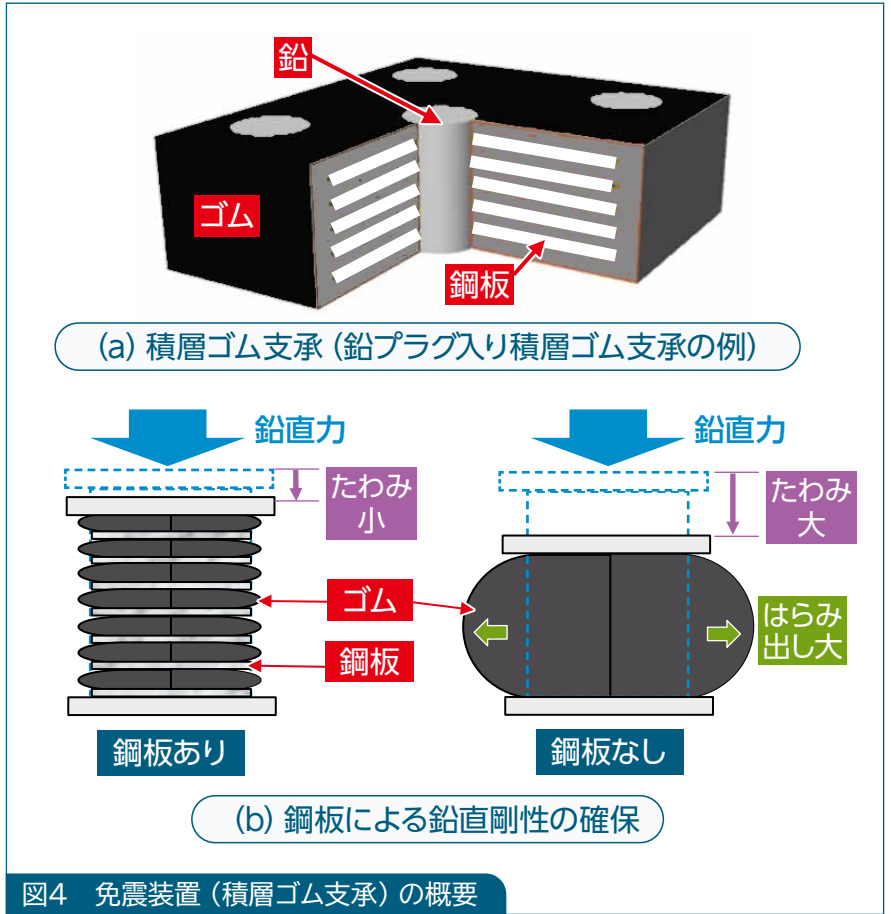


図4 免震装置（積層ゴム支承）の概要

柔らかく変形する装置を免震支承といいます。

橋りょう用の免震支承としては、図4(a)に示すように、ゴムを角形や円形に成型した装置が広く用いられています。ただし、支承は桁の死荷重や列車荷重などを普段から安定して支持する必要があることから、鉛直方向の変形はなるべく小さくする必要があります。このため、図4(a)に示すように、鋼板とゴムをサンドイッチ状に積み重ねて接着した、積層ゴム支承が一般に用いられます。ゴムを薄く分割することで、図4(b)に示すように、鉛直力を受けた際の側面へのゴムのはらみ出しを小さくし、鉛直方向に剛な構造を実現できます。

なお、支承部が柔らかいほど、桁と橋脚の間の力のやり取りは小さくなりますので、究極的には桁と橋脚をすべらせることで振動を絶縁できます。これは「すべり摩擦支承」といい、免震構造の一種です。

制震構造とは

免震構造では支承部が大きく変形しますが、あまり変形が大きいと、隣接する構造との衝突など、望ましくない影響が生じる懸念があります。また、図2(c)の模型で、ゴムを付けた錘は、振動が収まるまでには時間を要します。橋の場合、常時や地震時に振動が持続することになり、これも望ましくありません。そこで、免震構造では支承部の変形を抑制し、振動をすみやかに収束させる対策が必要となります。この方法として、物体が変形・振動する際の振動エネルギーを制震装置という別の装置で吸収し、振動を人為的に「制御」する制震構造があります。

制震装置は一般にダンパーともよばれ、身近なところでも自動車のサスペンションやドアクローザーなどさまざまなものが用いられています。土木・建築構造の代表的な制震装置の概念図を図5に示します。ピストンの両端を構造物に接続し、シリンダー内にピストンを収めます。

