

- 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

新しい構造で高架橋の地震に対する危機耐性を高める

鉄道構造物は耐震設計により高い安全性や復旧性が確保されていますが、将来、設計での想定を超える巨大地震が発生する可能性は否定できません。こうした状況においても、人命損失などの破滅的な被害を回避する、危機耐性の高い構造物の構築が望まれています。ここでは、新設および既設の高架橋の危機耐性を向上させる具体的な工法として開発を進めている、自重補償構造と倒壊方向制御構造の概念と効果検証試験について紹介します。



豊岡 亮洋
Akihiro Toyooka
鉄道地震工学研究センター
地震応答制御研究室
室長
[専門分野] 地震工学



室野 剛隆
Yoshitaka Murono
研究開発推進部
JR 部長
[専門分野] 地震工学

はじめに

鉄道構造物は、過去の多くの地震被害の経験などを踏まえて改訂されてきた設計標準、および観測、解析、実験技術の進歩に支えられた地震工学の発展により、設計で想定しうる地震作用に対して十分な安全性や復旧性を確保してきました。一方で、2011年東北地方太平洋沖地震における大規模・広域地震や、2016年熊本地震における前震・本震の連続的な発生など、設計で必ずしも想定しえない規模や回数の地震も発生しています。耐震設計や耐震補強を事前に十分行うことの重要性

は今後も変わるものではありませんが、こうした予期せぬ地震作用や、その結果生じる可能性がある被害に対しても、何らかの対策を講じることが求められています¹⁾。

この課題に応えるため、2012年に改訂された鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計（以下、耐震標準）では、新たに「危機耐性」という概念が導入されました²⁾。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、すなわち危機の発生可能性を認めた上で、仮に設計で想定した以上の地震動が生じたとしても、

