

平成 30 年 5 月 15 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02274

研究課題名(和文) 過大地震入力に対する免震構造の極限性能向上技術の開発

研究課題名(英文) Development of technology for improving ultimate performance of seismic isolation systems for excessive earthquake ground motion

研究代表者

菊地 優 (Kikuchi, Masaru)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：50344479

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究で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、過大な地震入力における免震構造の極限挙動を解明し、それに対処可能な免震構造の高性能化技術の開発を目的とする。具体的には、長周期地震動において多数回繰り返し変形を強いられ性能が劣化しにくい高耐久型の免震積層ゴム、および想定以上の過大な変形を強いられた場合でも免震装置が損傷せずに免震効果を維持できるフェイルセーフシステムの開発を行った。さらに、これらの免震装置の極限挙動の予測できる解析技術を開発し、オープンソース構造解析システムOpenSeesに実装することによって、高性能化技術を取り込んだ免震構造の設計を可能にした。

研究成果の概要(英文)：This research aims to develop technology that improves the ultimate performance of seismic isolation systems for excessive earthquake ground motions. Two high-performance seismic isolation devices were developed. One is a high durability elastomeric seismic isolation bearing whose performance does not easily deteriorate during a large number of cyclic deformations caused by long period ground motions. The other is a fail-safe system that maintains the device's seismic isolation performance without being damaged, even during excessive large deformations. Furthermore, we proposed analytical models that predict the ultimate behavior of the isolation systems we developed. The models were implemented in the open-source structure analysis program, OpenSees, which enables us to design seismically isolated structures that incorporate the high-performance devices we developed.

研究分野：工学

キーワード：耐震設計 免震構造 積層ゴム すべり支承 フェイルセーフ 長周期地震動 巨大地震

### 1. 研究開始当初の背景

免震構造は1995年阪神淡路大震災を契機に本格的に普及し、2000年以降に頻発した内陸地震においても効果を発揮し実績を蓄積してきた。一方、2003年十勝沖地震が免震構造に与えた影響は大きく、長時間・長周期地震動への対応が求められ、研究開発が今日でも継続されている。2011年東日本大震災では、免震構造を適用した防災拠点建物が、震動による被災を免れ機能を維持したことにより、救援活動に大活躍した。免震構造は期待どおりの性能を発揮したというのが定評となり、防災拠点の免震化が一層加速されることとなった。しかしながら、冗長性の低さという免震構造の重大な弱点が露呈されなかった。その要因は、震動の大きさが免震構造を損傷させるレベルに至らなかったことにある。一方、同地震以降、建築構造は過大地震入力に対する明確な設計思想が求められるようになった。免震構造においても、想定外の極限事象が起り得ることを前提に、安全性を確保する対策を講じることが求められている。

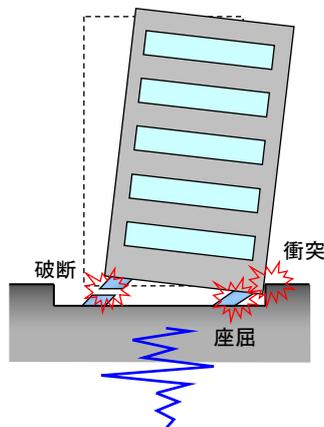


図1 免震建物の想定外極限事象

免震構造には、想定以上の地震入力に対して急激に上部構造の塑性化が進行するという脆弱性がある。これは、免震構造が免震層以外ではエネルギーを吸収しない構造であることに起因し、非線形定常振動解から理論的に検証されている。また、2008年に発見された免震積層ゴムの水平2方向加力時の早期破断現象のように、免震建物が未だに安全性を確認できるレベルの現地地震動を受けていないことで、予期しない挙動に遭遇することがある。研究代表者・分担者らは、上述の免震構造に関する共通の問題意識のもと研究チームを発足させ、免震構造の弱点を克服すべく方策を検討してきた(平成23～25年度基盤研究(B)、平成22～25年度国土交通省建築基準整備促進事業)。これらの研究では、免震構造の極限挙動に関する理論的検証と実大免震部材の実験室環境での各種性能検証を行った。そして、これまでの研究成果を発展させることで、免震構造の弱点を克服するための方策と理想的な免震構造の形態を具現化する段階にきている。免震構造は巨大地震への備えとしての有力な手段であり、免震構造の一層の高性能化が対応急務の課題である。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、上記の免震構造が置かれた状況に鑑み、過大な地震入力における免震構造の極限挙動を解明し、それに対処できる免震構造の高性能化を実現することを目的として掲げる。この目標を達成するプロセスとして、以下の3項目を並行して遂行する。

