

# 長大橋の耐震性能向上策における せん断パネルダンパーの適用効果

杉岡弘一<sup>1</sup>・藤林美早<sup>2</sup>・杉山尚希<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 阪神高速技研株式会社 技術部 (〒550-0011 大阪市西区阿波座1-3-15)

E-mail:koichi-sugioka@hanshin-tech.co.jp

<sup>2</sup>正会員 阪神高速道路株式会社 大阪管理部 (〒552-0006 大阪市港区石田3-1-25)

E-mail:misa-fujibayashi@hanshin-exp.co.jp

<sup>3</sup>正会員 (株)総合技術コンサルタント 大阪支社 (〒533-0033 大阪市東淀川区東中島3-5-9)

E-mail:n-sugiyama@sogo-eng.co.jp

長大橋のレベル2地震動に対する耐震性能向上対策として、制震・免震設計法の適用が増加している。ここでは、せん断パネルダンパーに着目し、その適用効果を検証するため、1質点系簡易モデルを用いた時刻歴応答解析を実施した。解析ケースの設定に際し、耐震性能向上対策としてせん断パネルダンパーを適用した長大鋼アーチ橋の固有振動周期の違いに着目し、その違いを表現できる上部工重量、橋脚剛度・降伏耐力を考慮した。その結果、固有振動周期をはじめとする橋梁諸元によって、せん断パネルダンパーを設置する橋梁の地震応答低減効果に変化することを明らかにするとともに、せん断パネルダンパーの固定支承側橋脚、可動支承側橋脚および両橋脚への配置が地震時水平力の分散効果に及ぼす影響を示している。

**Key Words :** *Shear panel damper, Seismic retrofit, Dynamic analysis, Long span bridge*

## 1. はじめに

兵庫県南部地震による道路橋の震災経験を踏まえ、巨大地震に対する橋梁の安全性向上は必須となっており、全国で橋梁の耐震補強が実施されてきている。橋脚補強、支承取替、落橋防止システムの設置など、既設一般高架橋に対する耐震補強は既設長大橋より先行して進められ、長大橋の耐震補強は遅れをとっていることも多い。長大橋の耐震補強においては、一般高架橋の耐震補強に適用される通常の耐力・じん性補強を用いた場合、補強部材の大型化や重量増加による施工性の低下、あるいは構造体の剛性や重量の増加による補強規模の増大などの問題が生じる場合もある。

この様な中、道路橋の耐震補強法として、従来の耐力・じん性を向上させる方法でなく、ダンパーなど取換え可能な制震デバイスを用いて積極的に損傷を制御する制震・免震設計法<sup>1)</sup>の適用が増加してきている。これらの制震・免震設計法によれば、主構造の損傷の回避や補強範囲の縮小、あるいは補強部材の小規模化などコスト縮減効果が期待できる。阪神高速道路においても制震

デバイスとして履歴減衰型のせん断パネルダンパーの適用を試み、従来の変位制限構造による補強案との比較設計を通して、長大橋の構造的な特性を考慮した最適な耐震補強構造を提案している<sup>2)4)</sup>。長大鋼アーチ橋では、橋軸方向地震動に対して、塑性変形によるエネルギー吸収により、水平変位の抑制と地震時応答値の低減を可能にする支承部せん断パネルダンパーを適用している。併せて、固定支承側の上下部構造間にせん断パネルダンパーを設置する場合、常時およびレベル1地震時までは固定支承として機能を維持し、これを越える水平力が作用した場合に支承の固定機能を開放し制震デバイスに地震力を伝達させるためのいわゆるロックオフ機能を有する構造を提案している。長大鋼斜張橋では、橋軸直角方向地震動に対して、主塔下部に配置された斜材の座屈防止と応答値低減が期待できる複数の制震パネルで構成されたガセット部せん断パネルダンパーを設置している。これらの耐震補強については文献7)にも示している。しかしながら、それぞれの耐震補強対策は個別橋梁ごとに設計されることから、せん断パネルダンパーが適用可能な橋梁諸元や、その適用効果が明確でない。せん断パネ

