

令和 2 年 7 月 13 日現在

機関番号：34517
 研究種目：基盤研究(C)（一般）
 研究期間：2017～2019
 課題番号：17K06661
 研究課題名（和文）耐震壁とフラットスラブから構成される欧米型RC厚肉床壁構造の非線形有限要素解析

 研究課題名（英文）Nonlinear Finite Element Analysis of Western Type RC Thick Wall and Floor Structure consisting of Shear Wall and Flat Slab

 研究代表者
 田川 浩之（Tagawa, Hiroyuki）

 武庫川女子大学・生活環境学部・准教授

 研究者番号：60422531
 交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：「平面による構成」であるRC厚肉床壁構造について、建築構造・計画・歴史の観点から多面的に検討した。「平面による構成」の建築作品に対して、プロトコル分析を行い、デザインプロセスを検討するとともに、自重や地震動に対して有限要素解析を行い、構造安定性、安全性を評価し、デザイン代を明らかにした。その結果、独立柱を加えるなど比較的軽微な設計変更により、構造上の条件を満たすことが可能であることを示した。連層耐震壁は心棒と等価とみなせることを示した。連層耐震壁、フラットスラブ、鉛直荷重支持柱等から構成される「建築スタジオ」をはり要素と平板要素、もしくはソリッド要素によりモデル化して有限要素解析を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、建築設計と構造工学を結びつける契機とすることを旨とし、両分野で共通して重要なテーマと考えられる「平面による構成」のRC厚肉床壁構造を対象に据え、建築構造・計画・歴史の観点から多面的に検討した。建築設計の観点から、プロトコル分析を通してデザインプロセスを明らかにするとともに、構造工学の観点からは、有限要素法に基づく構造解析を実施し、構造安定性、安全性を評価し、RC厚肉床壁構造のデザイン代を明らかにした。また、建築設計のお手本として設計された「建築スタジオ」全体に対する有限要素解析に挑戦した。建築設計と構造工学を結びつけて包括的に実施したことが、本研究の大きな学術的、社会的意義と考える。

研究成果の概要（英文）：RC thick wall and floor structures consisting of planes are analyzed from the perspectives of architectural structure, planning and history. Protocol analysis is conducted for the architectural design works of “Combination of planes” to understand the design process and in parallel, the finite analysis is conducted to evaluate the structural stability and safety and to understand the margin of the design. As a result, it is demonstrated that, without major change of the design, structural requirements can be satisfied by the relatively slight design change such as adding the gravity columns. Also, the multi-story seismic walls in the thick wall and floor structures are equivalent to the continuous columns. Finally, the “Design Studio” consisting of the multi-story seismic walls, flat slabs and gravity columns is analyzed with the finite element method using the hybrid system of beam and plate elements, or all solid elements.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：平面による構成 RC厚肉床壁構造 デザイン代 連層耐震壁 フラットスラブ 非線形有限要素解析
 建築構法の変遷 建築設計

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究を開始した当初、研究代表者は、大学2年生の設計課題である「平面による構成—学生会館」の設計演習を担当していた。この演習では、ミース・ファン・デル・ローエが設計したバルセロナ・パビリオン(図1)に代表される、西洋建築の近代化で辿りついた「平面による構成」、すなわち、壁と床の平面を組み合わせ、必要に応じて鉛直荷重を支える独立柱を加えて、3階建て鉄筋コンクリート造建物を設計することが課題であった。「平面による構成」で実際の鉄筋コンクリート造建物を設計すると、通常、厚さが250~450mm程度のRC耐震壁とフラットスラブから構成されるRC厚肉床壁構造に近いものとなる。また、武庫川女子大学建築学科のある上甲子園キャンパスには、欧米型、すなわち、耐震要素である連層耐震壁、鉛直荷重を支持する細い壁柱、フラットスラブから構成される「建築スタジオ」(図2)がある。これは、構造計画のみならず、建築意匠・計画、環境設備などの観点からも優れた建築であり、建築学科の学生達の建築設計の教科書、お手本として設計されたものである。「建築スタジオ」は、純粋なRC厚肉床壁構造というわけではないが、設計図書に軸組図がないことに示唆されるように柱梁ラーメン構造ではなく、「平面による構成」を意識して設計されたものであり、「平面による構成—学生会館」の設計演習においても、設計のお手本とされている。

