

# 報告 1 方向をブレース補強したSRC造学校校舎の耐震補強効果の検討

日比野 巧<sup>\*1</sup>・千葉 正裕<sup>\*2</sup>

**要旨：**既存建物の耐震補強による耐震性能の向上効果を常時微動測定から明らかにする手法は確立されていない。そこで本報告では、耐震補強前後の建物から耐震補強と建物の立体挙動の関係を明らかにすることを目的として、一方向のみをブレース補強した細長い平面形を有する学校校舎の多点常時微動測定を行った。その結果、耐震補強を行った方向の建物1階に対するR階の変位倍率は補強前の建物よりも小さくなり、固有周期は補強前よりも短周期になった。また、振動モードは、耐震補強前と耐震補強後とで異なるモードになった。

**キーワード：**耐震補強、常時微動、立体振動、固有周期、振動モード

## 1. はじめに

1995年兵庫県南部地震における建物被害<sup>1)</sup>の多くは、1981年以前に建設された建物であったと言われている。これらは、建設当時の耐震基準を満足するものの、1981年施行の耐震基準に準拠していない既存不適格の建物である。そこで、1995年に施行された「建築物の耐震改修の促進に関する法律」により、既存建築物の耐震診断を行い耐震性能が不十分と判断される場合には、耐震性能を改善するための耐震改修を行うよう規定されている。

通常、耐震改修による耐震性能の向上効果は、構造計算により確認するのが一般的である。しかし、既存建築物の設計図書がない場合や実際の施工状態がよく分からない場合もあり、質量や剛性評価が難しいことも多い。そのため、構造計算通りの耐震性能を有しているかは不明確である。これに対して、既存建物を直接実測することで耐震改修効果が確認可能であれば、非常に簡便かつ実用的な評価手法となり得るが、現在までにオーソライズされた手法がないのが現状である。

そこで、本報告では常時微動測定を用いた評価手法の確立を目的として、耐震補強前後の建物に対して多点常時微動測定を行い、振動性状の変化と補強効果の関係を明らかにする。また、測定対象は一方向のみを補強した建物とし、補強効果の検討を行いやすくする。なお、本報告の対象とする建物は災害時に地域の防災の拠点となることが想定される学校建築のなかでも、多点にわたる立体的な測定が難しく、複雑な振動性状を示す、細長い平面形を有する建物<sup>2), 3)</sup>とする。

## 2. 建物概要および耐震補強計画

常時微動測定を行う建物は日本大学工学部構内にある1号館であり、この西北西約600mの位置に北北東－南南西方向に東北新幹線が走っている。建物は、1962年

表－1 建物概要

| 建<br>概<br>要                | 用途     | 教室棟                                   |
|----------------------------|--------|---------------------------------------|
|                            | 建設年月日  | 昭和37年（経過年数 55年）                       |
| 建<br>物<br>規<br>模           | 長辺方向   | 87.0 m                                |
|                            | 短辺方向   | 13.0 m                                |
|                            | 軒高     | 12.2 m                                |
|                            | 延床面積   | 3577.98 m <sup>2</sup>                |
|                            | 構造種別   | 鉄骨鉄筋コンクリート造                           |
|                            | 塔屋     | 有                                     |
| 仕<br>概<br>上<br>要           | 屋根     | シート防水仕上げ                              |
|                            | 内壁     | モルタル下地ペイント                            |
| 使<br>用<br>構<br>造<br>材<br>料 | コンクリート | 普通 $F_c=17.7\text{N/mm}^2$            |
|                            | 鉄骨     | 柱・梁 SS400 (400N/mm <sup>2</sup> )     |
|                            | 鉄筋     | 柱主筋・梁主筋 SR235 (235N/mm <sup>2</sup> ) |
|                            |        | 帯筋・あばら筋 SR235 (235N/mm <sup>2</sup> ) |
|                            |        | 壁筋・スラブ筋 SR235 (235N/mm <sup>2</sup> ) |
|                            | 基礎     | 独立基礎                                  |

表－2 耐震診断および耐震改修計画のIs値

| 階 | 耐震補強前 |      | 耐震補強後 |      |
|---|-------|------|-------|------|
|   | X方向   | Y方向  | X方向   | Y方向  |
| 3 | 0.92  | 1.80 | 0.92  | 1.79 |
| 2 | 0.62  | 1.16 | 1.02  | 1.15 |
| 1 | 0.26  | 0.88 | 0.83  | 0.87 |

