

既設鋼鉄道橋に用いられるピボット支承の 復元力特性に関する実験的研究

芝寛¹・池田学²・黒田智也³・齋藤聡⁴・工藤伸司⁵

¹正会員 （財）鉄道総合技術研究所 鋼・複合構造（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

²正会員 工修 （財）鉄道総合技術研究所 鋼・複合構造（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

³正会員 東日本旅客鉄道株式会社 東京工事事務所（〒151-8512 東京都渋谷区代々木2-2-6）

⁴正会員 工修 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター（〒151-8578 東京都渋谷区代々木2-2-2）

⁵正会員 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター（〒151-8578 東京都渋谷区代々木2-2-2）

1. はじめに

首都圏をはじめ道路幅の広い幹線道路と交差する鋼鉄道橋には、大正から昭和初期にかけて写真-1に示すようなポスト形式の鋼橋脚とピボット支承を有する鉄道橋が多く用いられている。このような鉄道橋は首都圏の重要な幹線輸送を支える箇所に設置されており、地震被害が生じると社会的、経済的な影響が大きいと考えられる。一方で、近年の大規模地震の被災事例として、平成7年1月に発生した兵庫県南部地震ではポスト形式橋脚の横倒れにより桁の架違い部が線路直角方向に変形し、桁端部が損傷した例が報告されている。他に、ピボット支承を有する門型ラーメン橋脚では、同じく兵庫県南部地震において、ピボット支承本体が破損する事例も報告されている¹⁾。

新設の鉄道橋では、「鉄道構造物等設計標準・同

解説（耐震設計）」²⁾（以下、耐震標準）において大規模地震に対する評価法は確立されているが、既設構造物に対しては大規模地震に対する評価法が確立されていない。これまで、既設鋼鉄道橋の耐震性に関する研究は、門型鋼製ラーメン鋼脚に関するものが多く^{3),4)}、ポスト形式の鋼橋脚を有する鉄道橋を対象とした例は少ない^{5),6)}。このような背景のもと著者らは、財産図に基づき簡易な三次元骨組解析モデルを設定し、時刻歴応答解析を行い地震時挙動に関する検討を行ってきたが⁷⁾、地震時の解析に用いるピボット支承の復元力特性に関しては研究事例が少なく、不明な点が多く残されている。

そこで、ピボット支承について構造や寸法等をパラメータとした交番載荷試験を実施し、繰返し載荷時のピボット支承の挙動や、荷重と変形の復元力特性について確認した。また、上沓が下沓からの逸脱を防止するリングタイプの補強部材を考案し、その効果についても交番載荷試験により確認した。さらに、ピボット支承の簡易な復元力モデルの設定を試みた。

2. ピボット支承の交番載荷試験

(1) 試験概要

ピボット支承の回転挙動を確認し、復元力モデルを設定するために、写真-2に示すように交番載荷試験を行った。ピボット支承の試験体は、実橋梁の財産図を参考に、実物大で新たに作成した。

載荷方法は、上部工反力としての鉛直荷重を荷重

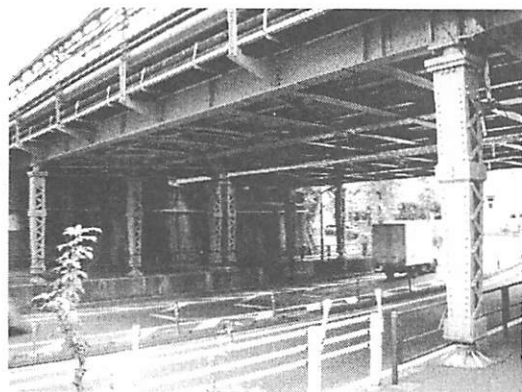


写真-1 ポスト形式の鋼橋脚とピボット支承を有する鉄道橋の例

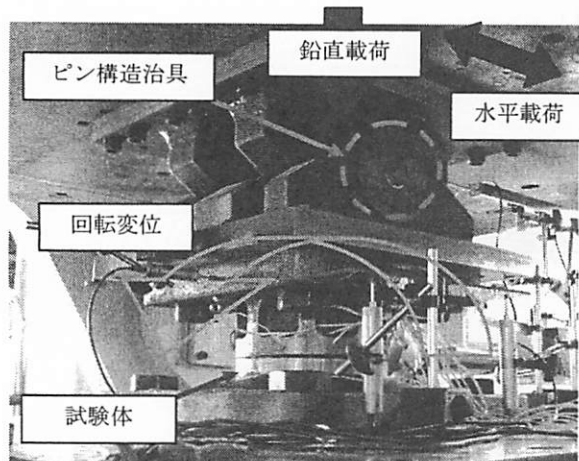


写真-2 荷重試験概要

表-1 ピボット支承試験体一覧

試験体 No.	記事
1	標準タイプ（鉸桁1号柱用）
2	浮上り防止アンカーボルト付
3	浮上り防止リング付
4	上下杓遊間変更
5	補強リングⅠ設置
6	補強リングⅡ設置