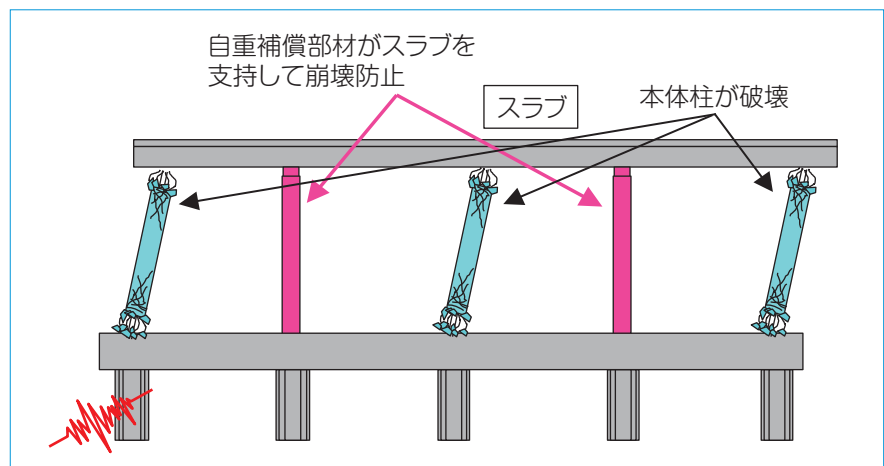


図1 自重補償構造の概要

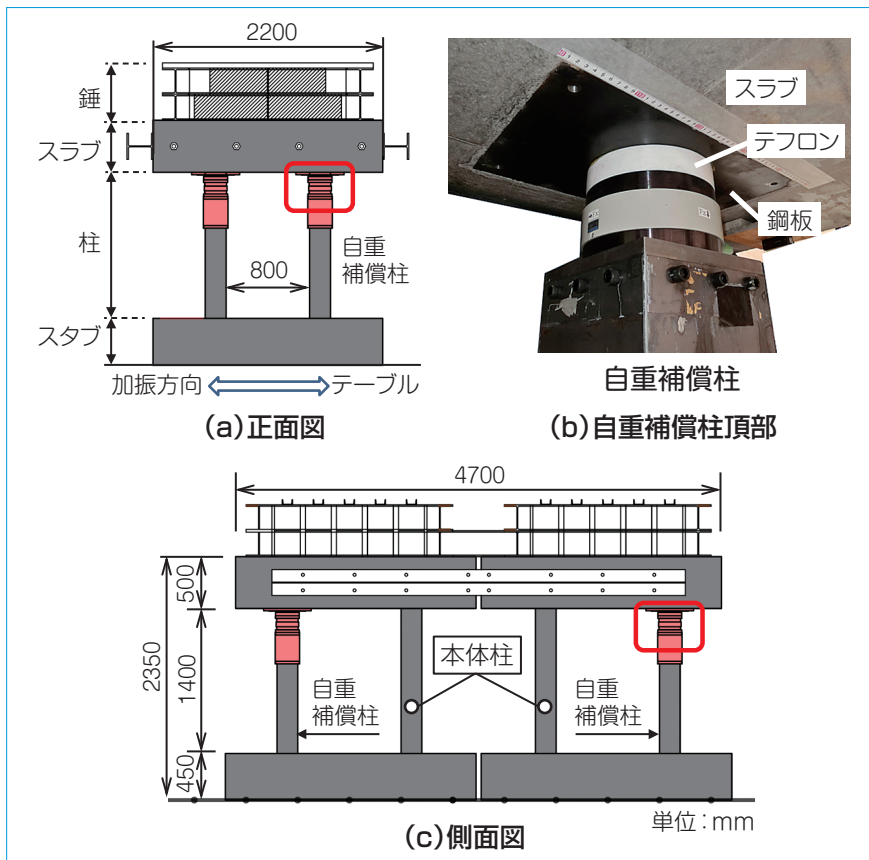


図2 自重補償構造の振動台実験試験体

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。危機耐性の概念については、本号の「鉄道構造物の地震に対する危機耐性を評価する」で詳しく説明しています。

一方で危機耐性の向上は耐震構造計画での配慮事項に留ま^{とど}っており、現在具体的な工法開発が求められている状況です。そこでここでは、実路線において数量の多い高架橋を対象として開発している、危機耐性を高める新しい工法について紹介します。

危機耐性を高めるには

危機耐性を高めるには、どのような方法が考えられるでしょうか？先述のように、危機耐性は設計での想定を超える領域を扱うため、そもそも地震動が想定できず、通常の耐震設計のように応答を算定して照査を行う、という

方法で性能を担保することができません。そこで、本号の「鉄道構造物の地震に対する危機耐性を評価する」で紹介したように、地震動の大きさや応答ではなく、地震の「結果」として構造物や周辺環境に生じうる被害のシナリオを多数想定します。個々のシナリオが引き起こす危機には大小さまざまなものが含まれますが、次にこの中から人命損失などの破滅的な被害が生じる危機シナリオを特定します。そして、このシナリオに至らない工法や仕組みを導入することで、危機耐性の向上を図ることができます。

高架橋を例とすると、兵庫県南部地震におけるせん断破壊のように、高架橋下や周辺の空間および道路が閉塞される状況が、破滅的な被害をもたらす主要な危機シナリオと想定されます。この危機は、構造全体の大規模崩壊により引き起こされるため、危機耐性を高

めるためには、設計地震動を超える地震動が発生して想定以上の損傷が構造物に生じた場合も、構造物に「①崩壊を生じさせない」、もしくは「②崩壊が生じたとしてもその挙動をコントロールし、事前に想定する破壊シナリオに誘導する」、のいずれかを実現する構造を考案すればよいと考えられます。ここでは、このような着想の元に開発を行っている「自重補償構造」および「倒壊方向制御構造」を紹介します。