\*1 日本大学 工学部建築学科助教 博(工) (正会員)

\*2 日本大学 工学部建築学科教授 博(工)

に当時の耐震基準に基づいて設計・建設された鉄骨鉄筋コンクリート造で、地上3階、一部塔屋を有し地階はない。図-1に1階平面図、図-2にR階平面図を示す。また、表-1に建物概要を示す。建物の規模は、長辺方向87.0m、短辺方向13.0m、軒高12.2mであり、延床面積3577.98m<sup>2</sup>である。

図-3に耐震補強箇所を示し、表-2に耐震補強前後に

おける構造耐震指標(Is)値<sup>4)</sup>を示す。耐震補強前のIs値は、X(桁行)方向の1, 2階で0.26, 0.62となっており、Iso=0.7を下回っている。Y(張間)方向は、耐震壁の効果もあり、各階のIs値はIso=0.70を全て上回っている。耐震補強は強度の不足するX方向の1, 2階のみであり、外付け鉄骨K型ブレースの設置を行っている。表-3に耐震補強に用いる耐震ブレース概要を示す。

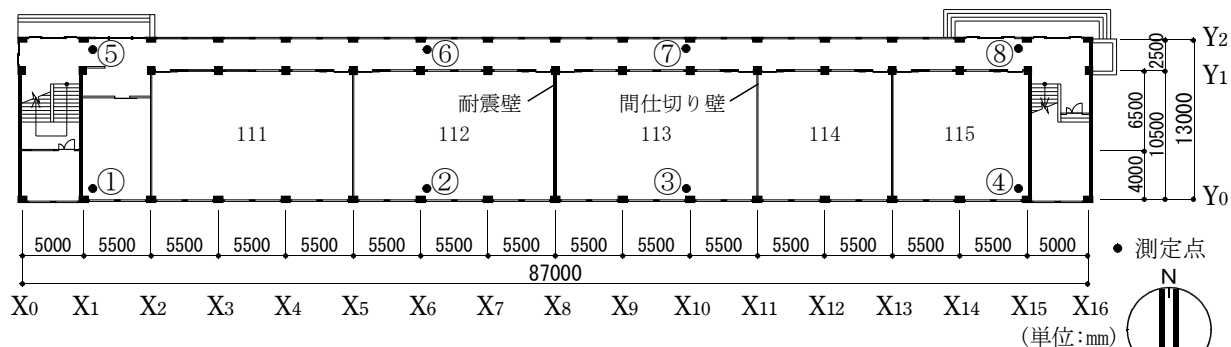


図-1 1階平面図

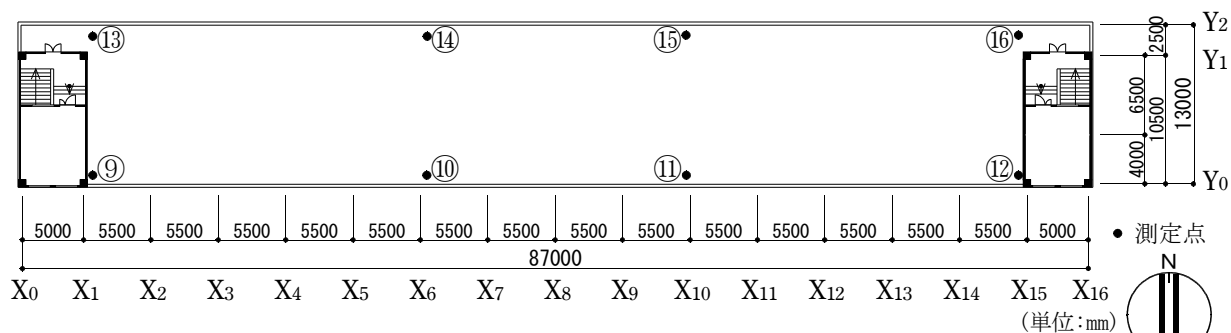


図-2 R階平面図

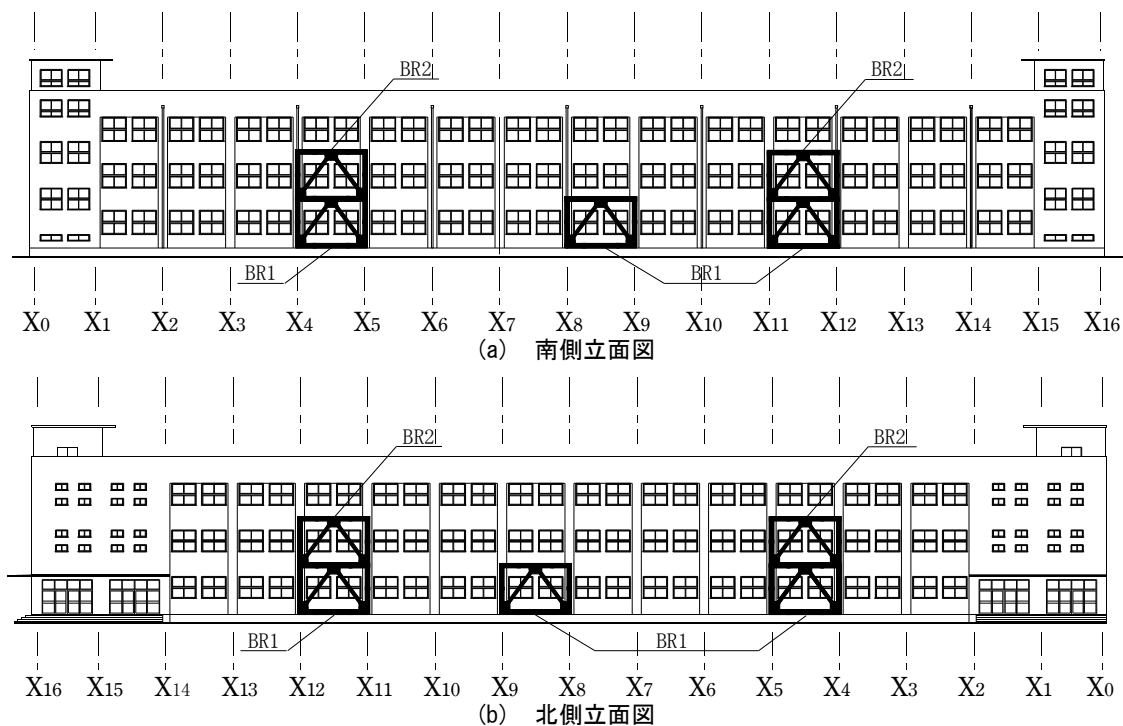


図-3 耐震補強箇所

表-3 耐震ブレース概要 (単位: mm)

| 符号     | BR1             | BR2             |
|--------|-----------------|-----------------|
| 部材     | φ 273.1-12 (鋼管) | φ 244.5-12 (鋼管) |
