

博士論文

構造物の地震応答に対する MR グリースダンパの効果
Seismic Response Reduction of Buildings by MR Grease Damper

国立大学法人 横浜国立大学大学院

環境情報学府

櫻井 朋樹

Tomoki Sakurai

2017年3月

目次	頁
1. 緒言	1
1.1 背景と概要	1
1.2 本論文の構成	2
2. 耐震について	3
2.1 近年の地震	3
2.2 長周期地震動と大きな前震・余震～近年の地震の特徴～	6
(1) 長周期地震動	6
(2) 大きな前震・余震	7
2.3 耐震の考え方	9
(1) 基準等の基本的な考え方	9
(2) 性能規定の適用	10
(3) 最近の耐震について	13
2.4 本研究のねらい	14
3. MR グリース	15
3.1 概要	15
3.2 グリースについて	16
3.3 磁気粘性効果について	17
3.4 MR グリースについて	18
3.5 実験結果	19
(1) 磁気粘性 (MR) 特性	19
(2) 分散安定性	22
3.6 まとめ	24
4. MR グリースダンパ	25
4.1 ダンパ構造	25
4.2 ダンパ特性	28
4.3 モデル試験	33
(1) セミアクティブ振動制御アルゴリズム	33
(2) 加振試験	33
(3) 正弦波加振試験の結果	34
(4) 正弦波掃引 (スイープ) 加振試験の結果	37
(5) モデル試験のまとめ	38
4.4 まとめ	39
5. 数値解析による実構造物への適用検討	41
5.1 解析モデル	41
(1) モデル化方法	42
(2) MR グリースダンパのモデル化	45
(3) 解析モデルケース	48
5.2 入力地震波	53
5.3 固有値解析結果	59

	頁
5. 4 地震応答解析結果	68
(1) 結果の評価方法について	68
(2) 解析結果	69
(3) まとめ	97
6. 地震応答解析結果の考察	99
6. 1 被害評価の詳細	99
6. 2 固有振動数と地震波卓越周波数の比較	110
6. 3 固有振動数とダンパ配置について	113
6. 4 残留変位での比較	115
6. 5 MR グリースダンパの優位性について	118
6. 6 複数のデバイス使用の検討	120
6. 7 エネルギー吸収量での検討	127
7. 結言	133
参考文献	135
謝辞	138

1. 緒言

1.1 背景と概要

1995 年の兵庫県南部地震から、2011 年の東北地方太平洋沖地震、あるいは本年（2016 年）の熊本地震まで、震災（災害）をもたらす地震が以前に比べて頻発しており、地震活動期に入ったとする説もある。これらの被害地震の頻発を受けて、巨大地震に対する防災、あるいは減災の重要性が高まってきている。さらには、東海、東南海、南海の各地震、及びこれらの三連動地震や、首都直下型地震のような巨大地震の襲来予測も為されていることから、これらへの対策である構造物や設備の耐震性向上が急務となっている。

そのため耐震、免震、あるいは制振（制震）といった対策技術も、近年に急速な進歩、発展を遂げている。耐震性向上のために用いられるブレースやダンパ、アイソレータといったデバイスについても、この傾向に漏れず様々なアイデアが発案・研究され、実用化、適用が為されてきている。

一方、これらのデバイスに対して機能性材料が適用されることも増えてきている。その中の一つとして磁気粘性流体（Magneto-Rheological Fluid：MR 流体）があるが、分散粒子の沈降問題が解決できないなどの欠点があり、まだ利用に関してハードルが高いのが現状である。著者らは、この磁気粘性流体に着目し、分散粒子の沈殿を抑制するために、分散媒としてグリースを用いた磁気粘性流体である磁気粘性グリース（以下、MR グリース）を開発した。

本研究では開発した MR グリースの特性把握と円筒型の可変減衰ダンパへの適用検討、さらにはこの可変減衰ダンパの耐震デバイスとしての使用を考えて、実構造物を対象とした数値解析によってその効果を検証した。その結果、

- ・ MR グリースは、磁気粘性（MR）特性が MR 流体と同等、長期間にわたる分散安定性の保持といった当初の開発目的どおりの特性を有すること
- ・ 円筒型の可変減衰ダンパ（MR グリースダンパ）への適用が有効であること
- ・ この MR グリースダンパが耐震デバイスとして有効であり、特に最近の地震で着目されている特徴である「長周期地震動」と「大きな余震」に対して、既存の耐震デバイスより有効であること

が分かった。

1.2 本論文の構成

第1章は、本研究の動機づけとなる背景について簡潔に述べ、更に目的と概要について記述した。

第2章では、まず本研究の背景である最近の日本における地震の発生状況や特徴について検討を行った。更に、特徴の中でも喫緊の課題として着目されている長周期地震動と、大きな前震・余震について言及するとともに、これらの課題を解決のするために耐震デバイスに求められる特性についても示した。

第3章では、MR グリースについて記述した。内容としては、分散媒として用いたグリースの特徴、静置試験結果により分散粒子の沈降が生じないことの確認や、回転粘度計を用いた特性把握試験から従来の MR 流体と同等の特性を持つことについて記述した。

第4章は、MR グリースを適用する耐震デバイスとして、円筒型の可変減衰ダンパ (MR グリースダンパ) を選択し、小型モデルダンパの試作、及び要素試験より把握したダンパの特性について示した。また、3層構造モデルに小型モデルダンパを設置、簡易なセミアクティブ振動制御システムを適用して加振試験を行った結果についても記載した。

第5章では、実際の鉄骨構造物に対する MR グリースダンパの耐震デバイスとしての効果について示した。具体的には、3階建て鉄骨骨組み構造の機械棟を対象に、補強 (耐震性向上) のために MR グリースダンパの設置を想定して、有限要素法による数値解析によって効果を検討した。また、効果の比較検討のために、現在の状態 (補強前、通常タイプの鋼製ブレースが設置された状態)、同様に補強のために、地震対策として一般的に使われている座屈拘束ブレースを設置した状態等についても解析を行い、これらの結果も記載した。

第6章は、第5章での解析結果について、より詳細に検討を加えた考察について記述した。

第7章には、本研究で得られた結果について、全体のまとめを示した。

2. 耐震について

2.1 近年の地震

国内では 1995 年の兵庫県南部地震以降、地震活動期に入ったとも言われており、比較的大きな地震が頻発している。それに伴って地震被害（震災）の発生も多く見られる。

Fig.2-1 は、平成 17 年度版「防災白書の概要」（内閣府）に記載された図、および気象庁のデータベースを基に、1975 年から 2016 年（現在）までの過去 40 年間に於ける震度 6 以上の地震を記したものである。

