

鉄道一般
車両
軌道
構造物
防災
電力
信号通信 情報
材料
環境
人間科学
浮上式鉄道

鋼構造物の耐震技術

鉄道橋は古くから鋼構造物が多く用いられており、これまでに大地震を経験したものの少なくありません。地震による鋼構造物の被害事例は全体的には多くはありませんが、主に支承部(※参照)に損傷が多く生じています。そこで、本稿では、鋼構造物の主に支承部に着目し、被害事例や耐震設計の変遷を概説するとともに、既設の特に古い鋼構造物の耐震技術として、耐震性評価や補強方法について最近の研究開発事例を紹介します。



池田 学
Manabu Ikeda
構造物技術研究部
鋼・複合構造研究室
主任研究員
【専門分野】 鋼構造, 複合構造



杉本 一朗
Ichiro Sugimoto
構造物技術研究部
鋼・複合構造研究室
室長
【専門分野】 鋼構造, 複合構造

はじめに

鋼鉄道橋には100年以上経過したのも多数存在します。図1は都内のある鋼構造物について、今からちょうど100年前の建設直後(大正3年(1914年)発行資料¹⁾より引用)と現在の写真を示します。このような古い構造物が多く存在しており、過去の大地震を経験したものも少なくありません。

鋼構造物は過去の大地震においてどのような被害が生じているのでしょうか?被害の多くは鋼桁の支承部に生じています。それ以外の被害は非常に少ないものです。

本稿では、鋼構造物の支承部に主に着目し、過去の耐震設計の概要、最近の研究開発事例などを紹介します。

過去の地震被害と耐震設計の変遷

鋼鉄道橋には、古くから鉄鋼製の支承が一般に用いられてきました。その中でも特に铸铁製の線支承(図2)が多く用いられています。铸铁とは、文字通り「鉄でできた铸件」で、通常の炭素鋼と比べて、加工しやすく安価という長所があるものの、粘りが小さく衝

撃に弱いという欠点を有します。

この铸铁製の支承が地震に脆いことが認識されたのは、1978年に発生した宮城県沖地震のときです。鋼構造物の他部位ではほとんど被害がありませんでしたが、桁の铸铁製の支承に多くの被害が生じました。これを教訓に、支承の地震時の設計においては、地震の影響の水平震度を構造物の周期特性や方向などに応じて割り増して用いることとしました。このとき、基本となる地震動の水平震度は0.2とされました。すなわち自重の0.2倍の水平力に対して、構造物が降伏しないような設計が用いられました。鋼構造物の場合、軽くて粘り強いので、「水平震度0.2

※ 支承

橋脚・橋台などの上面で桁を支持するもので、桁からの力を橋脚・橋台などに伝える役割をしています。沓(くつ・シュー)ともいわれます。鋼構造物に用いられる支承は、材料面で区分すると金属製とゴム製に大別されます。金属製の支承には、プレート支承、線支承、ローラー支承、ピボット支承などがあります。また、ゴム製の支承は、薄いゴム層と鋼板を積層した構造をしています。



(a) 1914年頃¹⁾



(b) 現在

図1 旧式鋼構造物の事例

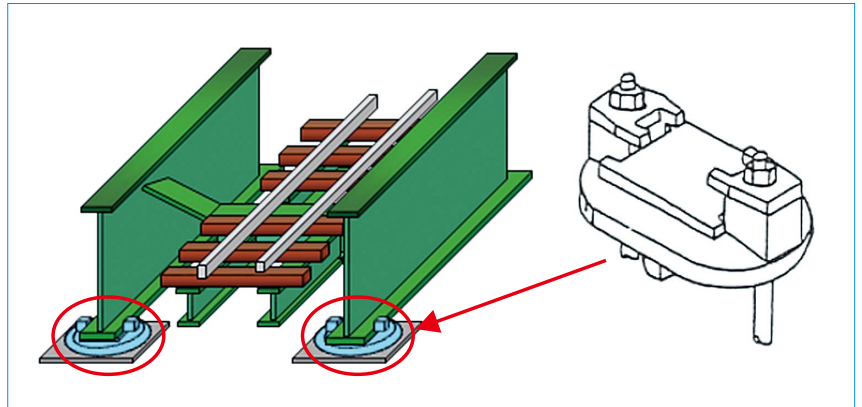


図2 鋳鉄製の線支承



(a) 桁支承の損傷



(b) ラーメン橋脚のピボット支承の逸脱

図3 兵庫県南部地震における被害事例

で弾性設計しておけば大規模地震に対しても大丈夫」との認識があったことも事実です。

この認識を改める契機となったのが、1995年に発生した兵庫県南部地震です。兵庫県南部地震では、鋼構造物は、支承以外の被害は少なく、やはり支承に多くの被害が生じました。図3に被害事例を示しますが、図3(a)が桁の支承の損傷で多くみられた事例、図3(b)がラーメン橋脚の基部にあるピボット支承の逸脱の事例です。これを機に、大規模地震に対する設計の重要性を認識し、「兵庫県南部地震クラスの地震動に対しても、鋼構造物の塑性化は許容するが軽微な損傷にとどめる」設計法を導入することになりました。

