

令和 2 年 5 月 25 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04497

研究課題名(和文) 2016年ミャンマー地震における文化財建築の耐震補強効果の検証と都市防災への応用

研究課題名(英文) Effectiveness of strengthen method of cultural buildings in 2016 Myanmar earthquake and its application to urban disaster prevention

研究代表者

日比野 陽(Hibino, Yo)

広島大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50456703

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ミャンマーにおける歴史的な文化財建築における耐震補強工法の有効性、ミャンマー都市部の建物の構造性能評価、ミャンマーの地盤構造評価を実施し、ミャンマーの組積造建物の周期特性や耐震性能、補強の有効性と適用性について明らかにした。ミャンマーの組積造建物において、面外方向への転倒を防止できればレンガ壁が効果的な耐震要素となることを示した。さらに、バガン市内での地震時の強震動特性を明らかにし、強震動特性と寺院の被害データとの比較により、地震動強さと被害程度の関係性を評価した。また、ヤンゴンおよびマンダレーの地盤特性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた知見は、ミャンマーを含むレンガ壁を建材に用いる諸外国の建物の地震被害の低減に大きく寄与するものである。本研究により、ミャンマーで多く見られる組積造建物において、レンガ壁の補強工法としての有効性が明らかになり、組積造建物やレンガ壁を建材に用いる諸外国の建物に対する耐震補強工法の実用化に繋がる。レンガ壁の構造被害を減少させることで、建物の安全性や耐久性、および継続使用性を向上させることにも寄与する。さらに、ミャンマーの地盤構造が明らかになり、ミャンマーにおける強震動予測や建物の被害推定に繋がること期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, the effectiveness of seismic retrofitting method in historic buildings, structural performance evaluation of buildings in urban areas of Myanmar, and evaluation of soil structure of Myanmar are carried out. The periodic characteristics of masonry buildings in Myanmar and the effectiveness and application of reinforcement were evaluated. It is shown that brick walls can be an effective seismic element in buildings in Myanmar if they can be prevented from falling out of the plane. Furthermore, by comparing the strong motion characteristics and the damage data of temples, it is shown that the strong motion characteristics in Bagan city, the relationship between the earthquake intensity and the damage was evaluated. The soil characteristics in Yangon and Mandalay were proposed.

研究分野：建築構造，耐震工学

キーワード：耐震性能 耐震補強 地盤構造 地震被害 強震動予測 組積造

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2016年ミャンマー中部において Mw6.8 の地震が発生し、文化財建物を含む組積造建物や鉄筋コンクリート造建築物において多数の被害が生じた。バガンの仏教遺跡群(約900年前の組積造建物)も被害を受け、仏塔の崩落や壁・天井のひび割れや崩落などが確認された。一方で、一部の寺院においては1975年に発生した地震において生じた被害の修復および、鉄筋コンクリート構造による耐震補強が行われていた。補強時の報告書<sup>1)</sup>によれば、補強工法の適用に際して、地盤や建物の周期特性などが詳細に検討されていたことが分かっているが、耐震補強の有効性や被害については詳細な情報は得られていない。ミャンマーにおいて近い将来、大地震が発生することが予想されており、ミャンマーの現代建物の耐震補強工法の開発は喫緊の課題である。主に現地で開発され、かつ多様な組積造建物・部材に対して実用化された耐震補強の有効性を定量的に把握することは、今後の組積造文化財および組積壁を有する現代建物の耐震補強工法を開発する上で極めて有益な資料となり、ミャンマーを含むレンガ壁を建材に用いる諸外国の建物の地震被害の低減に大きく寄与すると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、ミャンマーの現代建物の耐震性能や地盤特性を明らかにすることで、ミャンマーの建物の耐震性能に関する課題や耐震性能向上のための必要な補強方法を提案することを目的とする。具体的には、①2016年ミャンマー地震で被害が生じた組積造建物の周期特性や損傷部位、耐震補強の詳細や施工方法、損傷を確認し、補強の有効性と適用性を明らかにする。補強工法の有効性については、補強済み建物と未補強建物の被害状況を比較することにより行う。②ミャンマーの都市部の建物の構造性能の調査、図面の入手、関係省庁からのヒアリングにより、現地で使用されている材料や構造方法を調査することで、ミャンマーの建物の耐震性能を明らかにする。③過去に地震被害を受けた寺院周辺やヤンゴン市やマンダレー市の地盤特性を常時微動計測等の調査から明らかにし、想定した震源モデルにより、ミャンマーの都市の強震動予測を行う。④調査した耐震補強工法を元にミャンマーの現代建物に対する耐震補強工法について検討する。

