

## 機能分離型免震支承装置によるマルチレベル地震動への対応

吉田貴行<sup>1</sup>・伊津野和行<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 立命館大学大学院 理工学研究科 環境社会工学専攻 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 立命館大学助教授 理工学部土木工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

### 1. はじめに

阪神・淡路大震災による道路橋示方書の改訂により、新設橋梁のみならず、既存橋梁の耐震補強にもゴム支承が使用されるようになった<sup>1)</sup>。しかし、既存橋梁では、必ずしもゴム支承の設置空間が十分に確保されているとは限らず、大幅な縦断勾配変更も不可能な場合が多い。従来の免震ゴム支承は背が高く、大反力用になると広い設置面積も必要である。また、既存橋梁の免震化では、桁遊間の制約により、大変形になると桁同士が衝突する可能性が生じる場合もある。さらに、橋脚補強のみが先行しているなど設計条件の制約もあり、従来の免震ゴム支承を利用しにくい場合も多い。

そこで、平常時の荷重に対する支承の働きと、地震荷重に対するバッファの働きとを分離し、従来の線支承の交換にも用いることができるような、背の低い機能分離型免震支承装置が開発された<sup>2)</sup>。

死荷重とは無関係にゴムバッファの剛性を設定することができるため、バッファ剛性を低くして免震効果を期待することも、バッファ剛性を高くして変位応答を抑制することも可能である。しかし、加速度応答と変位応答とはトレードオフの関係にあり、加速度応答を抑制すれば変位応答は大きくなり、変位応答を抑制すれば加速度応答は大きくなる。通常のゴム支承と同様に、免震効果を期待すれば変位応答は大きくなり、レベル1地震動でも隣接部材が衝突することになりかねない。逆に、変位応答を小さく抑えようとするれば、桁の加速度応答は大きくなり、免震効果は期待できない。

この問題を解決するため、本研究では、機能分離をさらにおしすすめ、地震時をレベル1とレベル2地震時に分離して考える装置を提案する。地震時荷重を震度法レベルと地震時保有耐力照査法レベルの2段階に分け、それぞれの荷重に対して機能する部材を考えることにより、マルチレベル地震動へ対応することが可能である。ここでは、その地震応答特性について、数値解析的な検討を行う。

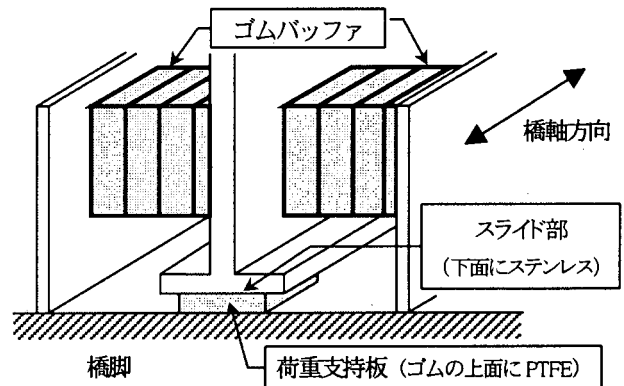


図-1 機能分離型免震支承装置の概念図

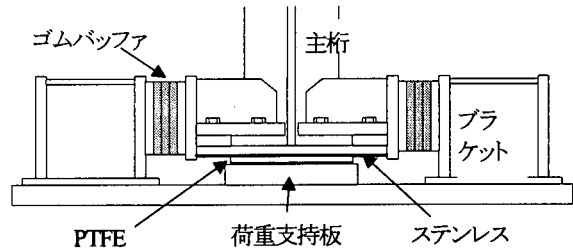


図-2 機能分離型支承装置の取付図

### 2. 機能分離の考え方

機能分離型免震支承は、図-1に示すように、荷重支持板とその上に設けられたスライド部、および側面に取り付けられたゴムバッファからなる。

荷重支持板は薄いゴムからなり、常時の鉛直荷重支持と、桁の回転吸収を行う。スライド部は、図-2に示すようにPTFEとステンレスとの間ですべり摩擦が生じることを利用し、地震時における橋軸方向の揺れの長周期化と摩擦減衰の付加をねらっている。ゴムバッファは天然ゴムの積層ゴムからなり、地震時におけるすべりに対するバネして働く。また、図-3に示すように、本研究で提案するマルチレベル地震動対応の支承装置は、レベル1用、レベル2用バッファに分離されている。レベル1地震動