- (1) 高耐久免震部材の開発
  - (2) 免震フェイルセーフシステムの開発
  - (3) 免震建物の極限挙動予測技術の高度化
- このうち、前2項目は過大入力に対応できる新たな免震部材の開発を行うものであり、これらの免震部材を免震構造の設計に具体的に取り込めるよう、(3)項によって前2項の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27年度～29年度の3年間の研究期間について、以下の3項目のプロセスを遂行して研究目標を達成する。

- (1) 高耐久免震部材の開発
 

免震構造の主要構成要素である履歴減衰型免震部材は、地震エネルギーを熱エネルギーに変換して減衰効果を発揮する。長時間・長周期地震動の下では、免震部材の多数回の繰返し変形による疲労破壊や、熱エネルギーが蓄積され温度上昇することで減衰性能が劣化する。既往研究にて性能劣化の現象理解をほぼ終えており、次なるステップとして劣化抑制方法を提案する。具体的には、免震部材全体の熱容量拡大と発熱部材の分散配置によって温度上昇を抑え、安定的に減衰性能を発揮できる高耐久免震部材を開発する。開発は実験を主体として行い、これに熱伝導解析による現象理解を加えて、積層ゴム内部のディテール改良を試みる。

- (2) 免震フェイルセーフシステムの開発

免震構造の脆弱性を回避するには、前項の高耐久免震部材を実用化するとともに、フェイルセーフを導入することで免震構造システム全体の冗長性を増やすことが欠かせない。研究分担者は、免震装置の大変形時の損傷防止の目的から独自のフェイルセーフシステムを提案し、縮小試験体による性能検証を行ってきた。このシステムは、ある変形レベルで上部建物へ入力される地震力を制限することができ、免震構造の冗長性を増やす上で望ましい性能を有する。そこで、本研究では実大免震装置を製作し、実地震に近い環境下で加力試験を実施することで、蓄積してきた研究成果に現実性と実用性を付与する。

- (3) 免震建物の極限挙動予測技術の高度化

研究代表者・分担者は、免震積層ゴムの大変形時のハードニングや座屈という強非線形挙動や水平二方向変形時に現れる多軸連成挙動を追跡できる高度な解析手法を数々提案してきた。本項目では、これらの解析技術を、1つのプラットフォームに集約して、免震構造物の極限挙動予測技術の高度化を図る。このプロセスにて、

米国 UC Berkeley で開発されている構造解析システム OpenSees に注目した。OpenSees とは、プログラムコードをオープンソース化し無償かつ自由に配布する一方で、世界中の研究者・技術者の最新技術を集約し、相互に利用可能とするシステムである。これをプラットフォームとして利用することで、プログラム開発の効率化と研究コストの削減、研究成果の世界展開というグローバル化が期待できる。前 2 項で開発する新たな免震部材の力学モデルを OpenSees に実装し、免震構造の高性能化の検討手段を充実させる。これにより、免震構造物の極限挙動解析が可能となり、検討結果に高い信頼性を付与できる。

#### 4. 研究成果

##### (1) 高耐久免震部材の開発

免震部材の高耐久化は、主要免震部材の一つである鉛プラグ入り積層ゴム (以下、LRB) を対象とした。高耐久化は熱容量の増大と鉛プラグの分散配置の 2 通りについて検討した。

##### ① 熱容量の増大

熱容量の増大は、図 2 に示すように内部鋼板の総厚を従来のもの (Type 1、図は省略) より増やすことで実現した。Type 2 は各鋼板厚を一律 2 倍とし、Type 3 は中間部の鋼板 1 枚を厚さ 70.4mm にしたものである。これにより熱容量は約 1.3 倍となった。

