

倉吉市旧明倫小学校円形校舎の構造特性に関する研究

—第1次診断と微動観測について—

Study on Structural Characteristics of Old Meirin Circular Type School Building in Kurayoshi City about First Diagnosis and Microtremor Measurements

野村直樹¹・定村泰房²

Naoki Nomura and Hironobu Sadamura

¹特定非営利活動法人文化財修復構造技術支援機構 (〒571-0067 大阪府門真市石原町19-24)

NPO Agency for Supporting-Partners of Structural Engineering for Conservation of Historical Cultural Properties

²関西大学大学院博士課程前期課程 理工学研究科環境都市工学専攻 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

Master's Program, Graduate School of Kansai University, Science and Engineering, Environmental and Urban Engineering Major

Circular school buildings were constructed by Kanao Sakamoto in the latter half of 1940, while it was necessary to secure classrooms as the number of children increased due to the post-war baby boom. Circular school buildings have spread nationwide due to the low quantity of materials and cost savings. However, in recent years many circular school buildings have been demolished due to deterioration, but the Old Meirin Elementary School circular school building in Kurayoshi City was hardly damaged by the large earthquake. Therefore, in this paper, we evaluate the structural performance of the building and consider that it will lead to the preservation of the circular school building.

Keywords: Round school building, Circular plane, Radial earthquake resistant wall, Sakamoto Kanao,

1. はじめに

円形校舎は廊下や階段の共用部が少ないこと、平面が円形をした建物で外壁面積が同じ床面積の矩形平面の建物よりも少なくコストが低い等の合理的な設計をされた建物である。1940年代後半の第一次ベビーブームにより子供が増加し、それに伴い学校施設の需要が増え、この時に円形校舎が教室棟の確保のために坂本鹿名夫により多くの円形校舎が建設された。戦災復興期であるため、十分な敷地を確保することは困難であり、そのため狭小な敷地においても建設できる円形校舎¹⁾は、戦後の日本の文化として重要な建物であると考えられる。

しかし、少子化に伴う小学校等の統廃合などにより、施設が使用されなくなったり、もしくは30~50年程度経過しているようなから老朽化などの理由で取り壊される事例があり、近畿に9棟存在していた円形校舎が現在は4棟の半分に減少している。

近年では地域の卒業生が母校の円形校舎を保存するための活動が行われることもあることから、円形校舎の構造特性について確認することは保存・利活用するうえで重要である。

2. 研究目的

円形校舎を保存を進めるうえで、歴史的研究は進んでいるが、構造に関する調査・研究が少ない。そこで今回鳥取県倉吉市の旧明倫小学校円形校舎について耐震診断と常時微動観測を行い、円形校舎の構造特性を

確認することを目的としている。

3. 対象建物

(1) 建物概要

対象施設は鳥取県倉吉市の明倫小学校旧円形校舎で1955～1971年まで教室棟として使用され、現存する円形校舎の中で最古級である。2018年4月からフィギュアミュージアムとして再利用が計画されている。

建物は独立基礎で松杭、鉄筋コンクリート構造（以下RC造）3階建て、平面の直径が約25mで軒高さ約10.95mである。敷地の地盤はGLから-2.7m付近まではN値の低い礫交じり砂層で、GL-3.3～4.3m付近にN値30程度の砂礫層があり、そこに建物は支持されている。振動観測はリニューアル工事前の坂本鹿名夫が設計した当初のもので行った。また、対象建物は2016年10月21日の鳥取県中部の地震（マグニチュードM6.6）を経験後に観測を行った。その際建物の損傷を目視により確認したが、著しい損傷は見られなかった（写真1～4）。しかし、周辺のRC建物には震災被害のある建物があった。

図1は対象建物の図面で、表1は部材表である。図面の特記事項を下記に示す。

- ・外側の柱をC1、内側の柱をC2、R階の柱をC3（図1（7）のように柱の半径方向が放射状の通り芯と平行）
- ・外側の円周状の梁、放射状の梁及びR階の円周状の梁をG1
- ・内側の円周状の大梁をG2
- ・螺旋階段周りの小梁をB1、PH階螺旋階段周りの小梁をRB1、放射状の梁をGK1