RC厚肉床壁構造の構造面に目を向けると、様々な未解明なことが多々あることが判明した。RC厚肉床壁構造は、柱型、梁型のない開放的な内部空間を提供するとともに、本来、建築デザインの要求に従い、耐震壁をグリッドに捉われずに比較的自由に配置できる長所が考えられる。一方で、どこまで、耐震壁の非対称な配置による偏心を許容できるかなど、RC厚肉床壁構造のデザイン代(しろ)は、殆ど明らかとされていない。また、RC厚肉床壁構造で、耐震壁やフラットスラブを線材で置換した構造解析が行われることが多いが、平面状のものを線材でモデル化することは本来、適切でなく、また、偏心の影響を考えると、構造物全体に対して有限要素解析を行う必要があるが、モデル化の妥当性について殆ど検討されていない。さらに、RC厚肉床壁構造では、高い耐震性能を有すると想定されているが、そのメカニズムについては殆ど明らかにされていない。たとえば、建物を高さ方向に貫く剛強な連層耐震壁が心棒となってフラットスラブから伝達される慣性力に抵抗することが想定されるが、確かめられていない。



図1 バルセロナ・パビリオン (平面による構成)



図2 武庫川女子大学・建築スタジオ

2. 研究の目的

本研究では、以下の3項目を主な目的としている。

- ・ RC厚肉床壁構造では、どのくらい構造上の制約を緩和でき、建築デザインを許容できるのか、所謂、デザイン代(しろ)を明らかにする。
- ・ RC厚肉床壁構造の耐震メカニズム、とくに建物を高さ方向に貫くRC連層耐震壁の心棒効果を明らかにする。
- ・ RC厚肉床壁構造の建物全体に対して、はり要素、シェル要素などの構造要素、もしくはソリッド要素などの有限要素でモデル化を行い、モデル化の妥当性を明らかにする。さらに、有限要素解析を行うことで、地震時挙動や耐震メカニズムなどを明らかにする。

3. 研究の方法

本研究は、以下の方法を用いて、実施された。

(1) 武庫川女子大学建築学科の大学院生と教員あわせて 18 名の被験者に対し、RC 厚肉床壁構造のデザイン上のもととなる「平面による構成」の作品を制作してもらい、プロトコル分析を通して、デザインプロセスについて分析する。これに並行して、自重解析、地震動に対する時刻歴応答解析を実施し、RC 厚肉床壁構造のデザイン代を明らかにする。

(2) 連層耐震壁をこれまでのベルヌーイーオイラーはり要素から、ティモシェンコはり要素、平面応力要素（適合・非適合 4 節点四辺形要素、8 節点 2 次四辺形要素）に代えてモデル化し、ロッキング連層耐震壁の動的な心棒効果について定量的に評価する。

(3) 「建築スタジオ」の実物ならびに設計図面・図書を参照し、形状データを作成し、3 次元有限要素モデルを作成し、モデル化の妥当性を検討するとともに、「建築スタジオ」全体の有限要素解析を実施することを試す。その際、汎用非線形有限要素解析プログラムを使用する。

4. 研究成果

連層耐震壁とフラットスラブから構成される RC 厚肉床壁構造について、建築構造・計画・歴史の観点から多面的な検討を行った。主な実施内容を以下の 4 項目に纏める。

(1) 「平面による構成」による模型制作実験（図 3）を行い、そのプロトコル分析を通して、デザインプロセスにおいて発想や判断の基準となる概念を抽出し、構造的観点と意匠・計画的観点に分けた（図 4）。それらの観定の定量的分析、さらに構造的観点と意匠・計画的観点からの共起関係について明らかにした。これらの成果を、日本建築学会近畿支部研究発表会への論文「平面の構成」によるデザインプロセスにおける構造的及び意匠・計画的観点の関係」などに纏め、発表した。