### 3. 研究の方法

本研究ではミャンマー地震で被害を受けた建物の被害状況と被害原因から、文化財建築に施工された耐震補強工法の有効性を検討について検討を行った。調査の対象は2016年ミャンマー地震による被害が多く確認されたミャンマーのバガン市とし、被害を受けた仏教遺跡群の調査を主として行った。また、現地で円滑な調査を進めるため、現地を訪れ、研究協力者の依頼を行った。

#### ・文化財建築における耐震補強工法の有効性

本研究ではミャンマーの文化財建築の被害調査と建物及び地盤の常時微動計測を行うことで、補強工法の有効性の検証を行った。常時微動計測によって固有振動数を計測し、過去のデータと比較することで、劣化や損傷の推定を行った。対象建物は補強済みおよび未補強の文化財建築(寺院)であり、UNESCOの地震被害報告書<sup>1)</sup>を元に決定した。建物の常時微動は東西方向、南北方向で計測し、建物の周期と方向の依存性について検討を行った。計測された地震波を元に地震時の寺院の応答加速度や応答性状から耐震性能と補強効果の有効性を明らかにする。建物の固有値解析により補強効果の検証を行った。

#### ・ミャンマー都市部の建物の構造性能評価

ミャンマーのヤンゴン市とマンダレー市の建物の耐震性能に関する調査を行った。建物の固有振動数は常時微動計測から伝達関数を用いて推定を行った。現地では、建設中の建物の調査を実施し、施工状況や施工品質などの調査、使用材料の構造特性を実験により調査した。地表面の応答スペクトルと推定した建物の耐震性能より、マンダレー市の地震被害想定を行った。

#### ・ミャンマーの地盤構造評価

地盤と建物の相互作用を考慮するため、ミャンマーのバガン市およびマンダレー市周辺の地盤の固有振動数の計測を行い、経験的手法に基いて地震動強さの予測を行った。マンダレー市周辺においては、地震断層を想定し、地表面での応答スペクトルの分布の予測を行った。表層地盤の増幅特性は常時微動計測等を用いてモデル化した。

### 4. 研究成果

#### 4. 1 ミャンマーの歴史的建造物の構造性能

##### 4. 1. 1 構造性能と補強方法

ミャンマー・バガン市に存在する歴史的組積造建造物を対象とし、建物の高さごとに周期特性を明らかにした。建物の高さは10~60m程度であった。大小様々なひび割れが見られる建物が多く、特に外壁面に対して鉛直方向のひび割れが多く観測された。これは、面外方向に対する耐震性能が低く、壁面が面外方向に変形したことによるものと考えられる。また、文献<sup>2)</sup>では、1975年の地震の後に修復を行った部分は既存のものとは比べてレンガ目地が厚く、既存部分と修復部

分が一体とならなかったことも被害の原因の一つとして挙げている。

表 1 に常時微動から推定した固有周期を示す。UNESCO の報告書で示される周期と概ね一致する結果となった。図 1 に建物の高さ と被害率の関係を示す。実線は右軸と対応しており、被害レベルの平均を表している。被害は高い建物において集中しており、固有周期が比較的長い建物において被害が大きかった。また、最も多く観測された補強方法は鉄骨で補強を行ったものであり、内壁や外壁、天井に沿って鉄骨を組み面外方向に対して補強を行っているものや、鉄筋コンクリート部材を壁面に埋め込んだものなどが確認された (図 2)。図 3 に、UNESCO の調査によって得られた補強前の建物の固有周期と、本調査により得られた補強後の固有周期の関係を示す。補強を行うことにより若干ではあるが固有周期が短くなっていたが、補強の有無や方法の違いによる差異は明確には現れなかった。したがって、本調査で確認された補強方法は、大幅な耐震性能の向上には寄与していないことが考えられる。

