

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

|                   |                                                                                                        |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 論題(和文)            | 2083 E-ディフェンス高層建物試験体の長期モニタリング：その2 小地震記録に基づく振動特性評価(構造)                                                  |
| Title             |                                                                                                        |
| 著者(和文)            | 尾野 勝, 金澤健司, 森本 真史, 佐藤 大樹, 北村春幸, 長江拓也                                                                   |
| Authors           | Kenji KANAZAWA, daiki sato, Haruyuki Kitamura                                                          |
| 出典 / Citation     | 日本建築学会関東支部研究報告集 I, , No. 79,                                                                           |
| Citation(English) | , , No. 79,                                                                                            |
| 発行日 / Pub. date   | 2009, 2                                                                                                |
| rights            | 日本建築学会                                                                                                 |
| rights            | 本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである                                                                       |
| relation          | isVersionOf: <a href="http://ci.nii.ac.jp/naid/110007453936">http://ci.nii.ac.jp/naid/110007453936</a> |

# E-ディフェンス高層建物試験体の長期モニタリング その2 小地震記録に基づく振動特性評価

構造—振動

準会員○尾野勝<sup>\*1</sup> 正会員 金澤健司<sup>\*2</sup>  
正会員 森本真史<sup>\*3</sup> 正会員 佐藤大樹<sup>\*4</sup>  
正会員 北村春幸<sup>\*5</sup> 正会員 長江拓也<sup>\*6</sup>

固有振動数 高層建物

震動台実験 構造ヘルスマニタリング

## 1. はじめに

近年、地震等により甚大な影響を受けた建築物の損傷程度を評価する手法への関心が高まっている。その評価手法の一つとして構造ヘルスマニタリング(SHM)に関する研究が盛んに行われており、実測記録に基づく建築物への振動特性評価の重要性がさらに増してきている。

本研究では、SHMの基礎データの取得を目的として、E-ディフェンス高層建物実験<sup>1)</sup>におけるホワイトノイズ加振データを小地震記録と見なして鉄骨建物の振動特性を評価し、小地震記録から評価される振動特性が地震を経験するごとにどのように変化していくのかを分析した。さらに、その結果を常時微動から評価された振動特性<sup>2)</sup>と比較した。

## 2. 試験概要

### 2.1 試験体概要

試験建物は長辺方向(Y方向)6m×2スパン、短辺方向(X方向)8m×1スパン、基準階高3.8mの地上21階、高さ80mの高層建物を想定した鋼構造建物である。図1に試験建物の平面図および断面図を示す。試験体は実験施設の制約により、1層〜4層までを実大で再現し、5層〜21層についてはコンクリート床板と積層ゴムを用いて3層に縮約している。

### 2.2 加振実験概要

加振実験は2008年3月17日から21日に表1に示す順序で行われた。主要な加振の前後に、試験体の線形範囲の特性を確認するための加振レベルが異なる2種類のホワイトノイズ加振(W-20%とW-40%)が行われた。ホワイトノイズ加振は継続時間250秒の2軸同時入力であり、震動台上の加速度振幅は二乗和平方根(RMS)で、W-20%加振ではX方向約7.4 cm/s<sup>2</sup>、Y方向約8.6 cm/s<sup>2</sup>、W-40%加振ではX方向約16.5 cm/s<sup>2</sup>、Y方向約18.4 cm/s<sup>2</sup>である。本研究では、これらW-20%加振とW-40%加振を小地震と見なして、試験体の小地震時の振動特性を分析する。

