

I-36

落橋防止装置の剛性が桁間相対変位に与える影響

北海道大学大学院工学研究科 F 会員 林川 俊郎
 北海道大学工学部 O 学生員 村井 健二
 北海道大学大学院工学研究科 学生員 佐野 雅章
 (株) 開 発 工 営 社 正 員 山下 敏夫

1. まえがき

1995 年 1 月の兵庫県南部地震では、種々の橋梁構造物が甚大な被害を受けた。¹⁾ 其中で、高架橋では鋼製橋脚の局部座屈による損傷ばかりでなく、高架橋を構成している支承や落橋防止装置等の各構造要素の破損も見受けられた。これを契機として、高架橋の耐震設計に際しては、高架橋の各構造要素が必要な強度を満足するだけでなく、高架橋全体のシステムとしての挙動を考慮することの必要性が指摘され、この点に関した研究も盛んに行われている。²⁾ 震災後に改定された道路橋示方書では、免震支承の採用を推奨しており、橋脚に作用する地震力を軽減する対策の一つとして免震支承が多く用いられるようになってきている。さらに、兵庫県南部地震では、従来からよく用いられていたタイパタイプの落橋防止装置に損傷が多く見受けられたため、様々な種類の落橋防止装置が考案されている。

本研究では、鋼製橋脚を持つ 2 径間高架橋を対象とし、その動的非線形挙動を考える。上部構造の過度の動きを抑えるため桁間を連結する落橋防止装置に着目し、かつ、隣接高架橋の影響を考慮できる解析モデルにより弾塑性地震応答解析を行い、落橋防止装置の剛性が 2 径間高架橋の大地震時非線形挙動に与える影響について検討する。具体的には、上部構造における応答変位、支承部および落橋防止装置の水平力と水平変位の関係、橋脚基部の曲げモーメントと曲率の関係について考察を行う。

2. 解析モデル

本研究では、高架橋全体構造の動的非線形挙動を明らかにすることを目的とするため、上部構造、支承および橋脚の相互作用を考慮できる最も基本的な解析モデルとして 2 径間高架橋を対象とした。

2.1 上部構造・下部構造

本研究では、図-1 に示すような 2 径間高架橋を解析モデルとする。上部構造は支間長 40m、総重量 600tf の合成桁とした。解析に際してはこれを断面 2 次モーメントと総重量が等価な鋼断面に換算することとした。橋脚は鋼製橋脚を対象とし、断面幅を 2.2m、板厚を 0.05m の正方形箱形断面とした。また、橋脚高さは図-1 のように P1、P2、P3 すべて 20m とした。上部構造と橋脚断面諸元を図-2 に示す。なお、上部構造および橋脚をはり柱要素にモデル化し、上部構造は 1 スパン 40m を 8 要素に分割、橋脚は橋脚高さ 20m を 5 要素に分割した。桁や橋脚に用いる鋼材は応力-ひずみ関係がバイリニア型になるものとし、ヤング率を $2.1 \times 10^7 \text{tf/m}^2$ 、降伏応力を 2400tf/m^2 、ひずみ硬化を 1% とした。³⁾

2.2 支承

支承は、鋼製の可動支承と固定支承を対象とし、1 つの支承を水平、鉛直、回転の 3 方向のばね要素にモデル化した。鉛直および回転方向は線形ばねで、水平方向は非線形ばねにより可動支承および固定支承を模擬している。鉛直ばねは支承部の鉛直方向の剛な結合条件を表すために十分大きなばね定数 ($1.8 \times 10^8 \text{tf/m}$) を設定し、回転方向ばねにはヒンジの条件を満足するように小さなばね定数 ($10.0 \text{tf} \cdot \text{m/rad}$) を

