

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	E-ディフェンス震動台実験における5層制振建物の長期常時微動モニタリング
Title	LONG-TERM AMBIENT VIBRATION MONITORING OF PASSIVELY-CONTROLLED 5-STORY BUILDING ON THE E-DEFENSE SHAKING TABLE TEST
著者(和文)	尾野勝, 金澤健司, 飯野夏輝, 佐藤大樹, 北村春幸, 引野剛, 笠井和彦
Authors	Kenji KANAZAWA, Daiki Sato, Haruyuki Kitamura, Tsuyoshi Hikino, KAZUHIKO KASAI
出典 / Citation	構造工学論文集, Vol. 57B, , pp. 247-245
Citation(English)	Journal of structural engineering, Vol. 57B, , pp. 247-245
発行日 / Pub. date	2011, 3
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/110009706442

E-ディフェンス震動台実験における5層制振建物の長期常時微動モニタリング

LONG-TERM AMBIENT VIBRATION MONITORING OF PASSIVELY-CONTROLLED
5-STORY BUILDING ON THE E-DEFENSE SHAKING TABLE TEST

尾野 勝*, 金澤 健司**, 飯野 夏輝*, 佐藤 大樹***, 北村 春幸****, 引野 剛*****, 笠井 和彦*****

Masaru ONO, Kenji KANAZAWA, Natuki IINO, Daiki SATO, Haruyuki KITAMURA,
Tuyoshi HIKINO and Kazuhiko KASAI

Continuous structural health monitoring of a steel building specimen on the full-scale shaking table test is conducted to investigate modal properties of a passively controlled steel building subjected to large earthquakes. Changes in the dynamic properties are evaluated from the continuous ambient vibration test, which are related to damage detectability from ambient vibration or earthquake observation on real buildings. The results in the paper are summarized as follows: (1) The shifts 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 or damping factors is observed in use of different types of seismic control devices.

Keywords: Natural Frequency, Damping, Steel Building, Ambient Vibration, Shaking Table Test, Structural Health Monitoring

固有振動数, 減衰定数, 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

地震の多発地域である日本において、地震経験後における建築物の構造性能を把握し、それに応じた対策を講じることは、防災や減災の面において重要である。特に、被災時の復旧拠点となる重要施設において、被災状況を正確かつ迅速に把握し、被災後における継続使用の可否を早急に判定することは非常に重要である。その一方で、大地震の被災経験を契機に盛んに用いられるようになった制振技術や免震技術の性能や設計法の妥当性は、現状では完全に把握されているとはいえず、大地震や強風等の過大な荷重を受けるそれら技術の真の効果を検証することが必要不可欠となる。

このような背景の下で、近年、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国内外で活発に行われており¹⁾²⁾、制振や免震の新しい技術の性能を確かめるためにも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。実測記録の主な取得方法としては、常時微動計測、強制振動実験、自由振動実験ならびに強風・地震観測などがあげられるが、なかでも、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であり、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において、建築物の建設初期段階から加振経験を経て、損傷・崩壊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³⁾⁴⁾。

本研究では、構造ヘルスマニタリングの検証データの取得を目的として、(独)防災科学技術研究所のE-ディフェンスにおいて実施された5層実大制振建物の震動台実験⁵⁾⁶⁾の機会を利用して、鉄骨造制振建物試験体の鉄骨骨組み建方終了時から実験終了までの振動特性を、常時微動観測により長期的にモニタリングした。本震動台実験は、各種制振装置を搭載した鉄骨建物の真の地震時挙動を把握することを目的としており、その結果として、制振装置が予想通りの機能を発揮したため、建物や制振装置に深刻な損傷は発生せず、最終加振を終えてもほぼ健全な状態に留まった。このため、本震動台実験の対象建物のモニタリング結果から、構造ヘルスマニタリングの重要な機能である損傷検知の可能性を論ずることはできない。しかし、多数の地震を経験しても構造健全性が保持された鉄骨建物の振動特性の遷移過程や、国内外で多用される4種類の制振装置を搭載した鉄骨建物の振動特性の特徴を分析することは可能であり、これらの知見は構造ヘルスマニタリングの実用化のための重要な情報となるものと思われる。

本論文では、まず、対象となる制振建物の震動台実験で用いられた試験体の概要ならびに常時微動観測の観測システム概要、震動台

* 東京理科大学大学院理工学研究科 大学院生

** 電力中央研究所地球工学研究所 主任研究員・博士(工学)

*** 東京理科大学理工学部建築学科 助教・博士(工学)

**** 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)

***** (独)防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター

***** 東京工業大学 建築物物理研究センター 教授・Ph.D.

Graduate Student, Faculty of Science and Engineering, Tokyo Univ. of Science

Research Engineer, Civil Engineering Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry, Dr. Eng.

Assistant Professor, Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

Professor, Dep. of Architecture, Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

National Institute for Earthquake Disaster Prevention Research.

Professor, Structural Engineering Research, Tokyo Institute of Technology, Ph. D.

実験における加振内容と実験で用いられた制振装置の取り付け状況について述べる。その後、常時微動観測で取得した観測記録を用いて、試験建物の振動特性を同定した結果を示す。これらの結果に基づき、試験体の建設過程における振動特性の変動を実測データに基づいて連続的に評価するとともに、同じ鉄骨造試験体に異なる制振装置を順に設置した各制振装置設置時の試験体の微振動レベルにおける固有振動数や減衰定数を評価し、常時微動に基づく振動特性に着目して4種類の制振装置を搭載した建物の振動特性を比較する。

2. 実験概要

2. 1. 試験建物と震動台実験の概要⁹⁾

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、可能な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E-ディフェンスにおいて制振構造建物の震動台実験が行われた。

図1に試験建物の伏せ図と立面図を示す。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(短辺方向)が5m×2スパン、Y方向(長辺方向)がスパン長7mと5mの2スパンである。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。ただし、Y方向のダンパー容量はX方向の2倍であるため、X方向とY方向で同じ制振効果を有するよう設計されている。また、試験体の1, 2層の制振装置が取り付けしていない構面の外周部にはALC版とアルミカーテンウォール(ACW)が配置された。

