

◆ 報文 ◆

免震橋梁への大変位吸収システムの適用性に関する研究

近藤益央* 運上茂樹** 大住道生***

1. はじめに

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、大規模地震時には桁の応答変位が大きくなり、桁遊間が30cmを越えるような場合も生じる。このような橋梁においては、30cmを越える移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。

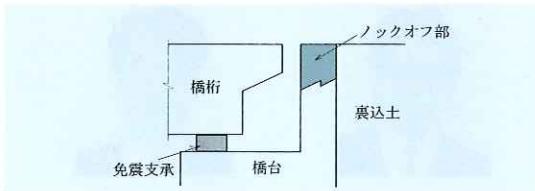
そこで、温度収縮等の常時変形を含めた震度法レベルまでの変形量については伸縮装置により桁の変形を吸収し、兵庫県南部地震クラスの大規模地震時には舗装やパラペットの一部を損傷させて桁本体の損傷を防止するシステムを開発している。本システムの開発にあたっては、簡易な構造で大規模地震時にも桁の変位を吸収出来る構造とし、免震橋梁全体の応答特性に影響を与えない、すなわち免震支承の変形性能を損ねないことを条件とした。

本文では、動的載荷実験及び動的解析を実施して、大変位吸収システムの動的特性及び免震橋梁への適応性に関して検討した結果について報告するものである。

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とは、図-1に示すような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・中規模な変位に対しては伸縮装置により吸収し、発生確率の低い大規模地震等の大変位については、構造体の一部を損させることにより、桁および橋台本体への大きな損傷の回避と免震性能への悪影響を回避しようとするものである¹⁾。

ノックオフ構造は、橋台パラペットの上部をその下と切り離しておき、大地震が生じて桁が大き

図-1 ノックオフ構造¹⁾の概要

Research on the Applicability of Large Displacement Joint System for Menshin Bridges

く振動し、橋台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、ノックオフ部がずれることにより、道路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段差や突起を低く抑える必要がある。このように桁端部に生じる大変位を有効に吸収するとともに、交通車両への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要求性能を設定して検討を行った。

- ① 構造は簡単な構造とし、日常の維持管理が容易であること。
- ② 地震時にシステムが稼働した際の舗装段差が±10cm以下であり、交通車両が致命的な損傷を受けないこと。
- ③ 大規模地震後においても車両（重量車両も含む）の交通が確保できること²⁾。
- ④ 本格的復旧においても全面的交通遮断を必要としないこと。

図-2は、以上の要求性能を満たす構造として検討したものである。図-2(a)は両側のスライドプレートが稼動式のものであり、それぞれのスライドプレートの形状および移動量が小型化できるものである。図-2(b)は片側のみのスライドプレートが移動可能な構造形式で、車両交通が一方向の橋梁において有効なものである。図-2(c)はスライドプレートが反対側の桁と衝突して稼動する構造形式である。図-2(d)は固定側のプレートが桁を跨ぐかたちで設置され、伸縮装置が桁間にではなく桁上に設置される構造形式である。

これらの大変位吸収システムの特徴としては、桁側から張り出したスライドプレートがもう一方のプレートと衝突して、アスファルト内に貫入する構造である。スライドプレートは常時の活荷重に十分抵抗出来るようにアンカーボルトで締め付けるとともに、先端にはアスファルト内への貫入を容易にするためのテープを設ける。また、大規模地震時に押し込み側、引き出し側の両方の動きに追従できるように、スライドプレートとコンクリート床版の間にゴムシートとテフロンシートを、アンカーボルト締め付け部にもテフロンシートを

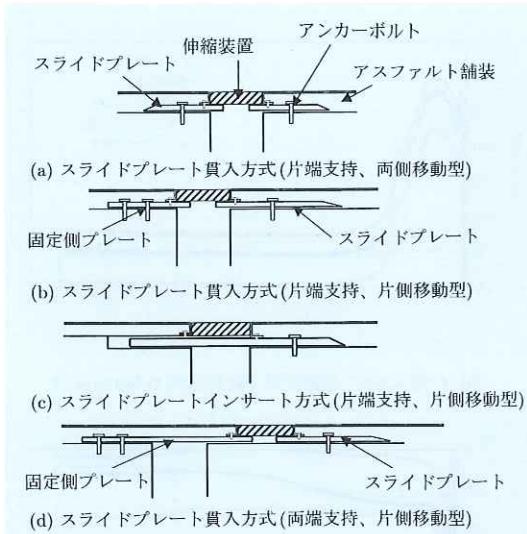


図-2 大変位吸収システム
敷設してすべり抵抗の軽減を図った。

大変位吸収システムでは、大規模地震時においても交通車両に大きな影響を与えないことが開発の条件であることから、図-3のようにシステムが作動している時においても、また作動後においても路面段差が10cm以下であることを目標として開発を行った。このため、アスファルト舗装が圧縮で座屈して大きく持ち上がるような損傷形態では路面段差10cm以下という値は困難であることから、アスファルト舗装が伸縮装置上に乗り上げるような損傷形態を誘導する必要がある。

