

# 免制震すべりシステム(ICSS)における2方向同時入力の位相効果が地震応答に及ぼす影響

松田 哲夫<sup>1</sup>, 五十嵐 晃<sup>2</sup>, 古川愛子<sup>3</sup>, 大内浩之<sup>4</sup>, 宇野裕恵<sup>5</sup>, 松田 宏<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 西日本高速道路エンジニアリング九州株式会社 (〒810-0073 福岡市中央区舞鶴1-2-22)  
E-mail: t.matsuda.a@w-e-kyushu.co.jp

<sup>2</sup>正会員 京都大学大学院准教授 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)  
E-mail: igarashi.akira.7m@kyoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 京都大学大学院准教授 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)  
E-mail: furukawaaiiko3w@kyoto-u.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 西日本高速道路株式会社 徳島工事事務所 (〒770-0861 徳島県徳島市住吉5-1-30)  
E-mail: h.ouchi.aa@w-nexco.co.jp

<sup>5</sup>正会員 オイレス工業株式会社 免制震事業部 (〒108-0075 東京都港区港南1-6-34)  
E-mail: h.uno@oiles.co.jp

<sup>6</sup>正会員 株式会社ドーナー大地 (〒359-0021 埼玉県所沢市東所沢2-28-12)  
E-mail: h.mtd@cdaichi.co.jp

多径間連続桁の耐震構造に免震支承, 制震ダンパーおよびすべり支承を組合わせる免制震すべりシステムがある. このような変位しやすい場合には地震波の2方向同時入力による実挙動の評価が望まれる. しかし, 道路橋示方書の標準波を直交する2方向に同時入力すると設計上の意味付けの不明確さが存在する問題がある. そこで, 標準波およびそれと同等の応答加速度スペクトルを有する相補直交成分波を用いた2方向同時入力による応答評価を行った. この結果, 制震ダンパーのような機能方向性や有限長を含む振動系では1方向入力との相違が見出され, 入力方向や地震波の組合わせによる影響や, 直交成分の位相差に起因する回転方向による応答の大きな相違が明らかとなった. そこで, 2方向の回転方向による結果を平均して評価する方法を提案した.

**Key Words :** ICSS, Bi-Directional input, Hilbert Transform, complementary orthogonal component wave, Seismic Performance assessment

## まえがき

多径間連続桁橋に免震支承, 制震デバイスおよびすべり支承を適切に組み合わせて適用し, 温度等による不静定力が耐震性に与える影響を抑え<sup>1)</sup>, かつコスト削減が可能な耐震構造として免制震すべりシステム(ICSS: Isolation Seismic Controlled Slide System)<sup>2),3),4),5),6),7),8),9),10)</sup>を提案している. 本システムを適用すると上部構造は橋軸および橋軸直角方向共に変位しやすくなる傾向にあり, また多径間連続桁の多くが平面曲線を有しているため, 地震波が任意方向から入力される実現象としての地震時挙動を把握することが望まれている.

一般的な橋のレベル2地震動に対する耐震性の評価では, 地震波を橋軸および橋軸直角方向の1方向に入力しているが, 曲線橋や線形の複雑な橋では地震波を橋軸方向や橋軸直角方向のみならず, 様々な方向に入力している. これは, 道路橋示方書<sup>11)</sup>に基づく耐震性の評価が, 標準波を1方向に入力することを基本としているためである. しかし, 実現象としての地震時挙動を把握するためには, 地震波を直交する2方向に同時入力した評価を行うことが合理的であると考えられる. しかしながら, これまで2方向同時入力する場合に適用できるレベル2地震動の加速度波形は確立されておらず, 応答値の評価法

も定められていない。さらに、構造体やデバイスの任意方向に対する履歴特性の設定手法も確立されていない。

一方、道路橋示方書の同一地点に由来する標準波2波を鋼製橋脚の直交する2方向に入力した場合の地震時挙動に基づき、合理的な限界値を検討する研究が行われているが<sup>12)</sup>、これは照査に用いる2方向同時入力の妥当性や根拠に着目したものではない。道路橋示方書の標準波を用いて2方向同時入力による耐震性を評価することは、地震波の任意方向のスペクトル特性の同等性が保証されているわけではないため、妥当ではない。ただし、従来の1方向入力による耐震性の評価に整合する2方向同時入力用の地震波があれば、道路橋示方書に準じかつ入力の2方向性を考慮した耐震性評価が可能と考えられる。さらに、2方向同時入力において入力方向を固定し、1方向入力で様々な方向に入力した結果と同等な結果を得ることができれば、1方向入力に比べて設計上の利便性は高い。

2方向同時入力に用いることができる地震波<sup>13),14)</sup>としては、シナリオ地震波やサイト地震波が考えられる。こうした地震波は、それが観測あるいは予測された地点に位置する橋であれば、耐震性を判断する一つの根拠とすることができるが、道路橋示方書で定める設計スペクトルに整合しているわけではない。

これに対し、1方向に入力する地震波と同じスペクトル特性をもち、直交する2方向の地震波であることを考慮して、 $\pi/2$  ラジアン位の位相差を持つ相補直交成分波を作成し、その2つの地震波を直交する2方向に同時入力する耐震評価法<sup>15),16),17),18)</sup>が提案されている。そこで、本論文ではこの手法により道路橋示方書の標準波を用いて免制震すべりシステムを適用した橋に2方向同時入力し、地震応答の評価を行った。具体的には、道路橋示方書の標準波の同一サイトに由来する地震波2波を用いた2方向同時入力による動的挙動が、道路橋示方書で意図するレベルよりも過大な応答になることを確認した後、道路橋示方書の標準波およびその相補直交成分波を用いて2方向同時入力により免制震すべりシステムを用いた橋の地震時挙動を評価し、免制震すべりシステムに適用する2方向同時入力手法を考察した。

## 1. 免制震すべりシステム (ICSS) の基本構造

免制震すべりシステムは、両橋台で橋軸直角方向の変位を拘束する多径間連続桁橋に対し、限定した区間の下部構造にのみ免震支承および制震ダンパーを設置して地震時挙動を制御し、それ以外の下部構造にはすべり支承のみを設置する耐震構造である。このシステムを長多径間連続桁橋に適用すれば、以下のような技術的課題の改善が期待される。

- ① 温度変化等による桁の伸縮に起因する不静定力が大きく低減され、不静定力が橋の耐震性能に及ぼす影響を極めて小さくできる。
- ② 不静定力が小さいので、施工時にポストスライド等による支承位置の調整を不要にできる。
- ③ すべり支承のみを用いた下部構造を小さくできるので、免震支承や制震ダンパーを設置する特定の下部構造は大きくなるものの、橋全体としての下部構造の規模を縮小できる。
- ④ デバイスの強非線形性により地震時に大きな減衰性能を発現できる。

一般に、免震支承やゴム支承を用いた地震時水平力分散構造の長多径間連続桁橋では、温度変化等に起因する桁伸縮により端支点に近い下部構造ほど大きな不静定力が作用し、地震時の支承変位や橋脚の塑性化を促進させることが明らかとなっている<sup>5)</sup>。これを抑制するために、図-1に示すような免震支承や地震時水平力分散ゴム支承を用いた長多径間連続桁橋では、温度変化以外に起因する桁伸縮による不静定力に対して、施工時にポストスライド等による支承位置の調整を行っている。これに免制震すべりシステムを適用すると、図-2に示すように橋全体にわたり免震支承、制震ダンパー、すべり支承等を組み合わせた耐震構造となり、不静定力は極めて小さくなるため耐震性が損なわれることはなく、施工時の支承位置の調整が不要となる。この形式では、一連の橋であることに加え、両端の橋台部で橋軸直角方向の変位を拘束し、かつ橋軸方向の桁かかり長を十分に確保すれば、極めて耐震性の高い橋となる。

