T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	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3 常時微動記録に基づく補強試験体の振動特性評価(構造)
Title	
著者(和文)	尾野 勝, 金澤健司, 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, Vol. 80, , pp. 277-280
Citation(English)	, Vol. 80, , pp. 277-280
発行日 / Pub. date	2010, 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:http://ci.nii.ac.jp/naid/110008729953

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

Architectural Institute of Japan

2009年度日本建築学会
関東支部研究報告集

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3　常時微動記録に基づく補強試験体の振動特性評価

構造－振動

正会員 ○尾野勝[*1]　正会員 金澤健司[*2]
正会員 佐藤大樹[*1]　正会員 北村春幸[*1]
正会員 長江拓也[*3]

固有振動数　常時微動　高層建物　耐震補強
震動台実験　長期モニタリング

1. はじめに

近年，建築物の構造健全性を評価する手法として構造ヘルスモニタリングに関する研究が国内外で活発に実施されている。実際に，既往の研究によって大地震等の過大な荷重を受けた後に固有振動数が低下する現象が報告されている[1)]。以上の背景を基に，筆者らは，実大三次元振動破壊実験施設（E-ディフェンス）での実大鉄骨建物の震動破壊実験の機会を利用して，建築物の建設初期段階から加振経験を経て，解体に至るまでの建築物の長期にわたる振動特性を連続的に実施し，その振動特性の遷移過程を評価してきた[2), 3)]。前報[4)]では，1980 年以前の初期に建設された高層建物の耐震性を確認するための震動台実験において高層建物試験体の振動特性を評価した結果を報告した。

E-ディフェンスでは，既存高層建物に耐震補強を施した場合を想定した震動台実験が改めて実施された。本研究では，その試験建物の振動特性を長期微振動モニタリングによって評価した。

2. 試験建物概要

対象建物は，E-ディフェンスにおいて，2009 年 9 月に実施された「E-ディフェンスを用いた長周期地震動を受ける耐震補強超高層建物の震動台実験」の試験建物である。

試験建物は，下部 4 層の鋼構造架構の上に大重量コンクリート錘と積層ゴムを縮約層として配し，高さ 80m，21 階建ての高層建物を模擬している。平面形状は前報と同様に，X 方向(南北方向)8m×1 スパン，Y 方向(東西方向)6m×2 スパンである。試験建物の平面図および立面図を図 1 に示す。

前回の 2008 年 3 月の実験[5)]において大梁の下フランジが繰り返し変形によって破断損傷が発生することがわかった。本実験では，骨組の変形を抑えるための制振補強と骨組自体の耐震性を増すための溶接接合補強を施すことで，前回実験での試験建物よりも耐震性能を向上させた試験建物が用意された。制振補強には，鋼材ダンパーとオイルダンパーが使われ，そのダンパーの種類・配置により 4 つの試験建物ケースにおける制振効果の検証を行った。表 1 に示すように試験建物のケースは以下のように設定した。まず，最初のケースは，実架構部と縮約層の 5 層と 6 層に鋼材ダンパーを組み込んだ試験体（UBB-1)であり，次に縮約層のダンパーを取り外し，実架構部のみに鋼材ダンパーを組み込んだ試験体(UBB-2)，そして，鋼材ダンパーの代わりにオイルダンパーを組み込んだ試験体(OIL)である。最後に，実架構部のダンパーを全て取り外し，ダンパーを組み込まない試験体（FRAME)とした。図 1 に示すように制振ダンパーは，実架構部においては X 方向，Y 方向ともに 2 機ずつ計 16 機設置され，縮約層には U 型の鋼材ダンパーが 5 層と 6 層に各 2 機ずつ計 4 機が設置された。

