

3.2.3 超高層建物の強震観測による損傷評価を視野に入れたモニタリング技術の開発

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

首都圏で長周期地震動が発生した場合、多大な被害の発生が想定される高層建物を対象にし、その耐震性能評価および被害軽減を目的として、長周期地震動が高層建物にもたらす被害を国民に明らかにする。また、本実規模実験で検証される実践的な応答低減手法に関する研究成果を建築関連団体と連携し指針を取りまとめるとともに、各種業界と本研究成果を共有し、安心・安全な高層建物の広い普及を最終目標とする。

本課題では、地震後における構造安全性や補修の可否などを適切に判断するための構造躯体の損傷モニタリング技術に関する基礎的検討を目的とする。具体的には、高層建物に一般的に設置されている強震計等の観測機材を利用し、加速度記録による構造躯体の損傷評価手法の提案、および強震計を用いた構造モニタリングの可能性などの検討を行う。

(b) 平成 21 年度業務目的

制震装置を組み込んだ高層建物の E-ディフェンス震動実験において、一般的な強震計および関連する観測機材を用いた詳細なデータ取得を行う。またそのデータを用いて、制震機構による応答低減効果と損傷回避状況の評価を行うとともに、これまでの実験データとあわせて、構造体の非線形応答や固有振動特性の変化等のモニタリング特性を明らかにする。さらに、観測機器の周波数特性や分解能などの性能が応答特性・損傷評価に及ぼす影響など、強震計による高層建物の損傷モニタリング技術の可能性を多角的に検証する。

具体的な検討項目と達成目標は以下の通りである。

- 1) 試験体に複数種類の強震計を多数設置し、得られた加速度記録を用いて、固有振動数や減衰定数等の振動特性、層間変形や層の履歴特性の評価法を明らかにする。
- 2) 制震装置の有無や繰り返し加振などにより順次損傷が進む試験体について、上記 1) の手法を用いて構造体の非線形特性や振動特性の変化と損傷の発生・進展の関係を検討し、強震計による構造損傷モニタリングの可能性を明らかにする
- 3) 複数の異なる強震計による地震応答や常時微動記録について、上記の分析結果を比較検討し、高層建物の実際的な損傷モニタリング技術のための基礎資料を蓄積する。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名
名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻	教授	福和伸夫
名古屋大学大学院 環境学研究科附属 地震火山・防災研究センター	准教授	飛田 潤
名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻	准教授	護 雅史

(2) 平成 21 年度の成果

(a) 業務の要約

Eーディフェンスによる震動実験において、4種類の強震計を計66箇所、光ファイバセンサを8箇所に設置し、震動実験の全ての加振ケースおよび常時微動時のデータを取得した。取得した強震計の加速度記録から、制震機構の有無による応答低減効果を評価した。また、加速度応答から固有振動数や減衰定数の同定を行うとともに、層間変形と層せん断力から層の非線形特性を求める手法を検討し、これらを用いて躯体の損傷状況を評価できることを示した。特に顕著な損傷を生じた制震機構なしの状態の試験体に関して、繰り返し加振による応答観測記録に上記の手法を適用し、構造体の非線形応答特性や固有振動特性の変化と損傷の発生・進展の関係から、強震計による損傷モニタリングの可能性を確認した。性能の異なる強震計による地震応答と損傷の評価特性を比較するとともに、強震計による常時微動時の振動特性評価等も行い、高層建物の実際的な損傷モニタリング技術の確立にむけた検証を行った。

(b) 業務の成果

1) 背景

プレート境界の大地震では、長周期成分が卓越した継続時間の長い地震動（いわゆる長周期地震動）の発生が予測されており、特に堆積平野上の大都市に多数存在する高層建物への影響はきわめて重大である。さらにプレート境界の地震の連動や活断層の地震の誘発、あるいは余震発生を考慮すると、ある建物が短期間に連続して強い揺れを複数回受けることも想定しなければならない。その際に、既存の多数の高層建物について、地震による応答や損傷を速やかに把握し、地震後の再使用の可否や補修内容の判断を行う必要がある。しかし一方で、規模の大きい高層建物の被災状況調査は、専門的な構造技術者や設備機器の技術者を必要とするため、広域大災害では十分な対応は不可能である。特に鋼構造は構造部材が内装材や耐火被覆に覆われているため、明確な残留変形がないと構造安全性に関わる重大な構造被害であっても発見しにくく、アスベストがあれば除去にさらに時間がかかる。以上から、多数の既存高層建物に関して、地震応答性状や構造損傷・劣化を客観的に捉え、さらには続発する地震も考慮して継続使用性や修復可能性を的確に判断できるモニタリングの方法論や実際的なシステムの必要性はきわめて高い。

