

平成21年3月31日現在

研究種目：基盤研究(A)
 研究期間：2005～2008
 課題番号：17206048
 研究課題名（和文） 擬似非線形構造システムを生成する受動型負剛性制震ダンパーの開発と応用
 研究課題名（英文） Development and application of passive negative stiffness seismic dampers generating apparent nonlinear structural systems
 研究代表者
 五十嵐 晃 (IGARASHI AKIRA)
 京都大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：80263101

研究成果の概要：地震動の作用する構造物に免震・制震性能を付加するダンパーとして、構造物に与える負荷を従来のものよりも軽減できる特色を持つ、負剛性制震ダンパーを開発した。これを実現する装置としてセミアクティブ型に加えパッシブ型の負剛性ダンパーを提案し実際に試作を行うとともに、要素実験および振動台実験を通じて、地震時の応答特性、制震効果、加速度応答低減効果など、適用効果を定性的、定量的に確認した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	27,700,000	8,310,000	36,010,000
2006年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
2007年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
総計	39,300,000	11,790,000	51,090,000

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：地震工学

1. 研究開始当初の背景

構造物に作用する強震動の影響を効率的に低減する制震手法は、大きく分けてパッシブ制御、アクティブ制震、セミアクティブ制御に大別され研究が行われてきた。その中でダンパーによる制御減衰力の履歴特性が負の剛性を有している場合に効果的な制震効果が得られることが見出された。研究代表者らはこれを負剛性制震ダンパーと名付け、主にアクティブ制御での実現と理論計算、およびセミアクティブ制御による実装を提案している。この負剛性が効率的な制震効果を発現する物理的理由は、構造物の動特性が人工的に非線形化され、共振的な振動を防止するとともに、付加減衰効果による振動エネルギー

を吸収するという原理による寄与が考えられる。

このために種々の変位-荷重特性を持つダンパーが考案されているが、共通した結果として擬似負剛性ダンパーは従来の粘性ダンパーと比較して、地震応答低減効果が優れているものの、それまでの提案はセミアクティブ制御により実現されているダンパーであり、地震のような大きな外力と変形を受ける場合、必要とする応答特性や履歴減衰の確保が困難となる場合が生じると考えられる。また同時に、大地震等の実用性を考慮すると、外力に対する抵抗力を発生させるための機構が巨大化するとともに、外部よりエネルギー供給を必要とする特性があげられる。

したがって、この方法論を実用化するに当たっての課題として、こうしたダンパーの実際の稼動にあたっての課題を抽出した上で、実験的な検証が不足していること、またコストおよび維持管理上有利な点が多い、パッシブ方式で同様の原理に基づく制震ダンパー装置が実現されていなかったことが挙げられる。

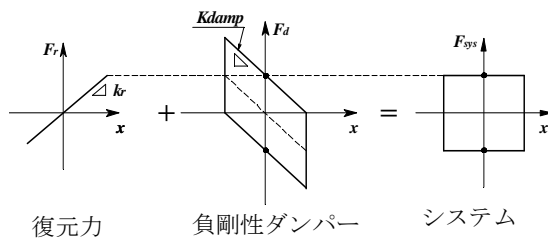
2. 研究の目的

負剛性制震ダンパーは、構造物などの特性に適した制震特性を持つことが明らかになっていることを前提に、それを実装したダンパーを用いた構造物への効果の実験的検証、この原理をパッシブダンパーにより実現する制震ダンパーの開発、人為的な擬似非線形特性と応答低減効果の検証を目的とした。

3. 研究の方法

(1) 負剛性制震ダンパーの制震効果の実験的検証のため、本研究の基礎となる負剛性制震ダンパーが構造物に設置された場合の応答低減効果を検証するセミアクティブ方式ダンパーを対象とした種々の実験的検証を行った。特に、リアルタイムハイブリッド実験の手法を用いた、より実構造物への設置された条件に近い状態での実験を試みた。

