

(118) ゴムの圧縮変形を利用した地震時反力分散装置の開発とPC連結桁の一考察

立命館大学理工学部土木工学科 工博 伊津野 和行
 東京ファブリック工業(株)大阪営業所 吉野 伸
 ドーピー建設工業(株)大阪支店 正会員 鈴木 亮介
 ドーピー建設工業(株)大阪支店設計部 正会員 和田 教志

1. はじめに

橋梁を多径間化することにより、構造上の弱点である桁端部を減らすことや、走行性を改善することができる。しかし、固定支承の選定によっては、温度応力の問題と地震時の反力分散方法の問題が生ずる。そこで様々な手段によって、多径間連続橋の試みが検討されている。

従来、反力分散装置としては、オイルダンパーや粘性ストッパー等の粘弾性ダンパーが用いられることが多く、これらは応答速度に比例した減衰力を各橋脚に伝えることによって反力の分散をはかっている。その効果は十分に実証されているが、常日頃からのメンテナンスの必要がある。また、ゴム支承によって桁を弾性支持することによっても反力分散を期待することができる。免震装置としてはゴムのせん断変形を利用したゴム支承が一般的であるが、変形応答が大きくなるため、継手部の工夫やストッパーの検討が必要である。

変位応答を制御するためには、ゴム材の圧縮変形を用いることが有効だと考えられる。ただし、単なるストッパー的な使用法では、橋脚に作用する地震力が過大となる可能性があり、固有周期を長くする等の工夫が必要である。

本研究では、ゴム材の圧縮変形を利用した特許¹⁾に基づいた反力分散装置によって、連続橋の免震化をはかるとともに、大変形の抑制と反力分散をはかるための基礎的検討を行っている。まず、供試体の載荷試験によって基礎的な特性を明らかにし、次にその復元特性のモデル化を行った。さらに、反力分散装置を設置した連続橋をモデル化し、その地震応答特性を数値シミュレーションによって検討した。

2. 反力分散装置の載荷試験

2-1 反力分散装置の概要

本方法では支承にはスライド沓等の可動沓を用い、鉛直反力を受け持たせる。アンカーバーには、従来より単純桁によく使用されているキャップ方式を採用する。その際、アンカーバーとキャップを矩形断面として、橋軸直角方向には固定とする。橋軸方向にはアンカーバーとキャップとの間にゴム弾性体を介在させ、ゴムの圧縮バネを利用して各橋脚に反力を分散させようとするものである。(図-1参照) ただし、板状のゴムをそのまま用いるとバネ定数が大きくなりすぎ、反力分散装置としては適しても免震効果は全く期待できない。そのため数個の