制御にて保持した状態で、水平荷重を繰返し荷重した。このとき、実橋梁のピボット支承の挙動を再現するため、上杓をピン構造の回転可能な治具に、下杓を面板に、それぞれボルトで固定した。これにより水平方向に荷重することでピボット支承に回転挙動を与えた。

計測は、鉛直・水平荷重、上下杓の鉛直・水平変位、ひずみ等について行った。

(2) 試験体

試験体の一覧を表-1に、試験体形状を図-1に示す。No.1は、首都圏の鉄道橋で多く使用されている鉸桁1号柱⁸⁾用ピボット支承とし、これを標準タイプとした。No.2, No.3は、既往の浮上り防止装置として昭和初期頃より設置されてきたアンカーボルト⁸⁾と、浮上り防止装置として設置されているリングの効果把握するための試験体とした。No.4は上下杓の当り方と回転角の相違による影響を把握するために、上下杓の遊間を標準タイプNo.1の5 mmに対して15 mmとした。

No.5, No.6は、標準タイプにあと施工にて設置できるようなリングタイプの補強部材（以下、補強リング）を考案し、その効果を把握するための試験体とした。補強リングは、これまでの損傷事例¹⁾、

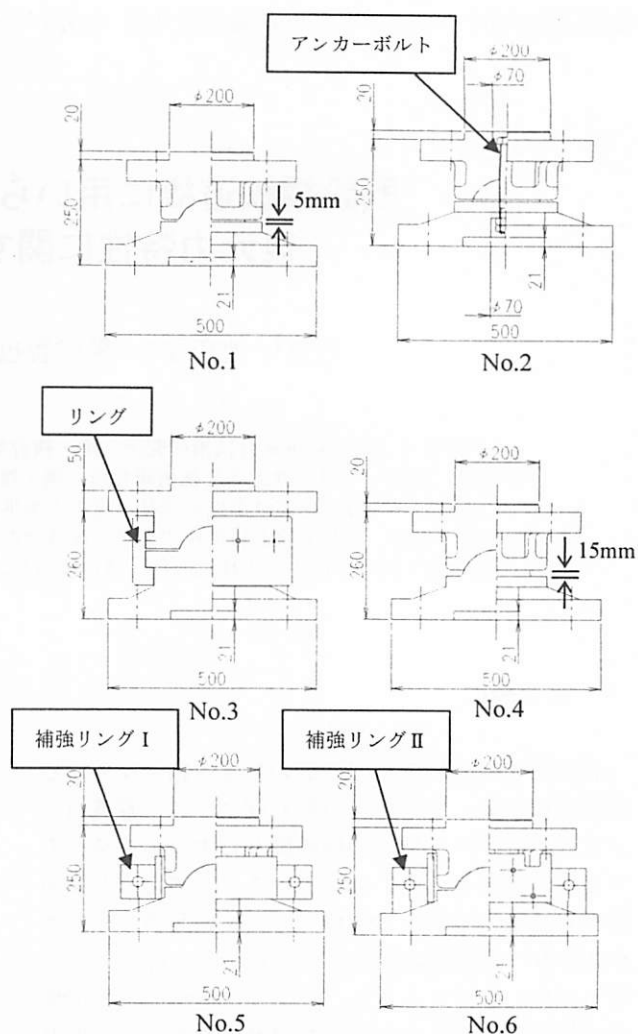


図-1 試験体形状と寸法

No.1の荷重試験結果等から、以下のような効果を期待した。

- ・上杓が、下杓に乗り上げてから水平方向にずれて外れるのを防ぐ効果。（図-2(a)）
- ・上杓が回転して逸脱するのを防ぐ。回転すると、補強リングの上端が上杓に接して、この部分が回転中心になることで逸脱しにくくなるという効果（図-2(b)）
- ・もし地震時上揚力を受けて上杓が鉛直方向に浮上った場合、このリングの高さ分までは浮き上がっても元に戻る効果（ガイドの役目）。（図-2(c)）

補強リングⅠは、上下杓を横から挟みこむ様にリングを設置した。補強リングⅡは、リングⅠの改良版として、リング高さの変更、リング接続プレートの形状変更、止めネジの追加を行った。図-3に補強リングⅡのイメージ図を示す。

(3) 試験内容

a) 交番载荷試験 (常時挙動)

水平方向の载荷は、上下沓接触までの履歴特性を把握することを主目的として、変位制御による正負交番载荷とし、繰返し回数は1回とした。ただし、No.1については繰返し回数による影響をみるため、繰返し回数は3回とした。鉛直荷重は、No.1, No.4は100kN, 500kN, 1000kN, 2000kNの4パターン、No.2, No.3, No.5, については、-200kN (引張り)、100kN, 500kN, 1000kN, 2000kNの5パターンについて行った。