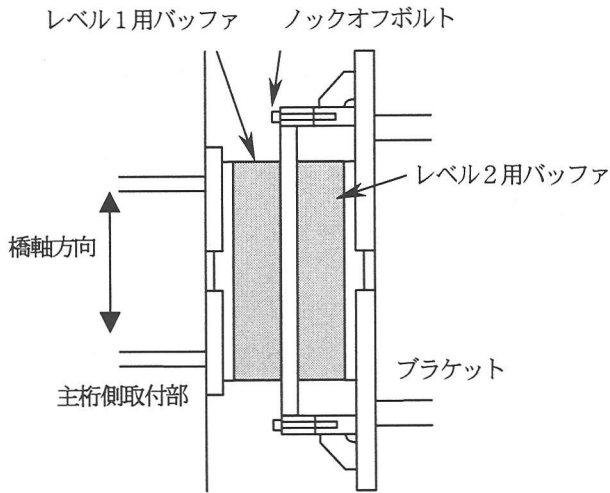


図-3 マルチレベルバッファの平面図

に対しては、レベル1用バッファにより、地震時水平力分散と変位制限装置として働く。レベル2地震動に対しては、ノックオフボルトの破壊により、レベル1用バッファに加え、レベル2用バッファが作用する。それにより、免震効果を期待し、十分な長周期化を行うものである。

### 3. 解析方法

#### (1) 対象橋梁

本研究で対象とした橋梁は、図-4 に示す橋長 140m の 3 径間連続橋である。桁は鋼製、橋脚はRC製とした。また、地盤種別はI種で、各橋脚および橋台の支承に機能分離型免震支承が採用されているものとする。

#### (2) 解析モデル

解析あたり、図-5 に示すように、対象橋梁を多質点系の骨組構造モデルとしてモデル化をおこなった。以下の非線形地震応答解析には、汎用地震応答解析ソフトウェア TDAP III<sup>3)</sup> を用いた。

橋脚のモデル化に際しては、水平バネを用いた。また、非線形性を考慮し、図-6 に示すように、履歴復元力特性はバイリニアの骨格を持った剛性劣化 (Takeda) 型を用いた。設計降伏震度は 0.5 と仮定した。橋台は変位しないものとし、橋台天端を固定点とした。

次に、支承装置のモデル化は、図-7 に示すように、4 本のバネを組み合わせるによりモデル化をおこなった。バネ1はすべり部分を表しており、図-8 に示すように、バイリニア型の履歴復元力特性を持たせることにより、摩擦力を評価した。モデル化に用いたパラメータを表-1 に示す。P<sub>1</sub>は摩擦係数 (0.1 に設定) に死荷重反力を乗じることによって求められる。δ<sub>1</sub>は荷重支持板の微