ルダンパーの適用にあたっては、対象橋梁の地震応答特性を把握した上で、適用条件やその設置効果を明らかにしておく必要があると考えられる。

そこで、本研究では、まず、せん断パネルダンパーを用いた耐震性能向上対策を実施した2つの長大鋼アーチ橋について、それらの固有振動周期の違いに着目し、その違いを表現できる上部工重量、橋脚剛度・降伏耐力を考慮した解析ケースを設定した上で、1質点系簡易モデルを用いた時刻歴応答解析を実施した。次に、せん断パネルダンパーの適用効果を応答値の比較から考察し、せん断パネルダンパーの適用効果が高い橋梁諸元を示した。併せて、地震時水平力の分散効果について、せん断パネルダンパーを固定支承側、可動支承側および両橋脚に設置した場合の応答値の比較を通して考察した。

## 2. 固有振動周期の違いに着目した解析

### (1) 解析対象

対象とする橋梁は、例えば下路式の長大鋼アーチ橋を想定している。ここでは、橋梁諸元について限定せず、レベル2地震動に対する耐震性能向上対策として、せん断パネルダンパーを適用した長大鋼アーチ橋<sup>4),6)</sup>を参考に、解析パラメータを設定した。比較対象とする橋梁諸元を表-1に示す。

### (2) 解析モデルと解析条件

解析では、図-1に示す1質点系解析モデルを用いて、非線形時刻歴応答解析を実施した。上部構造の質量を橋脚およびせん断パネルダンパーのバネが支持する構成とした。

解析ソフトはDYNA2E (Ver 8.00) を用い、数値積分

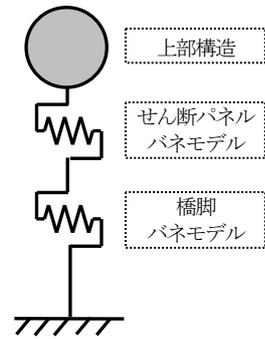


図-1 1質点系解析モデル

はニューマークの $\beta$ 法で、積分時間間隔 0.002秒とした。減衰定数は、0.02とした。

入力地震動は、道路橋示方書V耐震設計編<sup>9)</sup>に示されるレベル2地震動のタイプIおよびタイプIIとした。ここでは、表-1に示すアーチ橋AとBの地盤種別が共にIII種地盤であることから、III種地盤における波形とした。

せん断パネルダンパー設置前の解析では、タイプIおよびタイプIIの各3波形を用いたが、せん断パネルダンパー設置後の解析では、設置前の解析における最大応答値を考慮し、各タイプからI-III-2およびII-III-3の2波を選定し、解析を実施した。

### (3) 解析パラメータの設定

解析パラメータの設定に際し、表-1に示す長大鋼アーチ橋の固有振動周期の違いに着目し、その違いを表現できる上部工重量、橋脚剛度・降伏耐力を考慮した上で解析ケースを表-2に示すとおり設定した。

上部工重量は、表-1に示すアーチ橋AとBに加え、それらの平均重量程度の3つのパラメータを設定した。

橋脚剛度は、材料種別、断面剛性、橋脚高、基礎バネ等により変化するため、固有振動周期に着目して設定

表-1 せん断パネルダンパーを適用した長大鋼アーチ橋の諸元<sup>6)</sup>

橋梁一般図	アーチ橋A		アーチ橋B	
	側面図	断面図	側面図	断面図
支条件	可動	固定	固定	可動
支間長 (m)	254.0		156.8	
上部工重量 (kN)	55840		44108	
下部工重量 (kN)	32577	37815	37674	29865
下部構造の構造形式	鉄筋コンクリート橋脚	鉄筋コンクリート橋脚	鋼製橋脚	鋼製橋脚
下部構造躯体の高さ (m)	16.2	18.7	42.8	41.1
下部工剛性 (EI)	充填部 (kN・m <sup>2</sup> /脚)	2.963E+09	3.975E+09	2.524E+09
	中空部 (kN・m <sup>2</sup> /脚)			5.177E+08
固有周期	上部工～固定橋脚 (s)	0.835		2.117
	可動橋脚単体 (s)	0.366		0.557

表-2 解析ケース名称と解析パラメータ

橋脚剛度 (kN/m)	降伏耐力 (kN)	上部工重量 (kN)		
		45,000	49,500	54,400
36,000	28,000	CASE-A11	—	—
	21,000	CASE-A12	—	—
	14,000	CASE-A13	—	—
180,000	55,000	—	CASE-B21	—
	40,000	—	CASE-B22	—
	25,000	—	CASE-B23	—
960,000	55,000	—	—	CASE-C31
	40,000	—	—	CASE-C32
	25,000	—	—	CASE-C33

