

ロッキング挙動を利用した免震・制震機構の橋梁への適用について

---上路式鋼アーチ橋を対象として---

後藤芳顯¹・奥村 徹²

¹フェロー会員 工博 名古屋工業大学大学院教授 社会工学専攻（〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町）

²正会員 修(工) 岐阜工業高等専門学校講師 環境都市工学科（〒501-0495 岐阜県本巣市上真桑2236-2）

1. はじめに

近年、アーチ橋の耐震性能を向上させる方法として、軸降伏型の座屈拘束ブレースなどの履歴型ダンパー¹⁾を用いる制震構造が検討されている。上記のような制震構造においては、通常のブレース部材に代え剛性の低い座屈拘束ブレースを用いることにより、ここに塑性変形を集中し、エネルギーを吸収させるとともに、水平方向慣性力による骨組構造の変形を曲げ変形からせん断変形支配型にすることで柱部材の軸圧縮力を低減させることができる。このように、支柱や橋脚に用いられる多層骨組構造に履歴型の座屈拘束ブレースを適用することは耐震性能向上と言った観点からは有効であるが、高所作業の伴う既設構造でのダンパーの設置、さらに、地震後に損傷を受けたダンパーの取り替えや骨組構造における残留変形の矯正などは必ずしも容易ではないと考えられる。以上のような問題点を解決するためにここでは新たな免震・制震機構の提案をおこなう。

骨組構造の耐震性を向上させるためには先に述べたように地震時における柱部材の軸圧縮力の増加を抑えることが重要である。アスペクト比 (h/b =骨組高さ/骨組幅) が大きい場合やせん断剛性が高い場合、通常の骨組構造では基部の浮き上がりを伴うロッキング挙動が拘束されるので端部の柱には引張り力が作用し、その反作用として他端の柱には圧縮力が作用する。このため、柱には死荷重による圧縮力を超える大きな軸圧縮力が作用することになる。従って、この引張り力を低減できれば軸圧縮力も低減できることになる。引張り力を低減する直接的な方法は浮き上がりを許容することである。

このような浮き上がり機構を高橋脚に取り入れた例は海外においては2,3見られ、ねじりダンパーを併用した South Rangitikei Bridge²⁾は著名である。しかしながら、わが国の橋梁分野では著者らが2層3径間ラーメン橋脚の耐震補強に浮き上がりを許容する構造を用いた例³⁾を除き、ほとんど扱われたことが無い。さらに、アーチ

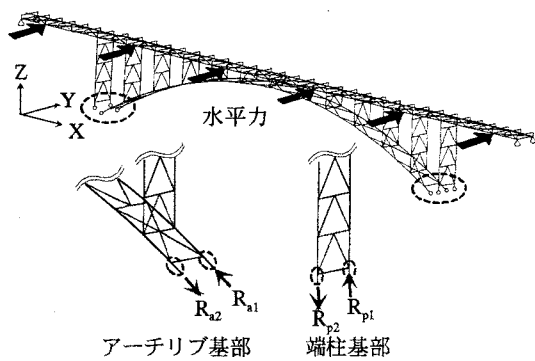
橋のアーチリブ基部への浮き上がり機構の導入に対する検討は著者の知る範囲では海外においても無いと考える。ここでは、すでに著者らが2層3径間ラーメン橋脚の耐震補強に用いた浮き上がりを許容した免震構造に、軸降伏型ダンパーを付加した免震・制震機構を提案する。そして、この有効性について橋軸直角方向の耐震補強が容易でない上路式アーチ橋を対象に、本機構を端柱やアーチリブ基部に設置することによる耐震性能の向上効果について検討する。なお、本免震・制震機構は基部に設置されるので施工時に高所作業が伴わないことや死荷重作用下でのダンパーの設置・交換が可能であるなどの特徴がある。また構造上、ダンパーの損傷による変形の矯正は容易である。

2. ロッキング挙動を利用した免震・制震機構

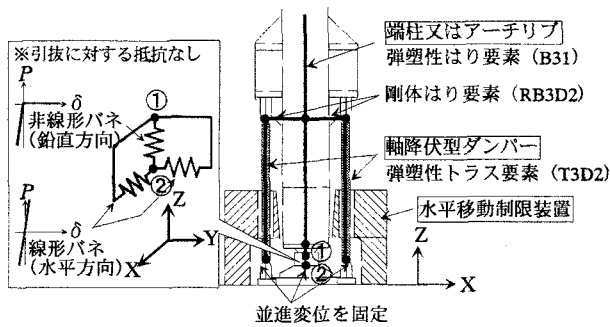
(1) 構造と設計

図-1 a)に示すアーチ橋の端柱やアーチリブのようにアスペクト比(高さ/幅)が大きく、ブレースによる補剛がなされたせん断剛性が高い骨組構造に、地震力等の水平力が作用した場合、片側の支承部が浮き上がろうとするロッキングが生ずる可能性がある。通常、このような浮き上がりを防ぐために、基部の支承部では引き抜きに抵抗する構造となっている。したがって、骨組頂部に作用する水平力による転倒モーメントとつりあうため、正と負の鉛直反力が、それぞれの支承部に発生する。その結果、水平力の増加に伴い柱基部の支承の一方に負反力が発生すると他方の柱基部には死荷重による圧縮力に加え、この負反力に釣り合う圧縮力が作用しトータルとして大きな圧縮軸力が発生し、この部分が損傷する。上路式鋼アーチ橋に対して橋軸直角方向に地震波を入力した際に、端柱やアーチリブ基部に生ずる損傷は、主にこのようなメカニズムによる。

