

機関番号：37401  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20560454  
 研究課題名（和文） 長周期・高減衰せん断構造体の基本構造・支持形式と耐震性能に関する研究  
 研究課題名（英文） Study on seismic performance, support system and frame construction of multistory frame with a long natural period and a corresponding high damping constant  
 研究代表者  
 片山 拓朗（KATAYAMA TAKURO）  
 崇城大学・工学部・教授  
 研究者番号：80310027

研究成果の概要（和文）：基礎に固定した副多層骨組構造，基礎上のローラ支承で支持された副多層骨組構造およびこれらの副多層骨組構造の上部を結合する頂部結合副骨組からなる多層骨組構造の固有振動特性、付加減衰特性および耐震性能を数値計算と模型振動試験で検討した。軒高が同じ従来構造に比べて、提案構造の固有周期は2倍となり、効率的に大きな付加減衰が得られことが判明した。また、地震時の応答加速度が約1/2に低減し、躯体の最大せん断力が約1/3程度に減少することが予想された。

研究成果の概要（英文）：Characteristics of natural mode, characteristics of additional damping and seismic performance of the proposed multistory rigid frame are investigated theoretically and experimentally. The proposed multistory rigid frame consists of fixed sub multistory rigid frame, horizontally movable sub multistory rigid frame and the top connection sub frame. By numerical analyses and vibration test by using a scale model, it was found that the fundamental natural period of the proposed frame is two times longer than that of the ordinary frame with the same number of stories and the fundamental damping constant can be effectively increased by the horizontal installation of viscous dampers. Furthermore, it was estimated that the maximum acceleration and the base shearing force of the proposed frame can decrease to at least one half of the maximum acceleration and one third of the base shearing force of the ordinary frame, respectively.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	300,000	90,000	390,000
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：構造力学、振動工学

科研費の分科・細目：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：耐震性能、固有周期、付加減衰、多層骨組構造、ローラ支承、減衰装置

## 1. 研究開始当初の背景

日本は地震国であり、地震災害時の避難所・指令所となる公共施設や救急救命の拠点病院あるいは情報ネットワークの要であるデータセンターなどとして用いる中高層建物では高い耐震性が要求される。近年は想定

を超える最大加速度の内陸断層型地震が多発し、プレート境界型の首都直下地震やプレート境界海溝型の東海・東南海・南海地震の連動も高い確率で発生が予想されているので、経済的で高い耐震性を有す中高層建物へのニーズは高い。アイソレータを用いる免震

構造は、低層建物では経済的に高い耐震性を実現できるが、中高層建物では建設費が高くなる傾向がある。よって、従来の免震構造と同程度の耐震性を有し、中高層建物に適用できる新しい耐震構造が求められている。

## 2. 研究の目的

地震動によって構造物に作用する地震力の大きさは加速度・周期・継続時間などの地震動の特性と構造物の水平固有周期・減衰定数などの固有振動特性に関係するが、地震動の周期特性を考慮して構造物の水平固有周期と減衰定数を適切に設計することは、耐震設計を経済的に行う上で重要である。建築基準法施行令などの定める地震応答加速度スペクトルでは、約1秒を超える周期領域において、固有周期の増加と共に応答加速度は急激に減少する。

軒高 40m~60m の建築物の固有周期は 0.8 から 1.2 秒であり、この程度の軒高の建物の固有周期を倍の長さにすることができれば、その地震応答加速度は従来の建物のその約 1/2 に低下すると考えられる。ただし、地震応答では基本固有振動モードの応答が卓越すると仮定する。さらに、減衰装置等によって経済的に大きな例えば 10% を超える付加減衰を与えることができれば応答加速度はさらに減少し、応答加速度は従来の建物の約 1/4 に低減すると考えられる。