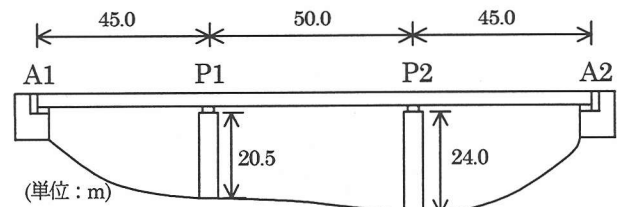


図-4 対象橋梁

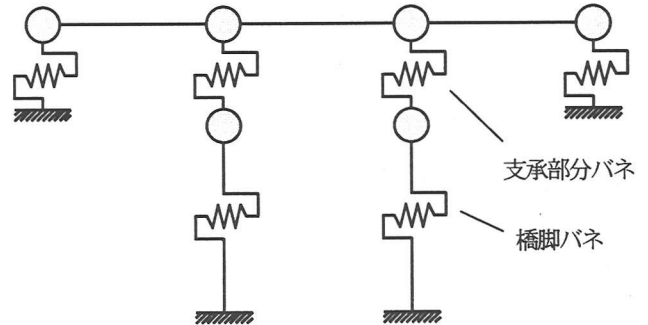


図-5 全体モデル

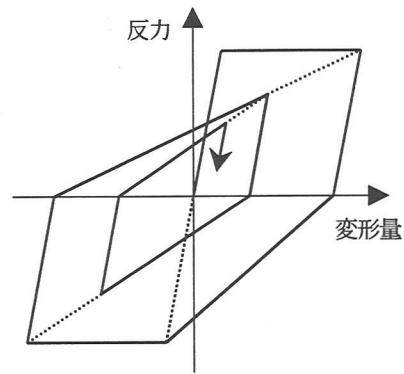


図-6 橋脚の履歴特性

表-1 入力パラメータ

		バネ定数 (MN/m)
橋脚バネ	P1	30
	P2	17
支承バネ 橋台部分 (A1,A2)	k <sub>1</sub>	98
	k <sub>2</sub>	7
	k <sub>3</sub>	98
	k <sub>4</sub>	3
支承バネ 橋脚部分 (P1,P2)	k <sub>1</sub>	98
	k <sub>2</sub>	19
	k <sub>3</sub>	98
	k <sub>4</sub>	9

少なせん断変形として考え、実験結果<sup>2)</sup>を参考に、剛性 k<sub>1</sub> から設定した。バネ2はレベル1用バッファで、線形弾性モデルを使用し、剛性 k<sub>2</sub> を仮定している。バネ3はノックオフボルトを表し、図-9 に示すように、破壊を考

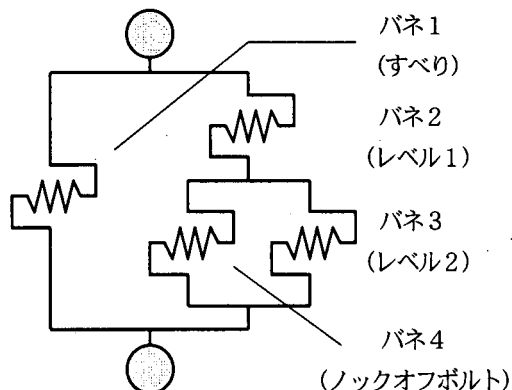


図-7 支承部分モデル

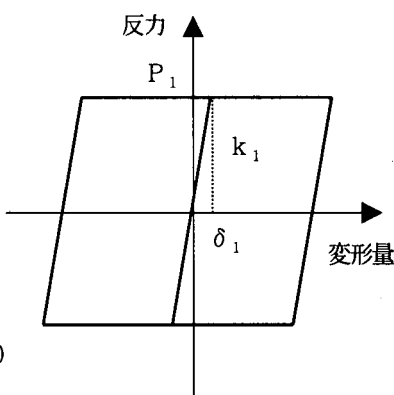


図-8 すべり部分の履歴特性

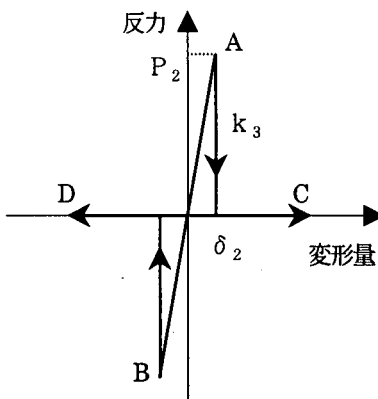


図-9 ノックオフボルトの履歴特性

表-2 最大応答値

地震波 解析ケース	レベル2 タイプ I		レベル2 タイプ II		レベル1	
	ケース1	ケース2	ケース1	ケース2	ケース1	ケース2
桁加速度 (gal)	500	350	500	300	130	130
橋脚天端 加速度 (gal)	P1 430	P2 420	630	610	160	160
橋脚反力 (MN)	P1 4.1	P2 3.9	4.1	4.1	1.9	1.9
支承装置全体 の変位 (cm)	A1 35	A2 34	34	30	7.2	7.2
	P1 19	P2 29	18	26	1.8	1.8
	P2 8	A2 14	10	12	0.5	0.5
橋脚変位 (cm)	A2 34	P1 16	34	30	7.2	7.2
	P2 27	P2 23	27	25	7.0	7.0