そこで、ロッキングが生じる際に、柱基部やアーチリブ基部の浮き上がりを許容し免震機能を持たせるとと



a) アーチ橋の端柱およびアーチリブ基部に発生する負反力



b) 免震機構の概要とモデル化
図-1 提案する免震・制震機構の概要

もに、軸降伏型の履歴ダンパーを周辺に配置することで浮き上がり量を適切に調節しかつ制震機能を付加することにより、柱基部など構造物本体の損傷を低減することが可能であると考え、図-1 b) に示す免震・制震機構を提案する。この機構では、まず、従来の支承の引き抜きに対する抵抗性を無くし、柱基部が浮き上がった際に水平反力を受け持ち、杓からの脱落を防止するための水平移動制限装置を新たに設ける。さらに、支承の周囲には軸降伏型ダンパーを柱やアーチリブの軸線方向の押し引きに抵抗するように一端を柱やアーチリブ基部に他端を支承あるいはアンカーを介して基礎に固定する。これにより、柱基部の浮き上がりに対する抵抗を適度に与えるとともに、ダンパーの塑性化によるエネルギー吸収を図る。また、引張りにより塑性変形したダンパーの圧縮抵抗により柱基部の作用力が引張りから圧縮へ反転するとき柱基部が支承部に直接衝突することを防ぐ。なお、このダンパーは構造系の完成状態において設置することを前提とするので、死荷重下では無応力状態となる。また、ダンパーが受ける履歴特性としては座屈拘束ブレースのような両振りではなく、圧縮変形が小さい引張り側での片振りである。

本免震・制震機構はダンパーを取り外した状態でも死荷重に対しては機能を損なわないので、地震後のダンパー交換作業において、死荷重作用下での交換が可能である。さらに、ダンパーは柱基部に設置されているため、制震ブレースなどに較べ作業が容易であると考えられ

る。

ダンパーの設計は制震ブレースの設計²⁾と同様に少なくとも主荷重や従荷重に対しては損傷せず、レベル2地震動で塑性化させるという考えで設計する。また、ダンパーの引張り塑性化後の浮き上がり残留変位を発生させないためには、下に示す式(1)のように1つの柱基部に設置する各軸降伏型ダンパーの降伏軸力の合計が柱基部の死荷重による初期軸力 N_0 よりも小さくなればよい。このような条件を満足すると死荷重によるダンパーの再降伏でもとの状態へ戻る構造となる。なお、この条件では繰り返し载荷を受けるダンパーの弾塑性挙動をバイリニア移動硬化則で表せるものと仮定している。

$$\sum_{i=1}^n \sigma_{yd}^i A_d^i < N_0 \quad (1)$$

ここに、 σ_{yd}^i 、 A_d^i はダンパーの降伏応力と断面積、 n は支承1基あたりに設置するダンパーの本数である。ただし、主荷重や従荷重に対して損傷しないように設計した場合には、式(1)を満足させることは不可能な場合もあるが、式(1)が満足されない場合もダンパーを取り外すことで比較的容易に元の位置に戻すことができると考える。

実際のダンパーの設計としては、まず、1次設計において、ダンパー長と鋼種を設定して道路橋示方書⁷⁾に基づき主荷重や従荷重下で断面積を決定する。ダンパーの断面積は可能な限り小さくなるように、ダンパーの配置などを工夫し、式(1)を満たすように設計することが望ましい。つぎに、2次設計では、このダンパーを導入した構造系にレベル2地震動を入力して、制震・免震性能を検証し、不十分な場合はダンパー長や鋼種を変更して再設計する手続きをとる。2次設計における軸降伏型ダンパーの許容値としては、安全側の実現可能なものとして、文献2)の座屈拘束ブレースと同様に、最大ひずみを $20 \varepsilon_y$ 、累積塑性ひずみを $140 \varepsilon_y$ と設定する。

(2) 数値解析における免震・制震機構のモデル化

提案する免震・制震機構を適用した骨組構造の性能を非線形解析ソフトABAQUS[®]を用いた数値計算により検討するために棒要素とバネ要素を用いて図-1 b) に示すようにモデル化する。浮き上がりを表現するため柱基部が負反力に対して抵抗せずに変位するように節点①と節点②の柱の軸線方向(Z軸方向)のバネ要素は引張側のバネ定数が0となるバイリニアの非線形弾性の構成則を設定する。水平移動制限装置による水平抵抗については線形弾性バネ要素で表す。バネの弾性定数についてはいずれも変形が十分小さくなるように大きな値を設定する。軸降伏ダンパーについては弾塑性トラス要素(T3D2)でモデル化する。

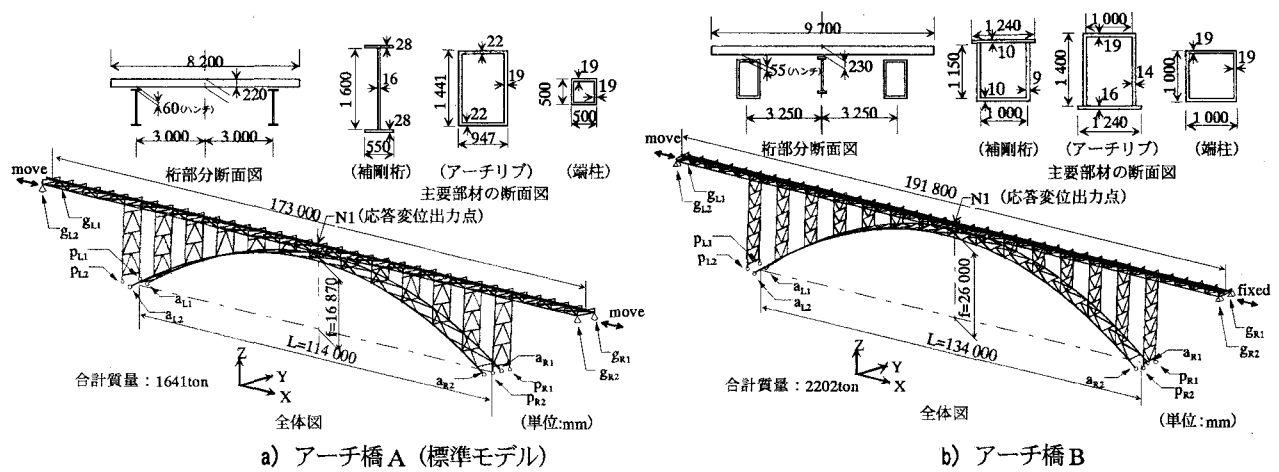


図-2 アーチ橋モデル

表-1 検討モデル

モデル名	端柱基部		アーチリブ基部		死荷重下の面外弾性1次固有周期(sec)	
	浮き上がり	ダンパー	浮き上がり	ダンパー	アーチ橋A	アーチ橋B
FIX (基本モデル)	×	×	×	×	1.035	1.387
FREE+BSD2 (ロッキング型免震・制震構造モデル2)	○	○	○	○	1.020	1.346
FREE+BSD1 (ロッキング型免震・制震構造モデル1)	○	○	×	×	1.030	1.385
FREE (ロッキング型免震構造モデル)	○	×	○	×	1.035	1.387

