

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360249

研究課題名(和文)炭素固定に有効な解体材活用・建物制震システムの開発研究

研究課題名(英文) Study on Development of the Utilizing System of Lumber Collected from Deconstructed Wooden Buildings and the Damping System for Buildings that are Effective in Immobilization of Carbon Dioxide

研究代表者

山口 謙太郎 (YAMAGUCHI, Kentaro)

九州大学・人間環境学研究院・准教授

研究者番号：10274490

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円、(間接経費) 4,290,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、建築物の解体材料から発生する二酸化炭素の固定化に有効な、木造建築の解体材を地盤補強や耐震要素に利用する方法と、リユース可能な壁体材料と乾式工法による建物制震システムを開発することを目的として実施した。その成果として、木造建築解体材を地盤に貫入することによる液状化対策技術を提案し、模型振動実験によってその有効性が確認された。また、建築解体材の再利用を想定した木造耐力壁や筋交い架構を考案し、静的水平載荷実験によってその性能が確認された。更に、乾式工法によるコンクリートブロック摩擦制振壁を提案し、動的水平載荷実験や振動台実験によって制振効果が期待できることが確認された。

研究成果の概要(英文)：This study was conducted to develop the utilizing system of lumber collected from deconstructed wooden buildings to ground improvement or earthquake resisting element, and to develop the damping system for buildings with reusable wall materials and dry construction method. These systems are effective in immobilization of carbon dioxide. As a result of this study, the following 3 techniques were proposed. (1) Liquefaction countermeasure technique by piling of lumber from deconstructed wooden buildings. (2) Wooden share wall and wooden frame inserted K-type braces symmetrically reusing lumber from deconstructed wooden buildings. (3) Frictional damping concrete block wall by dry construction method. The effectiveness of these techniques was confirmed by static or dynamic horizontal loading test, or shaking table test.

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：地球環境負荷低減 リユース 建築解体材 地盤補強 制震 カスケード利用 コンクリートブロック 液状化対策

1. 研究開始当初の背景

建築物由来の CO₂ 排出量は世界の総排出量の約 3 割を占めるといわれており、気候変動に関する政府間パネルは 2007 年に取りまとめた第 4 次評価報告書の中で、建築分野が短中期の地球温暖化の緩和や防止に大きく貢献するポテンシャルを有することが述べられている。我が国では 2009 年 12 月に建築関連 17 団体によって「提言：建築関連分野の地球温暖化対策ビジョン 2050」が出され、建築は二酸化炭素排出の少ないエコマテリアル利用を推進することが方針の一つに掲げられている。しかし、2002 年 5 月に施行された建設リサイクル法では、建設発生木材については工事現場から 50km 以内に再資源化施設がない場合は縮減（単純焼却処分）でよいとされており、2005 年度の木材の合法的な再資源化等率（縮減を含む）は 91%であるが、縮減を除く再資源化率は 68%であり、しかもその 4 割弱（建設発生木材全体の約 26%）は燃料利用（熱回収）されている。

また、解体時における材料再利用については、鋼構造における溶接や、鉄筋コンクリート構造における鉄筋とコンクリートの付着など、接着による応力伝達機構が主流の現在の建築物において、リサイクルには材料によっては対応可能になりつつあるものの、材料を再度製造する工程を経ないことからより高い環境負荷低減効果が得られるリユースについては、仮設住宅など一部の例を除いて研究段階や試行段階であるものが多い。

研究代表者の山口と研究分担者の小山らは摩擦抵抗型の乾式組積構造（SRB-DUP 構造）を開発した。この構造は煉瓦などの固体要素に薄鋼板などの水平補強要素を積みながらボルト・ナット等の鉛直補強要素で固定するという作業を繰り返して構築するものである。固体要素の組積にモルタルなどの湿式の接着材を用いず、プレストレスを与えて固定する乾式工法を採用することにより、使用材料の分別解体やリユースが可能である。山口と研究分担者の川瀬らは、SRB-DUP 構造体を建築物の主体構造としてだけでなく、鋼構造などの建築物の制震壁として利用するために、九州大学衛星通信実験棟に SRB-DUP 制震壁を適用して実験や解析を行い、その成果を基に特許を出願した。

