激しく劣化・損傷した軍艦島 30号棟の振動センシング

VIBRATION SENSING OF BUILDING 30 SEVERELY DETERIORATED AND DAMAGED IN GUNKANJIMA

濱本卓司 — * 1 関根明日香 — * 2
富岡昭浩 — * 3 大胡拓矢 — * 3

Takuji HAMAMOTO — * 1 Asuka SEKINE — * 2
Akihiro TOMIOKA — * 3 Takuya DAIGO — * 3

キーワード：
軍艦島モニタリング, 振動センシング, 30号棟, 特異値分解,
スペクトログラム, 伝達関数

Keywords:
Gunkanjima monitoring, Vibration sensing, Building 30, Singular value
decomposition, Spectrogram, Transfer function

Dynamic behaviors of building 30 severely deteriorated and damaged are investigated by processing acceleration data acquired by the vibration sensor network in Gunkanjima. Long-term and short-term variations of the vibrational characteristics of building 30 have been evaluated by singular value decomposition and spectrogram, respectively. It is observed that predominant frequencies change unsteadily as a time-variant system depending on damage evolution and external environment during long-term and short-term monitoring even in normal time.

1. はじめに

軍艦島（正式名称は端島）で最初の鉄筋コンクリート造鉤員アパートが建設されてから 100 年を超える歳月が流れた¹⁾。閉山後 40 年以上たち、放置されていた建築群はいずれも劣化・損傷が進行し、すでに崩壊過程にある建物も少なくない^{2), 3)}。30号棟は其中でも最も古い建物であり、場所も島の南端に近く、塩害とともに風雨や波浪の度重なる作用により極度に劣化・損傷が進行している。多くの柱と梁は鉄筋腐食による割裂破壊を生じており、大きなきれつが随所に入り、被りコンクリートだけでなくコアコンクリートまで剥落して著しい断面欠損が生じている。さらに、南東側と南西側の内部では多くの床スラブの崩落が発生している。

30号棟の振動センシングを始めてから 2 年間経過したが⁴⁾、この間に隣県では一連の熊本地震が発生した。軍艦島では最大でも震度 3 を上回ることにはなかったが、余震活動の期間が長かっただけにその影響が懸念された。また、同年の夏には、九州南方海上に停滞していた大型台風の影響で長雨が続き、雨水がきれつから劣化コンクリート内に浸潤して重量を増し、南東側の内部で複数スパン・複数層にわたる大規模な床崩落が連鎖的に発生した。外側から見る限り南東側に顕著な変化は見られないが、その内部では梁を巻き込んだ床崩落により壁面一枚で自立しているような大空間が形成された。

劣化・損傷が進行している 30号棟では、状態変化が加速化し、2 年間といえども、その間に生じた変化は決して小さなものではない。本報告では、この 2 年間における 30号棟の変化を島内に構築した振動センサネットワークの加速度データを用いて検討する。

2. 閉山前後の状況

30号棟は 1916 年にまず鉄筋コンクリート造 4 階建て・地下 1 階（南西側の一部のみ）として建設され、すぐに 3 階増築して鉄筋コンクリート造 7 階建てになった。30号棟の各階平面図と南東・南西立面図を図 1 に示す。図 2 の標準階梁伏図に示すように、4 つの

矩形ラーメン構造を巴形に連結することにより、中庭をもつ「ロ」の字形平面を形成している。大梁が柱に接合せず、別の大梁と T 字継手で接合している箇所が各階に複数ある。また、廊下・土間と居室のレベル差をとるために逆梁が使われている。玄関は北西側 1 階にあるが、1 階と 2 階を除くすべての階は北東側の空中廊下で岩山方向から出入りできる。各階の廊下が中庭をぐるりと取り巻き、階段が南西側に設けられている。

すでに 100 年以上が経過し、建物全体で劣化・損傷が激しいが、その傾向はとくに風雨に曝されやすい南東側と南西側で顕著である。岩山を背にした北東側と隣接する 31 号棟に守られた北西側は、相対的にはあるが南東側と南西側に比べて損傷程度が小さい。30号棟は閉山まで補修と補強が繰り返され、1954 年には 4 階以下で大規模な柱の巻き立て補強が行われている。写真 1 に示すように、外壁面だけでなく中庭に面した柱も風雨に曝され劣化・損傷が激しい。