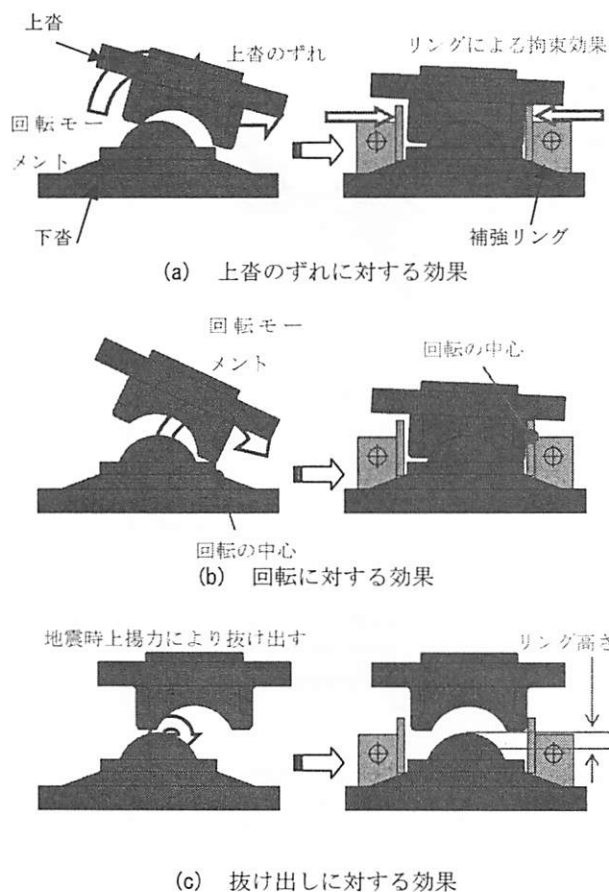


図-2 リングに期待する効果

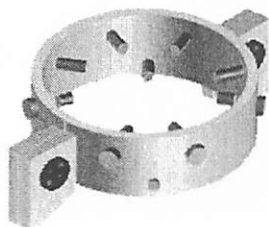


図-3 補強リング II

b) 交番载荷試験 (終局挙動)

水平载荷は、上下沓接触後の変形性能と支承の破壊形態の把握を主目的として、鉛直荷重 (500kN) を一定で载荷した状態で変位制御による正負交番载荷とした。载荷履歴は、上下沓の接触後水平変位を3~5mmずつ増加させる方法とし、繰返し数は1回とした。载荷は沓が破損するか上沓が下沓から逸脱しそうになるまで行った。

3. 交番载荷試験結果

(1) 常時挙動

図-4にNo.1の試験結果のM- θ 関係を示す。今回の実験ではピン構造の治具を利用して回転モーメントを与えていることから、試験結果はM- θ 関係で整理した。曲げモーメントは、水平荷重によりピボット支承に作用する曲げモーメントと鉛直荷重の偏心による曲げモーメントの合計値とした。回転角は、上沓の水平方向変位量を、ピボット支承の回転中心から水平荷重の载荷位置までの高さで除して求めた。

結果はいずれの試験体も同様の傾向であり、以下の通りであった。水平荷重を増加させていくと上沓が滑り出し、曲げモーメントがほぼ一定のまま上下沓が接触する値まで回転角が増加した。また、鉛直荷重の増加にともなって、この一定の曲げモーメントも増加していた。これにより、ピボット支承が回転域にあるときは、水平力に対して球体表面摩擦で抵抗するため、鉛直荷重に比例する一定の曲げモーメントで回転することが確認できた。

表-2

に試験結果より算出した各試験体の摩擦係数を示す。摩擦係数は一般的に水平方向の作用力と鉛直方向の作用力の比で表わされるため、(式1)のように考えることができる。

$$\mu = F/(N + N_d) \quad (\text{式1})$$

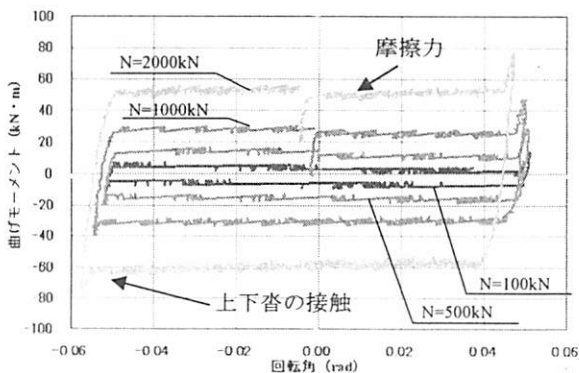


図-4 No.1の M- θ 関係 (常時挙動)

ここで、 μ ：摩擦係数

F ：水平荷重の実験値

N ：鉛直荷重の実験値

N_d ：試験体（上沓）の死荷重

これにより、これらの試験体の球体表面摩擦係数は、平均約0.07であった。ローラー支承のころがり摩擦係数は0.05が一般的に用いられており⁹⁾、ピボット支承の回転機構はころがり摩擦に近いと考えられる。なお、接触部が変形したり、すべり摩擦を伴う箇所が存在したりすると摩擦係数は大きくなること⁹⁾から、鉛直荷重が小さい（100kN）ときは、すべり摩擦を伴う回転機構の傾向が強かったものと考えられる。