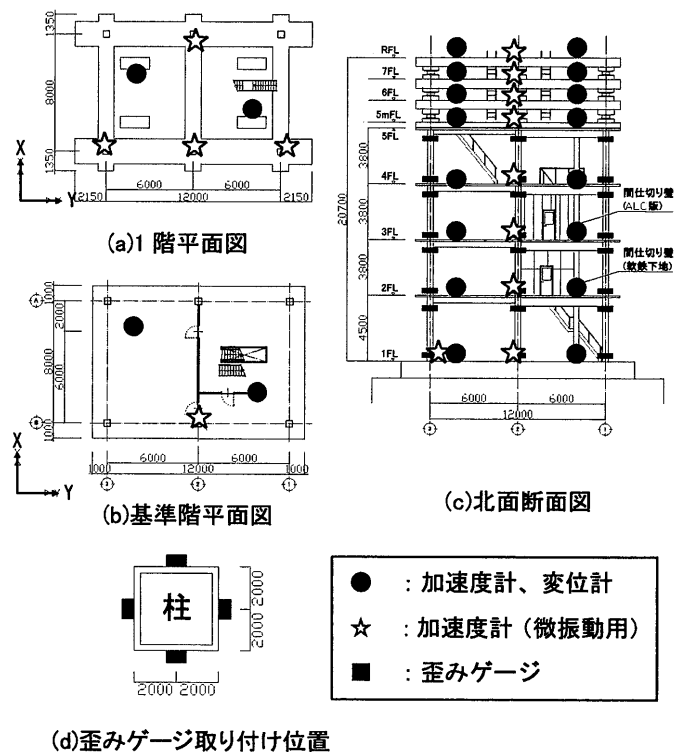


図1 試験建物の平面図および断面図

### 2.3 観測概要

今回の実験では、試験建物の振動特性の変動を捉えるために、様々な測定が行われた。本研究では、そのうち、加速度記録、層間変位記録、柱のひずみ記録を用いた。各観測位置を図1に示す。これらの観測記録のサンプリング周波数は200Hzである。加速度計は各階に南東と北西の2ヶ所に計16台が設置された。同様に変位計は各階の南東と北西に2ヶ所に計14台が設置された。柱の歪みゲージは全ての柱の上部と下部にそれぞれ4個ずつ取り付けられ、柱の上下方向のひずみ成分が計測された。また、これらとは別に常時微動の連続モニタリングを実施しており、その詳細はその<sup>1)</sup>に記載した。

## 3. 振動特性の評価手法

本研究では、4種類の異なる方法を用いて試験体の1次固

有振動数を評価した。以下に計算法を述べる。ここで、加速度、層間変位の記録は各層で南東と北西 2 点の記録を短辺方向、長辺方向でそれぞれ平均したもの、その層における加速度記録、層間変位記録として用いた。

### 3.1 ひずみを用いた荷重変位関係に基づく算定法(計算法 A)

図 1 の(d)のように柱に取り付けられた歪みゲージから得られたひずみより応力を求め、この応力から柱上部と下部のモーメントを算出する。これら 2 点のモーメントより柱のせん断力を求め、各層に 6 本ある柱のせん断力を足しあわせることで、それを層せん断力とした。そして、そのせん断力と層間変位より、図 3 のような荷重-変位関係を各層について得る。そして、その関係から最小二乗法により等価剛性を算出する。この手法により得られた層剛性と各層の重量を用いて固有値解析を行い、固有振動数を算出した。これを固有振動数 A と呼ぶ。

### 3.2 加速度を用いた荷重変位関係に基づく算定法(計算法 B)

各層の加速度記録と重量より層せん断力を算出する。この層せん断力から前節の計算法 A の場合と同様に等価剛性を求め、固有値解析によって固有振動数を算出した。これを固有振動数 B と呼ぶこととする。

### 3.4 加速度記録からの振動モード同定手法(計算法 C)

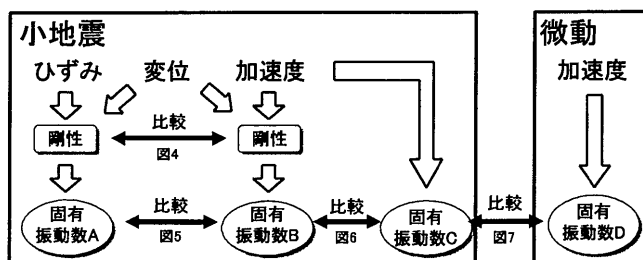
5 階の加速度記録に、ARMA モデルによる振動モード同定法<sup>2)</sup>を適用して、小地震記録に相当する加速度データから直接的に小地震時の固有振動数を求めた。以下、この手法によって得られた結果を固有振動数 C と呼ぶ。

