

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19760318
 研究課題名（和文） 免震高架橋システムにおけるインタラクションを考慮した耐震性能評価
 研究課題名（英文） SEISMIC PERFORMANCE OF ISOLATED VIADUCT CONSIDERING INTERACTIONS BETWEEN DEVICES
 研究代表者
 松村 政秀（MATSUMURA MASAHIDE）
 大阪市立大学・大学院工学研究科・講師
 研究者番号：60315976

研究成果の概要：免震高架の免震メカニズムを補償するためには、(a)レベル1地震動に対しては、上部構造の移動を制限される、(b)強地震に対しては移動制限を解放される、という基本的な2つの機能が保証できるサイドブロックの設置が有効である。また、高架橋の耐震性評価において、縮小模型を用いる振動台実験の地震応答動解析による再現性および高架用の耐震性評価に小型振動台を用いることの有用性を明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	0	1,800,000
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	450,000	3,750,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学，構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：サイドブロック，免震，高架橋，耐震性評価

1. 研究開始当初の背景

上部構造・橋脚・定着構造・支承部からなる高架橋システムは、都市間あるいは都市内の交通輸送を担う社会基盤構造物として重要な役割を担っている。しかし、強地震時にこのような高架橋システムが損傷を受けると、災害時における緊急車両の通行や避難経路の確保という機能を十分に果たせない。さらに、交通の遮断や早期復旧の妨げになるというシナリオが容易に想像できる。

ここで、レベル1地震動程度の中小規模の地震に対しては伸縮装置の損傷を防止できるように上部構造の移動を伸縮装置の遊間内に制限し、レベル2地震動等の強地震時に

は橋脚・下部構造へ過大な慣性力を伝達させないように上部構造の移動制限を確実に解放できる移動制限装置（例えば支承サイドブロック、以下SBと称する）を採用すれば、免震機能を合理的かつ確実に発揮させることが可能であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、都市内高架橋システムを対象として、(i)橋脚・免震支承・高機能SBのインタラクション、および(ii)地震の作用方向が高架橋システムの地震に対する安全性評価に及ぼす影響を数値シミュレーションにより明確にすることを、当初の目的とする。ま

た、数値シミュレーション手法の妥当性は、縮小模型を用いる振動台実験により検証する。高架橋システムの設計において、(i)および(ii)を考慮する必要性の有無に関する研究成果を明示することも目的である。

3. 研究の方法

上述した目的の達成のため、主に、(a)弾塑性有限変位解析プログラムEPASS/USSPの高度化・機能アップ、(b)高架橋システムをモデル化した縮小模型を用いた振動台実験の実施、(c)免震高架橋の解析モデルの設定と地震応答解析の実施、(d)橋脚の縮小模型を用いた小型振動台による地震応答の再現性、を実施し、橋脚に支持された免震高架橋システムを対象として、(e)橋脚・免震支承・高機能SBのインタラクション、およびそれらが地震時の高架橋システムの地震に対する安全性評価に及ぼす影響、を明らかにする。なお、破断時の荷重あるいは変位を高精度に制御可能な高機能SB自体は、H17・18に交付を受けた「免震支承を有する橋脚への高機能サイドブロックの設置効果（科学研究費補助金・若手研究(B)，課題番号：17760379，研究代表者：松村政秀）」の研究成果を踏まえて、本研究において、これを発展させる。

上の(a)～(e)を達成するための具体的な方法は下記の通りである。

(1) 高機能SBの提案

SB基部の圧縮側にスリット加工を施し、高精度に破断特性の制御が可能な高機能SBを考案し(図-1参照)、その破断に至る荷重変位関係を載荷実験の結果に基づいて明確にする。また、高機能SB(記号ではCSBと称する)の破断特性は、静的な荷重作用と受ける場合と動的な荷重作用を受ける場合で異なることから、高機能その縮小模型を用いた静的・動的な載荷実験を実施する。

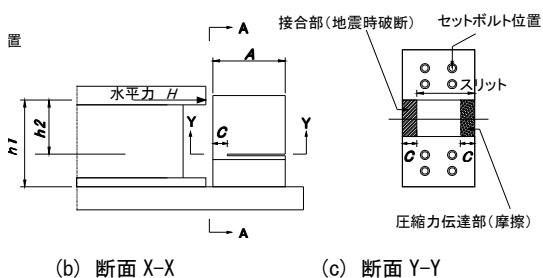


図-1 高機能SB (CSB)

