

機関番号：17102
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20560524
 研究課題名（和文） 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
 研究課題名（英文） Suitable evolution and development of the construction method
 and structural system adaptable for reuse of materials in Japan
 研究代表者
 山口 謙太郎（YAMAGUCHI KENTARO）
 九州大学・大学院人間環境学研究院・准教授
 研究者番号：10274490

研究成果の概要（和文）：本研究では、建築材料のリユースに対応できる建築工法や建築構造システムのうち、木構造、PC板の乾式取付工法、SRB-DUP構造に焦点を絞り、日本に適したリユースの展開方法の提案や、日本でのニーズが高いリユース可能な工法・構造システムの開発と提案に取り組んだ。その成果として、木造建築構成材のリユースに有効なカスケード利用システムや、PC板の乾式取付工法およびSRB-DUP構造によるリユース可能な制振壁の設計・施工法を提案した。

研究成果の概要（英文）：In this study, suitable evolution and development of the construction method and structural system adaptable for reuse of materials in Japan were addressed, focusing on wooden structure, dry construction method of PC (Precast Concrete) wall panel and SRB-DUP structure (Steel Reinforced Brick structure based on Distributed Unbond Prestress theory). As a result of this study, "cascade utilization system" which is effective in reuse of wooden structural members, and the methods of design and construction for the damping walls by dry construction method of PC wall panel and by SRB-DUP structure were proposed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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：地球環境負荷低減、サステナブル、リユース、建築用木材、乾式組積造、摩擦抵抗、プレキャストコンクリート、制振壁

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初も現在も、リデュース（発生抑制）、リユース（再使用）、リサイクル（再生利用）はおよそその順で資源の有効利用と廃棄物削減の観点から地球環境負荷の低減に有効とされている。本研究で主に取り組んだリユースは、リサイクルの場合に必要な材料を再度製造する工程を経ないため、建設と解体の繰り返し回数が多いほど高い環境負

荷低減効果が得られる。しかし、現在の建築構造工学の体系は、木構造における接着剤、鋼構造における溶接、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を占めており、材料のリユースが難しく、建築物が解体される際の環境負荷低減を困難にしているという状況がある。

また、社会的な状況として、日本国内では

解体した建築物から回収した材料は製品としての認識が薄いため、その強度や耐久性は十分に把握されておらず、「この状況の材料は、どのような処理を施し、どのような工法でリユースすれば、どの程度の期間は機能的に新品と遜色なく使用できるのか」という点に関して学術的な指針類や法的な整備などの対応が遅れている。

加えて、日本の建築物の設計では耐震性への配慮が不可欠であるが、PC（プレキャストコンクリート）カーテンウォールなどは耐震要素として有効な強度を有していても非構造壁として取り扱われている。計算が複雑にならないための配慮であるが、これらは主体構造に接着せず、リユースできるように接合することも可能なので、工夫次第ではリユース性と耐震性の双方が向上するように利用できる。

研究代表者の山口らは摩擦抵抗型の乾式組積構造（SRB-DUP 構造：Steel Reinforced Brick structure based on Distributed Unbond Prestress theory）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挿みながらボルト・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、鉛直補強要素で個々の固体要素を締め付けてプレストレスを与え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、リユース、リサイクルが可能である。この SRB-DUP 構造壁体は、構成要素が互いに接着されていないことを活かして、変形能力やエネルギー吸収能力が高い構造体を実現することが可能である。

2. 研究の目的

山口らは鉄骨純ラーメンの主体構造に SRB-DUP 構造壁体を接合することによって、SRB-DUP 構造壁体が制振壁として機能する工法を考案し、九州大学衛星通信実験棟に適用した。その時刻歴応答解析結果によれば、SRB-DUP 構造壁体を鉄骨純ラーメンの主体構造に制振壁として適用すると、当該建物（平屋）の場合、応答層間変形角が半減することが確認された。

また、同様の接合を PC（プレキャストコンクリート）の壁板に適用して高速な水平載荷実験を行った結果、完全弾塑性に近い履歴特性が得られ、非構造壁の PC 板も優れた制振効果が期待できることが分かった。

更に、山口は 2007 年 5 月に米国で行われた国際会議 Decon'07 に参加し、木造建築構成材のリユースに関する多数の実例報告等の情報を得た。この木造部材のリユースは、より詳しい調査等を行って日本に適したものを検討し、木造建築の多い日本に提案すべ

