

イラン・聖ステファノス修道院における建造物 及び表層地盤の動特性評価

EVALUATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF BUILDING AND SURFACE GROUND AT ST. STEPANOS MONASTERY IN IRAN

池本敏和¹・A. H. Fallahi²・山口謙太郎³・宮島昌克⁴・吉田雅穂⁵
Toshikazu Ikemoto, Abdolhossein Fallahi, Kentaro Yamaguchi, Masakatsu Miyajima
and Masaho Yoshida

¹金沢大学講師 地球社会基盤学系 (〒920-1192 金沢市角間町)

Associate Professor, School of Geosciences and Civil Engineering, Kanazawa University

²アゼルバイジャン シャヒド マダニ大学准教授 土木工学科 (35 km. of Tabriz-Maragheh Road, Tabriz, IRAN)

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University

³九州大学准教授 都市建築学部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

Associate Professor, Department of Architecture and Urban Design, Kyushu University

⁴金沢大学教授 地球社会基盤学系 (〒920-1192 金沢市角間町)

Professor, School of Geosciences and Civil Engineering, Kanazawa University

⁵福井工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (〒916-8507 鯖江市下司町)

Professor, Department of Civil Engineering, National Institute of Technology, Fukui College

Currently, 60% of the world's population resides in masonry structures, several of which are constructed using bricks of inferior quality. While inexpensive to construct, masonry structures are vulnerable to earthquakes. Herein, we studied the microtremors of the church and its towers at the Saint Stephanos Monastery in Iran. We also analyzed the subsurface characteristics using microtremors measurement and shear wave velocity by using the refraction method for elastic wave exploration by the stochastic green function method. We used these results to discuss the dynamic characteristics of the church building and its towers at the Saint Stephanos Monastery.

Keywords : *microtremor measurement, masonry structure, inferior quality brick, Saint Stephanos Church*

1. はじめに

世界の人口の約60%の人々は低品質のレンガ建造物に住んでいる¹⁾。また世界の地震大国では、社会・経済的な面から大都市の地震対策が進められている一方、地方都市の耐震化が進んでおらず、小規模の地震でも建造物および人的被害が発生する地域が多数存在する²⁾。プレートで挟まれたアジア諸国としてイラン、トルコ、ネパール、インドネシア等が挙げられる。その中のイランは、ユーラシアプレート、アラビアプレート、インド・オーストラリアプレートのプレートがぶつかり合う地域に位置している。地震の発生頻度の高い上位8ヶ国の地震頻度と被災死亡者数の関係を図1に示す。同図より、イランと日本の地震発生頻度は同程度であるものの、被災死亡者数に注目するとイランの方が圧倒的に多いことがわかる。このような国では耐震的に脆弱なアドベ(日干しレンガ)などの低品質レンガ建造物の住家が多いことから、建造物が壊滅的な被害を受ける。このような建造物に住む住民が被災するため被災死亡者数が増加すると考えられる。

近年発生した大きな地震災害として、2017年11月12日に発生したケルマンシャー地震や2003年12

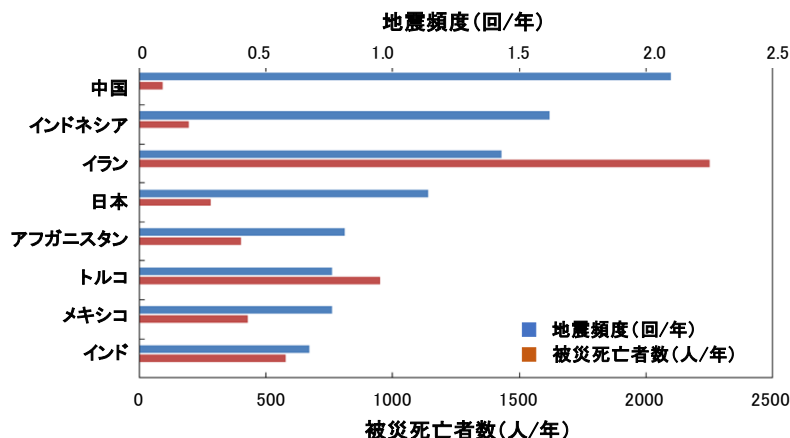


図1 地震頻度と被災死者数の関係¹⁾

月26日に発生したイラン・バム地震³⁾が挙げられる。後者の震源地はイラン南東部のバムであり、地震の規模を表すマグニチュードは6.6、揺れの大きさはEMS98震度階（EU諸国で用いられている震度階で、ほぼMMIに相当）では、断層近傍付近で最大のIXと推定されており、これは日本の気象庁震度階で5強から6弱に相当する。この地震による死者は27,200人、負傷者は14,300人であり、死者数はバム市内の人口の約3割に相当する。バム市の旧市街地に分布しているアドベ建造物の倒壊被害が多く報告されており、世界最大のアドベ建造物群である「アルゲ・バム」も壊滅的な被害を受けた⁴⁾。