| 枠材     | H-350×175×7×11  | H-350×175×7×11  |
| 鋼材     | SS400           | SS400           |
| 形式     | K型              | K型              |
| スタッド   | 2-16 φ @150     | 2-16 φ @150     |
| アンカー筋  | 柱               | 1-D22@165       |
|        | 上部梁             | 1-D22@165       |
|        | 下部梁             | 1-D22@165       |
| スパイラル筋 | 2-6 φ @60(径120) | 2-6 φ @60(径120) |

### 3. 測定概要

常時微動測定は、耐震補強前後の雑振動の少ない夜間に行う。測定階は1階およびR階とし、測定位置は図-1および図-2に●印で示すように、各階ともX1, X6, X10, X15およびY0, Y2通りの交点にある柱近傍の床板上とする。測定方向は、建物のX軸(EW)およびY軸(NS)に合わせた水平2成分とし、合計32成分の同時測定である。測定には、周期2秒程度まではほぼ平坦な振動特性を持つ長周期速度計を用い、積分回路による変位測定とする。また、得られた波形は、15Hzのローパスフィルタを用いて雑振動を低減させた後、A/D変換を行い、サンプリング周波数200Hzで連続したデータを収録した。解析対象には、耐震補強前後とも新幹線が本学部付近を複数回通過した際の記録の中からR階の水平変位が最も大きい40.96秒間をそれぞれ選定し、新幹線通過時とする。