1974 年の閉山以前でも劣化・損傷はかなり進行していたと予想されるが、人がいなくなった閉山後はさらに進行し、南東側と南西側の床が複数個崩落している。振動センサネットワーク構築以前に生じていた床崩落の状況を写真 2 に示す。床崩落の発生は逆梁周辺に集中している。西隅に設置された共同トイレ部分は大きく海側に傾斜している。その部分の屋上に生じたきれつを写真 3 に示す。

3. 振動センサの設置

30号棟の 1 階は足の踏み場もないほど瓦礫で埋まっていたため、1 階は瓦礫の少ない中庭中央に 1 基置き、2 階と 7 階の各隅に 1 基ずつセンサを設置して、計 9 基のローカルネットワークを構成した。振動センサの配置を図 3 に示す。巴形を形成する 4 ブロックの端部に 1 基ずつ置くことを原則としたが、南隅と東隅は床の崩落個所が多く危険なため、端部にできるだけ近い柱際のスラブ上に設置した。

ハブステーションは 7 階の北隅に設置し、通信ケーブルにより 9 基のセンサと並列配線した。1 階と 2 階への配線は中庭の吹き抜け

¹⁾ 東京都市大学 名誉教授・工博
(〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)
²⁾ 東電設計 (元東京都市大学大学院生)
³⁾ 日本航空電子工業

¹⁾ Emeritus Prof., Tokyo City Univ., Dr. Eng.

²⁾ TEPCO, Formerly Graduate Student of Tokyo City Univ.
³⁾ Japan Aviation Electronics Industry

空間を利用した。30号棟計測用の太陽光パネルは、当初、30号棟屋上に設置することを考えたが、崩壊の可能性があることと、陸屋根で強風により吹き飛ばされてしまう危険性が高いことから、ペントハウス、パラペット、煙突などを風除けとして利用できる31号棟屋上に設置場所とした。電源ケーブルは31号棟の太陽光パネルから空中配線（棟間約5m）して30号棟7階のハブステーションに接続した。通信ケーブルは、ハブステーションから31号棟南側のペントハウス底上に設置したLTE通信用無線ルーターまで空中配線して携帯電話網につなげた。2時間ごとに10分間の定時計測を継続している。サンプリング振動数は100Hz、計測レンジは $\pm 2G$ 、ノイズレベルは1 $\mu Grms$ 、AD変換器の分解能は16bitである。AD変換器の入力レンジを $\pm 100mG$ に設定し微動計測を行っている。

4. センサネットワーク構築後の状況

2015年10月に30号棟内部にセンサネットワークを構築してからこれまでの間に、熊本地震の発生と30号棟南東側周縁部の床大崩落という2つのエポック的な事象が発生した。

2016年4月に隣県で発生した熊本地震は、4月14日に震度7の

前震、4月16日に震度7の本震、その後も震度6強の余震が2回、震度6弱の余震が3回続き、活動がやや沈静化してきたのは6月に入ってからだった。軍艦島での揺れは本震のときでも震度3程度にとどまり、あとは震度2以下で島内の建築群には表立った被害は見られなかった。軍艦島モニタリングで使用したセンサにはトリガーをかけておらず、熊本地震の主要な前震・余震は記録されていないが、たまたま定時計測中に余震が含まれていた計測データもある。

2016年8月末から9月初めの間に、30号棟の南東側周縁部で複数層・複数スパンにわたる床大崩落が発生した。このとき、台風10号が九州南方海上に数日間停滞して長期間雨天が続き、太陽光パネルで充電した電源が底をつき、正確な床崩落の日時は特定できなかった。台風10号は8月21日に高緯度で発生した後、西寄りに進み、海水温の高い海域で停滞して異例の長寿台風となった。その後、進路を東寄り、さらに北西へと変えて8月30日に大船渡に上陸し、東北地方に深刻な水害をもたらした。床大崩落の原因は、台風停滞時の長雨により雨水が徐々に劣化コンクリートに浸潤し、重量を増した床や梁が連鎖的な自重崩落に至ったものと考えられる。