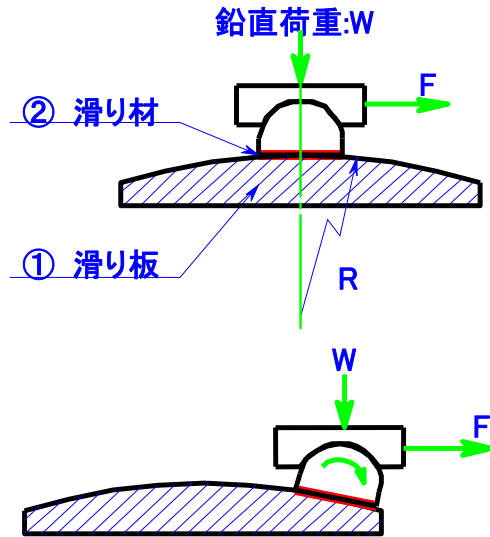
(2) 負剛性ダンパーの適用による擬似非線形特性について、非線形振動論の観点からみた数値計算に基づく理論的な検討を行い、地震応答特性を検証した。シミュレーション解析により従来のパッシブダンパーと負剛性ダンパーとの効果を比較検討した。



(3) パッシブ負剛性ダンパーの原理について考察し、滑り摩擦抵抗を利用したパッシブ負剛性履歴ダンパーの機構と、それに基づくパッシブ負剛性摩擦ダンパーを提案した。また、その試作機によるパッシブ負剛性摩擦ダンパーの要素実験を実施した。

(4) パッシブ負剛性ダンパー装置と復元力装置（積層ゴム）を組み合わせたシステムを実際の構造物に適用した場合を想定し、振動台実験により特性を確認した。対象モデルとして橋梁構造物の免震システムを想定し、橋脚と橋桁間に免震装置を設置した1質点モデルし、免震装置として、パッシブ負剛性すべ

り支承を適用した。供試体は、従来型の平板すべり支承と負剛性すべり支承（2タイプ）とし、従来型との相対的な性能を比較した。試験条件は、正弦波加振による基本特性試験と想定地震波加振（Ⅰ種、Ⅱ種、Ⅲ種地盤）試験を実施した。また、振動大実験の負剛性すべり支承をバイリニアモデルとしてモデル化し、その再現解析を行い、実験結果と解析結果との整合性について検討した。



パッシブ型負剛性ダンパーの原理

(5) パッシブ負剛性ダンパー装置とそれに基づく実験結果の解析的検証を行った。

4. 研究成果

(1) セミアクティブ制震ダンパーを模擬したセミアクティブ装置と、各種荷重試験装置を用いた実験を行った。

- ・特に、リアルタイムハイブリッド実験システムを構築するにあたっては慣性力荷重型ダンパー試験装置を精度良く再現する手法としてPID制御を導入した手法を開発した。
- ・セミアクティブダンパーをパッシブな粘性ダンパーとして用いた場合の結果と、制御手法として擬似負剛性制御を行った場合の地震応答の低減効果について検証した。2自由度系モデルにおいて、下部構造物に擬似負剛性制御を実装したダンパーを設置することで、見かけの剛性が下がり、特に上部構造において大きな応答低減効果が得られること確認した。

- ・想定モデルに擬似負剛性制御を実装したバリアブルダンパーを設置した場合において、固有周期付近での応答を大幅に低減することが確認され、JMA神戸NSを入力した場合において、ベースシアを求めると、加速度・速度・変位応答を低減し、ベースシアを抑えつつ、大きなエネルギー吸収能力を持つことを