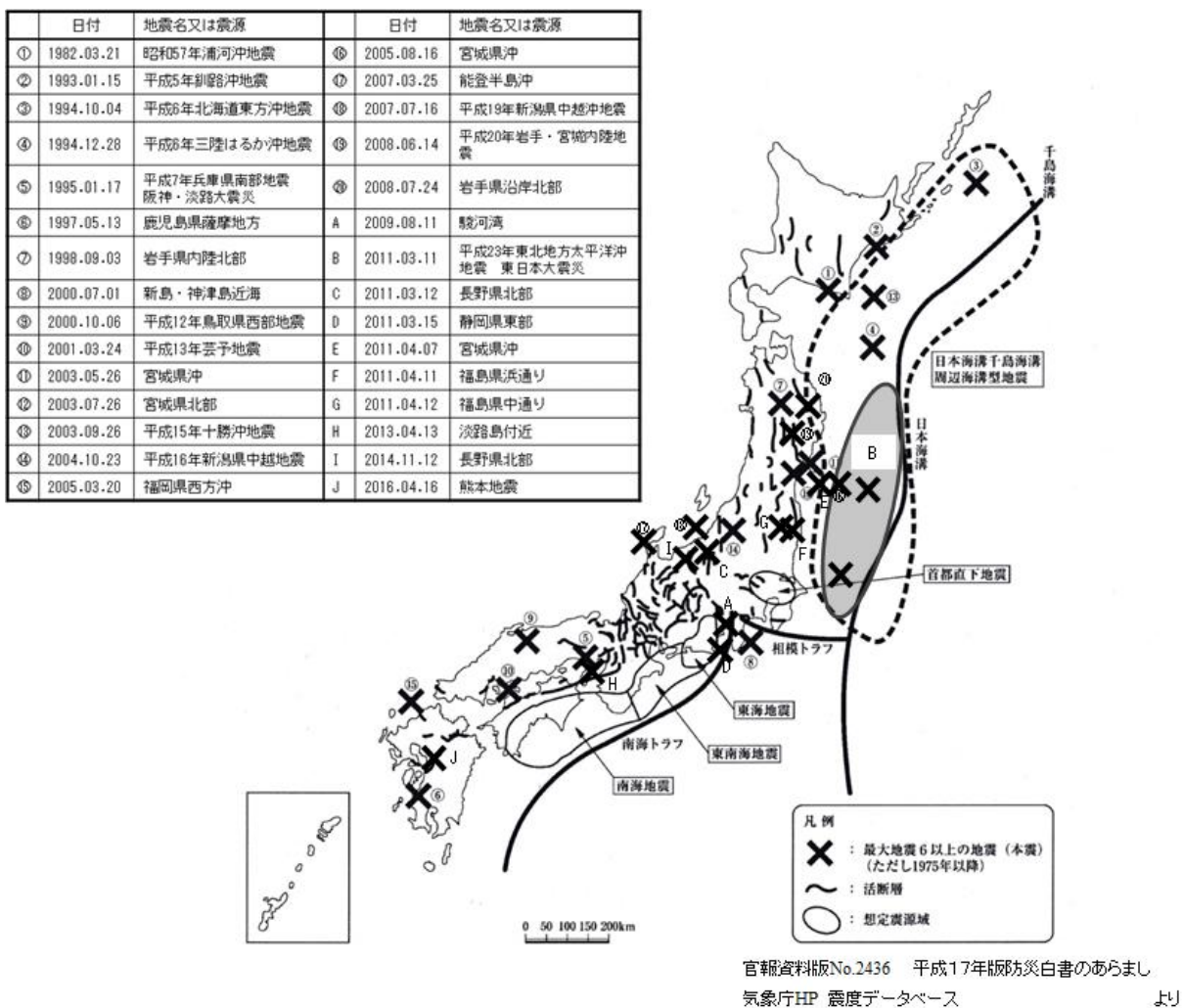


Fig.2-1 過去 40 年の地震と震源域（震度 6 以上）

この図から、地震が日本全国で発生しているが、北海道の北西側、あるいは巨大地震の襲来予測のある、東海・東南海・南海地震の発生域、あるいは首都直下付近の発生は少なく見える。

また、地震発生の日付を見ると、兵庫県南部地震（1995年）がちょうど表示期間である40年の半分（20年間）となる。この1995年前後を区切りとして、それ以前（1975年～1994年）と以後（1995年～2016年）の発生件数に比べると、

1975年～1994年：4件

1995年～2016年：26件

となり、兵庫県南部地震以後の発生件数が極めて多いことが分かる。

次にTable 2-1に、構造物の耐震基準としては代表的な建築基準法の変遷に比較的大きな地震とを並記したものを示す。

Table 2-1 建築基準法の変遷と大規模地震

西暦	建築基準法の変遷	発生地震
1923年		関東地震(関東大震災)
1924年	市街地建物法：水平震度の明記 “水平震度を0.1以上とする”	
1948年		福井地震
1950年	建築基準法の施行：許容応力度設計法、 地域による低減係数など	
1964年		新潟地震
1968年		十勝沖地震
1971年	建築基準法施行令の改訂： 終局強度などの評価法	
1978年		宮城県沖地震
1980年	建築基準法施行令の改正(新耐震設計法、施行は翌年)： 2段階設計法、評価法の見直しなど	
1995年		兵庫県南部地震(阪神大震災)
1998年	建築基準法の改正(仕様規定型から性能規定型へ) 限界耐力計算、動的解析、地盤の考慮など (設計自由度の拡大)	
2007年		新潟中越沖地震
2011年		東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)

この表からは、震災を伴うような巨大地震の後には、その被害要因を基に基準の見直しが都度行われ、これにより構造物の強化、耐震性の向上が図られていることが分かる。これらの見直しも、発生した地震の特性、被災地域の特性により被害の特徴が異なることから、事前予測ではなく事後の反映になりがちである。

現在も、東海・東南海・南海および、それらの3連動波、あるいは関東近辺の大地震などの巨大地震の襲来が予測されている。この予測データも、地震発生(震

災発生)の都度、得られた知見をもとに中央防災会議等において襲来規模、災害予測の見直しが行われている。

先の Fig.2-1 のうち、更に比較的規模の大きい震災を伴った地震とその特徴を Table 2-2 に示すが、それぞれに異なった被害形態や特徴が見られる。

Table 2-2 比較的規模の大きい震災を伴った地震

発生年	地震名称	地震の特徴	被害の特徴
1995年	兵庫県南部地震	・大きな振幅 ・上下動が大	・高架橋(高速道路)、 港湾設備、建築物の 被害
2003年	十勝沖地震	・長周期成分、やや長周期 成分が顕著	・スロッシングによる 貯蔵タンクの火災、 浮屋根の損傷沈没
2007年	新潟中越沖地震	—	・原発の被災(大きな 被害は皆無)
2011年	東北地方太平洋 沖地震	・長い継続時間 ・大きな規模の前震・余震	・津波被害(原発の被災/ 被害)
2016年	熊本地震※)	・多数の余震 ・本震と同規模の前震	・大きな断層のズレに 伴う被害

※) 熊本地震については、調査、評価がまだ完了していない。

これらの被害の要因を検討すると、地震の大きさや特性だけでなく、地震を受ける側の構造物や地盤の特性(地域性、技術の発達等による)も関連している。更には、この構造物の特性が変化したため、着目されるようになる地震特性、事象もある。この一つとして、“長周期地震動”(地震波の長周期成分)が挙げられる。最近の建物の高層化に伴って、その支配的な振動モードの固有振動数が低下(長周期化)したために、被害発生が増加している。

また、喫緊の地震である東北地方太平洋沖地震や熊本地震では、“比較的規模の大きな前震・余震”が発生しており、これについても問題視され始めている。

この“長周期地震動”、“比較的規模の大きな前震・余震”は、近い将来において襲来予測がされている東海、東南海、南海の三連動地震のような巨大地震でも現出が懸念されている。

2.2 長周期地震動と大きな前震・余震～近年の地震の特徴～

2.1 節で述べた近年頻発している比較的大きな地震で、特に最近の特徴と言える長周期地震動、大きな前震・余震について、以下に述べる。これらが、本研究の背景の根幹を成している。

(1) 長周期地震動

石油タンクなどに見られる円筒型の貯蔵タンクでは、地震時の挙動として液面の揺動である“スロッシング”現象がよく知られている。古くから、地震時のスロッシングによる被害が報告されているが、国内では 1964 年の新潟地震や 2003 年十勝沖地震の際に、このスロッシングによって円筒型タンク内の貯蔵流体のいつ流による漏洩、あるいはタンク火災が生じている。

スロッシングの固有周期は、円筒の直径にもよるが直径 50m で約 8～9 秒、さらに容量の大きなタンクだと 10 秒以上となり、一般的な地震波卓越周期である 1～2 秒 (0.5～1Hz) に比べて、長い周期である。このような、長い周期を持つ地震動、地震の長周期成分が大きい地震動が、いわゆる“長周期地震動”と呼ばれている。

前述の地震、特に 2011 年の東北太平洋沖地震では、震源から距離のある首都圏の高層建築物において、この長周期地震動による大きな揺れの発生、さらにはエレベーターの緊急停止などが報告されている。これらは、最近の建築物の高層（長大）化、柔構造化に伴い固有振動数が低くなる傾向（長周期化）のために、長周期地震動により励振され易くなったことによる。つまり、技術の発達に伴う構造物の特性の変化により生じた被害である。これらの被害状況を受けて、長周期地震動、およびその対策に関する研究、開発が以前に比べて活発化、実際の施工例も増加している。

長周期地震動は地震の発生機構的に生じるのではなく、震源からの伝搬経路の特性、すなわち地盤特性や地下構造によって励起、増幅されることが、近年の研究からわかってきている。特に平野部の構造は、洗面器のような桶・容器形状を成す硬い岩盤の上（容器の内側）に、河川によって運ばれ積もった土砂等による比較的柔らかい堆積層があると考えられている。この構造から、関東平野の南側では周期 10 秒程度、大阪平野の湾岸では約 6 秒の周期、濃尾平野では 3 秒と 6 秒の周期が卓越するといった評価結果も示されている。