きと考えた。また、使用材料のリユースが可能な SRB-DUP 構造や PC 板の乾式取付工法は、建築物の耐震性を向上させる効果によって日本でのニーズがより高くなるよう、前述した制振に関する研究を更に進展させるべきと考え、本研究を着想するに至った。

本研究は、建築材料のリユースに対応できる建築工法や建築構造システムのうち、木構造、PC 板の乾式取付工法、SRB-DUP 構造に焦点を絞り、日本に適したリユースの展開方法や、日本でのニーズが高いリユース可能な工法・構造システムの開発と提案を目的として実施した。具体的には、

- (1) リユース可能な木構造・工法システムの提案とその成立に必要な条件整備に関する提案
 - (2) PC 板の乾式取付工法によるリユース可能な制振壁の設計・施工法開発のための実験と解析
 - (3) SRB-DUP 構造によるリユース可能な制振壁の設計・施工法開発のための実験と解析
- に取り組んだ。

3. 研究の方法

- (1) リユース可能な木構造・工法システムの提案と必要な条件整備について

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。

- ① 日米における木造建築構成材のリユースの現状に関する調査

米国と日本における木造建築構成材のリユースの現状について、文献調査および両国での関係機関・現場の見学ならびに関係者に対する聞き取り調査を行った。

- ② 築 50 年を超える教会堂建築を構成する木材の劣化状況調査

日本国内で改修計画と移築が進められている木造教会堂建築 2 件の実地調査を行い、構造部材の腐食等の状況確認と対応策の検討を行った。

- ③ 築 49 年～74 年の木造建築物の解体で発生した木材の劣化状況調査

日本国内で解体や建替工事が行われた木造建築の実地調査と解体材の収集を行い、部材の密度、含水率、弾性係数、強度、腐食状況を様々な方法で確認して、材のリユース可否判断のための指標を検討した。

- (2) PC 板の乾式取付工法によるリユース可能な制振壁の設計・施工法開発のための実験と解析

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。

- ① モルタル製の摺動材を用いる工法の提案と摺動材の水平載荷実験

プレキャストコンクリート壁板を周辺の主体構造フレームに強く固定することで生

じる壁板の面外曲げに対する脆さを改善する新たな工法として、モルタル製の摺動材（補強モルタルブロック）を用いる制振システムを提案し、数種類の摺動ブロック試験体に関する繰り返し水平載荷実験を行って、その挙動を確認した。

② 新開発制振システムに関する実大の壁－フレーム試験体の繰り返し水平載荷実験

①で提案したモルタル製の摺動材を用いる PC 板のリユースが可能な新開発制振システムについて、実大の壁－フレーム試験体の繰り返し水平載荷実験を行い、同制振システムの復元力特性を調べた。

(3) SRB-DUP 構造によるリユース可能な制振壁の設計・施工法開発のための実験と解析

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。

① 滑り層を制御する接合工法の提案と同工法を適用した試験体の水平載荷実験

滑り発生層の制御が可能な SRB-DUP リユース対応型制振システムを新たに考案し、システムの接合部付近を抽出した試験体の繰り返し水平載荷実験を行って、その挙動を確認した。

② 滑り発生層の制御が可能な SRB-DUP 制振システムに関する実大の壁－フレーム試験体の繰り返し水平載荷実験

①で提案した滑り発生層の制御が可能な SRB-DUP リユース対応型制振システムについて、実大の壁－フレーム試験体の繰り返し水平載荷実験を行い、同制振システムの復元力特性を調べた。

4. 研究成果

(1) リユース可能な木構造・工法システムの提案と必要な条件整備について

① 日米における木造建築構成材のリユースの現状に関する調査

調査の結果、主に以下 1)～4)の知見が得られた。

1) 日本：建設リサイクル法の制定と課題

平成 14 年に完全施行された建設リサイクル法において、特定建設資材を用いた解体工事又は新築工事で一定の規模以上のものは、施工方法に関する一定の技術基準に従い分別解体等を実施し、それに伴って生じた特定建設資材廃棄物は再資源化等を行うこととされている。また、工事の受注者は分別解体等で生じた特定建設資材廃棄物について再資源化をしなければならないが、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ければ縮減（単純焼却処分）でよいとされており、焼却による CO₂ の排出が懸念され、今後改善すべき課題といえる。