### 3.4 常時微動記録からの振動モード同定手法(計算法 D)

震動台実験が実施されていない静穏時の常時微動記録を用いて、ARMA モデルによる振動モード同定法により<sup>2)</sup>、常時微動時の固有振動数を求めた。以下、この手法によって得られた結果を固有振動数 D と呼ぶ。

### 3.5 各計算法の相互比較

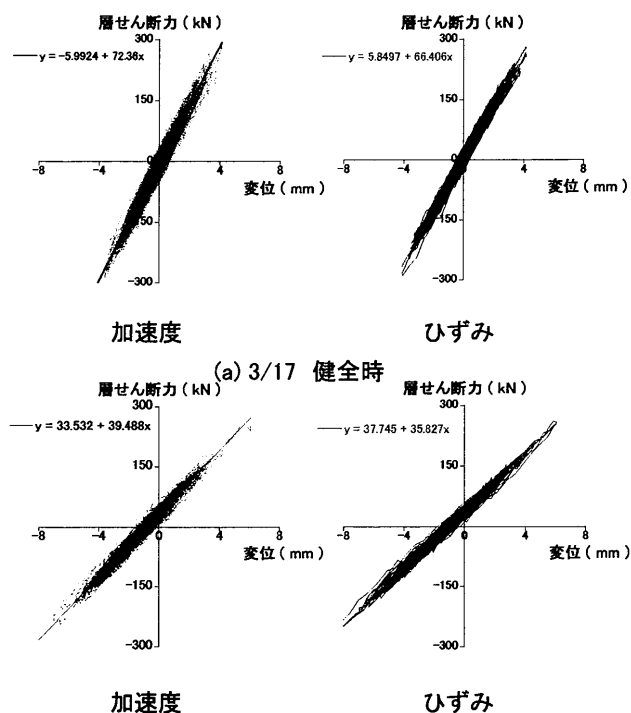
図 2 に示した関係のように、各計算法から得られた固有振動数の比較を行った。計算法 A と B においては、加振実験より得られた各記録の剛性と固有振動数について比較を行う。計算法 A からは純粋な鉄骨フレームとしての結果が、計算法 B からは間仕切り壁等の非構造部材の影響を受けた結果が得られる。これらを比較することにより、非構造部材が建築物に与える影響を把握できると考える。計算法 B と C では、ともに小地震時の加速度記録から得られた結果を用いて固有振動数を求めている。異なる手法を用いて固有振動数を求めるので、その結果を比較することで、各手法の妥当性を検討す



(a) 加振実験

(b) 微振動観測

図 2 各振動特性評価の関係



(b) 3/21 損傷後

図 3 W-20%加振による 2 階の荷重-変位関係

る。計算法 C と D は振動モード同定法を用いて、小地震動記録と常時微動記録の比較を行った。これにより、常時微動と小地震ひずみ振幅レベルが振動特性に与える影響を調べる。

## 4. 振動特性の算定、同定結果

加振期間を表 2 の 6 つの区分に分けて、各手法により得られた結果を比較した。ただし、3 月 19 日のホワイトノイズ 20%、40%加振の記録については、データが正確に記録できなかったため、考察から除外した。

### 4.1 計算法 A と B の比較

小地震動記録を用いた計算法 A と B を比較してみる。図 4 および図 5 に計算法 A と B による剛性と固有振動数の結果を示す。図 4 をみると、計算法 A、B でともに X 方向、Y 方向どの層でも同じ割合で剛性が減少している傾向が認められる。

