

## 橋梁支承部の地震時挙動を捉える実験技術

構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室

主任研究員 池田 学

### 1. はじめに

過去の大規模地震において鉄道橋の被害の多くは支承部に生じている。一方、支承部は種々の形式があり、その地震時の挙動については未だ不明な点も多い。本発表では、支承部の地震時の挙動を明らかにするために実施した各種支承の載荷試験として、既設鋼橋梁の支承（線支承、ピボット支承）や新形式の支承を用いた試験事例を紹介する。さらに、試験結果をもとに復元力モデルを提案し、構造物全体系での地震時の評価に適用した事例を紹介する。

### 2. 既設鋼橋の線支承の載荷試験

#### 2.1 載荷試験の概要

既設鋼橋には鋳鉄製の線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る。そのため、鋳鉄製の線支承の耐力等を精度良く算定することが重要である。

そこで、実橋から撤去された線支承を用いて載荷試験を実施した。載荷は、当研究所の二軸交番載荷試験装置（最大荷重 2500kN）を用い、上部工反力に相当する鉛直荷重（500kN）を載荷させた状態で水平荷重を繰り返し加えた（図 1）。水平載荷は、線路直角方向と線路方向それぞれ行ったが、ここではサイドブロックに着目した線路直角方向の載荷試験結果を示す。

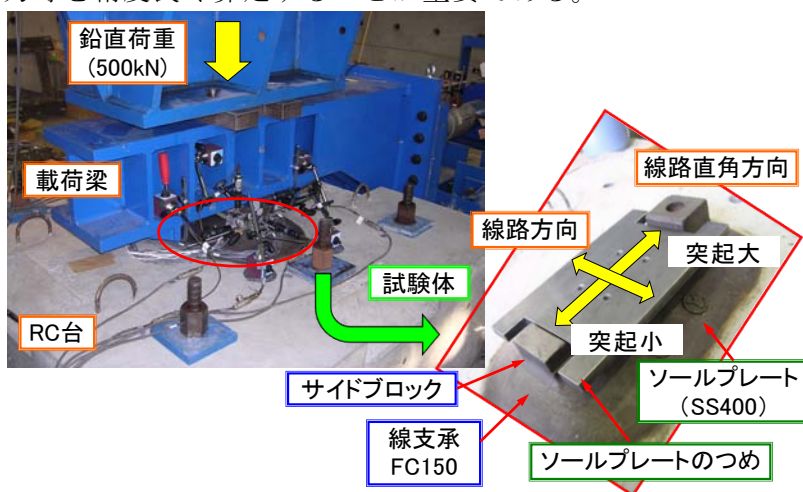


図 1 線支承の交番載荷試験

#### 2.2 載荷試験結果と復元力モデルの検討

図 2 に試験結果の荷重－変位関係の一例を示す。最初は、荷重一定で変位が 1.5mm 程度増加しているが、これは線支承とソールプレートの摩擦によるものである。その後、ほぼ線形的に荷重が増加し、最大荷重に達すると、急激に荷重が低下する脆性的な破壊形態を示した。破壊形態は図 3 に示すように、支承部のサイドブロック（突起）が脆性的に破断した。

これらの挙動を表現できる復元力モデルとして、図 4 のモデルを提案した。最大荷重は、試験結果より、突起部のせん断破壊面を設定して算定することで評価可能であることを確認した。各点の算定方法は、載荷試験結果および FEM 解析結果をもとに定めた<sup>1),2)</sup>が、詳細は本稿では省略する。

### 2.3 構造物の評価事例

上記の支承部の復元力モデルを用いて、地震時の構造物の評価を行うため、構造全体をモデル化し時刻歴応答解析を行った。解析対象構造の概要を図5に示す。

解析結果の一例として、各部位の損傷レベルを評価した結果を表1に示す。地震動は耐震設計標準のL2地震動を用いた。本対象構造（検討用に実橋の諸元を変更）の場合、線路方向では端部の線支承が、線路直角方向では中間部の線支承とラーメン橋脚が厳しい結果となっている。このように、載荷試験結果から復元力モデルを設定することで、大規模地震に対する評価が可能となる。