表-3 各解析ケースの固有振動周期

解析ケース	固有周期(秒)
CASE-A11	2.24
CASE-A12	
CASE-A13	
CASE-B21	1.05
CASE-B22	
CASE-B23	
CASE-C31	0.48
CASE-C32	
CASE-C33	

した。設定に際しては、表-1に示すアーチ橋AとBの固有振動周期を参考にして、3つのパラメータを設定した。表-3に各解析ケースの固有振動周期を示す。

橋脚の降伏耐力は、適用設計基準や、経年劣化の状況などにより異なるため、表-1に示すアーチ橋AとBの橋脚の降伏耐力を中央値として、それぞれ前後の降伏耐力を加えた3つのパラメータを設定した。

#### (4) せん断パネルダンパーの設定

せん断パネルダンパーの構造概要を図-2に示す。せん断パネルダンパーは、大規模地震時に塑性せん断変形するせん断パネルと、フランジ、補剛材およびベースプレートで構成される。せん断パネルには、降伏強度のばらつきが小さく、塑性後の変形性能が高い低降伏点鋼(材質 LY225)を用いており、塑性変形後の安定した履歴減衰によって地震エネルギーの吸収を図っている。

せん断パネルダンパーの設定に際しては、せん断パネルダンパーの設置に伴うスペースや取付部の制約がない

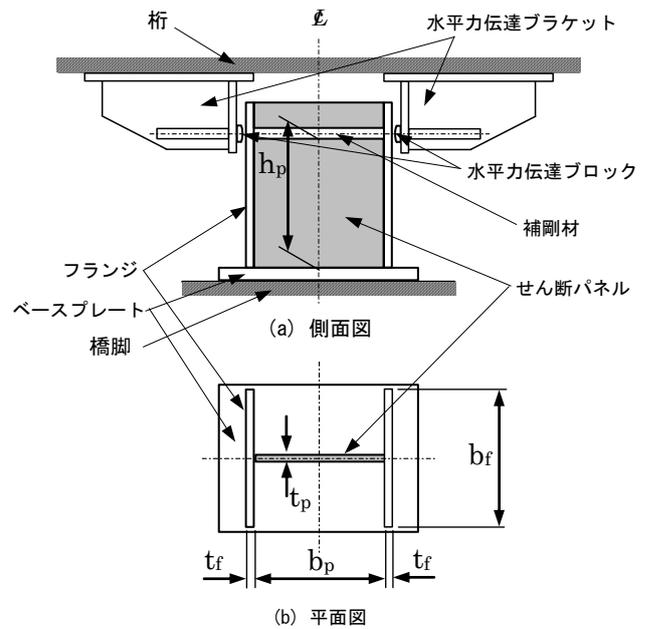


図-2 せん断パネルダンパーの構造概要

ものとした。ただし、せん断パネルについては、板厚は  $t=45\text{mm}$  以下とし、高さと同幅とした。せん断パネル本体の履歴曲線などの特性値については、既往の研究成果<sup>7)</sup>を参考に決定した。せん断パネルの水平力  $H_p$  - 水平変位  $\delta_p$  関係は、バイリニア型とした。せん断パネル本体の要求性能についても同様に、既往の研究成果<sup>7)</sup>を参考に決定した。各解析ケースにおいて、その要求性能を確保した上で応答値低減効果の高いせん断パネルダンパーの構造諸元を表-4に示す。

#### (5) せん断パネルダンパー設置による応答低減効果

耐震性能向上対策におけるせん断パネルダンパーの適用効果を検証するために、表-2に示す各解析ケースについて、せん断パネルダンパー設置前後における橋脚の応答値を比較した。

表-5ではタイプII地震動に対する橋脚の応答水平変位  $\delta_p$  を、表-6ではタイプII地震動に対する橋脚の応答水平反力  $H$  を、それぞれ示す。

まず、橋脚の応答水平変位に着目すると、せん断パネルダンパー設置による応答値の低減幅にばらつきがある

表-4 せん断パネルダンパーの諸元一覧表

項目	記号	単位	A11	A12	A13	B21	B22	B23	C31	C32	C33
パネル	幅	$b_p$	mm	850	750	600	850	850	700	850	700
	高さ	$h_p$	mm	850	750	600	850	850	700	850	700
	板厚	$t_p$	mm	38	33	27	38	38	31	38	31
	材質	—	—	LY225							
フランジ	幅	$b_f$	mm	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	板厚	$t_f$	mm	45	45	45	45	45	45	45	45
	材質	—	—	SM490Y							
設置基数	N	基	4	4	4	8	6	6	8	6	6

