

構造物の耐震に関する最近の研究開発

構造物技術研究部
部長 谷村 幸裕

1. はじめに

これまでに、鉄道構造物は地震による様々な被害を受けてきており、これに対応して構造物の耐震に関する技術開発が進められ、様々な耐震対策方法を開発してきた。今後も、南海トラフや首都圏直下で巨大地震の発生が想定されており、着実に対策を進めて行く必要がある。そこで、耐震対策の基本的な考え方について述べるとともに、これまでの地震被害を踏まえて開発されてきた対策方法について述べる。

2. 耐震対策の考え方

高架橋や橋りょうなどの構造物の設計において、通常の作用に対しては構造物が安全かつ無損傷であることを要求している。しかし、稀に発生する大規模な地震の作用に対しても全ての構造物が無損傷であることを要求するのは困難であるため、ある程度の損傷を前提として設計されるのが一般的である。このように、地震作用に対する構造物の要求性能は、損傷を前提としている点で他と大きく異なっていることを十分認識しておく必要がある。そして、損傷後は早期の復旧を求められるため、損傷を受けても構造物の機能に及ぼす影響を最小限にとどめるように配慮しておくことが重要である。

耐震対策は、新設構造物において要求性能を満足するように設計することはもちろんのことであるが、耐震性の低い既設構造物の対策も重要であり、種々の構造物で耐震補強などが進められている。既設構造物の耐震対策方法は、新設構造物の設計に比べると対策の自由度が低く、個別に適切な方法を適用する必要がある、より高度な技術が求められる。次章に橋りょうやトンネルなど種々の鉄道構造物における地震対策について述べるが、鉄道は構造物が線状に連続して構成され、複数の路線がネットワークを形成しているのが特徴である。一部の部材や構造物にのみ着目して耐震対策を検討するのではなく、構造物全体や路線全体あるいは路線網全体を考慮して、リダンダンシーの高い、より効果的な対策方法を検討する必要がある。

3. 各種構造物の地震被害と対策方法

(1) 高架橋

高架橋の設計基準は、1978年宮城県沖地震の被害などを契機として大きく変更され、1995年兵庫県南部地震の被害などを踏まえて見直されるなど、数度の改訂を経て現在に至っている(表1)。従って、高架橋はその建設年代によって耐震設計基準が異なるため、耐震性にばらつきがある。また、鉄道高架橋で多く採用されているラーメン高架橋は、不静定構造物であり冗長性が高いと考えられてきたが、1995年兵庫県南部地震では、旧基準で設計された高架橋の柱がせん断力により脆性的に破壊し、高架橋全体の崩壊につながった(図1)。そこで、既設高架橋柱を鋼板巻き立てなどにより補強する耐震対策が進められ、最近の地震においてその補強効果が確認されている(図2)。

ところで、前述したとおり、現在の設計基準でも大規模地震時にある程度の損傷を生じる可能性があるため、損傷した場合の補修方法を検討しておく必要がある。そこで、曲げ破壊形態の柱について、耐力や変形性能を回復するために必要な補修方法を検討し、ひび割れやコンクリートのはく落程度の損傷であれば、無収縮モルタルによる断面修復で十分であるが、軸方向鉄筋が座屈するような損傷の場合は、鋼板巻き立て等が必要であることを明らかにした。また、損傷を早期に検知するため、地震時の柱の最大応答部材角を測定し、損傷の有無を把握できる装置を開発した(図3)。この損傷検知装置を用いることにより、鋼板巻き立てされた柱など、目視による損傷状況の調査が困難である場合においても損傷の有無を把握することができ、

地震発生から運転再開までのダウンタイムを短縮できるものと考えられる。

さらに、地震時の列車走行性の確保も課題であるが、高架橋接続部の角折れや目違いを軽減する対策法も開発しており（図4）、これらにより地震時列車走行性の向上が図られている。

（2） 橋りょう

橋りょうで地震の被害を受け易い部位は、支承部や橋脚であり、これまでに多くの被害を受けてきた。桁の支承部は、破壊によって桁ずれを生じ、最悪の場合は落橋につながることから、移動制限装置の取り付けや、落橋防止工の取り付けが進められてきた。また、鋼製橋脚のピボット支承については、地震による逸脱を防止するため、補強リングによる対策方法（図5）を開発している。