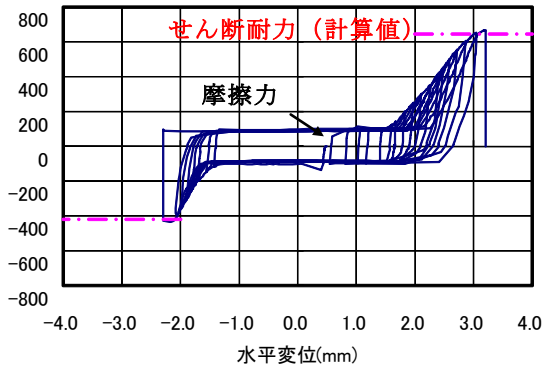


図2 載荷試験結果の荷重－変位関係

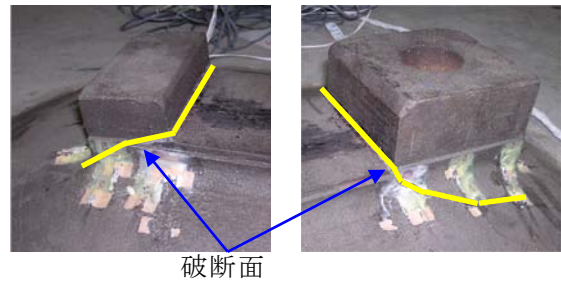


図3 サイドブロックの破壊状態

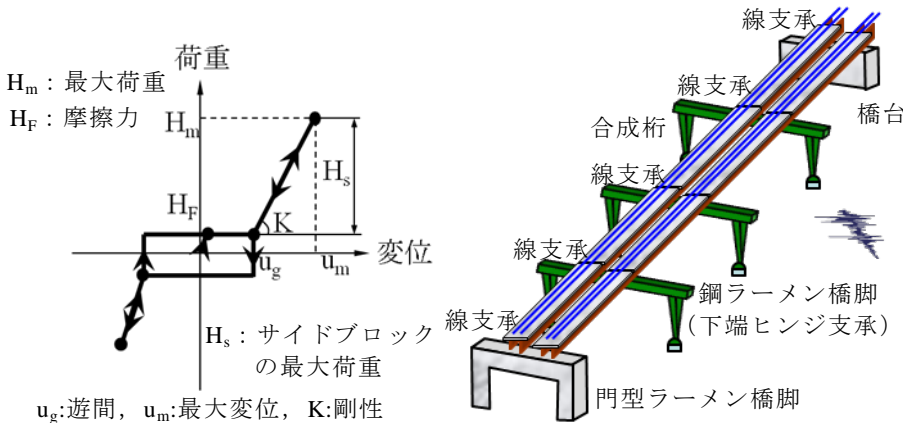


図4 復元力モデル

図5 解析対象構造

表1 評価結果例（損傷レベル）

		線路方向	線路直角方向
桁支承	端部	4	2
	中間部	2	4
鋼ラーメン橋脚	柱	2	4
	隅角部	—	4
	ピボット支承	2	4

## 3. 既設鋼橋のピボット支承の載荷試験

### 3.1 載荷試験の概要

都市内の古い鋼橋には、ピボット支承を有する構造物が多い。このような構造物の大規模地震時の評価を行うためには、ピボット支承の挙動を評価することが重要となる。ピボット支承の大変形時の挙動が不明であったため、以下のような載荷試験を実施した。

実橋からの撤去品を試験体として用い、交番載荷試験を実施した（図6）<sup>3)</sup>。載荷試験は、線支承と同様に、当研究所の二軸交番載荷試験装置を用いた。載荷は、一定の鉛直荷重を付与した状態で、水平方向に繰り返し載荷し、ピボット支承に曲げモーメントを作用させた。

### 3.2 載荷試験結果と復元力モデルの検討

図7(a)に試験結果の荷重－変位関係の一例を示す。最初は球面上を転がるため曲げモーメント一定の状態で行き、上下脊が接触すると曲げモーメントが急増する。その後回転角の増大に伴

い上沓が下沓に乗り上がろうとする挙動を示し、さらに回転角を増やすと最終的には逸脱に至る。これらの挙動を表現できる復元力モデルとして、図7(b)に示すモデルを提案した。復元力モデルの詳細は文献3)による。

### 3.3 構造物の評価事例

橋長等の異なる2橋を対象に、構造物を3次元骨組解析モデルで表現し、地震波を入力して時刻歴応答解析を行った。図8に対象構造の概要と解析モデルを示す。ピボット支承は、図7(b)の復元力モデルを有する非線形回転ばね要素を用いた。