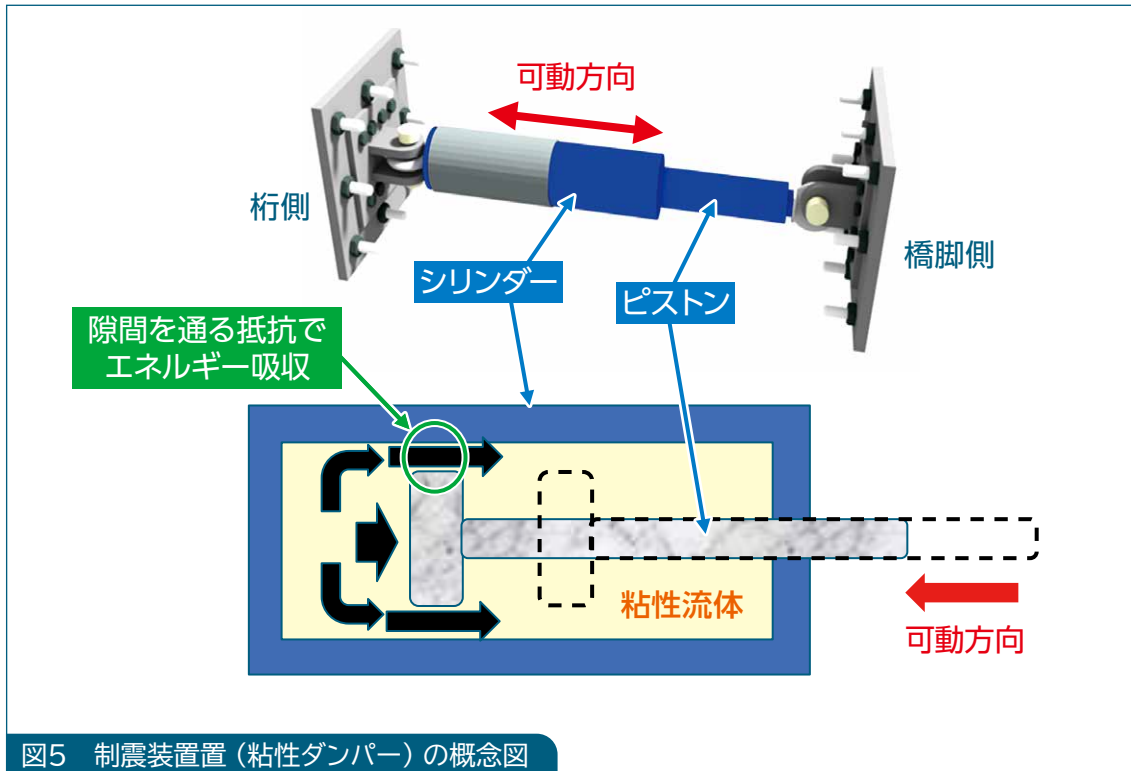


図5 制震装置（粘性ダンパー）の概念図

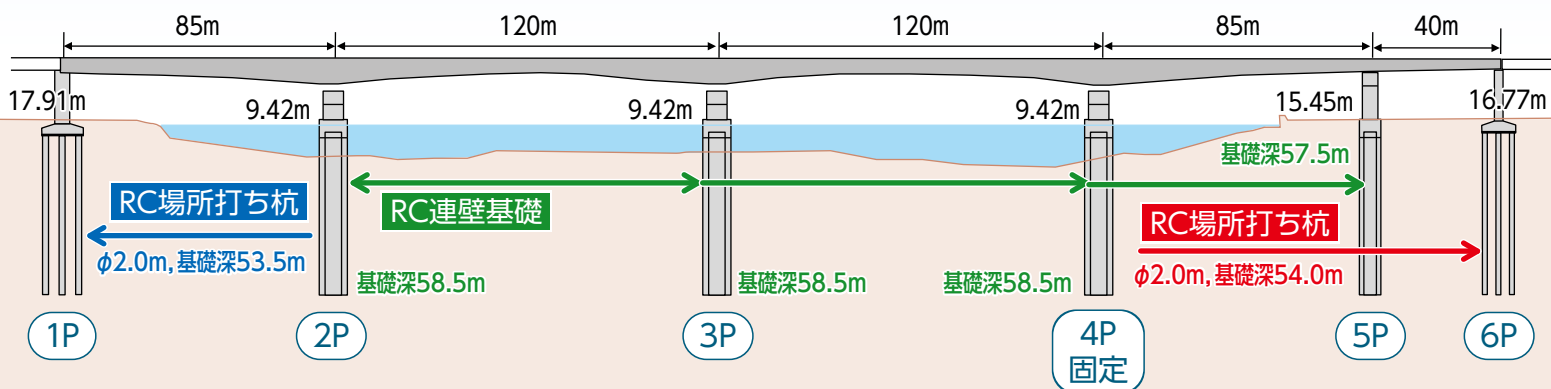
シリンダーの中には粘り気のある流体が封入され、またピストンとシリンダーの間には隙間を設けています。地震などでピストンが押されると、隙間を流体が通り抜ける際にエネルギーを消費し、抵抗力が生じます。こうした流体のほかにも、摩擦を利用したものなど、さまざまな制震装置が提案されています。なお、先に述べた積層ゴム支承に対して、鉛を封入したり特殊なゴムを用いることで、免震装置自体にエネルギー