表1 高架橋・橋りょうの地震被害と設計基準の変遷

西暦	主な地震	設計基準	
1923	大正関東地震 宮城県沖地震	土木構造物の設計基準（案） 建造物設計標準 制定	許容応力度法，設計水平震度 0.2 程度
1955			
1970			
1978			
1983	兵庫県南部地震	建造物設計標準改訂 鉄道構造物等設計標準	耐震設計が大幅に変更 限界状態設計法，海溝型地震考慮
1991			
1995			
1999			
2012		耐震設計標準改訂	性能照査型設計法，内陸活断層地震考慮



図1 高架橋の被災例



図2 高架橋柱の鋼板巻き立て補強



図3 高架橋柱損傷検知装置

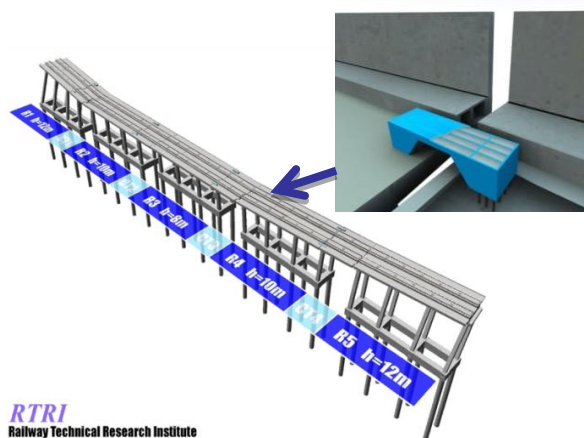


図4 角折れ防止工

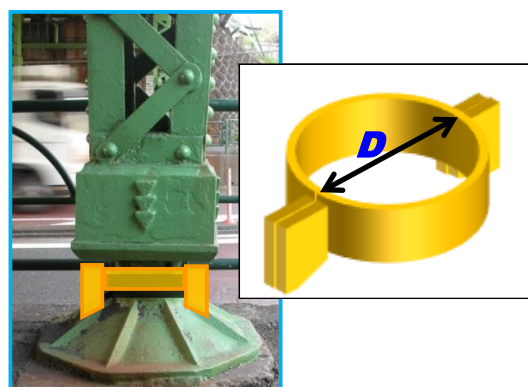


図5 補強リングを用いたピボット支承の対策



図6 橋脚の被災例

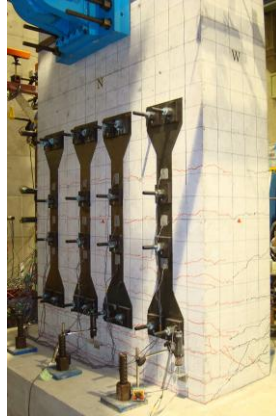


図7 帯板鋼板補強工法

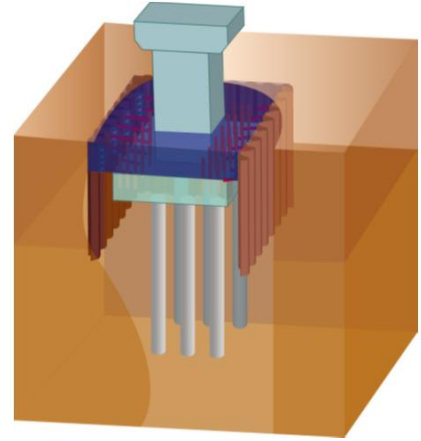


図8 橋脚基礎のシートパイル補強

橋脚については、旧基準で設計された鉄筋コンクリート構造の場合、地震時に軸方向鉄筋段落し部のコンクリートが損傷する被害がしばしば発生している（図6）。この対策として鉄筋コンクリート巻立て補強が実施されてきたが、断面が大きくなることや施工性の点から、河川内の橋脚においては実施困難な場合もある。そこで、断面の増加を最小限に抑えけるとともに、より簡易に補強できる方法として帯板鋼板補強工法を開発している（図7）。また、地盤が軟弱な箇所においては地震により基礎の安定が失われて残留変位を生じる被害も報告されているが、基礎の補強は大規模な工事となるため対策は進んでいない。このため、比較的簡易に補強ができる方法として橋脚基礎のシートパイル補強工法を開発している（図8）。

