

マルチレベル地震動対応の機能分離型免震支承装置を用いた構造物の非線形動的解析

吉田 貴行¹・伊津野 和行²

¹学生員 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)

²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)

荷重支持と桁の回転吸収という常時の機能を受け持つ荷重支持板と、地震時の減衰付加と水平力分散という機能を受け持つバウファおよびスライド部からなる、機能分離型免震支承装置が開発された。本研究では、機能分離をさらにおしすめ、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。数値シミュレーションにより、地震時における支承装置の挙動特性、および構造物全体系への影響を検討した。レベル1地震動に対して地震時水平力分散として、レベル2地震動に対して免震として機能することにより、この支承装置がマルチレベル地震動に対して効果的に対応できることを示した。

Key words: nonlinear dynamic response analysis, sliding bearing, multi level earthquake, knock-off system

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¹⁾。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ウ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²⁾。

死荷重とは無関係にゴムバウファの剛性を設定することができるため、バウファ剛性を低くして免震効果を期待することも、バウ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れば、桁の加速度応答は大き

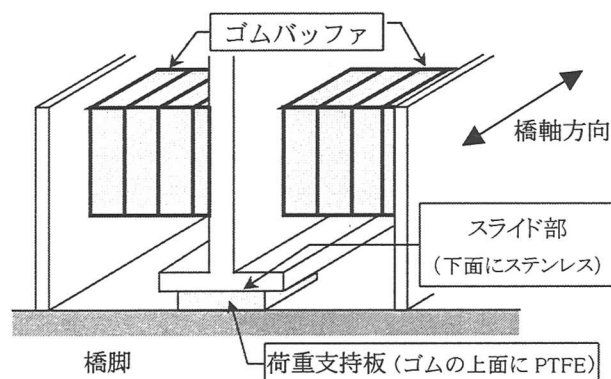


図-1 機能分離型免震支承装置の概念図

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。

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

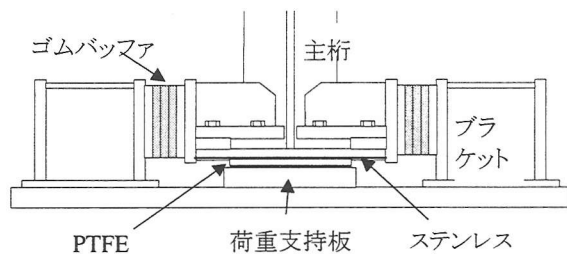


図-2 機能分離型支承装置の取付

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として働く。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、ロ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

本研究では、機能分離型免震支承装置が設置されている橋梁をモデル化、非線形動的解析を行うことにより、支承装置自体の挙動、及び橋梁全体の挙動への影響の検討を行った。今回の解析では、都市部における高速道路などの高架橋を想定し、図-4 に示す区間を対象とした。既存の単純桁の高架橋の連続化が行われたことを想定し、P2からP5までは3径間連続桁となっている。桁はPC製、橋脚はRC製とした。地盤種別はⅡ種で、単純桁部分は固定-可動形式の鋼製支承となっており、連続桁部分の支承として機能分離型免震支承装置が採用されているものとする。

解析あたり、対象橋梁を多質点系の2次元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TDAPⅢを用いた。