(2) 高架橋システムをモデル化した縮小模型を用いた振動台実験の実施

橋脚-ゴム支承-上部構造(重り)からなる振動系を模した供試体を作成し、振動台により加振し、振動計の動的挙動を明確にする。

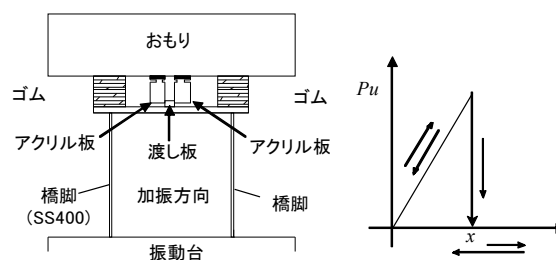


図-2 実験概要

図-3 ノックオフ要素

また、実験結果を用いて、地震応答解析に用いる高機能SBの破断特性を再現できる解析要素の妥当性を検証する。

ノックオフ機能を有するデバイスを設置した橋脚の振動応答特性を明らかにするため、図-2に示す簡易橋脚免震模型を用いた振動台実験を行った。供試体は、振動台上に門形形式の簡易橋脚を並列して2体固定し、各橋脚上に免震用のゴムを2つずつ設置、その上に10kNのおもりを載荷する。おもりの下面に、加振方向のゴムの変形を拘束するために、橋脚と橋脚をつなぐ渡し板を挟んでアクリル板を設置する。アクリル板は、ノックオフ機能を持たせるため、スリットを入れて作用力が約50Nで破壊するように設計したものの(アクリルCSB)、およびスリットを設けず作用力が500Nでも破壊しないように設計したものの(アクリルSB)の、2種類を用いる。実験は、アクリルSBを使用しないex-noSB、設置するex-SB、振動途中で破断するアクリルCSBを設置するex-CSBの3パターンとする。入力波は、振幅1mmでex-SBの共振振動数に相当する2.5Hzの漸増正弦波である。

(3) 高機能SBのモデル化と振動台実験の再現解析

(2)で検証された解析要素を用いて、桁端部の部材の衝突・干渉・破断などのインタラクションを考慮できる免震高架橋の解析モデルを作成し、それらのインタラクションを考慮した動的応答解析を行う。なお、実験供試体は、橋脚およびおもりを梁要素、ゴムを線形バネ要素でモデル化する。ノックオフ機能を有するデバイスは、図-3に示すノックオフ要素を用いてモデル化する。ノックオフ要素は、ある荷重(P_u)に達すると耐力が0となり、一度経験した荷重-変位経路は二度とたどらない履歴特性を有している。具体的なバネ定数の値は実験結果に基づいて設定する。

(4) 高架橋を支持する橋脚柱(本研究では鋼製橋脚)単体の動的な弾塑性挙動の小型振動台実験による検証

構造物の耐震性能照査手法の1つとして位置付けられている動的解析を行うための解析モデルには、構造系の固有振動特性、減衰

特性、および部材の非線形履歴特性等を十分に考慮できる適切なモデル化が必要となる。

一方、振動台実験では、前述の減衰や材料特性に関する仮定を設けずに、構造物の動的挙動を再現できる。しかし、振動台の積載能力などの制約から縮小模型を用いる必要がある。特に、小型供試体を用いる場合には、実寸大からの縮小率が大きいことに起因する影響が懸念される。一方で、同条件の供試体を用いた振動実験を複数回実施できるなど、運用面、費用面でのメリットも大きい。

そこで、橋脚の縮小模型を用いた振動台実験を実施して、動的挙動を検証する。実験装置の概要は図-4のとおりであり、実験供試体上部には、橋梁上部構造の重量を模した質量10kNの鋼塊を設置し、地震波を入力する。供試体は、橋脚(1辺2m、橋脚高さSquare1:10m、Square2:14m)を想定し、それを1/20に縮小したものであり、柱断面は震度法に従い設計水平震度0.283として設計した。

