

機関番号：10101

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360245

研究課題名 (和文) 免震建物の終局挙動評価技術の高度化と合理的設計法への展開

研究課題名 (英文) Improving the practical design of seismically-isolated structures with state of the art analysis capabilities to capture extreme isolator behavior

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

研究成果の概要 (和文)：本研究では画期的な耐震技術の一つである免震構造の一層の普及を目指して、免震装置の終局挙動評価手法と免震建物の地震時挙動解析技術を高度化し、それらの技術を免震構造の合理的設計法へ展開した。初めに、主要な免震装置である積層ゴムの極限挙動を追跡できる力学モデルを新たに開発した。続いて、この力学モデルを用いて、近い将来発生が懸念されている長周期地震動に対する免震建物の挙動を把握し、免震建物の安全性を検証した。

研究成果の概要 (英文)：We improved the practical design of seismically-isolated structures with the state of the art analysis capabilities to capture extreme isolator behavior. First, a new analytical model was developed for the elastomeric isolation bearings under severe large shear deformation and axial load. Next, the safety of seismically-isolated buildings was carefully evaluated using the improved analytical model for long-period ground motions that might be produced by large earthquakes in the near future.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,200,000	2,460,000	10,660,000
2009年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：建築構造学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：耐震設計、免震構造、積層ゴム、軸力、座屈

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(住宅を除く)を超えた(図1)。免震構造の効用は、我が国では1995年兵庫県南部地震、米国ではそれより1年前のノースリッジ地震において注目され、建築棟数を急増させてきた。世界の地震国の中で日本の免震建築棟数は突出しているものの、日本全体の建築棟数から見れば、この数字は微々たる

ものであり、地震防災対策上、圧倒的に優位とされる免震構造の効用を享受できる建築はまだ非常に少ない。近年の我が国での地震被害を踏まえると、より高度化された社会が求める地震防災対策については、建物の構造被害の低減・防止のみでは不十分であり、建物機能と財産の保全が必要である。2007年7月16日に発生した新潟県中越沖地震(M6.7)後の柏崎刈羽原子力発電所の停止は、このことを如実に物語っている。建物の機能維持に

対しては建物内の応答加速度低減が最も効果的であり、これを実現できる技術は免震・制震のような振動制御技術以外には見当たらない(図2)。

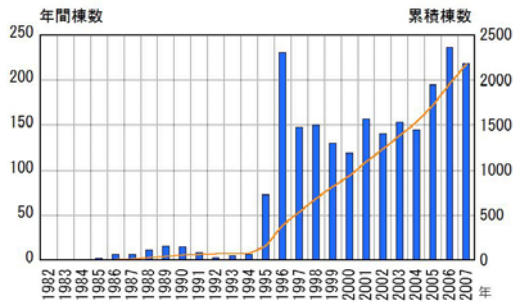


図1 免震建物の建築棟数の推移

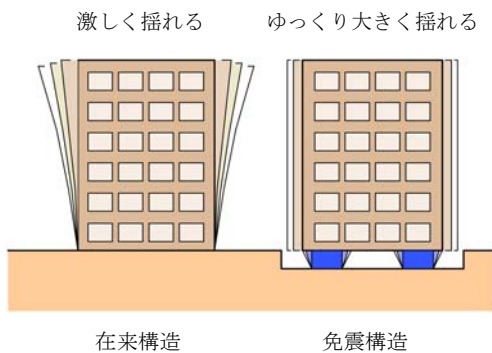


図2 免震構造のコンセプト

四半世紀に渡る免震構造の技術的進歩を顧みると、免震周期の長周期化の流れを見てとれる。長周期化することで建物内の応答加速度は低減され、構造損傷のみならず機能・収容物喪失の防止が一層容易になる。しかし、長周期化による応答加速度の低減は応答変位の増大とトレードオフの関係にあり、建物の重量を支持して変形する積層ゴムへの要求性能は一層厳しくなる。近い将来発生が懸念されている東海・東南海地震に関する研究では、長周期成分の卓越した継続時間の長い地震動が予測されている。このような巨大地震で予測される地震動は、免震装置に大振幅の多数回繰り返し変形という過酷な状況を与えることになり、免震構造の地震時安全性に対する懸念さえ指摘されている。本研究課題の学術的重要性は、この懸念を払拭し、免震性能をより向上させることにより、地震防災上有効な対策方法の一つとされる免震構造の一層の普及を促すことにある。