示した。

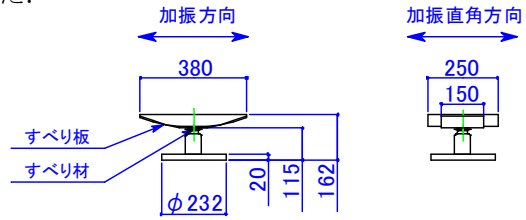
(2) 負剛性ダンパーの擬似非線形特性と制震性能

- ・従来からの振動エネルギー吸収型ダンパーに対して、負剛性ダンパーを付加したシステムの等価剛性は低下し、固有周期が長周期化する。また減衰定数は増加する。
- ・負剛性履歴ダンパーを免震システムに適用することにより、従来型のダンパーを付加した場合よりも、最大作用地震力が軽減されることが理論的に示された。
- ・負剛性ダンパーを適用した場合、システムの見かけの剛性は従来の摩擦ダンパーよりも低下し、長周期化する。その結果、応答加速度が相対的に低減し、逆に応答変位が増加する傾向があるが、地震波タイプや固有周期の範囲によっては、負剛性ダンパーを適用することにより、従来型ダンパーよりも応答加速度と応答変位を同時に低減できる適用条件があった。
- ・Ⅰ種、Ⅱ種、Ⅲ種と地盤が軟弱な場合に対応する地震波ほど、負剛性ダンパーの最大応答加速度の低減効果は大きく、従来型ダンパーとの差が顕著になる。また、逆に負剛性ダンパーの最大応答変位は、Ⅰ種、Ⅱ種、Ⅲ種と地盤が軟弱になるほど、増加する傾向がある。
- ・負剛性値の大きさおよび構造体の固有周期を0.5 sから5.0 sまで変化させて比較すると、固有周期が短く負剛性による長周期化の効果が得にくい条件の場合、地震波のタイプによる傾向として、Ⅰ種、Ⅱ種、Ⅲ種と入力地震波の地盤が軟弱になるほど、応答加速度の低減効果が小さくなる。また、応答変位は、入力地震波の地盤が軟弱になるほど、負剛性の倍率の増加に伴い増加する傾向がある。
- ・復元力の固有周期が長い場合については、地震波のタイプによる傾向として、Ⅰ種、Ⅱ種、Ⅲ種と入力地震波の地盤タイプに関わらず、付加する負剛性の倍率が大きいほど、応答加速度が低減する。応答変位は、固有周期が0.5s~2.0 s以外の場合は、入力地震波の地盤タイプに関わらず、ほとんど変化しない。
- ・地震波タイプや固有周期の範囲によって、また負剛性の大きさによっても応答特性は異なるが、復元力の固有周期が1.5~2.0 sの範囲では、従来型のダンパーよりも、負剛性ダンパーの方が、応答加速度の低減効果が優れており、それは負剛性の勾配が大きいほど顕著である。また、応答変位は従来型ダンパーよりも増加する傾向があり、その増加傾向は復元力の固有周期と入力地震波タイプによって異なる。ただし、応答変位の増加傾向については、入力地震波や復元力の固有周期によっては、応答変位が増加しない条件がある。

(3) パッシブ負剛性ダンパーの提案と試作

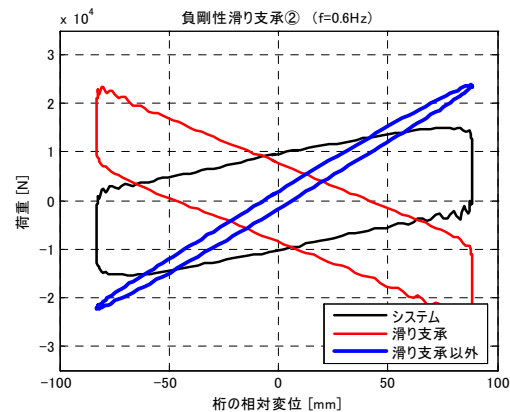
実験

- ・パッシブ型負剛性の発生原理として、曲面上の滑り摩擦装置による固有の負剛性を備えたパッシブ負剛性摩擦ダンパーを考案し、パッシブ負剛性摩擦ダンパー装置を提案した。