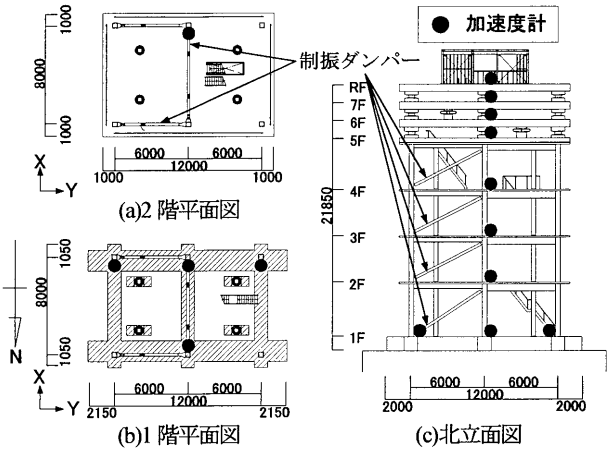


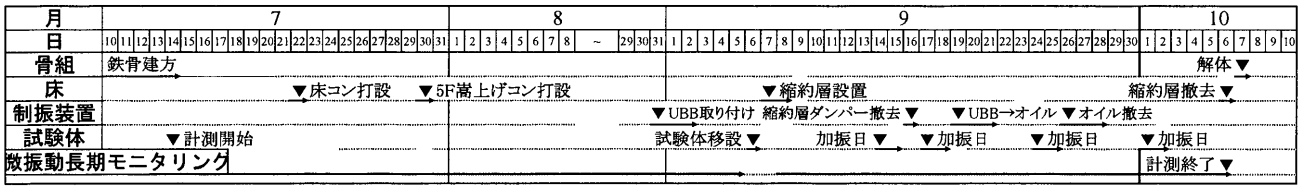
図 1　試験建物の平面図と断面図および微振動計測点

3. 微振動観測概要

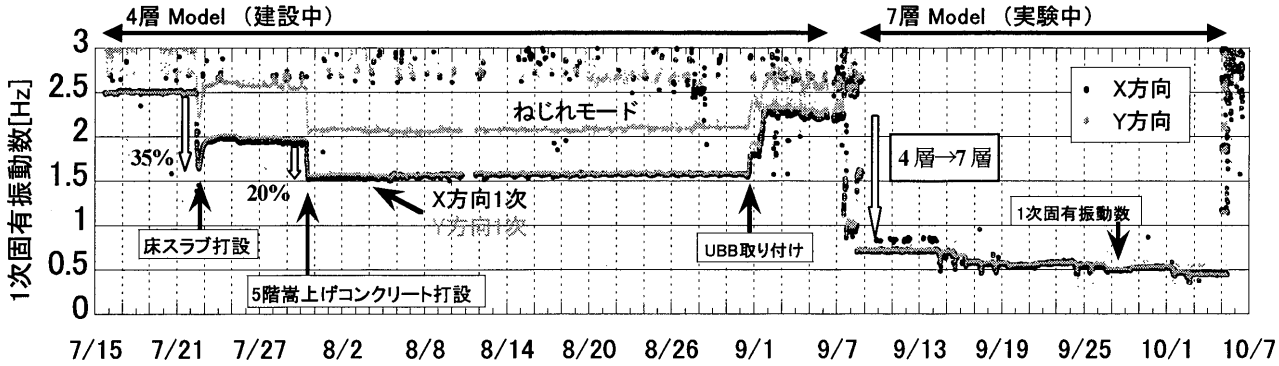
試験建物の鉄骨建方終了時から解体に至るまで，微振動の長期連続モニタリングを実施した。観測は，計 11 台の三成分加速度計を用いて，2009 年 7 月 15 日から 10 月 7 日まで行った。収録装置のサンプリング周波数は 200Hz で，1 時間ごとに観測記録を保存した。図 1 に，観測装置の設置地点を示す。加速度計は試験建物の南側中柱を中心として，各階柱脚に配置した。さらに，試験建物のロッキング振動を把握するために基礎コンクリート上にも，4 台の加速度計を配置した。なお，試験建物の建設開始から床スラブ打設後までは各階の床版が存在せず，床上での計測ができないことから，当該箇所の大梁端部の下フランジに治具を用いて床の下側から加速度計を取り付けた。