本研究では、従来の中高層建物は主に梁・柱からなる骨組構造で地震力に抵抗し、耐震設計に必要な固有振動特性は層間変形特性

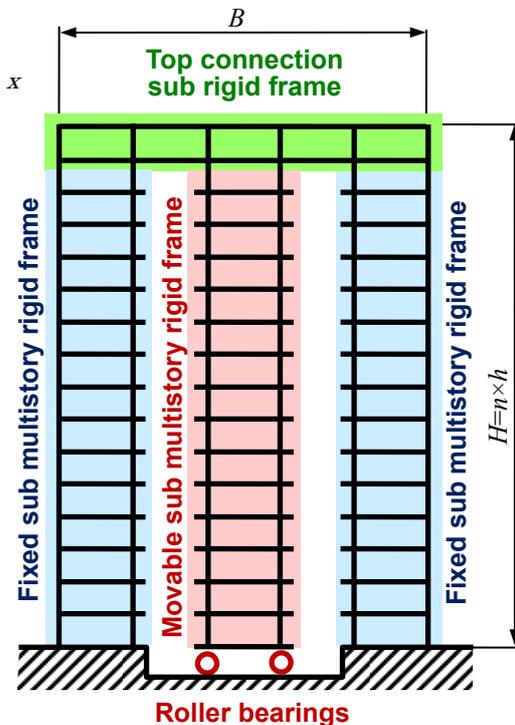


図-1 提案の多層骨組構造

を考慮した多層せん断振動モデルで算出されることに着目した。すなわち、多層せん断振動モデルの基本固有周期は主に層数と層間固有振動数（層間せん断ばね定数と階層質量の比の平方根）で決まるので、層間固有振動数を同程度にして、階数を変えずに層数を2倍とすれば固有周期が2倍となることに着目した。本研究では、多層骨組構造の構成とその支持形式を工夫することによって、固有周期に関わる層数を2倍とすることにより基本固有周期を2倍に伸張させ、且つ減衰装置の設置による減衰の付与に有利な固有振動モードを発現させることを試みる。

## 3. 研究の方法

図-1 に提案の多層骨組構造を示す。提案構造は、下端を基礎に固定した2個の副多層骨組（以後、固定側副骨組と略す）と下端を基礎上のローラ支承で鉛直方向固定・水平方向可動になるように支持した副多層骨組（以後、可動側副骨組と略す）および3個の副多層骨組の上部を結合する頂部結合副骨組で構成される。また、固定側副骨組、可動側副骨組および頂部結合副骨組は主に梁と柱で構成される。提案構造は4つの副骨組が一体となって振動し、可動側副骨組はその上部を2個の可動側副骨組で水平方向に支えられているため、固有周期に関する層数は固定側副骨組と可動側副骨組のそれぞれの層数の和と考えられる。これより、図-1 に示す提案構造の基本周期は従来構造より長くなると予想される。