試作パッシブ型負剛性すべり支承概要図

- ・パッシブ負剛性摩擦ダンパー装置の要素実験により得られた履歴曲線の二次剛性は負勾配を示し、その二次剛性は、水平変位振幅によらずほぼ同じで、安定した履歴特性が得られた。パッシブ負剛性摩擦ダンパーの負剛性値は、実験値と設計値が定量的に一致し、提案したパッシブ負剛性摩擦ダンパーの理論が実際に成り立つことが証明された。
- ・提案した負剛性ダンパー装置の回転構造について、回転体と回転軸受け間の隙間や回転遅れが無く、滑り材が曲面滑り板上から離れることなく追従する構造であることが実験的に確認できた。また、滑り材が曲面滑り板上を動く際に生じる鉛直変位の変動特性について、滑り材の水平変位と鉛直変位の関係式より、理論と実験結果の整合性が確認され、滑り材が曲面板上に追従していることがわかった。



(4) 振動台地震応答試験

- ・正弦波加振実験においては、計測されたダンパーの剛性は、平板、負剛性2種類のいずれの滑り支承についても、ほぼ設計値と一致し、振動台実験の正弦波加振実験においても、開発した負剛性滑り支承の理論と実験値との整合性が確認され、提案したパッシブ負剛性滑り支承の性能が機能することが実証さ

れた。

・桁の応答値が最大となる周波数が存在し、それぞれの最大応答周波数を比較すると、従来型平面すべり支承の場合よりも負剛性すべり支承の方が小さく、負剛性ダンパーの長周期化の効果が確認された。また、最大応答周波数における負剛性すべり支承適用時の応答加速度は従来型よりも低減し、応答変位はやや増加傾向が見られた。

・地震波加振実験より、負剛性滑り支承の方が従来の平面滑り支承よりも桁の最大応答加速度が低減し、またその負剛性滑り支承の負剛性値が大きいほど低減し、その低減効果は、地震波のタイプによらないことがわかった。これより、橋梁を模擬した振動台実験により、提案した負剛性摩擦ダンパーが従来の摩擦ダンパーよりも応答加速度低減効果が優れていることが明らかになった。

・桁の絶対変位は、従来型の平面すべりの場合よりも低減するが、桁の最大応答変位は、入力地震波のタイプによって異なり、I種地盤地震波ではダンパーの負剛性値によらずほとんど変化せず、II種およびIII種地盤では負剛性値の増加とともに増加した。これらの応答加速度と応答変位の特性は、入力地震波の応答スペクトル特性と負剛性による長周期化の傾向と定性的に一致した。

・地震波加振実験後の残留変位は、II種地盤地震波ではみられないが、I種、III種地盤では負剛性が大きい供試体でのみみられた。復元力と負剛性のバランスを想定地震波の応答特性を考慮することにより、地震時の残留変位を抑制できる可能性が確認された。

・振動台による地震波加振実験により負剛性ダンパー適用時の桁の絶対応答加速度は、従来の平板すべり支承よりも低減し、また、負剛性が大きいほどその効果が大きいことがわかった。さらに、桁の応答変位は、地震波のタイプによって異なるが負剛性が大きいと増加する傾向があった。

・桁の応答変位は、負剛性の大きさによりシステムの履歴の固有周期が異なり、その程度により応答変位が異なる。また、その応答変位特性は応答スペクトル特性と負剛性による長周期化が影響しており、負剛性を付加して長周期化した場合でも、応答変位が増加しない条件があることがわかった。

(5) 再現解析

・負剛性すべり支承をバイリニアモデルとしてモデル化して解析し、振動台実験結果と比較した結果、桁変位、履歴曲線、入力エネルギーにおいて比較的良い適合性が見られ、解析モデルの妥当性が示された。

(6) まとめ

本研究により固有な負剛性特性を備えた機構を持つパッシブ型負剛性ダンパーとし

て実現することができた。本研究で提案された新しいパッシブ型負剛性ダンパーを免震・制震システムに適用することにより、地震応答的にダンパーが構造物に与える負荷を従来のものよりも軽減できることが確認された。将来起こりうる巨大地震に対するインフラ構造物の耐震改修への適用では、既存構造物への耐震補強の負担を軽減させ、そのコストを抑えることや、これまで既存構造物の強度が低すぎて制震装置を付加できなかったものへの適用も考えられ、社会的貢献が期待できる。

