

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

新しい耐震技術で巨大地震による被害を低減する

将来発生が予想される巨大地震に対して、鉄道の安全性や早期復旧性を確保するためには、早期地震防災システムなどのソフト対策に加え、構造物や付帯構造物の損傷を低減させるハード対策も重要な要素です。これには、ある程度の地震に耐える強さに加え、損傷を受けても早期に回復することが可能な回復力を持たせることが有効と考えられます。ここでは、新設および既設構造物に適用することで、強さと回復力を付与することが可能な新しい地震対策工法として、橋りょう・高架橋を対象とした超連続基礎構造、負剛性摩擦ダンパー、および電化柱の倒壊防止工について紹介します。

「強さ」と「回復力」

2011年の東北地方太平洋沖地震による被害は、想定を超える巨大地震により構造物や付帯構造物の被害が生じる可能性が否定できないことを認識させられるものでした。一方で、鉄道は重要な社会インフラの一つであり、この早期復旧が地震後の復旧・復興に欠かせない要素であることも改めて明らかになりました。

このため、今後の鉄道の地震対策においては、構造物や付帯構造物にある程度の地震に耐える「強さ」を持たせた上で、万が一巨大地震により被災が

生じたとしても、危機耐性を確保することで倒壊などの人命に関わる損傷を生じさせないことが必要となります。さらに、列車運行再開のための機能を早期に回復する「回復力」を具備させることで、ダウンタイムを可能な限り最小化することも重要です¹⁾。

強さと回復力を持たせるには、地震前、地震後のそれぞれの段階でさまざまな方法が考えられますが、地震時の構造物の揺れを小さくする対策を行うことができれば、損傷も小さくなりますので、強さと同時に早期復旧が可能な回復力を持たせることができます。



豊岡 亮洋
Akihito Toyooka
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
【専門分野】耐震設計、
免震・制震構造



原田 智
Satoshi Harada
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
【専門分野】パンタグラフ、
電車線の相互作用