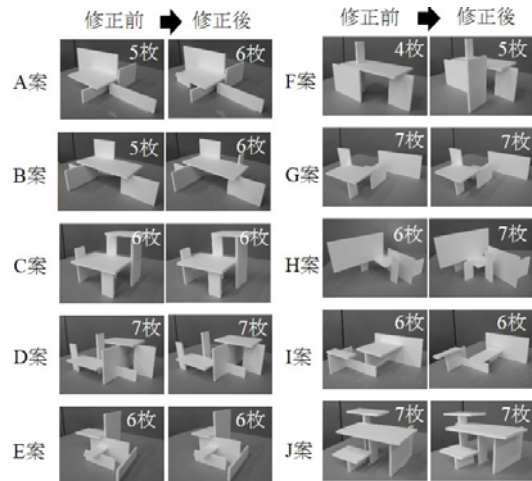


図 3 「平面による構成」の作品例

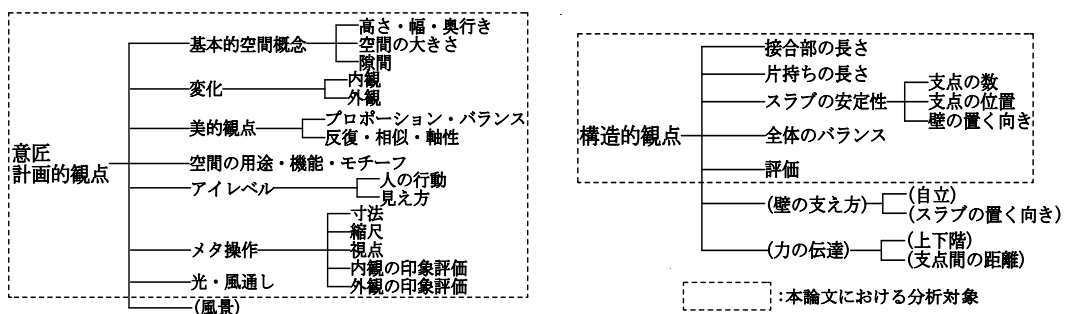


図 4 意匠・計画的観点と構造的観定の抽出

プロトコル分析を行った、「平面による構成」の作品を実際に RC 厚肉床壁構造で設計すると想定した建物に対して、有限要素法に基づく 3 次元構造解析を実施し、自重に対して壁・床板に生じる応力度を算出した（図 5）。RC 厚肉床壁構造の「デザイン代（しろ）」、すなわち、構造的制約をどのくらい緩和でき、建築デザインを許容できるか、について明らかにした。設計者が思い描く当初のデザインを大きく変更することなく、床板の厚さを増す、独立柱を追加するなどの比較的軽微な変更によって、構造安全性を担保することが可能であることを示した。