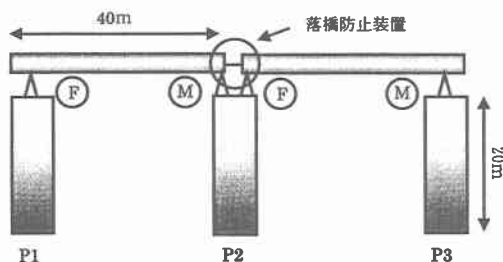


図-1 2 径間高架橋

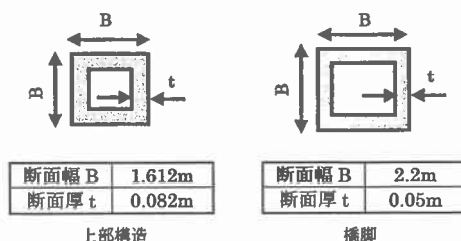


図-2 上部構造・橋脚断面

Effect of Spring Stiffness of Seismic Tie-Plates on Displacements between Beam Ends of Highway Viaducts
 by Toshiro HAYASHIKAWA, Kenji MURAI, Masaaki SANO and Toshio YAMASHITA

設定した。⁴⁾ 本研究では、落橋防止装置による上部構造の基本的な応答変位性状を調べるために、可動支承のストッパーを考慮していない。なお、P1 橋脚には固定支承、P3 橋脚には可動支承、そして P2 橋脚には固定・可動の双方を設置した。

2.3 落橋防止装置

落橋防止装置については、支承と同様に水平、鉛直、回転の 3 方向のばね要素を持たせ遊間の有無を線形・非線形ばねでモデル化することとした。落橋防止装置の概略を図-3 (a) に示す。また、落橋防止装置を表すばねの水平力と変位の関係は、図-3 (b) のように設定している。ここでは、パラメトリック解析として落橋防止装置の剛性を変え、モデル①～④とした。なお、落橋防止装置の断面諸元は表-1 に示す。落橋防止装置に遊間がない場合、可動支承が動くと直ちに落橋防止装置が作用することを考慮した。その時の落橋防止装置の剛性を K_1 で表す。なお、モデル①は落橋防止装置がない場合と同等と考えてよい。落橋防止装置に遊間 (4cm) がある場合については、可動支承が動き、桁が遊間 (4cm) をすべっている状態にあるとき、落橋防止装置の剛性には十分小さな値として K_1 (1.0tf/m) を用いた。この場合については、落橋防止装置は遊間をいっぱいすべり、変位が +4cm に達したとき引張に作用し、-4cm に達したとき圧縮に作用することを考慮した。その時の落橋防止装置にかかる水平力を F_1 、落橋防止装置の剛性を K_2 で表した。

3. 解析方法

本解析において採用した非線形動的応答解析方法は、鋼材の降伏および幾何学的非線形性の影響を考慮し、はり柱要素の有限要素法と Newmark β 法 ($\beta=0.25$) および修正 Newton-Raphson 法を併用した平面骨組構造のための弾塑性有限変位動的応答解析を用いた。弾塑性有限変位動的応答解析に際しては、桁や橋脚に用いる鋼材の応力-ひずみ関係をバイリニア型になるものとし、ヤング率を $2.1 \times 10^4 \text{tf/m}^2$ 、降伏応力を 2400tf/m^2 、塑性域のひずみ硬化を 1% としている。また、構造減衰に関しては質量比例型を仮定し、1 次の固有振動モードに対する減衰定数を 0.05 とした。弾塑性有限変位動的応答解析に用いた入力地震波は兵庫県南部地震発生時に観測された JR 鷹取駅観測波、さらにこの記録などから求められた II 種地盤標準波の N-S 成分を入力地震波として用い解析モデルの橋軸方向に作用させた。構造物の応答性状は入力する地震波に依存するため、用いる入力地震波によって構造物の応答性状は種々変化すると考えられる。しかし、1 つの地震波に対しての結果を比較することによって落橋防止装置の差異が高架橋全体系の動的応答性状に及ぼす影響の傾向を知ることはできると考えられるので、以下では II 種地盤標準波による結果について考察する。

4. 解析結果

4.1 固有振動解析結果

動的応答解析に先立ち、落橋防止装置を設置したモデルの固有振動解析を行った。可動支承においては、地震時においてすべりの状態が支配的であると考えてその剛性を 1.0tf/m とした。固定支承については、十分剛であると考えてその剛性を $1.8 \times 10^8 \text{tf/m}$ とした。落橋防止装置については、遊間がない場合は K_1 を設定した。遊間がある場合は