なお、本研究で用いたモデルは、支承装置の有効性について検討するためのものであり、実際の高架橋データ

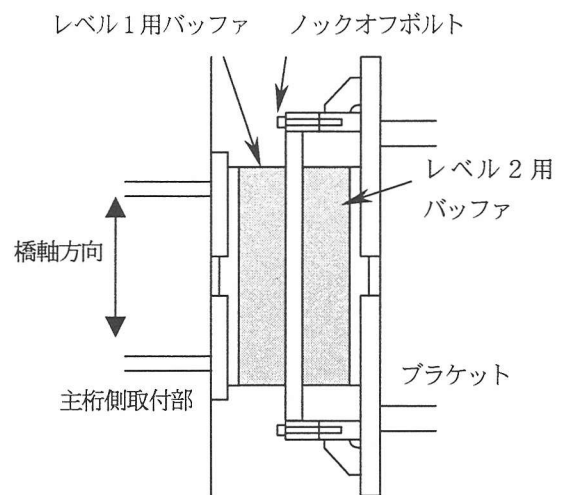


図-3 マルチレベルバッファの平面図

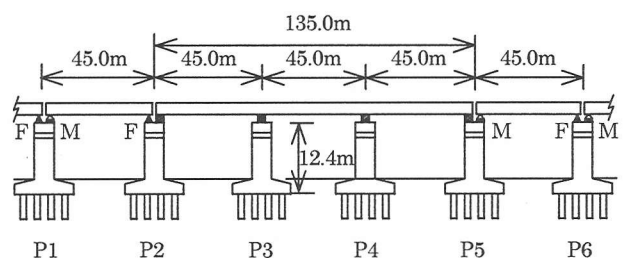


図-4 対象橋梁図

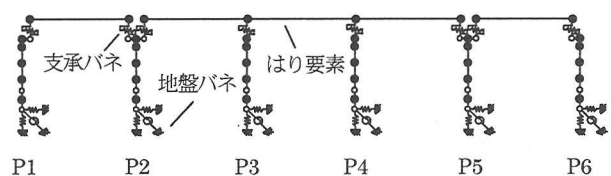


図-5 全体モデル図

を用いたものではない。簡単化のため、橋脚も支承条件に関わらず同じモデルとしている。

(1) 構造全体のモデル化

桁および橋脚のモデル化に際しては、はり要素を用い、各節点に集中質量を与えることにより重量を持たせた。また、高架橋の一部を対象としているため、モデル化しなかった部分の影響も考慮する必要があると考えられる。そのため、P1橋脚天端に固定支承を支えている影響として、隣接桁重量の90%を負荷し、P6橋脚天端に可動支承を支えている影響として隣接桁重量の10%を負荷した。構造物全体のモデル図を図-5示す。今回の解析において用いた各部材の減衰定数は、桁および橋脚のはり部材に対して0.02、地盤バネに対して0.2を与えた。橋脚は塑性化することが予想されることから、非線形性を考慮す

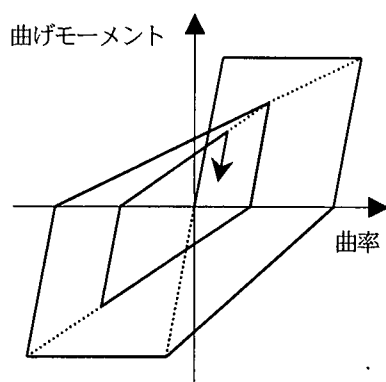


図-6 橋脚の履歴特性

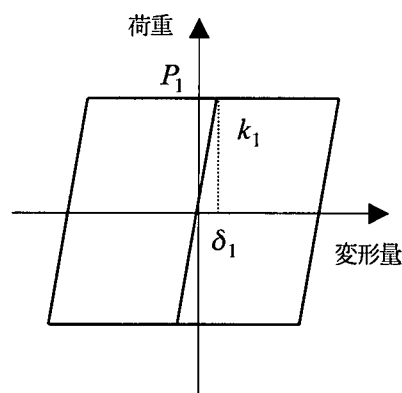


図-8 すべり部分の履歴特性

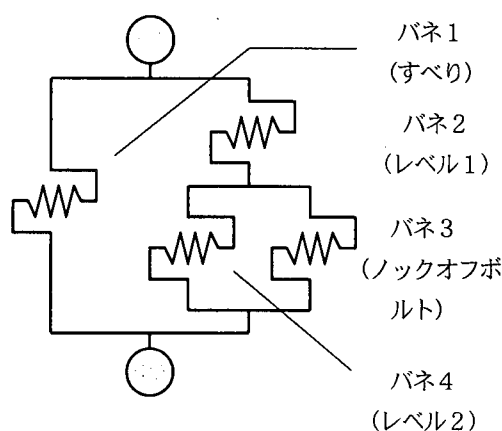


図-7 支承部分モデル

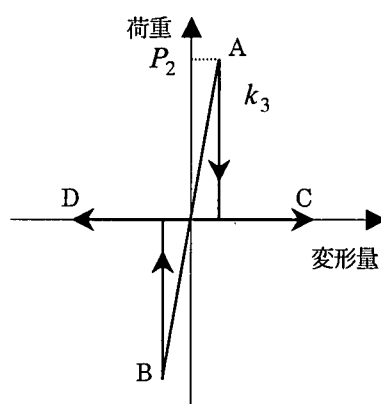


図-9 ノックオフボルトの履歴特性

ることとし、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。地盤および基礎のモデル化に際しては、水平・鉛直・回転の3方向に線形バネを設定した。