表 1 計測結果一覧

Sr. No.	ID	Height(m)	Direction	Fundamental period (sec)	
				UNESCO	Investigation
1.	1622	54.68	NS	0.46	0.43
			EW	0.40	0.38
2.	1597	61.26	NS	0.52	0.51
			EW	0.46	0.50
3.	1599	13.72	NS	-	0.18
			EW	-	0.18
4.	1620	15.54	NS	-	0.29
			EW	-	0.25
5.	1589	27.43	NS	-	0.21
			EW	-	0.34

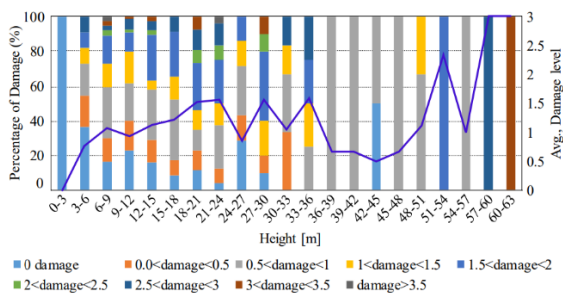


図 1 建物高さ と被害の関係



図 2 鉄骨や RC による補強

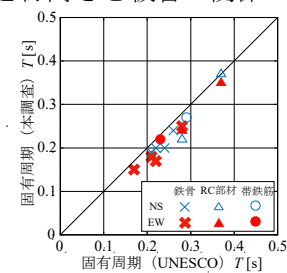


図 3 補強による固有周期の違い

#### 4. 1. 2 解析による補強効果の検証

バガン遺跡のうち鋼材により補強された建造物の 1 つに着目し、3D スキャンによる実測からモデル化して地震応答解析を行い、とくに補強効果に着目して考察した。研究対象建造物の全景を図 4 に示す。この建造物はレンガによる組積構造であり、1983 年頃に内部に H 形の鋼材による補強 (図 4) が行われた。補強架構は礼拝室の中央の柱回りにのみ配され、床面および天井面で建造物と固定されている。図 5 に建造物の 3D スキャン画像および FEM 解析のためのモデル化を示す。地震応答解析に使用した地震波は 2016 年 8 月に建造物から 5km 圏内のミャンマー・ニャウンウーで観測された地震波である。地震波の時刻歴を図 6 に示す。解析モデルの層せん断力の時刻歴および補強部分の鉄骨が負担する層せん断力の時刻歴を図 7 に示す。最大層せん断力はそれぞれ 1263kN、1.23kN であることから、補強部分の層せん断力の負担は建造物全体の約 0.1% にしか及ばないことがわかった。すなわち鋼材による水平方向の補強効果はほとんどなく、適切な耐震補強が施されていないと考えられる。