## 2. 免制震すべりシステム (ICSS) の耐震性

検討対象橋は図-3に示す橋長 1,200m の鋼 18 径間連続混合合成桁の曲線橋である。地盤種別はⅢ種地盤である。耐震構造は、図-2に示すように橋軸方向には橋中央付近の渡川部であり橋脚規模の大きい P9 および P10 に免震支承と制震ダンパーを設置し、それ以外はすべり支承のみを設置して鉛直反力のみを支持させている。ここで、制震ダンパーは地震時

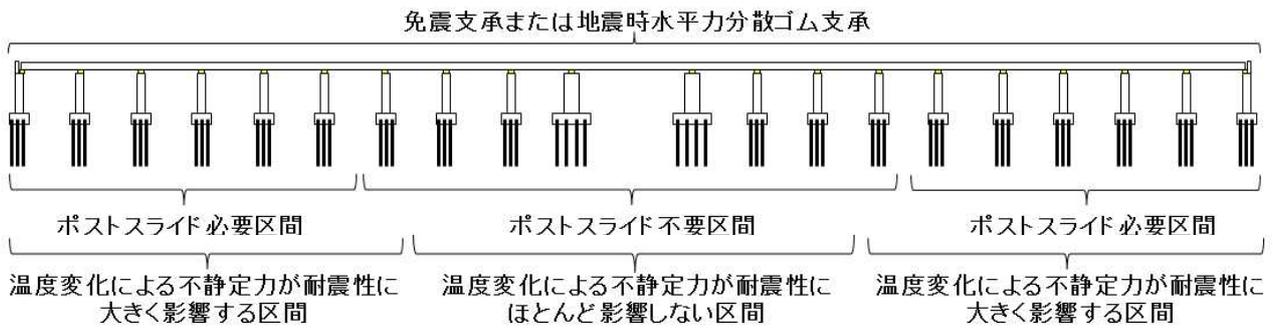


図-1 免震橋またはゴム支承を用いた地震時水平力分散橋

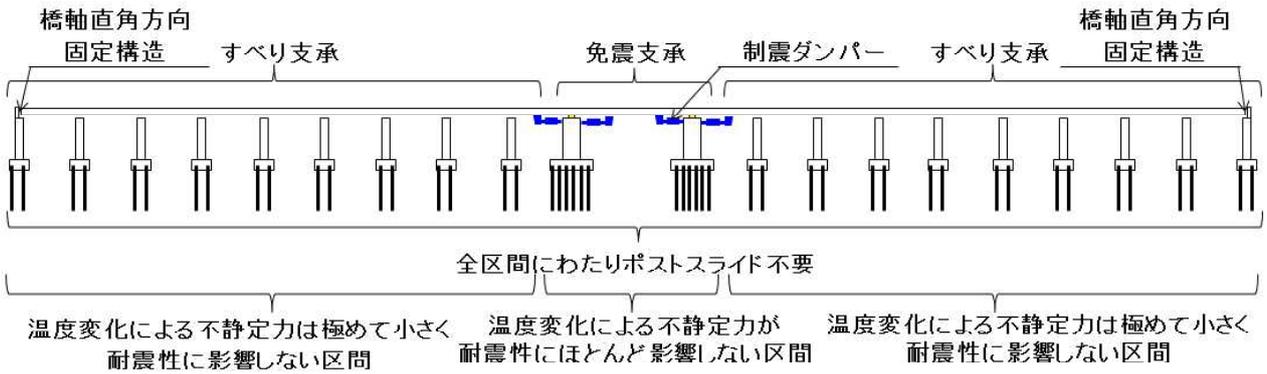


図-2 免制震すべりシステムにおける各デバイスの適用例

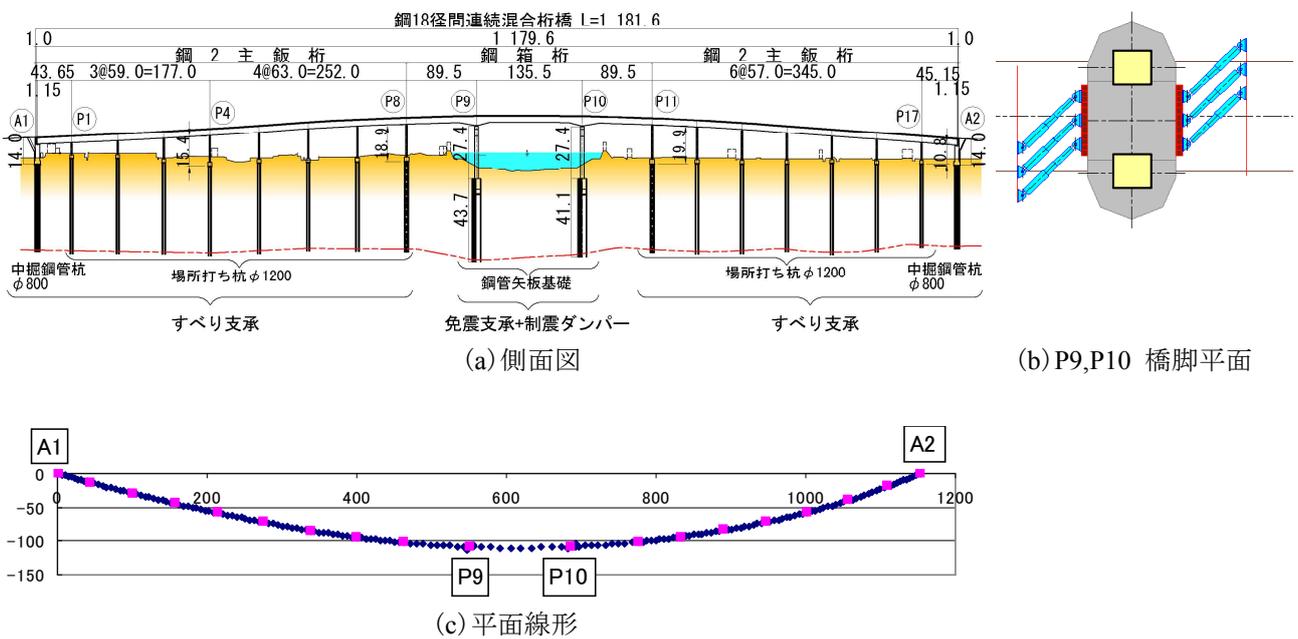


図-3 検討対象橋：鋼18径間連続混合成桁橋

の効率的な機能性を考慮し、橋軸方向から45度の方向に設置している。橋軸直角方向には両端の橋台で固定支持し、P9 および P10 橋脚の免震支承と制震ダンパーが抵抗する。本橋の耐震設計では、道路橋示方書の標準波を1方向入力としているが、曲線橋であり、かつ変位しやすい振動性状であることを

考慮し、入力方向を様々な方向（橋軸方向の0, 30,45,60,90,120,135,150度）に設定している。応答値は3波平均で評価している。なお、本橋の振動モードは図-4に示すようであり、橋軸および橋軸直角方向の一次固有周期はそれぞれ5.3sec および16.3secである。

