

大変位吸収システムが免震橋の地震時振動特性に及ぼす影響

大住 道生¹・運上 茂樹²・近藤 益央³

¹正会員 工修 建設省土木研究所耐震研究室(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

²正会員 工博 建設省土木研究所耐震研究室(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

³正会員 建設省土木研究所耐震研究室(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

1. はじめに

平成7年1月17日の兵庫県南部地震では、道路橋も甚大な被害を受けたことから平成8年12月に改訂された道路橋示方書¹⁾では、弾性ゴム支承や免震支承を用いた水平力分散構造の採用が望ましいとされている。しかし、地震エネルギーを支承の変形により吸収する免震橋梁では、桁の地震時応答変位が大きくなり、桁遊間が30cmを超えるような場合がある。このような橋梁においては、30cmを超える可動量を有する伸縮装置を使用することが必要となるが、大変位に対応する伸縮装置を使用した場合には、経済性から合理的でない場合が多い。

そこで、温度収縮等の常時変形による変形量および橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動による変位量については伸縮装置により桁の変位を吸収し、兵庫県南部地震クラスの大规模地震時には舗装やパラペットの一部を損傷させて桁遊間を確保する免震橋用の大変位吸収システムを開発した²⁾。本システムの開発にあたっては、簡易な構造で大规模地震時にも桁の変位を吸収できる構造とし、免震橋梁全体の応答特性に悪影響を及ぼさない、すなわち免震支承の変形性能を損ねないことを条件とした。

本論では、大変位吸収システムを有する多径間連続橋を対象に地震応答解析を行い、大変位吸収システムが免震橋の地震時挙動に及ぼす影響について検討した。

2. 大変位吸収システムの概要

大変位吸収システムの考え方は、ニュージーランドで実用化されているノックオフ構造と同じく、頻繁に発生する小変位に対しては伸縮装置により吸収し、大规模地震等の発生確率の低い大変位に対しては、構造体の一部を損傷させることにより、桁の衝突を回避するために必要な遊間を確保するものである。³⁾ノックオフ構造は、

ノックオフ部と呼ばれる橋台パラペットの上部をパラペット下部と切り離しておき、大规模地震により桁が大きく振動し、パラペットと衝突した場合にはノックオフ部が裏込め地盤の方向に移動する構造である。

しかしながら、このようなノックオフ部の移動により、道路面上に段差や突起が生じることも考えられ、通行車両への影響を考慮するとこのような段差や突起を出来る限り低く抑える必要がある。そこで、桁端部の変位を有効に吸収するとともに、交通車両に及ぼす影響を最小限にできる大変位吸収システムとして以下のような要求性能を設定して開発を行った²⁾。

- ①簡単な構造で、日常の維持管理が容易なこと。
- ②大规模地震時に生じる路面段差を10cm以下とし、通行車両に致命的な影響を与えないこと。
- ③大规模地震後において車両の通行が確保できること。
- ④地震後に全面通行止めを行わずに復旧が可能なこと。

図-1は、以上の要求性能を満たす構造として開発された大変位吸収システムの構造を示すものである。

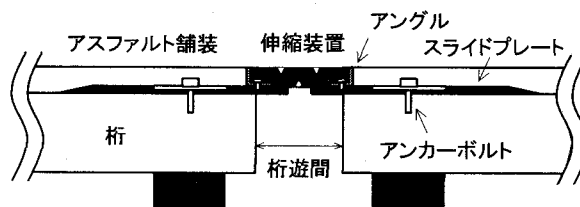


図-1 大変位吸収システムの構造

大変位吸収システムは、大规模地震時にはスライドプレートが桁とアスファルトの間に押し込まれる、あるいは引き抜かれることにより、上部構造間に生じる相対変位を吸収する。そのとき、桁とスライドプレート間には摩擦抵抗、アスファルトとスライドプレート間には付着抵抗が生じ、スライドプレートを押し込む方向ではアングルの曲げ変形抵抗が生じる。この大変位吸収システム