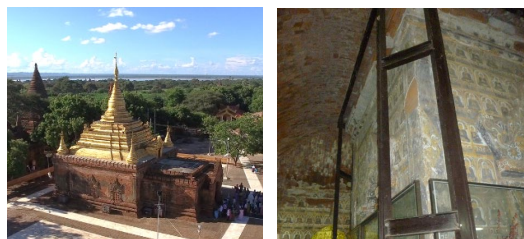


図 4 研究対象建物

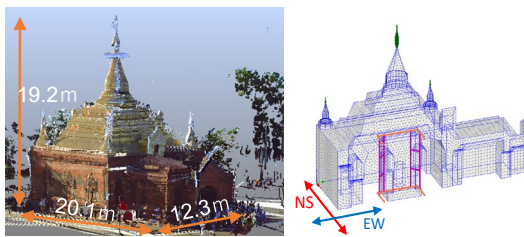


図 5 3D スキャン画像と FEM モデル

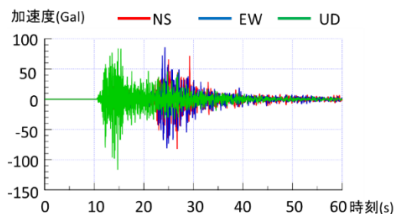


図 6 地震応答解析の入力地震動

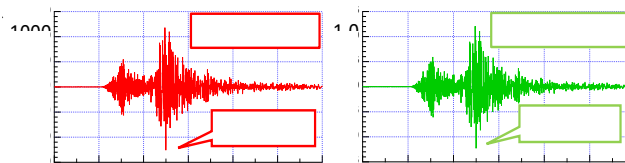


図 7 地震応答解析結果

#### 4. 2 ミャンマー都市部の建物の構造性能

##### 4. 2. 1 構造的特徴と振動特性

ミャンマー都市部の建物の構造性能を調査するため、都市部の建物において常時微動計測を行い固有周期の推定を行った。各建物の固有周期の推定を行った。固有周期は概ね建物高さとの比例関係にあり、固有周期  $T$  と建物の高さ  $H$  の関係は  $T=0.012H\sim 0.019H$  であった。我が国の建物の例 ( $T=0.02H$ ) と比較してやや剛性が低いと考えられるものの、著しく耐震性能が低い建物は確認されなかった。

##### 4. 2. 2 解析による補強効果の検証

研究対象建物はマンダレー市内にある高層の鉄筋コンクリート造公共施設である (図 8)。本建物は 2016 年の地震後に建設されたレンガ壁を有する RC 造建物である。建物の耐震性能にレンガ壁が与える影響について解析的に分析するため、静的増分解析を行った。解析パラメータはレンガ壁の考慮の有無であり、表 2 の通りである。建物は基礎梁を剛と仮定し、基礎下をピン支持とした。柱梁部材は剛域を有する線材に置換した。レンガ壁を考慮する解析では、レンガ壁をストラット材に置換した。ストラットの剛性は Smith&Carter<sup>3)</sup>による方法を、強度は Mainstone<sup>4)</sup>による方法を採用して評価した。解析モデルを図 9 に示す。静的増分解析では、いずれかの層が層間変形角 0.05rad になるまで載荷した。建物最下層のベースシア係数と層間変形角の関係を図 10 に比較する。レンガ壁の重量を考慮した Case B は Case A よりも耐力が小さい。レンガ壁の剛性も考慮した Case C では、3 ケースの中で最も耐力が大きく、レンガ壁の面外方向への転倒を防止できれば効果的な耐震要素となることがわかる。



図 8 研究対象建物

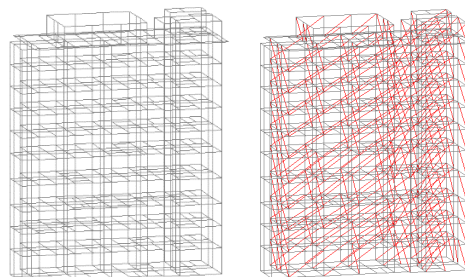


図 9 解析モデル (左: 壁無, 右: 壁有)

表 2 解析パラメーター一覧

解析ケース	レンガ壁重量	レンガ壁剛性
Case A	無視	無視
Case B	考慮	
Case C		

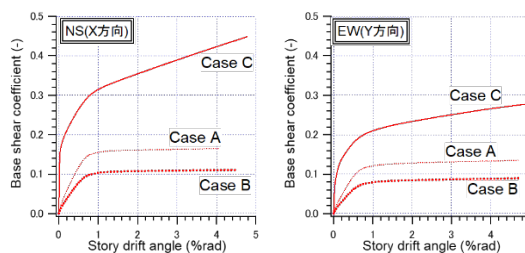


図 10 静的増分解析結果 (右: 長辺, 左: 短辺)

#### 4. 3 ミャンマーの地盤特性

##### 4. 3. 1 バガンの地盤特性と 2016 年ミャンマー中部地震の強震動特性

2016 年に発生したミャンマー中部地震では、バガンの歴史的組積造建物である寺院に多数の被害がみられたことから、バガンの約 40 地点の地盤上において微動観測を実施した。既存の地盤調査結果を参考にしながら、拡散波動場理論に基づく逆解析を行い、観測点の S 波速度構造モデルを推定した。さらに、地震時に観測された地震動データのはぎ取り解析により、基盤面での地震動波形を計算した。基盤面での地震動波形と各地点での S 波速度構造モデルを用いて、地震時における強震動波形を推定することで、バガン市内での地震時の強震動特性を明らかにした (図 11)。その結果、地震時の最大加速度は  $90\sim 170\text{cm/s/s}$  となることがわかった (図 12)。また、強震動特性と寺院の被害データとの比較したところ、地震動強さと被害程度には明瞭な関係はみられず、被害の有無は各寺院の構造特性の影響が大きいことを明らかにした。