2) 日本：木材の再利用が進まない要因

日本で木材のリユースが難しい理由とし

て、まず、金物の除去、資材の分別に手間がかかる点がある。破壊・廃棄では必要な人件費や時間が発生するため、新材を買った方がよいというのが現場の認識である。保管の場所や受け皿となる工場が、必ずしも現場の近くにあるわけではないため、分別・解体し、再資源化が可能な状態になっても、結局最終処分場行きとなってしまうこともある。加えて、企業の「製品（建築物を含む）の質が落ちるから再利用はできない」というこだわりや、消費者の「値段が変わらないなら新材の方がよい」という心情も解体材の再利用を妨げている。

3) 米国：建材の再利用を取り巻く状況

米国には日本の寄付金控除に似た、寄付控除制度があり、控除対象となる寄付は、現金、建材、奉仕事業、製品である。アメリカでは、税控除を Internal Revenue Service (IRS：国税庁) が管理している。

また、米国で木造といえば 2×4 工法が主流であるが、2×4 工法に用いられる木材は規格化されているため、部材の寸法にばらつきが少なく、再利用に適している。

4) 米国：Habitat for Humanity の取組

Habitat for Humanity (HfH) は、収入が少なく、住宅が必要な人々のために、住宅を解体して得た利益を利用して、割安な価格で住宅を建設する手助けを行っているアメリカの非営利団体である。ノースカロライナ州の HfH of Wake County では住宅の解体を請け負い、解体で得た建材を ReStore と呼ばれる小売店で販売している。米国では DIY が盛んで、ReStore の中古建材は比較的良好に売れ、中古建材市場が活発である。

以上の知見を踏まえ、日本における木材の再利用状況を改善するための方策として以下の 6 項目を提案する。

1) 木材のカスケード利用システムに関する研究の推進

2) 容易に金物の取り外しができる工法に関する研究の推進

3) 金物除去の技術向上のための研究の推進

4) 建築用木材分野における寸法の規格化の推進

5) 中古木材販売の受け皿となる DIY の普及を推進する取組

6) 企業の意欲向上を狙ったインセンティブの導入

② 築 50 年を超える教会堂建築を構成する木材の劣化状況調査

調査の対象としたのは 1949 年鹿児島市に建設されたザビエル聖堂と、1951 年福岡市に建堂された浄水通りカトリック教会である。

ザビエル聖堂は洋風木造建築で、新しい聖堂の建設に伴い、1998 年に解体され、福岡県宗像市で再建されつつある。本研究では再建時の部材の再利用・交換状況を詳細に調査し、

木材の劣化しやすい箇所などを調べた。

浄水通りカトリック教会も洋風木造建築で、1998年と2001年に天井・雨樋・外壁等を対象とする改修工事が計2回実施されている。本研究では2009年に小屋裏部分や外壁の劣化状況を調査した。

両教会堂建築の調査の結果、材の劣化原因は主に腐朽と蟻害であった。以下に特徴的な劣化箇所と考察を示す。

- 1) 土台や床下は高湿度のため腐朽しやすい。
- 2) 外に面している柱や梁は、雨漏り・表面被覆による高湿度・内外の温度差による結露などから、腐朽しやすい。
- 3) トラス部分などの建物内部の骨組は、周辺からの影響を受けにくいから、劣化の進行が遅い。
- 4) 材の接合部は、材の端部や欠損が集まっていることから劣化が進行しやすい。
- 5) 瓦や外壁の欠損は、雨漏りを引き起こし、屋根部分や外に面した材の劣化に繋がる。

劣化しやすい箇所とそれ以外で頻度を検討しながら点検を実施し、適切な補修を行うことが建物の長寿命化につながるといえる。

③ 築49年～74年の木造建築物の解体で発生した木材の劣化状況調査

調査の対象とした木材を採取した3棟の建築物のうち2棟は福岡県田川市の松原炭鋳住宅で、1936年築（築74年）と1948年築（築62年）の木造軸組住宅である。もう1棟は福岡県福岡市に1961年に建築された笹丘カトリック教会（築49年）で、鉄骨構造であるが母屋に木材が使用されていた。

