

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360237

研究課題名(和文) 多次元入力地震動に対する免震建物の地震応答評価手法の開発

研究課題名(英文) Development of seismic response evaluation method of seismically isolated buildings for multi-dimensional input ground motion

研究代表者

菊地 優 (Kikuchi, Masaru)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50344479

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,400,000円、(間接経費) 4,620,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は来たる巨大地震への有力な備えとなる免震構造の一層の普及を目指し、多次元地震入力という免震建物が実際に地震時に生じる応力状態に近い条件の下での免震建物の挙動解明である。初めに免震部材の水平2方向加力試験を実施して力学挙動を把握するとともに、水平2方向と軸力変動という3軸連成挙動を再現できる力学モデルを開発した。続いて、この力学モデルをオープンソース構造解析システムOpenSeesに実装して多次元地震入力に対応できる免震建物の応答解析システムを構築した。最後に、この解析システムを用いて多次元地震入力下での免震建物の地震時挙動を解明した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to examine the behavior of seismically isolated buildings under multi-dimensional earthquake input, which has been expected to be an effective preparation for large earthquake coming. First, we conducted the bi-directional loading tests for seismic isolation devices, and captured the mechanical behaviors of those devices. An analytical mechanical model was developed to allow it to reproduce the three dimensional interactive behavior for bidirectional horizontal displacements and vertical axial force variation. Subsequently, we constructed a seismic response analysis system for seismically isolated building under multi-dimensional seismic inputs by implementing the open source structure analysis system, OpenSees. Finally, we clarified the seismic performance of isolated buildings under multi-dimensional seismic input by using this analysis system.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：免震構造 地震動 多次元 免震装置 積層ゴム 地震応答解析

### 1. 研究開始当初の背景

日本では 1983 年に初めて免震建築が完成して以来四半世紀が過ぎ、その建築棟数は 2000 棟（戸建住宅を除く）を超えるに至った。日本以外の免震建築棟数を見ると、ロシアと中国が約 500 棟であり、米国が約 100 棟、イタリアが約 30 棟と続く。今や、日本は建築棟数では 2 位以下を大きく引き離す免震大国である。しかし、日本国内では 1 年間に約 150,000 件もの建築着工があることを考えると、免震建築の割合は微々たるものである。近年の我が国での地震被害を鑑みると、高機能社会が求める地震防災対策には建物の構造被害の低減・防止のみでは不十分である。地震後の事業継続計画（BCP）への関心が高まっているように、建物の機能維持と財産の保全が求められている。特に、建物の機能維持には応答加速度低減が最も効果的であり、これを実現する方法は免震・制震のような振動制御技術以外に見当たらない。

本研究課題の研究分担者の研究チームは、最近、主要な免震部材の 1 つである高減衰積層ゴムを水平 2 方向に同時に変形させると 1 方向のみに変形させたときよりも限界性能が低下する現象を実大積層ゴムの加力試験によって発見した。その後、研究代表者・分担者は、この問題を受けて日本免震構造協会内に緊急に組織された対策 WG において、高減衰積層ゴムに関する水平 2 方向限界特性の評価方法について検討した。しかし、他種の免震部材の水平 2 方向特性の確認と包括的な評価方法、水平 2 方向特性を考慮した免震建物の地震時挙動の把握など未解決な課題が残されており、免震部材の水平 2 方向特性に関する研究はまだ端緒が開かれたばかりである。近い将来発生が懸念される南海トラフ地震のような巨大地震では、長周期成分が卓越し継続時間の長い地震動が予測されている。長周期構造物である免震建物では、免震部材が大振幅多数回繰り返し変形という過酷な状況を強いられると予想され、免震部材の水平 2 方向変形による限界性能の低下は、免震構造の安全性検証にとって無視できない現象である。以上により、免震部材の水平 2 方向特性の現象解明とそれを考慮した免震建物の地震応答評価手法の確立は対応急務な研究課題である。