田中 浩平
Kohei Tanaka
鉄道地震工学研究センター
地震動力学研究室
研究員
【専門分野】耐震設計、
地震リスク評価



岡本 大
Masaru Okamoto
構造物技術研究部
コンクリート構造研究室
室長
【専門分野】コンクリート
工学

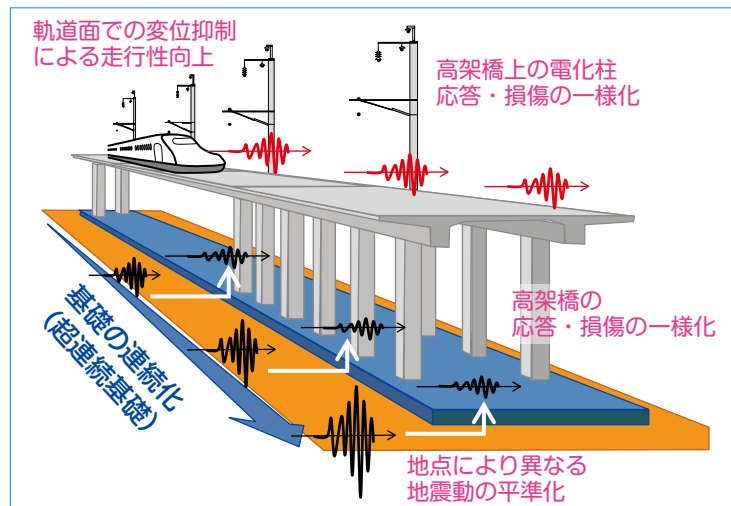


図1 超連続基礎の概念図

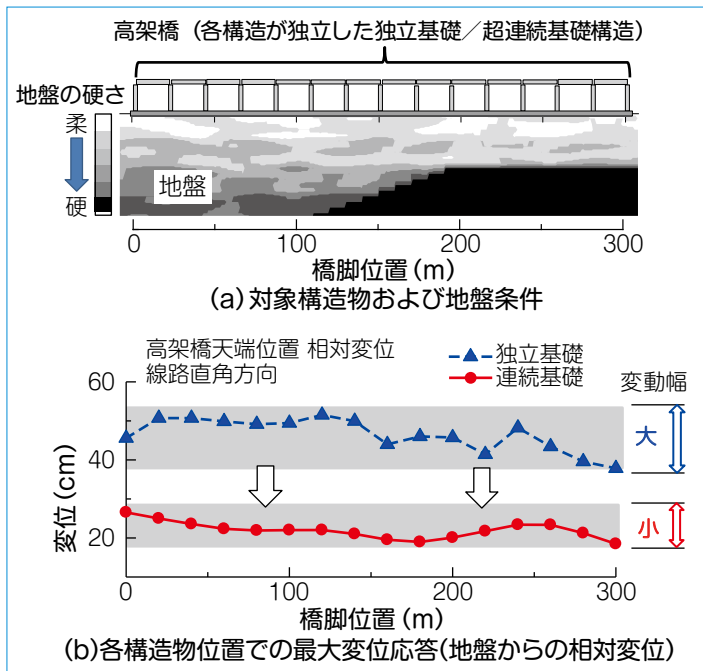


図2 超連続基礎による応答の一様化と低減効果

一方、そうした対策が困難な場合は、最低限、倒壊のような破滅的な破壊を防止し、その後の復旧を容易にする対策が必要となります。

ここでは、こうした強さと回復力を持たせることを目的として、鉄道総研で開発を行っている耐震技術のうち、以下の3つの新しい手法についてその概要と効果を紹介します。

- (1) 事前に正確な予測が困難な地震動や地盤特性に対して、構造物の揺れの感度や変動を鈍感にし、構造物の損傷の低減や車両走行性の向上を図る「超連続基礎構造」
- (2) 構造物に入力された地震の振動エネルギーを吸収することで、構造物の揺れや損傷を低減する新しい制震装置「負剛性摩擦ダンパー」
- (3) 万が一大きな損傷を受けた場合でも、倒壊を回避して列車の走行空間を確保する「電化柱の倒壊防止工」

超連続基礎構造

～地震の揺れを一様化する～

鉄道構造物は線状に連続して構築されるため、構造物に作用する地震動は、各地点の地盤の地層構成などに応じて

大きく変動します。これにより、隣接する構造物と構造物の間に大きな相対変位が発生したり、局所的に大きな被害を受ける構造物が生じたりする可能性があります。また、一般には将来発生する地震動を各地点で正確に予測することは困難なため、設計時に想定した以上の地震動が構造物に入力する可能性も否定できません。

そこで、こうした地震動や地盤の不確定性を直接相手にする代わりに、地震動の特性に対して構造物の揺れを鈍感にする構造を開発することが有効と考え、図1のように、フーチング基礎を線路方向に100～1000m程度連続化した「超連続基礎」を有する高架橋を提案しました²⁾。この構造は、基礎位置で構造物を長距離にわたり連続化することで、高架橋を大きな一体構造に変化させるものです。この一体化により、連続化した区間の構造物に入力される地震動が、地盤の条件によらずほぼ一様化されるため、構造物の応答や電化柱などの付帯構造物の応答も一様化され、構造物の局所的な損傷を抑制することが可能となります。また、一体化により軌道面における構造物間

の相対変位や角折れ、目違いが抑制されることから、車両走行安全性の向上が期待できます。さらに、個別の地盤条件に依存した設計を実施する必要がないため、構造設計の簡略化や上部構造のプレキャスト化が可能となり、コストや施工性、品質の向上が期待できる、など設計・施工上の利点もあります。

この超連続基礎の効果を検証するため、図2 (a) に示すようなさまざまな地盤上に構築された高架橋を想定し、各高架橋の基礎が独立した通常の独立基礎構造、およびこれを連続化した超連続基礎構造を対象に地震応答解析を行いました。高架橋上面での線路直角方向の最大変位応答の分布を図2 (b) に示します。このように独立基礎構造では地盤条件に応じて応答が変動するのに対し、超連続基礎を用いることで、各構造物の応答が一様化され、応答変動幅および応答値自体が低減される効果が確認できました。