### 4. 測定結果

#### 4.1 最大変位

表-4に新幹線通過時の耐震補強前後における各最大変位を示す。全体的にNS方向の振幅がEW方向の振幅に比べて大きくなる傾向が見られる。耐震補強前後における新幹線通過時の最大変位は、1階のNS方向でそれぞれ約2.17 μm, 約2.03 μm, EW方向でそれぞれ約1.03 μm, 約1.11 μmであり、R階のNS方向でそれぞれ約7.25 μm, 約7.08 μm, EW方向でそれぞれ約2.92 μm, 約2.74 μmである。

図-4に新幹線通過時の耐震補強前後におけるR階の時刻歴変形モードを示す。変形モードは、R階の最大変位時刻を含む1秒間をそれぞれ0.025秒刻みで表している。耐震補強前後とも同様な変形モードを示しており、新幹線通過時には、NS方向で建物両端の変位に対して建物中央の変位が大きくなる傾向が見られ、EW方向にはあまり振動をしていない。

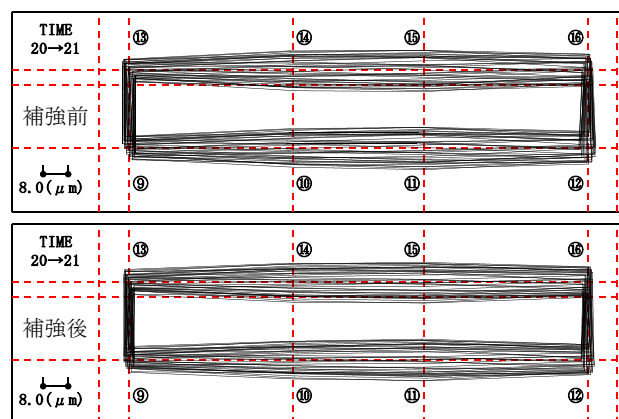


図-4 R階の時刻歴変形モード

表-4 各最大変位 (μm)

| 耐震補強 | 測定成分 | 階  | ①・⑨   | ②・⑩   | ③・⑪   | ④・⑫   | ⑤・⑬   | ⑥・⑭   | ⑦・⑮   | ⑧・⑯   |
|------|------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 補強前  | NS   | R階 | 4.014 | 6.343 | 7.246 | 5.315 | 3.908 | 6.551 | 7.050 | 5.293 |
|      |      | 1階 | 1.526 | 1.739 | 1.848 | 2.173 | 1.430 | 1.776 | 1.868 | 2.138 |
|      | EW   | R階 | 2.736 | 2.708 | 2.889 | 2.924 | 2.310 | 2.074 | 2.098 | 2.356 |
|      |      | 1階 | 0.858 | 0.892 | 0.942 | 1.026 | 0.863 | 0.860 | 0.903 | 0.868 |
| 補強後  | NS   | R階 | 4.208 | 6.357 | 7.079 | 5.085 | 4.105 | 6.519 | 6.927 | 5.110 |
|      |      | 1階 | 1.590 | 1.891 | 1.933 | 2.029 | 1.501 | 1.950 | 1.941 | 2.015 |
|      | EW   | R階 | 2.084 | 2.221 | 2.580 | 2.743 | 2.173 | 2.060 | 1.981 | 1.975 |
|      |      | 1階 | 0.963 | 1.033 | 1.108 | 1.102 | 0.994 | 0.964 | 0.992 | 0.958 |

表-5 1階の各最大変位に対するR階の各最大変位倍率

| 耐震補強 | 測定成分 | ⑨     | ⑩     | ⑪     | ⑫     | ⑬     | ⑭     | ⑮     | ⑯     |
|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 補強前  | NS   | 2.630 | 3.647 | 3.921 | 2.446 | 2.733 | 3.689 | 3.774 | 2.476 |
|      | EW   | 2.647 | 3.362 | 3.662 | 2.506 | 2.735 | 3.343 | 3.569 | 2.536 |
| 補強後  | NS   | 3.189 | 3.036 | 3.067 | 2.850 | 2.677 | 2.412 | 2.323 | 2.714 |
|      | EW   | 2.164 | 2.150 | 2.329 | 2.489 | 2.186 | 2.137 | 1.997 | 2.062 |