このような点に着目し、さらに日常の維持管理面においても大きな負担とならない構造形式の絞り込みを行った。

本報告では、スライドプレートの小型化がはかる図-2(a)のスライドプレート貫入方式(片端支持、両端移動型)を対象とし、要求性能として桁遊間量を60cm、常時の桁遊間量を8cmと設定して実験・解析を実施した。

3. 動的載荷実験

大変位吸収システムの動的応答特性を把握することを目的として、図-4に示す実験模型を使用した動的載荷実験を行った。実験模型は、実サイズとして作成し、スライドプレート幅は1mとした。スライドプレートの厚さやアンカーボルト設置位置、本数等については、事前に行った静的安定計算により決定した。また、アスファルトは、橋梁上で使用される改質アスファルトを4cmづつ2層に分けて打設した。

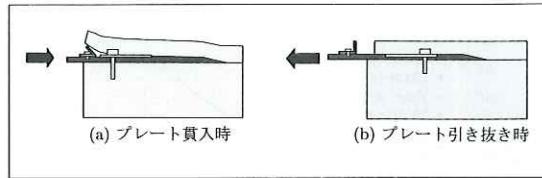


図-3 大変位吸収システム作動時破壊形態

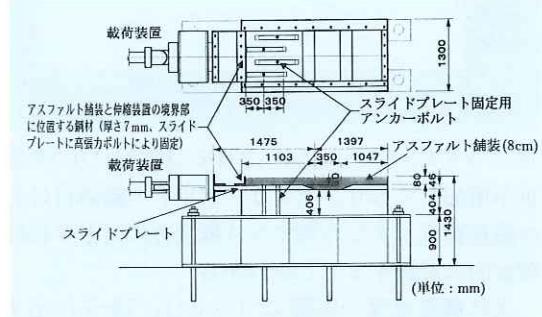


図-4 実験供試体の概要

実験では、動的載荷装置とスライドプレートを結合させて、一定速度での載荷実験を行った。

まず、スライドプレートの作動性及びすべり抵抗力の測定のため、スライドプレートをアンカーボルトで締め付けアスファルトを打設しない状態で載荷実験を実施した。事前に実施した動的解析では、桁の応答速度が100cm/sec程度であり、また、スライドプレートが張り出し梁として安定するために必要なアンカーボルトの締め付け力が98kNであったことから、載荷速度及びアンカーボルトの締め付け力の影響を把握する目的で、ボルトの締め付け力を49kN、98kN、147kNに、載荷速度についても0.5cm/sec、25cm/sec、50cm/sec、100cm/secと変化させて載荷実験を実施した。

図-5に載荷速度及びボルトの締め付け力の影響について示す。ここで用いた載荷荷重は、スライドプレートが動き始めたのちに荷重が安定した領域での平均値とし、アンカーボルトの平均張力についても載荷荷重が安定した領域での4本のアンカーボルトの平均張力としている。アンカーボルトの張力を計測するために、コンクリート床版に貫通穴を設けアンカーボルトをナットで締め付けている。さらに、リード線取り出しのため貫通穴はアンカーボルト径より大きくしてあることから、スライドプレートの移動とともにアンカーボルトが傾き、初期の締め付け力に対して変動している。アンカーボルトの締め付け力の影響については、締め付け力に対して比例的な関係で載荷荷

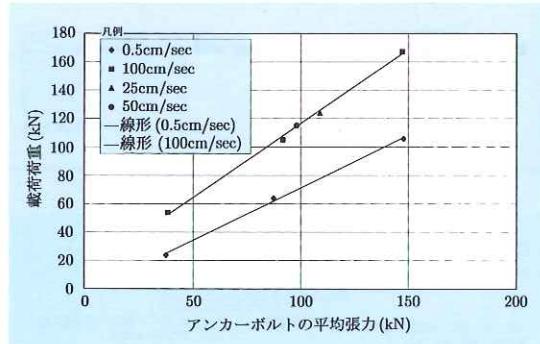


図-5 スライドプレートのすべり抵抗と締め付け力の関係
重が増加しており、アンカーボルトの締め付け力が載荷荷重、すなわちすべり抵抗力に対してほぼ線形的に影響することがわかる。