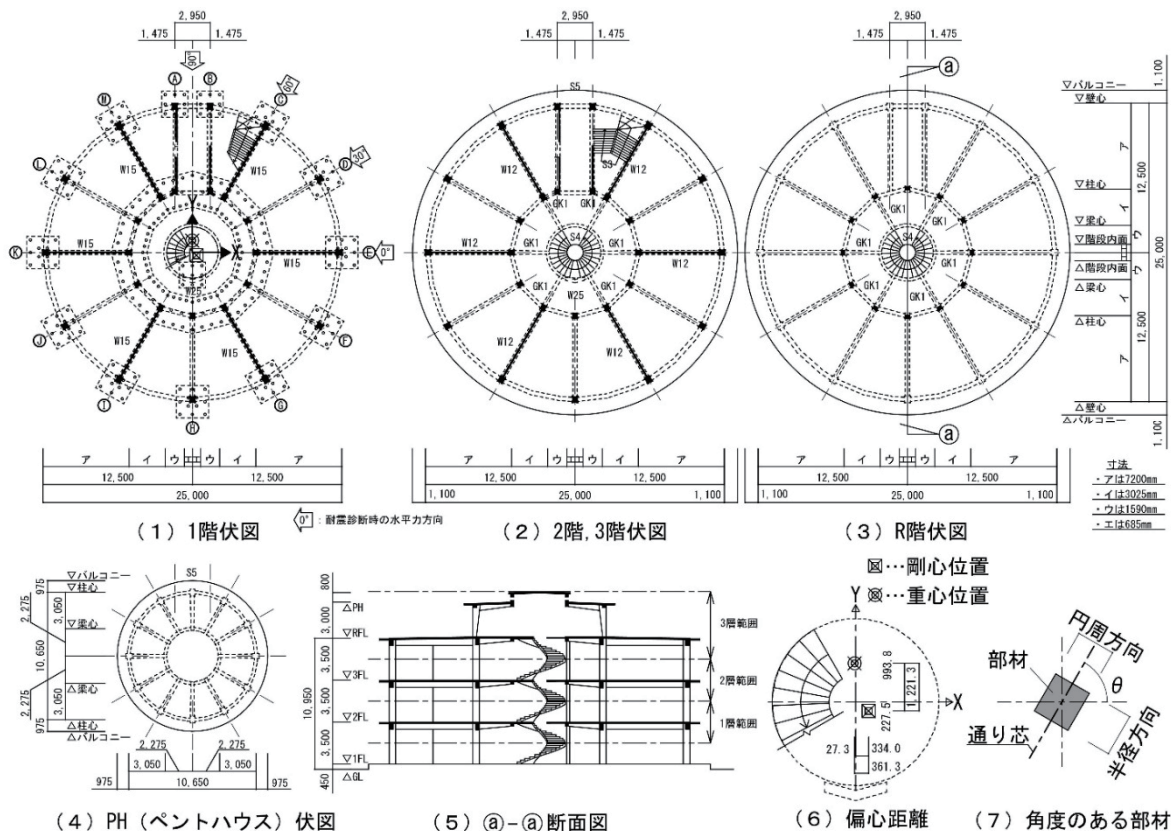


図1 対象建物の図面（単位：mm）

表1 部材表（単位：cm）

| 部材 | 記号 | 断面寸法 (半径方向×円周方向) | | 部材 | 記号 | 断面寸法 (幅×せい) | | 部材 | 記号 | 断面寸法 (幅×せい) or (厚さ) | |
|----|----|---------------------|-------|-----|-----|----------------|---------|----|-----|------------------------|--|
| | | | | | | | | | | | |
| 柱 | C1 | 55×50 | | 大梁 | G1 | 35×60 | | 小梁 | B1 | 25×35 | |
| | | 50×45 | | | | 30×65 | | | | 25×50 | |
| | C3 | 柱脚 | 30×40 | | GK1 | 付端 | 35×60 | 壁 | W15 | 15 | |
| | | 柱頭 | 55×40 | | | 中央 | 30×47.5 | | W12 | 12 | |
| | | 先端 | 30×35 | W25 | | 25 | | | | | |
| | | | | | | スラブ | S | 12 | | | |



写真1 外観写真



写真2 廊下



写真3 教室内部



写真4 中央螺旋階段付近 見上げ

(2) 建物重量

表 2 に対象建物の重量と略算的な単位面積重量の比較を示す。各層の重量は、図 1- (5) の断面図に示す各層の範囲の重量である。例えば 1 層目の躯体重量を算出する場合、梁やスラブの躯体重量に加えて 1 階の柱や壁の上部（階高の半分）と 2 階の柱や壁の下部（階高の半分）の躯体重量である。そのとき階段（S3）、螺旋階段（S4）及びバルコニー（S5）は水平面に投影させた面をスラブ（厚さ 12cm）として計算する。

躯体重量は、図面より体積を算出し、鉄筋コンクリート単位容積重量を 24kN/m^3 として算出している。積載荷重は、対象建物が学校建築であったことから、教室の地震力を計算する場合の値を採用している。同表④は躯体重量を床面積で除した値（②/①）と積載重量（③）の和であり、 $7.8\sim 8.4\text{kN/m}^2$ となっている。同表⑤の略算の単位面積重量 12kN/m^2 は文献2)で略算的に耐震診断する場合に用いられる値である。④に対する⑤は $1.43\sim 1.54$ 倍となり、一般的な建物よりも対象建物は5割程度軽く作られていることがわかる。

表2 対象建物重量と略算値との比較

| 層 | ①床面積 (m^2) | ②躯体重量 (kN) | ③教室の地震時 積載荷重 (kN/m^2) | ④単位面積当たり重量 【②/①+③】 (kN/m^2) | ⑤略算の単位面積重量 (kN/m^2) | ⑤/④ |
|---|--------------------------|--------------------------|-------------------------------------|---|-----------------------------------|------|
| 3 | 489.40 | 3271 | 1.1 | 7.8 | 12.0 | 1.54 |
| 2 | | 3501 | | 8.3 | | 1.45 |
| 1 | | 3550 | | 8.4 | | 1.43 |