本業務ではこれらの点に関して、Eーディフェンスによる高層建物試験体の震動実験に基づき、一般的な強震計（加速度計）の記録を主に用いて、強い地震動を受けた際の建物応答特性や損傷状況を評価する手法を構築することを目的としている。これにより、多数の建物について実施可能なモニタリング技術が確立されれば、大規模地震災害時に広域の多数の建物について速やかな損傷状況の把握が可能になり、安全性の確保のみならず、再使用可否の判断による避難の解消や事業継続の観点からメリットは大きい。

2) 強震計による試験体の強震応答・非線形履歴特性の評価

a) 今年度の実験における観測の概要

今年度実施された高層建物試験体の震動実験において、使用した地震計の配置を図1・図2に、緒元を表1に示す。図1の①普及型強震計、②機器の更新により廃棄された

旧型強震計、③小型・廉価型強震計の3種は19年度の実験で用いた機材であり、いずれも単独の筐体にセンサ・収録部・電源などが納められ、スタンドアロンで動作可能である。これらの稼働状況や観測記録の比較検討は、昨年度までの本業務報告書および引用文献¹⁾に詳述されている。観測状況は前回と同様であり、ネットワーク接続はデータ回収と動作確認のみに用い、オンライン・リアルタイム収録は行っていない。これは一般的な強震計の機能を踏まえて実際的な利用法を検討するためである。同様に、建物内での観測状況を考慮して、GPSやNTPによる時刻同期機能も使用していない。本年度の報告では主に強震計①を用い、スタンドアロン機材間の時刻ずれなどを考慮しながら、多自由度振動システムの同定や加速度記録の積分による変位・層間変形特性の評価を検討している。

図2の④は新たに加えたネットワーク接続型強震計(SU102)である。①～③のスタンドアロン型とは異なり、個々のセンサはデータ収録等の機能を持たず、ネットワーク接続されたサーバにより時刻同期された連続データを収録する。センサは小型で、電源も含めて1本のLANケーブルで順次接続できるなどの利点を持つ。したがって強震計④については、観測体制やデータ活用は異なった形が想定されており、多点同時記録の取得、分析とともに、立体挙動の表示を試みることで、今後の活用のための基礎的検討を行っている。