(2) 支承のモデル化

支承部分のモデル化に際しては、バネ要素を用いた。固定支承は、剛性の高いバネを水平・鉛直方向に設定し、橋軸直角方向を軸とする回転方向は自由に挙動するように設定した。

可動支承は、橋軸方向にバイリニア型の履歴復元力特性を持った非線形バネ要素を設定した。また、摩擦係数 0.05 と仮定することにより、摩擦力を評価した。なお、今回の解析では移動制限は考慮していない。鉛直方向には剛性の高いバネを設定し、橋軸直角方向を軸とする回転方向は自由に挙動するように設定した。

次に、機能分離型免震支承装置のモデル化は、図-7 に示すように、4本の水平バネを組み合わせること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。P₁は摩擦係数 (0.1 に

表-1 入力パラメータ

	バネ定数 (MN/m)
k ₁	49.0
支承部分 k ₂	14.7
水平バネ k ₃	980.0
k ₄	2.9

設定) に、死荷重反力を乗じることによって求められる。δ₁は荷重支持板の微小なせん断変形として考え、実験結果 2を参考に、剛性 k₁ を設定した。バネ2はレベル1用バツファを表し、線形とし、剛性 k₂ 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、破壊を考慮したバネモデルを採用した。図中の剛性 k₃ 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、降伏設計震度を一律 0.3 と仮定することにより破壊時の P₂ 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用バツファを表し、線形とし、剛性 k₄ 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用バツファのバネ4が作用することになる。今回の解析では、レベル2用のバツファの剛性を決定す

表-2 各最大応答値（ケース1～3）

地震波	レベル2タイプⅠ		レベル2タイプⅡ		レベル1	
解析ケース	ケース1	ケース2	ケース1	ケース2	ケース2	ケース3
桁加速度 (gal)	730	370	1010	350	180	120
橋脚天端 (gal)						
P2	470	410	680	790	170	180
P3	630	1280	1110	1300	190	230
P4	630	1330	1110	1300	190	230
P5	480	1540	830	1350	200	220
基部曲げモーメント (MN・m)						
P2	56.8	56.4	56.8	56.8	26.1	24.4
P3	56.8	36.0	56.8	33.3	18.2	15.2
P4	56.8	35.9	56.8	33.3	18.2	15.2
P5	56.8	33.6	56.8	29.7	14.6	12.1
支承装置全体の変位 (cm)						
P2	29.8	49.7	42.0	59.2	3.4	8.8
P3	31.2	43.1	44.7	50.0	4.3	7.2
P4	31.2	43.1	44.7	50.0	4.3	7.2
P5	32.2	44.4	48.7	51.5	5.0	8.6
橋脚変位 (cm)						
P2	14.2	10.7	32.1	26.3	4.8	4.5
P3	11.9	7.0	23.0	5.6	3.3	2.7
P4	11.9	7.0	23.0	5.6	3.3	2.7
P5	10.8	6.3	18.0	5.0	2.8	2.1

るにあたって、固有周期を参考に決定した。非免震時のP2～P5部分の固有周期が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倍の3.2秒前後にすることを目標とした。試算の結果、レベル2用バッファ剛性をレベル1用バッファの剛性の5分の1と設定した。