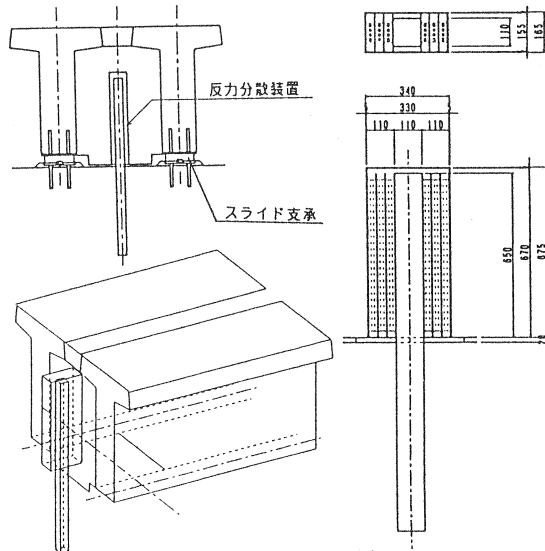


図-1 反力分散装置概要図

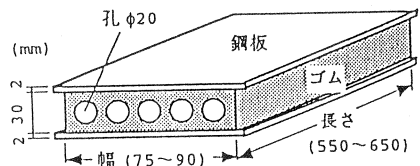


図-2 供試体形状

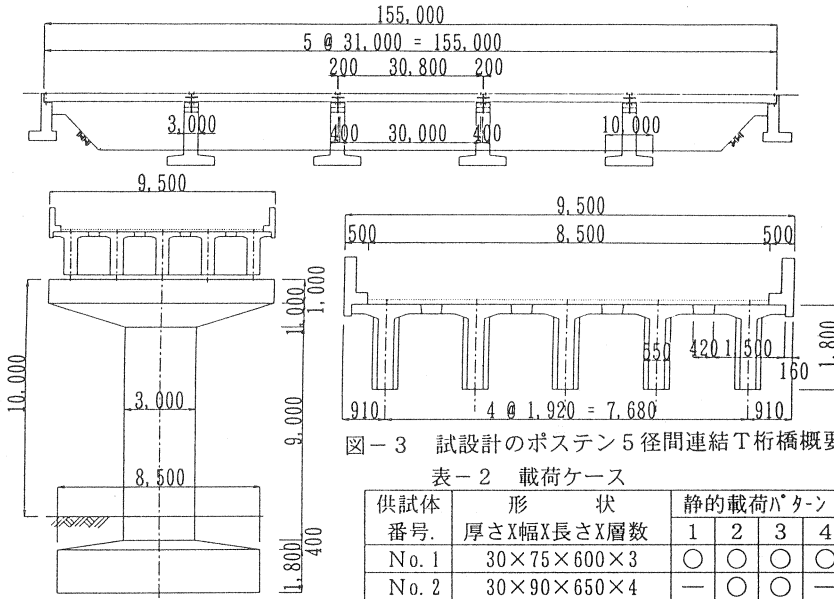


図-3 試設計のポステン5径間連結T桁橋概要図

表-2 荷重ケース

供試体 番号	形 状 厚さX幅X長さX層数	静的荷重パターン				動的荷 重実験
		1	2	3	4	
No. 1	30×75×600×3	○	○	○	○	○
No. 2	30×90×650×4	—	○	○	—	—
No. 3	30×90×550×3	—	○	○	—	—
No. 4	30×75×625×3	—	○	○	—	—

表-3 動的荷重パターン

ケース	荷重範囲	荷重振動数
1	1↔20 (tonf)	1 (Hz)
2	1↔20 (tonf)	0.2 (Hz)
3	1↔20 (tonf)	0.05 (Hz)
4	10↔13 (tonf)	5 (Hz)
5	4↔6 (tonf)	5 (Hz)

表-1 試設計ケース

	橋種	支間	径間	橋長
Case-1	プレテンション	20m	5	104.50 m
Case-2	方式連結T桁橋		10	209.00 m
Case-3	ポストテンション	30m	5	155.00 m
Case-4	方式連結T桁橋		10	310.00 m

穴を空けて剛性を調節している。

(図-2参照)

供試体は、表-1に示す4橋の試設計(図-3参照)を行い、形状を決定した。供試体は表-2に示す4種類であり、静的荷重パターンとして4種類、動的荷重パターンとして5種類の試験を行った。すべての荷重パターンを行ったのはNo. 1供試体であり、は静的荷重パターン2と3を行った。いずれも荷重制御の実験である。供試体はプレテンションおよびポストテンションの5径間連続橋の端と中の反力分散装置に求められる剛性が得られるように形状を決めて

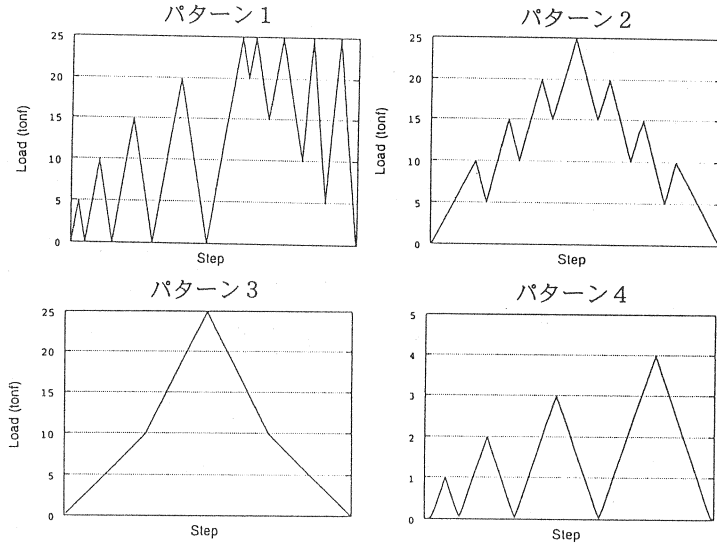


図-4 静的荷重パターン

いる。静的荷重パターンを図-4に示す。パターン1では全体的な履歴特性の概略を、パターン2では部分荷重特性を、パターン3では履歴復元力特性の骨格曲線を、パターン4では微小振幅レベルにおける履歴復元力特性を検討するために行った。動的試験では試験器の性能より、大振幅の高振動数荷重は無理なため、