さらに、山口と小山らは平成 20 年度から平成 22 年度にかけて、科学研究費補助金 基盤研究(C)「リユースに対応できる建築工法・構造システムの日本に適した展開と開発」に取り組んだ。その成果として、木造建築構成材は現状の技術や規制の体系下では解体後に同種の部材ではなく他の用途へカスケード利用を行うことが環境負荷低減に最も有効であることが分かったが、どのようなカスケード利用の体系を整備するのが最適かという点については未検討であった。また、PC 版の乾式取付工法や SRB-DUP 構造による制震システムについては、部材（制震壁）とし

ては完全剛塑性型に近い载荷履歴特性を有することが分かったが、この制震部材を用いた構造物としての挙動が予測できるかという点については未検討であった。そこで、以後の研究で建物全体の制震システムに発展させるために本研究を着想するに至った。

2. 研究の目的

本研究は、前述の基盤研究(C)「リユースに対応できる建築工法・構造システムの日本に適した展開と開発」の成果を発展させ、建築物の解体材料からの二酸化炭素排出を抑制する方策として、木造建築の解体材を地盤補強や木造耐震要素の作製に利用するなどの方法で炭素を固定化する技術と、従来のスクラップアンドビルドを極力避け解体材料をリユースできるようにユニット化した壁体材料と乾式工法による建物制震システムを開発することを目的として実施した。具体的には、

- (1) 木造建築解体材を地盤補強にカスケード利用する方法の提案
 - (2) 木造建築解体材を木造耐力壁や筋交い架構にカスケード利用する方法の提案
 - (3) リユース可能な壁体を用いた乾式工法による建物制震システムの提案
- に向けた実験・解析的検討を行った。

3. 研究の方法

- (1) 木造建築解体材を地盤補強にカスケード利用する方法の提案

本研究では、このテーマに取り組むにあたり、主に以下の内容について検討を行った。木造建築解体材から地盤補強にカスケード利用できる材積の検討

一般的な木造住宅に使用されている部材のうち、地盤補強にカスケード利用可能な寸法を有する材がどの程度含まれているか検討を行った。

木造建築解体材を利用した地盤液状化対策技術に関する模型振動実験

木造建築物の解体時に発生する角材を、既に有効性が確認されている丸太を用いた地盤液状化対策技術の代替材料としてカスケード利用可能か、模型振動実験を行って検討した。

木造建築解体材を利用した地盤液状化に伴う側方流動対策に関する模型振動実験

液状化に伴う地盤の側方流動の発生を模擬した模型振動実験を実施し、丸太と角材の水平変位抑制効果の違いについて検討した。

- (2) 木造建築解体材を木造耐力壁や筋交い架構にカスケード利用する方法の提案

本研究では、このテーマに取り組むにあたり、主に以下の内容について検討を行った。木造建築解体材から木造建築構成材へのカスケード利用法に関する検討

解体材の断面および長さ、腐食や欠損の除去、前回の使用時に受けていた応力などを考慮しながら、使用部位の移動を前提とした木

造建築構成材へのカスケード利用法に関する検討を行った。

建築解体材の再利用を想定した木造耐力壁の水平載荷実験

地盤補強に利用できない短材を木造耐力壁の作製にカスケード利用する方策として、断面が 80mm 角で長さが 240mm と 80mm の 2 種類の木ブロックを内部に積み上げる耐力壁を考案し、静的水平載荷実験を行ってその力学特性を調べた。

建築解体材の再利用を想定した木造筋交い架構の水平載荷実験

地盤補強に利用できない短材を木造筋交い架構の作製にカスケード利用する方策として、短い筋交い材を対称に挿入する木造軸組を考案し、静的水平載荷実験を行ってその力学特性を調べた。

