



|                     |   |
|---------------------|---|
| Title               | 多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを用いた免震建物の応答変位抑制法に関する研究  |
| Author(s)           | 荻野, 伸行  |
| Degree Grantor      | 北海道大学   |
| Degree Name         | 博士(工学)  |
| Dissertation Number | 甲第15370号  |
| Issue Date          | 2023-03-23  |
| DOI                 | <a href="https://doi.org/10.14943/doctoral.k15370">https://doi.org/10.14943/doctoral.k15370</a> |
| Doc URL             | <a href="https://hdl.handle.net/2115/89579">https://hdl.handle.net/2115/89579</a>               |
| Type                | doctoral thesis   |
| File Information    | OGINO_Nobuyuki.pdf  |



多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを用いた免震建物の  
応答変位抑制法に関する研究

Response Displacement Suppression Method for Seismically  
Isolated Structures Using Velocity-dependent Multi-staged  
Oil Damper

2023年3月

北海道大学大学院工学院 建築都市空間デザイン専攻  
構造制御学研究室

荻野 伸行



---

## 論文要旨

近年、日本では海溝型巨大地震や内陸直下型地震で発生が予測される設計想定を超える大振幅地震動に対する免震構造の対応が求められている。大振幅地震動に対する免震構造の極限事象としては、免震層の応答変位の増大により最終的には上部建物が擁壁に衝突するか、免震部材が損傷（限界変形・限界速度・引張破断・座屈等）することが考えられる。これらの事象に対する対策としては、擁壁の衝突を許容する技術（高精度解析技術・衝撃緩衝材）と許容しない技術（フェイルセーフ・応答変位抑制・大変形免震部材）に大別できる。本研究は、設計想定を超える地震動に対する免震建築物の応答変位抑制法のオイルダンパーに着目し、従来のオイルダンパーの減衰力特性を実現しているバルブ機能（調圧弁）を改良するのみで可変減衰を容易に実現する、動作信頼性の高い、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーに関する研究であり、設計領域の地震動から設計想定を超えるような長周期地震動、内陸直下型地震など多様な地震動に対して、上部構造の応答加速度を抑制することで免震効果を確保し、同時に大振幅地震動の領域においても免震層の変位を抑制することにより、擁壁（躯体）衝突を回避できる、応答変位抑制法を提案している。

第1章「序論」では、まず、本研究の背景と目的について述べた。この中で、過去に発生している地震と免震構造の取り巻く環境の変化と対応状況から、大振幅地震動に対する免震構造の対応の重要性と対策方法について概説し、オイルダンパーを増量した場合の応答変位抑制法における課題について示した。次に、オイルダンパーを利用した応答変位抑制法に関する既往の研究についてまとめた。最後に、本研究の主題である多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの必要性と研究目的、研究手法の概略を示した。

第2章の「免震用多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの設計」では、免震・制振用オイルダンパーの原理・機構と特徴を整理し、設計コンセプトと本質的にオイルダンパーが持つ、速度依存性を利用して、新たに開発した専用調圧弁（バルブ機能の改良）で、振幅領域毎に減衰力を任意に設定し、広範囲な地震動レベルに対して免震性能を発揮できる、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを設計した。また、実機の試作機（最大減衰力：1200kN，最大速度：150cm/s）を設計・製作し、性能確認試験を行った。その結果、目標とした減衰力特性（F-V特性）が得られ、低速・中速・高速の切替も計画通りであり、オイルダンパーの特徴である周波数依存性もほとんど見られなかったことから、本オイルダンパーは、設計領域の低速領域では低減衰となり、従来の免震構造と同等以上の性能を確保し、設計想定レベルを超える大振幅地震動の中・高速領域では高減衰に切り替わり、変位抑制が可能となる設計通りの減衰力特性が確保できると結論付けた。

第3章の「時刻歴応答解析による応答変位抑制効果の検証」では、第2章で設計・製作し、試作機による性能確認試験と試験結果を踏まえ、ダンパーのモデル化を行い、15階建てRC造の基礎免震構造における時刻歴応答解析による抑制効果を検証した。その結果、本オイルダンパーを追加設置することで、大振幅地震動に対して、従来の免震構造に比較して、応答加速度、応答変位、応答層せん断力に低減効果が現れていることを確認した。また、標準的な設計用入力地震動においても、加速度応答の増加はみられず、既存のオイルダンパーよりも免震効果を発揮した。以上の検討結果より、本オイルダンパーは、設計領域では従来の免震構造と同等以

---

上の性能を確保し、設計想定レベルを超える大振幅地震動においても変位抑制が可能であり、広範囲の入力地震動レベルに対して免震効果が確保できることを検証した。

第4章の「オイルダンパーの繰り返し依存性を考慮した免震建物の地震応答性状」では、オイルダンパーの繰り返し依存性の特性評価に関する現状に鑑みて、OpenSees にオイルダンパーの繰り返し依存性を考慮した機能を新たに構築し、各免震部材の繰り返しによる性能変化を考慮した時刻歴応答解析について検討を行うことで、その有効性を示すとともに、オイルダンパーを採用する場合の詳細モデルによる検証法を提案した。検証法は、実機による加力試験より機種毎の減衰係数の変化率を設定し、精算法による温度上昇の推定法を利用し、温度上昇による等価粘性減衰係数の変化率から時刻歴応答解析において時々刻々と温度に応じて、減衰係数を変化させることで、繰り返し依存性を考慮する方法とした。また、15階建てRC造の基礎免震構造における時刻歴応答解析による繰り返し依存性による比較検討を行った結果、オイルダンパーの繰り返し依存性が免震性能に与える影響は、非常に小さいことを確認した。よって、繰り返し依存性がある支承材に多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを追加設置することで、大振幅地震動に対しても、有効に作用し、設計領域では従来の免震効果を確保しつつ、大振幅地震動の領域で変位を抑制することにより擁壁衝突を回避する目標性能を確保することが可能である。なお、提案する解析法は、免震・制振用オイルダンパーに共通するもので、オイルダンパーを用いた様々な免震・制振システムに適用できる。以上の結果から、免震部材の繰り返し依存性を考慮した場合において、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーが有効に作用すると結論付けた。

第5章の「断層近傍の長周期パルス地震動に対する多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの適用」では、2016年の熊本地震の観測された震源近傍で長周期成分が卓越するパルス状の強い地震動（以下、長周期パルス）に対する多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの適用について、本オイルダンパーと摩擦ダンパーを組み合わせた複合ダンパーを提案し、基本特性試験と試験結果を踏まえた時刻歴応答解析による効果を検証した。長周期パルス地震動は、免震構造にとって、非常に厳しい地震動となっており、応答変位や応答速度は、現在の免震部材の限界性能を超えるものとなる。そこで、本章では、その解決策として、オイルダンパーの応答速度が限界速度に達する荷重でパッシブに摩擦ダンパーに切り替わる複合ダンパーを提案した。縮小モデル(プロトタイプ)の住宅用免震を用いた動的加力試験による基本特性試験結果では、本複合ダンパーは、設定荷重に対して、オイルダンパーから摩擦ダンパーに切り替えが可能であることを確認した。また、15階建てRC造の基礎免震構造における時刻歴応答解析による効果を検討した結果、本複合ダンパーは、大速度・大振幅領域においても限界速度以下で一定の免震効果が発揮できることを確認した。以上の検討結果より、本複合ダンパーは、断層近傍の長周期パルス地震動に対しても有効であると結論付けた。

第6章「結論」では、本論文の成果をまとめ、今後の課題と展望について述べた。

最後に、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーは、設計領域の地震動から設計想定を超えるような大振幅地震動など多様な地震動に対して、上部構造の免震効果を確保しつつ、大振幅地震動の領域においても免震層の応答変位を抑制することができることを明らかにした。

---

## 謝辞

最初に、本学位論文の完成に向けて、ご指導頂きました、北海道大学大学院工学研究院教授 菊地優博士に深く感謝いたします。

また、本論文の執筆に当たっては、菊地博士ならびに北海道大学大学院工学研究院教授 蟹江俊仁博士、同准教授 高井伸雄博士に、鋭いご指摘と優しいご指導を賜りました。同助教 石井建博士には、OpenSees におけるオイルダンパーの繰り返し依存性を考慮した解析モデルの構築および解析結果の検証において多大なご助力を頂きました。

2018年3月ごろ、菊地博士から社外委員会のあとに、大学卒の私に学位取得の可能性をご助言頂き、大学院博士課程の入学を勧めて頂きましたことは、私のチャレンジ精神に火が付き、人生の大きな転換期となりました。

振り返ってみると、1981年に株式会社熊谷組に入社してから、ちょうど免震構造が世の中に出始め、ゼネコン各社が〇〇式免震構法の開発なる旗を掲げて自社の物件に適用し始めた1980年代（草創期）に免震構造の研究開発に携われたことは、非常に幸運でした。当時は、社内でも免震に懐疑的な設計者も確かにいました。それから、応答制御構造技術の研究・開発に携わってから、現在に至るまで、免震構造に関する研究、床免震構法に関する研究、パッシブ制振構法に関する研究、アクティブ制振構法に関する研究、交通振動対策用制振装置に関する研究、免震・制振構造の高度化に関する研究（ロック機構付オイルダンパー、浮き上がり対策（IBTワッシャー）等）など、様々な研究・開発と実用化を進めてきました。その間には、東京工業大学名誉教授 和田章博士をはじめ、多くの学識経験者の方々のご指導を頂いたことは、私の大きな財産になっています。

本研究はその後半の大振幅地震動対策用免震オイルダンパーの研究成果になりました。2015年ごろ長周期地震動や内陸直下型地震の大振幅地震動対策が免震構造の解決すべき新たな課題としてクローズアップされたころ、今まで培った知見から、オイルダンパーを活用した対策がなんとかできないか、日々思案しておりましたが、ある時、今回提案した多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを思いつき、カヤバ株式会社の故 露木保男博士に、「大振幅地震動対策でこんな減衰力特性のオイルダンパーが実現できないだろうか」と相談したところ、「これならできる、共同で開発を進めましょう」と決まったのが発端でした。

そこから、現在に至るまで、関係者のご協力のもと、様々な実験・解析による研究を進め、菊地博士のご指導により、今回の学位論文として帰結することができました。

会社に在籍しながら、本研究の機会と環境を与えてくれたのは、小川嘉明 執行役員副社長、上田真 専務執行役員をはじめ、直属の上司である平野譲 常務執行役員であり、私を自由にさせて頂き、研究を進めることができたことを、本当に感謝しております。おそらく、私がサラリーマンというより、フリーマン（自由人）に近く、本当に好きな仕事や研究をしていることを、ご理解頂いたのだと勝手に思っており、今後、後輩に技術や精神を伝承するのが私の役割と感じています。

また、耐震設計部の部長だったころに、本研究の協力を頂いた北川麻記さん、白鳥和希君をはじめメンバー各位には私が、社外活動が多く、ほとんど自席にいなかったため、苦勞をかけたと思っています。

今回の研究は、様々な社外の関係者のご協力がなければ、なしえませんでした。

---

第2章の多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの設計・性能確認試験にあたっては、実機の設計・具現化について、カヤバ株式会社の故 露木博士、中原学氏、岡本真成氏に長きにわたり、ご協力を頂き、実機適用への目処がたったと思っています。特に、中原氏には今回開発した専用調圧弁の理論、実験データの分析、実用化等多くの議論をさせて頂きました。

第3章の時刻歴応答解析では、提案可変減衰オイルダンパーの効果を検証するためのオイルダンパーのモデル化が必要だったため、ユニオンシステム株式会社の山崎久雄氏に解析モデルの構築と地震応答解析プログラムに組み込む作業を実施頂きました。山崎氏には他の様々なソフト開発や検証も依頼しており大変感謝しています。

第4章のオイルダンパーの繰り返し依存性を考慮した地震応答では、まだ誰もオイルダンパーの温度上昇による減衰係数の変化を考慮した時刻歴応答解析による検証法を実施していないことから、実験結果と解析手法の双方の検討が必要になりました。オイルダンパーの繰り返し依存性の試験結果は、カヤバ株式会社の岡本氏からデータを提供頂き、解析手法については、他の免震部材の繰り返し依存性が考慮できる OpenSees に、オイルダンパーの繰り返し依存性が考慮できる機能を新たに構築し、同プログラムに組み込む作業を菊地博士、石井博士に協力頂きました。基本ソフト構築の後、石井博士には、私のわがままで、減衰係数特性の追加変更や OpenSees の使用方法など、非常に丁寧なご指導頂いたと感謝しています。

第5章で述べた断層近傍の長周期パルス地震動に対する提案可変減衰オイルダンパーの適用では、熊本地震で観測された西原村小森の長周期パルス地震動は、設計領域を遥かに凌駕するレベルで非常に驚かされました。地震動特性からすれば、従来の免震構造では対応できないことは明らかでしたが、なんとか解決できる手段がないか思案していた時、提案可変減衰オイルダンパーの研究の延長線で解決するように摩擦ダンパーを直列設置した複合ダンパーとすれば、オイルダンパーの限界速度問題を解決出来るのではと考え、カヤバ株式会社の故 露木博士、岡本氏、平和発條株式会社の邢超氏らと議論を重ね、邢氏から自社の保有技術を活用した輪ばね式摩擦ダンパーを考案頂き、これと提案可変減衰オイルダンパーを組み合わせた複合ダンパーの設計を行いました。性能確認試験では、まずはプロトタイプ of 複合ダンパーの基本性能確認試験から実施をすることとし、動的加力試験は、株式会社コベルコ科研 保有の試験機を用いて、同社の上北剛寛氏、上出朋弘氏の協力を得て、想定通りの荷重切替えができることが確認できました。ここでも、複合ダンパーの効果を検証するためのダンパーのモデル化と解析プログラムへの導入は、ユニオンシステム株式会社の山崎氏に協力頂きました。

私が仕事や研究に専念できる家庭環境をつくり、支え応援してくれた妻 晶子と子供たち、そして、今回の授与を喜んでくれた高齢の父、応援してくれた家族・親戚の皆に感謝しています。

これからも、出会いを大切に、免震・制振構造の研究開発・普及に少しでも貢献できれば、良き人生です。

最後に、本研究を進めるあたり、ご支援くださった全ての方々に心より感謝の意を表します。

2023年3月 荻野 伸行

---

## 関連発表論文等

### [論文]

- 1) 荻野伸行, 菊地優, 岡本真成, 中原学: 大振幅地震動に対する免震用多段速度依存型可変減衰オイルダンパーに関する研究, 構造工学論文集 Vol.67B, pp.549-556, 2021.3
- 2) 荻野伸行, 石井建, 菊地優, 岡本真成: 大振幅地震動に対するオイルダンパーの繰り返し依存性を考慮した時刻歴応答解析に関する研究, 構造工学論文集 Vol.68B, pp. 376-385, 2022.4

### [発表]

- 1) 荻野伸行, 露木保男, 猪口敏一, 中原学, 山崎久雄: 大振幅地震動対策用免震オイルダンパーの開発 (その 1) 基本特性および効果の検証, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.409-410, 2016.8
- 2) 中原学, 荻野伸行, 北川麻記: 大振幅地震動対策用免震オイルダンパーの開発 (その 2) 原理試作および性能確認試験, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.995-996, 2017.8
- 3) 荻野伸行, 北川麻記, 山口洋平, 中原学: 大振幅地震動対策用免震オイルダンパーの開発 (その 3) 時刻歴応答解析, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.997-998, 2017.8
- 4) 荻野伸行, 北川麻記, 白鳥和希, 露木保男, 岡本真成, 山崎久雄: 大振幅地震動対策用免震オイルダンパーの開発 (その 4) オイルダンパーと摩擦ダンパーを複合したダンパーの検討, 日本建築学会学術講演梗概集 (構造Ⅱ), pp.1029-1030, 2018.9
- 5) 荻野伸行, 石井建, 菊地優, 岡本真成: 大振幅地震動に対するオイルダンパーの繰り返し依存性を考慮した時刻歴応答解析に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集 (構造Ⅱ), pp.589-590, 2021.9
- 6) 荻野伸行, 北川麻記, 白鳥和希, 南遼太, 邢超, 石塚 太: 大振幅地震動対策用免震オイルダンパーの開発 (その 5) 複合ダンパーの縮小モデルによる基本特性試験, 日本建築学会学術講演梗概集 (構造Ⅱ), pp.655-656, 2022.9
- 7) Nobuyuki Ogino, Masaru Kikuchi, Masanari Okamoto: 'Study of High-performance Oil Dampers for Seismically Isolated Structures to Counter Extremely Strong Earthquake Ground Motions', 16th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Regulation of Dynamic Characteristics of Structures, Saint-Petersburg, Russia, July 1-6, 2019
- 8) 荻野伸行, 大振幅地震動に対する免震建物の応答変位抑制技術, 耐震工学研究会 第 99 回研究会, 中央大学駿河台記念館 610 号室, 2018 年 9 月 21 日 (招待講演)
- 9) 荻野伸行, 免震委員会 講演会 大振幅地震動に対する応答変位抑制技術, 一般社団法人 日本振動技術協会 (JAVIT), 明治大学駿河台キャンパス リバティータワー 9 階, 1096 教室, 2018 年 1 月 22 日 (招待講演)
- 10) 荻野伸行(AIJ 免震構造小委員会), シンポジウム 巨大地震への備えを目指す免震構造の取り組み, (一社) 日本建築学会, 建築会館ホール, 2017 年 1 月 23 日

---

#### [その他の論文]

- 1) 荻野伸行, 北川麻記 : 大振幅地震動対策用免震オイルダンパーの開発, 熊谷組技術研究報告 NO.76, pp99-106, 2017
- 2) 荻野伸行, 北川麻記, 白鳥和希 : 大振幅地震動に対する免震用複合ダンパーの研究, 熊谷組技術研究報告 NO.78, 2019
- 3) 荻野伸行, 北川麻記, 白鳥和希, 南遼太 : 大振幅地震動に対する免震用複合ダンパーの研究－縮小モデルによる基本特性試験－, 熊谷組技術研究報告 NO.80, pp26-31, 2022

#### [公開特許]

- 1) 荻野伸行, 北川麻紀, 白鳥和希, 露木保男, 岡本真成, けい超, ” 免震用ダンパ”, 特願 2018-143202, 出願日 2018年7月31日, 特開 2020- 20373, 公開日 2020年2月6日, 特 7186388, 登録日 2022年12月1日
- 2) 荻野伸行, 北川麻紀, 白鳥和希, 露木保男, 岡本真成, ” 免震用ダンパ”, 特願 2018-143203, 出願日 2018年7月31日, 特開 2020- 20374, 公開日 2020年2月6日
- 3) 荻野伸行, 中原学, 石原幸子, 高林正和, ” 建物振動抑制装置”, 特願 2017- 12331, 出願日 2017年1月26日, 特開 2018- 119343, 公開日 2018年8月2日, 特 6886824, 登録日 2021年5月19日
- 4) 荻野伸行, 榊原健人, 安藤智紀, ” 免震用ダンパ”, 特願 2016-126329, 出願日 2015年6月27日, 特開 2018- 3853, 公開日 2018年1月11日, 特 6774234, 登録日 2020年10月6日

---

## 目次

|  |           |
|--|-----------|
| 論文要旨 .....                                       | i         |
| 謝辞 .....   | iii       |
| 関連発表論文等 .....                                    | v         |
| 目次 .....   | vii       |
| <b>第1章 序論 .....</b>                              | <b>1</b>  |
| 1.1 研究の背景 .....                                  | 2         |
| 1.2 既往の研究 .....                                  | 5         |
| 1.3 本研究の目的 .....                                 | 7         |
| 1.4 本論文の構成 .....                                 | 8         |
| 第1章の参考文献 .....                                   | 10        |
| <b>第2章 免震用多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの設計 .....</b>        | <b>11</b> |
| 2.1 概要 .....                                     | 12        |
| 2.2 オイルダンパーの原理・機構 .....                          | 12        |
| 2.3 装置の設計 .....                                  | 19        |
| 2.4 性能確認試験 .....                                 | 23        |
| 2.5 試作機の設計 .....                                 | 23        |
| 2.6 試験方法 .....                                   | 26        |
| 2.7 試験結果と考察 .....                                | 27        |
| 2.8 まとめ .....                                    | 29        |
| 第2章の参考文献 .....                                   | 30        |
| <b>第3章 時刻歴応答解析による応答変位抑制効果の検証 .....</b>           | <b>31</b> |
| 3.1 概要 .....                                     | 32        |
| 3.2 ダンパーのモデル化 .....                              | 32        |
| 3.3 検討ケース .....                                  | 34        |
| 3.4 解析結果と考察 .....                                | 39        |
| 3.5 まとめ .....                                    | 62        |
| 第3章の参考文献 .....                                   | 63        |
| <b>第4章 オイルダンパーの繰り返し依存性を考慮した免震建物の地震応答性状 .....</b> | <b>64</b> |
| 4.1 概要 .....                                     | 65        |
| 4.2 オイルダンパーの繰り返し依存性の概要 .....                     | 66        |
| 4.3 オイルダンパーの繰り返し依存性の解析手法 .....                   | 73        |
| 4.4 時刻歴応答解析による検討 .....                           | 77        |
| 4.5 まとめ .....                                    | 124       |
| 第4章の参考文献 .....                                   | 125       |

---

|   |     |
|---|-----|
| 第 5 章 断層近傍の長周期パルス地震動に対する多段速度依存型可変減衰オイルダンパー<br>の適用 ..... | 127 |
| 5.1 概要 .....  | 128 |
| 5.2 複合ダンパーの設計 .....                                     | 128 |
| 5.3 縮小モデルによる基本特性試験 .....                                | 131 |
| 5.4 時刻歴応答解析による検討 .....                                  | 140 |
| 5.5 まとめ .....   | 160 |
| 第 5 章の参考文献 .....  | 161 |
| 第 6 章 結論 .....  | 162 |
| 6.1 研究の総括 .....   | 163 |
| 6.2 今後の展望 .....   | 165 |

## 第 1 章 序論

- 1.1 研究の背景
  - 1.2 既往の研究
  - 1.3 本研究の目的
  - 1.4 本論文の構成
- 第 1 章の参考文献

## 第1章 序論

### 1.1 研究の背景

日本における地震や強震動、地震防災に対する調査研究とデータ公開は、1995年の兵庫県南部地震を契機に大きく転換し、強震観測網(K-NET)、地表と基盤との強震動同時観測を目的としたKiK-net、同じく高感度地震観測網Hi-net、広帯域地震観測網F-netに代表されるように、精度の高い多くの地震観測記録の情報が即時に得られるようになってきている。

これらの観測記録や調査研究から、1995年兵庫県南部地震、2004年新潟県中部地震、2007年新潟県中越地震では、陸域の浅い内陸直下型地震で継続時間が短いものの、比較的短周期成分に卓越周期があるパルス性の地震波が観測されており、2003年の十勝沖地震では、苫小牧の石油タンク火災にみられるように、長周期地震動による共振現象が明らかになった。また、2011年東北地方太平洋沖地震では、Mw9.0という想定外の超巨大地震が発生し、津波被害や建物被害や地盤災害に加えて、福島第一原子力発電所のメルトダウンなど、前例のない様々な複合災害が発生した。地震動に関しては、長周期・長時間地震動が東北地方だけでなく、震源から遠く離れた関西地方でも観測され、超高層建築物や免震建築物が大きく揺れて様々な被害が生じている。これを受けて、近い将来、発生が懸念される南海トラフ沿いの巨大地震については、内閣府が2015年に長周期地震動に関する報告書を発表し、それを受けて国土交通省は2016年に超高層建築等の対策と基盤促波を公表して、静岡県と3大都市圏（関東圏、中京圏、大阪圏）における入力地震動として設計で採用することを求めている<sup>1)</sup>。また、関東圏はそれほど大きな地震波とはなっていないが、今後、公表される相模トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動については引き続き注意が必要といえる。

その後、大規模な内陸直下型地震として2016年熊本地震(Mj7.3)が発生し、最大で2mの断層ずれを伴う地表地震断層が出現した。活断層近傍の益城町や西原村では震度7の激しい揺れの原因となった指向性パルスを観測し、同時に断層ずれに起因する地盤変状、フリングステップや長周期パルスが注目されている。この特徴的なパルス性の長周期地震動は、大規模な活断層帯地震のごく近傍で発生し、かつ、数千年以上に1度程度という非常に稀な大振幅地震動であり、活断層近傍における免震建築物に関する入力地震動と耐震対策を考慮する上で重要な教訓が得られている。

また、大阪では、一般社団法人日本建築技術者協会関西支部において2009年に「大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動及び設計法に関する研究会」(大震研)が発足し、大阪府域に影響を与える内陸直下型地震に対する建築物の設計用入力地震動とそれらに対する建築物の耐震設計法を取りまとめている<sup>2)</sup>。この研究会では、内陸直下型地震による断層近傍で発生する地震動はやや長周期のパルス波形を含み、これによる高層建築物や免震建築物に大きな影響を及ぼす可能性があり、現行の建築基準法等に準拠した時刻歴応答解析による設計だけでは十分に対処できないと考え、このような取組が行われており、設計においても公開されている地震波を採用している。

このように、近年観測されている地震波は、設計想定を超える様々な特徴をもつ地震波が観測されており、それに対応した各分野での研究・開発がなされてきた。

日本国内の免震建築物は、1983年に日本初の免震建物の八千代台住宅が建設されたから、約40年が経過し、約5000棟の免震建築物が建設されているが、年代の経過に伴い、免震構造の

取り巻く環境は大きく変化しており、設計技術の高度化や免震部材の大型化・高性能化が図られてきている。

過去に発生している地震と免震構造の取り巻く環境を見ると、1995年の兵庫県南部地震では、免震構造の有効性が立証され多くの建物に適用され始め、これ以降は年間150～250棟前後で計画棟数は推移している。2003年の十勝沖地震では、長周期地震動による対策が求められ、2011年東北地方太平洋沖地震では、長周期・長時間地震動に加えて、津波対策、極限事象対策などが求められるようになってきている。

これらの様々な地震動レベルに対して、免震構造の目標耐震性能をどこに設定するかで、免震部材・免震システムが異なることになる。例えば、JSCA性能設計<sup>3)</sup>では、免震構造は、地震動レベルと被害の程度に応じて、免震基準級、免震上級、免震特級の3つの耐震性能グレードが設定されている。また、文献4)では、想定地震の地震動レベルと再現期間の目安が示されており、L3地震動における極大地震動・想定最大級の地震動の2段階の目安が示されている。

以上のように、近年、日本では海溝型巨大地震や内陸直下型地震で発生が予測される大振幅地震動に対して免震構造の対応が求められ、様々な研究・開発が実施されている。大振幅地震動に対する免震構造の極限事象としては、免震層の応答変位の増大により最終的には上部建物が擁壁に衝突するか、免震部材が損傷（限界変形・限界速度・引張破断・座屈等）することが考えられる。

これらの事象に対する対策としては、図1.1に示すように、擁壁の衝突を許容する技術（高精度解析技術・衝撃緩衝材）と許容しない技術（フェイルセーフ・応答変位抑制・大変形免震部材）に大別できる<sup>5)</sup>。

設計想定を超える地震動に対する応答変位抑制法については、一般的に免震層の変位増大を抑制するためにダンパーを増量することが考えられる。しかし、その場合には標準的な設計用地震動レベルに対しては、免震効果を減少させる可能性が大きい<sup>6)</sup>。そこで本研究では、設計領域では従来の免震効果を確保しつつ、大振幅地震動の領域で変位を抑制することにより擁壁（躯体）衝突の回避を狙う多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを新たに提案する。（図1.1の赤枠の部分に位置する）

既往のオイルダンパーを利用した免震効果と免震層変位のトレードオフ関係を改善する手段としては、最適制御やスライディング制御などを用いたセミアクティブ免震があるが、これらは、パッシブによる免震システムと比較して複雑で維持管理を含めコストが高くなるという課題がある<sup>7)~9)</sup>。一方、パッシブにおける可変オイルダンパーは、変位依存型可変減衰オイルダンパー<sup>11)12)</sup>や変位依存型可変性能オイルダンパー<sup>13)14)</sup>などが提案されている。これらのオイルダンパーは新たな回路や機能などを追加するため、装置が複雑化・大型化になることが多い。

そこで、本研究では、従来のオイルダンパーの減衰力特性を実現しているバルブ機能（調圧弁）を改良するのみで可変減衰を容易に実現する、動作信頼性の高い、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを提案することで、これらのトレードオフ関係を解決することを目指しており、本オイルダンパーの開発・設計・実機による性能確認試験と時刻歴応答解析による効果について論ずる。また、従来の免震部材では困難とされてきた、震源近傍で長周期成分が卓越する長周期パルス地震動に対応可能な本オイルダンパーを適用した免震システムを提案する。

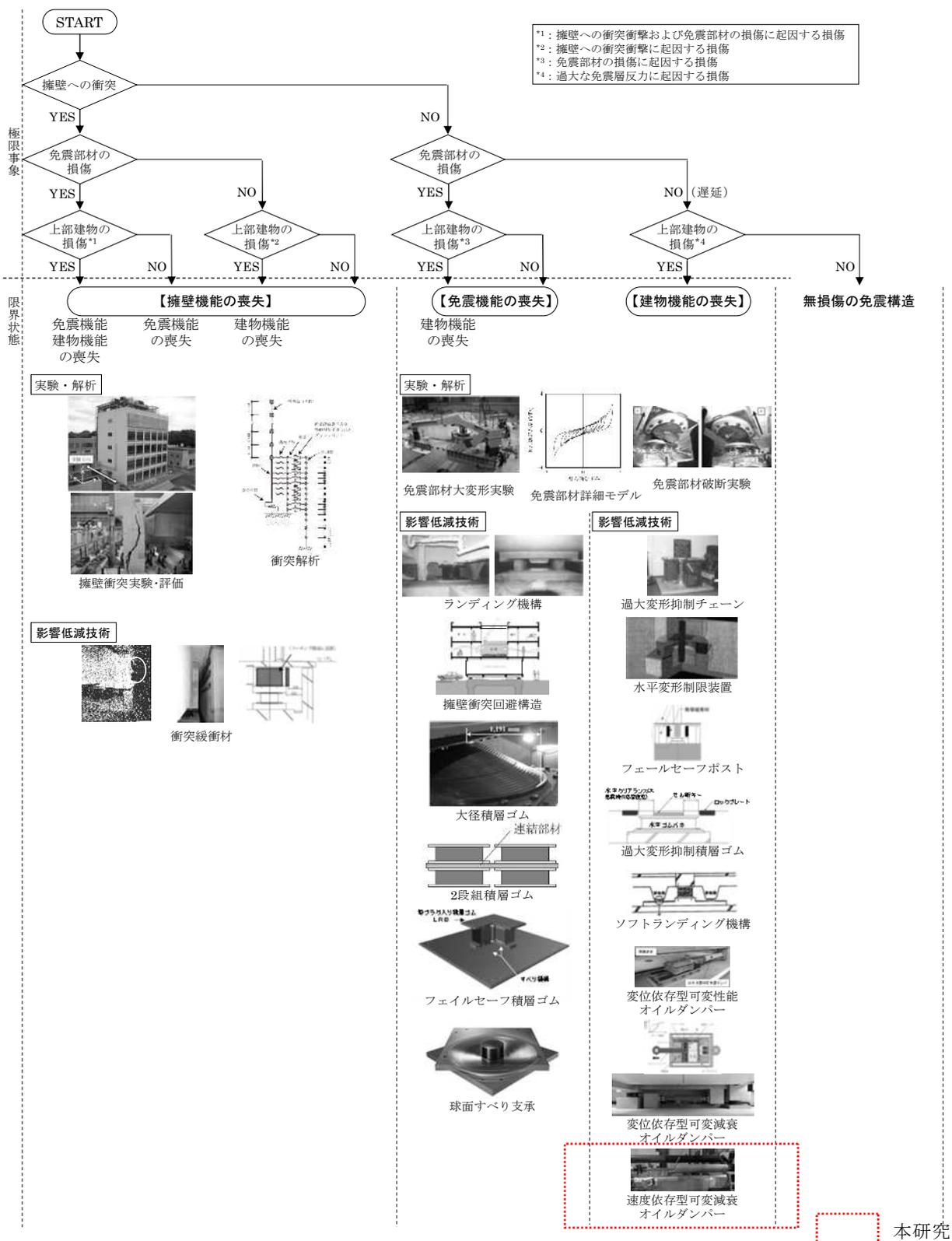


図 1.1 免震建築物の限界状態および免震層の過大変位対策の分類<sup>5)</sup>

## 1.2 既往の研究

オイルダンパーを利用した免震効果と免震層変位のトレードオフ関係を改善する手段としての既往の研究は、最適制御やスライディング制御などを用いたセミアクティブ免震と可変減衰オイルダンパーを用いたパッシブ免震がある。

### (1) セミアクティブ免震

可変構造セミアクティブ免震は、可変減衰ダンパーと制御コンピュータおよび変位計、加速度計の各センサーで構成されとおり、建物の応答性状に応じて、制御則に従って最適な指令値を出して2つの減衰力特性に切替える。オイルダンパーの減衰力特性は、バイリニア型でシャットオフ弁の開閉でCH（高減衰）とCL（低減衰）の2つの特性が実現できるようになっている。通常は閉状態で減衰力を発生し、CH特性となる。また、シャットオフ弁開時はCL特性となる。主に中小地震時の加速度低減による居住性向上が目的として開発されており、センサーの不具合は停電などの不測の事態でも建物の安全性を確保するために、常時は高減衰側にセットされている<sup>7)</sup>。

また、上記と同様な2段階に切替え可能なセミアクティブ免震の制御方法をスライディングモード制御とした手法がある<sup>8)</sup>。スライディングモード制御は、制御性能を規定する切替え超平面に制御対象の状態量を拘束するように制御を切替える非線形制御であることから、制御設計時のモデル誤差や制御対象の特性変動に係わらず規定された制御性能が実現されるため、高いロバスト性を有している。

セミアクティブ免震の多くは、最適制御理論に基づいているが、この方法は、建物の応答量をモニタするセンサーが複数台必要で、制御演算も複雑であることから、免震層の変形のみに着目して、電気信号により、2値切替型（MinMax制御）の可変減衰オイルダンパーとして、ユニフロー型オイルダンパーを用いてリニア型のオイルダンパーの低速領域で低減衰（CL）に切替える手法も提案されている<sup>9)</sup>。また、筆者は、同様に免震層の変位計測データを元に設定変位に達した時点で減衰力特性を切替える、風揺れ対策用のロック機構付きオイルダンパーを活用した方法を提案している<sup>10)</sup>。

### (2) 可変減衰オイルダンパー

パッシブにおける可変減衰オイルダンパーは、変位・速度依存型可変減衰オイルダンパーや変位依存型可変性能オイルダンパーなどが提案されている。

パッシブ型可変減衰オイルダンパーは電磁弁などの電氣的な機構を用いずに減衰係数を変化させるもので、一定の変位以上になると減衰係数を切り替えるタイプと一定の速度以上になると減衰係数を切り替えるタイプが考えられている。後者の速度依存型可変減衰オイルダンパーは筆者が提案するダンパーとなる。また、ダンパー自体は通常のオイルダンパーを使用し、ダンパーの接続部に特殊な機構を設け、一定変位以上になるとダンパーが作用するものもある。

#### 1) 変位依存型可変減衰オイルダンパー

免震層の変位が一定以上になると、高減衰状態を保持するパッシブ切替え型オイルダンパーは、高減衰用の弁を有するシリンダー内部のピストン流路に加えてシリンダーの外側にシリンダー内部の伸側室と縮側室を繋ぐバイパス流路を新たに設け、その流路に低減減衰用の弁と流路を塞ぐシャットオフ弁が配置されている。常時はバイパス流路をオイルが流れ低減減衰の特性だが、ダンパーの変位が設定以上になるとバイパス流路の流れがシャットオフ弁により閉鎖さ

れ、シリンダー内部のピストン流路のみが機能し、高減衰の特性が得られる。地震終了後には、手動で切替レバーを操作し、シャットオフ弁を解放して低減衰モードに復帰する<sup>11)</sup>。

上記の地震後の手動切替を不要とした、変位依存型オイルダンパーも開発されている<sup>12)</sup>。本オイルダンパーは、変位が一定以上の領域で高減衰モードになり、変位が小さくなるとまた低減衰モードになる。内部にピストンを貫通して設置されている切替ロッドには、中央部の一定区間に軸方向へ伸びる溝を設けており、ピストンが取付長近傍から切替変位ではダンパー伸縮時に油が溝を通ることにより、バルブへ通る油を減少させ油圧抵抗を減らすことでピストン速度に応じた減衰力を低下させ、ダンパーが伸縮しピストンが一定区間を超えると、切替ロッドの溝は無くなり油はバルブのみを通るため、バルブに応じた油圧抵抗がピストン速度に応じた減衰力として作用する。

## 2) 変位依存型可変性能オイルダンパー

通常オイルダンパーにスイッチ接続装置を直列に連結し、規定変位以下ではオイルダンパーが作動せず、規定変位以上ではオイルダンパーが作動するようにした接続スイッチダンパーは、初期状態ではロックピンがスイッチプレートの上を滑りオイルダンパーは作動せず、規定変位以上になるとロックピンが穴に落ちることでロックされ、オイルダンパーは建物の変位に追従して作動する。この機構により、オイルダンパーは通常使用されているタイプを使用しながら、中小地震ではオイルダンパーは一切作動せず、極大地震時にオイルダンパーの特性をフルに発揮することができる<sup>13)</sup>。

また、中小地震に対する免震性能を確保しつつ極大地震に対する免震層の過大変形も抑制する方法として、不感帯機構と免震用オイルダンパーに接続したGAP機構付きオイルダンパーも提案されている。本機構は、免震層変位が設定した不感帯幅以下の場合（中小地震レベル）、オイルダンパーに減衰力を発生させずより高い免震性能を確保し、免震層変位がそれ以上の場合（大地震レベル以上）で減衰力を発生させ、過大変位を抑制する<sup>14)</sup>。

### 1.3 本研究の目的

研究の背景で示したように、近年、研究が進められている設計想定を超える大振幅地震動に対する免震構造の対策方法において、オイルダンパーを増量して、免震層の応答変位を抑制する場合、トレードオフ関係で大振幅地震動では変位が抑制できても、中小地震や設計想定レベルの地震に対して、減衰力が過大となり免震性能が低下する現象が生じる。これを解決するには、既往の研究に示したように何らかの方法で、地震動レベルに応じて、オイルダンパーの減衰特性を切替える方法が必須となる。

セミアクティブ免震のように制御方法を利用して減衰特性を切替える方法、オイルダンパーの内部に新たな機構を追加して変位に応じて切替える方法、通常オイルダンパーに接続装置を追加して、大地震時にオイルダンパーを機能させる方法などがあるが、これらは、装置が複雑で大型化になることから、もっと、シンプルで動作信頼性の高いオイルダンパーの本質（バルブ特性）を活かしたシステムが望まれる。

そこで、本研究では、上記の要求性能を達成するために、設計想定を超える地震動に対する応答変位抑制方法として、筆者が開発した多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを提案することを目的としている。

研究の方法としては、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの目標性能を実現するため、装置設計と様々な性能試験を実施し、試設計免震建物を用いた地震応答解析により応答値抑制効果の検証を行い、提案するダンパーの有効性を検証する。

また、本オイルダンパーの繰り返し依存性を考慮できる解析手法を新たに構築し、免震建物の時刻歴応答解析による応答性状の検証を行うことで、高減衰ゴム系積層ゴム支承や鉛プラグ入り積層ゴム支承のような、繰り返し依存性により性能変化を生じる免震支承を併用した場合の有効性を論ずる。

さらに、従来困難とされてきた、断層近傍の長周期パルス地震動に対する多段速度依存型可変減衰オイルダンパーと摩擦ダンパーを組み合わせた複合ダンパーを用いた新たな免震システムを提案することで、非常に大きな大振幅地震動から設計領域の地震動までの多様な地震動に対して有効な、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを適用した応答変位抑制法を提案する。

## 1.4 本論文の構成

本論は全6章から構成されている。

第1章の「序論」では、本研究の背景として、近年の日本において観測された地震動や被害の特徴、それを受けて、南海トラフ沿い巨大地震や内陸直下型地震における国や民間等における取組み状況から、設計想定を超える地震動（大振幅地震動）に対する各分野での研究の重要性について言及している。また、過去に発生している地震と免震構造の取り巻く環境の変化と対応状況から、近年、大振幅地震動に対する免震構造の極限事象と様々な対策技術が研究・開発されているが、筆者は、オイルダンパーを活用した応答変位抑制技術に着目し、既往の研究を概観し、本研究の目的を明確に位置付け、設計領域では従来の免震効果を確保しつつ、大振幅地震動の領域で変位を抑制することにより擁壁（躯体）衝突の回避を狙うことを従来のオイルダンパーの減衰力特性を実現しているバルブ機能（調圧弁）を改良するのみで可変減衰を容易に実現する、動作信頼性の高い、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを提案している。

第2章の「免震用多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの設計」においては、免震・制振用オイルダンパーの原理・機構と特徴を整理し、設計コンセプトと本質的にオイルダンパーが持つ、速度依存性を利用して、新たに開発した専用調圧弁（バルブ機能の改良）で、振幅領域毎に減衰力を任意に設定し、広範囲な地震動レベルに対して免震性能を発揮できる、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを設計した。また、実機の試作機（最大減衰力：1200kN，最大速度：150cm/s）を設計・製作し、性能確認試験を行った。その結果、目標とした減衰力特性（F-V特性）が得られ、低速・中速・高速の切替も計画通りであり、オイルダンパーの特徴である周波数依存性もほとんど見られなかったことから、本オイルダンパーは、設計領域の低速領域では低減衰となり、従来の免震構造と同等以上の性能を確保し、設計想定レベルを超える大振幅地震動の中・高速領域では高減衰に切り替わり、変位抑制が可能となる設計通りの減衰力特性が確保できると結論付けている。

第3章の「時刻歴応答解析による応答変位抑制効果の検証」では、第2章で設計・製作し、試作機による性能確認試験と試験結果を踏まえ、ダンパーのモデル化を行い、その機能を新たに解析モデルに組み込んだ。また、15階建てRC造の基礎免震構造における時刻歴応答解析による効果を確認した結果、本オイルダンパーを追加設置することで、大振幅地震動に対して、従来の免震構造に比較して、応答加速度、応答変位、応答層せん断力に低減効果が現れている。また、標準的な設計用入力地震動においても、加速度応答の増加はみられず、既存のオイルダンパーよりも免震効果を発揮した。

以上の検討結果より、本オイルダンパーは、設計領域では従来の免震構造と同等以上の性能を確保し、設計想定レベルを超える大振幅地震動においても変位抑制が可能であり、広範囲の入力地震動レベルに対して免震効果が確保できることを検証している。

第4章の「オイルダンパーの繰り返し依存性を考慮した免震建物の地震応答性状」では、オイルダンパーの繰り返し依存性の特性評価に関する現状に鑑みて、OpenSeesにオイルダンパーの繰り返し依存性を考慮した機能を新たに構築し、各免震部材の繰り返しによる性能変化を考慮した時刻歴応答解析について検討を行うことで、その有効性を示すとともに、オイルダンパーを採用する場合の詳細モデルによる検証法を提案している。検証法は、実機による加力試験より機種毎の減衰係数の変化率を設定し、精算法による温度上昇の推定法を利用し、温度上昇による等価粘性減衰係数の変化率から時刻歴応答解析において時々刻々と温度に応じて、減衰

係数を変化させることで、繰り返し依存性を考慮する方法を提案した。また、15階建てRC造の基礎免震構造における時刻歴応答解析による繰り返し依存性による比較検討を行った結果、オイルダンパーの繰り返し依存性が免震性能に与える影響は、非常に小さいことが確認された。よって、繰り返し依存性がある支承材に多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを追加設置することで、大振幅地震動に対しても、有効に作用し、設計領域では従来の免震効果を確保しつつ、大振幅地震動の領域で変位を抑制することにより擁壁衝突を回避する目標性能を確保することが可能である。なお、提案する解析法は、免震・制振用オイルダンパーに共通するもので、オイルダンパーを用いた様々な免震・制振システムに適応できる。また、限界性能に近い応答であっても、より精度の高い応答推定が可能である。

以上の結果から、免震部材の繰り返し依存性を考慮した場合において、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーが有効に作用すると結論付けている。

第5章の「断層近傍の長周期パルス地震動に対する多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの適用」では、2016年の熊本地震では、震源近傍で長周期成分が卓越するパルス状の強い地震動（以下、長周期パルス）が観測されている。これらは、免震構造にとっても、非常に厳しい地震動となっており、応答変位や応答速度は、現在の免震部材の限界性能を超えるものとなる。

本章では、その解決策として、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーと摩擦ダンパーを組み合わせた複合ダンパーを適用した新たな免震システムを提案しており、縮小モデル（プロトタイプの住宅用免震）を用いた動的加力試験による基本特性試験と試験結果を踏まえた解析検討を行っている。基本特性試験結果より、本複合ダンパーは、設定荷重に対して、オイルダンパーから摩擦ダンパーに切り替えが可能であることを確認した。一方、摩擦ダンパーは、振幅依存性と速度依存性があり、実用化に当たっては、これらを改善する必要がある。また、15階建てRC造の基礎免震構造における時刻歴応答解析による効果を確認した結果、本複合ダンパーは、大速度・大振幅領域においても限界速度以下で一定の免震効果が発揮できるが、良好な免震効果を得るためには、変位量は1.5m程度必要である。限界変位を1.5m程度確保するためには、支承材にもその変位量が必要となるが、現在、市販化している積層ゴム支承の最大は、外径1.8m、ゴム総厚32cmであることから、限界変位（ $\gamma=400\%$ ）は1.28mであるが、既存の免震支承では、免震効果が低下する。その解決方法として、本章では、1.5mの最大応答変位でも免震性能を確保できるよう、支承材は、弾性すべり支承、復元材として高減衰ゴム系積層ゴム支承を提案し、時刻歴応答解析により免震効果を発揮することを確認した。

以上の検討結果より、本複合ダンパーは、断層近傍の長周期パルス地震動に対しても有効であると結論付けている。

第6章の「結論」では、研究の総括として、第2章から第5章の検討結果より筆者が開発した、従来のオイルダンパーの減衰力特性を実現しているバルブ機能（調圧弁）を改良するのみで可変減衰を容易に実現する、動作信頼性の高い、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーは、設計領域の地震動や設計想定を超えるような長周期地震動、内陸直下型地震など多様な地震動に対して、上部構造の応答加速度を抑制することで免震効果を確保し、同時に免震層の変位を抑制し、擁壁（躯体）衝突の回避できる、応答変位抑制法であることを示している。また、今後の展望では、本オイルダンパーの実用化や、免震構造への今後の展望が述べられている。

## 第1章の参考文献

- 1) 国土交通省：超高層建築物等における南海トラフ沿い巨大地震による長周期地震動への対策について，2016  
[http://www.mlit.go.jp/report/press/house05\\_hh\\_000620.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000620.html)
- 2) 大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および設計法に関する研究会：大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および耐震設計指針，2015
- 3) 日本建築構造技術者協会：JSCA 性能設計説明書【耐震性能編】2017年版，「JSCA 性能設計【耐震性能編】」パンフレット，2018
- 4) 日本免震構造協会：免震建築物のための設計用入力地震動作成ガイドライン（第3版），pp.3-1-3-2，2022.6
- 5) 日本建築学会：大振幅地震動に対する免震構造の設計，pp.83-125，2020.11
- 6) 荻野伸行：シンポジウム 巨大地震への備えを目指す免震構造の取り組み「大振幅地震動に対する応答変位抑制技術と検討事例」，日本建築学会，pp.53-62，2017.1
- 7) 篠崎洋三ほか：可変構造セミアクティブ免震システムの開発と適用（その1～6），日本建築学会学術講演梗概集（近畿），構造Ⅱ，pp.723-734，2005.9
- 8) 長嶋一郎ほか：可変減衰オイルダンパーを用いた免震構造物のスライディングモード制御，日本建築学会構造系論文集，第75巻，第649号，pp.511-519，2010.3
- 9) 鈴木太輝雄ほか：可変減衰セミアクティブ免震構造の開発（その1～3），日本建築学会学術講演梗概集（北海道），構造Ⅱ，pp.395-400，2013.8
- 10) 荻野伸行ほか：大振幅地震動対策用免震オイルダンパーの開発（その1）基本特性および効果の検証，日本建築学会学術講演梗概集，構造Ⅱ，pp.409-410，2016.8
- 11) 欄木龍大ほか：巨大地震に対する高性能免震技術の開発（その1～3），日本建築学会学術講演梗概集（関東），構造Ⅱ，pp.509-514，2015.9
- 12) 福喜多輝ほか：可変減衰型オイルダンパーの開発（その1，2），日本建築学会学術講演梗概集（中国），構造Ⅱ，pp.991-994，2017.8
- 13) 安田拓矢ほか：免震ダンパー接続型付加減衰機構の開発（その1，2），日本建築学会学術講演梗概集（東海），構造Ⅱ，pp.275-278，2012.9
- 14) 得能将紀ほか：免震用オイルダンパーに接続する不感帯機構の開発（その1），日本建築学会学術講演梗概集（九州），構造Ⅱ，pp.403-404，2016.8

## 第 2 章 免震用多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの設計

- 2.1 概要
  - 2.2 オイルダンパーの原理・機構
  - 2.3 装置の設計
  - 2.4 性能確認試験
  - 2.5 試作機の設計
  - 2.6 試験方法
  - 2.7 試験結果と考察
  - 2.8 まとめ
- 第 2 章の参考文献

## 第2章 免震用多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの設計

## 2.1 概要

多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの設計コンセプトとして、従来のセミアクティブ免震や可変減衰オイルダンパーにおける、装置の複雑化・大型化、コスト増となる課題を解決するために、改良が容易な点に着目して、従来のオイルダンパーの減衰力特性を実現しているバルブ機能（調圧弁）を改良するのみで可変減衰を実現することが可能である多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを開発することを明確にしている。

本オイルダンパーは、設計領域では減衰が低く、大振幅領域（高速領域）で高減衰になるように減衰力特性を速度に応じて3段階（低速領域(C<sub>1</sub>), 中速領域(C<sub>2</sub>), 高速領域(C<sub>3</sub>))に切り替える可変としていることに特徴がある。この特性を有することで、発生頻度が比較的高い中小地震から設計領域を超える地震動までのあらゆる地震入力レベルに対して、良好な免震効果を発揮することができる。本章では、実機の装置設計および試作機試作機の設計を行い、試作機による性能確認試験を行った。その結果、本オイルダンパーは、設計領域の低速領域では低減衰となり、従来の免震構造と同等以上の性能を確保し、設計想定レベルを超える大振幅地震動の中・高速領域では高減衰に切り替わり、変位抑制が可能となる設計通りの減衰力特性が確保できると結論付けている。

## 2.2 オイルダンパーの原理・機構

オイルダンパーは自動車、鉄道車両の懸架装置および産業機械の防振装置等広く用いられているもので、土木・建築構造物用は形状、および機構が異なるが原理的には同一である。オイルダンパーの基本性能式は実験による回帰式ではなく、リニア特性（速度比例）およびバイリニア特性が得られる減衰機構を確立された流体理論式を用いて設計しており、メーカーにより構造が部分的に異なるが、基本原理構造は同一である。

## (1) 減衰力発生の原理

流体は大小の差はあるが粘性があり、流体の流れ学における現象には、流体の運動が主に粘性力によるものと、慣性力によるものがある。流体系のダンパーは主に粘性力を利用するものは粘性ダンパー、主に慣性力を利用するものはオイルダンパーと呼ばれている。

図 2.1 に流体を用いた筒型ダンパーの原理図を示す。流体が充満したシリンダー(φ D)mの内側をピストンおよびピストンロッドが速度(  $\dot{u}_d$  ) m/s で作動する構造になっている。流体は圧縮しないものとする、流量(Q) m<sup>3</sup>/s でタンク室に流れ、粘性力と慣性力の流れの抵抗で、内圧(P) N/m<sup>2</sup>が発生し、この内圧がピストンに作用し、抵抗力(  $F_d$  ) N となり、この力を減衰抵抗力と称し、(2.1)式で表される。

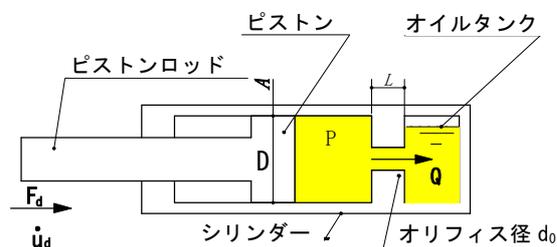


図 2.1 原理図 1)

$$F_d = \left[ 8 \cdot \pi \cdot \nu \cdot L + \frac{A \cdot \dot{u}_d}{2 \cdot C_D^2} \right] \cdot \left( \frac{A^2 \cdot \rho}{a^2} \cdot \dot{u}_d \right) \quad (2.1)$$

$A$  : ピストン受圧面積 ( $\frac{\pi}{4} \cdot D^2$ )  $m^2$ ,  $a$  : オリフィス面積 ( $\frac{\pi}{4} \cdot d_o^2$ )  $m^2$ ,  $\nu$  : 流体の動粘性係数  $m^2/s$ ,  
 $\rho$  : 流体の密度  $kg/m^3$ ,  $L$  : オリフィス長さ  $m$ ,  $C_D$  : 流量係数,  $\dot{u}_d$  : ピストン速度  $m/s$

(2.1)式の大括弧内1項は粘性による流れ抵抗を示し、第2項は乱流による慣性抵抗を示している。第1項の流体の動粘度係数( $\nu$ )は温度依存性が大きく、振動エネルギーを熱として消散するダンパーは特性が温度で支配されることになり、頻度の高い使用条件には使用できない。そこで、オイルダンパーは粘度の小さい作動油を用い、さらに、オリフィス長さ $L$ を小さくして、大括弧内1項の粘度影響を無視できる構造にしている。粘性を無視できる構造の減衰力特性式は、式(2.2)に示すように温度影響を受けるのは流体の密度 ( $\rho$ ) のみとなり、実用上、温度依存性は無視できる。

$$F_d = \frac{\rho \cdot A^3}{2 \cdot C_D^2 \cdot a^2} \cdot \dot{u}_d^2 \quad (2.2)$$

(2.2)式は速度の2乗に比例した特性となり、高速時は過減衰に、低速時は減衰不足になり、一般には簡易型のオイルダンパーとしてしか用いられない。建築構造用オイルダンパーの減衰特性としては、低速から、高速まで一定の減衰で、解析のし易い速度比例特性が主に用いられている。

(2) 減衰力発生機構

減衰発生機構は種々考案されており、免震・制振用オイルダンパーとして、一般的に用いられている減衰機構について述べる。

1) 速度2乗減衰機構

(2.2) 式は、次の様子的に書き換えられる。

$$\therefore F_d = C_2 \cdot V^2 \quad (2.3)$$

ここで、 $C_2$  は減衰抵抗係数で単位は ( $kN \cdot s^2/m^2$ )

$$C_2 = \frac{\rho \cdot A^3}{2 \cdot C_D^2 \cdot a^2}$$

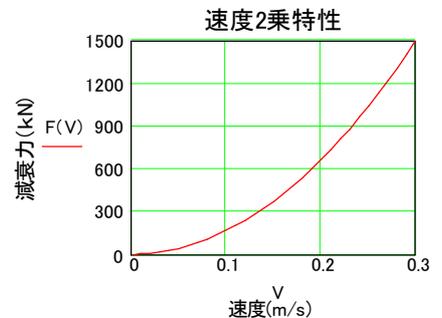


図2.2 速度2乗減衰特性<sup>1)</sup>

式 (2.3) は、図 2.2 のような速度の2乗の特性が得られる。減衰機構は、図 2.1 のような単孔オリフィスである。

2) 速度2/3乗減衰機構

図 2.3 のような円錐形状のバルブをオリフィスの部分に設け、バネ力と内圧の釣合いで開くバルブ制御とし、オイルの通路面積が、弁リフト  $X$  に比例する機構にすると、次式の速度の2/3乗に比例する特性が得られる。

$$F_d = C_3 \cdot \dot{u}_d^{\frac{2}{3}} \quad (2.4)$$

$$C_3 = \sqrt[3]{\frac{C_2 \cdot A^2 \cdot K_v^2}{A_v^2 \cdot B^2}}$$

$A_v$  : バルブポート面積,  $K_v$  : バネ定数,  $B$  : バルブ形状係数,  $X$  : バルブリフト

(2.4) 式は, 図 2.4 の様に速度の 2/3 乗の特性となる。

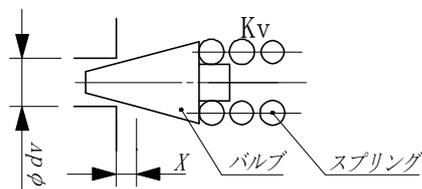


図 2.3 円錐弁減衰機構<sup>1)</sup>

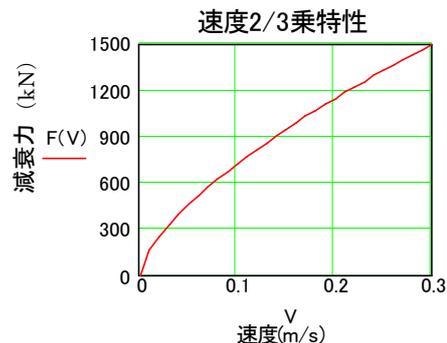


図 2.4 速度 2/3 乗特性<sup>1)</sup>

### 3) 速度比例減衰機構

バルブの開口面積がバルブリフトの 1/2 乗に比例するような特殊な形状とすると：

$$F = C_d \cdot \dot{u}_d \quad (2.5)$$

$$C_d = \sqrt{\frac{C_2 \cdot K_v \cdot A}{A_v \cdot \lambda^2 \cdot B^2}}$$

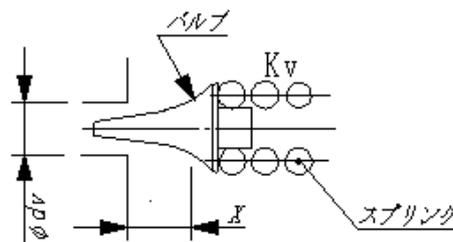


図 2.5 速度比例バルブ<sup>1)</sup>

ここで,  $\lambda$  は形状係数で, 弁形状で異なる。(2.5) 式は図 2.6 のように, 速度に比例する特性となる。

以上の 3 種類特性の減衰力比例定数,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_d$  はそれぞれディメンションが異なる。

$$C_2 : \text{kN} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^2$$

$$C_3 : \text{kN} \cdot \text{s}^{2/3} / \text{m}^{2/3}$$

$$C_d : \text{kN} \cdot \text{s} / \text{m}$$

呼称は  $C_2$ ,  $C_3$  は単に減衰力係数で, 速度比例の  $C_d$  は粘性減衰係数と呼ばれている。

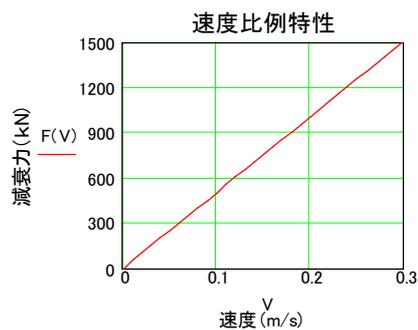


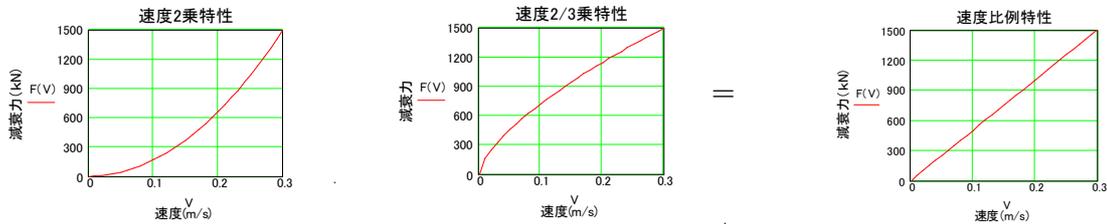
図 2.6 速度比例特性<sup>1)</sup>

4) 組合せ特性

これらのバルブを単独で用いる特性と組み合わせて用いる場合がある。

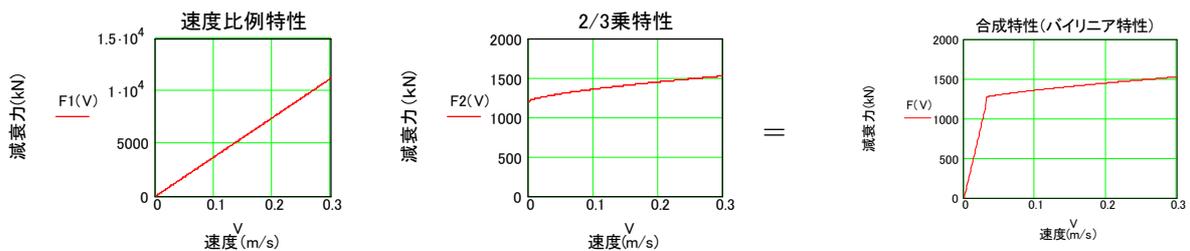
\* 速度二乗特性と速度 2/3 の特性の組合せを組合せた速度比例特性

速度二乗のオリフィスと速度 2/3 乗の円錐弁を組合せると近似的に速度比例特性が得られる。また、オリフィスと 1/2 乗弁を組合わせる方法もある。



\* 速度比例特性と速度 2/3 乗特性の組合せたバイリニア特性

速度比例弁と速度 2/3 乗弁にスプリングにプリセットを与えた組み合わせで、バイリニア特性が得られる。また、切片を持った比例特性 ( $C_2$ ) を実現するリリーフ弁もある。



(3) ダンパー本体の基本構造 (メカニズム)

オイルダンパーの基本構造は、筒型ダンパーが主流であり、バルブやオイルタンクの配置で、免震用オイルダンパーは、片ロッドのユニフロー型とバイフロー型に分類される。一方、制振用オイルダンパーは両ロッドのバイフロー型になる。

1) ユニフロー型免震用オイルダンパー

図 2.7 にユニフロー型オイルダンパーの構造(例)を示す。片ロッド 2 重シリンダーと調圧弁、吸込弁、密閉タンクにより構成され、伸び、圧縮作動共に同一の調圧弁を流れ、タンク室を経てシリンダーに戻る循環流れの回路構成である。

減衰力は流体が調圧弁を流れるときの流体抵抗によりシリンダー内が高圧になりピストンに作用し抵抗力となることによって生ずる。

この構造は、シリンダーの面積をロッドの面積の 2 倍にすることで、伸び側、圧縮側同一の減衰力が得られ、調圧弁が軸受け側で、伸び側、圧縮側共通であることが特徴である。

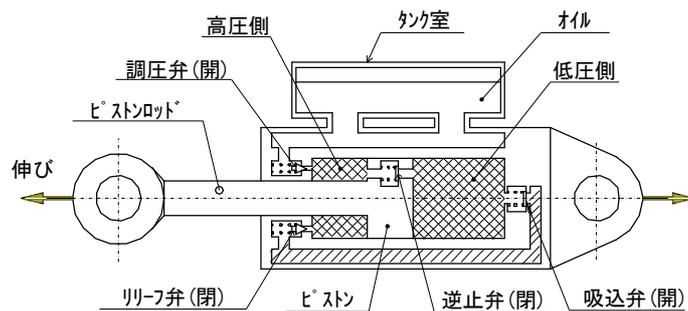


図 2.7 免震用ユニフロー型オイルダンパーの構造(例)<sup>1)</sup>

2) バイフロー型免震用オイルダンパー

図 2.8 にバイフロー型免震用オイルダンパーの構造を、図 2.9 にメカニズム (例) を示す。片ロッド、2 重シリンダー方式で、ピストンに装着した伸び側、圧縮側それぞれの調圧弁で減衰力を発生し、作動油の流れはピストンを境にして交互に流れ、タンクへはロッドの押し込み容積分が流れる。特徴はタンク内蔵でコンパクトになることである。

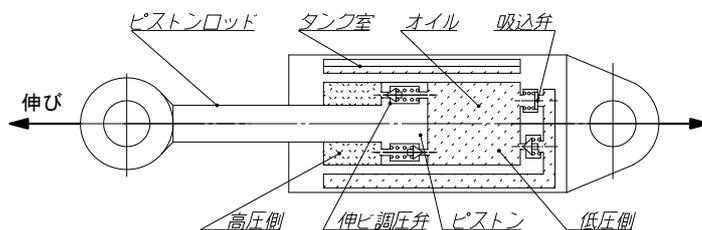


図 2.8 バイフロー形免震用オイルダンパーの構造<sup>1)</sup>

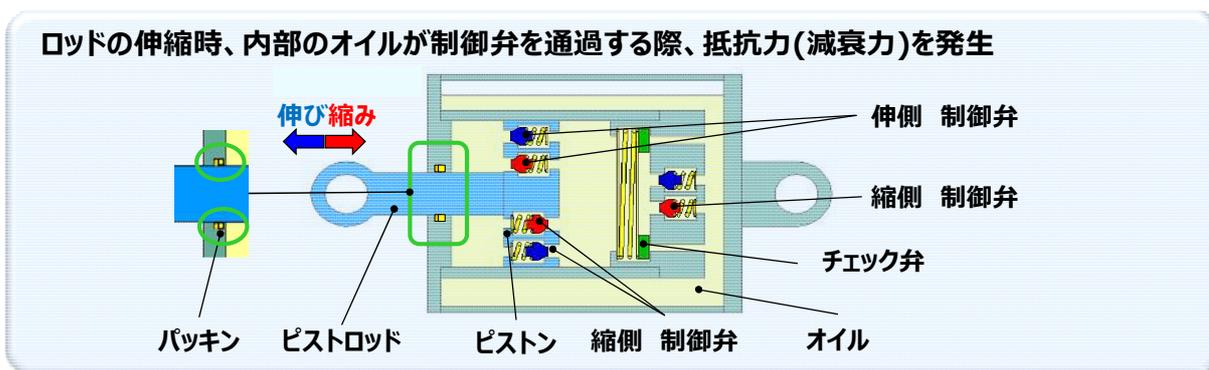


図.2.9 バイフロー型免震用オイルダンパーのメカニズム(例)<sup>2)</sup>

3) バイフロー型制振用オイルダンパー

図 2.10 にバイフロー型制振用オイルダンパーの構造を，図 2.11 にメカニズム（例）を示す。両ロッド，シングルシリンダー方式で，ピストンに装着した伸び側，圧縮側それぞれの調圧弁で減衰力を発生し，作動油の流れはピストンを境にして交互に流れる。免震用と異なり，両ロッドであることから左右のタンク室の面積は同じであるため，ボトム側の制御弁は不要である。

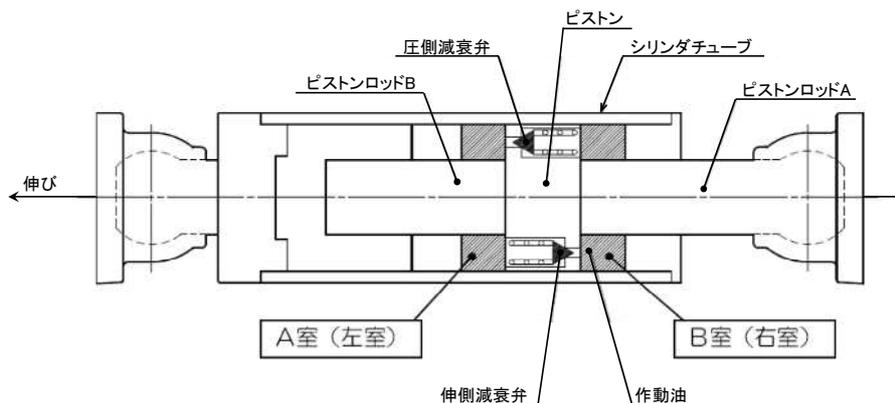


図 2.10 バイフロー型制振用オイルダンパーの構造<sup>2)</sup>

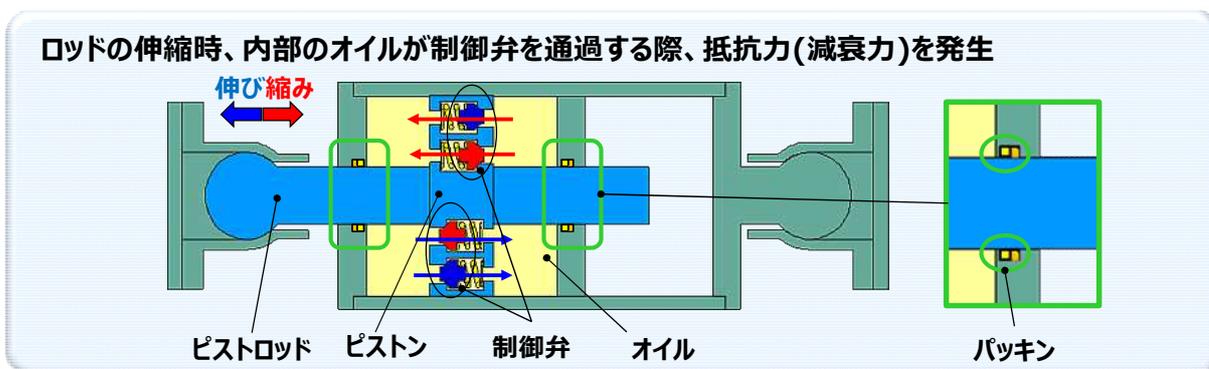


図 2.11 バイフロー型制振用オイルダンパーのメカニズム(例)<sup>2)</sup>

免震・制振用オイルダンパーの特徴比較を表 2.1 に示す。バイフロー型はタンクを内蔵した双方向流れのため、装置がコンパクトの反面、性能調整に分解が必要となる。一方、ユニフロー型は、装置が大型化するが、性能調整が分解しなくともできるため容易であるというメリットがある。

表 2.1 免震・制振用オイルダンパーの特徴比較<sup>2)</sup>

| 区分 | 型式    | F-V 特性     | シリンダー構造                | オイルの種類   | オイルの流れ      | 最大減衰力<br>最大速度             | バルブの位置・構成                       | 特徴  | 備考 |
|----|-------|------------|------------------------|----------|-------------|---------------------------|---------------------------------|---|----|
| 免震 | バイフロー | リア・バリア     | 片ロッド<br>低圧型<br>(空気室あり) | 鉱物油・シリコン | 圧・伸び<br>両方向 | 1000KN<br>150cm/s         | ピストン及び<br>ボトム<br>調圧弁・オリフィス・リリフ弁 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・タンクを内蔵しているため、装置がコンパクト</li> <li>・性能調整する場合、分解が必要</li> <li>・大振幅・大速度領域(限界速度 150cm/s)まで履歴特性が安定</li> </ul>                                    |    |
|    | ユニフロー | リア・バリア・ロック | 片ロッド<br>低圧型<br>(空気室あり) | 鉱物油・シリコン | 1方向         | 1000KN(1476kN)<br>150cm/s | 外筒<br>調圧弁・オリフィス・ロック弁            | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ロッド径が大きく、タンク容量を確保するため、装置が大型化。(ex.タンク室を外側に設置)</li> <li>・性能調整が容易(分解する必要がない)</li> <li>・大振幅・大速度領域(125cm/s以上)で減衰力の立上り遅れが発生する場合がある</li> </ul> |    |
| 制振 | バイフロー | バリア        | 両ロッド<br>高圧型            | 鉱物油・シリコン | 圧・伸び<br>両方向 | 2000KN<br>30cm/s          | ピストン<br>調圧弁・オリフィス・リリフ弁          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・両ロッドのため、ピストン部だけのバルブで構成</li> <li>・P-Q 試験を事前に実施しているため、特性が安定。</li> <li>・免震に比較して、ばらつきも小さい</li> </ul>  |    |

## 2.3 装置の設計

### (1) 多段速度依存型可変減衰オイルダンパーのコンセプト

一般的な免震用オイルダンパーの減衰力特性は、図 2.12 に示すように速度依存型でリニア型とバイニリア型の 2 種類が採用されている。設計領域を超える大振幅地震動に対して免震層の変位を抑制するためにオイルダンパーを増設すると、設計領域での地震動による応答変位が極端に抑えられ、上部構造の応答加速度が大きくなり免震性能が低下する。したがって、オイルダンパーを増設しても設計領域では減衰力を小さくすることで上部構造の加速度応答を増加させずに従来の免震効果を確保しつつ、設計領域を超える地震動レベルでは大きな減衰力を発揮させ免震層の変位を抑えられるという、可変減衰型のオイルダンパーが実現できれば、広範囲な地震動レベルに対して免震性能を発揮できることが期待される。オイルダンパーを利用した主な大振幅地震動の対策技術の研究は、変位に依存して減衰力特性を切り替える変位依存型ダンパーと速度に依存して減衰力を切り替える速度依存型ダンパーに大別できる。前者の変位依存型は、既存の装置に設定変位を検知しオイルの流れを切り替える部品やバルブ以外の外部通路を確保し、減衰係数を切り替える変位依存型可変減衰オイルダンパーやオイルダンパー以外の接続装置・不感帯機構などの新たな機構を付加する変位依存型可変性能オイルダンパー等があるが、これらは装置が複雑化・大型化し、コスト増となることが多い。一方、後者の速度依存型は、従来のオイルダンパーの減衰力特性を実現しているバルブ機能（調圧弁）を改良するのみで可変減衰を実現することが可能である。本研究では改良が容易な点に着目して、後者の方法を採用した可変減衰タイプのオイルダンパーを開発する。本オイルダンパーでは、図 2.12 に示すように設計領域では減衰が低く、大振幅領域（高速領域）で高減衰になるように減衰力特性を速度に応じて 3 段階に切り替える可変としていることに特徴がある。目標とする切替速度については、オイルダンパーの限界速度を 150cm/s としており、100~150cm/s を高速領域(C<sub>3</sub>)、一般的な免震構造の告示波での応答速度 50~60cm/s を低速領域(C<sub>1</sub>)、その間を切り替える範囲を中速領域(C<sub>2</sub>)とする。この特性を有することで、発生頻度が比較的高い中小地震から設計領域を超える地震動までのあらゆる地震入力レベルに対して、良好な免震効果を発揮することができる。また、既存の免震・制振用オイルダンパーと同様に、オイルダンパーの改造範囲内で減衰力-速度特性（以下、F-V 特性）の上下限値を、バルブの構成個数を変えることで任意に設定することもできる。

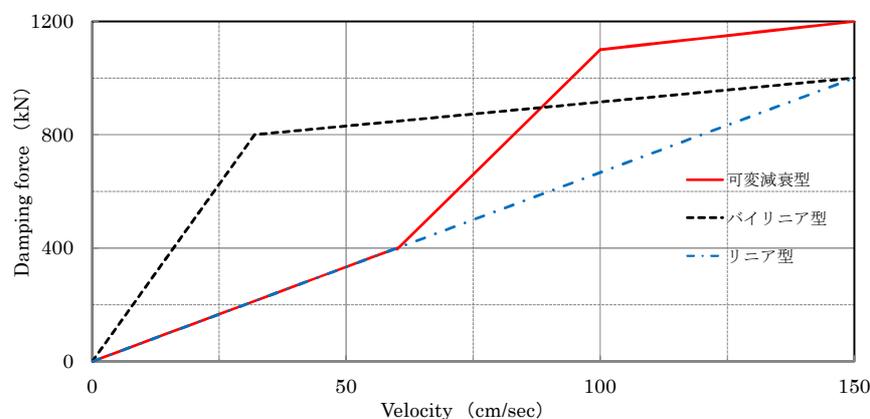


図 2.12 減衰力特性<sup>8)</sup>

(2) 装置の設計

多段速度依存型可変減衰オイルダンパーは、片ロッドバイフロー型のオイルダンパーをベースにしており、内蔵しているバルブを新たに開発・適用している。

図 2.13 に多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの構造を示す。

オイルダンパーはインナーチューブ、アウターチューブ、ピストンロッド、ピストン、減衰バルブ、作動油から構成される。

ピストンロッドとピストンは連結されており、インナーチューブ内部の黄色部 (A 室・B 室) に作動油が密閉されている。ピストンとボトム側のシリンダには減衰バルブ (調圧弁・リリースバルブ) が複数組み込まれており、速度  $v$  に応じて減衰力が発生する。

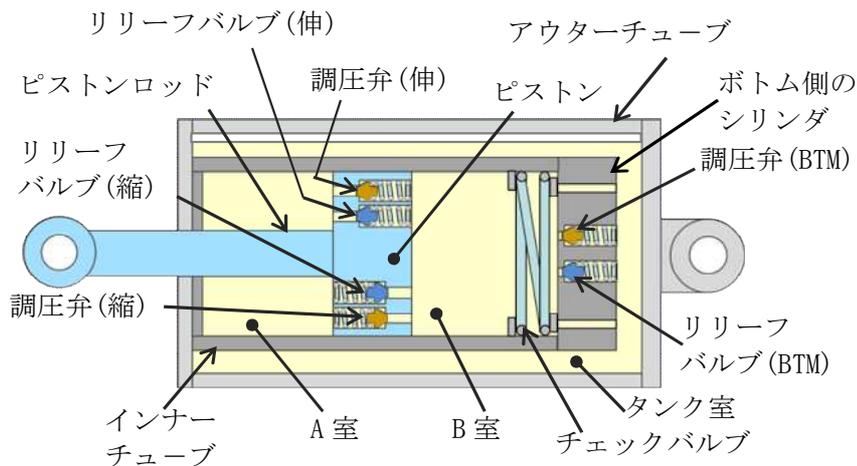


図 2.13 多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの構造<sup>8)</sup>

一般的にオイルダンパーは外部からの入力により、ピストンロッドをインナーチューブに対して移動させることにより、A 室、B 室間の作動油の流れを発生させ、この流れに減衰バルブを用いて抵抗を与えることにより圧力のかたちで力を発生させる。減衰力  $F$  は、円筒の部材で構成されるシリンダチューブ内径  $D$  とピストンロッド外径  $d$  で区切られる、円もしくはドーナツ状の二重円の断面積に負荷される圧力  $P$  の大きさで決まる。すなわち減衰力  $F$  は、

$$\text{円断面：} \quad F = P \cdot A_t = P \cdot D^2 \cdot \frac{\pi}{4} \quad (2.6)$$

$$\text{ドーナツ状断面：} \quad F = P \cdot A_r = P \cdot (D^2 - d^2) \cdot \frac{\pi}{4} \quad (2.7)$$