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、図2に示すような、鋼材ダンパー、粘性ダンパー、オイルダンパー、粘弾性ダンパーであり、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。各ダンパーの性能の詳細は、既報文献7)-10)に記載されている。

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日間ずつで行われた。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. 2. 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、10台の三成分加速度計(過減衰動コイル型加速度計2G計、感度1.0V/G)を用いて、2008年11月28日から2009年4月11日までの135日間で行

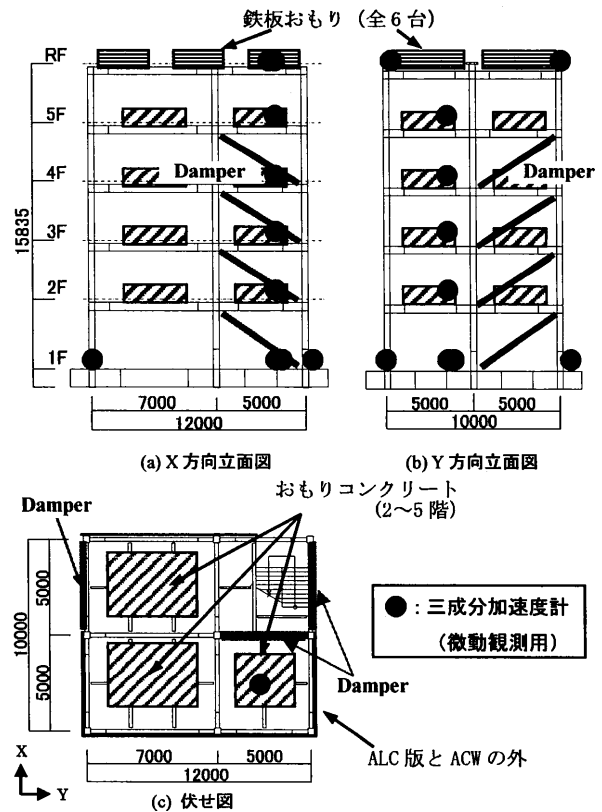


図1 試験建物伏せ図、立面図および観測位置

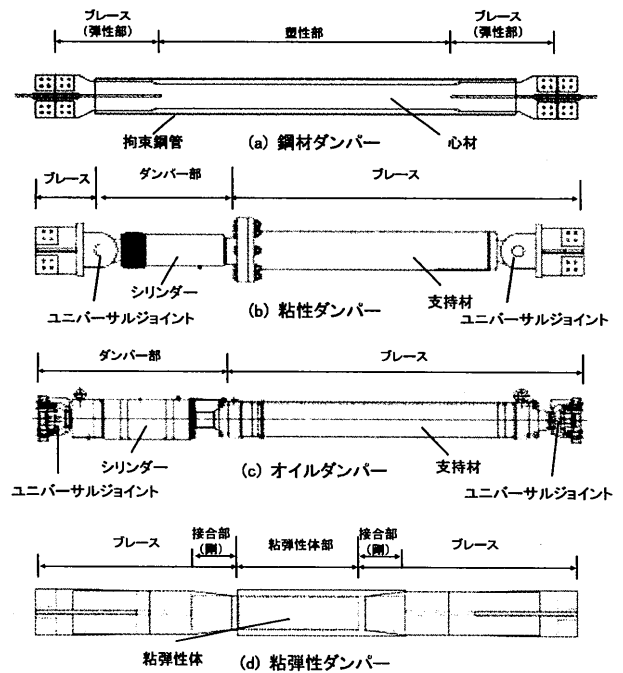


図2 各種ダンパーの概要図

い、試験体の状態変化を長期的かつ連続的に観測した。計測条件は、サンプリング周波数200Hz、計測範囲±2.5cm/s²とし、分解能24BitのA/D変換器(ダイナミックレンジ130dB)を用いて、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

表1 試験建物の施工/実験工程表

月	11																														12															1															2																													
	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	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)																																																											
床																															床コン打設 (RF,4F,2F)															おもりコン打設															鋼材ダンパー取付け																													
制振部材																																																													試験体実験棟内移動 (仮置き)															試験体震動台設置														
その他																																														ALC設置																														鉄板おもり設置														
モニタリング																															計測開始																																																											

月	2															3															4																													
	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															粘性→オイル															オイル→粘弾性														
制振部材																															ダンパー撤去															試験体搬出														
その他																																														鉄板おもり撤去														
モニタリング																																														計測終了														

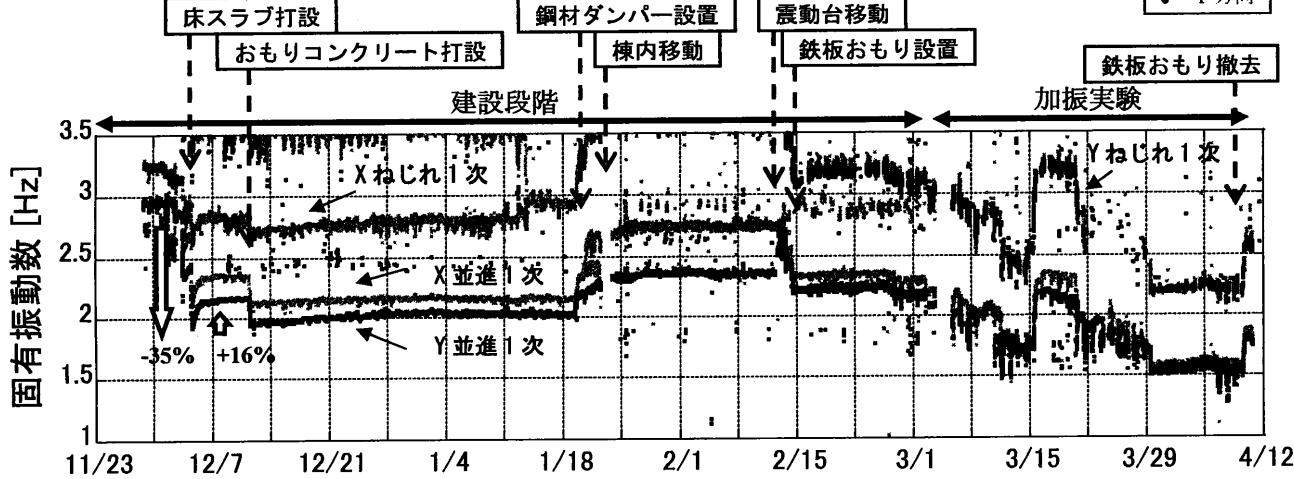


図3 1次固有振動数の長期変動(全工程)