の抵抗特性を図-2に、そのときに働く力を図-3に示す。大変位吸収システムの抵抗特性はその構造上、スライドプレートを押し込む方向と引き抜く方向とで履歴特性が異なる。押し込む方向については、伸縮装置の遊間が0となったときに大変位吸収システムに抵抗が生じ始め、桁とスライドプレートの摩擦抵抗、アスファルトとスライドプレートの付着抵抗、アングルの曲げ変形抵抗の和である抵抗値を最大値とし、その後は摩擦抵抗のみとなる。引き抜く方向については、伸縮装置の最大伸び量になったときに変位吸収システムに抵抗が生じ始め、桁とスライドプレートの摩擦抵抗、アスファルトとスライドプレートの付着抵抗の和である抵抗値を最大値とし、その後は摩擦抵抗のみとなる。

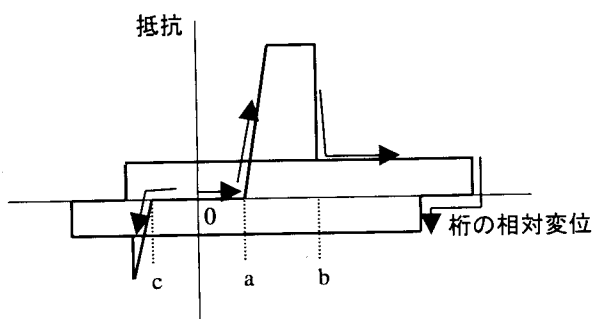
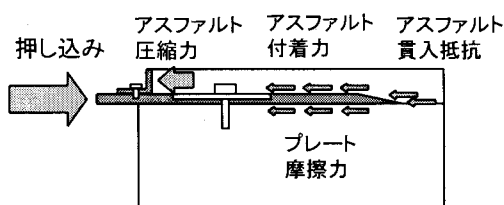
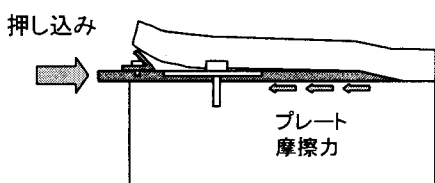


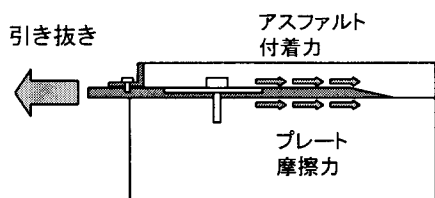
図-2 大変位吸収システムの抵抗特性



a) 伸縮装置の遊間が0になったとき



b) アングルが曲げ降伏に達したとき



c) 伸縮装置が最大伸びとなったとき

図-3 大変位吸収システムに作用する力

3. 大規模地震時の桁間衝突が橋の振動特性に及ぼす影響

大変位吸収システムを適用せずに、大規模地震時に生じる上部構造変位に対して桁同士が衝突する場合の動的解析を行い、橋の振動特性について検討を行った。

(1) 解析条件

検討対象とした橋梁は表-1に示すように、3、16径間連続免震橋梁が連なる一連の高架橋で、いずれも鉛プラグ入り積層ゴム支承、RC壁式橋脚、杭基礎により支持され、桁形式は3径間連続側がPC箱桁、16径間連続側がPC中空床板桁である。また、地盤条件は全て道路橋示方書に定めるⅡ種地盤に相当する。

表-1 検討対象橋梁の緒元

連続径間数	3	16
桁形式	PC箱桁	PC中空床板桁
免震支承	LRB	LRB
橋脚	RC壁式	RC壁式
基礎	杭基礎	杭基礎
連続長(m)	92.0	389.0

検討対象とした3径間連続部、16径間連続部の解析に当たって、図-4に示すようにそれぞれを1次の卓越振動モードに代表される1質点系にモデル化し、その間を衝突バネにより連結した。対象橋梁の実設計に基づき解析定数を表-2に示すように定めた。

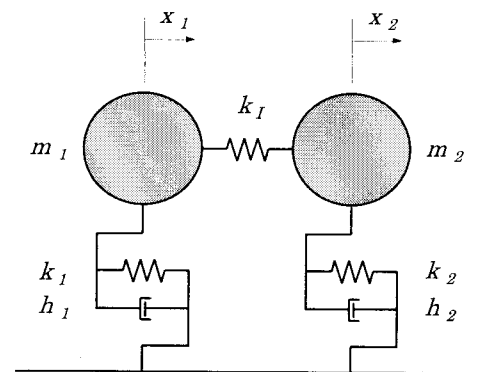


図-4 解析モデル

表-2 解析定数

	3径間連続部	16径間連続部
質量 m_i (t)	285.0	938.1
等価バネ定数 k_i (MN/m)	72.3	202.0
等価減衰定数 h_i (%)	14.1	13.7
1次の固有周期 T_i (s)	1.24	1.34