その後、2004年の新潟県中越地震、

2011年の東北地方太平洋沖地震においても、従来の設計標準で設計された鋼桁の支承の一部に被害が生じています。

今までの地震被害は、全体的には鋼構造物では甚大なものは少なく、幸いにも落橋に至るような壊滅的な被害は生じていません。これは、鋼橋は軽く、粘りがある材料であり、また工場で大抵が製作されるため品質が安定していることなどが理由と考えられます。さらに、古い鋼構造物は多数の部材から構成され、リダンダンシーの高い構造であることも理由と考えられます。

鋼桁の支承の耐震評価

前述の通り、既設鋼橋には鋳鉄製の支承が多く用いられ、過去の地震被害もこの支承形式で多く生じています。

そのため、この支承の耐力を精度良く把握し、必要な対策を効率よく施すことが重要です。

著者らは、実橋から撤去された支承を用いた載荷試験や数値解析を行い、耐力の算定法および、水平力と水平変位の復元力モデルの設定法などを提案しています²⁾。また、既設鋼橋を対象とした構造全体系の地震応答解析を行い、支承が地震時に損傷する可能性が高いこと、さらには補強による効果を確認しています。紙面の都合上、これらの内容については割愛します。

ピボット支承を有する鋼橋の耐震評価

首都圏をはじめ道路や鉄道と交差する箇所には、明治から昭和初期にかけ

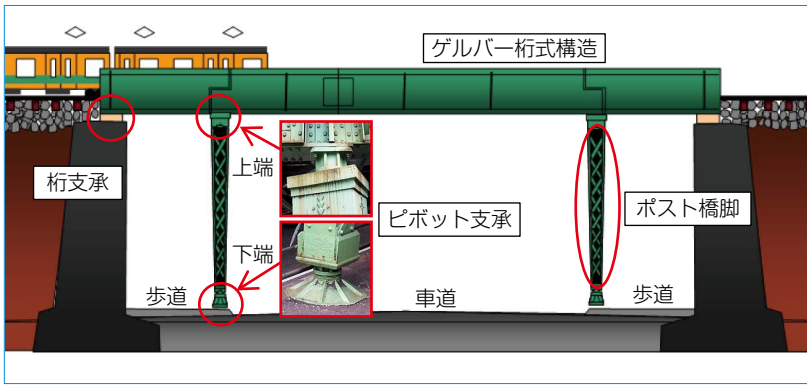


図4 旧式鋼構造物の概要

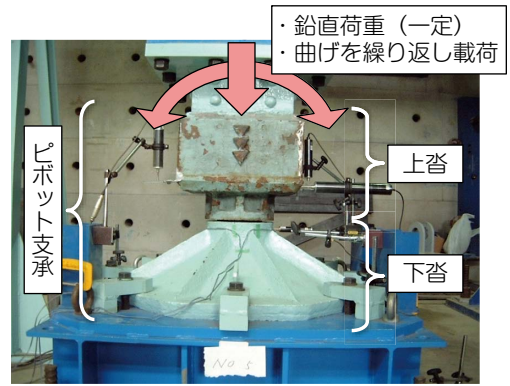


図5 ピボット支保の載荷試験

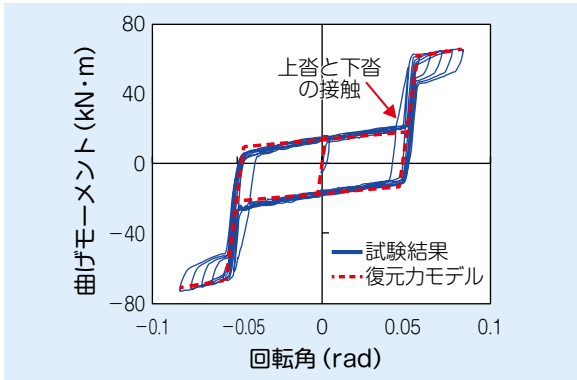


図6 ピボット支保の載荷試験結果と復元力モデル

表1 耐震評価事例

部位	A 橋 (橋長 24m)	B 橋 (橋長 40m)
桁	1	1
桁支保	2	2
ポスト橋脚 (柱)	1	1
ピボット支保	1	3

- ・入力地震動：L2 地震動スペクトルⅡ（耐震設計標準）
- ・表中の数値は以下の損傷レベルを表す。
- 損傷レベル1 損傷なし（降伏や座屈しない）
- 損傷レベル2 一部降伏するが軽微な損傷
- 損傷レベル3 損傷が大きくなるが破壊や逸脱しない
- 損傷レベル4 破壊や逸脱する

