

第116回

鉄道橋りょう・高架橋の耐震補強

はじめに

日本は地震大国であり、これまでさまざまな地震によって鉄道構造物は被害を受けてきました。その経験を蓄積し、鉄道構造物の耐震設計や耐震補強は今日まで発展してきました。

ここでは、鉄道橋りょう・高架橋を対象として、これまでの地震被害とそれを踏まえた耐震補強の変遷を整理します。また、将来発生が危惧されている首都直下地震や南海トラフ地震などの巨大地震に対する耐震補強の方向性について説明します。

過去の地震被害と耐震補強の変遷

鉄道橋りょう・高架橋のおもな地震被害と耐震補強の変遷を表1に整理し

ます。鉄道構造物の地震被害は、耐震設計導入の契機となった1923年の関東地震から記録がありますが、おもに橋りょう・高架橋の被害に着目すると、まずは1978年の宮城県沖地震があげられます。本地震では、建設中の東北新幹線の鋳鉄製の支承被害や橋脚の損傷が発生しました(図1)。この地震とほぼ同時期に、将来の発生が想定される東海地震への対応として、「大規模地震対策特別措置法」が制定され、東海道新幹線では、新横浜～豊橋間の延長214kmについて、1979年より鉄筋コンクリート(RC)巻立てや桁座拡幅工・桁移動防止工などの落橋防止対策が行われました。

1995年に発生した兵庫県南部地震は、鉄道橋りょう・高架橋にこれまでにない大きな被害をもたらしました。具体的には、ラーメン高架橋柱のせん

断破壊(図2)、桁支承部の破壊による桁の過大变位や落橋などです。これを受け、当時の運輸省から既存の鉄道構造物に係る耐震補強の緊急措置の方針が提示され、重要線区を対象にラーメン高架橋柱のせん断補強、橋りょう・高架橋の落橋防止対策の設置などの耐震補強が進められることとなりました。これ以降、鉄道橋りょう・高架橋の耐震補強が本格化しました。

2003年の三陸南地震や2004年の新潟県中越地震では、上述した耐震補強の対象範囲外もしくは対象範囲内であっても未補強であった構造において、せん断破壊などの被害が発生しました。なお、新潟県中越地震では、新幹線車両が初めて脱線し、それ以降、脱線対策が推進されることとなりました。

2011年には、地震規模を表すモーメントマグニチュードが9.0という未曾有の大規模地震である東北地方太平洋沖地震が発生しました。本地震では、津波や巨大な余震といった地震随伴事

表1 鉄道橋りょう・高架橋のおもな地震被害と耐震補強の変遷

年	おもな地震と関連法律・省令など	被害と対策の概要
1978	宮城県沖地震	鋼製支承の被害、橋脚・高架橋柱の損傷
1978	大規模地震対策特別措置法	東海道新幹線の対策(RC巻立てや落橋防止対策)
1995	兵庫県南部地震	高架橋柱のせん断破壊、落橋
1995	鉄道施設耐震構造検討委員会の提言に基づく鉄道構造物の耐震性能に係る当面の措置について	高架橋柱のせん断補強、落橋防止対策
2003	三陸南地震	耐震補強未実施の高架橋柱のせん断破壊
2004	新潟県中越地震	耐震補強未実施の高架橋柱のせん断破壊
2011	東北地方太平洋沖地震	橋りょう、高架橋の致命的な被害は無
2013	特定鉄道等施設に係る耐震補強に関する省令	首都直下地震、南海トラフ地震などの発生に備えた省令制定
2016	熊本地震	ロッキング橋脚を有する道路橋が落橋
2018	既存の鉄道施設の耐震補強の推進に関する指針	ロッキング橋脚を有する鉄道橋も補強対象として明記