表-5 橋脚の応答水平変位  $\delta_p$  (タイプII)

解析ケース	①設置前 (m)	②設置後 (m)	①-② (m)	②/①
CASE-A11	1.048	0.936	0.112	0.89
CASE-A12	1.062	0.947	0.115	0.89
CASE-A13	0.802	0.755	0.047	0.94
CASE-B21	0.500	0.404	0.096	0.81
CASE-B22	0.471	0.435	0.036	0.92
CASE-B23	0.472	0.441	0.031	0.93
CASE-C31	0.088	0.051	0.037	0.58
CASE-C32	0.105	0.048	0.057	0.46
CASE-C33	0.139	0.091	0.048	0.65

表-6 橋脚の応答水平反力 H (タイプII)

解析ケース	①設置前 (kN)	②設置後 (kN)	①-② (kN)	②/①
CASE-A11	28,650	28,380	270	0.99
CASE-A12	22,160	21,880	280	0.99
CASE-A13	15,000	14,880	120	0.99
CASE-B21	57,350	56,190	1,160	0.98
CASE-B22	43,000	42,570	430	0.99
CASE-B23	29,020	28,640	380	0.99
CASE-C31	56,960	48,580	8,380	0.85
CASE-C32	44,040	40,390	3,650	0.92
CASE-C33	32,280	29,170	3,110	0.90

ものの、すべての解析ケースにおいて応答水平変位が低減していた。表-5のせん断パネルダンパー設置前後の比率 (②/①) に着目すると、固有振動周期が短い解析ケースCASE-C31~C33で大きく低減している。ただし、これは橋脚の剛性や耐力が大きく、設置前の応答水平変位が小さい場合であり、低減量 (①-②) はわずかであった。一方、橋脚の応答水平変位の低減量が大きかったのは、固有振動周期が長い解析ケースCASE-A11~A13であり、最大の応答水平変位低減量は115mmであった。

次に、表-6に示す橋脚の応答水平反力に着目すると、固有振動周期が長い解析ケースCASE-A11~A13では、応答水平反力Hの低減量は小さいが、固有振動周期が短い解析ケースCASE-C31~C33では、最大の応答水平反力低減量が8,400kN程度と大きくなった。

なお、タイプI地震動に対して、せん断パネルダンパー設置前後における橋脚の応答値を比較すると、タイプII地震動に対する比較と同様の結果が得られた。

それぞれの長大橋では、支間長、上部構造質量、下部構造剛性、およびその高さなど構造諸元が異なるが、橋梁構造に関する諸元の違いはいずれも固有振動周期に影響すると考えられる。得られた結果について、固有振動周期の違いに着目し、せん断パネルダンパー設置前後における橋脚の応答値を比較したものを、図-3および図-4

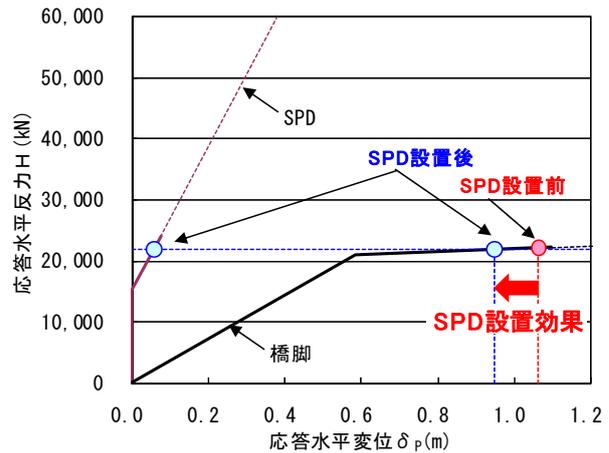


図-3 固有振動周期が長い橋梁におけるせん断パネルダンパーの設置効果 (CASE-A12)