と表現される。

圧力  $P$  については、バルブにてオイルの流路を絞ることで抵抗を与え、抵抗に逆らって流そうとする力がオイルに対する圧力となる。

抵抗として一般的な絞り(オリフィス)の式を以下に示す。

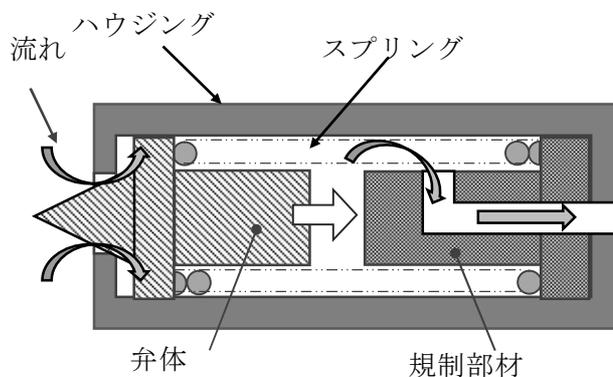
$$Q = \alpha Ah \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (2.8)$$

ここに、 $Q$  は流量、 $\alpha$  は流量係数、 $Ah$  は流路面積、 $P_1$  は絞りより上流の圧力、 $P_2$  は絞りより下流の圧力、 $\rho$  は流体密度である。

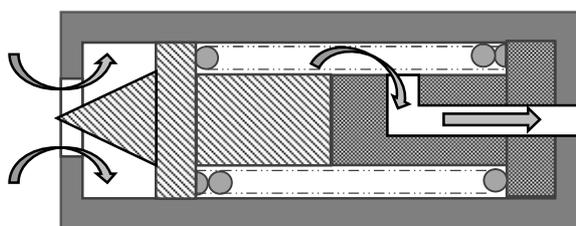
(2.8)式において圧力差  $P_1 - P_2$  を  $\Delta P$  とし、 $\Delta P$  について解くと(2.9)式が得られる。

$$\Delta P = \frac{Q^2 \rho}{2(\alpha Ah)^2} \quad (2.9)$$

(2.9)式よりダンパーの内圧力は流量  $Q$  に対しての 2 乗特性となることが分かる。しかしながら、オイルダンパーの F-V 特性にはリニアな特性が求められる。これは、オリフィスの流路面積  $Ah$  が特定の流量で特定の圧力を発生する面積となるよう、減衰バルブが動くことで実現している。本オイルダンパーの基本構成および外観は、従前の免震用オイルダンパーと同様である。ただし、バルブは微小な面積変化を制御しており、さらに変化率を減らす(減衰係数高=面積変化率小)ことは加工精度上困難である。このため従前のバルブでは、減衰係数が任意の速度地点で高くなるように切替えることは技術的に難しい。 $Ah$  は小さな面積であり、途中での変化率の変更が加工上困難であることから、本開発では専用のバルブ（専用調圧弁）を開発・適用した。今回開発した専用調圧弁の概略図を図 2.14 に示す。



(a)低速領域における専用調圧弁の状態



(b)中速領域における専用調圧弁の状態

図 2.14 専用調圧弁の概略図 8)

専用調圧弁の具体的な構造は、ハウジング内部に規制部材を追加し、弁体が規定のストローク量に達すると、規制部材とぶつかり、弁体の移動量を規制できることである。

$Ah$  を変化させるバランスをとっているバルブの動きを止めてしまえば、流路面積  $Ah$  はその状態で固定されるため、固定した以降の流量に対する圧力の特性は、元の2乗特性となる。前述のように、減衰係数を任意の地点で傾きを変化させることは困難であることから、中間速度領域での  $F-V$  に2乗特性を採用した。図 2.15 に本オイルダンパーの  $F-V$  特性を示す。低速領域  $C_1$  ではオリフィス（2乗特性）と専用調圧弁が規制部材に接触しない範囲で作動し、中速領域  $C_2$  では、専用調圧弁が規制部材で拘束され、オリフィス特性に移行、高速領域  $C_3$  ではリリーフ弁が作動する。

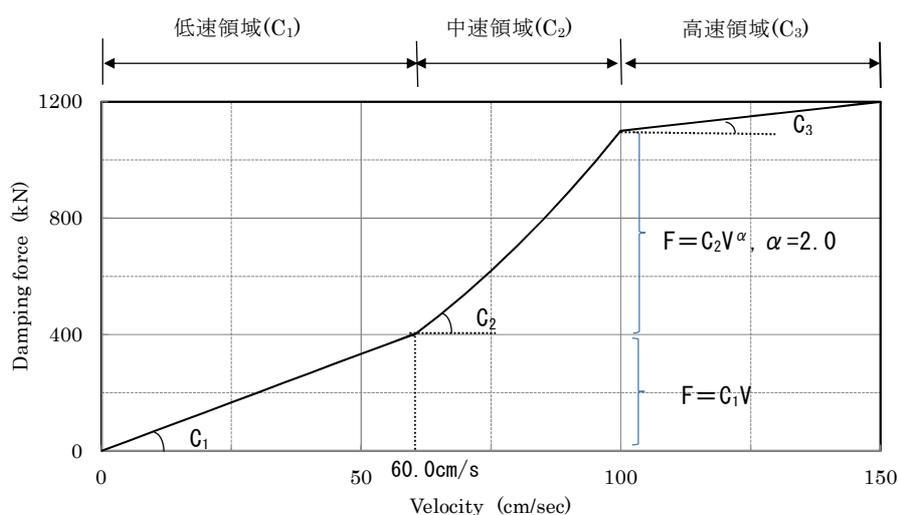


図 2.15 多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの減衰力特性<sup>8)</sup>

各速度領域(①～③)では、減衰バルブが以下のように作用して、目標とする減衰力特性を実現する。

- ①  $C_1$  領域（低速領域）では、オリフィスと専用調圧弁が作用し、リリーフ弁は閉じた状態になっており、 $F=C_1V$  の線形特性となる。本領域は減衰過多にならず、免震効果を有効に発揮させる領域である。
- ②  $C_2$  領域（中速領域）では、専用調圧弁が規制部材で拘束され  $F=C_2V^2$  の2乗特性（オリフィス）に移行する。本領域では①領域の低減衰特性から急速に減衰力を高め、ブレーキング効果を発揮させる。
- ③  $C_3$  領域（高速領域）では、リリーフバルブが解放され減衰係数を小さくすることで、減衰力が過大となることを防止し装置を損傷させない。

上記の各速度領域での履歴特性は図 2.16 のようになり、低速領域では楕円形状を、中速領域では上下に拡張し、高速領域では矩形に近い形状特性となり、履歴吸収エネルギーが速度に応じて大きくなる。

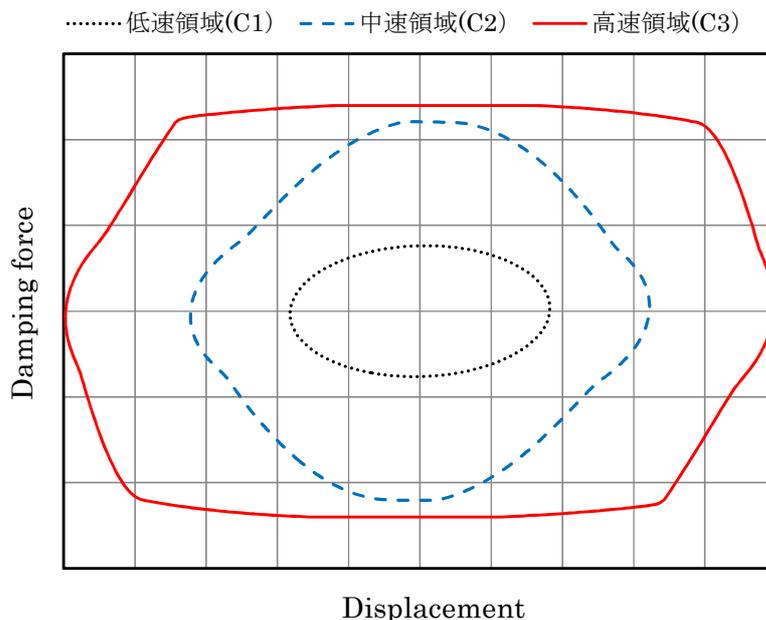


図 2.16 荷重－変位関係<sup>8)</sup>

#### 2.4 性能確認試験

図 2.15 の減衰力特性を実現できる実機が多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを設計・試作し、正弦波加振実験による、減衰荷重確認実験、特性切り替え確認実験、周波数依存性確認実験の 3 種類の試験を行い、設計計画通りの減衰力－速度関係（F-V 特性）と速度切り替えが実現できることを確認する。

#### 2.5 試作機の設計

多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの減衰力特性を確認する目的で、実大の試作機（最大減衰力：1200kN，最大速度：150cm/s）を設計・製作した。

本オイルダンパーは、既存のオイルダンパーのバルブを特殊仕様として製作しており、バルブについては、標準品の特性違い品に追加部品を加えてバルブストローク途中から特性が変わる構成とした。標準品は単穴オリフィス（2乗特性）、調圧弁（1/2乗特性）、リリース弁（切片を持った比例）で構成されるが、本オイルダンパーは、調圧弁を専用調圧弁に切替える。各速度領域でのバルブの開閉は表 2.2 のようにしている。

表 2.2 多段速度依存型可変減衰オイルダンパーのバルブ構成と開閉

|         | C <sub>1</sub> 低速 | C <sub>2</sub> 中速 | C <sub>3</sub> 高速 |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 単孔オリフィス | 開放                | 開放                | 開放                |
| 専用調圧弁   | 開放<br>(規制部材接触なし)  | 開放<br>(規制部材接触)    | 開放                |
| リリース弁   | 閉鎖                | 閉鎖                | 開放                |

本ダンパーの諸元を従前の機種と比較して表 2.3 に示す。また、試験体および実験の実施状況を図 2.17, 写真 2.1 に示す。

表 2.3 試作機と従前のオイルダンパーの仕様<sup>8)</sup>

| 項目     | 記号             | 単位                    | 従前の機種<br>BDS120 B-1 | 開発試作 |
|--------|----------------|-----------------------|---------------------|------|
| 一次減衰係数 | $C_1$          | kN/(m/s)              | 2500                | 667  |
|        | $C_2$          | kN/(m/s) <sup>2</sup> | —                   | 1100 |
| 二次減衰係数 | $C_3$          | kN/(m/s)              | 169.5               | 200  |
| 切替荷重   | $F_c$          | kN                    | —                   | 400  |
| 切替速度   | $V_c$          | m/s                   | —                   | 0.6  |
| リリース荷重 | $F_r$          | kN                    | 800                 | 1100 |
| リリース速度 | $V_r$          | m/s                   | 0.32                | 1.0  |
| 最大荷重   | $F_{max}$      | kN                    | 1000                | 1200 |
| 限界速度   | $V_{max}$      | m/s                   | 1.5                 | 1.5  |
| 限界変形   | $\delta_{max}$ | m                     | ±1.0                | ±1.0 |

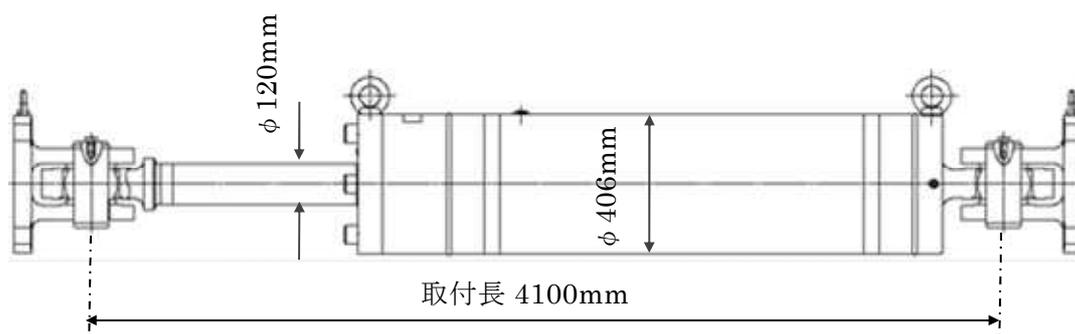


図 2.17 試作機の形状と寸法<sup>8)</sup>

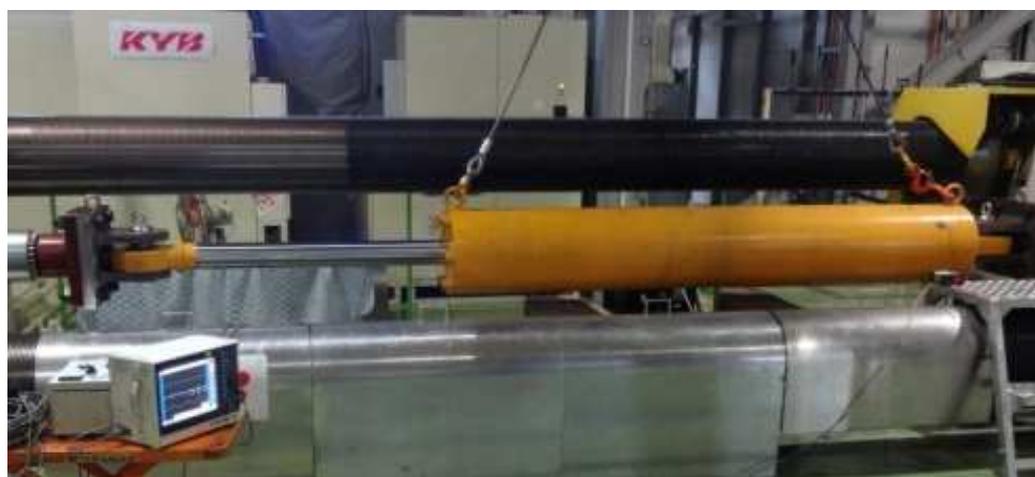


写真 2.1(1) 性能確認試験の実施状況<sup>8)</sup>



写真 2.1(2) 性能確認試験の実施状況

## 2.6 試験方法

本オイルダンパーの基本性能を確認するために、以下の(1)~(3)の3項目について試験を実施した。加振条件を表2.4と表2.5の2つの速度領域に分けて示す。試験機は、2000kN試験機(最大振幅：±500mm，動的最大加振力：1000kN/150cm/s時，2000kN/50cm/s時)を用いた。

### (1) 減衰荷重確認実験

正弦波加振により計画通りの減衰力-速度関係 (F-V 特性) が実現されることを確認する。

### (2) 特性切替り確認実験

切替り速度とその速度前後での変化を確認する。

### (3) 周波数依存性確認実験

同速度の実験を複数の周波数で行い、依存性の有無を確認する。

表 2.4 加振条件一覧表 (1次減衰領域)<sup>8)</sup>

| 周波数<br>(Hz)           | 周期<br>(s) | 速度 (cm/s) |       |       |                        |       |       |       |       |       |
|-----------------------|-----------|-----------|-------|-------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                       |           | 20        | 40    | 55    | 60                     | 65    | 80    | 90    | 95    | 100   |
| 0.25                  | 4.0       | 127.3     | 254.6 | 350.1 | 382.0                  | 413.8 | ×     | ×     | ×     | ×     |
| 0.5                   | 2.0       | 63.7      | 127.3 | 175.1 | 191.0                  | 206.9 | 254.6 | 286.5 | 302.4 | 318.3 |
| 0.75                  | 1.33      | 42.4      | 84.9  | 116.7 | 127.3                  | 137.9 | 169.8 | 191.0 | 201.6 | 212.2 |
| 1.0                   | 1.0       | ×         | 63.7  | 87.5  | 95.5                   | 103.5 | 127.3 | 143.2 | 151.2 | 159.2 |
| 低速領域(C <sub>1</sub> ) |           |           |       |       | 中速領域 (C <sub>2</sub> ) |       |       |       |       |       |

表 2.5 加振条件一覧表 (2次減衰領域)<sup>8)</sup>

| 周波数<br>(Hz)           | 周期<br>(s) | 速度 (cm/s) |       |       |       |
|-----------------------|-----------|-----------|-------|-------|-------|
|                       |           | 105       | 120   | 140   | 150   |
| 0.5                   | 2.0       | 334.2     | 382.0 | 445.6 | 477.5 |
| 0.75                  | 1.33      | 222.8     | 254.6 | 297.1 | 318.3 |
| 1.0                   | 1.0       | 167.1     | 191.0 | 222.8 | 238.7 |
| 高速領域(C <sub>3</sub> ) |           |           |       |       |       |

2.7 試験結果と考察

加振実験結果の荷重変形関係の速度による比較を図 2.18 に、実験結果の最大荷重を F-V 特性としてプロットしたものを図 2.19 に示す。グラフ中上側が圧縮側、下側が引張側である。履歴特性は、速度に応じて想定した形状を示している。なお、各速度は最大減衰力を発生させる、正弦波加振での最大速度を基準として表記している。

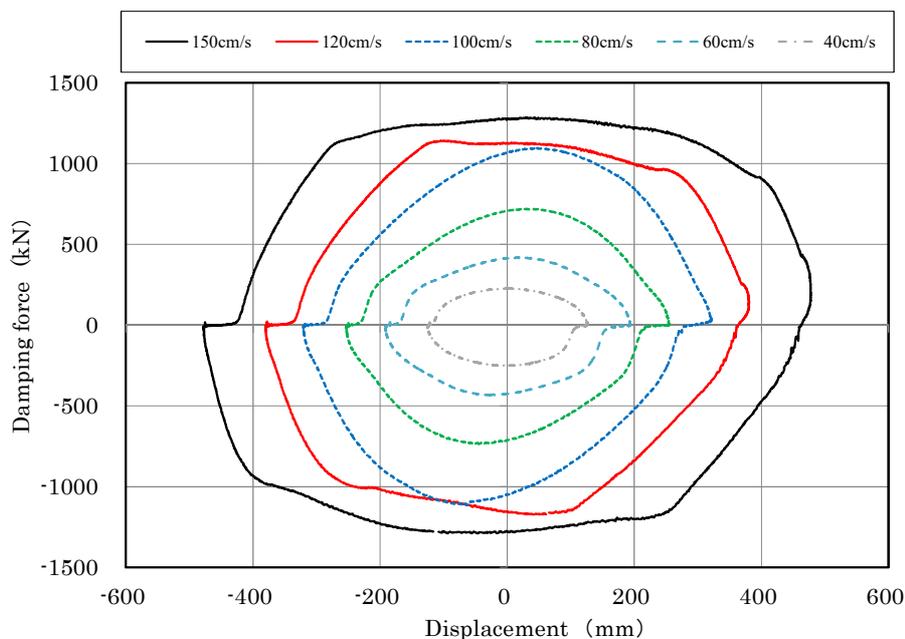


図 2.18 荷重－変位関係(0.5Hz)<sup>8)</sup>

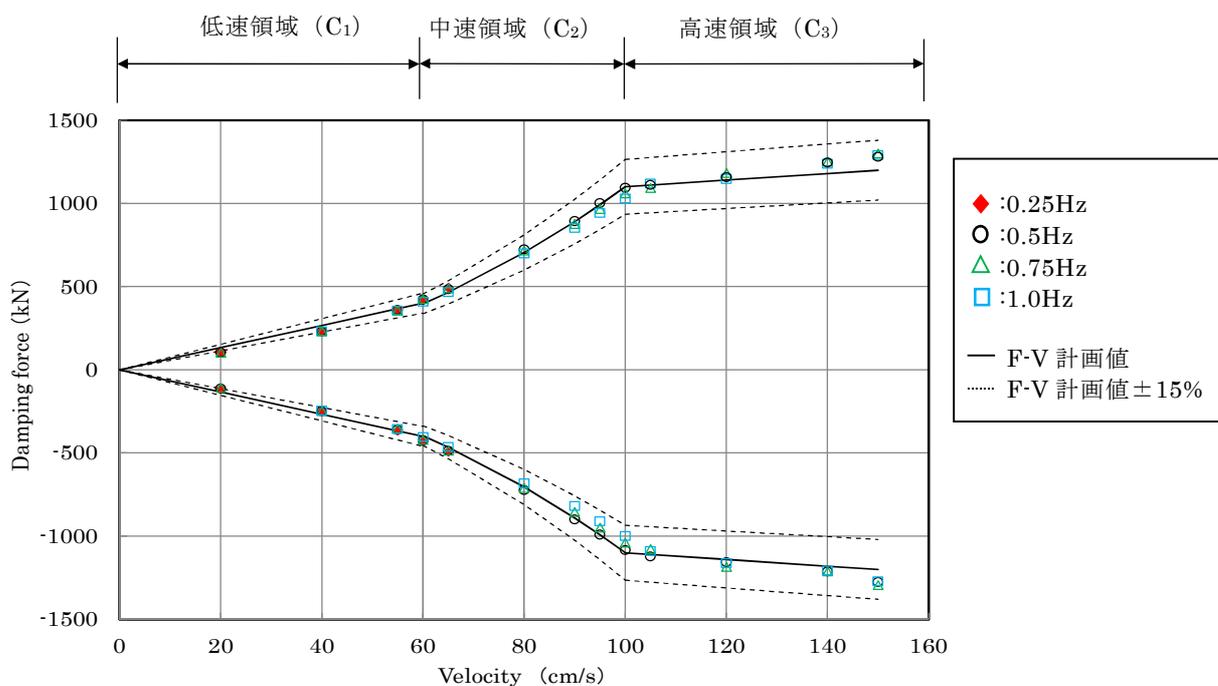


図 2.19 F-V 特性<sup>8)</sup>

(1) 減衰荷重確認実験

一次減衰領域 20 cm/s の低速領域において計画値±15%に対し-21.94%と低めに外れているが、その他の領域については±15%の領域に入っている。

(2) 特性切替り確認

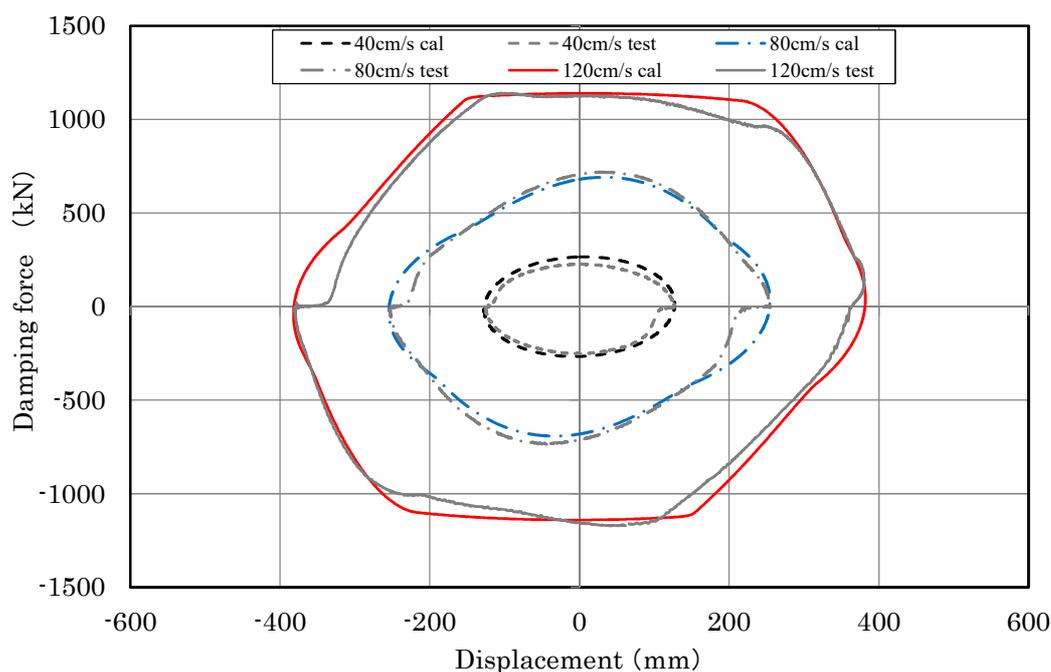
図 2.19 より、低速から中速・高速への切替速度は F-V 特性の傾きが計画特性の通り切替っていることを確認できる。

(3) 周波数依存性確認実験

図 2.19 では、60～100cm/s の速度域で 0.5～1.0Hz の複数の周波数での結果を重ねているが、ほぼ同一の線上に並んでいる。よって、リニア特性の C<sub>1</sub> 領域（低速領域）と C<sub>3</sub> 領域（高速領域）、およびその間の減衰係数を高めた 2 乗特性の C<sub>2</sub> 領域（中速領域）の全領域において、周波数依存性の影響は、ほとんど見られないと判断できる。

(4) 実験結果と解析結果の比較

各速度領域における実験結果と解析結果の履歴特性の比較を図 2.20 に示す。比較に用いた解析は、Maxwell モデルを MATLAB にて構成し、試験体の設計値を用いて、正弦波の入力の応答を算出した結果である。速度が反転する際の不感帯部分以外の領域では、実験結果と解析結果を概ね一致している。



※凡例中 cal は解析結果， test は試験実測

図 2.20 荷重－変位関係<sup>8)</sup>

(実験結果と解析結果の比較)

## 2.8 まとめ

本章では、免震構造における大振幅地震動対策として、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを考案し、試作機による性能確認試験を行った。

以下に示す検討結果より、本オイルダンパーは、設計領域の低速領域では低減衰となり、従来の免震構造と同等以上の性能を確保し、設計想定レベルを超える大振幅地震動の中・高速領域では高減衰に切り替わり、変位抑制が可能となる設計通りの減衰力特性が確保できると結論付ける。

- (1) オイルダンパーは、封入した油の流れやすさを制限するオリフィスやバルブ（調圧弁やリリーフバルブ）を組み合わせることでリニアやバイリニア型の減衰性能を発揮する免震部材である。流れを制御することから、本質的にオイルダンパーが持つ、この速度依存性を利用して、バルブ機能（調圧弁）の改良のみで、振幅領域毎に減衰力を任意に設定し、広範囲な地震動レベルに対して免震性能を発揮できる、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを設計した。
- (2) 実大の試作機（最大減衰力：1200kN，最大速度：150cm/s）を設計・製作し、性能確認実験を実施した試験結果により、目標とした減衰力特性（F-V特性）が得られ、低速・中速・高速の切替も計画通りであった。また、オイルダンパーの特徴である周波数依存性もほとんど見られなかった。

第2章の参考文献

- 1) 日本免震構造協会：免震部材部会ダンパー小委員会 活動報告<改訂>－免震用ダンパーの基本特性と性能評価－，PP5-61-5-87,2019.3  
<https://www.jssi.or.jp/members/doc/damperhoukokusyo.pdf>
- 2) 日本免震構造協会：免震・制振材料問題対応委員会 免震建築物・制振建築物の応答対策部会」報告書，付録2 オイルダンパーのメカニズム，2021.4
- 3) 荻野伸行，露木保男，猪口敏一，中原学，山崎久雄：大振幅地震動対策用免震オイルダンパーの開発（その1）基本特性および効果の検証，日本建築学会学術講演梗概集，構造Ⅱ，pp.409-410，2016.8
- 4) 中原学，荻野伸行，北川麻記：大振幅地震動対策用免震オイルダンパーの開発（その2）原理試作および性能確認試験，日本建築学会学術講演梗概集，構造Ⅱ，pp.995-996，2017.8
- 5) 荻野伸行，北川麻記，山口洋平，中原学，：大振幅地震動対策用免震オイルダンパーの開発（その3）時刻歴応答解析，日本建築学会学術講演梗概集，構造Ⅱ，pp.997-998，2017.8
- 6) 石原幸子，中原学：トリリニア型オイルダンパの開発，KYB 技報，pp.45-49，2018.10
- 7) Nobuyuki Oginno , Masaru Kikuchi , Masanari Okamoto : ‘Study of High-performance Oil Dampers for Seismically Isolated Structures to Counter Extremely Strong Earthquake Ground Motions’ , 16th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Regulation of Dynamic Characteristics of Structures, Saint-Petersburg, Russia, July 1-6, 2019
- 8) 荻野伸行，菊地優，岡本真成，中原学：大振幅地震動に対する免震用多段速度依存型可変減衰オイルダンパーに関する研究，構造工学論文集 Vol.67B，pp.549-556，2021.3
- 9) 荻野伸行，北川麻記：大振幅地震動対策用免震オイルダンパーの開発，熊谷組技術研究報告 NO.76，pp99-106，2017

## 第 3 章 時刻歴応答解析による応答変位抑制効果の検証

- 3.1 概要
  - 3.2 ダンパーのモデル化
  - 3.3 検討ケース
  - 3.4 解析結果と考察
  - 3.5 まとめ
- 第 3 章の参考文献

### 第3章 時刻歴応答解析による応答変位抑制効果の検証

#### 3.1 概要

筆者が提案する多段速度依存型可変減衰オイルダンパーについて、第2章では、提案ダンパーの装置設計と試作機による性能確認試験結果から、設計通りの減衰力特性が実現できることを確認した。

本章では、第2章の検討結果を踏まえ、ダンパーのモデル化を行い、その機能を新たに解析モデルに組み込んだ。また、15階建てRC造の基礎免震構造における時刻歴応答解析による効果を確認した結果、本オイルダンパーを追加設置することで、大振幅地震動に対して、従来の免震構造に比較して、応答加速度、応答変位、応答層せん断力に低減効果が現れており、標準的な設計用入力地震動においても、加速度応答の増加はみられず、既存のオイルダンパーよりも免震効果を発揮した。以上の検討結果より、本オイルダンパーは、設計領域では従来の免震構造と同等以上の性能を確保し、設計想定レベルを超える大振幅地震動においても変位抑制が可能であり、広範囲の入力地震動レベルに対して免震効果が確保できることを検証している。

#### 3.2 ダンパーのモデル化

オイルダンパーの振動数依存、微小速度および微小変位依存は作動油の圧縮性に起因する。圧力変動の少ない使用条件下では作動油は非圧縮性であると考えが、オイルダンパーのような振動荷重を受ける使用条件では圧縮性を無視できないので、以下に記述する。

圧力による流体の体積の変化を表すには体積弾性係数が用いられる。

$$K_v = V \cdot \frac{dP}{dV} \quad (3.1)$$

$V$ ：作動油の初期体積、 $dP$ ：変動圧力、 $dV$ ：容積変化、 $K_v$ ：作動油の体積弾性係数  
 $K_v$ は実験的に求められ石油系作動油では  $=1.4 \sim 1.9 \times 10^{-3}$  (MPa) の値が用いられ、これを定数として取り扱くと、次式から、作動油の圧縮バネ定数が計算できる。

$$K_d = \frac{A^2}{V} \cdot K_v \quad (3.2)$$

$K_d$ ：内部剛性（作動油の圧縮剛性）、 $V$ ：圧力の作用している室の作動油容積、

$A$ ：ピストン受圧面積

作動油の圧縮性は、減衰抵抗力を発生する調圧弁を流れる流量がピストンの動きに対して遅れを生じさせ、減衰抵抗力-速度関係が位相遅れによりヒステリシスループを描く。このため、最大減衰抵抗力の低下、および1サイクルの消散エネルギーの低下となる。この力学モデルは減衰に対し直列にバネを有するMaxwellモデルとなり性能は振動数依存性を持つようになる。

したがって、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーのモデル化は、図3.1に示すように装置剛性を考慮したMaxwellモデルとする。ダッシュポット部（粘性減衰係数）の減衰力特性は図3.2の特性とする。 $C_1$ 特性はリニア特性の  $F=C_1V$ 、 $C_2$ 特性は、 $F=C_2 \cdot V^2$ の2乗特性とし、 $C_3$ 特性はリニア特性の  $F=C_3V$ となる。

ここで、 $C_1$ と $C_2$ の切り替え速度 ( $V_c$ ) と切替荷重( $F_v$ )は、0点からの $F=C_2 \cdot V^2$ 特性と $F=C_1V$ 特性の交点となる。この機能を新たに構築し、地震応答解析プログラム SS21/DynamicPRO の解析モデルに組み込んだ。

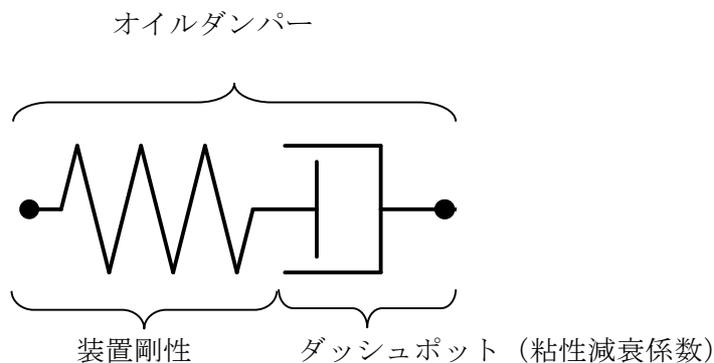


図 3.1 多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの解析モデル (Maxwell モデル)

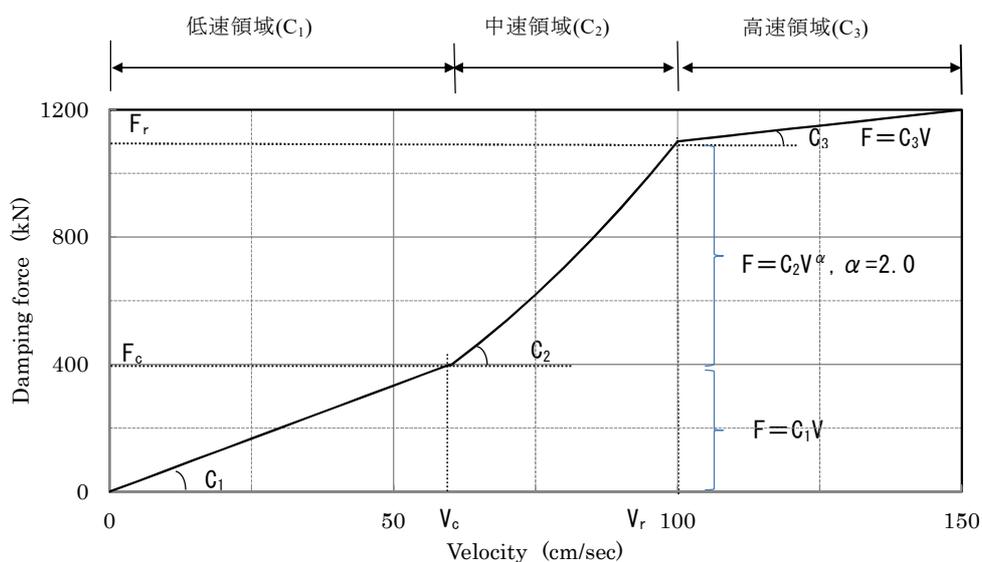


図 3.2 多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの減衰力特性

### 3.3 検討ケース

#### (1) 検討モデル

検討対象建物は、15階建てRC造の基礎免震構造<sup>1)</sup>とし、免震部材（支承材）は高減衰ゴム系積層ゴムとする。建物総重量は123,186kN、等価固有周期は4.09s（40cm変形時）、免震層の降伏せん断力係数は0.03である。図3.3に検討建物概要を示す。

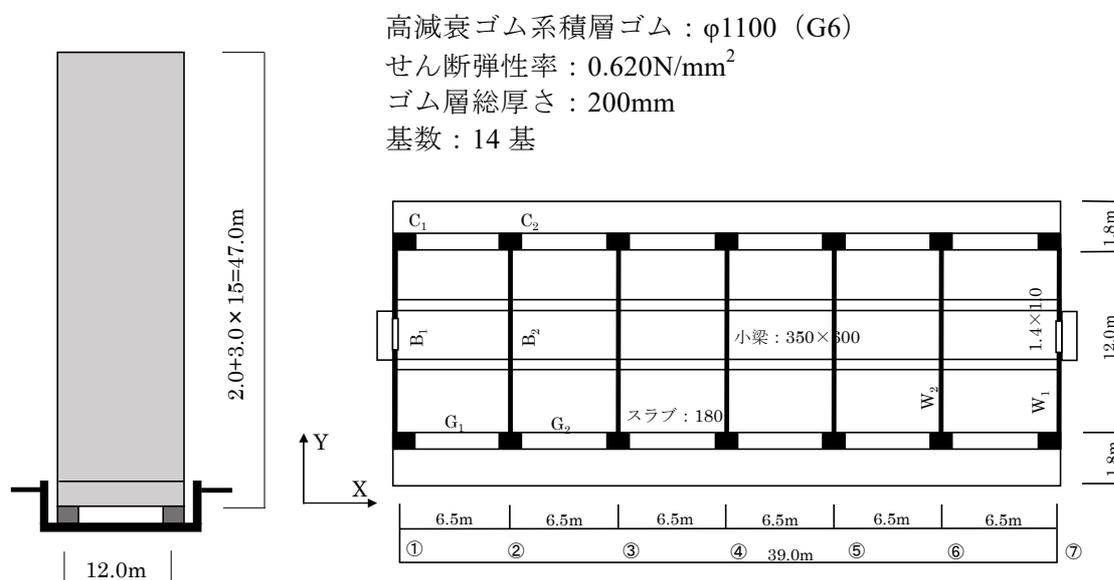


図 3.3 検討建物(RC 15/0)<sup>1)</sup>

#### (2) 入力地震動

検討用地震波としては、長周期地震動として、南海トラフ沿い巨大地震<sup>2)3)</sup>を想定した大阪地区と中部地区の4波(OS1, CH1, OSKH02, AIC003)を、内陸直下型地震は、上町断層A4ゾーン（レベル3B：UMTA4B2EW1）<sup>4)</sup>と熊本地震におけるK-NET一宮EW（2016/4/16：KMM004EW）<sup>5)</sup>の2波を、さらに標準的な設計用地震動レベル（告示波：AWL2）1波の合計7波とする。地震波一覧を表3.1に、擬似速度応答スペクトルおよびエネルギースペクトルを図3.4、3.5に示す。

表 3.1 地震波一覧

| 地震波                     | 略称          | 最大加速度<br>(cm/s <sup>2</sup> ) | 最大速度<br>(cm/s) | 継続時間<br>(s) |
|-------------------------|-------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| 南海トラフ(OS1)              | 南海 (OS1)    | 263.0                         | 45.9           | 655.3       |
| 南海トラフ(CH1)              | 南海 (CH1)    | 265.0                         | 59.4           | 655.3       |
| 南海トラフ 4連動<br>(OSKH02)   | 南海 (OSKH02) | 133.0                         | 58.0           | 640.0       |
| 南海トラフ 4連動<br>(AIC003)   | 南海 (AIC003) | 545.4                         | 68.6           | 640.0       |
| 上町断層<br>(UMTA4B2EW1)    | 上町 (A4B2)   | 387.0                         | 97.4           | 41.0        |
| 2016 熊本地震<br>(KMM004EW) | 熊本 (KMM)    | 346.7                         | 80.5           | 300.0       |
| 告示波 (AWL2)              | 告示 (AW)     | 347.8                         | 52.5           | 120.0       |

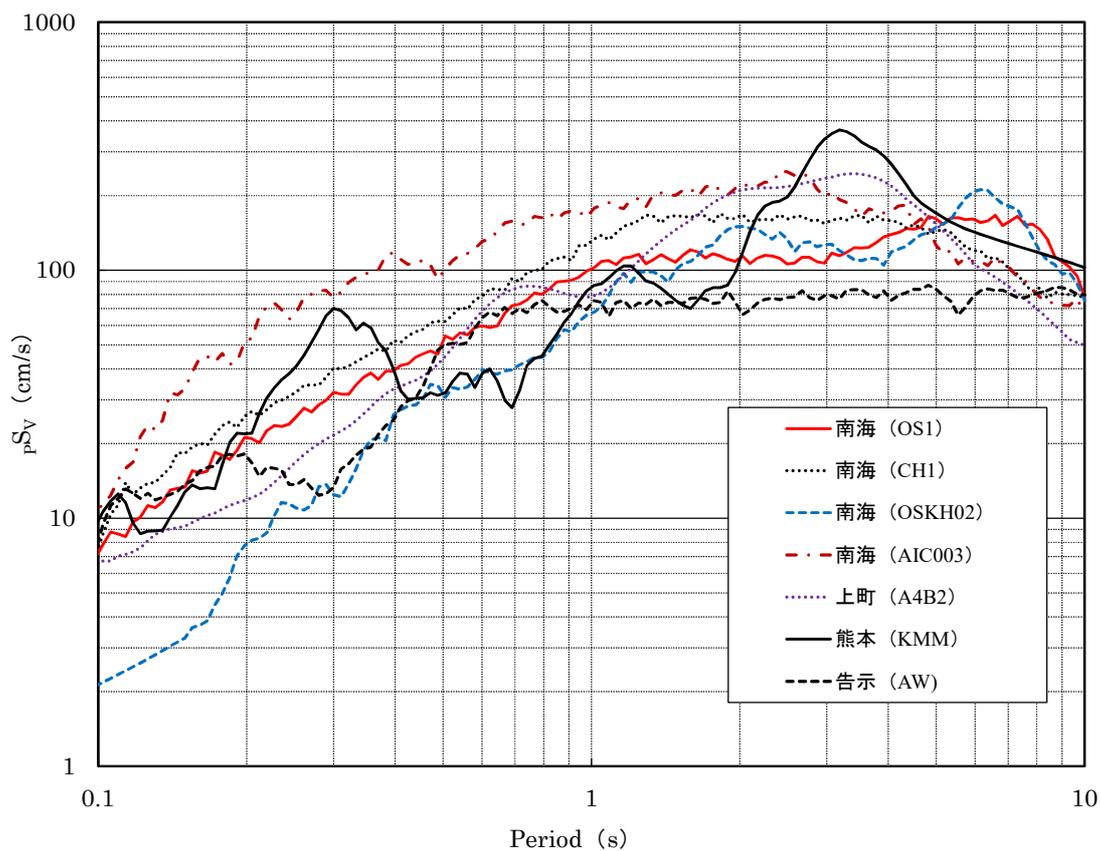


図 3.4 擬似速度応答スペクトル(h=0.05)

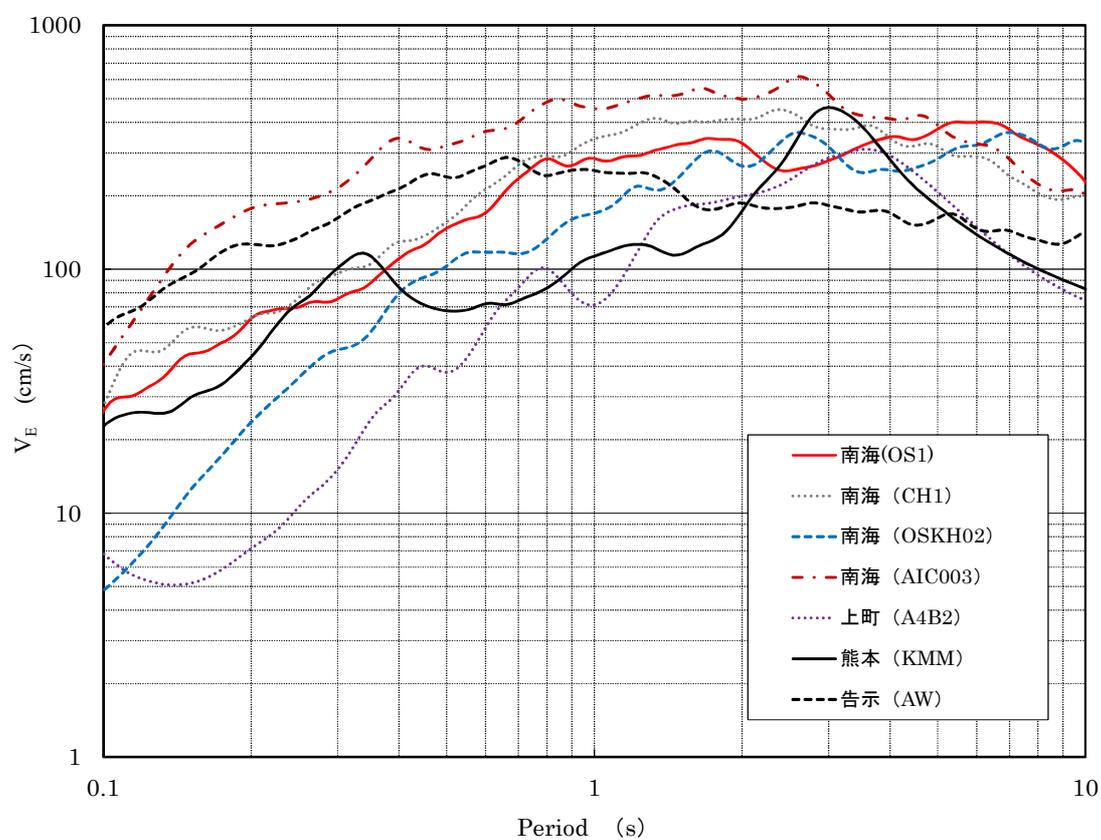


図 3.5 エネルギースペクトル (h=0.10)

## (3) 解析モデルおよび検討ケース

解析モデルは1柱列多質点系モデルとし、上部構造は線形、免震システムは高減衰ゴム系積層ゴムとオイルダンパーを組み合わせる。また、高減衰ゴム系積層ゴム (G6)<sup>6)</sup>には限界変形を考慮できる Kikuchi-Aiken モデル<sup>7), 8)</sup>を適用し、オイルダンパーは装置剛性を考慮した Maxwell 型モデルとし、速度に依存して減衰力を変化させる。上部構造の減衰は免震層固定時に対して2%の瞬間剛性比例型とし、地震応答解析の方向は、建物長辺方向 (X 方向) とした。

図 3.6 に解析モデルを示す。

検討は表 3.2 に示す 4 ケースについて実施した。CASE-1 は、一般的な免震構造として、高減衰ゴム系積層ゴム支承 (ゴム総厚 200mm) のみ採用した基本モデルである。この基本モデルに多段速度依存型可変減衰オイルダンパー (CASE-2) と既存のオイルダンパー (CASE-3) を各々、解析方向に 10 基追加設置した場合について、比較検討を行った。さらに、CASE-4 では、より高い免震性能の可能性を追求した免震システムの最適設計として、ゴム総厚 250mm の高減衰ゴム系積層ゴムと天然ゴム系積層ゴムを組み合わせることで、ハードニング現象を回避し、これに提案するオイルダンパーを追加した免震システムの効果についても比較した。

本章で採用している高減衰ゴム系積層ゴムは、減衰性の高いゴムを使用したゴムで、ゴム材料自体で剛性と減衰機能を有していることから、ダンパーを不要とする設計も可能であることが特徴であり、一般的に採用されている免震部材である。また、ゴム材料の弾性率は、G3, G4, G6 の 3 種類があり、設計条件に応じて選択することができる。

高減衰ゴム系積層ゴム支承の解析モデルは、せん断歪に対して水平性能が変化することから歪依存式に基づく修正バイリニアな Kikuchi-Aiken モデルを採用することが多い。しかし、修正バイリニアの適用範囲は、ハードニングが生じない 270%以下であることから、本章では限界歪 400%まで適用可能な Kikuchi-Aiken モデルを採用している、同モデルのせん断復元力パラメータの評価式を以下に示す。

$$Geq \text{ (Mpa)} = 0.68358 \gamma^{-0.39964} \quad (0.05 \leq \gamma < 1.15) \\ = 1.10103 - 0.61946\gamma + 0.22047\gamma^2 - 0.022191\gamma^3 \quad (1.15 \leq \gamma \leq 4.0)$$

$$heq = 0.23834 - 0.0213\gamma - 0.000087664\gamma^2 \quad (0.05 \leq \gamma \leq 4.0)$$

$$u = 0.44236 - 0.062943\gamma - 0.037571\gamma^2 \quad (0.05 \leq \gamma \leq 4.0)$$

$$n = 1 \quad (0.05 \leq \gamma \leq 1.5)$$

$$0.91173 - 0.59184\gamma + 0.43379\gamma^2 \quad (1.5 < \gamma < 4.0)$$

$$a, b, c \quad \gamma \leq 1.3 \text{ では } b=0 \text{ として評価式にしたがって, } a \text{ を評価} \\ \gamma > 1.4 \text{ では } a=10.19171 \text{ として, 評価式にしたがって, } b \text{ を評価)} \\ c = 5.0 \text{ (const.)} \quad (0.05 \leq \gamma \leq 4.0)$$

ここで、 $Geq$  : 等価せん断弾性率,  $\gamma$  : せん断ひずみ,  $heq$  : 等価粘性減衰定数,  $u$  : 降伏荷重特性比,  $a, b, c, n$  : 履歴ループ形状パラメータ

次にスケルトンカーブにおける変位  $X$  と復元力  $F$  を次式で表現する。

$$F = \frac{G_{eq} A}{T_r} X \quad (3.3)$$

ここに、 $G_{eq}$  はせん断ひずみの関数で表されるゴムの等価せん断弾性率、 $A$  は積層ゴムの断面積、 $T_r$  はゴムの総厚であり、履歴ループは次式のように  $F_1$  と  $F_2$  の和とする。

$$F = F_1 + F_2 \quad (3.4)$$

ここに、 $F_1$ 、 $F_2$  は次式で表す。

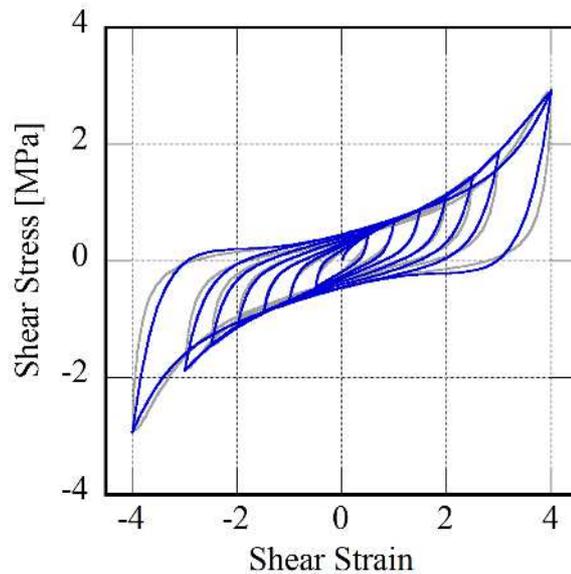
$$\begin{cases} F_1 = \frac{1}{2}(1-u)F_m \{x + \text{sgn}(X)|x|^n\} \\ \dot{X} > 0 : F_2 = uF_m \{1 - 2e^{-a(1+x)} + b(1+x)e^{-c(1+x)}\} \\ \dot{X} < 0 : F_2 = -uF_m \{1 - 2e^{-a(1+x)} + b(1-x)e^{-c(1-x)}\} \end{cases} \quad (3.5)$$

ここに、 $u$ 、 $x$  は次式である。

$$\begin{cases} u = \frac{F_u}{F_m} \\ x = \frac{X}{X_m} \end{cases} \quad (3.6)$$

$X_m$ 、 $F_m$  はスケルトンカーブからの除荷時の変位と荷重を表し、 $n$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $c$  は履歴ループの形状を規定するパラメータで、 $a$ 、 $b$ 、 $c$  は次式で表される  $q$  より求める。

$$q = \frac{\pi h_{eq}}{2} \quad (3.7)$$



Kikuchi-Aiken モデル (実験値と解析の比較)



図 3.6 質点系応答解析モデルの諸元 (X 方向)

表 3.2 検討ケース一覧

|        | 略称             | 免震部材  | 減衰力特性   |
|--------|----------------|---|---|
| CASE-1 | OD 無し          | HDR (14 基) H=200mm                            | —   |
| CASE-2 | 提案可変 OD        | HDR (14 基) +OD1 (10 基) ※<br>H=200mm           | 可変減衰オイルダンパー<br>C <sub>1</sub> : 667kN/(m/s), C <sub>2</sub> : 1100 kN/(m/s) <sup>2</sup> ,<br>C <sub>3</sub> : 200kN/(m/s), F <sub>c</sub> : 400kN, F <sub>r</sub> : 1100kN |
| CASE-3 | 既存 OD          | HDR (14 基) +OD2 (10 基) ※<br>H=200mm           | 既存オイルダンパー<br>C <sub>1</sub> : 2500kN/(m/s), C <sub>2</sub> : 169.5 kN/(m/s),<br>F : 800kN   |
| CASE-4 | 提案可変 OD (h250) | HDR (8 基) +NRB (6 基) +OD1 (10 基) ※<br>H=250mm | 可変減衰オイルダンパー<br>C <sub>1</sub> : 667kN/(m/s), C <sub>2</sub> : 1100 kN/(m/s) <sup>2</sup> ,<br>C <sub>3</sub> : 200kN/(m/s), F <sub>c</sub> : 400kN, F <sub>r</sub> : 1100kN |

HDR : 高減衰ゴム系積層ゴム支承 (G6), NRB : 天然ゴム系積層ゴム (G4), H : ゴム総厚

OD1 : 多段速度依存型可変減衰オイルダンパー

OD2 : オイルダンパー (パイリニア型), ※オイルダンパーは, 長辺方向 (X 方向) の基数

### 3.4 解析結果と考察

#### (1) 各階の最大応答

CASE-1（オイルダンパー無し）、CASE-2（提案可変減衰オイルダンパー）、CASE-3（既存オイルダンパー）における各入力地震動に対する地震動毎の免震層の最大応答変位、最大応答速度、1階の最大応答層せん断力、上部構造の最大応答加速度を図 3.7～3.10 に示す。また、最大応答分布と高減衰ゴム系積層ゴムとオイルダンパーの履歴特性を図 3.11～3.24 に示す。

基本モデルのオイルダンパーが無い高減衰ゴム系積層ゴムのみの場合(CASE-1)は、図 3.20、3.22 の履歴ループに見られるように活断層地震において免震層にせん断ひずみ 400% ( $\delta=80\text{cm}$ ) を超えるような大きな変形が生じているため、ハードニングの影響で加速度応答も大きくなっている。これに対して提案している多段速度依存型可変減衰オイルダンパー (CASE-2) は、応答加速度、応答変位、応答層せん断力に低減効果が現れている。また、免震層の最大応答速度は、オイルダンパー無し (CASE-1) は、210cm/s と非常に大きいですが、本オイルダンパーを設置することで最大 130cm/s 程度となっており、オイルダンパーの限界速度 150cm/s 以下となっている。

#### (2) 入力レベルによる効果

提案可変減衰オイルダンパー (CASE-2) は、図 3.23 に見られるように標準的な設計用入力地震動(告示 AW)においても応答加速度は 200 cm/s<sup>2</sup> 以下であり、オイルダンパー無し(CASE-1) に対して応答加速度の増加はみられず、既存のオイルダンパー (CASE-3) よりも免震効果を発揮している。また、CASE-3 の既存のオイルダンパーを付加すれば、免震層の応答変位を抑えることはできるが、設計領域の地震動では、変位を抑えすぎるため加速度応答が大きくなる。これらの応答結果より、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーは、設計領域では、従来の免震効果を確保し、大振幅地震動の領域で変位を抑制することが可能である。なお、免震層の応答変位(クリアランス)と上部構造の応答はトレードオフの関係があるため、良好な免震効果を得るためには、変位量は可能な限り大きくとる必要がある。

#### (3) オイルダンパーの温度上昇

最大累積吸収エネルギー量を示した長周期地震動(南海 AIC003)における、オイルダンパーの温度上昇シミュレーション解析を文献<sup>12)</sup>により検討した結果を図 3.25、3.26 に、累積吸収エネルギー量を図 3.27～3.29 に示す。CASE-2 のオイルダンパーの温度上昇(精算法)は 9.05°C (表面温度 29.05°C : AIC003) であり、シール材の耐熱限界温度 80°C 以下を十分下回っていることから、オイルダンパーの温度上昇による機能上の問題はない。また、CASE-3 の既存のオイルダンパーの温度上昇(精算法)は 15.79°C (表面温度 35.79°C : AIC003) であり、提案オイルダンパーより温度上昇が大きい。一方、CASE-2 の放熱を考慮しない場合の温度上昇は、簡易法として(3.8)式で求まることから、9.14°C (表面温度 29.14°C : AIC003) となり、双方の差はほとんど見られない。

$$t=Ed/C \quad (3.8)$$

ここに、 $t$ : 温度 (°C) ,  $Ed$ : 吸収エネルギー(kN・m) ,  $C$ : 熱容量 (kJ/°C)

## (4) 免震システムによる性能比較

CASE-4 では、より高い免震性能の可能性を追求した最適設計の免震システムとして、ゴム総厚 250mm の高減衰ゴム系積層ゴムと天然ゴム系積層ゴムを組み合わせている。解析結果の例として、応答結果は比較的大きい内陸直下型地震（上町 A4B2，熊本 KMM）における提案可変減衰オイルダンパー（CASE2）と比較した応答分布図を図 3.30，3.31 に示す。また、免震部材の履歴特性の比較を図 3.32，3.33 に示す。なお、CASE-4 は高減衰ゴム系積層ゴムと天然ゴム系積層ゴムの合計の履歴ループと比較している。

応答加速度や応答せん断力は、CASE-4 が CASE-2 より、さらに応答を低減しており、最大応答変位においても大差がない。履歴特性では、ゴム総厚を 250mm に変更したことから剛性が低下しており、破断の限界変位も向上しているためハードニング現象も生じていない。そのため、提案可変減衰オイルダンパーの履歴ループも大きくなり、エネルギー吸収量が増加して、免震層の変位を効果的に抑制している。

以上から、最適な免震システム採用することで提案している多段速度依存型可変オイルンパーはより、性能を向上した免震建築物が実現可能である。

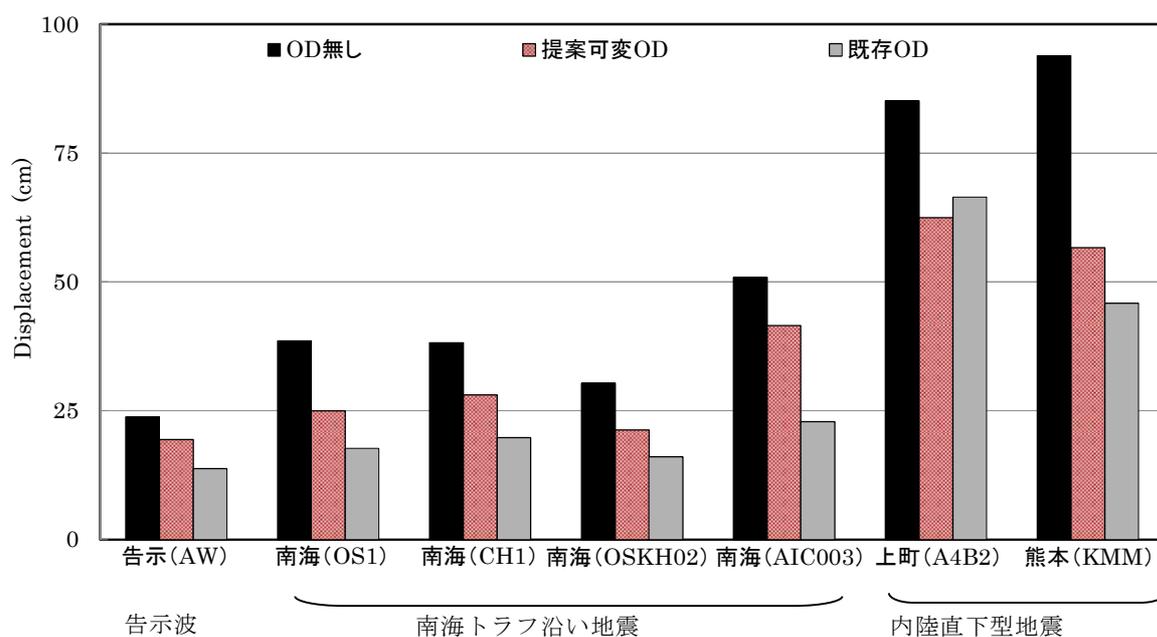


図 3.7 免震層の最大応答変位

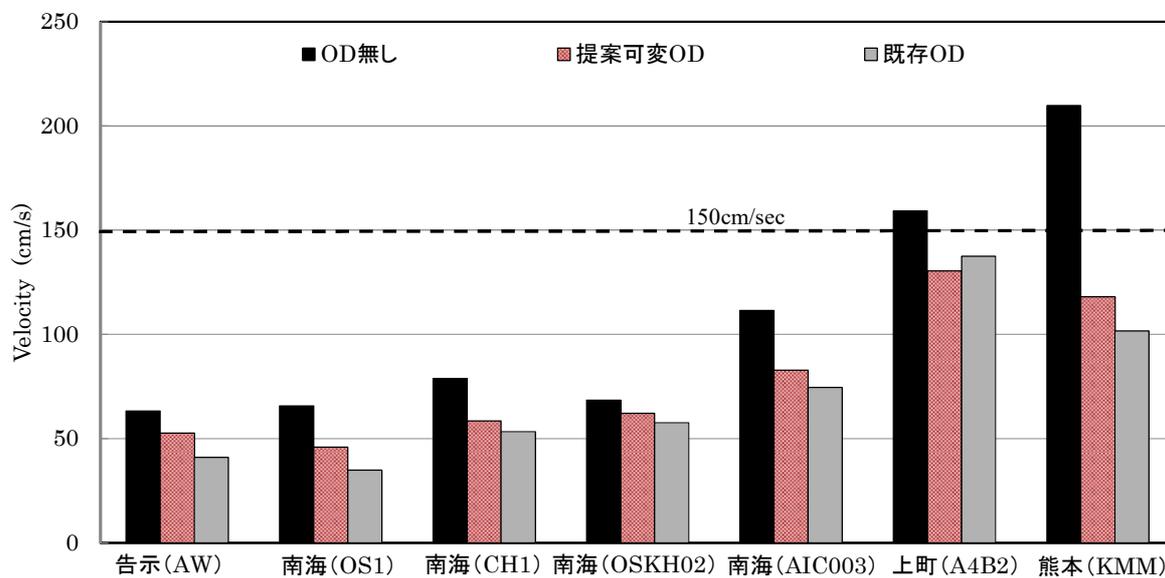


図 3.8 免震層の最大応答速度

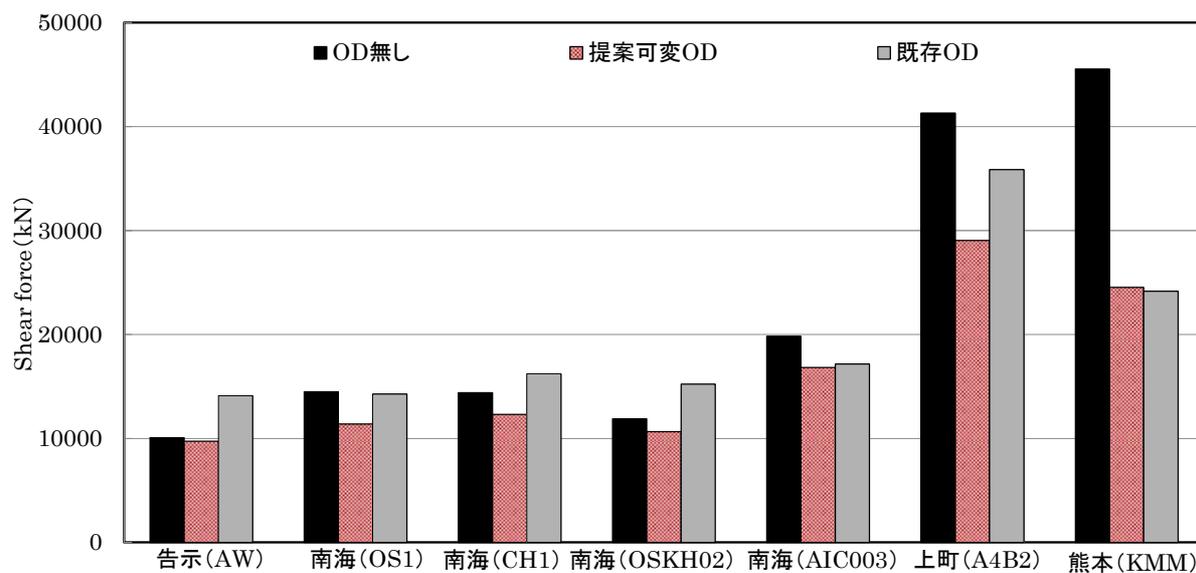


図 3.9 1階の最大応答層せん断力

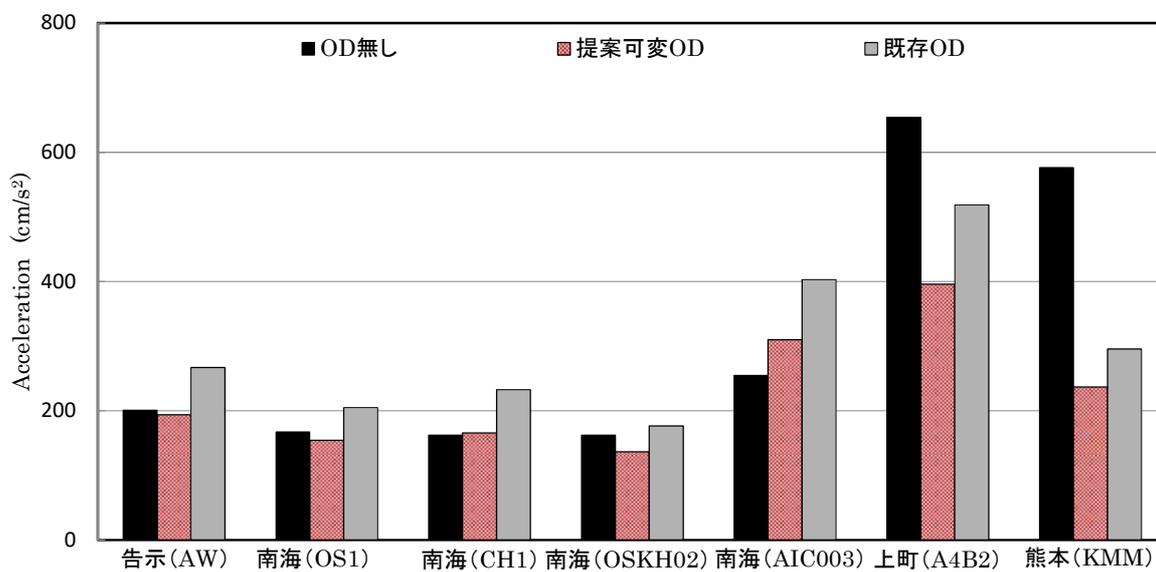


図 3.10 上部構造の最大応答加速度

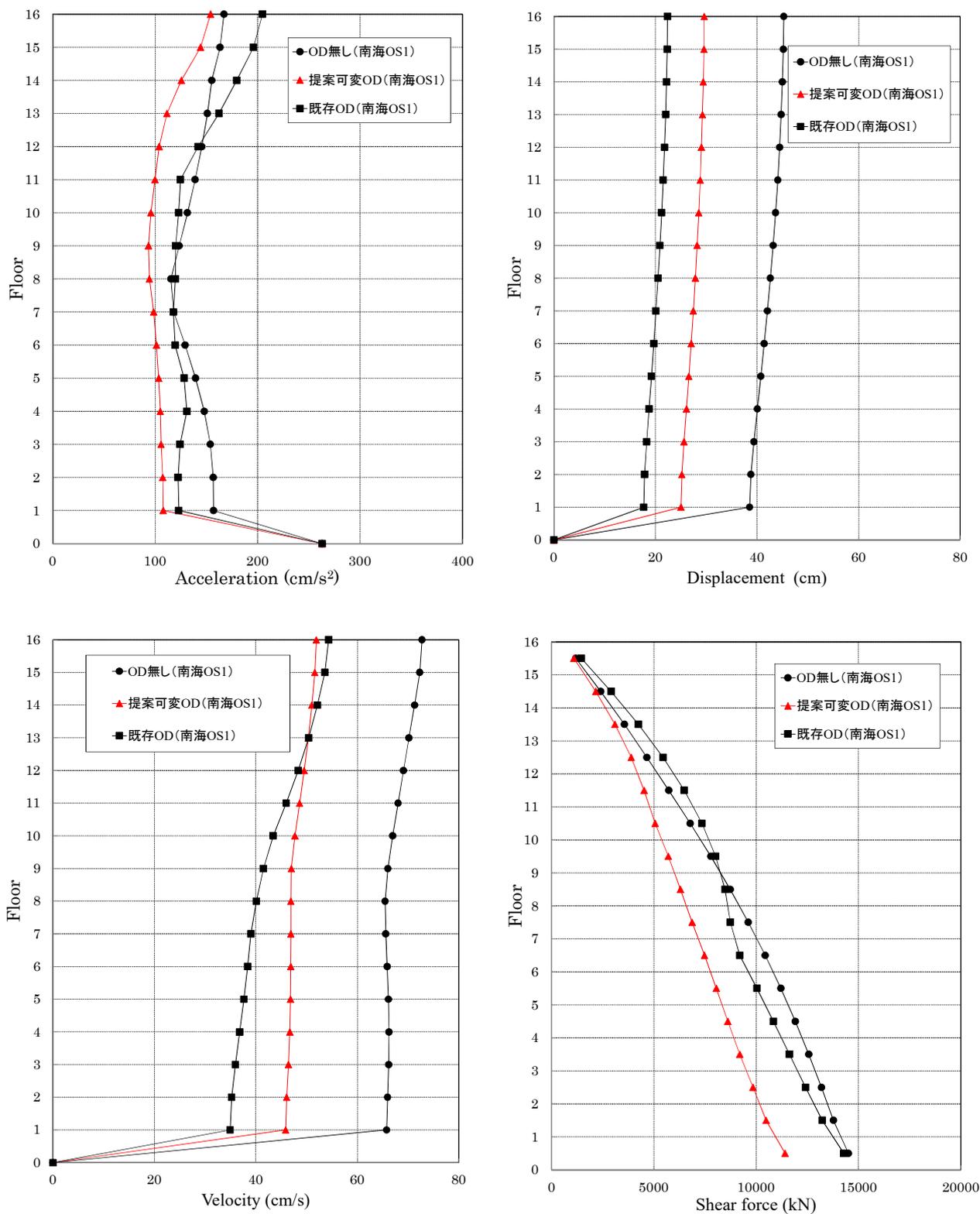
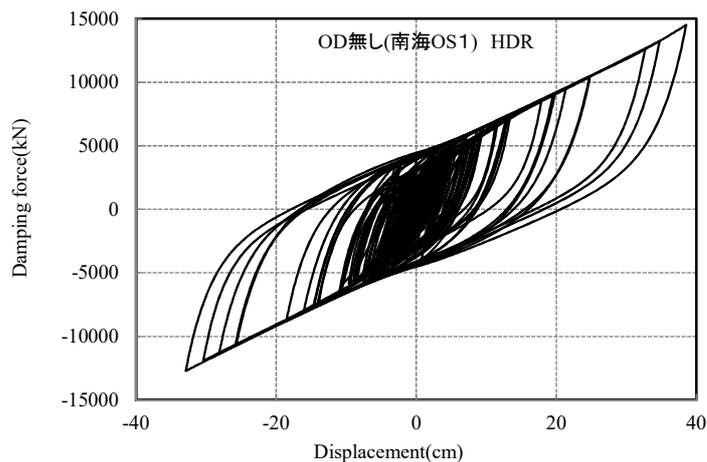
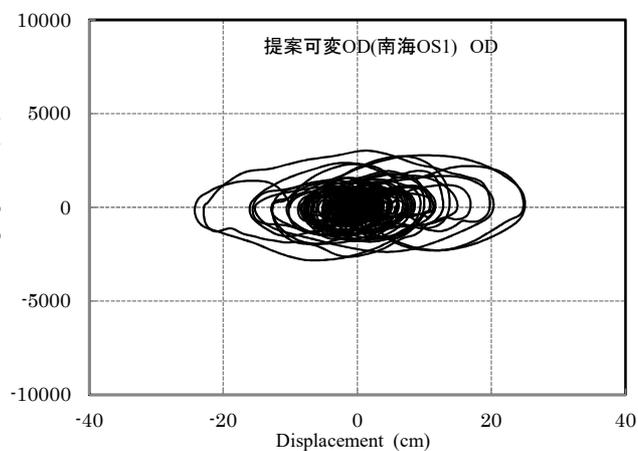
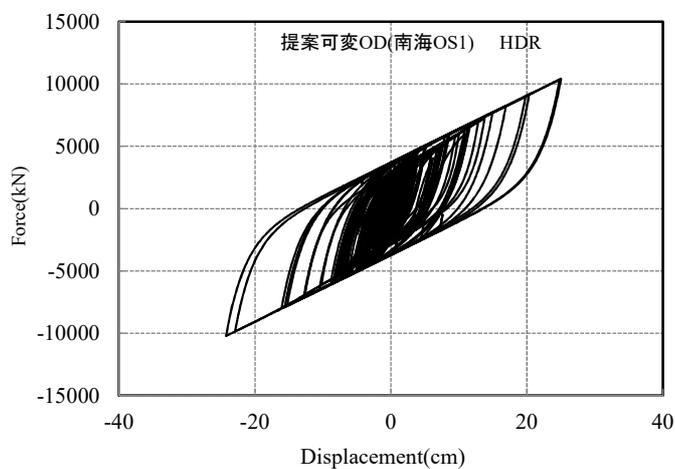


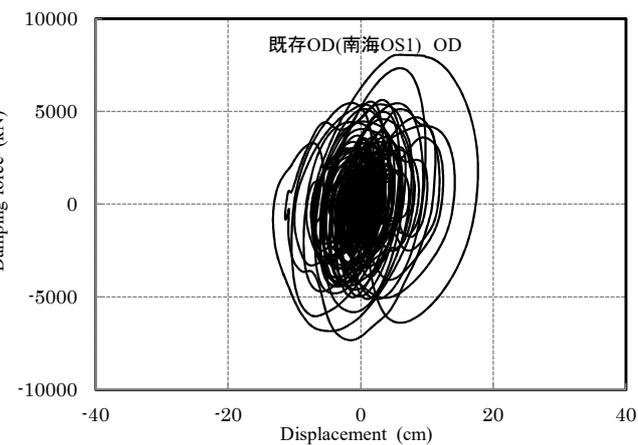
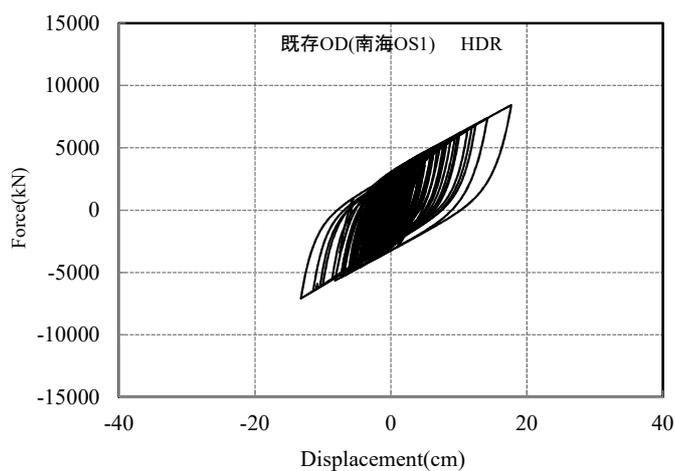
図 3.11 最大応答分布図  
(CASE-1・2・3 : 南海 OS1)



履歴特性 (CASE-1 : OD 無し)



履歴特性 (CASE-2 : 提案可変 OD)



履歴特性 (CASE-3 : 既存 OD)

図 3.12 免震部材の履歴特性  
(CASE-1・2・3 : 南海 OS1)