桁同士の衝突を検討するに際して、衝突をモデル化するための衝突バネを仮定しなければならない。衝突バネとは、式(1)に示すように離れる方向には剛性が0で、桁同士が接触すると剛性を持つような性質を持ったバネ

である。衝突バネ定数は川島の検討⁴⁾を参考に、16径間側の桁の伸び剛性としたものを基本に、その10倍の場合についても検討を行った。

$$S = k_I \langle r \rangle r \tag{1}$$
$$\langle r \rangle = \begin{cases} 1 & r < 0 \\ 0 & r \geq 0 \end{cases}$$

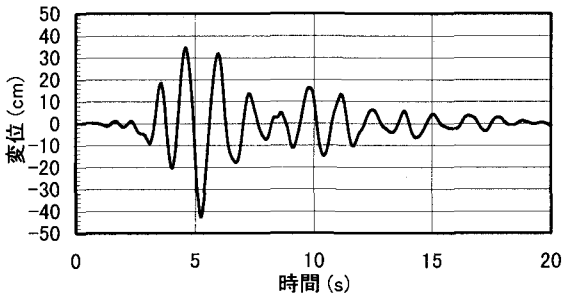
ここで、
S：衝撃力 (MN)
k_I：衝突バネ定数 (MN/cm)
r：桁間相対変位 (cm)

入力地震動は、道路橋示方書³⁾に規定されるタイプⅡ地震動のⅡ種地盤用の標準波を用いた。

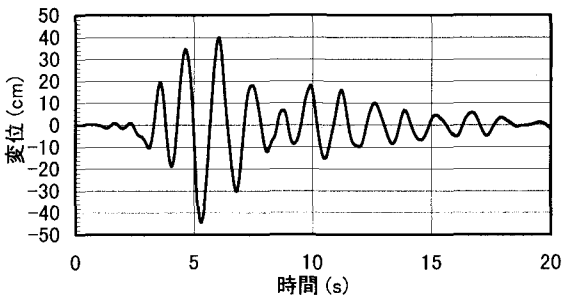
(2)解析結果

まず、衝突を考慮せずに行った3径間連続桁および16径間連続桁の時刻歴応答変位を図-5に示す。これを見ると、どちらも似た振動特性を示し、最大応答変位は40cmを越えるという結果となった。

一方、桁同士の衝突による影響を考慮する場合、両桁の応答振動周期が近いことから、同位相入力ではほとんど衝突しないため、両桁の相対応答速度が最大となるように位相差入力を行うことを考え、その位相差を求めると0.73秒となった。そこで、衝突バネのバネ定数が基本ケースの場合に0.73秒の位相差を付けて地震動を入力した場合の各桁の応答変位を図-6に示す。



(a) 3径間連続桁



(b) 16径間連続桁

図-5 衝突無しの場合の桁の応答変位

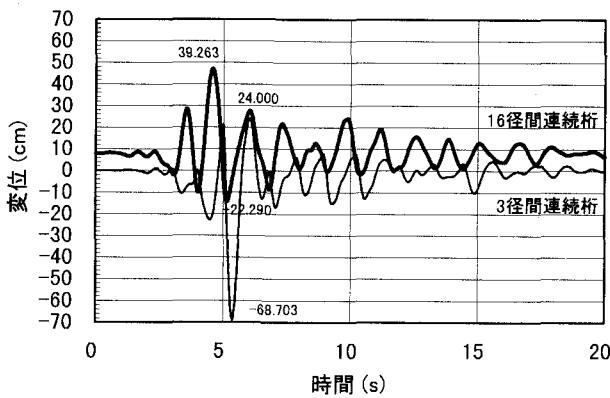


図-6 衝突有りの場合の応答変位の例

ここで設定した桁遊間は8cmであり、両桁の変位が重なって表示されている時間が衝突している時間である。図-6から、桁間の衝突により上部構造重量の軽い3径間連続側の桁は最大70cm近く変位することになり、衝突しない場合と比べて非常に応答変位が大きくなっていることが分かる。この傾向は、衝突バネ定数が大きくなると更に顕著となり、計算結果としてはすでに計算上の仮定が成り立たないような値ではあるが、表-3に示すような値となった。