表-2 摩擦係数

試験体 No.		1	2	3	4	5	6
鉛直荷重	μ	0.14	0.10	0.11	0.14	0.11	0.11
	平均	0.12					
500 (kN)	μ	0.10	0.06	0.08	0.07	0.06	0.05
	平均	0.07					
1000 (kN)	μ	0.10	0.06	0.07	0.07	0.06	0.05
	平均	0.07					
2000 (kN)	μ	0.10	0.05	0.10	0.07	0.06	0.04
	平均	0.07					

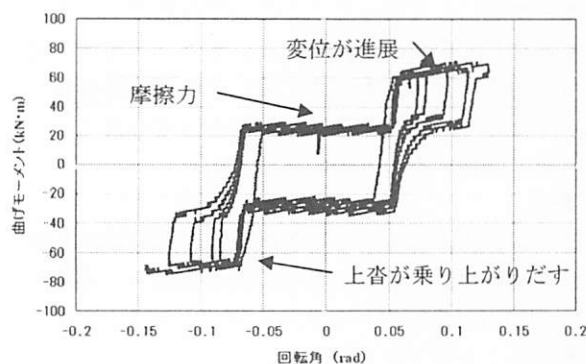


図-5 No.1のM-θ関係（終局挙動）

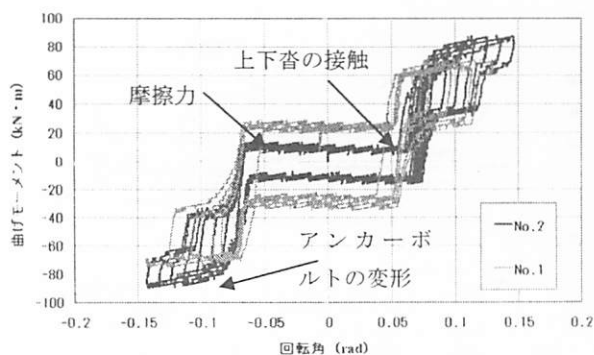


図-6 No.2のM-θ関係（終局挙動）

(2) 終局挙動

図-5にNo.1のM-θ関係を、図-6にNo.2のM-θ関係を、図-7にNo.3のM-θ関係を、図-8にNo.6のM-θ関係を、写真-3にNo.1の上沓逸脱状態を示す。また、表-3に材料引張試験の結果一覧を示す。

No.1については、回転角が増加して上下沓が接触すると急激に曲げモーメントが増加した。曲げモーメントが約60kN・mに達するとその後曲げモーメントは増加せずに回転角が進展、接触箇所を変形させながら上沓が下沓に乗り上がるようにして逸脱へと至った。上下沓接触箇所直下の下沓のひずみ値に着目すると、接触後直ぐに1700μ程度の値を示した。