#### 4. 3. 2 マンダレーの地盤特性と想定地震による強震動予測

ミャンマー第2の都市であるマンダレーを対象として、約50地点の地盤上において微動観測を実施し、拡散波動場理論に基づく逆解析から、各地点のS波速度構造モデルを推定した。これらの分析から、マンダレーにおける卓越周期などの地盤特性を明らかにした(図13)。さらに、M7程度の想定地震に対して、統計的グリーン関数法と1次元等価線形解析(DYNEQ)を用いて、強震動予測を行った。これにより、マンダレー市内では最大加速度で170~400cm/s/s程度の地震動強さになること(図14)、周期0.2~0.3秒程度の比較的短周期の地震動が卓越すること、などが推定された。

#### 4. 3. 3 ヤンゴンの地盤特性

マンダレー最大の都市であるヤンゴンを対象として、計34地点の地盤上において微動観測を実施し、H/Vスペクトル比から地盤特性の評価を行った。観測値は既存の地盤調査による理論値と概ね対応し、市内の多くの地点では周期1秒前後に卓越周期がみられることを明らかにした(図15)。また、H/Vスペクトル比のピーク値の分布から、ヤンゴン最大の湖であるインヤー湖や主要な河川沿いの地域でやや大きなピークがみられ、揺れやすさが比較的大きくなる可能性があることを示した。