表-3に示すように、ケース1~3は大振幅の低振動数載荷、ケース4, 5は小振幅の高振動数載荷を行った。

2-2 実験結果

静的載荷実験の結果の供試体No. 1、載荷パターン1の荷重-変位曲線(履歴曲線)を図-5に示す。降伏点やハードニングの開始点等が異なるものの、いずれの供試体も同様な履歴復元力特性を示した。図-5より、微小変形ではバイリニア特性に近く、ハードニングが起きると曲線的な動きとなる。履歴曲線が囲む面積から等価減衰係数を求めると約2%で高減衰ゴム支承のような数十%という大きな減衰効果は望めないことが分かった。

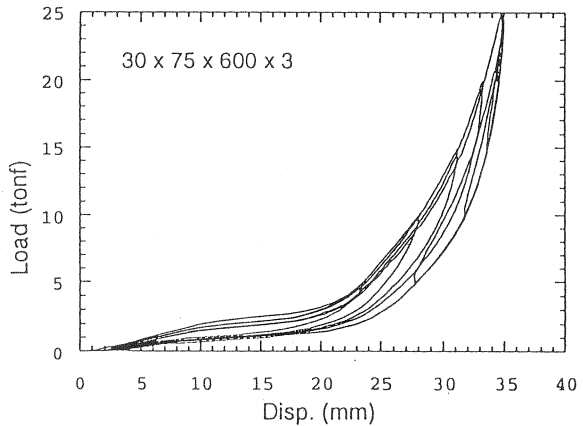


図-5 静的載荷実験の履歴曲線の例
(N0.1供試体-載荷パターン1)

動的載荷実験の結果得られた履歴曲線を図-6に示す。ケース1~3では荷重の小さな範囲での挙動がわずかに異なるものの荷重の大きい領域では同じ曲線を描いている。5Hzで載荷したケース4と5でも、大振幅で載荷したケース1~3の曲線の1部分とほぼ重なっている。以上、本実験で行った周期20秒から0.2秒の範囲では載荷速度の影響はそれほど現れていないと考えられる。

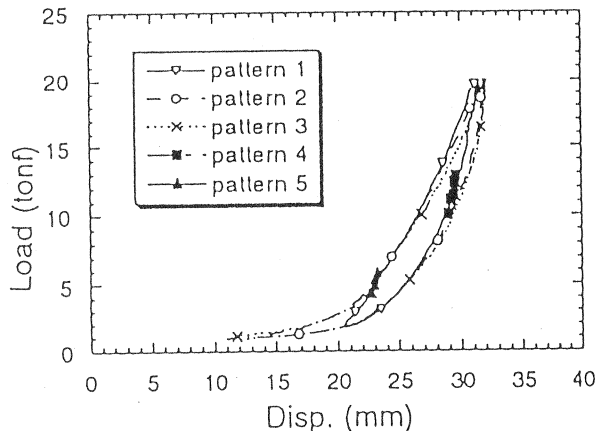


図-6 動的載荷実験の履歴曲線

3. 履歴復元力特性のモデル化

3-1 圧縮ゴムモデル

圧縮変形を用いると一般のゴム支承のようなせん断変形を利用する場合よりも、ハードニング現象の影響が大きい。ハードニングによって変形に限界があり、せん断変形を利用した装置よりも構造的に破断等が起こりにくいためにダンパーストッパーや反力分散装置としての特性に優れている。本装置はゴムに穴を開けて小変形時の低剛性領域を広く取ることによって、免震効果もねらったものであるが履歴復元力特性のモデル化にあたってはハードニング領域も考慮する必要がある。実験結果より圧縮変形ではハードニングの度合いが高いことと除荷時のグラフが曲線的であることより、本解析では以下のような圧縮ゴムモデルを新たに提案することとした。