本研究では、世界遺産に登録されているイラン・聖ステファノス修道院⁵⁾を対象とし、1) 修道院内の教会部とタワー部において常時微動計測を行い、建造物の振動特性を解明する。また、2) 建造物周辺地盤上の常時微動観測及び弾性波探査による地下構造推定、3) 経験則から推定された地震動特性、これら1) から3) を比較、検討を行うことで、聖ステファノス修道院内の建造物の地震時動特性の評価を行うことを目的とする。

2. 常時微動計測について

聖ステファノス修道院は、9世紀に創建された教会であるが、現在残っている遺構は過去の度重なる地震のあとに15世紀に再建されたものである。風化や地震などの影響よりレンガとモルタル接着部の劣化が進行しており、今にも崩れ落ちそうな箇所も見られた。また、建造物の内部、外部ともに多数のひび割れが存在した。修復した形跡が見られ、幾度も表面の化粧直しが行われている。また、建造物に対する大規模な補強工事などは行われておらず、建造物の振動特性の把握及び地盤のそれを検討を行うことは耐震工学上有益であると考えられる。

本研究では、聖ステファノス修道院（図2参照）の中にある教会部（写真1参照）、タワー部（写真2参照）に注目し、2棟の常時微動計測を行った。教会部における速度計設置箇所は、地盤上（A点）、1階床レベル（B点：地面上にベタ基礎になり、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。建造物はEW方向、NS方向に沿って建立されている。EW方向とは教会建造物の長辺側、NS方向は短辺側を表



写真1 教会正面

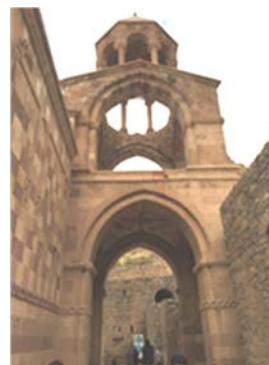


写真2 教会横のタワー部

す。また、教会の南側には写真2(a)、(b)のようなタワーが隣接しており、同様に計測を行った。

事前に対象建造物の実測及び柱や壁、屋根形状などを調査した後、常時微動計測に用いたサーボ型速度計（東京測振社製SPC-35E:記録範囲0.1~70Hz）の設置場所を検討し、表層地面上、各階の床や屋根上に建造物に直行する水平2成分を設置した。教会の断面図及び速度計の位置を図3及び補足平面に示す。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。タワーの水平構面をなす床には、「北+南」、「東+西」の2パターンの速度計を設置した。これは方向別による振動性状の差異、すなわちタワーのねじれを確認するものであるが、2パターンともに同位相で揺れていることが明らかであったため、本研究ではねじれの議論を省略する。