(3) 入力地震波および解析ケース

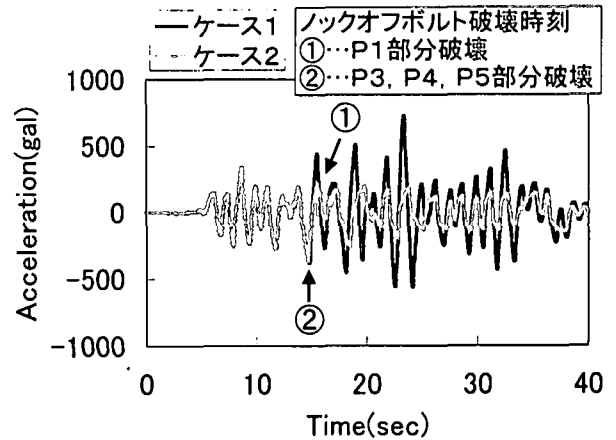
入力地震波は、道路橋示方書V耐震設計編に基づく標準入力例④のうち、Ⅱ種地盤用レベル1地震波、Ⅱ種地盤用レベル2タイプⅠ地震波の波形1、Ⅱ種地盤用レベル2タイプⅡ地震波の波形1の3波形を用いて解析を行う。

また、解析は、基本ケースとして支承部分を次のように変化させた3つのケースにより行う。地震時水平力分散に主眼を置き、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、レベル2地震時に免震効果を得ることを考えたケース3である。ケース1、3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。ケース3では、ケース2のレベル2地震時において、レベル1用およびレベル2用バッファが同時に作用する場合と等価になるように、バッファ剛性 k^* を次式より求めた。

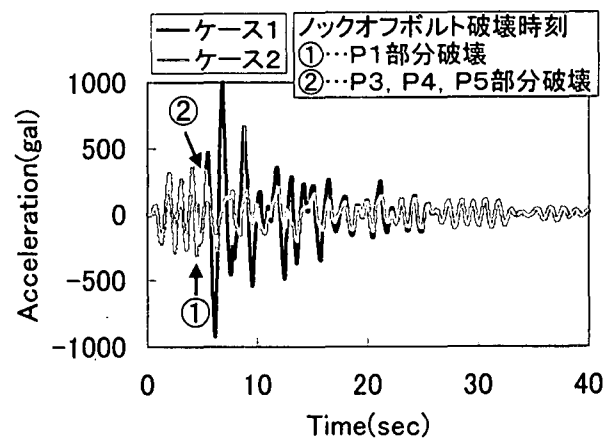
$$k^* = \frac{1}{\frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_4}} \quad (1)$$

ここで、 k_2 はレベル1用バッファの剛性、 k_4 はレベル2用バッファの剛性である。

4. 解析結果



(a) レベル2タイプⅠ地震波



(b) レベル2タイプⅡ地震波

図-10 桁の加速度応答波形

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地震波における地震時水平力分散を目的としたケース1と、マルチレベル地震動対応のケース2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2の応答値と比較した。

桁の最大応答加速度は、地震時水平力分散のケース1に対してマルチレベル地震動対応のケース2を比較すると、タイプⅠ地震波で730galが370galと49%低減され、タイプⅡ地震波で1010galが350galと65%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。図-10に示す桁加速度の時刻歴応答波形の比較を行った。全橋脚におけるロックオフボルト破壊後は、最大値のみならず、全体的に応答が抑えられている。また、スペクトル解析を行った結果、タイプⅠ地震波では、マルチレベル地震動対応のケース2の方が卓越周波数が低周波数領域にあり、若干長周期化されていることがわかった。タイプⅡ地震波では、長周期化はタイ

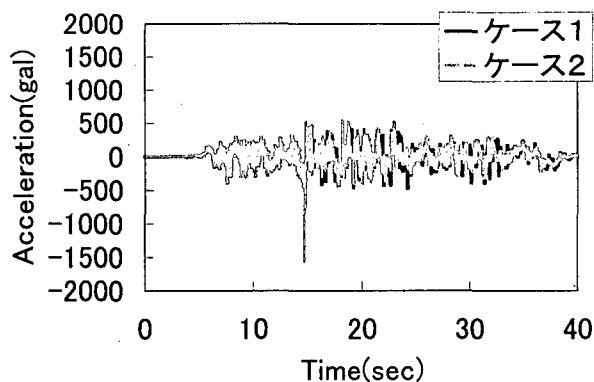


図-11 橋脚の加速度応答波形 (レベル2タイプI地震波, P5)