負剛性摩擦ダンパー

～地震エネルギーを吸収する～

地盤を通じて構造物に作用した地震動は、構造物の振動エネルギーに変化し、この振動エネルギーが大きいほど、構造物の被害が大きくなります。そこで、構造物とは別にこの振動エネルギーを吸収する装置を組み込むことで、構造物の振動エネルギーを逃がして損傷を低減する、免震・制震構造を採用する事例が土木・建築構造物で増加しており、鉄道構造物においても徐々に適用事例が増えています。ここでは制震構造の一つとして、新しいダンパーの開発例を紹介します。

いま、図3 (a) のような高架橋を想定し、構造物の剛性を k 、地震時の変形を x とすると、地震時に構造物に作用する慣性力 F は簡易的に $F = k \times x$ 、すなわち図3 (b) の線Aで表されます。

この慣性力 F が大きいほど地震時の損傷が大きくなることから、この慣性力 F を下げる必要があります。このためには構造物の剛性 k 、および変形 x を下げる必要があります。ところが、変形 x は上述したようなエネルギー吸収により低減できますが、剛性 k を下げるには高架橋の柱を細くするなど、大きな構造変更が必要となり現実的ではありません。

そこで、見方を変えて、剛性 k の高架橋に、図3(b)の線Bのように剛性が負、すなわち $-ka$ であるような装置を並べることを考えます。すると、高架橋の剛性 k がこの負の剛性 $-ka$ と打ち消し合い、図3(b)の線Cのように高架橋の見かけの剛性を $k-ka$ に下げることができ、慣性力 F を下げるができます。このように、すでに存在する構造物の剛性を低下させて慣性力を低下させる機構を「負剛性」といいます。通常の部材は変形に対して抵抗する方向に力を生じるのに対し、負剛性では球が坂道を転がり落ちるように、変形を加速する方向に力を生じます。