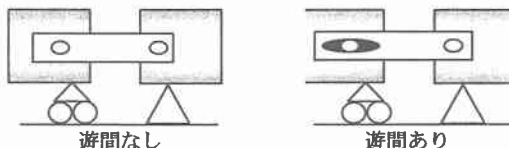


図-3(a) 落橋防止装置

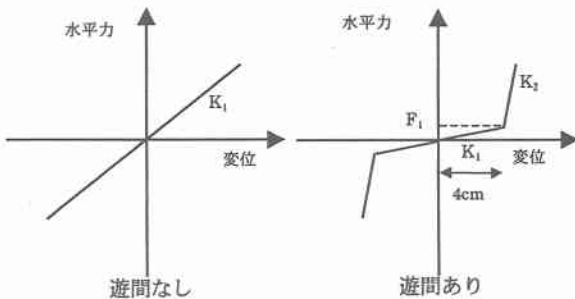


図-3(b) 落橋防止装置の解析モデル

表-1 落橋防止装置断面諸元

	線形モデル			
	①	②	③	④
K_1 (tf/m)	1.0	1.0×10^2	1.0×10^3	1.0×10^4
	非線形モデル (遊間 4cm)			
	①	②	③	④
K_1 (tf/m)	1.0	1.0	1.0	1.0
K_2 (tf/m)	1.0	1.0×10^2	1.0×10^3	1.0×10^4
F_1 (tf)	0.0412	0.0412	0.0412	0.0412

表-2 解析モデルの固有振動数・固有周期

	①	②	③	④
固有振動数 (Hz)	1.43	1.46	1.49	1.50
固有周期 (s)	0.697	0.686	0.669	0.667

落橋防止装置が作用した状態を考え K_2 を設定した。なお、その結果を表-2 に示す。落橋防止装置の剛性を大きくすると固有振動数は大きくなりそれに伴い固有周期は小さくなる。これは、落橋防止装置の剛性が大きくなるにつれ、モデル全体の剛性が高まるためと思われる。

4.2 動的応答解析結果（Ⅱ種地盤標準波）

4.2.1 上部構造の応答変位

図-4 は P2 橋脚上部の桁端の相対変位を示す。左側に落橋防止装置に遊間がない場合、右側に遊間がある場合を示す。図中の破線は落橋防止装置の桁端相対変位が +4cm で引張、-4cm で圧縮に作用することを意味する。図-5 は落橋防止装置に遊間がない場合の桁端部の応答変位を示す。モデル①～④いずれも上側が左上部構造、下側が右上部構造の応答変位を示す。図-6 は落橋防止装置に遊間がある場合の桁端部の応答変位を示す。モデル①～④いずれも上側が左上部構造、下側が右上部構造の応答変位を示す。ここで、P1 橋脚には固定支承を設置しているため P1 橋脚上端部と左上部構造の応答変位は等しい。同様に、P2 橋脚上端部と右上部構造の応答変位は等しい。落橋防止装置に遊間がない場合、図-4 より落橋防止装置の剛性を大きくすることにより、桁端相対変位は抑えられている。図-5 よりモデル①～④においてすべて左上部構造に残留変位を生じていることから、モデル①～④においてすべて P1 橋脚に残留変位を生じていることが分かる。また、モデル③・④においては P2 橋脚にも残留変位を生じている。落橋防止装置に遊間（4cm）がある場合、図-4 より落橋防止装置の剛性を大きくすることにより、桁が遊間をいっぱいにすべった後の ± 4 cm に達してからの相対変位は抑えられている。図-5 より落橋防止装置に遊間がない場合と同様に、モデル①～④においてすべて左上部構造に残留変位を生じていることから、モデル①～④においてすべて P1 橋脚に残留変位が生じているものと考えられる。また、落橋防止装置の剛性が大きいモデル④においては P2 橋脚にも残留変位を生じている。

4.2.2 落橋防止装置の水平力と変位の関係

図-7 は落橋防止装置の水平力と変位の関係を示す。ここで変位というのは相対変位のことを表す。落橋防止装置が、+側で引張、-側で圧縮に作用する。落橋防止装置に遊間がない場合、モデル①～④すべてにおいて落橋防止装置にかかる水平力はそれほど大きくはない。落橋防止装置に遊間がある場合、モデル①～③については落橋防止装置にかかる水平力はそれほど大きくはない。しかし、モデル④については引張側で落橋防止装置に大きな水平力がかかっている。これは、落橋防止装置の剛性が大きいために伸縮できずに、その分大きな水平力が発生するものと考えられる。