2. 研究の目的

免震構造を地震防災の有効な対策として位置づけ、その普及を促進させるには、免震構造に関わる未解明の技術的課題を一つずつ解決していく以外にない。地震時安全性に

対する懸念を払拭するには、免震構造の終局挙動評価技術の高度化をもって信頼性の高い安全性評価を行う必要がある。また、高度化された評価技術は、構造設計の合理的判断を可能とし実用上有用な知見を与えることとなる。以上により、本研究課題では以下の2項目を研究目的として掲げる。

- (1) 免震構造の終局挙動評価技術の高度化
- (2) 免震構造の地震時終局挙動を踏まえた構造設計の合理化

両項目はツールとそのアプリケーションである。(1)を研究成果として提示するのみでは本研究の価値は十分に見出せないと考え、(1)を用いた系統的な検討を行うことで免震構造の設計合理化に踏み込み、研究成果に実用的価値を付与する。

3. 研究の方法

(1) 積層ゴムの力学モデルの構築

積層ゴムの終局挙動を再現するため、大変形と過大な軸力変動に対応した力学モデルを新たに開発する。

(2) 積層ゴムの加力試験

力学モデルの妥当性を検証するための試験データ収集を目的として、以下の実験パラメータを考慮に入れた加力試験を実施する。

- ① 積層ゴムの種類(鉛プラグ入り型、高減衰ゴム系)の2種類
- ② 積層ゴムの2次形状係数(=積層ゴム径/ゴム総厚)
- ③ 作用軸力(一定、変動)

(3) 免震建物の極限挙動解析システムの開発

(1)で開発した並列多軸ばねモデルを組み込んだ地震応答解析システムを開発する。

(4) 免震構造の合理的設計法の検討

(3)で開発された解析手法を用いて、巨大地震を想定した実免震建物の地震時終局挙動の検討を行う。

4. 研究成果

(1) 積層ゴムの加力試験

鉛プラグ入り積層ゴムと高減衰積層ゴムについて、縮小試験体を用い大変形と高軸力を組み合わせて極限状態を模擬した加力試験を実施した(図3)。



図3 積層ゴムの加力試験状況

図5は角型断面を有する鉛プラグ入り積層ゴム(図4)の荷重変形関係である。作用軸力(面圧)の大小や加力方向によって荷重変形関係が大きく変化することがわかる。同様の傾向は、高減衰積層ゴムでも確認された。この試験結果は一定の軸力で得られたものであるが、地震時には図5の左右の状況が交互に現れると予想される。

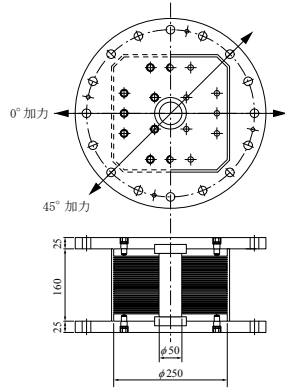
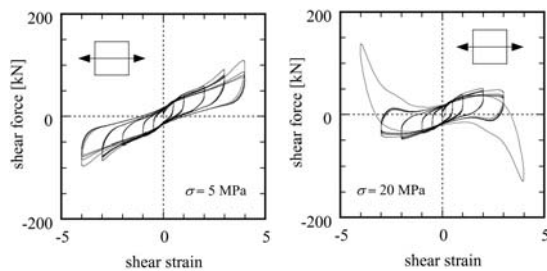
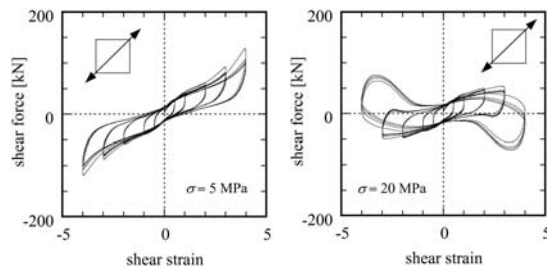