(3) リユース可能な壁体を用いた乾式工法による建物制震システムの提案

本研究では、このテーマに取り組むにあたり、主に以下の内容について検討を行った。

コンクリートパネル間に適用した摩擦接合の制振効果に関する繰り返し載荷実験

柱梁部材間をピン接合した鋼製門形フレームに 2 枚のプレキャストコンクリート壁版をロッキング方式で接合し、両壁版間を摩擦接合したものを試験体とする動的水平載荷実験を行って、その復元力特性を確認した。

乾式工法によるコンクリートブロック摩擦制振壁の繰り返し水平載荷実験

柱梁部材間をピン接合した鋼製門形フレームに乾式工法で組積したコンクリートブロック壁体を摩擦接合した試験体の繰り返し水平載荷実験を行い、制振壁として利用するための基本的な力学性状を調べた。

乾式工法によるコンクリートブロック摩擦制振壁 2 枚で構成した試験体の振動実験

柱梁部材間をピン接合した鋼製門形フレームに乾式工法で組積したコンクリートブロック壁体を摩擦接合した制振架構 2 構面からなる試験体を作製し、震源域の強震動で加振する振動台実験を行って、試験体の動的挙動を調べた。

4. 研究成果

(1) 木造建築解体材を地盤補強にカスケード利用する方法の提案

木造建築解体材から地盤補強にカスケード利用できる材積の検討

一般的な住宅の使用材積を検討した結果、地盤補強に使用可能な部材（断面 105mm 角以上、長さ 4m 以上）は一般的な住宅の使用材積の約 60% を占めており、本カスケード利用の対象として検討できることが分かった。

木造建築解体材を利用した地盤液状化対策技術に関する模型振動実験

図 1 に実験装置の概要を示す。振動台上にアクリル製の土槽を設置し、その中に模型地盤を作製した。地下水位は地表面とした。丸太および角材の模型は福井県産のスギ間伐

材より作製した。材の打設は、飽和砂層作製後に周辺地盤をできるだけ乱さないように静的に貫入して行き、地盤中央から外側に向かって時計回りに打設した。構造物模型の設地圧は 1.5kN/m^2 で、模型は木材頂部に静置してあるだけで連結されていない。入力波は振動数 5Hz の正弦波で最大加速度 120gal 、加振時間は 20 秒とした。実験中は入力加速度、構造物模型の応答加速度、地盤の応答加速度、地盤内の過剰間隙水圧、構造物模型の鉛直および水平方向変位量を計測した。

図 2 は P1 における過剰間隙水圧の加振終了後の消散過程を示したものである。置換率一定の角材と丸太では、角材の方が早く水圧が消散し始めており、周面積一定の角材と丸太はほぼ同様の挙動を示している。図 3 は構造物模型の沈下量を時刻歴で示したもので、置換率一定の角材と丸太では角材の方が沈下を抑制し、周面積一定の角材と丸太はほぼ同様の挙動を示している。これは図 2 と同様な傾向を示すもので、地盤支持力は木材の周面摩擦抵抗の大きさの影響を受け、その形状の影響は受けにくいことが明らかとなった。

