

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	実大震動台実験における制振構造建物の長期振動モニタリング
Title(English)	LONG-TURM VIBRATION MONITORING ON PASSIVELY CONTROLLED STEEL BUILDING OF E-DEFENSE FULL-SCALE TEST
著者(和文)	尾野勝, 金澤健司, 佐藤大樹, 北村春幸, 引野剛
Authors(English)	Kenji KANAZAWA, daiki sato, Haruyuki Kitamura, Tsuyoshi Hikino
出典(和文)	第13回日本地震工学シンポジウム論文集, , , pp. 1538-1543
Citation(English)	, , , pp. 1538-1543
発行日 / Pub. date	2010, 11

実大震動台実験における制振構造建物の長期振動モニタリング  
**LONG-TURM VIBRATION MONITORING ON PASSIVELY  
 CONTROLLED STEEL BUILDING OF E-DEFENSE FULL-SCALE TEST**

尾野勝<sup>1)</sup>、金澤健司<sup>2)</sup>、佐藤大樹<sup>3)</sup>、北村春幸<sup>3)</sup>、引野剛<sup>4)</sup>

Masaru ONO<sup>1</sup>, Kenji KANAZAWA<sup>2</sup>, Daiki SATO<sup>3</sup>, Haruyuki KITAMURA<sup>3</sup>,  
 Tuyoshi HIKINO<sup>4</sup>

1) 東京理科大学大学院理工学研究科建築学専攻

<sup>1</sup> Graduate Student, Faculty of Science and Engineering, Tokyo Univ. of Science  
 e-mail : j7109609@ed.noda.tus.ac.jp

2) 電力中央研究所、主任研究員 博士 (工学)

<sup>2</sup> Research Engineer, Central Research Institute of Electric Power, Dr. Eng.  
 e-mail : kanazawa@criepi.denken.or.jp

3) 東京理科大学理工学部建築学科

<sup>3</sup> Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science

4) 防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター

<sup>4</sup> National Institute for Earthquake Disaster Prevention Research

**ABSTRACT:** Continuous structural health monitoring of a steel building specimen on the full-scale shaking table test is conducted for investigating modal properties of a passively controlled steel building subjected to large earthquakes. The main results in the paper are summarized as follows: (1) The changes in the first natural frequency due to the construction works and seismic experiences can be detected clearly. (2) Within tiny deformation of ambient vibration different characteristics in natural frequency and damping factors is observed in use of different types of seismic control devices.

**キーワード:** 固有振動数、鉄骨建物、常時微動、振動台実験、構造ヘルスマニタリング

## 1. はじめに

世界的にみても地震の発生頻度の高い日本では、建築物の耐震性能を正確に把握し、それに応じた対策を講じることが、防災・減災の面からも必要不可欠といえる。また、近年の大量消費型社会から循環型社会への移行を考えると、建築物は長期的に維持管理を行っていくことが望ましく、建築物の長寿命化が推し進められるなかで将来的に耐震性能の経年劣化が表面化することが懸念される。これらの背景の下で、近年、建築物の損傷の有無、さらには損傷の位置や程度を把握することによって建築物の構造健全性を評価する手法として振動特性評価に基づく構造ヘルスマニタリングに関する研究が活発に行われており<sup>1),2)</sup>、実測記録に基づく構造物の振動特性評価はその重要性を増してきている。特に常時微動計測に基づく振動特性評価は、比較的容易に高い頻度で実施することができることから、構造ヘルスマニタリングへの応用が期待されている。しかし、その実用化のためには、実大構造物の実損傷を実際の常時微動観測により評価することが必要不可欠である。しかし、現状では、その実測記録が不足している

ため実用化には至っていない。そこで、筆者らは、実大三次元震動破壊実験施設（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常時微動観測により連続的に実施し、その振動特性の遷移過程を評価してきた<sup>3),4)</sup>。

本論文では、E-ディフェンスで実施された制振構造建物実験<sup>5),6)</sup>において、試験建物の状態変化に着目し、鉄骨骨組み建方終了時から実験終了までの振動特性を微振動の長期モニタリングによって評価した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験建物概要

近年、地震等による被害を軽減するために制振技術を建築物へ適用する例が年々増加している。しかし、現状では、実際の大地震時におけるこれらの技術の効果は実証されていないため、できる限り実際の適用時と同じ条件下での検証が必要となる。そこで、これら制振技術の地震時における効果を確認することを目的として、2009年2月下旬から4月上旬に（独）防災科学技術研究所の兵庫耐震工学研究センター（兵庫県三木市）にあるE-ディフェンスを利用して制振構造建物の震動台実験が行われた。