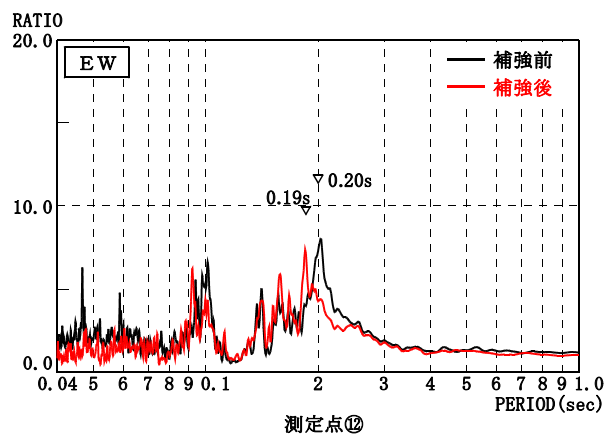
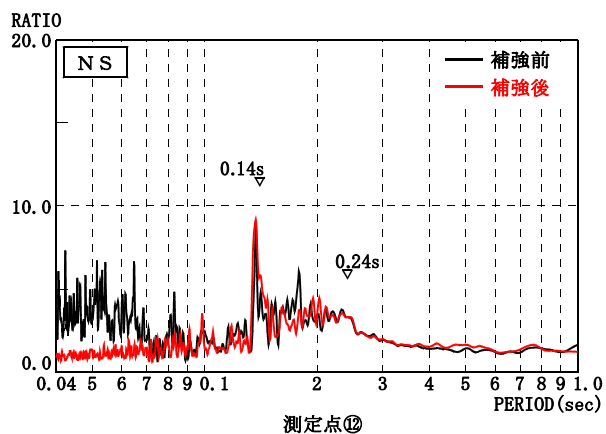
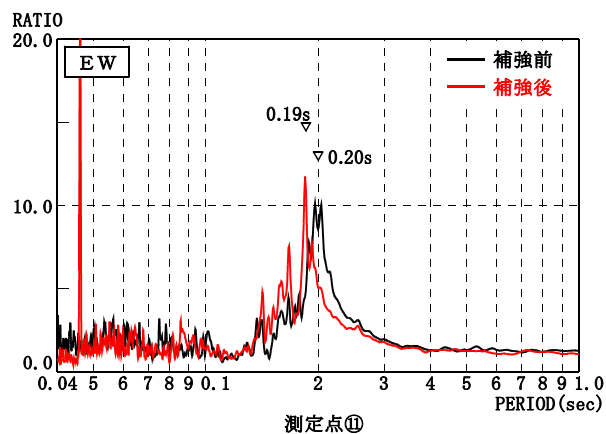
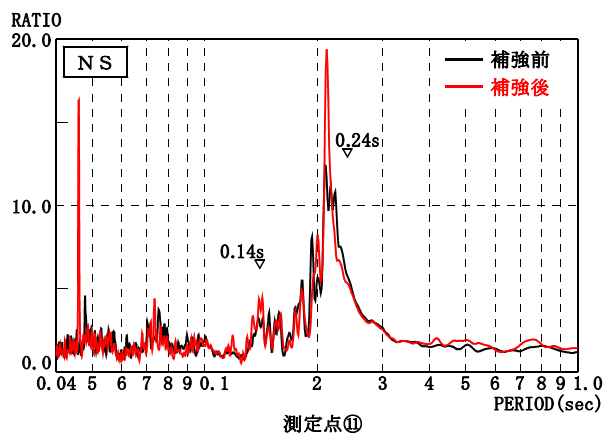