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. 解析手法

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基準階をR階と設定してARMA-Burg法¹⁾を適用し、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た。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。ここで、AR次数とデシメーション数については、AR次数を20,30,40次、デシメーション数を4,8,16,32個と設定し、その中から振動特性が最も安定した次数とデシメーション数を選択した。その際、ARMA法により同定した基準階のパワースペクトルを各パラメータで算出し、本研究で対象とした1次モードにおける精度を確認し決定している。

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3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性を評価する。ここで、図中に示したXねじれ1次は、X方向の観測記録か

ら同定されたねじれ1次モードの同定結果を示す。同様に、Yねじれ1次は、Y方向の観測記録から同定された結果を示している。

まず、図3を見ると、建設初期の12月3日と4日に大きな固有振動数の減少が認められる。これは、表1の各階床スラブコンクリートの打設日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ためと考えられる。また、その後に、固有振動数が緩やかに回復する傾向が認められ、コンクリートの硬化に伴って床スラブの剛性が増加する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、周囲の大梁から離れたスラブの中央部に打設され、その効果が現れたためである。

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方向とY方向とともに固有振動数が大きく増加した。その後、試験体が震動台に移設されることで、Y方向のみの固有振動数が急激に増加し、鉄板おもりの設置によりX方向とY方向とともに固有振動数が減少する傾向が見られる。鉄板おもりの設置に伴う固有振動数の減少は、おもりコンクリートの打設時の現象と同様に、建物重量の増加によるものと考えられる。その一方で、震動台移動後にY

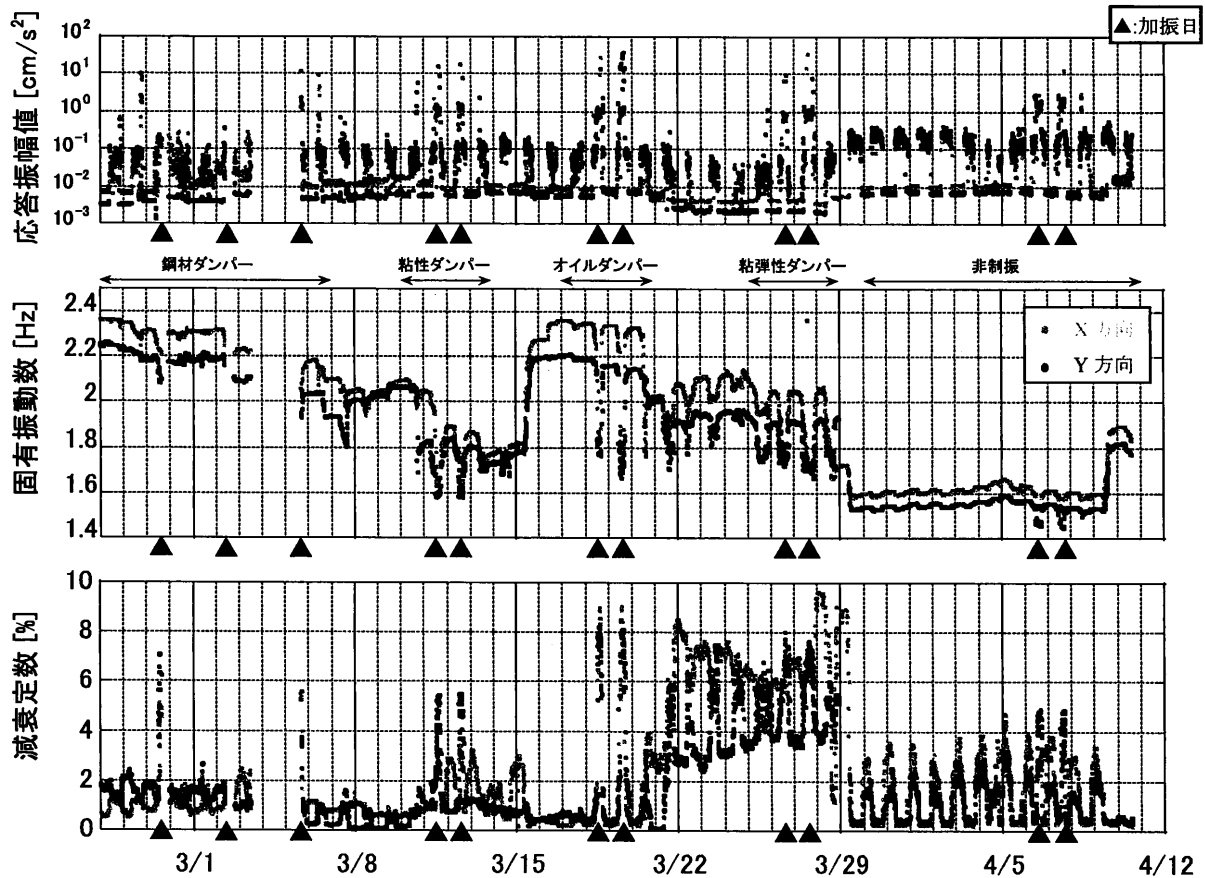


図4 加振期間における応答振幅値、固有振動数および減衰定数の推移

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	2.31 Hz	2.18 Hz	1.89 Hz	1.82 Hz	2.34 Hz	2.19 Hz	2.04 Hz	1.90 Hz	1.63 Hz	1.57 Hz
加振後	2.18 Hz	2.03 Hz	1.87 Hz	1.80 Hz	2.32 Hz	2.14 Hz	2.04 Hz	1.92 Hz	1.60 Hz	1.54 Hz
変化率	-5.9 %	-6.6 %	-1.0 %	-0.9 %	-0.9 %	-2.0 %	0.2 %	0.6 %	-1.8 %	-2.0 %