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 20 件)

(1) 小林裕亮, 古川忠稔: 可変振り子センサを用いた既存建築物動特性の推定法 — 一方向せん断型試験体を用いた実験的検証 —, 構造工学論文集, Vol. 55B, pp. 569-575, 2009年, 査読有

(2) 勝田つかさ・伊津野和行: 免震支承の鉛直剛性が橋梁の交通振動に与える影響, 第11回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム, 東京, 2008年, 査読無.

(3) Pradono, M. H., Iemura, H., Igarashi, A., Kalantari, A., "Application of angular-mass dampers to base-isolated benchmark building" Structural Control and Health Monitoring, Vol. 15, No. 5, pp. 737-745, 2008, 査読有.

(4) Hirokazu IEMURA and Mulyo Harris Pradono "Highway Bridge Benchmark Control Problem with Passively-controlled MR Dampers," Proc. 12th Japan Earthquake Engineering Symposium, 2006, 査読有.

(5) 家村浩和, 五十嵐晃, 豊岡亮洋, 井本佳秀, 夢屋文子: HDR を用いた橋梁用ダンパーの開発と制震性能に関するハイブリッド実験, 地震工学論文集, Vol. 29, pp. 503-509, 2007, 査読有

(6) N. D. Anh, H. Matsuhisa, L. D. Viet, M. Yasuda, Vibration control of an inverted pendulum type structure by passive mass-spring-pendulum dynamic vibration absorber, Journal of Sound and Vibration, 307, 187-201, 2007, 査読有.

(7) 金治英貞, 鈴木直人, 家村浩和, 高橋良和, 美濃智広, 高田佳彦. 低摩擦型すべり支承の面圧・速度依存性検証と床組免震構造の設計モデル構築, 土木学会論文集 A, Vol. 62, No. 4, pp. 758-771, 2006, 査読有

(8) H. Iemura, A. Igarashi and A. Kalantari: Experimental verification and numerical

studies of an autonomous semi-active seismic control strategy, J. Structural Control and Health Monitoring, Vol.13, No.1, pp.303-323, 2006, 査読有

(9) H. Iemura, A. Igarashi, M. H. Pradono, , and A. Kalantari : Negative Stiffness Friction Damping for Seismically Isolated Structures, Journal of Structural Control and Health Monitoring, Vol.13, pp.775-791, 2006, 査読有

(10) 伊津野和行・小林紘士 : 免震支承の剛性が桁の固有振動に与える影響に関する一考察, 構造工学論文集, Vol. 52A, pp. 593-602, 2006, 査読有

(11) Yanqing Liu, Hiroshi Matsuhisa, Hideo Utsuno, Jeong Gyu Park, Control by a Variable Damping and Stiffness System with Magnetorheological Dampers, JSME International Journal, Series C, Vol. 49, No. 2, 411-417, 2006, 査読有.

(12) Yanqing Liu, Hiroshi Matsuhisa, Hideo Utsuno, Jeong Gyu Park, Variable Damping and Stiffness Vibration Control with Magnetorheological Fluid Dampers for Two Degree-of-Freedom System, JSME International Journal, Series C, Vol. 49, No. 1, 156-162, 2006, 査読有.

(13) Iemura, H., Igarashi, A., Pradono, M. H., and Kalantari, A. "Negative Stiffness Friction Damping for Seismically Isolated Structures," Journal of Structural Control and Health Monitoring, Special Issue: Smart Base Isolated Structures Subjected to Near Fault Earthquakes, Vol. 3, pp. 775-791, 2006, 査読有.