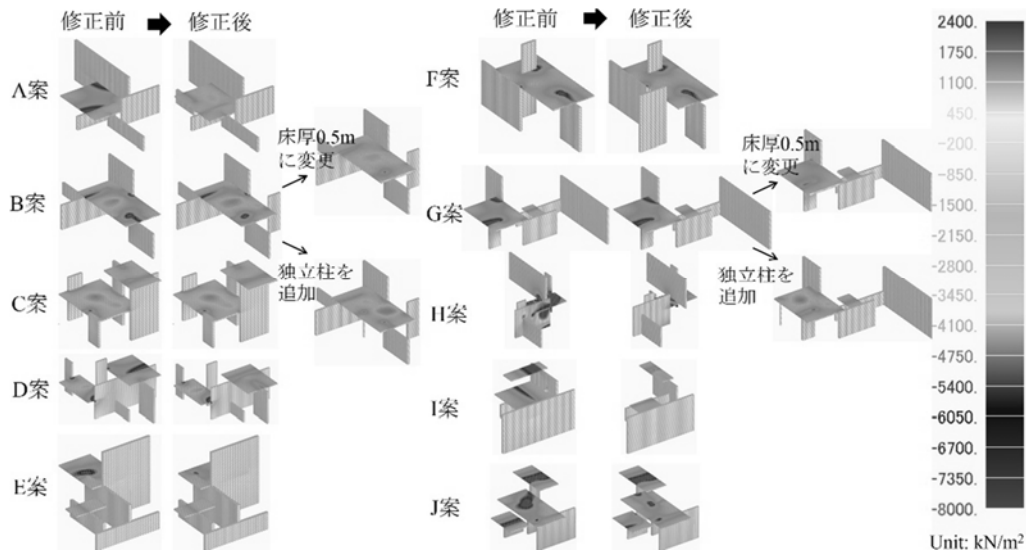
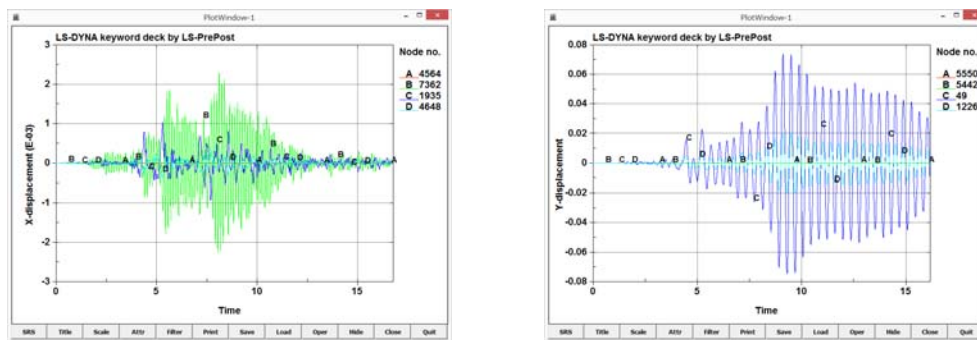


図5 自重に対する応力の検討

固有値解析結果によると、RC厚肉床壁構造は、地面に完全固定された耐震壁とそれらをつなぐ床スラブで構成されるため、十分に小さな固有周期をもつ。すなわち、弾性時において十分な剛性が確保され、また、耐震壁により十分な強度も確保される。有限要素法に基づく、建物全体の地震応答解析によると、不整形な形状であっても耐震壁をバランスよく配置すれば、十分な剛性、強度を持ち、設計レベルを超える地震動に対しても小さなねじり変形に抑えられ、さらに耐震壁が連層になると、その心棒効果によって、層崩壊メカニズムが阻止できる。ところが、耐震壁を偏って配置した場合に、ねじれ変形を起こす危険性があり（図6）、その場合は、偏心率を制限して、耐震壁をバランスよく配置するなど、設計の初期段階で考慮する必要がある。

これらを通して、建物全体の有限要素解析を行うことで、不整形になりがちな建築作品の構造安定性、安全性について、より具体的、定量的に評価でき、建築教育にも生かすことができることを実感した。これらの成果を、日本建築学会近畿支部研究発表会への論文「RC厚肉床壁構造のデザイン代に関する基礎的検討—「平面による構成」の作品に対する有限要素解析を通して」などに纏め、発表した。



(a) 壁をバランスよく配置した場合の応答 (b) 壁を偏って配置した場合の応答

図6 1方向水平地震動に対するX,Y-変位の時刻歴応答

(2) これまでの串団子+心棒モデルを改良し、連層耐震壁をベルヌーイ・オイラーはり要素、ティモシェンコはり要素、および適合・非適合4節点1次四辺形要素、8節点2次四辺形要素などの平面応力要素でモデル化し（図7）、非線形時刻歴応答解析を行った。これらの場合で、変形や応力を評価、比較し（図8、図9）、厚肉床壁構造の主要な構成要素である連層耐震壁は心棒と等価と見なせることを示した。これらの成果を、計算工学講演会への論文「ロッキング連層耐震壁をはり要素、平面応力要素でモデル化した場合の心棒効果」などの纏め、発表した。