### 2. 研究の目的

巨大地震で発生が予想される長周期地震動では、免震部材に過大な水平変形が生じると同時に軸力変動も大きくなると考えられる。本研究課題の着想は免震部材の水平 2 方向の力学的挙動を解明したいという動機にあったが、具体的な課題設定では巨大地震への対応を考慮して、水平 2 方向変形と軸力の 3 方向の相互作用を扱うこととする。以下、本研究では水平 2 方向変形と軸力の相互作用を多次元連成と称する。以上の学術的背景を踏まえて、本研究課題では次の 3 項目を主要

な研究目的として掲げる。

- (1) 免震部材の多次元連成力学モデルの構築
- (2) 多次元入力地震動に対応した免震建物の 3 次元地震応答解析システムの開発
- (3) 免震建物の多次元地震時挙動を踏まえた免震設計法の提案

このうち、前 2 項は解析手法を提供するものであり、これを研究成果として提示するのみでは本研究の価値は見出せないと判断する。そこで、(1)、(2)の成果を用いて免震建物の多次元地震時挙動に関する系統的な検討を行い、免震構造の設計手法の合理化に踏み込み、研究成果に実用的価値を付与する。

### 3. 研究の方法

本研究では、平成 23 年度～25 年度の 3 年間の研究期間において、以下の 4 項目のプロセスを経て研究を完結させる。

- (1) 免震部材の多次元連成力学モデルの構築  
研究代表者と研究分担者はそれぞれ独自に提案する多次元連成力学モデル（図 1、図 2）を用いて、高減衰積層ゴム、鉛プラグ入り積層ゴム、弾性すべり支承のモデル化を行う。

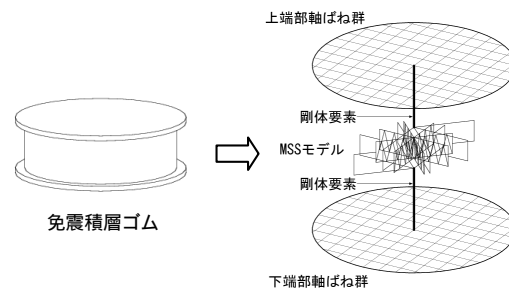


図 1 並列軸ばねモデル

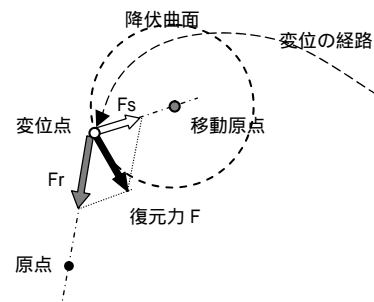


図 2 山本モデル

- (2) 免震部材の加力試験の実施と試験データの収集

力学モデルの妥当性を検証するために図 3 の試験装置を用いて、高減衰積層ゴム、鉛プラグ入り積層ゴム、弾性すべり支承の縮小試験体を用いた水平 2 方向加力試験を実施する。加力プログラムとしては、楕円オービット変位加力、2 方向地震応答変位加力などを予定する。一方、実大積層ゴムの水平 2 方向加力試験データについては、積層ゴムメーカーから提供を受ける。



図3 水平2方向加力試験装置

(3) 免震建物の3次元地震応答解析システムの開発

新たに提案する免震部材の多次元連成力学モデルを組み込んだ免震建物の地震応答解析システムを開発する。プラットフォームとしては、米国 UC Berkeley で開発・運用されている OpenSees を用いることとし、これに新たな力学モデルを実装して、既存の要素と合わせて免震建物の多次元地震応答解析に対応させる。



図4 OpenSeesのホームページ  
(<http://opensees.berkeley.edu/>)

(4) 免震建物の多次元地震時挙動を踏まえた免震設計法の検討

OpenSees を用いて系統的な免震建物の地震応答解析を実施し、水平2方向地震入力時の免震建物の応答性状を把握する。そこから現行の1方向のみの検討でみるべき余裕度の定量化に関する合理的な判断を下す。