(3) 経験した地震

2016年10月21日の鳥取県中部の地震の震央と円形校舎、K-NETの観測点（K-NET倉吉）の位置関係を図2^{註1)}に、K-NET倉吉でのEW方向の応答加速度を図3^{註2)}に示す。震央からK-NET倉吉までの距離は約6.1km、震央から当該円形校舎まで約6.6km、K-NET倉吉と円形校舎は約0.9kmと激震地に近い。また、K-NET倉吉でのEW方向の最大加速度は 1381gal と、現在の設計基準のおよそ1.4倍であった。これより、円形校舎は耐震性が高いことが言える。

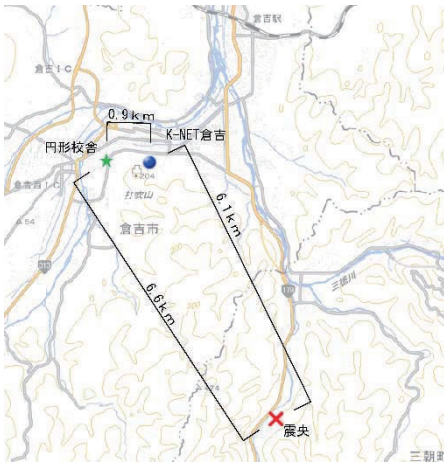


図2 震央と円形校舎の位置関係

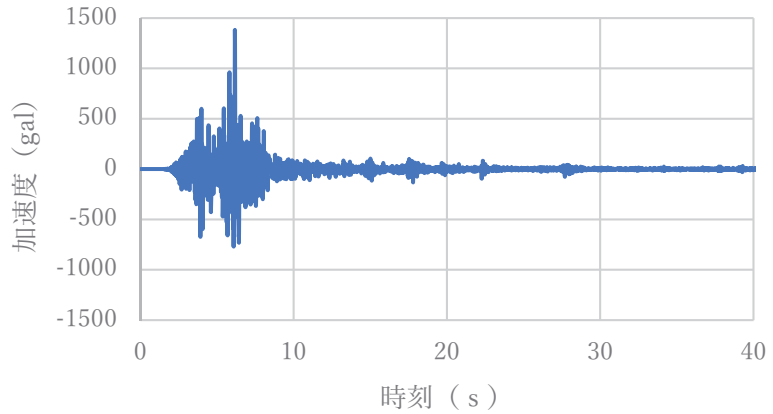


図3 K-NET倉吉でのEW方向の応答加速度

(4) 耐震診断

耐震性の確認のために、第1次診断法²⁾による耐震診断を表3、4に示す。各表の W_i は各層の躯体重量と地震力算定用積載荷重の和で、 ΣW_i は低階より上の建物全重量である。表3が前述した(2)建物重量で求めた躯体荷重と積載荷重を用いたもの（以下、計算重量）で、表4が略算の単位面積重量を用いたもの（以下、概算重量）である。独立柱は内法高さ h_0 /柱の断面せい D （1階 3.52 ） >2 であるため $F=1$ とし²⁾、壁は $F=1$ とする²⁾。形状指標はくびれやピロティなどがなく偏心（A法）による偏心率 1 （1階 $l_x=0.01$ 、 $l_y=0.03$ ） <0.1 により $S_D=1$ とし、経年指標は目視によるひび割れ調査により著しい損傷はないため $T=0.9\sim 1$ ととっても問題ないように感じるが、竣工年が1955年で30年以上経過していることから $T=0.8$ を用いる。対象建物が中央から放射状に耐震壁が配置されていることから、コンクリート強度は設計基準強度である 18N/mm^2 を使用し、加力方向により水平力を負担する壁面積が変わってくるため、保有性能基準指標 E_0 を角度毎に検討する。加力方向の角度は図1-（1）1階伏図のX軸方向への加力を 0° とし、加力方向とX軸とのなす角を $30^\circ \cdot 60^\circ \cdot 90^\circ$ とする。内部鉄筋の状況が不明であるために、第1次診断法を用いる。加力方向に対し角度がある耐震壁の強度指標の計算で用いる断面積 A は、（1）式³⁾とした。 A_w が耐震壁の断面積、 θ が加力方向とX軸とのなす角である。