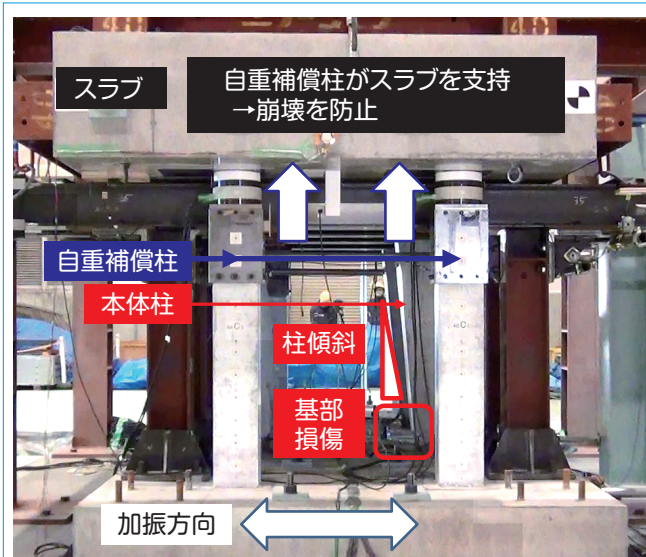
自重補償構造で崩壊を防止する

(1) 基本構造

自重補償構造は、構造物に「①崩壊を生じさせない」ことを目的として、図1のように高架橋の柱部材(本体柱)とは別に、「自重補償部材」と称する部材を設けた構造です。自重補償部材は、想定を超える地震動により本体柱が著しく損傷し、スラブなどの鉛直荷重を支持する性能が大幅に低下もしくは喪失した場合、図1のように本体柱に代わり、もしくは本体柱と協調して支持性能を発揮するものです。これにより、構造物の崩壊を回避して危機耐性を高めることを意図しています。

(2) 検証実験

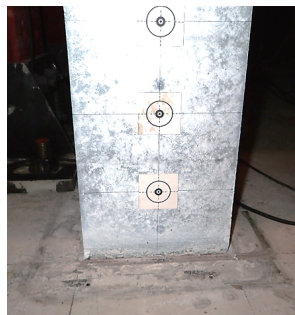
提案する自重補償構造が、高架橋に崩壊が生じるような地震動下において機能することを検証するため、大規模な振動台実験を行いました。実験では、図2のように実構造の1/4程度の高架橋模型を製作しました。8本の高架橋柱のうち、端部4本の柱を自重補償柱とし、残りの4本の本体柱が損傷した後もスラブを支持する機能を持たせました。自重補償柱自体は、本体柱と同じ鉄筋コンクリートですが、柱の頂部とスラブ面には、それぞれ図2(b)のようにテフロンと鋼板を設置し、摩擦係数0.1程度のすべり摩擦構造としました。これは、自重補償柱に大きな水平荷重が



(a) 試験後の状況：自重補償柱が試験体を支持



(b) 本体柱基部



(c) 自重補償柱基部

図3 自重補償構造の効果 (本体柱損傷後の状況)

作用して損傷が生じると、本来期待する鉛直荷重の支持機能が失われる可能性があることから、スラブからの水平方向の慣性力をすべり構造で受け流すことで、自重補償柱に過度な損傷を生じさせないことを意図しています。この試験体に、耐震標準の設計地震動を段階的に設計レベルの2倍以上まで一方向に作用させ、破壊試験を行いました。

図3には最終的に高架橋の本体柱に倒壊に近い損傷が生じた後の試験体および柱の状況を示します。本体柱には図3(a)にみられるような傾斜が生じ、図3(b)のように鉄筋の座屈など大きな損傷が生じています。しかし、このような状況でも、自重補償柱がスラブの鉛直荷重を受け換えて試験体の崩壊を防止することができました。また、すべり摩擦機構を採用したことで、

図3(c)のように自重補償柱にはほとんど損傷が生じませんでした。このように、提案する自重補償構造により、構造全体系の崩壊を防止できることを実証しました。

倒壊方向制御構造で崩壊を制御する

(1) 基本構造

倒壊方向制御構造は、構造物に「②崩壊が生じたとしてもその挙動をコントロールし、事前に想定する破壊シナリオに誘導する」構造です。すなわち、図4のように居住区域や緊急輸送道路、復旧スペースなどを支障する方向への倒壊を防止するよう、人為的に振動挙動を制御することで、崩壊にともなう破滅的な状況を回避して危機耐性を向上させる構造です。

