

平成 30 年 5 月 25 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2014～2017

課題番号：26303007

研究課題名(和文) イラン東アゼルバイジャンにおける世界遺産建造物の耐震診断と補強法に関する調査研究

研究課題名(英文) Seismic Diagnosis and Reinforcement of UNESCO World Cultural Heritage in East Azarbaijan, Iran

研究代表者

宮島 昌克 (MIYAJIMA, MASAKATSU)

金沢大学・環境デザイン学系・教授

研究者番号：70143881

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)：ユネスコ世界遺産に登録されている、イラン東アゼルバイジャンにある聖ステファノス教会を対象として、北タブリーズ断層を想定地震断層とした強震動予測を行い、耐震診断を行った。その際、常時微動観測や屈折法弾性波探査などの各種地盤調査を行って、建設地点の地盤動特性を明らかにするとともに、建物の常時微動観測を行い、建物の動特性も明らかにした。耐震診断結果をもとに耐震補強法を提案した。

研究成果の概要(英文)：Prediction of strong ground motion was conducted at St. Stepanos Monastery that was registered as UNESCO World Cultural Heritage in Iran. Scenario earthquake fault was assumed as North Tabriz fault. Several kinds of in situ tests such as micro tremor measurements, shear wave velocity measurements and so on, were conducted to estimate dynamic characteristics of the site. Seismic diagnosis of the monastery was done by using the scenario earthquake motion and methods of seismic retrofitting were proposed.

研究分野：地震工学

キーワード：耐震診断 耐震補強 組積造構造物 イラン 世界遺産

1. 研究開始当初の背景

イランは日本、トルコ、台湾、米国カリフォルニアに並ぶ世界有数の地震国である。2004年12月に発生したイラン・バム地震では、地震後世界遺産の危機遺産リストに緊急登録された日干し煉瓦（アドベ）造のバムの要塞都市が壊滅的な被害を受けたのみならず、同地震が人口約12万人といわれたバム市の約1/4の人命を奪った。これまで世界遺産の危機遺産リストにはアフガニスタンやイラクといった戦時下あるいはこれに近い状態にある世界遺産が登録されてきたが、地震によるものはバムの要塞都市が最初であり、これからもこのようなケースが増えてくるのではないかと危惧されている。

本研究で対象としている東アゼルバイジャン県はイランの北西部に位置し、テヘラン市の北部を走っている、世界的にも有名なアナトリア大断層帯がこの地域に延びて北タブリーズ断層となっており、この断層による地震の発生がテヘラン市とともに危惧されている。しかし、テヘラン市は首都ということでわが国の国際協力事業団の援助の下に地震被害想定調査が積極的に行われているのに対し、東アゼルバイジャン県における地震被害想定調査は皆無の状態である。

2. 研究の目的

本研究では、東アゼルバイジャン県において世界遺産に登録されている聖ステファノス修道院を対象として、北タブリーズ断層を想定地震断層として耐震診断を行うとともに、耐震補強法について現地の研究協力者と調査研究を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

研究体制は、「想定地震動」、「地盤動特性」、「建造物の診断・補強」、「避難シミュレーション」からなる。「想定地震動」に関しては、統計的グリーン関数法を用いて想定地震動波形を作成するが、そのために想定断層に関する情報を収集するとともに、「地盤動特性」グループと伝播経路特性、サイト特性の評価のための地盤の常時微動観測と屈折法弾性波探査試験を行う。「建造物の診断・補強」のために、「地盤動特性」グループと建造物の常時微動観測を行うとともに、サーモレーサーを用いたクラックマップの作成などを行う。「避難シミュレーション」では、避難行動判断実験、パーソントリップ調査を通して基礎的な情報を収集し、研究分担者が既に開発しているシミュレーションソフトを用いて解析する。

4. 研究成果

(1) 統計的グリーン関数法を用いた聖ステファノス修道院における地震動推定

聖ステファノス修道院周辺には北タブリーズ断層が存在し、この断層による地震が発生したときに修道院に大きな地震動が襲うと考えられる。そこで統計的グリーン関数法を用いて強震動予測を行った。

対象とする観測点では十分な地震情報が得られていない、あるいは地盤情報が公開されていないため、後述する常時微動記録に基づいて地盤動特性を評価した。

図1に本研究で得られた推定地震動の一例を、図2にこの推定地震動のフーリエスペクトルを示す。図1によれば最大加速度が約130cm/s²である。図2によれば、フーリエスペクトルには複数のピークが示されており、このピークの振動数と建造物の固有振動数が合致するかを検討する必要がある。