図4 角型鉛プラグ入り積層ゴムの形状



(a) 0度方向加力



(b) 45度方向加力

図5 角型鉛プラグ入り積層ゴムの試験結果
(左: 面圧 5MPa、右: 面圧 20MPa)

図6はカリフォルニア大学サンディエゴ校にある実大免震装置の加力試験機(SRMD)である。現在のところ、日本国内に同規模の試験機は存在せず、実機での高速多方向加力試験はこのSRMDでしか行えない。本研究では研究協力者であるSIE Inc.から、同試験機を使用して得られた実大鉛プラグ入り積層ゴムの2方向加力試験データの提供を受けた(図7)。



図6 実大免震装置の多方向加力試験機
(UC San Diego, SRMD)

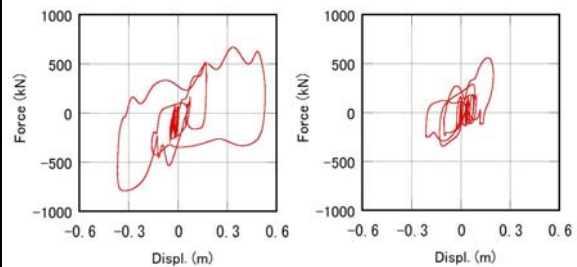


図7 実大鉛プラグ入り積層ゴムの
2方向加力試験結果
(左: 主軸、右: 副軸)

(2) 積層ゴムの力学モデル

(1)で実施した加力試験では、積層ゴムには低軸力時にはハードニング、高軸力時には座屈の挙動が見られ、その傾向は水平変形が大きくなるほど、あるいは積層ゴムの形状がスレンダーになるほど顕著となることが明らかとなった(図8)。長周期地震動に対して免震建物は過大な応答を示す可能性があることから、地震時の安全性を検証するには、図8の挙動を無視できない。

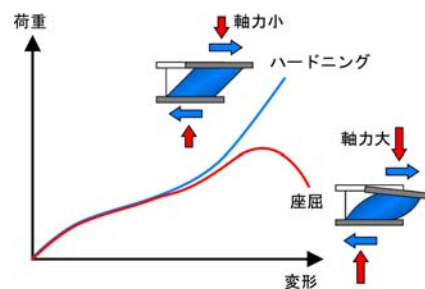


図8 積層ゴムの極限挙動

そこで、図9に示すように、上下端に多数の非線形軸ばねを配し、P- Δ 効果と中央のせん断ばねが傾くことによる幾何学的非線形性を考慮した力学モデル(並列軸ばねモデル)を新たに開発した。並列軸ばねモデルは、荷重条件のみでせん断変形と軸力の連成効果を自動的に考慮できる独自の力学モデルであり、中央のせん断ばねをMSSモデルと