慮したバネモデルを採用した。図中の剛性  $k_3$  を高く設定することにより、変形しない部材とみなし、また、降伏設計震度 0.3 と仮定することにより破壊時の  $P_2$  を決定した。履歴経路は、点 A または B どちらかに達するまでは線形とし、どちらかに達すると、破壊したと判定する。その後は、荷重を受け持たずに、直線 CD 上を移動する。バネ 4 はレベル 2 用バッファで、線形弾性モデルを使用し、剛性  $k_4$  を仮定している。バネ 3、バネ 4 を並列に設置することにより、ノックオフボルトのバネ 3 の破壊後は、レベル 2 用バッファのバネ 4 が作用することになる。今回の解析では、レベル 2 用のバッファの剛性を決定するにあたって、固有周期を参考に決定した。レベル 1 用バッファのみ使用時に固有周期が 1.6 秒であったのを、レベル 1、レベル 2 用バッファを両方使用した時の固有周期を 2.5 秒前後にするように考慮した結果、レベル 1 用バッファの剛性の半分とした。

### (3) 入力地震波および解析ケース

入力地震波は、道路橋示方書 V 耐震設計編に基づく標準入力例<sup>4)</sup>のうち、I 種地盤用レベル 1 地震波、I 種地盤用レベル 2 タイプ I 地震波の波形 1、I 種地盤用レベ

ル 2 タイプ II 地震波の波形 1 の 3 波形を用いて解析を行う。

また、解析は、支承部分を次のように変化させた 2 つのケースによりおこなう。地震時水平力分散に主眼をおき、レベル 1 地震時の変位を抑えることを考えたケース 1、今回提案するマルチレベル地震動対応のケース 2 である。ケース 1 では、バッファを二段階にしない図-2 のような従来型の装置を想定し、バネ 4 の破壊をなくすことによりシミュレーションをおこなう。

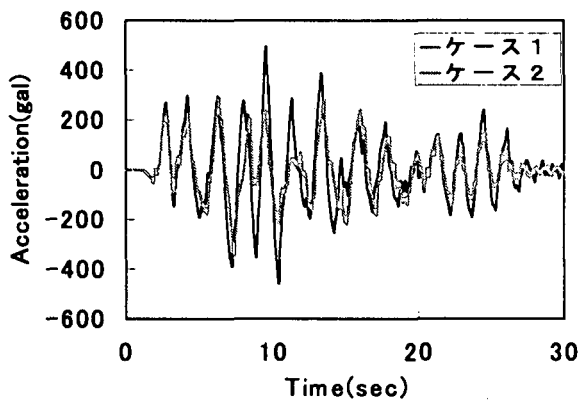
## 4. 解析結果

各最大応答値を、表-2 に示す。

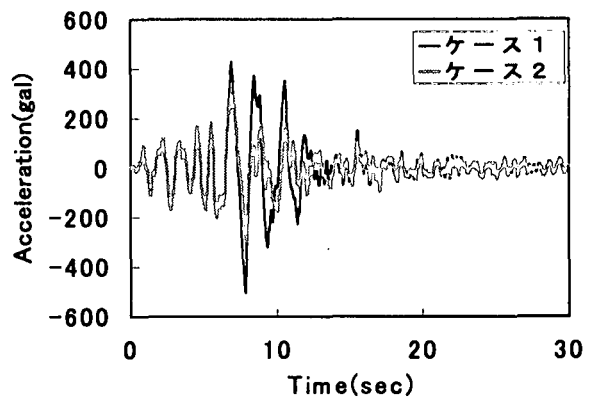
### (1) レベル 2 地震動による応答の検討

レベル 2 地震動による効果を検討するため、タイプ I 地震波、タイプ II 地震波におけるケース 1 とケース 3 の応答値の比較をおこなった。以下、ケース 1 の応答値をもとに、ケース 3 の応答値と比較した。