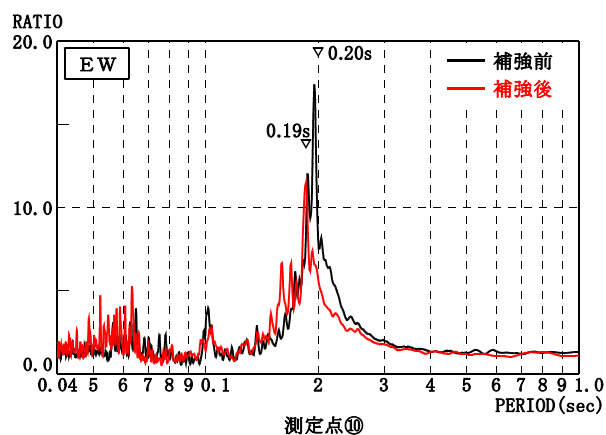
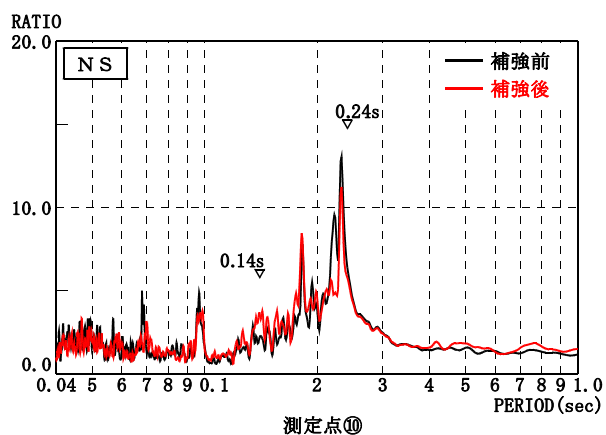
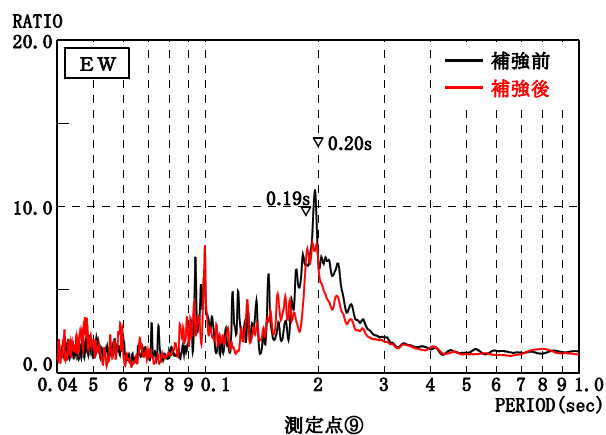
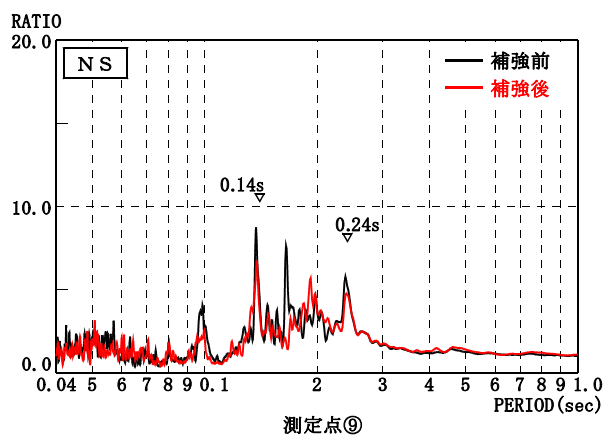