することで容易に3次元モデルへ拡張できる(図10)。

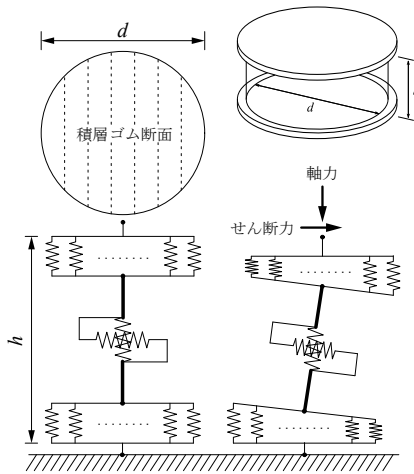


図9 2次元並列軸ばねモデル

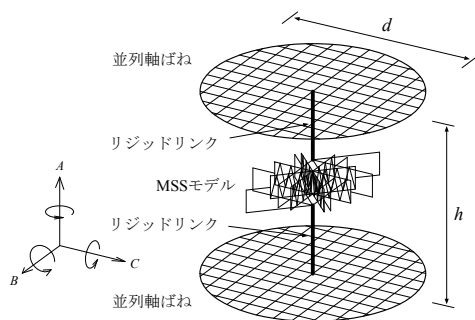


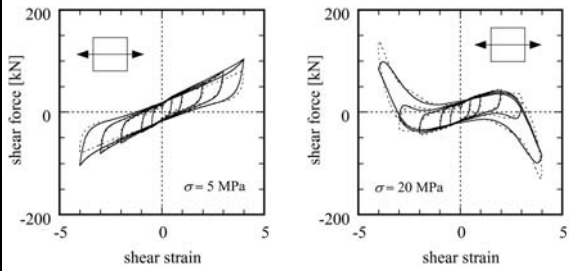
図10 3次元並列軸ばねモデル

図5に示した試験結果を、図10の3次元並列軸ばねモデルを用いて再現した(図11)。高面圧下での座屈という極限状態においても加力方向の違いによる荷重変形関係の違いが表現されている。また、図12は図7に示した実大鉛プラグ入り積層ゴムの2方向加力試験の解析結果である。図11と同様に、並列軸ばねモデルが試験結果を精度良く再現している。

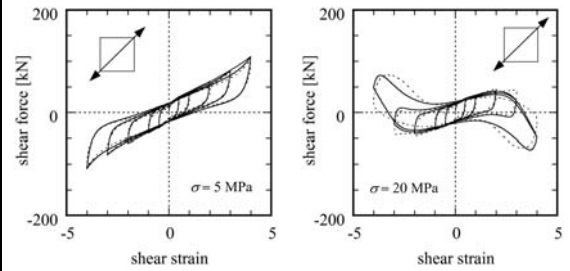
(3) 免震建物の極限挙動解析システムの開発

免震建物の極限挙動を追跡できる解析システムを開発した。このシステムは、従来から構造物の3次元的非線形挙動の追跡に用いられてきたものである。本研究では、これに各種の復元力モデル、および並列軸ばねモデルや他の多方向連成力学モデルを組み込むことで、免震建物の多次元の挙動を追跡できるようにした。なお、本システムを用いて設計された免震建物は100棟を超える。

— 解析 実験



(a) 0度方向加力



(b) 45度方向加力

図11 角型鉛プラグ入り積層ゴムの解析結果

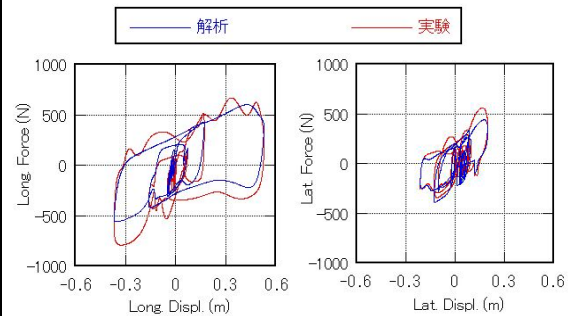


図12 実大鉛プラグ入り積層ゴムの解析結果

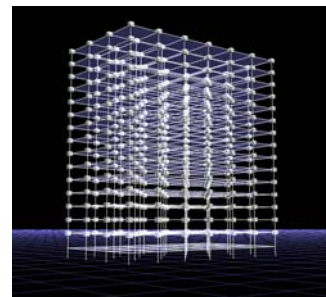


図13 免震建物の3次元振動解析システム

(4) 免震建物の多次元地震入力に対する応答評価

合理的設計法への展開として水平2方向地震入力に対する免震建物の応答性状について検討した。具体的には、高減

衰積層ゴムを対象に水平2方向の連成効果を考慮して、水平2方向加力試験結果のシミュレーションおよび地震応答特性に関する検討を行い、水平2方向特性を考慮した場合の余裕の見込みを評価した。この検討は、本研究を遂行中において、履歴減衰型の積層ゴムが水平2方向に変形するとねじれ変形が生じて1方向変形時よりも限界性能が低下するという事実が発覚したことがきっかけとなっており、水平2方向特性を考慮した限界特性の把握と設計法の確立が急務とされた研究課題である。

図14は高減衰積層ゴムを水平2方向に同時に変形させた場合の荷重変形関係である。水平2方向の特性を表現するモデルとして多用されている既往のモデル(MSSモデル)では、このような2方向特性を適切に評価できない。そこで、高減衰積層ゴムの2方向連成効果を適切に評価できる力学モデル(山本モデル)を用いて試験結果を再現した。山本モデルでは、図15のように特異な履歴ループ形状を再現できている。(4)で開発した解析システムは、山本モデルを採用したことで一層、解析能力を向上させることができた。