長周期地震動の周期としては、明確な定義づけはないが、以下のようないくつかの考え方が示されている。

- ・ 上述の主要な都市圏の立地する堆積盆地が揺れやすい周期を必ず含むように長周期地震動を定義するという考え方にに基づき、中央防災会議（2008）によれば、想定東海地震や東南海地震、宮城県沖地震の影響が及ぶ範囲にある大都市圏のうち、揺れやすい周期が最も短い、中京圏を含む濃尾平野と仙台圏を含む仙台平野の周期であるおよそ 3～4 秒前後を下限。
- ・ 大きな地震の近くで発生する、継続時間は短いものの振幅の大きな揺れを含めるとすると、周期 1 秒程度を下限。
- ・ 前述の 2003 年十勝沖地震の時に、苫小牧において周期約 4 秒以上の成分を多く含む地震動が発生し、長周期地震動による特徴的な被害をもたらしたことに基づけば、周期 4 秒以上
- ・ 一般的な高層建物が揺れやすい周期（固有周期）である 2～3 秒前後を下限。以上から、概ね 3 秒前後以上の周期の地震動が長周期地震動と見なせるようである。

長周期地震動は、その特性から振幅が大きいこと、すなわち大きな変位（ストローク）、遅く速度に対応することがダンパの性能に求められる。

（2）大きな前震・余震

2011 年の東北太平洋沖地震では、その発生日である 3 月 11 日（本震、M（マグニチュード）7.3）の 2 日前の 3 月 9 日に、M7.3 の比較的エネルギー規模の大きな前震が発生している。

また、2016 年 4 月に発生した熊本地震では、2 千回を超えるこれまでにない数の余震とともに、16 日の本震（震度 7、M（マグニチュード）7.3）の 2 日前の 14 日に、本震に匹敵する震度 7（M（マグニチュード）6.5）を観測する前震が発生している。それ以外にも震度 6 強を観測する余震も数回発生しており、地震被害を拡大させている。

特に、当初は 14 日の余震を本震と見なしていたことによって、16 日の本震発生時に建屋の損傷が拡大、倒壊に至った例、またそれによって居住者が死亡した例も多数、報告されている。

これら両者の共通点としては、本震が震度 7 を観測する巨大地震であることが挙げられる。このことから、襲来が予測されている特に東海・東南海・南海の各

地震および、それらの3連動地震のような海溝型（プレート型）巨大地震においても、“比較的規模の大きな前震・余震”、言い換えると“被害（震災）を伴う規模の前震・余震”の発生が懸念されている。

この大きな前震・余震と本震とによって巨大地震が短期間で繰り返し襲来することになり、それにより生じる被害の拡大や、同様に巨大地震を免震、制振装置の能力限界付近までを費やすことで倒壊に至らなかった構造物が、この大きな余震で倒壊することなどが危惧されている。

2.3 耐震の考え方

(1) 基準等の基本的な考え方

現在、巷間に広く用いられている 1980 年の改正以後の建築基準法による耐震設計、所謂「新耐震設計法」（“新耐震”と呼ばれることが多い）では

・2 段階の設計方法

を耐震性評価（設計）の基本的な考え方としている。

これは、大地震でも壊れない頑丈、高強度の構造物を建設することは、必要となるリソースの多さ、およびコストが極めて大きくなり実現性に乏しいものとなることから、以下のように 2 つの段階、レベルに分けて基準を設定、構造物に適用させるものである。

まず発生する地震の観点からは

① 起こりうる大地震：10 年または 20 年程度の周期で発生する地震、

② 限界的な大地震：50 年または 100 年に 1 度程度の周期で発生する地震

というレベル分けになる。これらは、分野、業界によって表現が異なり、それぞれこの他に

① 構造物の使用中に数回は発生する大地震、レベル 1（L1）地震、S1 地震

② 構造物の使用中に 1 回発生するかどうかの大地震、レベル 2（L2）地震、S2 地震

との言い方をする場合がある。

次に、構造物の観点からは、上記のそれぞれの地震に対応し、

① 構造物が壊れない、機能が損なわれない

② 構造物は壊れても止むを得ないが、人命は損なわない

との表現になる。これらも地震と同様に、分野や業界によって異なった表現が使われ、それぞれ、

① 機能維持、弾性設計

② 目に見える変形が生じるが崩壊に至らない、弾塑性設計

とも表記される。

いずれにしても、大地震と巨大地震といった 2 段階に分けて、基準を設定、耐震設計・評価が行われる。これは、巨大地震でも全く損傷が生じないようにすることは、コスト的に合わないため、合理的に考えて設定がなされている。

1995 年の兵庫県南部地震を契機として行われた各耐震基準、指針等の見直しが

なされ、要求基準値、設計用地震波の高レベル化が行われているが、この2段階の考え方については基本的に変更されていない。

(2) 性能規定の適用

最近では、上記の2段階の考え方に、適用対象とする建築物（構造物）の重要性を基にした耐震性能を検討、加味（性能規定）して、より詳細な基準設定を考えるようになってきている。

この例を Table 2-3 に示す。これは日本建築構造技術者協会で検討された2段階の地震に対して要求される性能をメニュー化したものである。適用される建築物の用途を基に、それぞれの段階の地震に対して求められる耐震性（耐震グレード）を3種類に分けて設定している。損傷区分についても、無被害を含めて5段階に区分されている。

さらに、Table 2-4 に損傷区分と、その内容を示した表を示す。このような内容を基に、詳細な基準を検討することになる。

Table 2-3 地震荷重に対する性能メニュー表

↑耐震グレード	地震の大きさ グレード	まれに作用する荷重(L1地震)	きわめてまれに作用する荷重(L2地震)	適用されるべき建築物の用途例
	特級	機能維持 無被害 修復不要	主要機能確保 軽微な被害 軽微な修復	防災拠点、拠点病院など
上級	機能維持 無被害 修復不要	指定機能確保 小破 小規模修復	一般病院、避難施設、コンピュータセンター、本社機構、不特定多数が利用する施設など	
基準級	機能維持 無被害 修復不要	人命保護 限定機能確保 中破 ~ 大破 中～大規模修復	一般建築物	

(JSCA（日本建築構造技術者協会） 性能メニューパンフレットより)

Table 2-4 地震荷重に対する損傷区分の状態

状態区分	損傷限界 ▶		安全限界 ▶		
	機能維持 無被害 修復不要	主要機能確保 軽微な被害 軽微な修復	指定機能確保 小破 小規模修復	限定機能確保 中破 中規模修復	人命保護 大破 大規模修復
機能維持の程度	建築物としての機能がほぼ完全に維持される。	主要な業務遂行の為に機能が確保される。	基本的活動維持の為にあらかじめ指定された機能が確保され、避難所として利用できる。	業務活動の為に機能を失うが、限定された区画内で、最低限の救急活動等緊急対応が可能である。	地震時には人命が失われないが、地震後に建物に立入ることは危険で、緊急対応活動も不可能になる。
被害の程度	・構造骨組に変形は残らない。 ・仕上材等の一部は外観上の軽微な損傷を受けることがあるが、他はほぼ損傷を受けない。	・構造骨組には殆ど変形が残らず、構造強度に影響はない。 ・仕上材等は若干の損傷を受けるが、使用性は損なわれない。	・構造骨組に若干の残留変形が認められ、耐震性は多少低下するが、余震には耐える。 ・仕上材等には、ある程度の損傷を生じる。	・構造骨組は鉛直荷重支持能力を保持するが、構造強度に影響を及ぼす変形が残る。 ・仕上材等は相当の損傷を受けるが、脱落はしない。	・構造骨組が大損害を被るか、落床・倒壊は生じない。但し、余震による倒壊の危険性がある。 ・仕上材等の鋼板に亘る損傷・脱落を生じる。
要する修復の程度	・構造体の修復は不要である。 ・仕上材等の外観上からの補修を要する場合がある。	・構造体の強度確保の為に補修は要しない。 ・仕上材等は軽微な補修を施せば、建物の機能はほぼ完全に回復することが可能。	・構造体には直ちには補強・補修を要しない。 ・小規模な修復により、ほぼ完全に当初の機能が回復される。	・構造強度の低下に対する応急補強・補修を要する。 ・中規模の修復によって、ほぼ完全に当初の機能が回復される。	・構造体の完全な復旧は困難になる。 ・大規模な補強・補修により業務活動は再開できるが、当初機能の完全回復は困難である。

(JSCA (日本建築構造技術者協会) 性能メニューパンフレットより)

この性能設定、耐震グレードの詳細化の一つとも言えるかもしれないが、「②限界的な大地震」への対応について、最近ではこれらの設計基準（すなわち、建築基準法などの基準、指針）を最低限の基準値として、メーカーと客先企業との協議等で、