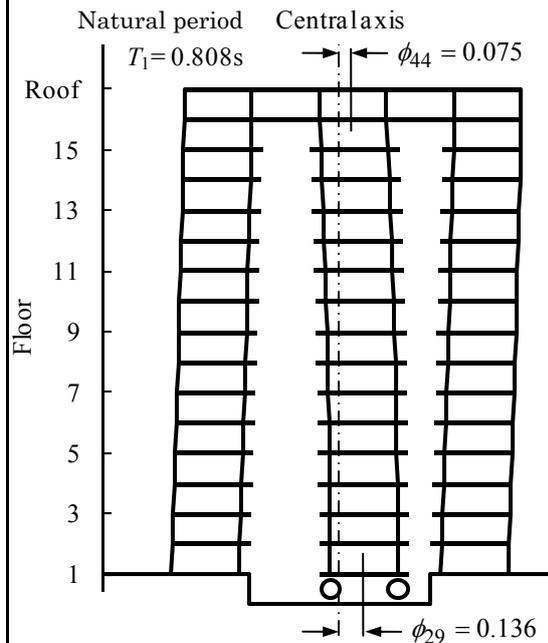


図-2 基本固有振動モード

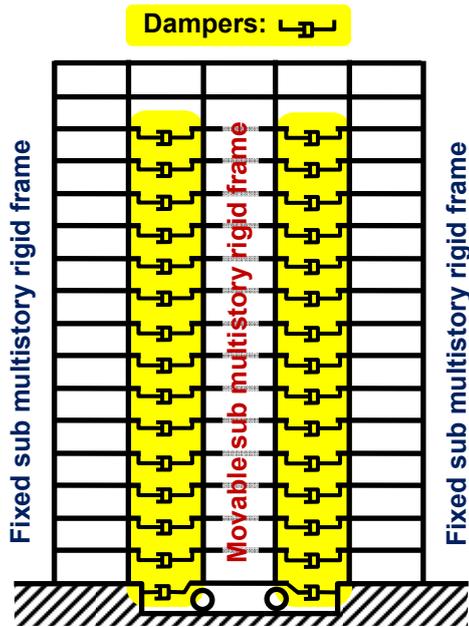


図-3 粘性減衰装置の配置

図-2 は提案構造の基本固有振動モードの形状の一例である。可動側副骨組は下側から上側に向かって徐々に水平変位が大きくなり、逆に可動側副構造は上側から下側へ向かって水平変位が徐々に大きくなる形状の振動モードが予想された。これは固定側副構造と可動側副構造の間の相対水平変位が上下の梁の相対変位に比べて大きいことを示す。

これより、図-3 に示すように粘性減衰装置を用いて可動側副骨組と固定側副骨組を水平方向に連結することによって効率的に付加減衰を付与できると考えられた。

本研究では、提案構造の固有振動特性と付加減衰特性を固有値解析と複素固有値解析で予想し、その妥当性を模型振動試験で定量的に検証した。また、提案構造の地震時応答を弾性地震応答解析で予想し、その妥当性を地震波模型振動台試験で検証した。

#### 4. 研究成果

##### (1)固有振動特性

軒高 38.5 m・階数 11 の提案の多層骨組構造について固有値解析によって試算した、可動側副骨組の質量  $\alpha_M$  と多層骨組構造の全質量  $\alpha_T$  の比 ( $\alpha_M/\alpha_T$ ) と基本固有周期の関係を図-4 に示す。建築基準法施行令を参考にすると鉄骨造・軒高 38.5m の従来建物の固有周期は  $T=0.03H=1.16$  秒となるので、階数 11 の従来の多層骨組構造の層固有円振動数（階層質量とせん断ばね定数の比の平方根）を 39.7rad/s と仮定し、提案構造の固定側および可動側副骨組構造の層固有振動数はその 0.9 倍の 35.5rad/s と仮定した。図より質量比

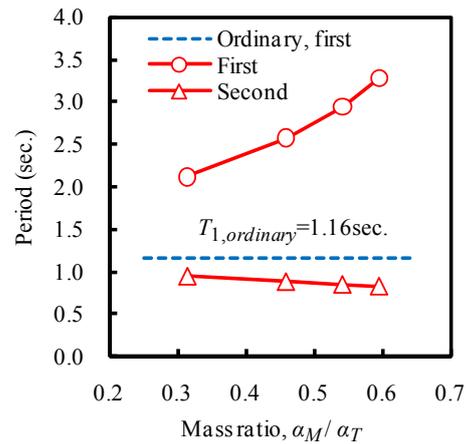


図-4 基本固有周期と質量比

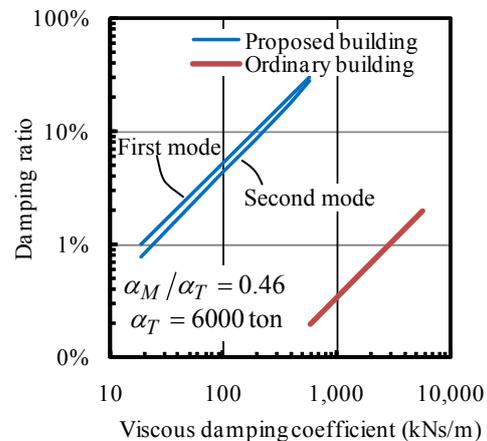


図-5 一次モードの付加減衰定数

が 0.4 以上であれば基本固有周期は従来構造のその 2 倍以上になると予想された。ただし、2 次固有周期が従来構造の基本固有周期と同程度となるので、2 次以降の固有振動モードの地震応答への寄与が問題になると予想された。