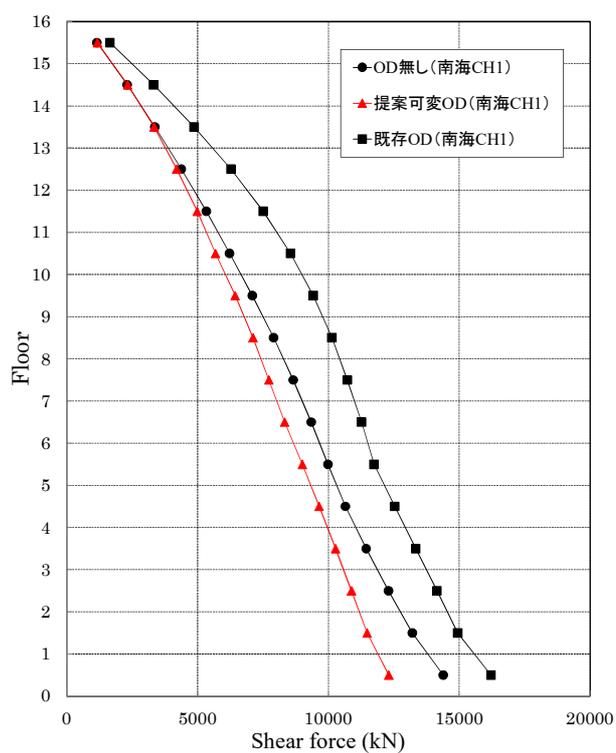
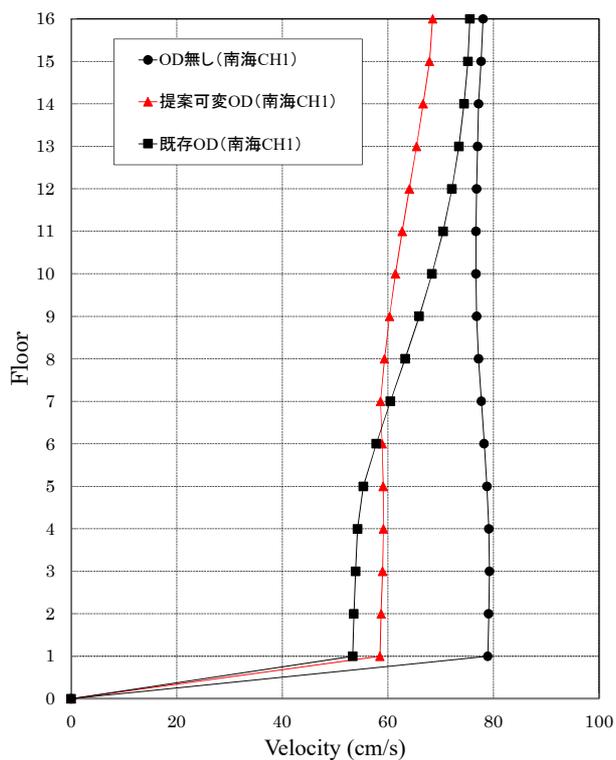
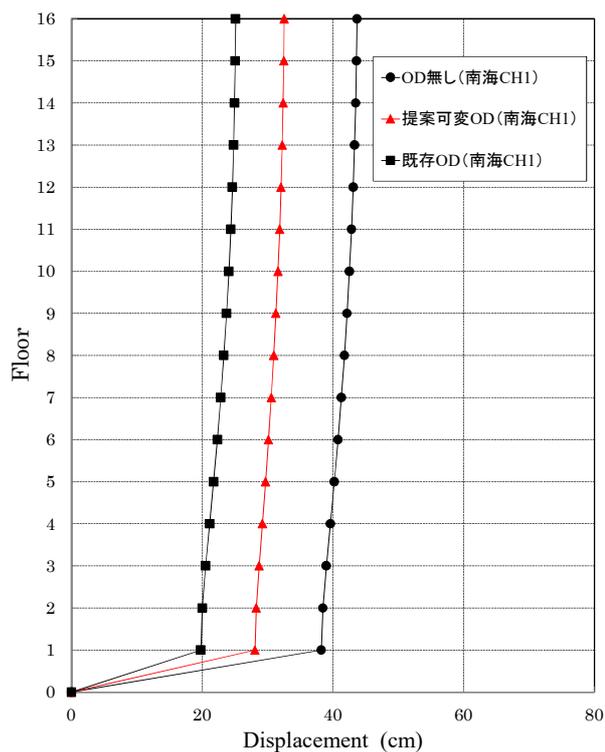
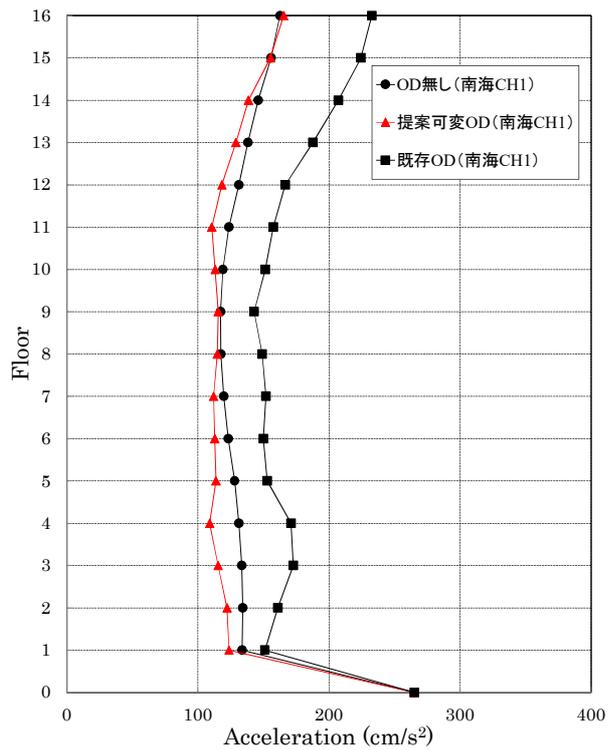
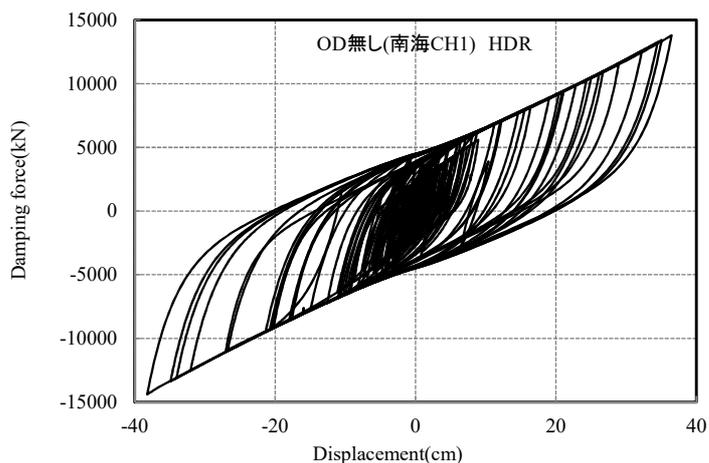
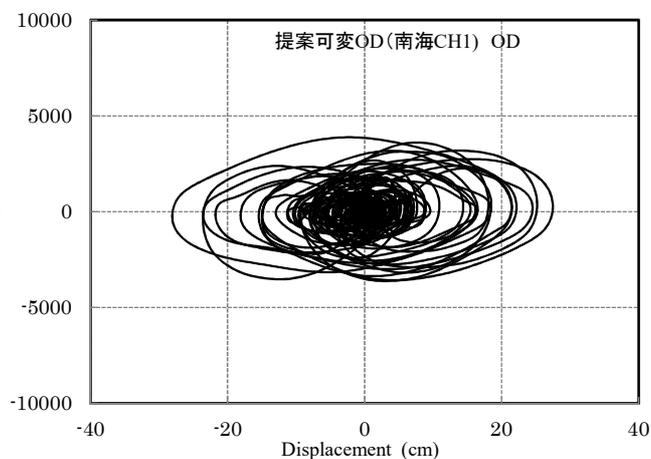
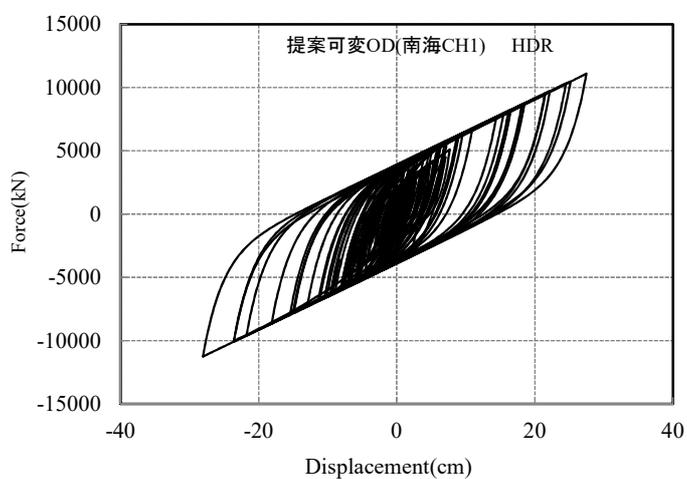


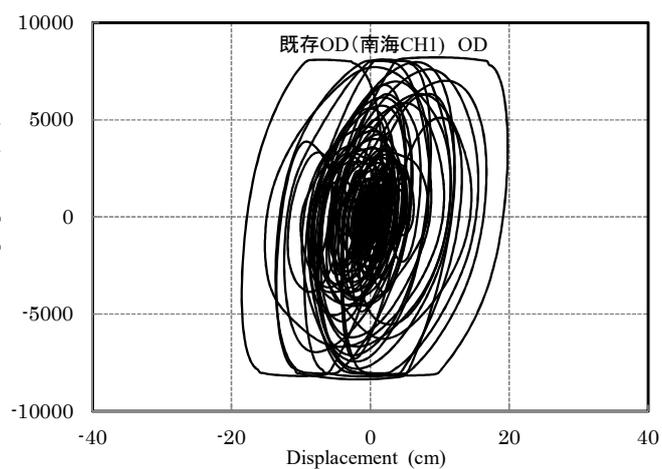
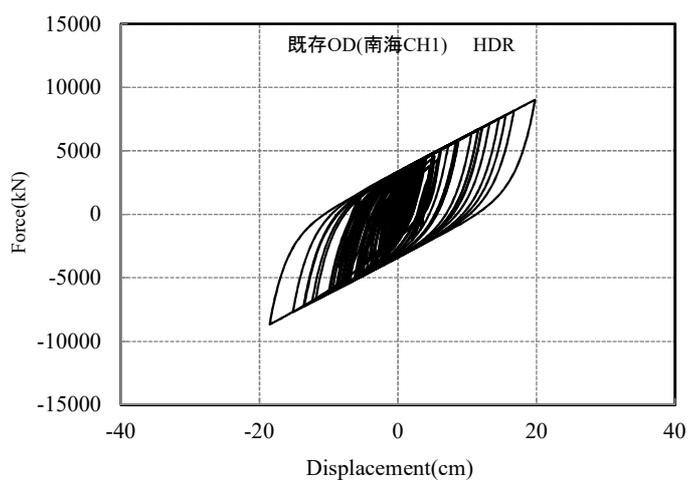
図 3.13 最大応答分布図  
(CASE-1・2・3 : 南海 CH1)



履歴特性 (CASE-1 : OD 無し)



履歴特性 (CASE-2 : 提案可変 OD)



履歴特性 (CASE-3 : 既存 OD)

図 3.14 免震部材の履歴特性  
(CASE-1・2・3 : 南海 CH1)

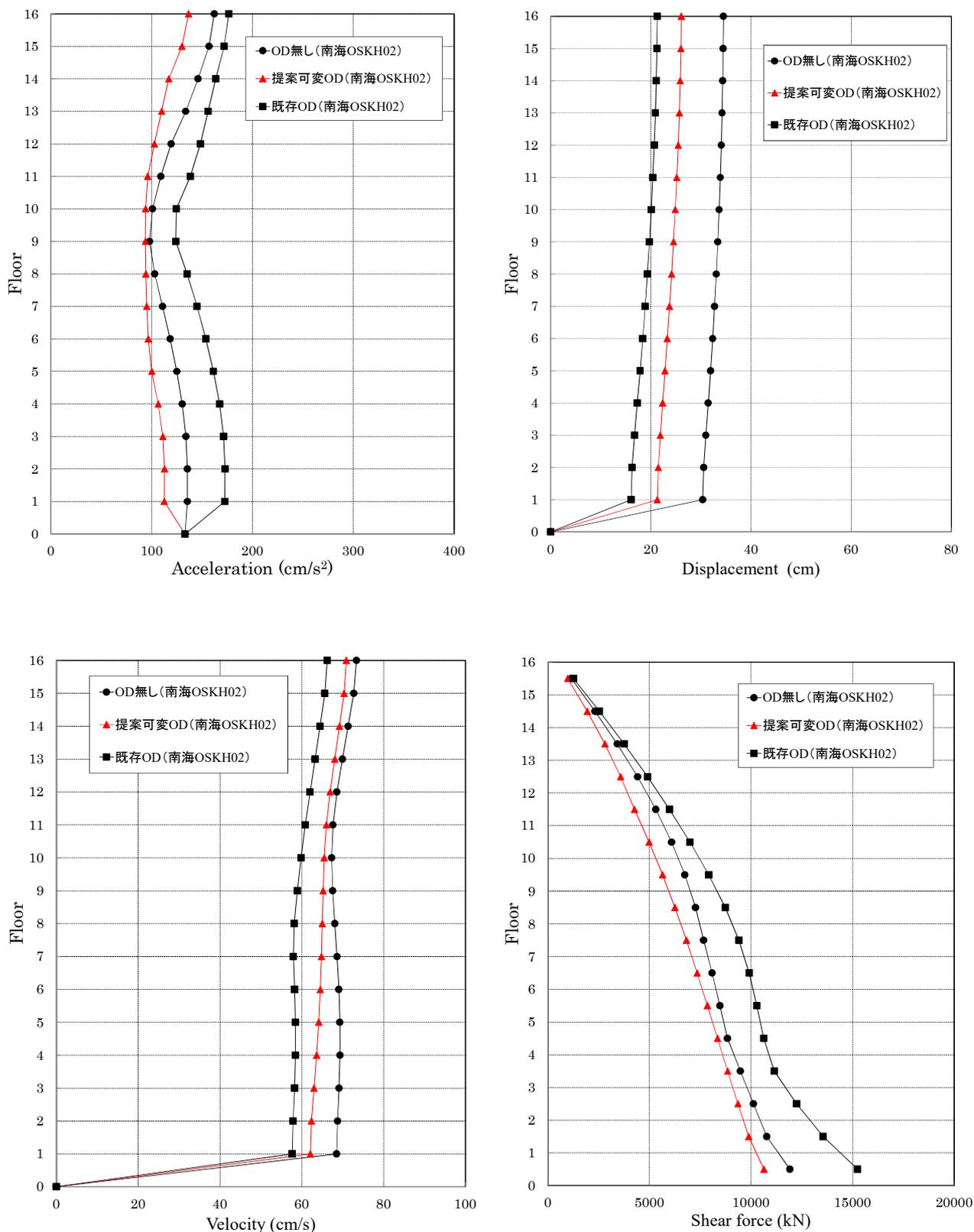
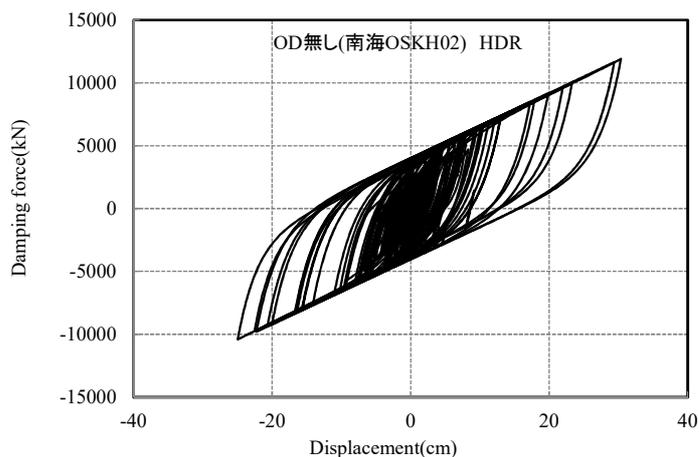
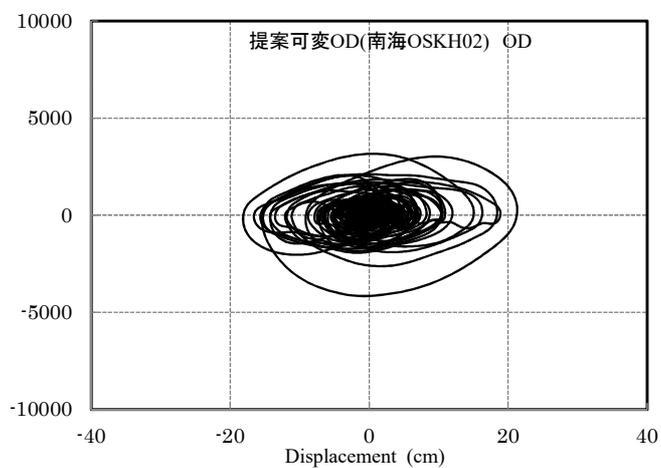
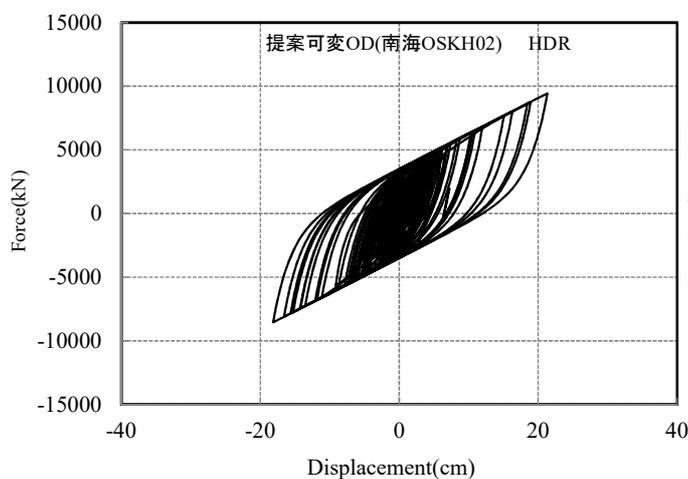


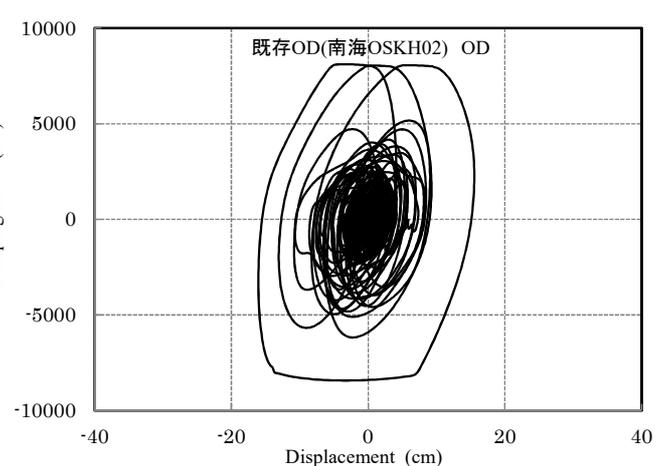
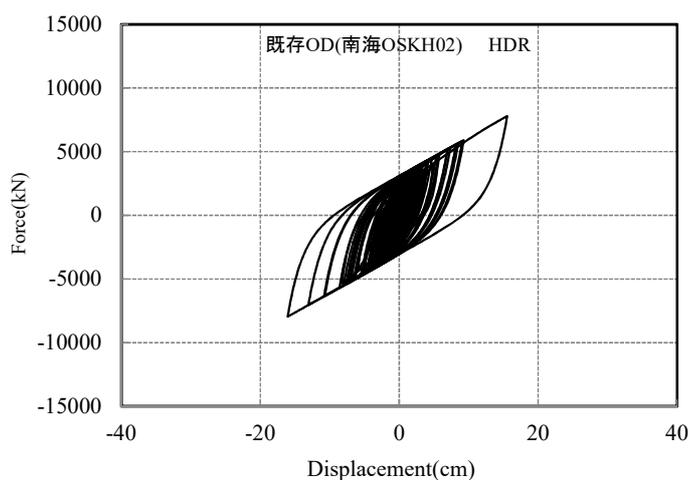
図 3.15 最大応答分布図  
(CASE-1・2・3 : 南海 OSKH02)



履歴特性 (CASE-1 : OD 無し)



履歴特性 (CASE-2 : 提案可変 OD)



履歴特性 (CASE-3 : 既存 OD)

図 3.16 免震部材の履歴特性  
(CASE-1・2・3 : 南海 OSKH02)

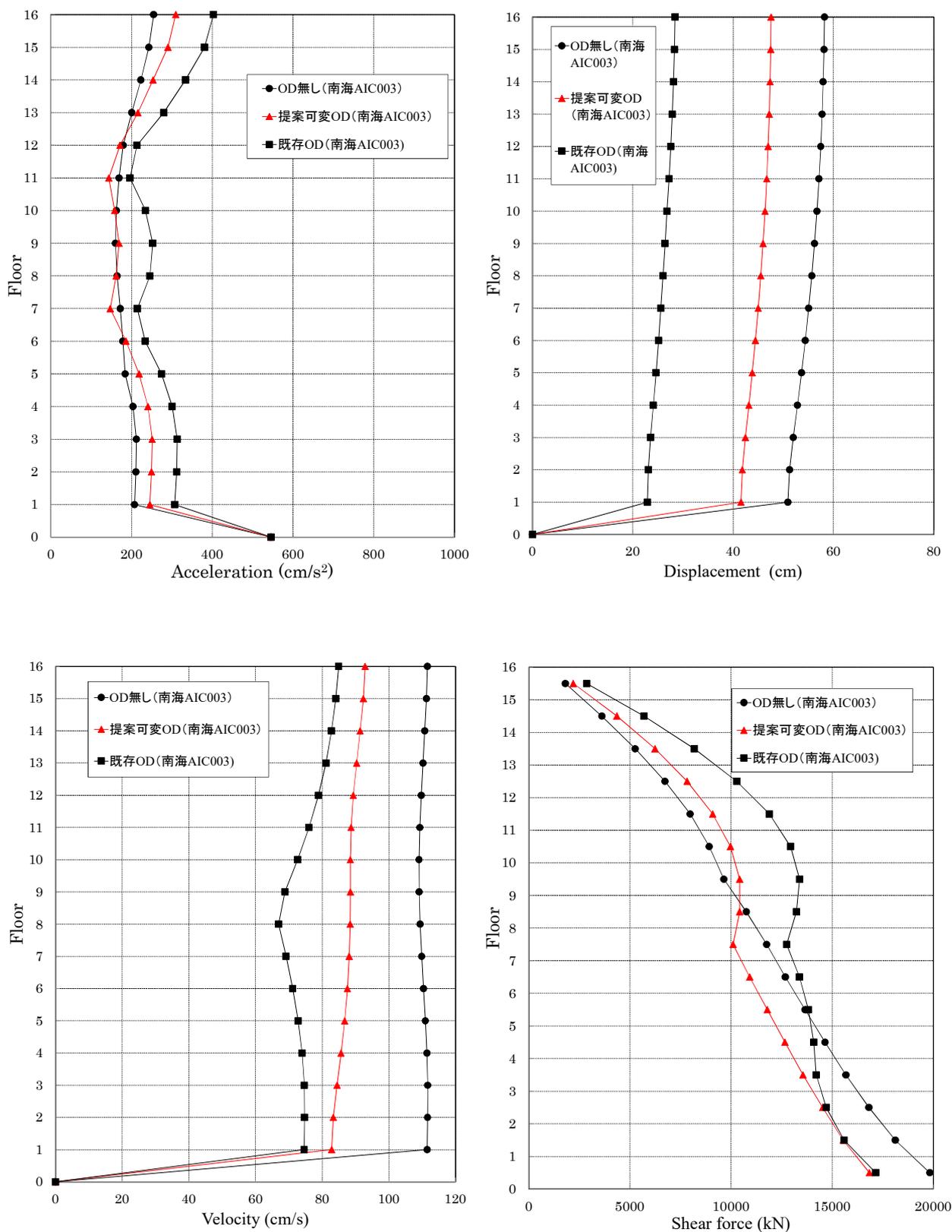
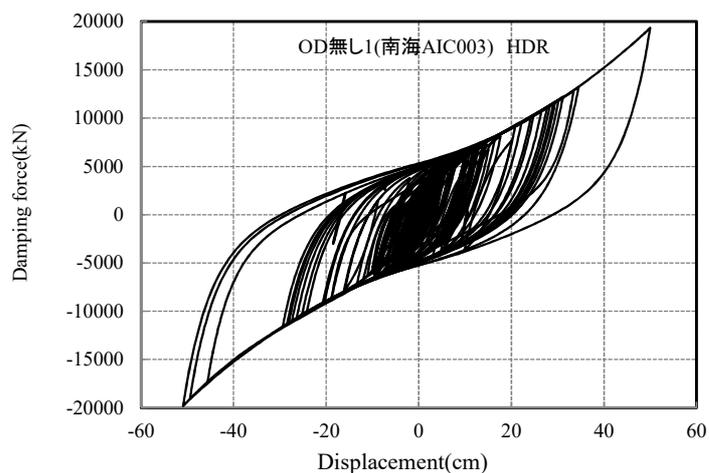
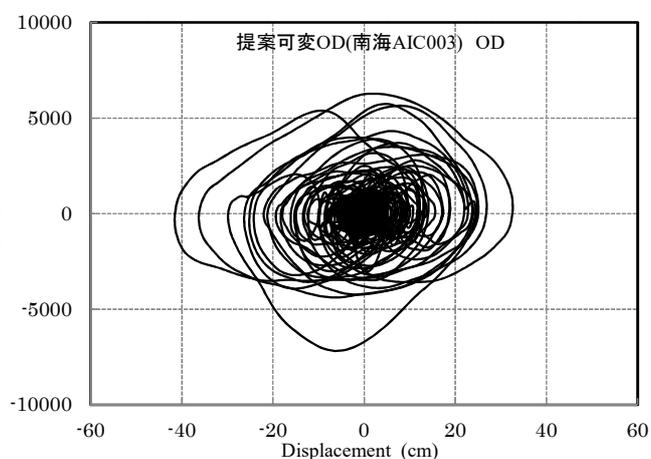
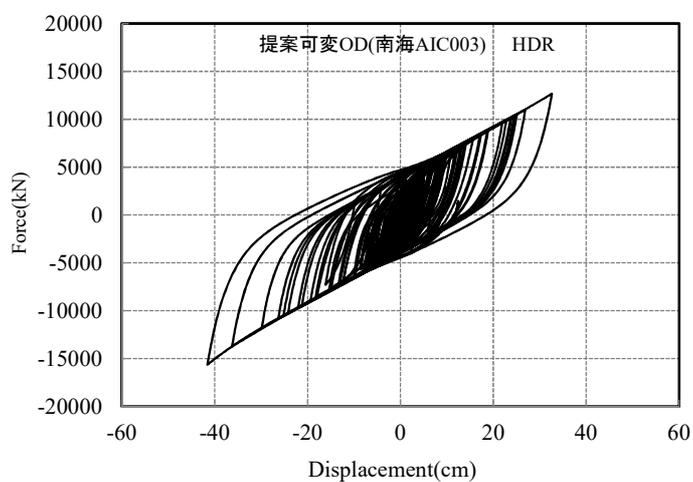


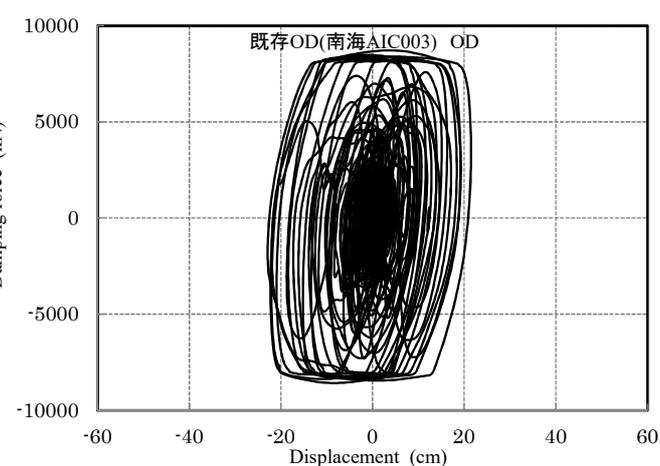
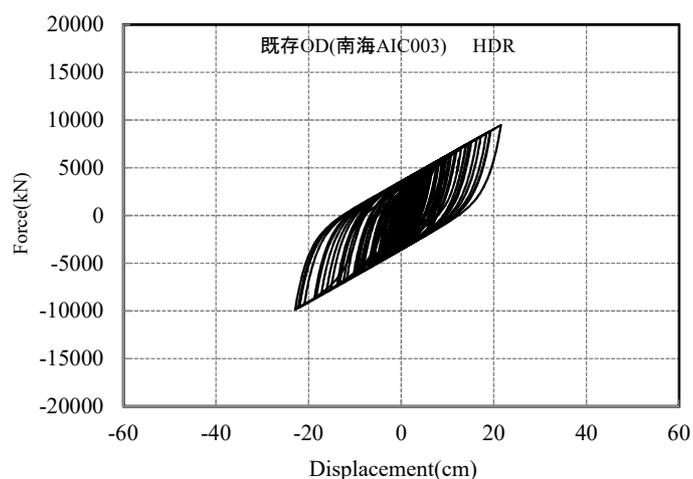
図 3.17 最大応答分布図  
(CASE-1・2・3 : 南海 AIC003)



履歴特性 (CASE-1 : OD 無し)



履歴特性 (CASE-2 : 提案可変 OD)



履歴特性 (CASE-3 : 既存 OD)

図 3.18 免震部材の履歴特性  
(CASE-1・2・3 : 南海 AIC003)

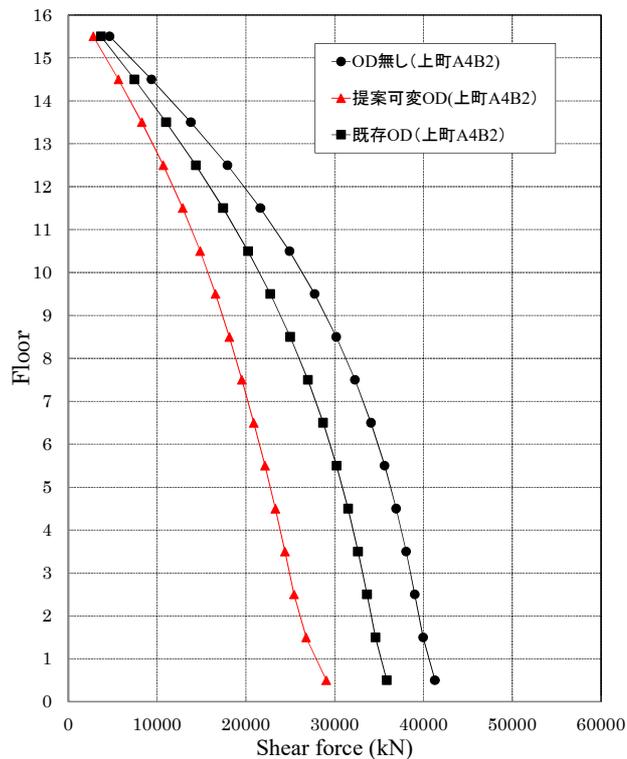
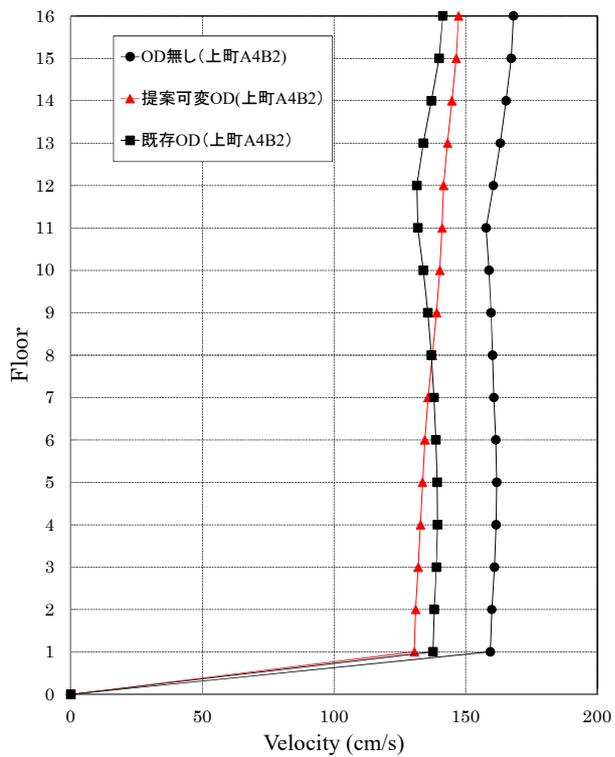
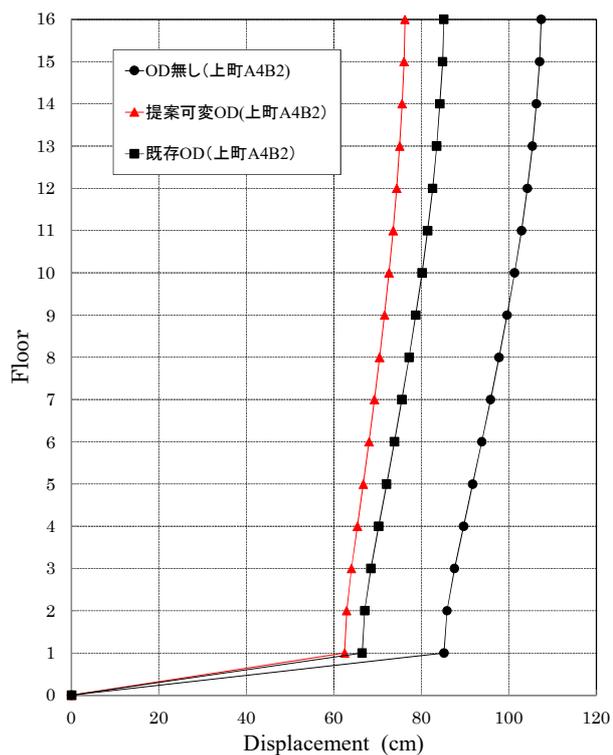
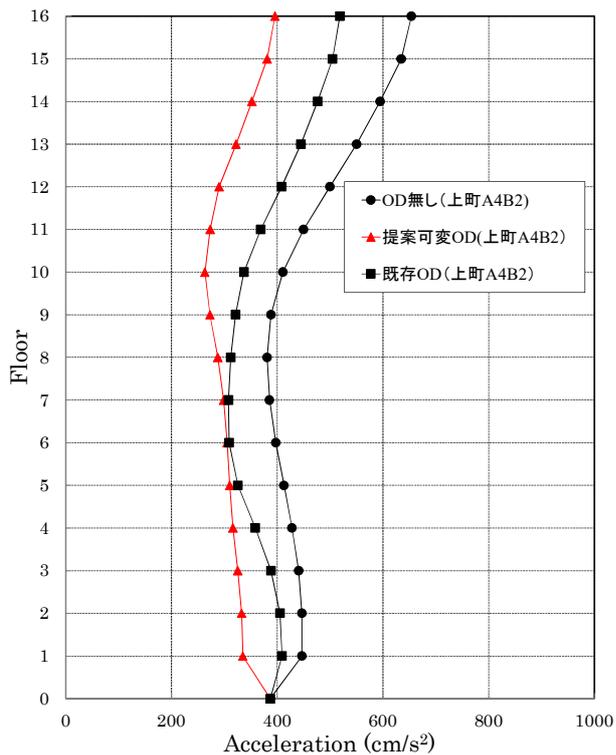
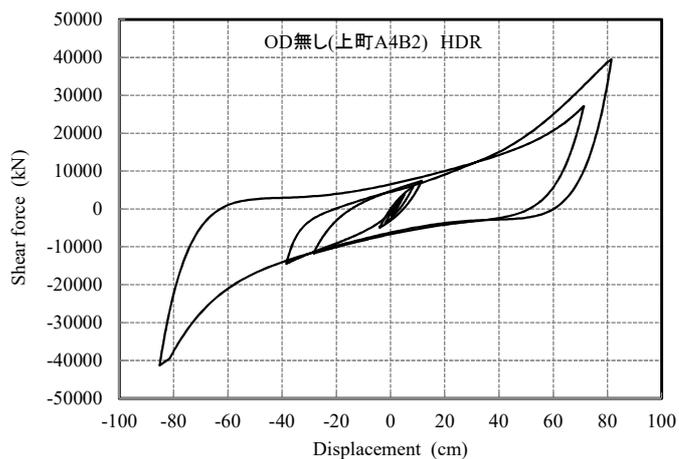
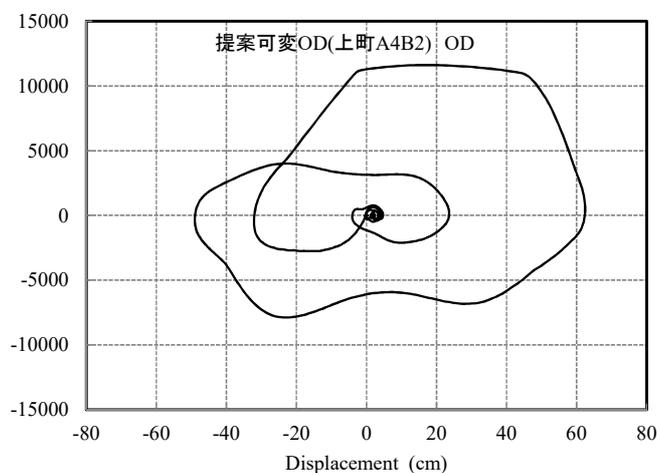
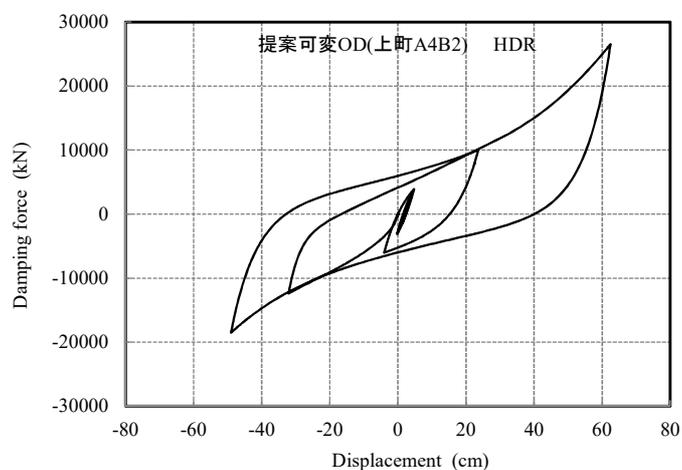


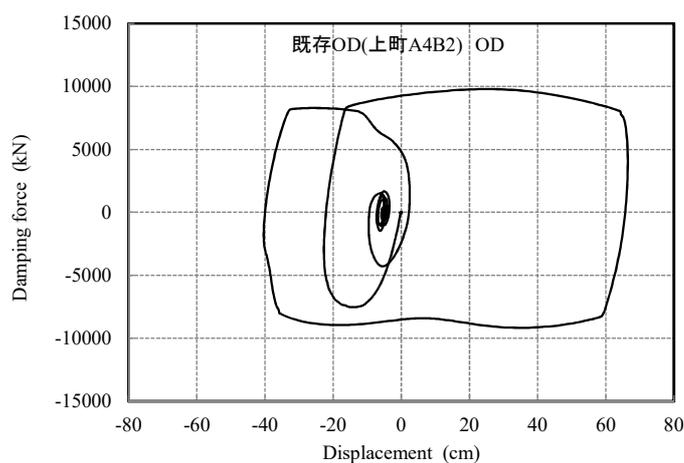
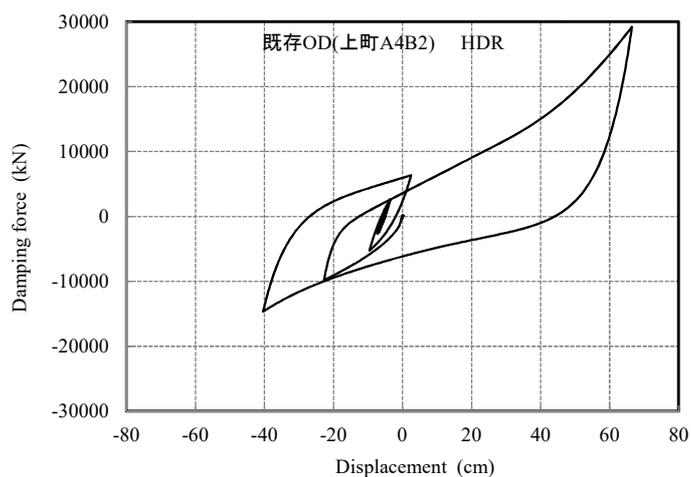
図 3.19 最大応答分布図  
(CASE-1・2・3：上町 A4B2)



履歴特性 (CASE-1 : OD 無し)



履歴特性 (CASE-2 : 提案可変 OD)



履歴特性 (CASE-3 : 既存 OD)

図 3.20 免震部材の履歴特性  
(CASE-1・2・3 : 上町 A4B2)

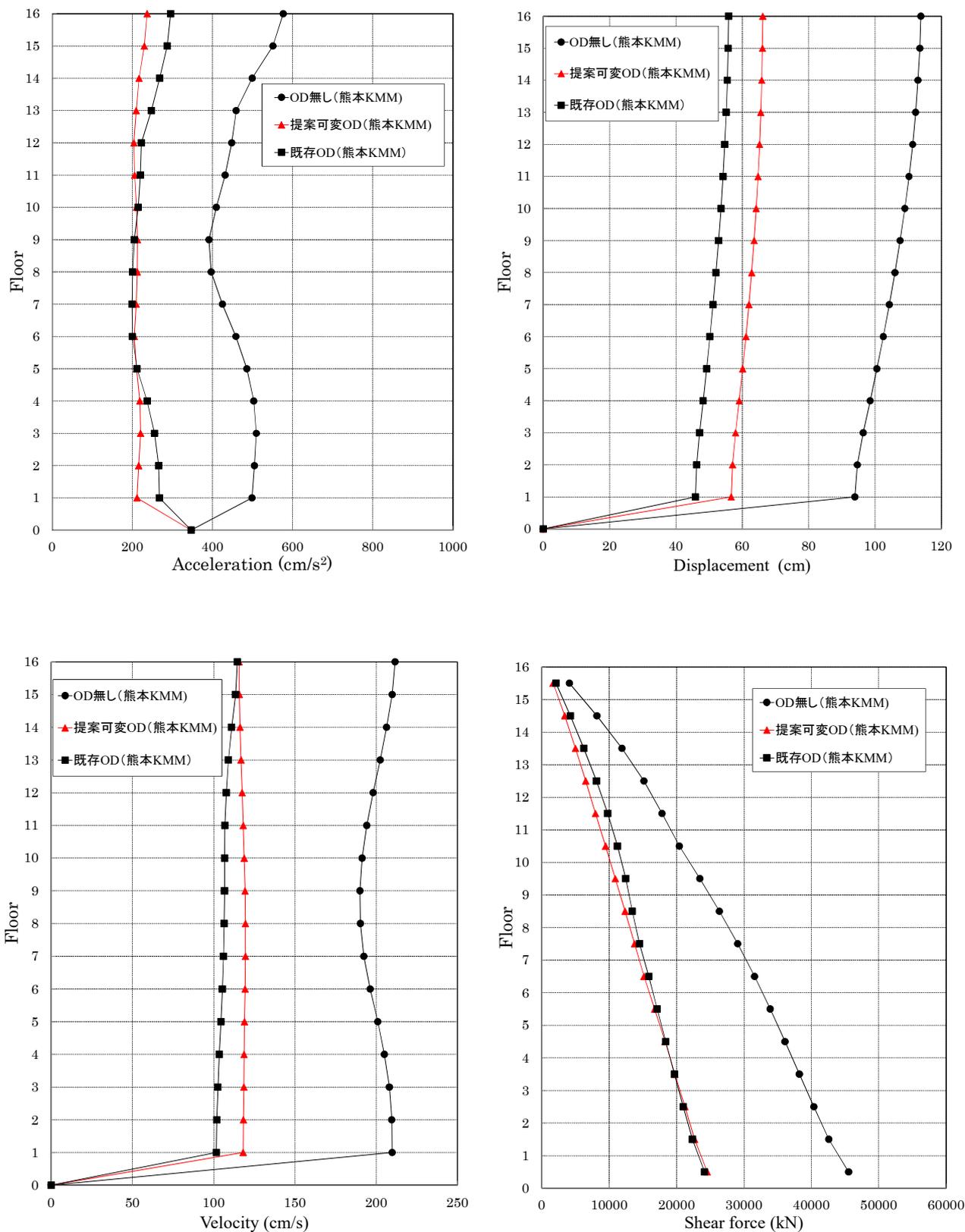
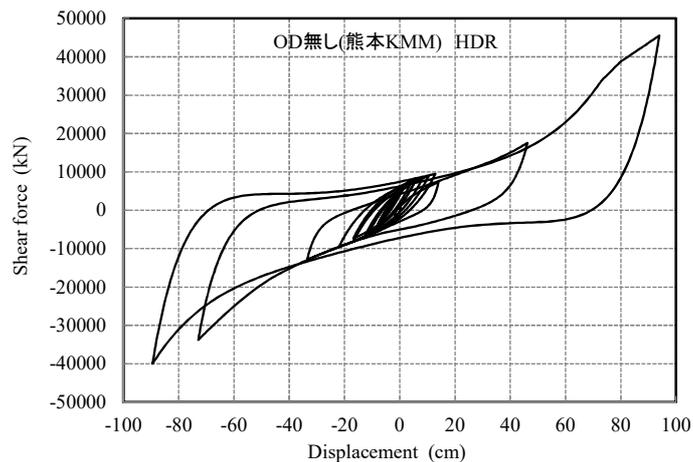
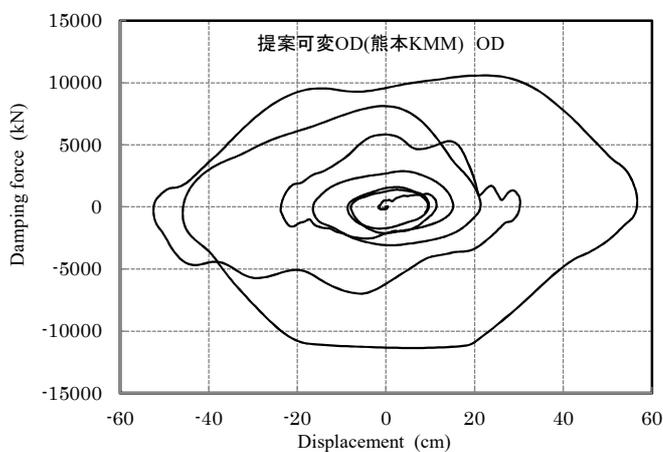
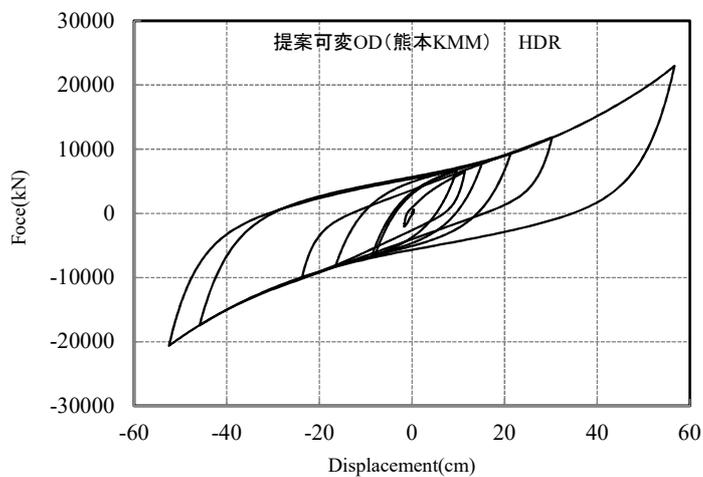


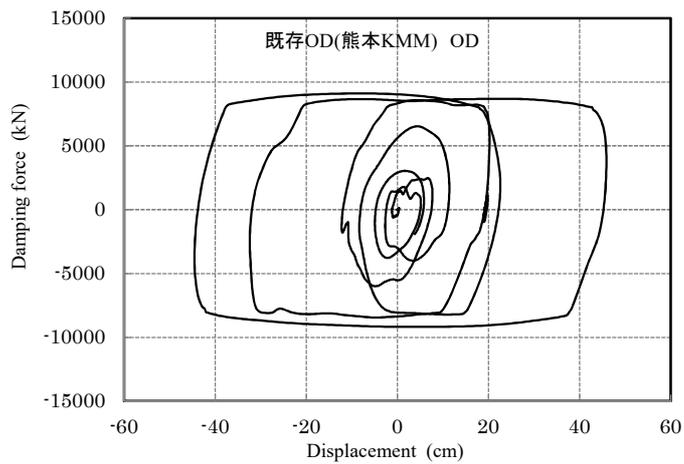
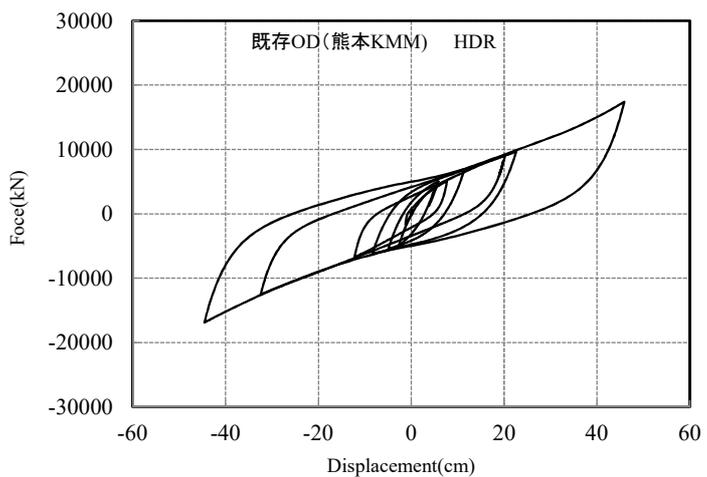
図 3.21 最大応答分布図  
(CASE-1・2・3 : 熊本 KMM)



履歴特性 (CASE-1 : OD 無し)



履歴特性 (CASE-2 : 提案可変 OD)



履歴特性 (CASE-3 : 既存 OD)

図 3.22 免震部材の履歴特性  
(CASE-1・2・3 : 熊本 KMM)

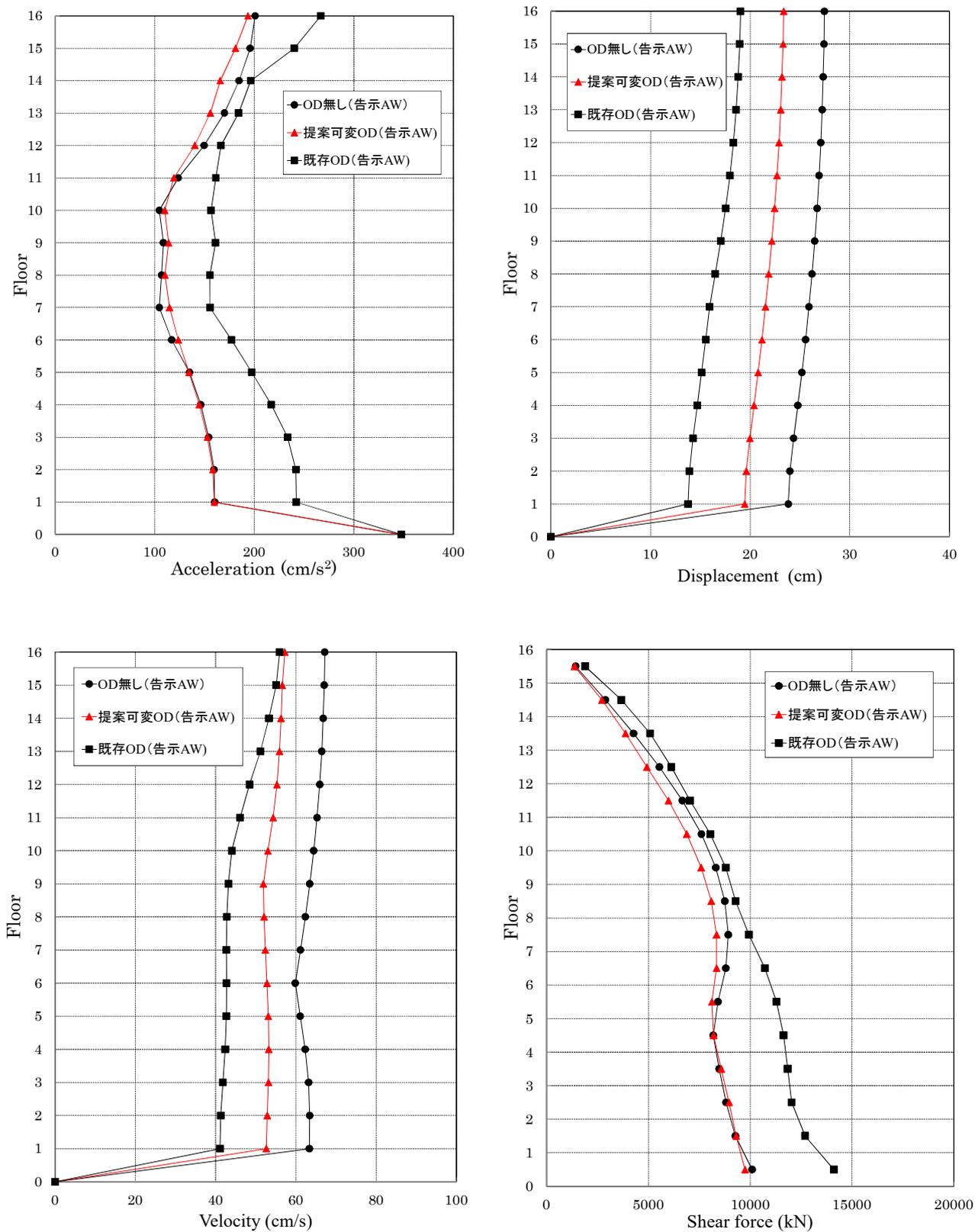
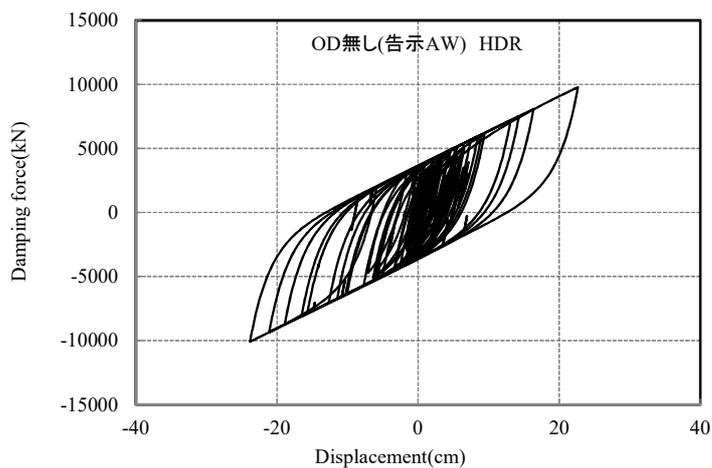
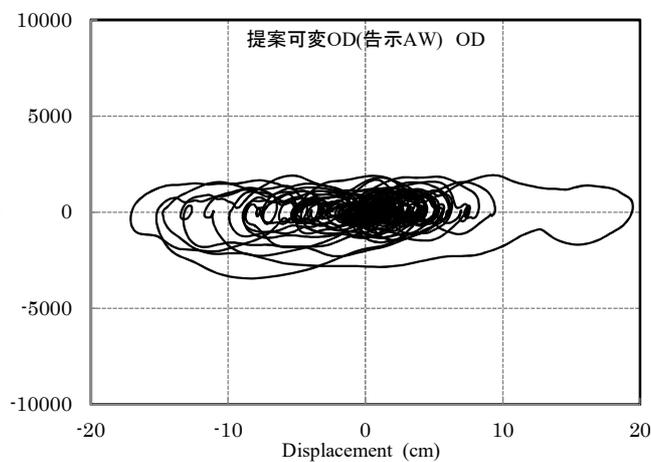
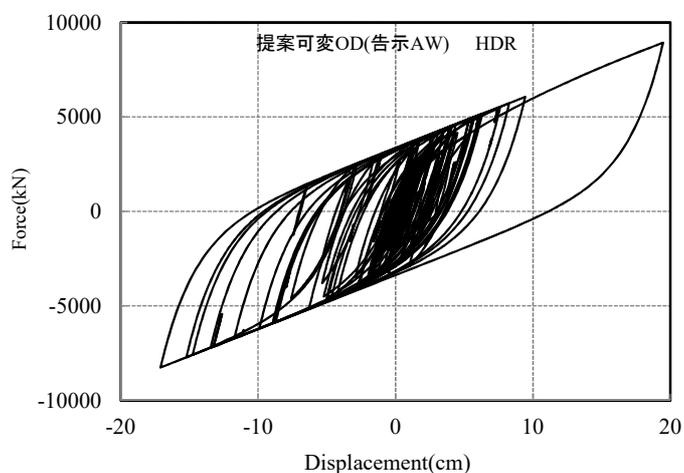


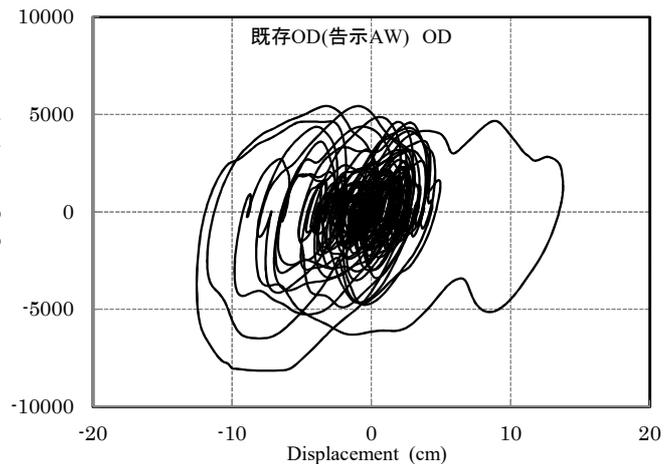
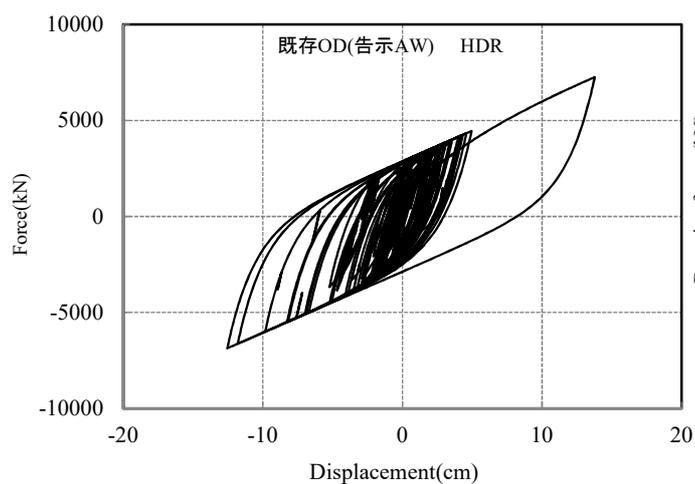
図 3.23 最大応答分布図  
(CASE-1・2・3 : 告示 AW)



履歴特性 (CASE-1 : OD 無し)



履歴特性 (CASE-2 : 提案可変 OD)



履歴特性 (CASE-3 : 既存 OD)

図 3.24 免震部材の履歴特性  
(CASE-1・2・3 : 告示 AW)

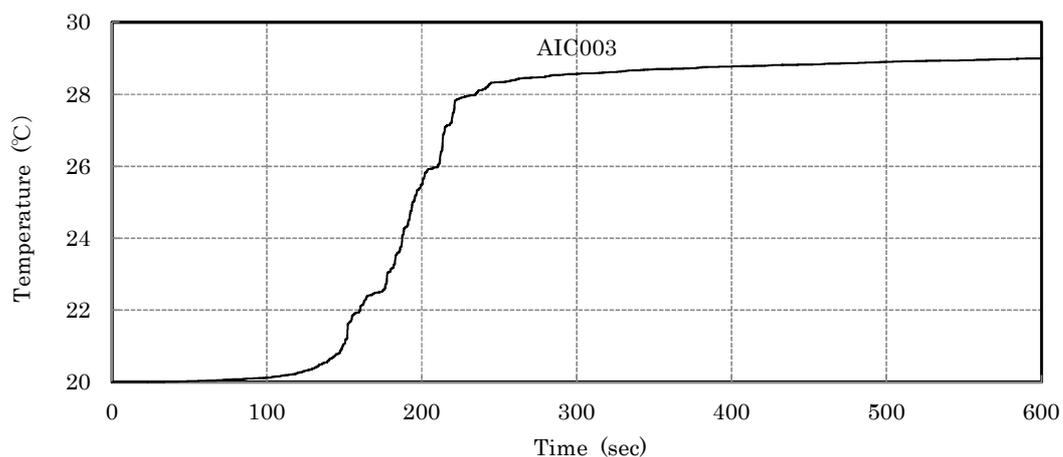


図 3.25 温度上昇シミュレーション解析結果(CASE2: 提案可変 OD\_南海 AIC003)

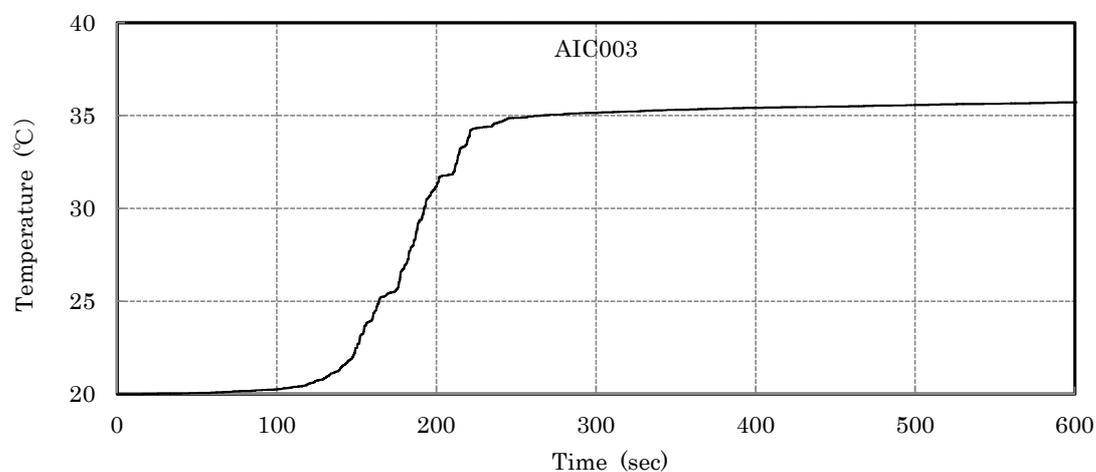


図 3.26 温度上昇シミュレーション解析結果(CASE-3: 既存 OD\_南海 AIC003)

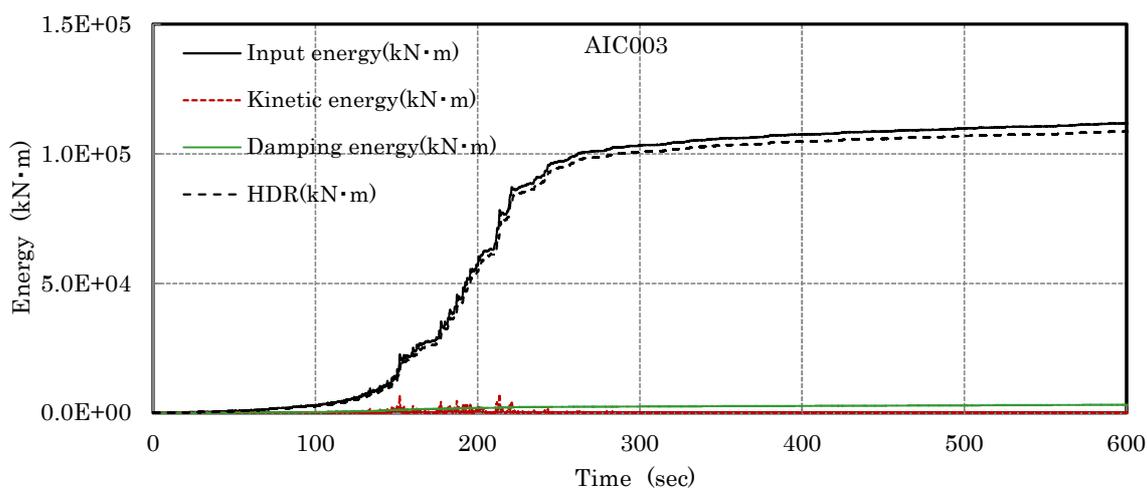


図 3.27 累積吸収エネルギー量 (CASE-1: OD 無し\_南海 AIC003)

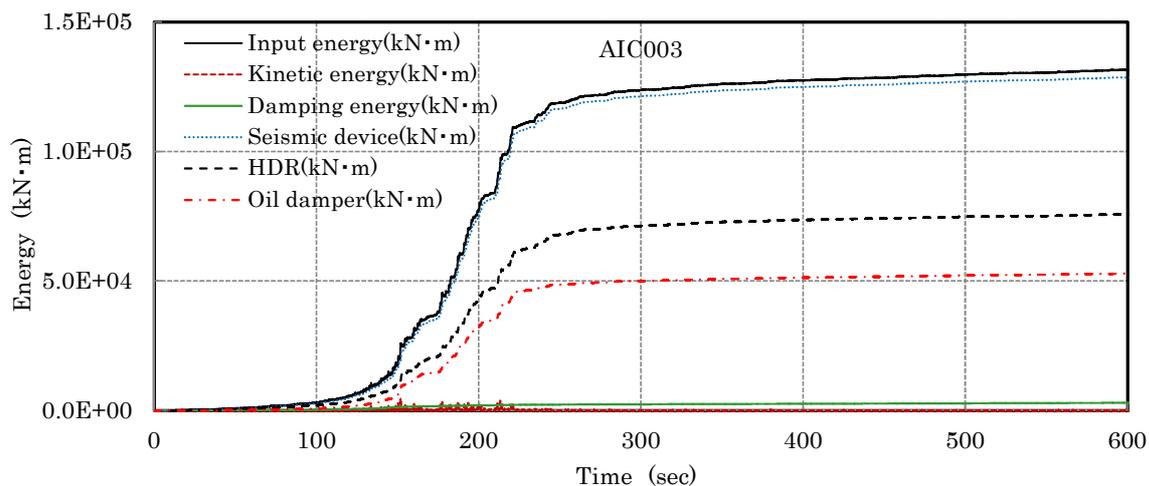


図 3.28 累積吸収エネルギー量 (CASE-2: 提案可変 OD\_南海 AIC003)

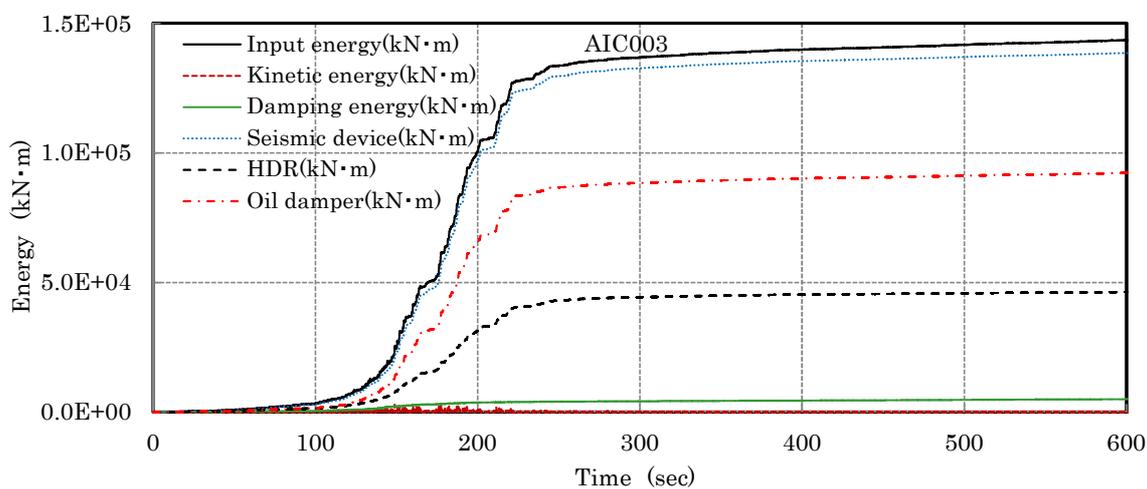


図 3.29 累積吸収エネルギー量 (CASE-3: 既存 OD\_南海 AIC003)

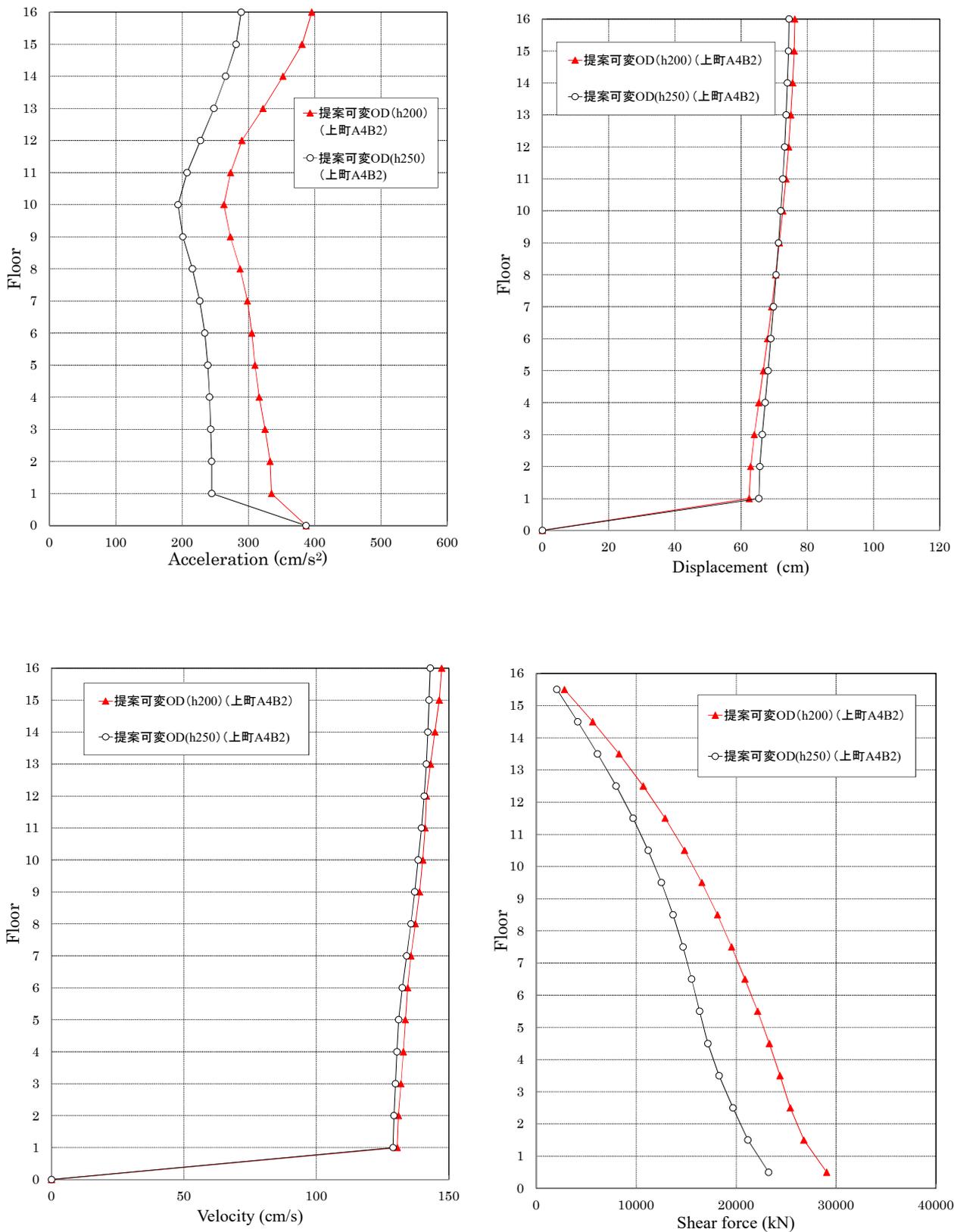


図 3.30 最大応答分布図  
(CASE-2・4 : 上町 A4B2)

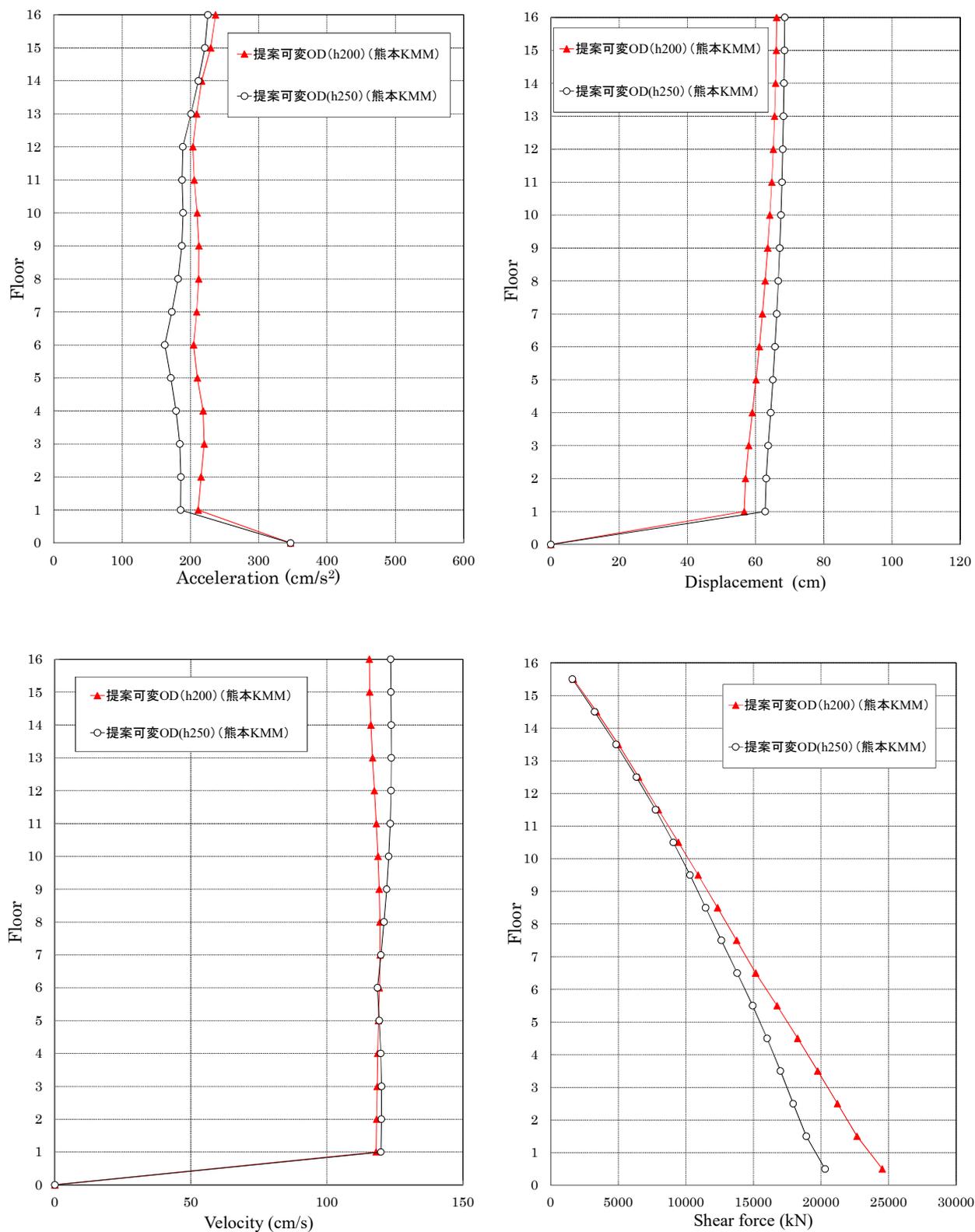


図 3.31 最大応答分布図  
(CASE-2・4 : 熊本 KMM)

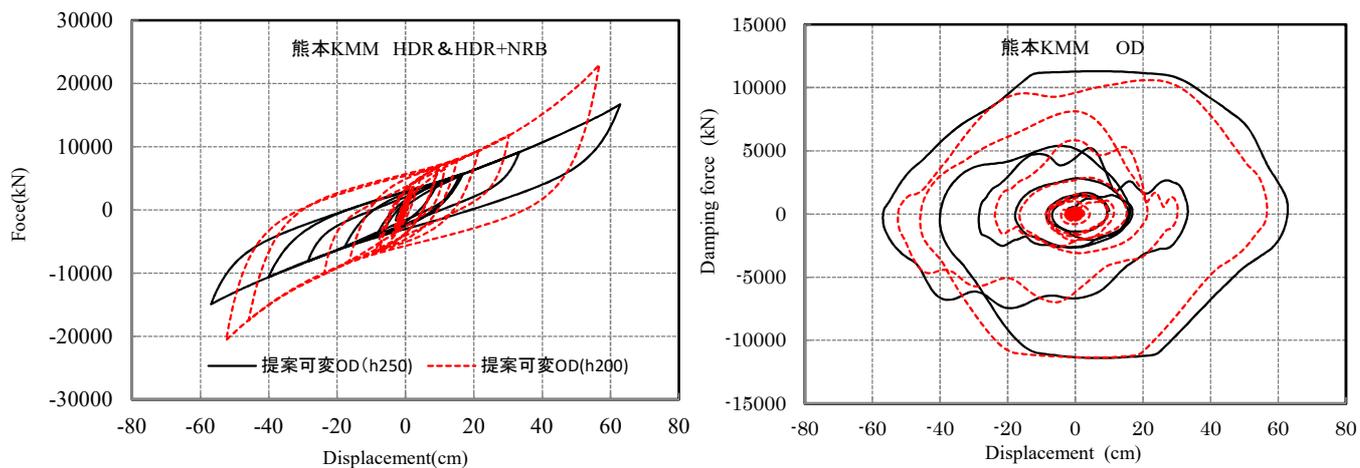


図 3.32 免震部材の履歴特性 (CASE2・4: 上町 A4B2)

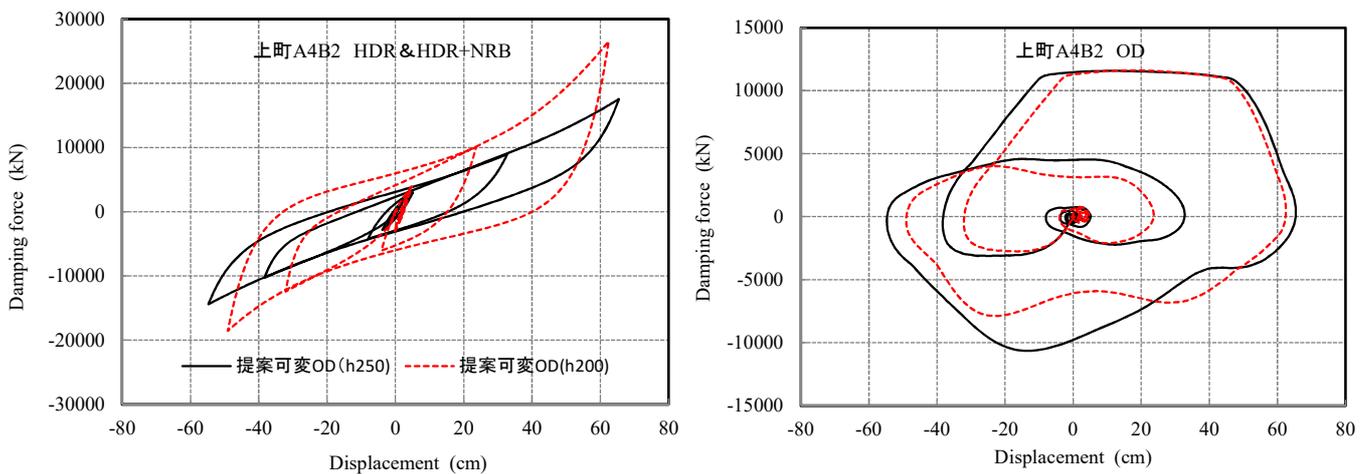


図 3.33 免震部材の履歴特性 (CASE2・4: 熊本 KMM)