表1 加振実施日時

| 3月17日 |                        | 3月18日 |                        | 3月19日 |                  | 3月21日 |                        |
|-------|------------------------|-------|------------------------|-------|------------------|-------|------------------------|
|       | ホワイトノイズ(20%,40%) case1 |       | ホワイトノイズ(20%,40%) case2 |       | ホワイトノイズ(20%,40%) |       | ホワイトノイズ(20%,40%) case3 |
| 18:42 | 東扇島 30%                | 14:10 | 気象庁 60%                | 15:02 | 東扇島 100%         | 15:00 | 三の丸100%①               |
| 19:03 | 東扇島 50%                | 14:27 | 気象庁 100%               |       |                  |       | ホワイトノイズ(20%,40%) case4 |
| 19:20 | 三の丸 20%                | 15:47 | EI-レベル2 100%           |       |                  | 19:53 | 三の丸100%②               |
| 19:39 | 三の丸 35%                |       |                        |       |                  |       | ホワイトノイズ(20%,40%) case5 |
| 19:54 | EI-レベル2 30%            |       |                        |       |                  | 20:44 | 三の丸100%③               |
| 20:11 | EI-レベル2 50%            |       |                        |       |                  |       | ホワイトノイズ(20%,40%) case6 |

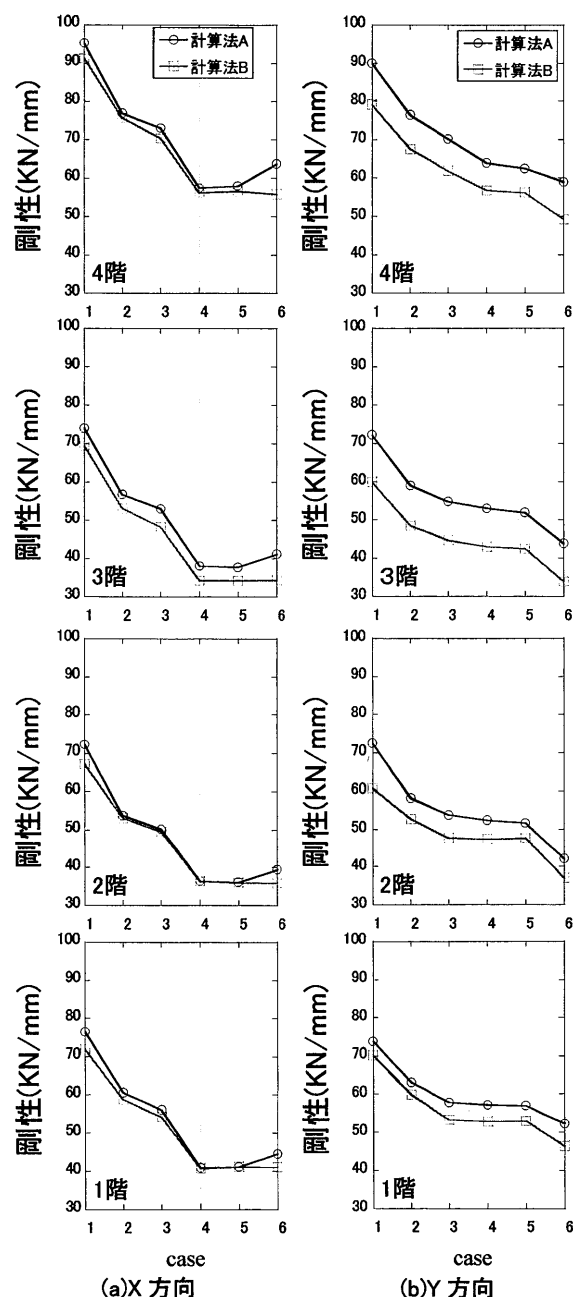


図4 W-20%加振による各層の剛性推移(計算法A,Bの比較)

詳細には、X方向ではcase3とcase4の間で、Y方向ではcase5とcase6の間で大きく剛性が低下する傾向が認められる。図5をみても、加振を受けるたびに固有振動数が減少するが、case3～case5の値の減少割合は固有振動数の方が大きく、これらは縮約層の剛性変化によるものである。case3とcase4の間には、三の丸100%加振①があり、X方向の梁に破断が発生