表-3 桁同士の衝突による最大応答変位

衝突バネ定数 (MN/cm)	最大変位 (cm)	
	3径間	16径間
0	-42.6	-44.3
5.1	-68.7	39.3
51	-1.78×10 ³	5.77×10 ²

4. 大変位吸収システムの地震時抵抗特性が免震橋梁の地震時応答特性に及ぼす影響

大変位吸収システムは、作動する際に桁とスライドプレートとの摩擦力、アスファルトとスライドプレートの付着力、アスファルトの圧縮抵抗力が働くため、桁本体にもこの反作用としての水平力が作用する。この水平力により免震橋梁として設計当初に見込んでいた免震性能が損なわれることがあってはならない。大変位吸収システムにより発生する水平力により、地震による慣性力のみから算出される変位と比較して、免震支承の最大変位が大きくなる可能性がある。免震支承は履歴特性が非線形であるため、変位が大きくなることにより減衰定数が低下する。免震橋の設計においては、橋の減衰定数により設計水平震度を定めるため、免震支承の減衰定数が過度に小さくなることは避けねばならない。また、上部構造の変位の増大が起これば、橋脚天端幅、大変位吸収システムの可動幅の割り増しが必要となる恐れもある。さらに、支承の変位が増加すれば、支承、橋脚、基礎に作

用する水平力も増加することになる。

そこで本解析では、実験²⁾により明らかとなった抵抗特性を用いて動的解析を行い、大変位吸収システムの抵抗特性が免震支承の変位に及ぼす影響を検討した。

(1) 解析条件

解析に用いたモデルは図-4に示したものと同様であるが、衝突パネの抵抗特性を図-7に示すようなものとした。これは実験²⁾により得られた大変位吸収システムの履歴特性をモデル化したものであり、この時の载荷速度は100cm/sである。また本モデルでは、伸縮装置の最大伸縮量は押し込み方向、引き抜き方向とも8cmとした。

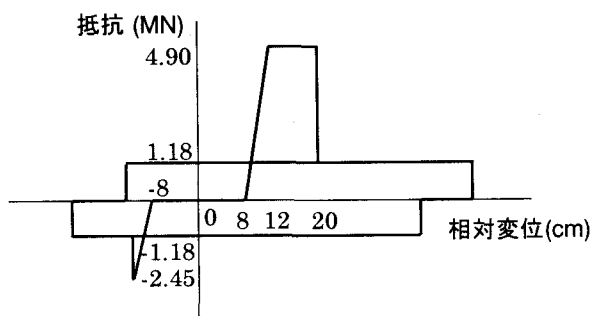


図-7 大変位吸収システムの抵抗特性

抵抗モデルの作成にあたっては、基本ケースとして幅10mの桁全体で貫入抵抗の最大値が4.90MN、引抜き抵抗の最大値が2.45MN、安定抵抗値が1.18MNであるとして抵抗特性を定め、貫入抵抗の最大値および引き抜き抵抗の最大値が2倍であるケース（以下2倍ケースと呼ぶ）、貫入抵抗の最大値を4倍にしたケース（以下4倍ケースと呼ぶ）の3種類の抵抗モデルを仮定した。

いずれの場合も付着、曲げ変形が最大抵抗を超えた後はスライドプレートと床版の摩擦抵抗のみを見込んでいる。また、押しから引き、引きから押しに変化するときの抵抗は、伸縮装置が機能しているとして、伸縮装置の最大伸縮量（伸縮装置遊間の2倍）分は抵抗値0で推移すると仮定した。また、アスファルトとスライドプレートの付着抵抗、アングルの曲げ変形抵抗は一度最大値になったらそれ以降は作用しないこととした。

入力地震動は、3章と同じ道路橋示方書³⁾に規定されるタイプⅡ地震動のⅡ種地盤用の標準波を用いた。

(2) 衝突のパターン

以上の条件により地震応答を算出した場合、衝突のパターンが大きく分けて以下の2種類あることが分かる。

- ① 2つの質点が逆位相で衝突する場合
- ② 一方の質点が他方に追突する場合

(1)で示した解析条件で入力位相差だけを変化させて、

3径間連続部、16径間連続部の間の最大衝突速度が最大となる場合、および最大応答変位が最大となる場合について入力位相差を求めると、衝突速度が最大となるのは①の場合、応答変位が最大となるのは②の場合となった。