表3の計算重量を用いた場合、 I_s 値は 0.8 をすべての方向、すべての層で超えている。しかし、表4の概算重量を用いた場合 $0^\circ \cdot 90^\circ$ においては 0.8 を下回っている（同表赤字は $I_s < 0.8$ ）。これより、概算重量が計算重量より 1.5 倍程度大きいことで耐震性を過少に評価してしまうことが分かった。また、最も弱い方向はX軸（ 0° ）方向への加力であることが分かった。

$$A = A_w \times \cos \theta \cdots (1) \text{ 式}$$

表3 計算重量を用いた耐震診断結果

| 層 | W_i | ΣW_i | SD | T | E0 | | | | I _s | | | |
|---|--------|--------------|----|-----|-------|-------|-------|-------|----------------|------|------|------|
| | k N | k N | | | 0° | 30° | 60° | 90° | 0° | 30° | 60° | 90° |
| 3 | 4003.6 | 4003.6 | 1 | 0.8 | 1.878 | 2.450 | 2.506 | 2.038 | 1.50 | 1.96 | 2.00 | 1.63 |
| 2 | 4039.3 | 8042.9 | 1 | 0.8 | 1.122 | 1.464 | 1.497 | 1.217 | 0.90 | 1.17 | 1.20 | 0.97 |
| 1 | 4088.3 | 12131.2 | 1 | 0.8 | 1.117 | 1.480 | 1.514 | 1.218 | 0.89 | 1.18 | 1.21 | 0.97 |

表4 概算重量を用いた耐震診断結果（ $I_s < 0.8$ ：赤字）

| 層 | W_i | ΣW_i | SD | T | E0 | | | | I _s | | | |
|---|--------|--------------|----|-----|-------|-------|-------|-------|----------------|------|------|------|
| | k N | k N | | | 0° | 30° | 60° | 90° | 0° | 30° | 60° | 90° |
| 3 | 5872.8 | 5872.8 | 1 | 0.8 | 1.280 | 1.670 | 1.708 | 1.389 | 1.02 | 1.34 | 1.37 | 1.11 |
| 2 | 5872.8 | 11745.6 | 1 | 0.8 | 0.768 | 1.002 | 1.025 | 0.834 | 0.61 | 0.80 | 0.82 | 0.67 |
| 1 | 5872.8 | 17618.4 | 1 | 0.8 | 0.769 | 1.019 | 1.042 | 0.839 | 0.62 | 0.82 | 0.83 | 0.67 |

4. 常時微動観測

(1) 観測条件

観測日は2017年8月28～29日の日中に行った。観測機材は3軸加速度計（株）ミツトヨ：JEP-6A3、白山工業（株）：LS-8800）を使用し、サンプリングを200Hzとし、6分間計測した。配置方法は2種類である。配置1はR階に対し平面的な配置をし、配置2は2階・3階・R階に2台ずつ高さ方向に配置をした。平面図断面図及び加速度計配置位置は図4に示す。図中の丸印が配置1の位置、四角が配置2の位置、印中の文字は加速度計名である。三角が地盤の加速度計位置で両配置とも同じである。また図中上下方向をNS方向とし、左右方向をEW方向とする。