(14) 家村浩和, 河内山修, 豊岡亮洋, 下田郁夫, 徳岡真司, 森本慎二 : パッシブ型負剛性摩擦デバイスの開発と振動台実験による免震性能の検証, 第29回地震工学研究発表会報告集(九州大学), p. p. 1254-1259, 2007年, 査読無.

(15) Hirokazu Iemura, Touraj Taghikhany, Yoshikazu Takahashi, and Sarvesh K. Jain, Effect of variation of normal force on seismic performance of resilient sliding isolation systems in highway bridges. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 34, pp. 1777-1797, 2005, 査読有.

(16) Kazuyuki Izuno, Hiroshi Kawarabayashi, Toshihiko Naganuma and Tsutomu Nishioka: Seismic performance of sliding isolation bearings during vertical movement of bridge girders, Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE, Vol. 22, No. 2, pp. 107s-121s, 2005, 査読有

(17) 高橋良和, 日比雅一, 家村浩和. 各種依存性を考慮した滑り型免震支承の数値モデルに関する一考察. 応用力学論文集, Vol. 8, pp. 701-708, 2005, 査読有.

(18) Iemura, H. and Pradono, M. H. "Simple Algorithm for Semi-active Seismic Response Control of Cable-stayed Bridges," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Special Issue: Earthquake Engineering for Transportation Structures, Edited by Joseph Penzien, Vol.34, Issue 4-5, 2005, 査読有.

(19) Iemura, H., Igarashi, A., Pradono, M. H., and Kalantari, A., "Negative Stiffness Friction Damping for Seismically Isolated Structures," Journal of Structural Control and Health Monitoring, Special Issue: Smart Base Isolated Structures Subjected to Near Fault Earthquakes, 2005, 査読有.

(20) N. D. Anh, P. X. Khang, T. K. Khiem, N. N. Long, N. C. Sang, P. X. Son, N. C. Thang, T. H. Vinh and H. Matsuhisa, Vibration Control of Stayed Cables Using Fluid Dampers, Proceeding of The Eighth Japan-Korea Joint Seminar on Steel Bridges, pp. 721-731, 2005, 査読無.

[学会発表] (計 18 件)

(1) 松村拓樹, 松久寛, 宇津野秀夫, 山田啓介, 澤田勝利, 安田正志, 高荷重三次元免震台の低固有振動数化に関する研究, 日本機械学会関西支部第84期定時総会講演会, p. 502, 近畿大学, 2009年3月16日.

(2) 松村拓樹, 松久寛, 宇津野秀夫, 山田啓介, 澤田勝利, 安田正志, 負剛性機構を備えた三次元免震台の研究, 日本地震工学会大会—2008, pp. 114-115, 仙台市情報・産業プラザ, 2008/11/3-5.

(3) Hirokazu Iemura, Osamu Kouchiyama, Akihiro Toyooka and Ikuo Shimoda : "Development of the Friction-Based Passive Negative Stiffness Damper and Its Verification Tests Using Shaking Table," Proc. of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, No. 0219, Beijing, China, Oct 12-17, 2008.

(4) 小林孝安, 家村浩和, 五十嵐晃, 豊岡亮洋 : 「慣性力載荷試験装置を用いた実時間ハイブリッド実験によるバリアブルダンパーの検証実験」, 土木学会第63回年次学術講演会, I-607, 東北大学, 2008年9月10日-12日.

(5) 勝田つかさ・伊津野和行 : 免震支承の鉛直剛性が五径間連続橋の振動特性に及ぼす影響, 土木学会第63回年次学術講演会, 第I部, 東北大学, 2008年9月10日-12日.

(6) Tadatoshi FURUKAWA, Ryosuke MIYAKE: System Identification of Multi Degree of Freedom System Using Variable Pendulum Sensor (VPS) -Concept and Performance Evaluation -, Proceedings of IASS International Symposium 2007, Venice, Italy, Paper No. PAP-260 (CD-ROM), December 3-6, 2007.