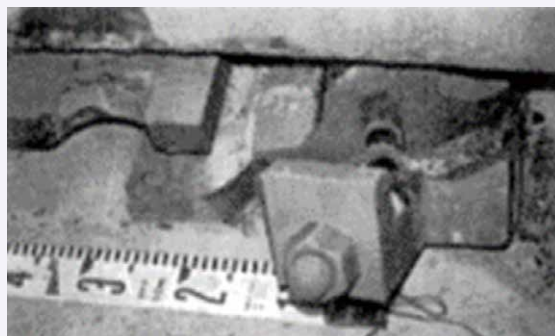


図1 宮城県沖地震の支承の被害事例¹⁾



図2 兵庫県南部地震でのラーメン高架橋の被害事例²⁾



図3 東北地方太平洋沖地震でのラーメン高架橋の被害事例³⁾

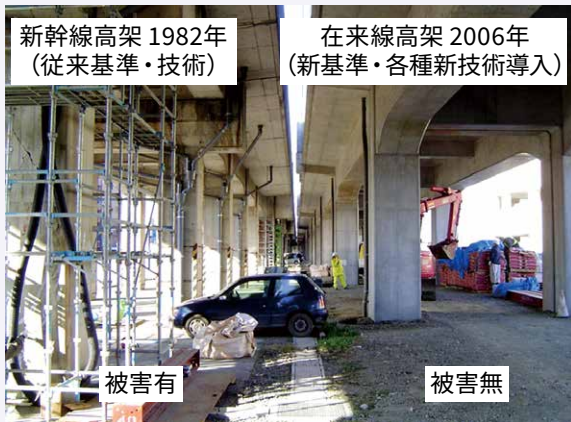


図4 建設年の異なる高架橋の地震被害の違い
(文献5に加筆修正)



図5 鋼板巻立て補強例⁶⁾

象による被害、高架橋上の電車線柱の多数の被害などが発生しました。一方、橋りょう・高架橋は、図3のような被害が生じたものの、兵庫県南部地震のような大きな被害は免れました。これはさまざまな要因が考えられますが、兵庫県南部地震以降に耐震補強が進行していたことや、1999年に「鉄道構造物等設計標準 同解説 耐震設計」(以下、耐震設計標準⁴⁾)の改訂前のもの)ことなどにより、橋りょう・高架橋の耐震性能が向上していたことも要因として考えられます。例えば図4に示すように建設年の新しい高架橋では被害が生じなかったという事例もあり、これは兵庫県南部地震の経験を踏まえた基準による耐震性能向上の効果を示したものと考えられます⁵⁾。

2013年には、内閣府の中央防災会

議において、首都直下地震、南海トラフ地震などの今後発生が予想される大規模地震に対する耐震補強の必要性が指摘され、国土交通省から「特定鉄道等施設に係る耐震補強に関する省令」が施行されました。この省令では、首都直下地震、南海トラフ地震で震度6強以上が想定される地域などにあり、1日あたりの片面断面輸送量が1万人以上の線区や緊急輸送道路などと交差または隣接して並走する線区などにある橋りょう・高架橋などの耐震補強が推進されることとなりました。

この省令に基づく補強が推進されている最中の2016年に発生した熊本地震では、高速道路をまたぐ道路橋が落橋しました。この橋は、橋脚の上下端がピン支持されているロッキング橋脚とよばれる形式であり、鉄道橋でも同形式の構造が多数存在します。そのこ

とから、前述の省令が2018年に改正され、「既存の鉄道施設の耐震補強の推進に関する指針」において、ロッキング橋脚を有する橋りょうが補強対象として明記されました。

以上のように、過去のさまざまな地震被害や今後想定される大規模地震被害を踏まえて、耐震補強に関する省令などが制定・改正され、鉄道橋りょう・高架橋の耐震補強が進められています。

柱の耐震補強、落橋防止

上述したように、兵庫県南部地震以降に、鉄道橋りょう・高架橋の耐震補強が本格化しましたが、その基本的な工法は、柱の鋼板巻きによるせん断補強になります(図5)。せん断補強とは、橋りょう・高架橋のぜい性的な破壊形態であるせん断破壊に対する耐力