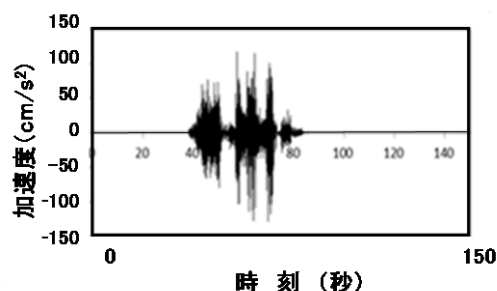


図1 想定地震の加速度波形の一例

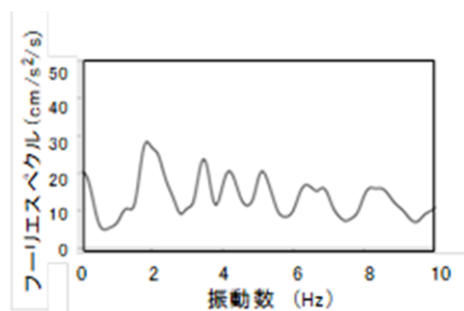


図2 想定地震波形のフーリエスペクトル

(2) 地盤の常時微動測定

聖ステファノス修道院の周辺地盤の常時微動計測を行った。計測はサンプリング振動数を100Hz、計測時間を10分（計測データ数を60,000点）とした。記録されたデータから比較的波形の安定している10区間（2,048点）を抽出し、それぞれのフーリエ変換に対してバンド幅0.4HzのParzen Windowを施し、スペクトルの平滑化を行い、算術平均して平均スペクトルを求めた。出来る限りノイズの影響が少なくなると考えられる、観光客が入ることができない14時～15時の閉館時と早朝、夜中に計測を行った。計測点は図3の【 】で示した位置である。各測定点における地盤の固有周期の結果を表1に示す。常時微動のH/Vスペクトル比においてピークが比較的明瞭

に表れている記録を用いて地盤構造の推定を行った。推定結果から、聖ステファノス修道院周辺地盤の固有周期は概ね0.12秒である。これは日本の道路橋示方書では、I種地盤と強固な地盤に相当する。地点【3】は建造物内部にある空地であったが、建造物の外側周辺地盤と同等な値を示した。

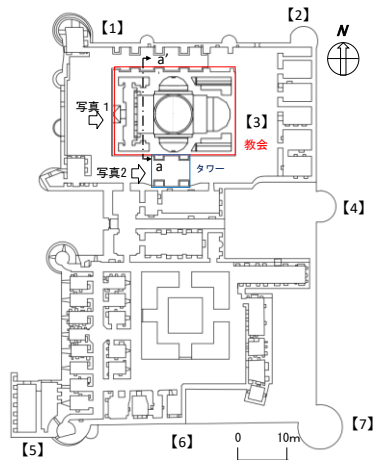


図3 常時微動計測位置

表1 地盤の固有振動数, 固有周期

測定点	固有振動数(Hz)	固有周期 (sec)
1	80	0.13
2	82	0.12
3	82	0.12
4	80	0.13
5	83	0.12
6	83	0.12
7	83	0.12

修道院周辺で屈折法弾性波探査を行った。間隔 5m ごとにピックアップを置いて測定を行った。枕木の上に荷重として数人が乗り、枕木をハンマーで打撃することで波形を生成し、各点での振動を測定した。測定機器は応用地質社製のジオフォン (McSEIC-3, MODEL-1817) である。走時曲線の傾きから北側の表層地盤のせん断波速度が 333m/s, 南側の表層地盤のせん断波速度が 341 m/s であった。また、1/4 波長則の推定式で層厚を計算すると、層厚は北側側線の地盤では 10.0m, 南側のそれは 10.2m とほぼ同程度の結果が得られた。

(3) 建物の常時微動測定

聖ステファノス修道院の中にある教会部 (写真1), タワー部 (写真2) に注目し、2棟の常時微動計測を行った。教会部の速度計設置箇所は、地盤上 (A点), 1階床レベル (B点: 地面上にベタ基礎であり、地面と一体化),