表2にL2地震動に対する各部の損傷レベルの評価結果を示す。いずれも大規模地震に対して損傷レベル3以下に留まっていることが確認できる。一方で、桁支承とピボット支承が、大規模地震時の損傷レベルが大きく、弱点箇所となりうる可能性もあることもわかる。

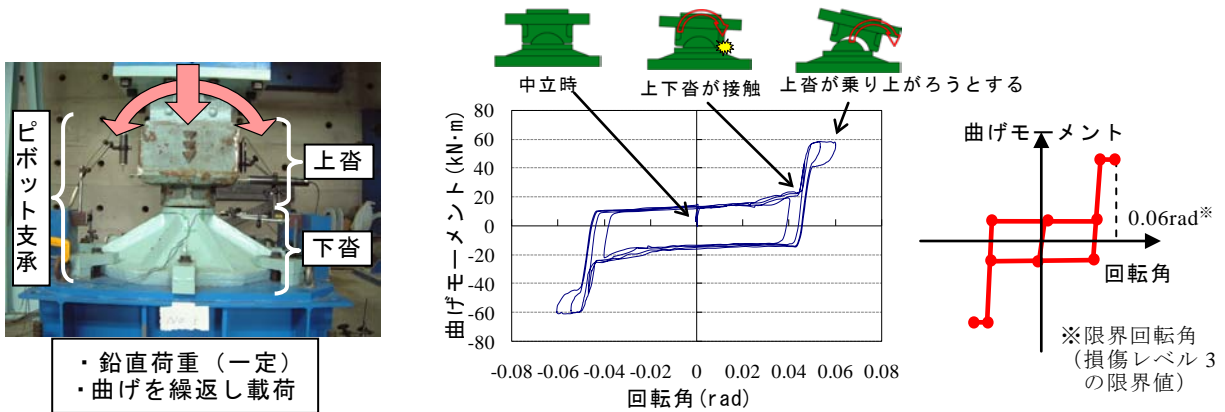


図6 ピボット支承の交番載荷試験

図7 載荷試験結果と復元力モデル

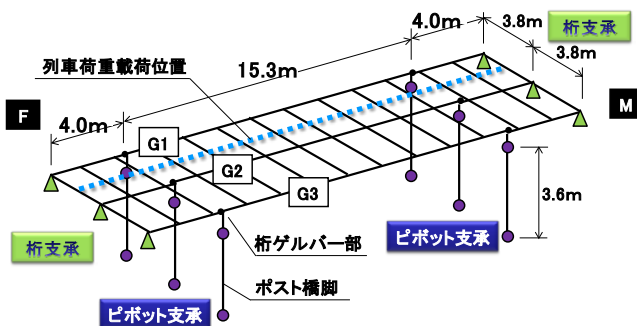


図8 解析モデルの概要（寸法はA橋）

表2 評価結果例（損傷レベル）  
（線路直角方向）

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

## 4. 負剛性摩擦支承を用いた振動台試験

### 4.1 振動台試験の概要

負剛性摩擦支承とは、図9に示すように、すべり板に凸の曲率を設定することで、荷重と変位の関係が負の剛性を有するように設計された支承である。この支承を、積層ゴム支承のような正の剛性を有する装置と併用することで、構造系の剛性を低下させて長周期化を図り、さらに摩擦材のエネルギー吸収により制震効果を得ようとするものである。

負剛性摩擦支承の動的特性を把握するため、小型の模型試験体を製作し振動台試験を行った<sup>4)</sup>。試験装置は、京都大学防災研究所の強震応答実験施設の大型振動台を用いた。振動台テーブルは5.0×3.0mで、最大上載荷重は150kN、最大加振加速度は1.0Gである。

試験体は、図10に示すように、重量約100kNの桁模型を、負剛性摩擦支承4基およびゴム支承2基により支える構造である。なお、鉛直荷重は負剛性摩擦支承のみで支持する構造である。

#### 4.2 試験結果と復元力モデルの検討

試験結果の一例として、桁の長手方向に、兵庫県南部地震における神戸海洋気象台記録（EW成分）の最大加速度を縮小した地震動を入力した結果について、負剛性摩擦支承の荷重・変位関係を図11に示す。全体としてほぼ一定の負剛性および履歴が観察でき、安定した挙動をしていること、また想定通りの負剛性-201kN/m（すべり板曲率半径497mm）が得られることを確認した。