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan



(a) 試験建物の施工工程



(b) 1 次固有振動数の変動

図 2　試験建物の施工工程および建設初期段階から解体に至るまでの固有振動数の長期的変動

4.　評価方法

2009 年 7 月 15 日から 10 月 7 日までの微振動の長期モニタリングの観測記録を用いて，試験建物の振動特性を同定した。これらの観測記録に対して 1 時間毎の記録を 5 分間のサンプルデータに分割した後，それぞれのサンプルデータに対して ARMA-Burg 法[6]を適用して，5 分毎の固有値（固有振動数と減衰定数）を同定した。さらに，全観測点の観測記録を用いて，複素固有モード（以下，モード）を同定した。

ARMA-Burg 法の適用条件は，R 階のセンサにおける X 方向および Y 方向の加速度記録を基準として振動特性を同定した。建物に縮約層が載る前の 4 階鉄骨建物のとき（7 月 15 日から 9 月 7 日）には，AR 次数を 40 次とし，デシメーション数は 8 とした。一方で，7 層となった 9 月 8 日以降においては，AR 次数を 20 次とし，デシメーション数は 32 とした。これは，試験建物が 4 層から 7 層へと変更されて長周期化したことに対応するための処置であり，デシメーション数を上げることで試験建物の低振動数領域に着目し，振動特性の変化を把握するためである。

ARMA-Burg 法を用いると AR 次数の数だけ固有値の候補値が得られるため，その中から有意な振動特性のみを精度良く選定する必要がある。本研究では MAC 関数を用いた固有値の選定法を適用する。

5.　長期間にわたる振動特性評価の結果と考察

図 2 に，前節の評価手法を用いて算出した 2009 年 7 月 14 日から 10 月 6 日までの試験建物の 1 次固有振動数を示す。なお，Y 方向においては 2 種類の 1 次固有振動数の値が検出されることがあるが，一方は Y 方向の並進モード，もう一方はねじれモードである。

図 2 の固有振動数の変動を見ると，7 月 22 日の床スラブ打設により固有振動数が急激に減少し，その後ゆるやかに増加していることがわかる。詳細には，打設前の 2.5Hz から打設後には 1.6Hz となり，約 35%の減少がある。そして，その後 1.9Hz まで増加し安定した。これは，床スラブ打設により建物重量が増加したことによって固有振動数が減少し，その後のコンクリート硬化に伴い建物剛性が増加することで固有振動数も増加したためである。また，7 月 30 日における 5 階嵩上げコンクリート打設時においても，固有振動数が 1.95Hz から 1.55Hz となり，約 22%減少し，コンクリート打設に伴う建物重量の増加による影響が見られた。しかし，その後のコンクリート硬化による固有振動数の増加は見られなかった。これは，5 階床スラブと嵩上げコンクリートの間にはスチレンフォームが設置されており，嵩上げコンクリートによる 5 階床スラブおよび大梁の剛性上昇を防止しているためであり，その効果が意図した通りに発揮されたためである。

8 月 31 日から 9 月 2 日にかけて鋼材ダンパーが設置された。この段階では，縮約層が設置されていないため，1 階から 4 階までの実架構部のみに取り付けられた。この制振ダンパーの効果により試験建物の建物剛性が増加し，それによる固有振動数の増加が見られた。詳細には，取り付け前の 1.5Hz からダンパーの効果により 2.3Hz になり，約 1.5 倍の増加が確認できる。このように，鋼材ダンパーの設置が建築物の微震動時の剛性を増加させることを確認できた。

NII-Electronic Library Service

表1　加振実験工程

UBB-1		
9月14日		
No.	name	dir
1	東京都庁波　25%	XYZ
2	ホワイトノイズ　20%	XY
3	ホワイトノイズ　40%	XY
4	ホワイトノイズ　60%	XY
5	Elcentro-Lv1	XY
6	Elcentro-Lv2	XY
7	Sweep-Y	Y
8	気象庁波	XY
9	東扇島波	XY
9月15日		
No.	name	dir
10	東京都庁波　25%	XYZ
11	ホワイトノイズ　40%	XY
12	三の丸　100%	XY
13	三の丸　80%	XY
14	三の丸　60%	XY
15	ホワイトノイズ　40%	XY