採取した木材の力学特性や劣化状況を調べた結果、以下の知見が得られた。

- 1) 無欠点試験体の破壊試験では、強度は無等級材の基準強度を概ね上回ったが、スギ材の曲げヤング係数は基準弾性係数を下回るものが多かった。
- 2) 木材表面の変色は切削加工で十分改善することが色差測定により確認された。
- 3) 原木の応力波伝播速度と無欠点試験体の曲げヤング係数の間には相関が見られた。
- 4) 動的ヤング係数と無欠点試験体の強度の間には相関が認められた。

(2) PC板の乾式取付工法によるリユース可能な制振壁の設計・施工法開発のための実験と解析

① モルタル製の摺動材を用いる工法の提案と摺動材の水平載荷実験

提案する工法の概要を図1に示す。本工法は、PC板の支持部分にモルタル製の摺動材を設置し、その摺動材に2面摩擦接合を適用して、PC板が損傷しない範囲で摺動材に滑りを生じさせるというものである。PC板と摺動材の間でモーメントの伝達を少なくすることにより、PC板に作用する面外曲げ応力を小さくする。本研究では写真1のような摺動材部

分の水平載荷実験を行い、その制振要素としての性能を調べた。実験の結果、どの試験体もほぼ完全剛塑性型の履歴特性が得られ、制振要素としての利用可能性が確認された。図2に得られた載荷履歴特性の一例を示す。

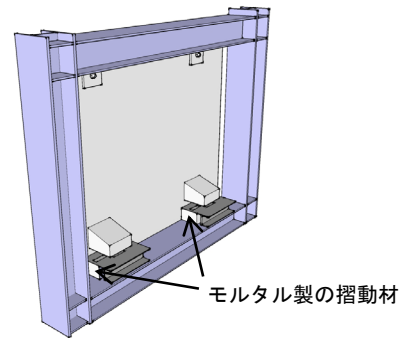


図1 提案する工法の概要

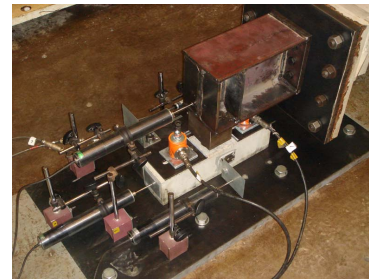


写真1 実験の状況

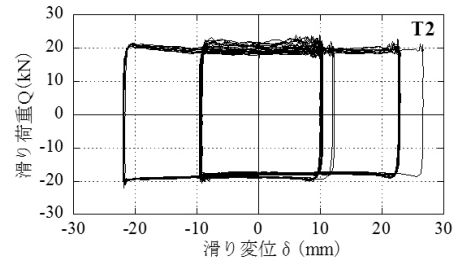


図2 滑り荷重-滑り変位関係 (ボルト張力 10kN/本)

② 新開発制振システムに関する実大の壁-フレーム試験体の繰り返し水平載荷実験

①で提案したモルタル製の摺動材を用いる制振システムについて、写真2のような実大の壁-フレーム試験体の繰り返し水平載荷実験を行った。実験の結果、図3のような載荷履歴特性が得られ、摺動材に滑りが生じているときの水平抵抗力が載荷方向によっ



写真2 実験の状況

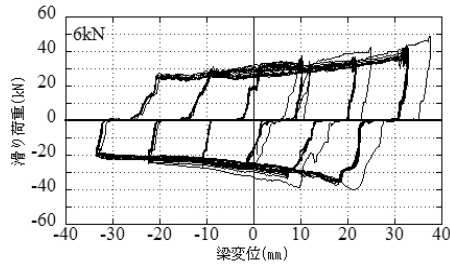


図3 滑り荷重—梁変位関係 (ボルト張力 6.0kN/本)

て異なることが確認された。載荷方向による水平抵抗に差がない剛塑性型の履歴特性が得られるように改善を進める必要がある。

(3) SRB-DUP 構造によるリユース可能な制振壁の設計・施工法開発のための実験と解析

① 滑り層を制御する接合工法の提案と同工法を適用した試験体の水平載荷実験

本研究で新たに提案する滑り発生層の制御が可能な SRB-DUP 制振システムを図 4 に示す。図 4 の下から 3 層目の煉瓦の大円孔 (φ 40mm) 中にグラウト材を充填して小円孔 (φ 15mm) とし、その上から締め付けることによって、下から 1, 2 層目のプレストレスを 3, 4 層目のプレストレスよりも大きくすることで、3, 4 層目の中でせん断滑りが生じるようにした。また、3, 4 層目とボルトを鋼板でつなぐことでボルトの変形を抑えるとともに、接合用鋼材が 2 面せん断状態で摺動するようにした。本研究では写真 3 のような接合部付