2階床レベル (C点: 教会内部は吹き抜けのため、回廊側の床上), 3階屋上に続く窓 (D点) に水平2成分の速度計を設置した。教会の断面図及び速度計の位置を図6に示す。修道院内の建造物群はNS, EW方向に沿って建っているため、速度計の設置もNS, EW方向に設置した。タワー部における速度計の設置高さを写真3に示す。



写真1 教会正面 写真2 教会横のタワー

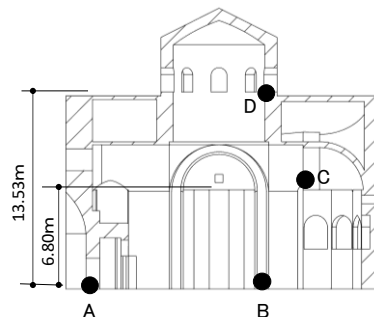


図6 教会の速度計 (AからD) の位置図

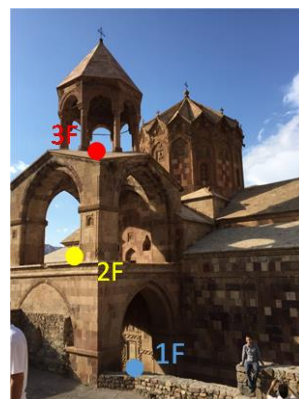


写真3 タワーの速度計の位置図

解析結果の一例, すなわち常時微動記録から求めた建造物の水平方向スペクトルを建造物前面の地盤上に設置した微動計の水平方向スペクトルで除したスペクトル比 (H/Hスペクトル比) を図7に示す。

各建造物の1次, 2次の固有振動数を表2にまとめた. 固有振動数に着目すると, 教会における振動数はEW方向で4.2Hz, NS方向で5.4Hzである. 一方, タワー部の1次固有振動数はEW方向で4.1Hz, NS方向で4.2Hz程度である. このことはEW方向では教会のそれとほぼ一致していることから, 教会と隣接する建造物の壁によってタワーが拘束されていることが考えられる. NS方向には隣接の建造物がなくなるものの, やや高めの振動数となっている. EW方向における2次の固有振動数には7.2Hzのピークが表れ, NS方向においては5.1Hzにピークが認められる.

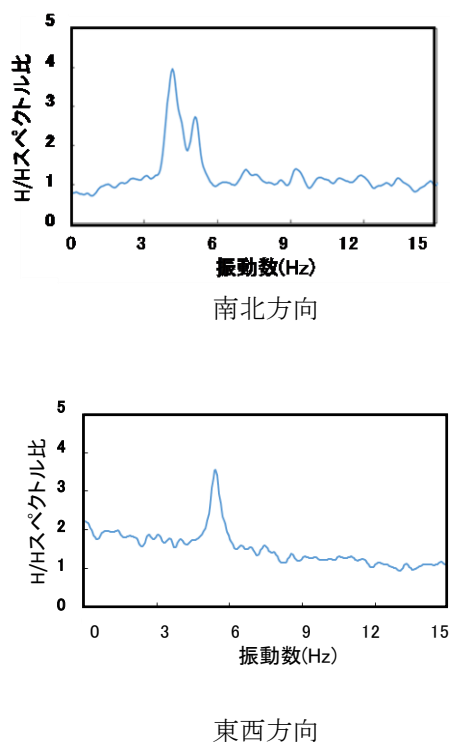


図7 建造物のH/Hスペクトル比

表2 各建造物の固有振動数

測定位置	測定方向	一次		二次		
		固有振動数 (Hz)	最大スペクトル比	固有振動数 (Hz)	最大スペクトル比	
教会	EW	4.2	4.0	—	—	
	NS	5.4	3.6	—	—	
タワー	北	EW	4.1	1.8	7.2	3.6
		NS	4.1	4.0	5.1	2.9
	南	EW	4.1	3.4	7.2	7.9
		NS	4.2	4.5	5.1	3.1
	東	EW	4.1	2.7	7.2	3.9
		NS	4.2	6.0	5.1	3.0
	西	EW	4.1	2.7	7.2	3.4
		NS	4.2	5.2	5.1	3.2

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 20 件)