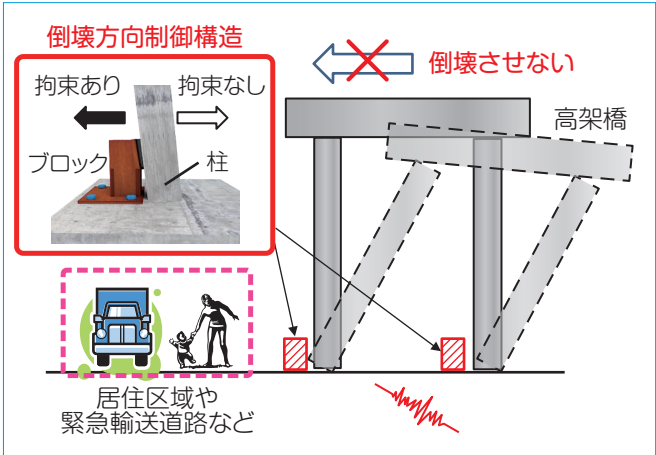


図4 倒壊方向制御構造の概念

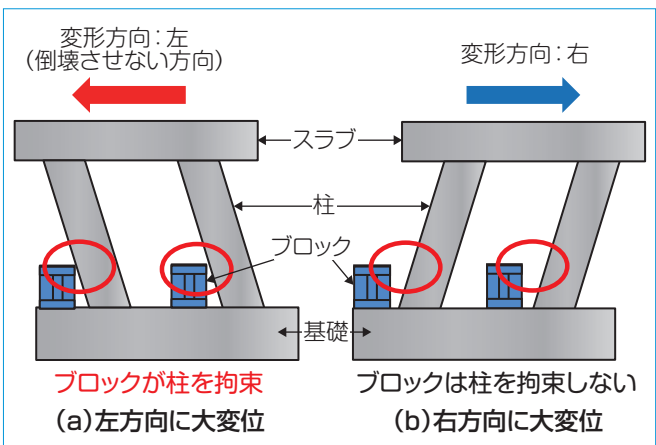


図5 倒壊方向制御構造の動作機構

このような制御を実現する構造として、図4中左上に示すようなブロック型の構造が提案されています³⁾。これは、高架橋の柱基部に、鋼製ブロックなどの安価なデバイスをアンカーで設置する簡易な構造です。高架橋が地震動により大きく振動した際のデバイスの動作を図5に示します。このように図5(a)の左方向の変形に対してはブロックが柱を拘束して変形を抑制します。一方、図5(b)の右方向に変形した場合は柱とブロックは接触せず、通常の高架橋と同様の挙動を示します。これにより、左方向への倒壊を回避することができます。

(2) 検証実験

自重補償構造と同様に、倒壊方向制御構造を組み込んだ高架橋模型を製作して破壊試験を行い、提案構造の実

証試験を行いました。図6に試験体の概要を示します。試験体正面および側面の諸元は図2の自重補償構造の試験と同一ですが、通常の高架橋を想定し、8本の柱すべてが水平力を受け持つ本体柱としました。倒壊方向制御デバイスは、角形鋼管にベースプレートを溶接してブロックを製作し、

図6のように高架橋模型の柱基部8箇所を設置しました。図5の概念図から、この配置では、倒壊方向制御構造を有する試験体は変位正側（紙面右側）に倒壊することが想定されます。入力地震動は、自重補償構造の実験と同様に設計地震動を用い、設計レベルの2倍以上で連続加振を行い、一気に高架橋を倒壊させました。なお、提案構造の効果を比較検証するため、デバイスを設置しない高架橋単

体の模型も製作し、同一の加振条件で比較試験を行いました。

図7は、高架橋単体および倒壊方向制御構造試験体の最終的な倒壊状況を示します。このように、高架橋単体では倒壊の方向が変位負側（紙面左）であったのに対し、デバイスあり試験体は、事前に想定したとおり変位正側（紙面右）に生じ、デバイスによる倒壊挙動の制御効果を明確に実証することができました。