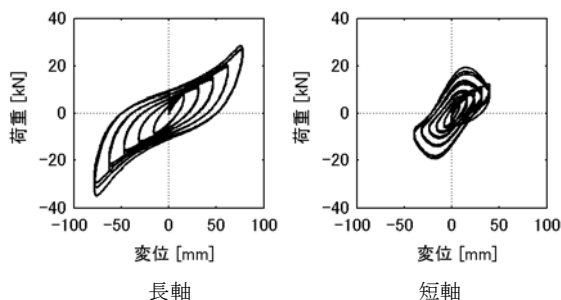


図14 高減衰積層ゴムの水平2方向加力試験結果(長軸:短軸=2:1とする楕円加力)

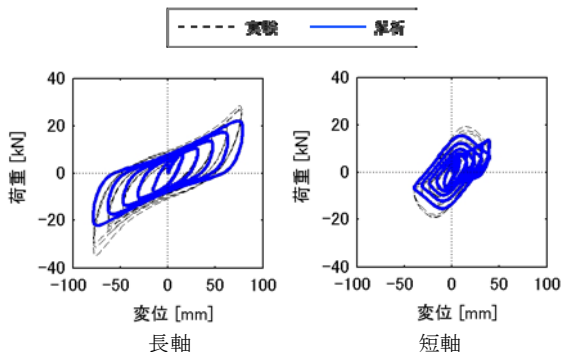


図15 山本モデルによる高減衰積層ゴムの水平2方向加力試験結果の再現

図16は水平2方向の地震動を入力した場合の積層ゴムのせん断応力度である。横軸の分配パラメータとは、地震動のNS成分とEW成分の合成割合を角度で示しており、両端が1方向入力に相当する。ねじれ応力を考慮した場合には、2方向入力時には1方向入力時よりも大きなせん断応力を生じる場合がある。また、その傾向は山本モデルを用いた場合に明確に現れる。検討の結果、従来のMSSモデルを用いた設計では2方向に対する余裕を1割程度見込む必要があると結論づけた。

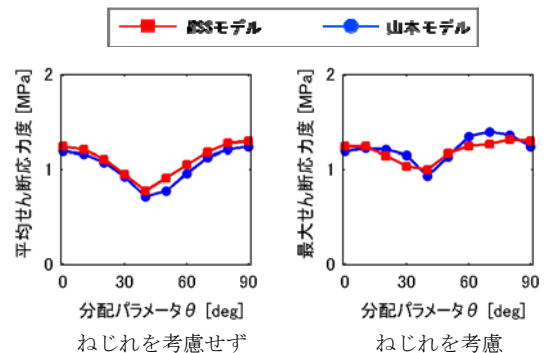


図16 地震応答解析で得られた積層ゴムのせん断応力度

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7件)

- ① 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, 査読有, 第666号, 2011 (印刷中)
- ② Masaru Kikuchi, Takahito Nakamura, Ian D. Aiken, Three-dimensional analysis for square seismic isolation bearings under large shear deformations and high axial loads, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 査読有, Vol. 39, 2010, 1513-1531.
- ③ 菊地優, 石井建, 加藤秀章, 大変形・高軸力下における高減衰積層ゴムの力学挙動予測に関する研究, 構造工学論文集, 査読有, Vol. 56B, 2010, 179-188.
- ④ 石井建, 菊地優, 北村佳久, 仲村崇仁, せん断変形と偏心曲げモーメントを受ける免震積層ゴムの力学挙動解析, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第647号, 2010, 87-93.
- ⑤ 菊地優, 山本祥江, 仲村崇仁, 西村拓也, 田村和夫, 3次元並列多軸ばねを用いた角型鉛プラグ入り積層ゴムの大変形挙動

解析, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第 638 号, 2009, 647-655.

- ⑥ Sachie Yamamoto, Masaru Kikuchi, Masaiki Ueda, Ian D. Aiken, A mechanical model for elastomeric seismic isolation bearings including the influence of axial load, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 査読有, Vol.38, 2009, 157-180.
- ⑦ 山本祥江, 菊地優, 越川武晃, 上田正生, 変動軸力の影響を考慮した鉛プラグ入り積層ゴムの限界特性に関する検討, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第 634 号, 2008, 2101-2110.