3. 上路式鋼アーチ橋への本免震・制震構造の適用

(1) 対象とするアーチ橋の基本モデル

ロッキング型免震・制震機構を適用する上路式鋼アーチ橋の基本モデルとして図-2に示す既設2橋A, Bを選定する。アーチ橋Aは平成8年度版の道路橋示方書により設計されたアーチ橋をもとにモデル化したもので、文献9)においてベンチマーク用の標準モデルとして用いられている。他方、アーチ橋Bについては兵庫県南部地震以前の昭和55年度版の道路橋示方書に基づき震度法による設計が行われており、各部材の耐力バランスなどアーチ橋Aと異なる可能性が考えられる。

アーチ橋のモデル化については、文献9)の方法に従っており、RC床版も考慮している。このとき、鋼部材とダンパーについてはバイリニア移動硬化則(鋼部材： $E=206\text{GPa}$, $E_2=E/100$ (2次勾配)、履歴型ダンパー： $E=206\text{GPa}$, $E_2=E/60$ (2次勾配))を用い²⁾、RC床版には道路橋示方書¹⁰⁾で与えられている圧縮強度 $\sigma_c=0.85\sigma_{ck}$ (設計基準強度： $\sigma_{ck}=30\text{MPa}$)の非線形応力・ひずみ曲線を載荷曲線とする非弾性のコンクリート構成則を用いる。

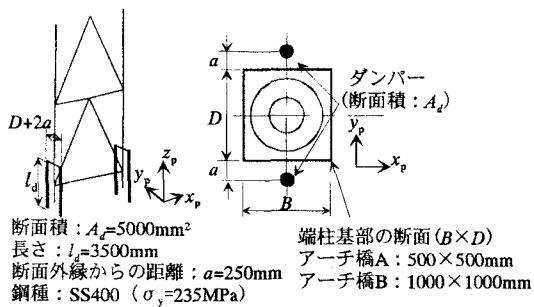
実構造の支承条件は、端柱基部などに橋軸直角軸(Y軸)まわりの回転のみが自由なピン支承が用いられている部分もあるが、ここでは、提案する免震・制震構造との比較のため、各アーチ橋の基本モデルでは端柱とアーチリブの支承すべてをピボット支承に置換する。これらのピン支承からピボット支承への変更による影響については、弾性固有値解析、ならびにレベル2地震動を橋

軸直角方向へ入力した弾塑性時刻歴応答解析を行ったが、実構造と較べて、終局挙動特性に大きな差がないことを確認している。

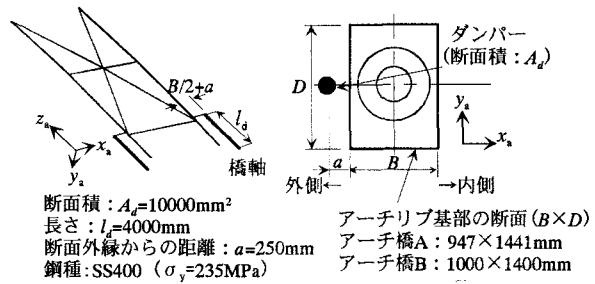
(2) アーチ橋の耐震性能向上モデル

アーチ橋A, Bの基本モデルに対して、端柱とアーチリブ基部の支承構造を変化させることにより耐震性能向上を目指した3つのモデルを基本モデルとともに表-1に示す。端柱およびアーチリブの基部すべてに浮き上がりを拘束するピボット支承を用いる基本モデルをFIXとする。これに対し、基部の浮き上がりに対する抵抗を全て無くしたロッキング型免震構造モデルをFREEとする。FREE+BSD2は2.で述べた方法により設計したダンパーをFREEの端柱ならびにアーチリブ基部に設置したもので、本研究において提案するロッキング型免震・制震構造モデルである。FREE+BSD1は端柱基部にのみ浮き上がりを許容し、FREE+BSD2と同じダンパーを設置したモデルであり、アーチリブの基部については基本モデルと同一である。このモデルを設定する理由としては、ここで提案する免震・制震機構をアーチリブ基部へ設置することの有効性をFREE+BSD2と比較することにより検討するためである。

FREE+BSD2およびFREE+BSD1に設置する端柱基部のダンパーは、橋軸直角方向のレベル1地震動に対して柱基部の面外方向の曲げに寄与せず、基部の浮き上がりに対してのみ抵抗するように図-3 a)に示す位置に設置する。一方、FREE+BSD2に設置するアーチリブ基部のダンパーに関しては端柱と同様な配置にすると、活荷



a) 端柱基部に設置するダンパー



b) アーチリブ基部に設置するダンパー

図-3 ダンパーの配置と諸元

重が支配荷重となり、ダンパー1本あたりの必要断面積が大きく設計される。これにより、本免震・制震構造の効果が低減することが考えられるため、図-3 b)に示すようになるべくアーチリブの面内曲げ (x_a 軸回り) に抵抗しないように基部断面の x_a 方向の主軸上でアーチリブの外側に設置する。