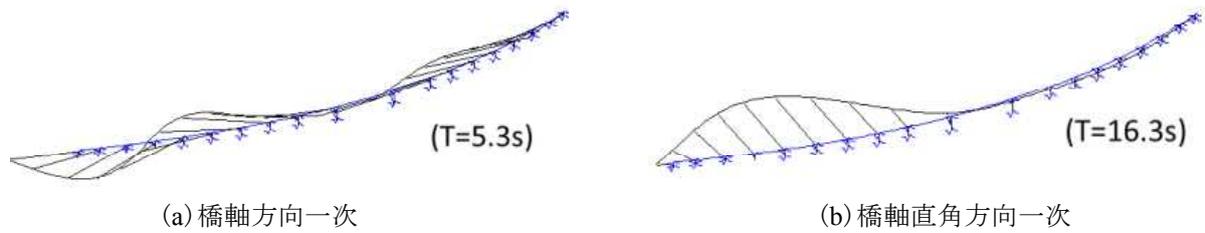


図-4 振動モード

表-1 1方向入力による解析結果

1方向入力 入力波形	入力 角度	LRB支承ひずみ		制震ダンパー	
		P9橋脚 (%)	P10橋脚 (%)	P9橋脚 (mm)	P10橋脚 (mm)
3波形平均 II-III-1 II-III-2 II-III-3	0	197	190	351	323
	30	174	176	408	450
	45	131	147	366	465
	60	99	138	302	435
	90	104	142	208	322
	120	147	165	62	113
	135	167	171	84	102
150	179	188	162	106	

表-2 相補直交関係にある道路橋示方書のⅢ種地盤の標準波

地盤種別	地震波	地震名	記録場所
Ⅲ種地盤	II-III-2	1995年兵庫県南部地震	ポートアイランド内地盤上 N-S
	II-III-3		ポートアイランド内地盤上 E-W

地震波を1方向入力した動的解析による免震支承および制震ダンパーの応答を表-1に示す。免震支承の最大応答せん断ひずみは0度方向入力の197%であり、許容せん断ひずみ250%を満足している。制震ダンパーの最大応答移動量は45度方向入力の465mmであり、許容移動量500mmを満足している。このように、本対象橋は、1方向入力による動的解析による耐震性を満足している橋である。

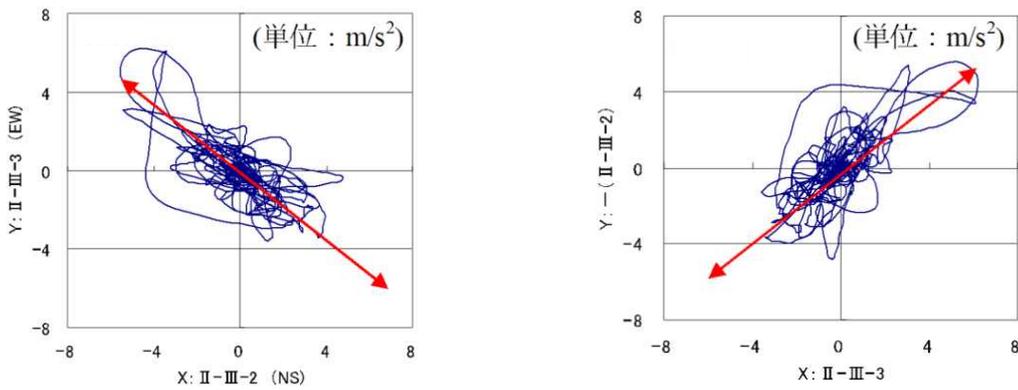
### 3. 道路橋示方書の標準波を用いた2方向同時入力による耐震性の評価

本対象橋はICSSを適用する最初の橋であり、橋長が長い曲線橋でかつ変位が大きいことから、実地震挙動に近い状態での耐震性の評価が望ましい。この評価には地震波を直交する2方向に同時入力すればよいが、現状の耐震設計体系ではそれに適用できる地震波が設定されておらず、応答に対する評価法も確立されていない。そこで、道路橋示方書におけるⅢ種地盤のレベル2地震動タイプⅡの標準波3波

のうち、表-2に示す地震波2波の原波形が同一サイトおよび同一地震で得られた直交成分となっていることから、2方向同時入力による耐震性の評価を試みた<sup>15),19)</sup> 既往の研究によれば、このような道路橋示方書の標準波の組合せによる2方向同時入力には、それぞれの地震波のベクトル合力方向に大きな応答を及ぼすという問題があることが指摘されているので、ここではこれを確認する。

II-III-2およびII-III-3地震波を橋軸方向(A1 → A2: X軸)および橋軸直角方向(A1 → A2の法線方向: Y軸)のそれぞれに入れ替えて入力した加速度のオービットを図-5に示す。同図からわかるように、これらの地震波を2方向同時入力すると入力加速度の卓越成分に強い方向性が見られる。そこで、地震波の入力方向を0, 90, 180, 270度と逐次回転させて、図-6に示す8ケースの地震波入力方向に組み合わせた2方向同時入力により動的解析を行った。

応答値を表-3に示す。同表には8ケースの応答を平均した値を付記している。現状の耐震性評価では、地震波3波それぞれを1方向に入力した応答値を平



(a) X軸：Ⅱ-Ⅲ-2, Y軸：Ⅱ-Ⅲ-3 を入力 (b) X軸：Ⅱ-Ⅲ-3, Y軸：Ⅱ-Ⅲ-2 を入力

図-5 道示標準波の加速度波形のオービット

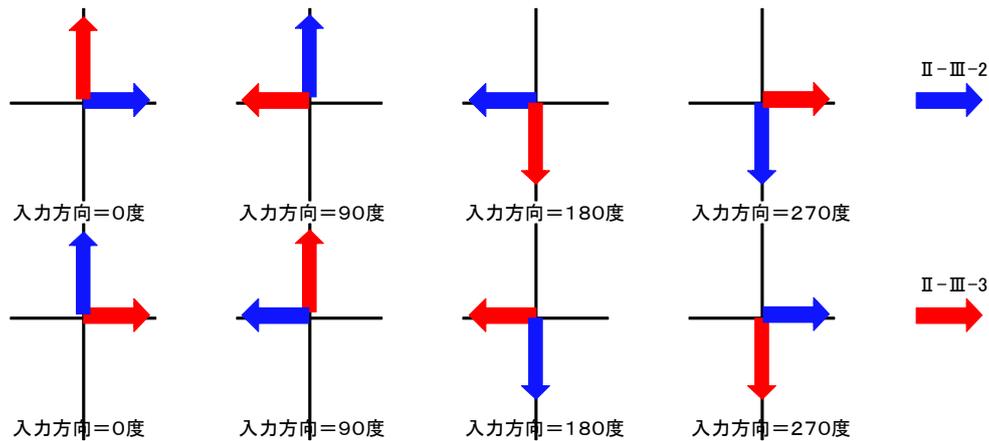


図-6 2方向同時入力の入力方向の定義

表-3 2方向同時入力による解析結果

Case	2方向同時入力 入力波形		入力 角度	LRB支承ひずみ		制震ダンパー	
	X軸	Y軸		P9橋脚	P10橋脚	P9橋脚	P10橋脚
				(%)	(%)	(mm)	(mm)
1	Ⅱ-Ⅲ-2	Ⅱ-Ⅲ-3	0	256	246	231	279
2	Ⅱ-Ⅲ-2	Ⅱ-Ⅲ-3	90	246	252	675	756
3	Ⅱ-Ⅲ-2	Ⅱ-Ⅲ-3	180	256	246	232	274
4	Ⅱ-Ⅲ-2	Ⅱ-Ⅲ-3	270	244	253	677	753
5	Ⅱ-Ⅲ-3	Ⅱ-Ⅲ-2	0	335	324	139	317
6	Ⅱ-Ⅲ-3	Ⅱ-Ⅲ-2	90	208	241	641	779
7	Ⅱ-Ⅲ-3	Ⅱ-Ⅲ-2	180	335	330	138	321
8	Ⅱ-Ⅲ-3	Ⅱ-Ⅲ-2	270	208	241	640	779
8ケース平均値				261	267	421	532