（3）土構造物

土構造物は、以前より地震による被害を繰り返してきたが、復旧が比較的容易であることから、これまで根本的な対策が実施されることは多くなく、最近になって重要箇所を対象とした対策が徐々に進められている。主な破壊形態としては、盛土の破壊や沈下（図9）、土留壁の破壊、液状化による軌道の沈下、橋台裏の沈下などがある。建設時期が古い在来線などにおいて膨大な数量の土構造物が存在するため、施工が簡便でより効果的な対策方法を開発している（図10）。



図9 盛土の被災例

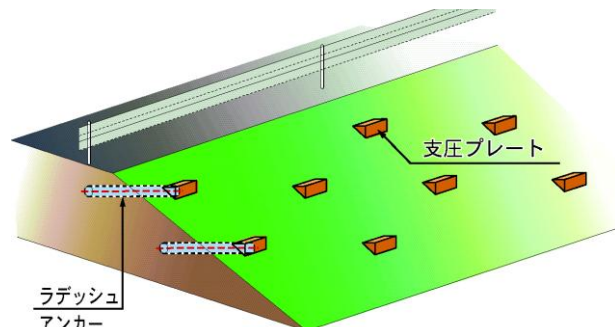


図10 既設盛土の耐震補強

（4）トンネル

トンネルは、一般には地震被害を受けにくい構造物であるが、過去の地震においていくつかの被害が報告されている。山岳トンネルにおいては、2004年新潟県中越地震で覆工コンクリートがはく落するなどの被害を受けた（図11）。地震規模が大きく震源距離が短い場合で、地形、地質条件、構造条件によっては、このような被害を受けることが考えられる。このような場合には、背面空洞への裏込め注入やロックボルトによる補強が有効である（図12）。開削トンネルにおいては、1995年兵庫県南部地震において、中柱の破壊により上床版が沈下し、地表面で道路が陥没する被害を受けた（図13）。中柱は高架橋の柱に比べて高い軸方向力を受けるため、破壊性状がやや異なるものの、高架橋柱と同様の鋼板巻き立て補強などにより損傷による



図 11 山岳トンネルの被災例



図 12 山岳トンネルの地震対策例



図 13 開削トンネルの被災例



図 14 開削トンネル中柱の鋼板巻き立て補強



図 15 駅施設の被災例

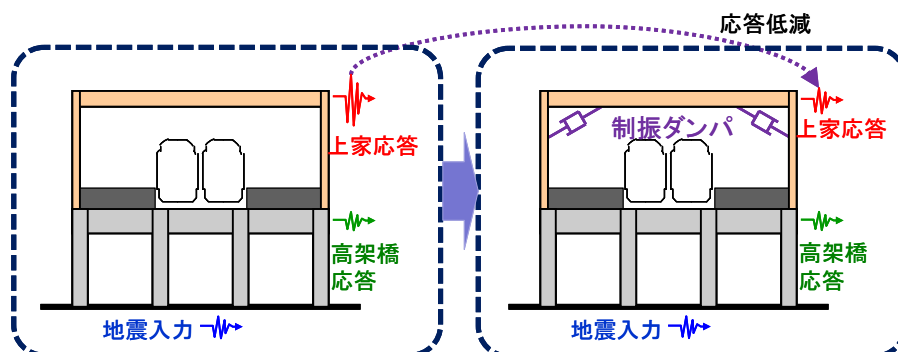


図 16 駅施設の耐震対策

軸方向耐力の低下を防ぐことができる（図 14）。

（５） 駅施設

駅施設においては、天井や看板などの非構造部材が落下する被害が生じている（図 15）。例えば、高架橋上のホーム上家などでは、地表面より高架橋に地震動が伝達されて増幅し、さらに高架橋から上家、吊天井へと伝達されてさらに地震動が増幅され、被害を大きくすることがある。このため、多種多様の天井や看板などを個別に対策するよりも、上家自体の応答を抑制する対策が有効であると考えられる。上家においては、旅客や列車の通行空間を確保するため耐震壁やブレースの設置が困難であるため、方杖型制振ダンパを用いた対策方法を開発しており、振動実験等によりその効果を検証している（図 16）。

４．おわりに

先にも述べたように、構造物が大規模地震を受けても損傷しないように対策するのは困難である。そこで、地震時の安全性と地震後の復旧性を十分に検討して、対策を進める必要がある。これまでに被害と対策が繰り返されてきた歴史があることから、今後も被害を軽減するための不断の取り組みが求められており、より一層効果的な耐震対策方法の開発を進めて行く所存である。