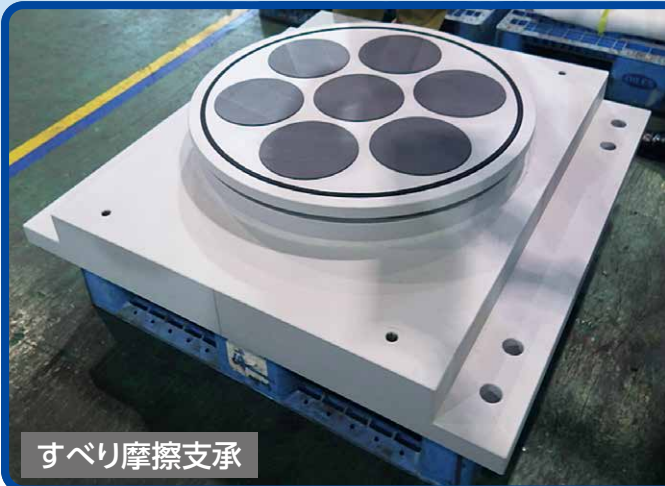
吸収性能をもたせる構造も道路や建物をはじめ、多くの実績があります。

実橋りょうへの適用事例

以上のように、免震支承で重い桁を柔らかく支持し、かつ制震装置で振動エネルギーを吸収することで、支承部の変形を大きくすることなく、橋りょうの損傷を抑制できます。この効果を実際の橋りょうの耐震補強に適用した事例について紹介します。本橋りょうの概要について

図6 北浦港橋りょうの概要





+



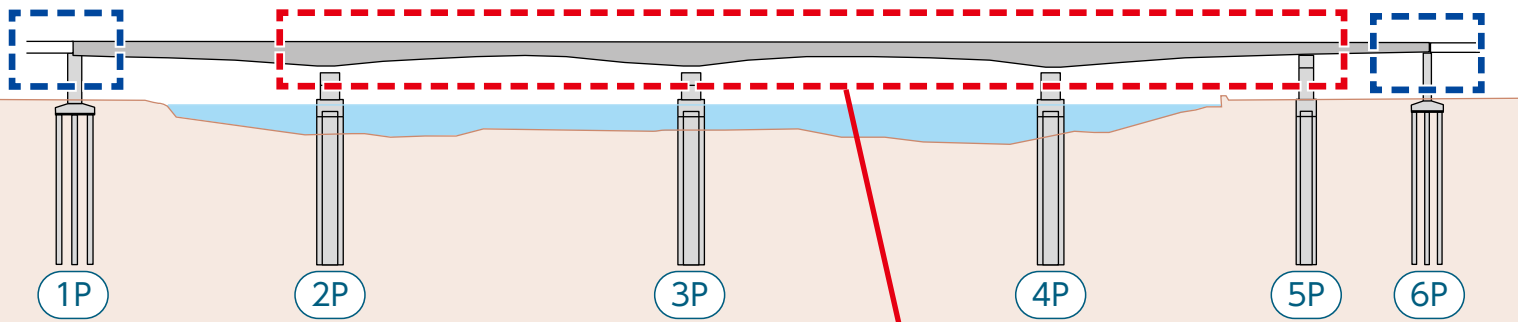
制震装置(2基)

制震装置(2基)

すべり摩擦支承(2基)

免震装置(LRB)
(2P, 3P, 4P=4基/5P=2基)

すべり摩擦支承(2基)



鋼製支承(既設)



免震積層ゴム支承(LRB)