基本モデルと各耐震性能向上モデルの死荷重下の弾性固有周期について表-1に示しているが、ダンパーの設置による影響は小さい。

(3) レベル2地震動に対する時刻歴応答解析結果

橋軸直角方向のレベル2地震動に対して複合非線形時刻歴応答解析を行い、提案する免震・制震構造によるアーチ橋A、Bの耐震性能向上効果について基本モデルと比較することにより検討する。レベル2の入力地震波として、神戸海洋気象台調整波・EW成分(JMA-EW-M)およびJR鷹取駅調整波・EW成分(JRT-EW-M)を用いる。減衰は質量比例型(減衰定数: $h=0.03$)を用い、各アーチ橋モデルの橋軸直角方向の最低次モードに対して与える。

解析結果として、まず、アーチ橋AおよびBに対してJMA-EW-MおよびJRT-EW-Mを橋軸直角方向に入力した場合の応答値を表-2、3にまとめる。表中のアーチ橋モデル内での各構造の最大応答ひずみの値は断面を構成する板要素の板厚と板幅方向に関して中央における出力値を用いる。アーチ橋本体の履歴吸収エネルギーはダンパーを除いた鋼部材とコンクリート床版の吸収エネルギーの総和を表す。このため、鋼部材の損傷がない場合もコンクリート床版の非弾性挙動のため履歴吸収エネルギーはゼロとならない。基部反力の垂直方向成分は支承の支持面に対して垂直な方向の反力成分を表しており、アーチリブ支承部については支承面が傾斜しているため、反力の垂直成分は基部におけるアーチリブ軸線方向に対応している。ロッキング型免震・制震機構を導入したFREE+BSD1、FREE+BSD2では、ピボット支承部のみ反力に加え、ダンパー基部の反力も含めた全反力について括弧書きで表示している。アーチリブ基部の浮き上がり変位は垂直反力成分と同様に傾斜した支

承面に垂直方向の変位成分を表す。

つぎに、アーチ橋A、Bに対して設定した各検討モデルにJRTを入力した場合の損傷状態を図-4、5に示す。ここで損傷部材は部材中の応答ひずみの最大値が降伏ひずみをこえたものと定義する。

(4) アーチ橋A、Bの基本モデルの損傷特性

アーチ橋AおよびBの基本モデルであるFIXについてレベル2地震動下の損傷状態を比較する。

アーチ橋Aでは、図-4および表-2からわかるように、アーチ橋Bと較べて対傾構や下横構などのブレース部材については損傷範囲、損傷度も小さいが、端柱基部やアーチリブ基部などの柱部材基部の損傷度は大きくなる。特に、端柱基部においては、JRTを入力した場合に $\varepsilon = -29.9 \varepsilon_y$ の圧縮ひずみが発生している。これは水平力に対して、対傾構の降伏耐力が高いため、端柱構造において曲げ変形が支配的となり、柱基部が大きく損傷したものと考えられる。アーチリブの損傷度は端柱の損傷に較べ、相対的に小さい。

これに対し、アーチ橋Bでは、図-5および表-3より、対傾構や下横構などのブレース部材や補剛桁が広い範囲で損傷し、損傷度も大きい。端柱基部は無損傷である。さらに、アーチリブもJMAでは無損傷であり、JRTでは損傷はしているものの $\varepsilon = -1.7 \varepsilon_y$ にとどまっている。アーチリブ基部の反力に関しても、アーチ橋Aと較べ、アーチ橋Bの最大応答値は小さくなっており、垂直方向の負反力はアーチ橋Aの半分以下となっている。このようにアーチ橋Aと終局挙動特性が異なる理由として、次のように考えられる。アーチ橋Bでは震度法で設計されているため、部材全体の降伏耐力が低く、しかも対傾構や下横構の降伏耐力が相対的に低いので、レベル2地震動ではこれらのブレース部材が先行して降伏する。そして、ブレース部材の降伏により端柱やアーチのせん断剛性が低下し、水平方向慣性力による端柱やアーチの変形が曲げ変形からせん断変形支配型となる。この結果、端柱基部やアーチリブ基部の軸圧縮力が低減し、大きな損傷が免れる。

表-2 レベル2地震動に対する各検討モデルの応答値の比較 (アーチ橋A)

入力地震動			JMA-EW-M				JRT-EW-M					
モデル名			FIX	FREE+BSD1	FREE+BSD2	FREE	FIX	FREE+BSD1	FREE+BSD2	FREE		
アーチ橋本体 (ダンパー除く)	桁中央部の最大水平応答変位(m) (図-2のN1点)		max	0.381	0.380	0.344	0.503	0.530	0.595	0.583	0.931	
			min	-0.401	-0.336	-0.303	-0.459	-0.484	-0.697	-0.703	-0.869	
	各構部における最大応答ひずみ ($\epsilon_{max}/\epsilon_y$)	アーチリブ	-1.0	弾性	弾性	弾性	弾性	-2.7	-7.6	弾性	弾性	
		アーチ下横構	-1.4	-1.2	弾性	弾性	弾性	-2.8	-3.8	弾性	弾性	
		端柱	-1.44	弾性	弾性	弾性	弾性	-2.99	弾性	弾性	弾性	
		端柱対横構	弾性	弾性	弾性	弾性	弾性	弾性	弾性	弾性	弾性	
補剛桁	弾性	弾性	弾性	弾性	弾性	弾性	弾性	弾性	1.0			
アーチ橋本体の履歴吸収エネルギー (MN・m)			0.839	0.039	0.010	0.040	9.761	4.117	0.047	0.112		
基部	最大反力 (MN)	垂直方向 成分 ^{*)}	端柱	max(圧縮)	10.280	3.824 [5.868]	4.341 [5.574]	4.278	11.320	5.624 [7.234]	4.570 [6.511]	4.685
			端柱	min(引張)	-8.069	0.000 [-2.988]	0.000 [-2.829]	0.000	-9.066	0.000 [-3.523]	0.000 [-3.650]	0.000
		アーチリブ	max(圧縮)	25.250	24.140	16.390 [18.650]	15.720	28.970	31.030	19.370 [21.720]	25.560	
		アーチリブ	min(引張)	-15.020	-14.720	0.000 [-2.670]	0.000	-18.660	-21.450	0.000 [-3.568]	0.000	
	橋軸直角 水平成分	端柱	max	1.831	0.800	0.642	0.412	2.373	1.118	0.928	0.572	
		端柱	min	-1.849	-0.680	-0.625	-0.404	-2.291	-0.957	-0.926	-0.613	
	アーチリブ	max	1.969	1.883	1.011	1.080	2.754	3.814	1.339	1.391		
	アーチリブ	min	-1.866	-1.644	-1.008	-1.106	-3.019	-3.770	-1.169	-1.262		
	支承部の最大浮き上がり変位(m)			端柱	-	0.040	0.031	0.075	-	0.072	0.079	0.130
				アーチリブ	-	-	0.026	0.051	-	-	0.074	0.133
ダンパー	最大応答ひずみ (%)		端柱	-	1.14 ($\leq 100 \epsilon_y$)	0.89 ($\leq 78 \epsilon_y$)	-	-	2.07 ($\leq 18.1 \epsilon_y$)	2.24 ($\leq 19.6 \epsilon_y$)	-	
			アーチリブ	-	-	0.75 ($\leq 6.6 \epsilon_y$)	-	-	-	2.08 ($\leq 18.2 \epsilon_y$)	-	
	累積塑性ひずみ $\sum_{i=1}^n \Delta \epsilon_{pi} $ (%)		端柱	-	4.46 ($\leq 390 \epsilon_y$)	2.33 ($\leq 20.4 \epsilon_y$)	-	-	13.57 ($\leq 118.8 \epsilon_y$)	14.82 ($\leq 129.8 \epsilon_y$)	-	
			アーチリブ	-	-	2.11 ($\leq 18.5 \epsilon_y$)	-	-	-	13.72 ($\leq 120.2 \epsilon_y$)	-	