そこで、表-4に示すように大変位吸収システムの抵抗特性、入力位相差を変化させた6つのケースを解析し、衝突がない場合と比較した。

表-4 解析ケース

解析ケース No.	衝突イメージ	大変位吸収システムの抵抗特性	入力位相差 (s)
1	衝突無し	無し	0
2	追突 応答変位最大	基本ケース	0.21
3		2倍ケース	0.26
4		4倍ケース	0.26
5	逆位相 衝突速度最大	基本ケース	0.73
6		2倍ケース	0.73
7		4倍ケース	0.73

(3) 解析結果

大変位吸収システムの抵抗特性を基本ケースとして衝突無し、追突、逆位相の解析ケース1, 2, 5のそれぞれの3径間連続桁、16径間連続桁の応答変位波形を図-8、図-9、図-10に示す。

図-8をみると、大変位吸収システムの影響が無い場合には、各桁の応答変位は最大40cm程度生じている。

図-9をみると、追突型の場合、3径間連続桁の最大応答変位は、衝突なしの場合の応答変位と比べて小さくなっている。ここで、衝突している時間は図中の3径間連続桁の応答変位と16径間連続桁の応答変位が交差している時間である。追突型の場合は衝突時の桁の速度の向きと衝突により受ける力の向きが等しくなっており、両桁の応答が元々大きい時間帯で追突することにより最大応答変位が生じていることが分かる。

図-10をみると、逆位相型の場合は、衝突なしの場合に比べて最大応答変位が小さくなっている。この場合、衝突時の桁の速度の向きと衝突により受ける力の向きが逆となっている。

全てのケースについて3径間連続桁、16径間連続桁の最大応答変位と衝突無しの時の最大応答変位の比を図-11に示す。ただし、追突型のものについてはすべて16径間側が3径間側に追突するものである。

これを見ると、逆位相で衝突する場合の最大応答変位は全て衝突しない場合と比べて小さくなくなり、今回の解析で設定したような抵抗特性では、大変位吸収システムが作動することにより地震エネルギーが吸収されていると考えられる。追突型の場合、追突される3径間連続桁の最大応答変位は衝突無しの時よりも大きくなって