図-5 フーリエスペクトル比 (R階/1階)

表－5に新幹線通過時の耐震補強前後における1階の各最大変位に対するR階の各最大変位倍率を示す。全体的にNS方向の各最大変位倍率は、EW方向の最大変位倍率より大きくなる傾向が見られる。耐震補強前後における新幹線通過時の最大変位倍率は、NS方向でそれぞれ約3.9倍、約3.2倍、EW方向でそれぞれ約3.7倍、約2.5倍であり、振幅の大きくなる新幹線通過時には、NS方向では耐震補強の有無にかかわらず同程度であるが、K型ブレースを設置したEW方向では耐震補強前に比べて耐震補強後の最大変位倍率が小さくなる傾向が見られる。

## 4.2 周期特性

耐震補強前後における測定建物の周期特性および固有周期を検討するため、各測定点の変位波形よりフーリエスペクトルを求め、さらに各測定点のフーリエスペクトルから1階に対するR階のスペクトル比を求める。なお、ピークの判別を行いやすくするため、フーリエスペクトルおよびスペクトル比とも、バンド幅0.1HzのParzenウィンドウを用いて移動平均する。

図－5に新幹線通過時の耐震補強前後におけるY0通りのフーリエスペクトル比を示す。新幹線通過時におけるNS方向では、耐震補強前後とも0.24秒近傍および0.14秒近傍にやや明確なピークが見られる。新幹線通過時におけるEW方向では、耐震補強前で0.20秒近傍に明確なピークが見られ、耐震補強後では0.19秒近傍に明確なピークが見られる。新幹線通過時のNS方向では、

耐震補強前後のピークはよく一致しているが、K型ブレースを設置したEW方向では、耐震補強前に比べて耐震補強後のピークが短周期化する傾向が見られる。

新幹線通過時における各測定点のスペクトル比を考え合わせると、建物の各次固有周期は、耐震補強前で0.24秒、0.20秒、0.14秒、耐震補強後では0.24秒、0.19秒、0.14秒であると考えられ、耐震補強により2次固有周期のみ変化をしている。表－6に耐震補強前後における建物の各次固有周期を示す。

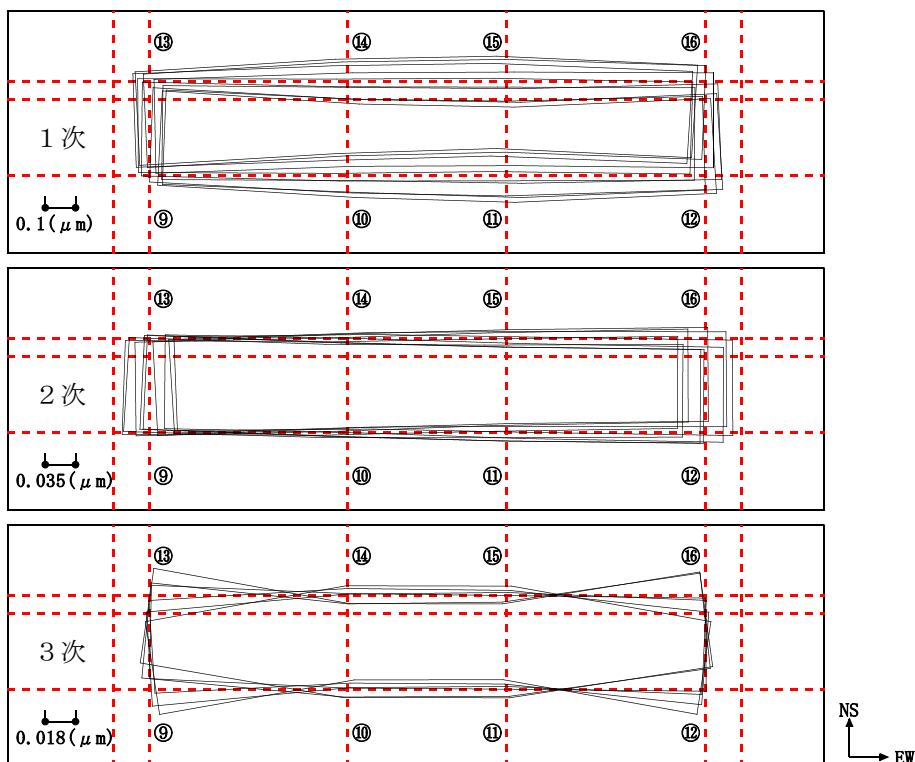
## 4.3 振動モード

各次固有周期における測定建物の振動モードを検討するため、フーリエスペクトルのある区間に帯域フィルタを乗じ、それによって得られたフーリエスペクトルをフーリエ逆変換することにより、その区間の周期特性のみが表れた変位波形を求める。次に、この変位波形から、各次固有周期における測定建物の振動モード(相対変位)を求める。