桁の最大応答加速度は、タイプ I 地震波で 500gal が 350gal と 30% 低減され、タイプ II 地震波で 500gal が

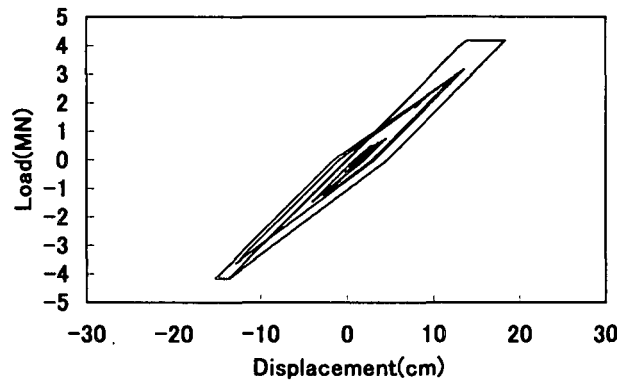


a) タイプI地震波

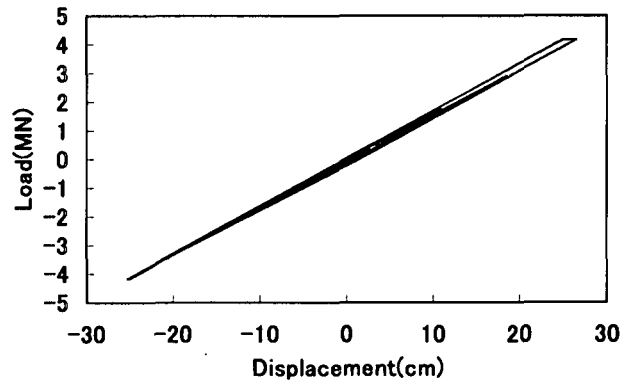


b) タイプII地震波

図-10 桁加速度の時刻歴応答波形

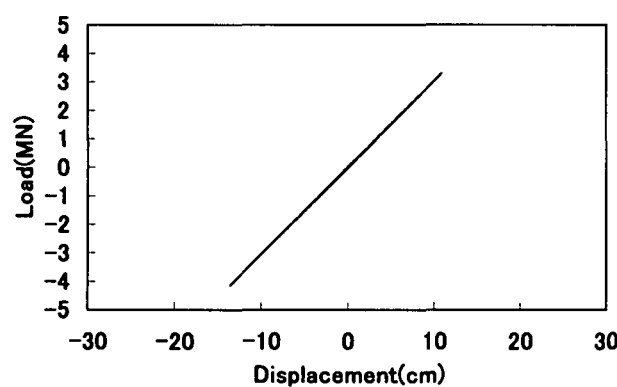


a) P1

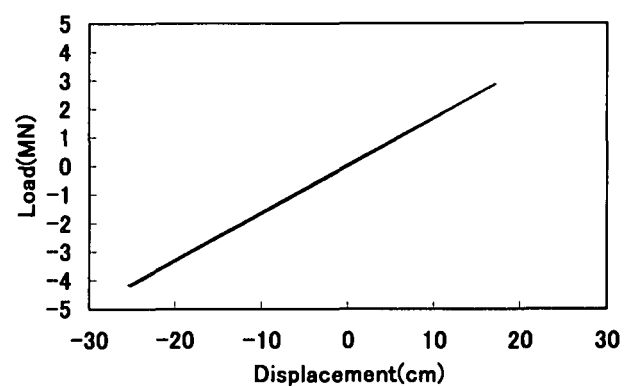


b) P2

(i) ケース1



c) P1



d) P2

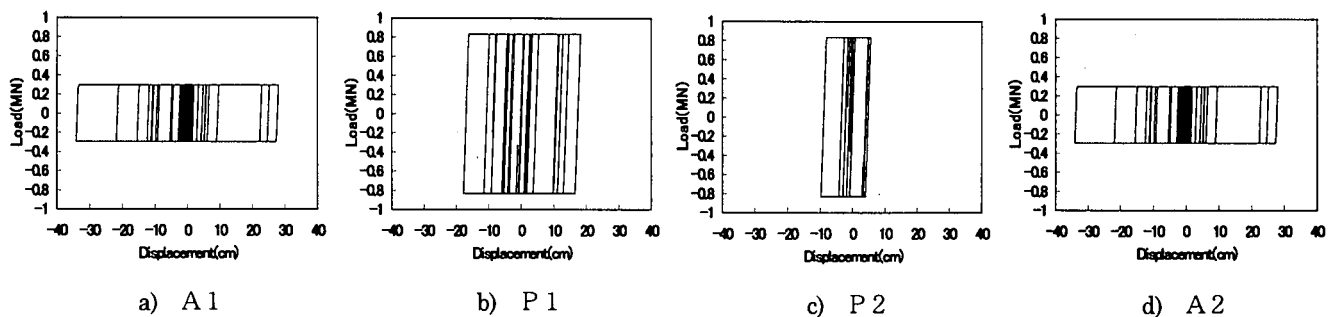
(ii) ケース2

図-11 レベル2タイプII地震波における橋脚の履歴応答