◆客先の要求性能に対する（基準・指針の評価値より厳しい）基準値を設定して設計する場合も出てきている。これは客先が考える防災計画や復旧シナリオに基づき、

- ・維持すべき項目（人命、機能の程度など）
- ・許容する損傷レベル（復旧の期間、費用など）

などを勘案して決められる。この考え方は、欧米では既に「性能設計」として用いられている考え方で、国内でも1995年の兵庫県南部地震以降に普及されるようになってきている。

特に電気、ガス等のエネルギー供給企業を筆頭に重要な社会インフラを抱える企業では、巨大地震に対する防災計画として

- ・所有プラントの中の順位付け（地震後に優先して復旧、稼働させるプラントの選別）

- ・その優先プラントの中での復旧・稼働計画の策定（被災・復旧シナリオの検討）
- ・策定された復旧・稼働計画に基づいて各設備の優先順位が決定され、上記の性能設計も優先設備等に適用
- ・この性能設計での評価により、選択と集中を検討した耐震補強の実施といったメリハリのある計画を実現させようと努力している企業もある。

例えば、Fig.2-2 に示すように、まず、客先が防災計画や地震後の復旧シナリオから要求仕様を作成、提示する。これを受けて、メーカーは客先と協議しながら維持すべき項目や許容できる損傷レベル等の目標性能を決める。この目標性能を決める段階では、コスト、実現性等の観点からも検討を行い、場合によっては要求仕様の変更（防災計画や復旧シナリオの変更）をも行って、具体的かつ現実的な内容とする必要がある。

この目標性能が耐震仕様（耐震基準）となり、メーカーはその実現のために設計、対策を行うことになる。客先とメーカーとの協議は、場合によっては客先の復旧シナリオの検討から始まる場合もある。

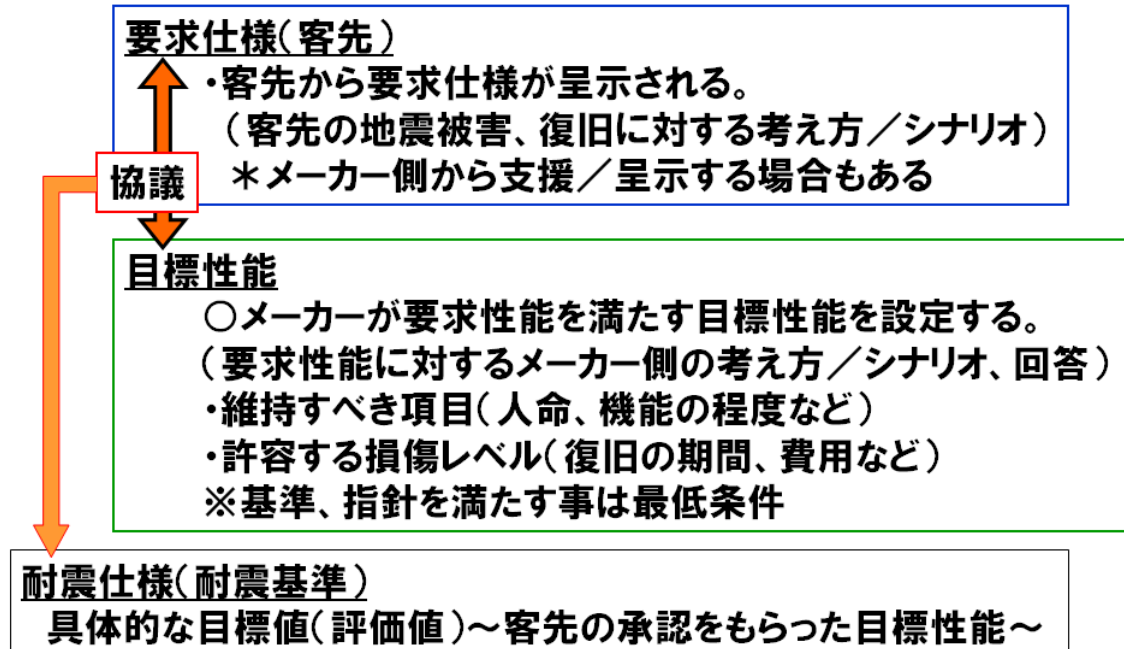


Fig.2-2 客先の要求する耐震仕様

(3) 最近の耐震について

前述のように兵庫県南部地震を機に、各基準、指針等の要求基準、設計用地震波の高レベル化が図られたが、これらの高レベル化基準・指針に対応した耐震性や詳細な性能規定に基づく耐震性を成立させるためには、従来のような構造部材の見直し、補強等の構造物の剛化、所謂狭義の意味での耐震だけでは成立し難い。

そのために免震、あるいは制振といった耐震手法も兵庫県南部地震以降、急速かつ広汎に採用されるようになってきてくる。昨今は、この免震の採用をアピールポイントとする住宅やマンションなども多く見られ、免震という文言も市民権を得たように思える。また、保守的であり、これまで剛化だけであった原子力発電所についての耐震指針でも免震を取り入れる方向へ変化している。

制振については、これまで風や波といった自然現象あるいは機械装置等から発生する力により励起される構造物の振動を対象として、装置の開発や施工・設置が行われていた。しかし、最近では特に地震を対象とするものも多くなってきている。建築・ゼネコン会社では、この地震による構造物の揺れを対象とした制振を“制震”と称しているようであるが、これでは“地震を制する”との意味になり、言葉として適正ではない。あくまでも、“地震によって励起された振動を制する”という意で、“制振”が正しい。

また、これらの免震、制振手法の普及を含めた耐震性の向上に伴い、それを実現するための装置、システム、構成デバイスの研究開発も活発化している。デバイスとして、ダンパやアイソレータといったデバイスについても、その傾向に漏れず様々なアイデアが発案・研究され、実現化、適用が為されてきている。デバイスとしては、機能性材料の使用例の増加が顕著である。これらによって、耐震性向上の対策を計画、施工する際のツールの増加、多様化が促進されており、急務とされている巨大地震対策にも大きく寄与している。

2. 4 本研究のねらい

本研究では、2.2 節で述べたような、最近の地震の特徴である

- ・長周期地震動による建造物・構造物の大きな揺れ（大变位（振幅）、遅い速度）
- ・大きな余震と本震による大震度（震度 6 や 7 程度）地震の短期間で複数回の発生

の対策として、機能性流体を用いた振動エネルギー吸収装置、具体的には MR グリースダンパの開発、耐震性向上のためのツールとしての適用を考えた。

3. MR グリース

この章では、開発した MR グリースの特性について、特性の計測結果も示して説明する。

3.1 概要

MR (Magnetorheological : 磁気粘性) グリースを含む MR 流体は、いわゆる機能性流体の一つである。通常、これらは液相中に μm サイズの強磁性微粒子 (保持力の小さいソフト磁性材料が多い) を表面処理し、体積で 10~30% の高濃度に懸濁させた流体である。これに磁界を印加することで、流体中に均一に分散していた強磁性微粒子が磁界の方向に沿って連結し鎖状のクラスタを形成する。このクラスタが変形 (流れ) に対して抵抗するために見かけの粘度は劇的に高まり、流動時には降伏応力を有する塑性流体の挙動を示す。

磁界による粘性の変化は可逆的であり、磁界を除くことにより元の状態に戻る。また、磁界の強さを変更することにより粘度変化の程度を調節できる。さらに、この流体の状態変化は極めて高速で生じ、磁界の変化に対する応答性は数ミリ秒レベルである。

この MR 流体の磁界による粘度増加のように、粘性を含む諸特性を外部からの信号で変化させることができる作動流体が、機能性流体と呼ばれる。MR 流体以外にも ER (Electrorheological : 電気粘性) 流体などがあり、油圧を利用した機器への応用分野の拡大への期待を背景として、これまでも開発が進められてきた。

しかしながら、MR 流体については流体中に分散している強磁性微粒子が、ある一定時間の後に、溶媒と微粒子との比重の差によって沈殿してしまう欠点があり、一部は実用化に漕ぎ着けたが、まだ利用に関してハードルが高いのが現状である。