##### (2)付加減衰特性

図-5 は複素固有値解析によって予想した図-3 の粘性減衰装置の配置による付加減衰定数と装置の粘性減衰係数の関係である。提案構造の総質量と質量比はそれぞれ 6000 ton と 0.46 と仮定した。また図には従来構造に上下層の相対水平速度を利用する層間粘性減衰装置を配置する場合の付加減衰定数と装置の粘性減衰係数の関係も示す。提案構造と従来構造の付加減衰を比較すると、提案構造では従来構造の 1/100 の性能の減衰装置により同程度の付加減衰を得られる可能性があると予想された。また、提案構造の 2 次モードの付加減衰も基本モードのそれと同程度であると予想された。

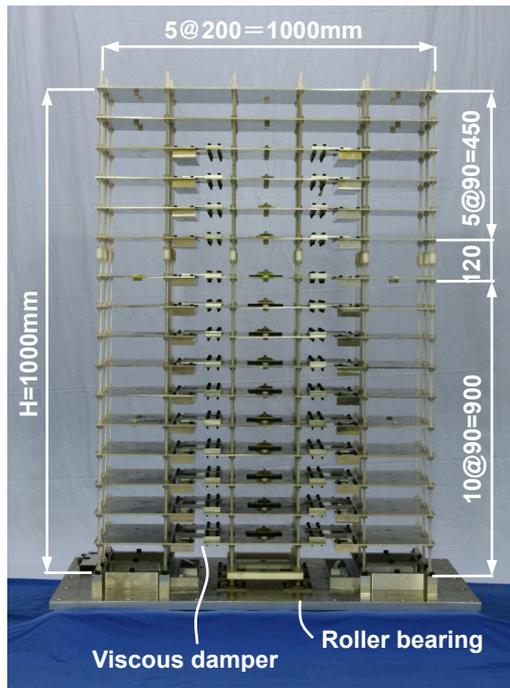


写真-1 振動模型の外観

(3) 振動模型

写真-1 に振動模型の外観を示す。模型の階数、軒高、振動方向の長さ、振動直角方向の幅はそれぞれ 16 階、1.47m、1.0m および 0.4m である。総質量、可動側副骨組の質量および質量比はそれぞれ 130kg、48.0kg、0.369 である。固定側副骨組の階層質量とせん断ばね定数および層固有振動数はそれぞれ 2.5kg、56.5kN/m、4.75rad/s であり、可動側副骨組のそれらはそれぞれ 3.2kg、56.5kN/m、4.20rad/s であった。なお、実測されたローラ支承の動摩擦係数は 0.0012 である。粘性減衰装置の実測された減衰係数は 15.0Ns/m である。

(4) 自由振動試験

図-6 と図-7 はそれぞれ減衰装置を付けない場合と付ける場合の自由振動試験で得られた固有周期と減衰定数の比較である。図には複素固有値で予測した減衰系固有周期と減衰定数の予測値を示す。減衰定数は、模型の構造減衰  $\zeta_0$ 、粘性減衰装置による付加減衰  $\Delta\zeta$  およびローラの転がり摩擦減衰を評価するための等価粘性減衰  $\zeta_e$  を考慮した。固有周期と減衰定数はともに予測値は実験値に良い対応を示していることが確認される。以上より、提案構造は図-4 で予想した固有振動特性と図-5 で予想した付加減衰特性を発現できることが確認された。