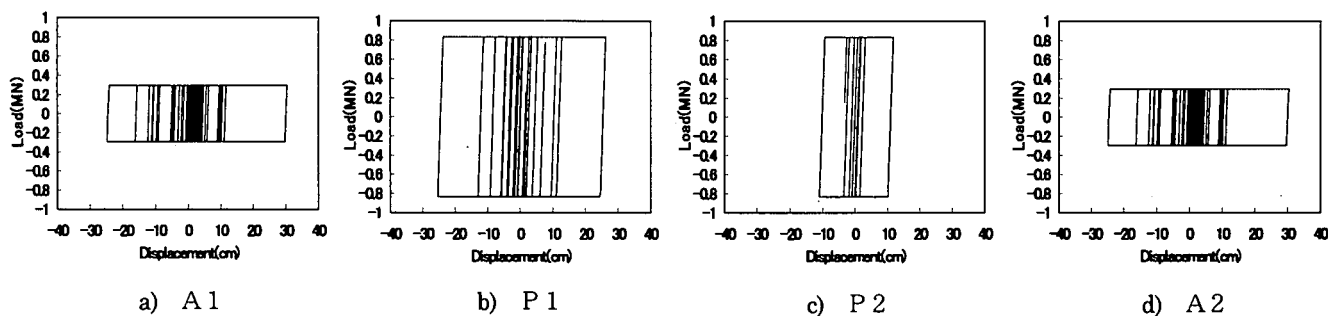
300galと40%低減された。桁の応答加速度を小さく抑えることより、十分な免震効果が確認される。また、橋脚天端の加速度を比較すると、タイプI地震波においては、P1で430galが420galと3%減少、P2で460galが360galと22%減少、タイプIIにおいては、P1で630galが610galと3%減少、P2で460galが440galと5%減少であった。橋脚の加速度応答には、さほど変化は見られない。

図-10に示す桁加速度の時刻歴応答波形を比較すると、タイプI地震波では、橋台部分と橋脚部分の破壊時刻が約4秒ずれていることから、長周期化は少なかったが、タイプII地震動では、6秒でノックアウト破壊後にケース2の方が若干長周期化されているのがわかる。また、最大値のみならず、全体的に応答が抑えられている。