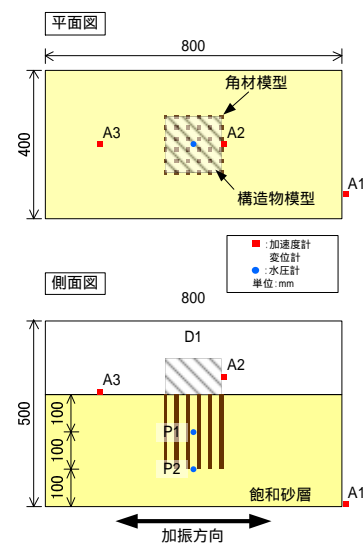


図 1 実験装置の概要（角材、置換率一定）

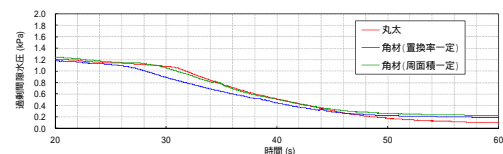


図 2 過剰間隙水圧の時刻歴波形（P1）

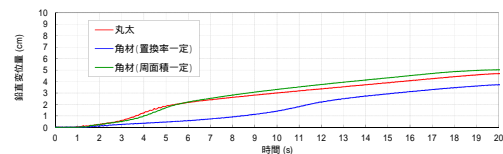


図 3 構造物模型の沈下の時刻歴波形（D1）

木造建築解体材を利用した地盤液状化に伴う側方流動対策に関する模型振動実験

図 4 に実験装置の概要を示す。丸太および角材の模型は(1) の実験と同様に作製したもので、構造物模型と斜面との間に 4 行 × 10

列となるよう 30mm 間隔で計 40 本を飽和砂層作成後に静的に打設した。丸太と角材の模型の断面積すなわち置換率は等しい。入力波は振動数 5Hz の正弦波、最大加速度 120gal、加振時間 4 秒とした。

図 5 に構造物模型の加振終了後の残留変位を示す。丸太と角材を打設した対策地盤では無対策地盤と比べて構造物模型の変位の抑制効果が確認できる。また、角材の方が丸太よりも変位量が小さく、構造物周辺地盤で側方流動が発生した場合、丸太よりも角材の方が水平および鉛直変位の抑制効果が高いといえる。

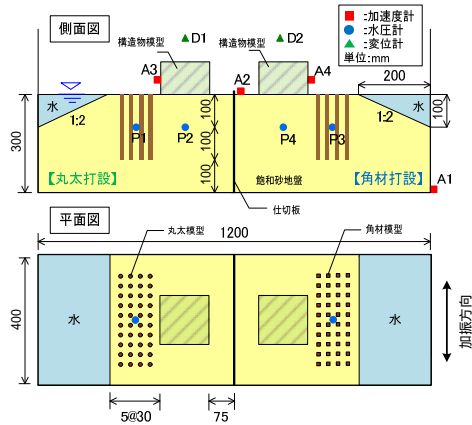
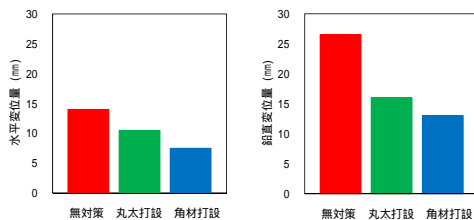


図 4 実験装置の概要



a) 水平変位 b) 鉛直変位

図 5 構造物模型の残留変位

(2) 木造建築解体材を木造耐力壁や筋交い架構にカスケード利用する方法の提案
木造建築解体材から木造建築構成材へのカスケード利用法に関する検討
材の断面および長さ、腐食や欠損の除去、前回の使用時に受けていた応力などを考慮し、検討した結果、図 6 のような流れでカスケード利用を行うことが効率的といえる。