*) FREE+BSD1, FREE+BSD2における [] 内の値はピボット支承部とダンパーの反力の合計値をあらわす。

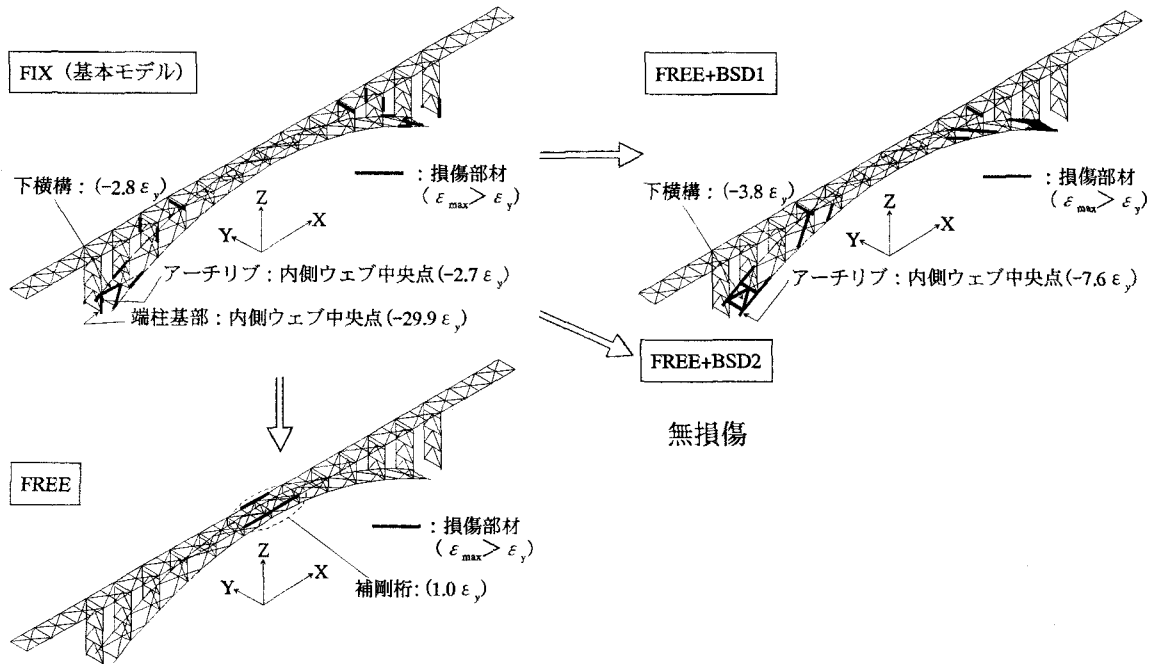


図-4 レベル2地震動に対するアーチ橋Aの損傷状態 (JRT-EW-M)

(5) ロッキング型免震・制震構造の耐震性能

a) 損傷

アーチ橋本体に対する損傷の大小の概略はダンパーを除いた表-2, 3 に示すアーチ橋本体の履歴吸収エネルギーの大小を見ることによって把握することができる。

履歴吸収エネルギーの最も小さいのはここで提案する端柱基部とアーチリブ基部に免震・制震機構を設置したロッキング型免震・制震構造 FREE+BSD2 であり、次に若干大きいのが端柱基部、アーチリブ基部の浮き上がり抵抗のないロッキング型免震構造 FREE である。いずれ

表-3 レベル2地震動に対する各検討モデルの応答値の比較 (アーチ橋B)