4. 研究成果

(1) 鉛プラグ入り積層ゴムの水平2方向特性

鉛プラグ入り積層ゴムの水平2方向加力試験では、図5に示すような長軸:短軸を2:1とする楕円オービットを与えた。加力試験結果の一例を図6に示す。図7は2方向加力時の積層ゴムの変形状態を示している。鉛プラグ入り積層ゴムのように履歴減衰を生じる積層ゴムでは、せん断変形した際に発生する復元力は弾性成分と履歴減衰成分に分離す

ることができる。1方向加力では両成分は原点方向に発生する。一方、2方向加力では弾性成分は原点方向に生じるものの履歴減衰成分は変形進行方向逆向きに生じるために、両成分の合力は原点方向を向かない。このために2方向加力時には積層ゴムにねじれモーメントが発生する。図8は鉛プラグ入り積層ゴム側面に観察されたねじれ変形である。ただし、詳細な試験結果の分析から、同積層ゴムの特性は本研究課題のきっかけとなった高減衰積層ゴムの水平2方向特性と比べて、連成作用の影響は少ないことが明らかとなった。これは履歴減衰成分発生の変形による鉛プラグの降伏によるものであり、変形が増大しても降伏荷重はある値で頭打ちとなるためである。

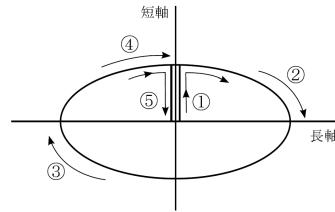


図5 楕円加力オービット

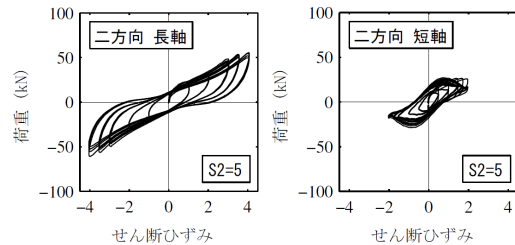


図6 鉛プラグ入り積層ゴムの加力試験結果

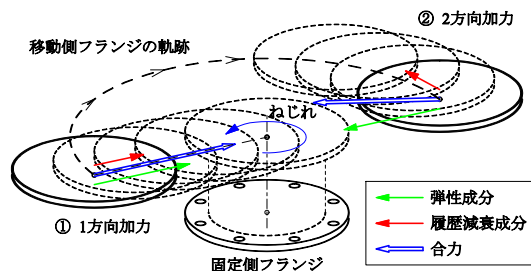


図7 2方向加力時の積層ゴムの変形状態



図8 鉛プラグ入り積層ゴム側面に観察されたねじれ変形

以上の分析結果から、水平2方向の力学モデルとしてはMSSモデルが適用可能と判断した。ただし、図1の並列軸ばねモデルでは、上下端部の軸ばね群に対して図9のようにべ

ッセル関数で表現される軸剛性分布を導入することで、積層ゴムの曲げ剛性評価に改良を加えた。図 10 は 2 次形状係数  $S2=4$  の試験体に対して、面圧を 1MPa と 15MPa を加えて楕円加力を行った試験結果のシミュレーション解析結果である。ここで開発した力学モデルは面圧によって変化する履歴ループの形状を良好に再現できている。

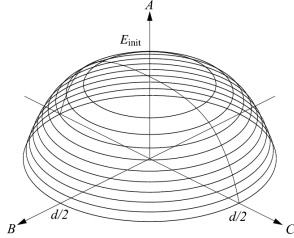
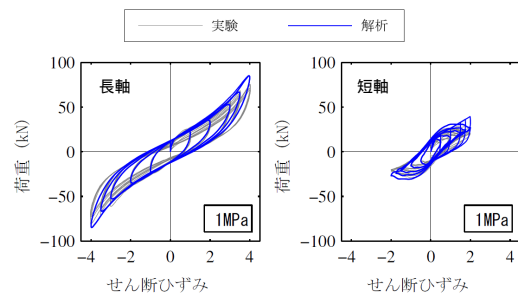
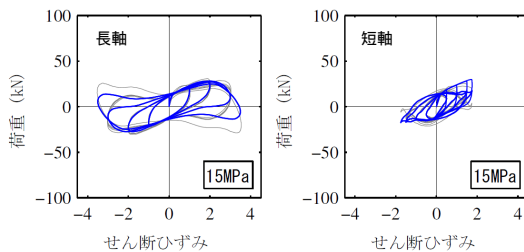