図1に試験建物の立面図と伏せ図を示す。試験建物は、高さ約16mの5層鋼構造建物であり、その平面形状は、X方向（南北方向）が5m×2スパン、Y方向（東西方向）がスパン長7mと5mである。また、制振装置として1層から4層にブレース型の層間ダンパーが設置され、ダンパーは、X方向に2構面、Y方向に1構面設置されており計12本のダンパーが設置された。

試験建物の加振実験は、4種類の異なるダンパーを用意し、それぞれ順次交換して行われた。ダンパーの種類は、鋼材ダンパー、粘性ダンパー、オイルダンパー、粘弾性ダンパーが用意され、これらの実験の後にダンパーを設置しない非制振試験体での実験も実施された。鉄骨主架構はダンパーを入れ替え何度も用いることを考慮し十分な強度を持つように設計されている。

### 2.2 加振実験概要

加振実験は、4種類のダンパーを取り付けた各試験体と非制振試験体に対して2日間ずつ行われた。主要な地震波として1995年兵庫県南部地震JR鷹取駅記録（以下、鷹取波）が入力された。加振スケジュールは各試験体を通して1日目に試験体の振動特性を調べるためのホワイトノイズ加振とステップ波加振、2日目に実施される加振波を作成するための入力補償波作成加振と先述の鷹取波（15%, 25%, 40%, 50%）加振が実施された。そして、2日目には、ホワイトノイズ加振、ステップ波加振と鷹取波（50%, 70%, 84%, 100%）加振が行われた。ただし、非制振試験体においては、安全性を考慮し、2日目の実験では鷹取波70%加振までの入力にとどめられている。

### 2.3 観測概要

本研究では、試験建物の鉄骨建方終了時から加振実験終了まで、常時微動の長期連続モニタリングを実施した。観測は、三成分加速度計を10台用いて、2008年11月28日から2009年4月11日までの135日間で行い、試験体の状態変化を長期的かつ連続的に観測した。収録装置のサンプリング周波数は200Hzとし、

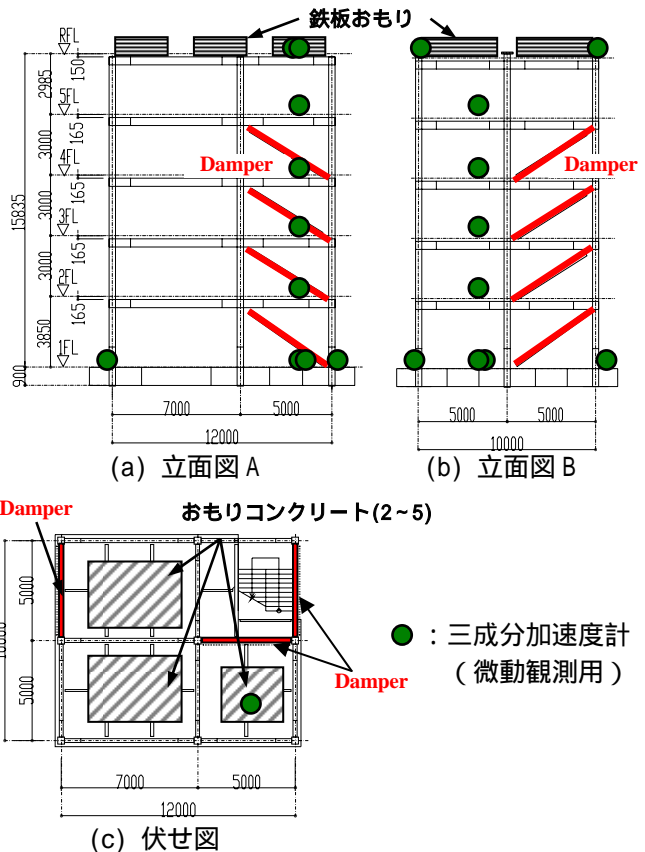


図1 試験建物平面図、立面図および観測位置

表 1 試験建物の施工工程表

月	11																														12																			1																			2																		
日	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19											
骨組	鉄骨建方																														床コン打設(5F,3F)																			鋼材ダンパー取付け																																					
床																															床コン打設 (RF,4F,2F)																			おもりコン打設																			試験体実験棟内移動 (仮置き)																		
制振部材																																																		ALC設置																			試験体震動台設置																		
その他																																																																					鉄板おもり設置																		
モニタリング																															計測開始																																						計測終了																		