試作 LRB を用いて繰り返し加力 (水平 2 方向、60 サイクル) を行った結果を図 3 に示

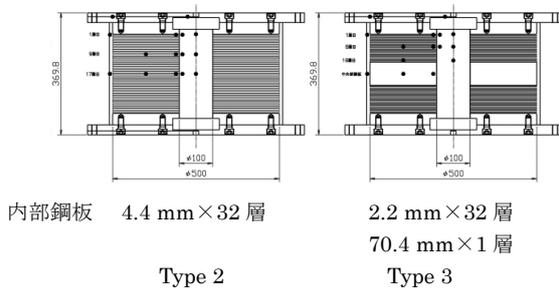


図 2 LRB の高熱容量化

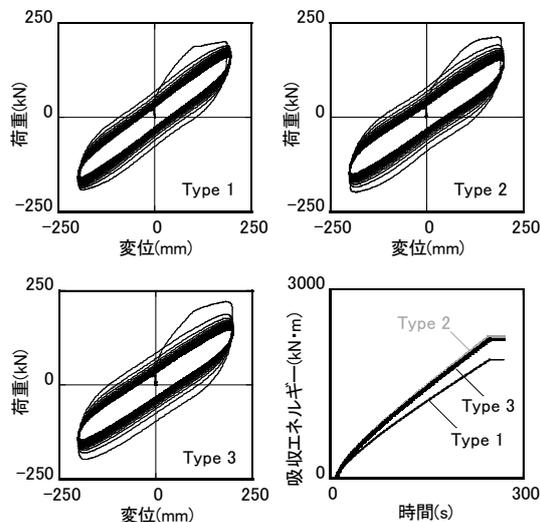


図 3 高熱容量化による性能改善効果

す。繰り返し加力によって履歴ループは徐々に細くなり減衰性能が低下している傾向が共通して見られるが、細り方は標準品の Type1 より Type2 や Type3 の方が少ない。吸収エネルギーの比較では、加力終了時において、Type1 に比較して Type2 で 19%、Type3 で 17%の改善効果が確認された。

##### ② 鉛プラグの分散配置

もう一つの高耐久化は、図 4 のように鉛プラグを従来の 1 本から複数本化して、4 か所に分散配置する方法 (マルチプラグ化) である。これによりプラグの発生熱が一か所に集中せず、放熱性の改善が期待できる。

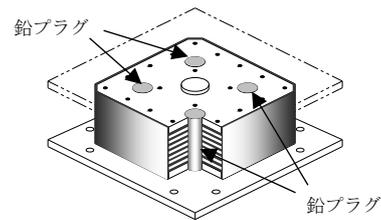


図 4 鉛プラグの分散配置

実大 LRB (900 mm 角、4 本プラグ) を製作し動的加力試験を実施して、繰り返し加力による力学特性の変化を把握した。図 5 は、ゴム部のせん断ひずみが 200%となる変形を 8 回繰り返し与えた結果である。周期を 3 通り (102 秒、16 秒、4 秒) に変えて実施しており、このうち周期 16 秒と 4 秒の動的加力試験は日本国内では実施不可能なため、米国 UC San Diego 校の SRMD 試験機を使用した。国内での出荷時検査に相当する周期 102 秒の加力試験結果に比べて、周期 16 秒と 4 秒の動的加力試験では履歴ループが細り、吸収エネルギーも低下している。マルチプラグによる高耐久化については、この動的加力試験と後述の(3)で開発した熱・力学連成挙動解析を組み合わせ、性能改善効果を確認した。結果については紙面の制約により割愛する。