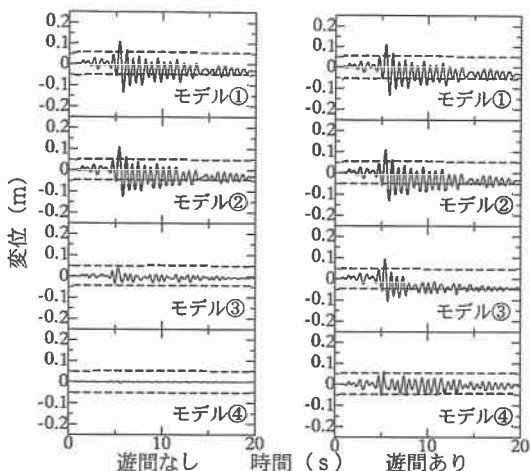


図-4 桁端相対変位

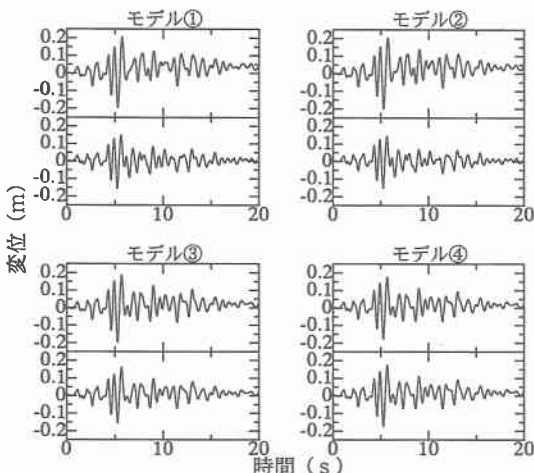


図-5 桁端変位（遊間なし）

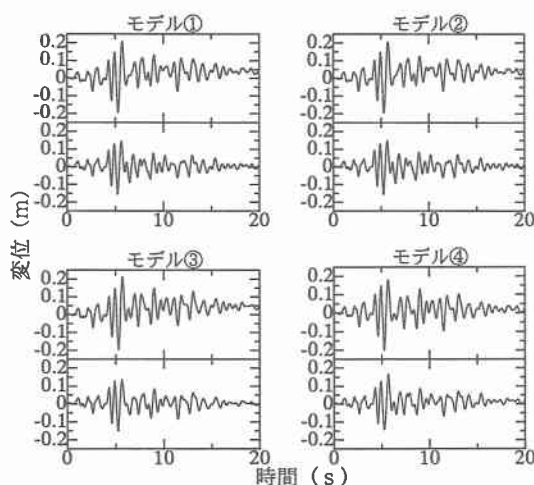


図-6 桁端変位（遊間あり）

4.2.3 橋脚下部の曲げモーメントと曲率の関係

図-8はP1橋脚下部の曲げモーメントと曲率の関係を示す。図-9はP2橋脚下部の曲げモーメントと曲率の関係を示す。図-8よりP1橋脚に関しては、落橋防止装置に遊間がない場合、ある場合ともにモデル①～③については大きく塑性化している。しかし、モデル④についてはモデル①～③に比べて履歴ループが小さくなっている。これは、落橋防止装置の剛性が大きくなるにつれ桁の連続化が起り、上部構造に作用する地震力をP1・P2両橋脚で負担しているためと考えられる。図-9よりP2橋脚に関しては、桁の連続化が起ると考えられるモデル④において、モデル①～③に比べて履歴ループが大きくなることがわかる。このことから桁の連続化が起っていることが確認される。