[学会発表] (計 16 件)

- ① 菊地優, 石井建, 山本雅史, 米田春美, 嶺脇重雄, 加藤秀章, 高減衰積層ゴムを用いた免震建物の水平 2 方向応答特性に関する検討 (その 1~その 3), 日本建築学会大会, 2010. 9. 9, 富山
- ② 北山翔馬, 石井建, 菊地優, 鉛プラグ入り積層ゴムの断面内剛性分布を考慮した大変形挙動解析, 日本建築学会北海道支部研究報告会, 2010. 7. 3, 室蘭
- ③ 石井建, 菊地優, 山本雅史, 米田春美, 嶺脇重雄, 加藤秀章, 高減衰積層ゴムを用いた免震建物の水平二方向応答特性に関する検討, 日本建築学会北海道支部研究報告会, 2010. 7. 3, 室蘭
- ④ Masaru. Kikuchi, Ken. Ishii, Takahito Nakamura, Ian D. Aiken, Three dimensional analysis for square seismic isolation bearings under large shear deformation and high axial loads, 7CUEE and 5ICEE, 2010. 3. 3, Tokyo
- ⑤ 藤田幸憲, 菊地優, 仲村崇仁, 西村拓也, 田村和夫, 角形鉛プラグ入り積層ゴムの極限挙動解析 (その 1~その 3), 日本建築学会大会, 2009. 8. 28, 仙台
- ⑥ 石井建, 菊地優, 北村佳久, 仲村崇仁, 3 層並列軸ばねを用いた偏心曲げを受ける積層ゴムの挙動解析, 日本建築学会大会, 2009. 8. 28, 仙台
- ⑦ 藤田幸憲, 菊地優, 越川武晃, 角形鉛プラグ入り積層ゴムの挙動解析, 日本建築学会北海道支部研究発表会, 2009. 7. 4, 札幌
- ⑧ 石井建, 菊地優, 北村佳久, 仲村崇仁, 3 層並列軸ばねを用いた偏心曲げを受ける積層ゴムの挙動解析, 日本建築学会北海道支部研究発表会, 2009. 7. 4, 札幌
- ⑨ M. Kikuchi, K. Morihiro, Ian D. Aiken, An analytical hysteresis model to predict the small shear strain behavior of high-damping rubber

bearings, PROHITECH09, 2009. 6. 24, Rome, Italy

- ⑩ S. Yamamoto, M. Kikuchi, M. Ueda, I. D. Aiken, Analytical modeling of elastomeric isolation bearings under severe axial load and shear deformations, 14WCEE, 2008. 10. 14, Beijing, China.
- ⑪ 北村佳久, 猿田正明, 西村拓也, 石井建, 菊地優, 積層ゴムにおける傾斜付加時の力学特性について (その 1~3), 日本建築学会大会, 2008. 9. 20, 東広島
- ⑫ 山本祥江, 菊地優, 越川武晃, 上田正生, 変動軸力の影響を考慮した積層ゴムの限界特性の検討 (その 1, 2), 日本建築学会大会, 2008. 9. 20, 東広島
- ⑬ 西村拓也, 田村和夫, 菊地優, 免震構造物の振動台実験における床応答スペクトルの高振動数域特性について, 日本建築学会大会, 2008. 9. 19, 東広島
- ⑭ 菊地優, 武田祐介, 越川武晃, 上田正生, 地震観測記録に基づく積層ゴムアイソレータの小ひずみ時の復元力モデルに関する研究, 日本建築学会北海道支部研究発表会, 2008. 6. 28, 札幌
- ⑮ 山本祥江, 菊地優, 越川武晃, 上田正生, 変動軸力の影響を考慮した積層ゴムの限界特性の検討, 日本建築学会北海道支部研究発表会, 2008. 6. 28, 札幌
- ⑯ 石井建, 菊地優, 越川武晃, 上田正生, 離散型並列多軸ばねモデルを用いた免震積層ゴムの力学特性の評価, 日本建築学会北海道支部研究発表会, 2008. 6. 28, 札幌

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

田村 和夫 (TAMURA KAZUO)
清水建設(株)・技術研究所・副所長
研究者番号: 50416822
西村 拓也 (NISHIMURA TAKUYA)
清水建設(株)・技術研究所・研究員
研究者番号: 70470325