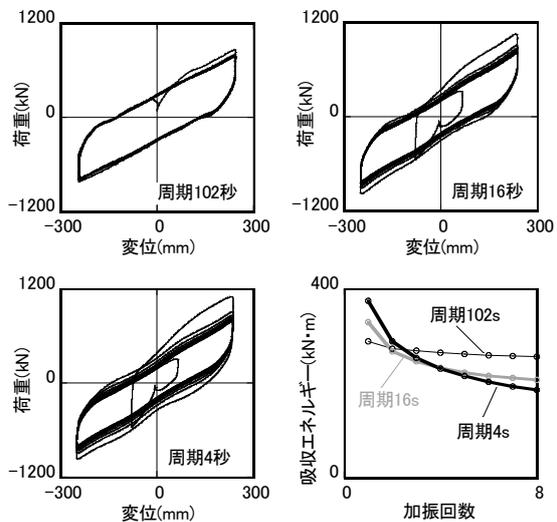


図 5 マルチプラグ実大 LRB の加力試験結果

(2) 免震フェイルセーフシステムの開発

免震構造で考えられるフェイルセーフシステムは、終局挙動シナリオ（擁壁衝突、支承損傷、応答増大のいずれか）によって、防舷材、ソフトランディング、ストッパー・ダンパー増設など様々な選択肢がある。本研究では、上記3通りの終局挙動シナリオのいずれをも回避できるものとして、図6に示すフェイルセーフシステムを提案した。このシステムは積層ゴムの安定変形領域を超える大変形が生じるような過大地震入力時には、支承上部をすべらせることで積層ゴムの損傷・破断および上部構造の応答増大の双方を回避するものである。

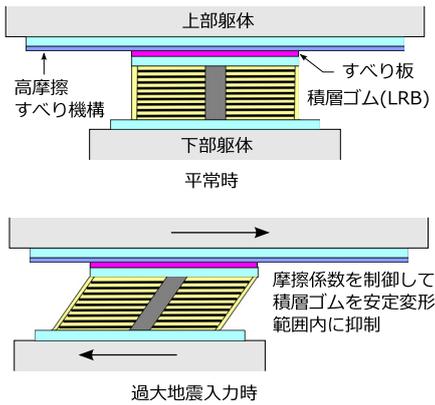


図6 フェイルセーフシステムの提案

初年度は、縮小試験体に対して水平2方向+変動軸力という地震時の多軸応力状態を再現して力学挙動を把握した。縮小試験体による試験結果を踏まえ、次年度には900mm角の鉛プラグ入り積層ゴムと高摩擦すべり支承を直列配置した実大フェイルセーフシステムを製作して、前年度と同様の多軸加力試験を実施した。なお、実大装置に地震時の多軸応力状態を与えられる常置試験装置は日本国内には存在しないため、図7に示す米国 UC San Diego 校の SRMD 試験機を使用した。試験では加振振動数、面圧、加力パターン（1方向・2方向の正弦波、実地震応答波）を変化させて、実機での性能を検証した。

図8に加振周期5秒、1方向加振時の荷重変形関係について、装置全体の変形（黒線）



図7 実大試験体の動的加力試験状況 (米国 UC San Diego 校 SRMD 試験機)

と積層ゴム部の変形（赤線）を重ね描いて示す。面圧の増加とともにすべり部分の摩擦荷重が大きくなり、積層ゴム部の変形が大きくなっている。面圧12MPaでは、積層ゴム部に僅かながらハードニング特性が現れている。また、変動面圧下では正負で摩擦荷重が異なることから、装置全体の荷重変形関係は非対称となっている。すべり部を撓動させて積層ゴムの損傷を回避するというフェイルセーフの狙いから、本システムの実用化に際しては積層ゴムがハードニングする以前の8MPaを基準面圧として使用すべきであると判断した。

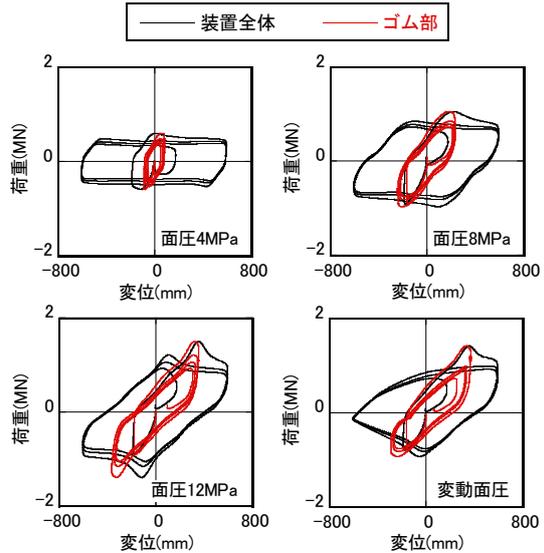


図8 実大フェイルセーフシステムの試験結果

図9に試験で得られた動摩擦係数 $\mu_d$ を示す。図中の曲線は先に縮小試験体の加振試験で得られた評価式である。

- ・低速時 ( $8 \leq V < 160$  mm/s)  