### 3.5 まとめ

本章では、第2章で設計・製作し、試作機による性能確認試験と試験結果を踏まえた時刻歴応答解析による検証を行った。以下に示す検討結果より、本オイルダンパーは、設計領域では従来の免震構造と同等以上の性能を確保し、設計想定レベルを超える大振幅地震動においても変位抑制が可能であり、広範囲の入力地震動レベルに対して免震効果が確保できると結論付ける。

- (1) 15階建てRC造の基礎免震構造における時刻歴応答解析による効果を確認した結果、本オイルダンパーを追加設置することで、大振幅地震動に対して、従来の免震構造に比較して、応答加速度、応答変位、応答層せん断力に低減効果が現れている。
- (2) 標準的な設計用入力地震動（告示AW）においても、加速度応答の増加はみられず、既存のオイルダンパーよりも免震効果を発揮した。
- (3) 最適設計の免震システムとすることで、より免震効果の高い免震建築物が実現可能である。

## 第3章の参考文献

- 1) 日本建築学会：長周期地震動と建築物の耐震性，pp234-237
- 2) 国土交通省：超高層建築物等における南海トラフ沿い巨大地震による長周期地震動への対策について，2016  
[http://www.mlit.go.jp/report/press/house05\\_hh\\_000620.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000620.html)
- 3) 建築研究所：超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討-南海トラフ4連動地震による超高層・免震建物の応答解析-，建築研究資料 No.147，2013
- 4) 大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および設計法に関する研究会：大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および耐震設計指針，2015
- 5) 防災科学技術研究所：平成28年（2016年）熊本地震 K-NET/KiK-netの地表観測点で観測された強震動  
<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/quake/>
- 6) ブリヂストン：MVBR-0514/MVBR-0520（X0.6R シリーズ），2014
- 7) Kikuchi, M., Aiken, I. D. (1997) An analytical hysteresis model for elastomeric isolation bearings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, (26): 215-231
- 8) Kikuchi, M., Ishii K. Advanced hysteresis model of high-damping rubber bearings for seismic isolation. *Proceedings of the 7-th Structural Engineers World Congress*, 24-26 April 2019, Istanbul, Turkey.
- 9) 荻野伸行，露木保男，猪口敏一，中原学，山崎久雄：大振幅地震動対策用免震オイルダンパーの開発（その1）基本特性および効果の検証，日本建築学会学術講演梗概集，構造II，pp.409-410，2016.8
- 10) 中原学，荻野伸行，北川麻記，山口洋平：大振幅地震動対策用免震オイルダンパーの開発（その2，3），日本建築学会学術講演梗概集，構造II，pp.995-998，2017.8
- 11) 石原幸子，中原学：トリリニア型オイルダンパーの開発，KYB 技報，pp.45-49，2018.10
- 12) カヤバシステムマシナリー：カヤバ BDS 型オイルダンパー（BDS シリーズ）の長周期地震動に対する免震材料の性能変化について，pp.21-28，2017.7
- 13) Nobuyuki Ogino, Masaru Kikuchi, Masanari Okamoto: 'Study of High-performance Oil Dampers for Seismically Isolated Structures to Counter Extremely Strong Earthquake Ground Motions', 16th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Regulation of Dynamic Characteristics of Structures, Saint-Petersburg, Russia, July 1-6, 2019
- 14) 荻野伸行，菊地優，岡本真成，中原学：大振幅地震動に対する免震用多段速度依存型可変減衰オイルダンパーに関する研究，構造工学論文集，Vol.67B，pp.549-556，2021.3

## 第4章 オイルダンパーの繰り返し依存性を考慮した免震建物の地震 応答性状

### 4.1 概要

### 4.2 オイルダンパーの繰り返し依存性の概要

### 4.3 オイルダンパーの繰り返し依存性の解析手法

### 4.4 時刻歴応答解析による検討

### 4.5 まとめ

### 第4章の参考文献

## 第4章 オイルダンパーの繰り返し依存性を考慮した免震建物の地震応答性状

## 4.1 概要

設計想定を超える大振幅地震動に対する免震構造の過大变位対策は、3つの限界状態【擁壁機能の喪失】【免震機能の喪失】【建物機能の喪失】を想定した影響低減技術に分類されており<sup>1)</sup>、近年、建物機能喪失に対する影響低減技術の応答変位抑制法として、オイルダンパーの高性能化を図った様々な研究・開発が活発化している<sup>2)~5)</sup>。その対策の一つとして、筆者は、従来のオイルダンパーの減衰力特性を実現しているバルブ機能（調圧弁）を改良するのみで可変減衰を容易に実現できる、動作信頼性の高い、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを提案している。本オイルダンパーは、低速・中速・高速領域の3段階で減衰力特性を速度に応じて切り替える多段可変減衰としていることに特徴がある。設計領域（低速領域）では従来の免震効果を確保しつつ、大振幅地震動の領域（高速領域）で変位を抑制することにより擁壁衝突を回避することができるため、発生頻度が比較的高い中小地震から設計領域を超える地震動までのあらゆる地震入力レベルに対して、良好な免震効果を発揮することができる。このようにして、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーは、ダンパー増設に伴う、免震層の変位と上部構造の応答におけるトレードオフ関係を解決することを目指している<sup>6)~10)</sup>。

オイルダンパーは、一般的に繰り返し依存性が小さいことから、免震効果の向上、変位抑制や居住性改善などに使われることが多い。また、オイルダンパーの限界状態は、ストローク限界に達する限界変形と温度上昇に伴うシール材の耐熱限界温度により決まる。

長周期地震動による長時間・大変形の繰り返しに対する免震部材の性能変化は、時刻歴応答解析において必要に応じて考慮する必要がある。南海トラフ沿い巨大地震における基整促波の公表の際には、免震部材の繰り返し依存性の検証方法が示されている<sup>11),12)</sup>。代表的な免震部材（アイソレータ・ダンパー）の繰り返し依存性を表4.1に示す。オイルダンパーの繰り返し依存性は小さいが、限界性能に近い振幅での加振など、オイルの温度上昇が想定される場合は、その影響を確認しておく必要がある。従来のオイルダンパーの繰り返しによる性能変化は、時刻歴応答解析による累積吸収エネルギーをもとに簡易法や精算法でオイルダンパーの温度上昇を推定し、減衰係数の変化率を実験データと比較して検討されている<sup>13)~15)</sup>。一方、鉛プラグ入り積層ゴムや高減衰ゴム系積層ゴムは繰り返しに対する性能変化を詳細モデルで検討する方法が提案されているが、オイルダンパーは繰り返し依存性を時刻歴応答解析において、時々刻々と減衰係数を変動させて詳細に評価したものは、ほとんどない。

以上のオイルダンパーの繰り返し依存性の特性評価に関する現状に鑑みて、本研究では、OpenSees<sup>16)</sup>にオイルダンパーの繰り返し依存性を考慮した機能を新たに構築し、各免震部材の繰り返しによる性能変化を考慮した時刻歴応答解析について検討を行うことで、その有効性を示すとともに、オイルダンパーを採用する場合の詳細モデルによる検証法を提案する。

表 4.1 長周期地震動による免震部材の性能変化<sup>11)12)</sup>

| 免震部材   |                      | 繰り返し依存性   |
|--------|----------------------|---|
| アイソレータ | 天然ゴム系積層ゴム            | 繰り返し依存性は小さい   |
|        | 鉛プラグ入り積層ゴム           | 降伏荷重が低下する   |
|        | 高減衰ゴム系積層ゴム           | 等価剛性，等価粘性減衰定数が低下する  |
|        | 弾性すべり支承<br>[低摩擦，高摩擦] | 低摩擦の場合は，繰り返し依存性は小さい。<br>高摩擦の場合は，加振回数の増加に伴い摩擦係数が低下する             |
| ダンパー   | 鉛ダンパー                | 降伏荷重が低下する   |
|        | 鋼材ダンパー               | 降伏荷重が低下する   |
|        | オイルダンパー              | 繰り返し依存性は小さいが，限界性能に近い振幅での加振など，作動油の温度上昇が想定される場合は，その影響を確認しておく必要がある |
|        | 粘性ダンパー               | 減衰力が低下する。また，オイルダンパーと同様に，必要に応じ粘性体の温度上昇を考慮する                      |

#### 4.2 オイルダンパーの繰り返し依存性の概要

長周期地震動に対するオイルダンパーの繰り返し依存性による性能変化は，以下に示す2つの実機の繰り返し試験を基に設定する。

##### (1) オイルダンパーの長周期地震動に対する性能変化<sup>13)</sup>

オイルダンパーの長周期地震動に対する性能変化は，図 4.1 に示す最大減衰力 1000kN ( $C_1 : 2500\text{kN} \cdot \text{s/m}$ ,  $C_2 : 169.5\text{kN} \cdot \text{s/m}$ , 限界変形 $\pm 700\text{mm}$ ) のバイリニア特性の試験体を用いて，表 4.2 の繰り返し加力試験によって検討している。また，繰り返しによる性能変化率は，温度変化で  $20^\circ\text{C}$  に対する変化率を $\pm 10\%$ 以内，繰り返し加振変化で初期加振に対する変化率で $\pm 5\%$ 以内を規格値とした。長時間繰り返し試験は，変位振幅 $\pm 160\text{mm}$ ，周期 1.0~2.0s の加振として，変位振幅 $\pm 80\text{mm}$ の基本特性試験を適宜入れ，性能変化を確認している。なお，試験機能力の制限により連続加振不可のため，正弦波の間欠加振としている。

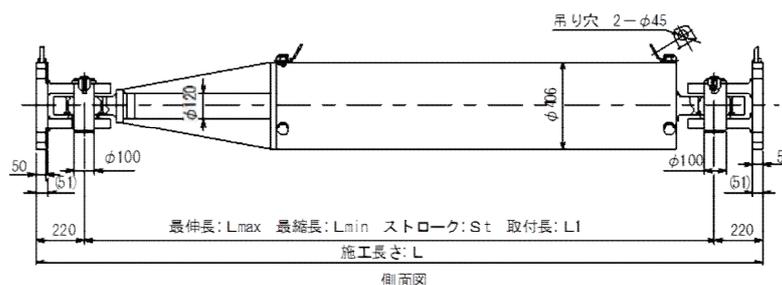


図 4.1 試験体形状と寸法

表 4.2 試験条件

|           | 加振条件                 | 周期(s) | 振幅(±mm) | 速度(m/s) |
|-----------|----------------------|-------|---------|---------|
| 基本特性試験    | ①(C <sub>1</sub> 領域) | 2.5   | 80      | 0.201   |
|           | ②(C <sub>2</sub> 領域) | 1.0   | 80      | 0.503   |
|           | ③(C <sub>2</sub> 領域) | 0.5   | 80      | 1.005   |
| 長時間繰り返し試験 | ④                    | 2.0   | 160     | 0.503   |
|           | ⑤                    | 1.0   | 160     | 1.005   |

基本特性試験の結果一覧を表 4.3, 4.4 に, 図 4.2~4.4 に基本特性試験の減衰力—変位関係を, 図 4.5~4.7 に試験結果の一例を示す。長時間繰り返し試験の前後で実施した, 基本特性試験の加振条件① (1次減衰領域) では, 累積距離 82m, シール材の耐熱限界温度の上限である表面温度 80°C のとき, 20°C での性能に対して等価減衰係数で 3.6%, 減衰力で 4.1%, 吸収エネルギーで 4.2% 低下した。また, 加振条件②, ③ (2次減衰領域) では減衰力で 8.6%, 吸収エネルギーで 8.7% 低下した。

表 4.3 基本特性試験結果(加振条件①)

| 累積距離 (m) | 表面温度 (°C) | 加振条件①<br>(1次減衰領域) |                |                |                  |
|----------|-----------|-------------------|----------------|----------------|------------------|
|          |           | 等価減衰係数 (kN・s/m)   | 圧縮減衰力 (kN)     | 伸側減衰力 (kN)     | 吸収エネルギー (kN・m)   |
| 0        | 20        | 2472.7            | 510            | 502            | 126.9            |
| 82       | 80        | 2382.9<br>(0.964) | 489<br>(0.959) | 483<br>(0.962) | 121.6<br>(0.958) |
| 設計規格値    |           | 2500              | 502.5          |                | —                |

表 4.4 基本特性試験結果(加振条件②③)

| 累積距離 (m) | 表面温度 (°C) | 加振条件②<br>(2次減衰領域) |                |                  | 加振条件③<br>(2次減衰領域) |                |                  |
|----------|-----------|-------------------|----------------|------------------|-------------------|----------------|------------------|
|          |           | 圧縮減衰力 (kN)        | 伸側減衰力 (kN)     | 吸収エネルギー (kN・m)   | 圧縮減衰力 (kN)        | 伸側減衰力 (kN)     | 吸収エネルギー (kN・m)   |
| 0        | 20        | 821               | 811            | 216.8            | 994               | 1023           | 261.8            |
| 82       | 80        | 756<br>(0.921)    | 750<br>(0.925) | 205.9<br>(0.950) | 909<br>(0.914)    | 940<br>(0.919) | 239.1<br>(0.913) |
| 設計規格値    |           | 831               |                | —                | 916.1             |                | —                |

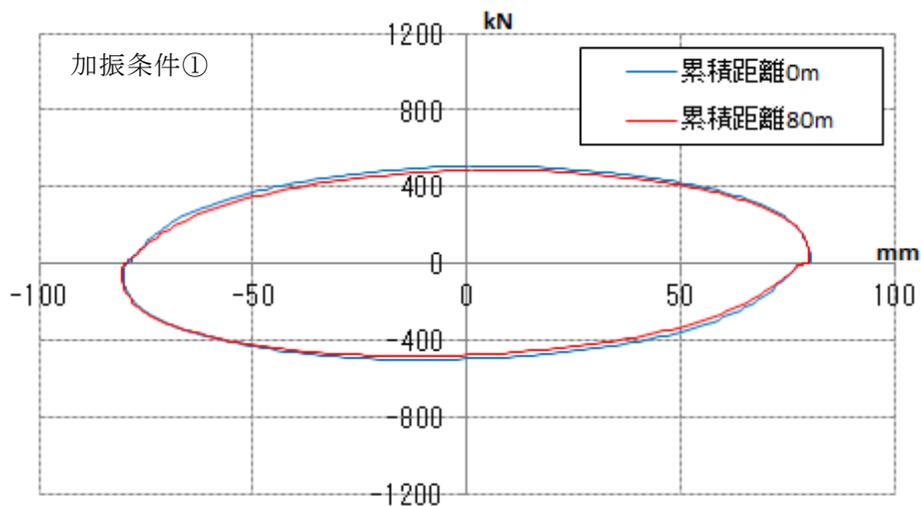


図 4.2 基本特性試験 減衰力-変位関係(加振条件①)

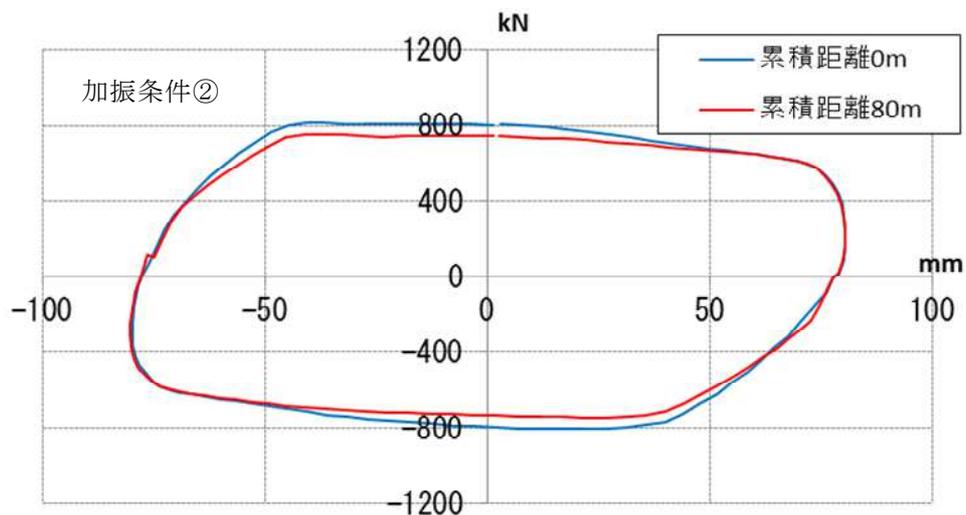


図 4.3 基本特性試験 減衰力-変位関係(加振条件②)

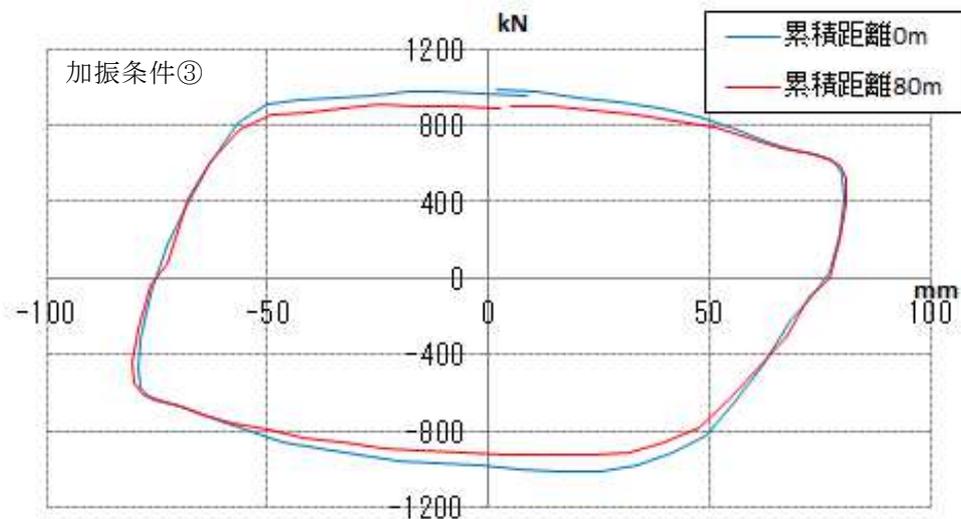


図 4.4 基本特性試験 減衰力-変位関係(加振条件③)

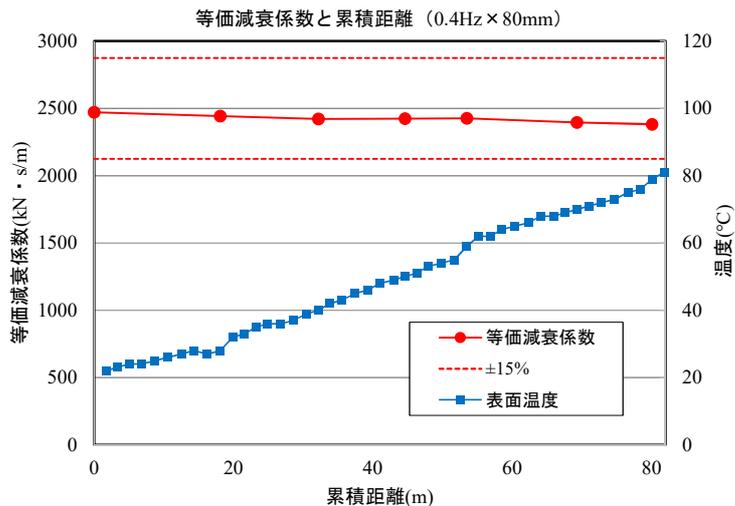


図 4.5 等価減衰係数と累積距離 (加振条件①)

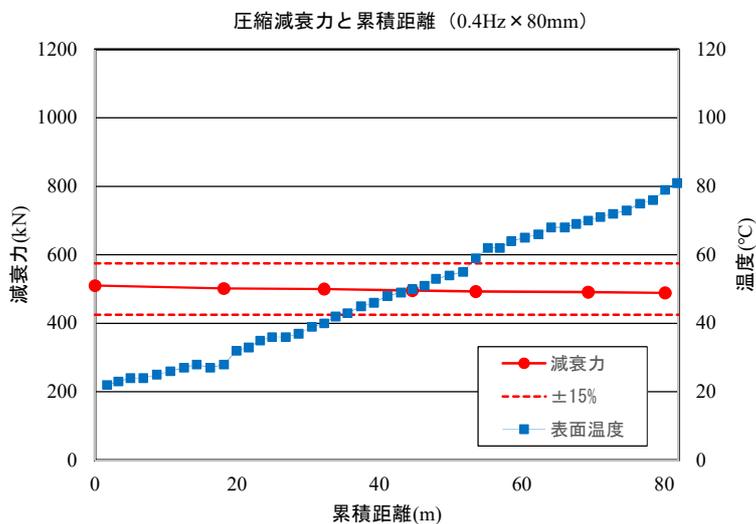


図 4.6 圧側減衰力と累積距離 (加振条件①)

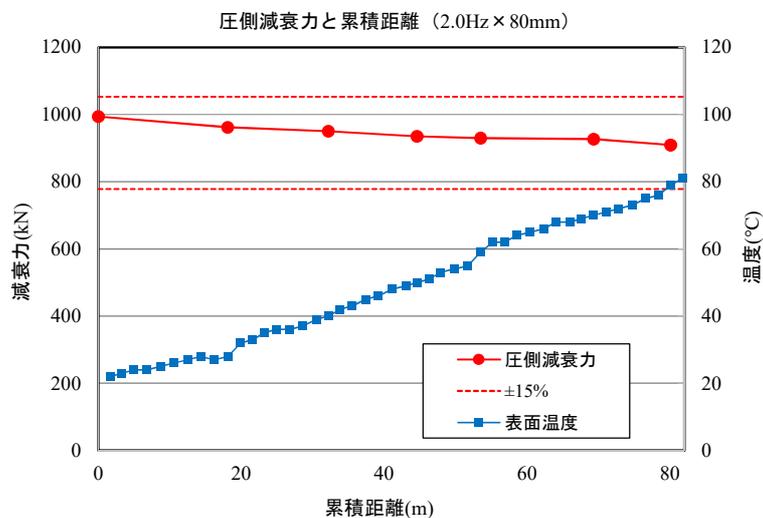


図 4.7 圧側減衰力と累積距離 (加振条件③)

(2) オイルダンパーの耐久性試験<sup>14)</sup>

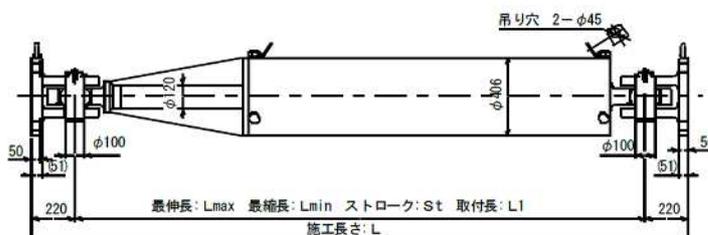
オイルダンパーは、材料認定<sup>16)</sup>にあたり、機種毎の耐久性能試験（加振回数 1000 回、累積距離 320m）および温度依存性試験（-20℃～80℃）を実施しており、各温度による等価粘性減衰係数を設定している。試験は表 4.5 に示す、リニア特性の 3 機種であり、加力試験条件は、正弦波 1.0Hz、±80mm、0.5m/s である。BDS120 の試験前後の履歴特性を図 4.8 に、10℃毎の温度性能変化を表 4.6、図 4.9 に示す。

耐久性試験前後の等価粘性減衰係数の変化率は-2.3%であり、変化率規格値±5%以下となっている。また、温度性能変化も最大 5.6%であり、変化率規格値±10%以内となっている。

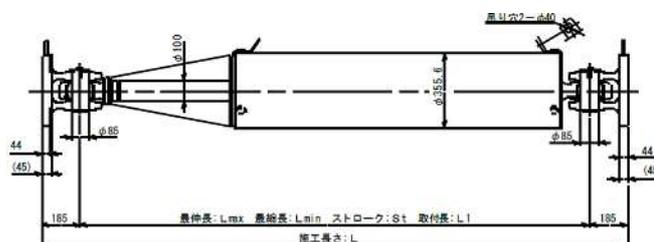
表 4.5 試験体と仕様

| No. | 機種             | 最大減衰力 (kN) | 限界速度 (m/s) | 等価粘性減衰係数 (kN・s/m) |
|-----|----------------|------------|------------|-------------------|
| 1   | BDS1201400-L-4 | 625        | 1.25       | 500               |
| 2   | BDS1001400-L-4 | 375        | 1.25       | 300               |
| 3   | BDS901100-L-1  | 500        | 1.25       | 400               |

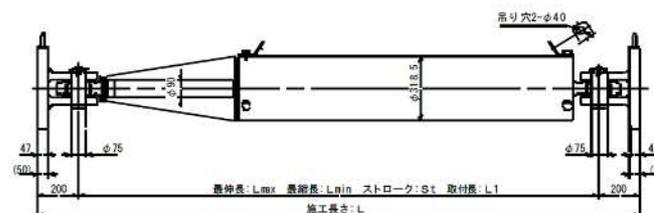
BDS1201400-L-4



BDS1001400-L-4



BDS901100-L-1



| 試験前の等価粘性減衰係数(kN・s/m) | 試験後の等価粘性減衰係数(kN・s/m) | 性能変化率(%) |
|----------------------|----------------------|----------|
| 491                  | 483                  | -2.3     |

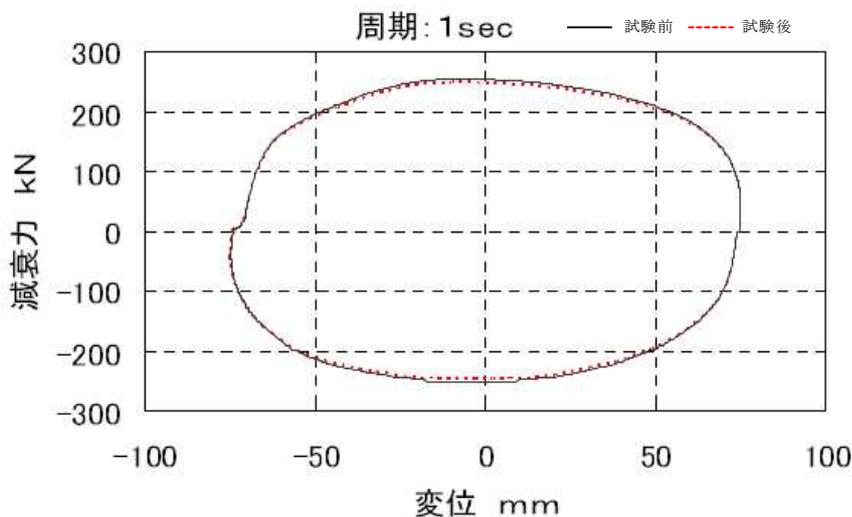


図 4.8 試験前後の減衰性能変化(BDS120)

表 4.6 温度性能変化(BDS120)

| 温度(°C) | 等価粘性減衰係数(kN・s/m) | 変化率(%) |
|--------|------------------|--------|
| -20    | 523              | 5.6    |
| -10    | 509              | 2.7    |
| 0      | 503              | 1.6    |
| 10     | 500              | 0.8    |
| 20     | 496              | 0.0    |
| 30     | 493              | -0.6   |
| 40     | 491              | -0.9   |
| 50     | 489              | -1.4   |
| 60     | 486              | -1.9   |
| 70     | 485              | -2.1   |
| 80     | 484              | -2.4   |

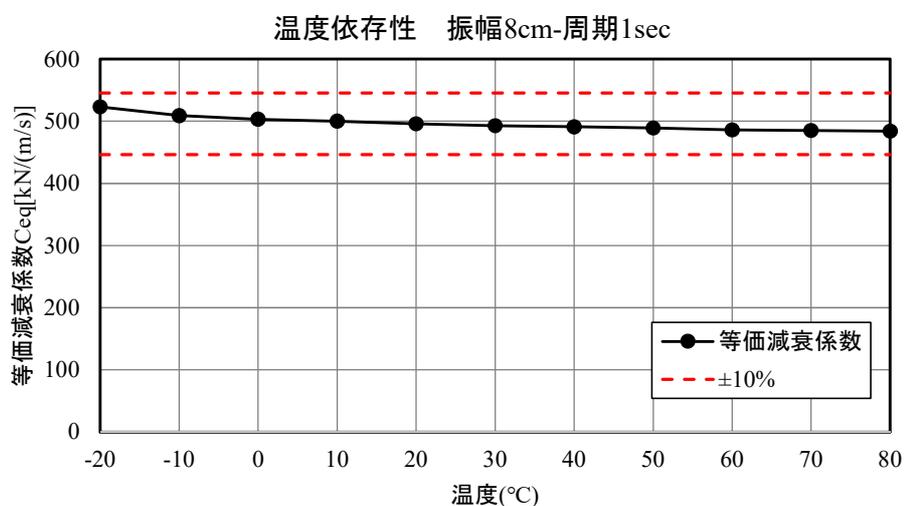


図 4.9 等価減衰係数と温度の関係(BDS120)

(3) 繰り返し依存性の特性設定

温度上昇に伴う等価粘性減衰定数の変化率として下記の特性①および②を設定し、後述する時刻歴応答解析で使用する。

- ・ 特性①：BDS120の実験結果を用いて、-20℃から80℃までの温度に対し表4.6の変化率を適用する。
- ・ 特性②：-20℃で+10%、80℃で-10%となる変化率を適用する。

提案している多段速度依存型可変減衰オイルダンパーはBDS120シリーズと同じ機種である。しかし、特性①を同定したサンプル数が少なくリニア特性であること、また、バイリニア特性の繰り返し試験との変化率が僅かに異なることを考慮して特性②を設定した。これら2種類の変化率と、表4.5の3機種の実験結果を比較して図4.10に示す。特性②は、どの機種のオイルダンパーでも包絡できる安全側の設定範囲となる。

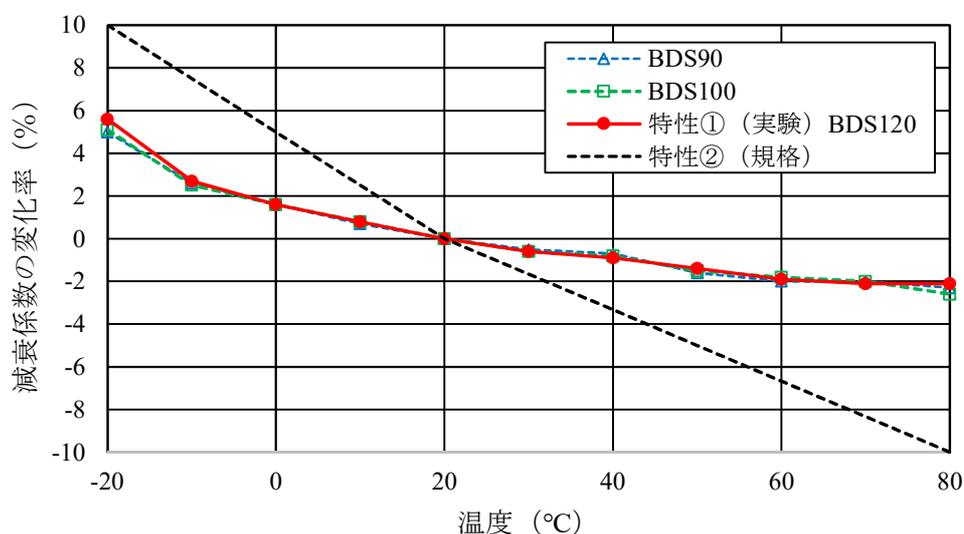


図 4.10 等価減衰係数の変化率と温度の関係

### 4.3 オイルダンパーの繰り返し依存性の解析手法

#### (1) 解析手法

オイルダンパーは、前節の実験結果のように、繰り返しの影響により、オイルの温度が上昇することで減衰係数に変化が生じる。これは、入力エネルギーを熱エネルギーによって消散させるためである。従来のオイルダンパーの温度上昇の推定法は、放熱を考慮する精算法と放熱を考慮しない簡易法がある。

ここで、オイルダンパーの減衰力を  $F_d$ [kN]、入力速度を  $\dot{x}$  [m/s] とすると、時刻  $\tau$ [s] に沿った積分により、累積吸収エネルギー  $E_{all}$ [kJ] (= [kJ]) は(4.1)式となる。

$$E_{all} = \int F_d \dot{x} \cdot d\tau \quad (4.1)$$

また、累積吸収エネルギー  $E_{all}$  がすべて熱エネルギーに変換されるものとする、発熱量  $Q$ [kJ/s] との関係は(4.2)式となる。

$$E_{all} = \int Q \cdot d\tau \quad (4.2)$$

オイルダンパーの熱容量  $C$ [kJ/°C] は、式(4.3)で表すことができる。

$$C = V_s \rho_s C_s + V_o \rho_o C_o \quad (4.3)$$

ここで、鉄鋼部品と作動油に分類したそれぞれの体積を  $V_s$  および  $V_o$ [m<sup>3</sup>]、密度を  $\rho_s$  および  $\rho_o$  [kg/m<sup>3</sup>]、比熱を  $C_s$  および  $C_o$  [kJ/(kg·°C)] とする。これらを用いて、オイルダンパーの温度  $t$  [°C] は、精算法と簡易法で以下のように計算できる。

#### 【精算法（放熱を考慮）】

オイルダンパーの温度  $t$  の時刻歴変化は、式(4.1)～(4.3)を用いて式(4.4) の微分方程式を逐次数値積分することで得られる。

$$t_{i+1} = t_0 + \int (Q d\tau - U(t_i - t_a) F d\tau) / C \quad (4.4)$$

ここに、 $t_0$  : 初期温度[°C]、 $t_a$  : 周囲温度[°C]、 $U$  : 熱伝達係数[kJ/(m<sup>2</sup>·s·°C)]、 $F$  : 表面積[m<sup>2</sup>]である。

【簡易法（放熱を無視）】

オイルダンパーの温度  $t$  は式(4.5)となる。

$$t = t_0 + E_{all} / C \quad (4.5)$$

オイルダンパーの温度  $t$  は、精算法の(4.4)式で温度上昇の時刻歴が得られることから、時刻歴応答解析の最終結果としてオイルダンパーの最大温度上昇をとらえることはできるが、応答解析での温度による減衰力特性の変化は、考慮されていない。

温度上昇による等価粘性減衰係数の変化率は機種ごとに実験データから求められていることから、この変化率から時刻歴応答解析において時々刻々と温度に応じて、等価粘性減衰係数を変化させることで繰り返し依存性を考慮する。解析フローを図 4.11 に示す。

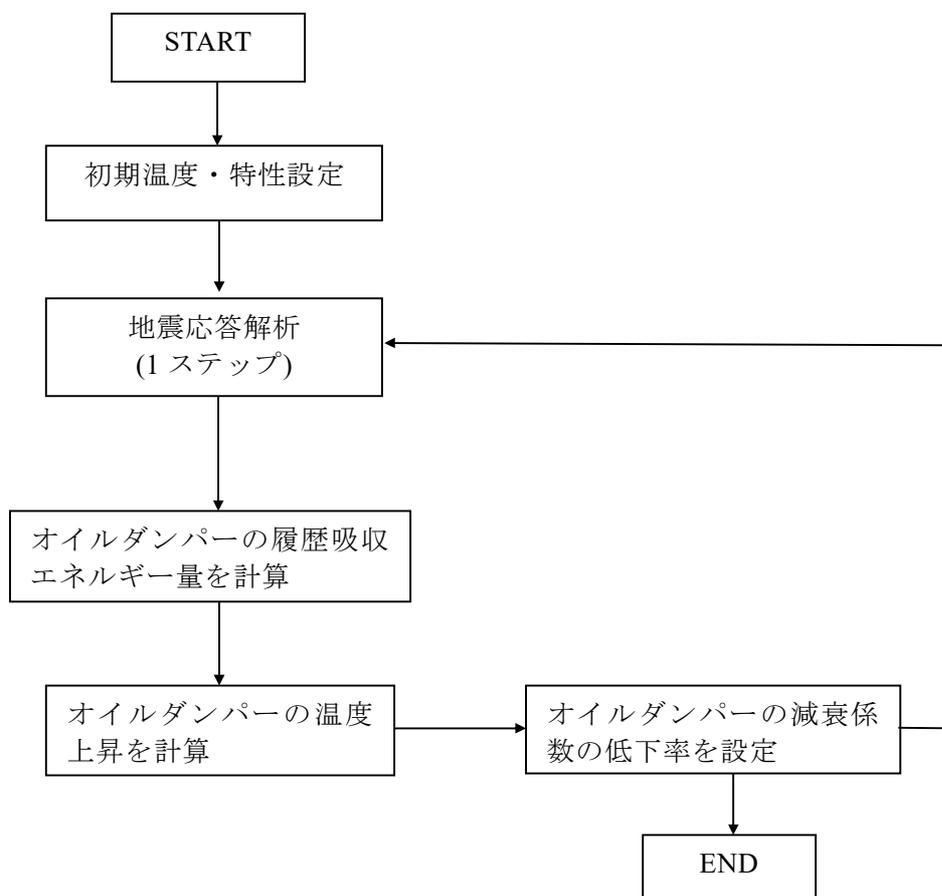


図 4.11 解析フロー

(2) 免震用オイルダンパーの温度上昇実大試験との比較

実大免震用オイルダンパーを使用した繰り返し加振による温度上昇試験結果を用いて、本解析手法の妥当性を検証する。

1) 試験体および試験方法

試験体は、以下に示す最大減衰力 1000kN の実機免震用オイルダンパーを用いて、表 4.7 の加振条件で実施している。

【試験体】

形式：BDS1201400-B1

最大減衰力：1,000kN                      ストローク：±700mm

1次減衰係数：2500kN・s/m            2次減衰係数：169.5kN・s/m

リリース速度：0.32m/s

表 4.7 加振条件

| 加振条件 | 振動数(Hz) | 振幅(±mm) | 速度(m/s) | 備考         |
|------|---------|---------|---------|------------|
| ①    | 0.4     | 80      | 0.201   | 1次減衰域特性計測用 |
| ②    | 1.0     | 80      | 0.503   | 2次減衰域特性計測用 |
| ③    | 2.0     | 80      | 1.005   | 2次減衰域特性計測用 |
| ④    | 0.5     | 160     | 0.503   | 温度上昇用      |
| ⑤    | 1.0     | 160     | 1.005   | 温度上昇用      |

2) 試験結果と解析結果の比較

精算法による温度上昇シミュレーションに使用したパラメータを表 4.8 に、解析結果と温度上昇試験結果の比較を図 4.12 に示す。

免震用実大オイルダンパーを使用した温度上昇試験結果に対してシミュレーション結果は良い一致を示していることから、本解析手法の妥当性が確認できる。

表 4.8 シミュレーションに使用したパラメータ

|       |      |          |        |                               |
|-------|------|----------|--------|-------------------------------|
| 鉄鋼部品  | 体積   | $V_s$    | 0.1227 | [m <sup>3</sup> ]             |
|       | 密度   | $\rho_s$ | 7850   | [kg/m <sup>3</sup> ]          |
|       | 比熱   | $C_s$    | 0.465  | [kJ/kg・°C]                    |
|       | 表面積  | $F$      | 3.158  | [m <sup>2</sup> ]             |
| 作動油   | 体積   | $V_o$    | 0.154  | [m <sup>3</sup> ]             |
|       | 密度   | $\rho_o$ | 892    | [kg/m <sup>3</sup> ]          |
|       | 比熱   | $C_o$    | 1.821  | [kJ/kg・°C]                    |
| 温度    | 初期温度 | $t_o$    | 20     | [°C]                          |
|       | 周囲温度 | $t_a$    | 13     | [°C]                          |
| 熱伝達係数 |      | $U$      | 17.6   | [(kJ/(h・m <sup>2</sup> ・°C))] |

オイルダンパーの表面温度

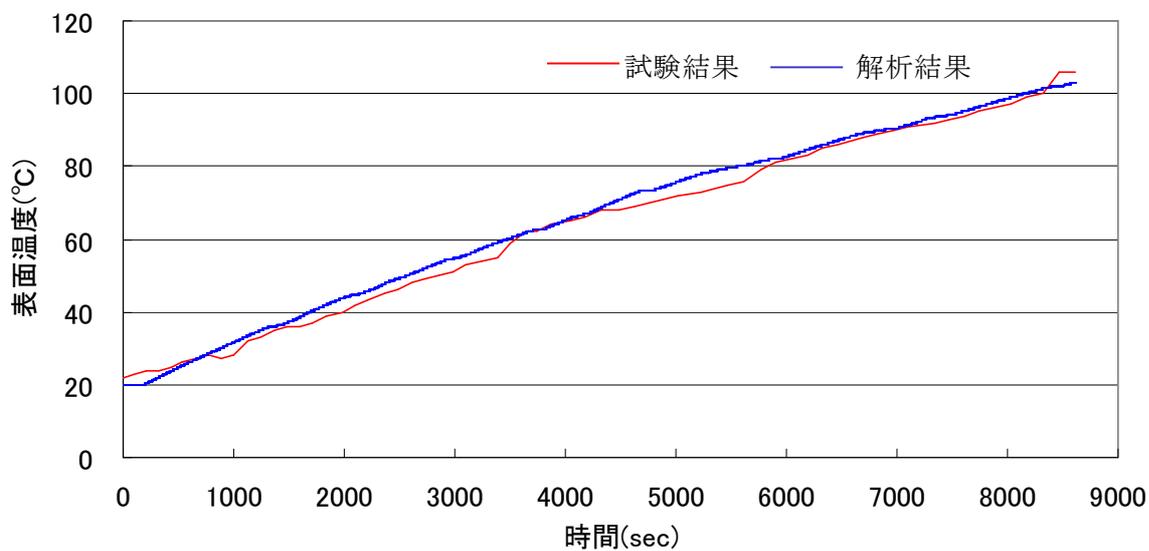


図 4.12 シミュレーション結果と試験結果の比較<sup>13)</sup>

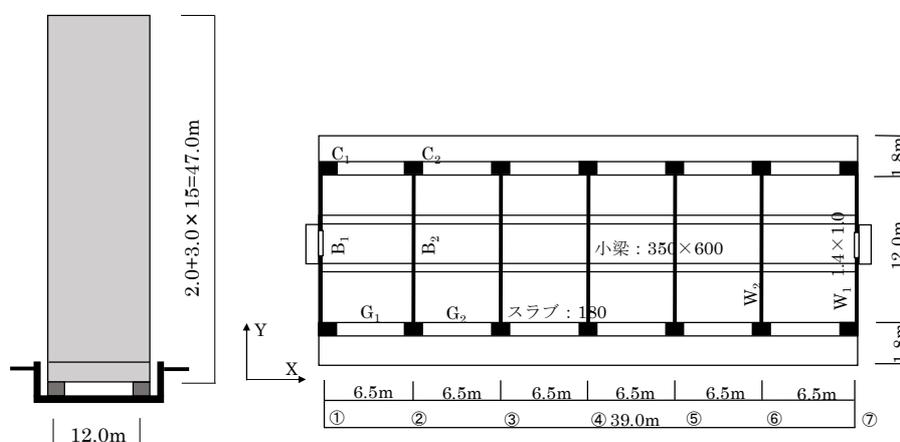
#### 4.4 時刻歴応答解析による検討

大振幅地震動に対する多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの繰り返し依存性を考慮した場合における免震性能を検証するために、3.3節で検討した15階建て試設計免震建物を用いた地震応答解析を行う。

##### (1) 検討建物

検討対象建物は、15階建てRC造の基礎免震構造<sup>17)</sup>とし、免震部材（支承材）は高減衰ゴム系積層ゴム(G6)<sup>18)</sup>または鉛プラグ入り積層ゴムとする。また、オイルダンパーは、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを採用する。

建物総重量は123,186kN、等価固有周期は、高減衰ゴム系積層ゴムで、4.09s（40cm変形時）、免震層の降伏せん断力係数は0.03、鉛プラグ入り積層ゴムの場合で、それぞれ、3.93s（40cm変形時）、0.037である。図4.13に検討建物概要を示す。



| 免震部材       | 仕様  | 基数       |
|------------|---|----------|
| 高減衰ゴム系積層ゴム | φ1100 (G6), ゴム総厚さ: 200mm, せん断弾性率: 0.620N/mm <sup>2</sup>            | 14       |
| 鉛プラグ入り積層ゴム | φ1100 (G4), ゴム総厚さ: 200mm, 鉛径: 220mm, せん断弾性率: 0.385N/mm <sup>2</sup> | 14       |
| オイルダンパー    | 多段速度依存型可変減衰オイルダンパー, 最大減衰力: 1200kN                                   | 各方向 10 基 |

図 4.13 検討建物 (RC 15/0)

(2) 入力地震動

検討用地震波としては、長周期地震動として、南海トラフ沿い巨大地震<sup>19),20)</sup>を想定した大阪地区と中部地区の4波(OS1, CH1, OSKH02, AIC003)を、内陸直下型地震は、上町断層(UMTA4B2EW1)<sup>21)</sup>と熊本地震におけるK-NET一宮EW(2016/4/16:KMM004EW)<sup>22)</sup>の2波の合計6波とする。地震波一覧を表4.9に、擬似速度応答スペクトルおよびエネルギースペクトルを図4.14, 図4.15に示す。

表 4.9 地震波一覧

| 地震波                    | 略称          | 最大加速度<br>(cm/s <sup>2</sup> ) | 最大速度<br>(cm/s) | 継続時間<br>(s) |
|------------------------|-------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| 南海トラフ(OS1)             | 南海 (OS1)    | 263.0                         | 45.9           | 655.3       |
| 南海トラフ(CH1)             | 南海 (CH1)    | 265.0                         | 59.4           | 655.3       |
| 南海トラフ4連動<br>(OSKH02)   | 南海 (OSKH02) | 133.0                         | 58.0           | 640.0       |
| 南海トラフ4連動<br>(AIC003)   | 南海 (AIC003) | 545.4                         | 68.6           | 640.0       |
| 上町断層<br>(UMTA4B2EW1)   | 上町 (A4B2)   | 387.0                         | 97.4           | 41.0        |
| 2016熊本地震<br>(KMM004EW) | 熊本 (KMM)    | 346.7                         | 80.5           | 300.0       |

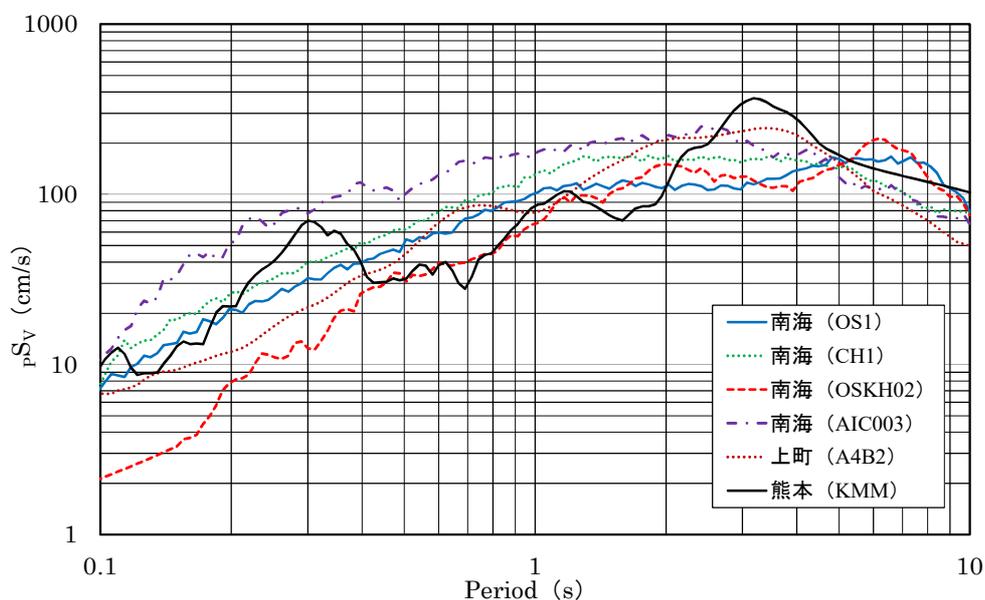


図 4.14 擬似速度応答スペクトル (h=0.05)

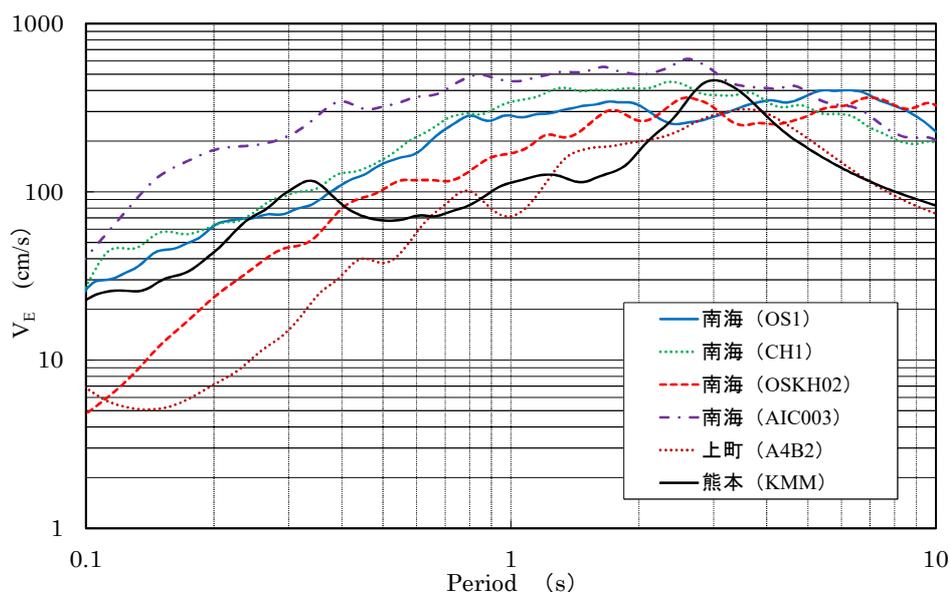


図 4.15 エネルギースペクトル (h=0.10)

### (3) 解析モデルおよび検討ケース

#### 1) 解析モデル

解析モデルは1柱列多質点系モデルとし、上部構造は線形とする。また、高減衰ゴム系積層ゴムと鉛プラグ入り積層ゴムは、それぞれ変位履歴積分モデル<sup>23)</sup>と Kikuchi-Aiken<sup>24)</sup>モデルに熱・力学的連成挙動<sup>25),26)</sup>を考慮した解析モデルを適用する。また、上部構造の減衰は、免震層固定時に対して、1次モードで減衰定数2%の瞬間剛性比例型とする。なお、地震応答解析の方向は、建物長辺方向(X方向)とした。

#### a) 高減衰ゴム系積層ゴムの解析モデル

高減衰ゴム系積層ゴムの復元力モデルは、変形履歴型積分則を用いて、G6の材料パラメータを採用している。熱伝導解析では、積層ゴムを分割した各セルでの熱エネルギーの移動を考慮しゴム部の体積平均温度を決定する。モデルは、2次元軸対称モデルとし、高さ方向の上半分を解析対象とする。熱・力学的連成連成解析のフローチャートを図4.16に、高減衰ゴム系積層ゴムの解析モデルを図4.17に示す。また、 $G_{eq}$ ,  $h_{eq}$ ,  $u$ の温度による変化は、修正バイリニアでは、図4.18で定義されるが、変位履歴積分モデルでは、図4.19に示す  $F_{Te}$  (弾性成分の変化率)と  $F_{Tp}$  (履歴成分の変化率)で表している。

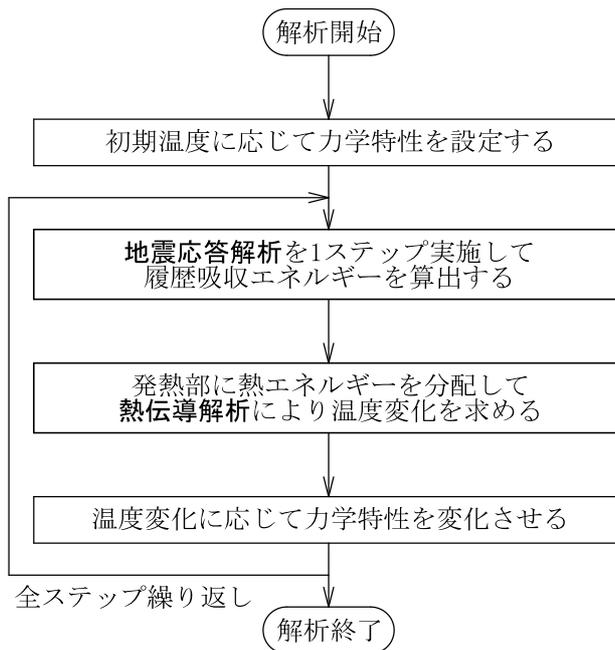


図 4.16 熱・力学的連成連成解析のフローチャート

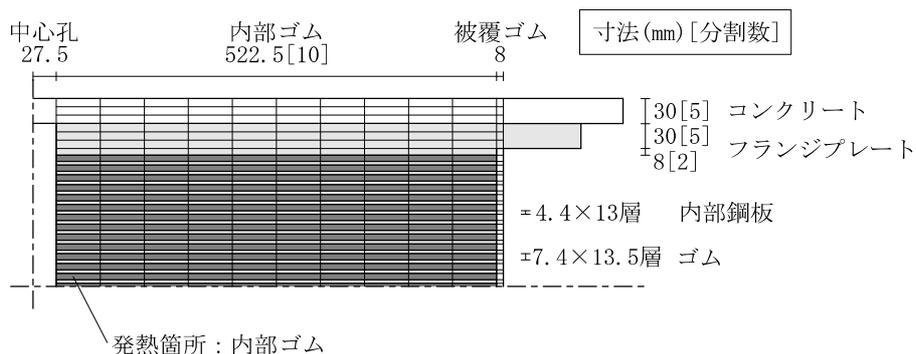


図 4.17 高減衰ゴム系積層ゴムの解析モデル

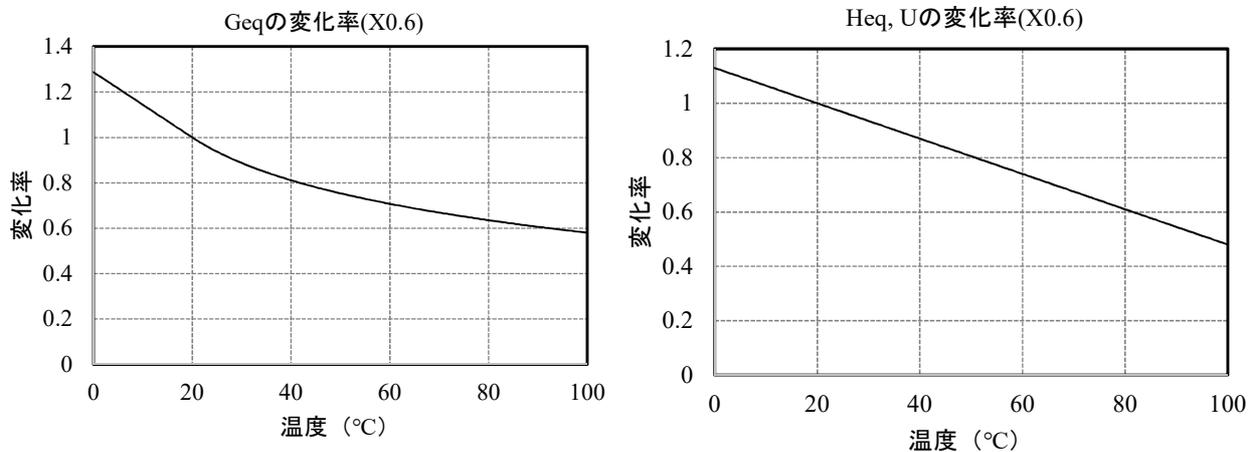


図 4.18 高減衰ゴム系積層ゴムの特性変化 (修正バイリニア\_G6)

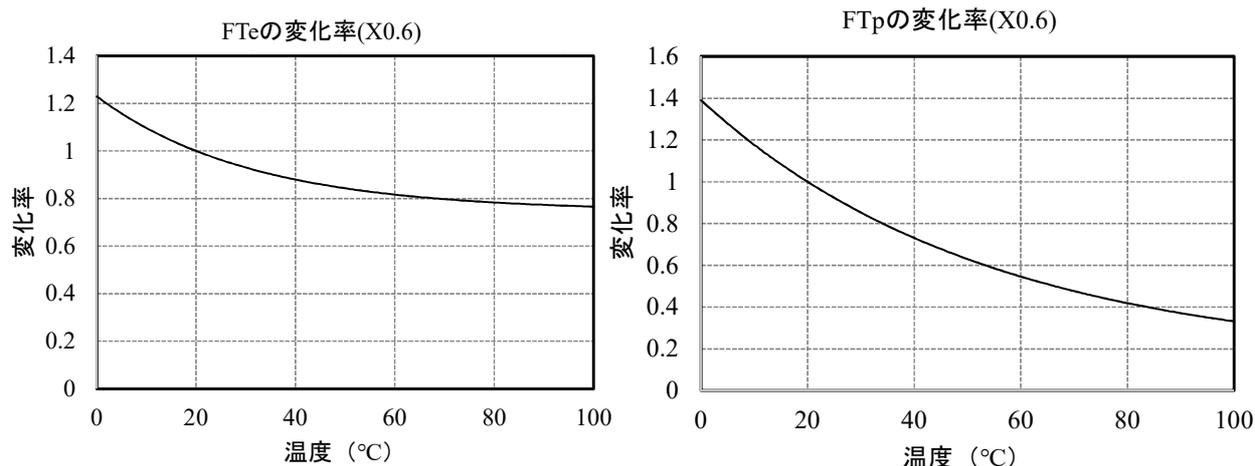


図 4.19 高減衰ゴム系積層ゴムの特性変化 (変位履歴積分モデル\_G6)

b) 鉛プラグ入り積層ゴムの解析モデル

鉛プラグ入り積層ゴムの復元力モデルは、Kikuchi-Aiken モデルに熱・力学的連成挙動を考慮した解析モデルを採用している。履歴吸収エネルギーが鉛部分の熱エネルギーに変換されることから、鉛プラグ部が温度上昇を受けた場合の特性変化を (4.6) 式の鉛温度～鉛降伏応力関係として鉛温度に応じて鉛降伏応力を低下させる。図 4.20 に提案式の鉛温度～降伏応力の関係を示す。また、鉛プラグ入り積層ゴムの解析モデルを図 4.21 に示す。なお、解析フローは図 4.16 と同様である。

$$\tau = \tau_0 \{ 1 - (T/T_L)^{\alpha_T} \} \quad , \quad \alpha_T = 0.4 + 0.25 \cdot (T/T_L) \quad (4.6)$$

$$\tau_0 = 15.0 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad , \quad T_L = 327.5 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

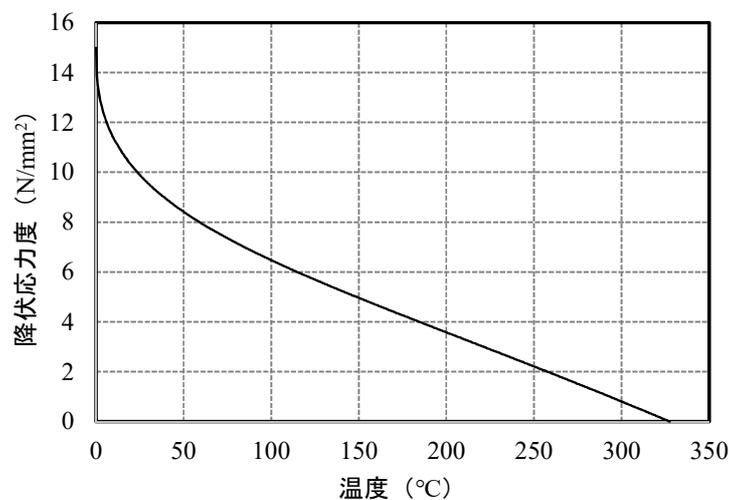


図 4.20 鉛温度～降伏応力関係

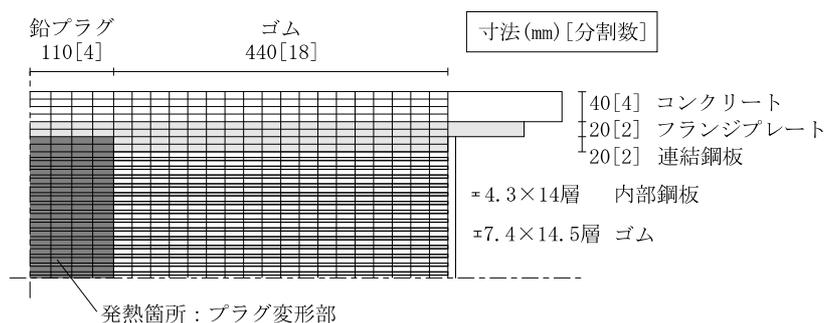


図 4.21 鉛プラグ入り積層ゴムの解析モデル

c) オイルダンパーの解析モデル

オイルダンパーは、図 4.22 に示す多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの F-V 特性とし、装置剛性を考慮した Maxwell 型モデルとする。

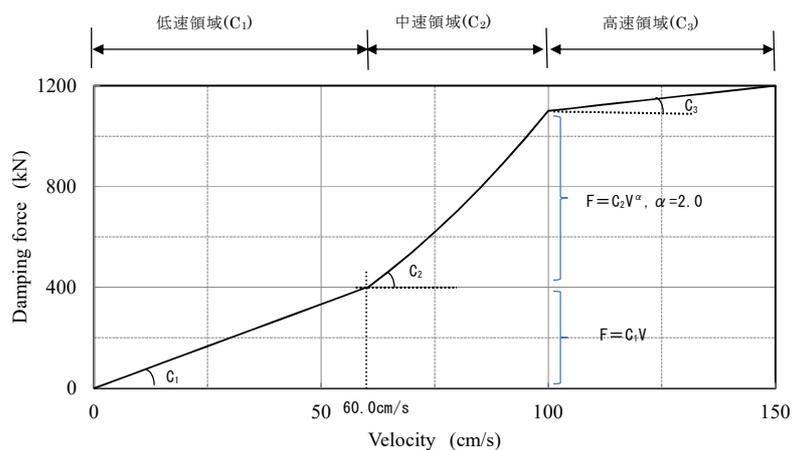


図 4.22 多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの減衰力特性

2) 検討ケース

検討は表 4.10 に示す 10 ケースについて実施した。CASE-1~4 は、オイルダンパーが無い場合の高減衰ゴム系積層ゴム，鉛プラグ入り積層ゴムを単体で用いた免震構造であり，支承材の繰り返し依存性の有無（熱考慮・熱非考慮）を確認する。CASE5, 6 は，繰り返し依存性を考慮しない，高減衰ゴム系積層ゴムと提案している可変減衰オイルダンパー，鉛プラグ入り積層ゴムと可変減衰オイルダンパーをそれぞれ採用したケースである。これに対して，CASE-7~10 は，各積層ゴム支承の繰り返し依存性と可変減衰オイルダンパーの繰り返し依存性を考慮した検討ケースであり，4.2 節(3)および図 4.10 で設定した，2 種類の温度と等価粘性減衰係数の変化率（特性①または②）について比較検討を行った。

表 4.10 検討ケース一覧

|         | 略称          | 免震部材                    | 繰り返し依存性の有無 |
|---------|-------------|-------------------------|------------|
| CASE-1  | HDR 熱非考慮    | HDR (14 基)              | 無          |
| CASE-2  | LRB 熱非考慮    | LRB (14 基)              | 無          |
| CASE-3  | HDR 熱考慮     | HDR (14 基)              | 有          |
| CASE-4  | LRB 熱考慮     | LRB (14 基)              | 有          |
| CASE-5  | HDR+OD 熱非考慮 | HDR (14 基) +OD (10 基) ※ | 無          |
| CASE-6  | LRB+OD 熱非考慮 | LRB (14 基) +OD (10 基) ※ | 無          |
| CASE-7  | HDR+OD 熱考慮① | HDR (14 基) +OD (10 基) ※ | 有 (特性①)    |
| CASE-8  | LRB+OD 熱考慮① | LRB (14 基) +OD (10 基) ※ | 有 (特性①)    |
| CASE-9  | HDR+OD 熱考慮② | HDR (14 基) +OD (10 基) ※ | 有 (特性②)    |
| CASE-10 | LRB+OD 熱考慮② | LRB (14 基) +OD (10 基) ※ | 有 (特性②)    |

HDR：高減衰ゴム系積層ゴム (G6)

LRB：鉛プラグ入り積層ゴム(G4)

OD：多段速度依存型可変減衰オイルダンパー

※オイルダンパーは，長辺方向 (X 方向) の基数

(4) 解析結果

1) 繰り返し依存性による影響

各入力地震動に対する免震層の最大応答変位，最大応答速度，1 階の最大応答層せん断力，上部構造の最大応答加速度を図 4.23, 24 に示す。また，CASE-1~8 の最大応答分布図および免震部材の履歴特性を図 4.25~図 4.58 に示す。なお，CASE-2, 4 のオイルダンパーが無い鉛プラグ入り積層ゴムの内陸直下型地震は，応答変位が限界歪 $\gamma=400\%$ 歪を大きく超える (1m 程度) ことから除外している。

鉛プラグ入り積層ゴムの降伏荷重(Qd)の低下率を図 4.59 に，オイルダンパーの温度変化と累積吸収エネルギー量を図 4.60, 4.61 に示す。

オイルダンパーが無い場合の応答は、高減衰ゴム系積層ゴムでは、免震層の変位は内陸直下型地震の上町（A4B2）で最大 79.7cm であり、限界変形 80cm ( $\gamma=400\%$ ) を超えていないが、繰り返し依存性を考慮した場合は、84.9cm に増加し、限界変形を上回る。また、熊本（KMM）では、それぞれ 86.5cm（熱非考慮）、91.8cm（熱考慮）であり、双方とも限界変形を上回る。これに、可変減衰オイルダンパーを付加した場合は、55~61cm 程度になり、24%変位を低減できる。

オイルダンパーが無い、鉛プラグ入り積層ゴムの場合は、高減衰ゴム系積層ゴムより、より顕著な傾向が表れており、内陸直下型地震の2波とも1m程度の変位となり、解析の適用限界をはるかに超えており、計算除外している。これに可変減衰オイルダンパーを付加した場合は、60~65cm 程度に低減できる。

次に、可変減衰オイルダンパーを付加したCASE-5~8では、南海トラフ沿い地震の南海（OS1）、南海（CH1）、南海（OSKH02）は、オイルダンパーの変位抑制効果により、免震層の応答変位が30cm以下となっている。

鉛プラグ入り積層ゴムのCASE-6、8において南海（OS1）、南海（CH1）で7~15%程度、免震層変位が増加し、上部構造の応答も僅かに変化しているが、オイルダンパーの温度上昇は2.5~4.9°Cであり、等価粘性減衰係数の変化率もほとんど生じていない。また、各積層ゴムの履歴減衰の低下をオイルダンパーが補うためオイルダンパーの応答速度は低速領域で上昇し、履歴ループは楕円形状に大きくなる。これに対して、累積吸収エネルギー量が最も大きい南海トラフ沿い地震の南海（AIC003）では、免震層の変位で12%程度の最大応答値の差が現れているが、上部構造の応答の差はほとんどない。

なお、加速度応答分布図において、南海（OSKH02）の南海トラフ地震については、大阪湾沿岸部の此花の6秒付近に卓越周期がある長周期地震動であることから、加速度入力レベルは小さいが、免震効果は他の地震動より発揮しにくい。

各積層ゴム支承の履歴ループを比較すると鉛プラグ入り積層ゴムの方が、高減衰ゴム系積層ゴムより、温度により降伏荷重が60%程度、低下するため形状変化が僅かに大きい。また、オイルダンパーの履歴ループも南海（OS1）同様に、鉛プラグ入り積層ゴムの履歴減衰の低下に伴い、中速領域で上下に拡張する。

最大応答変位と上部構造の応答は、内陸直下型地震（上町 A4B2）が最も大きいですが、パルス性の地震波で短時間に温度上昇するものの継続時間が短いことから地震後の温度上昇が3.5°Cと小さいため、繰り返し依存性の有無による応答の差はほとんどない。

オイルダンパーの性能変化は、累積吸収エネルギー量（温度上昇）に依存する。今回の検討ケースにおいては、南海（AIC003）の累積吸収エネルギー量が最も大きい。

南海（AIC003）のオイルダンパーの温度上昇は9.14°C（表面温度29.14°C）であることから減衰係数の変化率は0.6%（0.994）と小さく、オイルダンパーの減衰力特性の変化は小さい。このため、図4.59に示す鉛プラグ入り積層ゴムの降伏荷重の低下に伴う、エネルギー吸収量の低下をオイルダンパーが高速領域で効果的に吸収し、応答を抑制しているといえる。また、シール材の耐熱限界温度80°C以下を十分下回っていることから、オイルダンパーの温度上昇による機能上の問題はない。なお、鉛プラグ入り積層ゴムの設計基準値のQdは、基本特性試験 $\gamma=100\%$ 時の3サイクル目の履歴ループから設定していることから、初期のQdは設計基準値Qdより大きい。また、鉛の温度依存設計式も繰り返し加振試験で得られた特性から評価している。

このように、オイルダンパーの繰り返し依存性による影響は、本提案による解析法を用いて、非常に小さいことが確認された。

本章では、設計領域の地震動に対して、免震効果を発揮する一般的に採用されている免震部材（ここでは、高減衰ゴム系積層ゴムや鉛プラグ入り積層ゴム）に、大振幅地震動対策として多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを追加して検討をしているが、各地震波において、オイルダンパーが吸収するエネルギー量から計算した温度上昇は、最大でも 29.14℃であることから、減衰力特性の性能変化は小さい。

すなわち、検討した地震波と免震システムとオイルダンパーの減衰係数の変化率での限定した組み合わせの解析結果ではあるものの、表 4.9 を上回る極端な地震（大振幅が連続、長周期パルス等）でなければ、耐熱限界温度 80℃以下に抑えることで、免震用オイルダンパーの温度上昇が応答に与える影響は、比較的小さいと考えられる。

したがって、繰り返し依存性がある支承材に多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを併用することで、大振幅地震動に対しても有効に作用し、広範囲の速度領域において、免震性能を確保することが可能である。

## 2) 温度上昇の評価法による比較

オイルダンパーの温度上昇シミュレーション解析は、詳細法と簡易法があり、本提案の解析手法は詳細法に基づいている。

本提案法と放熱を考慮しない場合の温度上昇 (4.5) 式の簡易法による温度上昇を比較すると、図 4.60 に示す CASE-8 (LRB+OD 考慮①) のオイルダンパーの温度上昇 (精算法) 9.14℃ (表面温度 29.14℃ : AIC003) に対して、簡易法では 9.24℃ (表面温度 29.24℃) となり、双方に大きな差は見られないことから、簡易法でも地震応答におけるオイルダンパーの温度上昇の概略推定は可能である。

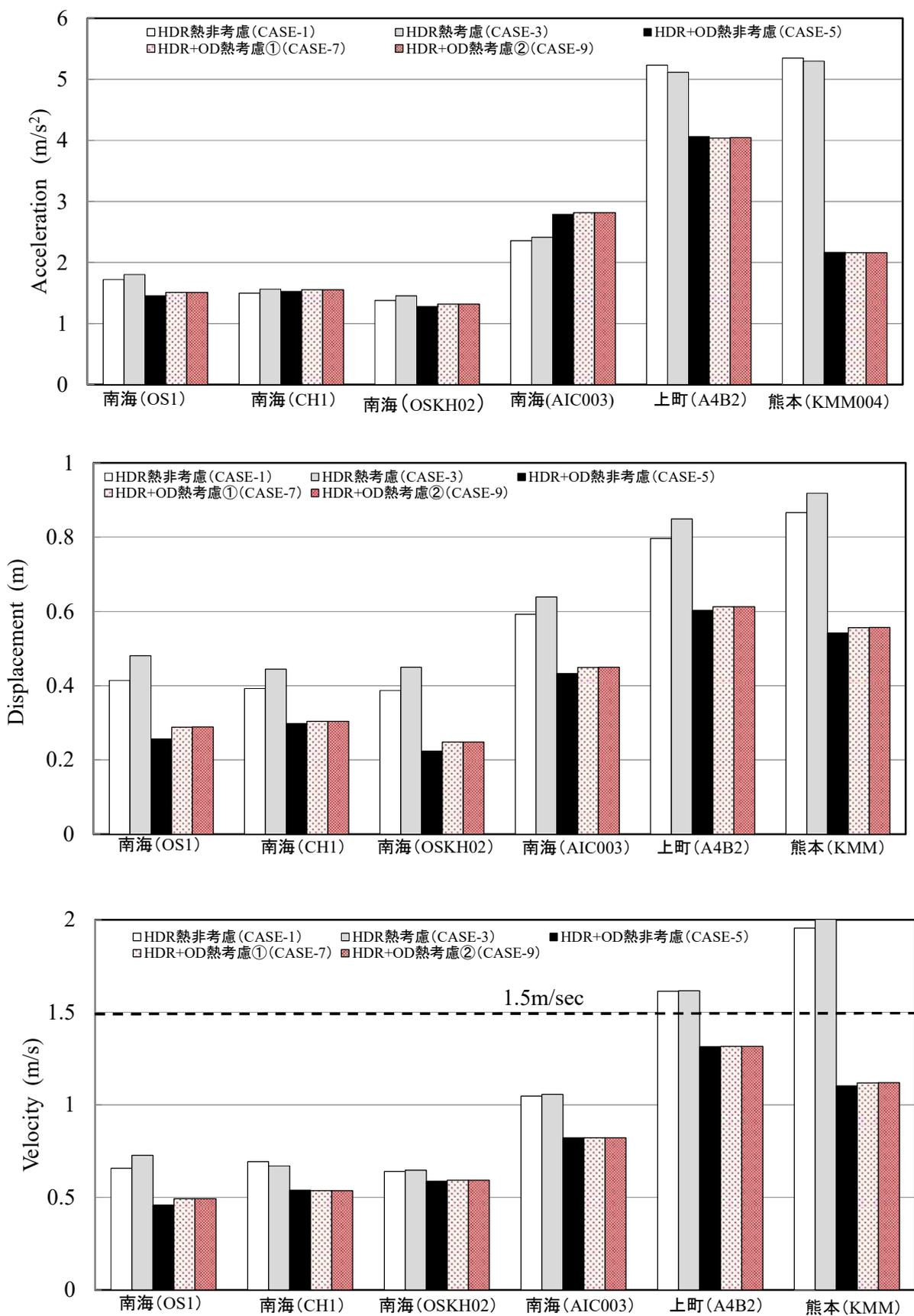


図 4.23(1) 最大応答 (CASE-1・3・5・7・9 : HDR・HDR+OD)

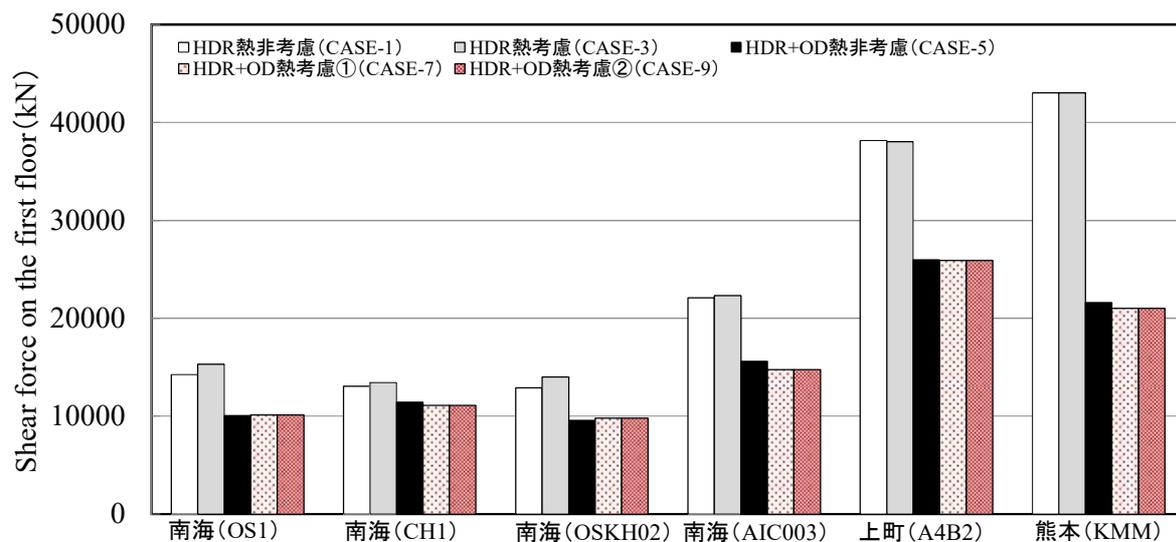
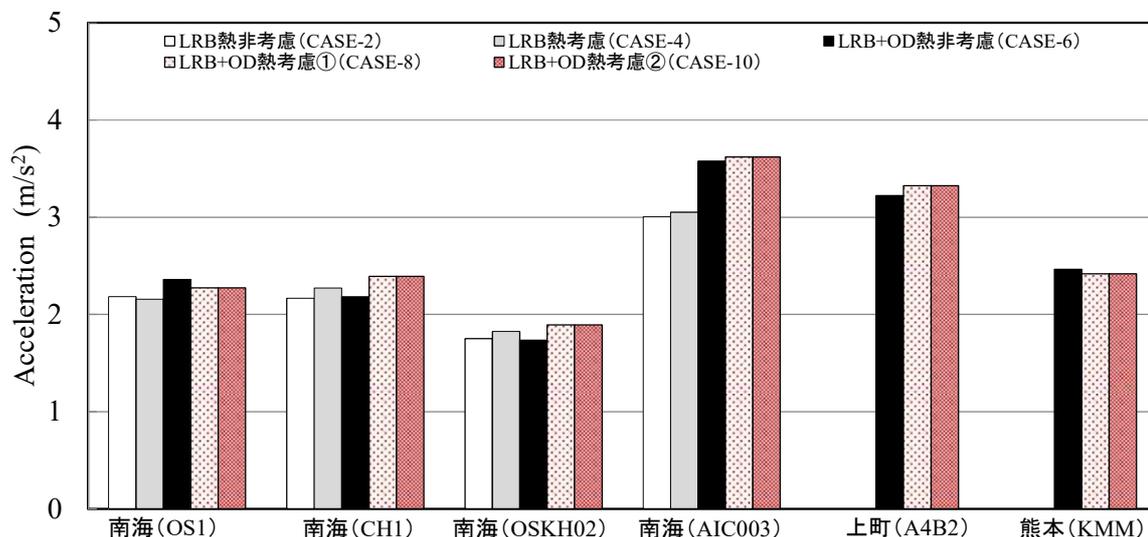