(7) Hiroshi MATSUBARA, Hiroshi OHMORI, Tadatoshi FURUKAWA: Verification of Seismic Evaluation Scheme of Special Structure by Elastic Time History Analysis, Proceedings of IASS International Symposium 2007, Venice, Italy, Paper No. PAP-165 (CD-ROM), 2007. 12.

(8) 徳岡真司, 豊岡亮洋, 家村浩和: 絶対応答低減に寄与するバッシブ負剛性すべり支承の開発, 土木学会第 62 回年次学術講演会, I-345, 広島大学, 2007 年 9 月 12 日-14 日.

(9) 森本慎二・河内山修・豊岡亮洋・家村浩和: バッシブ負剛性すべり支承の開発とその性能の検証, 土木学会第 62 回年次学術講演会, I-331, 広島大学, 2007 年 9 月 12 日-14 日.

(10) 森本 慎二, 家村 浩和, 豊岡 亮洋, 河内山 修, 徳岡 真司: バッシブ負剛性すべり支承の開発及びその性能の検証, 日本地震工学会大会 2007, 東京大学地震研究所, 2007 年 11 月 13 日-14 日.

(11) H. Matsuhisa, Semi-Active Control by MR Damper, NOVIC (Center for Noise and Vibration Control, KAIST), 2007. 2. 27.

(12) Yanqing Liu, Hiroshi Matsuhisa, Hideo Utsuno, Jeong Gyu Park and Satoru Hamada, Variable Damping and Stiffness Isolation System with Parallel Two Magnetorheological Fluid Dampers, Proceedings of the 8rd International Conference on Motion and Vibration, 32-37 (CD-ROM), Seoul, 27-30 Aug., 2006.

(13) H. Namiki, H. Suzuki, H. Matsuhisa, M. Kimura, Seismic Retrofitting of Bridges Using Slide Bearings with Bending-Type Anchor Bars, Proceedings of the 3rd International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, UP579 (CD-ROM), Porto/Portugal, July 16-19, 2006.

(14) Iemura, H., Igarashi, A., Pradono, M. H., and Kalantari, A., "Effectiveness of pseudo negative stiffness dampers to various types of benchmark structures," 4th World Conference on Structural Control and Monitoring, July 11, 2006.

(15) Liu Y., Matsuhisa H., Utsuno H., A Variable damping and stiffness

semi-active vibration isolation using magnetorheological fluid dampers, Proceeding of 13th International Congress on Sound and Vibration, CD-ROM No. 559, Vienna/Austria, July 2-6, 2006.

(16) Iemura, H. and Pradono, M. H., "Seismic Isolation and Damping Strategies for Cable-stayed Bridges," 8th National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, April 18-22, 2006.

(17) H. Iemura, A. Igarashi and A. Kalantari: An experimental study on the control of a variable oil damper using friction negative-stiffness control law, Proc. International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, pp. 125-132, Oct. 26-28, Bordeaux, 2005.

(18) H. Iemura, A. Igarashi, T. Aoki and Y. Yamamoto: Real-time substructure hybrid earthquake loading system for super-high-damping rubber bearing, Proc. 1st International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering, pp. 401-408, Nagoya, July 19-21, 2005.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

五十嵐 晃 (IGARASHI AKIRA)
京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 80263101

(2) 研究分担者

松久 寛 (MATSUHISA HISASHI)
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 00109034
伊津野 和行 (IZUNO KAZUYUKI)
立命館大学・理工学部・教授
研究者番号: 90168328
古川 忠稔 (FURUKAWA TADANORI)
名古屋大学・大学院環境学研究科・准教授
研究者番号: 70273597
高橋 良和 (TAKAHASHI YOSHIKAZU)
京都大学・防災研究所・准教授
研究者番号: 10283623

(3) 連携研究者

家村 浩和 (IEMURA HIROKAZU)
京都大学・名誉教授
研究者番号: 10026362
豊岡 亮洋 (TOYOOKA AKIHIRO)
鉄道総合技術研究所・副主任研究員
研究者番号: 80425917