方向のみ固有振動数が増加した現象は、ダンパーの取り付けボルトの締結作業等による影響が原因として考えられるが、現時点でその詳細な原因はわかっていない。その後、2月25日から4月8日の加振期間における加振経験やダンパーの取り替えに伴う固有振動数の変動や加振終了後の4月9日の鉄板おもり撤去による固有振動数の急激な変化が確認できる。なお、加振期間中における振動特性の変動については、次章で詳細に考察する。

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4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に条件を設定した。

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。

5. 1. 鋼材ダンパー試験体

鋼材ダンパー試験体の加振実験は2月27日の予備加振から3月6日までの期間に行われた。この期間では、X方向とY方向とともに固有振動数が加振実験後に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減少率は約6%である。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低下する現象は、他の鉄骨構造物の実験³⁴⁾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。まず、鋼材ダンパーから粘性ダンパーに入れ替えたことで、X方向と

Y方向でともに固有振動数が減少する傾向が確認できる。この傾向は、微振動レベルにおいて建物剛性に付加する鋼材ダンパーの剛性が粘性ダンパーより大きいことを表している。その一方で、粘性ダンパー試験体の加振前後における振動数の変化はほとんどみられなかった。これは、粘性ダンパー試験体時に鋼材ダンパー試験体の時と同様の地震波が入力されていることから、粘性ダンパー試験体が鋼材ダンパー試験体の経験した応答以上の応答を受けず、建物の性状が変化し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、固有振動数について考察を行う。図5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5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方向の振動数と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に受けた応答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、ダンパー擺動部の状態が変化することが考えられる。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、あるいは、3月10日の主油圧起動時にはY方向のみ大きな応答が発生したために、Y方向の1次固有振動数が先に低下したことが考えられる。

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。粘性ダンパーからオイルダンパーにダンパーを取り替えたことで、固有振動数が大きく増加し、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、微振動レベルにおいて、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。しかし、オイルダンパー試験体の加振前後における固有振動数の変化はほとんど見られなかった。また、減衰定数については、微振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。オイルダンパー試験体からダンパーの取り替えにより、固有振動数はX方向とY方向でともに1割程度の減少が確認できる。また、加振前後においては、固有振動数に明瞭な変化はみられなかった。その一方で、減衰定数をみると微振動レベルの振幅時から高い値を示しており、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。その一方で、加振前後での固有振動数の変化はほとんど確認できな

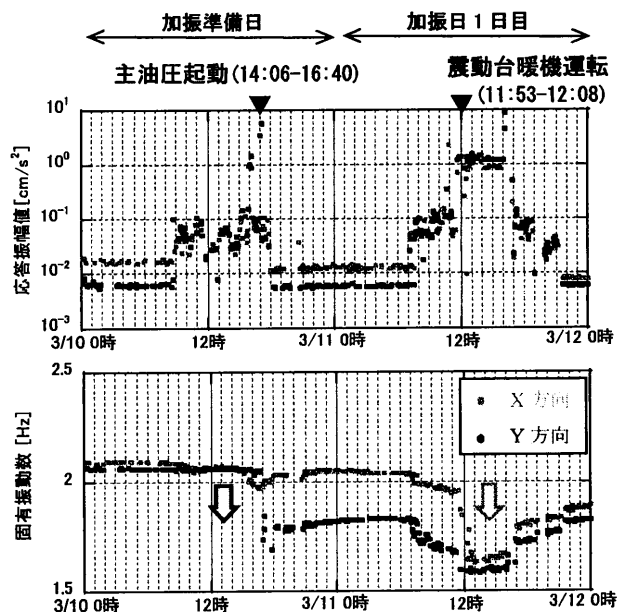


図5 粘性ダンパー試験体の振動特性の推

かった。これは、加振を鷹取波70%までにとどめたために、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. 固有値の応答振幅依存性に関する評価

6. 1. 評価方法

図6に各試験体ケースの加振実施日である2日間と加振前日の計3日間の応答振幅値を示す。ただし、鋼材ダンパー試験体は2月27日に予備加振を行っているため、あるいは、試験体の最初の加振経験に伴う固有値の変動を分析するため、2月25日から3月5日までの9日間を対象とした。本報では、X方向に着目して考察する。考察にあたり、まず、応答振幅値の大きさによって、振幅レベルを3つに分類した。分類は、微振動領域として、深夜の小振幅レベルの常時微動領域をA群、計測作業等による振動レベルを作業振動領域としてB群、震動台起動によって生じる振動レベルを震動台起動領域としてC群の3つに分け、それ以上の加振等による大振幅レベルを加振領域とした。ここで、B群の作業振動領域は、加振前後に行われた試験体の確認作業や計測機器の確認作業のために複数人の作業者が試験体内部で作業することで発生した振幅レベルに相当する。これらA群からC群の分類は試験体ケース毎に閾値が異なり、鋼材ダンパー試験体ではA-B群の閾値が0.02 cm/s²、B-C群が0.6 cm/s²、同様に粘性ダンパー試験体では0.03 cm/s²と0.6 cm/s²、オイルダンパー試験体では0.02 cm/s²と0.6 cm/s²、粘弾性ダンパー試験体では0.005 cm/s²と0.4 cm/s²、そして非制振試験体では0.02 cm/s²と0.6 cm/s²にそれぞれ設定した。また、微振動領域は全試験体ケースで2.0 cm/s²までとした。なお、応答振幅値が2.0 cm/s²を超える領域については、常時微動の計測データが測定範囲を超えた恐れもあり、正しい結果が得られないと思われるため、本論文では検討対象から外した。