均で評価することにより、地震波の固有特性が発現されにくいようにされているが、ここでの2方向同時入力に用いた地震波は限定されているため、地震波の特性の平準化を図ることはできない。そこで、8ケースの応答値を平均することで、地震波の特性の平準化を試みた。

2方向同時入力の応答と1方向入力の応答から、入力方向毎の免震支承のひずみおよび制震ダンパー

の変位量をそれぞれ図-7および図-8に示す。これより、ほとんどの解析ケースで2方向同時入力の応答値は1方向入力より大きく、入力方向によっては2方向入力の応答値は相当に大きい。8ケースの平均値と比べても概ね1～3割程度大きい。これは、1方向入力波形に用いた3波形の最大入力加速度は619gal(Ⅱ-Ⅲ-2)であるのに対し、2方向同時入力により合成された最大入力加速度は791galと、1方向

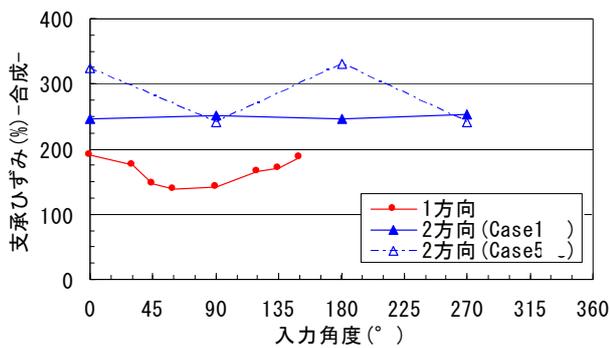


図-7 入力角度と支承ひずみの関係(P10)

入力の約 1.3 倍に相当することからも推測される。したがって、既往の研究で指摘されているように、このような道路橋示方書の標準波の組合せによる 2 方向同時入力の応答値は、3 波平均より大きくなるため過大な評価を与えると考えられており、この ICSS の例からもあきらかになったことから、妥当な評価ではないと考えられる。

また、免震支承では、1 方向入力も 2 方向同時入力も入力方向の違いによる応答値の変動は比較的小さいが、制震ダンパーでは入力方向の違いによる応答値の変動が大きい。これは、制震ダンパーはその構造軸方向にのみ機能するためである。制震ダンパーの変位は、入力方向によって大きく変動するという性質が既往研究からも指摘されているが、上記も同じ事例である。

#### 4. 道路橋示方書の標準波と相補直交成分波を用いた 2 方向同時入力による耐震性の評価

##### (1) 2 方向同時入力に用いる地震波

道路橋示方書の標準波を用いた 2 方向同時入力による応答は、解析結果からも過大な評価を示すと考えられることから、既往の研究<sup>15),17),18)</sup>に基づき 2 方向同時入力を試みた。これにより設定される地震波を用いた 2 方向同時入力では、応答方向に関わらず道路橋示方書の標準波の応答加速度スペクトルと同等のスペクトルを有している。すなわち、道路橋示方書の標準地震波 3 波それぞれに対して同等の応答加速度スペクトルを有する相補直交成分波を組合せて、2 方向同時入力による動的解析を行う方法である。本論文で想定する相補直交成分波は与えられた地震波の位相を  $\pi/2$  ずらした地震波であり、直交座標系における軸の対応関係に起因する 2 つの組合せに大別できる。地震波の入力加速度が反時計回

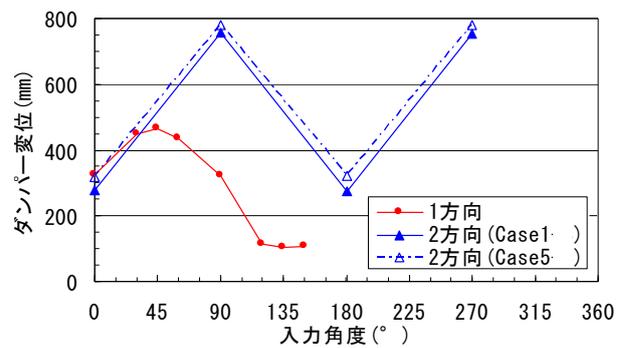


図-8 入力角度とダンパー変位の関係(P10)

りに回る性質を有する場合と、時計回りに回る性質を有する場合である。前者は、標準波軸→相補直交成分波軸に反時計回り（以下、「反時計回り」）、後者は標準波軸→相補直交成分波軸に時計回り（以下、「時計回り」）の入力加速度となる。

本論文では標準波 II-III-1 を検討対象とし、それに「反時計回り」と、「時計回り」の 2 方向同時入力の入力加速度のオービットを図-9に示す。

##### (2) 解析条件

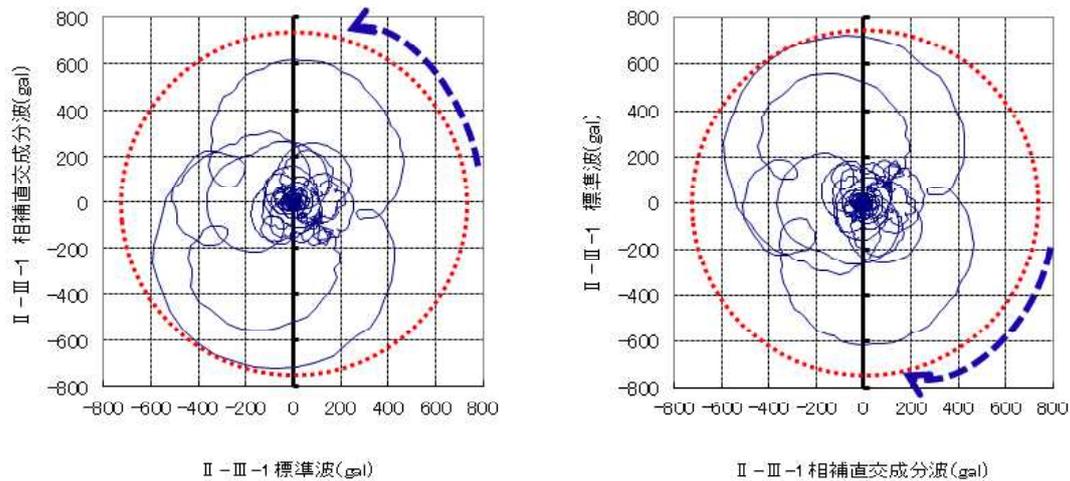
標準波 II-III-1 と相補直交成分波を用いて反時計回り、時計回りの 2 方向同時入力による動的解析を行った。入力方向は、表-4に示すようである。

制震ダンパーは、50kine の速度における抵抗力が 9,000kN となる速度 0.1 乗則の制震ダンパーを用い、制震ダンパー 0kN とは免震支承のみ設置した場合に相当する。

##### (3) 2 方向同時入力結果と評価

制震ダンパー 9,000kN の場合と制震ダンパー 0kN の場合の制震ダンパーの最大応答変位および免震支承の最大応答せん断ひずみをそれぞれ図-10～図-13に示す。それぞれの図は(a)「反時計回り」、(b)「時計回り」および(c)平均を示している。図-10および図-11では、入力方向に制震ダンパーの最大応答変位をプロットしてそれぞれを線で結び、中心から制震ダンパーの移動可能距離 500mm の位置に赤線の円を併記している。これに対し、図-12および図-13では、入力方向毎に免震支承の最大応答せん断ひずみをプロットしてそれぞれを線で結び、中心から免震支承の許容せん断ひずみに相当する 250%の位置に赤線の円を併記している。