て、図1および図4のような鋼構造物（以下、旧式鋼構造物という）が多く用いられました。このような旧式鋼構造物は、特に都市部の主要な線区を支える箇所によく、大規模地震に対して耐震性を確保することが強く求められています。

旧式鋼構造物は、柱の上下端に“ピボット支保”（☞参照）といわれる支保が用いられているのが大きな特徴です。ピボット支保は、地震時に万が一破損あるいは逸脱すると、構造全体系が不安定となるため、耐震評価上重要な部位です。

ピボット支保について、実橋からの撤去品や実物大の製作品を用いて、大

変形域まで繰り返し曲げ変形を付与する交番載荷試験を実施しました（図5）³⁾。

載荷試験の結果（図6青線）を見ると、回転角が小さい領域ではスムーズに回転しますが、ある程度回転すると上沓と下沓が接触して曲げモーメントが急激に増大することがわかります。さらに載荷していくと回転のみが進み、上沓が下沓に乗り上がるようにして逸脱していき挙動を示しました。ピボット支保は、支保本体が破損することはなく、0.07～0.1rad程度回転すると上沓と下沓が逸脱しそうになり、終局状態に至ることがわかりました。

大規模地震時の評価を行うために、載荷試験結果をもとに、曲げモーメントと回転角の関係の復元力モデルを提案しました（図6赤線）。

これらの復元力モデルを用いて構造全体系モデルで地震応答解析を行い、耐震性を評価した結果の事例を表1に示します。対象とした構造物は、実橋を想定した2橋で、いずれも大規模地

震に対して所要の耐震性能（損傷レベル3以下）を確保しており、旧式鋼構造物の耐震性は比較的高いことが確認されました。また、このような解析を種々行うことによって、旧式鋼構造物では、大規模地震時に、ピボット支保と桁支保が弱点となり得ることも明らかになりました。

また、全ての構造物に対してこのような構造全体系の地震応答解析を行うのは煩雑ですので、この解析を行わずに簡易にピボット支保の耐震評価を行う方法も提案しています⁴⁾。

ピボット支保の補強法

都市内の旧式鋼構造物は、歩車道境界などの狭隘な箇所を設置されていることが多いため、ピボット支保の補強を行う場合には、可能な限りコンパクトで、簡易に施工できる構造が望まれます。そこで、ポスト形式橋脚の断面内に収まるサイズであり、現場で人力により簡易に施工することができる

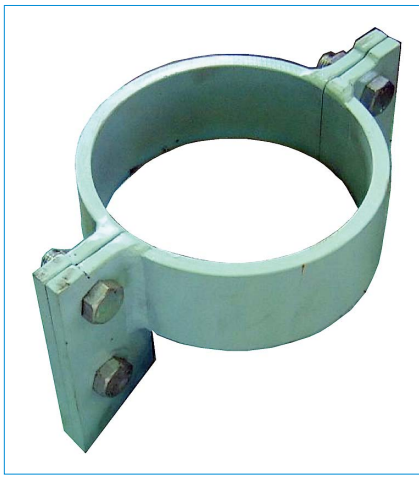


図7 補強リングの構造

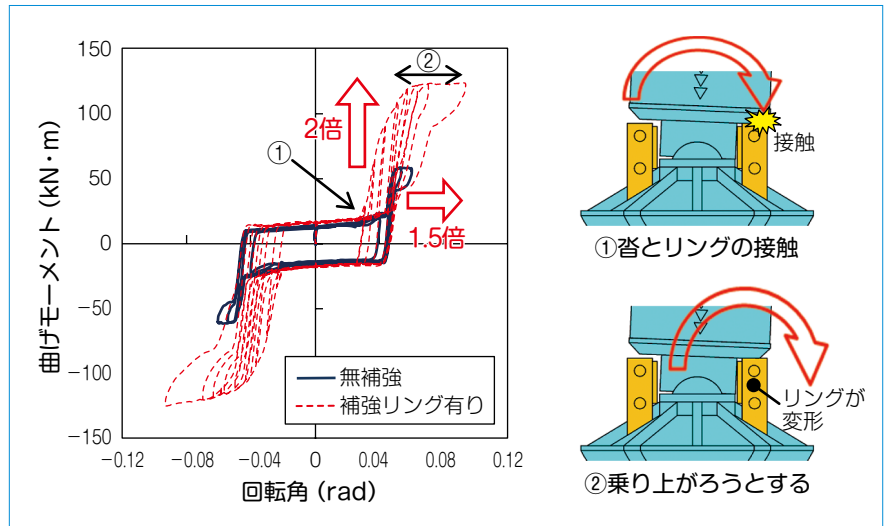


図8 補強リングの効果

「補強リング」を考案しました。

図7に、補強リングの構造を示します。補強リングは、半割の鋼管を、ピボット支承をはさみこむように取り付け、鋼管に取り付けられた鋼板同士をボルトなどで結合する構造です。