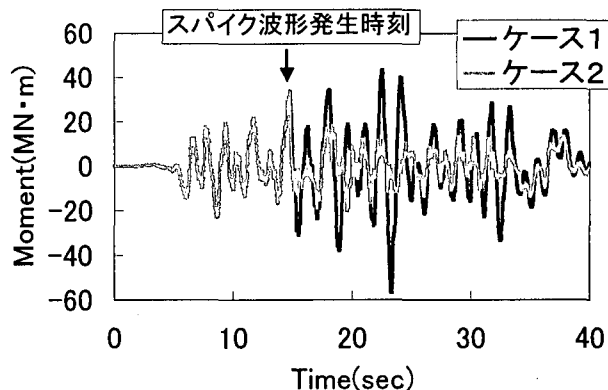


図-12 橋脚基部の曲げモーメント応答波形 (レベル2タイプI地震波, P5)

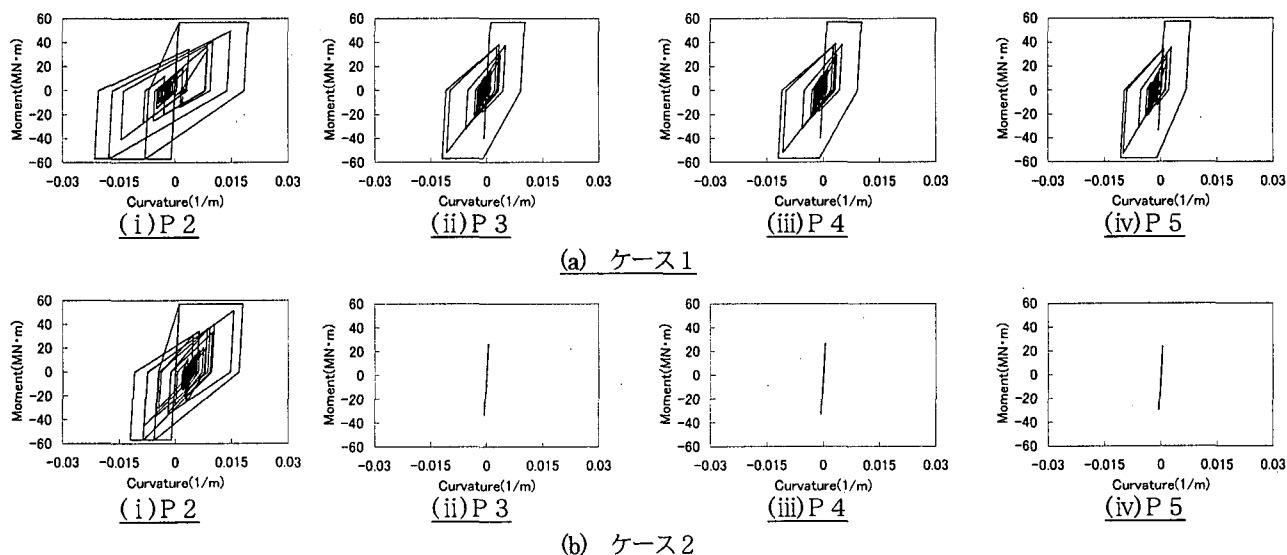


図-13 橋脚基部の履歴応答 (レベル2タイプII地震波)

プ1地震波の場合と比べると、さほど明確ではなかった。この違いは地震波の特性による違いで、大きな振幅が長時間繰り返して作用するタイプI地震波のほうが、長周期化がより顕著に現れたものであると考えられる。

橋脚天端の加速度において、地震時水平力分散のケース1に対してマルチレベル地震動対応のケース2を比較すると、タイプI・タイプII地震波いずれにおいても、P2橋脚以外は増加している。大きく増加している部分では、加速度の時刻歴応答波形に、スパイク波形が瞬間的に生じて最大値が大きくなっている (図-11の時刻15秒付近)。図-12に示す同橋脚の基部の曲げモーメントの時刻歴応答波形を見てみると、加速度にスパイク波形が生じた時刻付近で曲げモーメントは大きくなっているが、地震時水平力分散のケース1と比較しても大きな増加はなく、スパイク波形発生による橋脚基部への影響は少ないと考えられる。