制震ダンパー 9,000kN 適用時の制震ダンパーの最大応答変位は、「反時計回り」が「時計回り」より大きい傾向にある。「反時計回り」では地震波の加



(a) II-III-1 と相補直交成分波（「反時計回り」） (b) II-III-1 と相補直交成分波（「時計回り」）

図-9 標準波と相補直交成分波による2方向地震動の加速度軌跡

表-4 入力方向の回転角

制震ダンパー	A1→A2(橋軸方向)からの入力方向の回転角(度)
9000kN	0,30,60,90,120,150,180,210,240, 270,300,330,360
0kN	0,30,45,60,90,120,135, 150,

速度は反時計回りに入力されるので上部構造は時計回りに加振され、「時計回り」では時計回りに入力されるので上部構造は反時計回りに加振され、応答の回転方向が2ケースで逆となる。これは、制震ダンパーは図-3(b)のように取り付けられているため、構造骨組みとしては図-14のような挙動になり、上部構造は時計回りに加振された場合、制震ダンパーが橋軸方向に近づくことで部材軸方向に大きな力を受け、上部構造が反時計回りに加振された場合、制震ダンパーが橋軸方向に対してより傾くため水平変位しやすく部材軸方向に力を受けにくいためである。この結果、「反時計回り」では、制震ダンパーの応答移動量が移動可能距離を超え、1方向入力の応答移動量より大きくなり、「時計回り」では逆に小さくなっている。有限長を持つ制震ダンパーの特性と、構造の線形や配置、振動形の非対称性とが相まって、結果的に入力の位相差により生じる回転方向により地震応答に顕著な相違が生じるということを示している。

実際の地震動では回転方向が特定されないと考えられることから、地震波特性を平準化して評価することを目的に、「反時計回り」と「時計回り」を平均して評価することを試みた。この処理も、地震波

の特性を緩和することを考慮したものである。この結果、制震ダンパーの移動可能量を満足し、1方向入力の応答移動量に近い値となった。制震ダンパーのない場合の仮想制震ダンパーの最大応答変位でも、「反時計回り」が「時計回り」より相当大きくなっているが、図-14で示したのと同じ要因である。制震ダンパーのある方が「反時計回り」と「時計回り」の差が小さいのは、制震ダンパーが変位を抑制しているためである。

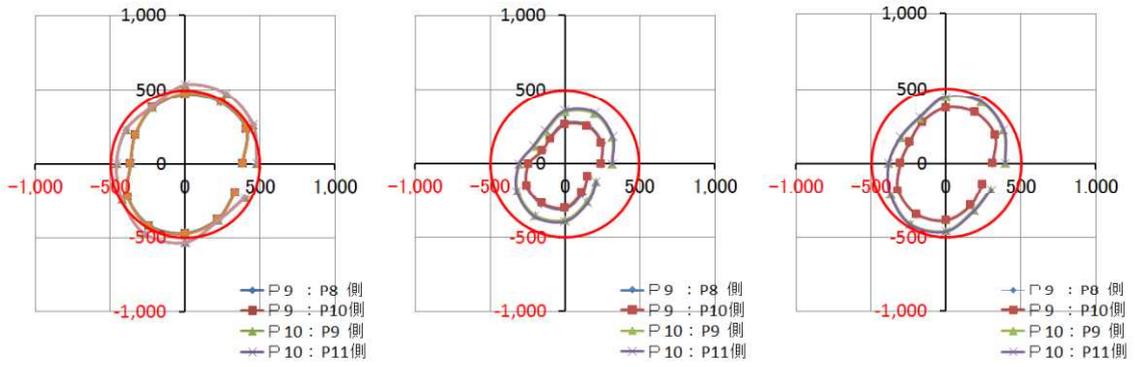
一方、制震ダンパー 9,000kN 適用時の免震支承の最大応答変位は、「反時計回り」が「時計回り」より小さい傾向にあり、制震ダンパーが大きく抵抗するため、トレードオフの関係となっている。ただし、「平均値」では、概ね 250%を満足している。これに対し、制震ダンパー 0kN の免震支承の最大応答せん断ひずみは、「反時計回り」と「時計回り」はほぼ同等である。これは、免震支承が橋脚の中心点に点として位置することおよび免震支承の等方性によるものと考えられる。

#### (4) 入力方向を135度回転させた応答の分析

入力方向 135 度回転させて2方向同時入力した場合の「反時計回り」および「時計回り」の入力地震波の加速度オービットをそれぞれ図-15に示す。

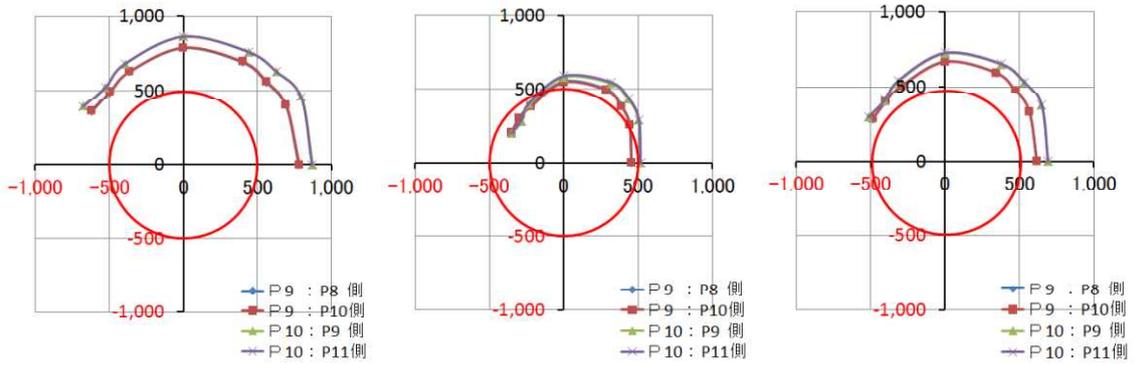
「反時計回り」は制震ダンパーの取付け方向（相補直交成分波方向）の入力加速度が大きいのにに対し、「時計回り」は小さい。