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

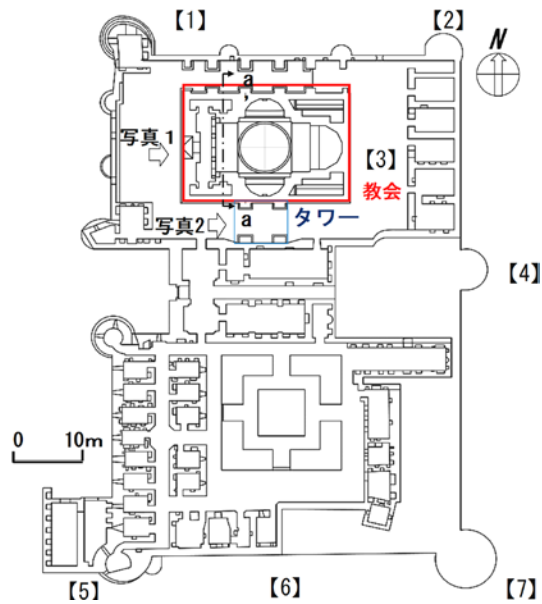


図2 聖ステファノス修道院の平面図及び地盤上の常時微動計測位置

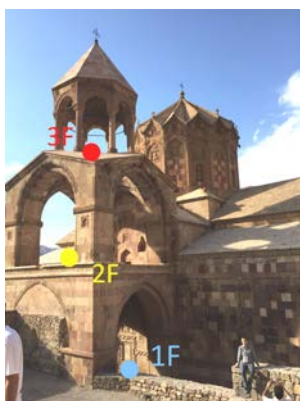


写真3 タワー部3階床における速度計の設置箇所

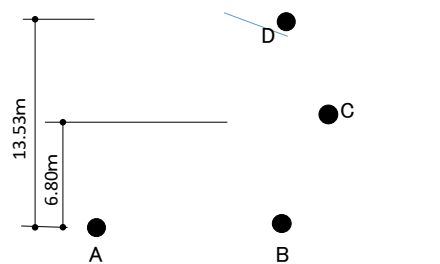


図3(a) 教会の a-a' 断面図及び速度計 (A から D) の位置図

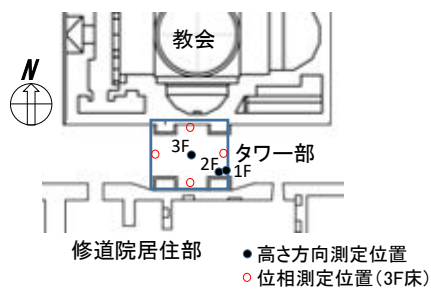


写真3の補足平面

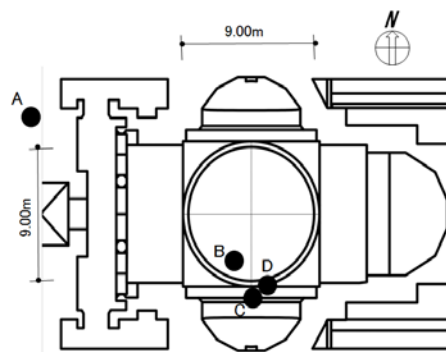


図3(b) 教会の平面図及び速度計の位置図

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。

3. 建造物の計測結果及び考察

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スペクトルを建造物前面の地盤上に設置した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 4 に示す。H/H スペクトル比は、EW 方向、NS 方向ともに求めた。H/H スペクトル比とは、建造物の同一方向における上階のスペクトルを下階のスペクトルで除したもので、上下階の各振動数における伝達特性を表すものと考えられている。各建造物の一次、二次の固有振動数を表 1 にまとめる。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、タワー部における卓越振動数を求めると表 1 中の赤茶色ようになった。タワー部の EW 方向とは傾斜方向に対して直角方向である。タワー部の一次固有振動数は 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。EW 方向には隣接の建造物がないものの、若干高め振動数となった。NS 方向における二次の固有振動数には 5.1Hz にピークが EW 方向においては、7.2Hz のピークが認められる。

このことは、8Hz 程度の高振動数を含む地震動が来襲すれば、タワー部の EW 方向が共振する可能性のある。また、日本における層せん断力の算定では、RC3 階建ての一般建築物（高さ：20m）の場合、一次固有振動数は 2.4Hz（ $0.41\text{sec} = 0.02 \times 20\text{m}$ ）である。これと比較すると、タワー部の EW 方向の振動数は 1.7 倍（ $= 4.1/2.4$ ）と高い振動数であることがわかる。