この負剛性を実際の装置として実現するため、図4のように、凸型のすべり面にすべり材を載せ、これらにガススプリングで圧縮力を作用させた、負

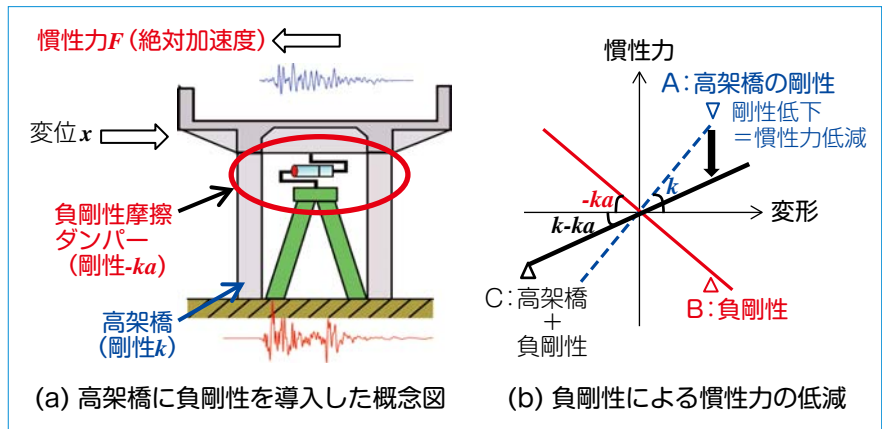


図3 負剛性の導入の効果

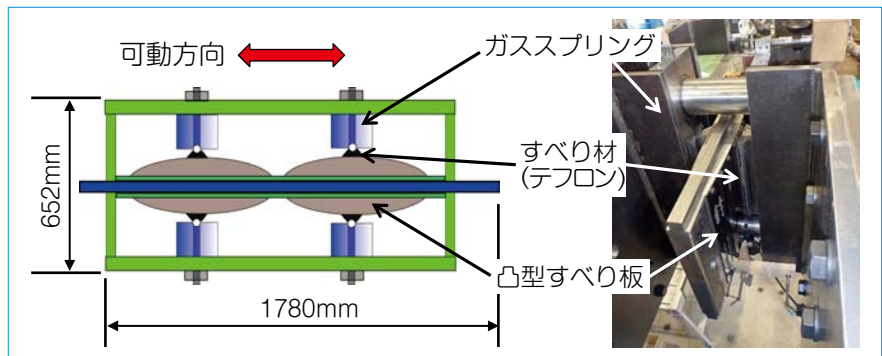


図4 開発した負剛性摩擦ダンパー

剛性摩擦ダンパーという新しい装置を開発しています³⁾。このダンパーは、水平変形を受けると、すべり面の凸形状および鉛直力により、すべり材はすべり面上をすべり落ちる方向(変形を大きくする方向)に動き、負の剛性が発揮されます。また、すべり面には摩擦によるエネルギー吸収が期待でき、このエネルギー吸収により変形 x も抑制し、構造物の慣性力 F をさらに低減できます。

このダンパーの効果を、実構造物を対象として、構造物の降伏震度(☞参照)と弾性固有周期(☞参照)を変えたハイブリッド試験(☞参照)により検証しました。図5は、ダンパーなしの応答を1として、ダンパーを導入した場合の最大応答の比較です。このように、構造物の損傷に関係する絶対加速度、および車両走行性に関する絶対変位について、それぞれ2~5割程度低減できる効果が得られました。現在、

設計法の整備や耐久性評価など、実用化に向けた検討を行っています。

電化柱の倒壊防止工 ～列車の走行空間を確保～

2011年の東北地方太平洋沖地震においては、構造物の被害が比較的軽微であったにもかかわらず、多数の電化柱の折損が生じました。幸い、この折損した電化柱と車両との衝突という最悪の事態は生じませんでした。折損した電化柱が建築限界を支障することで、走行車両の脱線を引き起こす可能性があります。このことは、今後の地震対策においては、構造物の被害を軽減することに加え、電化柱のような付帯設備の対策についても考慮する必要があることを示しており、特に既存の電化柱に対する地震対策が求められています。このため、電化柱の耐力を増加させる耐震補強法や、先述のようなダンパーを用いた制震構造などが提案され