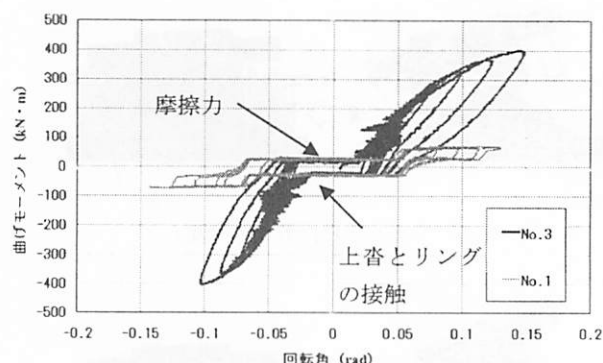


図-7 No.3のM-θ関係（終局挙動）

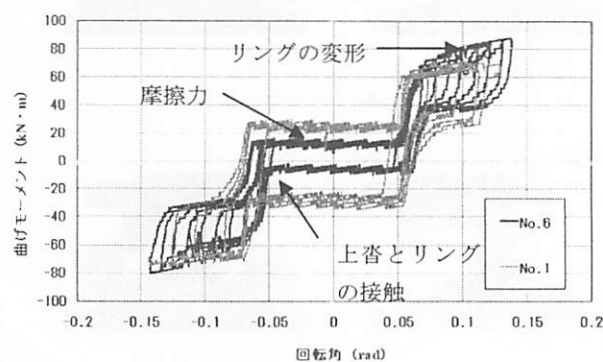


図-8 No.6のM-θ関係（終局挙動）

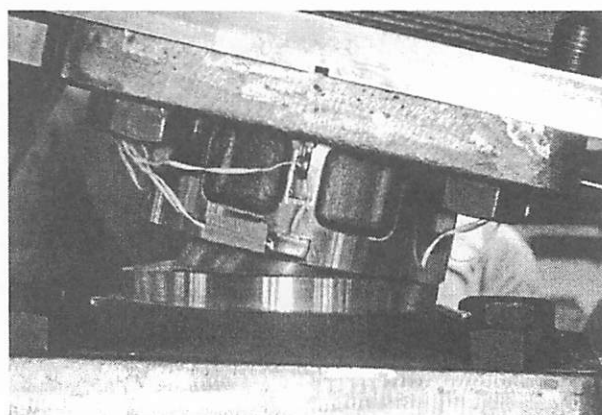


写真-3 No.1上沓逸脱状況

材料の引張試験の結果から降伏ひずみは 1540μ であったため、接触箇所はすぐに降伏したことがわかった。この傾向は、No.4についても同様であった。

No.2については、上下沓の接触後曲げモーメントが約 $60\text{kN}\cdot\text{m}$ に達すると剛性が変化し、緩やかに曲げモーメントが増加した(図-6)。最終的には約 $90\text{kN}\cdot\text{m}$ まで増加することが確認できた。ひずみの値に着目すると、上下沓接触箇所直下の下沓のひずみについては、No.1と同様に接触後直ぐに 1800μ 程度の値を示した。このとき、アンカーボルトにはひずみが発生していなかった。接触後、回転角が進むとアンカーボルトにもひずみが発生し、曲げモーメントが約 $60\text{kN}\cdot\text{m}$ に達する回転角 0.07rad のとき 50μ 、曲げモーメントが約 $90\text{kN}\cdot\text{m}$ に達する 0.12rad のとき 1500μ 程度の値を示した。写真-4に試験後のアンカーボルトの写真を示す。試験後のアンカーボルトを見ると、繰返し曲げモーメントが作用したことにより中央付近で折れ曲がっていることが確認できた。このことより、上下沓接触後はアンカーボルトで曲げモーメントに抵抗しているため荷重が増大していると考えられる。

No.3については、上下沓が接触する前に上沓とリングが接触し、曲げモーメントが急激に増加した(図-7)。最終的には、約 $400\text{kN}\cdot\text{m}$ まで増加することを確認したが、下沓が面板から持ち上がっていることが確認されたため、载荷を終了した。そのため、実際の耐力はこの結果より相当高いと考えられる。上沓とリングの接触箇所のひずみ値に着目すると、曲げモーメントが約 $350\text{kN}\cdot\text{m}$ に達する回転角 0.12rad のときに約 1800μ 、モーメントが約 $400\text{kN}\cdot\text{m}$ に達する回転角 0.14rad のときに約 2000μ であった。

これらの結果から、ピボット支承は、ピボットの沓自体の破損ではなく回転角の増加に伴う上沓の逸脱が、支承の終局挙動を考える上で支配的な要因となることがわかった。また、アンカーボルトの設置されているピボット支承は約1.5倍ほど、リングの設置されているものについては少なくとも約6.7倍ほど耐力の増加が見込めることがわかった。

補強リングを設置した試験体の結果は、以下のとおりであった。

No.5は、回転角の進展とともに補強リングも追従して回転してしまい、期待していた効果が得られなかった。これは、補強リングの高さが低かったため相対的に補強リングと支承との遊間が広く、上下沓が接触した以降の回転を補強リングで拘束出来なかったこと、補強リング自体が回転しようとする挙

表-3 材料引張試験結果

試験片 No.	材質	降伏強度 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び %	
規格値	SC450	≧225	≧450	≧19	
1	上沓	SC450	308	515	31.4
	下沓	SC450	300	510	31.4
2	上沓	SC450	316	577	30.1
	下沓	SC450	348	516	29.7
3	上沓	SC450	316	577	30.1
	下沓	SC450	326	559	28.7
	リング	SC450	326	559	28.7
4	上沓	SC450	308	515	31.4
	下沓	SC450	326	559	28.7
5	上沓	SC450	308	515	31.4
	下沓	SC450	311	516	31.3
6	上沓	SC450	308	515	31.4
	下沓	SC450	300	510	31.4