入力地震動			JMA-EW-M				JRT-EW-M					
モデル名			FIX	FREE+BSD1	FREE+BSD2	FREE	FIX	FREE+BSD1	FREE+BSD2	FREE		
アーチ橋本体 (ダンパー除く)	桁中央部の最大水平応答変位(m)	max	0.385	0.362	0.383	0.432	0.556	0.550	0.622	0.802		
		min	-0.365	-0.331	-0.393	-0.468	-0.670	-0.639	-0.724	-0.815		
	各構部における最大応答ひずみ (ϵ_{mm}/ϵ_y)	アーチリブ	弾性	弾性	弾性	弾性	-1.7	-1.7	弾性	弾性		
		アーチ下横構	-4.1	-4.2	-2.6	-3.5	-9.7	-9.3	-2.2	-1.9		
		端柱	弾性	弾性	弾性	弾性	弾性	弾性	弾性	弾性		
		端柱対傾構	2.2	弾性	弾性	弾性	4.5	弾性	弾性	弾性		
補剛桁	1.4	1.2	1.4	1.4	2.4	1.8	2.1	2.6				
アーチ橋本体の履歴吸収エネルギー(MN・m)			2.139	1.786	0.438	0.513	13.570	10.297	1.398	2.377		
基部	最大反力 (MN)	垂直方向成分 [※]	端柱	max(圧縮)	10.500	4.659 [6.745]	4.195 [6.234]	5.009	11.950	4.902 [6.859]	5.817 [8.086]	7.232
			min(引張)	-8.139	0.000 [-2.828]	0.000 [-2.844]	0.000	-9.288	0.000 [-3.233]	0.000 [-3.446]	0.000	
		アーチリブ	max(圧縮)	20.200	19.990	16.300 [18.630]	17.590	21.590	21.730	19.820 [22.130]	18.200	
			min(引張)	-7.253	-6.722	0.000 [-2.735]	0.000	-8.423	-9.664	0.000 [-3.444]	0.000	
	橋軸直角 水平成分	端柱	max	1.246	0.663	0.593	0.374	1.368	0.786	0.674	0.444	
			min	-1.081	-0.587	-0.574	-0.322	-1.366	-0.744	-0.563	-0.448	
		アーチリブ	max	1.197	1.190	1.219	1.073	1.671	1.649	1.239	0.837	
			min	-1.104	-1.121	-1.120	-0.933	-1.633	-1.663	-1.209	-0.907	
	支承部の最大浮き上がり変位(m)	端柱	-	0.031	0.032	0.053	-	0.054	0.067	0.090		
		アーチリブ	-	-	0.023	0.042	-	-	0.064	0.086		
ダンパー	最大応答ひずみ(%)	端柱	-	0.89 ($\approx 7.8 \epsilon_y$)	0.96 ($\approx 8.4 \epsilon_y$)	-	-	1.56 ($\approx 13.6 \epsilon_y$)	1.91 ($\approx 16.7 \epsilon_y$)	-		
		アーチリブ	-	-	0.73 ($\approx 6.4 \epsilon_y$)	-	-	-	1.88 ($\approx 16.5 \epsilon_y$)	-		
	累積塑性ひずみ $\sum_{i=1}^n \Delta \epsilon_{pi} $ (%)	端柱	-	3.60 ($\approx 31.6 \epsilon_y$)	4.18 ($\approx 36.6 \epsilon_y$)	-	-	12.35 ($\approx 108.2 \epsilon_y$)	12.80 ($\approx 112.1 \epsilon_y$)	-		
		アーチリブ	-	-	4.63 ($\approx 40.5 \epsilon_y$)	-	-	-	15.14 ($\approx 132.6 \epsilon_y$)	-		

※) FREE+BSD1, FREE+BSD2における [] 内の値はピボット支承部とダンパーの反力の合計値をあらわす。

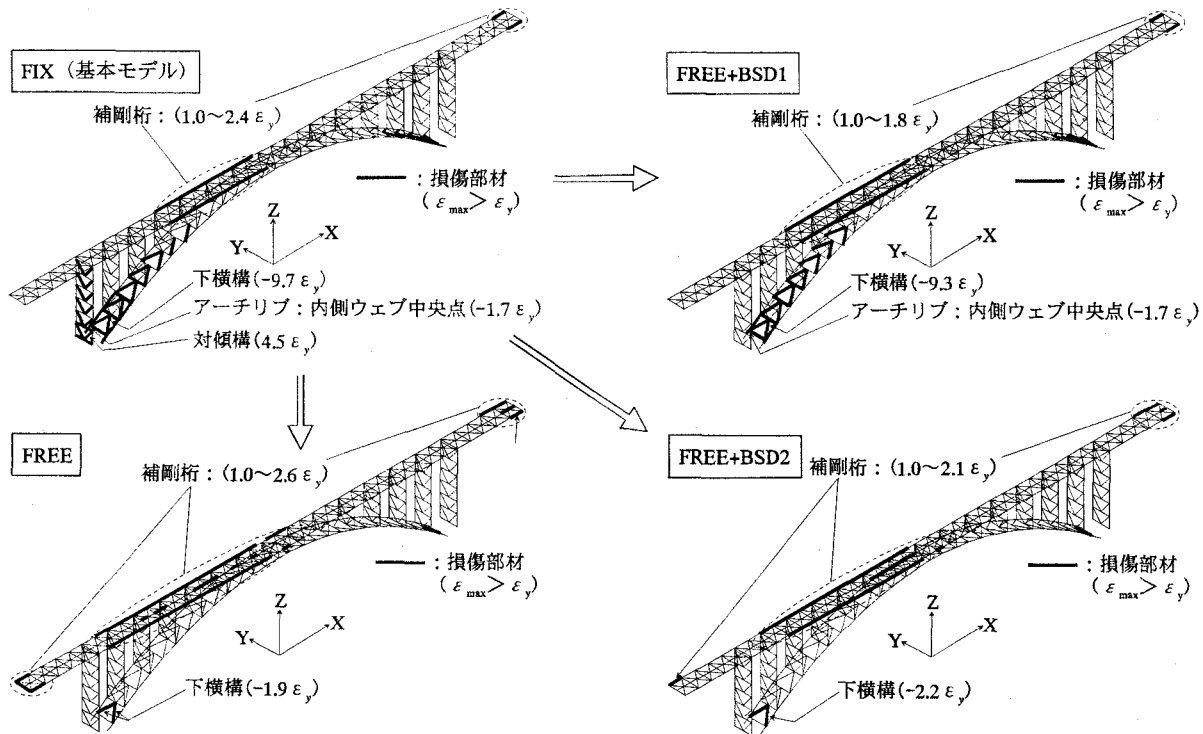
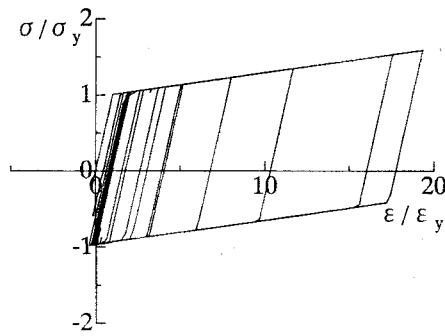