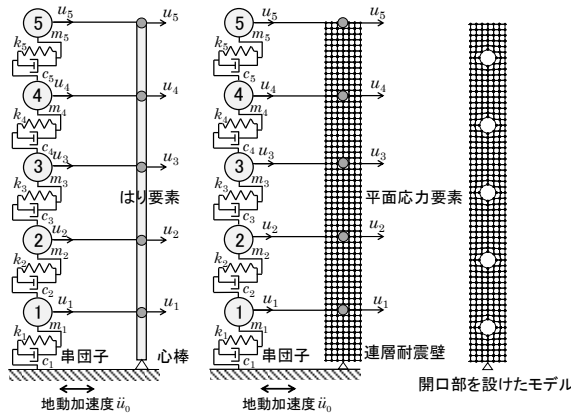


図7 構造解析モデル

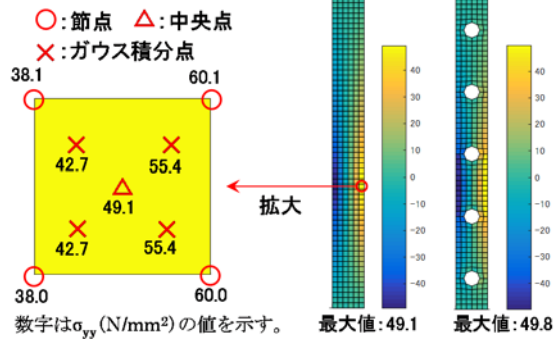


図8 連層耐震壁に生じる応力分布

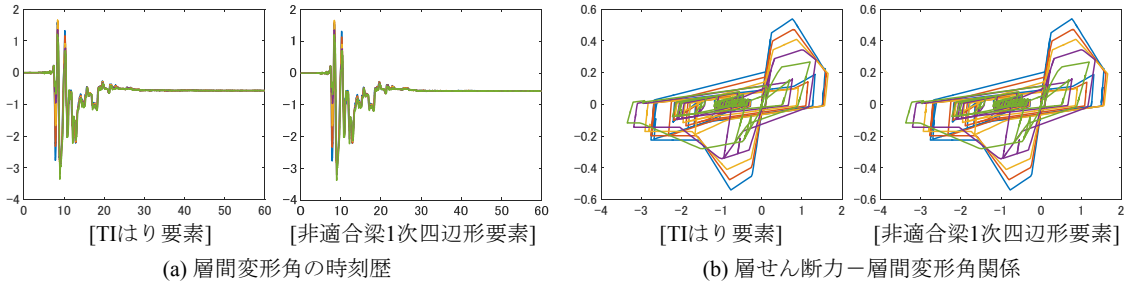


図9 解析結果

(3) 武庫川女子大学・上甲子園キャンパスにある「建築スタジオ」は、耐震壁、ボイドスラブ、鉛直荷重支持柱などから構成される。スパン 15m の「設計スタジオ」を支える PCaPC 梁と柱は PC 圧着接合され、大スパンを可能とする PCaPC 構造の特徴を生かすため、鉛直荷重のみを支えるように設計された。「建築スタジオ」の主要部分に対し、連層耐震壁、床スラブを平板要素、鉛直荷重支持柱をはり要素で、もしくは建物全体をソリッド要素で、の大きくは 2 通りのモデル化により有限要素解析を実施した (図 10)。本建物は、柱、梁ラーメン架構を残した「平面による構成」であるとともに、PC 圧着接合を用いた PCaPC 構造であり、複雑に配筋される。設計図面通りにモデル化することは困難を極め、適宜、簡略化した (図 11)。建築全体のより詳細な非線形有限要素解析は、今後の研究課題としたい。