(5) 共振振動台試験

図-8 は共振曲線の一例である。減衰装置の有無で比較すると、減衰装置の設置によっ

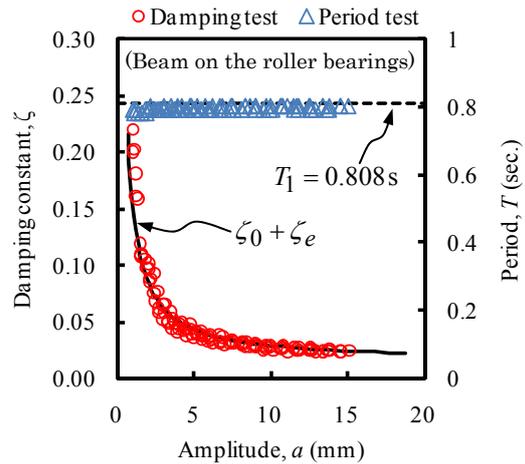


図-6 減衰装置無模型の自由振動特性

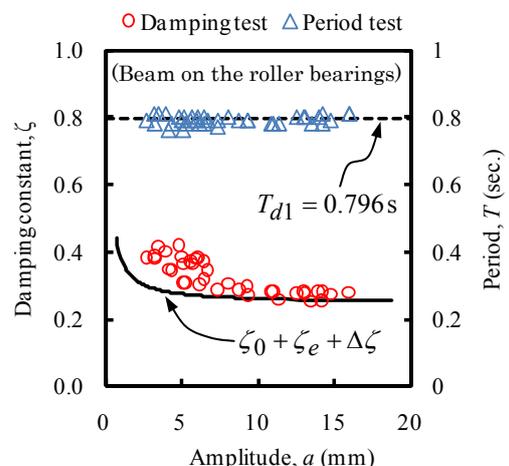


図-7 減衰装置有模型の自由振動特性

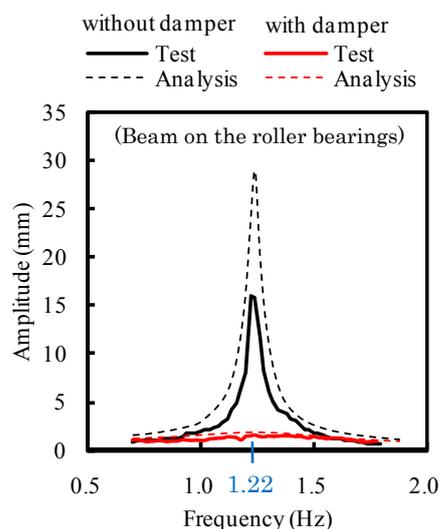


図-8 模型の共振曲線

て共振振幅が著しく減少することが確認される。ただし、減衰装置が無い場合は理論曲線との差が大きかった。これは振動台の加振

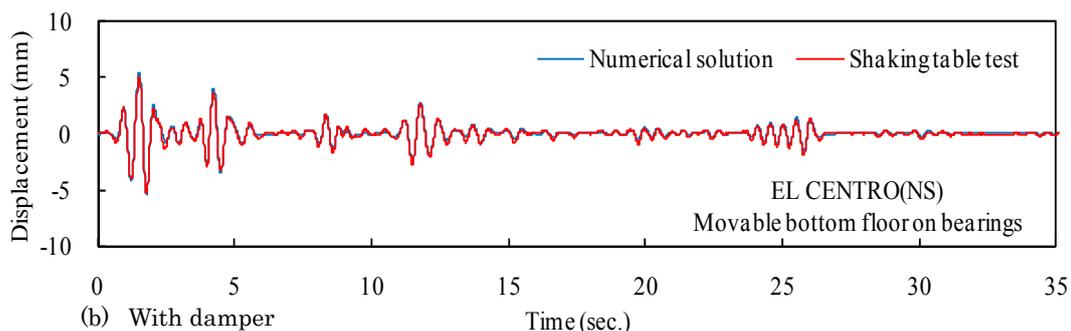


図-9 振動模型のエルセントル地震(NS)の地震応答の比較

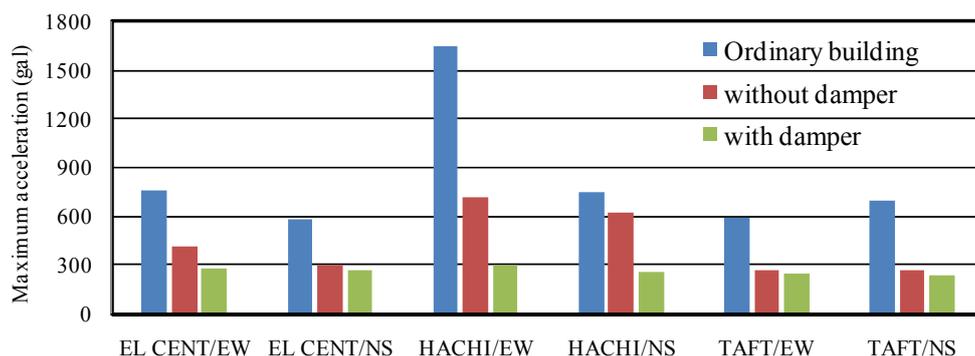


図-10 弾性地震応答解析による最大加速度の比較

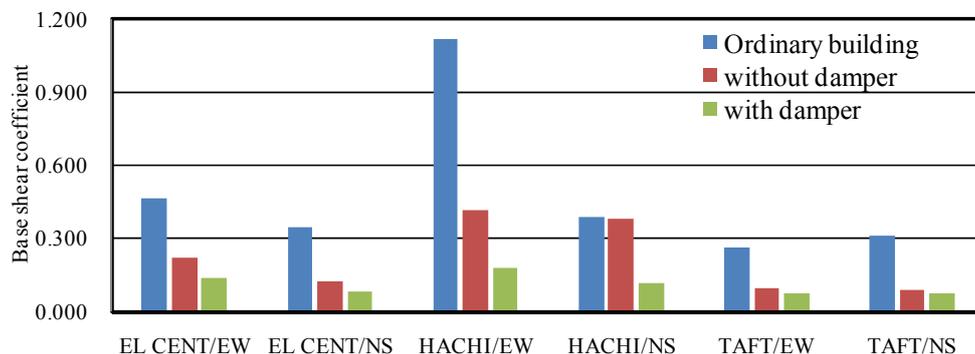


図-11 弾性地震応答解析によるベースシア係数の比較

周波数に高次成分が混入していたためである。この高次成分の除去はできなかった。図より、減衰装置の設置によって高い制振性能が付与できることが定性的に確認された。