図-5 レベル2地震動に対するアーチ橋Bの損傷状態 (JRT-EW-M)

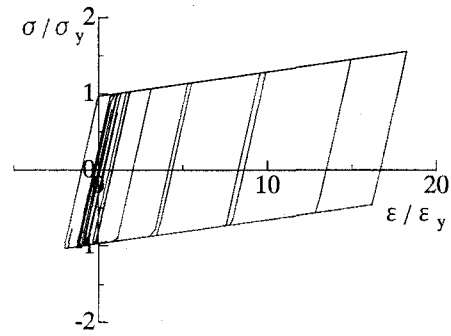
も、基本モデルFIXに較べ吸収エネルギーはかなり減少し、損傷も減少することがわかる。端柱基部のみに免震・制震機構を設置したFREE+BSD1については、基本

モデルよりも履歴吸収エネルギーは減少するが、アーチ橋Bに対する効果はそれほど大きくない。

より詳しく、損傷状態を表-2, 3, 図-4, 5をもとに検討



a) 端柱基部ダンパー



b) アーチリブ基部ダンパー

図-6 ダンパーの応力-ひずみ曲線 (アーチ橋A, FREE+BSD2, 入力地震波JRT-EW-M)

する。アーチ橋 A, B の基本モデル FIX では JMA, JRT いずれの地震波に対しても鋼部材に損傷を生じたが, FREE+BSD2 については, アーチ橋 A に関しては, 無損傷にすることができる。さらに, もともと耐震性能の低いアーチ橋 B についてはアーチ部や補剛桁を無損傷におさえることはできないが, 損傷範囲ならびに各部材の損傷度を大幅に低減できる。この場合, 基本モデルに比べ, 補剛桁の損傷範囲がやや広がっているが, 損傷度は逆に小さくなっている。一方, FREE でも同様に端柱, アーチリブの損傷は大きく低減できるが, 補剛桁については損傷の範囲のみならず損傷度も増加する傾向にある。これは, 端柱, アーチリブに浮き上がり抵抗がないため橋軸直角方向の剛性が小さくなり, 補剛桁がより大きな水平方向地震力を負担することに起因する。このように, FREE も FIX に比べ損傷はかなり低減するが FREE+BSD2 よりやや性能は劣る。FREE+BSD1 では端柱は無損傷であるとともに, 補剛桁も損傷範囲が FIX に比べ拡大せずに損傷度も各モデルの中で最も小さくなっている。しかしながら, 基部に免震・制震機構を設置していないアーチ部では損傷範囲と損傷度は FIX と比べいずれも増加する傾向にある。これは, 端柱基部の浮き上がりのみを許容したことで, アーチリブの地震力の負担がより大きくなり, アーチリブ基部の損傷が増大したと考えられる。これより, 端柱のみならずアーチリブ基部にも本免震・制震機構を設置することが重要であることがわかる。

b) 補剛桁の水平応答変位

端柱ならびにアーチリブ基部の浮き上がりによる水平抵抗が減少する FREE+BSD2, FREE では補剛桁の水平応答変位が FIX に比べ増加する可能性がある。この増加が極端である場合には主構造の損傷が小さくとも床版やジョイント部に損傷を与える可能性があり望ましいものではない。これについて表-2, 3 に示す桁中央部の最大応答水平変位に着目して検討する。

基部の引き抜き抵抗が全く無い FREE では基本モデル FIX に比べて最大応答水平変位は 25%~75%ほど大きくなる。これに対して支承の浮き上がりをダンパーで制御

する FREE+BSD2 では地震波 JRT 下のアーチ橋 A で 35%大きくなる以外, 基本モデルほぼ同程度か逆に 15%小さくなる場合もあり, 水平変位はほとんど増加しないといえる。これからも浮き上がり量をダンパーで制御するロッキング型免震・制震構造の有効性がわかる。

c) 基部反力と浮き上がり量

端柱基部反力の応答値は表-2, 3 のように浮き上がりを拘束しない FREE ではアーチ橋 A, B のいずれに関しても基本モデル FIX と比べ, 垂直成分正反力で 40~60%, 負反力で 100%, 水平成分で 70~80%という大幅な値の低減が可能となる。ダンパーを設置した FREE+BSD2 の基部反力も FREE ほどではないが反力の大きな低減が可能となる。すなわち, 垂直成分負反力では FIX の 60~65%低減し, その他の反力成分については上に示した FREE の低減率より 10~15%少ない程度である。端柱基部のみに免震・制震機構を導入した FREE+BSD1 においても FREE+BSD2 と同程度, 反力が減少する。

アーチリブ基部反力に関しては, アーチ橋 A では FREE+BSD2 における垂直成分の負反力は FIX に比べ 80%程度低減し, 先に述べた端柱の場合より大幅に減少するが, 垂直成分の正反力は 25%, 水平成分は 50~55%と低減率はやや小さめである。FREE については浮き上がりの拘束がないため垂直成分負反力は 100%低減するが, 他の反力成分の低減率は FREE+BSD2 よりやや小さい傾向にある。アーチ橋 B では FREE+BSD2 では垂直成分負反力の FIX に対する低減率は 60%あるが, 他の反力成分については低減率は小さい。FREE についても 100%低減する垂直成分負反力や JRT 下で半減する橋軸直角水平成分反力を除いて他の反力成分の低減率は小さい。これは, 先に述べたようにアーチ橋 B の端柱やアーチリブの変形がアーチ橋 A に比べせん断変形支配型であることによる。FREE+BSD1 ではアーチ橋 A, B いずれにおいても端柱基部の浮き上がりのみを許容したことにより, アーチリブへの地震力の負担が大きくなり, アーチリブ基部反力の大きさは基本モデル FIX と同程度かそれ以上になる。