図 9 上下端部ばね群の軸剛性分布



(a) 面圧 1MPa,  $S2=4$  試験体



(b) 面圧 15MPa,  $S2=4$  試験体

図 10 鉛プラグ入り積層ゴムの解析結果

(2) 高減衰積層ゴムの水平 2 方向特性

高減衰積層ゴムについてはモデル化が行われていない低弾性タイプの高減衰積層ゴム (G0.35 タイプ) を対象とした。図 11 は鉛プラグ入り積層ゴムと同様に図 5 のような楕円加力を行った試験結果である。長軸の履歴ループは大きく膨らみ、短軸のそれは変形ゼロの付近で荷重が最大となる特異な形状を示していることから、水平 2 方向の相互作用が非常に大きいことがわかる。これは図 12 のように積層ゴム内部に生じるねじれ変形が大きく影響していることが要因と考えられる。このような力学特性は MSS モデルでは再現できないと判断し、図 2 の山本モデルを用いて力学モデルを構築した。図 13 は山本モデルによる解析結果である。解析結果は実験結果を良好に再現していることがわかる。なお、高減衰積層ゴムの実験では軸力をパラメータとしなかったため、軸力に違いによる差異は検討していない。

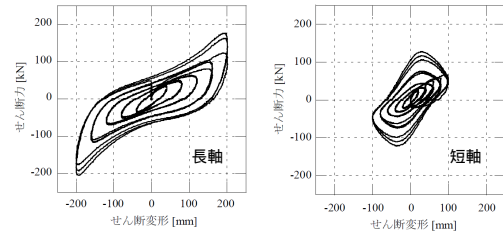


図 11 高減衰積層ゴムの加力試験結果

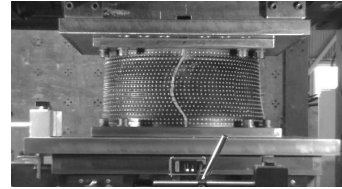


図 12 高減衰積層ゴムの変形状態

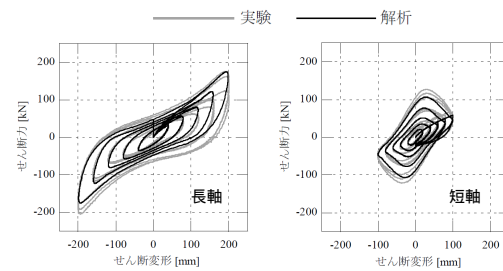


図 13 高減衰積層ゴムの解析結果

(3) 弾性すべり支承の水平 2 方向特性

弾性すべり支承は図 14 のように積層ゴム上下端部のいずれか (同図では下端) にすべり材を貼り付け、ある荷重に達するとすべらせる構造となっている。すべりが生じている間は水平剛性がゼロであり、理論上は周期が無限大となる。通常の積層ゴムと組み合わせることで免震周期を伸ばすことができる。

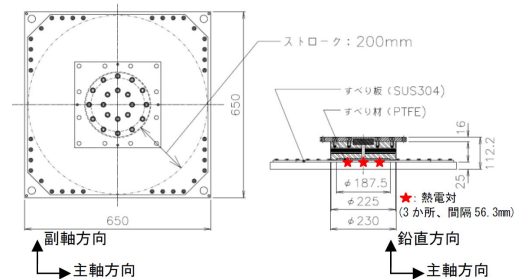


図 14 弾性すべり支承の構造 (本研究課題で製作した試験体)

ただし、すべり出し荷重が軸力  $\times$  摩擦係数で評価されるように、力学モデルでは軸力によって変動することを考慮しなければならない。また、水平 2 方向特性のモデル化においては、山本モデルにおいて弾性成分をゼロ、履歴減衰成分を軸力  $\times$  摩擦係数とすることで対応できる (図 15)。図 16 は弾性すべり支承の水平 2 方向楕円加力試験の解析結果である。一定軸力と変動軸力の 2 種類の結果を示しており、実験と解析はほぼ一致する結果となった。