さらに、同じ地震経験を有し同一の構造状態にある試験体の固有

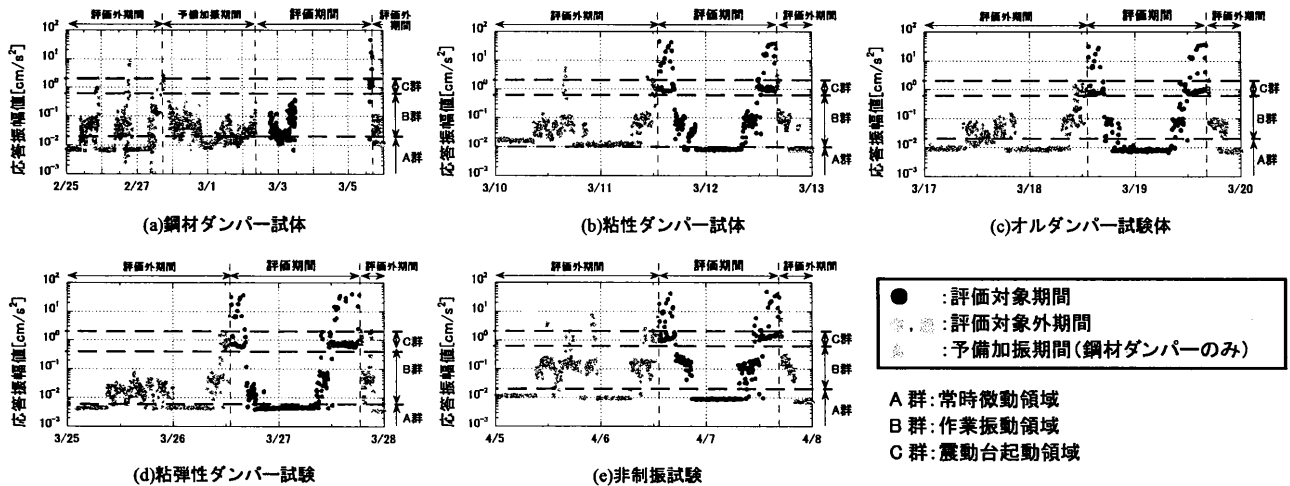


図6 各試験体ケースにおける応答振幅値

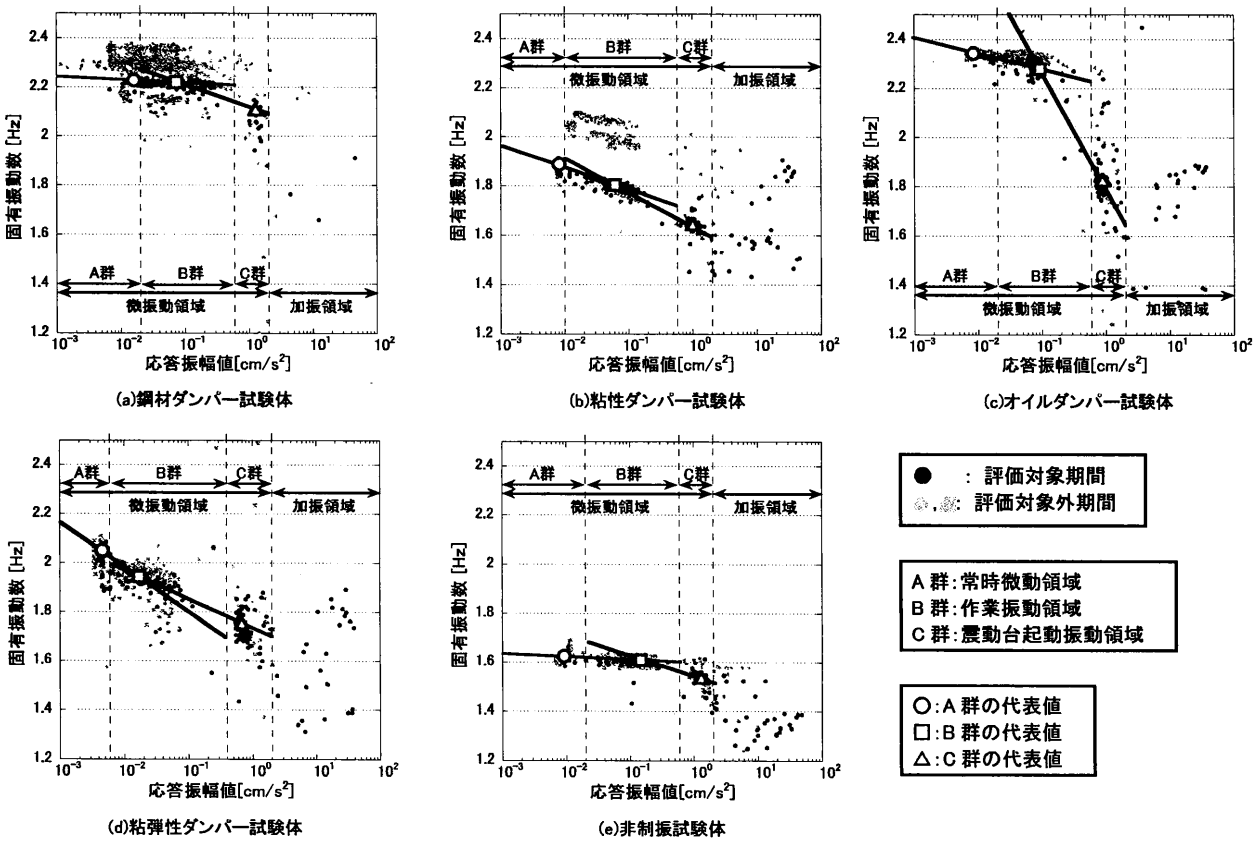


図7 各試験体ケースにおける振動数の応答振幅依存性

値の応答振幅依存性を分析するため、実験期間を試験の進行状況によって分類した。分類は、各試験体ケースにおいて初めて応答振幅値が 10^1 cm/s^2 以上になる時刻から、その期間内で最後に 10^1 cm/s^2 以上であった時刻までを評価の対象として評価期間、それ以外を評価外期間として設定した。そして、この評価期間において、応答振幅値の3分類である、A群、B群およびC群のそれぞれについて応答振幅値と固有振動数、減衰定数の平均した値を各群の代表値として求め、表3.4にそれら代表値を示した。以上の分類をもとに、図7に各試験体ケースにおける固有振動数と応答振幅値の振動数-振幅関