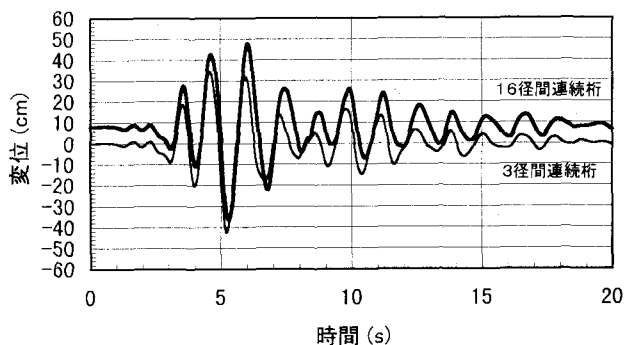


図-8 ケース1(衝突無し)の場合の桁の応答変位

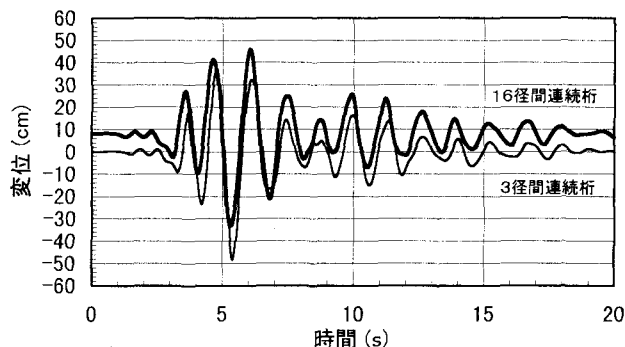


図-9 ケース2(追突型)の場合の桁の応答変位

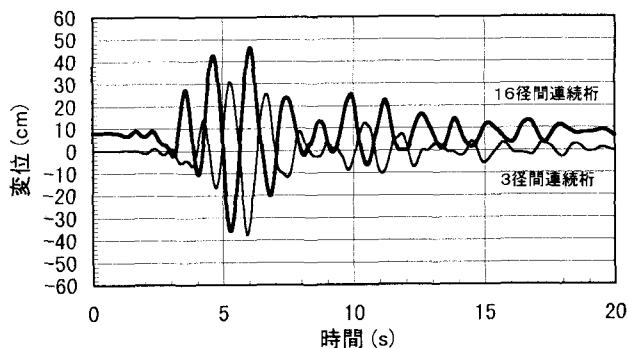


図-10 ケース5(逆位相型)の場合の桁の応答変位

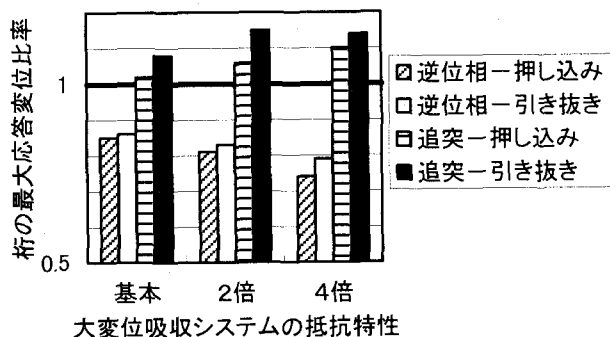


図-11 各桁の最大応答変位

いる。そして、この中では衝突バネの剛性が大きい方が最大応答が大きくなる傾向は見られるが、必ずしも剛性の増加に従って応答値が大きくなっているわけではない。これは、最大応答が生じる衝突の前にも衝突をしていることが原因であると考えられる。このように衝突無しの

場合に比べて応答変位が大きくなる場合には、支承に生じる変形が大きくなり、免震橋の減衰性能に悪影響を及ぼすおそれがある。基本ケースの抵抗特性では、最大応答となる入力位相差で見ても変位量は衝突無しの場合と比較して1割程度の増加にとどまっており、この程度の増加であれば特に悪影響を及ぼすとは考えにくい。また、2倍ケースの場合でも変位量の増加は1割程度であるが、4倍ケースの場合では2割程度の増加である。従って、免震橋の全体応答への影響を考慮すると、大変位吸収システムは過度に抵抗が大きくなるように設計する必要があると考えられる。

5. 大変位吸収システムが他の部材に及ぼす影響

ここまで各連続桁を1質点にモデル化した解析により、大変位吸収システムを有する免震橋の全体系の振動特性について検討を行ったが、衝突により他の部材に及ぼす影響についても検証する必要がある。

そこで、大変位吸収システムを導入した場合に桁に生じる軸力、橋脚基部に発生する曲げモーメント、せん断力に対する影響を検討する。

(1) 解析条件

3径間連続部、16径間連続部を図-12に示す様に、それぞれ橋脚1本ずつモデル化して動的解析を行った。各構造部材のモデル化は、表-5に示す通りである。

表-5 各構造部材のモデル化

構造部材	解析モデル
上部構造	線形梁要素
免震部材	非線形バネ要素
下部構造	線形梁要素
基礎	水平バネ要素 回転バネ要素

免震支承の履歴特性は歪依存 Bi-linear 型モデルとし、その特性を図-13に示す。大変位吸収システムの抵抗特性は図-14に示すように押し側、引き側ともに最大荷重 2.94MN のトリリニアモデルとした。これは解析ソフトの制約から、抵抗特性は前章で仮定した抵抗特性を再現することが困難であったため、大変位吸収システムによる影響が再現できると考えられるモデルとして、最大荷重となる相対変位までを前章の仮定と等しくし、その後荷重を維持するモデル設定となっている。