次に載荷速度の影響については、図-5に示すように載荷速度が0.5cm/secと25cm/sec以上とでは載荷荷重に1.5~2.2倍の差が出ている。しかし、今回の実験では載荷速度25cm/sec以上では高い線形性を有しており、速度依存性がないことがわかる。したがって、温度収縮のようなゆっくりとした速度(0.5cm/sec)と地震時等の速い速度(25cm/sec以上)で分けて設計すべきことがわかった。

次にスライドプレート上にアスファルトを打設して実験を行った。図-6に載荷速度0.5cm/secでスライドプレートを貫入させた実験結果を示す。アスファルトを打設したケースでは、アスファルト打設時のタンパーによる影響のため、ボルト締め付け力がやや抜けている。このため、各実験ケース毎にアンカーボルトの平均締め付け力が異なる。そのため、計測された載荷荷重から同時にアンカーボルトの平均張力(締め付け力)から算出したスライドプレートのすべり抵抗力を引き、アスファルトの抵抗力分を算出した。その後アンカーボルトの締め付け力が影響するスライドプレートのすべり抵抗力を、当初予定の締め付け力で発生するであろうすべり抵抗力を算出し、これにアスファルトの抵抗力分を加えて載荷荷重を補正している。

同図に示すように、スライドプレートの移動に伴い、載荷荷重が増加して、写真-1に示すようにアスファルトが伸縮装置上に乗り上げるようになれば、アスファルトが伸縮装置上に乗り上げた後は、載荷荷重が徐々に減少して約100mm貫入した後は、スライドプレートのすべり抵抗力分の

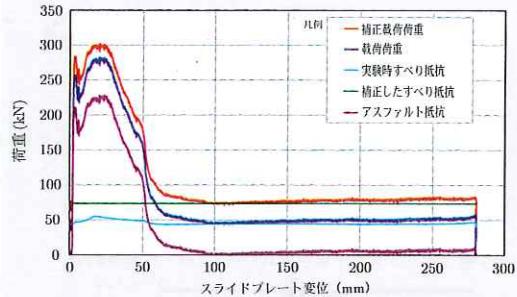


図-6 貫入時の実験結果(載荷速度 0.5cm/sec)

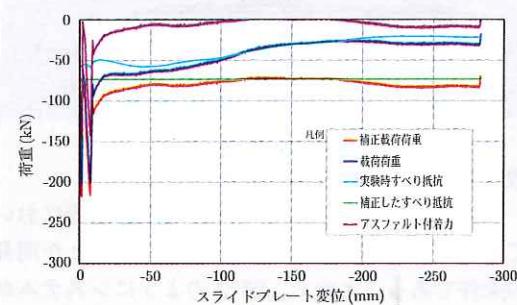


図-7 引き抜き時の実験結果(載荷速度 0.5cm/sec)

みの値を示している。破壊形態を見ると、載荷によりスライドプレートがアスファルト舗装内に貫入、伸縮装置との境界部に位置する鋼材を受圧面としてアスファルトが圧縮され、この圧力により鋼材が曲げ変形を起こしている。この曲げ変形によりアスファルト舗装が一気に鋼材に乗り上げ、その後は鋼材が舗装下面を擦るようにして移動している。また、載荷速度を100cm/secで行った場合には、最大載荷荷重が約490kNと大きくなつたが、破壊形態については載荷速度が0.5cm/secの場合と同じであった。

アスファルトの付着力を把握する事を目的として、スライドプレートを0.5cm/secで引き抜く実験を行った。実験の結果を図-7に示す。同図によればスライドプレートとアスファルトとが付着している状況では載荷荷重が上昇し、いったん付着力の低下が見られるが再び荷重が増加している。これは、アンカーボルトの先端部がアスファルト内に埋まった形になっているため、スライドプレートとアスファルトの付着とアンカーボルト先端部とアスファルトの付着の2つがあるものと推定できる。スライドプレートの変位量が20mmを越えると、スライドプレートを貫入させたケース