係を、図8に減衰定数と応答振幅値の減衰-振幅関係を示す。また、図7.8には、各群の代表値をプロットし、その代表値同士を結んだ回帰線も併せて示した。

なお、図8(b),(d),(e)のA群の減衰定数は縦に長い分布となっており、減衰定数のばらつきが非常に大きくなっている。図9は固有値の同定値を用いて求めたスペクトルを高速フーリエ変換 (FFT) より求めたスペクトルと比較したものであり、応答の非常に小さいとき (図9(a)) にはスペクトルのピークを平たく評価し、減衰を過大に評価している傾向が伺える。その一方で、ピークの振動数につい

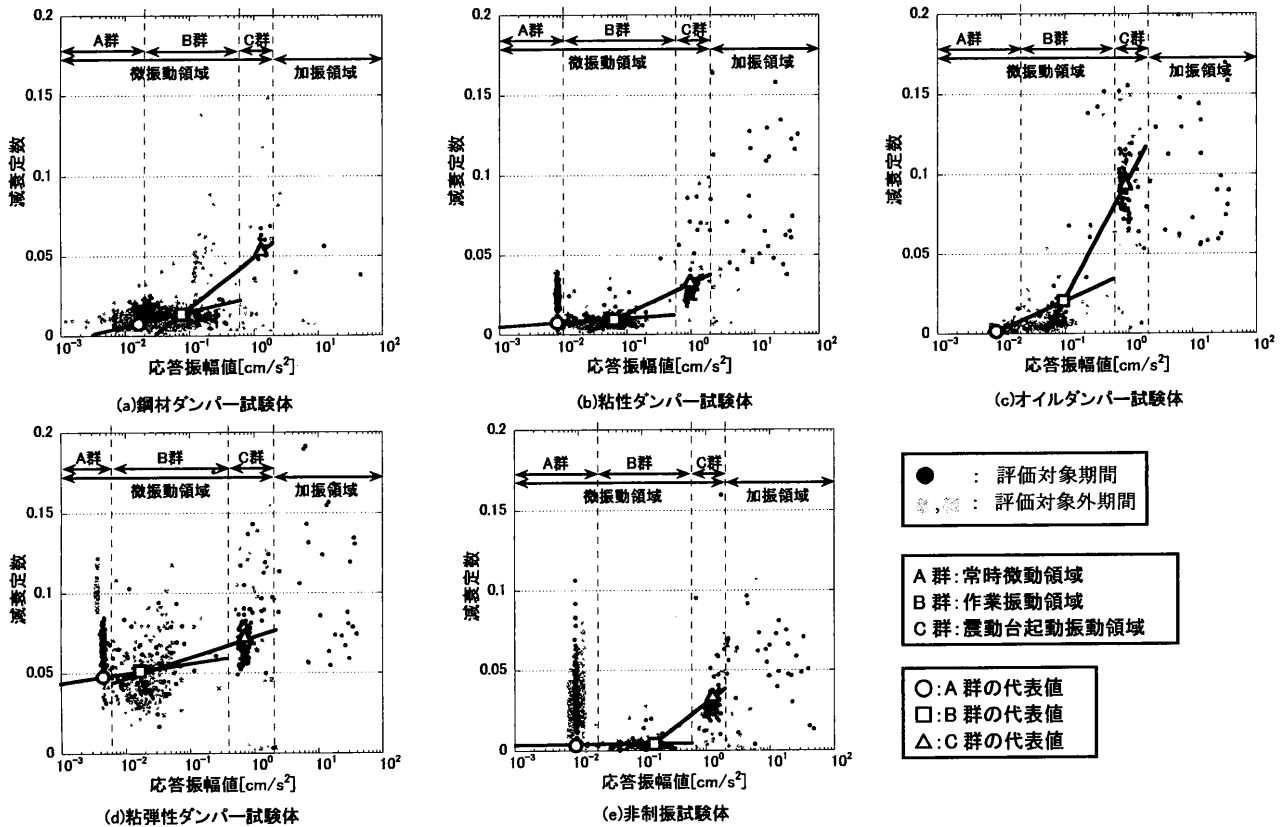


図8 各試験体ケースにおける減衰定数の応答振幅依存性

表3 固有振動数の代表値(X方向)

	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		非制振	
	振動数 (Hz)	応答振幅値 (cm/s ²)	振動数 (Hz)	応答振幅値 (cm/s ²)	振動数 (Hz)	応答振幅値 (cm/s ²)	振動数 (Hz)	応答振幅値 (cm/s ²)	振動数 (Hz)	応答振幅値 (cm/s ²)
A群	2.22	1.6E-02	1.88	9.8E-03	2.34	8.3E-03	2.04	4.4E-03	1.61	9.0E-03
B群	2.21	7.4E-02	1.80	7.6E-02	2.27	9.0E-02	1.94	1.6E-02	1.59	1.5E-01
C群	2.11	1.3E+00	1.63	1.8E+00	1.82	1.4E+00	1.73	1.0E+00	1.51	2.0E+00

表4 減衰定数の代表値(X方向)