入力地震動は、平成8年道路橋示方書に示されるⅡ種地盤のタイプⅡ地震動の標準波を基本として調整した波を用いた。

入力位相差は、各橋脚ごとに A2 橋台を規準として地

盤変位の位相差も導入した。位相差は検討対象とした橋梁近辺の地盤の代表的な位相速度である 200m/s を用いて、橋軸方向の距離に従って算出した。

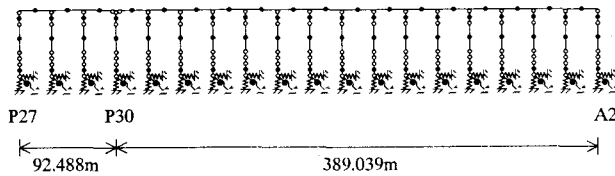


図-1 2 解析モデル

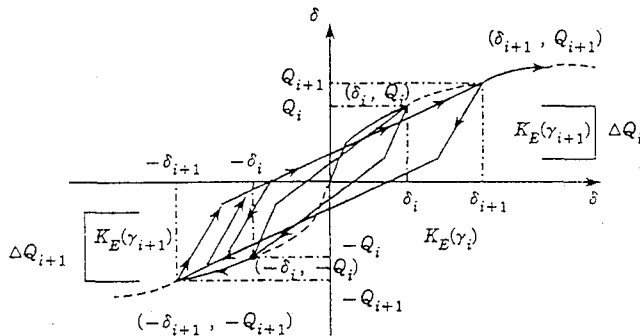


図-1 3 免震支承の履歴特性モデル

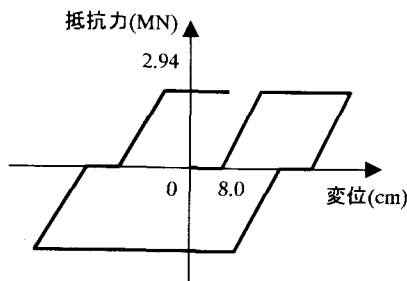


図-1 4 大変位吸収システムの履歴特性モデル

(2) 解析結果

a) 桁端部の最大軸力

桁端部に発生する軸力およびその許容値を表-6 に示す。これを見ると、最大で 5MN 程度の軸力が発生している。ただし、この軸力は変位吸収システムの作動抵抗によるものだけでなく、位相差入力により各下部構造の振動の位相差が異なることによる軸力が含まれている。しかし、5MN 程度の軸力は許容軸力と比較して十分に小さく、設計上全く問題とはならない。

表-6 桁端部に生じる軸力

	3 径間連続桁	1 6 径間連続桁
発生軸圧縮力 (MN)	4.635	5.371
許容軸圧縮力 (MN)	102.5	93.67
判定	OK	OK

b) 橋脚基部の最大せん断力、最大曲げモーメント

各橋脚基部に生じる最大せん断力および最大曲げモーメントと大変位吸収システムがない場合との比を図-15 に示す。この結果、せん断力、曲げモーメントともに位相差を考慮して衝突させたときは位相差無しの場合に比べて同程度あるいは小さくなっている。

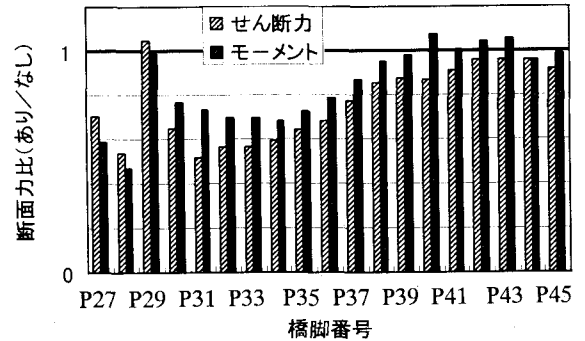


図-1 5 橋脚基部に発生する断面力比

6. まとめ

大規模地震時に上部構造に発生する変位を吸収できる大変位吸収システムが、作動抵抗により免震橋梁の地震地振動特性に及ぼす影響について解析的に検討した結果、以下のことが分かった。

- (1) 大変位吸収システムを有する免震橋は、入力位相差によっては、桁同士が衝突をしないと仮定をした場合に比べて上部構造の最大変位が大きくなるが、大変位吸収システムの抵抗特性が基本ケースの場合、上部構造の変位の増大は最大 1 割程度である。
- (2) 大変位吸収システムを有する免震橋に位相差を考慮して、大変位吸収システムを作動させたときに桁に生じる軸圧縮力は、許容軸圧縮力に比べて充分小さく、橋脚基部に生じるせん断力、曲げモーメントは、位相差無しの場合に比べて同程度あるいは小さくなっている。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書 V 耐震設計編、1996 年 12 月
- 2) 近藤益央、運上茂樹、大住道生：免震橋梁に適用する変位吸収システムの開発、第 10 回日本地震工学シンポジウム、1998 年 11 月
- 3) 建設省土木研究所：道路橋の免震設計法マニュアル(案)、1992 年 10 月
- 4) 川島一彦：動的解析における衝突のモデル化に関する一考察、土木学会論文報告集第 308 号、1981 年 4 月