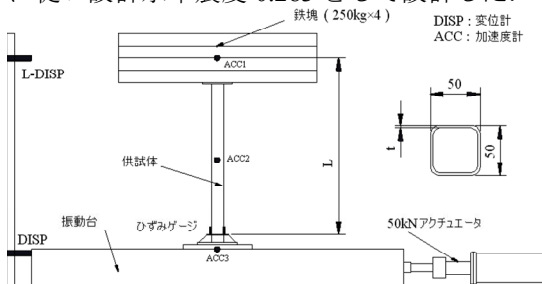


図-4 小型橋脚模型の振動台実験

表-1 小型橋脚模型

供試体	L (mm)	t (mm)	f (Hz)	δ_y (mm)	P/P_y	λ	R_R
Square1	523	1.6	3.594	4.570	0.105	0.635	0.605
Square2	724	2.3	2.613	13.65	0.054	1.071	0.500
Square3	523	2.3	3.168	7.160	0.054	0.774	0.557

ここに、L: 柱長、t: 板厚、f: 固有周波数、 δ_y : 降伏変位、 λ : 細長比パラメータ、 R_R : 幅厚比パラメータ

表-2 解析内訳

柱部材	B		P
	梁-柱要素		板要素
質点	M1	M2	M3
溶接部	W1	W2	W3
基部			

できるだけ経済的な供試体製作のため、JIS規格で規定されている構造用規格鋼管(JIS G 3466, R付き)を用いる(表-1)。

解析には弾塑性有限変位解析プログラムEPASS/USSPを用いる。解析モデルは、表-2に示すように、柱部材、質点の分布、および溶接線のモデル化の違いに着目し、計8個を設定した(表-2)。入力地震波は、東神戸大橋付近で観測された地震波形を、時間軸は相似則に基づき $1/\sqrt{20}$ に、加速度軸は各々の供試体をモデル化した事前解析において、最大応答変位が降伏変位の3倍程度となるように調整し、Square1では2/5倍、Square2では3/2、Square3では3/5倍としている。

(5) 高架橋の地震応答解析

詳細な解析モデルを用いた免震高架橋システムの地震応答解析を行う。さらに、現行の欧州統一基準にもとづく高架橋の耐震設計、および今後欧州統一基準に導入される予定で研究が進行中の研究成果にもとづく高架橋の耐震設計にしたがう設計手法との差違について比較・検討を行う。このため、イタリアのEUCENTRE(地震工学教育研究のための欧州センター)に、センター長のCalvi教授およびパビア大学のPinho講師のもと、客員研究員として滞在し研究を実施する。

高機能SBの免震高架橋への適用性を検討するため、図-5に示す3径間連続箱桁免震橋の橋軸直角方向に地震加速度を入力する場合を対象として地震応答解析を行う(Case-CSB)。また、比較のため従来型の普通型SBを設置した場合(Case-SB)、および支承SBを設置しない場合(Case-noSB)も併せて実施する。CSBおよび普通型SBは、すべての橋脚上に設置し、それぞれの特性は(1)の静的載荷実験結果を基に設定する。入力地震波は、兵庫県南部地震において東神戸大橋で観測された加速度波形(以下、L2地震動という)である。

4. 研究成果

(1) 高機能SBの提案

図-6および表-3に示すように、高機能SBは想定した破断荷重付近で、速やかに破断する脆性的な破断を呈している。一方、普通型SBは、想定破断荷重を超えても曲げ変形が著しく生じ、破断荷重の制御は困難であり、設計で想定する以外のダメージが橋脚等に生じる恐れがある。ここで、高機能SBは、図-1に示した記号を用いて、 $A/B \approx 4$ 、 $C/B \approx 0.6$ 、スリット率($A-C/A$)を85%に設定すると、提案した設計式により、破断荷重を精度良く算定できる。また、この設計式では、動的載荷を受ける場合、静的載荷に比べて破断荷重が1割程度上昇すること考慮している。