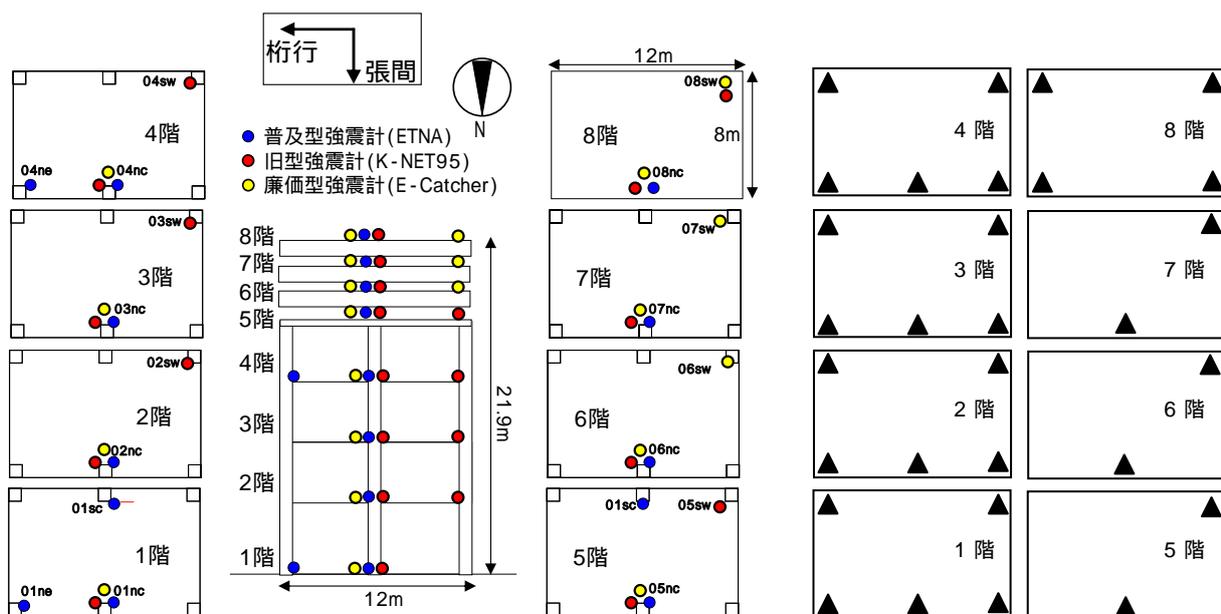


図1 強震計(①～③)の配置: 計36箇所

図2 強震計④の配置: 30箇所

表1 使用した強震計の比較

	普及型	旧型	小型廉価	ネットワーク接続型
センサ	サーボ加速度計	サーボ加速度計	半導体センサ加速度計	静電容量式加速度センサ
測定範囲	±2G (0.25 ~ 4G)	±2G	±2G (H) 1G (V)	±1.5G
周波数範囲	DC ~ 40Hz	DC ~ 30Hz (-3dB)	DC ~ 20Hz、上下 ~ 4Hz	0.1 ~ 50Hz
A/D変換	分解能18bit以上	24bit	実効16bit	24bit
ダイナミックレンジ	108dB以上	114dB	ノイズレベル2gal	分解能5.72 × 10 ⁻³ gal
サンプリング	100,200Hz	100Hz	100Hz	100Hz
時刻補正	GPS	GPS	NTP	NTP
記録媒体・時間	PCカード ~ 512MB	フラッシュ8MB	100秒 × 56記録	サーバ側内蔵、512MB
通信ポート	RS-232C	RS-232C	RS-232C、イーサネット	イーサネット内蔵
電源	AC + 内蔵バッテリー	AC + バッテリー	AC100V + 乾電池	LAN
寸法	256 × 381 × 166mm	274 × 374 × 178mm	120 × 170 × 50mm	140 × 140 × 58mm (センサ)

以上に加えて、動コイル型常時微動計を1、3、5、8階の北側中央に設置し、主に夜間に計測している。またSOF0型光ファイバセンサによる柱軸力計測を、1階と2階の北側中央・北東の柱の各2箇所（計8箇所）で実施している。これらの計測内容は19年度と同様であるため省略する。

b) 加速度記録による層間変形と履歴特性の評価

昨年度までに、観測された加速度記録（各地震計で時刻が厳密に合っていない記録）を用いて多自由度系のシステム同定²⁾を行うことで、固有振動数と減衰定数を適切に推定でき、その傾向から非線形応答特性や損傷をある程度評価できることを示している。今年度の観測記録についての結果は後述するが、この手法により得られる特性はモーダルパラメータが主であり、構造全体の特性変化は得られるものの、局所的な損傷に対する感度が必ずしも高くなく、損傷部位の特定も容易ではない。そこで本報告では、加速度記録を積分することにより層間変形などの構造体の局所的変形性状の推定を試みる。さらに、ある層より上の各階の応答加速度と質量から慣性力の総和により層せん断力を求めれば、層の非線形履歴特性を求めることができる。

図3に、1階から5階の応答加速度から求めた層間変形を、相対変位計による計測値と比較して示す。ここに挙げた例は、制震ダンパーなしの状態での丸波が入力した際の記録であり、下層で1/100を超える大きな層間変形が生じている。この場合を含めて、地震波やホワイトノイズ加振では、加速度計から求めた波形は相対変位計の結果と形状はよく対応している。最大値は入力や層により2~3割程度の差が見られることがあった。