$$\mu = 0.32\sigma^{-0.42} - 0.0874 \sigma^{-1.087} \cdot \ln(160/V)$$
- ・高速時 ( $160$  mm/s  $\leq V$ )  

$$\mu = 0.32\sigma^{-0.42}$$

ここに、 $\sigma$ は面圧(MPa)、 $V$ は撓動速度(mm/s)である。

評価式は、実大装置における撓動速度と面圧による動摩擦係数の変動を良好に表現しており、実用上十分な精度を有していると判断できる。

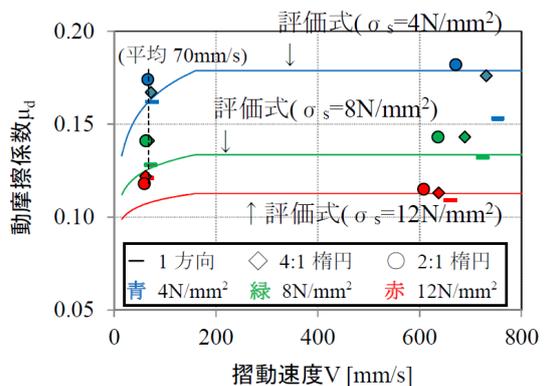


図9 一定面圧下での動摩擦係数

### (3) 免震建物の極限挙動予測技術の高度化

図1に示した免震建物の極限事象ならびに(1), (2)で検討した高耐久免震部材や免震フェイルセーフシステムの力学挙動を再現する各種の解析技術は、米国 UC Berkeley で管理・運用されているオープンソース解析システム OpenSees 上で開発した。今後、計算の安定性が得られた解析モデルは、本体システムへアップロードする予定である。

ここでは本研究で開発した解析技術のうち、長周期地震動による多数回繰り返し変形の影響を考慮した免震装置の挙動予測について報告する。主要な免震装置である履歴減衰型積層ゴムでは、内部で振動エネルギーを熱エネルギーに変化して減衰を得る。多数回繰り返し変形を強いられると積層ゴム内部の温度が上昇し、減衰性能が劣化する恐れがある。このような熱・力学連成挙動に関して、鉛プラグ入り積層ゴムを対象とした場合の解析フローを図10に示す。この解析手法は、0.01秒程度の時間刻みで熱伝導解析と地震応答解析を交互に実施して、熱による復元力特性の変化を時々刻々追跡する。図11に鉛プラグ入り積層ゴムの多数回繰り返し加力

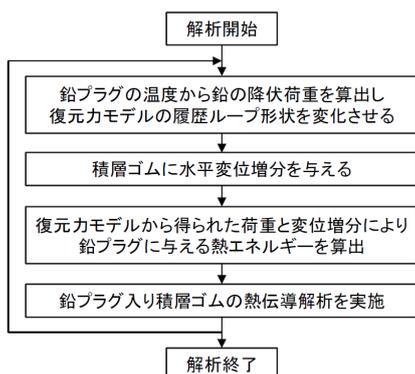


図10 熱・力学連成挙動の解析フロー

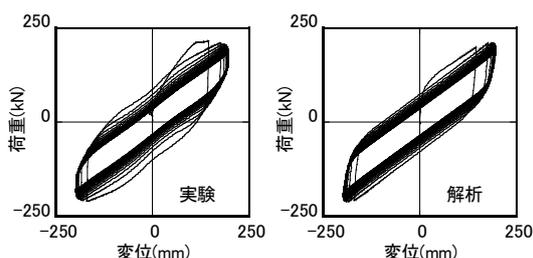


図11 鉛プラグ入り積層の多数回繰り返し加力のシミュレーション解析

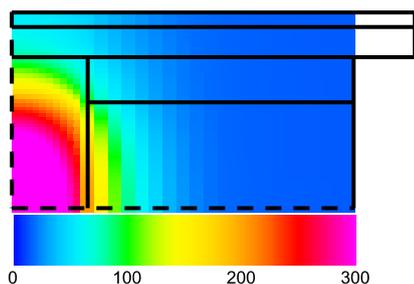


図12 鉛プラグ積層ゴム内部の温度分布

のシミュレーション解析結果を示す。繰り返し加力によって履歴ループが徐々に細り、減衰性能が低下していく状況を解析で予測することが可能となった。また、図12の積層ゴム内部の温度分布からは、鉛プラグからの発生熱が周囲に拡散せず、プラグ周辺に蓄積している状況が明らかとなった。