図7 免震・制震構造による補強の概要

は特集記事1(本四備讃線橋りょうを耐震補強する)でも紹介していますので、あわせて参照下さい。

対象とする北浦港橋りょうは、図6に示すように、本四備讃線の四国側に位置する橋長450mの長大橋りょうです³⁾⁴⁾。橋脚は6基のうち2P, 3P, 4P(P=橋脚(Pier)の略)が海上

に建設されています。支承は鋼製で、4Pが固定、そのほかは水平方向に移動可能な可動支承です。この橋の補強前の耐震診断を実施したところ、すべての橋脚について、橋脚本体と基礎のいずれか、もしくは両者の補強が必要な結果となりました。このうち、陸上部の1P, 5P, 6Pはこれまでに実績のある巻立てなどの工法で補強

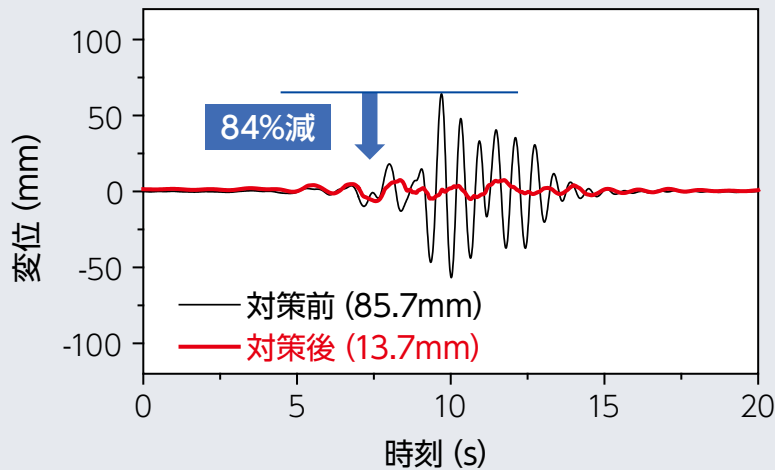


図8 免震・制震構造による補強効果(4P橋脚天端の変位応答)

が実施できますが、海上部の2P、3P、4Pについては、施工性や経済性等のさまざまな制約から、海上での補強の実施はほぼ不可能という問題がありました。

そこで、既設の支承を免震・制震装置により置き換え、先に述べた原理により橋脚に発生する地震時の作用力を低減させ、海上部での基礎補強を不要とする工法を採用しました。免震装置は、鉄道橋での使用実績等から、積層ゴム支承にエネルギー吸収のための筒状の鉛を設置した鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)を用いました。ただし、1Pおよび6Pでは桁下と橋脚天端間の高さが非常に小さく、LRBを設置できないことがわかりました。そこで1Pおよび6Pには、積層ゴム支承に替えて、高さ方向にコンパクトなすべり摩擦支承を用いました。しかし、すべり摩擦支承にはゴムのように地震後に元の位置に戻る機構がないため、端部の1Pおよび6Pでは桁の変位が大きくなり、隣接桁との衝突などの挙動が懸念されました。そこで1Pと6Pに対しては、変位を吸収するためのシリンダー型の制震装置を別途設置しました。以上の

耐震補強の概要をまとめて図7に示します。

図8には、耐震補強後の4P橋脚頂部の変位応答を三次元時刻歴応答解析で算定した結果を例として示します。このように、補強により橋脚の変位すなわち損傷を84%と大幅に抑制できました。ほかの橋脚についても応答が抑制され、海上部での基礎補強が不要となることを確認しています⁴⁾。なお、免震構造を用いることによる列車走行性への影響については、別途詳細な検討を行っています。これについては本号の特集記事5(免震・制震装置で補強された鉄道橋りょうの地震時走行性を確保する)を参照ください。

おわりに

免震・制震構造は、ここで紹介したように、支承まわりの対策のみで構造全体系の耐震補強を実施可能であることから、施工や工期の制約条件が厳しい条件下において、有効な補強工法の一つとなり得ると考えています。ここでの内容が、今後の鉄道の耐震補強における免震・制震構造の適用の一助となれば幸いです。RRR

文献

- 1) 国土交通省鉄道局監修，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，丸善出版，2012
- 2) 川島一彦：地震との戦い なぜ橋は地震に弱かったのか，鹿島出版，2014
- 3) 笠原康平，笹岡良治，菊地佳誉，中田裕喜，佐名川太亮：本州四国連絡橋の鉄道橋梁の補強，基礎工，Vol.5，2021
- 4) 豊岡亮洋，中田裕喜，宇野匡和：免制震構造化による大規模鉄道PC橋の耐震補強，基礎工，Vol.8，2021