写真-1 舗装部の損傷(伸縮装置に乗上げた状況)



写真-2 舗装部の損傷(舗装部が折れ曲がった状況)

と同様に、ほぼスライドプレートのすべり抵抗のみになっている。また、載荷速度を 100cm/sec で行った場合には、最大載荷荷重が約 245kN と大きくなつた。

さらに、実験結果から伸縮装置との境界部に相当する鋼材の曲げ変形を生じさせるのに必要な外力は、スライドプレート貫入時の最大荷重から、スライドプレートのすべり抵抗と付着力を引いて求められ、約 85kN となる。これは、鋼材の中心高さに集中荷重が作用していると仮定して、鋼材の曲げ耐力を塑性モーメントより計算すると、83kN となり、実験結果とほぼ一致している。

鋼材の変形を拘束して別途行った実験結果では、写真-2 に示すようにアスファルトが圧縮力により座屈して中央部付近から折れ曲がり、約 45cm 隆起が生じた。したがって、アスファルトの隆起量を最小限にとどめるために、アスファルト舗装が伸縮装置上に乗り上げるような破壊形態とすることが必要とされる。このために、伸縮装置との境界部に変形を誘導できる鋼材を設置するか、アスファルトの圧縮力の合力が作用する位置が、舗装厚の 1/2 より高い位置になるような工夫を施す必要がある。このような破壊形態の場合には地震後にスライドプレートが当初位置に戻れば、路面段差もほとんど発生しないことになる。

4. 大変位吸収システムの抵抗特性が免震橋梁に及ぼす影響

大変位吸収システムの稼動抵抗が大きい場合には、免震橋梁が本来有している変形性能を拘束してしまう可能性がある。そこで、本システムが作動した場合、すなわちスライドプレート同士が衝突した場合、このシステムの抵抗が免震橋梁の振動特性に及ぼす影響について動的解析により検討した。

解析対象としたのは、桁幅 10m の 16 径間連続免震橋と 3 径間連続免震橋の掛け違ひ部(諸元を表-1 に示す)で、図-8 に示すような 1 自由度系のバネ質点モデルとして、質点間に図-9 に示す衝突バネを設置した。衝突バネの特性は、実験により得られた大変位吸収システムの荷重変位特性から設定した。大変位吸収システムは、最初に桁の相対変位が圧縮方向に生じた場合には、伸縮装置の遊間である 8cm までは抵抗なく移動し、相対変位が 8cm に達した時から抵抗力が増加し、相対変位 12cm で最大抵抗力 4,900kN に達する。その後 20cm までは最大抵抗力を維持するものの、相対変位が 20cm を越えた後には 1,200kN 一定となる。その後、図-9 に示すように移動方向が逆転すると、⑥から⑦と移り、-1,200kN 一定となる。したがって以降は、⑧→⑨→⑩→⑥→⑦の抵抗特性となる。逆に最初に相対変位が引っ張り側に生じた場合には、相対変位が 8cm に達した時から除々に増加し、相対変位が 10cm に達した時に最大抵抗力 -2,450kN を発生し、それ以上の変位が生じるとその後は -1,200kN 一定となる。

このような衝突バネを有するモデルに対して、
表-1 解析諸元

	質量 (ton)	等価 バネ定数 (MN/m)	等価 減衰定数 (%)	一次の 固有周期 (sec)
3 径間連続 上部工	285.0	72.34	14.1	1.24
16 径間連続 上部工	938.1	201.96	13.7	1.34

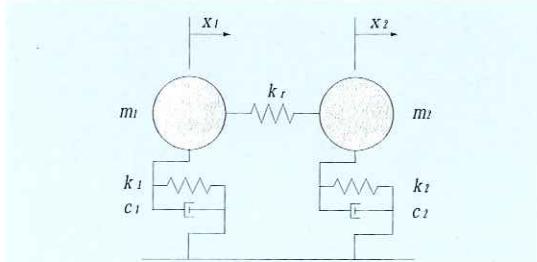


図-8 解析モデル

図-10に示す道路橋示方書に規定されるⅡ種地盤のタイプⅡ地震動を用い、各系に位相差を導入して上部構造に生じる変位を求めた。衝突のパターンとして、図-11に示すように両上部構造が逆位相となり互いに近寄り衝突する場合と、一方の上部構造が他方を追いかけて追突する場合がある。逆位相の場合は衝突速度が大きく、衝突で作用する抵抗力も大きい。これに対して、追いかけて追突する場合は衝突速度は大きくないが、追いつかれて衝突された桁は、衝突により応答変位が増大する。ただし、追突の場合は16径間連続桁が3径間連続桁に追突する場合を考えた。したがって、これらの条件は2連の桁が衝突するという現象で最も厳しい条件と考え、これらの条件に対しての安全検討を実施した。