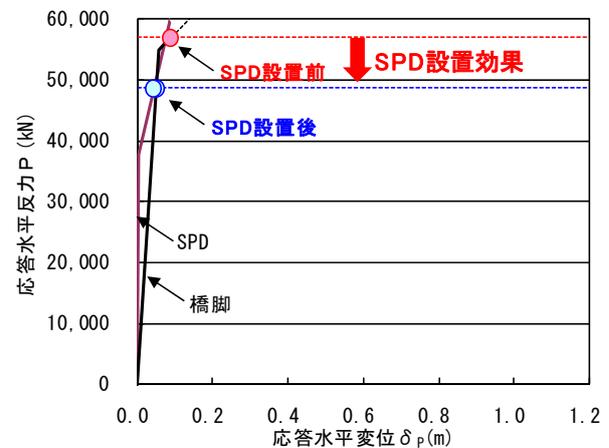


図-4 固有振動周期が短い橋梁におけるせん断パネルダンパーの設置効果 (CASE-C31)

に示す。なお、図中のSPDは、せん断パネルダンパーである。図-3に示す固有振動周期の長い橋梁は、固有振動周期の短い橋梁と比較して、応答水平変位の低減量が大きかった。一方、図-4に示すとおり、応答水平反力の低減量は、固有振動周期の長い橋梁と比較して、固有振動周期の短い橋梁が大きいと考えられる。

### 3. 地震時水平力の分散効果に着目した解析

#### (1) 解析モデルと解析条件

せん断パネルダンパーの適用に伴う地震時水平力の分散効果を検証するため、図-5に示す1質点系解析モデルを用いて、時刻歴応答解析を実施した。

解析モデルとして、固有振動周期の長い橋梁と、短い橋梁の2つの橋梁を設定した。固定支承側橋脚および可動支承側橋脚の解析モデルは、固有振動周期の長い橋梁ではそれぞれ解析ケースCASE-A12およびCASE-A13を、固

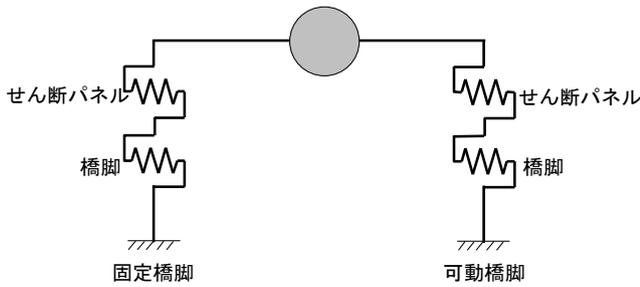


図-5 解析モデル(ケース4)

表-7 解析ケース

解析ケース		固定橋脚	可動橋脚
ケース1	現況	F	M
ケース2	固定橋脚SPD設置	SPD	M
ケース3	可動橋脚SPD設置	F	SPD
ケース4	両橋脚SPD設置	SPD	SPD

固定橋脚：固定支承側橋脚，可動橋脚：可動支承側橋脚  
 F：固定支承，M：可動支承，SPD：せん断パネルダンパー

有振動周期の短い橋梁ではそれぞれ解析ケースCASE-C32およびCASE-C33を用いた。

また、せん断パネルダンパーを設置する橋脚として、固定支承側橋脚のみに設置した場合、可動支承側橋脚のみに設置した場合、両橋脚に設置した場合の3つのケースとしてモデル化した。解析ケースを表-7に示す。なお、固定支承側橋脚にせん断パネルダンパーを設置する解析ケース2およびケース4では、固定支承の可動化とともに、常時およびレベル1地震時までには固定支承として機能を維持し、これを超える水平力が作用した場合に支承の固定機能を開放しせん断パネルダンパーに地震力を伝達させるためのいわゆるロックオフ機能を有する構造部位の設置を想定した。

その他の解析条件は、前章と同様とした。

## (2) せん断パネルダンパー設置による分散効果

固有振動周期の長い橋梁および短い橋梁の分散効果をそれぞれ図-6および図-7に示す。各図において、橋脚およびせん断パネルダンパーの荷重-変位曲線上に、各解析ケースの最大応答値をそれぞれプロットしている。図中の固定橋脚、可動橋脚、SPDは、それぞれ固定支承側橋脚、可動支承側橋脚、せん断パネルダンパーを示している。せん断パネルダンパーの設置により、固定支承側橋脚から可動支承側橋脚に地震時水平力を分散させているのは、表-7に示す解析ケース3とケース4である。