4. 研究対象地周辺の振動特性

(1) 周辺地盤における常時微動計測

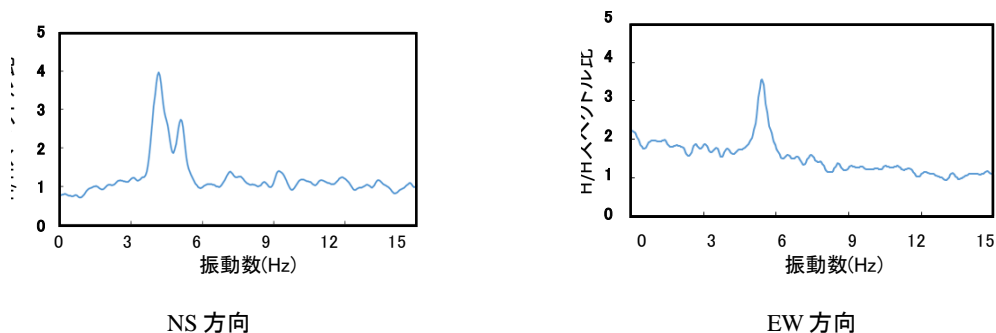


図 4 H/H スペクトル比

表 1 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

次に、建造物の常時微動と同様に周辺地盤の常時微動の計測を行った^{6),7)}。計測及び解析の方法は建造物の計測と同様である。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出来ない14時～15時の間と早朝、夜中に計測を行った。計測点は図2中の【 】で示した位置である。各測定点における地盤の固有振動数の結果を表2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振動数は概ね8.2Hz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。このようにイラン・聖ステファノス修道院の建っている場所は硬い地盤の場所と言える。また、建造物（教会）の固有振動数と地盤のそれは一致していないことが明らかとなった。

(2) 弾性波探査の観測結果

修道院の周辺における箇所屈折法弾性波探査⁸⁾を行った。図5中に測定の側線を破線で示す。このとき、測定は傾斜地形の大きくない東西側線に沿って、間隔5mごとにピックアップを置いた。測定点から5mの位置に枕木を置き、ハンマーで打撃することで波形を生成し、各点での振動を測る方法である。測定機器は応用地質社製のジオフォン（McSEIC-3.MODEL-1817）である。測定は西から東、その逆の方向で往復で行った。北側の側線における走時曲線の結果を図6に示す。走時曲線の傾きの逆数がせん断波速度であることは周知のことである。表層モデルを考え、走時曲線の傾きから北側の表層地盤のせん断波速度を表3に求めると333m/sが得られた。また、南側の表層地盤のせん断波速度は341 m/sであった。

表2 各測定点における地盤の固有振動数

測定点	固有振動数 (Hz)
1	8.0
2	8.2
3	8.2
4	8.0
5	8.3
6	8.3
7	8.3

(3) 地下構造推定

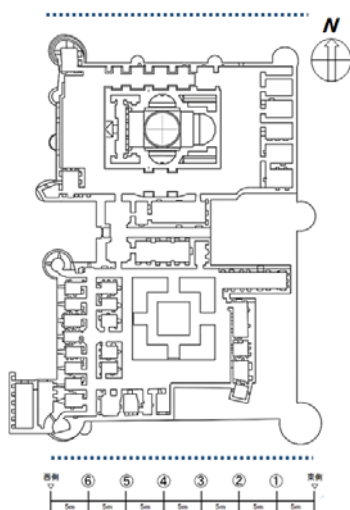


図5 屈折法弾性波探査の観測の場所

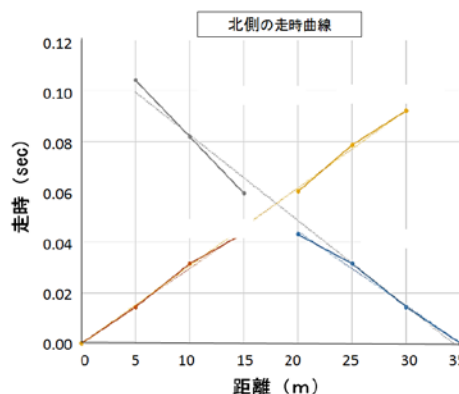


図6 北側の側線における走時曲線

表2 修道院周辺地盤のせん断波速度

地点	せん断波速度 (m/s)	固有振動数 (Hz)	層厚 (m)
北側側線	333	8.3	10.0
南側側線	341	8.3	10.2

(2)より得られた結果から、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程度、南側のそれは10.2mとほぼ同程度の結果が得られた。表層地盤の下層は岩盤であり、工学的基盤とみなせる。

5. 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 North Tabriz 断層が存在し、この断層による地震が発生したときに最大規模な地震動が修道院を襲うと考えられる。そこで本研究では、入倉らの「強震動予測レシピ」^{9),10)}を基に強振動予測を行った。断層破壊の総面積およびアスペリティの総面積は地震モーメントに関して一定のスケーリング則で位置づけられており、断層パラメータに関して大別すると2つのスケーリング則で表される。特性化震源モデルの設定では、断層全体の形状や規模を示す巨視的震源特性と、主として震源断層の不均質性を示す微視的震源特性を設定する。