位相差を与えない場合での桁の時刻歴応答変位を図-12(a)に、逆位相で衝突する場合を図-12(b)に、

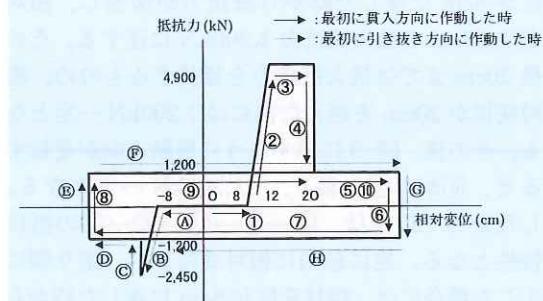


図-9 衝突バネの変形特性

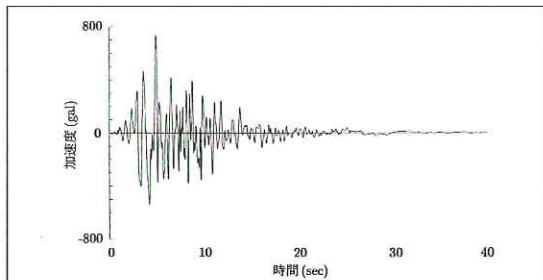


図-10 入力波形

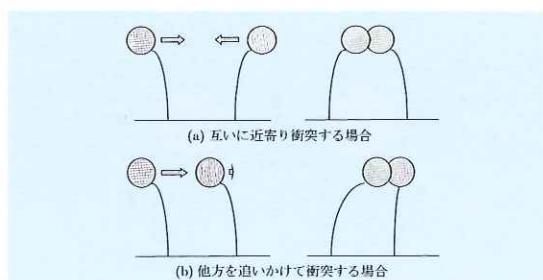


図-11 衝突パターン

追突する場合を図-12(c)に示す。ここで、桁の時刻歴応答変位が重なりあっている状態が、スライドプレート同士が接触している状態を表している。位相差を与えたなかった場合、双方のスライドプレートが接触する事がないが、逆位相を与えた場合には図-12(b)に示すように、大変位吸収システムがほぼ全時間領域にわたって作動していることがわかる。これに対して、追突するとした場合には図-12(c)に示すように、最大変位振幅が発生する時に16径間連続桁が3径間連続桁に追突して、桁を押し出して最大応答変位を増大させている。表-2に最大応答変位を示す。同表の比率は、位相差を与えない場合の最大応答変位に対する比であり、大変位吸収システムを押し込む方向と引き抜く方向に分けて整理した。逆位相で衝突した場合は、大変位吸収システムを押し込む場合も引き抜く場合も衝突しない場合に比べて最大で15%ほど小さくなっている。これは、衝突バネの剛性が比較的小さいため、衝突により桁の運動エネルギーが吸収されていることによると考えられる。

一方、追突した場合には、位相差を与えない場合と比較して3径間連続桁側で最大8%ほど大きくなっている。これは、桁重量の小さい3径間連続桁が桁重量の大きい16径間連続桁に後ろから追突され、応答が増幅された状況を表している。免震橋梁においては、衝突を考慮しないという前提で支承の等価減衰定数を決めており、支承の変位が桁の衝突等により設計変位より過度に大きくなると、免震性能に対して悪影響を及ぼす可能性がある。2連の桁が厳しい条件で衝突するように位相差を想定した今回の解析によれば、大変位吸収システムを設置した場合には、逆位相で桁が衝突する場合は、桁の衝突により応答変位が15%程度減少し、

表-2 最大応答変位

	衝突の状態	変位方向	最大応答変位cm	変位倍率
3径間連続桁	位相差なし	押し込み	34.5	1.00
		引き抜き	42.6	1.00
	近寄り衝突	押し込み	29.4	0.85
		引き抜き	36.5	0.86
	追いかけて衝突	押し込み	45.9	1.08
		引き抜き	45.9	1.08
16径間連続桁	位相差なし	押し込み	44.3	1.00
		引き抜き	39.9	1.00
	近寄り衝突	押し込み	43.1	0.97
		引き抜き	38.0	0.95
	追いかけて衝突	押し込み	41.5	0.94
		引き抜き	38.4	0.96