を向上させて、粘り強い破壊形態である曲げ破壊へと破壊形態を移行させることで、**図2**のようにただちに橋りょう・高架橋が崩壊することがないように配慮した対策です。そのほかにも施工性や経済性に配慮した多くの耐震補強工法が開発され、実用化されています。なお、柱のおもな補強工法については、鉄道総研からも設計・施工指針⁷⁾を発刊しており、鉄道事業者が幅広く活用可能な環境が整備されています。

また、RC橋脚の上部は下部に比べ

て地震の力に抵抗するための必要な鉄筋量が少なくなるため、橋脚中間部から上方の鉄筋本数を減じることがあり、これを「段落とし」とよんでいます。古い設計基準で建設された橋脚では、これが弱点となることがあり、段落とし部での地震被害が散見されました(**図6**)。これに対して、RC巻立てが一般的に適用されてきましたが、河積阻害率などの都合でRC巻立てができない場合があり、施工条件も踏まえた工法も開発されています⁸⁾など。

また、桁を有する橋りょう・高架橋は、落橋防止対策が施されてきました。これについては、地震時に桁がずれた場合にも桁座から落下しないように桁座を広げる桁座拡幅工(**図7**)や、桁同士をつなぐことで過大な桁変位を抑制する桁連結工などがあります。

構造全体系を踏まえた耐震補強

河川橋脚や、高架下が店舗利用されている高架橋などでは、周辺環境の制約により、前述した巻立てによる耐震補強が困難な場合もあります。そのような場合は、制震ダンパーなどの地震時の振動エネルギーを吸収する装置を用いて、構造全体系としての地震時応答を低減させることで、耐震性能を担保する方法などが活用されています。例えば、**図8**に示すように免震ゴム支承と制震ダンパーを併用して隣接構造物と地震力を効果的に分担させつつ、エネルギー吸収も発揮させることで、構造全体系としての耐震補強がなされた事例⁹⁾などがあります。