	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		非制振	
	減衰定数	応答振幅値 (cm/s ²)	減衰定数	応答振幅値 (cm/s ²)	減衰定数	応答振幅値 (cm/s ²)	減衰定数	応答振幅値 (cm/s ²)	減衰定数	応答振幅値 (cm/s ²)
A群	0.007	1.6E-02	0.005	9.8E-03	0.001	8.3E-03	0.047	4.4E-03	0.003	9.0E-03
B群	0.014	7.4E-02	0.009	7.6E-02	0.020	9.0E-02	0.051	1.6E-02	0.004	1.5E-01
C群	0.053	1.3E+00	0.041	1.8E+00	0.095	1.4E+00	0.076	1.0E+00	0.037	2.0E+00

では、図9(a)でもARモデルとFFTのスペクトルが一致している。このように応答振幅値が非常に小さい場合には、S/N比(シグナル/ノイズ比)が悪く、ARモデルのスペクトル推定が劣化しているため、固有振動数の推定値は良好であるものの、減衰定数の推定値は過大に評価されている。以上の事項を考慮して、減衰定数については、A群の代表値は同定値の分布の下限を採用し、それ以外の代表値は同定値の分布の平均値を採用することにした。

6. 2. 固有振動数の応答振幅依存性

図7より全試験体ケースにおいて応答振幅値が増加すると固有振動数が減少する固有振動数の応答振幅依存性が確認できる。試験体ケース別に振幅依存性についてみると、鋼材ダンパー試験体では、同じ期間であればA群とB群の微振動領域において応答振幅値が大きくなっても振動数の低下はほとんどみられない。これは、A-B群

の回帰線の傾きを見ても明らかである。一方、C群では応答振幅値が大きくなると振動数の低下は顕著になり、B-C群回帰線の傾きも大きくなることが確認できる。これにより、鋼材ダンパー試験体では、微小振幅レベルと大振幅レベルにおいて振幅依存の傾向が異なり、振幅が大きくなると振幅依存性がより顕著になることがわかる。

粘性ダンパー試験体では、評価期間のデータをみると、鋼材ダンパー試験体時と異なりA-B群の微振動領域においても振幅依存性の傾向が強く見られ、代表値の回帰線はA-B群とB-C群でほぼ同程度の傾きとなった。

オイルダンパー試験体では、A-B群の回帰線においては緩やかな傾きがあり、B-C群の回帰線の傾きは、その傾きが全試験体ケースの中で最も大きな傾きとなった。これは、B群からC群へ遷移する間にオイルダンパーの力学的性状が非常に大きく変化したことを示

している。

粘弾性ダンパー試験体は、他の試験体ケースと比べてA群の閾値が小振幅レベルにあることから、粘弾性ダンパーの特性として応答が小さい微小変形時からその制振効果を発揮していることが伺える。そして、A-B群とB-C群の回帰線の傾きをみるとA-B群の傾きのほうが大きいことから、微小振幅時に応答振幅依存性が顕著であることが確認できる。これは他の試験体ケースではみられない特徴であり、粘弾性ダンパー特有の性質であると考えることができる。

そして、非制振試験体では、制振装置を取り外したことで制振装置の付加剛性がなくなり固有振動数は全体的に低い値を示しているが、加振経験による分布の変化はみられなかった。代表値を結んだ回帰線の傾きは、鋼材ダンパー試験体と同じような傾向を示していることから、鉄骨架構においても、A-B群とB-C群で振幅依存性の傾向が異なることが確認できる。

このように、振動数と振幅関係を評価することで加速度の応答振幅で 2.0 cm/s^2 以下の微振動時における各試験体が有する特徴をより詳細に捉えることができた。

6. 3. 減衰定数の振幅依存性

減衰定数についても前節と同様に図8に基づき試験体ケース別に分布の傾向を考察する。

鋼材ダンパー試験体では、B-C群への回帰線の傾きより、応答振幅値が増加すると減衰定数も増加する関係がみられることから、減衰定数の応答振幅依存性が確認できる。しかし、振動数-振幅関係と同様、A-B群の範囲では、依存性の傾向はほとんどみられなかった。

次に、粘性ダンパー試験体においては、鋼材ダンパー試験体と同様、B-C群の回帰線の傾きから減衰定数の応答振幅依存性を確認できる。一方で、A-B群の傾きはほぼゼロであり、応答振幅値によらず、減衰定数は一定の値となる。

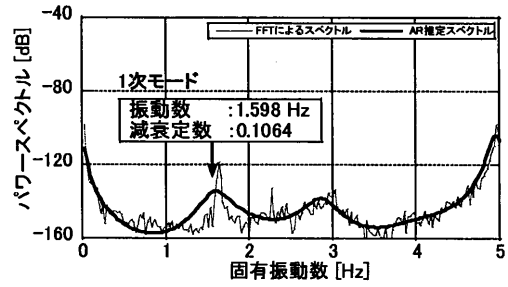
オイルダンパー試験体では、全ての応答振幅値において振幅値が増加すると減衰定数も増加する振幅依存性が確認できる。これから、オイルダンパーは、低振幅レベルにおける減衰能力は非常に小さく、B-C群の間で急激に減衰性能が発揮されるようになると考えられる。

粘弾性ダンパー試験体では、他の試験体ケースと比較すると小振幅レベルにおける減衰定数が高い値を示している。これから、粘弾性ダンパーが小さい振幅レベルにおいても高い減衰能力を持つことがわかる。

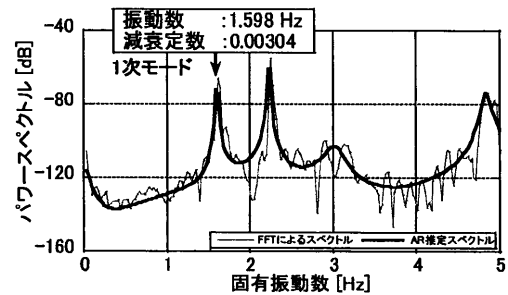
そして、非制振試験体では、B-C群の傾きから減衰定数の振幅依存性が確認できる。その一方でA-B群における減衰定数は非常に小さく、微振動時において鉄骨架構が減衰能力をほとんど有していないことが確認できる。