固有振動周期の長い橋梁を示す図-6において、可動支承側橋脚にせん断パネルダンパーを設置したケース3と現況のケース1との比較では、固定支承側橋脚の応答水

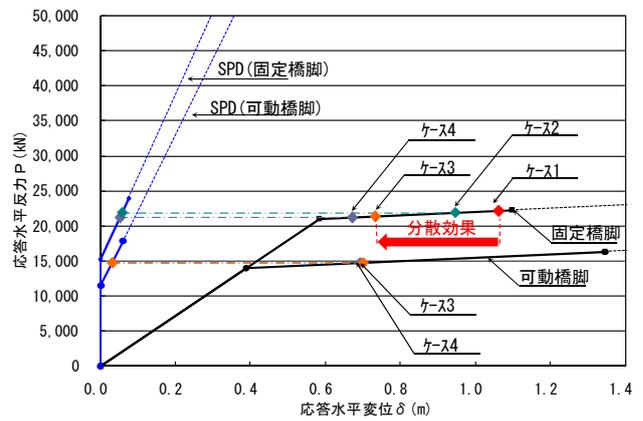


図-6 固有振動周期の長い橋梁の分散効果

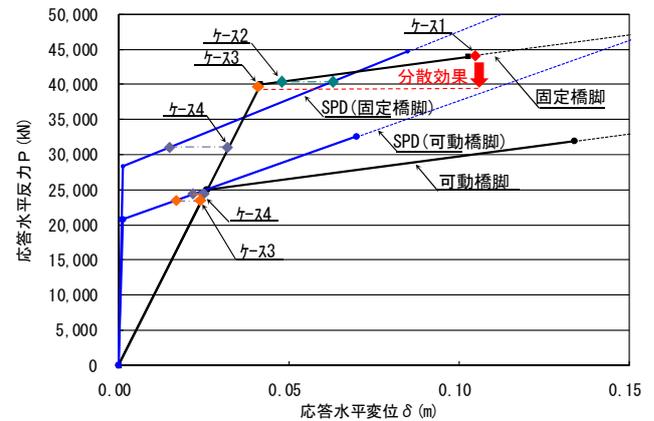


図-7 固有振動周期の短い橋梁の分散効果

平変位低減量は330mmと大きく、分散効果が明確であった。両橋脚にせん断パネルダンパーを設置したケース4では、橋脚の応答水平変位がさらに低減した。このことから、固有振動周期の長い橋梁にせん断パネルダンパーを設置する場合は、分散効果を期待して、まず、可動支承側橋脚にせん断パネルダンパーを設置することが有効と考えられる。そして、さらなる地震エネルギーの吸収による応答値の低減が必要な場合には、固定支承側橋脚にもせん断パネルダンパーを設置する必要がある。ただし、可動支承側橋脚にせん断パネルダンパーを設置する際には、分散効果による応答水平反力の増加を考慮して、可動支承側橋脚の耐力照査を実施する必要がある。一方、応答水平反力の低減については、2つのケースとも固定支承側橋脚が塑性化していることから、低減量は小さかった。

固有振動周期の短い橋梁を示す図-7においては、解析ケース3とケース1を比較すると、固定支承側橋脚の応答水平反力が大きく低減し、分散効果が明確であった。両橋脚にせん断パネルダンパーを設置したケース4では、橋脚の応答水平反力がさらに低減した。この解析例では、固定支承側橋脚の塑性化を防止することができた。この

ことから、固有振動周期の短い橋梁にせん断パネルダンパーを設置する場合も、固有振動周期の長い橋梁と同様に、まず、可動支承側橋脚にせん断パネルダンパーを設置すべきであり、さらなる応答値の低減には、固定支承側橋脚にもせん断パネルダンパーを設置することが有効と考えられる。一方、応答水平変位の低減については、解析ケース3とケース1の比較では、低減量は64mmと小さかった。

固有振動周期の長い橋梁および短い橋梁のいずれのケースにおいても、せん断パネルダンパーを可動支承側橋脚に設置した場合の分散効果による応答値の低減効果が有効であると考えられる。

#### 4. まとめ

長大橋の耐震性能向上対策におけるせん断パネルダンパーの適用効果を確認するため、1質点系簡易モデルを用いた時刻歴応答解析を実施した。解析ケースの設定に際し、レベル2地震動に対する耐震性能向上対策としてせん断パネルダンパーを適用した長大鋼アーチ橋の固有振動周期の違いに着目し、その違いを表現できる上部工重量、橋脚剛度・降伏耐力を考慮した。得られた主な知見を以下にまとめる