床大崩落による外壁面への影響は外側からはっきりとは認められ

(a) 2-9階平面

(c) 南東立面

図2 30号棟の標準階梁伏図

(b) 1階平面

(d) 南西立面

図1 30号棟の平面図と立面図

図3 センサの設置位置

写真1 中庭に面した柱（2015/6/8撮影）

写真2 床大崩落前の状況（2015/6/8撮影）

写真3 屋上西隅の亀裂（2015/6/8撮影）

なかったが、写真4に示すように、建物の内側から見ると複数のスパンで数層にわたり床が崩落していることがわかった。床大崩落以前に先行して起こっていた数カ所の床崩落に比べて規模が大きく、梁も巻き込んで崩落し、南東側の外壁は板一枚で自立しているような状態になった。床大崩落により当該部分の質量と剛性は大きく変化したことが予想される。

5. データ処理と検討

劣化・損傷による建物の変化を追跡する上で2年間は短かすぎるともいえるが、ここでは熊本地震と床大崩落の二つの事象の前後を含めた期間に記録された加速度データを用いて、この期間中の動的挙動を再現し、振動特性の変化について検討する。

計測期間中に記録された加速度データに特異値分解を適用し、異なる時期における卓越振動数の長期的な変化を追跡した結果を図4に示す。特異値分解はすべてのセンサで記録された10分間の応答のパワースペクトルとクロススペクトルを用いた相関解析である⁵⁾。建物の振動状態を大局的に把握したいときに有効で、少数のセンサが故障していても建物全体としての挙動を把握できる点で実用的な価値がある。ピークとして現れるのは入力特性と構造特性を反映した卓越振動数である。特異値分解の結果から、30号棟は劣化・損傷が進行して構造体としての一体性を喪失しており、卓越振動数を明確には特定できなくなっていることがわかる。卓越振動数らしきものがあっても、その振動数は計測のたびに大きく揺らいでいる。激しい劣化・損傷の進行に伴う応力再配分により、卓越振動数が長期的に大きく変化する時変システムになっている。

10分間の加速度時系列のスペクトログラム(x成分)を求めることにより、熊本地震前、熊本地震後～床大崩落前、床大崩落後の3時期の計測時間中における短期的な卓越振動数の変化を追跡した結果を図5に示す。スペクトログラムは計測時間中のパワースペクトルの変化を図化したものである⁶⁾。計測時間中、卓越振動数が一定で変化がなければ、その振動数は構造物全体あるいは部分の固有振動数である可能性が高い。スペクトログラムにはいくつかのピークが見られるが、時間によりピーク振動数が変化しないものがある一方、時間とともにゆっくりと変化するピークもある。30号棟は短期的に見ても外力条件に依存して固有振動数が変化する時変システムになっている。また、3時期ともに、建物の対角位置にある東隅と西隅に置いたセンサのスペクトログラムの形状が似ているという特徴が見られる。

センサ位置におけるx-y平面とx-z平面の変位リサージュの例を図6に示す。変位リサージュを見ると、水平振動よりも鉛直振動の方が大きくなり、東隅と西隅での揺れが北隅と南隅での揺れに比べて卓越する特異な揺れになっている。健全な建物であれば水平振動に比べ鉛直振動ははるかに小さいはずであり、鉛直支持部材である柱の劣化・損傷と床崩落による柱の長柱化が進行していることを示唆している。スペクトログラムの結果同様、東隅と西隅のリサージュの形状はよく似ており相関性が強い。岩山方向に連絡橋でつながれた北隅は拘束効果が大きく、東隅と西隅は主に南隅を介して振動していると考えられる。南隅の振動は東隅と西隅に比べ、揺れが小さくなることもあれば、東隅と西隅の振動に同調して大きくなることもある。南東側と南西側が一緒に大きく揺れ、北東側と北西側が

相対的に小さな揺れになる傾向が徐々に強まっている。

特異値分解あるいはスペクトログラムに現れるピーク振動数がどのようなメカニズムで生じるのかを検討するために、各センサの入出力関係を四隅における2階に対する7階のスペクトル比として求めた結果を図7に示す。3時期の伝達関数をx, y, z全成分について

写真4 床大崩落後の状況 (2016/9/27 撮影)

図4 特異値分解による卓越振動数の長期的変化の追跡

(a) 熊本地震前 (2016/4/10)