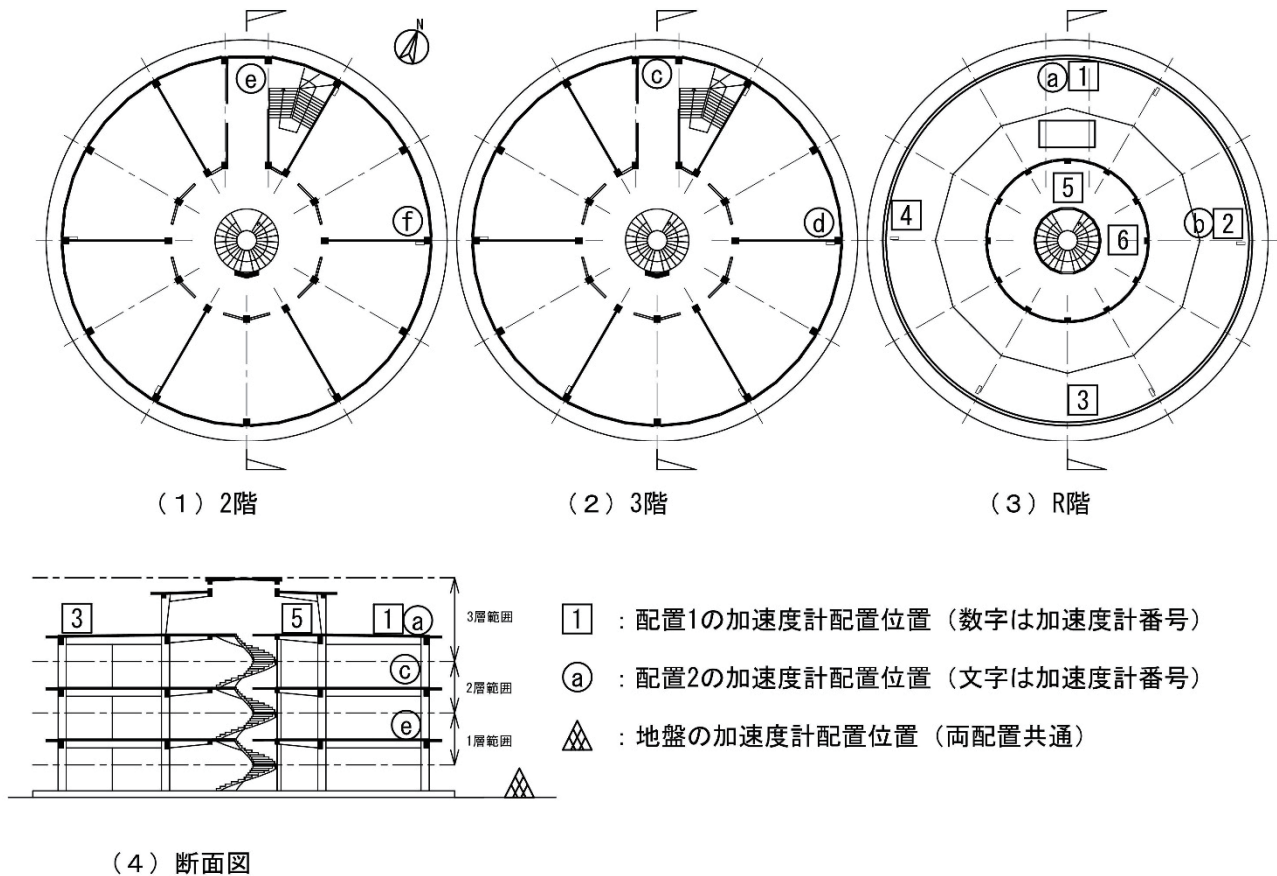


図4 加速度計配置位置

(2) 解析手法

観測データに0.5～25.0Hzのバンドパスフィルタをかける。その後6分間の内20.48秒間ごとに高速フーリエ変換（以下、FFT）を17回行い、位相角とパワースペクトル（PS）を求める。そして、17回のPSを平均し、それを用いて応答倍率を求める。位相角は1回目のものを用いる。

(3) FFT結果

各配置のFFT結果を図5・6に示す。両図特徴的な点がア（2.83Hz）とイ（NS：4.05Hz、EW：4.25Hz）の振動数の点である。まず、両図の点アは配置1の加速度計1・3・5でEW方向が卓越しており、加速度計2・4・6でNS方向が卓越している。配置2では加速度計a・c・eがEWで、加速度計b・d・fがNSである。この振動数時の位相角を確認したところ、ねじれ振動のような性状となり、ねじれの卓越振動数である。