図 4.23(2) 最大応答 (CASE-1・3・5・7・9 : HDR・HDR+OD)



上町・熊本の CASE-2・4 は限界変形を大きく超えるため解析除外

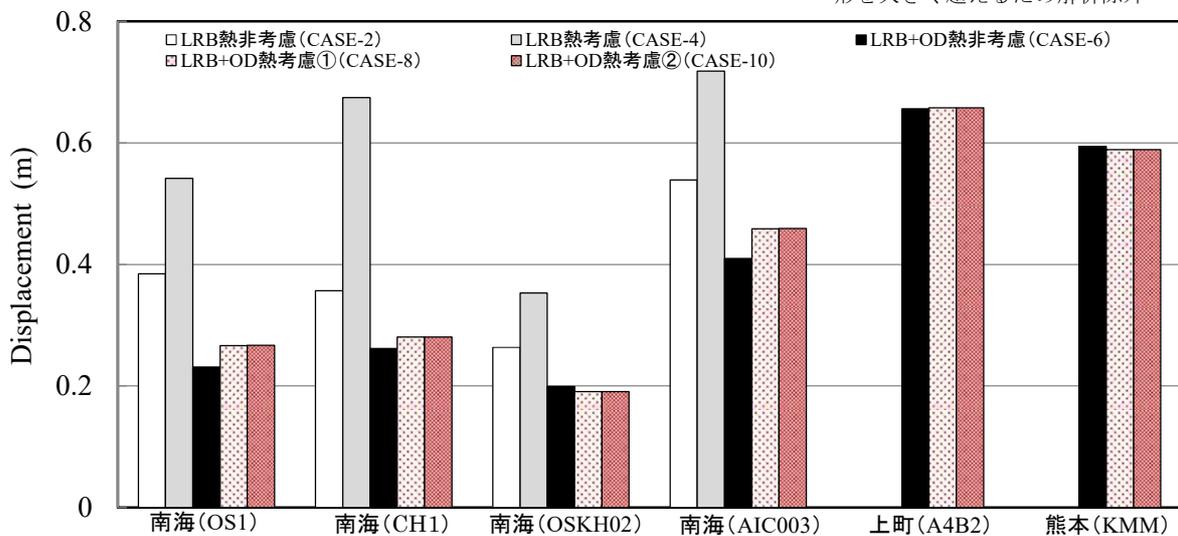


図 4.24(1) 最大応答 (CASE-2・4・6・8・10 : LRB・LRB+OD)

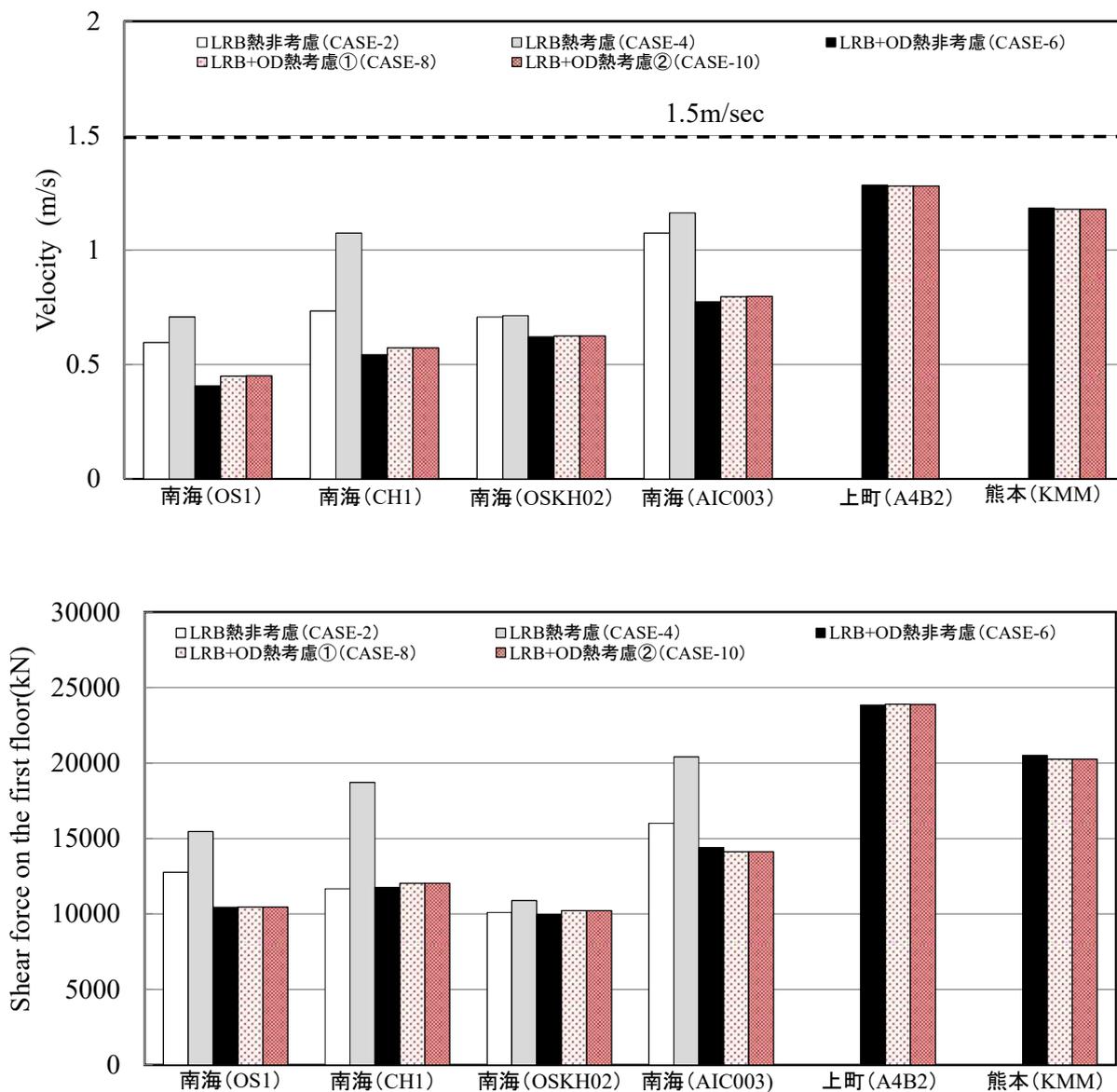


図 4.24(2) 最大応答 (CASE-2・4・6・8・10 : LRB・LRB+OD)

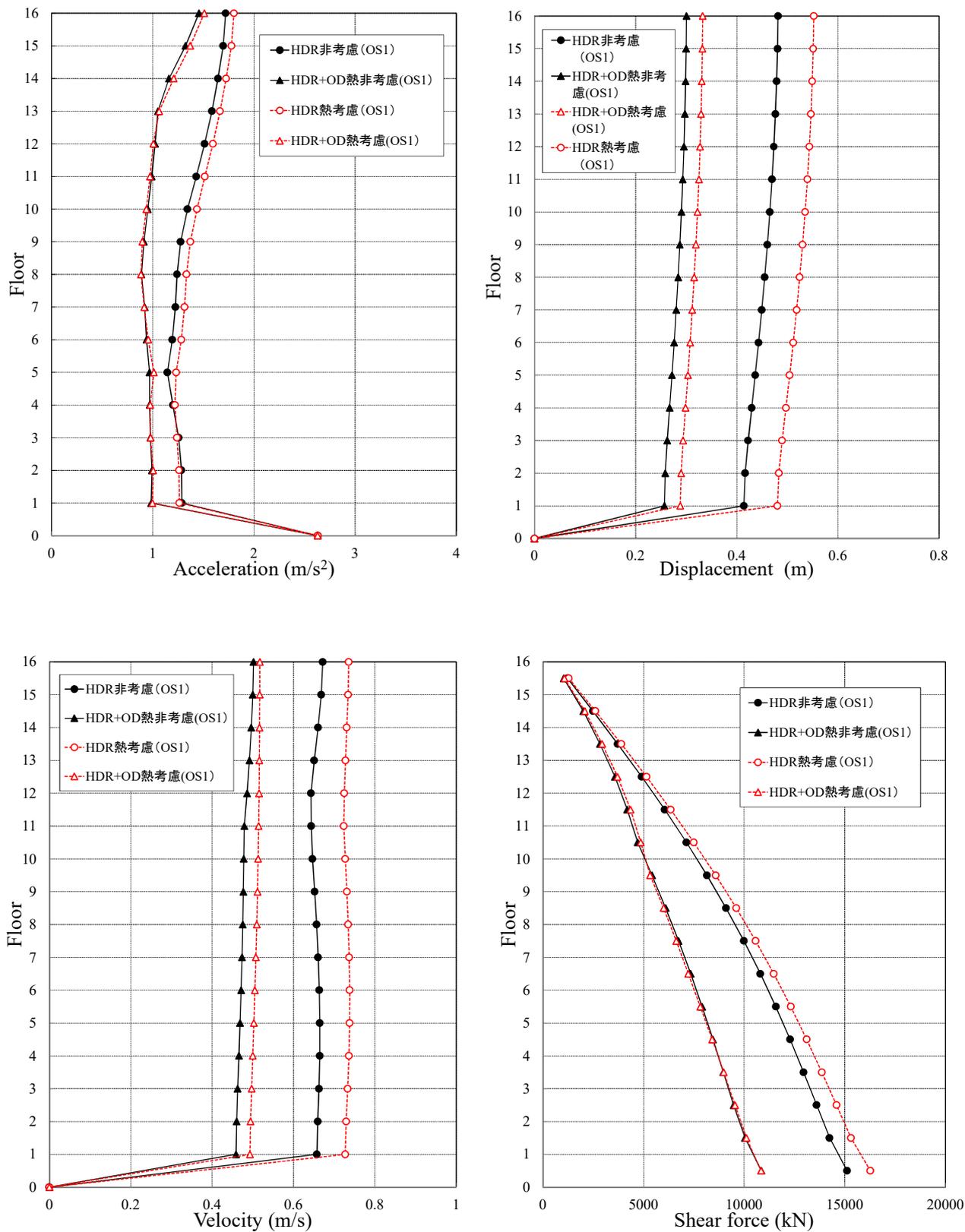


図 4.25 最大応答分布図 (CASE-1・3・5・7: 南海 OS1)

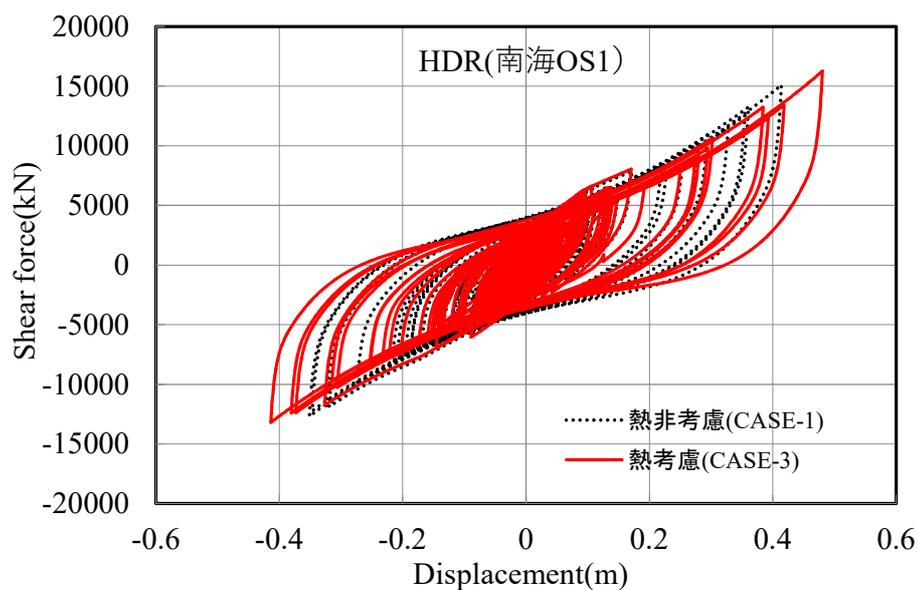


図 4.26 積層ゴムの荷重－変位関係(CASE-1・3：南海 OS1\_HDR)

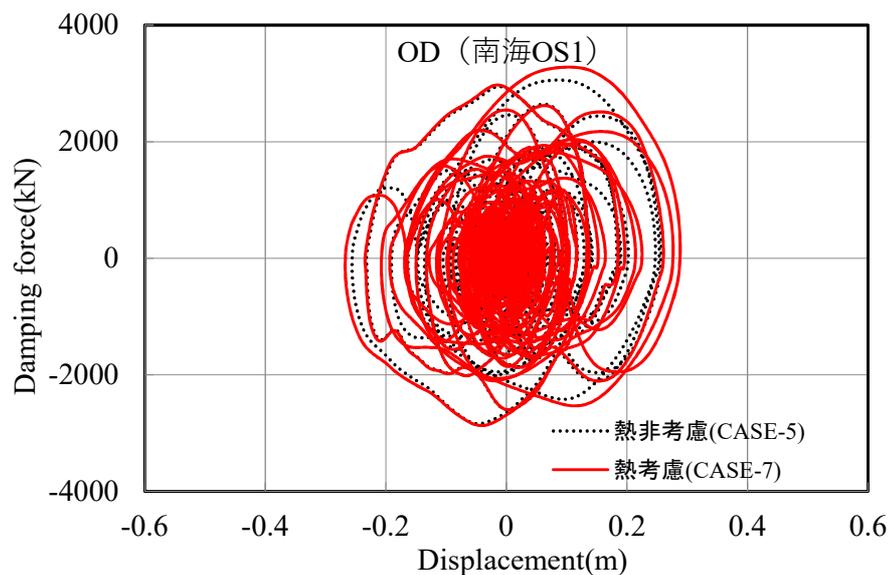
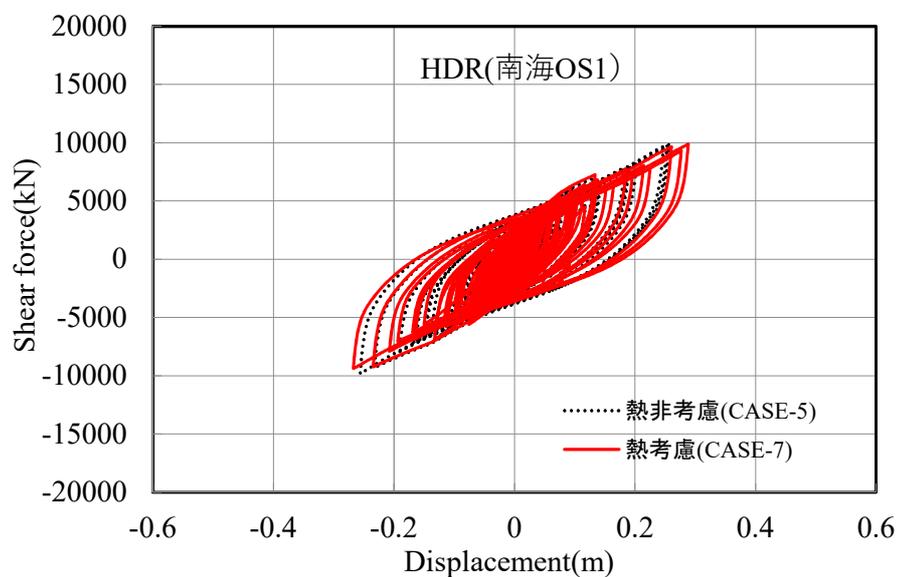


図 4.27 積層ゴムとオイルダンパーの荷重－変位関係(CASE-5・7：南海 OS1\_HDR+OD)

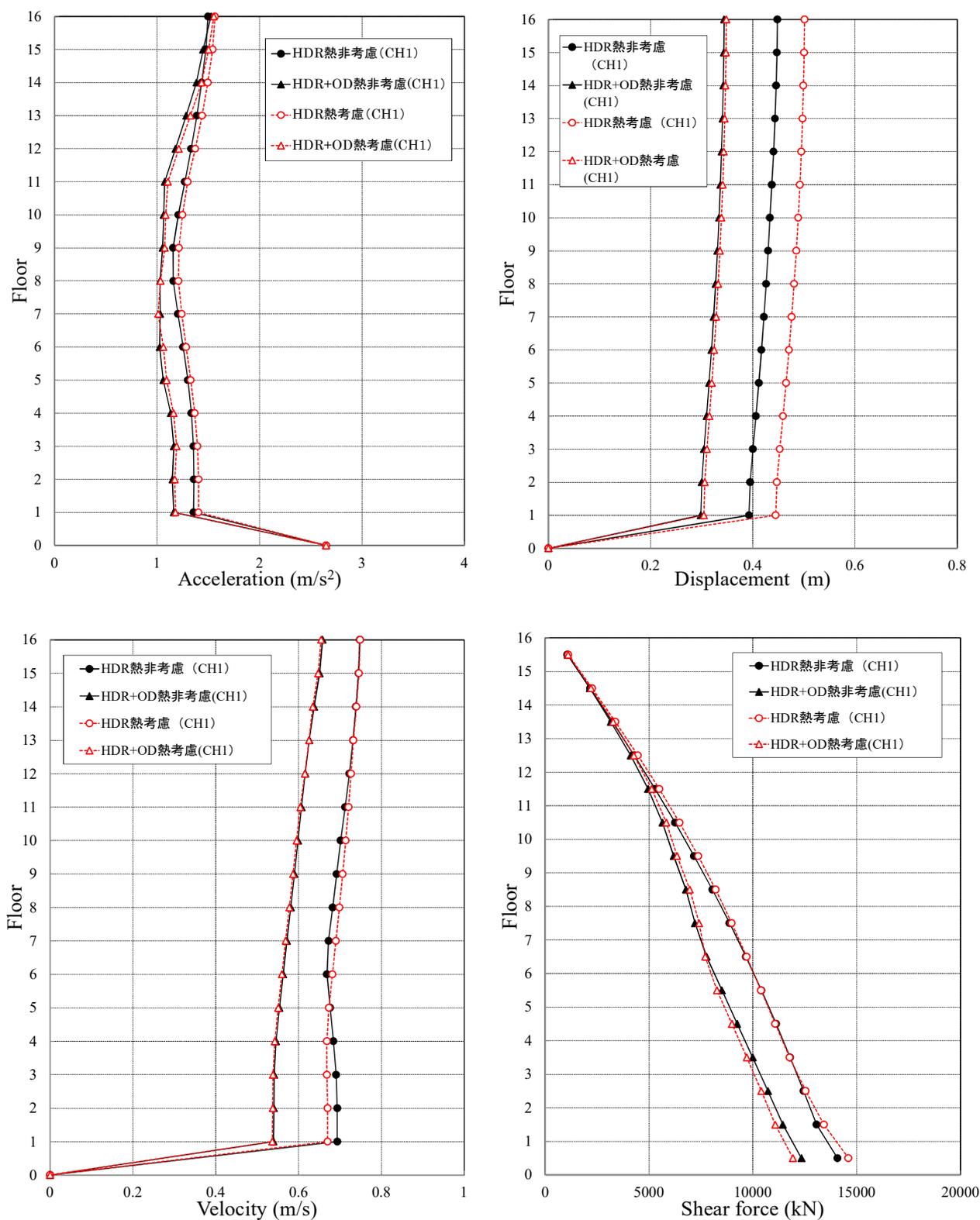


図 4.28 最大応答分布図 (CASE-1・3・5・7: 南海 CH1)

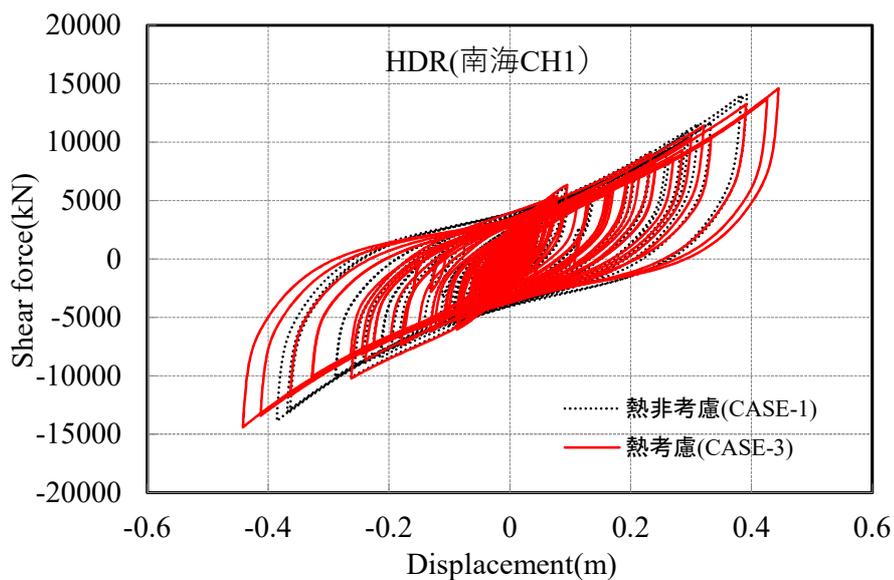


図 4.29 積層ゴムの荷重-変位関係(CASE-1・3: 南海 CH1\_HDR)

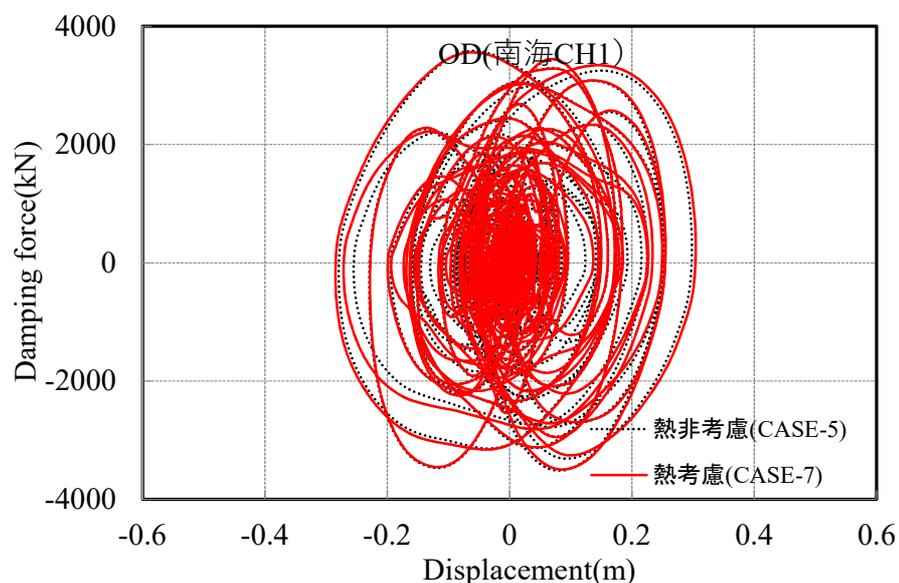
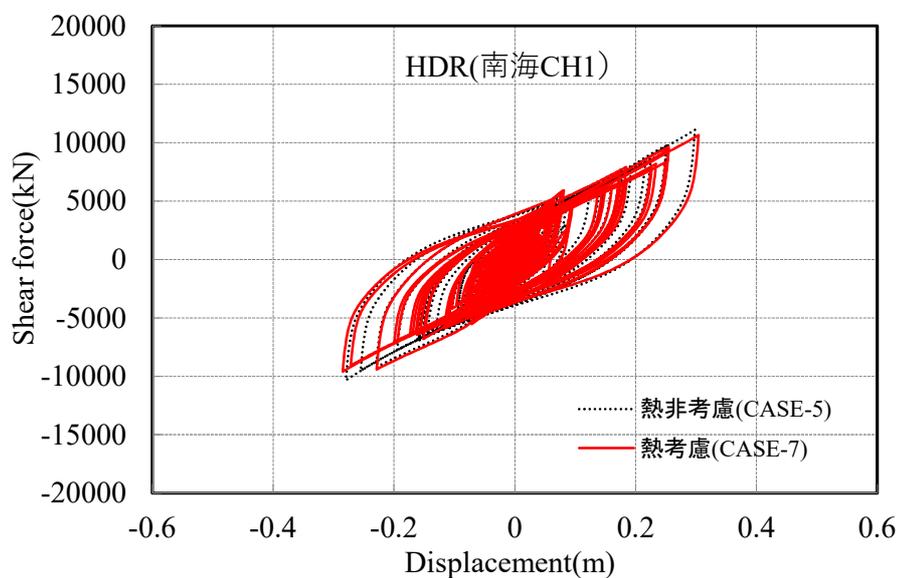


図 4.30 積層ゴムとオイルダンパーの荷重-変位関係(CASE-5・7: 南海 CH1\_HDR+OD)

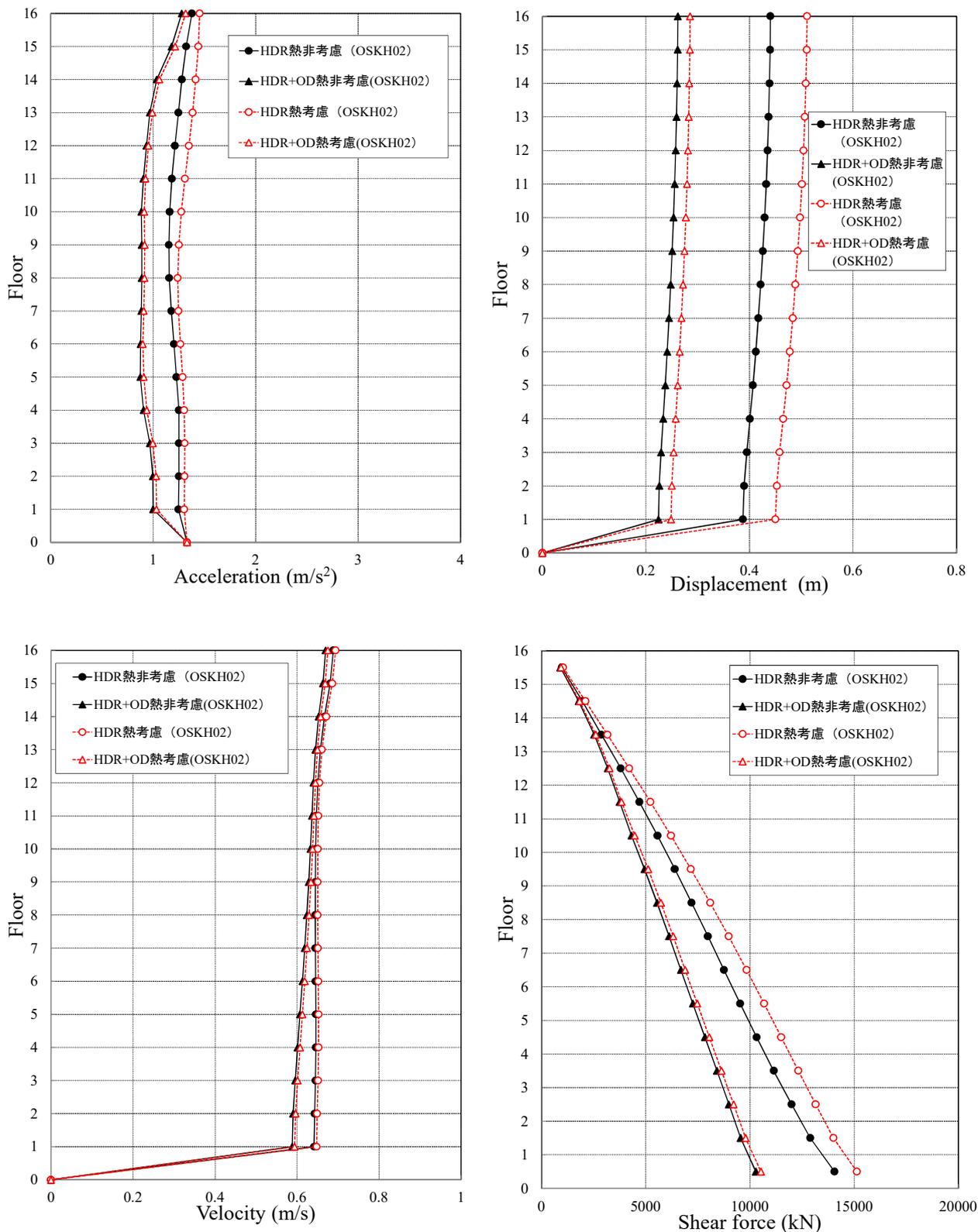


図 4.31 最大応答分布図 (CASE-1・3・5・7 : 南海 OSKH02)

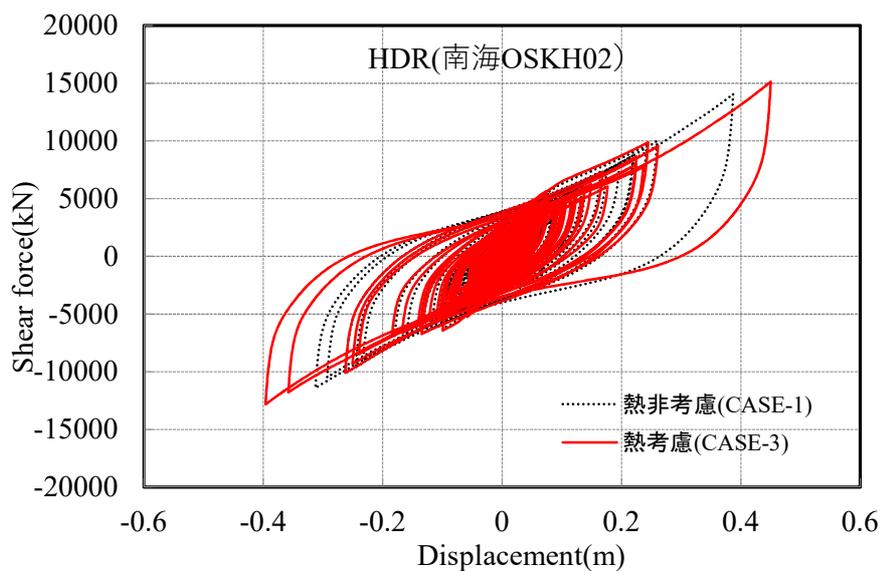


図 4.32 積層ゴムの荷重-変位関係(CASE-1・3: 南海 OSKH02\_HDR)

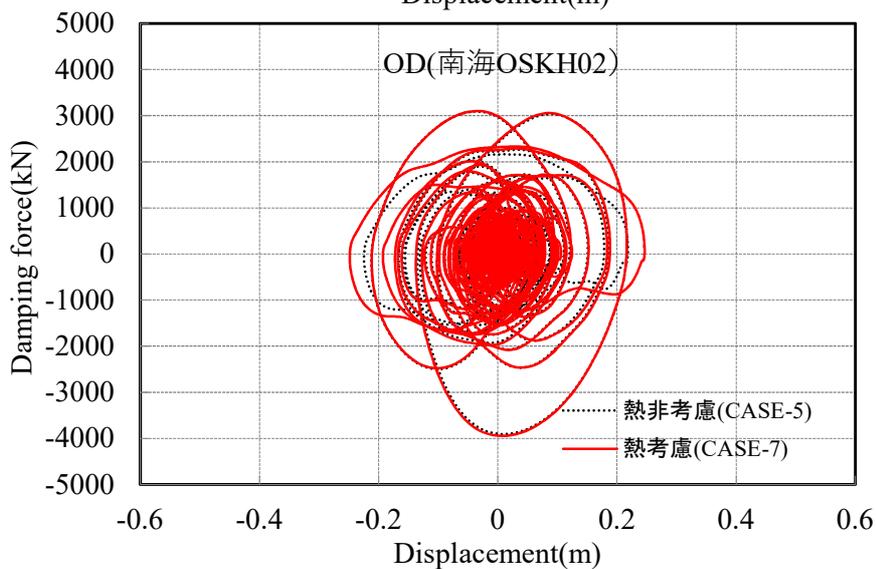
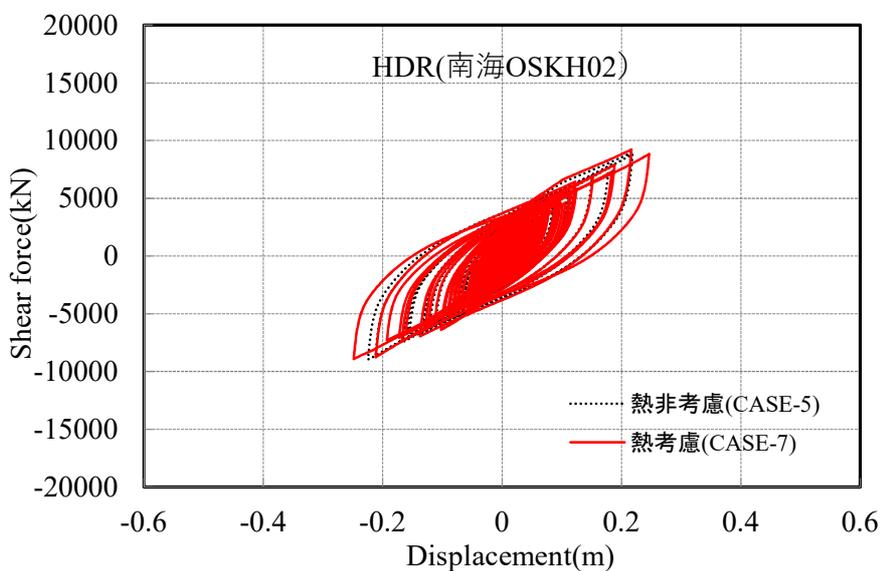


図 4.33 積層ゴムとオイルダンパーの荷重-変位関係(CASE-5・7: 南海 OSKH02\_HDR+OD)

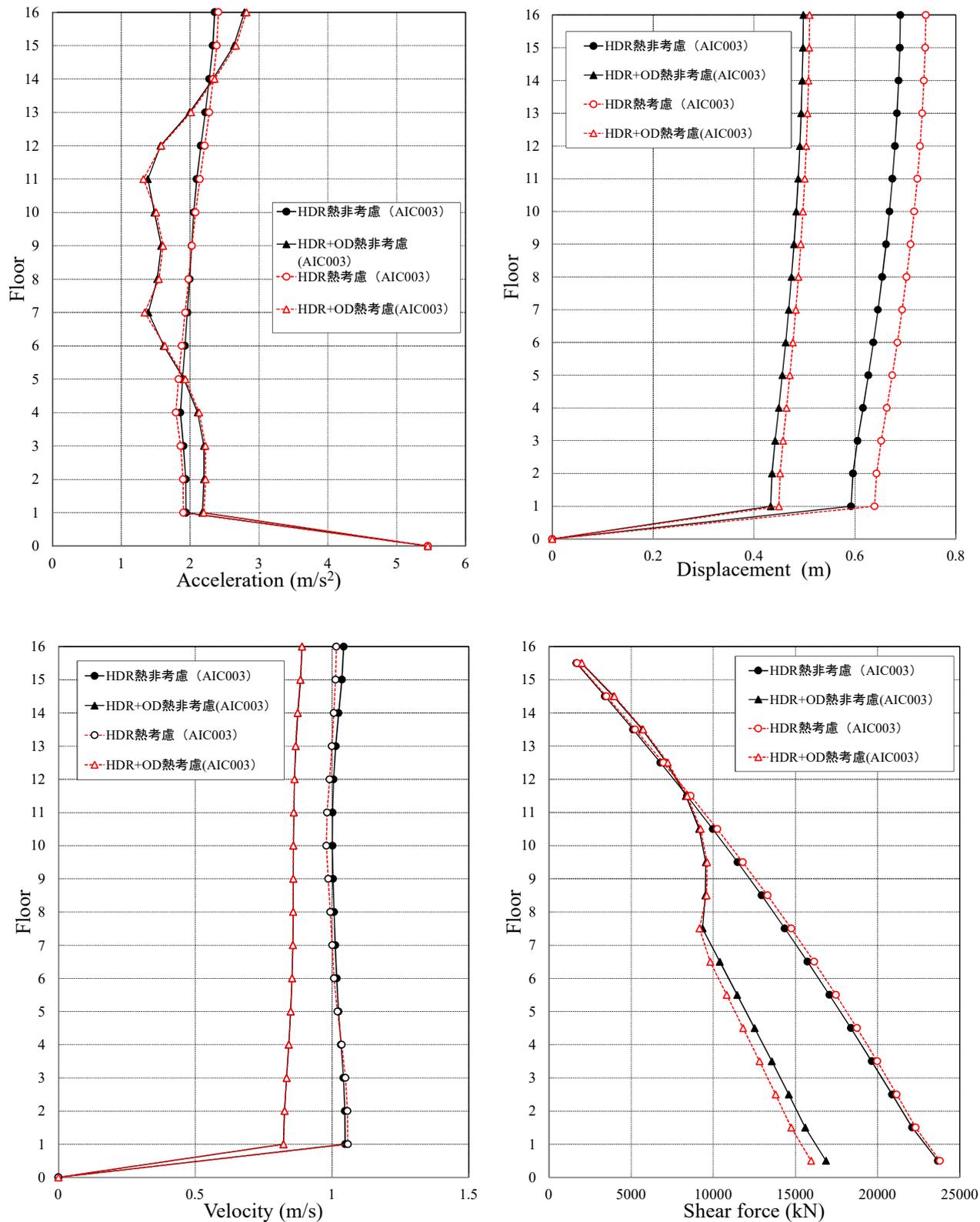


図 4.34 最大応答分布図 (CASE-1・3・5・7: 南海 AIC003)

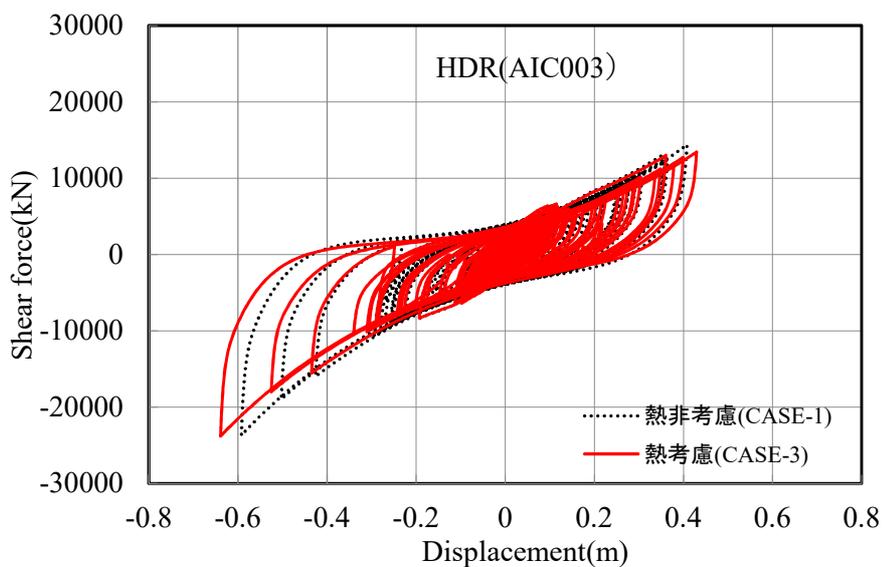


図 4.35 積層ゴムの荷重-変位関係(CASE-1・3 : 南海 AIC003\_HDR)

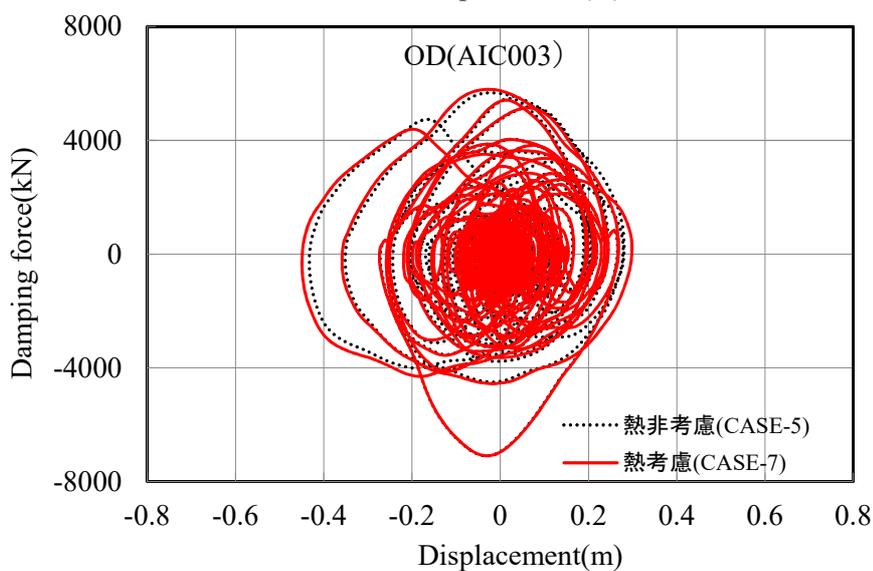
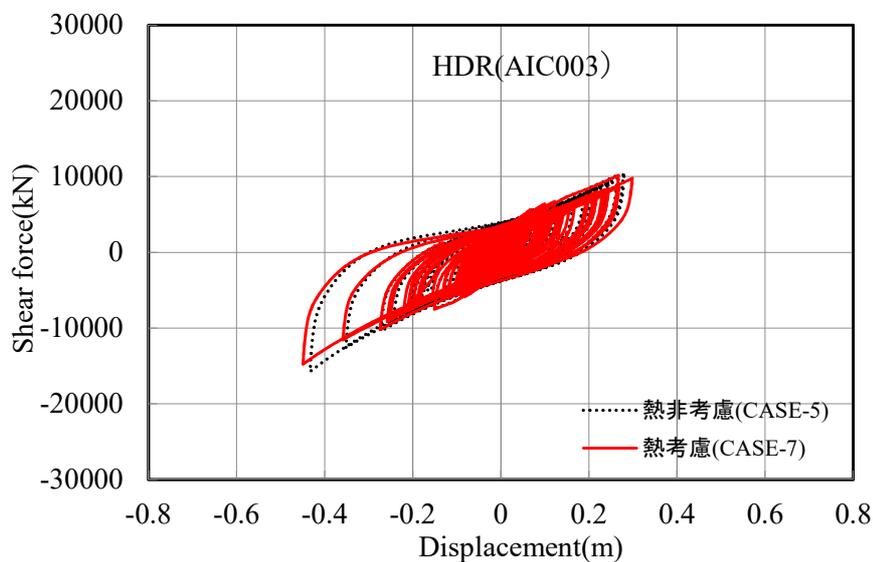


図 4.36 積層ゴムとオイルダンパーの荷重-変位関係(CASE-5・7 : 南海 AIC003\_HDR+OD)

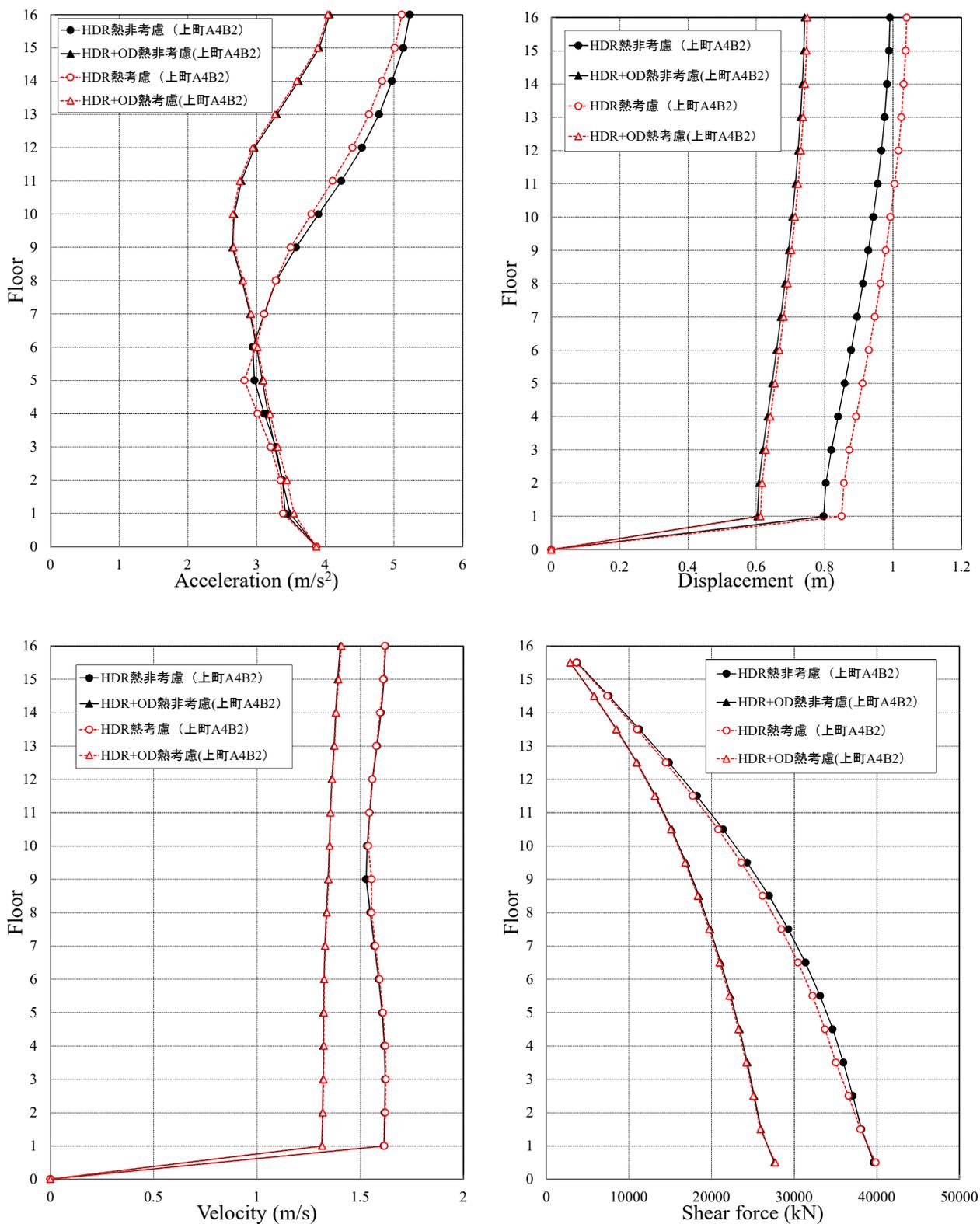


図 4.37 最大応答分布図 (CASE-1・3・5・7: 上町 A4B2)

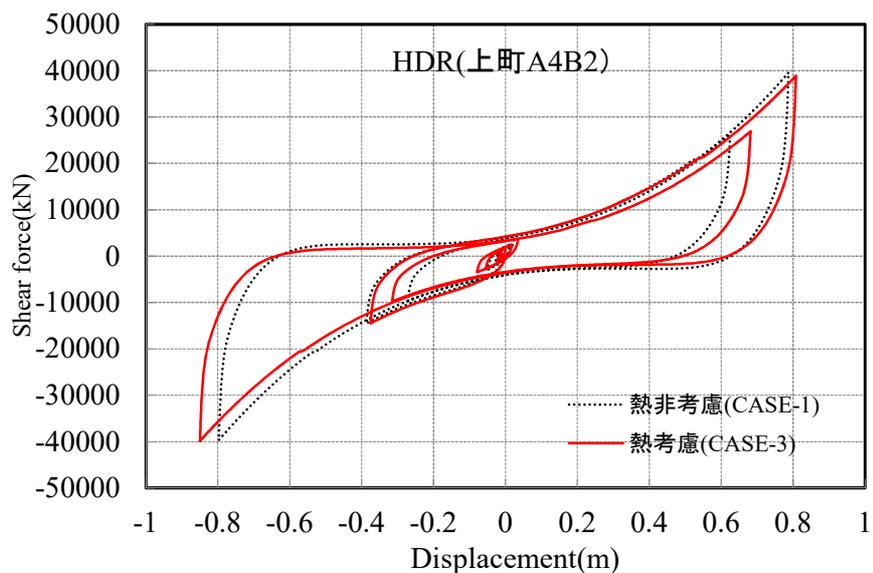


図 4.38 積層ゴムの荷重-変位関係(CASE-1・3: 上町 A4B2\_HDR)

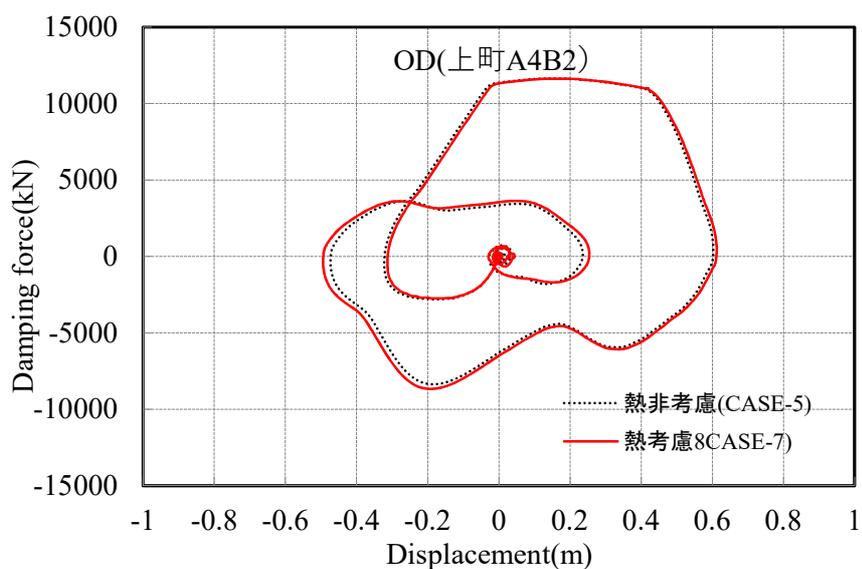
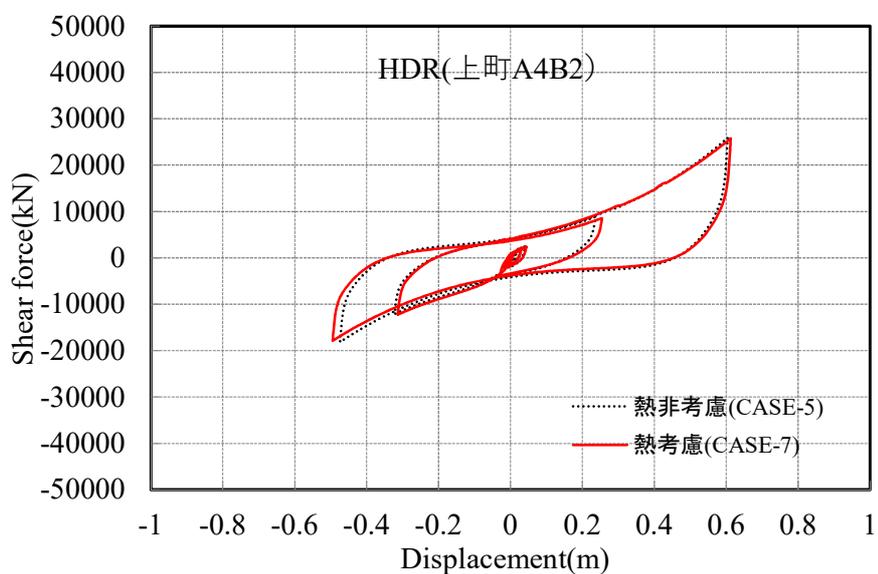


図 4.39 積層ゴムとオイルダンパーの荷重-変位関係(CASE-5・7: 上町 A4B2\_HDR+OD)

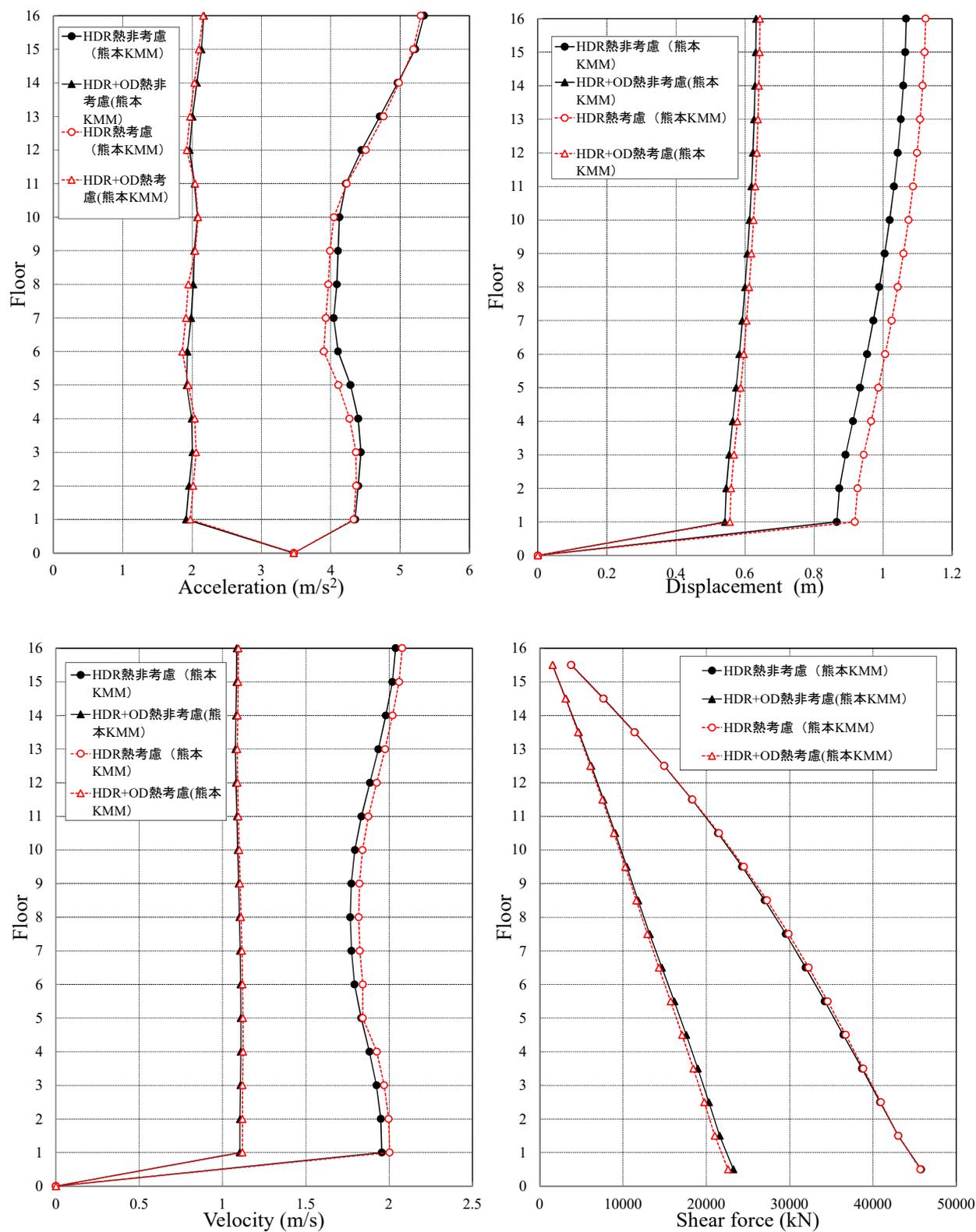


図 4.40 最大応答分布図 (CASE-1・3・5・7: 熊本 KMM)

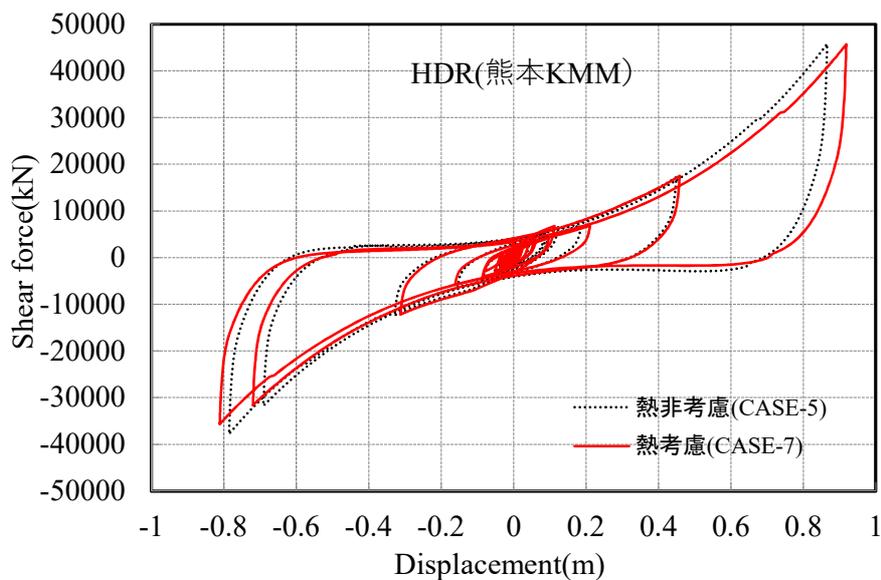


図 4.41 積層ゴムの荷重-変位関係(CASE-1・3: 熊本 KMM\_HDR)

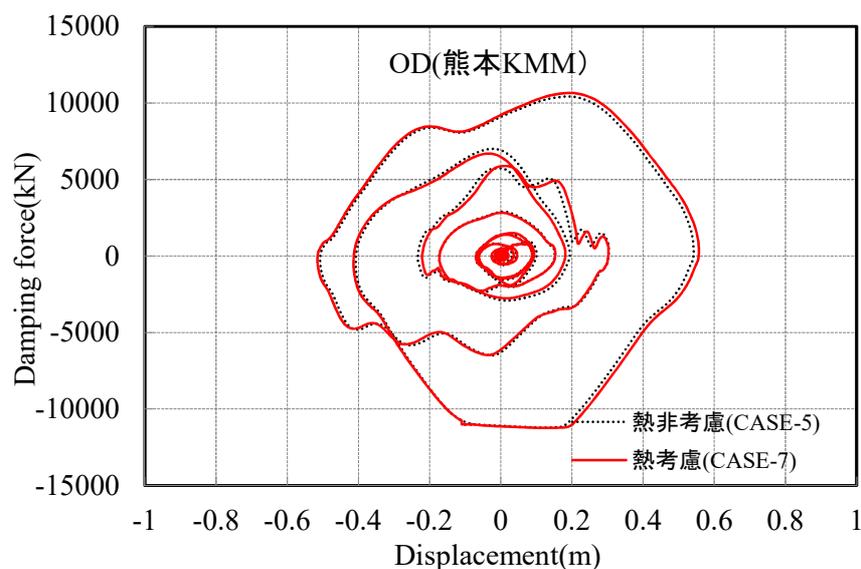
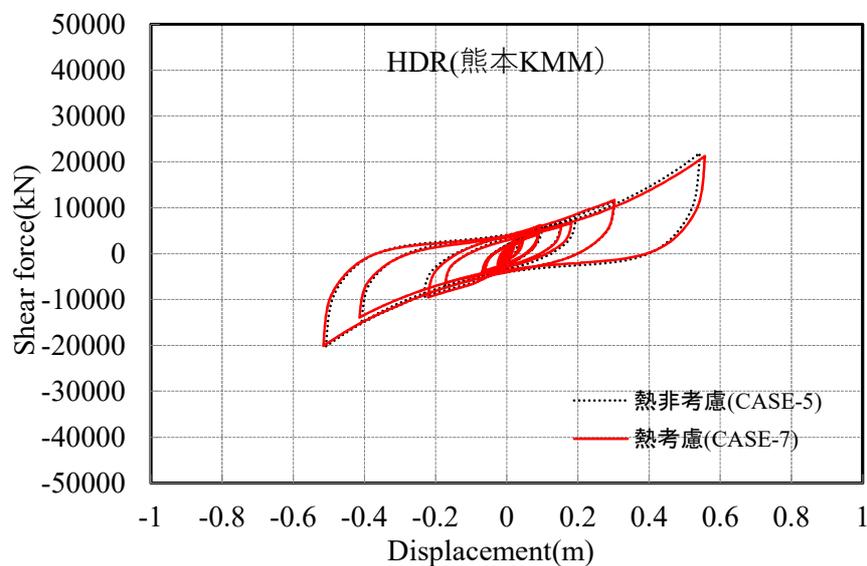


図 4.42 積層ゴムとオイルダンパーの荷重-変位関係(CASE-5・7: 熊本 KMM\_HDR+OD)

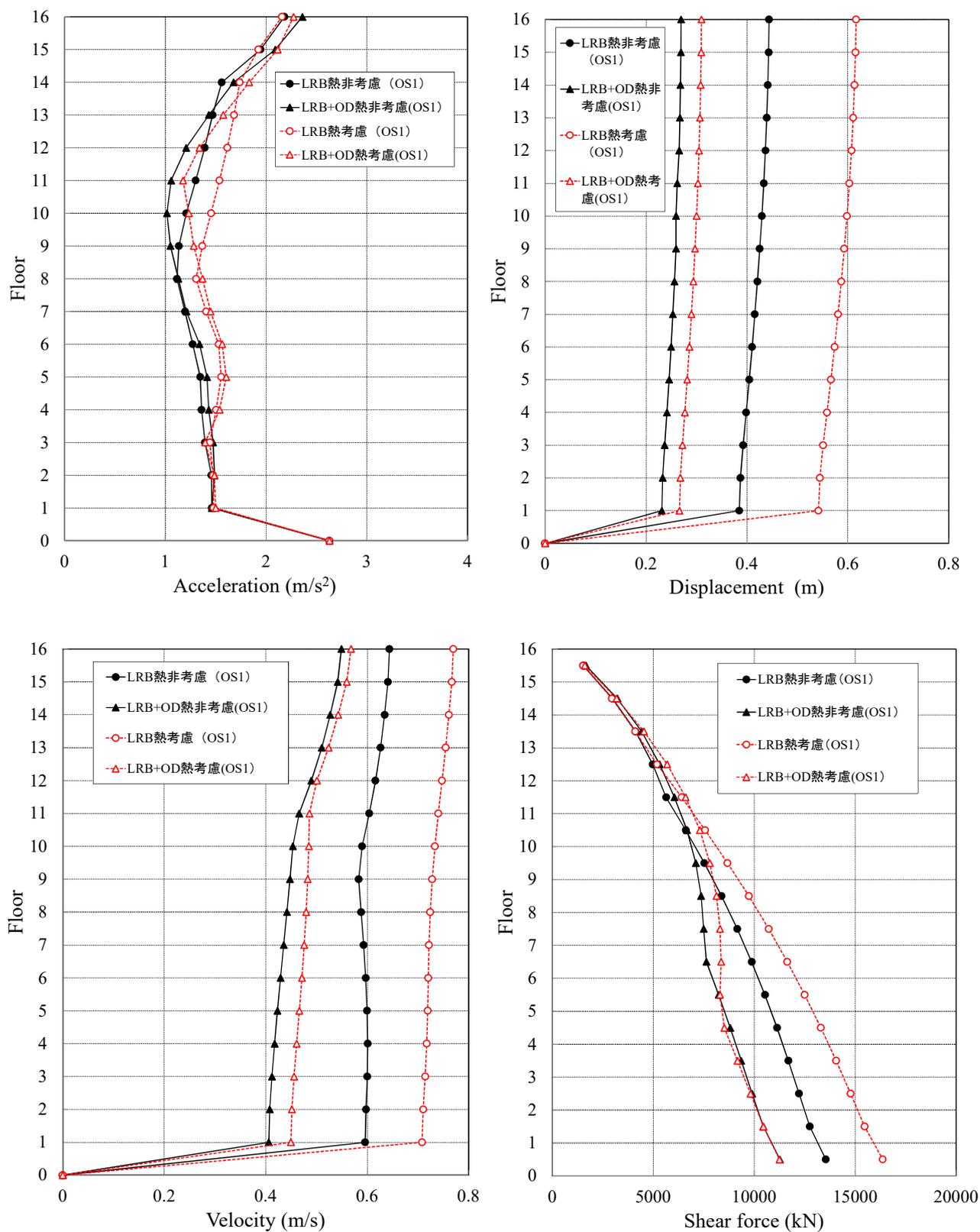


図 4.43 最大応答分布図 (CASE-2・4・6・8 : 南海 OS1)

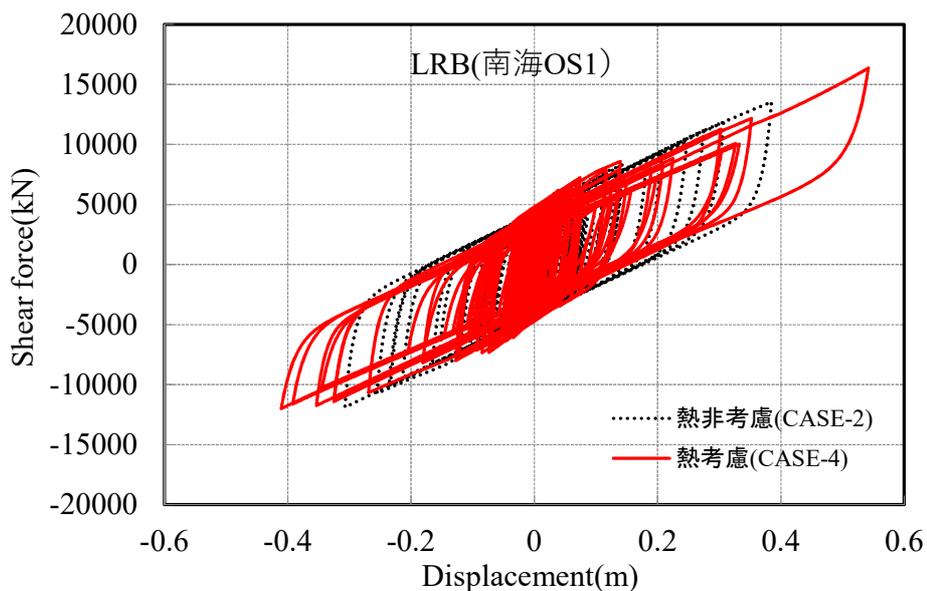


図 4.44 積層ゴムの荷重-変位関係(CASE-2・4: 南海 OS1\_LRB)

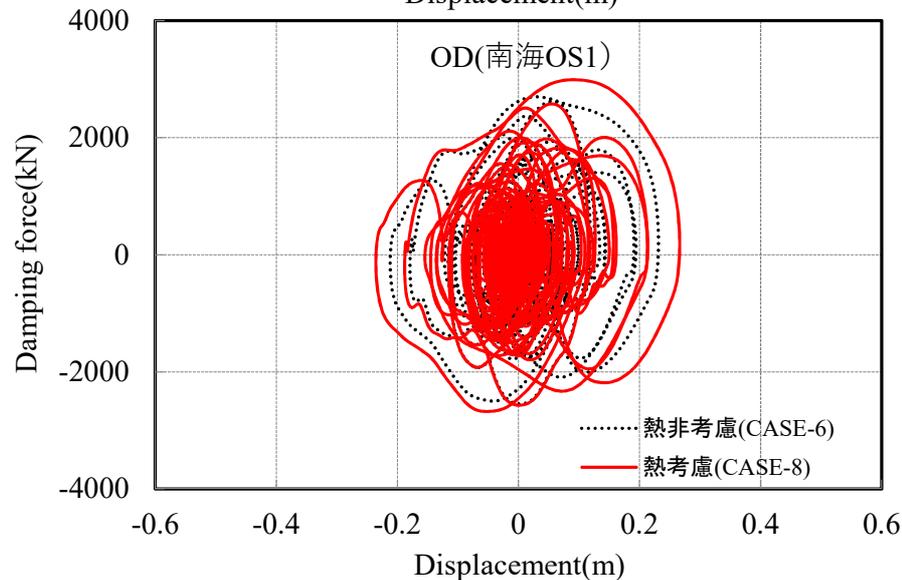
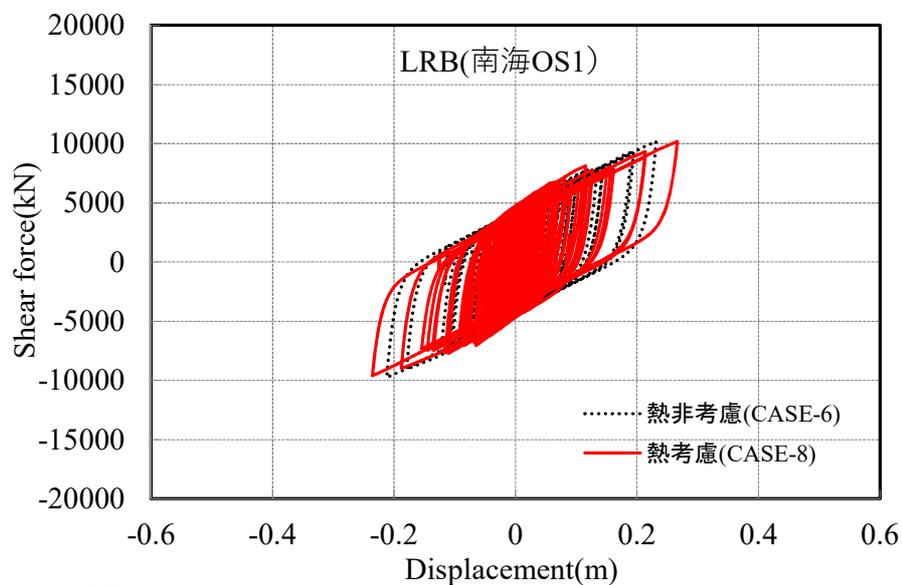


図 4.45 積層ゴムとオイルダンパーの荷重-変位関係(CASE-6・8: 南海 OS1\_LRB+OD)

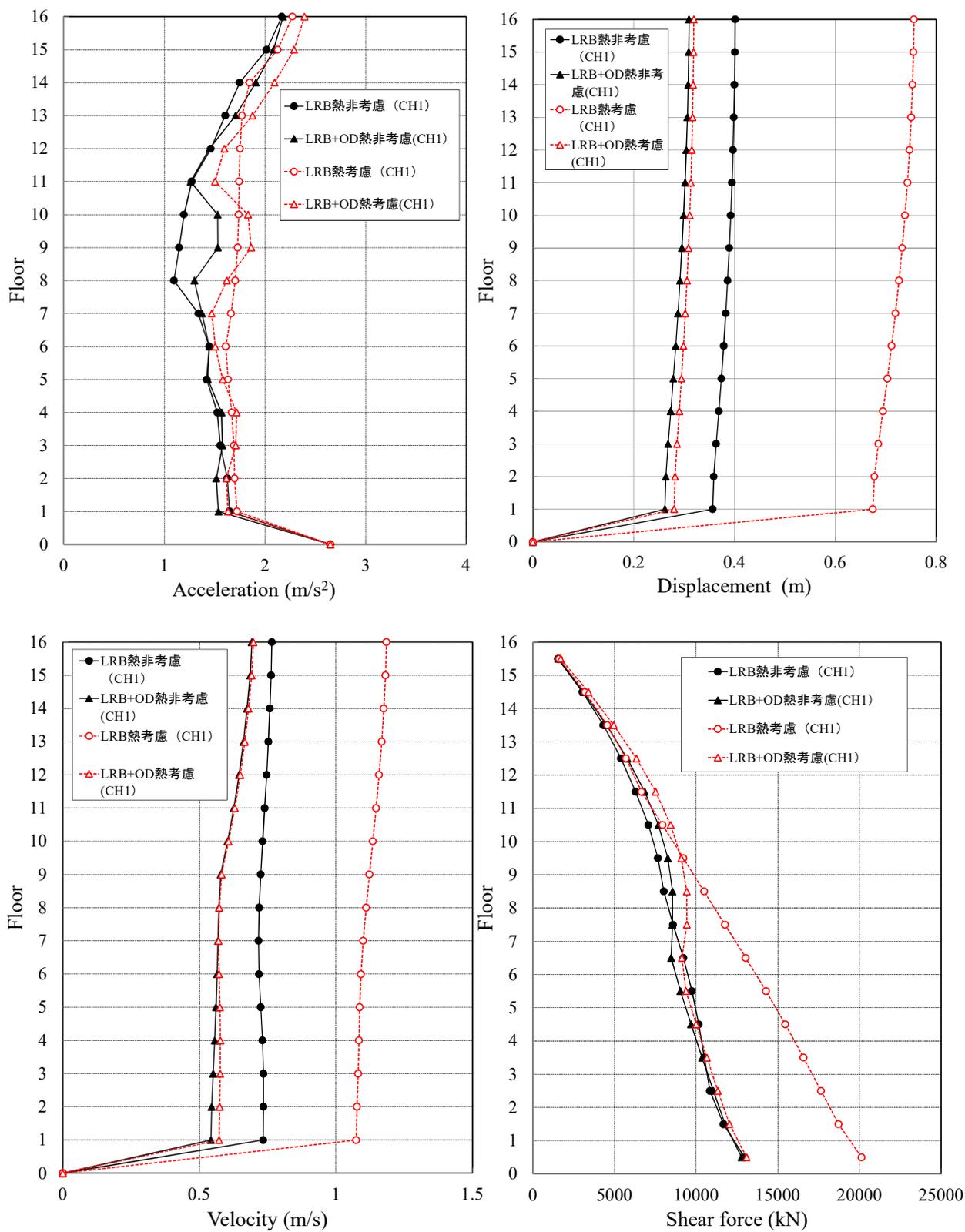


図 4.46 最大応答分布図 (CASE-2・4・6・8 : 南海 CH1)

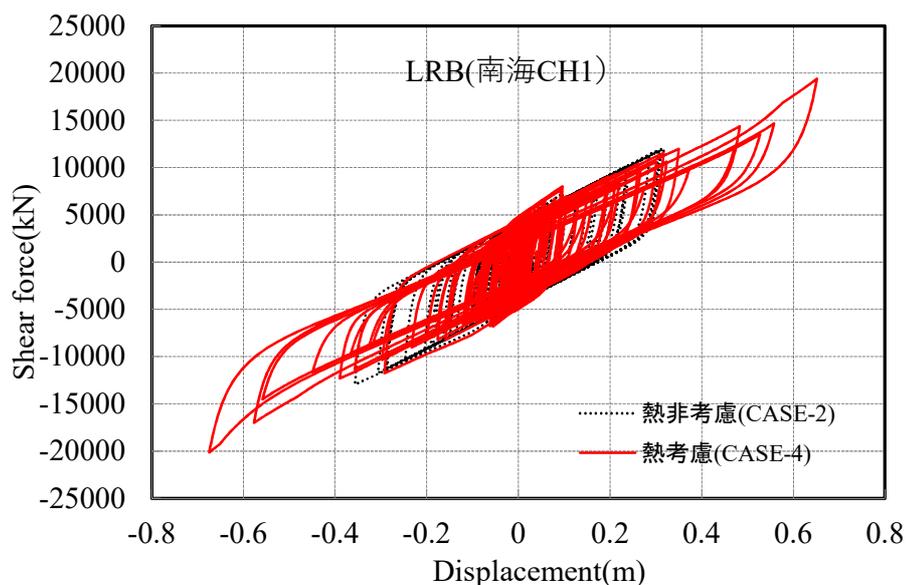


図 4.47 積層ゴムの荷重－変位関係(CASE-2・4：南海 CH1\_LRB)

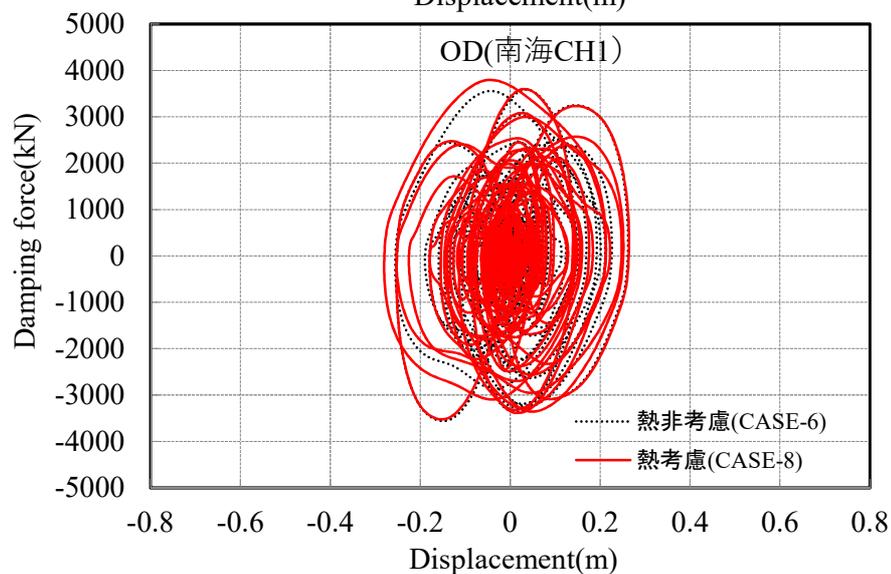
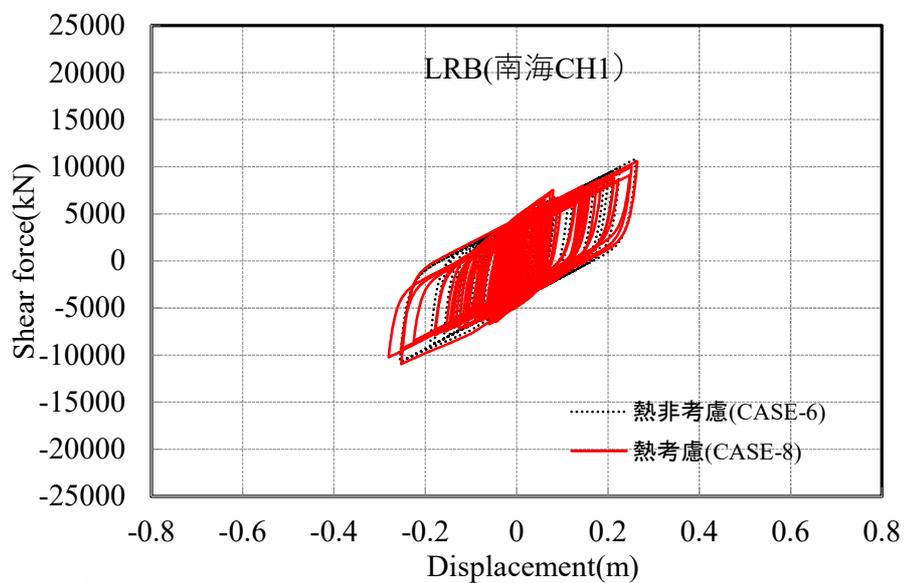