5. あとがき

本研究では、鋼製橋脚を持つ2径間高架橋を対象とし、落橋防止装置の剛性が高架橋全体の非線形挙動に与える影響についてパラメトリック解析を行った。落橋防止装置に遊間がない場合とある場合ともに、落橋防止装置の剛性を上げることにより、桁間相対変位は抑えることができる。落橋防止装置に発生する水平力に関しては落橋防止装置に遊間がない場合、大きな水平力は発生していない。しかし、落橋防止装置に遊間がある場合、落橋防止装置の剛性が大きいモデル④において大きな水平力が発生している。P1・P2両橋脚下部の曲げモーメントと曲率の関係を見ると、落橋防止装置の剛性が大きいモデル④において桁の連続化が起っていると考えられる。桁の連続化が起った場合、落橋防止装置に遊間がある場合よりもない場合の方が、上部構造の地震力をバランス良く2本の橋脚が負担し合っている。今後、落橋防止装置の遊間と剛性の兼ね合いを十分検討して適切に決める必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会鋼構造新技術小委員会: 鋼構造物の安全性の調査報告-阪神大震災における鋼構造物の被害報告と今後の耐震設計について、土木学会、1995.5
- 2) 中嶋章典・庄司泰啓・安波博道・小野寺理: 簡易モデルを用いた多径間高架橋システムの大地震時応答解析、鋼構造年次論文報告集、第5巻、pp.313-320、1997.11
- 3) 林川俊郎・椋平剛史・小幡卓司・佐藤浩一: 支承部の違いによる高架橋の大地震時挙動、土木学会北海道支部論文報告集、第53号(A)、pp.106-109、1997.2
- 4) 林川俊郎・佐野雅章・大嶽敦郎・中島章典: 橋脚長の異なる高架橋の大地震時非線形挙動、土木学会北海道支部論文報告集、第54号(A)、pp.156-161、1998.2

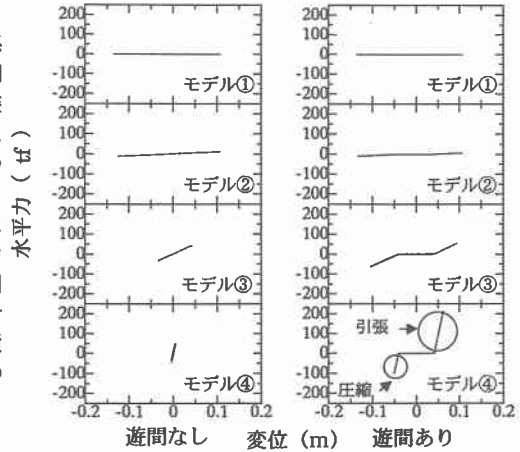


図-7 落橋防止装置の水平力と変位の関係

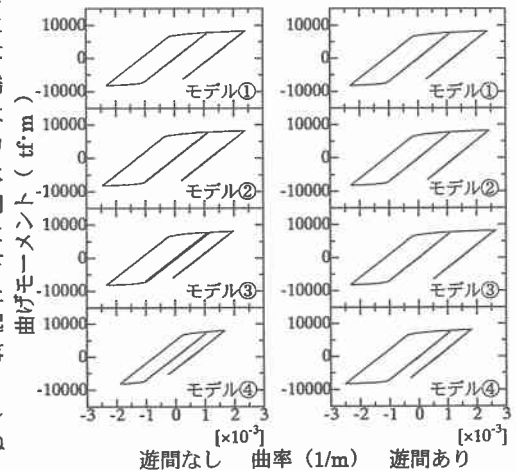


図-8 P1橋脚下部の曲げモーメントと曲率の関係

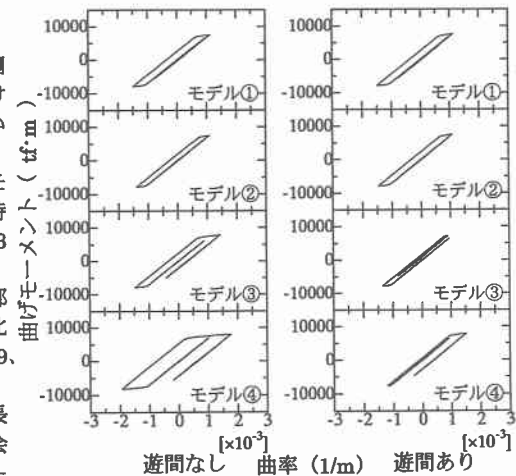


図-9 P2橋脚下部の曲げモーメントと曲率の関係