図-13に、橋脚基部の履歴応答を示す。レベル2タイプII地震波において、マルチレベル地震動対応のケース2

では、P2橋脚以外は全て線形域での応答変位であった。それに対し、地震時水平力分散のケース1では、橋脚は全て非線形域に入っており、橋脚変位は大きく増加している。また、タイプI地震波では、マルチレベル地震動対応のケース2では全て線形域での応答であり、地震時水平力分散のケース1ではP2・P3・P4橋脚が非線形域に入っており、橋脚変位は大きく増加している。これらは、マルチレベル地震動対応のケース2ではレベル2バッファ使用により、橋脚への負担が小さくなり、地震時水平力分散のケース1に比べて変位が小さくなったと考えられる。また、いずれのケースにおいてもP2橋脚基部の曲げモーメントが大きくなる原因としては、隣接桁の固定支承を支えている影響で地震荷重が大きくなったためであると考えられる。

支承装置全体の変位について、地震時水平力分散のケース1に対してマルチレベル地震動対応のケース2の比較を行った。タイプI地震波においては、それぞれ、P2では29.8cmから49.7cmと67%増加、P3・P4で

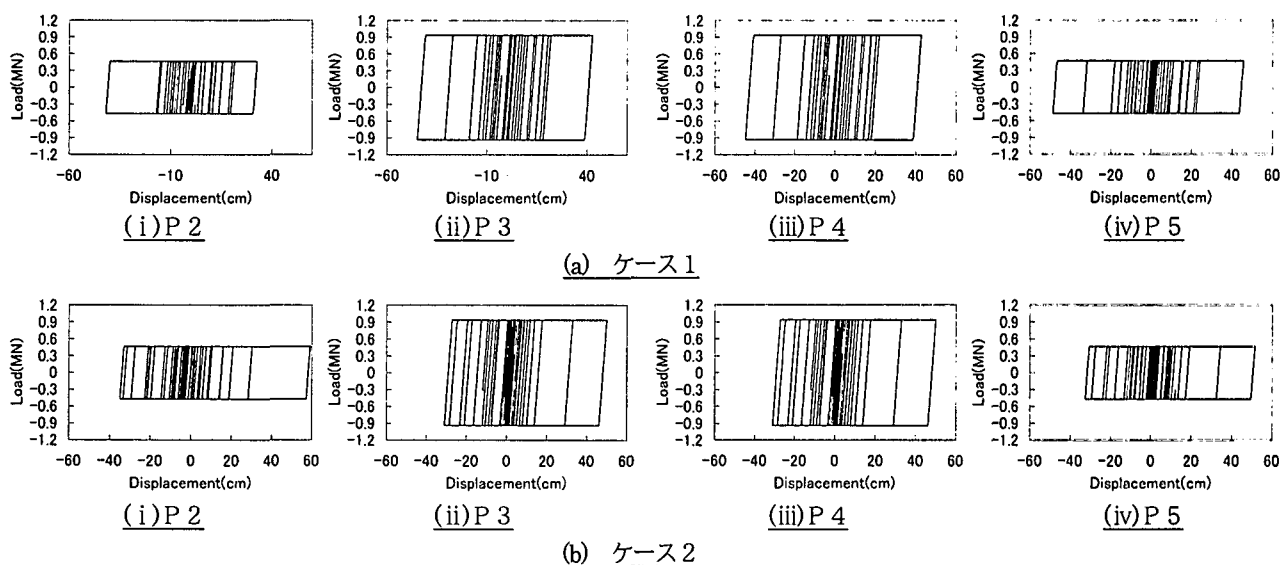


図-14 支承部分の履歴応答（レベル2タイプⅡ地震波）

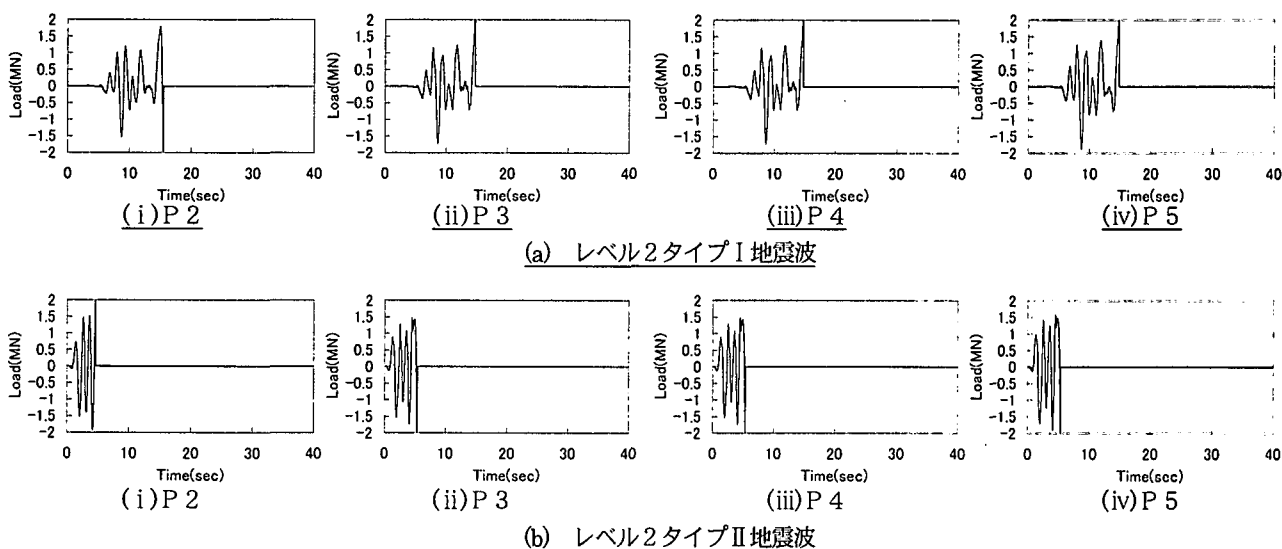


図-15 ノックオフボルトの荷重の応答波形

31.2cm から 43.1cm と 38%増加, P 5 で 32.2cm から 44.4cm と 38%増加であった。タイプⅡ地震波では、それぞれ、P 2 で 42.0cm から 59.2cm と 41%減少, P 3・P 4 で 44.7cm から 50.0cm と 12%増加, P 5 で 48.7cm から 51.5cm と 6%増加であった。図-14 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。