（鋼材ダンパー：1-4層，縮約5,6層）

UBB-2		
9月17日		
No.	name	dir
16	ホワイトノイズ　20%	XY
17	ホワイトノイズ　40%	XY
18	ホワイトノイズ　60%	XY
19	Elcentro-Lv1	XY
20	Elcentro-Lv2	XY
21	Sweep-Y	Y
22	気象庁波	XY
23	東扇島波	XY
9月18日		
No.	name	dir
24	東京都庁波　25%	XYZ
25	ホワイトノイズ　40%	XY
26	三の丸　100%	XY
27	ホワイトノイズ　40%	XY

（鋼材ダンパー：1-4層）

OIL		
9月24日		
No.	name	dir
28	ホワイトノイズ　20%	XY
29	ホワイトノイズ　40%	XY
30	ホワイトノイズ　60%	XY
31	Elcentro-Lv1	XY
32	Elcentro-Lv2	XY
33	Sweep-Y	Y
34	気象庁波	XY
35	東扇島波	XY
9月25日		
No.	name	dir
36	東京都庁波　25%	XYZ
37	ホワイトノイズ　40%	XY
38	三の丸　100%	XY
39	ホワイトノイズ　40%	XY

（オイルダンパー：1-4層）

FRAME		
10月1日		
No.	name	dir
40	ホワイトノイズ　20%	XY
41	ホワイトノイズ　40%	XY
42	ホワイトノイズ　60%	XY
43	Elcentro-Lv1	XY
44	Elcentro-Lv2	XY
45	Sweep-Y	Y
46	ホワイトノイズ　40%	XY
47	気象庁波	XY
48	東扇島波	XY
49	ホワイトノイズ　40%	XY
50	三の丸　100%	XY
51	ホワイトノイズ　40%	XY
10月2日		
No.	name	dir
52	東京都庁波　25%	XYZ
53	ホワイトノイズ　40%	XY
54	三の丸　100%	XY
55	ホワイトノイズ　40%	XY
56	三の丸　100%	XY
57	ホワイトノイズ　40%	XY
58	三の丸　100%	XY
59	ホワイトノイズ　40%	XY
60	三の丸　100%	X
61	ホワイトノイズ　40%	XY
62	三の丸　100%	X
63	ホワイトノイズ　40%	XY

限界性能試験

（ダンパー無し）

表2　試験体ケースにおける加振前後の1次固有振動数

	UBB-1	UBB-2	OIL	FRAME
加振前	0.72	0.59	0.59	0.54
加振後	0.67	0.58	0.57	0.46

(Hz)