以上より、高機能SBの破断荷重および破

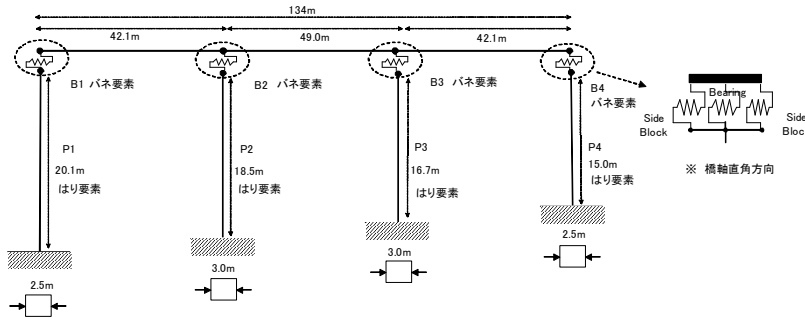


図-5 解析モデル

断時の変位，および動的な荷重作用がそれらに及ぼす影響を明確にし，高機能 SB を提案した。

(2) 高架橋システムをモデル化した縮小模型を用いた振動台実験

図-7 に，橋脚の応答変位の時刻歴を示す。ex-noSB では，ゴムの変形を拘束しないため，加振当初より免震化し橋脚の応答変位が小さい。ex-SB では，免震機能が阻害され，橋脚の応答変位が大きい。一方，ex-CSB では，振動中ロックオフデバイスが破壊し，ex-SB の波形から ex-noSB の波形へ，速やか移行したことがわかる。

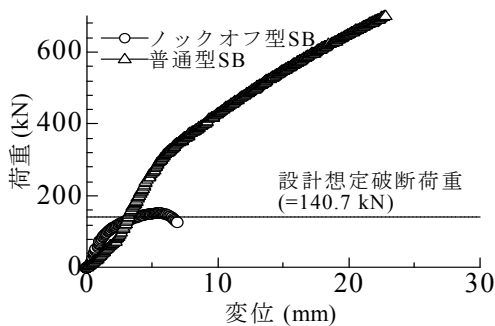


図-6 SB の荷重-変位関係

表-3 SB 諸元および実験結果

タイプ	A	B	C	h2	破断変位	破断荷重	想定破断荷重
単位	mm	mm	mm	mm	mm	kN	kN
ロックオフ型SB	108	28	16	61.3	5.2	156.1	140.7
普通型SB	108	23	-	61.3	25.7	751.4	140.7

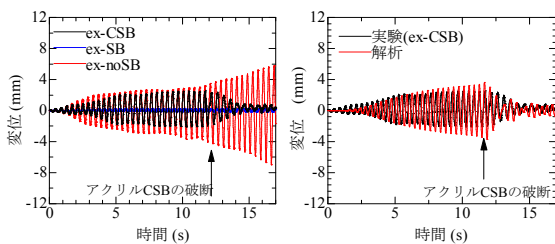


図-7 橋脚応答変位 図-8 実験と解析の比較

(3) 高機能 SB のモデル化と振動台実験の再現解析

高機能 SB の簡易非線形モデルの構築のため，解析要素を組み込み，実験結果の再現解析を行った。その結果，図-8 に示すように，両者はほぼ一致し，提案したモデル化手法の妥当性を確認した。

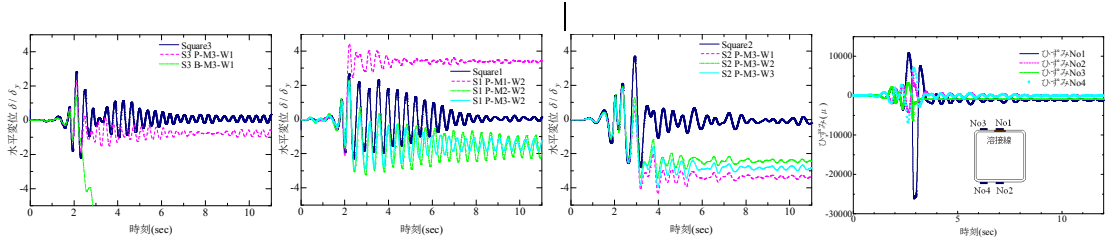
(4) 高架橋を支持する橋脚柱単体の動的な非塑性挙動の小型振動台実験による検証

図-9 には重りの重心位置における水平変位の時刻歴応答を，表-4 には，実験値と解析値の比較を示す。図-9 に示すように，実験結果は，最大応答変位で $2.6 \sim 3.7\delta_y$ を示したが，残留変位はほとんど生じていない。これは，今回用いた実験供試体では，加振を受けるフランジにある溶接線近傍で大きなひずみを計測するものの，フランジに座屈等の変形がほとんど発生しなかったためである。

モデル化の差異による影響に着目する。まず柱部材のモデル化が梁-柱要素か三角形板要素かが異なる解析モデルを比較すると，フランジの局部座屈変形の有無により，最大応答以降の挙動が異なる。次に，コーナー部のモデル化に着目すると，固有周期に差を生じるため，最大応答変位および残留変位に大きい差異が認められる。また，質点の分布が1質点系か実際に近い多質点分布形かが異なる解析モデルでは，最大応答変位でかなりの差違が認められ，最大応答以降の挙動が全く