免震支承および P10 の P11 側の制震ダンパーの応答変位オービットを図-16に、免震支承の時刻歴合成変位の絶対値および制震ダンパーの時刻歴応答変



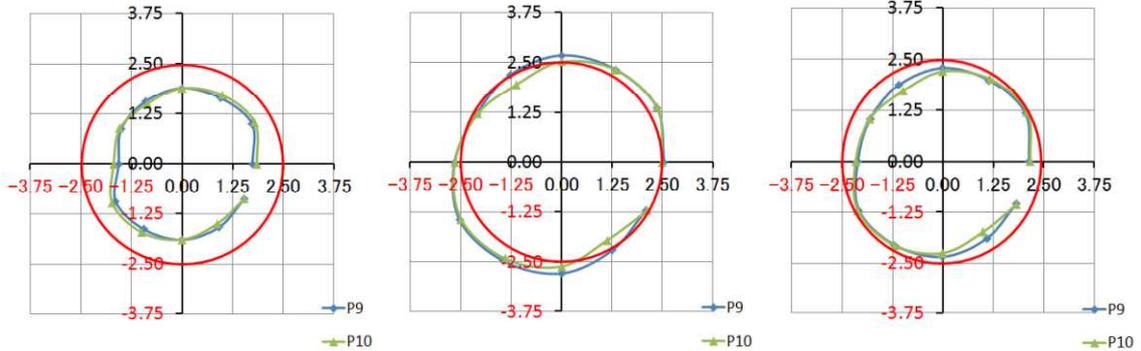
(a) 「反時計回り」 (b) 「時計回り」 (c) 平均値

図-10 制震ダンパー 9,000kN を設置した制震ダンパーの最大応答変位



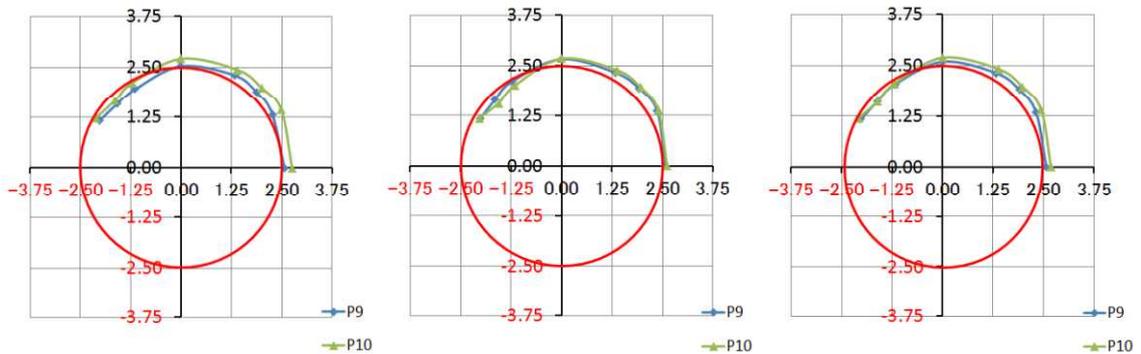
(a) 「反時計回り」 (b) 「時計回り」 (c) 平均値

図-11 制震ダンパー 0kN の仮想制震ダンパーの最大応答変位



(a) 「反時計回り」 (b) 「時計回り」 (c) 平均値

図-12 制震ダンパー 9,000kN を設置した免震支承の最大応答せん断ひずみ



(a) 「反時計回り」 (b) 「時計回り」 (c) 平均値

図-13 制震ダンパー 0kN の免震支承の最大応答せん断ひずみ

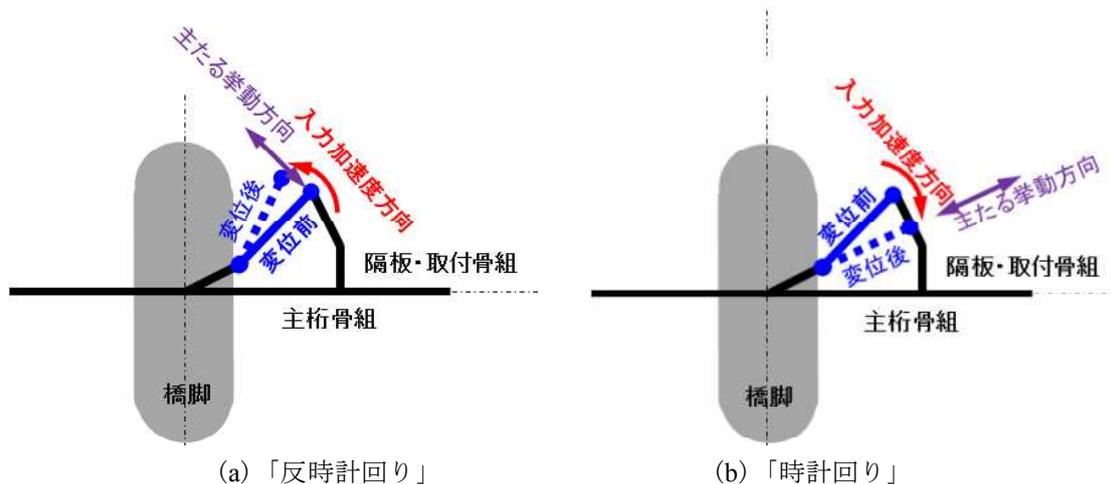
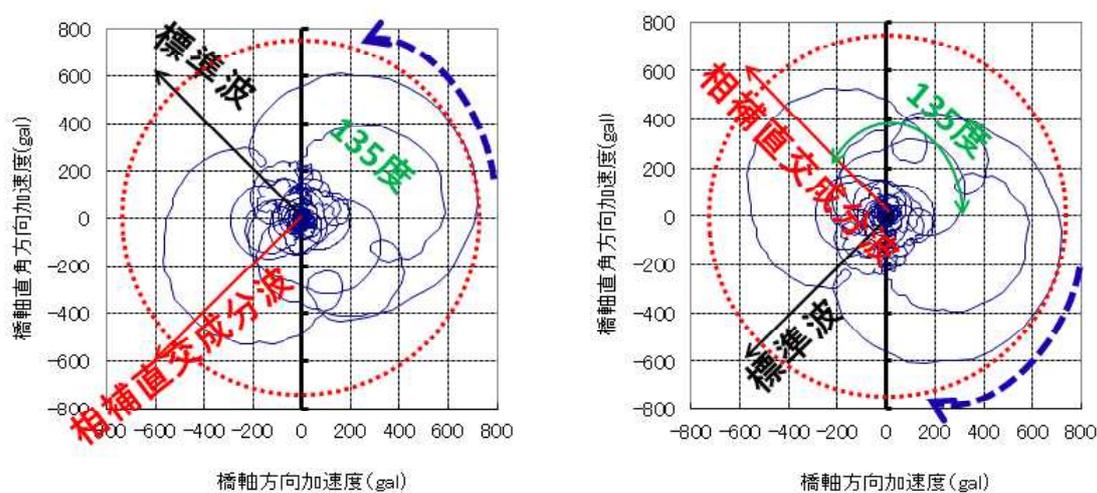


図-14 制震ダンパー取付け位置の主たる動き



(a) 反時計回りの相補直交成分波を用いた場合 (b) 時計回りの相補直交成分波を用いた場合

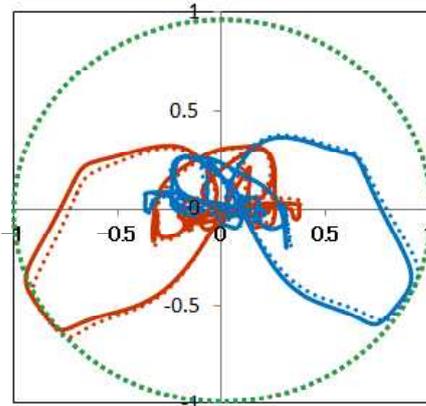
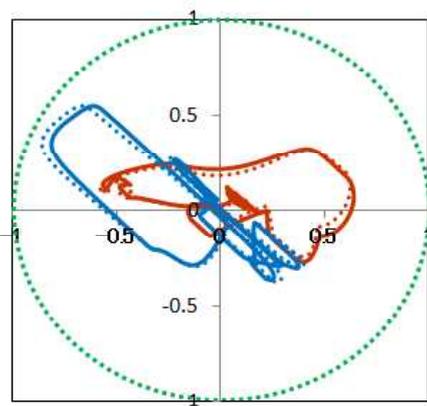
図-15 入力方向を135度回転させた2方向地震動の加速度軌跡

位を図-17および図-18に示す。さらに、制震ダンパーのない場合の制震ダンパー両端取付け位置のオービットを図-19に示す。

同じ制震ダンパーの抵抗力であれば、免震支承と制震ダンパーの応答変位オービットは、図-16に示すようにほぼ同じである。ただし、制震ダンパー9,000kNでは「反時計回り」と「時計回り」の応答が異なっており、制震ダンパーのない場合は逆符号であるがほぼ同じの応答変位オービットとなっている。同様に、免震支承の時刻歴応答変位の合成値は、図-17に示すように制震ダンパー9,000kNでは「反時計回り」と「時計回り」で異なっているが、制震ダンパー0kNではほぼ一致している。これに対し、免震構造では、地震波の組み合わせによる影響は極めて小さい。しかし、制震ダンパーの応答変位は、図-18に示すように制震ダンパーの抵抗力の有無に

かわらぬ異なっている。このように、制震ダンパー0kNの免震構造では「反時計回り」と「時計回り」で免震支承の挙動は同じであるので、橋全体の動的挙動は同等の応答を呈していると考えられるが、制震ダンパーの挙動は異なっている。