### 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6件)

- ① 和氣知貴, 菊地優, 石井建, 黒嶋洋平, 仲村崇仁: 繰り返し加力を受ける鉛プラグ入り積層ゴム支承の降伏荷重評価法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 第83巻 第750号, 2018年8月, 掲載予定, 査読有
- ② 濱口弘樹, 和氣知貴, 山本雅史, 菊地優: フェイルセーフ機構を備える鉛プラグ入り積層ゴム支承の実用化に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集 第83巻 第749号, 2018年7月, 掲載予定, 査読有
- ③ 濱口弘樹, 和氣知貴, 山本雅史, 菊地優: 設計想定を超える地震動に対して高い耐震安全性を有する免震構造の提案, 日本建築学会構造系論文集 第82巻 第739号, pp.1349-1359, 2017年9月, 査読有
- ④ 黒嶋洋平, 石井建, 菊地優, 飯場正紀, 白井和貴: 鉛プラグ入り積層ゴムの熱・力学的連成挙動を考慮した免震建物の地震応答解析, 構造工学論文集, Vol.63B, pp.231-239, 2017年3月, 査読有
- ⑤ Ken Ishii, Masaru Kikuchi, Takuya Nishimura, Cameron J. Black, 'Coupling behavior of shear deformation and end rotation of elastomeric seismic isolation bearings', Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2017, Vol. 46: 677-694, DOI: 10.1002/eqe.2809, 査読有
- ⑥ 菊地優, 加藤秀章, 山本雅史, 石井建, 白井和貴: 高減衰積層ゴムの3軸連成力学モデルに関する研究, 日本建築学会構造系論文集 第80巻 第713号, pp. 1067-1077, 2015年7月, 査読有

[学会発表] (計20件)

- ① Masaru Kikuchi, Ken Ishii, 'Thermal-Mechanical Coupled Behavior of Elastomeric Isolation Bearings under Cyclic Loading', 16<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering, Thessaloniki, Greece, 2018.6.18-21 (発表決定)
- ② Masaru Kikuchi, 'An Advanced Hysteresis Model of High-Damping Rubber Bearings for Seismic Isolation', 16<sup>th</sup> Scientific Conference of the memory of Professor Danilovskiy, Khabarovsk, Russia, 2017.10.16-18
- ③ 山本雅史, 濱口弘樹, 石井建, 鴨下直登,