補強リングの効果は、交番載荷試験により確認しています。図8に載荷試験結果の一例を示しますが、補強リングを取り付けることにより、耐力は約2倍、変形性能は約1.5倍増加しています。この効果は、補強リングが沓と接触して回転を抑える効果が発揮されたものです。回転に対する効果以外にも、補強リングは、上沓が上方へ抜け出すことを抑える効果も付加しています。

さらに、構造全体系モデルを用いた地震応答解析により、ピボット支承に補強リングを取り付けた場合の補強効果や他部材への影響を確認しました。その結果、補強リングを取り付けることにより、相当な地震に対してもピボット支承の逸脱が抑えられることがわかりました。一方、桁支承などの他部位の照査結果は、補強リングの取り付け前後でほぼ変わりませんでした。このことから、補強リングは、ピボット支承のみについて耐震性能を向上できる有効な補強であることを確認しました。

なお、補強リングは実橋にも適用されています(図9)。

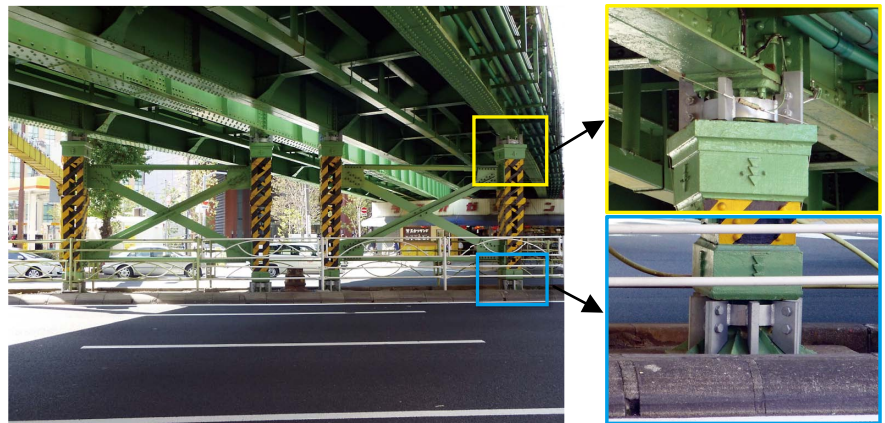


図9 補強リングの設置事例

おわりに

既設鋼鉄道橋は、多種多様な構造や材料が用いられています。特に、部材構成が複雑で、ピボット支承などで部材が結合されている構造が多く、構造系が複雑なため、大規模地震に対する評価が非常に難しいのが実状です。

本稿では、一部の構造を対象とした地震時の補強法の紹介に留めましたが、それら以外にも、桁支承の補強として、例えば桁・橋台・盛土一体化構造なども有効であると考えられます⁵⁾。

鋼橋は軽く、材料自身が粘り強く、さらに安定した製作品質を得ることが可能なため、大規模地震に対して有利な構造物であると考えられます。今後、鋼構造物の特徴を生かした耐震技術の開発に取り組んでいきます。[RRR]

文献

- 1) 土木学会HP：東京市街高架鉄道建築概要
(http://library.jsce.or.jp/Image_DB/j_railways/34553/34553.shtml)
- 2) 中原正人, 池田学, 豊岡亮洋, 永井紘作：鑄鉄製支承の地震時耐荷力特性と復元力モデル, 鉄道総研報告, Vol.22, No.3, pp.23-28, 2008
- 3) 池田学, 芝寛, 吉田直人, 黒田智也：ピボット支承を有する旧式鋼橋の耐震性評価および補強法, 鉄道総研報告, Vol.25, No.2, pp.23-28, 2011
- 4) 和田一範, 池田学, 青木千里, 工藤伸司, 齋藤聡, 黒田智也：ピボット支承を有する旧式鋼鉄道橋の構造形式の違いによる地震時挙動への影響, 構造工学論文集, 2014
- 5) 神田政幸, 館山勝, 小林裕介, 杉本一朗：構造変更による旧式鋼橋梁のリニューアル, RRR, Vol.69, No.10, pp.4-7, 2012