月	2							3							4																																						
日	20	21	22	23	24	25	26	27	28	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
骨組	予備加振							加振							加振																																						
床								鋼材 粘性							オイル 粘性																																						
制振部材								ダンパー撤去							試験体撤出																																						
その他								鉄板おもり撤去																																													
モニタリング															計測終了																																						

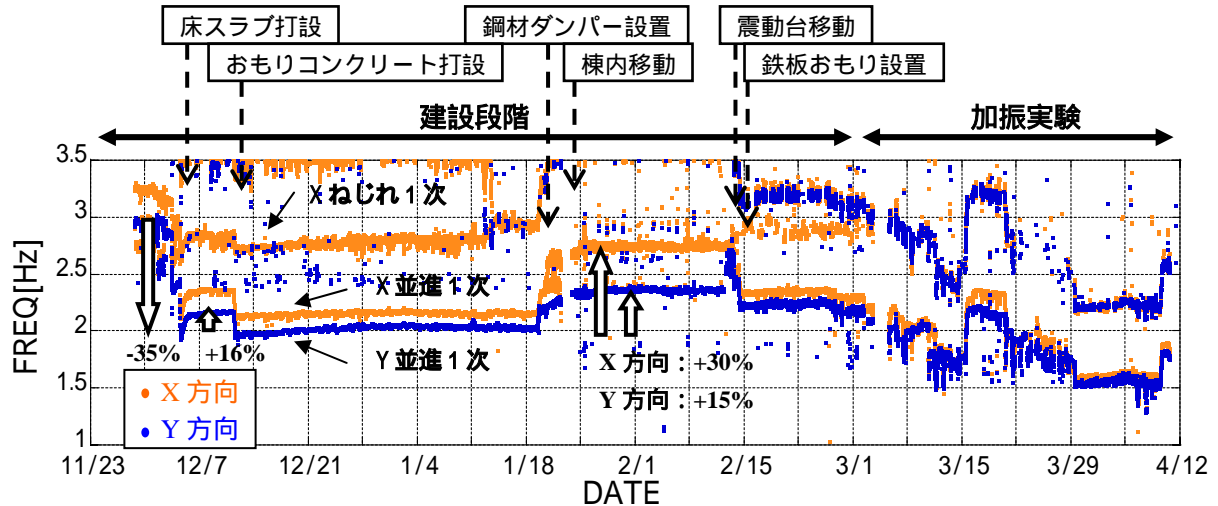


図 2 1次固有振動数の長期変動

1時間ごとに観測記録を保存した。加速度計は図1に示すように、2～4階に各1台ずつ、R階に2台設置し、試験建物のロッキングモードを捉え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。

### 3 評価手法

長期モニタリングによって観測された全ての記録を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<sup>7)</sup>を適用して、試験建物の5分毎の固有値(固有振動数と減衰定数)と複素固有モード(以下、モード)を同定した。ここで、加振時の記録でレンジオーバーした記録に対しては特別な処理は行わず、他の記録と同様に解析を行っている。ARMA-Burg法の適用条件は、AR次数を30次、デシメーション数を8個(時間刻み25Hz)とした。AR次数は、深夜の静穏時を代表時間としてパラメータスタディを行い決定した。

### 4 長期観測実施期間における振動特性の評価結果

表1に2008年11月6日から2009年4月13日における試験建物建方終了時から加振実験終了後に至るまでの施工工程表を、図2に全観測期間における1次固有振動数の同定結果を示す。ここでは、施工進捗状況と固有振動数の変化の傾向を比較し相互の関係を評価する。まず、図2を見ると、建方終了後に大きな固有振動数の減少がみられる。これは、表1の各階床スラブコンクリートの打設の期間と一致することから、床スラブ打設による建物重量の増加により固有振動数が減少した現象と考えられる。また、その後、固有振動数が緩やかに回復する傾向が見られることから、コンクリートの硬化に伴う床スラブ剛性の増加現象も捉えられている。それに対して、おもりコンクリートの打設では、床スラブ打設時と同様にコンクリート打設による重量増加のための固有振動数の減少が見られるが、その後のコンクリート硬化に伴う上昇は見られなかった。これは、おもりコンクリートの打設が試験建物の重量のみを付加させること