次に点イでは配置1・2と主にNS・EWともに卓越し、また位相角においても同一の方向となっていたことから並進卓越振動数であると考えられる。

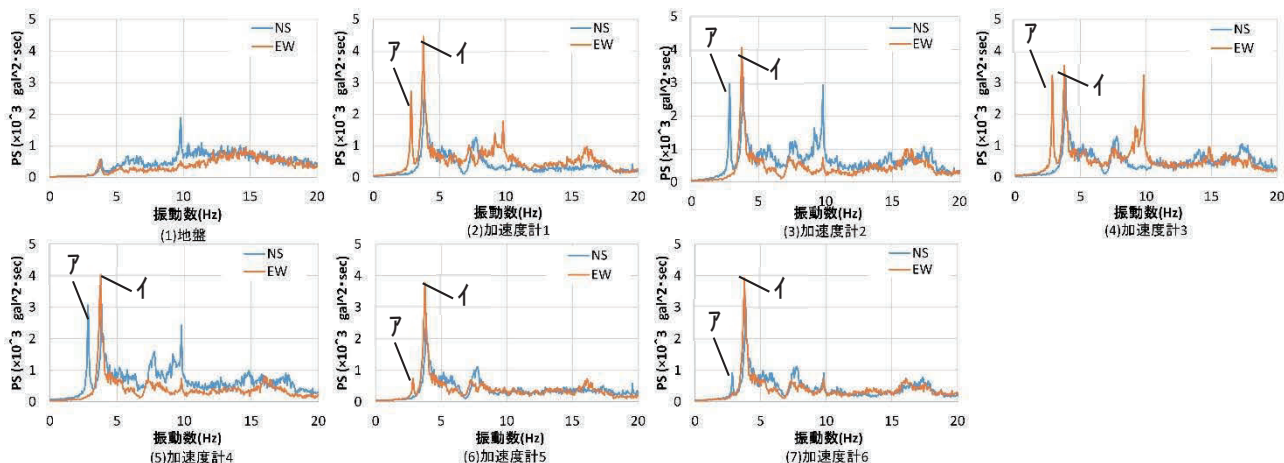


図5 配置1 FFT結果

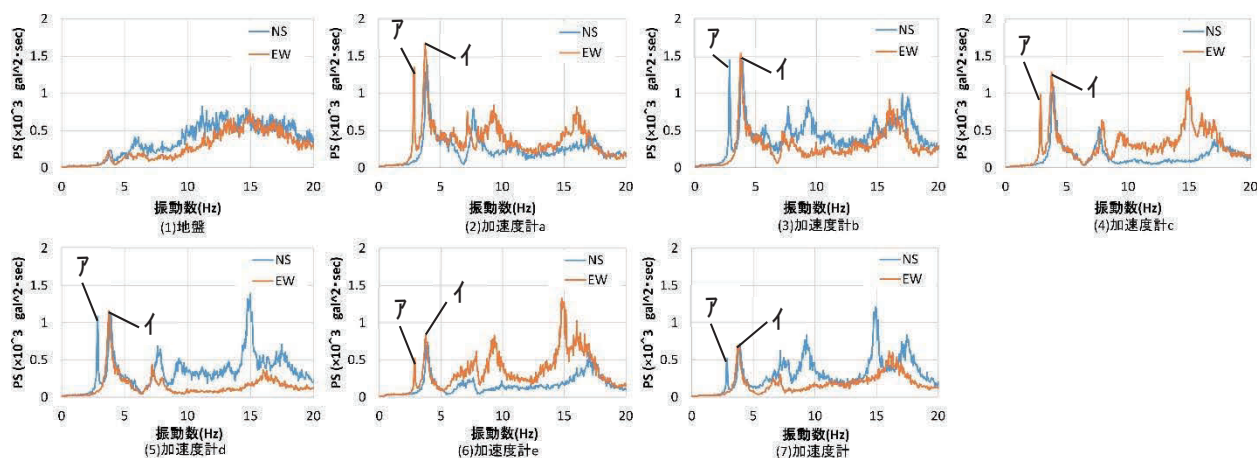


図6 配置2 FFT結果

(4) 応答倍率

各配置の応答倍率を図7・8に、図7のアのねじれの卓越振動数（2.83Hz）時の平面的なスペクトル比を図9に、図8で示した卓越1次振動数 [NS : 4.05Hz、EW : 4.25Hz]（四角）・2次 [NS : 7.47Hz、EW : 7.28Hz]（三角）・3次 [NS : 14.94Hz、EW : 14.94Hz]（丸）のマーカで示した点についてのスペクトル比を図10に示す。NSの応答倍率は地盤のNS方向のパワースペクトル（PS）に対する各加速度計のNS方向のPSで、EWの応答倍率は地盤のEW方向のPSに対する各加速度計のEW方向のPSである。

図9の平面的なスペクトル比は、同図（1）が加速度計1・3・5・6のEW方向のスペクトル比を赤色で、同図（2）が加速度計2・4・5・6のNS方向のスペクトル比を青色で示しており、外周に向かうにつれて値が大きくなり、ねじれ振動を起こしていることがわかる。同図（3）中央部を拡大すると、赤色とX軸が交差する点と、青色とY軸が交差する点をプロットした点（以下、観測回転中心）がねじれの回転中心であると考えられる。観測回転中心が重心と剛心の間付近にある。図7・9を確認することで建物中央にある螺旋階段付近においた加速度計5・6はアのねじれの卓越振動数時の応答倍率が小さく、それに比べ外周部にある加速度計は応答倍率大きい。このように平面図にスペクトル比を示すことにより、2.83Hzがねじれの卓越振動数であることが明示できた。

図10の（1）～（4）の卓越1次振動数時の青色を見ると、すべて折れ曲がることなく、一方向（右方向）に分布しており、1次モードのようになっている。また、卓越2次振動数時のオレンジ色を見ると、1層目若しくは2層目で折れ曲がっていて、（2）と（3）においてはY軸を過ぎ、概ね2次モードのような形状である。卓越3次振動数時の灰色を見ると、（2）と（3）については2度折れ曲がり、概ね3次モードのような形状である。

図9で大まかに回転の中心を確認することができたが、精度を上げるために加速度計数を増やして放射状に耐震壁が配置された建物の観測を行い、そのような建物のねじれ振動に関する実験も行いたいと考えてい

る。このような放射状に耐震壁が設置された建物は X・Y 方向の耐震性の確認に加え、壁量が少ない円周方向（ねじれ振動）について検討を進めることが重要であると考え、今後は各層のねじれ剛性を知るうえで、ねじれ振動の2次、3次モードも確認できるようにしたい。