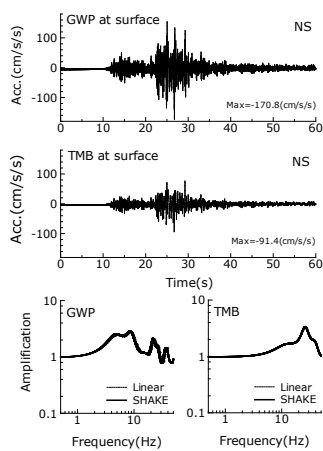


図11 推定された強震動波形

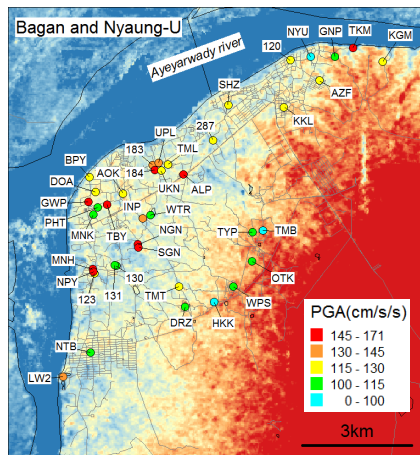


図12 バガンでの最大加速度の分布

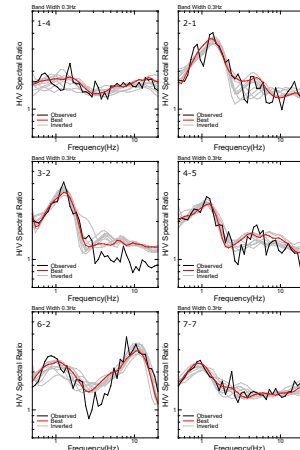


図13 マンダレーでの微動H/Vスペクトル比

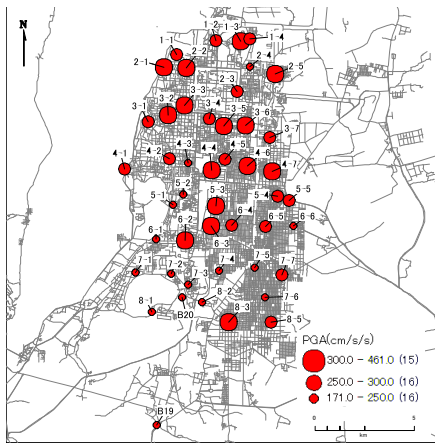


図14 推定された最大加速度の分布

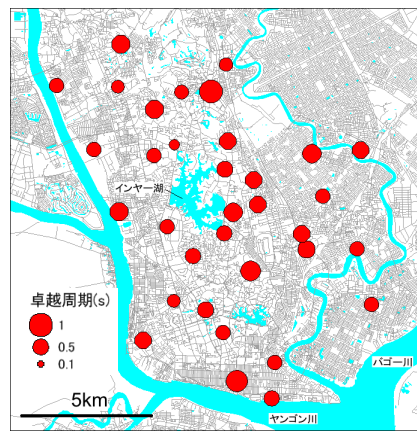


図15 ヤンゴン市の卓越周期分布

#### 参考文献

1. UNESCO PROJECT BUR/78/023, Methods for Repair and Strengthening the National Monuments in Pagan-Burma, Volume IV, Dynamic Properties of selected structures, Skopje, May 1983.
2. Saw Htwe Zaw, Teraphan Ornthammarath & Nakhorn Poovarodom, Seismic Reconnaissance and Observed Damage after the Mw 6.8, 24 August 2016 Chauk (Central Myanmar) Earthquake, Journal of Earthquake Engineering, 23:2, 284-304, 2019, DOI: 10.1080/13632469.2017.1323050
3. B. Stafford Smith, C. Carter : A method of analysis for infilled frames, Proc. Inst. Civil Engrs, Sep. 1969
4. R. J. Mainstone : On the Stiffness and strength of infilled frames, Proceeding of the Institution of Civil Engineers, Supplement IV, pp. 57-90, 1971

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Miura, H., Fujita, H., Than, K. S. S. and Hibino, Y	4. 巻 126
2. 論文標題 Estimation of Site Response during the 2016 Chauk, Myanmar Earthquake Based on Microtremor-derived S-wave Velocity Structures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Soil Dynamics and Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 なし
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105781">https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105781</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 日比野陽, Khaing Su Su Than, 真田靖士, 片山遥
2. 発表標題 Investigation on Seismic Resistance of Temples Affected by the 2016 Chauk Earthquake in Historic Cultural City Bagan Part I Typical Damage and Reinforcing Methods
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Khaing Su Su Than, 日比野陽, 真田靖士, 片山遥
2. 発表標題 Investigation on Seismic Resistance of Temples Affected by the 2016 Chauk Earthquake in Historic Cultural City Bagan Part II Detailed Investigation
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹中一成, カイン ス ス タン, 日比野陽, 真田靖士, 畠龍樹
2. 発表標題 ミャンマーにおける歴史的組積造建造物の補強効果と耐震性能
3. 学会等名 日本建築学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 畠龍樹, 真田靖士, 日比野陽, 松本幸大, Khaing Su Su Than
2. 発表標題 ミャンマー・バガン地区における歴史的組積造建造物の振動特性評価
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 藤田秀隆, 三浦弘之
2. 発表標題 2016年ミャンマー地震の被災地での微動を用いた地盤特性の把握とそれに基づく地震動の推定
3. 学会等名 日本建築学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 畠龍樹, 真田靖士, 日比野陽, 松本幸大, Khaing Su Su Than
2. 発表標題 常時微動計測および固有値解析に基づくバガン遺跡の振動特性評価
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 畠龍樹, 真田靖士, 日比野陽, 松本幸大, Khaing Su Su Than
2. 発表標題 バガン遺跡の鋼材により補強された歴史的組積造建造物の解析
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三浦弘之, 藤田秀隆
2. 発表標題 ミャンマー・ヤンゴンにおける微動H/Vスペクトル比による地盤特性の評価
3. 学会等名 日本建築学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤田秀隆, 三浦弘之
2. 発表標題 ミャンマー・マンダレーにおける微動を用いた地盤構造モデルの推定と想定地震による強震動予測
3. 学会等名 日本建築学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2020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	眞田 靖士 (Sanada Yasushi) (80334358)	大阪大学・工学研究科・教授  (14401)	
研究分担者	三浦 弘之 (Miura Hiroyuki) (30418678)	広島大学・工学研究科・准教授  (15401)	
研究分担者	松本 幸大 (Matsumoto Yukihiro) (00435447)	豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授  (13904)	