この欠陥を克服するために、我々は、磁性微粒子を溶媒としてグリースを用いた、新たな種類の制御可能な作動流体である MR グリースを開発した。

3.2 グリースについて

グリースは古くから機械装置等の潤滑剤として利用されているが、その成分、製造法、特性などについては、一般的にはあまり知られていない。構成成分としては基油、増ちょう剤、さらには各種の添加剤であり、増ちょう剤はグリース内部で3次元の網目構造をつくり、基油が増ちょう剤に取り込まれて保持されることにより、半固体状の性状を有し、また付着性などの固有な特性が得られるとされている。増ちょう剤の網目構造を直接捉えた写真はないが、基油を除いた電子顕微鏡写真の一例を Fig.3-1 に、位相差顕微鏡写真を Fig.3-2 に示す。基油としては鉱油や合成油が用いられ、また増ちょう剤はリチウム石けん系、ウレア系、有機系、無機系などが開発されている。それぞれの組み合わせにより使用温度、防水性、機械的安定性などに特徴を持たせることができるとされている。

グリースの製造方法は、基油の中で増ちょう剤を合成し、分散させてグリース構造を構成する方法（けん化法、合成法）、および予めできている増ちょう剤を基油に分散させる方法（混合法）とがある。本研究で利用している MR グリースはけん化法により製造されており、増ちょう剤を基油の中で混合する訳ではない。

グリースは潤滑剤として利用されており、しかも付着性を有するために通常の粘度という概念が適用されていない。その代わりに「ちょう度」という柔らかさの指標が国際的に用いられている。これは形状や重さが指定された円錐状のおもりをグリース表面に差し込んで、5 秒間落下させたときの陥入した深さの mm の 10 倍をもって定義された値である。従って、柔らかいほどちょう度は大きいことになる。これをニュートン粘度と対応させることは難しく、グリースとしてはちょう度により柔らかさを表すが、今回の作動流体としての MR グリースは降伏応力をもって特性を表現することとした。

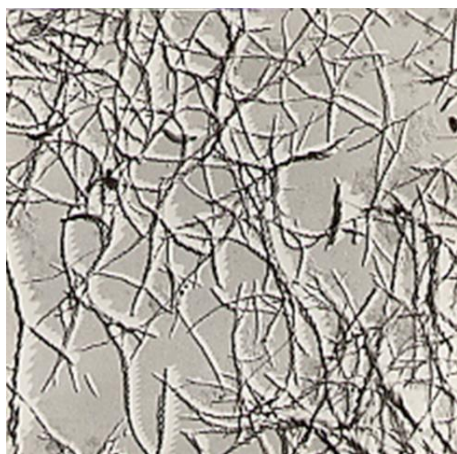


Fig.3-1 増ちょう剤の電子顕微鏡写真

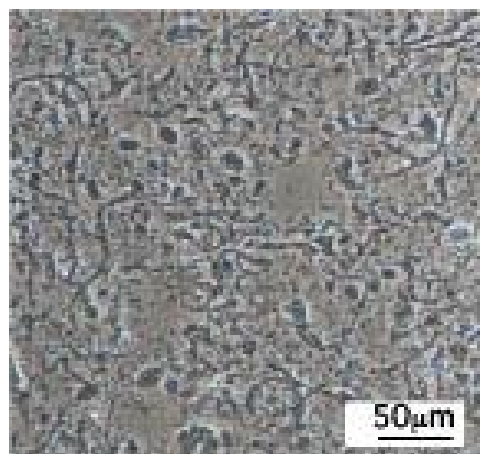


Fig.3-2 増ちょう剤の位相差顕微鏡写真

3.3 磁気粘性(MR)効果について

磁気粘性効果とは一般的に外部磁場の強度によって流体の粘性が変化する効果をいう。粘性を表す指標としては通常はニュートン粘度が利用されており、流体のせん断応力とせん断速度の比として定義されるが、磁気粘性効果はニュートン粘度が変化する訳ではない。磁気粘性効果を有する流体は固液 2 層流が一般的で、一様な流体中に磁性微粒子を分散させている。外部から磁場を加えることにより、Fig.3-3 に模式図として示すように、微粒子同士が凝集して鎖状のクラスタを形成し、このクラスタが流体の動きに対して抵抗を示すことで、見かけ上ではあるが流体としてのレオロジー特性が変化する。レオロジー特性の変化は、Fig.3-4 に示すように、降伏せん断応力の変化として現れる。ニュートン粘度も多少変化するが、その部分のメカニズムは不明である。降伏せん断応力の変化は、機械要素として応用した際に摩擦力の変化として取り出すことができる。

MR 流体は固液 2 層流であり、しかも固体と液体の密度が全く異なるために、分散微粒子は長期間の静置により沈殿することが知られている。製造時から時間があまり経たないうちは沈殿も柔らかく再分散が可能であるが、数年後には硬い沈殿となる場合が多い。これが MR 流体の最大の欠点とされている。

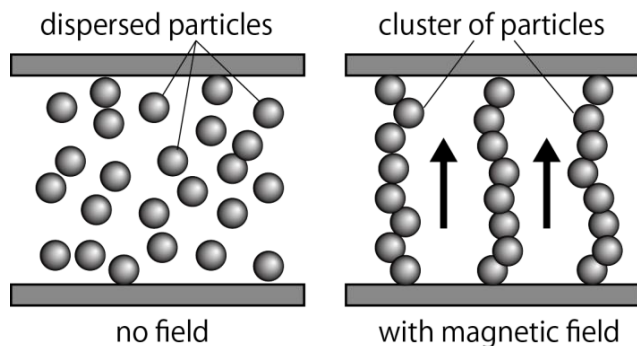


Fig. 3-3 磁界印可状態での磁性微粒子のクラスタ形成 (模式図)

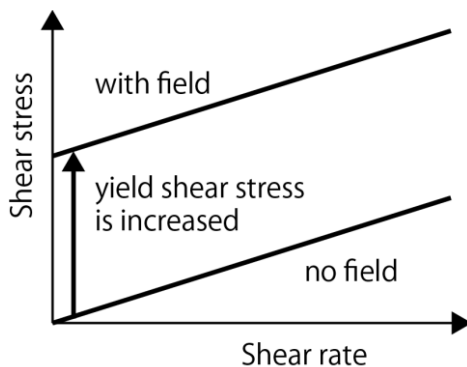


Fig.3-4 MR 流体の降伏せん断応力の変化 (磁界印可状態)

3.4 MR グリースについて

MR 流体における分散微粒子の沈殿を抑制するために、分散媒としてグリースに着目した。グリースは 3.2 節に述べたように内部に増ちょう剤の 3 次元網目構造を有している。増ちょう剤は透明であるために、基油とともに撮影された写真はほとんどなく、グリースの中での大きさもほとんど知られていない状況にある。しかし、これまでの経験から、ある程度は機械的な意味で剛性を有し、磁性微粒子の分散に寄与する可能性が高いと考えて、重量%で最大 85%になるまで分散させることを試みた。微粒子が分散されたグリース内部の映像をとることは極めて困難であるために、Fig.3-5 に模式図を示している。仮にこのモデルに示すような構造が成立した場合に懸念される点は、磁場を加えた時の応答性ということになる。この応答性は増ちょう剤の剛性に大きく影響を受けると推定される。

本研究でサンプルに用いた MR グリースは合成油を分散媒とし、ウレア系の増ちょう剤を用いたものである。磁性微粒子の含有量は重量%で 75%とした。

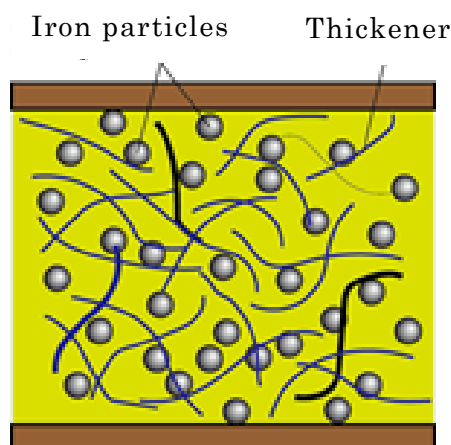


Fig.3-5 増ちょう剤による粒子保持状態（模式図）

3.5 試験結果

MR グリースについて、その磁気粘性（MR）特性と、分散安定性について、試験を行った。以下に、その内容を示す。

（1）磁気粘性（MR）特性

磁気粘性特性を計測するために、Fig.3-6 に示すような、回転粘度計を用いた。

この粘度計は、同心円筒構造で、上部・入力側容器、下部・出力側容器、本体（基礎）構造の 3 つの主要部分から成り立っている。環状溝が出力側・容器に設けられており、入力側・容器はこの溝に差し込まれている。2 つの容器間の隙間は 1.0mm で、MR グリースがこの隙間を満たしている。入力側・容器は速度可変モーターで回転し、MR グリースに与えるせん断速度を 0 から 232 s⁻¹ まで変えられる。また、MR グリースを通して出力側容器に伝達されたせん断力は、基盤に固定された荷重計によって計測される。