(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。ここでは、マルチレベル地震動対応のケース2と、免震を目的としたケース3の応答値の比較を行う。連続桁部分の桁遊間は伸縮量を考慮してP 2側で 6cm, P 5側では隣接桁の支承が可動支承のため、その影響も考慮して 10cm と想定した。これらは温度変化を考えて、桁長より

算出した値である。マルチレベル地震動対応のケース2ではP 2側での変位は 3.4cm, P 5側での隣接桁との相対変位は 5.4cm であり、桁遊間以内に収まっている。免震を目的としたケース3では、P 2側での変位は 8.8cm, P 5側での隣接桁との桁間の相対変位は 9.8cm であり、P 2側で大きく桁遊間を超えた変位になっている。なお、実際には桁同士での衝突が起こる可能性があるが、今回の解析では衝突は考慮していない。

このことより、マルチレベル地震動対応のケース2ではレベル1地震動に対応して、隣接桁との衝突を防ぐ効果があると考えられる。また、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) ノックオフボルト破壊時刻のずれによる応答への影響

ノックオフボルトの破壊時刻に注目することにする。図-15 にノックオフボルトに作用する荷重の時刻歴応答波形を示す。荷重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。

全ての部分で、途中で荷重を受け持たなくなっている。破壊時刻は、タイプⅠ地震波では、P 2で15.5秒、P 3・P 4・P 5で14.7秒であった。タイプⅡ地震波では、P 2で4.5秒、P 3・P 4・P 5で5.3秒であった。タイプⅠ・タイプⅡ地震波共にP 2部分とP 3・P 4・P 5部分とで、若干ではあるが破壊時間の違いがある。原因としては、P 2橋脚の影響が考えられる。今回の解析では、P 2橋脚は隣接桁の固定支承を支えている影響で、地震時の水平荷重が大きくなる。このことより、P 2橋脚はP 3・P 4・P 5橋脚と違う挙動になり、ノックオフボルトに作用する荷重もP 2橋脚のみ若干違った結果となったと考えられる。また、破壊時の支承装置全体の変位は、すべて10cm 前後であった。