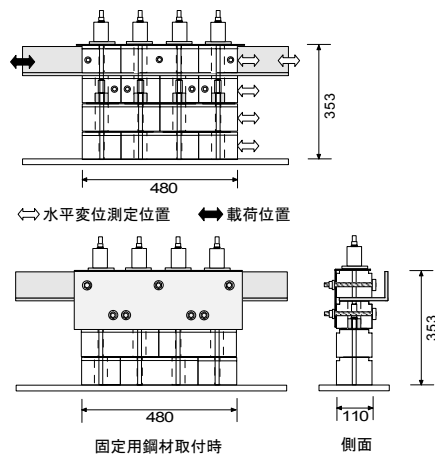


図 4 提案する工法の概要



写真 3 実験の状況

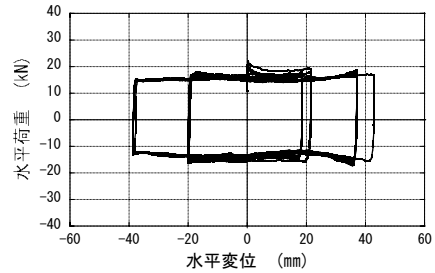


図 5 水平荷重—水平変位関係 (ボルト張力 3.0kN/本)

近の水平載荷実験を行い、その制振要素としての性能を調べた。実験の結果、図 5 のようなほぼ完全剛塑性型の履歴特性が得られ、制振要素としての利用可能性が確認された。

② 滑り発生層の制御が可能な SRB-DUP 制振システムに関する実大の壁—フレーム試験体の繰り返し水平載荷実験

① で提案した滑り発生層の制御が可能な SRB-DUP リユース対応型制振システムについて、写真 4 のような実大の壁—フレーム試験体の繰り返し水平載荷実験を行った。実験の結果、SRB-DUP 壁体に与えるボルト張力が小さい低摩擦抵抗下では図 6 のような荷重履歴特性が得られ、制振要素としての利用可能性が確認された。

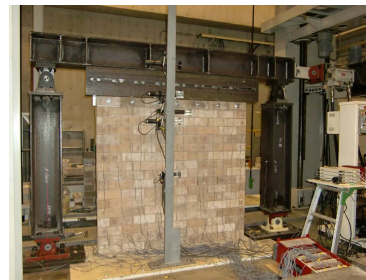


写真 4 実験の状況

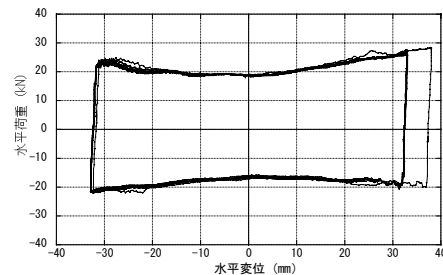


図 6 水平荷重—水平変位関係 (ボルト張力 1.0kN/本)

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 15 件)

- ① 山口謙太郎、小山智幸、田中隼斗、一般的な木造建築の建設・改修・解体で生じる環境負荷の低減に向けた基礎的研究 その 1 築 49 年～74 年の木造建築物の解体で発生した木材の劣化状況調査、日本