電磁コイルは出力側容器に設置されており、磁気回路は図中の赤矢印のように（試験体のせん断変形方向と垂直に交差するように）形成される。試験体を通る磁束密度は、0 から 5A まで変えられる。磁気計測機器（hall probe）は、磁束密度が計測できるように、磁気回路に沿って設置している。

また、試験体の温度を測るために内壁に熱電対を設置している。

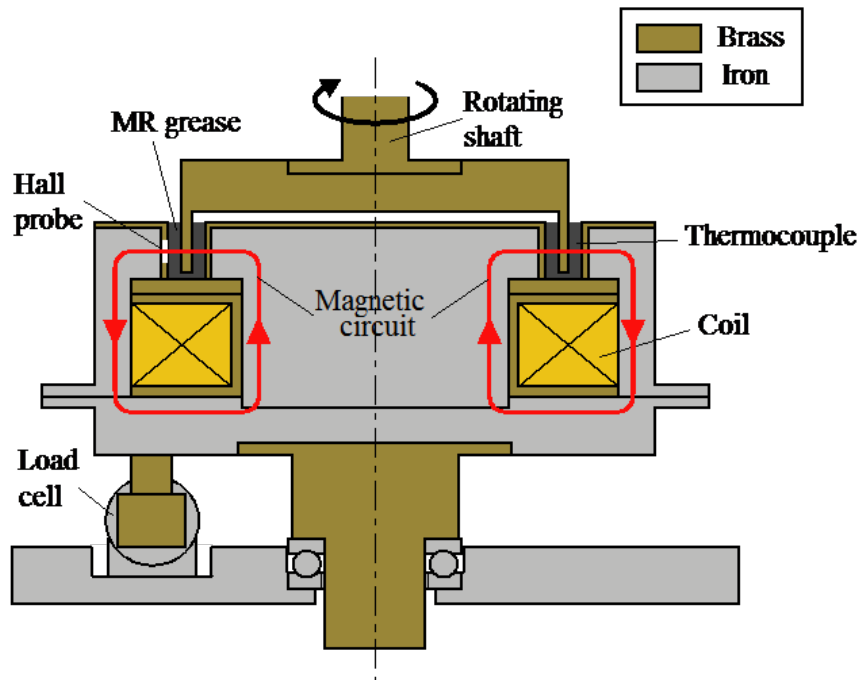


Fig. 3-6 回転粘度計の概要図

計測に用いた MR グリースの仕様を、Table 3-1 に示す。

Table 3-1 MR グリースの仕様

Base oil	Particles	Concentration of particles	Thickener	Concentration of thickener	Penetration
Mineral oil	Carbonyl iron	75 wt%	Lithium soap	1 wt%	320

計測結果を Fig.3-7 と Fig.3-8 に示す。計測は、それぞれの条件下で 3 回実施した。また、計測中の MR グリースの温度は約 25℃であった。

Fig.3-7 は、MR グリースに与えられる磁場の強さが変化した時の、降伏せん断応力とせん断速度との関係を示している。図に示すように、磁場を加えないときは降伏せん断応力も小さくニュートン流体のようにみえるが、磁場強度をあげるに従い、特性曲線の勾配は大きな変化をみせず、降伏せん断応力だけが増加していることがわかる。この変化は可逆的である。このことから、MR グリースは、MR 流体で通常示されるような、ビンガム可塑性流体の特徴を持つことが示された。

また、得られた降伏せん断応力はこの試験の範囲で最大数十 kPa あり、最大降伏せん断応力は市販品の MR 流体とほぼ等しい、およそ 20kPa であった。

Fig.3-8 は、磁場強度（磁束密度）と様々なせん断速度の下で生じる降伏せん断応力との関係を示している。横軸がせん断速度、縦軸が降伏せん断応力である。図からは、降伏せん断応力が磁場強度の増加によって増加していることがわかる。また、MR 効果は約 0.6T で飽和状態となった。

さらに、せん断速度によって降伏せん断応力が増加するにもかかわらず、せん断速度の影響は、磁場強度の影響よりも小さくなっている。この傾向は、MR 流体の場合と同様であった。

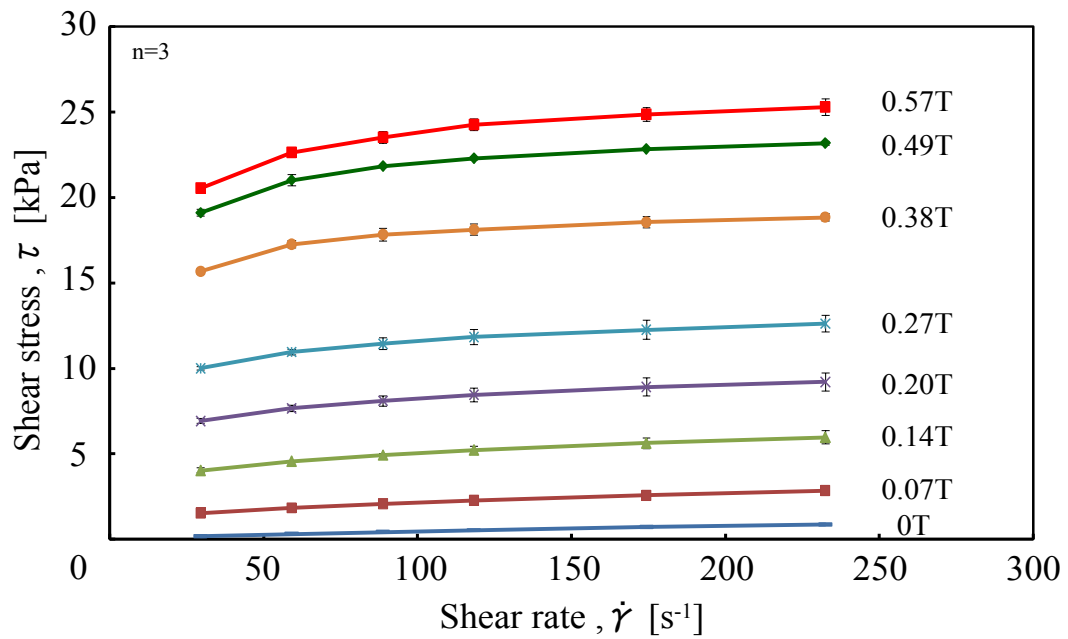


Fig.3-7 磁場の強さによるせん断応力の変化

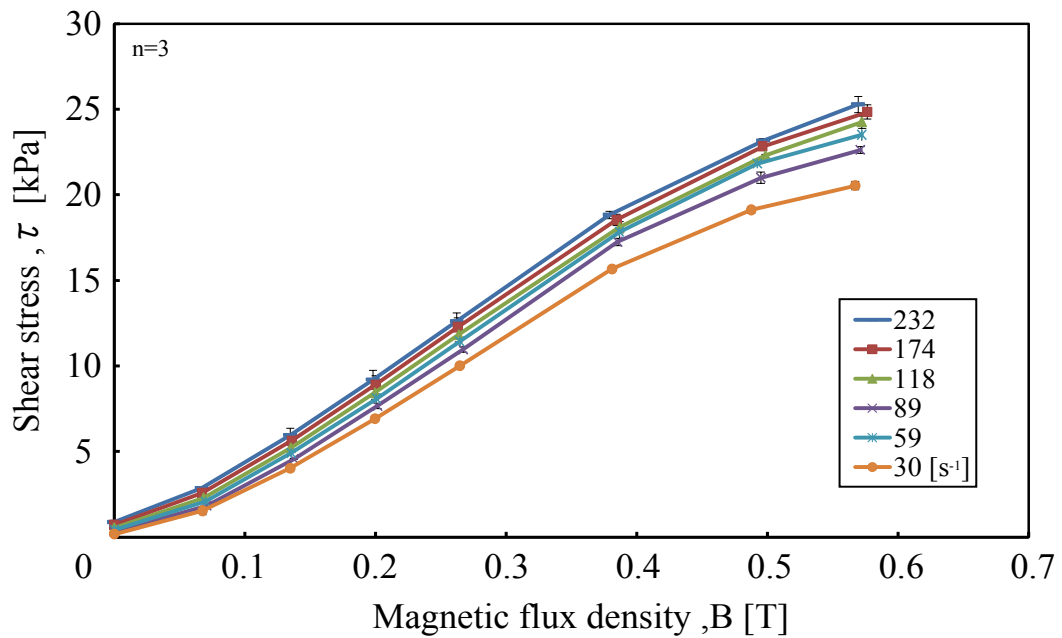


Fig.3-8 磁場強度（磁束密度）によるせん断応力の変化

(2) 分散安定性

グリース内部に分散された磁性微粒子の分散安定性に関する試験例は極めて少ない。分散安定性を確認する方法はいくつかあるが、最も簡単な方法は長期間静置して、分散媒と分散質の分離を測定することである。