今回の解析では、ノックオフボルトの破壊はP 2部分のみ若干破壊時刻がずれたものの、全ての橋脚におけるノックオフボルトの破壊はほぼ同時に起こった。ノックオフボルトの破壊は、全ての箇所と同時に破壊するのが望ましい。しかし、橋脚条件の違いや隣接径間の影響などで、ノックオフボルトへ作用する荷重が設計と変わってしまい、当初の目標通りに破壊しない場合も考えられる。そこで、一例として、P 5部分のみ、ノックオフボルトの破壊が遅れることを想定して、P 5部分の破壊荷重を、全ての橋脚で同じと仮定したケース2の1.5倍としてケース4の解析を行った。全て箇所のノックオフボルトの破壊がほぼ同時に起こったケース2との比較を行った。

表-3 に各最大応答値を示す。レベル2タイプⅠ地震波、レベル2タイプⅡ地震波の場合の両方共に、破壊荷重を全ての橋脚で同じにしたケース2と比較して、桁加速度は最大5%の変化であった。支承装置の変位応答は、地震波の違いによって、破壊荷重を全ての橋脚で同じにしたケース2と比較して、±10%以内の増減が見られた。しかし、若干の増減であり、ノックオフボルトの破壊が遅れることによる大きな影響はないと考えられる。

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を用いた構造物の非線形動的解析を行うことによって、支承装置の挙動特性、および構造全体系

表-3 各最大応答値（ケース2、4）

地震波 解析ケース	レベル2タイプⅠ		レベル2タイプⅡ	
	ケース2	ケース4	ケース2	ケース4
桁加速度 (gal)	370	390	350	350
橋脚天端 加速度 (gal)	P2	410	790	780
	P3	1280	1300	1300
	P4	1330	1300	1300
	P5	1540	1350	1430
基部曲げ モーメン ト (MN・m)	P2	56.4	56.8	56.8
	P3	36.0	33.3	33.4
	P4	35.9	33.3	33.4
	P5	33.6	29.7	33.7
支承装置 全体変位 (cm)	P2	49.7	59.2	63.7
	P3	43.1	50.0	55.7
	P4	43.1	50.0	55.7
	P5	44.4	51.5	57.1
橋脚変位 (cm)	P2	10.7	26.3	27.0
	P3	7.0	5.6	6.6
	P4	7.0	5.6	6.6
	P5	6.3	5.0	6.0

への影響の検討を行った。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。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。

しかし、通常の免震支承と同様に、レベル2地震時に大きな免震効果を期待すれば、その分、上部構造の応答変位が大きくなる。各レベルのバッファ剛性の決定に加え、ノックオフボルトの破壊の有無をうまく組み合わせることで、レベル2地震時の応答変位を抑えることも可能であると考えられる。また、橋脚条件の違いや、レベル2地震時に桁衝突、あるいは可動支承部分の移動制限値を超える挙動などが起こることにより、予想していた挙動と変わってしまい、十分な免震効果が得られない場合が考えられる。今後は、支承装置による基本的な挙動を把握した上で、支承装置部分の設定のみならず、詳細なモデル設定を行った解析も行う必要がある。

参考文献

1) 日本道路協会：道路橋示方書・解説，V耐震設計編，1996。
2) 伊津野和行，袴田文雄，中村一平：機能分離型支承装置の動特性と設計手法に関する研究，土木学会論文集，No. 654/1-52, pp. 233～244, 2000年7月。
3) 株式会社アーク情報システム：TDAPⅢ，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。

NONLINEAR DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS OF BRIDGE WITH SLIDING BEARING FOR MULTI LEVEL EARTHQUAKE

Takayuki YOSHIDA and Kazuyuki IZUNO

This paper discussed the behavior of the sliding bearing and the effect on bridge with sliding bearing during earthquake. This system consists of the supporting rubber plate to support the main load such as the dead load and the live load, and the slider-buffer system to reduce the earthquake response. In this study, besides we devise the system dividing level 1 earthquake motions and level 2 earthquake motions. This study showed that this system functions as earthquake shear force distribution bearing on level 1 earthquake motions, as seismic isolation bearing on level 2 earthquake motions.