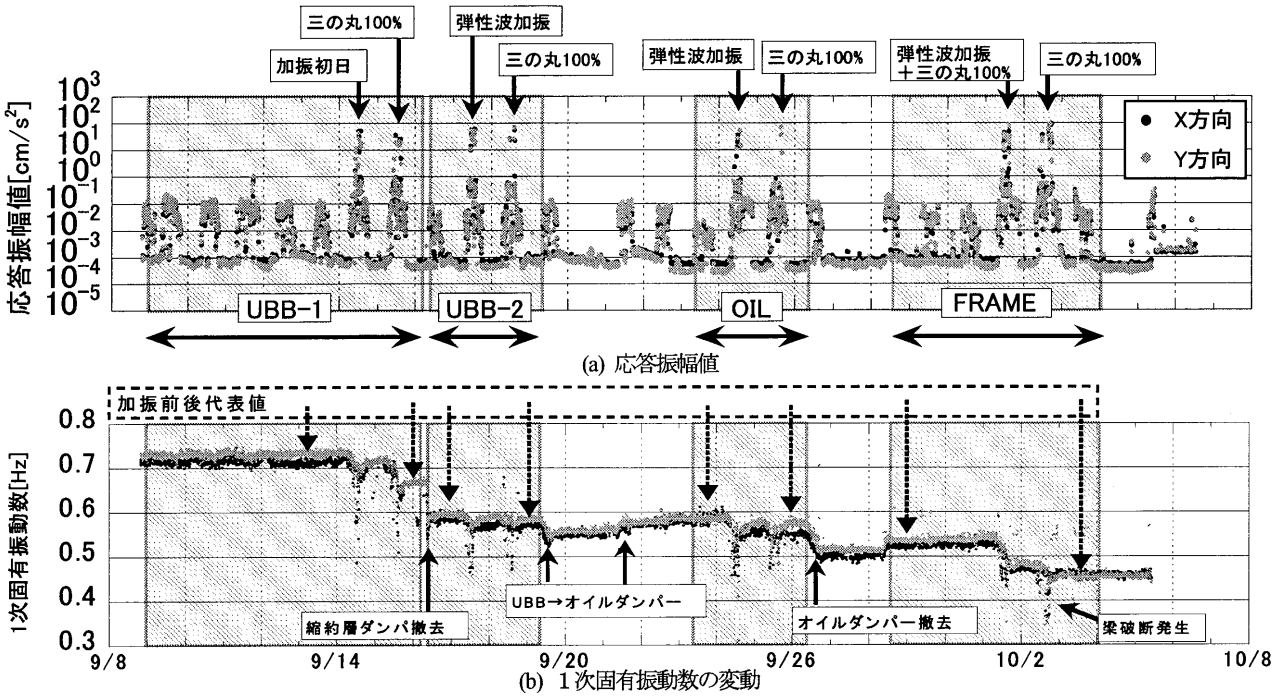


図3　加振期間における試験建物の応答振幅値および固有振動数の変動

9月7，8日には，縮約層の設置が行われた。縮約層が下層から順に設置されるに従い固有振動数が減少する傾向が確認できる。固有振動数は，縮約層設置前の2.3Hzから設置後には0.72Hzに減少した。

以上のように微振動の長期モニタリングから試験建物の建設に伴う固有振動数の変動を捉えることができた。次節では，加振実験期間に着目して考察を行う。

6.　加振実験期間における振動特性評価の結果と考察

表1に震動台実験における加振実験工程を示す。入力地震動として試験建物ケースごとにElcentro-Lv.1，Lv.2，気象庁波，東扇島波，首都直下波，三の丸波の加振を行い，各試験建物ケースにおける応答が確認された。また，地震波加振の他に，試験建物の弾性性状を確認することを目的としたホワイトノイズ加振およびスイープ波加

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

振（Y 方向のみ）が行われた。また，10 月 2 日には，梁が破断するまで複数回の加振を続け，3 回目の三の丸波 100%加振で Y 方向の梁端部が破断，その後，梁破断が確認されなかった X 方向のみに三の丸波 100%加振を 2 回繰り返し行った。その結果，X 方向の梁端部にも破断が発生した。本文では、10 月 2 日の最初の三の丸 100%加振（加振番号 54 番）以降を限界性能確認試験，それ以前の加振を耐震性能確認試験と呼ぶ。

図 3 に加振期間を含んだ 9 月 8 日から 10 月 5 日までの応答振幅値及び 1 次固有振動数を示す。応答振幅値は R 階の加速度記録の RMS 値である。また，表 2 に図 3(b)の各試験建物ケースにおける加振前後の 1 次固有振動数の代表値を示す。

6.1 加振期間における固有振動数の変化

図 3(b)と表 2 より，試験建物の加振期間中における 1 次固有振動数の変動の傾向を分析してみる。9 月 14，15 日の UBB-1 の加振では，固有振動数が大きく減少している。14 日と 15 日では 15 日の方が大きく減少していることがわかる。詳細には，加振未経験の状態の約 0.72Hz から加振後には約 0.67Hz になり，約 10%減少した。これらのことから，加振未経験の状態からより大きな加振を経験することで試験建物の性状が変化すると考えられる。