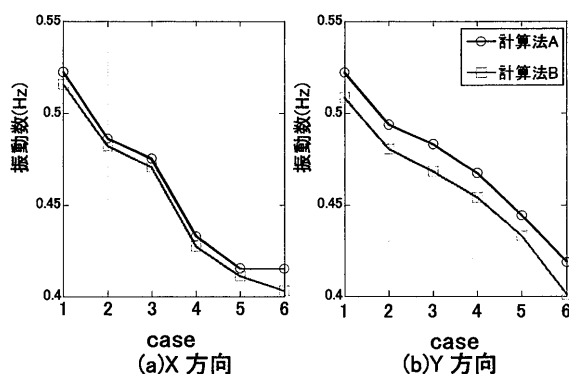


図5 W-20%加振による固有振動数推移(計算法A,Bの比較)

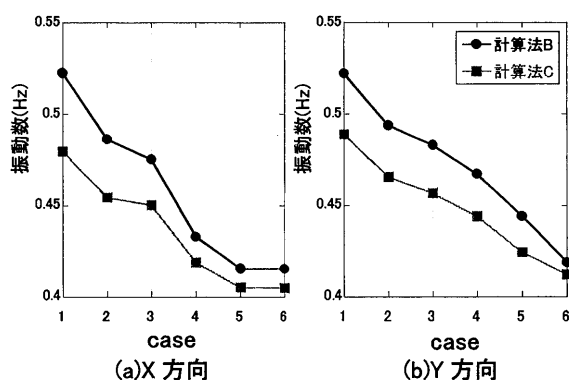


図6 加速度記録を用いた固有振動数の推定(計算法B,Cの比較)

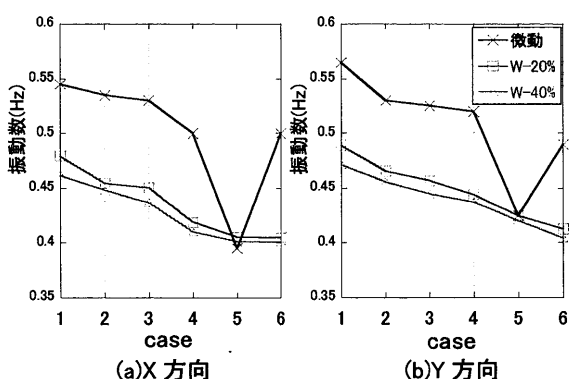
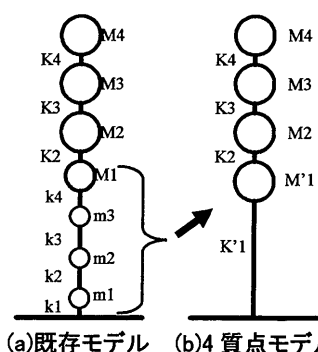
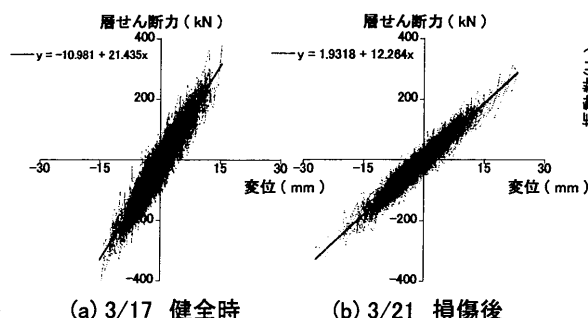


図7 小地震と微振動による固有振動数(計算法C,Dの比較)

しており、Y方向の梁にも破断が生じている<sup>1)</sup>。図4および図5は、梁破断などの重大な損傷が発生するような大地震を経験することで、建物剛性や固有振動数が低減することを示している。また、図4および図5では、ともに計算法Bの結果が計算法Aの結果より低い値を示している。これは、間仕切り壁などの非構造部材による建物の振動特性への影響を示