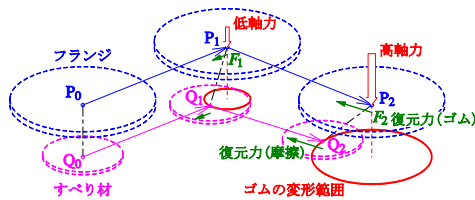


図 15 弾性すべり支承の水平 2 方向モデル

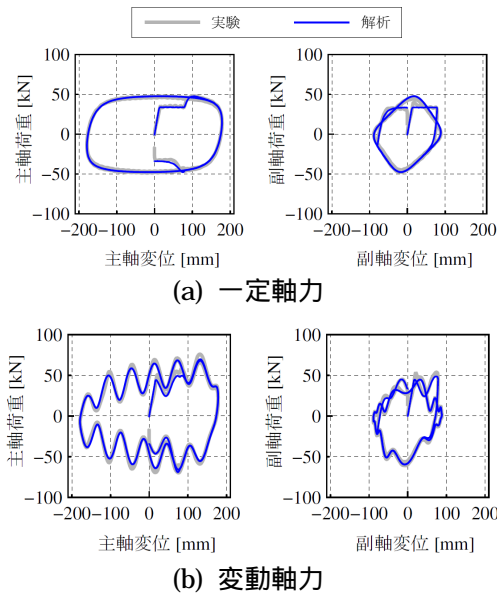


図 16 弾性すべり支承の解析結果

(4) 免震建物の 3 次元地震応答解析システム  
 (1)~(3)に示した 3 種類の免震部材の力学モデルを図 4 の OpenSees に実装することで、免震建物の多次元地震入力での応答解析が可能となった。このうち、並列軸ばねモデルは、KikuchiBearing Element として、図 17 のように UC Berkeley のサーバーにアップされ、世界中のユーザーが使用できる状態となっている。

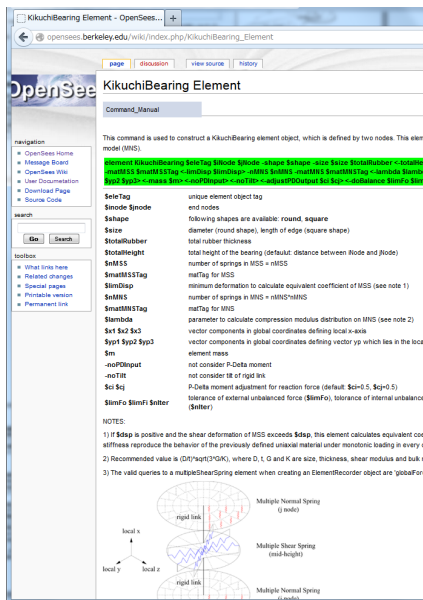


図 17 力学モデルの OpenSees への実装例

(5) 免震建物の多次元地震時挙動

OpenSees を用いて実施した免震建物の応答解析結果を例示する。免震建物モデルは図 13 でモデル化を行った低弾性高減衰積層ゴムであり、X、Y 方向にそれぞれ 5 列合計 25 台を配置した (図 18)、図 19 は水平 2 方向に地震波を同時入力したときに積層ゴムに生じるせん断応力である。地震動の X、Y の各方向への入力割合を変動させており、0°、90° は 1 方向入力に対応する。せん断応力の最大値は K-NET 釧路位相波の場合、2 方向入力時に生じている。これは従来の 1 方向入力でのみの解析では応答値が危険側に評価されることを示している。