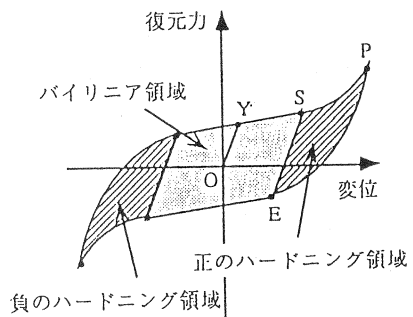


図-7 圧縮ゴムモデル

まず、ハードニング現象が発生するまでの変形が小さい領域では、一般のゴム支承で用いられるバイリニア特性を仮定しても問題ないと判断した。そこで図-7示すようなバイリニア領域を仮定する。静的載荷実験をもとに、降伏点Yとハードニング開始点Sを決める。原点Oと降伏点Yから求められる初期剛性と、降伏点Yとハードニング開始点Sから求められる2次剛性により、原点に対して点対称を仮定して平行四辺形としたバイリニア領域が決定される。この領域では通常のバイリ

ニア特性を示すものと仮定した。つまり、除荷時は常に初期剛性で戻り、載荷は平行四辺形の範囲から出ない範囲では初期剛性で、それ以上は第2剛性で動くとして仮定した。

次にハードニング領域を設定する。バイリニア領域に隣接して、変位が正の位置に正のハードニング領域を、変位が負の位置に負のハードニング領域を設ける。履歴復元力特性は原点に対して点対称とするため、以下正のハードニング領域に着いて詳述する。

まず、ハードニング後の通過点Pを1点決める。実験では25tonfまでの載荷を行っているの、ここではP点として25tonf時の値を用いた。ハードニング領域とバイリニア領域は連続している必要があるのでこれらの領域はハードニング開始点Sと、図-7のS点の下側のバイリニア限界(ハードニング終了点E)で接することになる。ハードニング領域では、載荷時はハードニング開始点Sと通過点Pを通る4次曲線に従うと仮定した。除荷時は除荷開始点とハードニング終了点Eを通る6次曲線に従うものとする。また、除荷がE点に達しないときに再載荷された場合には、これは部分載荷と呼び、部分載荷開始点と除荷開始点とを結ぶ直線に沿って運動すると仮定した。部分載荷によってハードニング領域の上辺S-Pを越える場合には、以降S-Pに沿って4次曲線で上昇する。以上の仮定をまとめると、表-4に示す8つのルールで反力分散装置の履歴復元力特性を規定することができる。ルール中、xは変位、fは復元力である。a、bは係数であり、前ステップでのx、fと、それぞれのルールで規定される通過点より、その都度決定される。また、ハードニング開始点S、ハードニング終了点E、通過点Pは正のハードニング領域における点にそれぞれ添字+をつけ、負のハードニング領域における点にそれぞれ添字-をつけて

表-4 履歴復元力特性のルール

ル-ル	条 件	定 義	式
1	バイリニア領域での変形増	初期剛性または2次剛性での直線	$f = ax + b$
2	正のハードニング領域での変形増	ハードニング開始点S+と通過点P+を通る変位の4次曲線	$f = ax^4 + b$
3	正のハードニング領域での変形減	除荷開始点とハードニング終了点E+とを通る変位の6次曲線	$f = ax^6 + b$
4	負のハードニング領域での部分載荷による変形増	部分載荷開始点と除荷開始点E+とを結ぶ直線	$f = ax + b$
5	バイリニア領域での変形減	初期剛性または2次剛性での直線	$f = ax + b$
6	負のハードニング領域での変形減	ハードニング開始点S-と通過点P-を通る変位の4次曲線	$f = ax^4 + b$
7	負のハードニング領域での変形増	除荷開始点とハードニング終了点E-とを通る変位の6次曲線	$f = ax^6 + b$
8	負のハードニング領域での部分載荷による変形減	部分載荷開始点と除荷開始点E-とを結ぶ直線	$f = ax + b$

区別する。
本モデルを決定するには、降伏点、ハードニング開始点、ハードニング後通過点の3点を与える必要があり、また逆に、この3点で本モデルを規定することができる。

3-2 載荷実験結果のシミュレーション

試験結果で得られた変位の時刻歴波形を用い、前述の圧縮ゴムモデルによって荷重曲線の再現を試みた。No.1供試体の載荷パターン2に対する履歴曲線を図-8に示す。実験では荷重が0付近になると時間と共に変位が0に戻っていくが数値シミュレーションでは荷重が0となった時点でかなり残留変形が残るといった差が生ずる。それ以外はハードニングや部分載荷等もある程度再現されている。地震応答解析に用いるには、充分実用的なモデルと考えられる。