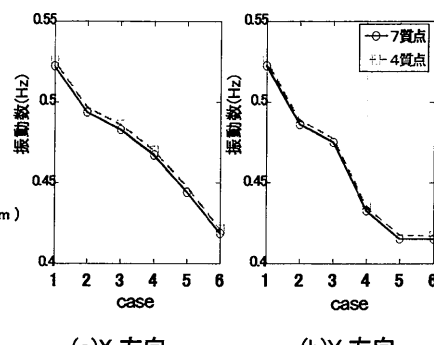


(a)既存モデル (b)4 質点モデル



(a) 3/17 健全時

(b) 3/21 損傷後



(a)X 方向

(b)Y 方向

図9 4質点縮約モデルの作成概要 図10 W-20%加振による縮約1層の荷重-変位関係 図11 W-20%加振による固有振動数推移

していると考えられる。

## 4.2 計算法BとCの比較

小地震記録を用いた計算法BとCによる固有振動数の評価結果を図6に示す。図6より、X方向、Y方向とも一律に約0.05Hzの幅で、固有振動数Cのほうが小さいことが確認できる。しかし、加振の進行に伴う固有振動数の減少の傾向などはおおむね一致しているといえる。これは、振動モード同定法によっても、地震経験によって建物の剛性が低下する現象を評価できることを示している。

## 4.3 計算法CとDの比較

常時微動記録と加振実験記録の同定値をケース毎に比較したものを図7に示した。この図をみると、常時微動記録と加振実験記録で固有振動数の値に20%程度の差があるが、推移する傾向では一致していることがわかる。なお、case5に対する常時微動記録の固有振動数が大幅に減少しているが、これは、表1に示すように、加振の間隔が短く、試験建物が常に振動しており振動振幅レベルがほかのcaseとは異なるためと考えられる。

## 5. 4 質点系縮約モデルによる振動特性の算定

構造モニタリングを行うにあたって、本実験で行った計測のように各層における変位や、歪みの測定を行うことは実際の高層建物では高コストであり、現実的とはいえない。そこで、今回、実大で再現した1~4層と3層分を縮約してある5層を1つの質点に縮約し、全体で4質点のモデルを作成し、より少ない計測点でのモニタリングの可能性を検討した。

### 5.1 縮約モデルでの算定方法

4質点へモデル化する際、図9のように、すでに縮約されている上部3層はそのまま、1~5層に対して縮約を行った。重量は1~5層の重量を合わせたものを使用し、変位は各層の層間変位を足し合わせたものとする。また、加速度記録は、5層で計測したものを使用した。これらの記録から、図10に示

したように荷重-変位関係を求め、3章で記述した手法を用いて等価剛性を算出し、固有値解析より固有値を求めた。

### 5.2 縮約モデルによる結果と考察

図11に、縮約モデルにおける固有振動数を示した。固有振動数の推移をみると、図4で示した「7質点モデル」での固有振動数と一致している。このことは、縮約モデルによっても損傷による振動特性への影響を検知できる可能性を示している。

## 6. まとめ

本研究では、小地震観測と常時微動長期モニタリングの観測記録を用いて、試験建物の加振実験期間における振動特性の変動をあらゆる角度から算定した。その結果、荷重-変位関係に基づく固有振動数や、小地震に基づく固有振動数と常時微動に基づく固有振動数の値そのものは一致することはないが、大地震を経験することによる固有振動数や剛性変化の減少傾向は、一致することを確認できた。また、縮約モデルにおける算定結果から、観測点を間引いた場合の構造モニタリングの可能性についても示すことができた。

### 謝辞

本研究は、文部科学省が推進する「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」の下で防災科学技術研究所からの委託研究として東京理科大学が実施した「長周期地震動による被害軽減対策の研究開発（その2）」の研究成果の一部である。

### 参考文献

- 1) 井上、長江ほか：高層建物の耐震性評価に関するE-ディフェンス実験—その1~11、日本建築学会構造系論文集、C-1 pp. 823-832, pp.873-884, 2008.9
- 2) 森本、金澤ほか：E-ディフェンス高層建物試験体の長期モニタリング—その1、日本建築学会関東支部研究報告集、2009.3

- \*1 東京理科大学理工学部建築学科
- \*2 電力中央研究所地球工学研究所 主任研究員・博士(工学)
- \*3 東京理科大学大学院理工学研究科建築学専攻
- \*4 東京理科大学理工学部建築学科 助教・博士(工学)
- \*5 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)
- \*6 (独) 防災科学技術研究所 研究員・博士(工学)