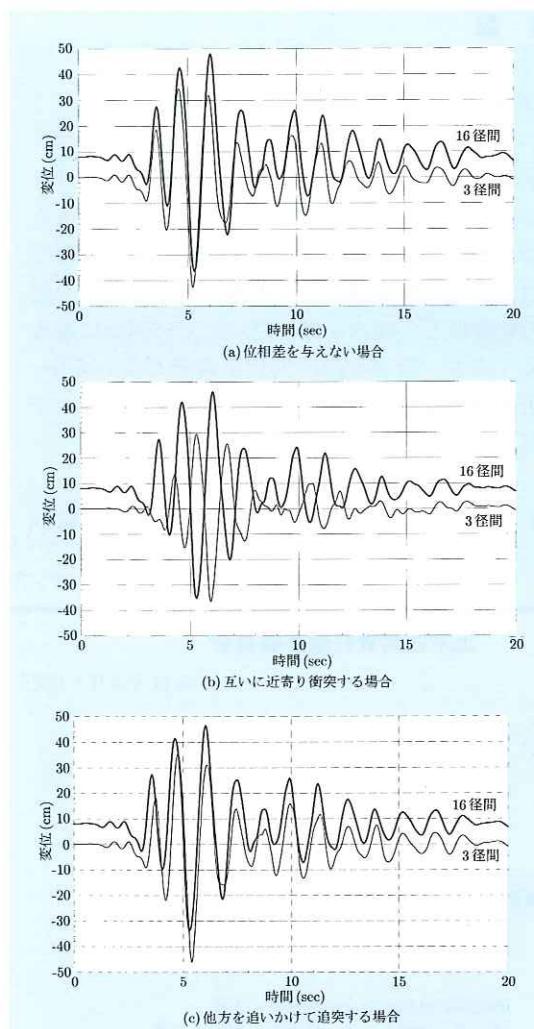


図-12 解析による桁の応答変位

一方押し出すように衝突する場合には、桁の応答変位の増加が8%程度であり、今回程度の抵抗力を有する大変位吸収システムであれば、免震性能に悪影響を与えないと考えられる。

5. まとめ

以上の結果をまとめると以下のとおりとなる。

- (1) 簡易な構造で大変位を吸収可能な大変位吸収システムを提案した。破壊モードは伸縮装置と舗装との境界に設置してある鋼材を変形させ、段差を小さくする構造である。
- (2) スライドプレートのすべり抵抗は、スライドプレートの締め付け力が98kNの時、静的な状態(載荷速度0.5cm/sec)で70kN/m、動的な状態(載荷速度25cm/sec以上)で120kN/mであった。
- (3) アスファルト舗装のある場合、路面段差を小さいま必要な変位を吸収することが明らかになった。また、抵抗力はスライドプレートを引き抜く際の最大荷重が245kN/m、貫入させる際の最大荷重が490kN/mであった。
- (4) 大変位吸収システムが作動しても、上部構造の変位の増加は上部構造の衝突がない場合に比べて最大8%程度であり、大変位吸収システムが免震性能には悪影響を及ぼさないと考えられる。

【謝辞】

本研究は、建設省近畿地方建設局が主催する米原バイパス天野川高架橋ノックオフ検討会(委員長:建設省土木研究所 西川和廣 橋梁研究室長)で検討をいただきながら実施したものである。ここに記して関係者に謝意を表す。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所:道路橋の免震設計法マニュアル(案),平成4年10月
- 2) (社)日本道路協会:道路橋示方書V耐震設計編,平成8年12月
- 3) 川島一彦、尾崎大輔:免震橋用の伸縮装置・落橋防止装置の開発,土木技術資料,平成5年1月
- 4) 運上茂樹、近藤益央、大住道生:免震橋梁の変位吸収システムの開発に関する研究,土木研究所資料第3576号,平成11年2月
- 5) 古山多喜男、井上顕史、東口武生:天野川高架橋における大変位吸収システムに関する検討・開発,平成10年度(第52回)建設省技術研究会,平成10年11月

近藤益央*



建設省土木研究所耐震技術研究センター耐震研究室研究員
Masuo KONDOH

運上茂樹**



同 耐震研究室長、工博
Dr. Shigeaki UNJOH

大住道生***



同 耐震研究室研究員
Michio OHSUMI