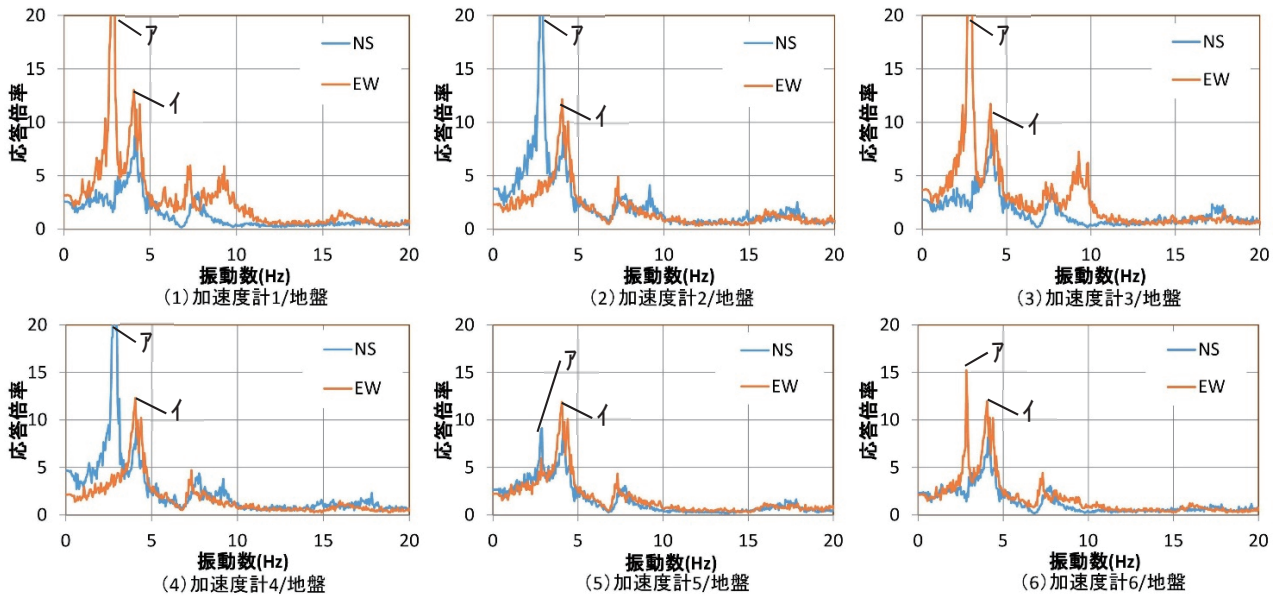


図7 配置1 応答倍率

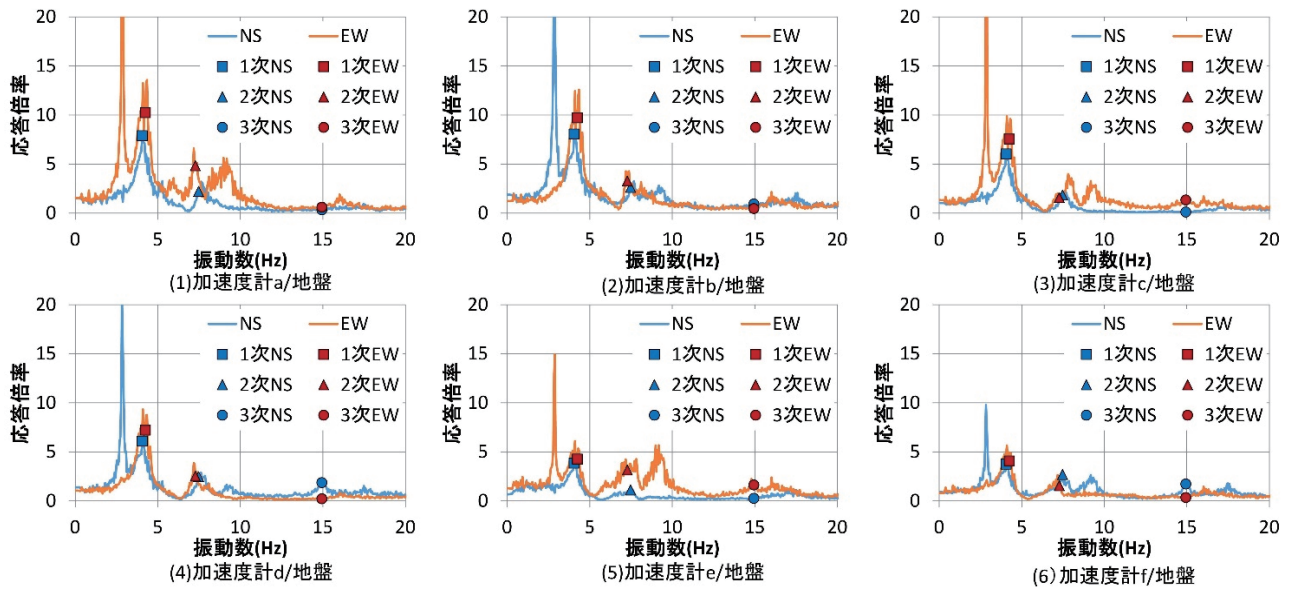


図8 配置2 応答倍率

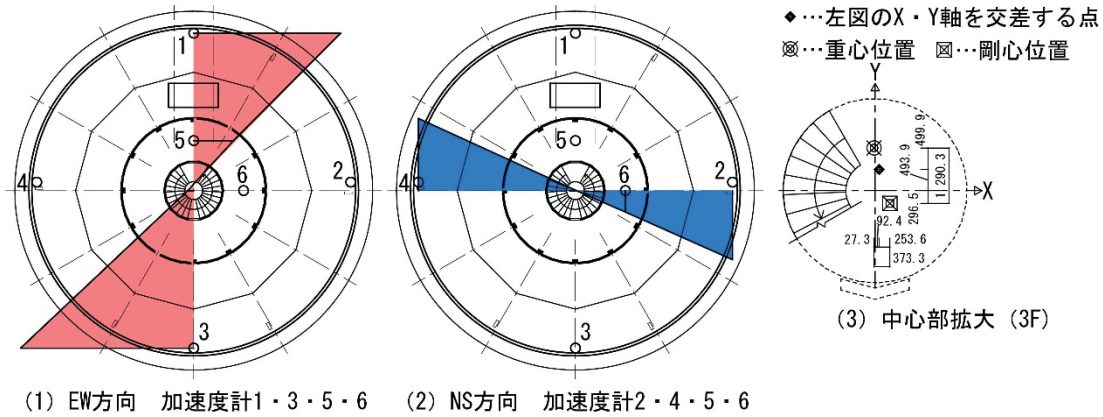


図9 配置1のスペクトル比 (2.83Hz)