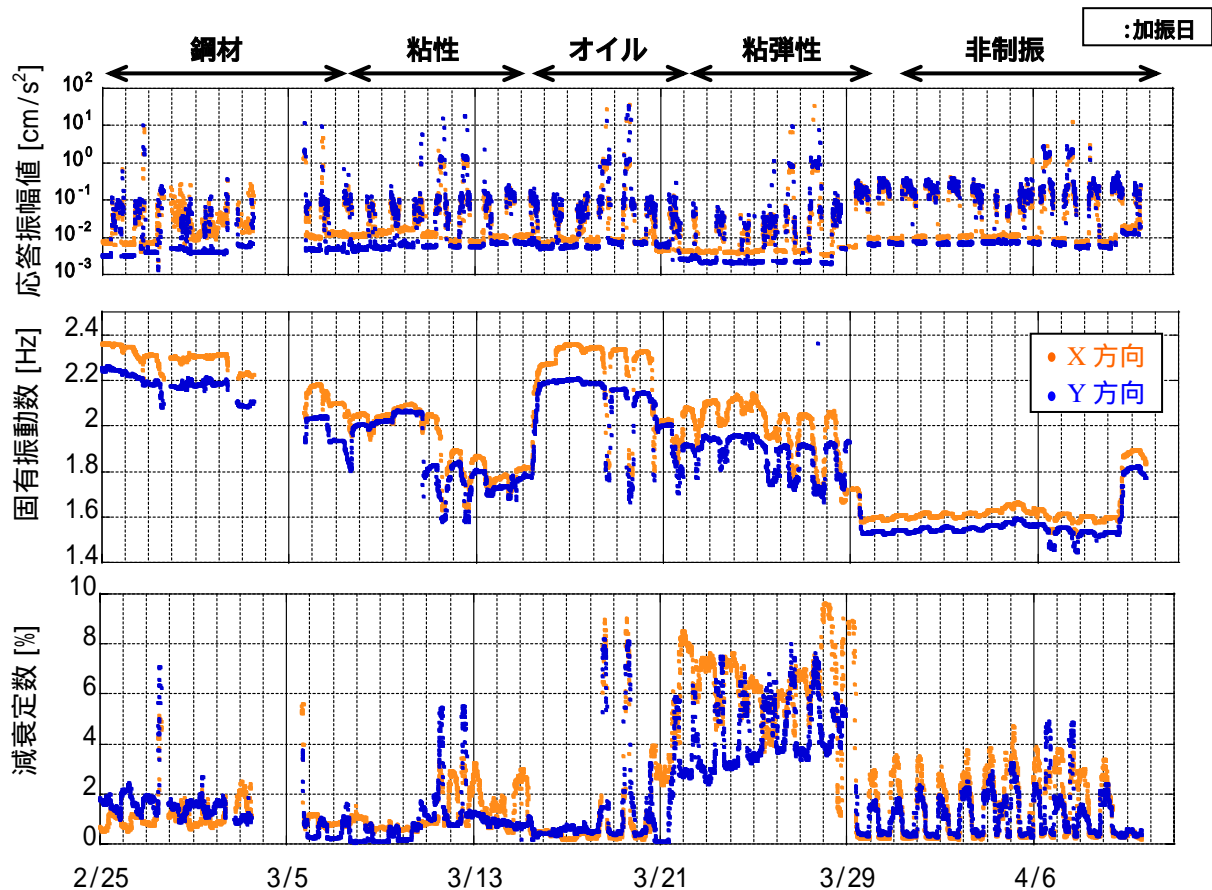


図3 加振期間における応答振幅値、固有振動数および減衰定数の推移

表2 各試験体モデルにおける加振実験前後の1次固有振動数

	鋼材		粘性		オイル		粘弾性		非制振	
	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向
加振前	2.30	2.18	1.89	1.83	2.34	2.19	2.04	1.90	1.63	1.57
加振後	2.10	1.94	1.87	1.81	2.32	2.14	2.04	1.91	1.60	1.54
減少率	8.8%	11.0%	1.0%	1.2%	0.8%	2.1%	-0.1%	-0.5%	1.7%	2.1%

を目的に行われており、建物全体の剛性を上昇させないことを意図して打設されたためである。

次に、2009年1月19日から21日にかけて大きな変動がみられる。これは、表1から鋼材ダンパーが設置された日時と一致することからダンパー設置に伴う変化と確認できる。ダンパーの設置により、X方向、Y方向ともに固有振動数が大きく増加した。その後、震動台に移設され、2月14日の鉄板おもりの設置や加振終了後の4月9日の鉄板おもり撤去により、固有振動数が急激に変化していることが確認できる。この現象も、鉄板おもりが建物剛性に寄与することなく、建物重量にのみ変化を与えたためと考えられる。