- ① 古川愛子, 増田景也, Daru, G.T.S., 清野純史: インターロッキングブロックの形状が組積造壁の荷重-変位関係および破壊挙動に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.64A, pp.241-249, 2018.
- ② Ikemoto T., Amiraslanzadeh R., Fukada S., Miyajima M. and Fallahii A.: Seismic Performance of Reinforced and Unreinforced Masonry Brick Walls Assembled with Head-Straight Texture Order, Proceedings of the 17th World Conference on Earthquake Engineering, USB, No.634, 10p. 2017.
- ③ Tsurugi, M., Kagawa, T. and Irikura, K.: Spectral Decay Characteristics f_{max} and κ for Strong Ground Motion Prediction, Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering, USB, No.1232, 2017.
- ④ Furukawa, A., Kiyono, J., Parajuli, R.R., Parajuli, H.R. and Toki, K.: Stiffness Reduction Identification of a Two-story Historic Masonry Building in Patan due to the 2015 Gorkha Earthquake by Microtremor Observation, 土木構造・材料論文集, Vol.33, pp. 93~100, 2017.
- ⑤ 池本敏和, 宮島昌克, 橋本隆雄, 中島進, 藤原寅士良, 池本宏文: 石積擁壁の耐震挙動に関する模型実験及び不連続変形法を用いた挙動解析, 土木学会論文集 F6 (安全問題), Vol. 73, No. 2, pp. I_181-I_188, 2017
- ⑥ New, Z.Z., Awar, N.P.S., Cho, A.M., Aung, K.M., Koyama, M. and Kiyono, J.: Development of Damage Patterns and Fragility Curves in Brick-nogging Buildings

- from the Thabeikkyin Earthquake, Myanmar, 2012, Journal of Earthquake Engineering, pp.1-9, 2017.
- ⑦ Qian, Z., Ikemoto, T., Amiraslanzadeh, R., Miyajima, M. and Fallahi, A.: Out-of-plane Analysis of In-filled Brick Masonry Wall, Journal of Disaster Mitigation for Historical Cities, Vol. 10, pp.175-178, 2016.
- ⑧ Ikemoto T., Sakai H., Miyajima M. and Hashimoto T.: Seismic Performance of Masonry Wall Based on Shaking Table Test and Large Deformation Analysis, The 14th International symposium on Geo-Disaster reduction, I-10, 2016.
- ⑨ Achour, N., Pascale, F., Price, A.D.F., Polverino, F. Aciksari, K., Miyajima, M., Ozucelik, D.N., and Yoshida, M.: Learning Lessons from the 2011 Van Earthquake to Enhance Healthcare Surge Capacity in Turkey, Journal of Environmental Hazards, DOI:10.1080/17477891.2016.1139539, 2016.
- ⑩ Karimzadeh, S., Miyajima, M., Kamel, B. and Pessina, V.: A Fast Topographic Characterization of Seismic Station Locations in Iran through Integrated Use of Digital Elevation Models and GIS, Journal of Seismology, Vol. 19, pp. 949-967, DOI:10.1007/s10950-015-9505-0, 2015.
- ⑪ 西川隼人, 宮島昌克: 合成したサイト増幅特性による地盤増幅評価式の検討, 日本地震工学会論文集, Vol. 15, No. 4, pp.7_180-7_193, 2015.
- ⑫ Furukawa, A., Horikawa, R., Kiyono, J., and Toki, K.: Seismic Behavior Analysis of Masonry Structures Using the Distinct Element Method Considering Element Deformability, Journal of Natural Disaster Science, Vol.35, Nov.2, pp.43-53, 2014.
- ⑬ Amiraslanzadeh, A., Ikemoto, T. and Miyajima, M.: Study on Mechanical Interaction of Masonry Bricks and Mortar through Experimental and Numerical Analysis, International Journal of Civil Engineering Research (IJCER), ISSN 2278-3652, Vol.6, No.1, 1-8, 2015.
- ⑭ Ikemoto, T., Amiraslanzadeh, R. and Miyajima, M.: A study on Health Monitoring of Structural Damages for Two Stories Model by Using Vibration Test, Open Journal of Civil Engineering, Paper ID: 1880246, Vol.4, No.4, 2014.
- ⑮ 山口和輝, R. Amiraslanzadeh, 池本敏和, 深田幸史, 宮島昌克, 村田 晶: 煉瓦壁モデルの耐震補強効果に関する静的載荷実験, 歴史都市防災論文集, Vol. 8, 243-248, 2014.
- [学会発表] (計 30 件)
- ① 横瀬昂・山口謙太郎・小石咲樹・宮島昌克・池本敏和・吉田雅穂: イラン・聖ステファノス修道院の耐震性評価に向けた基礎的研究 その3 有限要素法解析による外周壁を含む建物の応答特性評価, 2017年度 第57回 日本建築学会九州支部研究発表会, 2018, 鹿児島県, 鹿児島.
- ② 森田高志, 池本敏和, 宮島昌克: 赤外線サーモグラフィーを用いたイラン聖ステファノス修道院の損傷評価の試み, 平成29年度土木学会中部支部研究発表会, 2018, 愛知県, 名古屋市.
- ③ 横瀬昂・山口謙太郎・小石咲樹・宮島昌克・池本敏和・吉田雅穂: イラン・聖ステファノス修道院の耐震安全性評価に向けた基礎的研究 その2 有限要素法を用いた外周壁付近の固有値解析による壁体の剛性評価, 日本建築学会 2017年度大会 (中国), 2017, 広島県, 広島.
- ④ 小石咲樹・山口謙太郎・横瀬昂・宮島昌克・池本敏和・吉田雅穂: イラン・聖ステファノス修道院の耐震安全性評価に向