#### (6)地震波振動台試験

実規模構造の地震弾性応答解析すなわち数値実験に用いる解析プログラムと解析モデルの妥当性を検証するために、地震波振動台試験による模型の変位応答と数値実験の変位応答を比較した。応答の比較はエルセントル地震、タフト地震および八戸地震のそれぞれ NS 成分と EW 成分の合計 6 の地震波について行った。図-9 はエルセントル地震(NS

方向)による変位応答の一例である。数値実験の変位応答は振動台試験のそれと、振幅と位相の両面で良い対応を示した。他の地震波についても同様であった。これより、数値実験で用いる解析プログラムと解析モデルは実構造の地震応答を予測できると考えられた。

地震波振動台試験において、減衰装置が無い場合と減衰装置が有る場合の変位応答の比較から、減衰装置による変位応答の低減は定性的に確認できた。しかし、振動台に入力した加速度記録と振動台が出力した加速度記録のフーリエスペクトルを比較した結果、振動台の地震波の再現が十分でないことが判明した。よって、減衰装置の効果について

は再実験が必要と考えられたが、振動模型の振動可能量の制約から振動台の応答関数のキャリブレーションはできなかった。

#### (7)弾性地震応答解析

軒高 38.5 m・階数 11 の提案の多層骨組構造と同条件の従来の多層骨組構造について弾性応答解析を行い、二つの構造の加速度応答と変位応答および基部のせん断力を比較した。提案構造は減衰装置を設置しない場合とする場合の 2 ケースを解析した。提案構造と従来構造の構造減衰は 2%とした。提案構造の減衰装置による付加減衰定数は 20%とした。地震波は前述の 6 ケースとし、最大加速度は 300gal に調整した。