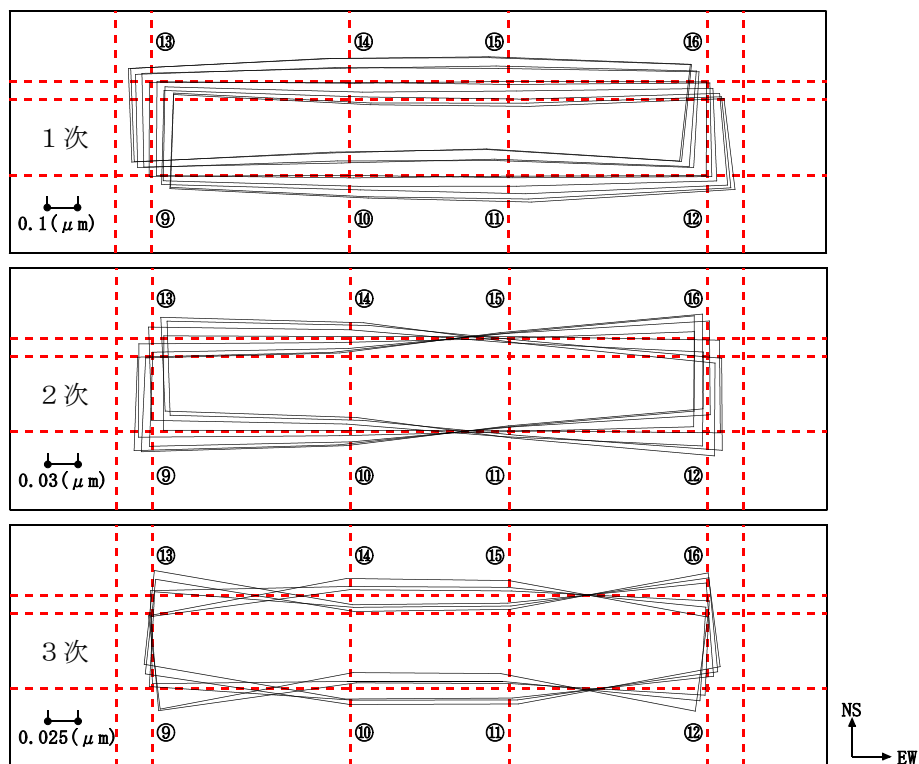
図－6に耐震補強前、図－7に耐震補強後における各次固有周期に対応する振動モードを示す。1次固有周期に対応する振動モードは、建物端部に対して建物中央が大きく変形するモードであり、耐震補強前後ともよく一致

表－6 建物の各次固有周期(秒)

| 耐震補強 | 1次   | 2次   | 3次   |
|------|------|------|------|
| 補強前  | 0.24 | 0.20 | 0.14 |
| 補強後  | 0.24 | 0.19 | 0.14 |



図－6 耐震補強前の各次固有周期に対応する振動モード



図ー7 耐震補強後の各次固有周期に対応する振動モード

している。2次固有周期に対応する振動モードは、耐震補強前がEW方向に並進振動するモードであり、耐震補強後は建物の両端が逆位相に変形するモードである。3次固有周期に対応する振動モードは、建物両端に対して建物中央が逆位相になるモードであり、耐震補強前後ともよく一致している。

振動モードは、EW方向が短周期化をした2次固有周期に対応する振動モードのみ耐震補強前後で変化しており、耐震補強前の0.20秒と耐震補強後の0.19秒におけるNS方向の振動モードの違いが表れたとみられる。

## 5. 結論

新幹線通過時においては、K型ブレースによる耐震補強を行ったEW方向で耐震補強前に比べて耐震補強後の最大変位倍率が小さくなる傾向が見られた。

フーリエスペクトル比から見た卓越周期は、耐震補強を行っていないNS方向では耐震補強前後による相違は見られないが、K型ブレースを設置したEW方向では耐震補強前に比べて耐震補強後の卓越周期が短周期化する傾向が見られた。

振動モードは、短周期化をした2次固有周期に対応する振動モードにおいて、耐震補強前後の振動モードに違いが見られた。

今後は、耐震補強による補強量や補強箇所の違いが建物の振動性状に与える影響をより正確に把握し、定量的な評価手法を確立していく予定である。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：1995年兵庫県南部地震鉄筋コンクリート造建築物の被害調査報告書、第Ⅱ編学校建築、1997.3
- 2) 日比野巧、千葉正裕：細長い平面形を有する建物の多点常時微動測定、日本大学工学部紀要、第44巻、第1号、pp.71-94、2002.9
- 3) 日比野巧、倉田光春：細長い平面形を有する建物の立体振動解析－変位入力による微動応答解析－、日本大学工学部紀要、第44巻、第2号、pp.19-36、2003.3
- 4) 日本建築防災協会：2001年改訂版既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・改修設計指針・同解説、2001.10