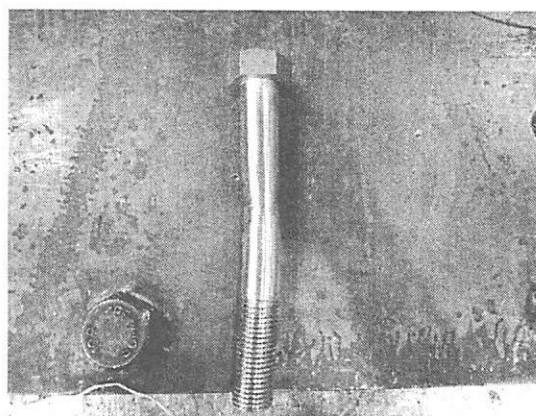


写真-4 試験後のアンカーボルト

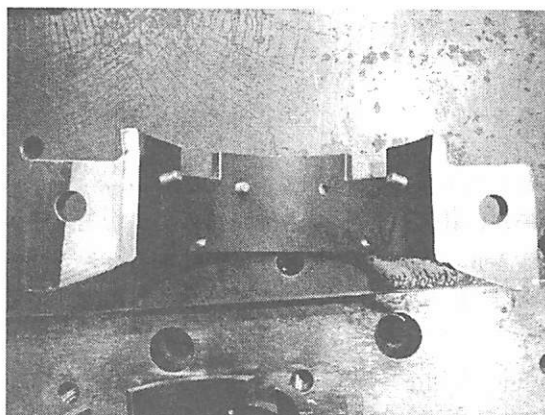


写真-5 試験後の補強リングII

動に抵抗できる形状でなかったことが原因と考えられる。したがって、以下の検討では整理の対象外とした。

No.6は、No.2と同様の傾向を示し、最終的には約 $85\text{kN}\cdot\text{m}$ まで曲げモーメントが増加した(図-8)。

No.1と比較すると約1.4倍ほど耐力の増加が見込まれ、回転角の増加に伴う沓の逸脱を防止するという意味では、既往の浮上り防止装置として設置されてきたアンカーボルトと同程度の効果があることを確認した。上沓と補強リングの接触箇所のひずみ値に着目すると、曲げモーメントが約60kN・mに達する回転角0.07radのとき2000 μ 、曲げモーメントが約85kN・mに達する回転角0.12radのとき7000 μ 程度の値を示した。写真-5に試験後の補強リングの写真を示す。試験後の補強リングを見ると、繰返し曲げモーメントが作用したことにより上沓との接触箇所が外側に变形し、全体としては「ハの字型」に外側に広がっていること、取付ボルトが上沓変位方向に折れ曲がっていることが確認できた。このことより、補強リングの变形性能と取付ボルトのせん断耐力で回転変位に抵抗していることが分かった。

4. 復元力モデルの検討

ピボット支承の地震時の解析に用いる復元力モデルを、簡易に設定することを試みる。復元力モデルは、試験結果から図-9に示すように回転角の範囲毎にモデル化できると考えられる。以下に骨格曲線の設定の考え方を示す。

(1) 復元力モデル① ($0 < \theta \leq \theta_1$)

回転角の範囲は、載荷スタートから上沓が滑り始めるまでとする。実際の変位量は微小であるため、ここでは上沓が0.01rad 回転したときを滑り始めと考え、鉛直荷重をパラメータとした初期剛性 K_0 を設定した。実験値から剛性を求めると、いずれの試験体も鉛直荷重の2倍程度の値であった。

(2) 復元力モデル② ($\theta_1 < \theta \leq \theta_2$)

回転角の範囲は、上沓が滑り始めてから上下沓が接触するまでとする。上下沓が接触するときの回転角 θ_2 は、図-10のように求めることとした。この範囲の曲げモーメントは、摩擦力から求めることとし、(式2)で表わせるものとした。

$$M_1 = \mu N' L \quad (\text{式2})$$

ここで、 M_1 ：曲げモーメント (kN・m)

μ ：摩擦係数 0.07

N' ：鉛直荷重

L ：ピボット支承の回転中心から水平荷重載荷位置までの距離

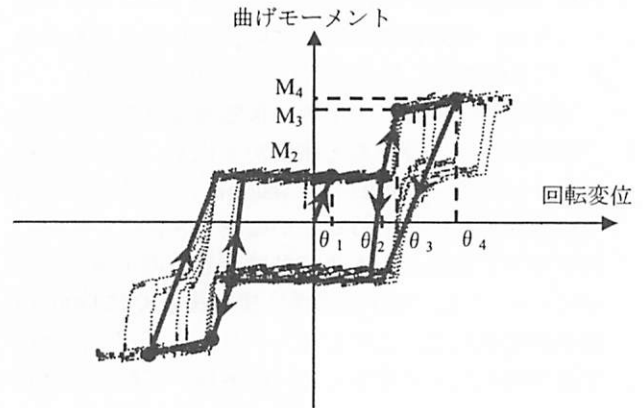


図-9 ピボット支承のモデル化

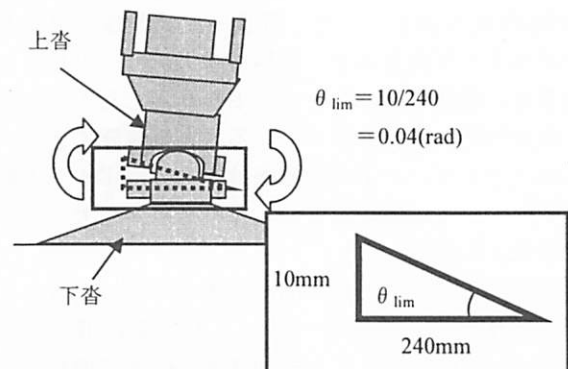


図-10 上下沓が接触するときの回転角

(3) 復元力モデル③ ($\theta_2 < \theta \leq \theta_3$)