積分に当たっては、センサの長周期側感度特性に対応したローカットフィルタの適用が必要である。ここでは0.3、0.1、0.01Hzなどのローカットフィルタを比較したところ、0.01Hzでは長周期ノイズが除けなかったが、0.1Hzで程度以上であれば十分な精度が得られた。また以上の特性は①と②の強震計でほぼ共通であった。したがってこのあとの検討では、三の丸波の卓越振動数（約0.3Hz）や試験体の固有振動数（0.5Hz強）も考慮して、0.1Hzのローカットフィルタを用いている。

さらに層間変形を計算するに当たり、隣り合う階の記録の時刻同期をとる必要がある。ここでは以下の手順により時刻ずれを補正した。①各強震計の加速度記録の上下動成分に対して、試験体の水平方向1次・2次固有振動数を避け、基準点（1階）と各点との伝達関数の位相に乱れが少なく、振幅も1付近で安定した周波数帯域（1.4~3.7Hz）でバンドパスフィルタを掛ける。②基準点の記録との相互相関関数から各地点の時刻ずれを求めて補正。③補正後の記録で基準点との伝達関数を求め、固有振動数以外の周波数帯域で位相の傾き（直線位相）がある場合はさらに補正を加えた。昨年度に検討したシステム同定による時刻ずれの推定とほぼ同様の結果が得られたが、実際の建物で利用するためには自動的な処理が必要なため、2つの記録の関係のみから時刻ずれを補正できる今回の手法を主に用いている。さらに各階の記録の時刻合わせの手順として、隣り合う階で順次補正していく方法と、1階と各階の関係で補正する方法を比較したところ、大きな差はないものの、今回の試験体・観測記録では後者のほうが安定する場合が多かった。

図4に、各層の履歴特性について、加速度計による変位波形と変位計を用いた場合を比較して示す。縦軸の層せん断力は各階の応答加速度と質量から求めた同一の値を用いてい

る。結果として、1層・2層のようにループの差（特に最大層間変形の差によるループの見掛けの傾きの差）が見られる場合もあるが、3層・4層ではループ形状までかなり良く一致し、加速度記録のみでもかなり正確な履歴特性の評価が可能であることが示された。