まとめ

ここでは、想定を超える地震に対しても、人命損失などの破滅的な状況を回避する、危機耐性の高い構造を実現するため、鉄道総研が開発を進めてい

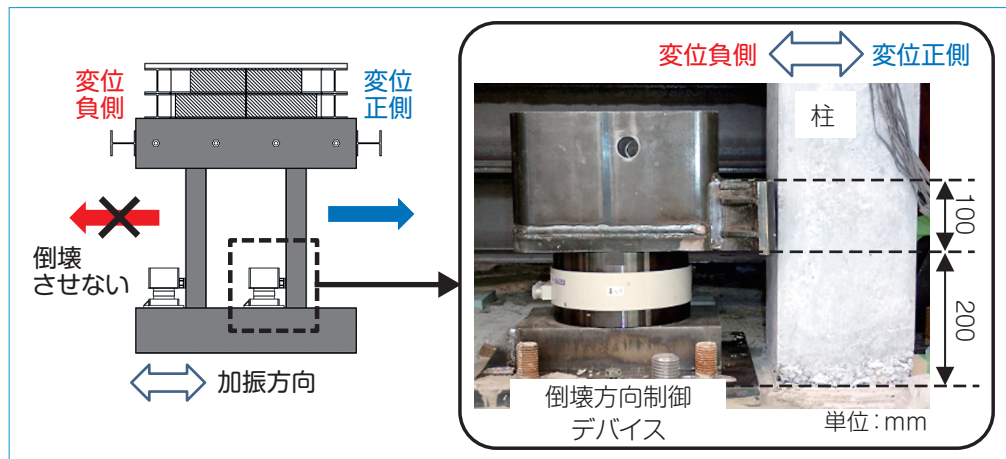


図6 倒壊方向制御構造の振動台実験試験体

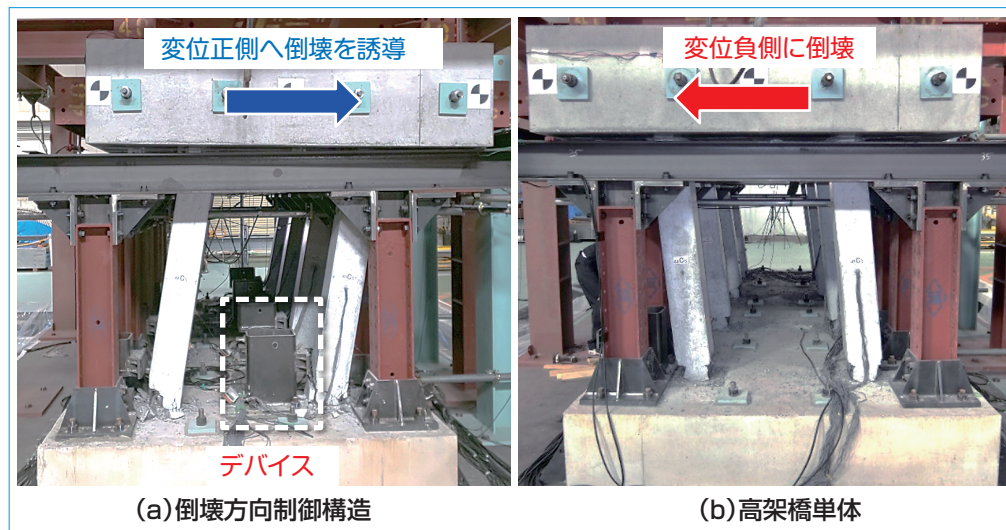


図7 倒壊方向制御構造の有無による倒壊状況

る自重補償構造および倒壊方向制御構の2つの構造について、地震時の動作概要を示すとともに、高架橋模型を用いた大規模振動台試験により効果を実証しました。

本実証実験のほかにも、試設計や数値解析、载荷試験などの結果をもとに、新設および既設構造を対象とした設計法を用意しており、新設および既設構造物の危機耐性向上を実現する構造として今後実用展開を図りたいと考えています。とくに自重補償構造は、構造物の崩壊を防止して地震時の安全性を担保する工法であることから、おもに既設構造の耐震補強法としての側面にも着目して適用を図りたいと考えています。

なお、本研究の一部は国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施しました。また、倒壊方向制御構造の基本概念は埼玉大学との共同研究により構築したものです。RRR

文献

- 1) 室野剛隆：巨大地震に備える－鉄道の耐震設計と危機耐性，土木学会誌 Vol.100, No.7, pp.24-27, 2015
- 2) 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
- 3) 齋藤正人，室野剛隆，本山紘希：地震時における構造物の倒壊に対する危機耐性機構の一考察，平成27年度土木学会全国大会第70回年次学術講演会概要集，1-144，2015