- けた基礎的研究 その1 建造物各部の常時微動計測, 日本建築学会 2017年度大会 (中国), 2017, 広島県, 広島.
- ⑤ 増田景也, 古川愛子, 清野純史: インターロッキングブロックの形状が組積造壁の荷重-変位関係に及ぼす影響に関する研究, 第72回土木学会年次学術講演会, 2017, 福岡県, 福岡市.
- ⑥ Ikemoto, T., Hashimoto, T., Miyajima, M.: Damage and Deformation Analysis of Dry Stone Retaining Masonry in the Kumamoto Castle during the 2016 Kumamoto earthquake, Proceedings of 15th International Symposium on Geo-disaster Reduction, 2017, Shimane, Japan.
- ⑦ Ikemoto, T., Sakai, H., Miyajima, M. and Hashimoto, T.: Seismic Performance of Masonry Wall Based on Shaking Table Test and Large Deformation, The 14th International Symposium on Geo-disaster Reduction, 2016, Chengdu, China.
- ⑧ Miyajima, M., Inuyama, T. and Tsurugi, M.: Strong Ground Motion Prediction at the Monastery of St. Stephanos, The 2nd bilateral between Iran and Japan Seismology and Earthquake engineering of historical masonry buildings, 2016, Tabriz, Iran.
- ⑨ Ikemoto, T., Fallahi, A., Miyajima, M. and Yoshida, M.: Estimation of Dynamic Characteristics of Church and Surface Ground in the Monastery of St. Stephanos Using Microtremor and Shear Wave Velocity Measurements, The 2nd Bilateral between Iran and Japan Seismology and Earthquake Engineering of Historical Masonry Buildings, 2016, Tabriz, Iran.
- ⑩ Yamaguchi, K., Zamani, G., Arai, A., Naka, R. and Hanazato, T.: Classification and Effects of Strengthening and Retrofitting Techniques for Unreinforced Masonry Structures, The 2nd Bilateral between Iran and Japan Seismology and Earthquake Engineering of Historical Masonry Buildings, 2016, Tabriz, Iran.
- ⑪ 山口 謙太郎, 花里 利一, 前島 彩子, ザマニ アハリ ゴラムレザ, 中 遼太郎: 補強・修復技術の分類と効果, 日本建築学会大会構造部門 (壁式構造) パネルディスカッション, 「海外組積造住宅の地震災害軽減化とその課題」主題解説 (3), 2014, 兵庫県, 神戸市.
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
宮島 昌克 (MIYAJIMA, Masakatsu)
金沢大学・地球社会基盤学系・教授
研究者番号: 70143881
- (2) 研究分担者
池本 敏和 (IKEMOTO, Toshikazu)
金沢大学・地球社会基盤学系・講師
研究者番号: 60311677
- 清野 純史 (KIYONO, Junji)
京都大学・地球環境学系・教授
研究者番号: 00161597
- 鶴来 雅人 (TSURUGI Masato)
一般社団法人地域地盤環境研究所・地盤防災グループ・グループリーダー
研究者番号: 60450912
- 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: 9210723
- 山口 謙太郎 (YAMAGUCHI Kentaro)
九州大学・人間・環境学研究科(研究院)・准教授
研究者番号: 10274490
- (3) 研究協力者
Ali Ajami
Azarbaijan Shahid Madani University
Vice President
- Abdollahosein Fallahi
Azarbaijan Shahid Madani University
Assistant Professor