ここで想定した断層モデルは、イラン北東部のイラク国境をまたいだ北西から南東に延びる断層である。アスペリティモデルを図7のように仮定した。

地震動を作成する際に考慮する特性として、一般的に震源特性と伝播経路特性と地盤増幅特性の特性がある。ここで、伝播経路特性に関しては、鶴来らの既往の研究¹¹⁾を利用する。本研究では、犬山、宮島、鶴来¹²⁾による強震動推定を行った。

図7の破壊開始点R2、R3の推定結果を図8に示す。図8(a)は推定地震動、(b)は推定地震動のフーリエスペクトルである。フーリエスペクトルより、複数のピークが得られており、このピーク時の振動数と建造物や地盤との固有振動数が合致するかを検討する。聖ステファノス修道院の教会、タワーの常時微動H/Hスペクトル比を計測し、教会のEW方向の固有振動数は4.2Hz、NS方向のそれは5.4Hz、タワーの一次固有振動数はEW方向で4.1Hz、NS方向で約4.2Hz、二次固有振動数はEW方向で7.2Hz、NS方向で5.1Hzであった。また修道院の敷地内、教会の周辺地盤の固有振動数はH/Vスペクトル比から約8.2Hz、弾性波探査における地盤構造の推定結果から、聖ステファノス修道院の周辺地盤での地盤の固有振動数は約8.3Hzであった。さらに、推定地震動の振動数が図8のスペクトル図には8.2Hz付近にもピークが認められる。

したがって、修道院敷地内までは8.3Hzの高振動数成分を含む最大加速度が約130cm/s²の地震動が襲来する可能性がある。構造物と隣接しないタワー部のEW方向の二次固有振動数は7.2Hzであることから地盤との共振も視野に入れる必要がある。一方、建造物の一次固有振動数は約4.1Hzから5.4Hzと表層地盤までのそれとは合致していないことがわかった。しかしながら、1) 最大加速度が130cm/s²

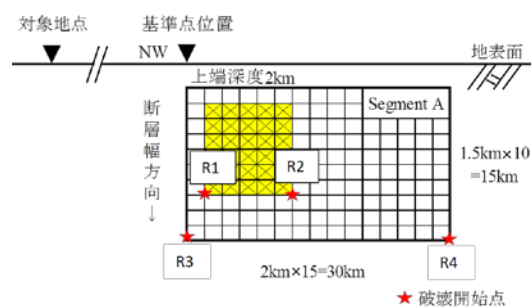
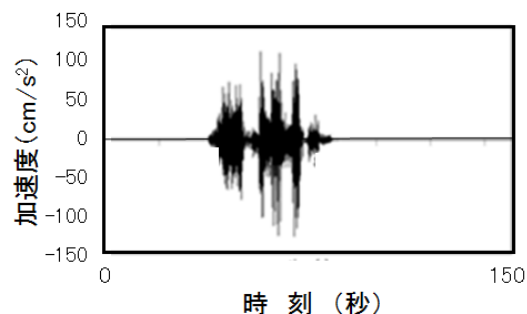
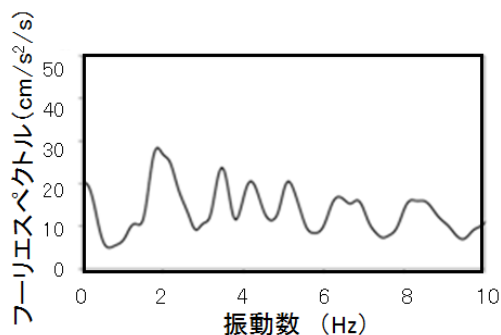


図7 アスペリティの設定



(a) 加速度時刻歴(m/s²)



(b) フーリエスペクトル (m/s²/s)

図8 推定地震動の特性

地震動が建造物に作用することが推定されたこと、2) 建造物の柱や壁は低品質のレンガで造られており、十分な耐震機能を期待できないこと、3) 図8. (b)から、推定地震動には4.2Hz、8.3Hzの成分も存在している。以上のことから、早急な建造物自身における耐震強度の詳細調査が必要であると考えられる。現在、赤外線サーモグラフィ観測による建造物の強度低下の場所を推定している段階にある。

6. 結論

本研究では、イランの歴史的建造物である聖ステファノス修道院において、1) 常時微動を計測することで建造物の振動特性を明確にするとともに2) 地盤の計測結果と3) 地震動推定の成果をもとに低品質なレンガ建造物の耐震性の評価を行った。