- 建築学会大会学術講演梗概集、査読無、C-1、2011、掲載決定済・頁番号未決定
- ② Fumie Ooba, Kentaro Yamaguchi, Yuki Ninomiya, Asako Nagamine, Consideration of Long-term Conservation of the General Wooden Structures in Japan - Deterioration Research of Churches Aged over 50 Years -, Journal of Habitat Engineering, 査読有, Vol.2, No.2, 2010, pp.135-144
 - ③ 黒田亮太郎、山口謙太郎、小山智幸、牧野起八、松藤泰典、摩擦抵抗型乾式組積構造を利用した制振システムの開発に関する研究 その2 滑り層を制御する接合工法を適用した試験体の水平載荷実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、査読無、C-1、2010、pp.889-890
 - ④ 山口謙太郎、牧野起八、二宮佑輝、大場文絵、コンクリート系非構造壁の取り付け部に介在させる摩擦接合ブロックの制振効果、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.32、No.2、2010、pp.949-954
 - ⑤ 牧野起八、山口謙太郎、小山智幸、田原桂太、黒田亮太郎、摩擦接合した摺動材に装着したコンクリート系非構造壁の制振効果 その1 モルタル製摺動材の水平載荷実験、日本建築学会九州支部研究報告、査読無、第49号・1、2010、pp.385-388
 - ⑥ 田原桂太、山口謙太郎、小山智幸、黒田亮太郎、牧野起八、松藤泰典、摩擦抵抗型乾式組積構造体の力学特性に関する研究 その1 SRB-DUP 構造体の構成要素を用いた2面せん断実験、日本建築学会九州支部研究報告、査読無、第49号・1、2010、pp.425-428
 - ⑦ 山口謙太郎、小山智幸、牧野起八、二宮佑輝、大場文絵、松藤泰典、摩擦抵抗型乾式組積構造体の力学特性に関する研究 その2 SRB-DUP 実大構造物に与えられたプレストレスの経時変化、日本建築学会九州支部研究報告、査読無、第49号・1、2010、pp.429-432
 - ⑧ 大場文絵、山口謙太郎、小山智幸、二宮佑輝、木造建築構成材のリユースの促進に向けた基礎的研究 その1 日米における木造建築構成材のリユースの現状に関する調査、日本建築学会大会学術講演梗概集、査読無、A-1、2009、pp.1137-1138
 - ⑨ 尾崎景、山口謙太郎、小山智幸、奥村卓也、田原桂太、松藤泰典、乾式組積構造の摩擦抵抗機構を用いた制振システムの開発に関する研究 その1 SRB-DUP 壁体の剛性評価と振動実験による検証、日本建築学会九州支部研究報告、査読無、第48号・1、2009、pp.669-672
- [学会発表] (計13件)
- ① 大場文絵、山口謙太郎、小山智幸、二宮

- 佑輝、一般木造建築の長期保全に向けた維持管理計画のための基礎的研究 その1 鹿児島市ザビエル聖堂の移築に伴う部材再利用状況調査、日本建築学会 2010 年度大会 (北陸) 学術講演会、2010 年 9 月 11 日、富山大学 (富山県)
- ② 山口謙太郎、小山智幸、黒田亮太郎、牧野起八、松藤泰典、摩擦抵抗型乾式組積構造を利用した制振システムの開発に関する研究 その1 SRB-DUP 構造体の構成要素を用いた2面せん断実験、日本建築学会 2010 年度大会 (北陸) 学術講演会、2010 年 9 月 10 日、富山大学 (富山県)
 - ③ 牧野起八、山口謙太郎、小山智幸、黒田亮太郎、大場文絵、二宮佑輝、コンクリート系非構造壁の端部に装着する摺動材を用いた摩擦制振システムの開発研究 その1 モルタル製摺動材の水平載荷実験、日本建築学会 2010 年度大会 (北陸) 学術講演会、2010 年 9 月 9 日、富山大学 (富山県)
 - ④ 黒田亮太郎、山口謙太郎、小山智幸、田原桂太、牧野起八、松藤泰典、乾式組積構造の摩擦抵抗機構を用いた制振システムの開発に関する研究 その2 接合部の水平載荷実験と工法の提案、日本建築学会 2009 年度 (第49回) 九州支部研究報告会、2010 年 3 月 7 日、長崎総合科学大学 (長崎県)
 - ⑤ 大場文絵、山口謙太郎、小山智幸、二宮佑輝、一般木造建築の持続可能性向上に向けた基礎的研究 その1 築50年を超える教会建築の保全と日米における木造建築構成材のリユースに関する取組、日本建築学会 2009 年度 (第49回) 九州支部研究報告会、2010 年 3 月 7 日、長崎総合科学大学 (長崎県)
 - ⑥ 田原桂太、山口謙太郎、小山智幸、牧野起八、黒田亮太郎、松藤泰典、摩擦抵抗型乾式組積構造の振動性状と力学特性 その1 SRB-DUP 壁体の剛性評価と振動実験による検証、日本建築学会 2009 年度大会 (東北) 学術講演会、2009 年 8 月 26 日、東北学院大学 (宮城県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口 謙太郎 (YAMAGUCHI KENTARO)
九州大学・大学院人間環境学研究院・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・大学院人間環境学研究院・准教授
研究者番号：50215430