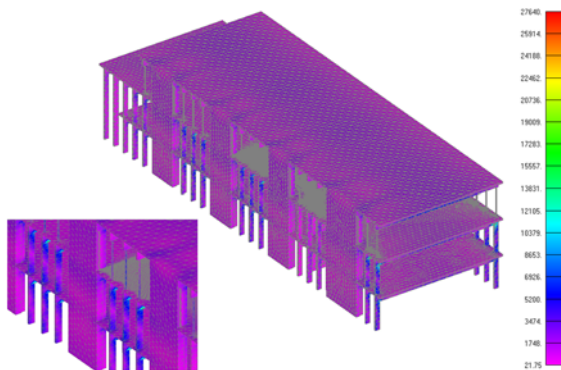


図10 ソリッド要素による解析結果

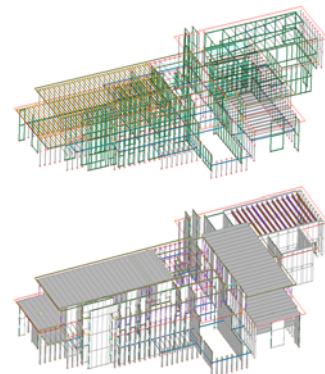


図11 「建築スタジオ」全体のモデル化

(4) 建築構法史の観点から、バルセロナ・パビリオンに代表される、西洋の近代化で辿り着いた「平面による構成」の建築と、日本の伝統的な木造軸組み構造に見られる「柱、梁による構成」の建築とを対比して、日本と西洋の建築構法の変遷について俯瞰的に調査、整理し、考察を行った。これらの成果を、日本建築学会近畿支部研究発表会への論文「日本と西洋における建築構法の変遷とその展開」に纏め、発表した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Misaki OKADA, Hiroyuki TAGAWA, Seika FUJIWARA, Noritoshi SUGIURA	4. 巻 -
2. 論文標題 Application of the continuous column concept to the morphogenesis of a super-high-rise building and a large spatial stadium	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the IASS Annual Symposium 2019, Form and Force	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 田川浩之	4. 巻 24
2. 論文標題 ロッキング連層耐震壁をはり要素、平面応力要素でモデル化した場合の心棒効果	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 計算工学講演会論文集	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 田川浩之、戸川屋凧美、鈴木利友
2. 発表標題 日本と西洋における建築構法の変遷とその展開 日米で異なる均一型、集約型架構形式に関する一考察
3. 学会等名 令和2年度日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田川浩之
2. 発表標題 開口部を設けたロッキング連層耐震壁による心棒効果
3. 学会等名 令和2年度日本建築学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田川浩之、戸川屋凧美、鈴木利友
2. 発表標題 日本と西洋における建築構法の変遷とその展開 日米で異なる均一型，集約型架構形式に関する一考察
3. 学会等名 令和2年度日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田川浩之
2. 発表標題 開口部を設けたロッキング連層耐震壁による心棒効果
3. 学会等名 令和2年度日本建築学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西村萌、杉浦徳利、田川浩之
2. 発表標題 「平面の構成」によるデザインプロセスにおける構造的及び意匠・計画的観点の関係
3. 学会等名 2019年度日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西村萌、杉浦徳利、田川浩之
2. 発表標題 「平面の構成」によるデザインプロセスにおける観点的抽出とその特徴 デザインプロセスにおける構造的及び意匠・計画的観点の関係 その1、2
3. 学会等名 日本建築学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡田美咲、田川浩之、杉浦徳利
2. 発表標題 伝統建築から着想を得た互入式心棒配置による制振効果
3. 学会等名 日本建築学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroyuki Tagawa, Misaki Okada, Noritoshi Sugiura
2. 発表標題 Numerical Simulation of Progressive Collapse of Perimeter Frame in Super-high-rise Framed-tube Structure using Simple Structural Model
3. 学会等名 13th World Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田川浩之、木守亜美、杉浦徳利
2. 発表標題 RC厚肉床壁構造のデザイン代に関する基礎的検討 「平面による構成」の作品に対する有限要素解析を通して
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木守亜美、松下聡、杉浦徳利、田川浩之
2. 発表標題 「平面による構成」のデザインと構造の関係 RC厚肉床壁構造によるデザイン代に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本建築学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroyuki Tagawa, Gregory MacRae
2. 発表標題 Seismic Simulation of U.S. and Japanese Type Steel Moment-resisting Frame Structures using Practical FEM Macro Models
3. 学会等名 STESSA2018 Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	杉浦 徳利 (Sugiura Noritoshi) (50411955)	武庫川女子大学・生活環境学部・教授 (34517)	