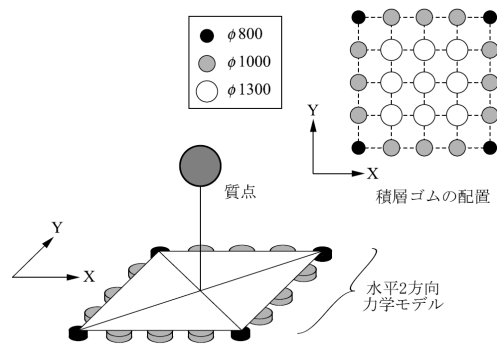


図 18 免震建物モデル

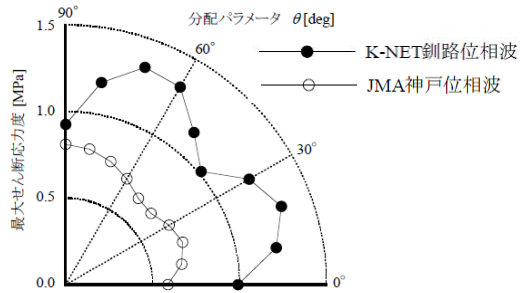


図 19 積層ゴムに生じるせん断応力

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

- 鴨下直登, 山本雅史, 嶺脇重雄, 菊地優, 石井建, 河内山修, 仲村崇仁: 数種の面圧条件下における弾性すべり支承の水平 2 方向特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 79 巻 第 698 号, pp.453-461, 2014 年 4 月, 査読有
- 菊地優, 山本雅史, 石井建, 佐々木頼孝: 低弾性高減衰積層ゴムの水平 2 方向復元力特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 第 79 巻 第 696 号 pp.257-265, 2014 年 2 月, 査読有
- 仲村崇仁, 菊地優, 石井建, 河内山修: 鉛プラグ入り積層ゴムの水平 2 方向限界特性, 日本建築学会技術報告集 第 19 巻 第 42 号, pp.471-476, 2013 年 6 月, 査読有
- 仲村崇仁, 菊地優, 石井建, 河内山修: 鉛プラグ入り積層ゴムの水平 2 方向復元力特性に関する研究, 日本建築学会構造

系論文集 第 77 卷 第 681 号,  
pp.1663-1671, 2012 年 11 月, 査読有  
加藤秀章, 森隆浩, 鮫島祐介, 室田伸夫,  
菊地優, 張國鎮, 黃震興, 汪向榮: 変形  
履歴積分型復元力モデルを用いた高減衰  
積層ゴム免震構造物の地震応答解析, 構  
造工学論文集, Vol.58B, pp.231-240, 2012  
年 3 月, 査読有  
加藤秀章, 森隆浩, 室田伸夫, 石井建,  
菊地優: 高減衰積層ゴムの変形履歴積分  
型復元力モデルに関する研究, 日本建築  
学会構造系論文集 第 76 卷 第 667 号,  
pp.1721-1728, 2011 年 9 月, 査読有  
石井建, 菊地優: 積層ゴム内部の圧縮・  
曲げ弾性係数の分布に関する基礎的考察,  
日本建築学会構造系論文集 第 76 卷  
第 666 号, pp.1425-1431, 2011 年 8 月,  
査読有

〔学会発表〕(計 20 件)

Masaru Kikuchi, Masaki Uhara, Toshihide  
Kashima, Kyo Fukuda, 'Response Analysis  
of a Seismic Isolation Retrofit: the National  
Museum of Western Art Buildings in Tokyo,  
Japan', PROHITECH'14, Antalya, Turkey,  
2014.5.7 ~ 9

河内山修, 菊地優, 仲村崇仁, 石井建,  
長弘健太: 鉛プラグ入り積層ゴムの水平  
二方向加力特性(その 1~その 3), 日本  
建築学会大会, 2013.8.30 ~ 9.1

木村裕崇, 松橋祐人, 菊地優, 石井建,  
山本雅史: 鉛プラグ入り積層ゴムの水平  
2 方向せん断モデルに関する研究, 日本  
建築学会大会, 2013.8.30 ~ 9.1

鴨下直登, 山本雅史, 嶺脇重雄, 菊地優,  
石井建, 河内山修, 仲村崇仁: 弾性すべ  
り支承の水平二方向特性に関する実験的  
研究(その 4~その 6), 日本建築学会大  
会, 2013.8.30 ~ 9.1

鶴原正樹, 菊地優, 鹿島俊英, 福田京:  
2011 年東北地方太平洋沖地震における国  
立西洋美術館本館の地震時挙動, 日本建  
築学会大会, 2013.8.30 ~ 9.1