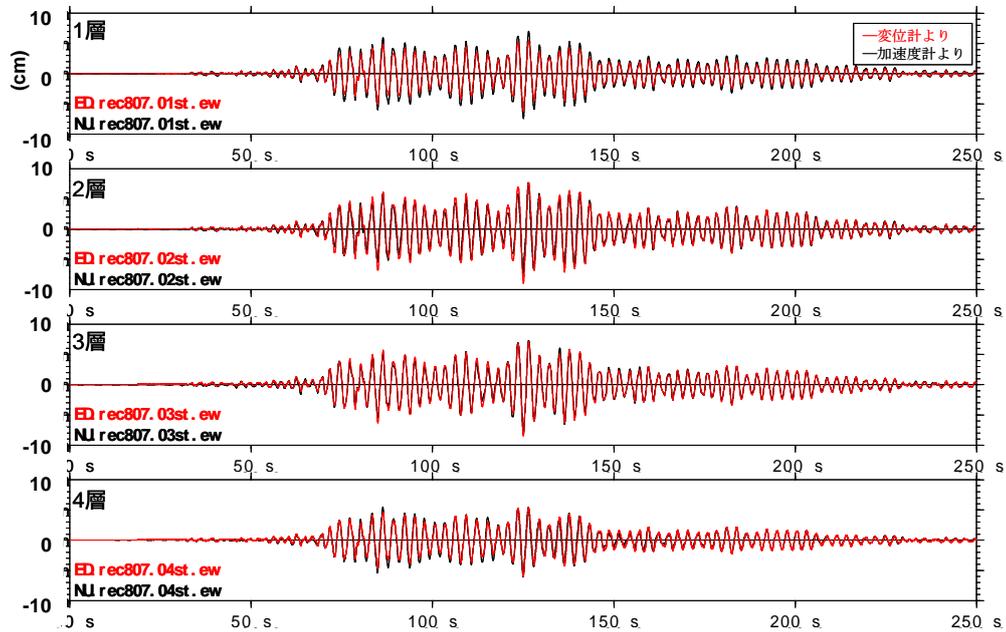


図3 加速度計から求めた各層の相対変形の時刻歴と相対変位計の記録の比較

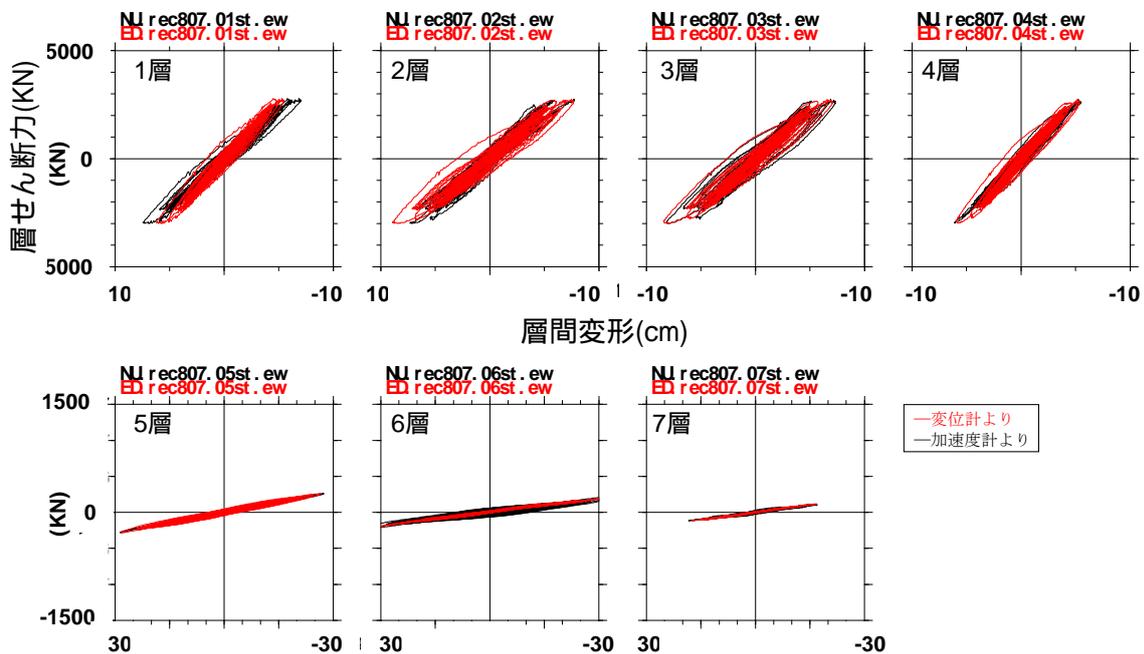


図4 加速度計による層間変形を用いた各層の履歴特性と相対変位計の結果の比較

c) 制震装置の有無による層の履歴特性の差異

図5に、3通りの制震装置を設置した場合と制震装置なしの場合について、上記の手法により評価した各層の履歴特性を比較して示す。入力はいずれも三の丸波である。制震装置を設置した場合では、縮約層の一部を除き、大きな損傷を生じていないことが試験体の

観察からわかっている。

図より、鋼材ダンパーが多くついているケース（2/3）では全層で最も変形が小さく、またループの傾きから剛性が高いこともわかる。したがって周期が短くなるため、三の丸波に対する共振が抑えられて応答が低減し、縦軸の層せん断力も小さくなっている。このような特徴は鋼材ダンパーの少ないケース（1/5）、オイルダンパーの順で小さくなり、補強なしの場合ではループの縦軸・横軸の最大値や面積が大きく、傾きは顕著に小さくなっている。上部の縮約層では、鋼材ダンパー2/3（5・6層にも入っている）のみループが小さく傾きも大きくなっており、補強の影響が明確に捉えられている。なお、6層のオイルダンパーのループで傾きが顕著に小さい部分が見られるのは、縮約層の剛性・減衰を与える積層ゴムや鋼材ダンパーが加振中に損傷したためであり、本来の構造体の損傷とは意味が異なるため、ここでは考察の対象としない。