ここで、建設段階の期間を通して固有振動数をみると全ての段階においてX方向の固有振動数が高く推移していることが確認できる。これは、鉄骨建方の段階から鋼材ダンパーを取り付けるまでの間には、ダンパー取り付け位置にダンパーの代わりとなるブレース鋼材が取り付けられていたためと考えられる。ダンパーは、図1-(c)の伏せ図のように、各層においてY方向にはダンパーが1基設置されているのに対して、X方向には2基設置されているため、X方向の建物剛性に付加する剛性が大きくなると考えられる。ただし、厳密には、非制振試験体(図3)においてもX方向の振動数が高く推移している。これは、X方向のスペンがY方向よりも短く、X方向のほうが梁の剛性が高いために層剛性が高くなると考えられる。このように、ブレースとスペン長の両方の影響でX方向の剛性が高くなっているが、ブレースの効果の方がスペン長の影響よりも大きいことにより顕著な増加となったものと思われる。

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施工工程に伴う振動特性の変動を捉えることができた。

### 5 加振期間における振動特性評価

図3に加振実験期間に着目した固有振動数の同定結果とその期間における応答振幅値ならびに減衰定数を示す。ここで示した同定結果は、3章で同定した同定値にメジアンフィルタを施した結果を用いた。フィルタは、各試験体期間中における1次固有振動数の値を24個取り、その中から中央値を求めるよう条件を設定した。

表2には、各試験体ケースにおける一連の加振実験前後の1次固有振動数の代表値を示した。代表値は深夜の静穏時1時間に同定した1次固有振動数の平均値とした。ただし、粘性ダンパー試験体の加振前の同定値は、X方向の値が高く評価されているため、加振1日目終了後の深夜の値を代表値としている。この原因については5.2節で改めて考察する。また、3月3日から5日の2日間は観測装置の不具合により記録が得られなかったため同定値が存在しない。

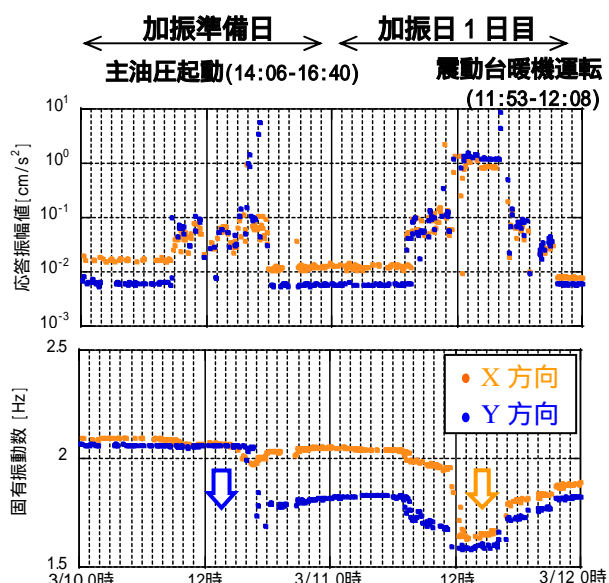


図4 粘性ダンパー試験体の振動特性の推移

#### 5.1 鋼材ダンパー試験体

2月27日の予備加振から3月6日まで鋼材ダンパー試験体による加振実験が行われた。この期間では、X方向とY方向でともに固有振動数が大きく減少していることが確認できる。表2より加振実験前後の振動数を比較するとに約1割の減少がみられた。この減少率は、他のどの試験体ケースよりも変動が顕著であった。このように実験初期段階で振動数が大きく減少する現象は、他の鉄骨構造物の実験<sup>3),7)</sup>においても確認されており、試験体が加振未経験の状態から加振を経験することで試験体の性状が変化するためと考えられる。

#### 5.2 粘性ダンパー試験体

粘性ダンパー試験体は、3月11,12日に加振実験が行われた。粘性ダンパー試験体では、加振前後での振動数の変化はほとんどみられなかった。これは、鋼材ダンパー試験体時と同様の地震波が入力されていることから鋼材ダンパー試験体が経験した応答以上の応答を受けなかったためと考えられる。