また、高架橋への適用として、施工可能な柱部分にダンパーブレースを設置することで、応答低減を可能とした事例もあります¹⁰⁾。

なお、東北地方太平洋沖地震での被害を踏まえ、鉄道総研では鉄道の震災

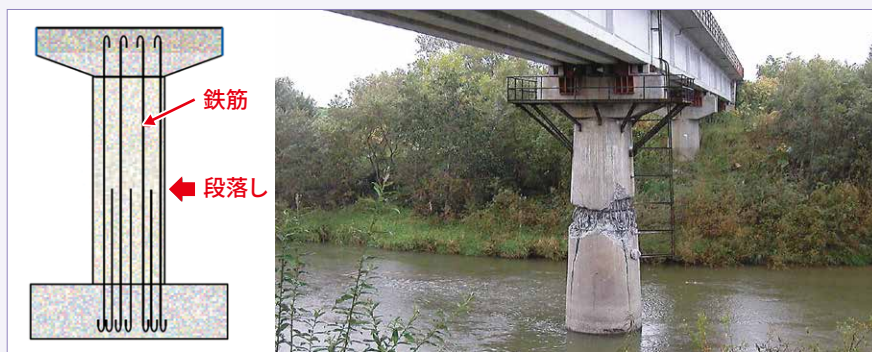


図6 段落とし部のイメージと被害事例⁸⁾

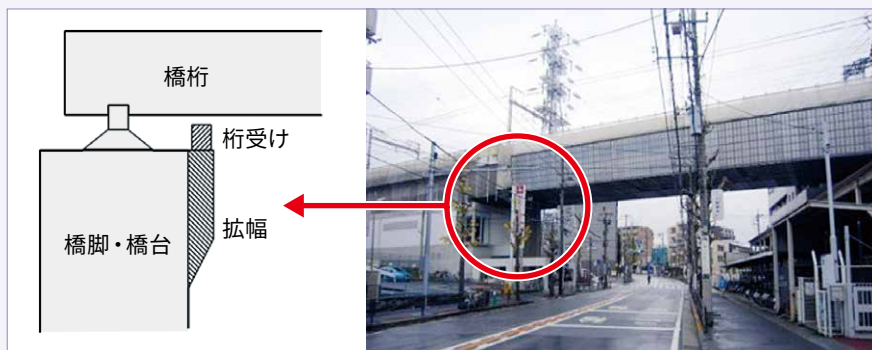


図7 桁座拡幅工による落橋防止対策の例⁶⁾

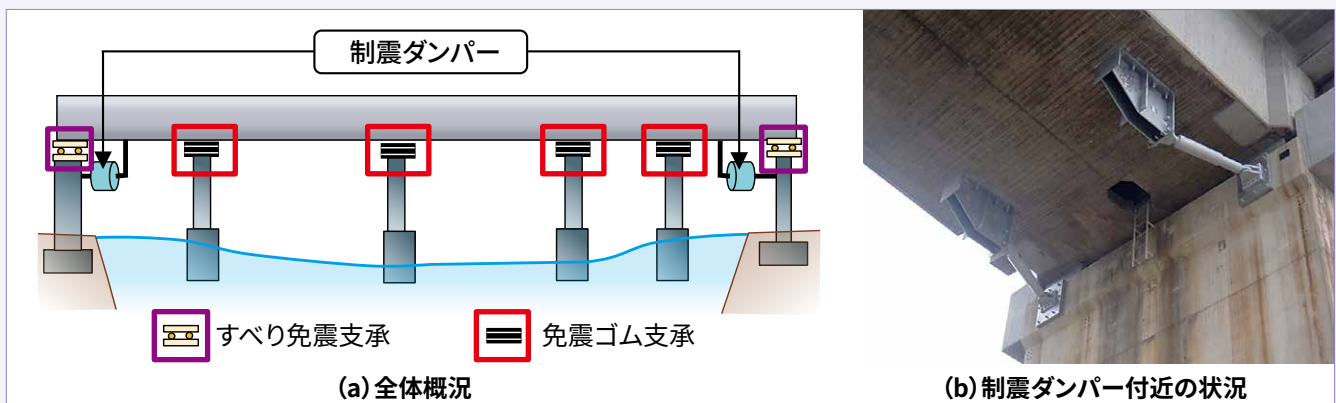


図8 橋りょうへの制震ダンパーの設置事例

復旧・復興に向けた各種技術開発を取りまとめています¹¹⁾。ここでは、橋りょう・高架橋はもとより、土構造物やトンネルなどの他構造物の耐震化技術や津波対策などの技術も整理されています。

今後の耐震補強の在り方

先述した各種耐震補強により、鉄道橋りょう・高架橋の耐震性能は着実に向上してきました。一方で、2011年の東北地方太平洋沖地震では、それまで想定していた規模を上回る地震が発生し、設計での想定を超える作用が発生する可能性が否定できないことが改めて認識されました。

上記背景から、現在の鉄道構造物の耐震設計標準⁴⁾には、耐震設計で制御し切れない事象への対応方針として、「危機耐性」の概念が明記されています。これは、設計での想定を超える巨大地震により構造物に被害が発生する可能性、すなわち危機が発生する可能性を認めた上で、設計で想定している以上の巨大地震が発生しても、危機に対する構造物の耐性を高めておくことで、人命損失などの破滅的な被害を回避する、という設計思想です。この概念を図9で説明します。地震により生じるすべての事象を図の黒枠が表すとすると、多くの事象はこれまでの耐震設計や耐震補強（水色領域）でカバーしています。これは、地震工学の進展と連綿と改良を重ねてきた耐震設計の成果といえます。一方で、想定を超える地震やそれにとまなう被害など、耐震設計でカバーできない部分が一定量残ることも事実です。こうした災害に対しても、図2のような大きな崩壊を防止し、人命損失などの破滅的な被害を防止することがこれまでの地震被害から得られた教訓です。このことを実