図 4.48 積層ゴムとオイルダンパーの荷重－変位関係(CASE-6・8：南海 CH1\_LRB+OD)

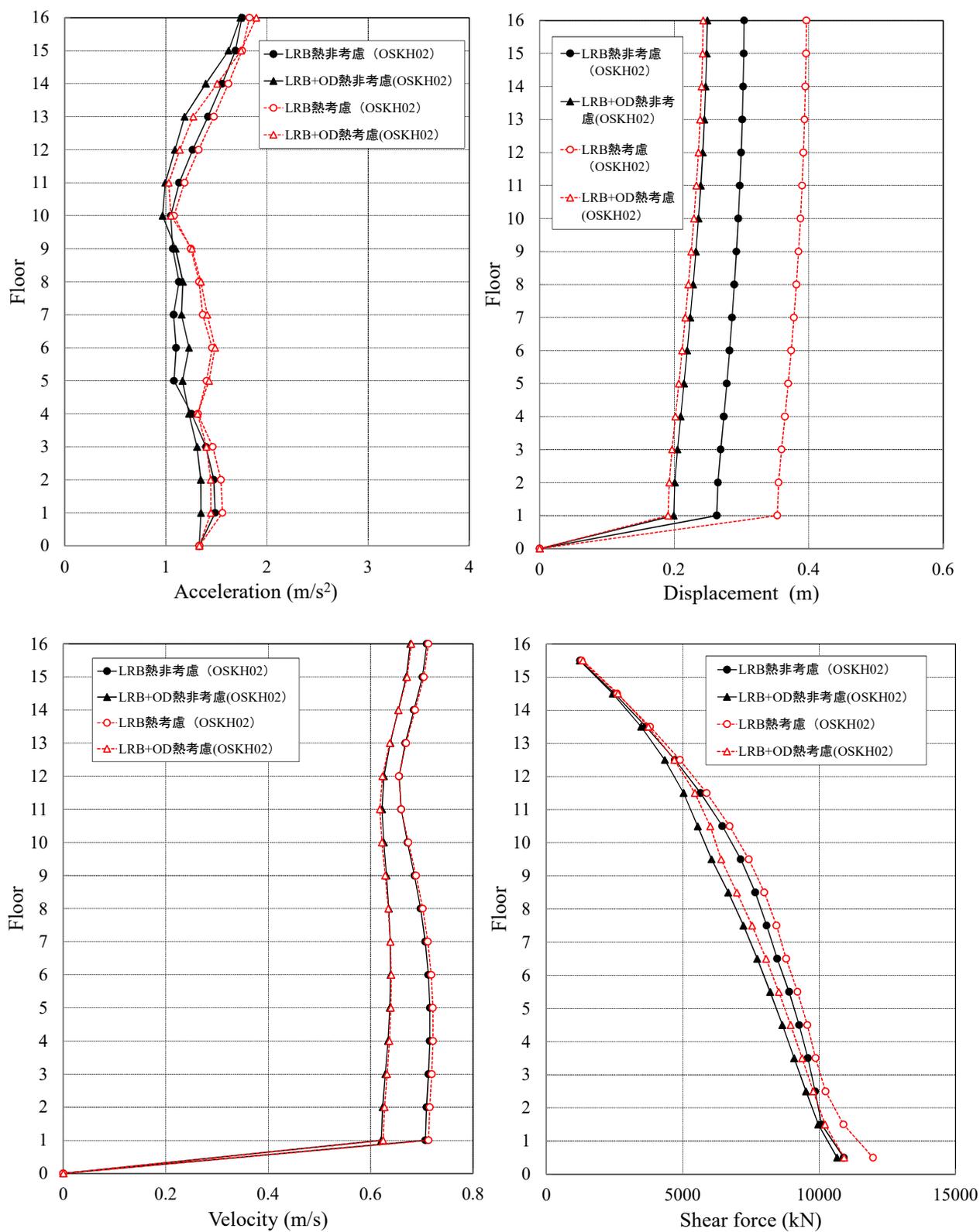


図 4.49 最大応答分布図 (CASE-2・4・6・8 : 南海 OSKH02)

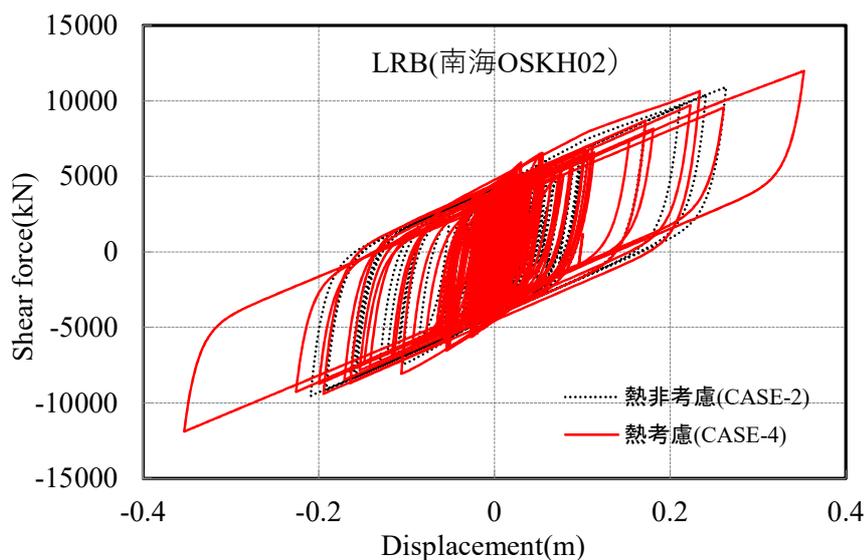


図 4.50 積層ゴムの荷重-変位関係(CASE-2・4: 南海 OSKH02\_LRB)

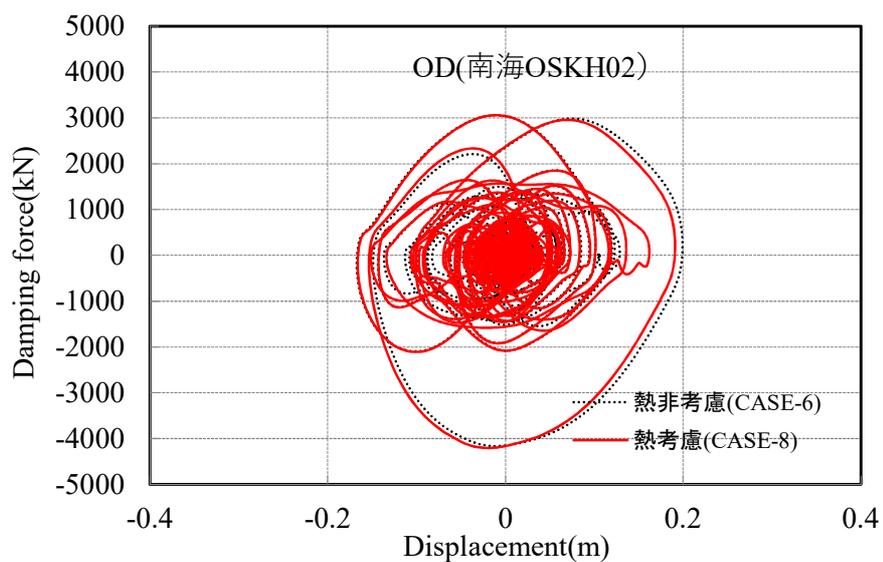
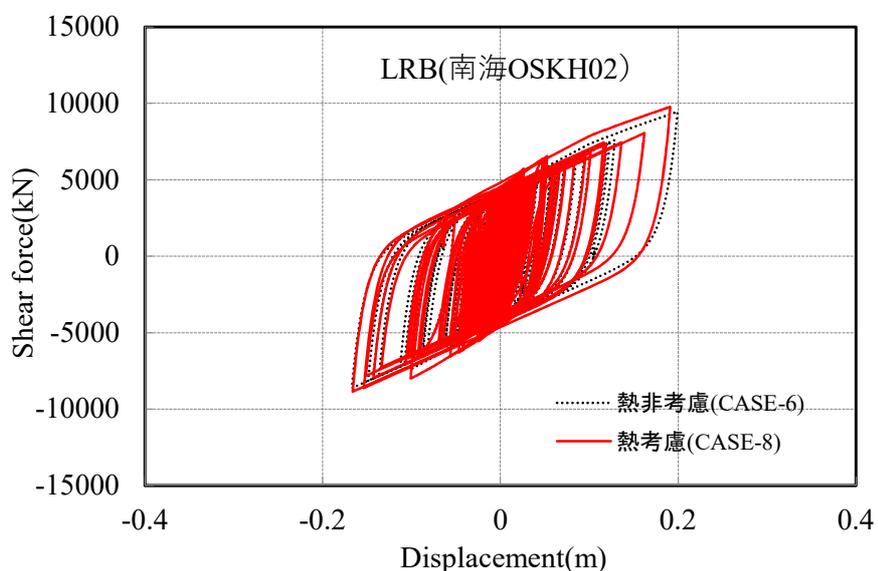


図 4.51 積層ゴムとオイルダンパーの荷重-変位関係(CASE-6・8: 南海 OSKH02\_LRB+OD)

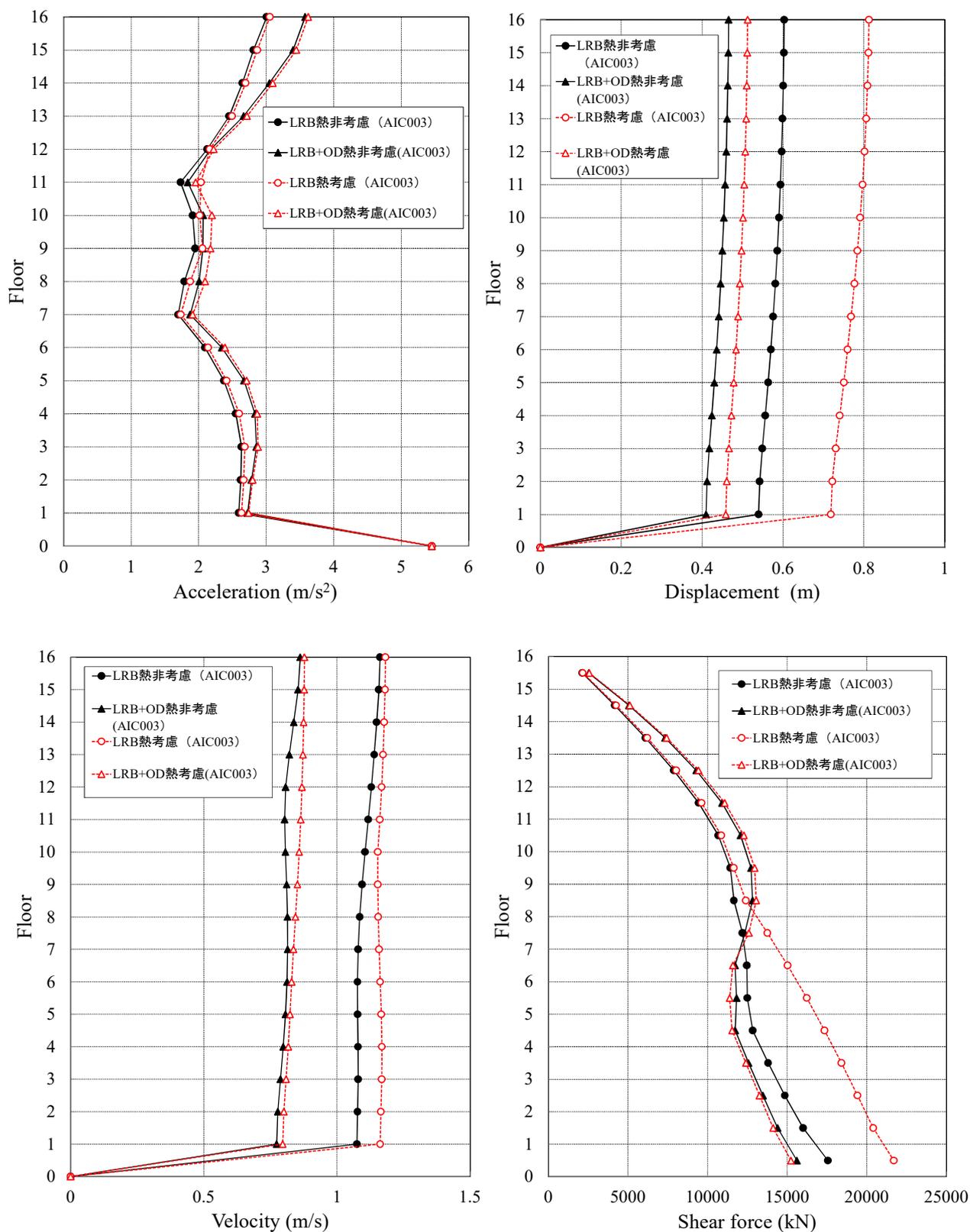


図 4.52 最大応答分布図 (CASE-2・4・6・8 : 南海 AIC003)

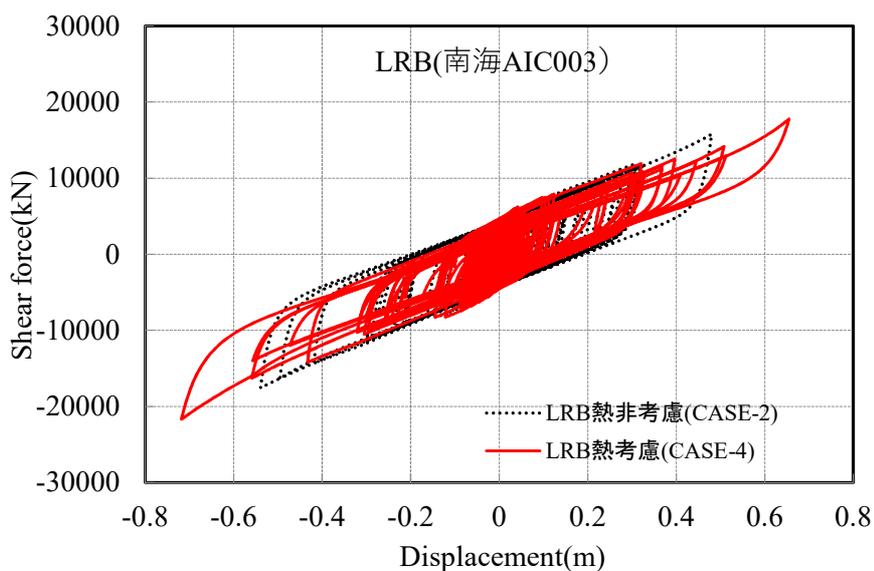


図 4.53 積層ゴムの荷重-変位関係(CASE-2・4: 南海 AIC003\_LRB)

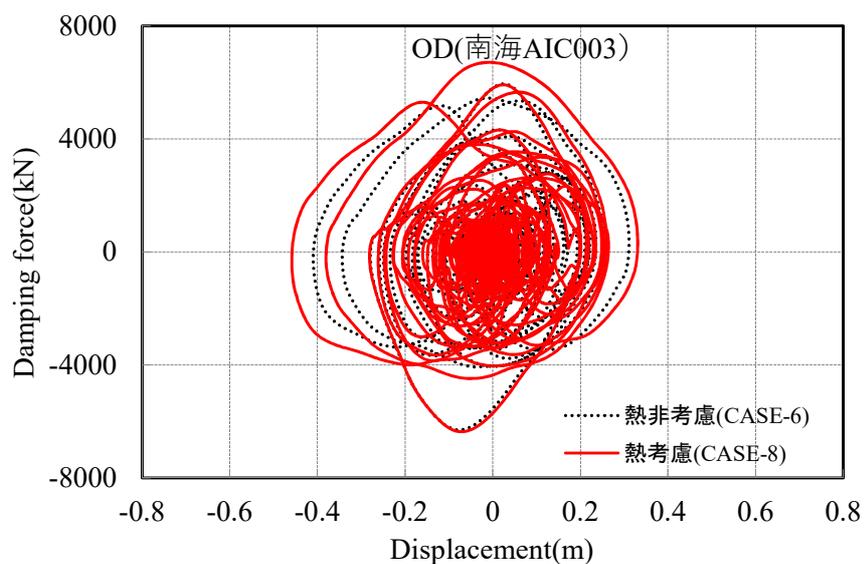
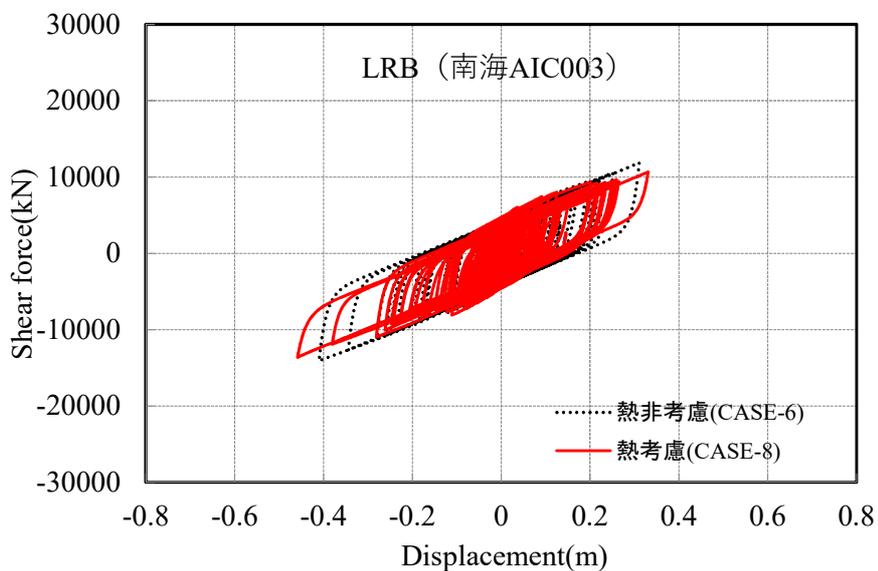


図 4.54 積層ゴムとオイルダンパーの荷重-変位関係(CASE-6・8: 南海 AIC003\_LRB+OD)

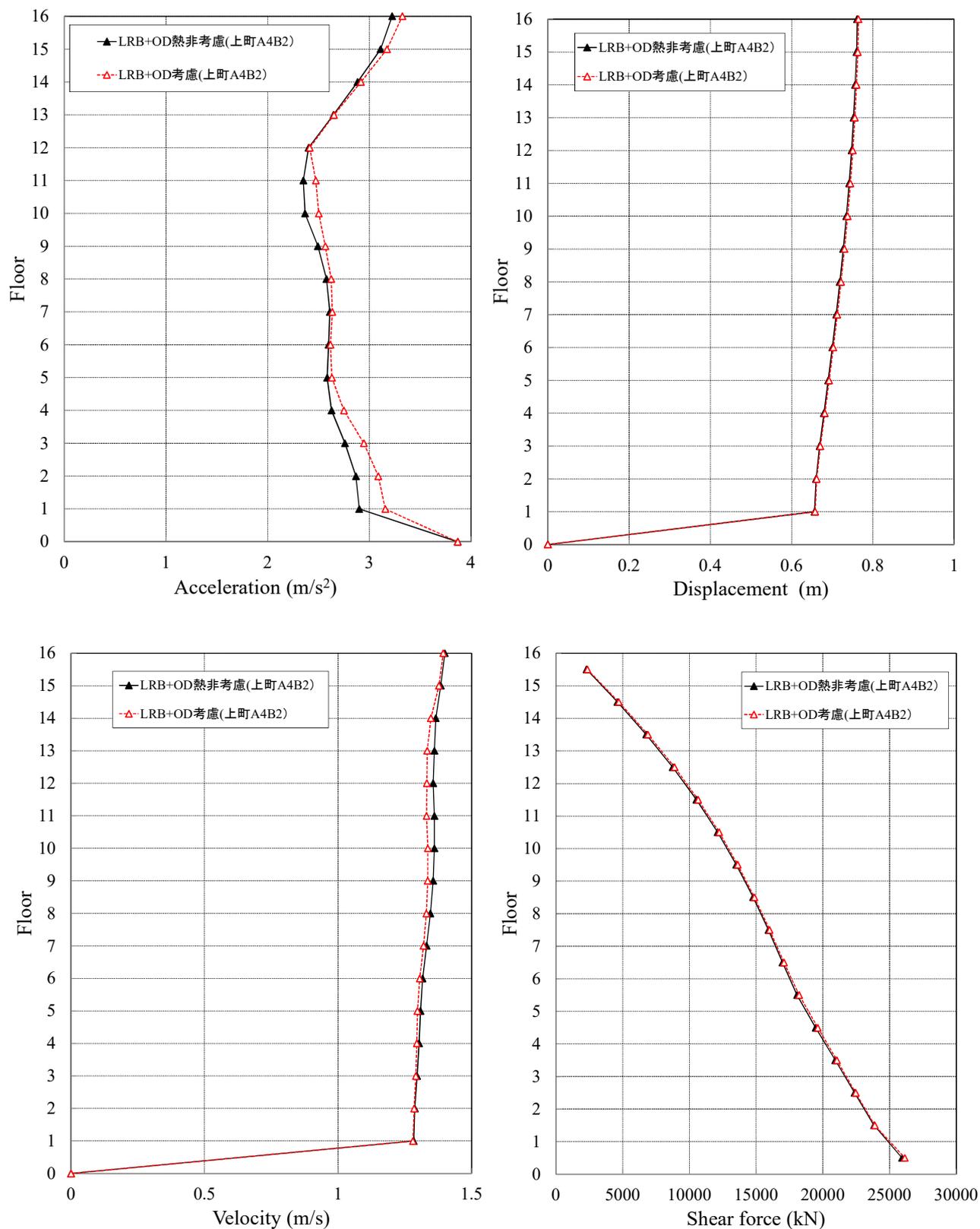


図 4.55 最大応答分布図 (CASE-2・4・6・8 : 上町 A4B2)

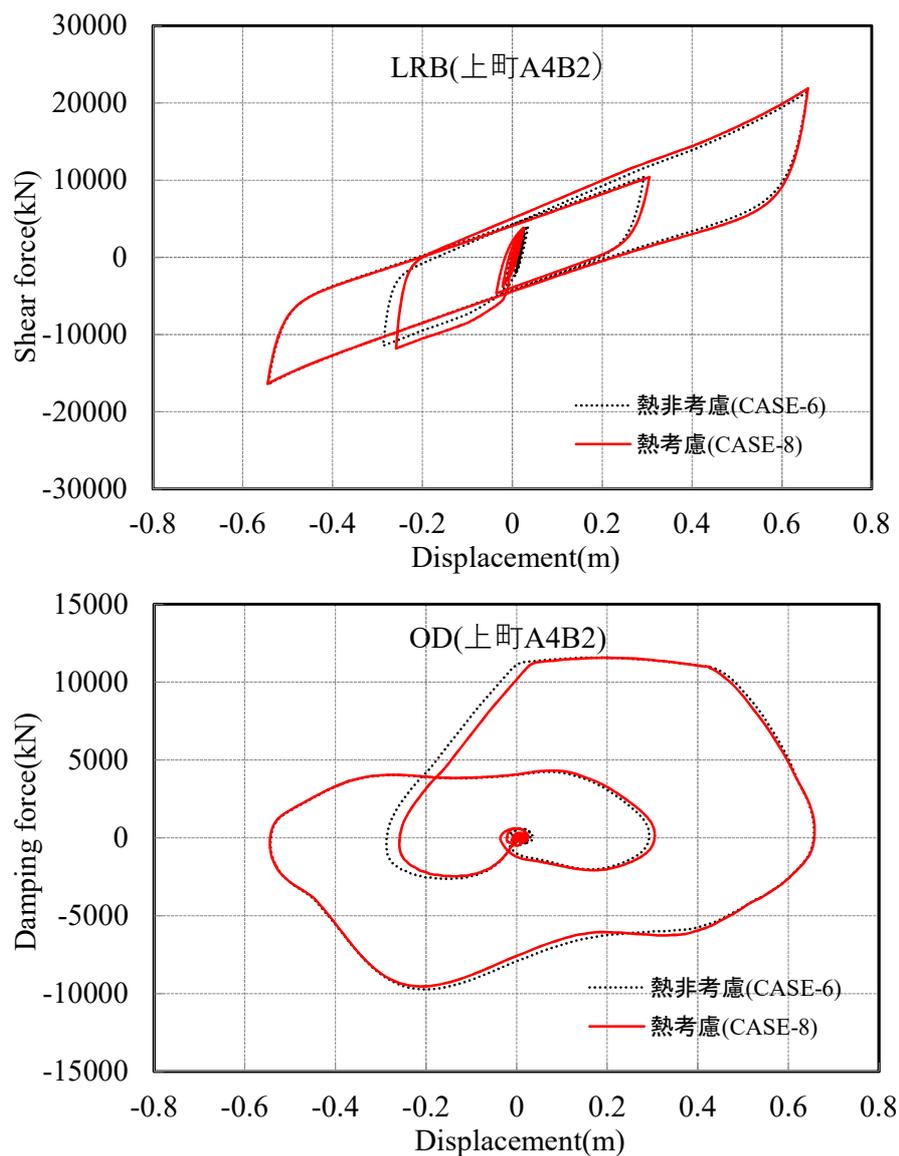


図 4.56 積層ゴムとオイルダンパーの荷重-変位関係(CASE-6・8: 上町 A4B2\_LRB+OD)

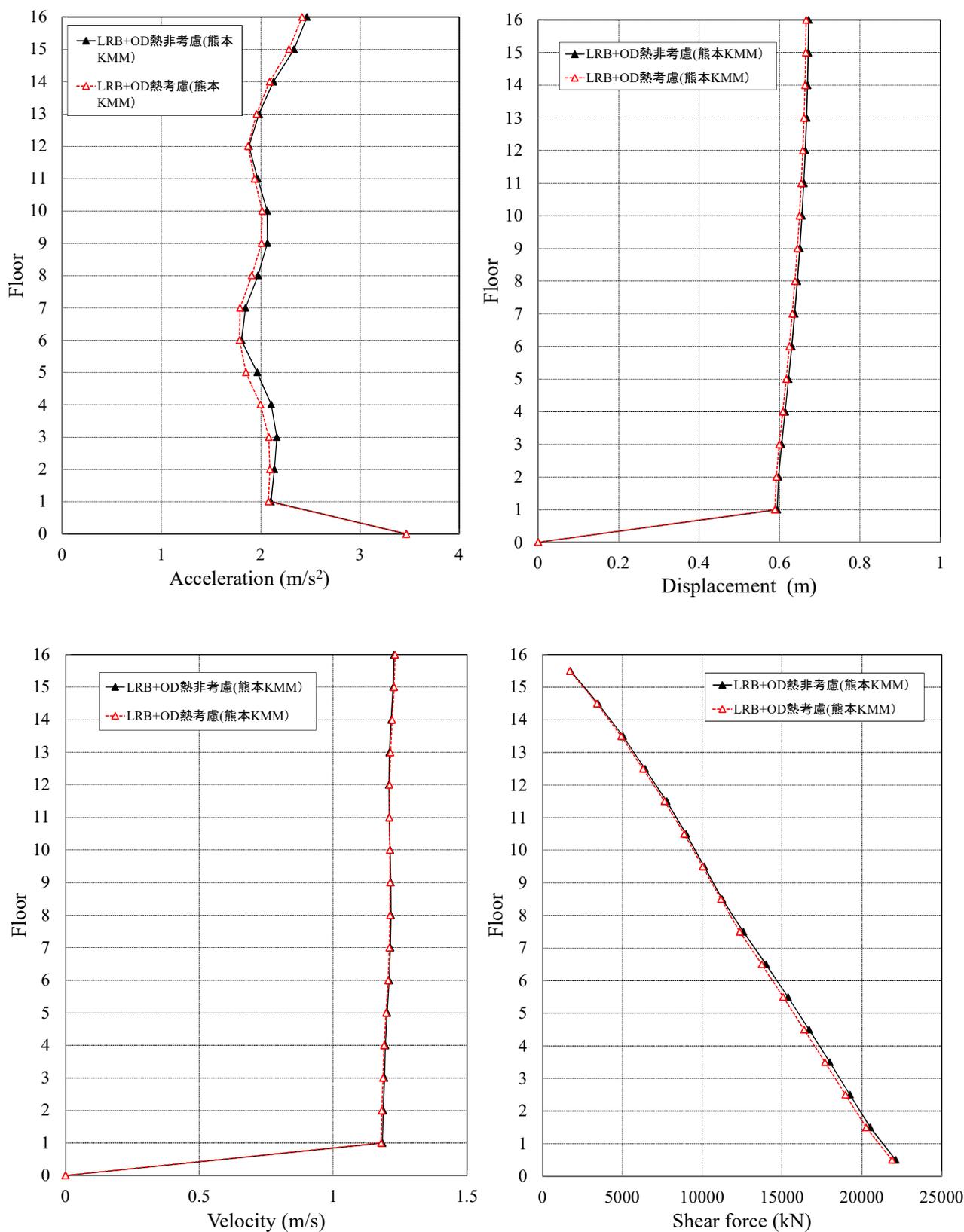


図 4.57 最大応答分布図 (CASE-2・4・6・8: 熊本 KMM)

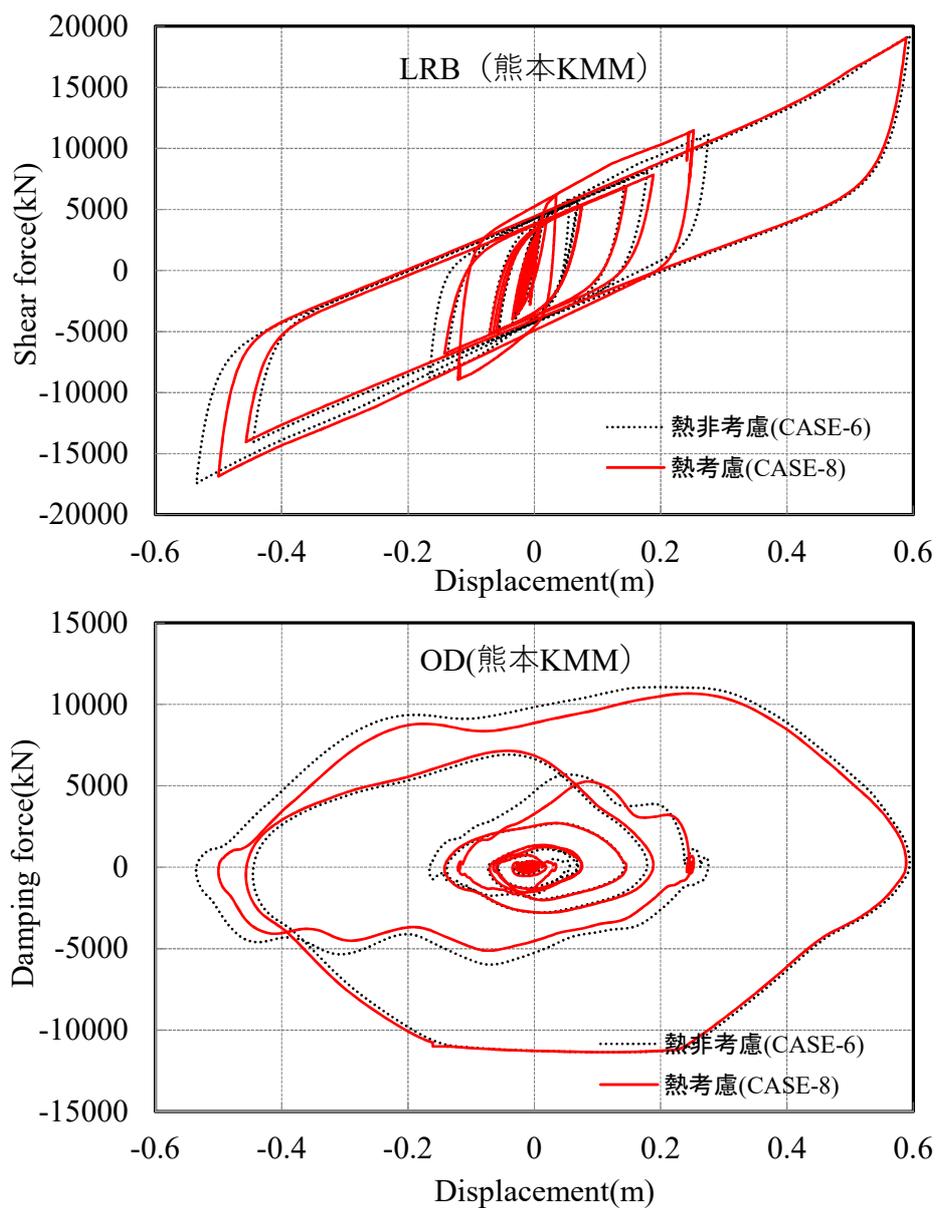


図 4.58 積層ゴムとオイルダンパーの荷重-変位関係(CASE-6・8: 熊本 KMM\_LRB+OD)

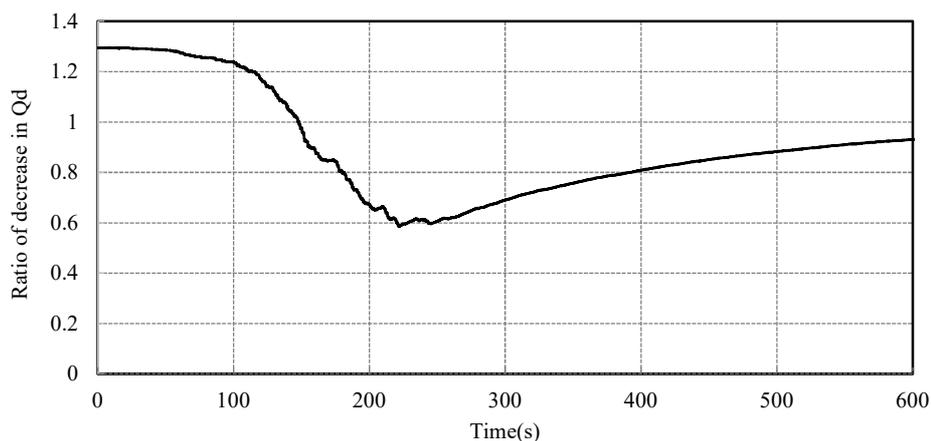


図 4.59 降伏荷重 (Qd)の低下率 (CASE-8 : LRB+OD 考慮①, 南海 AIC003)

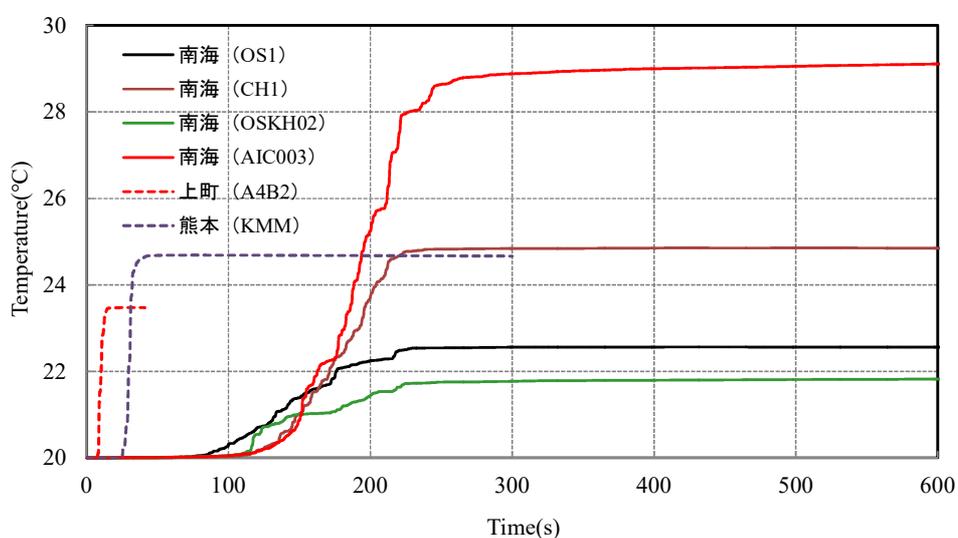


図 4.60 オイルダンパーの温度変化(CASE-8 : LRB+OD 考慮①, 南海 AIC003)

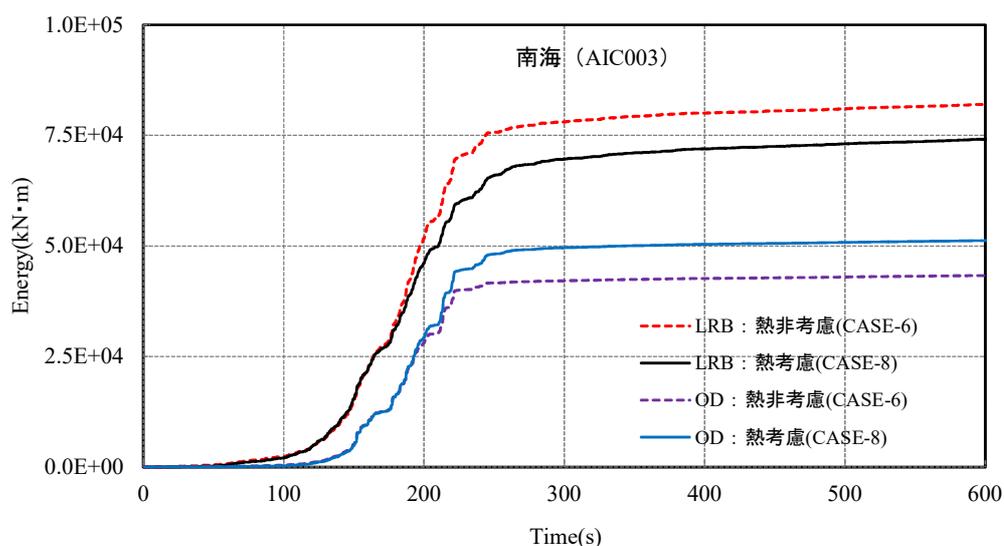


図 4.61 免震部材の累積吸収エネルギー量  
(CASE-6 : LRB+OD 非考慮, CASE-8 : LRB+OD 考慮①, 南海 AIC003)

3) 性能変化率による影響

オイルダンパーの温度と減衰係数の変化率を $-20^{\circ}\text{C}$ 、 $80^{\circ}\text{C}$ で最大 $\pm 10\%$ と変化させた特性②を採用した場合 (CASE-10) の最大応答分布図 (加速度・変位) を特性① (CASE-8) と併せて図 4.62~4.67 に示す。また、オイルダンパーの等価粘性減衰係数の変化率を図 4.68 に示す。最大応答分布は、ほぼ一致しており、特性①と特性②での差は現れていない。

オイルダンパーの温度上昇は、 $9.14^{\circ}\text{C}$ に対して $9.12^{\circ}\text{C}$ であり、等価粘性減衰係数の変化率は、特性①で $0.6\%$  ( $0.994$ ) に対して特性②でも $1.53\%$  ( $0.985$ ) と小さい。

したがって、規格値 $\pm 10\%$ まで考慮した特性を用いても、温度変化が小さければその影響は極めて小さい。

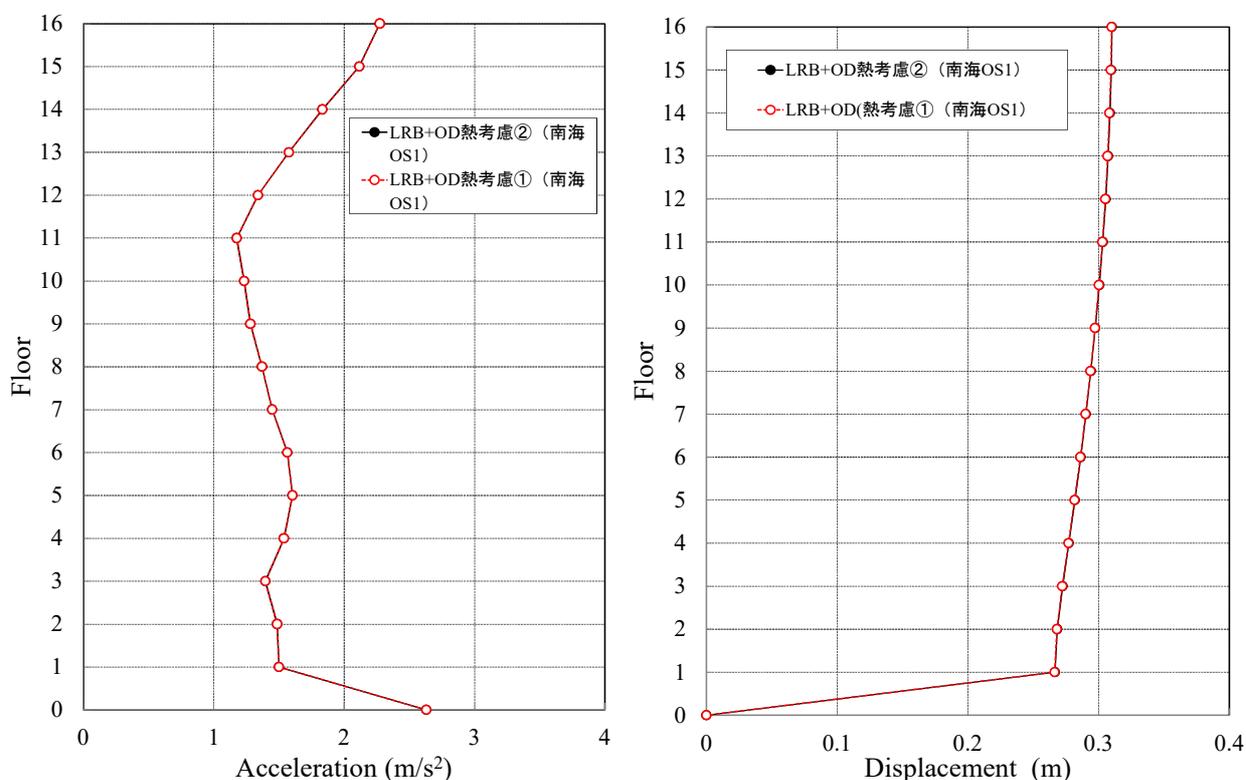


図 4.62 最大応答分布図 (CASE-8・10 : 南海 OS1)

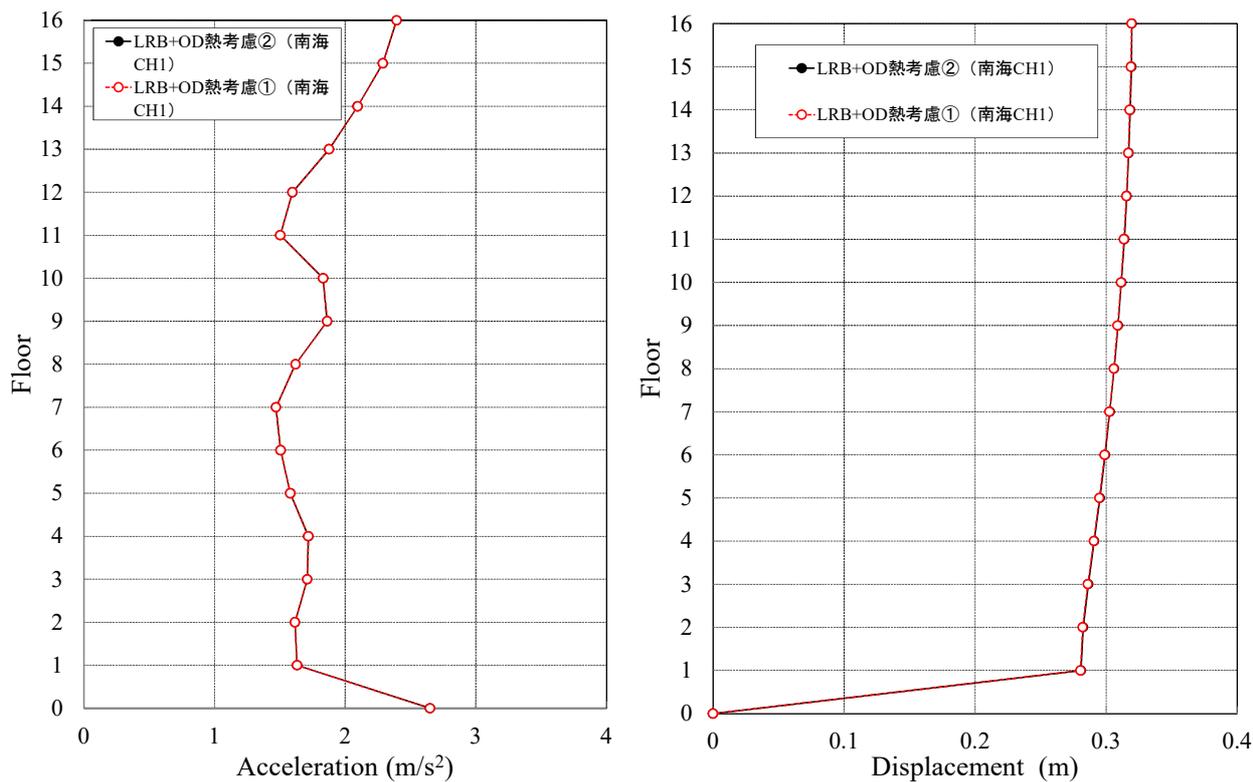


図 4.63 最大応答分布図 (CASE-8・10 : 南海 CH1)

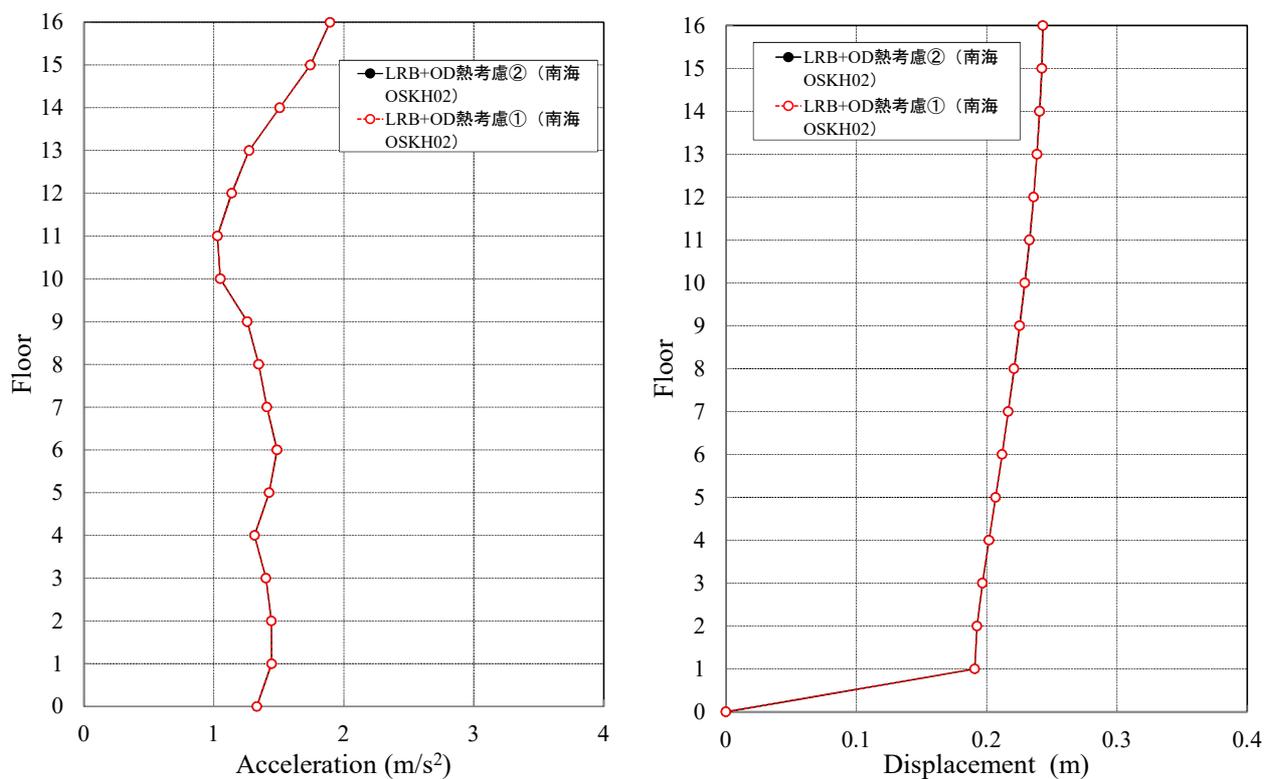


図 4.64 最大応答分布図 (CASE-8・10 : 南海 OSKH02)

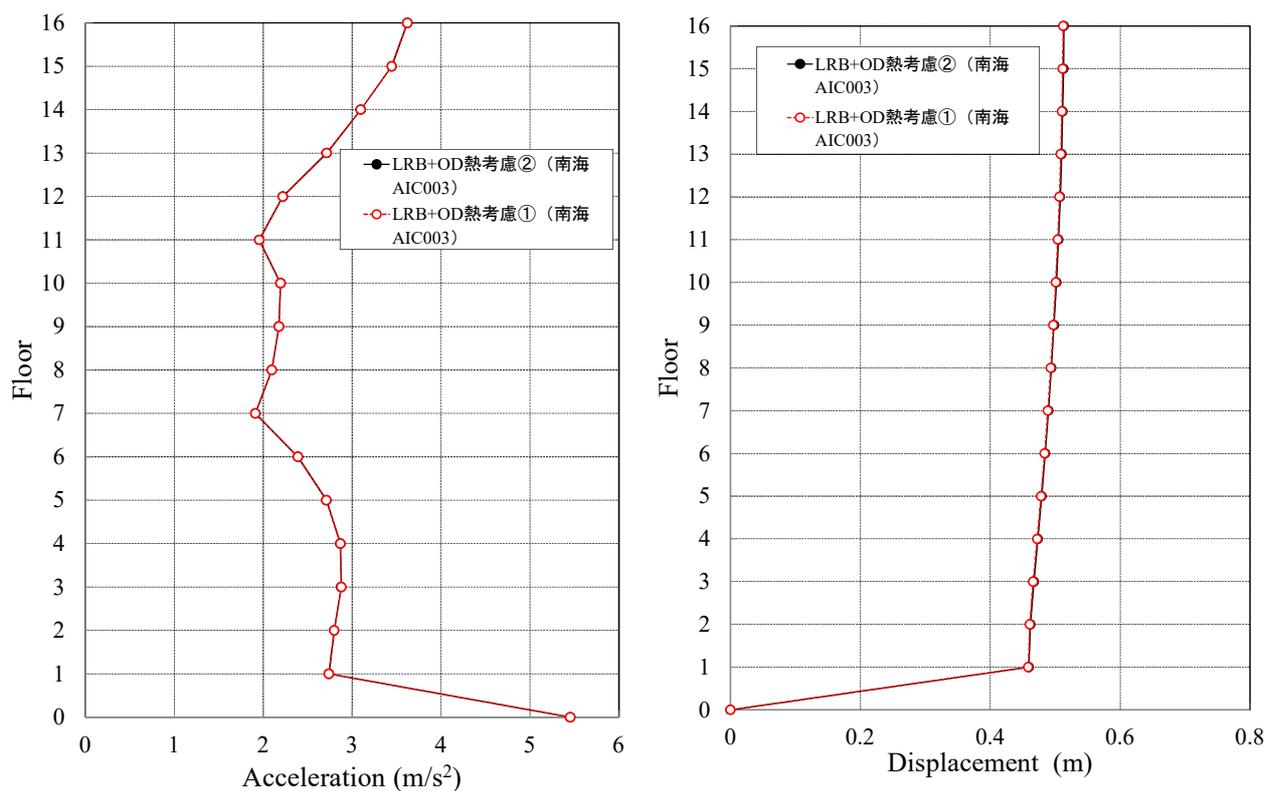


図 4.65 最大応答分布図 (CASE-8・10 : 南海 AIC003)

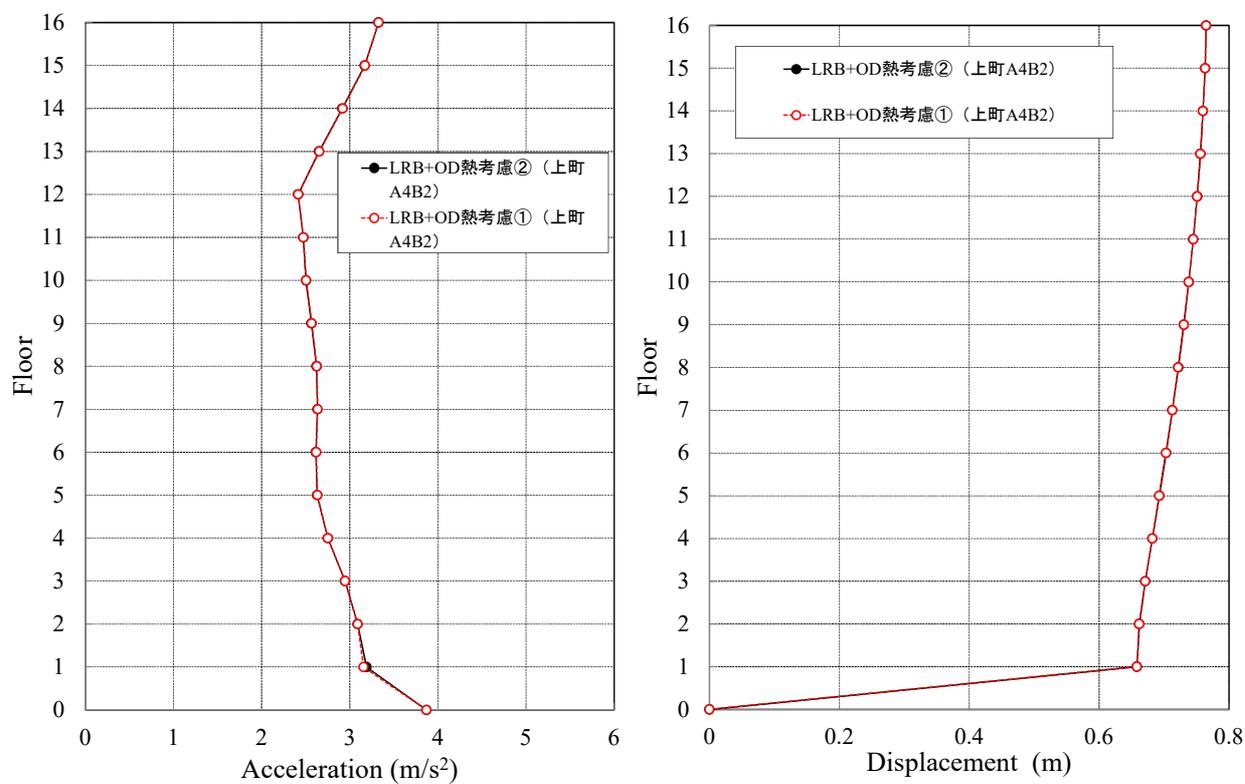


図 4.66 最大応答分布図 (CASE-8・10 : 上町 A4B2)

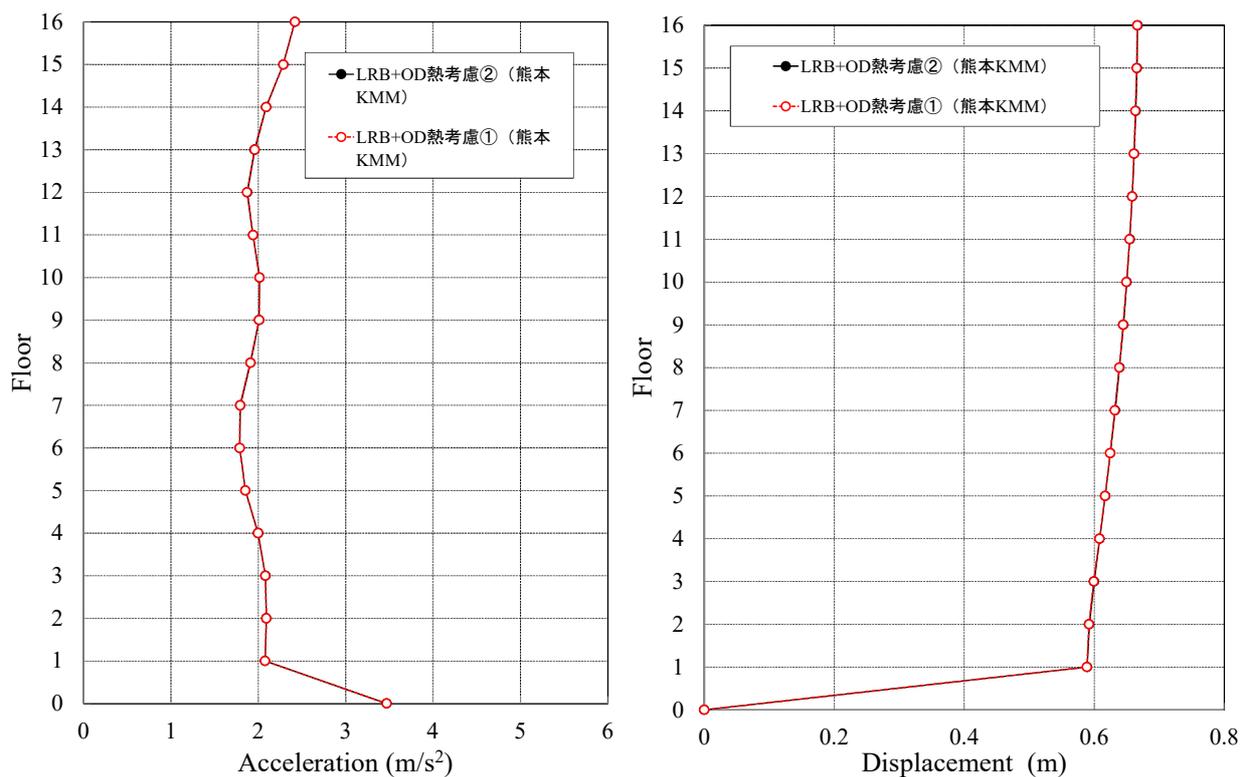


図 4.67 最大応答分布図 (CASE-8・10 : 熊本 KMM )

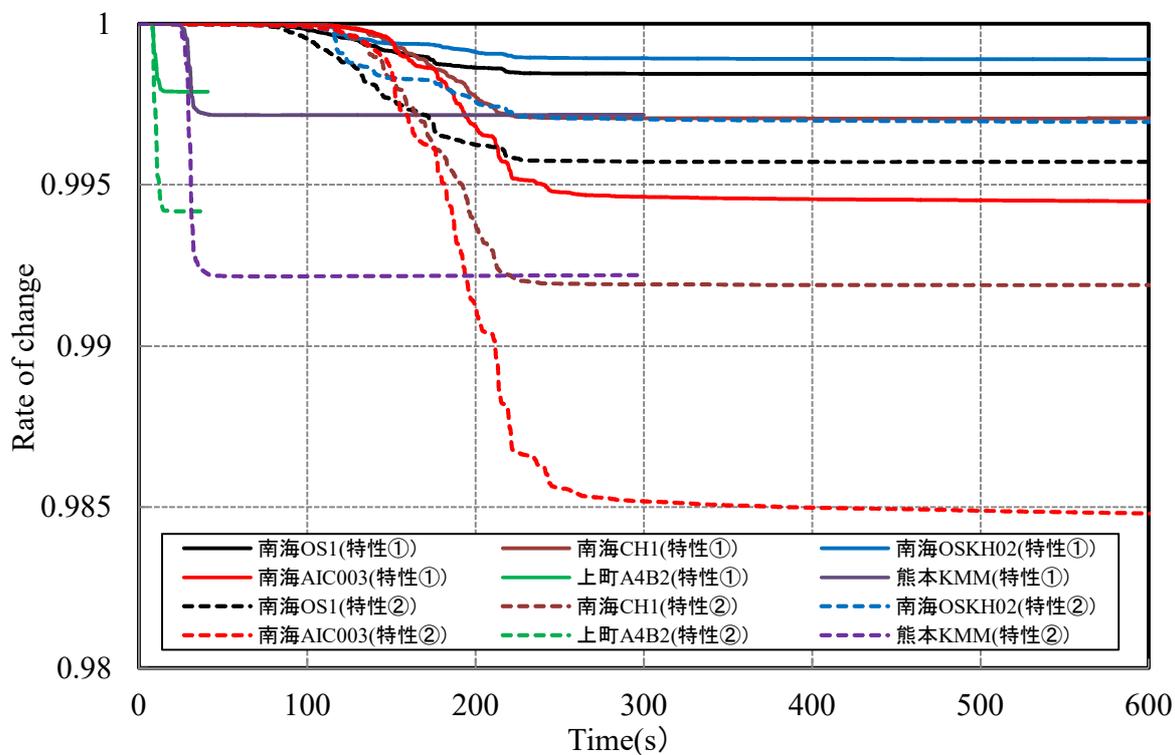


図 4.68 等価粘性減衰係数の変化率の時刻歴波形 (CASE-8 : LRB+OD 考慮①, CASE-10 : LRB+OD 考慮②)

## 4) 温度上昇による積層ゴムの特性変化

南海トラフ AIC003 における高減衰ゴム系積層ゴムと鉛プラグ入り積層ゴムの多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの有無による特性変化について以下に示す。

図 4.69, 4.70 に高減衰ゴム系積層ゴムのオイルダンパーがない場合 (CASE-3) とオイルダンパーがある場合 (CASE-9) の温度分布図を示す。また、高減衰ゴム系積層ゴムの体積平均温度の変化を図 4.71 に、温度による弾性成分 (Fte) と履歴成分 (Ftp) の低下率を図 4.72, 4.73 に、履歴特性を図 4.74 に示す。

高減衰ゴム系積層ゴムは、オイルダンパーがない場合では、継続時間終了時まで温度上昇が進み中央部で約 29°C となる。また、オイルダンパーがある場合では、中央部は 26°C 程度に低減される。いずれも、上部や外周部に放熱が反映しており、被覆ゴムでは熱伝導率の関係で温度は、ほとんど上昇せず、20°C 程度となっている。

高減衰ゴム系積層ゴムは、体積平均温度の変化が比較的小さいことから、温度による弾性成分の低下率はオイルダンパーが無い場合 (CASE-3) で 0.95, オイルダンパーがある場合 (CASE-9) で 0.96 であり、履歴成分の低下率は各々 0.89, 0.93 となっている。履歴特性においてもオイルダンパーにより変位は抑制されているが、同歪での履歴ループの差は小さい。

図 4.75, 4.76 に鉛プラグ入り積層ゴムのオイルダンパーがない場合 (CASE-4) とオイルダンパーがある場合 (CASE-10) の温度分布図を示す。また、図 4.77 に鉛プラグ入り積層ゴムのプラグ部分の体積平均温度 (体積平均応力度から逆算した温度) の変化を、図 4.78 に Qd の低下率を、図 4.79 に履歴特性を示す。

鉛プラグ入り積層ゴムは、オイルダンパーがない場合では、250s 付近でプラグ部の温度上昇が最大中央部で約 290°C となり、オイルダンパーがある場合は、220°C 程度に低下する。一方、積層ゴム部分の温度上昇は、鉛プラグ部付近は 100°C 程度であるが外周に移行するほど温度上昇は小さい。

鉛プラグ入り積層ゴムは、プラグ部の体積平均温度の変化が大きく、降伏荷重 Qd の変化率は、オイルダンパーが無い場合で、40%程度に、オイルダンパーある場合は 60%程度となり、オイルダンパーの変位抑制によりプラグ部の温度上昇に伴う低下率が抑えられている。同様に履歴ループにおいても差が生じている。

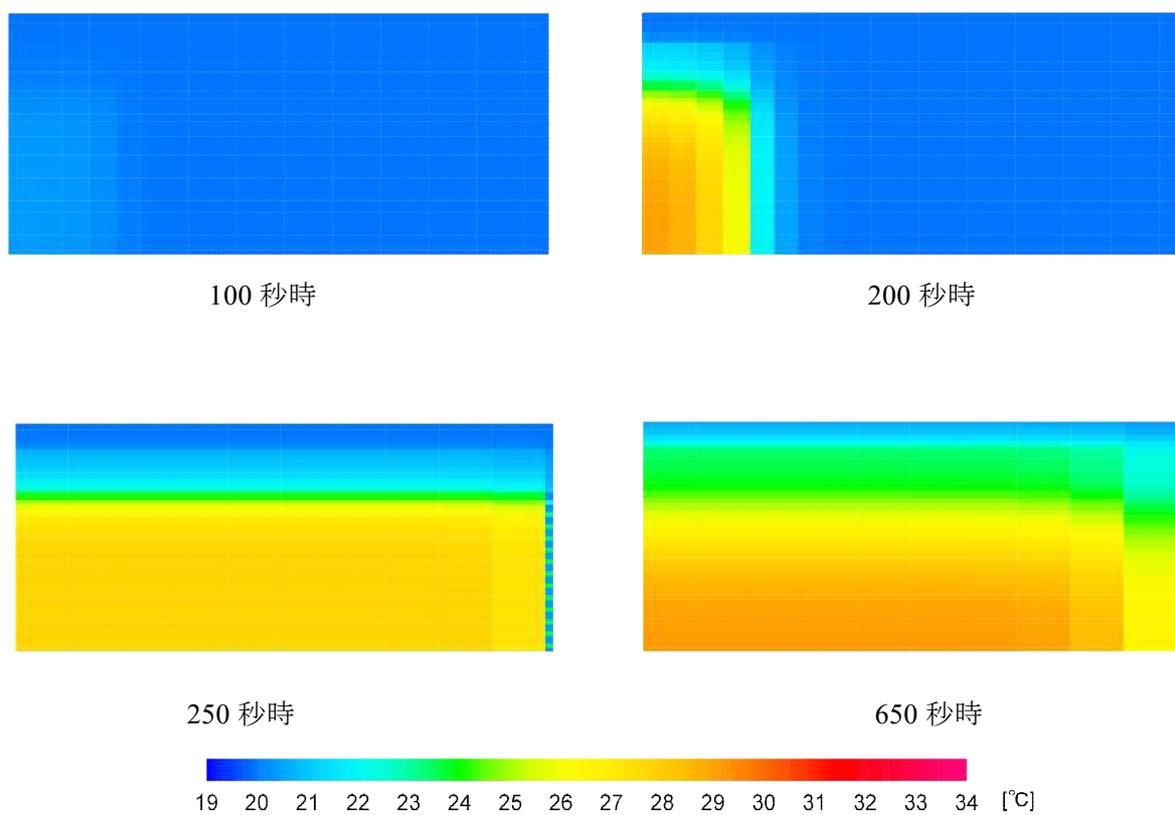


図 4.69 高減衰ゴム系積層ゴムの温度分布図(CASE-3：南海 AIC003 HDR)

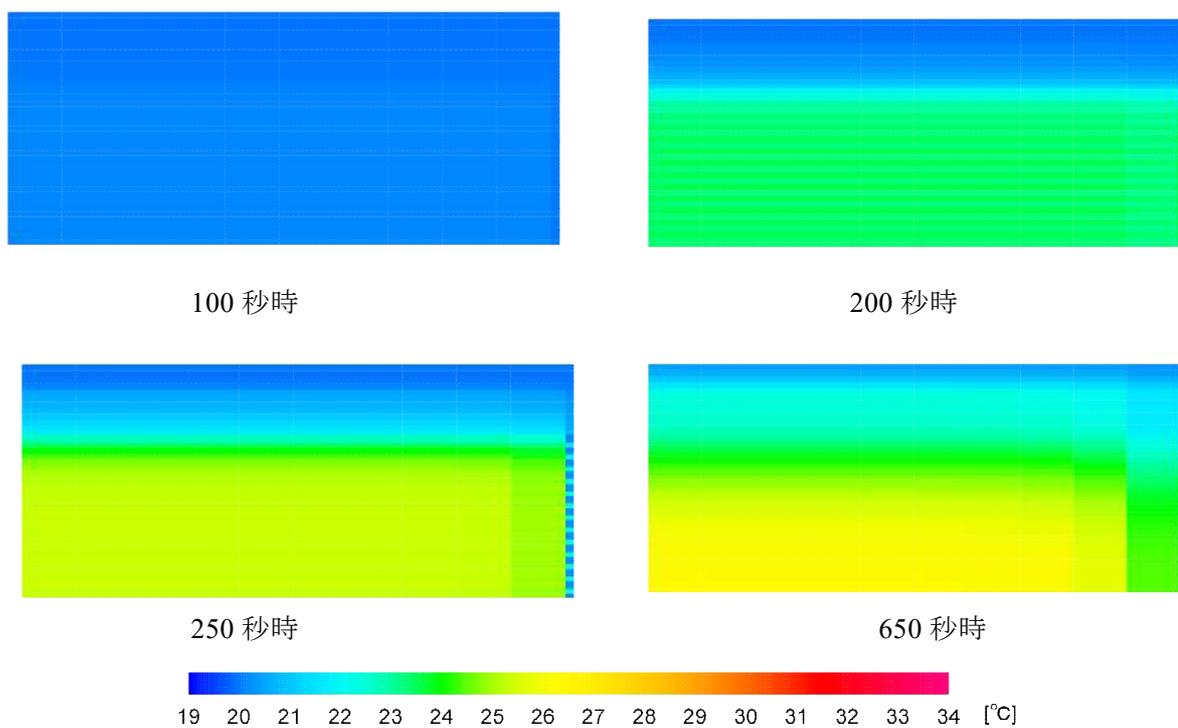


図 4.70 高減衰ゴム系積層ゴムの温度分布図(CASE-9：南海 AIC003 HDR+OD)

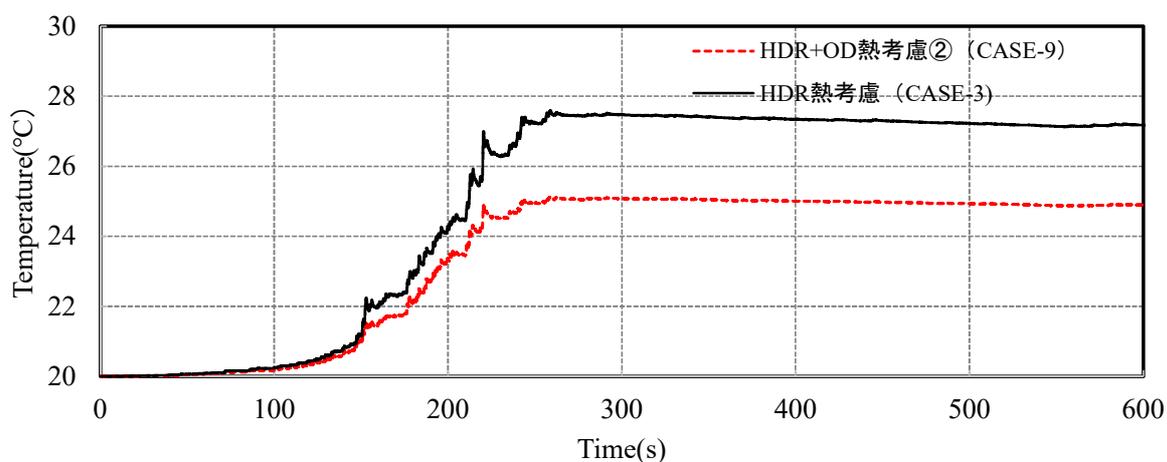


図 4.71 高減衰ゴム系積層ゴムの体積平均温度の変化

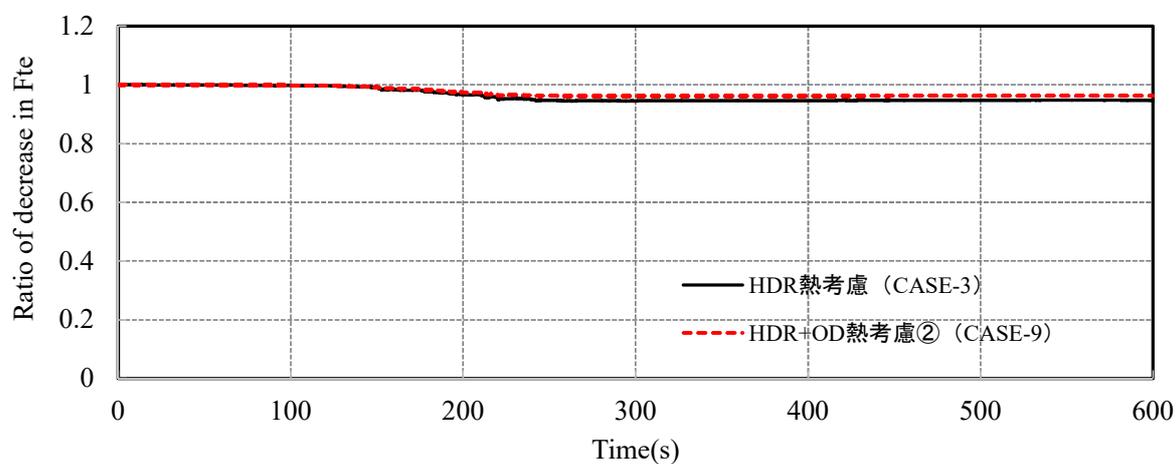


図 4.72 高減衰ゴム系積層ゴムの弾性成分 (Fte) の温度依存性

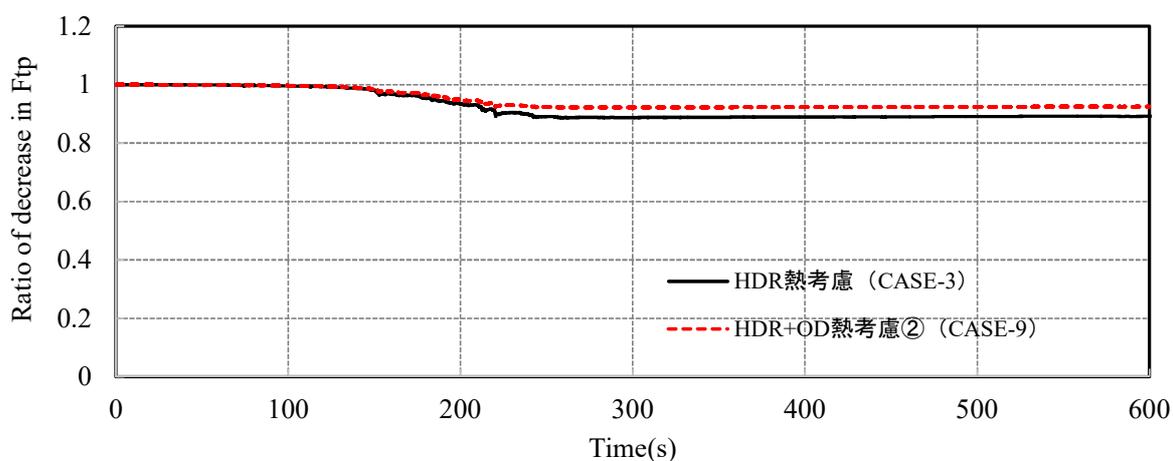


図 4.73 高減衰ゴム系積層ゴムの履歴成分 (Ftp) の温度依存性

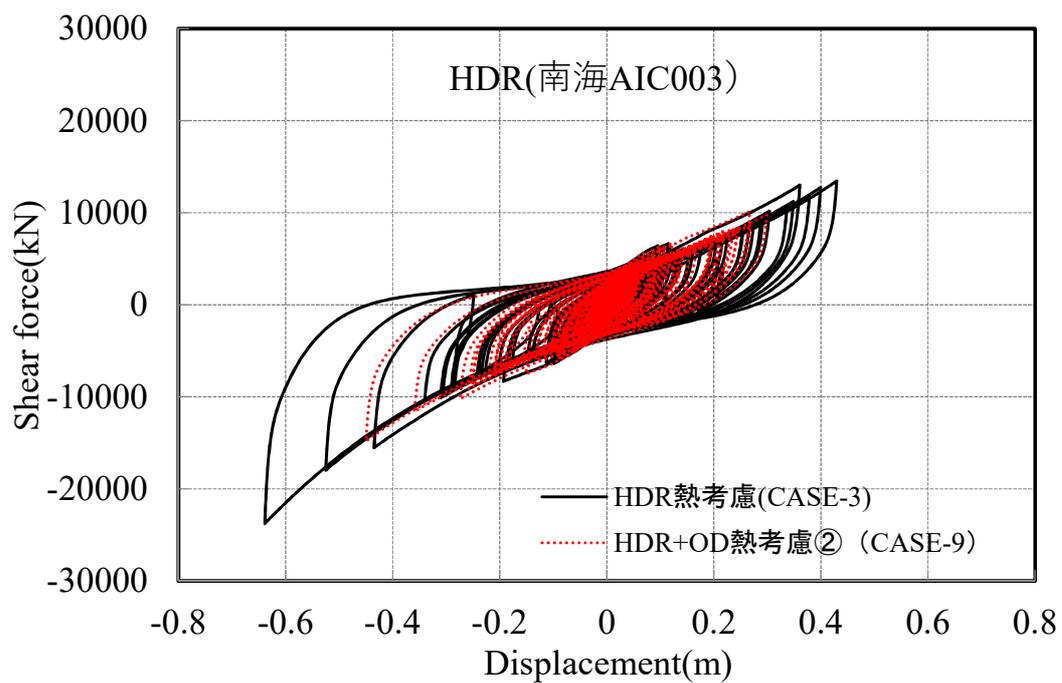


図 4.74 高減衰ゴム系積層ゴムの履歴特性

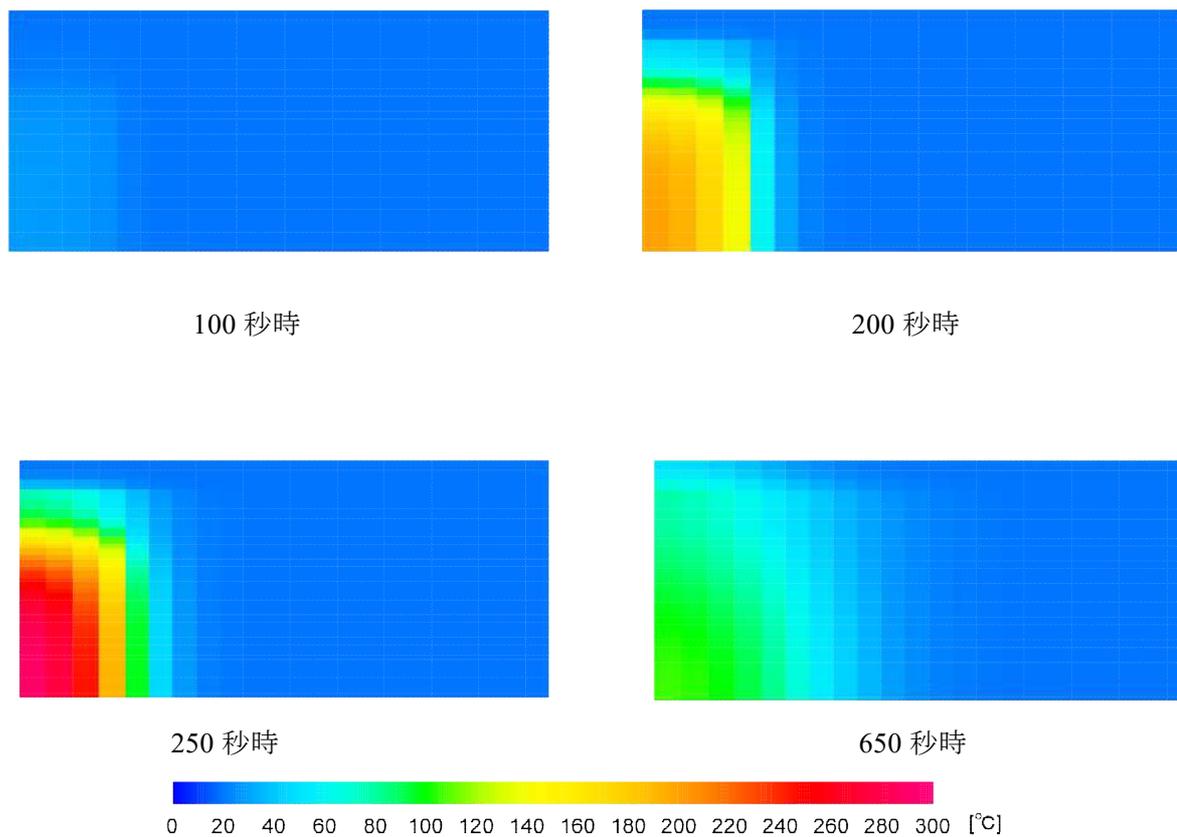


図 4.75 鉛プラグ入り積層ゴムの温度分布図(CASE-4 : 南海 AIC003 LRB)