この長期間静置の結果として、50日間静置した後のMRグリースとMR流体の写真をFig.3-9に示す。この方法は単純で、数日から数ヶ月単位ならば十分可能であるが、時間がかかるという欠点がある。写真からわかるように、50日経過後ではMR流体は2層に分離して上澄みが発生しているが、MRグリースでは殆ど上澄みは発生しない。このことから、従来のMR流体と比較して十分に分散安定性が増したといえる。

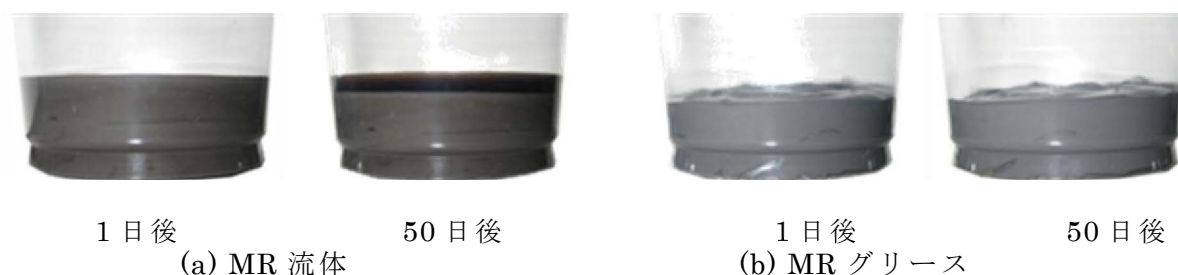


Fig.3-9 MR 流体と MR グリースの状態比較 (50日間静置後)

さらに短時間で分散安定性を評価する方法として、遠心分離することを試みた。MRグリースを市販の遠心分離器にかけて、一定回転数で一定時間遠心分離した後の分散媒と分散質の分離のようすを観察した。

その結果をFig.3-10に示す。図の横軸は加速度、縦軸は分散率となっている。この図から、170Gを60分間加えても上澄みは高々6%程度しか発生しないことがわかる。170Gはこの遠心分離器で1,000 rpmに相当するが、これを6時間継続すると15%程度の分離で飽和することも試験から分かった。

上記の結果をどのように判断するか、過去の研究成果を含めて検討した。分散微粒子が増ちょう剤の持つ付着力で保持されていると仮定すれば、グリースの特徴である付着性と本試験結果は密接な関係があることになる。過去にグリースの付着性に関する研究例は少ないが、そのひとつとして星野による研究が知られている。その研究では、円柱の周囲に各種のグリースを0.5gほど、できるだけ均一に塗布し、円柱を5分間一定回転数で回転させて遠心力によりグリースをとばし、

その後、秤量により残ったグリースの量 (mg/cm^2) を測定している。その結果によると、ほぼ同等のちょう度を有するグリースにおいて、100~400G 程度の加速度でグリースの残存量が急激に減少しており、定性的には本研究で実施した結果と一致している。ただし、星野による試験はグリースと円筒側面との付着性を代表した結果を示す一方で、本試験の結果は増ちょう剤と磁性微粒子との接着能を測定しているという相違がある。

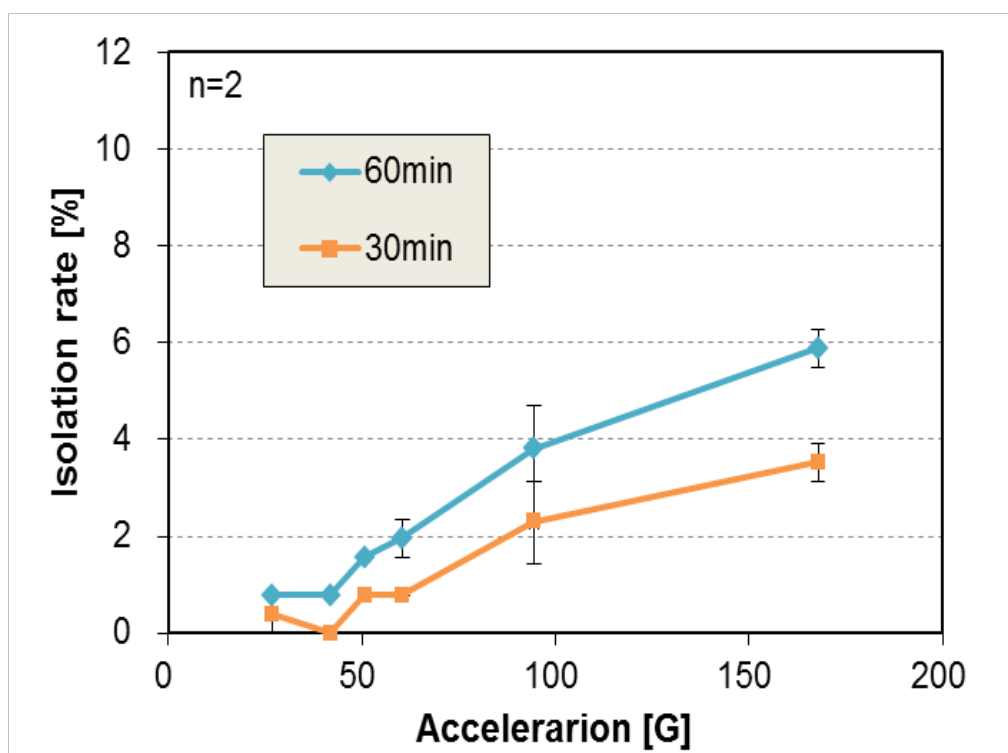


Fig. 3-10 分散粒子の分離比

3.6 まとめ

試験、計測結果から、開発した MR グリースは当初の目的どおりの特性を有することがわかった。

すなわち

- ・磁気粘性（MR）特性は、MR 流体と同等。
- ・長期間にわたる分散安定性の保持（MR 流体と比較して十分な分散安定性を保有）。

といった特性を持つことが示された。

このことから、MR グリースは MR 流体の機能を維持しつつ、その欠陥を克服した作動流体であることがわかった。

4. MR グリースダンパ

MR グリースを作動流体としたダンパモデルを試作し、特性を把握するための試験を行った。

4.1 ダンパ構造

磁気粘性（MR）効果を有する作動流体である MR 流体の応用分野としては、可変減衰ダンパ、車両用エンジンマウント、クラッチなどが考えられているが、最も汎用性の高い分野は可変減衰ダンパであると考えられる。

開発した MR グリースについても、可変減衰ダンパへの適用を検討した。可変減衰ダンパについて様々な形式が考えられるが、基本的な構造としては単純な構造で広範に用いられている円筒型ダンパを選択した。

MR 流体を用いた円筒型の可変減衰ダンパとしては、ピストンに電磁石を組み込んでピストンの駆動抵抗を可変にする形式と、シリンダに取り付けたバイパスに作動流体を導き、その中間部に電磁石を取り付けてピストンの抵抗を加減する形式とがある。それぞれ一長一短があるが、本研究では前者のピストンに電磁石を組み込む形式を採用した。

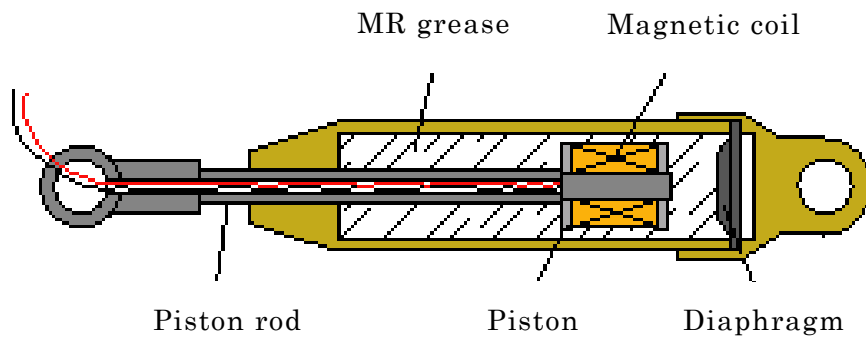
まずダンパモデル A として、容量 6N の比較的小型のダンパを作成した。その模式図を Fig.4-1 に、仕様を Table 4-1 に示す。