表-4 実験値と解析結果 (橋脚柱)

モデル	最大応答変位 δ_{max}/δ_y	時刻 $t(\text{sec})$	残留変位 $\delta_R(\text{mm})$	固有周波数 $f_1(\text{Hz})$
Square1	2.650	2.194	-0.59	2.530
S1 P-M1-W2	4.439	2.215	15.55	2.660
S1 P-M2-W2	-3.230	2.955	-7.05	2.380
S1 P-M3-W2	-2.899	2.445	-6.73	2.530
S1 B-M3-W1	-	-	-	2.580
S1 P-M3-W1	-2.948	2.935	-7.48	2.527
S1 P-M3-W3	-2.934	2.935	-7.34	2.530
Square2	3.692	2.909	-1.35	1.920
S2 P-M1-W2	-	-	-	2.250
S2 P-M3-W2	-3.419	3.960	-33.26	1.920
S2 B-M3-W1	-	-	-	2.080
S2 P-M3-W1	-4.372	3.980	-45.90	1.927
S2 P-M3-W3	-3.968	3.980	-38.62	1.916
Square3	2.834	2.107	0.62	2.879
S3 P-M1-W2	2.407	2.120	-5.53	3.055
S3 P-M2-W2	2.539	2.120	-4.51	3.055
S3 P-M3-W2	2.501	2.120	-4.94	3.049
S3 B-M3-W1	-	-	-	3.205
S3 P-M3-W1	2.297	2.120	-5.68	3.030
S3 P-M3-W3	2.296	2.120	-5.68	3.030



(a) S3(使用要素の比較) (b) S1(質点の比較) (c) S2(溶接線の比較) 図-3 基部ひずみの時刻歴応答(Square)

図-9 重り重心位置における変位の時刻歴応答

異なる。特に M1 は最大応答変位および残留変形ともかなり大きく算定している。溶接線のモデル化に着目すると、溶接線をフランジ上に有する S1 および S2 においては、塑性後の挙動に大きく差異が認められる。

(5) 高架橋の地震応答解析

最も橋脚の降伏変位(0.089m)が小さい橋脚 P2 に着目する。図-10 および図-11 に、L2 地震動入力時の橋脚 P2 の応答変位の時刻歴、上部構造と支承の相対変位の時刻歴を示す。図-12 には免震支承の荷重-変位関係および支承 SB の作用力の時刻歴を示す。

Case-noSB では、地震波入力当初より支承部の相対変位が大きく、橋脚の応答変位も降伏変位以下であり、免震化していることがわかる。Case-SB では、普通型 SB は破壊せず、免震支承の変形を拘束するため、橋脚に過大な反力が作用している。すなわち、設計で期待する免震機能が得られず、橋脚の降伏荷重に達していることがわかる。一方、Case-CSB では、CSB の破断(約 5.6 秒)までは、上部構造と支承の相対変位が小さい。しかし、CSB 破断後は、免震支承が有効となり、橋脚の応答変位も降伏変位以下に抑えられている。なお、CSB 破断時、急激な相対変位の増大等は認められず、スムーズに免震メカニズムに移行したと考えられる。これらより、CSB を免震高架橋に用いると、加速度の小さい地震に対しては、伸縮装置を保護でき、大きい地震には、橋軸直角方向にも免震効果が期待できることが明らかとなった。

以上のとおり、本研究では、(a)弾塑性有限変位解析プログラム EPASS/USSP の高度化・機能アップ、(b)高架橋モデルの縮小模型を用いた振動台実験、(c)高機能 SB 解析要素と地震応答解析の実施、(d)橋脚の縮小模型を用いた小型振動台による地震応答の再現性、を実施し、橋脚に支持された免震高架橋システムを対象として、(e)橋脚・免震支承・高機能 SB のインタラクション、およびそれらが地震時の高架橋システムの地震に対する安全性評価に及ぼす影響、を明らかにした。免震効果により高架橋を支持する橋脚や基礎への負担増を低減でき、それらへの損傷