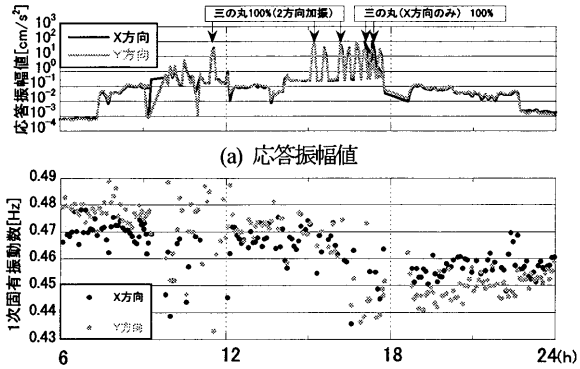
一方，その後の UBB-2 と OIL の加振実験前後には固有振動数の減少は見られなかった。これは，これらの状態において先に実施された UBB-1 の耐震性能確認試験を超える応答が発生しなかったため鉄骨フレームには変化が起こらなかったことが原因と考えられる。

そして，FRAME の状態では，再び大きく固有振動数が減少した。これは，制振装置が取り外され鉄骨のフレーム状態になったことで，ダンパー設置時に経験した応答よりも大きな応答を受けたことにより試験建物の剛性が変化したためと考えられる。

10 月 2 日の加振最終日では，三の丸波 100%加振により梁端部に破断が発生した。図 4 に加振最終日の応答振幅値と 1 次固有振動数の変動を示す。加振前と加振後を見ると，固有振動数はX方向では 0.47Hz から 0.46Hz，Y 方向では 0.49Hz から 0.45Hz にそれぞれ減少している。Y 方向が X 方向よりも減少量が大きいのは，Y 方向の損傷箇所が X 方向に比べて多いためと考えられる。

6.2 試験建物ケースにおける比較

次に各試験建物ケースでの固有振動数の比較を行う。表 2 より UBB-1 と UBB-2 では，縮約層のダンパーを取り外したことにより固有振動数の減少が確認できる。詳細には，ダンパー撤去前の 0.67Hz からダンパーを取り外したことで 0.59Hz に減少した。一方で，UBB-2 と OIL 時の固有振動数にはほとんど差は見られなかった。このことから，微振動レベルの振動時には，鋼材ダンパーとオイルダンパーが建物剛性に与える影響がほぼ同じであることがわかる。そして，オイルダンパーを取り外し OIL から FRAME へ試験体が切り替わった後に，固有振動数が減少する傾向も確認できる。



(a) 応答振幅値

(b) 1 次固有振動数

図 4 加振最終日の応答振幅値と 1 次固有振動数の経時変化

7. まとめ

本研究では，制振部材や梁端部の補強を行った高層建物の震動台実験の試験建物において取得した長期間の微振動データを用いて，建設時から加振経験を経て解体における試験建物の構造ヘルスモニタリングを試みた。その結果，制振部材の設置条件や加振経験による試験建物の状態変化に伴う固有振動数の変動を把握することができた。

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) 例えば，大場新太郎，濱川尚子：1995 年兵庫県南部地震における杭の損傷による建物固有周期の変化，日本建築学会構造系論文集，第 495 号，pp.63-70，1997.5.

(2) 桐田史生，金澤健司，北村春幸，松岡祐一：実大 4 層建物における固有振動数の長期モニタリング（E-ディフェンス鋼構造建物実験研究　その 30），日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp.851-852，2008.9.

(3) 森本真史，金澤健司ほか：E-ディフェンス高層建物試験体の長期モニタリングーその 1　常時微動記録に基づく振動特性評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp.695-696，2009.8.

(4) 井上，長江ほか：高層建物の耐震性評価に関する E-ディフェンス実験ーその 1~11，日本建築学会学術講演梗概集，C-1，pp.823-832，pp.873-884，2008.9.

(5) 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(CD-ROM)，2082，2009.3.

(6) 森本真史，金澤健司，桐田史生，北村春幸：耐震補強における低層鉄筋コンクリート造建物の振動特性の経時変化，構造工学論文集，Vol.54B，p493-500，2008

*1 東京理科大学理工学科建築学部

*2 電力中央研究所地球工学研究所

*3 （独）防災科学技術研究所

NII-Electronic Library Service