☞ 降伏震度

構造物に損傷が生じる力と、構造物の重量の比で、これが大きいほど強い構造物となります。

☞ 弾性固有周期

構造物が揺れやすい周期で、構造物の質量が大きく、剛性が小さいほど大きくなります。

☞ ハイブリッド試験

構造物の数値解析とダンパーの載荷試験を連動させ、地震時の構造物の挙動を把握する実験手法です。より詳細には本号の「研究開発 七つ道具」を参照ください。

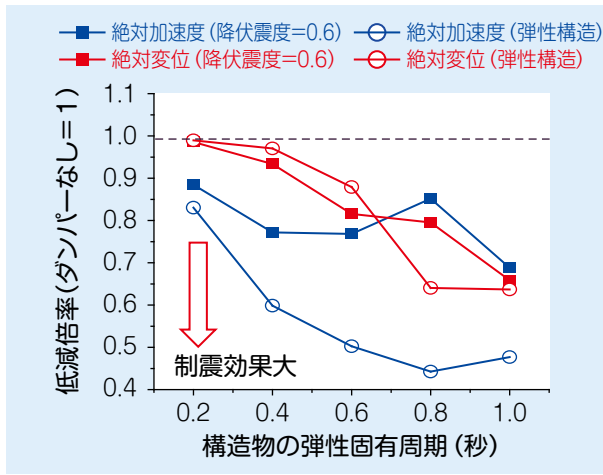


図5 ハイブリッド試験による応答低減効果の検証

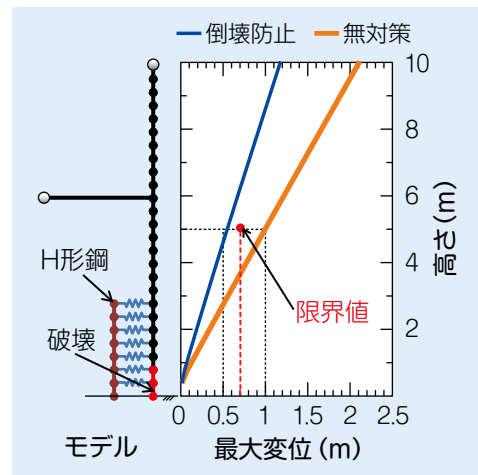


図7 電化柱の倒壊防止工の効果

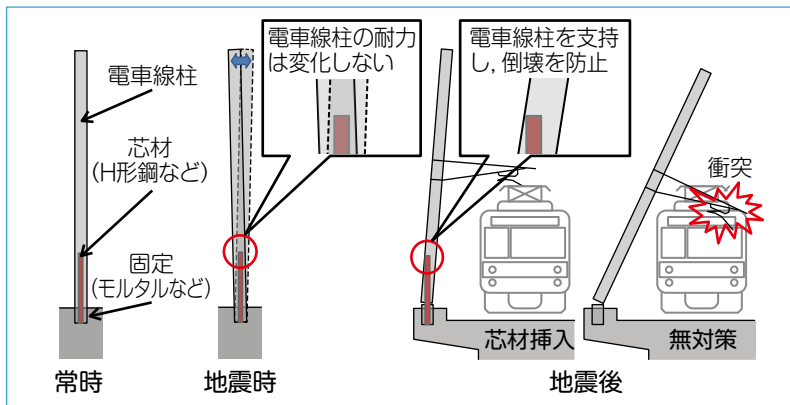


図6 電化柱の倒壊防止工の概念図

ていますが、電化柱は路線内に相当数存在することから、これらの対策を全て完了するには長期間を要します。そこで、電化柱がたとえ折損したとしても列車の走行空間を支障させないことを最低限の要求性能として、低コスト・短期間に実施可能な対策法が求められています。

このため、図6のように、H形鋼などの芯材を電化柱に挿入し基部をモルタルなどで固定することで、電化柱の倒壊を防止する工法を開発しました⁴⁾。本工法は、常時の電化柱が有する振動特性や地震時変形性能は変化させず、想定以上の地震により電化柱が損傷した場合には、芯材が電化柱を支持し倒壊を防止することを期待したものです。本工法の効果を解析的に検証したところ、図7のように、電化柱の基部が破損しても、H形鋼が挿入されているこ

とにより倒壊を防止することを確認しました。また、実物大の振動台実験やその再現解析においては、電化柱の振幅が大きくなると電化柱とH形鋼が一体で振動し、変位を抑制する効果も確認しています。本工法は、例えばH形鋼を電化柱上部から挿入する方法などにより比較的容易に施工が可能であり、かつ比較的安価に施工可能であると考えられます。さらに、本工法は、挿入した芯材と電化柱をモルタルやウレタンなどの中詰め材で一体化させることにより、電化柱の弾性固有周期を短くし、構造物との共振を避けることも可能であると考えられます。

まとめ

ここでは、構造物に「強さ」と「回復力」を持たせるための3つの新しい地震対策について紹介しました。このう

ち、「超連続基礎構造」は主に新設構造、「負剛性摩擦ダンパー」および「電化柱の倒壊防止工」は、主に既設構造への対策を念頭に開発を行っています。従来の耐震補強法に加え、こうした新しい対策技術を用いることで、将来想定される巨大地震に対して鉄道の安全性や復旧性の更なる向上を図っていきたいと考えています。

なお、ここで紹介した負剛性摩擦ダンパーはオイレス工業株式会社との共同研究により開発しています。[RRR]

文献

- 1) 室野：地震情報ネットワークと地震災害シミュレータの融合によるレジリエンス向上，第28回鉄道総研講演会講演要旨集，2015，<http://www.rtri.or.jp/events/kouen/2015/abstract.html#sect08>
- 2) 田中 他：超連続基礎を有する高架橋の提案とその効果確認の検討，第17回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.37-42，2014
- 3) 豊岡 他：絶対応答低減のための独立型負剛性摩擦ダンパーの開発，鉄道総研報告，Vol.29，No.3，pp.35-40，2015
- 4) 酒井 他：H形鋼を用いたPC電化柱の簡易な倒壊防止工法，鉄道総研報告，Vol.29，No.3，pp.41-46，2015