図-19に示す制震ダンパー0kNの制震ダンパー取付け部の変位オービットより、橋脚取付側では極めて小さい変位範囲であり、桁取付側では広い変位範囲である。これは、制震ダンパーは桁の水平振動により挙動が変化することを意味し、「反時計回り」では制震ダンパーの圧縮方向に大きく変位するが、「時計回り」では制震ダンパーの回転変位が卓越し伸縮は小さい。これは、制震ダンパーのは構造軸方向のみにしか機能しないことに加えて、制震ダンパーは有限長があり、かつ橋軸方向から角度を有して設置されていることの影響である。



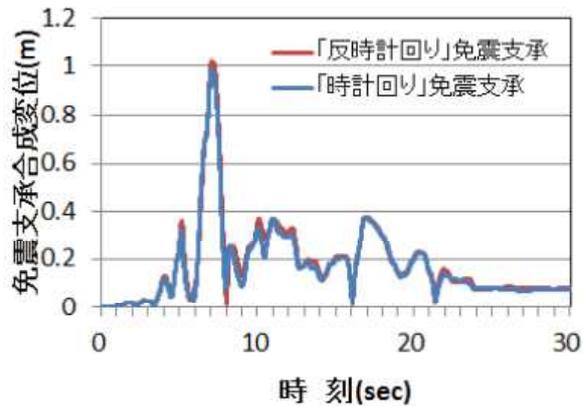
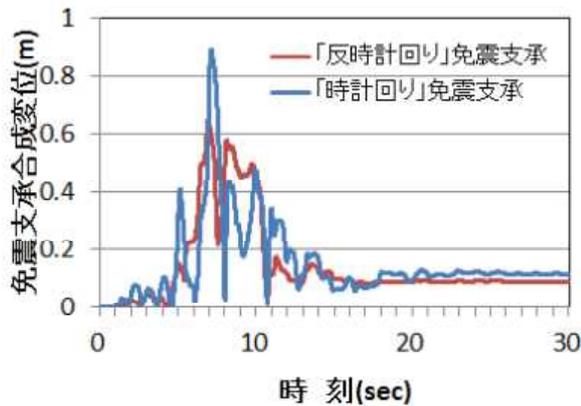
— 「反時計回り」免震支承  
 — 「時計回り」免震支承  
 ..... 「反時計回り」制震ダンパーP10(P11側)  
 ..... 「時計回り」制震ダンパーP10(P11側)  
 (単位：m)

— 「反時計回り」免震支承  
 — 「時計回り」免震支承  
 ..... 「反時計回り」制震ダンパーP10(P11側)  
 ..... 「時計回り」制震ダンパーP10(P11側)  
 (単位：m)

(a) 制震ダンパー 9,000kN 設置

(b) 制震ダンパーのない場合

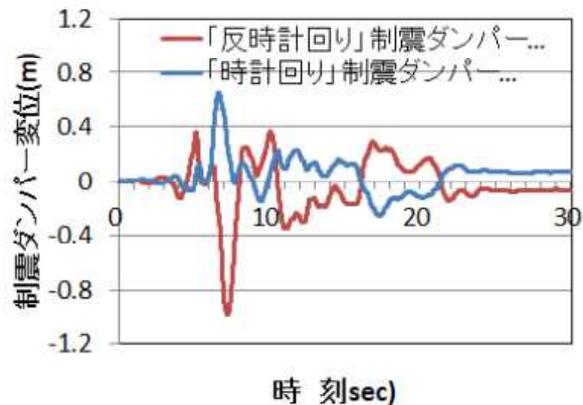
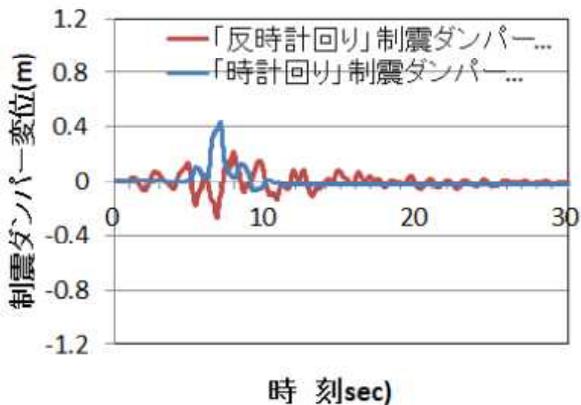
図-16 免震支承，制震ダンパーの相対変位オービット (P10)



(a) 制震ダンパー 9,000kN 設置

(b) 制震ダンパーのない場合

図-17 免震支承の時刻歴応答合成変位の絶対値 (P10)



(a) 制震ダンパー 9,000kN 設置

(b) 制震ダンパーのない場合

図-18 制震ダンパーの時刻歴応答変位 (P10)

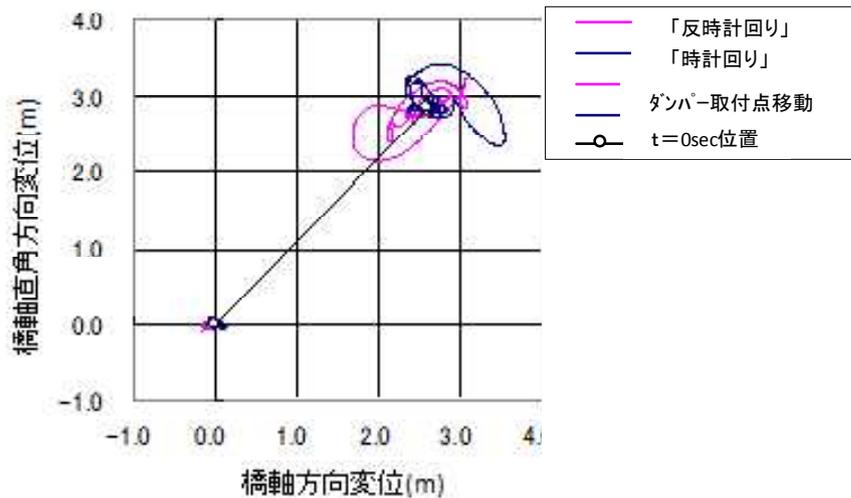


図-19 制震ダンパー 0kN の場合の制震ダンパー両端の応答変位オービット (P10)

## 5. まとめ

免制震すべりシステムを適用した橋は地震時に2方向に変位しやすく、曲率の比較的大きい平面曲線を有している橋の変位は慣性力の方向に依存しやすい。このため、地震波を2方向同時に入力し、実地震動に合わせた地震時挙動を把握するのがよい。しかし、2方向同時入力による耐震性の評価手法は見当たらない。そこで、免制震すべりシステムを適用した曲線橋を対象に、道路橋示方書の標準波を基本とし、既往の研究に基づき2方向同時入力による耐震性の評価を試みた。以下、検討結果をまとめる。

- ① 道路橋示方書の標準波のうち、直交する2つの地震波を用いて2方向同時入力により動的解析を行った。2方向同時入力による入力加速度の最大応答スペクトルは、1方向入力によるものの約1.3倍となり、過大な照査方法であることが確認された。また、この手法に用いた地震波は一通りの組み合わせであり、その地震波の特性が生じやすい。そこで、入力方向を変えた応答値を平均で評価したが、1方向入力より大きな応答であった。
- ② 道路橋示方書の標準波と相補直交成分波を用いて、2方向同時入力による耐震性を評価した。入力は、標準波を橋軸方向に相補直交成分波を橋軸直角方向に入力する場合と、その逆に入力する場合の2とおりであり、前者の入力加速度は反時計回りの特性を有し、後者は時計回りの特性を有している。この結果より、以下のことが明らかとなった。