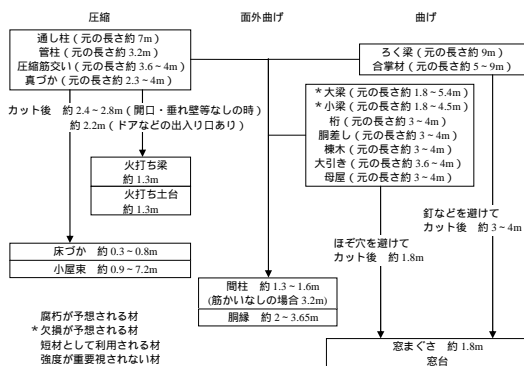


図 6 カスケード利用の流れ

建築解体材の再利用を想定した木造耐力壁の水平載荷実験

図 6 に提案する耐力壁 A の概要を示す。地盤補強に利用できない短い解体材を製材した直方体(80×80×240mm)と立方体(80×80×80mm)の木片を主に用い、それらを軸組にビス留めしながら規則的に積み上げて耐力壁を構成する。壁体の両面には合板を固定し、内部の木片が加力時に外へ飛び出すのを防ぐ。図 7 は耐力壁 A の施工性を改良した耐力壁 B で、木片を枠材で囲んだものを軸組に挿入して構成する。こちらも壁体の両面には合板を固定する。両耐力壁 (W1820×H2730) の静的水平載荷実験で得られた水平荷重と変形角の関係(包絡線)を図 8 に示す。耐力壁 B の水平耐力は大変形領域で耐力壁 A を若干下回るが、ほぼ同様の復元力特性が確認された。両耐力壁は 3.0×10^{-2} rad を超える変形領域まで水平耐力が上昇し続けるが、初期剛性がより大きな水平荷重まで保持されると更に利用しやすい耐力壁となる。

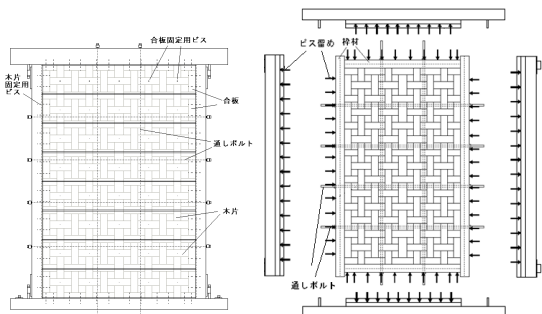


図 6 提案する耐力壁 A

図 7 改良した耐力壁 B

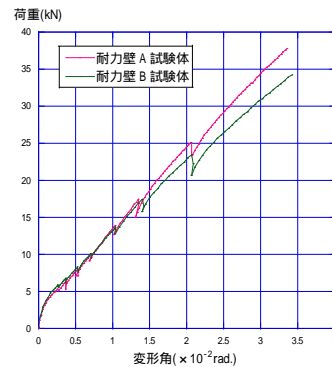


図 8 水平荷重 - 変形角関係(包絡線)の比較

建築解体材の再利用を想定した木造筋交い架構の水平載荷実験

図 9 に提案する筋交い架構の概要を示す。地盤補強に利用できない短い解体材を製材した断面 45×90mm で長さ約 1600mm の筋交いを 4 本、X 型に挿入することで、架構中央部での応力伝達を図る。特に圧縮力に対しては長い筋交いを挿入する場合より座屈長さが短くなり、安定した挙動が期待できる。この架構に対して(2)の実験と同様の静的水平載荷実験(写真 1)を行い、得られた水平荷重と変形角の関係を図 10 に示す。変形角が 1.0×10^{-2} rad 程度までは(2)で提案し

た耐力壁より高い水平耐力が得られており、使用材積を考慮するとより効率的な再利用方法といえる。

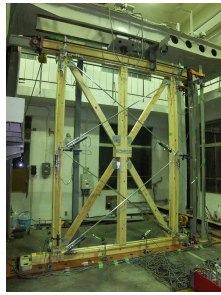
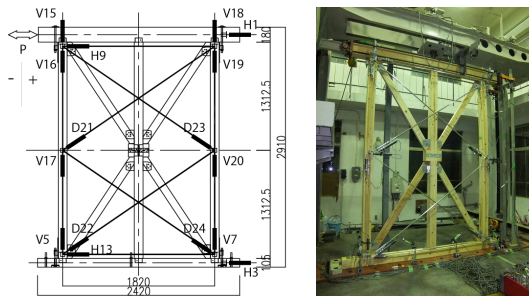