現する概念が図の赤色領域の危機耐性であり、耐震設計・耐震補強と危機耐性が協調することで事前に想定可能か否かにかかわらず、地震により生じる事象に対処することが可能となります。

危機耐性は、比較的新しい概念であり、現在、危機耐性に優れた具体的な構造提案などがなされています。提案構造の一例として、図10に示す自重補償構造は、本体柱に大きな損傷が発生し、スラブを支持不可能となった場合でも、自重補償部材がスラブを支持することで、崩壊を防止するものです。

また、危機耐性は、これまで推進されてきた耐震補強の思想とも合致します。例えば、鋼板巻きによるせん断補強や落橋防止対策といった耐震補強は、ぜい性破壊や落橋という破滅的な被害の防止という観点の対策であり、危機耐性を向上させるものといえます。

兵庫県南部地震を契機として本格化した鉄道橋りょう・高架橋の耐震補強はおおむね完了しつつあります。今後は、厳しい制約条件（施工困難箇所、

地震により発生する全ての事象

耐震設計

耐震設計・照査で
制御可能な事象

危機耐性

図9 危機耐性と耐震設計の位置づけ

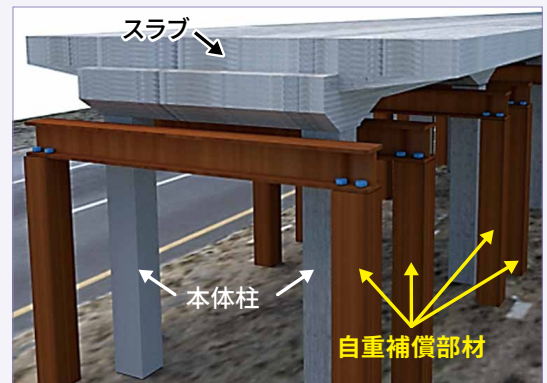


図10 自重補償構造のイメージ

コスト制約など)の下での合理的な対策や、発生が想定されている東海・東南海地震や首都直下地震などのこれまでの想定を超えるような地震に対する対策などがより一層必要となります。鉄道総研としては、耐震補強の合理化に向けた評価法や工法の開発、さらには実用的な危機耐性の評価法の構築などを行ってまいります。

(和田一範/鉄道地震工学研究センター
地震応答制御研究室)

文献

- 1) 構造物設計事務所編：'78宮城県沖地震鉄道被害状況、構造物設計資料、Vol. 55, 1978
- 2) 鉄道総合技術研究所編：兵庫県南部地震鉄道被害調査報告書、鉄道総研報告、特別第4号、1996
- 3) 東日本旅客鉄道株式会社編：東北地方太平洋沖地震と鉄道構造物、SED、第37号、2011
- 4) 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）、丸善出版、2012
- 5) 野澤伸一郎、白崎広和、和田旭弘、友利方彦：東北地方太平洋沖地震における鉄道の被災状況およびその復旧について、地盤工学ジャーナル、Vol. 7, No. 1, pp.127-137, 2012
- 6) 水野寿洋、東翔太：鉄道構造物の耐震性向上に向けて、RRR、Vol. 71, No. 3, pp.4-7, 2014
- 7) 鉄道総合技術研究所編：既存鉄道コンクリート高架橋柱の耐震補強設計指針、2020
- 8) 岡本大、田所敏弥：コンクリート構造物の耐震技術、RRR、Vol. 71, No. 3, pp.12-15, 2014
- 9) 豊岡亮洋：制震装置で構造物を補強する、RRR、Vol. 76, No. 3, pp.28-31, 2019
- 10) 村松浩成：東海道新幹線における地震対策、コンクリート工学、Vol. 49, No. 1, pp.37-42, 2011
- 11) 鉄道総合技術研究所編：鉄道の震災復旧・復興に向けた技術提案、2012