- ・入力方向による応答に相違が見られた。

これは、制震ダンパーは構造軸方向にのみ機能するためであり、制震ダンパー 0kN の場合には入力方向による免震支承の応答の相違は小さい。

これは、免震支承やすべり支承の機能には方向性がないためである。したがって、免制震すべりシステムでの2方向同時入力による耐震性評価では、入力方向を何通りかに設定する必要があるが、実地震時のような全方向に変位する地震時挙動を把握することが可能であると考えられる。一方、免震支承やすべり支承のみでは入力方向を変える必然性は小さいと考えられることから、実地震時のような地震時挙動を把握できるのみならず、入力方向を変える一方向入力に比べても利便性が高いものと考えられる。

- ・「反時計回り」と「時計回り」の応答に相違が見られた。

これは制震ダンパーを橋軸方向から角度を持たせて非対称に設置したためであり、制震ダンパーは桁側の取付け位置の回転変位により応答に差が生じたものである。したがって、制震ダンパーを橋軸方向に設置する場合にはこの影響はない。本検討では、それぞれの応答は地震波の設定に起因する特性により真逆に影響したものと考えられるので、その影響を緩和する目的でそれぞれの応答を平均して評価した。この結果、1方向入力と大きく異なる結果を得た。耐震性の照査への適用を図る場合には、このような方法が有望なアプローチと考えられ、今後検討に値する方法である。

## あとがき

構造物の地震時挙動は2方向に応答することから、構造物の特性によっては2方向同時入力により地震時挙動の把握を試みた。しかし、道路橋示方書の標準波を直接2方向入力すると1方向入力に比べて大きな応答を呈することは否めない。そこで、免制震すべりシステムを適用した変位性能の高い長多径間連続桁を対象に、相補直交成分波を用いて2方向同時入力により耐震性を評価したところ、1方向入力による応答値と大きな差はないことがわかった。この結果、免制震すべりシステムを適用する橋でも相補直交成分波を用いた2方向同時入力による耐震性評価は有益であると考えられる。

**謝辞：**本論文で紹介した解析結果は、西日本高速道路株式会社が主催されている「免制震すべりシステムに関する検討会」の成果を用いた。ここに、関係各位に謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 松田泰治,宇野裕恵,宮本宏一,柚木浩一：温度による桁の伸縮を考慮した橋梁の応答評価に関する一考察, コンクリート工学年次論文, Vol.30, No.3, pp.1039-1044, 2008.7
- 2) 宇野裕恵, 松田哲夫, 宮崎貞義, 福岡賢, 大内浩之：免制震すべりシステムの開発(1)：コンセプト, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集, 20010.9
- 3) 松田宏, 松田哲夫, 宇野裕恵, 福岡賢, 花田克彦：免制震すべりシステムの開発(2)：解析方法, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集, 20010.9
- 4) 福岡賢, 松田哲夫, 大内浩之, 松井隆行, 中谷隆夫, 松田宏, 宇野裕恵：免制震すべりシステムの開発(3)：ケーススタディ, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集, 20010.9
- 5) 松田哲夫, 鶴飼恵三, 和田吉憲, 宇野裕恵, 松田宏：長多径間連続曲線橋に適用した免制震すべりシステムのコンセプトと基本構造特性, 土木学会第14回性能に基づく橋等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2011.7
- 6) 松田哲夫, 五十嵐晃, 上田卓治, 宮崎貞義, 松田宏：免制震すべりシステムを適用した橋梁における支承部デバイス機能に関する一考察, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.68, pp. I\_683- I\_696, 2012.
- 7) 宮崎貞義, 井置聡, 上田卓司, 和田吉憲, 五十嵐晃, 古川愛子, 松田哲夫, 中谷隆夫, 宇野裕恵, 松田宏：免制震すべりシステム(I)：今切川橋の支承部デバ

イスの機能評価, 土木学会第66回年次学術講演会講演概要集, 20011.9

- 8) Ouchi, H. Ueda, T. Wada, Y. Igarashi, A. Matsuda, T. Sakate, M. Uno, H. and Matsuda, H. (2012). ICSS(1) Concept and fundamental characteristics of seismic response. 15th World Earthquake.
- 9) Matsuda, T. Igarashi, A. Ueda, T. Sakate, M. Uno, H. Matsuda, H. (2012). ICSS (2) Function and Contribution of Bearing Devices in Reduction of Seismic Action. 15th World Earthquake..
- 10) Tsushima, D. Igarashi, A. Ouchi, H. Ueda, T. wada, Y. Matsuda, T. (2012). ICSS(4) A design applied for super long multi-span bridge. 15th World Earthquake.
- 11) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 2002.3
- 12) 後藤芳顯, 江坤生, 小畑誠：2方向繰り返し荷重を受ける薄肉円形断面鋼製橋脚柱の履歴特性, 土木学会論文集, No.780/ I -70, pp.181-198, 2005
- 13) 松田宏, 中谷隆生, 五十嵐晃, 和田吉憲, 古川愛子, 和田吉憲, 上田卓司, 松田哲夫, 宇野裕恵, 宮崎貞義：ICSSを適用した橋梁のサイト特性を考慮した2方向同時入力による動的解析, 土木学会第67回年次学術講演会講演概要集, 20012.9 (投稿中)
- 14) Sakate, M. Igarashi, A. Ouchi, H. Ueda, T. wada, T. Matsuda, T. Uno, H. and Matsuda, H. (2012). ICSS(3) Seismic response to bidirectional input ground motions. 15th World Earthquake.
- 15) 井上和真, 五十嵐晃, 古川愛子, 和田吉憲, 松田哲夫, 宇野裕恵, 松田宏, 中谷隆夫：免制震すべりシステム(II-2)：免制震すべりシステムに対する2方向同時入力に用いるヒルベルト変換, 土木学会第66回年次学術講演会講演概要集, 2011.9
- 16) 宇野裕恵, 五十嵐晃, 和田吉憲, 古川愛子, 松田哲夫, 松田宏, 中谷隆生, 井上和真：免制震すべりシステム(II-3)：2方向同時入力時の制震ダンパーの挙動, 土木学会第66回年次学術講演会講演概要集, 2011.9
- 17) 五十嵐晃, 井上和真, 古川愛子, 宇野裕恵, 松田宏：標準波-相補直交成分波の組合せによる橋梁の耐震照査用水平2方向入力地震動, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.68, pp. I\_458- I\_469, 2012.
- 18) Igarashi, A. Inoue, K. Furukawa, A. Uno, H. and Matsuda, H. (2012). Synthesis of bidirectional seismic ground motion by standard and complementary waves for seismic design of bridges. 15th World Earthquake.
- 19) 中谷隆夫, 五十嵐晃, 古川愛子, 上田卓司, 和田吉憲, 松田哲夫, 松田宏, 宇野裕恵：免制震すべりシ

## Evaluation for the seismicity of ICSS utilizing bi-directional input of seismic waves

Tetuo Matusda, Akira Igarashi, Aiko Furukaw, Hiroyuki Ouchi,  
Hiroshige Uno and Hiroshi Matsuda

There is ICSS (Isolation Seismic Controlled Slide System) on the seismic design of multi-span continuous girders combined appropriately with the isolation bearing, the seismic damper and sliding bearing. It is very important to grab the actual behavior as well as possible. So, it is tried to utilize the bi-directional input of seismic waves to the bridge adapted ICSS. By means of a new research about the bi-directional measure, the seismic bi-directional behavior fitting to Japan specifications was given. As a result, it was found ICSS was apt to be influenced by input direction due to single-directional ability of such as the seismic damper. In addition, as the seismic damper was set the structural axis have angle from longitudinal direction, it was influenced by set input direction of each seismic waves. On the other hand, In the case of the bearing device without single-directional ability, it is scarcely influenced by input direction with only one combination of seismic wave.