図-10 は最大加速度の比較である。減衰装置を設置しない場合は従来構造に比べて 80%~40%程度に最大加速度が減少し、減衰装置を設置すると 50%~20%程度に減少すると予想される。また、減衰装置を設置する提案構造の最大加速度は地震波の最大加速度と同程度になると予想される。

図-11 は躯体下部のベースシア係数の比較である。減衰装置を設置しない場合は従来構造と 100%~30%程度に減少すると予想される。減衰装置を設置すると 30%~20%程度に減少すると予想される。

#### (8)結論

提案構造は従来構造に比べて固有周期が約 2 倍に長くなり、減衰装置の設置により大きな付加減衰が付与されることが、固有値解析と模型振動試験で確認された。また、地震波振動台試験により妥当性が確認された解析プログラムと解析モデルを用いた数値実験により、代表的な三つの地震に対して、提案構造の最大加速度は少なくとも従来構造の約 50%に減少し、ベースシア係数は少なくとも約 30%に低減すると予想される。よって、提案構造は従来構造に比べて高い耐震性能を有する可能性があると考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

- ① T.Katayama, T.Yamao and E. S. Kaya: Seismic Response Analysis of the Folded Cantilever Shear Structure, Proceeding of the 9<sup>th</sup> U.S. National and 10<sup>th</sup> Canadian Conference on Earthquake Engineering, 査読有, CD-ROM, No.642, 2010.
- ② E. S. Kaya, T. Katayama, and T. Yamao: Seismic Response Analyses of the Folded Cantilever Shear Structure (Analytical and Experimental Studies), Proceeding of the Twelfth East Asia - Pacific Conference on Structural Engineering and construction, 査

読有, pp.410-415, 2010.

- ③ Takuro Katayama, Toshitaka Yamao: Natural Vibration Modes of a Folded Cantilever Shear Structure, Proceeding of the 4th International Conference on Advance in Structural Engineering and Mechanics, 査読有, pp.1317-1325, 2008.
- ④ Takuro Katayama, Toshitaka Yamao: Natural Damping Vibration Modes of a Folded Cantilever Shear Structure, Proceeding of the 5th International Symposium on Steel Structures, 査読有, pp.362,369, 2008.

〔学会発表〕(計 5 件)

- ① 片山拓朗、可動支点と分離された梁・床を有する高層ビルディングの固有周期、土木学会西部支部、2011年3月5日、北九州市
- ② 片山拓朗、折曲がり片持ちせん断構造体の地震応答性状、土木学会西部支部、2010年3月6日、熊本市
- ③ 片山拓朗、可動支点および伸縮床を有する柔せん断構造の地震応答解析の一例、日本建築学会、2009年9月29日、仙台市
- ④ 片山拓朗、可動支点および伸縮床を有する柔せん断構造の固有振動モードの特性、日本建築学会、2008年9月19日、広島市
- ⑤ 片山拓朗、山尾敏孝、可動支点および伸縮床を有する柔せん断構造の固有周期と固有振動モード、土木学会、2008年9月12日、仙台市

〔産業財産権〕

○出願状況(計 1 件)

名称：耐震性構造物

発明者：片山拓朗、岡林拓也、山尾敏孝

権利者：学校法人君が淵学園、国立大学法人熊本大学

種類：特許

番号：特願 2008-160969

出願年月日：平成 20 年 5 月 22 日

国内外の別：国内

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

片山 拓朗 (KATAYAMA TAKURO)

崇城大学・工学部・教授

研究者番号：80310027

##### (2) 研究分担者

山尾敏孝 (YAMA O TOSHITAKA)

熊本大学・工学部・教授

研究者番号：40109674

(H20→H21：連携研究者)