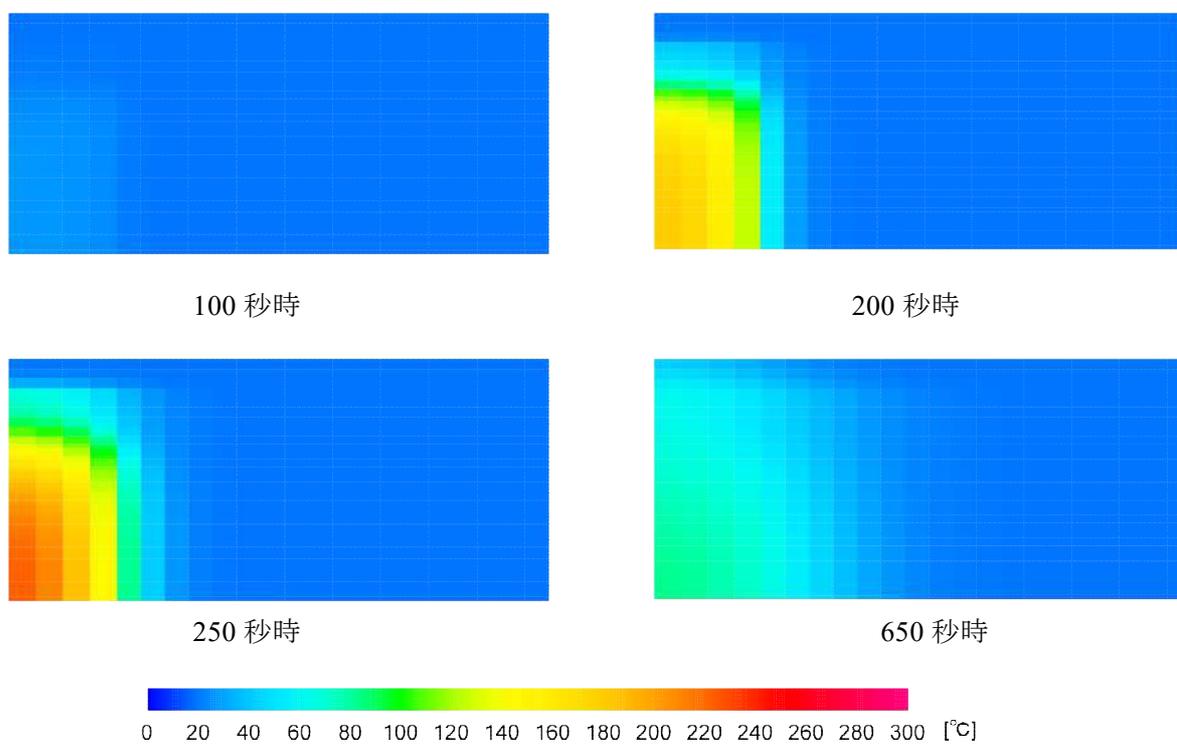


図 4.76 鉛プラグ入り積層ゴムの温度分布図(CASE-10 : 南海 AIC003 LRB+OD)

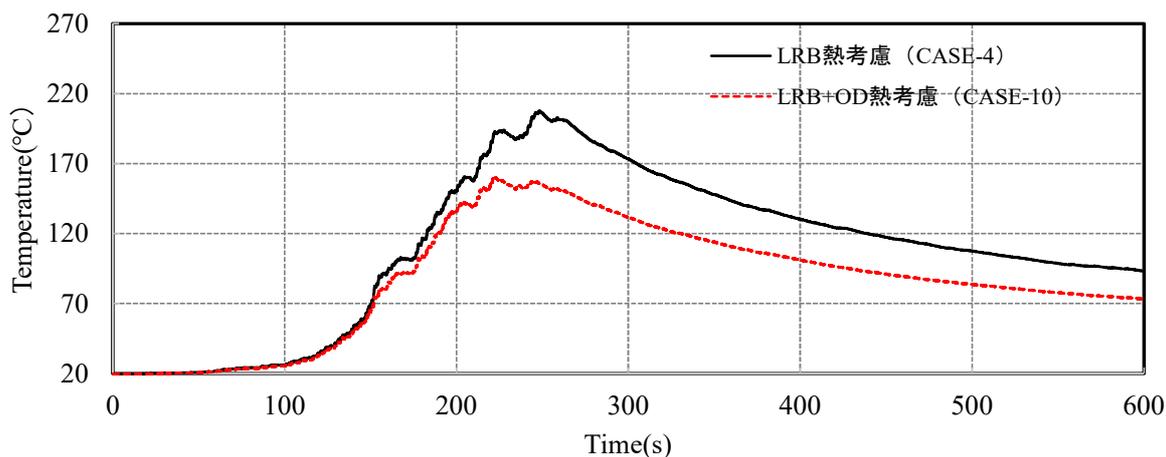


図 4.77 鉛プラグ入り積層ゴムのプラグ部体積平均温度の変化

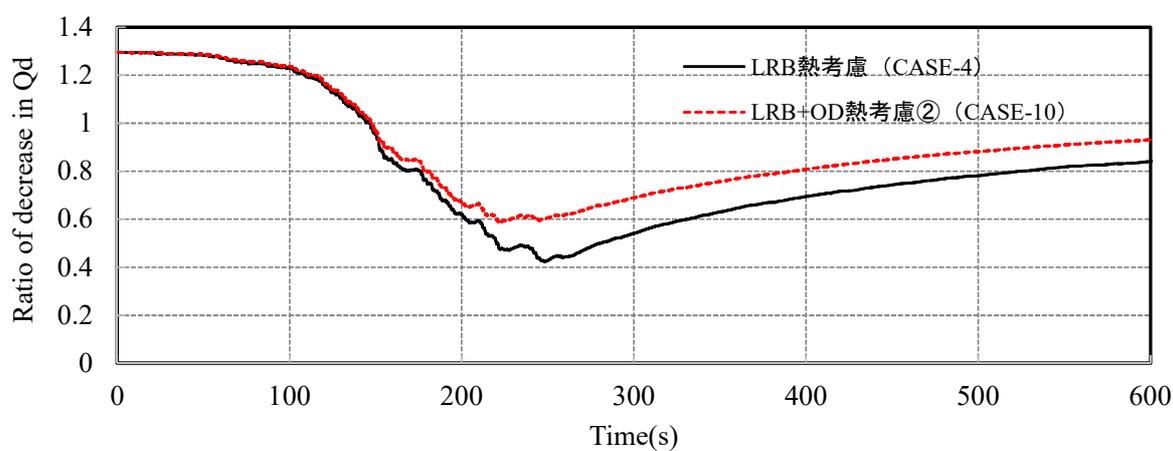


図 4.78 鉛プラグ入り積層ゴムの降伏荷重 (Qd) の低下率

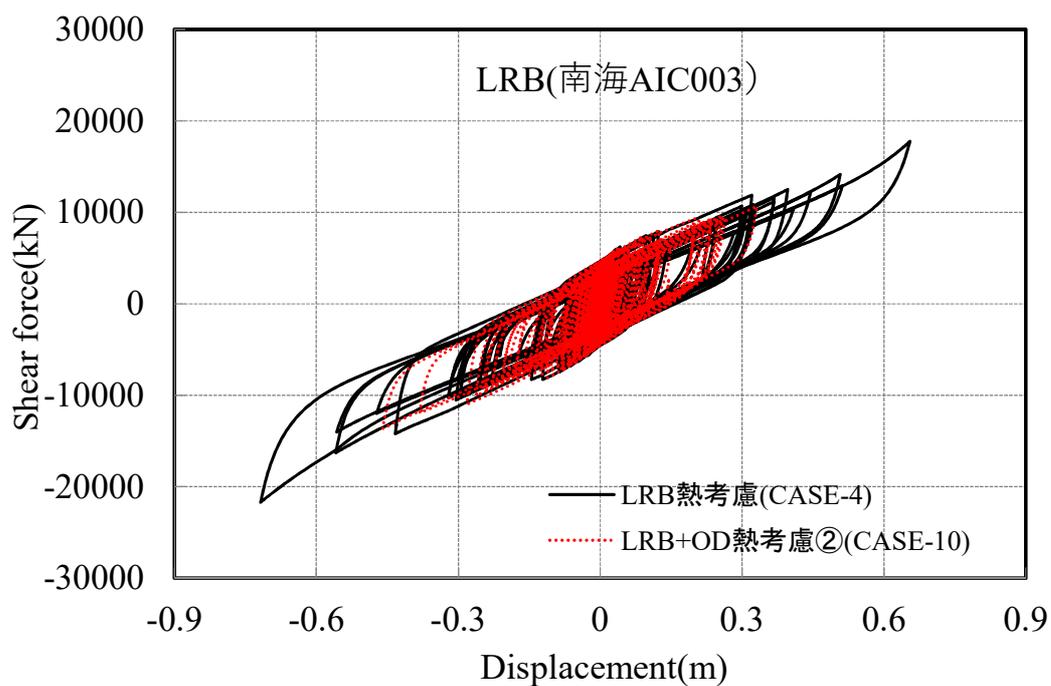


図 4.79 鉛プラグ入り積層ゴムの履歴特性

#### 4.5 まとめ

本章では、オイルダンパーの温度上昇に伴う減衰係数の変化（繰り返し依存性）を考慮した新たな解析法を考案し、解析プログラム OpenSees を用いて、大振幅地震動における時刻歴応答解析による解析検討を行った。以下に示す検討結果より、免震部材の繰り返し依存性を考慮した場合において、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーが有効に作用すると結論付ける。

- (1) オイルダンパーの繰り返し依存性による性能変化は、実機による加力試験より機種毎の減衰係数の変化率を設定している。繰り返しによる性能変化率は、温度変化で 20°C に対する変化率を $\pm 10\%$ 以内、繰り返し加振変化で初期加振に対する変化率で $\pm 5\%$ 以内を規格値としており、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーと同機種の BDS120 では温度性能変化における変化率は 5.6~2.4%とした。また、実験のサンプル数や減衰力特性を考慮し、-20°C、80°Cで規格値 $\pm 10\%$ としたタイプの特性も設定した。
- (2) 精算法による温度上昇の推定法を利用し、温度上昇による等価粘性減衰係数の変化率から時刻歴応答解析において時々刻々と温度に応じて、減衰係数を変化させることで、繰り返し依存性を考慮する方法を提案した。
- (3) 15 階建て RC 造の基礎免震構造における時刻歴応答解析による繰り返し依存性による比較検討を行った結果、オイルダンパーの繰り返し依存性が免震性能に与える影響は、非常に小さいことが確認された。
- (4) 本章では、一般的に採用している免震システムに多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを追加した限定的な解析結果ではあるものの、耐熱限界温度 80°C 以下に抑えることで、免震用オイルダンパーの温度上昇が応答に与える影響は、比較的小さいと考えられる。よって、繰り返し依存性がある支承材に多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを追加設置することで、大振幅地震動に対しても、有効に作用し、設計領域では従来の免震効果を確保しつつ、大振幅地震動の領域で変位を抑制することにより擁壁衝突を回避する目標性能を確保することが可能である。
- (5) 提案する解析法は、免震・制振用オイルダンパーに共通するもので、オイルダンパーを用いた様々な免震・制振システムに適応できる。また、限界性能に近い応答であっても、より精度の高い応答推定が可能である。

第4章の参考文献

- 1) 日本建築学会：大振幅地震動に対する免震構造の設計， pp.83-125， 2020.11
- 2) 福喜多輝ほか：可変減衰型オイルダンパーの開発（その1，2），日本建築学会学術講演梗概集（中国），構造II， pp.991-994， 2017.8
- 3) 欄木龍大ほか：巨大地震に対する高性能免震技術の開発（その1～3），日本建築学会学術講演梗概集（関東），構造II， pp.509-514， 2015.9
- 4) 安田拓矢ほか：免震ダンパー接続型付加減衰機構の開発（その1，2），日本建築学会学術講演梗概集（東海），構造II， pp.275-278， 2012.9
- 5) 得能将紀ほか：免震用オイルダンパーに接続する不感帯機構の開発（その1），日本建築学会学術講演梗概集（九州），構造II， pp.403-404， 2016.8
- 6) 荻野伸行，露木保男，猪口敏一，中原学，山崎久雄：大振幅地震動対策用免震オイルダンパーの開発（その1）基本特性および効果の検証，日本建築学会学術講演梗概集，構造II， pp.409-410， 2016.8
- 7) 中原学，荻野伸行，北川麻記，山口洋平：大振幅地震動対策用免震オイルダンパーの開発（その2，3），日本建築学会学術講演梗概集，構造II， pp.995-998， 2017.8
- 8) 石原幸子，中原学：トリリニア型オイルダンパーの開発，KYB 技報， pp.45-49， 2018.10
- 9) Nobuyuki Ogino, Masaru Kikuchi, Masanari Okamoto: 'Study of High-performance Oil Dampers for Seismically Isolated Structures to Counter Extremely Strong Earthquake Ground Motions', 16th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Regulation of Dynamic Characteristics of Structures, Saint-Petersburg, Russia, July 1-6, 2019
- 10) 荻野伸行，菊地優，岡本真成，中原学：大振幅地震動に対する免震用多段速度依存型可変減衰オイルダンパーに関する研究，構造工学論文集 Vol.67B， pp.549-556， 2021.3
- 11) 国土交通省：超高層建築物等における南海トラフ沿い巨大地震による長周期地震動への対策について，平成28年6月
- 12) 国立研究開発法人建築研究所：免震部材の多数回繰り返し特性と免震建築物の地震応答性状への影響に関する研究，建築研究資 No.170， 2016.4，  
<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/publications/data/170/index.html>
- 13) カヤバシステムマシナリー：カヤバ BDS 型オイルダンパー（BDS シリーズ）の長周期地震動に対する免震材料の性能変化について，平成29年7月
- 14) カヤバシステムマシナリー：オイルダンパーの繰り返し加振に対する減衰性能について，平成29年4月
- 15) カヤバシステムマシナリー：MVBR-0326-2，平成30年12月
- 16) OpenSees, Open System for Earthquake Engineering Simulation – Home Page,  
<https://opensees.berkeley.edu/> (2021年8月10日アクセス)
- 17) 日本建築学会：長周期地震動と建築物の耐震性， pp.234-237， 2007.12
- 18) ブリヂストン：MVBR-0514/MVBR-0520（X0.6R シリーズ），2014
- 19) 国土交通省：超高層建築物等における南海トラフ沿い巨大地震による長周期地震動への対策について，2016  
[http://www.mlit.go.jp/report/press/house05\\_hh\\_000620.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000620.html)

- 20) 建築研究所：超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討-南海トラフ4連動地震による超高層・免震建物の応答解析-, 建築研究資料 No.147, 2013
- 21) 大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および設計法に関する研究会：大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および耐震設計指針, 2015
- 22) 防災科学技術研究所：平成28年(2016年)熊本地震 K-NET/KiK-netの地表観測点で観測された強震動  
<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/quake/>
- 23) 加藤秀章, 森隆浩, 室田伸夫, 石井建, 菊地優：高減衰積層ゴムの変形履歴積分型復元力モデルに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第667号, pp.1721-1728, 2011.9
- 24) Masaru Kikuchi, Takahito Nakamura, Ian D. Aiken: Three dimensional analysis for square seismic isolation bearings under large shear deformation and high axial loads, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 39, pp.1513-1531, 2010.10
- 25) 加藤真守, 菊地優, 石井建, 加藤秀章, 中村昌弘：高減衰積層ゴム X0.6R を用いた免震建物の長周期地震動に対する応答評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.885-886, 2018.9
- 26) 近藤明洋, 竹中康雄, 高岡栄治, 引田真規子, 北村春幸, 宮崎充：大振幅繰り返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究(その10), 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp.399-400, 2008.9
- 27) 荻野伸行, 石井建, 菊地優, 岡本真成：大振幅地震動に対するオイルダンパーの繰り返し依存性を考慮した時刻歴応答解析に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集(構造II), pp.589-590, 2021.9
- 28) 荻野伸行, 石井建, 菊地優, 岡本真成：大振幅地震動に対するオイルダンパーの繰り返し依存性を考慮した時刻歴応答解析に関する研究, 構造工学論文集 Vol.68B, pp.376-385, 2022.4

## 第 5 章 断層近傍の長周期パルス地震動に対する多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの適用

- 5.1 概要
  - 5.2 複合ダンパーの設計
  - 5.3 縮小モデルによる基本特性試験
  - 5.4 時刻歴応答解析による検討
  - 5.5 まとめ
- 第 5 章の参考文献

## 第5章 断層近傍の長周期パルス地震動に対する多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの適用

### 5.1 概要

設計領域を超えるような大振幅地震動に対する免震構造の応答変位抑制法について、筆者は、擁壁の衝突を回避し、かつ、設計領域では、従来の免震効果を確保し、大振幅地震動の領域で変位を抑制することが可能な多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを提案している。

本オイルダンパーは、ほとんどの大振幅地震動に適用可能であるが、それをはるかに超える想定最大級の地震では、他の免震部材も同様であるが対応できない。

一方、2016年の熊本地震では、震源近傍で長周期成分が卓越するパルス状の強い地震動（以下、長周期パルス）が観測されている。これらは、免震構造にとっても、非常に厳しい地震動となっており、応答変位や応答速度は、現在の免震部材の限界性能を超えるものとなる。

本章では、その解決策として、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーと摩擦ダンパーを組み合わせた複合ダンパーを適用した新たな免震システムを提案し、基本特性試験と時刻歴応答解析による検証結果について論ずる。

### 5.2 複合ダンパーの設計

免震用オイルダンパーの限界速度は、100～150cm/s であり、バルブの設計・製作の制約で、200cm/s を超えるものは現在、製品化されていない。一方、長周期パルスを想定した場合の免震構造の応答速度は 200cm/s を超える場合がある。ストッパーや擁壁に衝突させる設計もその対策の1つであるが、ここでは、免震効果を大速度・大振幅領域でも確保できるダンパーとして、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーと摩擦ダンパーを直列に設置し、設定速度を超えると摩擦ダンパーにパッシブで切り替わるシステムを提案する。図 5.1 に複合ダンパー概念図を示す。

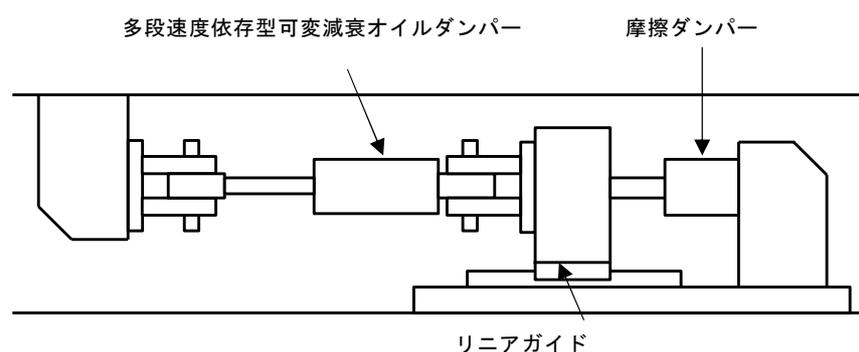


図 5.1 複合ダンパー概念図

複合ダンパーは、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーと摩擦ダンパーを中央ポストと摩擦力が小さいリニアガイドを介して、接合しており、各ダンパーは両端のブラケットにピンを差し込む形式で、交換も容易である。

新たに開発する輪ばね式摩擦ダンパーの概念図を図 5.2 に示す。摩擦ダンパーは筒形タイプで、外筒、ピストン（シャフト）、輪ばね、圧着板（内輪）、摩擦材、ボルトと皿ばねで構成されている。作動原理は、ボルトの締付軸力を輪ばねのテーパ形状を介して、ラジアル方向に圧縮力を発生させることで、ピストンの軸方向変形時に一定の摩擦力を確保している。

皿ばねの使用によって、ボルトの締付トルクを管理し、任意の圧縮力を設定することが可能であることから、摩擦力の調整も容易である。また、複合ダンパーに残留変位が生じた場合には、ボルトを緩めることで、元の位置に戻すことができる。

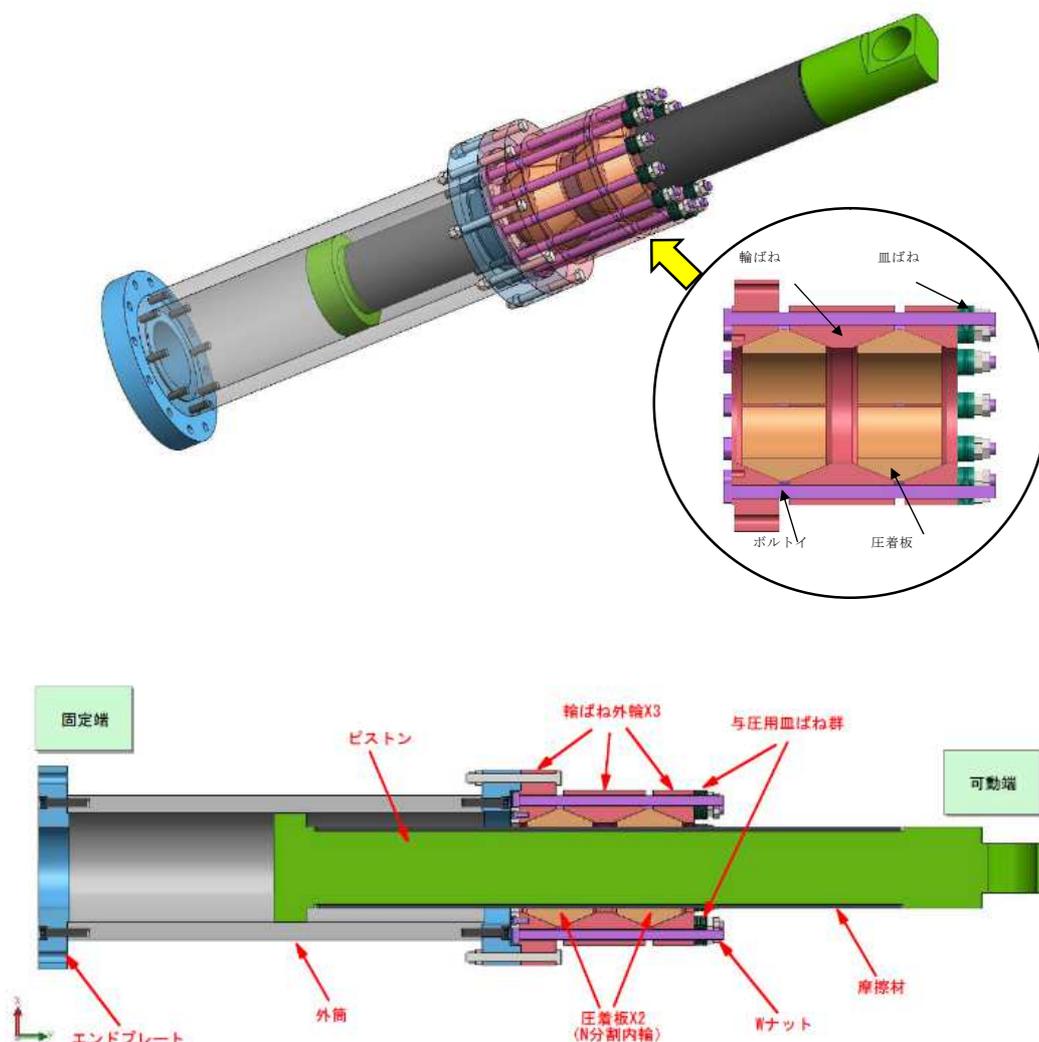
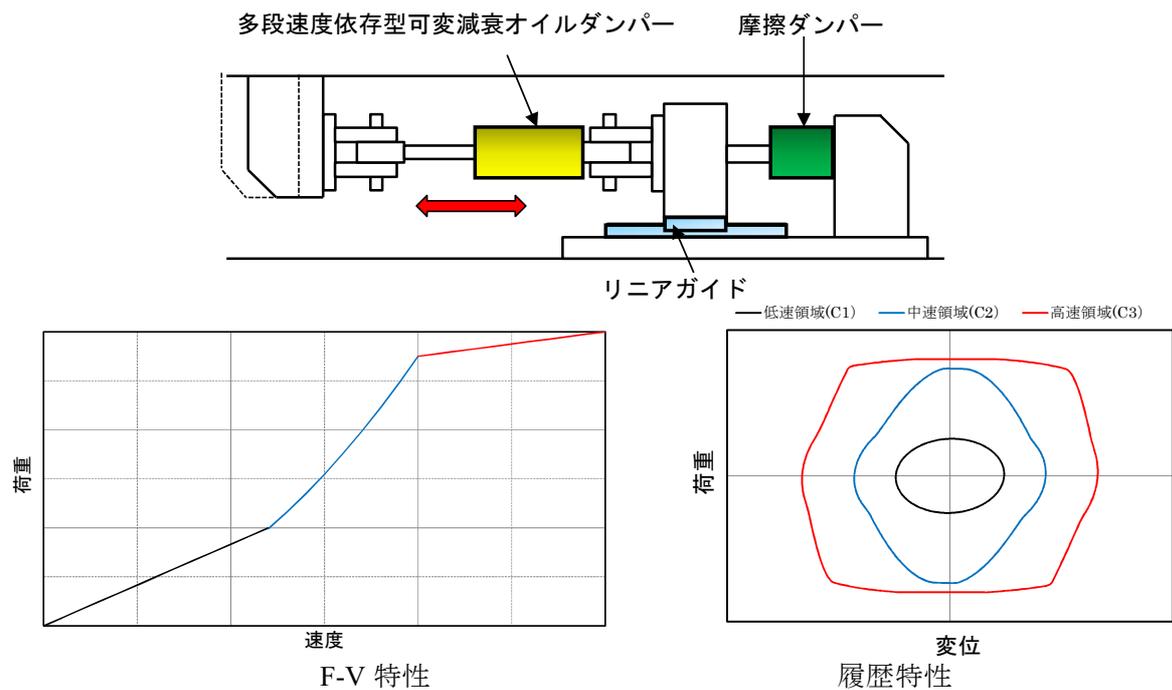


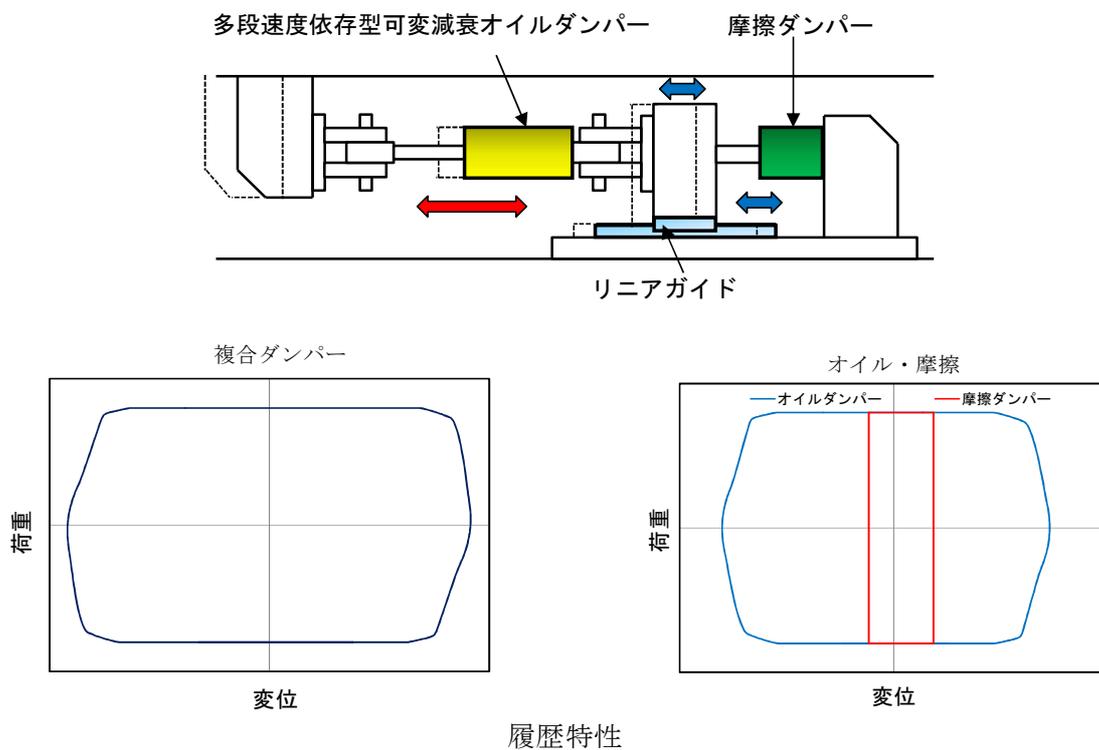
図 5.2 輪ばね式摩擦ダンパー概念図

複合ダンパーの稼働概念図を図 5.3 に示す。提案可変減衰オイルダンパーの限界速度以下の範囲（1.5m/s 以下）では摩擦ダンパーは、オイルダンパーの減衰力が摩擦ダンパーの摩擦力を超えない領域にあることから、オイルダンパーのみ作動し、第 2 章、第 3 章の減衰性能を得る。オイルダンパーの限界速度を超える範囲（1.5m/s 以上）では、オイルダンパーの限界速度に達し、最大減衰力を超えるため、リニアガイドがスライドし、摩擦ダンパーとオイルダンパーが稼働する。この時、各ダンパーは、直列配置しているため、最大荷重は最大減衰力=摩擦力で頭打ちとなるため、オイルダンパーの損傷を回避することができる。



- ・ 荷重が摩擦ダンパーの摩擦力を超えない範囲（限界速度以下）
- ・ オイルダンパーのみ稼働

限界速度（1.5m/s 以下）の場合



- ・ オイルダンパーの限界速度に達し摩擦ダンパーの摩擦力を超える範囲
- ・ リニアガイド（低摩擦）がスライド
- ・ オイルダンパー，摩擦ダンパーが稼働（オイルダンパーの損傷回避）

限界速度（1.5m/s 以上）の場合

図 5.3 複合ダンパーの稼働概念図

### 5.3 縮小モデルによる基本特性試験

#### (1) 試験計画

実機の複合ダンパーは、最大減衰力 1,200kN のダンパーを目指しているが、基本特性試験では、プロトタイプ（小規模の免震住宅レベル）における複合ダンパーの試験を行い、計画通りの機能・性能が発揮されるかの基本特性を把握することを目的として実施した。

#### 1) 試験体および単体特性試験

複合ダンパー試験体の概略図を図 5.4 に、オイルダンパー、摩擦ダンパー部の試験体を図 5.5、図 5.6 に示す。なお、各ダンパーを繋ぐ中央ポスト部のリニアガイド（長さ 1,000mm）は、最大変位  $\delta_{max} = \pm 27.5\text{cm}$  とした。

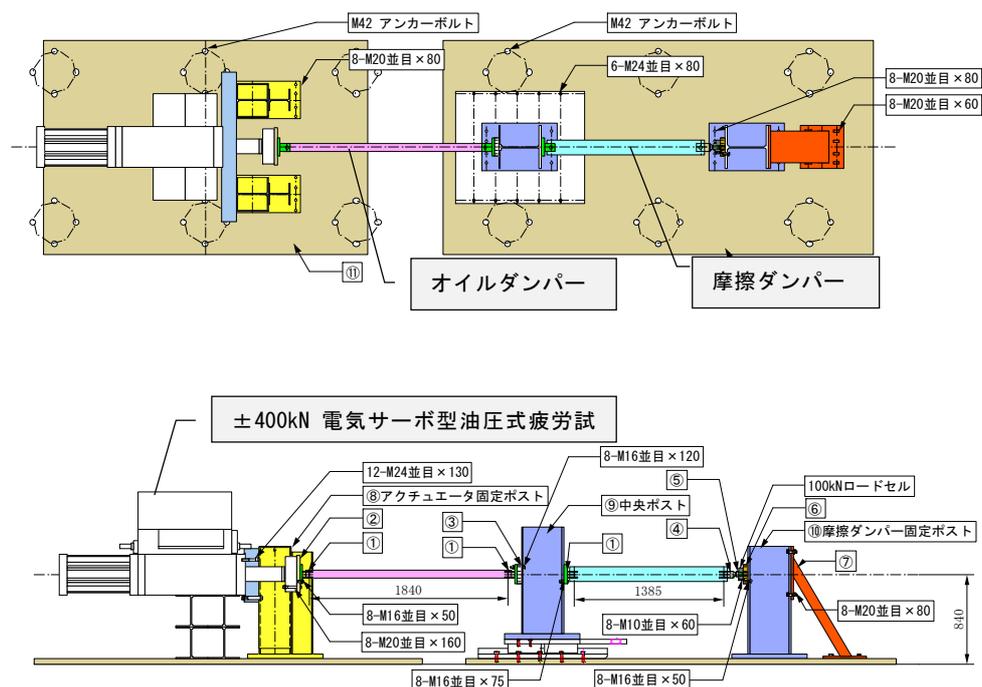


図 5.4 複合ダンパー試験体概略図

オイルダンパーは、市販品の住宅免震用オイルダンパーとし、最大減衰力 50kN、最大速度 100cm/s のリニア特性である。また、新たに開発した摩擦ダンパーは、最大摩擦力 50kN であり、摺動面を構成するピストンと内輪の形状・材質や摩擦材は複数の予備試験から設定した。予備試験から、内輪はテーパ角度  $8^\circ$  とし、材質 SCM435 にガス軟窒化、ショットピーニングを施した。また、ピストン部（シャフト）は材質 SCM435 に高周波焼入れ、ショットピーニング処理の上、グリスを塗布している。

型式：JD30-720-L-50-C（カヤバシステムマシナリー製）

減衰係数： $C=500\text{N} \cdot \text{s}/\text{cm}$

最大減衰力： $F_{\text{max}}=50\text{kN}$

最大速度： $V_{\text{max}}=100\text{cm}/\text{s}$

最大変位： $\delta_{\text{max}}=\pm 36\text{cm}$

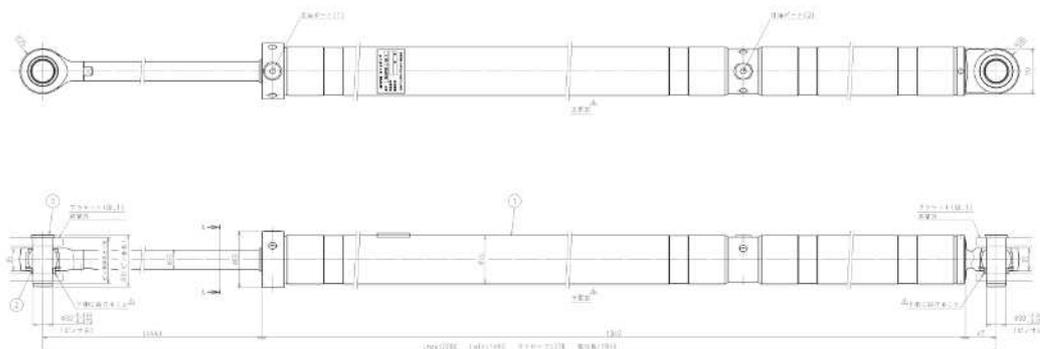


図 5.5 オイルダンパー試験体概略図

最大摩擦力： $F_{\text{max}}=50\text{kN}$  ( $F_{\text{fd}}: 40\text{kN}, 30\text{kN}, 20\text{kN}$ )

摩擦係数： $\mu=0.1$

最大変位： $\delta_{\text{max}}=\pm 27\text{cm}$

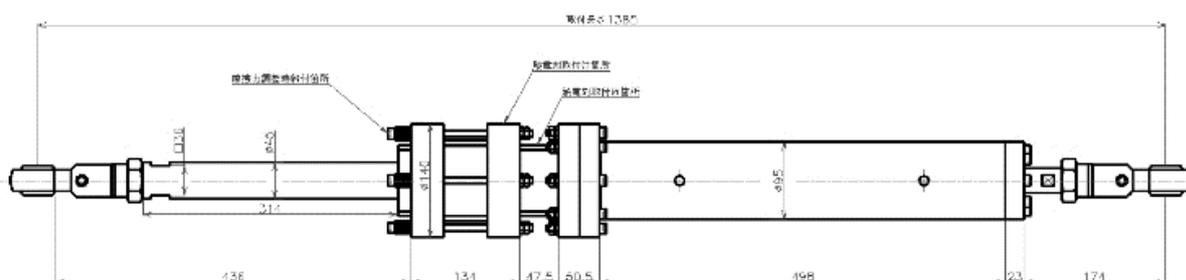


図 5.6 摩擦ダンパー試験体概略図

オイルダンパーの単体特性試験結果を図 5.7 に、摩擦ダンパーの単体特性試験結果を図 5.8 に示す。

オイルダンパーの減衰力は、速度 25~100cm/s において規格値±10%以内となっている。また、摩擦ダンパーの摩擦力も規格値±10%以内(3 サイクル目の切片荷重の平均値:28.64kN, 規格値-4.5%)となっている。

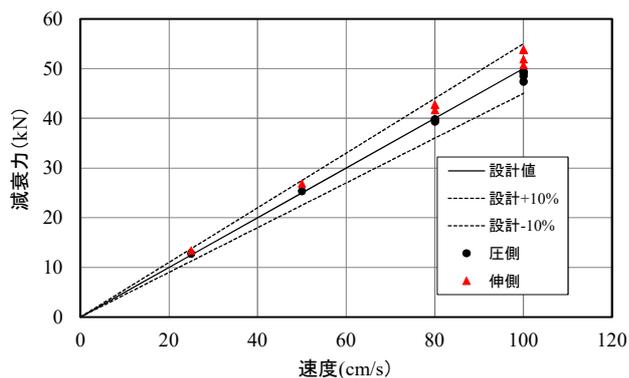


図 5.7 オイルダンパーの単体特性試験結果 (F-V 特性)

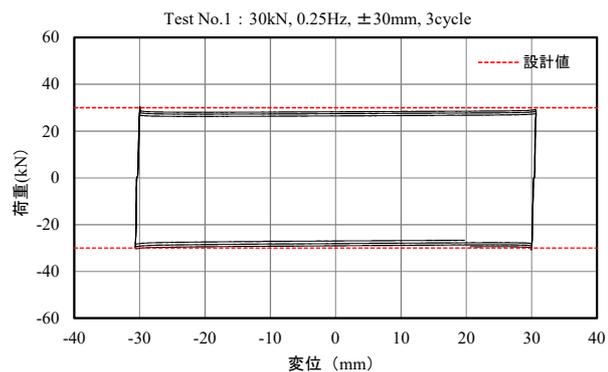


図 5.8 摩擦ダンパーの単体特性試験結果 (履歴特性)

## 2) 試験装置

試験は、コベルコ科研保有の $\pm 400\text{kN}$  電気サーボ型油圧式疲労試験機（島津製作所）を用いて実施した。試験機仕様および実験状況を図 5.9 に示す。また、測定は、荷重、変位（全体、各ダンパー）、温度について計測した。なお、本試験においては、リニアガイドの摩擦および慣性力の影響を受けない固定側のロードセルの荷重を試験結果として用いている。

最高速度 :  $100\text{cm/sec}$

荷重容量 : 動的  $\pm 400\text{kN}$ , 静的  $\pm 600\text{kN}$

ストローク :  $\pm 25\text{cm}$



図 5.9 試験機仕様および実験状況

### 3) 試験条件

複合ダンパーの基本特性を把握するために正弦波加振試験，ランダム波加振試験，繰り返し加力試験の3種類の試験を実施した。

なお，摩擦ダンパーの摩擦力は，オイルダンパーを固定治具に変更し，摩擦ダンパー単独の正弦波加力試験（0.25 Hz，±3 cm）を実施し，3 サイクル目の正負の切片荷重の平均値が条件荷重（摩擦力）に設定されていることを確認した。

#### a) 正弦波加振試験

正弦波加振試験は，複合ダンパーの切替特性，振幅依存性，振動数（速度）依存性について確認するために実施した。表 5.1 に正弦波加振条件を示す。加振振動数は，0.25 Hz ～1.0 Hz，速度：10～100 cm/s とし，摩擦ダンパーの設定摩擦力 Ffd は，20 kN (CASE-1S)，30 kN (CASE-2S)，40 kN (CASE-3S) の3水準について実施した。なお，加力サイクル数は，5 サイクルとし，各特性値の評価は，3 サイクル目とした。

表 5.1 正弦波加振条件

| f<br>(Hz) | T<br>(s) | 加振変位(cm)  |       |       |       |       |       |       |
|-----------|----------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|           |          | 速度 (cm/s) |       |       |       |       |       |       |
|           |          | 10        | 20    | 40    | 60    | 80    | 100   | 120   |
| 0.25      | 4.0      | 6.37      | 12.73 | 25.46 | 38.20 | 50.93 | 63.66 | 76.39 |
| 0.5       | 2.0      | 3.18      | 6.37  | 12.73 | 19.10 | 25.46 | 31.83 | 38.20 |
| 0.75      | 1.33     | 2.12      | 4.24  | 8.49  | 12.73 | 16.98 | 21.22 | 25.46 |
| 1.0       | 1.0      | 1.59      | 3.18  | 6.37  | 9.55  | 12.73 | 15.92 | 19.10 |
| 1.5       | 0.67     | 1.06      | 2.12  | 4.77  | 6.37  | 8.49  | 10.61 | 12.73 |

 実施試験条件

#### b) ランダム波加振試験

不規則なランダム波に対して，設定荷重で摩擦ダンパーが稼働することを確認するために実施した。ランダム波は戸建免震住宅を想定した時刻歴応答解析の応答変位波形とし，告示波（CASE-1R），南海トラフ地震<sup>4)</sup> (AIC003：CASE-2R)，上町断層地震<sup>5)</sup> (UMTA4C2EW1：CASE-3R) の3波を採用した。また，試験の入力波形は，試験機の性能範囲で振幅と時間軸を調整した。なお，摩擦ダンパーの摩擦力 Ffd は 30 kN とした。

#### c) 繰り返し加力試験

長周期地震動等の繰り返し加力を受けた場合の性能変化を把握するために実施した。

繰り返し加力試験の累積変形量は 80m 程度とし，摩擦ダンパーの摩擦力 Ffd は 30 kN，加振条件は 1.0Hz 100cm/s，159mm，130 サイクルとした。

試験は，5 サイクル/回として 26 回繰り返した。「5 サイクル/回」は摩擦ダンパーの残留変位とオイルダンパーのストロークおよびリニアガイドのストロークより決定した。また，オイルダンパーの温度が 50℃に達した時点でオイルダンパーをドライアイスで外気温相当まで冷却した。130 サイクルを終了後に初期の性能が復元していることを確認するために基本特性試験（Ffd =30 kN，1.0 Hz，40 cm/s）を実施し，正弦波加振試験における同条件の結果と比較した。

(2) 試験結果

1) 正弦波加振試験

複合ダンパーの履歴特性 (CASE-3S, 1 Hz) を図 5.10～5.13 に示す。また、各ケースの 3 サイクル目の荷重と速度の関係を図 5.14～5.17 示す。

速度 60cm/s 以下では、摩擦ダンパーの設定摩擦力 (40kN) をオイルダンパーの減衰力(30kN) が超えない範囲であることから、オイルダンパーの履歴特性が複合ダンパーの履歴特性と同様となり、リニア特性の楕円状の履歴ループとなる。80cm/s では、オイルダンパーの減衰力が摩擦力を上回るため、摩擦ダンパーが作動し、設定荷重レベル付近で切り替わる。また、履歴ループは、切替荷重で頭打ちの形状となる。5 サイクルの繰り返し加振に対して、摩擦ダンパーは+側の変位に徐々にシフトし、それに応じてオイルダンパーの履歴ループも-側にシフトしている。100cm/s では、その傾向が顕著に現れており、摩擦ダンパーが繰り返し回数と振幅増加に伴い、摩擦力の増加傾向が現れている。

各ケースの荷重と速度の関係から、切替前のオイルダンパーは速度依存の線形特性となっているが、摩擦ダンパーは速度による荷重の増加傾向が見られる。また、振動数依存性は、切り替え前の 60cm/s 以下ではオイルダンパーのみ作動しているため依存性は見られないが、切り替え後では僅かに変動する。摩擦ダンパーの単体特性試験の振幅±30mm 以下の範囲では、速度依存性や振幅依存性は、ほとんど見られていないことから、振幅や速度の増加に伴う性能変化は、摩擦ダンパーの機構上の剛性や摩擦面の面圧分布の影響が考えられる、したがって、実機では、これらを改善する必要がある。

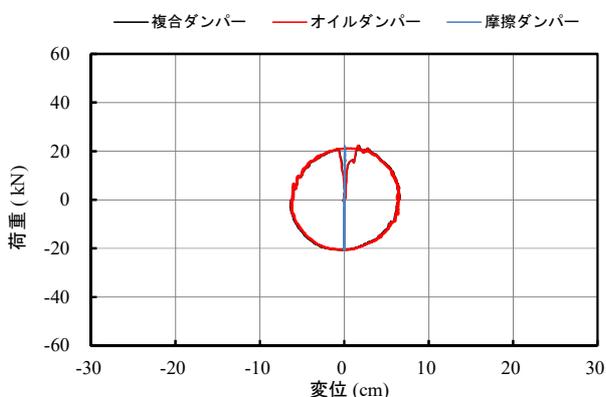


図 5.10 履歴特性 (CASE-3S : 1Hz\_40cm/s)

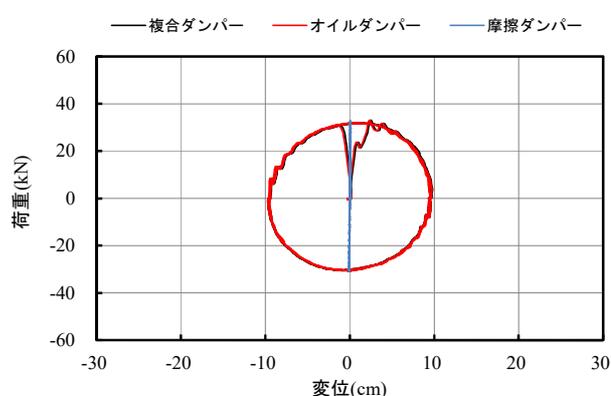


図 5.11 履歴特性 (CASE-3S : 1Hz\_60cm/s)

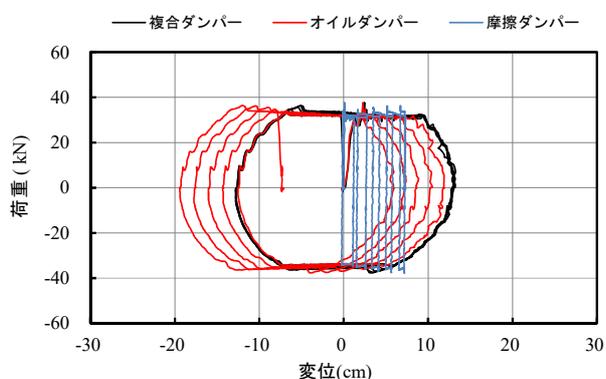


図 5.12 履歴特性 (CASE-3S : 1Hz\_80cm/s)

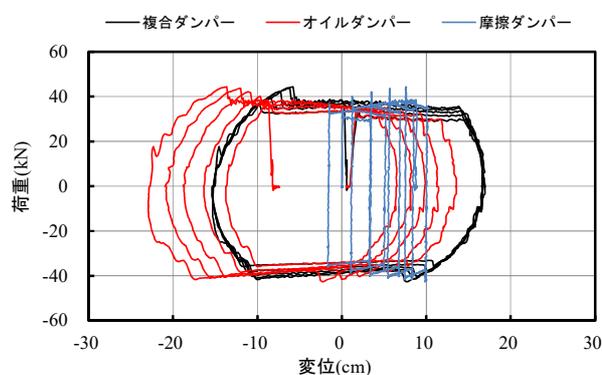


図 5.13 履歴特性 (CASE-3S : 1Hz\_100cm/s)

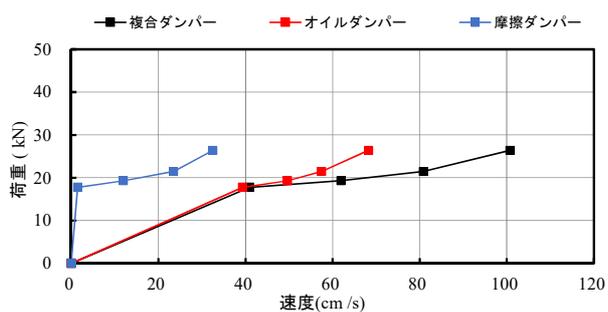


図 5.14 荷重と速度の関係 (CASE-1S : 1Hz)

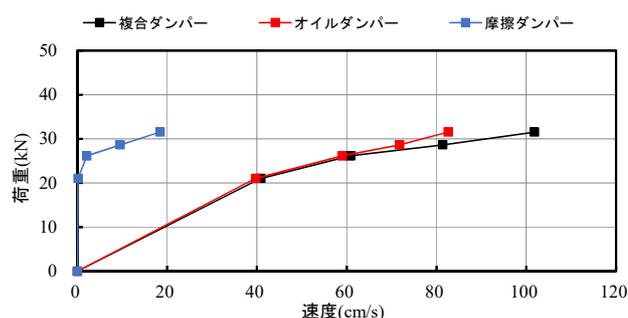


図 5.15 荷重と速度の関係 (CASE-2S : 1Hz)

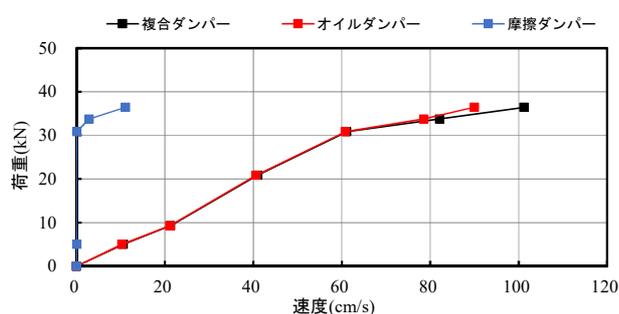


図 5.16 荷重と速度の関係 (CASE-3S : 1Hz)

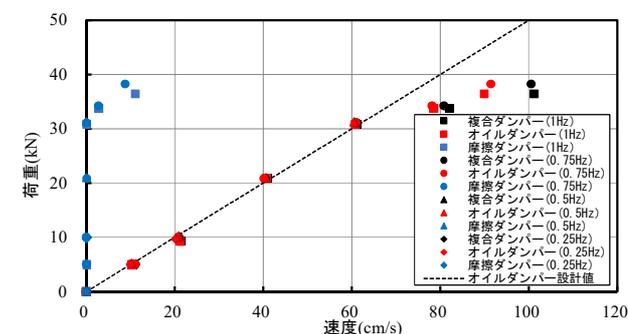


図 5.17 荷重と速度の関係 (CASE-3S : 0.25 ~ 1Hz)

## 2) ランダム波加振試験

ランダム波加振試験結果の変位時刻歴波形とダンパーの温度時刻歴波形を図 5.18, 5.19 に、履歴特性を図 5.20 に示す。複合ダンパーは、ランダム波加振においても、正弦波加振と同様に、設定荷重 30kN でスムーズに切替わっている。一方、南海トラフ地震と上町断層地震では、最大 10cm 程度の残留変位が生じている。また、ダンパーの温度上昇は、累積吸収エネルギー量が大きい AIC003 が最大であり、オイルダンパーで 57°C に上昇するが、耐熱限界温度 80°C 以下である。また、摩擦ダンパーの温度上昇は、ほとんどない。

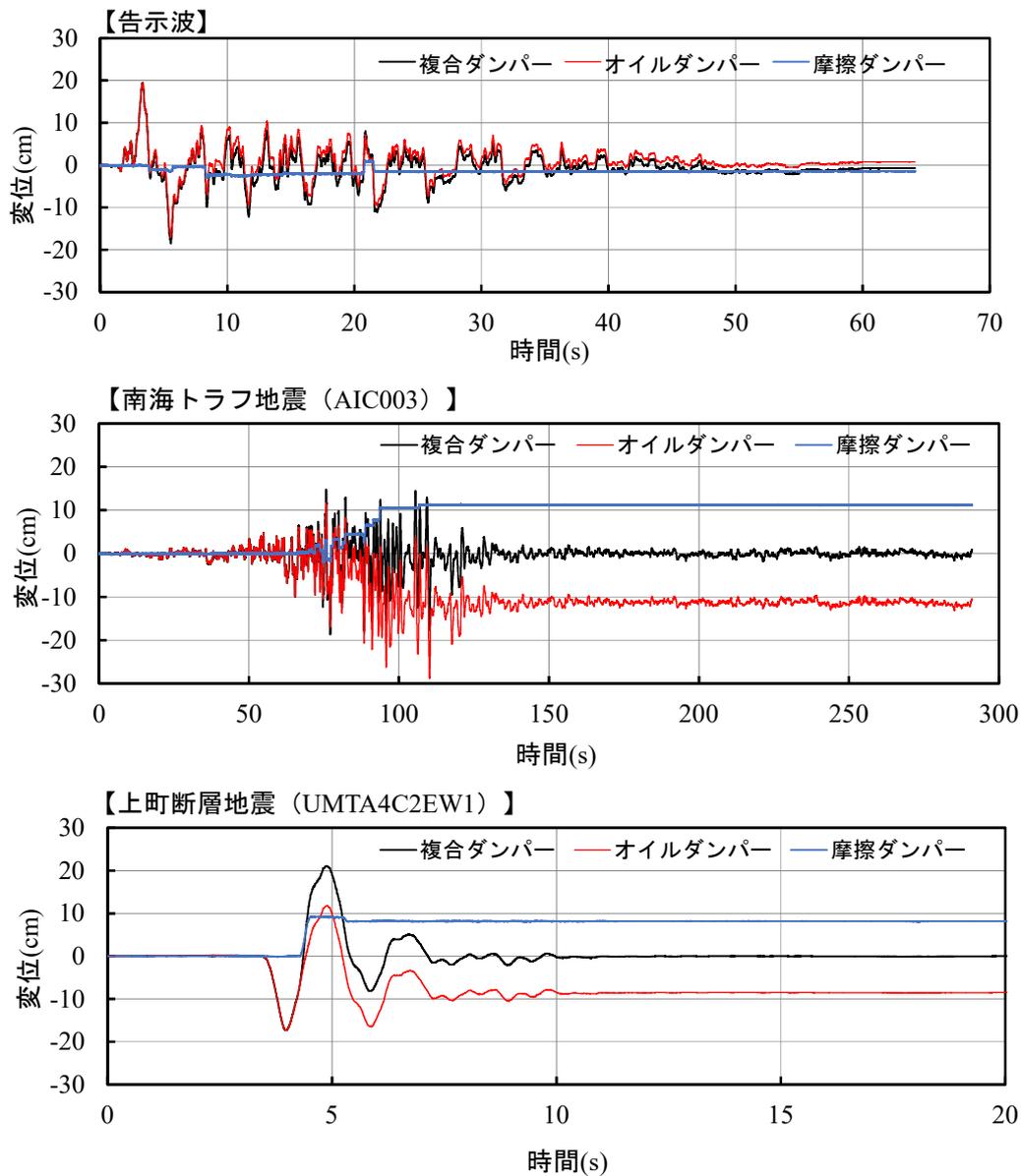


図 5.18 変位時刻歴波形

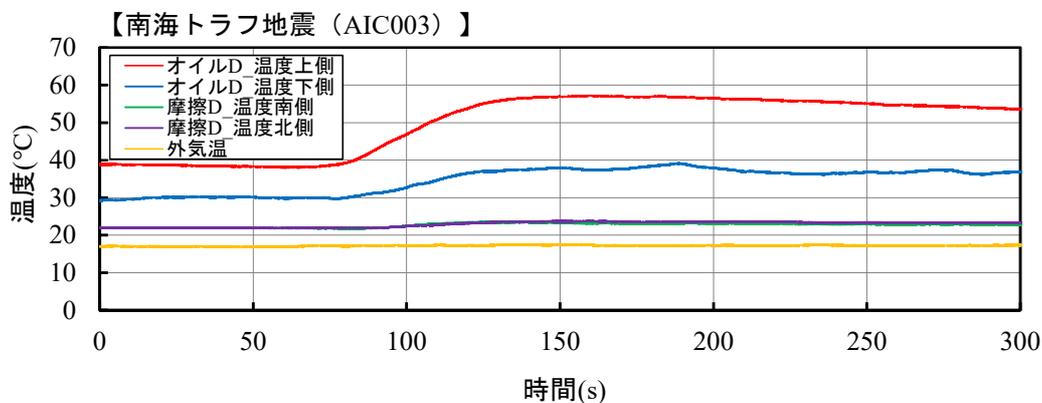


図 5.19 温度時刻歴波形 (南海 AIC003)

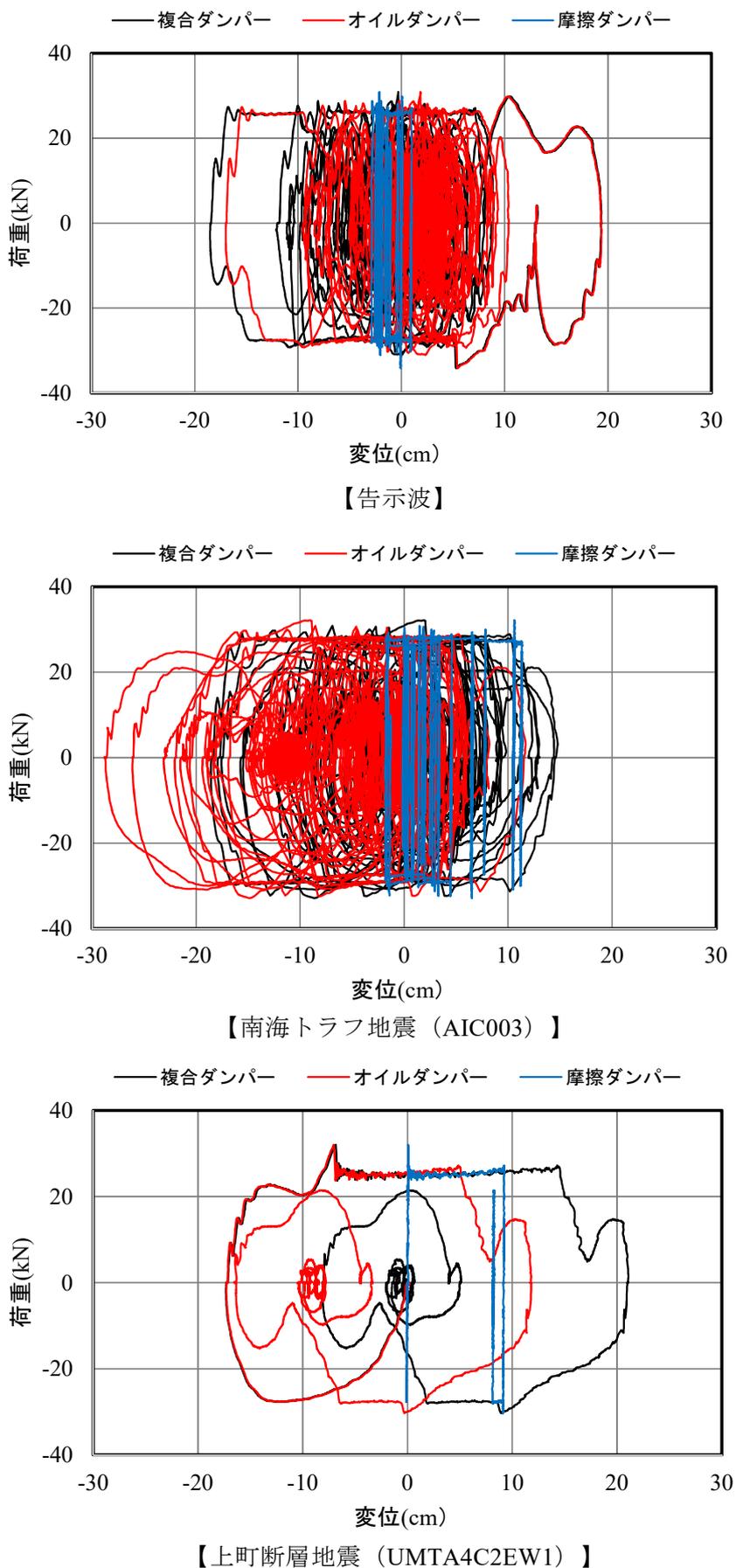


図 5.20 履歴特性

3) 繰り返し加力試験

繰り返し加力試験結果の累積吸収エネルギーと累積変形量の関係を図 5.21 に、温度と累積変形量の関係を図 5.22 に示す。また、繰り返し加力試験前後に実施した基本特性試験の履歴特性を図 5.23 に示す。

累積吸収エネルギーと累積変形量は、概ね比例関係であり、オイルダンパーが 76% を占めている。また、オイルダンパーは約 30m で約 35°C 上昇する。

繰り返し試験前後の基本特性試験における履歴ループの差は、ほとんどなく、オイルダンパーの等価減衰係数においても、繰り返し前後で約-4.5%（繰り返し前：265.1N・s/cm，繰り返し後：253.1 N・s/cm）であり、非常に小さい。

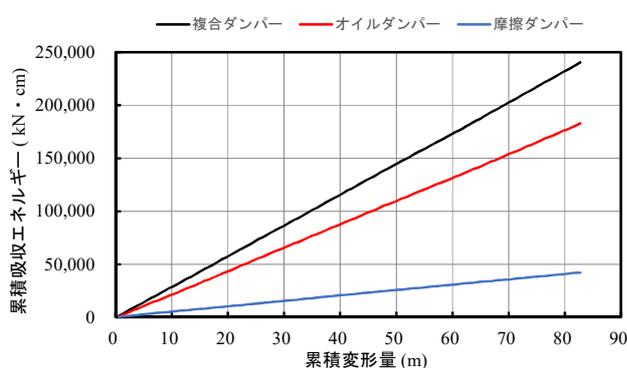


図 5.21 累積吸収エネルギーと累積変形量の関係

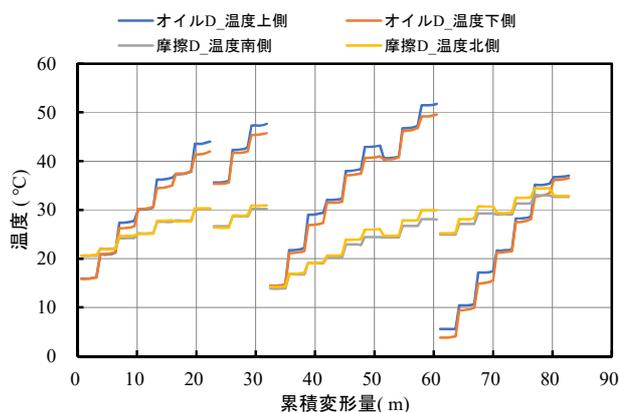


図 5.22 温度と累積変形量の関係

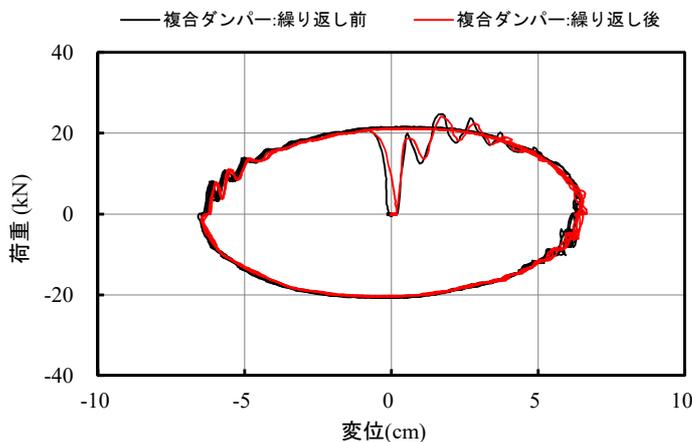


図 5.23 履歴特性（繰り返し前後）

### 5.4 時刻歴応答解析による検討

オイルダンパーと摩擦ダンパーを直列配置する複合ダンパーは、基本特性試験より、パッシブに、荷重切り替えが可能であると考えられることから、実機レベルに適用した場合の有効性について時刻歴応答解析により検証する。

#### (1) 検討建物

検討対象建物は、第3章、第4章と同様の第3期免震建物モデル15階建てRC造の基礎免震構造<sup>6)</sup>とする。建物総重量、等価固有周期、免震層の降伏せん断力係数は、高減衰ゴム系積層ゴム(G6, h=200mm)を用いた場合では、123,186kN, 4.09s(40cm変形時),  $\alpha_s=0.03$ であるが、断層近傍の長周期パルス地震動では、免震層変位で1.0mを超える大きな変位が生じ、支承材が限界変位を超えて破断することから、14基の支承材は、弾性すべり支承とし、復元材として、ゴム総厚60cmの高減衰ゴム系積層ゴムを採用する。図5.24に検討建物概要を示す。

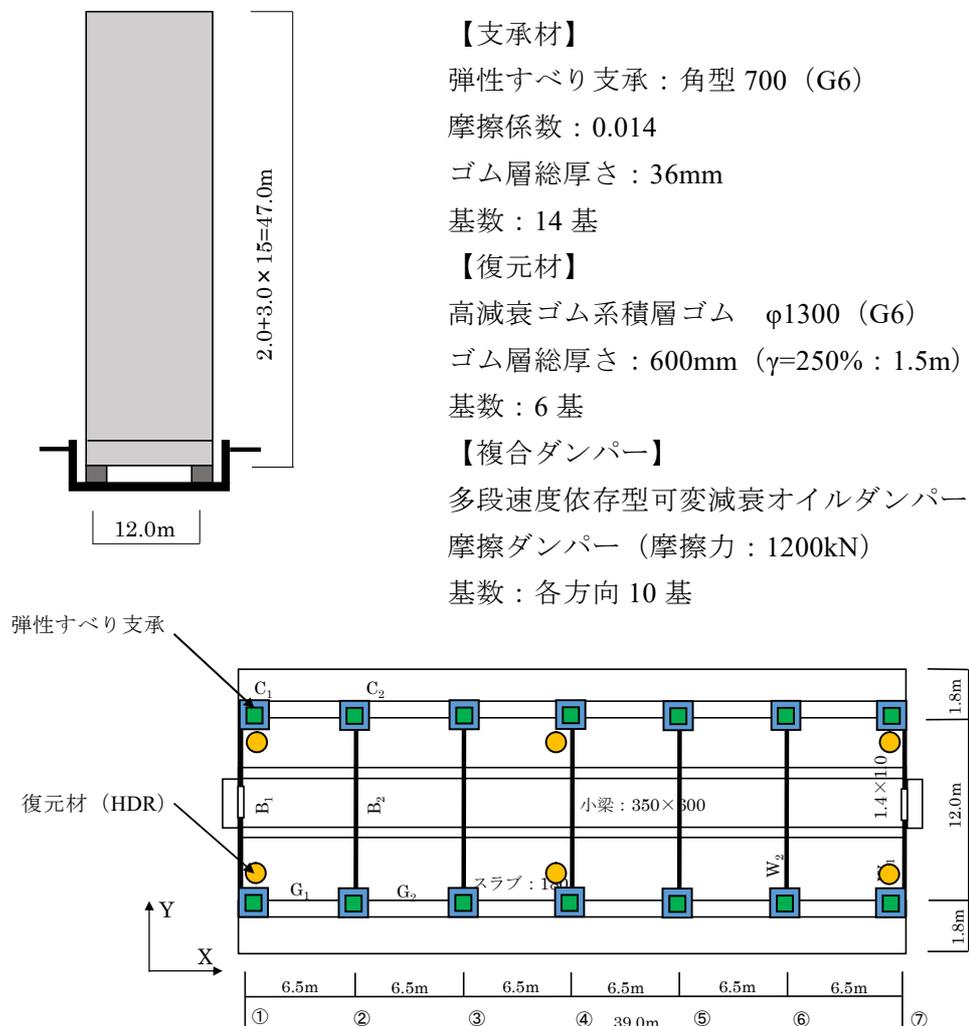


図 5.24 検討建物(RC 15/0)<sup>6)</sup>

(2) 入力地震動

検討用地震波としては、長周期地震動として、文献<sup>3)</sup><sup>4)</sup>による大阪地区と中部地区の4波を、内陸直下型地震は、文献<sup>5)</sup>による、上町断層 A4ゾーン(レベル3C: UMTA4C2EW1)と2016/4/16の熊本地震における K-net 一宮 EW, 長周期パルスを含む西原村小森 EW の3波を、さらに告示波(乱数)1波の合計8波とする。地震波一覧を表5.2に、擬似速度応答スペクトルを図5.25に、エネルギースペクトルを図5.26に示す。また、西原村小森 EW の加速度および速度時刻歴波形を図5.27に示す。

西原村小森 EW は、断層近傍での観測記録であることから、20~30秒付近に非常に強い長周期パルスが発生しており、最大速度で約240cm/s、擬似速度応答スペクトルで約360cm/s、エネルギースペクトルで500cm/s程度の強さを持っており、一般的な設計用入力地震動を遥かに上回ったものとなっている。

表 5.2 地震波一覧

| 地震波                         | 略称          | 最大加速度<br>(cm/s <sup>2</sup> ) | 最大速度<br>(cm/s) | 継続時間<br>(s) |
|-----------------------------|-------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| 南海トラフ(OS1)                  | 南海 (OS1)    | 263.0                         | 45.9           | 655.3       |
| 南海トラフ(CH1)                  | 南海 (CH1)    | 265.0                         | 59.4           | 655.3       |
| 南海トラフ 4連動<br>(OSKH02)       | 南海 (OSKH02) | 133.0                         | 58.0           | 640.0       |
| 南海トラフ 4連動<br>(AIC003)       | 南海 (AIC003) | 545.4                         | 68.6           | 640.0       |
| 上町断層<br>(UMTA4C2EW1)        | 上町 (A4C2)   | 625.0                         | 129.0          | 41.0        |
| 2016 熊本地震<br>(KMM004EW)     | 熊本 (KMM)    | 346.7                         | 80.5           | 300.0       |
| 2016 熊本地震 熊本県<br>(西原村小森 EW) | 西原村小森       | 770.5                         | 239.6          | 120.0       |
| 告示波 (AWL2)                  | 告示 (AW)     | 347.8                         | 52.5           | 120.0       |

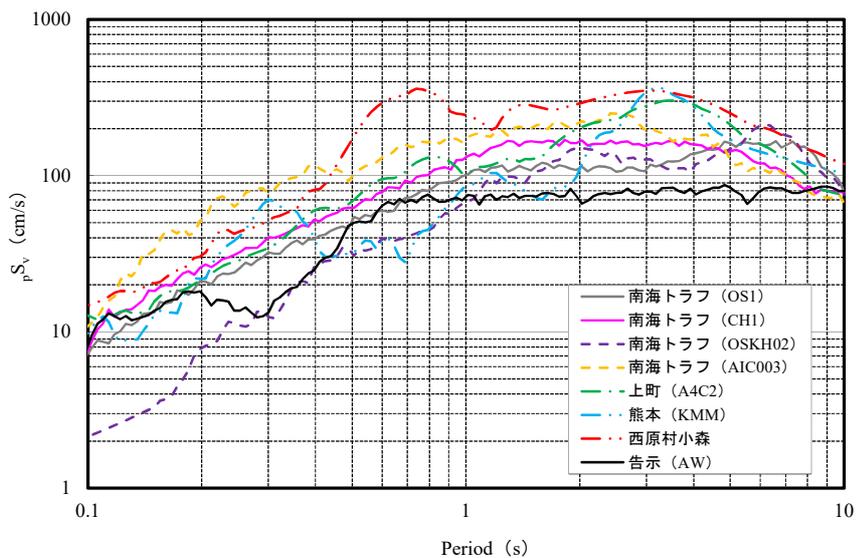


図 5.25 擬似速度応答スペクトル(h=0.05)

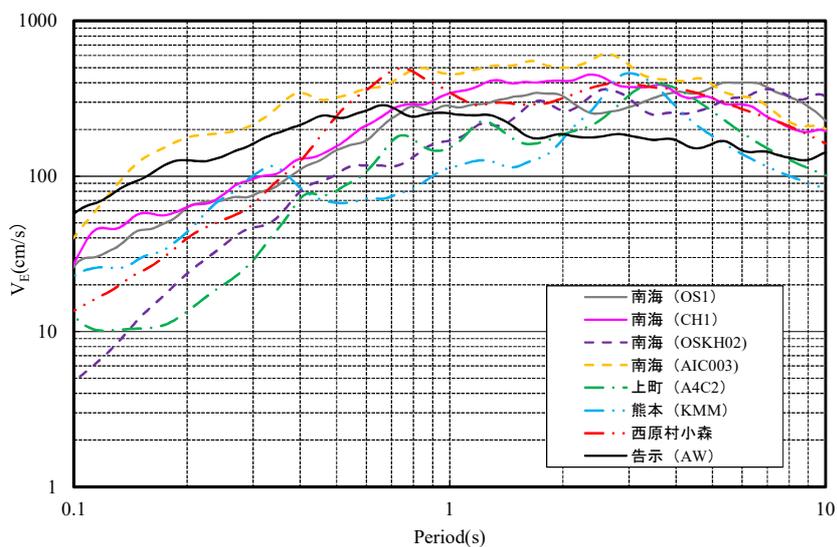


図 5.26 エネーグリースペクトル

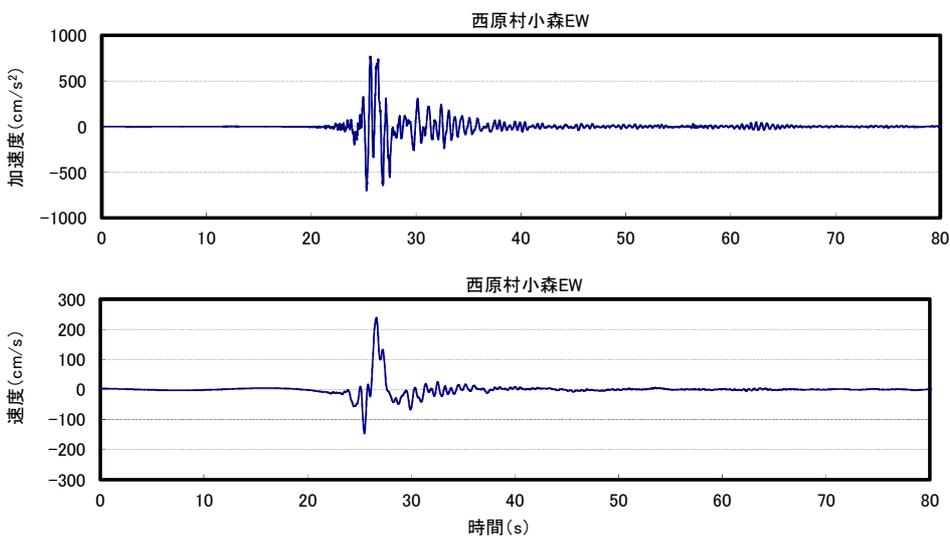


図 5.27 西原村小森 EW の加速度・速度時刻歴波形

(3) 解析モデルおよび検討ケース

1) 解析モデル

解析モデルは、1柱列多質点系モデルの等価せん断型モデルとし、支承材および復元材は、高減衰ゴム系積層ゴムを採用するため、ハードニングと低面圧下の復元力モデル（復元材：1MPa）を考慮できる Kikuchi-Aiken モデルを用いた<sup>7)</sup>。表 5.3 に低面圧下の高減衰ゴム系積層ゴム支承のせん断復元力パラメータの評価式一覧を示す。

表 5.3 せん断復元力パラメータの評価式一覧

$$G_{eq} \text{ (Mpa)} = \begin{cases} 0.671\gamma^{-0.413} & (0.05 \leq \gamma < 1.1) \\ 0.992 - 0.458\gamma + 0.142\gamma^2 - 0.0112\gamma^3 & (1.1 \leq \gamma \leq 4.0) \end{cases}$$

$$h_{eq} = 0.219 - 0.0213\gamma - 0.00133\gamma^2 \quad (0.05 \leq \gamma \leq 4.0)$$

$$u = 0.442 - 0.0912\gamma + 0.00300\gamma^2 \quad (0.05 \leq \gamma \leq 4.0)$$

$$n = \begin{cases} 1 & (0.05 \leq \gamma \leq 1.5) \\ 2.11 - 1.62\gamma + 0.585\gamma^2 & (1.5 < \gamma < 4.0) \end{cases}$$