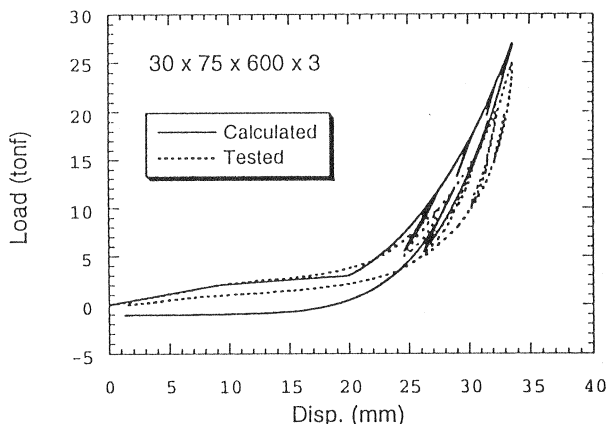


図-8 実験結果と数値解析結果の比較

4. 反力分散装置を設置した連続橋の地震時応答特性

ここではポストテンション方式の5径間連続PC橋を有限要素モデルでモデル化し、反力分散装置を設置した場合の地震応答解析を行った。

図-9に5径間連続橋の有限要素モデルを示す。各スパン約30mとし、22節点21部材のモデルを作成した。橋梁の橋軸方向の運動に対するモデルとして橋脚と桁を線形梁(柱)部材、支承を仮定した圧縮ゴム特性を持った非線形バネ部材とした。基礎は固定とし、入力地震動は平成2年の道路橋示方書のII種地盤に対する震度法レベルの地震波形を用いた。図-10にP1橋脚上の桁の加速度、図-11に同じ位置での桁と橋脚の相対変形、つまり反力分散装置の変形量、図-12に反力分散装置の履歴曲線(荷重-変形曲線)、図-13にP1橋脚基部に作用する曲げモーメントを示す。また、これらの最大応答値を表-5に示す。P1、P2橋脚も、どの値も1%程度しか差がない。よって、反力分散装置として十分な特性を持っていることがわかる。

図-11、図-12に示すように、変形は3cm程度に小さく抑えられている。一方、図-10の加速度波形には、衝撃的なパルスが含まれていることがわかる。橋脚基部での断面力(図-13)も、同様に衝撃的な力が含まれる応答となっている。この瞬間的な力によって橋脚がどの程度損傷を受けるか、詳細な検討が必要である。本研究では、橋脚を線形部材と仮定したが、入力地震レベルによっては橋脚も非線形を考慮する必要がある。