聖ステファノス修道院では教会部分、タワー部分の計2棟に着目して常時微動の計測を行った結果、教会部分では固有振動数がEW成分で4.2Hz、NS成分で5.4Hzという結果が得られた。タワー部分では、一次固有振動数がEW成分では4.1Hz、NS成分では4.2Hz、二次固有振動数がEW成分では7.2Hz、NS成分では5.1Hzであることがわかった。また、聖ステファノス修道院周辺地盤の常時微動計測の結果は、固有振動数が8.3Hzと日本の道路橋示方書のI種地盤に相当するため強固な地盤であると推測される。

地震動推定の結果、推定地震動とフーリエスペクトルから複数のピークが得られた。地震動の固有振動数と地盤のそれが共振した場合、増幅した地震動の揺れが建造物に伝わると考えられる。すなわち、修道院敷地内までは8.3Hzの高振動数成分を含む最大加速度が約130cm/s²の地震動が襲来する。建造物（教会）の固有振動数は約4.1Hzと表層地盤とは合致しないことがわかった。しかしながら、建造物には十分な耐震機能を期待できないこと、建造物に130cm/s²の地震動加速度が作用することが推定された。したがって、地盤とタワー部の2次振動数に注目しつつ、建造物に隣接しないEW成分の地震時耐震性を検討する必要がある。

一方、建造物には耐震補強は一切なされておらず、ひび割れやレンガの崩落などの劣化が既に確認できることから、建造物倒壊の危険性があると考えられる。そこで、早急な建造物自身における耐震強度の詳細調査が必要であると考え、赤外線サーモグラフィ観測による建造物の強度低下がある場所の推定を実施している段階である。また、建造物のモデルを作成し、地震動推定の結果を用いた聖ステファノス修道院の動的解析を行い、計測結果と比較を行う予定である。同時に、耐震強度の詳細調査を行うことで、必要な個所における対策案を現地の大学、市の教育委員会及び州の文化財保護機関と連携を図りながら、共同研究を進める予定である。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、現地の測定にあたり、本学学生及び Azarbaijan Shahid Madani 大学の学生諸氏に、また5章、地震動推定では、(一財)地域地盤環境研究所・鶴来雅人博士の協力を得たことに謝意を表します。本研究はJSPS 科研費 18H01526、18H01677 助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 目黒公郎：2005年パキスタン北部地震による一般住宅の被害と簡便で低価格な耐震補強法の提案，自然災害科学，JJSNDS25-3381-392，381-392，2006.
- 2) Akhaveissy AH, Lateral strength force of URM structures based on a constitutive model for interface element, American Journal of Solids and structures, 8, 445-461, 2011.
- 3) 高田至郎・楢田泰子：2003年イラン・バム地震の特徴と課題，シンポジウム「近年の国内外で発生した大地震の記録と課題」，pp.35-40，2006.
- 4) UN Office for the Coordination of Humanitarian Affairs(UN Office) for the Coordination of Humanitarian Affairs :
Iran-Earthquake OCHA Situation Report No. 14, Date: 9 Feb 2004.
- 5) UNESCO, Armenian Monastic Ensembles of Iran, <http://whc.unesco.org/en/list/1262> (access to 20th/April/2018)

- 6) Jafar Karashi : Results of Microtremor Measurements to Determine Soil Dynamic Characteristics at Saint Stephanos Church-Jolfa, 2015.
- 7) Jafar Karashi : Results of microtremor measurements at Saint Stephanos Church, Jolfa-Iran, 2015.
- 8) Richart, F. E., Woods, R. D., and Hall, J. R. : Vibration of soils and foundations, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1970.
- 9) 釜江克宏・入倉孝次郎・福知保長：地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測 統計的波形合成法による予測, 日本建築学会構造系論文報告集, No.430, 1-9, 1991.
- 10) 入倉孝次郎：強震動予測レシピ, http://www.kojiro-irikura.jp/pdf/kyoushindouyosoku_recipe.pdf, 2015/05/25 アクセス.
- 11) 鶴来雅人・田井優・入倉孝次郎・古和田明：経験的サイト増幅特性評価手法に関する検討, 地震, 第2輯, 第50巻, 215-227, 1997.
- 12) 犬山達也・宮島昌克・鶴来雅人：イラン「聖ステファノス修道院」周辺地盤の強震動推定, 平成28年度土木学会中部支部研究発表会, I-025, 49-50, 2016.