この復元力モデルについて、所定の負剛性および動摩擦係数 $\mu=0.1$ 等として設定することで、図11より全体的な特性を再現できることがわかる。

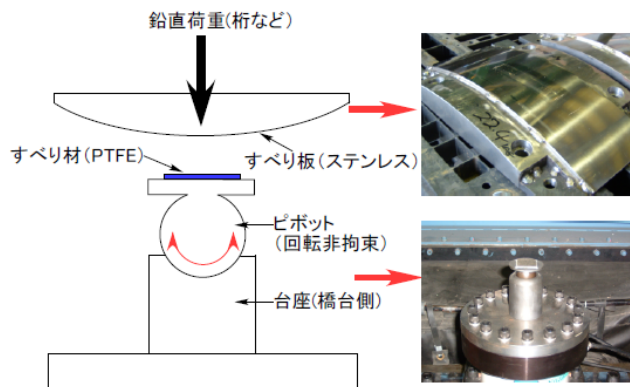


図9 負剛性摩擦支承の構造と特徴

#### 4.3 構造物の評価事例

3径間の桁式橋梁（スパン70m）を対象に、FM構造と負剛性摩擦支承を用いた構造について時刻歴応答解析を行った。詳細は割愛するが、負剛性摩擦支承を用いることにより、所要の性能を満足するための橋脚や基礎構造物の断面寸法を縮小できることを確認している<sup>5)</sup>。

#### 5. おわりに

本発表では、支承部の地震時の挙動を明らかにするために実施した各種支承の載荷試験事例を紹介した。支承は種々の形式があり、このような載荷試験を行い、耐力や変形性能、復元力特性を明らかにすることで、精度よく合理的に地震時の構造物の評価を行うことが可能となる。そのためにも、支承の挙動を捉える実験技術の向上を図ることが不可欠である。なお、負剛性摩擦支承に関する検討は、運輸分野における基礎的研究推進制度（平成17～19年度）において、京都大学、JRSE、オイレス工業との共同で実施したものである。

【参考文献】1)中原，池田他：鋳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，第22巻第3号，2008.3，2)安原他：既設鋼鉄道橋の鋼製支承の水平耐力評価法に関する実験および解析的研究，構造工学論文集，Vol.49A，2003.3，3)池田，芝他：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，第25巻第2号，2011.2，4)豊岡，河内山他：パッシブ型負剛性摩擦ダンパーの開発と振動台実験による制震性能の検証，土木学会論文集A Vol.66 No.1，2010.3，5)池田，豊岡他：パッシブ型負剛性摩擦ダンパーの適用による鉄道橋の耐震性評価，構造工学論文集，Vol.58A，2012.3

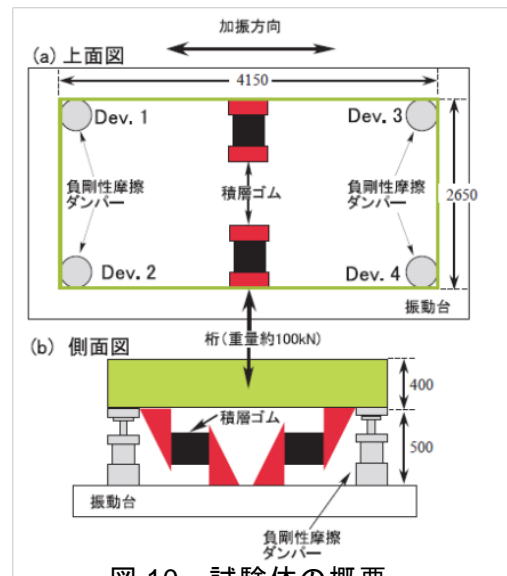


図10 試験体の概要

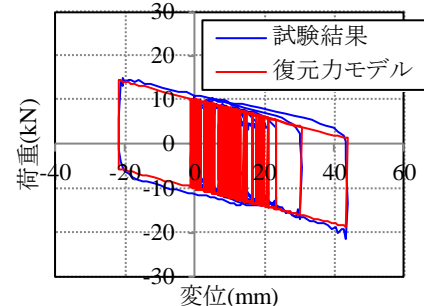


図11 負剛性摩擦支承の振動台試験結果と復元力モデル