- 和氣知貴, 菊地優: 想定を上回る地震に対して安全性の高い免震構造の提案 (その14~16), 日本建築学会大会 (中国), 2017.8.31~9.3
- ④ 和氣知貴, 菊地優, 石井建, 黒嶋洋平, 飯場正紀, 白井和貴: 高耐久 LRB の開発 (その3, 4), 日本建築学会大会 (中国), 2017.8.31~9.3
- ⑤ 加藤秀章, 森隆浩, 中村昌弘, 室田伸夫, 菊地優, 加藤真守, 石井建: 低弾性高減衰積層ゴムを用いた免震建物の長周期地震動に対する応答評価 (その1, 2), 日本建築学会大会 (中国), 2017.8.31~9.3
- ⑥ 本田菜, 菊地優, 石井建, 中南滋樹, 安永亮, 福田滋夫: 錫プラグ入り積層ゴムの熱・力学連成挙動解析, 日本建築学会大会 (中国), 2017.8.31~9.3
- ⑦ Hiroki Hamaguchi, Masashi Yamamoto, Tomotaka Wake, Masaru Kikuchi, 'A Proposal of a Seismic Isolation System with Higher Safety Margin against Input Ground Motions beyond Design Level', Post SMiRT 24 Conference, Tokyo, Japan, 2017.8.28-30.
- ⑧ Masaru Kikuchi, Ken Ishii, Kato Hideaki, Masahiro Nakamura, 'Numerical model for low-shear modulus high-damping rubber isolation bearing under large shear deformation', EMI2017, San Diego, USA, 2017.6.5-7
- ⑨ Ken Ishii, Masaru Kikuchi, Yohei Kuroshima 'Seismic response analysis considering the thermal and mechanical coupling behavior of lead rubber bearings', EMI2017, San Diego, USA, 2017.6.5-7
- ⑩ Hiroki Hamaguchi, Masashi Yamamoto, Tomotaka Wake, Masaru Kikuchi, 'A proposal of An Isolation System with Higher Seismic Safety against Input Ground Motions beyond Expectations', EMI2017, San Diego, USA, 2017.6.5-7
- ⑪ M. Yamamoto, H. Hamaguchi, N. Kamoshita, M. Kikuchi, K. Ishii, T. Wake, 'Horizontal Biaxial Loading Tests on Sliding Lead Rubber Bearing System', 2017 NZSEE Conference, Wellington, New Zealand, 2017.4.27-29
- ⑫ T. Wake, M. Kikuchi, K. Ishii, 'Strength Degradation on Lead-Rubber Bearings during a Long-duration Earthquake', 2017 NZSEE Conference, Wellington, New Zealand, 2017.4.27-29.
- ⑬ 鴨下直登, 濱口弘樹, 石井建, 山本雅史, 菊地優, 和氣知貴: 想定を上回る地震に対して安全性の高い免震構造の提案 (その11~13), 日本建築学会大会 (九州), 2016.8.24~8.26
- ⑭ 和氣知貴, 菊地優, 石井建, 経沢一平, 飯場正紀, 白井和貴: 高耐久 LRB の開発 (その1, 2), 日本建築学会大会 (九州), 2016.8.24~8.26
- ⑮ 加藤秀章, 森隆浩, 中村昌弘, 室田伸夫, 菊地優: 変形履歴積分型弾塑性モデルの低弾性高減衰積層ゴムへの適用, 日本建築学会大会 (九州), 2016.8.24~8.26
- ⑯ Ken Ishii, Masaru Kikuchi, Takuya Nishimura, Ian Aiken, 'Coupling Behavior of Shear Deformation and End Rotation of Elastomeric Seismic Isolation Bearings', EMI2016, Nashville, USA, 2016.5.22-25
- ⑰ 石井建, 菊地優, 経沢一平, 白井和貴, 山本雅史, 近藤明洋: OpenSees を用いた免震構造解析システムの開発 (その1, 2), 日本建築学会大会 (関東), 2015.9.4~9.6
- ⑱ 内田茉莉, 菊地優, 石井建, 加藤秀章, 中村昌弘, 室田伸夫: 超低弾性高減衰積層ゴムの大変形挙動解析モデルに関する研究, 日本建築学会大会 (関東), 2015.9.4~9.6
- ⑲ Masaru Kikuchi, Toshihide Kashima, Kyo Fukuda, 'Performance and Response Analysis of a Seismically-Isolated Building during the 2011 Tohoku Earthquake, Japan', EMI2015, Stanford, USA, 2015.6.16-19
- ⑳ Ipei Tsunozawa, Masaru Kikuchi, Takahito Nakamura, 'Analytical Model for Lead-Rubber Bearings Considering Heat Conduction', EMI2015, Stanford, USA, 2015.6.16-19
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  
飯場 正紀 (IIBA, Masanori)  
北海道大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号: 40344006
- 白井 和貴 (SHIRAI, Kazutaka)  
北海道大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号: 20610968
- 山本 雅史 (YAMAMOTO, Masashi)  
竹中工務店・技術研究所・部長  
研究者番号: 90416587
- 濱口 弘樹 (HAMAGUCHI, Hiroki)  
竹中工務店・技術研究所・グループ長  
研究者番号: 10416589
- (3) 研究協力者  
石井 建 (ISHII, Ken)  
和氣 知貴 (WAKE, Tomotaka)  
鴨下 直登 (KAMOSHITA, Naoto)  
AIKEN, Ian D.  
BLACK, Cameron J.  
MCKENNA, Frank