図9 提案する架構 写真1 実験の状況

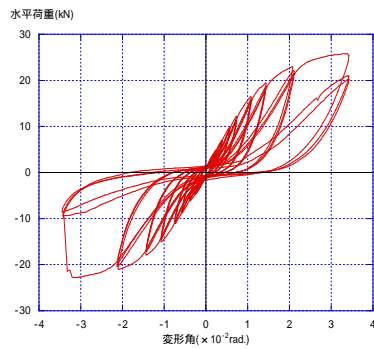


図10 水平荷重と変形角の関係

(3) リユース可能な壁体を用いた乾式工法による建物制震システムの提案

コンクリートパネル間に適用した摩擦接合の制振効果に関する繰り返し荷重実験

実験の状況を写真2に、実験で得られた水平荷重と梁水平変位の関係の一例を図11に示す。摩擦滑り以外の要因による変形が梁水平変位±10mm以下の領域で生じており、壁版接合部の製作精度と両壁版の取付精度を十分確保することが高い制震効果を得るために重要であることが分かった。



写真2 実験の状況

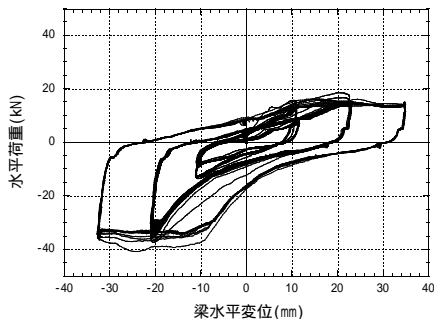


図11 水平荷重と梁水平変位の関係

乾式工法によるコンクリートブロック摩擦制振壁の繰り返し水平荷重実験

提案する摩擦制振壁と水平荷重実験の状況を写真3に、実験で得られた水平荷重と梁水平変位の関係の一例を図12に示す。試験体には想定した箇所摩擦滑りが生じ、概ね剛塑性型の履歴曲線が得られ、摩擦ダンパーとして利用できる可能性が確認された。



写真3 実験の状況

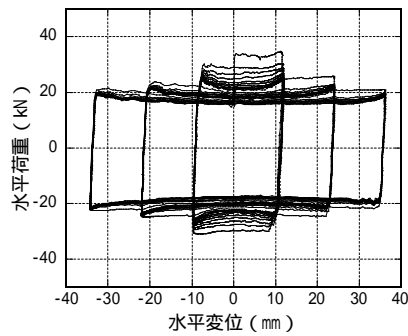


図12 水平荷重と梁水平変位の関係

乾式工法によるコンクリートブロック摩擦制振壁2枚で構成した試験体の振動実験

試験体の外観を写真4に、加振で試験体に生じたせん断力と層間変形角の関係の一例を図13に示す。試験体は神戸波120%の加振を受けても崩壊することなく、履歴曲線は図12に近い形状となり、別途行った解析でも概ね近い履歴特性が得られ、提案する制振機構は制振効果が期待できることが確認された。



写真4 試験体の外観

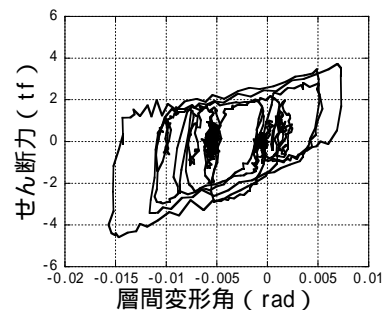


図13 せん断力と層間変形角の関係

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計18件)

桑田将弘、山口謙太郎、小山智幸、川瀬博、吉田雅穂、建築解体材の再利用を想定した木造耐震要素の開発に関する研究 その1 K型筋交いを対称に挿入した木造軸組の面内水平載荷実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、査読無、C-1、2014、掲載決定済・頁番号未定

吉永哲大、川瀬博、畠山直己、山口謙太郎、小山智幸、緒方智、乾式工法によるブロック造摩擦制振壁の開発に関する研究 その4 2枚の乾式ブロック造壁体を用いた制振機構の振動実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、査読無、C-2、2014、掲載決定済・頁番号未定