6. 4. 加振経験に伴う固有振動数の低下現象

図7の各試験体ケースにおける評価外期間を含んだ固有振動数の振幅依存性より、加振経験に伴った固有振動数の変化の傾向を考察する。まず、図7(a)の鋼材ダンパー試験体では、評価期間の振動数のまわりに評価外期間のデータが分布しており、加振により振動数が変化している傾向がうかがえる。このことを確認するため、図10に評価外期間(加振前)、予備加振期間、評価期間(加振期間)、評価外期間(加振後)の4つの期間でマークを変え、図7(a)を書き直したグラフを示す。図10より、A群からB群における全ての応答振幅値において、加振実験の進行に伴い固有振動数の分布が低下す



(a) 過剰に減衰を評価している時刻のスペクトル



(b) A群の下限值として採用した時刻のスペクトル

図9 非制振試験体のA群におけるスペクトル比較

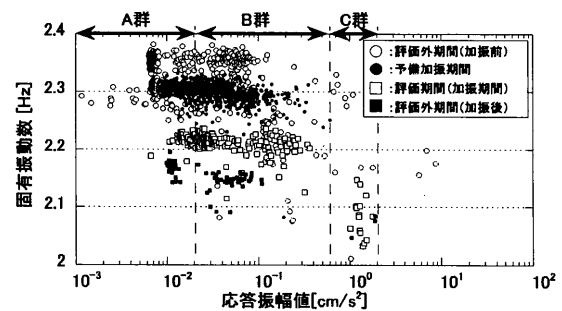


図10 鋼材ダンパー試験体の固有振動数の加振経験に伴う減少傾向

る傾向が明瞭に認められた。これは、5.1節でも述べたように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に変化が起きたことを示している。次に、図7(b)によれば、粘性ダンパーでは、2Hz付近と1.8Hz付近の2段階に分かれて振動数が分布しているのがわかる。これは、5.2節で述べたように、加振前にX方向の固有振動数が高く推移している現象を現しているためであり、評価期間に加振を経験することで、振動数が低下する様子を示していることがわかる。しかし、評価期間とその後の評価外期間には分布の変化は見られないことから、鷹取波100%加振などの大振幅加振によって試験体性状が変化しなかったことが確認できる。一方で、図7(c)より、オイルダンパー試験体では、評価外期間も含めどの期間においても同様の分布を示していることから、加振経験によってオイルダンパー試験体の振動特性は変化しなかったことがわかる。同様に、図7(d)から、粘弾性ダンパーにおいても、全期間を通して分布の傾向が同じことから加振経験による振動特性の変化はみられない。この傾向は図7(e)の非制振試験体においても同様であることが確認できる。このことから、鋼材ダンパー以外の実験期間には、加振によって試験体の構造性能に変化を与えるような重大な損傷が発生していないことがわかる。

7. まとめ

本研究では、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、鋼材ダンパー、粘性ダンパー、オイルダンパーおよび粘弾性ダンパーの4種類の制振ダンパーを搭載した鉄骨建物と、ダンパーを搭載しない非制振鉄骨建物の振動特性を長期的に評価した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 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。建設初期段階から床スラブの打設や制振部材の設置や切り替え、微振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常時微動観測によって詳細に評価できることを示した。
- (2) 4種の異なるダンパーを用いて実験を実施し、固有振動数と減衰定数の振幅依存性から評価を行うことで、常時微動計測によって評価される各種ダンパーを搭載した鉄骨建物の振動特性の違いを確認することができた。制振ダンパーを搭載した鉄骨造建物の固有振動数と減衰定数の応答振幅依存性は使用するダンパーによって異なる特性を示す結果が得られた。今後は、加振時におけるデータを加え、微小変形時から大変形時までの固有振動数と減衰定数の応答振幅依存性を分析する予定である。
- (3) 固有振動数の応答振幅依存性から、加振実験初期の鋼材ダンパー搭載時のみで加振経験に伴う固有振動数の低下現象が確認され、それ以降の試験では建物の性状変化に伴う振動数の低下は認められなかった。加振初期の変化のように、試験体の状態変化を適確に捉え、その詳細を把握することは、振動特性評価に基づいた構造ヘルスマモニタリングを実用化する上で重要である。

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:建築物のヘルスマモニタリング、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、構造専門委員会、pp.41-46,1993.3.
- 2) 中村充, 安井諒:微動測定に基づく地震被災鉄骨建物の層損傷評価、日本建築学会構造系論文集、第517号、pp.61-68,1993.3.
- 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) 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.
- 5) 笠井和彦ほか:5層実大制振建物の震動台実験、2010年度日本建築学会大会(北陸) 構造部門(鋼構造) パネルディスカッション資料(鋼構造建物の大型震動実験の今とこれから)、pp.33-47, 2010.9.
- 6) 西澤恵二, 笠井和彦, 大木洋司, 伊藤浩資, 引野剛:鋼材ダンパー制振構造の実験結果:速報その2(E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その44)、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1, pp741-742, 2009.8.
- 7) 米谷壮央, 笠井和彦, 大木洋司, 伊藤浩資, 引野剛:粘性ダンパー制振構造の実験結果:速報その3(E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その45)、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1, pp743-744, 2009.8.
- 8) 加藤史人, 笠井和彦, 大木洋司, 伊藤浩資, 引野剛:オイルダンパー制振構造の実験結果:速報その4(E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その46)、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1, pp745-746, 2009.8.
- 9) 村田真一郎, 笠井和彦, 大木洋司, 伊藤浩資, 引野剛:鋼材ダンパー制振構造の実験結果:速報その5(E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その47)、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1, pp747-748, 2009.8.
- 10) 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.
- 11) 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, pp493-500, 2008.3.