(b) 熊本地震後～床大崩落前 (2016/6/8)

(c) 床大崩落後 (2016/10/11)

図5 スペクトログラムによる卓越振動数の短期的変化の追跡 (x 成分)

x-y 平面

(a) 熊本地震前 (2016/4/10)

(b) 熊本地震後～床大崩落前 (2016/6/8)

(c) 床大崩落後 (2016/10/11)

x-z 平面

(a) 熊本地震前 (2016/4/10)

(b) 熊本地震後～床大崩落前 (2016/6/8)

(c) 床大崩落後 (2016/10/11)

図 6 3 時期における水平・鉛直変位リサージュの変化

(a) 熊本地震前 (2016/4/10)

(b) 熊本地震後～床大崩落前 (2016/6/8)

(c) 床大崩落後 (2016/10/11)

図7 3 時期における 30 号棟の増幅特性の変化

示したが、いずれの成分も卓越振動数は同じである。すなわち、建物全体が 3 次元的に揺れており、その卓越振動数は劣化・損傷の進行と外力条件に応じて不安定に変動している。東隅と西隅の増幅は大きい、北隅と南隅の増幅は相対的に小さい。ただし、南隅は東隅と西隅の揺れに追従して増幅するときもある。劣化・損傷が激しく進行した 30 号棟の揺れは、東隅と西隅での 3 次元的な増幅が支配的になっていることが伺われる。

6. 結び

軍艦島の鉄筋コンクリート建築群の中では最も古く、劣化・損傷が極度に進行している 30 号棟は、外観からはまだしっかりと自立しているように見えるが、内部では崩壊が始まっている。本報告では、振動センサネットワークを 30 号棟に構築してから約 2 年間にわたり動的挙動の変化を追跡した結果を示した。熊本地震と床大崩落という 2 つの大きな事象がこの期間で発生したが、その動的挙動への影響は単に固有振動数が一方向に増減したというような単純なものではない。損傷・劣化の進行とともに応力再配分を繰り返しながら構造システムが徐々に変化しているように見える。建物全体としての挙動は、南東側と南西側の揺れが北東側と北西側の揺れに比べて大きくなる傾向が強まっている。2 年間という計測期間で将来予測を行うことには無理もあるが、このまま劣化・損傷が進行すれば、初めに南東側と南西側が崩壊し、北東側と北西側が L 字形に残存する可能性が高い。30 号棟は軍艦島全体のシルエットに大きく寄与していることを考えると、北東側と北西側を残存させる方策を考える余地があるかもしれない。

軍艦島モニタリングは、従来のモニタリングの環境では得られなかった建物の挙動と状態に関する生きたデータを提供し、その取得データに基づいたデータ駆動型の建築構造解析という新たな学術領域を切り開く可能性をもっている。

謝辞

本報告で紹介した軍艦島モニタリングは、科学研究費補助金基盤研究 (B)「想定外事象に対するネットワーク異常検知システムの軍艦島における実証的研究 (研究代表者: 濱本卓司)」の補助を受けて行われた。島内での機器設置と計測には長崎市の協力を得た。写真は長崎市の特別な許可を得て撮影した。

参考文献

- 1) 阿久井喜孝, 滋賀秀實 (編著): 軍艦島 実測調査資料集, 東京電機大学出版局, 1984.3
- 2) 日本建築学会軍艦島コンクリート構造物劣化調査 WG: 軍艦島コンクリート構造物の劣化調査報告書, 2013.3
- 3) 濱本卓司ほか: 台風通過時の軍艦島 70 号棟における振動センシング, 日本建築学会技術報告集, Vol. 24, No.58, 957-962, 2018.10
- 4) 濱本卓司ほか: 想定外事象に対する建築群変化検知システムの軍艦島における実証実験, 日本建築学会技術報告集, Vol. 24, No.57, 553-558, 2018.6
- 5) Batel, M.: Operational Modal Analysis — Another Way of Doing Modal Testing, Sound and Vibration, pp.22-27, 2002.8
- 6) Signal Processing Toolbox User's Guide, The MathWorks, 2016

[2018 年 6 月 4 日原稿受理 2018 年 7 月 31 日採用決定]