図-11に、レベル2タイプII地震波における橋脚の履歴応答を示す。橋脚は、タイプI地震波、タイプII地震波



(i) ケース1



(ii) ケース2

図-12 レベル2タイプII地震波における支承部の履歴応答

共にケース2ではほとんど非線形域に入らず、線形域での応答変位であった。ケース1では、橋脚は全て非線形域に入っており、変位は増加している。これは、レベル2バッファ使用により、バッファが変位した分、橋脚への負担が小さくなり、変位が小さくなったと考えられる。

支承装置全体の変位については、タイプI地震波においては、それぞれ、A1では34cmのまま変化なし、P1で19cmから29cmと53%増加、P2で8cmから14cmと75%増加、A2では34cmのまま変化なしであった。タイプII地震波では、それぞれ、A1で34cmから30cmと12%減少、P1で18cmから26cmと44%増加、P2で10cmから12cmと20%増加、A2で34cmから30cmと12%減少であった。図-12にレベル2タイプII地震波における支承部の履歴応答を示す。タイプI地震波、タイプII地震波で共に橋台部分での変化に比べ、橋脚部分での増加が著しい。これは、橋台は変位しないと仮定しているのに対し、ケース2では橋脚の変位が小さくなった分、バッファの変位として現れたためであると考えられる。また、橋台部分の変位は、タイプI地震波で変化なし、タイプII地震波で減少であった。このことより、レベル2用バッファ使用による、桁全体の変位の増加はなく、橋脚変位は減少しており、より効果的な免震化がおこなえたことがわかる。

## (2) レベル1地震動による応答の検討

レベル1地震動に対する応答結果を前出の表-2に示

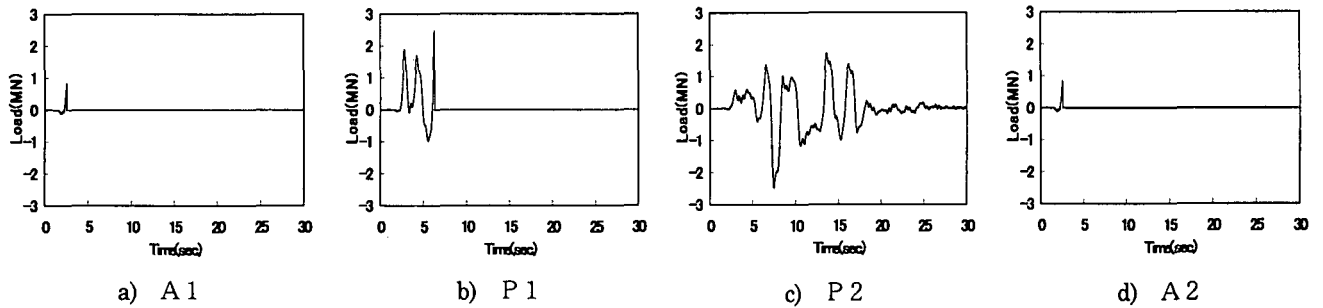
す。ノックオフボルトが破壊しない場合、ケース1もケース2も同じ応答結果になる。

橋台部分の支承装置全体の変位より、桁全体の変位は7.2cmであった。解析対象橋梁の桁遊間は10cmに設定されており、レベル1地震動に対応て、隣接桁との衝突を防ぐ効果があると考えられる。また、レベル1地震動でのノックオフボルトの破壊は見られず、適切なモデル化であったことがわかる。ノックオフボルトは、ジョイントプロテクターとして働いていると考えることができる。