回転角の範囲は、上下沓が接触してからM- θ 関係の折れ点までとする。M- θ 関係の折れ点の回転角 θ_3 は、標準タイプであるNo.1の試験結果より0.05radとした。この範囲の剛性を第三剛性 K_3 とすると、第三剛性は、試験結果よりいずれの試験体も初期剛性の5倍程度の値となった。

(4) 復元力モデル④ ($\theta_3 < \theta \leq \theta_4$)

回転角の範囲は、M- θ 関係の折れ点から支承の終局状態までとする。ここでは、沓自体は破損しなかったことから、回転角が進展し下沓の凸部分の高さの半分が露わになったときに「上沓が下沓から逸脱しそうになる＝支承の終局状態」と定義することとした。この範囲の剛性を第四剛性 K_4 とする。第四剛性は構造の違いで差異が見られた。補強部材が無いタイプ (No.1:標準タイプ) は、試験結果より初期剛性の0.05倍程度の値となった。アンカーボルトが設置されているタイプ (No.2) は、初期剛性の0.43倍程度の値となった。補強リングをあと施工にて設置したタイプ (No.6) は、試験結果より初期剛

性の0.35倍程度となった。

No.1のM- θ 関係と上記の復元力モデルの算定結果を図-11に、No.2を図-12に、No.6を図-13にそれぞれ示す。図中の復元力モデルは、骨格線を示している。また、表-4に骨格曲線の算定結果を示す。

これらの図をみると、上下脊が接触したときの回転角(0.04rad)が試験結果と0.01~0.02rad程度の差が生じているが、これは、モデルの回転角は図-15のように上下脊の遊間と下脊のサイズから概算した

のに対し、実際の試験体では上下脊接触箇所の上脊側に面取りが行われていること、治具や試験機のわずかな遊び等が原因と考えられる。また、No.1に

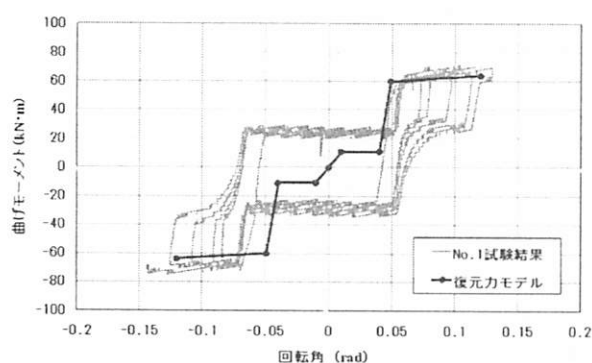


図-11 No.1のM- θ 関係(終局挙動)

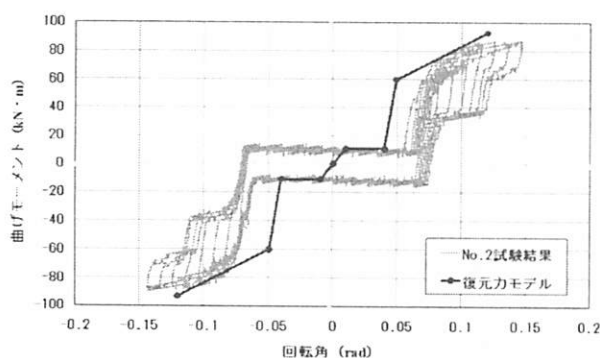


図-12 No.2のM- θ 関係(終局挙動)

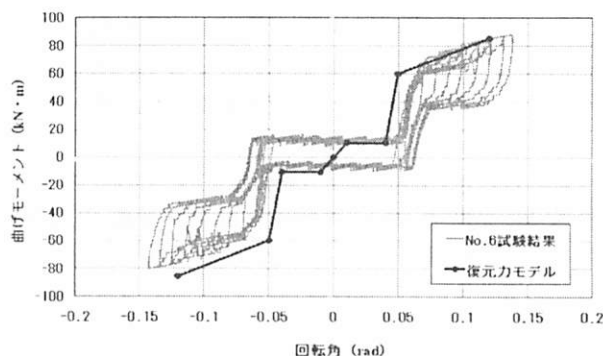


図-13 No.6のM- θ 関係(終局挙動)

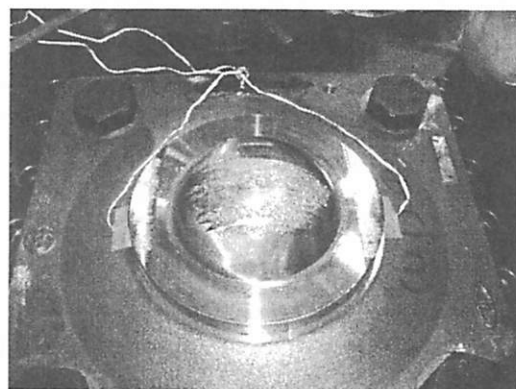


写真-6 試験後(No.1)



写真-7 試験後(No.6)