ただし  $\gamma > 1.3$  では  $a = 10.4$  (const.)  
 $\gamma \leq 1.3$  では  $b = 0.0$  (const.)  
 $c = 6.0$  (const.)  $(0.05 \leq \gamma \leq 4.0)$

ここで、 $G_{eq}$ ：等価せん断弾性率， $\gamma$ ：せん断ひずみ， $h_{eq}$ ：等価粘性減衰定数， $u$ ：降伏荷重特性比， $a, b, c, n$ ：履歴ループ形状パラメータ

2) 複合ダンパーのモデル化

多段速度依存型可変減衰オイルダンパーと摩擦ダンパーを直列に設置し、設定速度を超えると摩擦ダンパーにパッシブで切り替わるシステムとなることから、図 5.28 に示すように、3.2 節の Maxwell モデルのオイルダンパーに摩擦ダンパーを直列設置した解析モデルを新たに構築した。摩擦ダンパー部は、剛塑性モデルや粘性モデルが考えられるが、文献<sup>8)</sup>に示すように粘性モデルが剛塑性モデルより、安定性がよいこと、積分時間間隔を比較的荒くしても良好な結果が得られることにより、粘性モデルを採用している。なお、すべりだし速度は、微小値 (0.1cm/s) として、摩擦力÷微小速度から初期減衰係数を設定している。

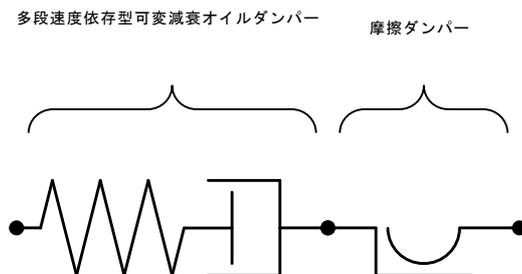


図 5.28 複合ダンパーの解析モデル

3) 検討ケース

検討は、表 5.4 に示す 4 ケースについて実施した。CASE-1 は、長周期パルス対策として、支承材を低摩擦型の弾性すべり支承（浮き上がりが発生する場合は転がり支承で対応）、復元材に 1300φ の X0.6R（ゴム総厚：60cm， $\gamma=250\%:1.5m$ ）を 6 基想定し、多段速度依存型可変オイルダンパーを組み合わせた場合を、CASE-2 では、本章で提案する複合ダンパーを組み合わせた。なお、摩擦ダンパーの摩擦力（切替荷重）は、オイルダンパーの限界速度時の減衰力 1200kN とした。

さらに、CASE-2 では、複合ダンパーの温度上昇と残留変位を把握するために、本震後に観測されている余震（震度 5 強）の影響を確認した。

また、CASE-3 については、上部構造の応答を改善するために制振装置を設置した場合の検討を行った。

上記の検討ケースは、長周期パルスでも免震効果を確保するため、支承材と復元材を新たに構築する方法であるが、免震効果のある程度低下させても良いとする場合として、CASE-4 として現在、製品化されている最大径 1.8m（ $\gamma=400\%(1.29m)$ ， $h=32cm$ ）の高減衰ゴム系積層ゴムと低摩擦型の弾性すべり支承を併用したケースを比較検討する。

なお、上部構造は、第 3 章、第 4 章では、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの基本性状を把握する目的で線形としているが、地震動レベルがはるかに大きいことから、上部構造の非線形を考慮し、制振部材の併用についても論じている。

表 5.4 検討ケース一覧

|        | 略称            | 免震部材   | 減衰力特性              |
|--------|---------------|--|--------------------|
| CASE-1 | 復元材+提案可変 OD   | ESL (14 基) + 復元材 (6 基) + OD1(10 基)                     | 可変減衰オイルダンパー        |
| CASE-2 | 復元材+複合ダンパー    | ESL (14 基) + 復元材 (6 基) + 複合ダンパー(10 基) <OD1+FD>         | 可変減衰オイルダンパー+摩擦ダンパー |
| CASE-3 | 復元材+複合ダンパー+制振 | ESL (14 基) + 復元材 (6 基) + 複合ダンパー(10 基) <OD1+FD> + 制振    | 可変減衰オイルダンパー+摩擦ダンパー |
| CASE-4 | 既存免震支承+複合ダンパー | HDR (6 基) + ESL (8 基) + 複合ダンパー(10 基) <OD1+FD> H=322 mm | 可変減衰オイルダンパー+摩擦ダンパー |

HDR：高減衰ゴム系積層ゴム支承，ESL：弾性すべり支承（ $\mu=0.014$ ） H：ゴム総厚

OD1：多段速度依存型可変減衰オイルダンパー，FD：摩擦ダンパー（摩擦力 1200KN）

制振：オイルダンパー2000KN 1～8階に1～2基設置，※オイルダンパーは、長辺方向（X方向）の基数

(4) 解析結果

1) 複合ダンパーの性能

入力地震動に対する免震層の最大応答速度を図 5.29 に、CASE-1~3 の最大応答分布を図 5.30~5.37 に示す。また、CASE-2 の西原村小森における免震部材の履歴特性を図 5.38, 5.39 に示す。多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを適用した場合 (CASE-1) の西原村小森の免震層の最大速度は 216cm/s であり、オイルダンパーの限界速度 150cm/s を超える。

CASE-1 と CASE-2 は多段速度依存型可変減衰オイルダンパーと複合ダンパーの比較であるが、オイルダンパーの限界速度を超えない場合は同じ応答であり、限界速度を超える西原村小森において、CASE-2 の摩擦ダンパーに切替わる。

復元材と複合ダンパーを採用した場合 (CASE-2) の免震層の最大速度は、222 cm/s であるが、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーと摩擦ダンパーの最大速度は、各々 151cm/s, 74cm/s で限界速度付近となっており、想定通り切替わっている。また、最大応答変位は 128cm ( $\gamma = 213\%$ ) となるが、復元材がハードニングを生じない範囲である。免震効果はすべての地震波に対して、確保できており、西原村小森における加速度応答も 300cm/s<sup>2</sup> 以下となっている。一方、層間変形角は 1/72 であり 1/100 を超える層がみられる。

複合ダンパーは、設定した摩擦力でオイルダンパーの減衰力が頭打ちになるため、履歴ループは矩形に近くなる。また、摩擦ダンパーが応答変位を分担する。

2) 制振装置の効果

CASE-3 は西原村小森の層間変形角を抑制するために、1~8 階に僅かな制振装置を付加しているが、西原村小森の層間変形角は 1/72 から 1/144 となり、上部構造の応答は改善できている。したがって、大振幅地震動では、免震構造と制振構造の併用も有効な対策と考えられる。

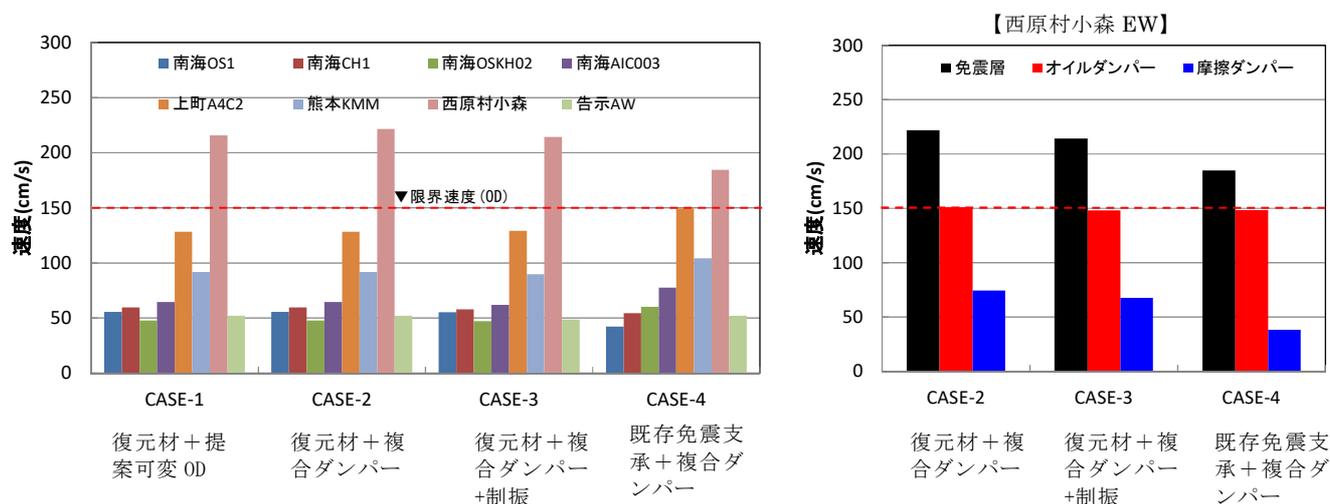


図 5.29 免震層の最大応答速度

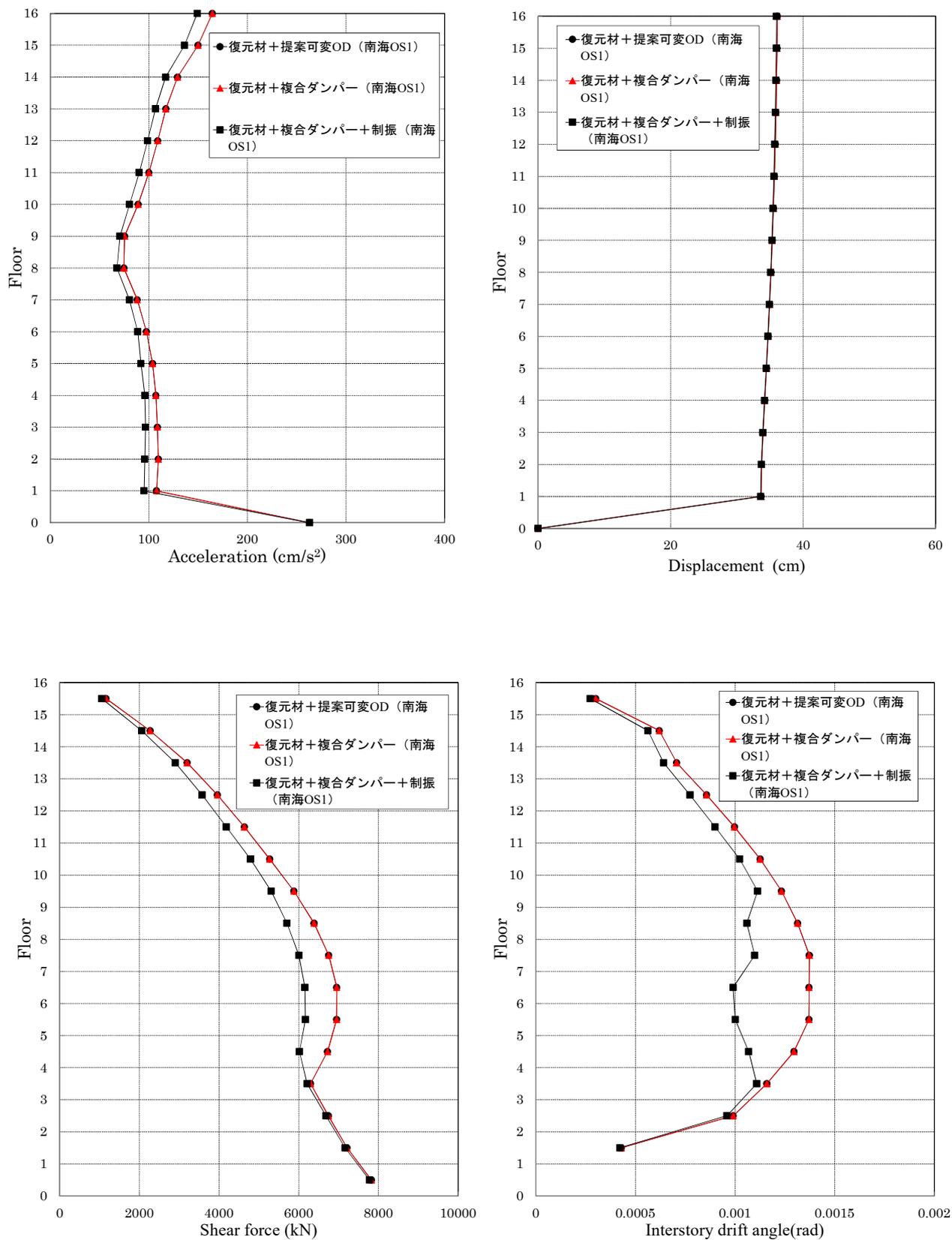


図 5.30 最大応答分布図 (CASE-1-3 : 南海 OS1)

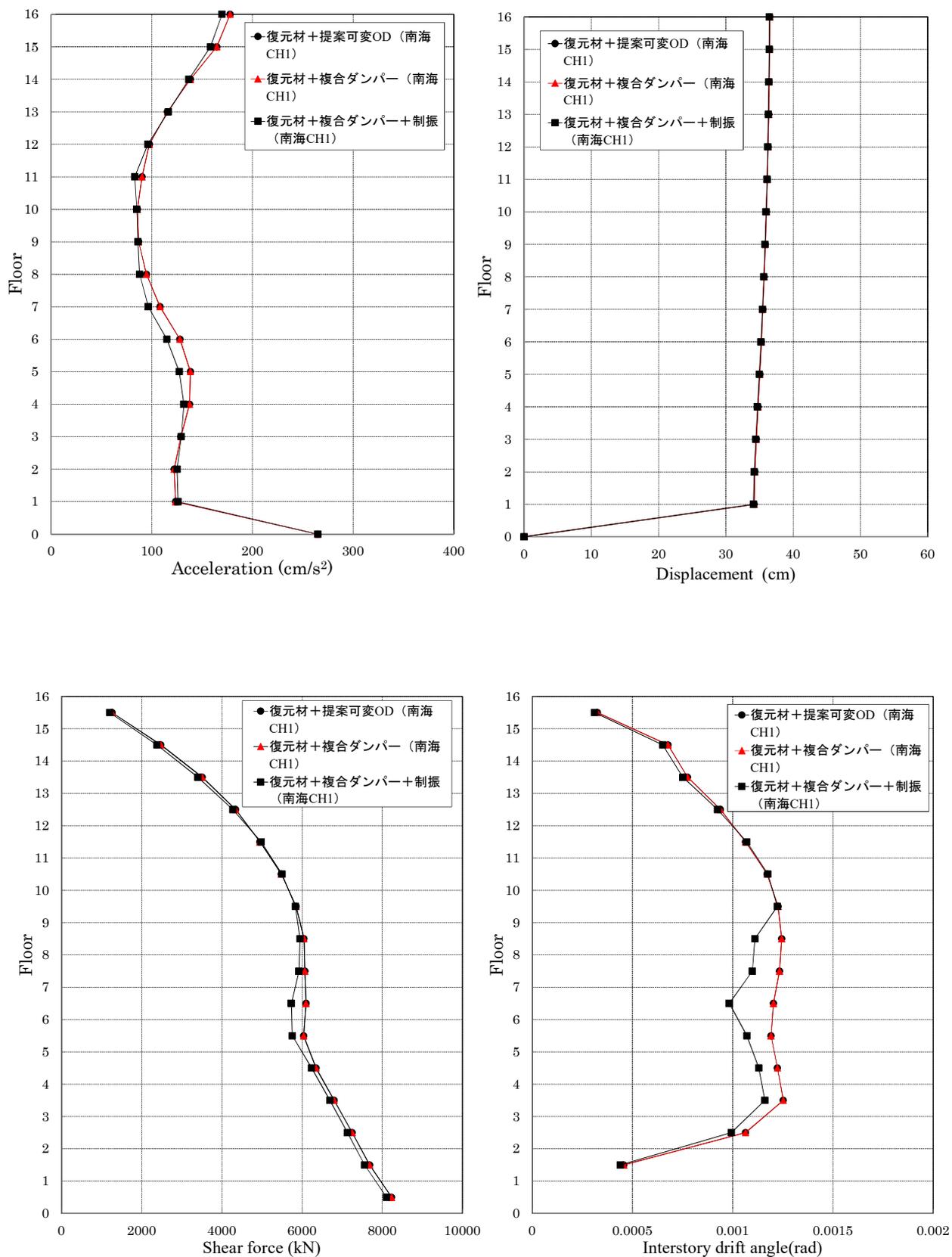


図 5.31 最大応答分布図 (CASE-1-3 : 南海 CH1)

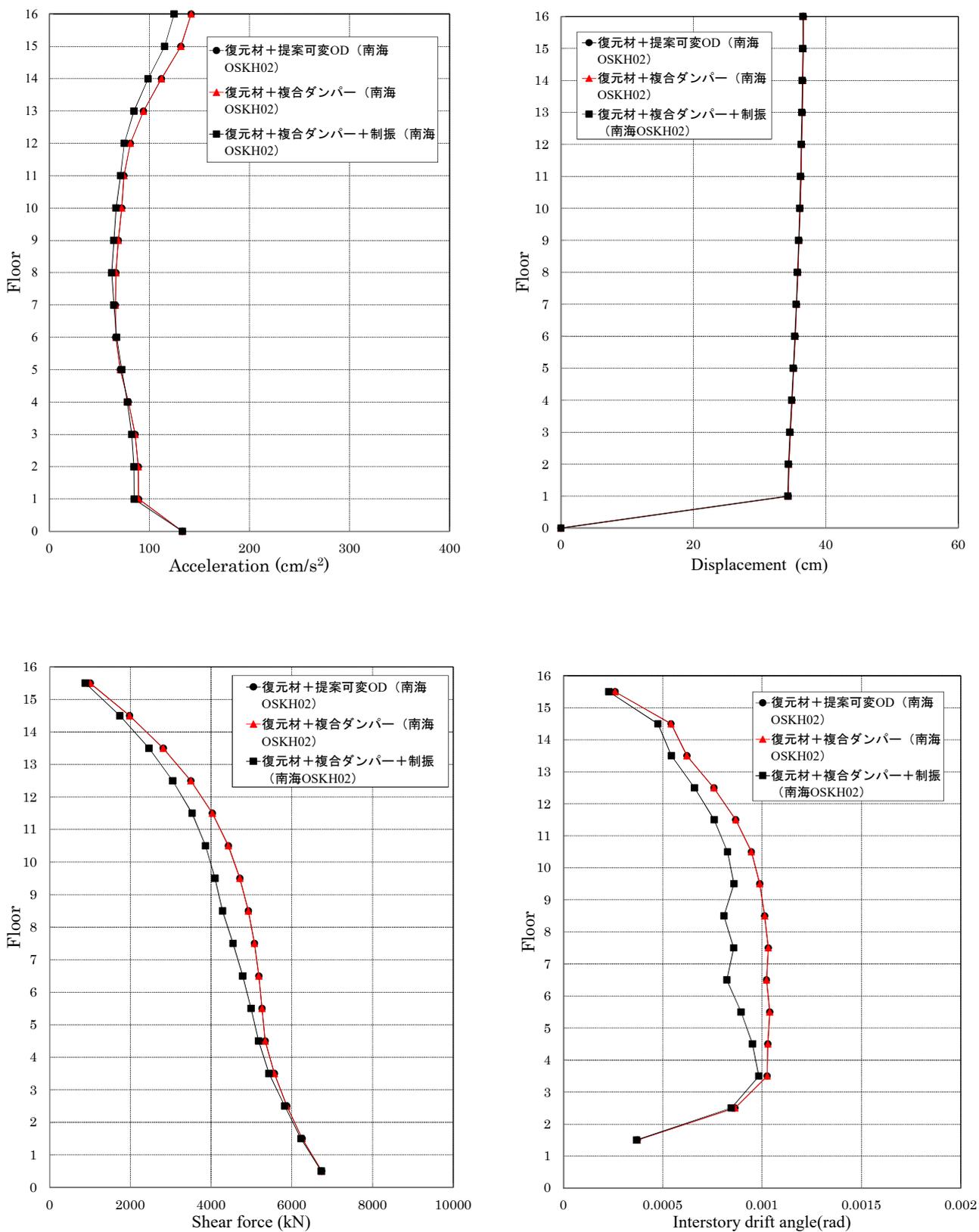


図 5.32 最大応答分布図 (CASE-1-3 : 南海 OSKH02)

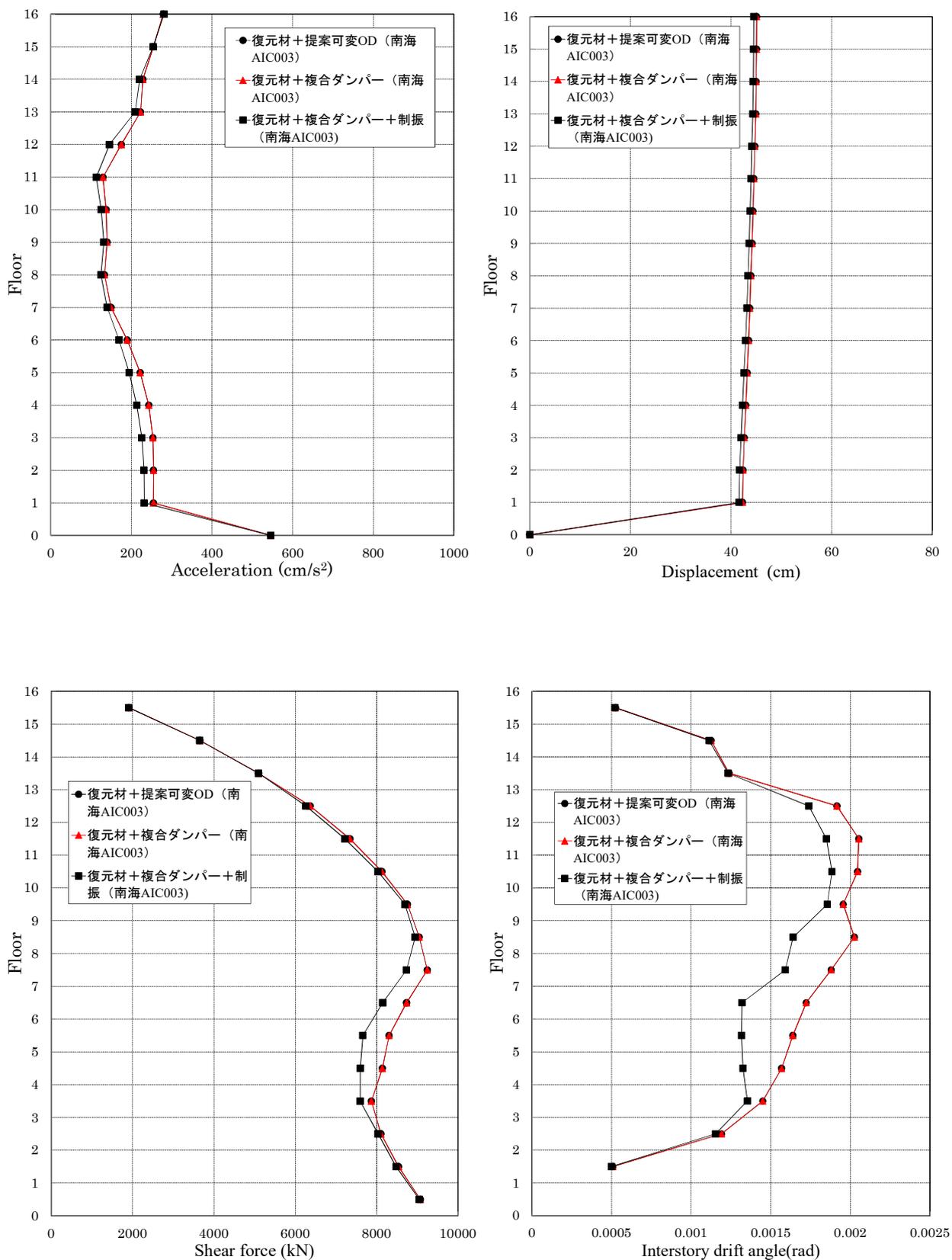


図 5.33 最大応答分布図 (CASE-1-3 : 南海 AIC003)

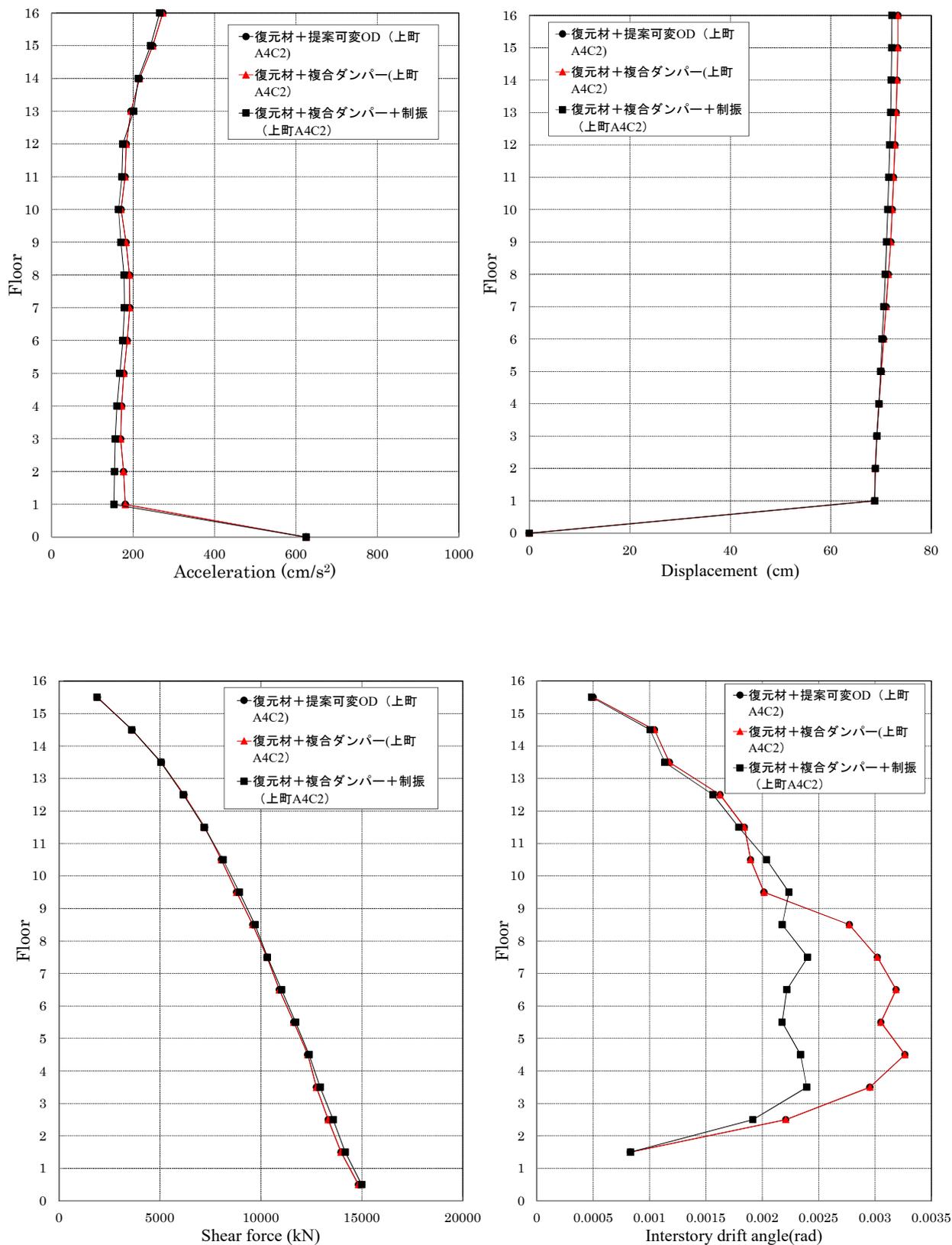


図 5.34 最大応答分布図 (CASE-1-3 : 上町 A4C2)

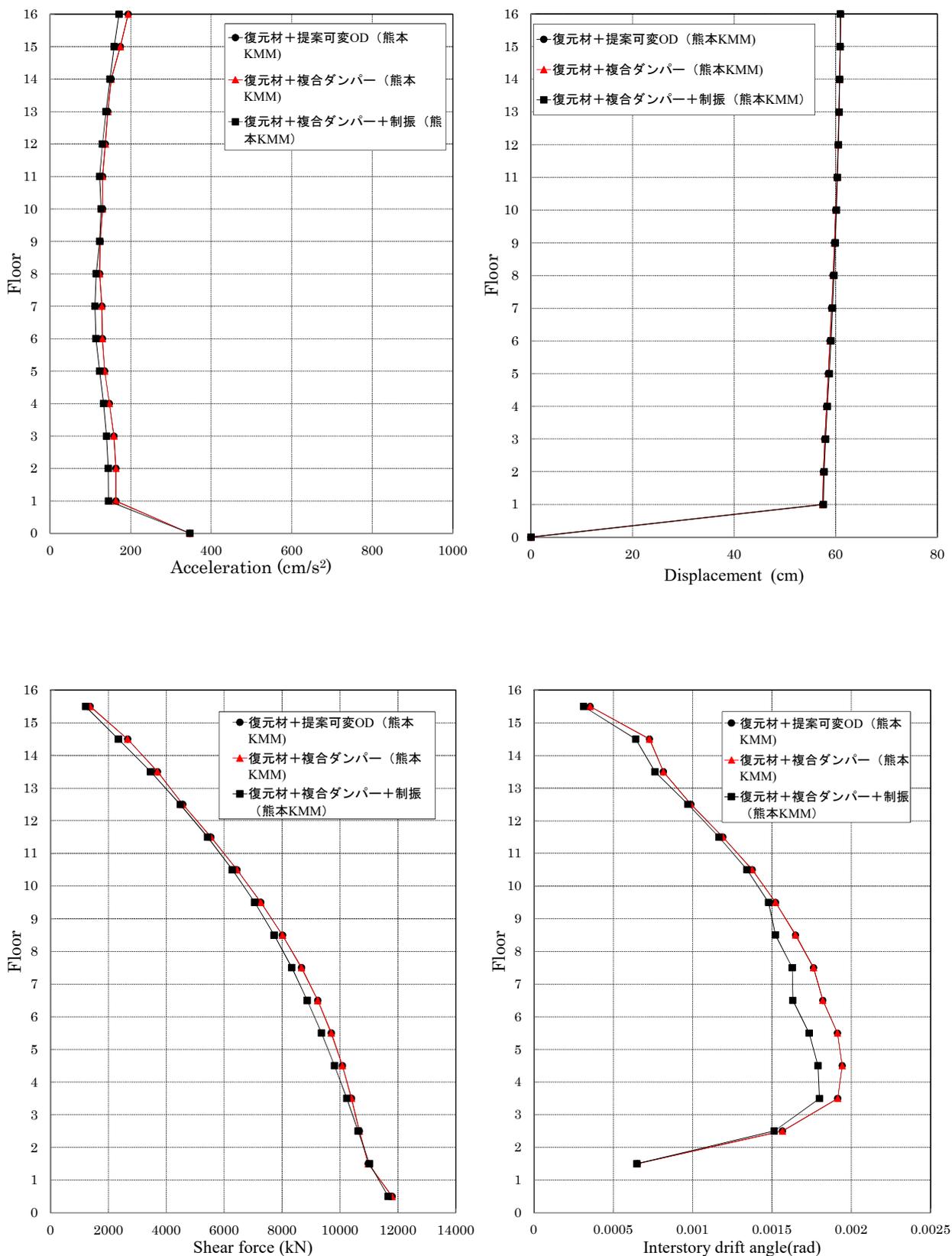


図 5.35 最大応答分布図 (CASE-1-3 : 熊本 KMM)

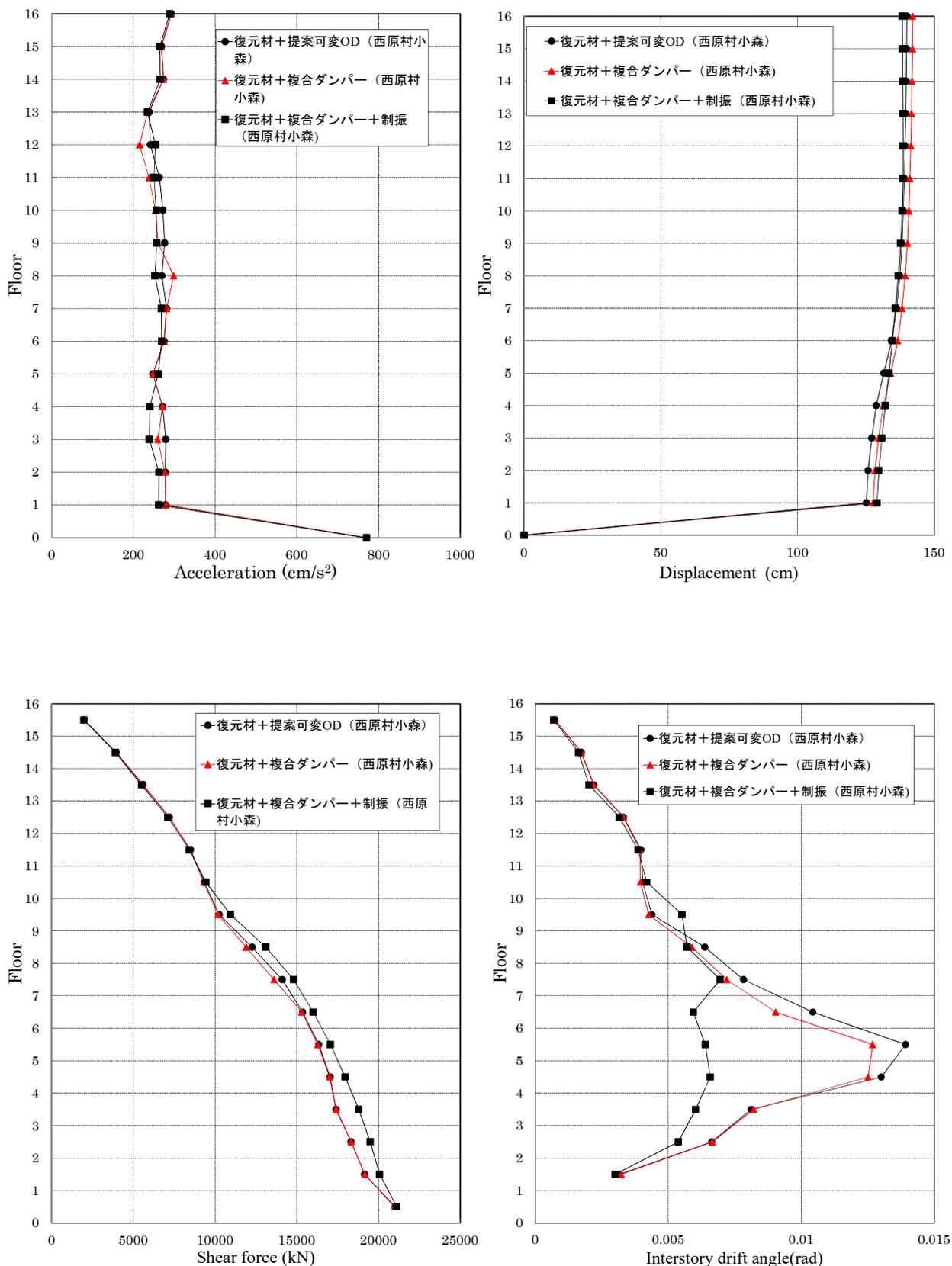


図 5.36 最大応答分布図 (CASE-1-3 : 西原村小森)

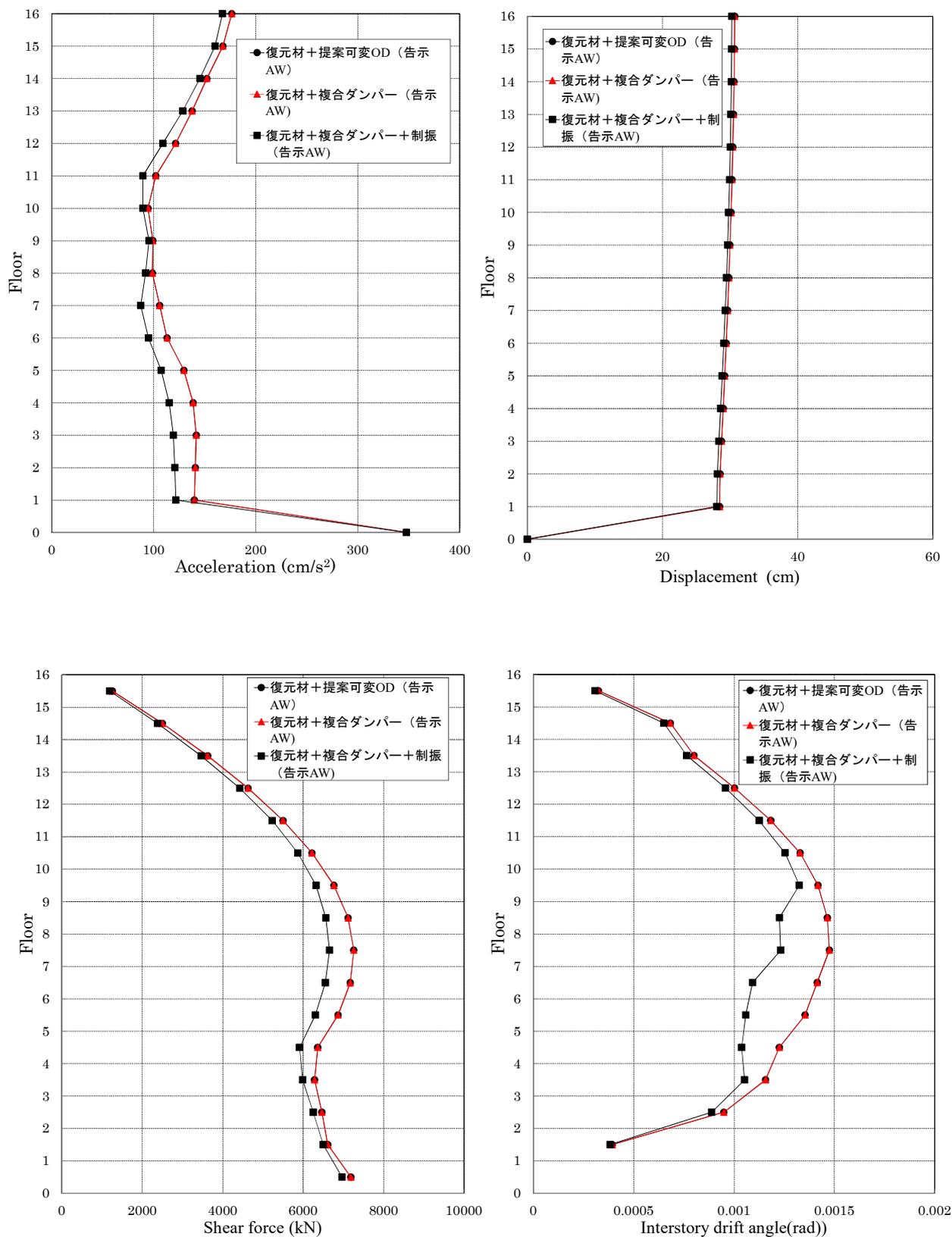


図 5.37 最大応答分布図 (CASE-1-3 : 告示 AW)

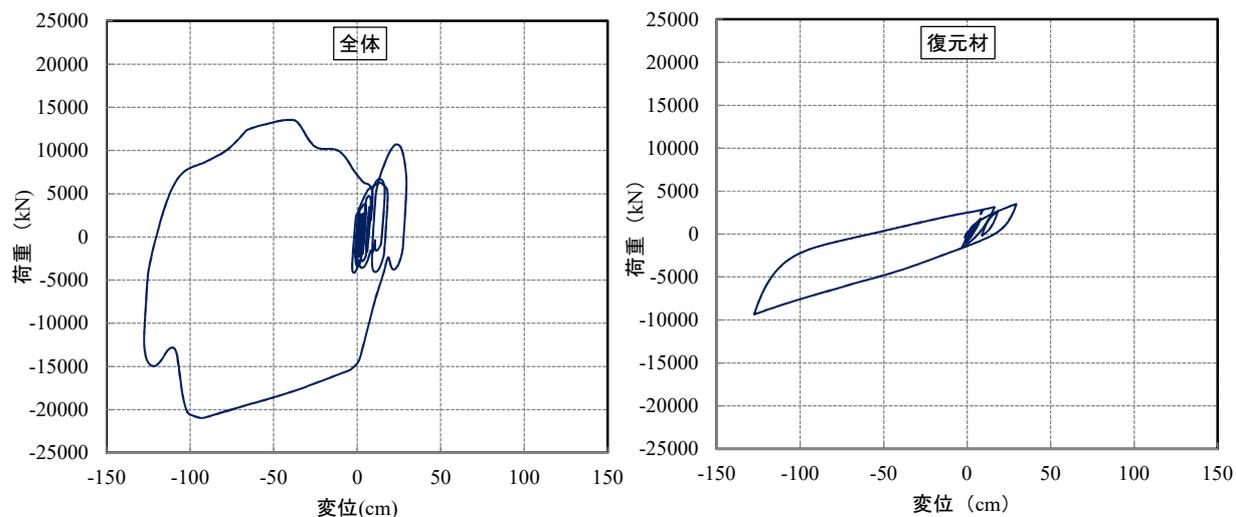


図 5.38 全体・復元材の履歴特性 (CASE-2: 西原村小森)

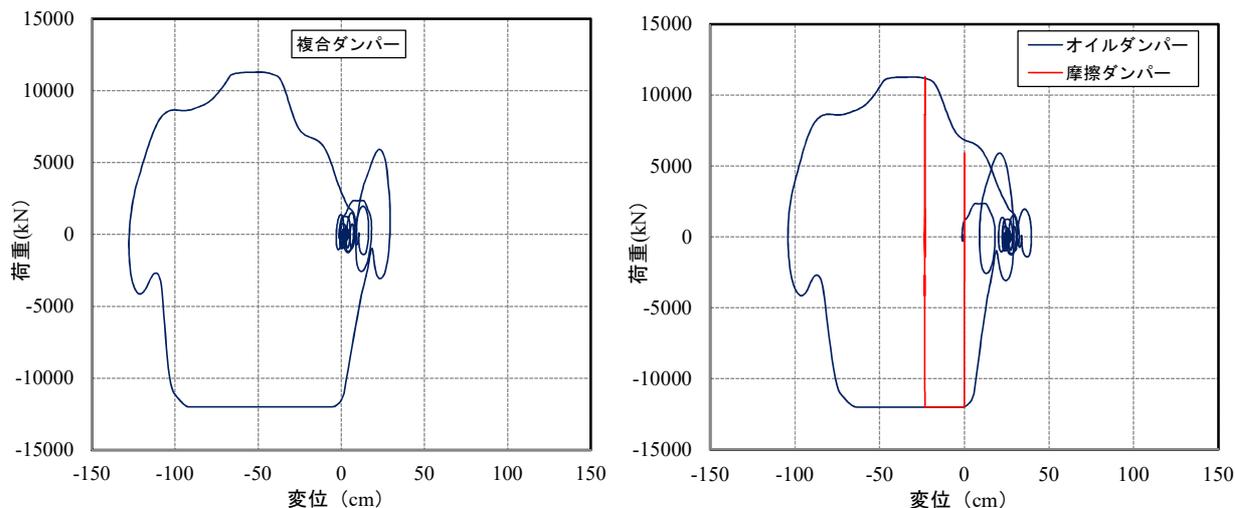


図 5.39 複合ダンパーの履歴特性(CASE-2: 西原村小森)

### 3) 残留変位と温度上昇

CASE-2 の西原村小森の複合ダンパーの免震層の変位時刻歴波形を図 5.40 に、CASE-2 の本震と余震を考慮した免震層の変位時刻歴波形を図 5.41 に示す。

CASE-2 の免震層の残留変位は、西原村小森 EW では、2.7cm 程度となるが、オイルダンパーと摩擦ダンパーの残留変位は 26cm 程度生じている。したがって、複合ダンパーは、地震後に残留変位を容易に元の位置に戻す機構が必要となる。なお、本震後の余震では、残留変位の増加はみられない。

最大累積吸収エネルギー量を示した南海 AIC003 における，オイルダンパーの温度上昇シミュレーション解析結果を図 5.42 に，累積吸収エネルギー量を図 5.43 に示す。

複合ダンパーのオイルダンパーの温度上昇（精算法）は 7.1°C（表面温度 27.1°C：AIC003）であり，限界温度 80°C 以下となっている。

精算法による温度上昇シミュレーションは，文献 9) により，以下の考え方に基づいて算定している。

微小時間  $d\tau$  に対象物の温度が  $dt$  だけ上がったとすると，この時間内の発熱量  $Q \cdot d\tau$  から放熱量  $U(t - t_a) \cdot F \cdot d\tau$  を差引いた残りが， $dt$  なる温度上昇に預かった発熱量と考える。すなわちオイルダンパーの温度  $t$  は，式(5.2)，(5.3)を用いて式(5.1)の微分方程式を逐次数値積分することで得られる。

$$Cdt = Qd\tau - U(t - t_a)Fd\tau \quad (5.1)$$

$$E_d = F_d \dot{x} \cdot d\tau \quad (5.2)$$

$$E_d = Q \cdot d\tau \quad (5.3)$$

また，熱容量  $C$  は式(5.4)として与えられる。

$$C = V_S \rho_S C_S + V_O \rho_O C_O \quad (5.4)$$

ここで，

$t$  : 温度【°C】， $t_a$  : 周囲温度【°C】， $V$  : 体積【m<sup>3</sup>】

$F$  : 表面積【m<sup>2</sup>】， $\rho$  : 密度【kg/m<sup>3</sup>】， $C_p$  : 比熱【KJ/ (kg · °C)】， $C$  : 熱容量 =  $V\rho C_p$ 【KJ/°C】

$U$  : 熱伝達係数【KJ/ (m<sup>2</sup> · h · °C)】

$Q$  : 発熱量【KJ/h】， $\tau$  : 経過時間【h】， $E_d$  : 総減衰エネルギー【KJ (KN · m)】

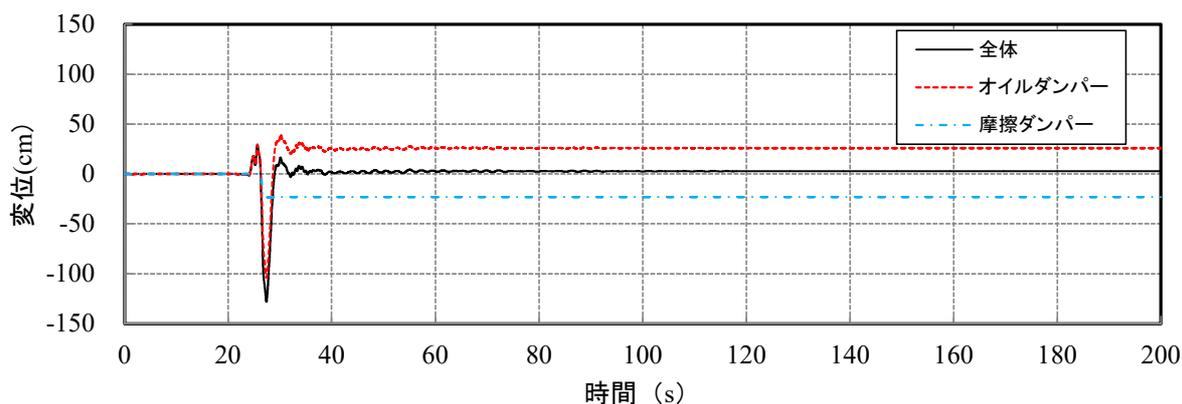


図 5.40 複合ダンパーの変位時刻歴波形(CASE-2：西原村小森)

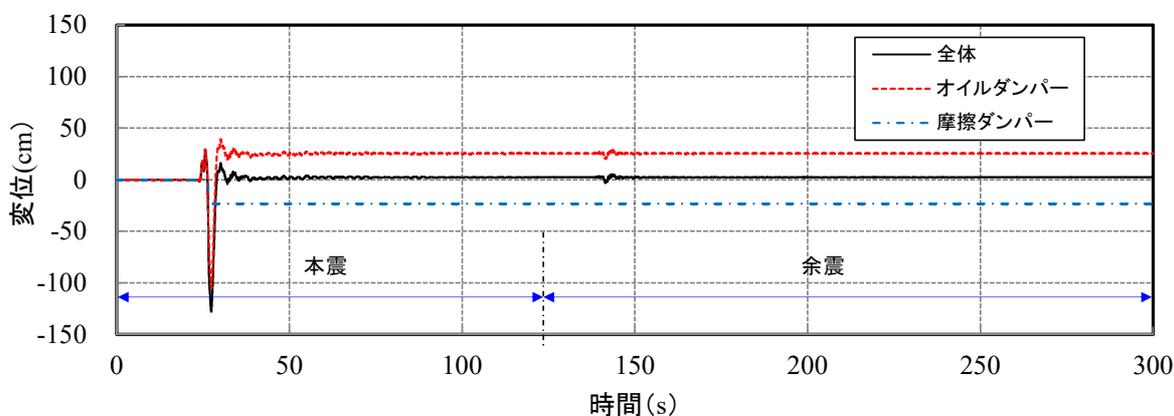


図 5.41 複合ダンパーの変位時刻歴波形  
(CASE-2：西原村小森 本震+余震)

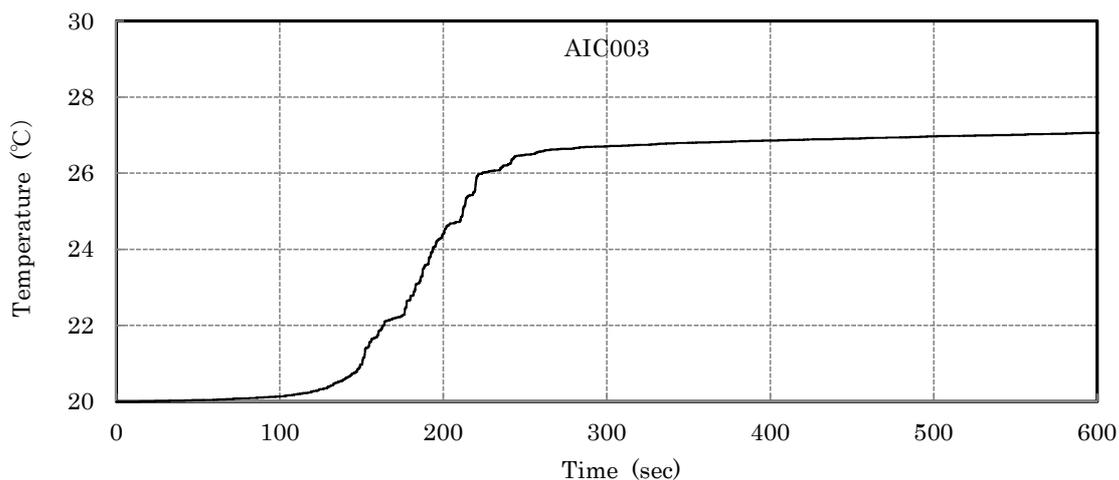


図 5.42 温度上昇シミュレーション解析結果 (CASE-2：南海 AIC003)

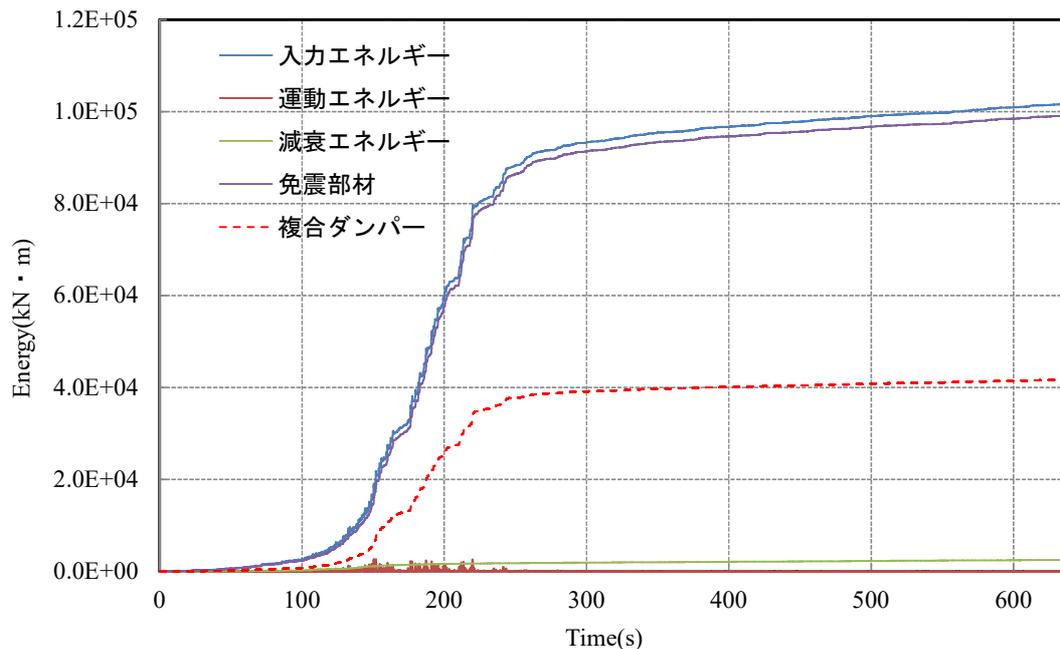


図 5.43 累積吸収エネルギー量(CASE-2 : AIC003)

#### 4) 既存の免震支承との比較

既存の免震支承として高減衰ゴム系積層ゴム (HDR) と低摩擦型の弾性すべり支承を併用し、複合ダンパーを追加した場合 (CASE-4) と復元材と複合ダンパーを併用した CASE-2 を比較した最大応答分布 (西原村小森) を図 5.44 に示す。また、免震部材の履歴特性を図 5.45, 5.46 に示す。

既存の免震部材では、上部構造の応答は低下し、加速度は  $840\text{cm/s}^2$ 、層間変形角は  $1/17$  となり免震効果が得られず、上部構造も倒壊する。CASE-4 では免震層の変位は  $81\text{cm}$  ( $\gamma=252\%$ ) となっており、比較的小さいが、これは、上部構造の塑性化によりエネルギーが吸収されていることによる。一方、今回提案している CASE-2 では、免震層の変位は  $128\text{cm}$  ( $\gamma=213\%$ ) であり、上部構造の応答も十分低減し、免震効果が確保されている。

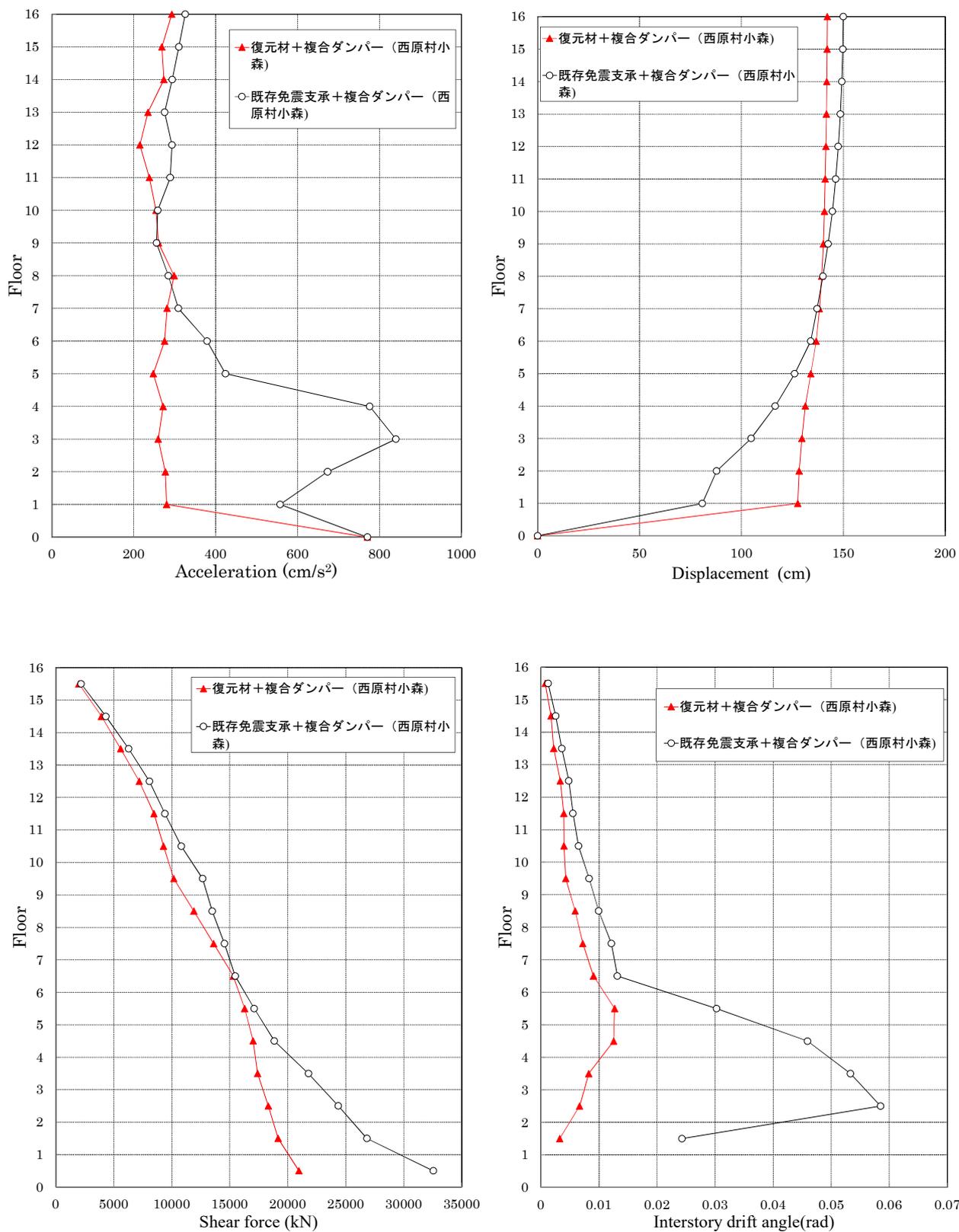


図 5.44 最大応答分布図 (CASE-2・4: 西原村小森)

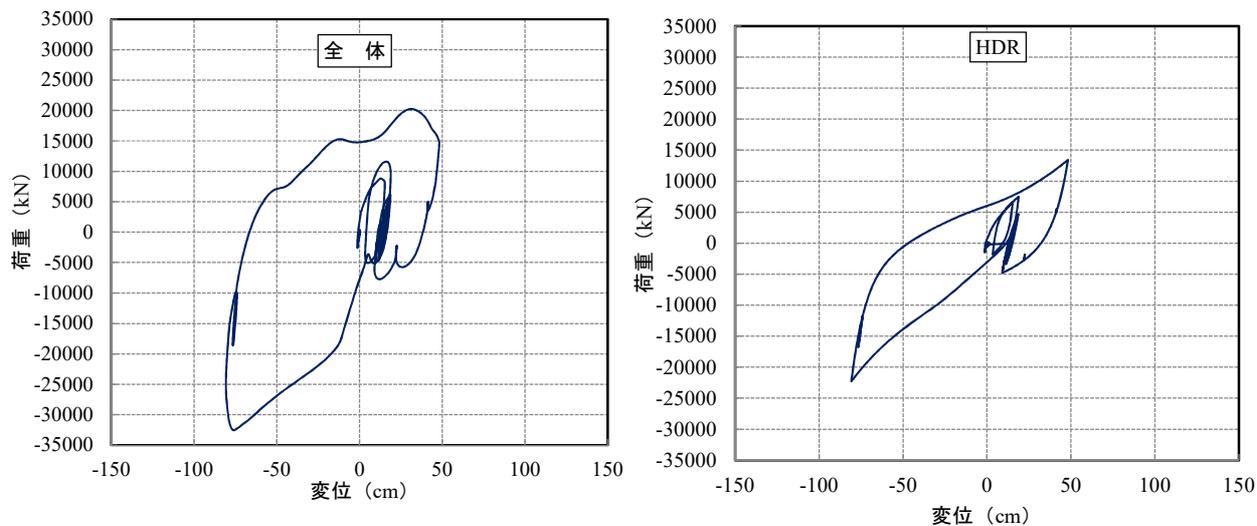


図 5.45 全体・高減衰ゴム系積層ゴムの履歴特性 (CASE-4: 西原村小森)

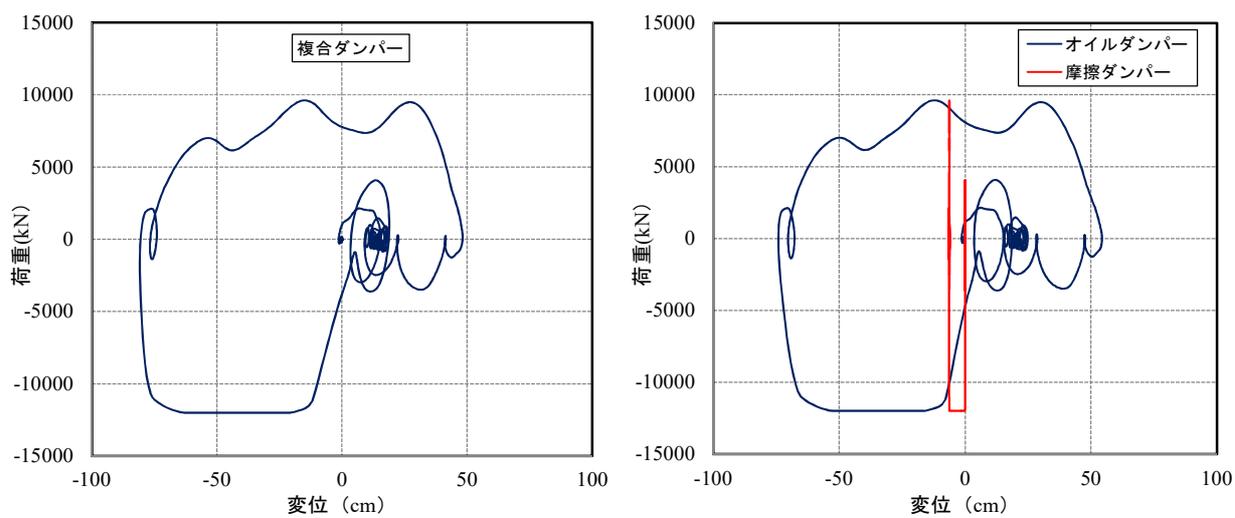


図 5.46 複合ダンパーの履歴特性(CASE-4: 西原村小森)

## 5.5 まとめ

長周期パルスを含む大振幅地震動対策として、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーと摩擦ダンパーを複合したダンパーを提案し、縮小モデル（プロトタイプの住宅用免震）を用いた動的加力試験による基本特性試験と試験結果を踏まえた解析検討を行った。

以下に示す検討結果より、本複合ダンパーは、断層近傍の長周期パルス地震動に対しても有効であると結論付ける。

- (1) 基本特性試験結果より、本複合ダンパーは、設定荷重に対して、オイルダンパーから摩擦ダンパーに切り替えが可能であることを確認した。一方、摩擦ダンパーは、振幅依存性と速度依存性があり、実用化に当たっては、これらを改善する必要がある。
- (2) 15階建てRC造の基礎免震構造における時刻歴応答解析による効果を確認した結果、本複合ダンパーは、大速度・大振幅領域においても限界速度以下で一定の免震効果が発揮できる。一方、良好な免震効果を得るためには、変位量は1.5m程度必要である。
- (3) 限界変位を1.5m程度確保するためには、支承材にもその変位量が必要となるが、現在、市販化している積層ゴム支承の最大は、外径1.8m、ゴム総厚32cmであることから、限界変位 ( $\gamma=400\%$ ) は1.28mであるが、既存の免震支承では、免震効果が低下する。その解決方法として、本章では、1.5mの最大応答変位でも免震性能を確保できるよう、支承材は、弾性すべり支承、復元材として高減衰ゴム系積層ゴム支承を提案し、時刻歴応答解析により免震効果を発揮することを確認した。

第5章の参考文献

- 1) 荻野伸行, 北川麻記, 白鳥和希: 大振幅地震動に対する免震用複合ダンパーの研究, 熊谷組技術研究報告 NO.78, 2019
- 2) 荻野伸行, 北川麻記, 白鳥和希, 露木保男, 岡本真成, 山崎久雄: 大振幅地震動対策用免震オイルダンパーの開発 (その 4) オイルダンパーと摩擦ダンパーを複合したダンパーの検討, 日本建築学会学術講演梗概集 (構造 II), pp.1029-1030, 2018.9
- 3) 国土交通省: 超高層建築物等における南海トラフ沿い巨大地震による長周期地震動への対策について, 2016, [http://www.mlit.go.jp/report/press/house05\\_hh\\_000620.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000620.html)
- 4) 建築研究所: 超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討-南海トラフ 4 連動地震による超高層・免震建物の応答解析-, 建築研究資料 No.147, 2013
- 5) 大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および設計法に関する研究会: 大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および耐震設計指針, 2015
- 6) 日本建築学会: 長周期地震動と建築物の耐震性, pp.234-237
- 7) 菊地優, 石井健, 加藤秀章: 大変形・高軸力下における高減衰積層ゴムの力学挙動予測に関する研究, 構造工学論文集 Vol.56B, pp.179-188, 2010.3
- 8) 山崎久雄, 大原和之, 中郡一雄, 中村秀司, 米田壮央: 摩擦機構を有する免震構造の実用的な解析法とモデル化に関する一考察 (その 1) (その 2), 日本建築学会学術講演梗概集 (構造 II), pp.579-582, 2015.9
- 9) カヤバシステムマシナリー: カヤバ BDS 型オイルダンパー (BDS シリーズ) の長周期地震動に対する免震材料の性能変化について, pp.21-28, 2017.7
- 10) 荻野伸行, 北川麻記, 白鳥和希, 南遼太: 大振幅地震動に対する免震用複合ダンパーの研究—縮小モデルによる基本特性試験—, 熊谷組技術研究報告 NO.80, 2022
- 11) 荻野伸行, 北川麻記, 白鳥和希, 南遼太, 邢超, 石塚太: 大振幅地震動対策用免震オイルダンパーの開発 (その 5) 複合ダンパーの縮小モデルによる基本特性試験, 日本建築学会学術講演梗概集 (構造 II), pp.655-656, 2022.9

## 第6章 結論

6.1 研究の総括

6.2 今後の展望

## 第6章 結論

### 6.1 研究の総括

本研究は、設計想定を超える地震動に対する免震建築物の応答変位抑制法について、筆者が開発した、従来のオイルダンパーの減衰力特性を実現しているバルブ機能（調圧弁）を改良するのみで可変減衰を容易に実現する、動作信頼性の高い、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーに関する研究であり、設計領域の地震動から設計想定を超えるような長周期地震動、内陸直下型地震など多様な地震動に対して、上部構造の応答加速度を抑制することで免震効果を確保し、同時に大振幅地震動の領域においても免震層の変位を抑制することにより、擁壁（躯体）衝突の回避できる、応答変位抑制法を提案することを目的としている。

本論では、研究の方法として、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの目標性能を実現するため、装置設計と様々な性能試験を実施し、試設計免震建物を用いた地震応答解析により応答値抑制効果の検証を行い、提案する可変減衰オイルダンパーの有効性を検証した。

また、本オイルダンパーの繰り返し依存性を考慮できる解析手法を新たに構築し、免震建物の時刻歴応答解析による応答性状の検証を行うことで、高減衰ゴム系積層ゴム支承や鉛プラグ入り積層ゴム支承のような、繰り返し依存性により性能変化を生じる免震支承を併用した場合の有効性を論じている。

さらに、従来困難とされてきた、断層近傍の長周期パルス地震動に対する多段速度依存型可変減衰オイルダンパーと摩擦ダンパーを組み合わせた複合ダンパーを用いた新たな免震システムを提案することで、非常に大きな大振幅地震動から設計領域の地震動までの多様な地震動に対して有効な、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを適用した応答変位抑制法を提案した。

本論で得られた知見を以下に示す。

第1章「序論」では、まず、本研究の背景と目的について述べた。この中で、過去に発生している地震と免震構造の取り巻く環境の変化と対応状況から、大振幅地震動に対する免震構造の対応の重要性と対策方法について概説し、オイルダンパーを増量した場合の応答変位抑制法における課題について示した。次に、オイルダンパーを利用した応答変位抑制法に関する既往の研究についてまとめた。最後に、本研究の主題である多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの必要性和研究目的、研究手法の概略を示した。

第2章の「免震用多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの設計」においては、免震・制振用オイルダンパーの原理・機構と特徴を整理し、設計コンセプトと本質的にオイルダンパーが持つ、速度依存性を利用して、新たに開発した専用調圧弁（バルブ機能の改良）で、振幅領域毎に減衰力を任意に設定し、広範囲な地震動レベルに対して免震性能を発揮できる、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを設計した。また、実機の試作機を設計・製作し、性能確認試験を行った。その結果、目標とした減衰力特性（F-V特性）が得られ、本オイルダンパーは、設計領域の低速領域では低減衰となり、従来の免震構造と同等以上の性能を確保し、設計想定レベルを超える大振幅地震動の中・高速領域では高減衰に切り替わり、変位抑制が可能となる設計通りの減衰力特性が確保できると結論付けている。

第3章の「時刻歴応答解析による応答変位抑制効果の検証」では、第2章で設計・製作し、試作機による性能確認試験と試験結果を踏まえ、ダンパーのモデル化を行い、その機能を新たに解析モデルに組み込んだ。また、15階建てRC造の基礎免震構造における時刻歴応答解析に

よる効果を確認した結果、本オイルダンパーを追加設置することで、大振幅地震動に対して、従来の免震構造に比較して、応答加速度、応答変位、応答層せん断力に低減効果が現れており、標準的な設計用入力地震動においても、加速度応答の増加はみられず、既存のオイルダンパーよりも免震効果を発揮できることを示した。

第4章の「オイルダンパーの繰り返し依存性を考慮した免震建物の地震応答性状」では、オイルダンパーの繰り返し依存性の特性評価に関する現状に鑑みて、OpenSeesにオイルダンパーの繰り返し依存性を考慮した機能を新たに構築し、各免震部材の繰り返しによる性能変化を考慮した時刻歴応答解析について検討を行うことで、その有効性を示すとともに、オイルダンパーを採用する場合の詳細モデルによる検証法を提案した。また、15階建てRC造の基礎免震構造における時刻歴応答解析による繰り返し依存性による比較検討を行った結果、オイルダンパーの繰り返し依存性が免震性能に与える影響は、非常に小さいことが確認された。よって、繰り返し依存性がある支承材に多段速度依存型可変減衰オイルダンパーを追加設置することで、大振幅地震動に対しても、有効に作用し、設計領域では従来の免震効果を確保しつつ、大振幅地震動の領域で変位を抑制することにより擁壁衝突を回避する目標性能を確保することが可能であると結論付けている。

第5章の「断層近傍の長周期パルス地震動に対する多段速度依存型可変減衰オイルダンパーの適用」では、2016年の熊本地震で観測された、震源近傍で長周期成分が卓越するパルス状の強い地震動（以下、長周期パルス）における免震構造の解決策として、多段速度依存型可変減衰オイルダンパーと摩擦ダンパーを組み合わせた複合ダンパーを適用した新たな免震システムを提案した。縮小モデルを用いた基本特性試験結果より、本複合ダンパーは、設定荷重に対して、オイルダンパーから摩擦ダンパーに切り替えが可能であることを確認した。一方、摩擦ダンパーは、振幅依存性と速度依存性があり、実用化に当たっては、これらを改善する必要がある。また、15階建てRC造の基礎免震構造における時刻歴応答解析による効果を確認した結果、本複合ダンパーは、大速度・大振幅領域においても限界速度以下で一定の免震効果が発揮できるが、良好な免震効果を得るためには、変位量は1.5m程度必要である。本章では、1.5mの最大応答変位でも免震性能を確保できるよう、支承材は、弾性すべり支承、復元材として高減衰ゴム系積層ゴム支承を提案し、時刻歴応答解析により免震効果を発揮することを確認し、本複合ダンパーは、断層近傍の長周期パルス地震動に対しても有効であると結論付けている。

以上より、筆者が開発した多段速度依存型可変減衰オイルダンパーは、設計領域の地震動から設計想定を超えるような大振幅地震動など多様な地震動に対して、上部構造の免震効果を確保しつつ、大振幅地震動の領域においても免震層の応答変位を抑制することができることを明らかにした。

## 6.2 今後の展望

多段速度依存型可変減衰オイルダンパーは、従前のオイルダンパーのバルブ機能（調圧弁）を改良することで実機として実現できるため、製品化が容易であり、今後、多くの免震構造への適用が望まれる。

オイルダンパーは、疲労性能が高く、繰り返し依存性が小さいことから、免震構造や制振構造で多用される部材であり、リニア・バイリニア・今回提案の多段可変等、様々な特性をもつものが開発されており、目標耐震性能に応じて使いわけすることも有益である。

耐震・免震・制振構造のどれを採用するかは、目標性能と地震・風・水害・津波などのハザードや地盤・敷地環境、コストにより決まることが多い。地震リスクやBCP（事業継続計画）、レジリエンスの観点では、免震構造が有効であると言えるが、現在の免震構造では、適用できない建物もあることから最適な構法の選定が設計上重要である。免震構造の耐震性能グレードは、JSCA性能設計<sup>1)</sup>が参考になるが、免震構造は、地震動レベルと被害の程度に応じて、免震基準級、免震上級、免震特級の3つの耐震性能グレードが設定されており、一般的には免震基準級、免震上級が多いと考えられる。また、文献2)では、表6.1に示す想定地震の地震動レベルと再現期間の目安がまとめられている。

多くの大振幅地震動の検討は、このレベル3の極大地震動（余裕度検証用地震動）の範囲が多く、想定最大級の地震動の長周期パルス、想定最大クラスの南海・相模トラフ巨大地震の地震動、原子力発電所用の基準地震動における免震構造の適用は困難な事例もあると思われる。

複合ダンパーは、実用化までに、改良と実機の確認試験が必要であるが、これに対応できる免震部材である。しかし、免震層の変位が大きくなることから免震クリアランスは1.5m程度必要になり、都内のように敷地条件に制約がある場合は適用が困難な場合も想定される。その場合は、擁壁の衝突を許容する技術（高精度解析技術・衝撃緩衝材）や耐震・制振構造も選択肢の一つである。

免震構造は、より高層化が進むと、現在の免震部材のサイズでは不足し、さらなる大型化が必要である。また、高層免震では風応答を考慮して免震・制振を組み合わせることも有効である。

様々な地震動に対して、全て免震構造で解決することは、困難ではあるが、不可能とせず、免震構造の適用可能性について、常に研究を進めることは極めて重要であり、本研究がその一端を担えば幸いである。

表6.1 想定地震の地震動レベルと再現期間の目安<sup>2)</sup>

| 名称            | L1 地震動                         |                                     | L2 地震動                                     | L3 地震動  |   |
|---------------|--------------------------------|-------------------------------------|--|---|---|
|               | 稀に発生する地震動                      | かなり稀に発生する地震動                        | 極めて稀に発生する地震動                               | 極大地震動（余裕度検証用地震動）                                    | 想定最大級の地震動                                       |
| 説明            | 建築物の存在期間中に数度遭遇することを考慮した中規模の地震動 |                                     | 建築物の存在期間中に1度は遭遇することを考慮した大規模な地震動            | 対象サイトで発生する可能性がある最大規模の地震動                            |   |
| 地震動レベルの目安*1   | 告示波（損傷限界）の地震動レベル。地表震度5弱程度      | 告示波（安全限界）の1/2程度の地震動レベル。地表震度5強～6弱程度  | 告示波（安全限界）用の地震動レベル。地表震度6強程度                 | 告示波（安全限界）の1.5～2倍程度の地震動レベル。地表震度6強～7程度                | 告示波（安全限界）の2～3倍程度の地震動レベル。地表震度7程度                 |
| 再現期間（超過確率）の目安 | 数十年に1度程度                       |                                     | 数百年に1度程度                                   | 数千年に1度程度  | 数万年に1度程度  |
|               | 30年（50年超過確率80%）程度              | 70年（50年超過確率50%）程度                   | 500年（50年超過確率10%）程度                         | 5,000年（50年超過確率1%）程度                                 | 50,000年（50年超過確率0.1%）程度                          |
| 想定地震の目安       | 中規模地震（M5～M6）の地震動など             | 中規模地震の近傍や大地震（M7以上）の遠方地震動など          | 大地震（M7）～巨大地震（M8）の地震動（継続時間60秒程度以上）など        | 活断層帯地震の震源近傍における大振幅地震動、海溝型巨大地震による堆積盆地での長周期・長時間地震動、など |   |
| 事例            | 告示波（損傷限界用）など                   | 最大振幅25cm/sに基準化した観測地震波（El Centro波）など | 告示波（安全限界用）、50cm/sに基準化した観測地震波（El Centro波）など | 東京臨海部のL3地震動、JSCA 関西支部の上町断層波、など                      | 想定最大クラスの南海・相模トラフ巨大地震の地震動、原子力発電所用の基準地震動（Ss地震動）など |
|               |                                |                                     | 南海トラフ地震の基整促波（国交省）、愛知県設計用入力地震動研究協議、など*2     |   |   |

\*1：表に示した地震動レベルはあくまで目安であり、対象サイトに影響する地震の規模・深さ・距離・発生確率、さらには地震動の伝播・サイト増幅特性（サイトの卓越周期の有無など）などによって、現実には地震動レベルは大きく変動する。したがって、本来、地震動はサイトごとに慎重に評価されるべきである。

\*2：近年、南海トラフの巨大地震は従来の「固有地震モデル」から、再現期間が短いM8地震から科学的に評価できないM9地震までを含む「多様性ある地震モデル」として評価されている。宝永地震や安政東海地震のように再現期間が長い大規模な地震により地震動を想定すると、場所により地震動レベルが極めて大きく評価される。その地震動をL2、あるいは、L3地震動とするか、その際の設計クライテリアをどう設定するかは、広く議論を行って社会的なコンセンサスを得るプロセスを踏まえることが望ましい。

## 参考文献

- 1) 日本建築構造技術者協会：JSCA 性能設計説明書【耐震性能編】2017年版，「JSCA 性能設計【耐震性能編】」パンフレット，2018
- 2) 日本免震構造協会：免震建築物のための設計用入力地震動作成ガイドライン（第3版），pp.3-1-3-2，2022.6