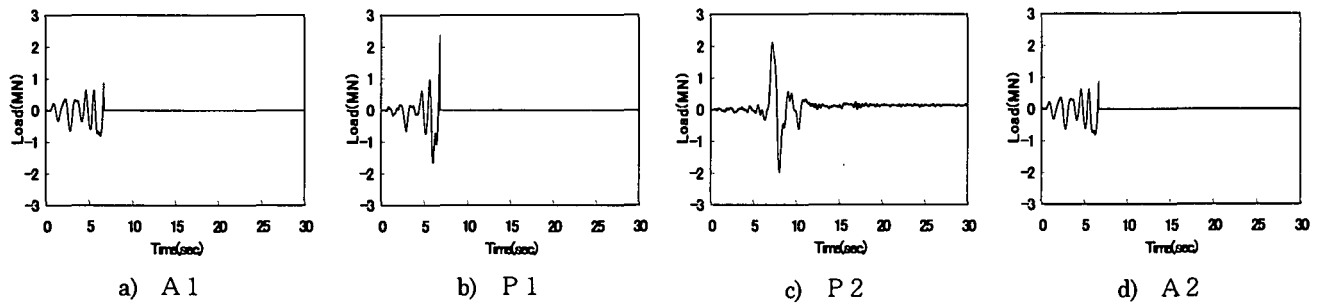
## (3) 破壊時の条件の検討

ノックオフボルトの破壊時刻に注目することにする。図-13にノックオフボルトの反力の時刻歴応答波形を示す。P2橋脚以外の波形は途中から反力がゼロになっている。反力がゼロになった時点で、ノックオフボルトが破壊したことを表している。タイプI地震動、タイプII地震動共に、P2橋脚部分では、最後まで反力を受け持っている。これより、P2橋脚部分では破壊はなかったものと判断できる。破壊に至らなかった原因としては、P2橋脚の剛性をP1橋脚より低く仮定したため、破壊に至らなかったと考えられる。

橋台とP1橋脚部分では、すべて途中で反力を受け持たなくなっている。これより、その時点で破壊が起こったものと判断できる。破壊時刻は、タイプI地震波では、A1で2.5秒、P1で6.2秒、A2で2.5秒であった。タ



(i) レベル2タイプI地震波



(ii) レベル2タイプII地震波

図-13 ノックオフボルトの反力の時刻歴応答波形

タイプII地震波では、A1で6.6秒、P1で6.8秒、A2で6.6秒であった。タイプI地震波では、橋台のノックオフボルトが先に破壊し、その後、P1橋脚のノックオフボルトが破壊に至っている。タイプII地震波では、ほぼ同時に破壊に至っている。これは、タイプI地震波は、大振幅が何度も繰り返して作用する地震動であるのに対し、タイプII地震波は、衝撃的な地震動あり、地震波特性の違いによるものであると考えられる。破壊時の支承装置全体の変位は、すべて14cm前後であった。このことより、支承装置全体の変位によって破壊時の条件が評価されることがわかった。

## 5. まとめ

本研究では、マルチレベル地震動に対応した機能分離型免震支承装置について検討した。提案した装置によって、レベル2地震動に対しては、桁の加速度を抑え、橋脚の塑性化も抑制できた。また、それによる桁変位の大幅な増加もなく、免震化がおこなえた。レベル1地震動に対しても、支承装置全体の変位を抑えることより、変位制限もおこなえた。これらより、マルチレベル地震動への十分な対応が確認された。

今後は、レベル2用バッファの剛性をどのように設定していくかが課題である。今回は全てレベル1用バッファの半分として解析をおこなったが、橋脚剛性の違いなどにより、挙動がP1とP2で違ってしまい、場合によっては、効果的な免震がおこなえないこともあり得る。そこで、構造物全体での免震設計をおこない、P1、P2での最適な合成した剛性を決定した上で、レベル2用バッファを決定していけばよいと考える。また、ノックオフボルトの破壊条件や、支承装置全体の変位条件なども考慮に入れた上で、詳細設定をおこなえば、より信頼性の高い解析がおこなえると思う。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、V耐震設計編、1996。
- 2) 伊津野和行、袴田文雄、佐藤大輔、中村一平：橋梁の機能分離型免震すべり支承に関する実験的研究、第10回日本地震工学シンポジウム、Vol. 3、pp.2783-2788、1998。
- 3) 株式会社アーク情報システム：TDAP III、Ver2.00、理論説明書、1998。
- 4) 日本道路協会：時刻歴応答解析に用いる標準地震入力例、1996。