表-4 骨格線の検討

	載荷試験結果			モデル		
	No.1	No.2	No.6	No.1	No.2	No.6
曲げモーメント2 M_2 (kN·m)	62.2	60.5	60.7	60.0	60.0	60.0
曲げモーメント3 M_3 (kN·m)	71.6	86.7	81.3	63.5	90.1	84.5
変化点回転角3 θ_3 (rad)	0.05	0.07	0.07	0.05	0.05	0.05
変化点回転角4 θ_4 (rad)	0.13	0.13	0.12	0.12	0.12	0.12
初期剛性 K_0 (kN·m/rad)	1024	998	961	1000	1000	1000
第三剛性 K_3 (kN·m/rad)	4094	4007	5938	5000	5000	5000
第四剛性 K_4 (kN·m/rad)	59	498	368	50	430	350

※剛性は、鉛直荷重500kNのときの値である。

については、復元力モデル②の範囲において、曲げモーメントの値に差がみられた。これは、No.1が他の試験体に比べて、常時挙動における交番回数が多かったため、終局挙動をみる交番載荷試験の際に表面に凹凸が生じたことが原因であると考えられる。このことは、No.6の結果と比較することで確認できる。写真-6に試験後のNo.1試験体写真を、写真-7に試験後のNo.6試験体写真を示す。No.6は、No.1と上下沓は同じ構造や寸法であるため、復元力モデル②の範囲の挙動は、No.1と同じ結果となるはずであるが、No.6の実験値はNo.1の実験値より小さく、骨格曲線と実験値と概ね一致していることが確認できる。

図-11～図-13より、上記のことを考慮すると、復元力モデルの骨格曲線は概ね試験結果を表現できていると考えられる。限られた試験結果による簡易な設定であるため、その適用については検討が必要であるが、設定した復元力モデルは、概ね妥当であると考えられる。

5. まとめ

鋼ポスト形式の鋼橋脚とピボット支承を有する鉄道橋について、ピボット支承に着目し、実物大の試験体を作成し載荷試験を行った。また、試験結果より地震時の解析に用いられるピボット支承の復元力モデルについて簡易な設定を試みた。

本研究により得られた知見を以下に示す。

- 1) ピボット支承は、ピボットの沓自体の破損ではなく回転角の増加に伴う上沓の逸脱が、支承の終局挙動を考える上で支配的な要因となる。
- 2) 浮上り防止装置の設置されていないピボット支承に比べ、アンカーボルトの設置されているピボット支承は約1.5倍、リングの設置されているものについては少なくとも約6.7倍の耐力を有している。
- 3) 本論文で示した復元力モデルの骨格曲線は、限られた試験結果による簡易的な設定であるため、その適用については検討が必要だが、今回の試験体と同タイプのピボット支承の場合には、評価が可能であると考えられる。
- 4) 標準タイプのピボット支承に、あと施工にて設置できる補強リングを考案した。この補強リングは、回転変位に伴う沓の逸脱を防止するという意味では、既往の浮上り防止装置として設置されてきたアンカーボルトと同程度の耐力や回転変形の向上が期待できる。

今後は、実橋梁から撤去したピボット支承を用い

て同様の試験を行い、得られた復元力モデルの妥当性を検証する予定である。さらに、得られた復元力モデルを用いて全体構造解析を行い、ポスト形式の鋼橋脚とピボット支承を有する既設構造物の耐震評価法を検討する予定である。

謝辞：本研究を行うにあたり、試験体作成および載荷試験においてご協力頂いた株式会社川金コアテックの関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) (財)鉄道総合技術研究所：鉄道総研報告 兵庫県南部地震鉄道被害調査報告書，1996.4.
- 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），1999.10.
- 3) 安原真人，市川篤司，三木千壽：既設鉄道鋼製ヒンジラーメン橋脚の簡易な耐震評価手法，土木学会論文集 No.794，1-72，2005.7.
- 4) 杉館政雄，市川篤司，宮本裕，酒井和男，大垣加津雄：門型ラーメン橋脚を有する鋼鉄道橋の地震被害解析と対策，鋼構造年次論文報告集（第6巻），1998.11.
- 5) 黒田智也，池田学，杉館政雄，齋藤聡，工藤伸司，高瀬誠司，土屋尚登：ポスト形式鋼製橋脚を有する鉄道橋の分布状況と耐震評価，第60回土木学会年次学術講演会，2008.9.
- 6) 池田学，黒田智也，杉館政雄，齋藤聡，工藤伸司，高瀬誠司，土屋尚登：ポスト形式鋼製橋脚を有する鉄道橋の大規模地震時の耐震性評価に関する一考察，第60回土木学会年次学術講演会，2008.9.
- 7) 黒田智也，池田学，杉館政雄，齋藤聡，工藤伸司：ポスト形式を有する鋼鉄道橋の地震時挙動に関する基礎的検討，構造工学論文集Vol.55A，2009.3.
- 8) クレス出版：鉄道技術発達史Ⅲ第2編施設（2）日本国有鉄道編，1990.5.
- 9) 日本道路協会：道路橋支承便覧，2004.4.