基部の浮き上がり変位について, FREE の最大値は JRT

を入力した場合において、端柱およびアーチリブ基部に約 13cm 生じる。しかしながら、ダンパーを設置した FREE+BSD2 ではこの値がほぼ半減する。

d) ダンパーの塑性履歴

基部に設置するダンパーの限界値として、最大ひずみおよび累積塑性ひずみに着目すると、表-2,3よりこれらの値はすべて許容値（最大ひずみ： $20 \varepsilon_y$ 、累積塑性ひずみ： $140 \varepsilon_y$ ）以下に収まっていることが確認できる。参考までに、FREE+BSD2での端柱および、アーチリブ基部のダンパーの応力-ひずみ履歴を図-6に示す。端柱では図-6 a)のように柱基部の圧縮変形に起因した微小な圧縮ひずみが発生するだけで、ほぼ引張りひずみ領域での片振り載荷である。アーチリブ基部では柱の外側（橋軸直角軸方向）にダンパーを設置しているため、アーチリブ基部の曲げによるひずみが生ずるが、基部の浮き上がりにより発生するひずみに対して小さく、端柱のダンパーと同様、図-6 b)のように、ほとんど片振り載荷に近い履歴を受けることがわかる。このことは、本検討で用いた両振りの場合のひずみ許容値の緩和の可能性を示唆している。

(6) 構造の差異による免震・制震効果と損傷形態

ロック型免震・制震構造を適用することによる耐震性能の向上効果や損傷形態はアーチ橋AとBにより明らかに異なっている。すなわち、アーチ橋Aに適用した場合には鋼部材は無損傷になるが、アーチ橋Bについては損傷はかなり低減されるもののアーチ下横構と補剛桁に損傷が若干残る。また、基部反力の低減率もアーチ橋Bではアーチ橋Aに較べて小さい。アーチ橋Bは震度法により設計されているため部材の降伏耐力が小さく、アーチ橋Aに較べ損傷しやすいこと、さらにアーチ橋Bの端柱の対傾構やアーチの下横構の降伏耐力が相対的に低いことが損傷に差異が生じた一つの原因である。このブレース部材の損傷により端柱やアーチはせん断変形支配型になり、浮き上がりにくい構造になる。その結果、端柱やアーチリブ基部の浮き上がりを利用する本免震・制震機構の効果が低減したものと見える。

提案する免震・制震機構の有効性を簡便に判断する指標として、基部の浮き上がり力の程度を表す量である基本モデル基部に発生する負反力の正反力に対する比の絶対値（ $= | \text{負反力} / \text{正反力} |$ ）が考えられる。このような観点から表-2,3を見るとアーチ橋Bではアーチ橋Aに較べ、端柱基部の負反力の割合は同程度であるが、アーチリブ基部の負反力の割合が特に小さいことがわかる。このことはアーチ橋Bにおいて端柱は損傷せずアーチの下横構が損傷する事実と符合する。以上から、本免震・制震構造の有効性を判断するには基本構造における負反力の大きさが有力な指針となるものと考えられる。

4. まとめ

上路式鋼アーチ橋の橋軸直角方向の耐震性能を比較的容易に向上することを目的として、骨組構造基部の浮き上がりを伴うロック型挙動を許容し、軸降伏型のダンパーで制御するロック型免震・制震機構を端柱とアーチリブの基部に用いることを提案した。この免震・制震構造の有効性を2種類の既設アーチ橋を対象とした複合非線形動的解析結果を基に詳細に検討した。その結果、本機構を導入することで、レベル2地震動に対するアーチ橋本体の損傷や基礎への作用力を大幅に低減できることが判明した。ダンパーにより、浮き上がり量を制御しエネルギーの吸収を計ることで、浮き上がりのみを許容する場合に較べ損傷と補剛桁の水平変位をより小さくしうることも明らかになった。本免震・制震機構はとくに端柱やアーチのアスペクト比が大きい場合やせん断剛性が大きい場合に有効である。また、軸降伏型ダンパーが受けるひずみ履歴はほとんど引張りひずみ領域の片振りであるので、両振りのひずみ履歴を受けるダンパーブレースに較べ設計も容易になる。施工の観点からみても本免震・制震機構は柱やアーチリブの基部に設置されるため適用が容易である。また、ダンパーを取り外した状態でもアーチ橋は死荷重に対する機能を損なわないので、死荷重作用下でのダンパーの設置、損傷後の交換、残留変形の矯正も困難ではないものと考えられる。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会：履歴型ダンパー付骨組みの地震応答性状と耐震設計法，日本鋼構造協会，2002。
- 2) 宇佐美勉，葛漢彬，日沖賢治，路志浩，河野豪：制震ダンパーによるアーチ橋の耐震性向上—橋軸直角方向地震動に対する検討—，土木学会論文集，No.766/I-68，pp.245-261，2004。
- 3) 森下邦宏，井上幸一，川島一彦，阿比留久徳，平井潤，本田誠：ダンパーブレースを組み込んだ上路式アーチ橋部分構造の動的地震応答実験，土木学会論文集，No.766/I-68，pp.277-290，2004。
- 4) 福田智之，川島一彦，渡辺学歩：ブレースダンパーによる鋼製アーチ橋の地震応答の低減効果，構造工学論文集 vol.51A，pp.847-858，2005。
- 5) R.I.スキナー，W.H.ロビンソン，G.H.マックベリー（川島一彦，北川良和 訳）：免震設計入門，鹿島出版会，1996。
- 6) 前野裕文，稲垣了史，後藤芳顯，水野清明，平山博，吉澤努：多層鋼製ラーメンロック型橋脚を含む高架橋全体系の動的挙動を考慮した落橋防止システムの設計，第4回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集，pp.41-47，2002。
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ 共通編Ⅱ 鋼橋編，2002。
- 8) ABAQUS/Standard User's Manual；Ver5.8.；HKS，Inc.，1998。
- 9) 日本鋼構造協会：鋼橋の性能照査型耐震設計法検討委員会：土木鋼構造物の動的耐震性能照査法と耐震性能向上策，2003。
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ 耐震設計編，2002。