- (1) せん断パネルダンパーの適用による応答値の低減効果を確認した。しかし、その低減量は各解析ケースでばらつきがあり、橋脚の剛度や降伏耐力が小さく固有振動周期が長い解析ケースと、橋脚の剛度や耐力が大きく固有振動周期が短い解析ケースとでは明確な違いを確認した。すなわち、固有振動周期が2秒を超える長周期の解析ケースでは、応答水平変位の低減量が大きく、既設の伸縮装置や支承の取替が不要となったり、隣接桁との衝突を回避できるなどの効果が得られると考えられる。一方、固有振動周期が0.5秒程度の短周期の解析ケースでは、応答水平反力の低減量が大きく、地震時水平反力の低減・制御による補強規模の縮小が期待できることが分かった。
- (2) 固有振動周期の長い橋梁および短い橋梁について、せん断パネルダンパーをそれぞれ固定支承側橋脚のみに設置した場合、可動支承側橋脚のみに設置した場合、両橋脚に設置した場合の応答値を比較した。その結果、いずれのケースにおいても、せん断パネ

ルダンパーを可動支承側橋脚に設置した場合の分散効果による応答値の低減効果が有効であることを確認した。このことから、まず、可動支承側橋脚にせん断パネルダンパーを設置すべきであり、さらなる応答値の低減が必要な場合には、固定支承側橋脚にもせん断パネルダンパーを設置することが有効と考えられる。可動支承側橋脚のみに、せん断パネルダンパーを適用する場合は、固定支承側橋脚にせん断パネルダンパーを設置する場合に必要な既設固定支承の取替えやロックオフ構造の適用などが必要なくなるため、耐震性能向上対策におけるコスト縮減が期待できる。

なお、本稿に示した内容は、限られた解析諸条件と数値により実施した解析から得られた結果であり、一般性を有するものとするには、さらに多くの研究が必要である。今後、本研究で設定した解析パラメータについて、それらの設定数を増やし、さらに、入力地震動や地盤種別の違いによる影響などの知見を得たいと考えている。

**謝辞：**本稿のとりまとめに際し、(株)総合技術コンサルタント 明田修氏、小林康晃氏に貴重なご意見をいただいた。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：鋼・合成構造標準示方書IV耐震設計編，2008.2.
- 2) Koichi Sugioka, Hiroshi Kobayashi, Nobuhiro Mashima: Seismic Retrofit of the Cable-Stayed 640m Span Tempoan Bridge with Absorbing Devices, 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, Tokyo, Japan, 2010.7.
- 3) 杉岡弘一，濱田信彦，小林 寛，西岡 勉，杉山尚希：長大橋用せん断パネルダンパーの弾塑性特性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.57A，pp.528-541，2011.3.
- 4) 杉岡弘一，間嶋信博，松下裕明，姫野岳彦，松村政秀：スリット型ロックオフ支承を用いた既設アーチ橋の耐震補強，構造工学論文集，Vol.57A，pp.467-478，2011.3.
- 5) 杉岡弘一，島 賢治，松下裕明：不整形地盤における鋼斜張橋の耐震性能向上対策，構造工学論文集，Vol.58A，pp.413-422，2012.3.
- 6) 杉岡弘一，島 賢治，松下裕明：長大鋼アーチ橋の耐震補強におけるせん断パネルダンパーの適用効果，土木学会論文集A1（構造・地震工学）Vol.68, No. 4, pp.1\_748-1\_759，2012.
- 7) 阪神高速道路（株）技術部：長大橋における免震・制震デバイスの適用ガイドライン（案），2009.4.
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，丸善，2002.3.

## APPLICATION EFFECT OF SHEAR PANEL DAMPERS TO SEISMIC RETROFIT OF LONG SPAN BRIDGES

Koichi SUGIOKA, Misa FUJIBAYASHI, Naoki SUGIYAMA

Seismic response-control devices such as the shear panel dampers have been increasingly applied for seismic retrofit of long span bridges. In this article, non-linear dynamic time history analyses were carried in order to examine the correlation between bridge natural period and seismic response reductions. As a result, it is found that the seismic response reduction might be significantly different according to natural periods of bridges. The distribution effect of horizontal seismic forces was also confirmed by the shear panel damper arrangements.