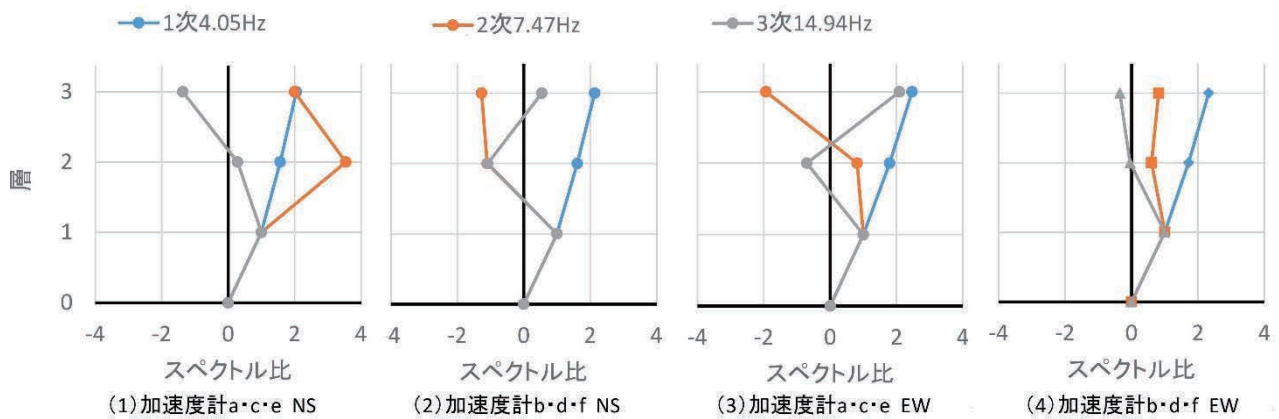


図 10 配置 2 のスペクトル比

5. まとめ

以上のような診断及び観測から以下の知見が得られた。

- 1) 円形校舎は一般的な建物よりも重量が5割程度軽い。
- 2) 円形校舎は第1次診断法の耐震診断結果で耐震性を有することが確認できた。ただし、建物重量について略算重量を用いると過小評価してしまうために、各層の重量を算出することが重要である。
- 3) ねじれ振動の卓越振動数が確認でき、回転中心が概ね確認できた。
- 4) 並進振動の1次・2次・3次の卓越振動数が確認できた。

今後は円形校舎が保存されていくために、いくつかの円形校舎で振動観測を行い、このような建物の特性について明確にしていきたいと考えている。また、放射状に耐震壁を配置した建物に対してのねじれ振動に関する実験を行い、ねじれ振動に対する安全性を確認していきたい。

謝辞：本研究を行うにあたり、関西大学大学院理工学研究科高度化研究費の助成を得た。また、円形劇場の稲嶋正彦氏に調査建物の提供いただき、ご協力いただきました。心から感謝の意を表し、厚く御礼申し上げます。

註

- 1) 国土地理院の電子地形図（タイル）に震央、K-NET観測点、円形校舎を書き込み。
- 2) 国立研究開発法人防災科学技術研究所K-NETの強震波形記録(TTR005)の地震観測波形データを使用した。
- 3) 文献3)において放射状に耐震壁が配置された建物の水平耐力は(2)式のようになるとされている。 S が加力方向に平行な耐震壁の耐力、 θ が加力軸と耐震壁の材軸とのなす角、 S_θ が耐震壁が加力方向から θ だけ傾いた時の耐力である。つまり、耐震壁の耐力に $\cos \theta$ をかけた値が、加力方向に対し θ 角度の付いた壁の耐力である。耐震診断時の壁の強度指標 C_w は壁面積と応力度をかけた値を建物重量で除したものである。よって、壁面積 \times 応力度が耐力を示していることから、応力度は角度による影響はないと考え、耐力算定用の壁面積に(1)式を用いる。

$$S_\theta = S \times \cos \theta \cdots (2) \text{ 式}$$

参考文献

- 1) 梅宮弘光：校地取得事情から検討した円形校舎の採用理由 1950年代の神戸市立学校円形校舎4棟を事例として、日本建築学会近畿支部研究報告集、計画系、52号、pp.757-760、2012.05
- 2) 一般財団法人日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準 同解説、2017.7
- 3) 安藤 範平、池田 昭男：鉄筋コンクリート模型による放射状耐震壁の水平加力実験、日本建築学会大会報告集、63-1号、pp.609~612、1959.10
- 4) 柴田明徳：最新耐震構造解析第2版、森北出版、2003
- 5) 大崎順彦：地震動のスペクトル解析入門、1983.3