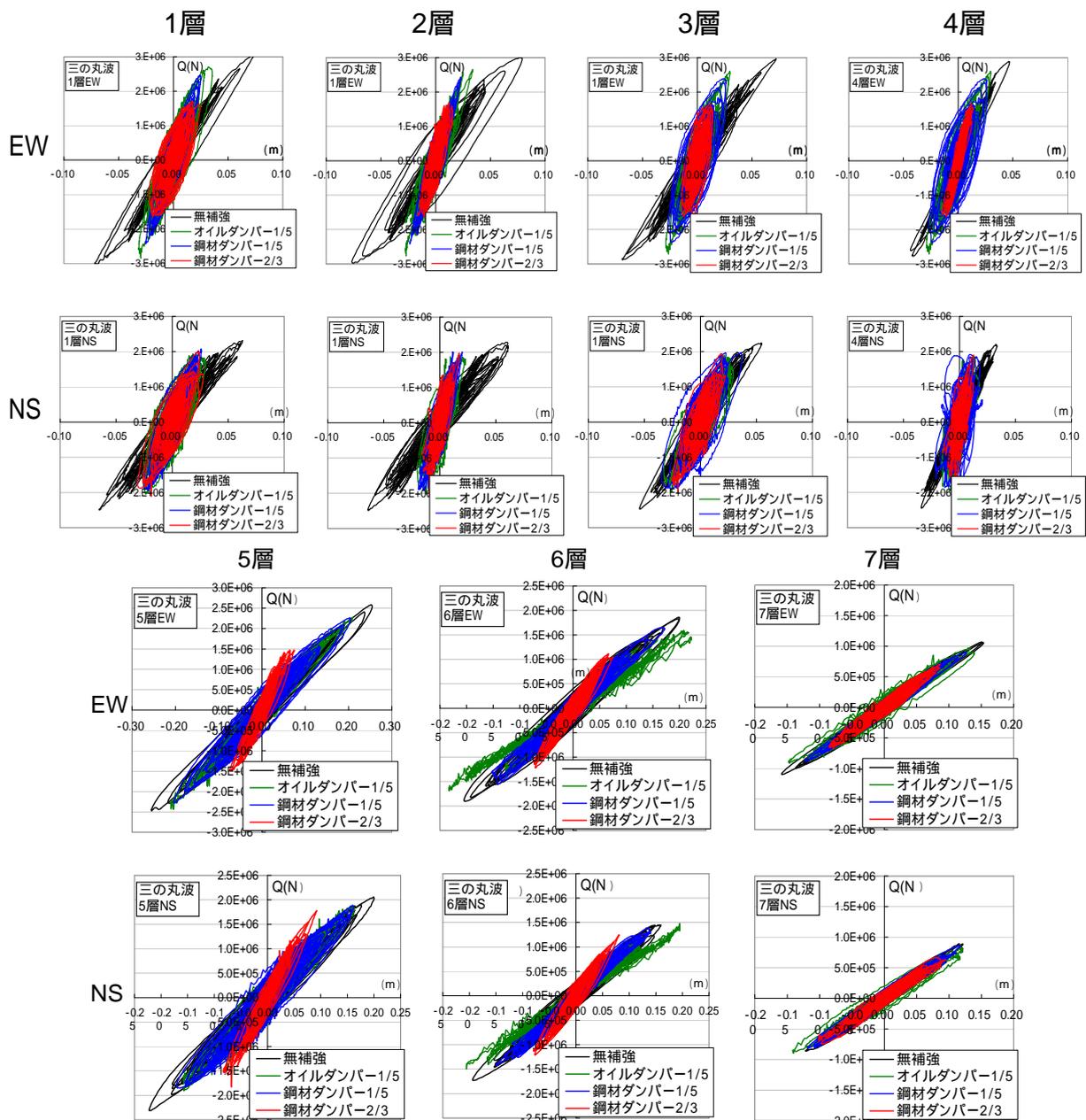


図5 加速度記録から求めた各層の履歴特性による制震装置の効果の比較(三の丸波加振)