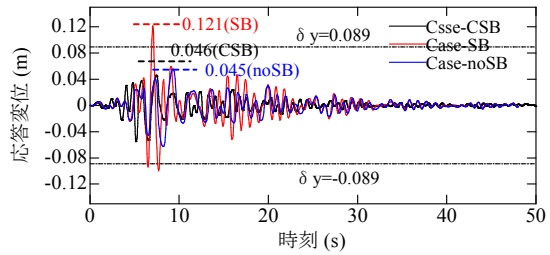


図-10 橋脚 P2 の応答変位

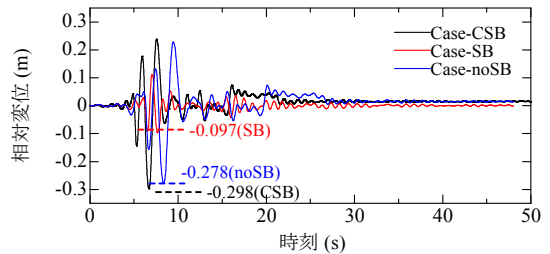


図-11 P2 上の上部構造と支承の相対変位

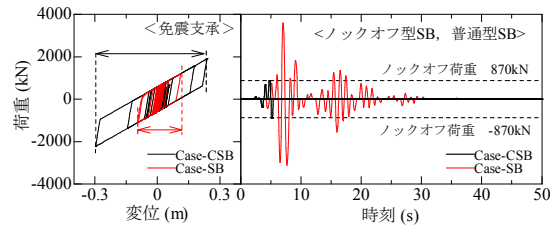


図-12 免震支承の荷重-変位 および支承 SB の応答

発生防止に有効である。かつ、上部構造の移動を制限する SB にロックオフ機能を持たせることにより、レベル 1 地震動程度の中小規模の地震に対しては伸縮装置の損傷を防止でき、レベル 2 地震動等の強地震時には橋脚・下部構造へ過大な慣性力を伝達させないように上部構造の移動制限を確実に解放でき、速やかに免震効果が得られることを明らかにした。本研究成果を発展させて、より合理的かつ確実な免震効果の発現が期待できる。このような作用する地震の大きさや要求される機能に着目した応答制御は、免震住宅など他への応用・発展も考えられ、本研究により得られた成果の意義は大きいと考える。

研究者番号：60315976

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者
なし

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① Masahide Matsumura, Yasuyuki Nakanishi, Toshiyuki Kitada, Fundamental Study on Seismic Response of Steel Bridge Piers through Dynamic Analysis and Shaking Table Test using Small-size Specimens, International Journal of Steel Structures, 査読有り, Vol. 8, No. 4, 2008
- ② 松村政秀, 坂井田実, 吉田雅彦, 北田俊行, 森田征樹, 浅田直宏, 免震桁橋用ノックオフ型サイドブロックの提案, 鋼構造論文集, 査読有り, 15巻, 2008, pp. 45-56
- ③ 中西泰之, 松村政秀, 北田俊行, 小型供試体を用いた振動台実験による鋼製橋脚の地震時挙動の定量評価に関する基礎的実験, 第11回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造物の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 査読無し, 2008, pp. 305-310
- ④ Masahide Matsumura, Development of new steel bridge piers, National Center for Research on Earthquake Engineering, 査読無し, NCREE-08-006, 2, 2008, pp. 233-248

[学会発表] (計3件)

- ① Masahide Matsumura, Yasuyuki Nakanishi, Toshiyuki Kitada and Takashi Yamaguchi, Fundamental study on seismic response of steel bridge piers through dynamic analysis and shaking table test using small-size specimens, Proceedings of the 9th Korea-Japan Joint Symposium on Steel Bridges, pp. 569-577, Incheon, Korea, 22-24, August, 2007
- ② 浅田直宏, 吉田雅彦, 坂井田実, 松村政秀, 北田俊行, ノックオフ型SBの地震荷重を受ける高架橋への設置効果に関する研究, 土木学会第63回年次学術講演会, 査読無し, pp. 1239-1240, 東北大学川内キャンパス, 9/12, 2008
- ③ 浅田直宏, 坂井田実, 吉田雅彦, 松村政秀, 北田俊行動的載荷の影響を加味したノックオフ型サイドブロック設計式の提案, 土木学会第62回年次学術講演会, 査読無し, Vol. 62, 2007, I-350-1, 2, 広島大学東城島キャンパス, 9/14, 2007.

6. 研究組織

(1)研究代表者

松村 政秀 (MATSUMURA MASAHIDE)

大阪市立大学・大学院工学研究科・講師