大久保徳洋、吉永哲大、山口謙太郎、小山智幸、川瀬博、吉田雅穂、乾式工法によるコンクリートブロック摩擦制振壁の開発研究 — 制振壁の概要と壁 - フレーム試験体の繰り返し水平載荷実験 —、都市・建築学研究 九州大学大学院人間環境学研究院紀要、査読有、第25号、2014、pp.87-93
吉田雅穂、山口謙太郎、木造建築解体材を利用した液状化に伴う側方流動対策に関する模型振動実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、査読無、B-1、2013、pp.637-638

Kentaro YAMAGUCHI, Tomoyuki KOYAMA, Ryotaro KURODA, Development of a Damping System Using Friction-Resistant Dry-Masonry Wall - Proposal of the Construction Method which Controls a Slipping Layer and Horizontal Loading Test of the Wall and Frame Specimen -, Journal of Habitat Engineering and Design, 査読有, Selected Papers from ISHED Conference 2012, Shanghai, 2013, pp.65-71

吉田雅穂、辻岡晃、山口謙太郎、木造建築解体材を利用した液状化対策技術に関する模型振動実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、査読無、B-1、2012、pp.495-496

白浜京子、山口謙太郎、小山智幸、川瀬博、吉田雅穂、建築解体材の再利用を想定した木造耐力壁の開発に関する研究 その1 耐力壁の提案と水平載荷実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、査読無、C-1、2012、pp.137-138

[学会発表](計13件)

大久保徳洋、吉永哲大、川瀬博、山口謙太郎、小山智幸、摩擦抵抗型乾式ブロック造制振壁の開発に関する研究 その2 2枚の乾式ブロック造壁体を用いた制振機構の振動実験、2013年度(第53回)日本建築学会九州支部研究発表会、2014年3月2日、佐賀大学(佐賀県)

大久保徳洋、山口謙太郎、小山智幸、川瀬博、吉田雅穂、吉永哲大、乾式工法による

ブロック造摩擦制振壁の開発に関する研究 その1 制振壁の概要と壁 - フレーム試験体の繰り返し水平載荷実験、日本建築学会2013年度大会(北海道)学術講演会、2013年9月1日、北海道大学(北海道)
白浜京子、山口謙太郎、小山智幸、川瀬博、吉田雅穂、建築解体材の再利用を可能にする木造耐力壁の開発に関する研究 その1 耐力壁の施工性改善に向けた提案と水平載荷実験、2012年度(第52回)日本建築学会九州支部研究発表会、2013年3月3日、大分大学(大分県)

Kentaro YAMAGUCHI, Tomoyuki KOYAMA, Ryotaro KURODA, Development of Damping System Using Friction-Resistant Dry-Masonry Wall - Proposal of the Construction Method which Controls a Slipping Layer and Horizontal Loading Test of the Wall and Frame Specimen -, First International Conference on HABITAT Engineering and Design, October 14, 2012, Tongji University, Shanghai, China

森本修平、山口謙太郎、小山智幸、川瀬博、吉田雅穂、コンクリートパネル間に適用した摩擦接合の制振効果に関する研究 その1 ロッキング方式でパネルを固定した試験体の水平載荷実験、日本建築学会2012年度大会(東海)学術講演会、2012年9月12日、名古屋大学(愛知県)

山口謙太郎、小山智幸、一般的な木造建築の長寿命化と材料再利用による環境負荷の低減に向けた基礎的研究 その1 築50年を超える教会堂建築の構造解析と材料のカスケード利用に関する検討、2011年度(第51回)日本建築学会九州支部研究発表会、2012年3月4日、西日本工業大学(福岡県)

6. 研究組織

(1)研究代表者

山口 謙太郎 (YAMAGUCHI, Kentaro)
九州大学・人間環境学研究院・准教授
研究者番号：10274490

(2)研究分担者

小山 智幸 (KOYAMA, Tomoyuki)
九州大学・人間環境学研究院・准教授
研究者番号：50215430

川瀬 博 (KAWASE, Hiroshi)
京都大学・防災研究所・教授
研究者番号：30311856

吉田 雅穂 (YOSHIDA, Masaho)
福井工業高等専門学校・環境都市工学科・教授
研究者番号：90210723