ここで、加振前の3月10日～12日までの2日間に着目して、X方向の固有振動数について考察を行う。図4にこれら2日間における粘性ダンパー試験体の固有振動数と応答振幅値を示す。図4の振動数を見ると3月10日の17時にY方向の振動数は大きく減少しているのに対しX方向の振動数には変化はみられなかった。その後、3月11日の12時にはX方向の振動数がY方向の振動数に近い値まで減少した。このときの固有振動数と応答振幅値の推移を比較してみると、どちらの変動もそれ以前よりもある程度大きい応答を受けた後に発生していることがわかる。それぞれの時刻において、10日の17時ごろには震動台の主油圧起動(テーブルは動かさない)、11日の12時ごろは加振直前の震動台の暖機運転があったことは確認されている。現時点で粘性ダンパーの詳細な構造が不明なため、推測の域を出ないが、ひとつの要因として、震動台の稼働に起因するわずかな振動によって、ダンパー摺動部の状態が変化したことが考えられる。X方向とY方向で減少の時期が異なるのは、先述のとおり、X方向とY方向ではダンパー量が異なるため、X方向では震動台の主油圧起動程度の応答ではシステムに変化が起こらなかったためとも考えられる。

#### 5.3 オイルダンパー試験体

オイルダンパー試験体は、3月18,19日に加振実験が行われた。オイルダンパー試験体では、加振前後での固有振動数の変化はほとんど見られなかった。また、この時の固有振動数は鋼材ダンパーの加振前

と近い値を示した。これは、微震動レベルにおいて、オイルダンパーが建物剛性に付加する剛性が鋼材ダンパーと同程度であることを示している。減衰定数については、微震動レベルにおいて鋼材ダンパー試験体と同程度だが、応答が大きい加振時には、鋼材ダンパー試験体時よりも大きな減衰能力を発揮していることが確認できる。

#### 5.4 粘弾性ダンパー試験体

3月26,27日には、粘弾性ダンパー試験体の加振が実施された。ここでも加振前後で振動数に明瞭な変化はみられなかった。また、減衰定数をみると微震動レベルの振幅時から減衰が高く、そのため応答振幅値も他の試験体に比べ低くなっている。これらは、粘弾性ダンパーの制振装置としての微小変形での特性をよく示した結果となっている。

#### 5.5 非制振試験体

制振装置を全て撤去した非制振試験体では、4月6,7日に実験が行われた。制振装置を取り外したことにより振動数は大きく減少したが、加振前後での固有振動数の変化はほとんど確認できなかった。これは、加振を鷹取波70%までにとどめたので、試験体が大きな損傷を受けなかったためと考えられる。このことから弾塑性波加振でも、試験建物に損傷が発生しない程度の加振では試験建物の振動特性に与える影響は小さいことがわかる。

### 6 まとめ

制振構造物の震動台実験において建方終了時から加振実験終了までの長期振動モニタリングを行い建築物の振動特性を長期的に評価した。長期間にわたり振動特性を評価することで、施工段階の進展や地震経験等に伴う固有振動数の変化を詳細に把握できた。また、4種の異なるダンパーを用いて実験を実施したことにより、各種ダンパーの力学的特性の違いを微震動レベルにおいて確認することができた。このように本研究で得られた常時微動記録は、建設初期段階から床スラブの打設や制振部材の設置、微震動時における制振装置の特性の違いや地震経験に伴って構造が変化していく過程を含んでおり、今後の構造ヘルスマニタリング技術の向上のために貴重なデータであると考えられる。

### 謝辞

本研究は、(独)防災科学技術研究所が遂行している「E-ディフェンス鋼構造建物実験研究」の制振・免震WG(主査:東京工業大学 笠井和彦教授)における成果の一部である。ここに記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 濱本卓司: 建築物のヘルスマニタリング, 性能評価における地震荷重と風荷重, 日本建築学会関東支部, 構造専門員会, pp.41-46,1993.3.
- 2) 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.
- 3) 桐田史生, 金澤健司ほか: 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, pp851-852, 2008.9.
- 4) K.Kanazawa, H.Kitamura, D.Sato, M.Morimoto, M.Ono and T.Nagae: Vibration-based Damage Detection of A High-rise Steel Building Before and After The E-defense Shaking Table Test, The 5<sup>th</sup> World Conf. on Structural Control and Monitoring, paper ID.5WCSCM-10098,2010
- 5) 笠井和彦ほか:E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その43~51, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1,pp.739-756,2009.8.
- 6) 伊藤浩資, 笠井和彦, 引野剛ほか: 実大5層制振建物試験体の固有周期と減衰定数の推定結果および妥当性の検証(E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その61), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1,pp.811-812,2010.9.
- 7) 尾野勝, 金澤健司ほか: 実大震動台実験における高層建物試験体の振動特性評価, 構造工学論文集, Vol.56B,pp247-254,2010.3.