免震性を発揮させるために低剛域領域をより広く設定して衝撃波形を防ごうとすると数十cmの波形が生じ、過大な変形を防げるという本装置の利点がある。

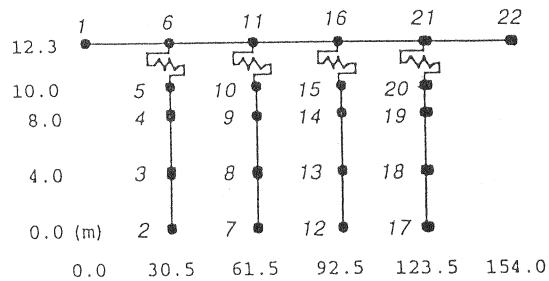


図-9 5径間連続橋の有限要素モデル

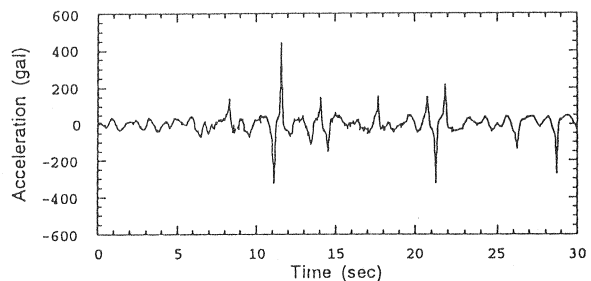


図-10 P1橋脚上の桁の加速度応答時刻歴波形

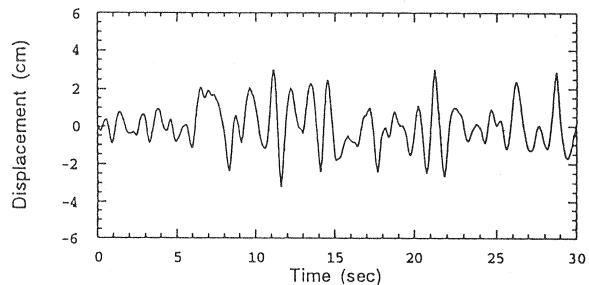


図-11 反力分散装置の変位応答時刻歴波形

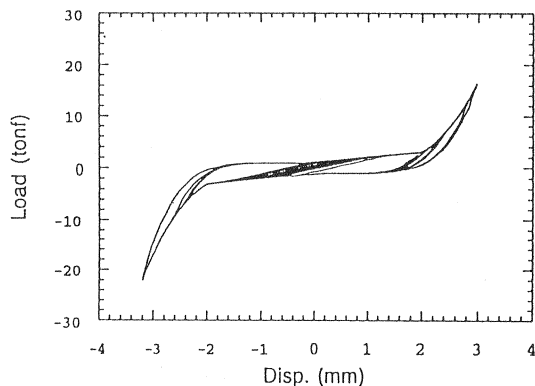


図-12 反力分散装置の履歴曲線

なくなる。本分散装置を用いて免震性を発揮するには、減衰器を付加して減衰性を高めることや、弾塑性ダンパー等の併用も考えられる。

また、これらの結果は、緩衝材としてゴム材を用いても、ある程度の衝撃力の発生は防げないことも示している。緩衝材を用いることによって、衝撃をやわらげることは重要であるが、その場合でも衝撃に対する照査を省略することはできないものと考えられる。

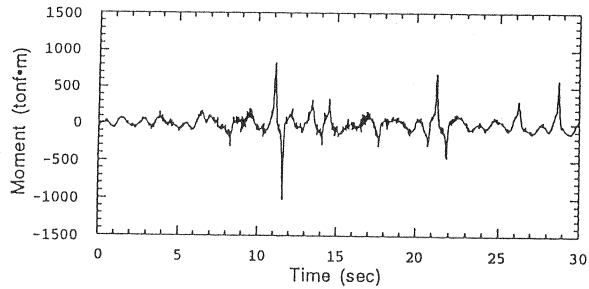


図-1 3 橋脚基部の曲げモーメントの時刻歴応答波形

5. 結論

以上、ゴム材の圧縮変形を利用した反力分散装置の地震時挙動に関して、載荷実験と数値シミュレーションを行った。

本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

1) 4種類の供試体を用いて、反力分散装置の静的載荷実験を行った。これらの供試体は、低剛性域後、ハードニング現象が発生するという特性があった。降伏点やハードニング開始点等が異なるものの、いずれの供試体も同様な履歴復元力特性を示した。微小変形ではバイリニア特性に近く、ハードニングが発生すると曲線的な動きとなった。

2) 履歴特性が囲む面積から、等価減衰係数を求めると約2%となり、それほど大きな減衰効果は望めなかった。

3) ゴムの圧縮変形に対して、ハードニング領域を考慮した履歴復元力特性として、バイリニア領域とハードニング領域を組み合わせた圧縮ゴムモデルを提案した。試験結果で得られた変位の時刻歴波形を用い、前述の圧縮ゴムモデルによって荷重曲線の再現を試みた結果、地震応答解析に用いるには十分な実用可能なモデルと考えられる。

4) 5径間連続橋を有限要素でモデル化し、圧縮ゴム特性を持った非線形バネを仮定して、反力分散装置を設置した連続橋をモデル化した。端部、中間部の橋脚ともほぼ同様な応答を示しており、反力分散装置として十分な特性を持っていることがわかった。また、変形が小さく抑えられる一方、加速度波形には衝撃的なパルス波形が含まれているのがわかる。橋脚基部での断面力も同様な衝撃的応答となる。

謝辞：供試体の載荷実験にあたっては、立命館大学理工学部土木工学科の児島教授、高木助教授および同大学大学院生の松尾真紀氏にお世話になった。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 鈴木亮介：連続桁構造物の水平反力分散方法、日本国特許庁、公開特許公報、昭63-114705、1988年5月

表-5 橋脚の最大応答値

	P1橋脚	P2橋脚
桁の加速度応答	443 gal	436 gal
桁と橋脚の相対変位応答	3.2cm	3.19cm
反力分散装置の復元力	22.0tonf (0.216MN)	21.8tonf (0.214MN)
反力分散装置の履歴吸収エネルギー	1.03tonf·m (1.01MN·m)	1.03tonf·m (1.01MN·m)
橋脚基部の曲げモーメント	1020tonf·m (10.0MN·m)	1010tonf·m (9.90MN·m)
橋脚基部のせん断力	207tonf (2.03MN)	205tonf (2.01MN)