K. Ishii, M. Kikuchi, 'Three-dimensional  
Mechanical Model for Circular Multilayered  
Elastomeric Bearings Considering  
Compression Modulus Distribution on the  
Rubber Pad', 13WCSI, Sendai, Japan,  
2013.9.24 ~ 27

鴨下直登, 山本雅史, 嶺脇重雄, 菊地優,  
石井建, 河内山修, 仲村崇仁: 弾性すべ  
り支承の水平二方向特性に関する実験的  
研究(その 1~その 3), 日本建築学会大  
会, 2012.9.12 ~ 14

藤原美津穂, 菊地優, 石井建, 加藤秀章:  
水平 2 方向大変形・高軸力下における高  
減衰積層ゴムの力学挙動解析, 日本建築  
学会大会, 2012.9.12 ~ 14

石井建, 菊地優, 山本雅史: 位相差変位  
入力をを用いた免震積層ゴム水平二方向加

力試験方法について, 日本建築学会大会,  
2012.9.12 ~ 14

深本和貴, 北山翔馬, 石井建, 白井和貴,  
菊地優: 米国免震設計法の応答修正係数  
RI を用いた免震建物耐力低減時の応答性  
状評価, 本建築学会大会, 2012.9.12 ~ 14

M. Kikuchi, I. D. Aiken, A. Kasalanati,  
'Simulation analysis for the ultimate  
behavior of full-scale lead-rubber seismic  
isolation bearings', 15WCEE, Lisbon,  
Portugal, 2012.9.24 ~ 28

Takahito Nakamura, Osamu Kouchiyama, M.  
Kikuchi, 'Behavior of lead rubber bearing  
under horizontal bi-directional loading test',  
15WCEE, Lisbon, Portugal, 2012.9.24 ~ 28

M. Yamamoto, S. Minewaki, N. Kamoshita,  
M. Kikuchi, K. Ishii, O. Kouchiyama, T.  
Nakamura, 'Behavior of Sliding Rubber  
Bearings under Horizontal Bidirectional  
Loadings', 15WCEE, Lisbon, Portugal,  
2012.9.24 ~ 28

K. Ishii, M. Kikuchi, K. Shirai, 'Seismic  
Response Analysis of Seismically Isolated  
Buildings with Multilayered Elastomeric  
Bearings Considering Rocking Behavior',  
15WCEE, Lisbon, Portugal, 2012.9.24 ~ 28

S. Kitayama, K. Ishii, M. Kikuchi,  
'Response Modification Factor for the  
Design of Seismically Isolated Buildings',  
15WCEE, Lisbon, Portugal, 2012.9.24 ~ 28

菊地優, 鈴木頼子, 石井建: 断面内剛性  
分布を考慮した実大鉛プラグ入り積層ゴ  
ムの極限挙動解析, 日本建築学会北海道  
支部研究報告会, 2011.8.23 ~ 25

石井建, 菊地優: 免震積層ゴムの断面内  
剛性分布に関する考察, 日本建築学会北  
海道支部研究報告会, 2011.8.23 ~ 25

仲村崇仁, 菊地優, 石井建, 鈴木頼子:  
鉛プラグ入り積層ゴムの水平二方向力学  
特性に関する研究(その 1~その 2), 日  
本建築学会大会, 2011.8.23 ~ 25

石井建, 北山翔馬, 菊地優: 断面内剛性分  
布を考慮した免震積層ゴムの大変形挙動  
解析, 日本建築学会大会, 2011.8.23 ~ 25

M. Yamamoto, M. Kikuchi, et al. 'Bi-axial  
Horizontal Bi-axial Horizontal Response for  
a Seismically-isolated Building with  
High-damping Rubber Bearings, 12WCSI,  
Sochi, Russia, 2011.9.20 ~ 23

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊地 優 (KIKUCHI MASARU)  
北海道大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号: 50344479

(2) 研究分担者

山本 雅史 (YAMAMOTO MASASHI)  
竹中工務店・技術研究所・部長  
研究者番号: 90416587