具体的には、電磁コイルをピストン内に設置し、その電線はロッドの軸を通して取り出され電源に接続される。この電線に電気を流すことにより、磁界がピストン外面とシリンダ内面との間を横切るように形成される。磁界の強さは、電流の調節によって変えられ、それにより減衰特性が制御される。

この形式の利点は構造が単純であることだが、ピストン部に組み込んだ電磁石のメンテナンス性は悪い。また、MR グリースとピストン外面、シリンダ内面のそれぞれとの摩耗について懸念があった。しかし、MR グリースについて耐摩耗性を四球式摩耗試験機により確認したところ、通常範囲では摩耗の発生は見られなかったことから、この懸念はないと判断した。

Table 4-1 MR グリースダンパモデル A の仕様

Stroke	24 mm
Inner diameter of cylinder	10 mm
Outer diameter of piston	8.2 mm
Piston length	10 mm
Diameter of piston rod	3 mm
The number of windings of coil	72 turns



(a) MR グリースダンパの概要



(b) 試作した MR グリースダンパ モデル A

Fig.4-1 円筒型 MR グリースダンパ (可変減衰ダンパ)

次に、容量 600N のダンパモデル B を試作した。構造は、ダンパモデル A と同じ円筒型でピストンに電磁石を組み込んだ構造である。

このダンパモデル B の仕様を Table 4-2 に示している。ダンパモデル A の倍程度の大きさ（寸法）となっている。

Table 4-2 MR グリースダンパモデル B の仕様

Stroke	50 mm
Inner diameter of cylinder	26 mm
Outer diameter of piston	24 mm
Piston length	20 mm
Diameter of piston rod	8 mm
The number of windings of coil	222 turns

4.2 ダンパ特性

次に、この試作した MR グリースダンパを油圧アクチュエータに接続、正弦波で往復運動させて、ダンパ特性である履歴を計測した。計測は、減衰力（ロッド部の力）とピストン変位（ストローク）である。

油圧アクチュエータの駆動振動数を 0.05~4.0Hz、コイルへの電流は 0~4A で変化させた。また、磁束密度については、本ダンパが小型であることからセンサー設置のための空間が確保できず、計測ができなかった。

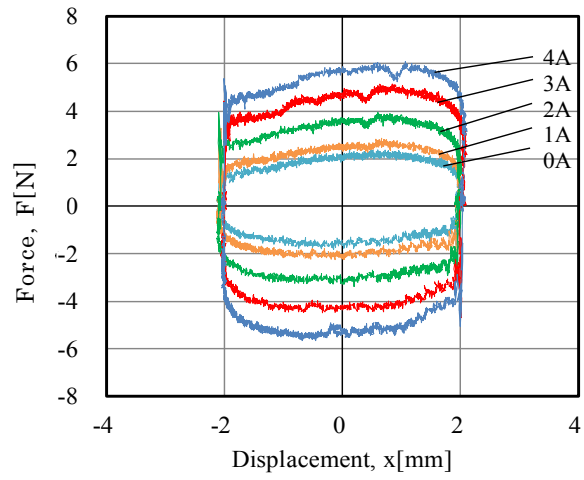
Fig.4-2 に、小型のダンパモデル A について、2mm の一定振幅で振動数を変えた時の、ピストン変位（横軸）と減衰力（縦軸）との履歴曲線を示す。図には、0~4A まで電流値を変えた履歴曲線を重ねてプロットしている。

これらの結果から、減衰力は供給される電流の強さ、すなわち磁場の強さに応じて増加していることが分かる。具体的には、(b)の振動数:1Hz の場合において、供給電流 4A で減衰力は 4.2N であった。コイルへの電流が無い状態 (0A) で約 1.4N だから、減衰力は、およそ 3 倍まで変わっていることになる。

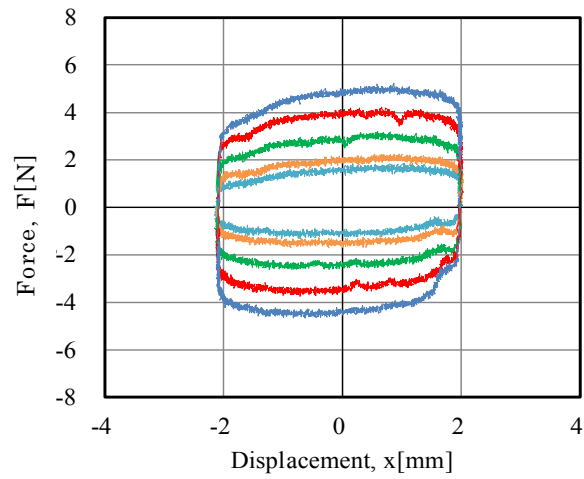
(a)~(c)の図を比較すると、駆動振動数の大きい方が減衰力も大きいことが分かる。

また、履歴曲線は矩形形状を示している。これは、MR グリースダンパにおいて、摩擦減衰が支配的であることを意味している。MR グリースダンパのこの特性は、磁場がない状態での履歴曲線の面積を除いて、MR 流体のそれと殆ど同じである。

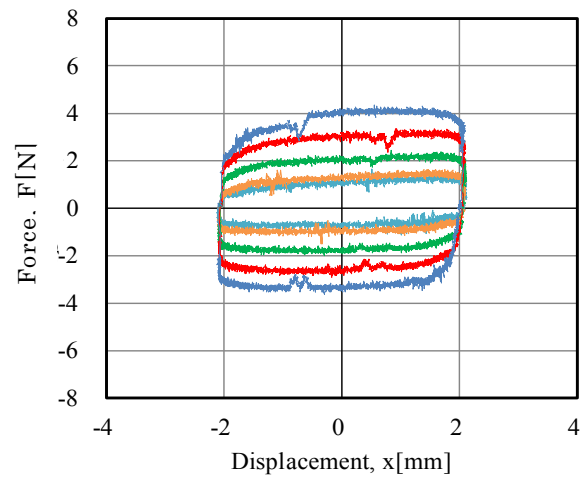
さらに、図から 0A での減衰力は、振動数（ピストンの駆動振動数）の増加によって大きくなっている。振幅は 2mm で一定であることから、言い換えるとピストン速度の増加によって、ダンパ内の MR グリースの粘性抵抗の作用がより大きくなったといえることができる。このことから、ダンパの適用範囲（減衰変更範囲）を増やすためには、磁場が印可されない時の減衰力、すなわちグリースの粘性抵抗の低減が求められると考える。簡易な対策として、ピストンとシリンダ間の隙間を広くすることが挙げられるが、これは同時に MR 効果自体を小さくすることにもなる。



(a) 振動数 : 3.0Hz



(b) 振動数 : 1.0Hz



(c) 振動数 : 0.1Hz

Fig.4-2 MR グリースダンパ モデル A の履歴特性 (振幅 : 2.0 mm)

次に Fig.4-3 に、ダンパモデル B について、10mm の一定振幅でダンパモデル A と同様に、振動数を変えた時のピストン変位（横軸）と減衰力（縦軸）との履歴曲線を示す。同じく、これらの図において、0～4A まで電流値を変えた履歴曲線を重ねて示している。

図から、ダンパモデル A と同様に、履歴曲線の形状も矩形形状で、減衰力は磁場の強さに応じて増加していることがわかる。(c)の振動数:1Hz の場合において、供給電流 4A で減衰力は約 500N、0A で約 50N 程度であるから、減衰力は 10 倍程度まで変わっている。

(a)～(c)の各図で、3～4 A 程度の電流範囲で電流の増加に伴う減衰力の増加が、0～1.5A 程度の低い電流より小さくなってきており、減衰効果が飽和に近づいていることが分かる。発生している磁場強度は測定できていないので明確ではないが、電磁石で磁気飽和が発生していることが考えられる。

また、最大 4A という大きな電流を流したが、この電流を流すことで熱の発生が避けられず、作動流体に与える熱の影響を小さくするために磁気回路の改良が必要である。

さらに駆動振動数をあげると、全体に少し丸みをおびた履歴曲線となり、粘性減衰の寄与が増加していることがわかる。試験範囲では発生する減衰力の大きさについて駆動振動数に対する差、言い換えるとピストン速度による差は見られない。

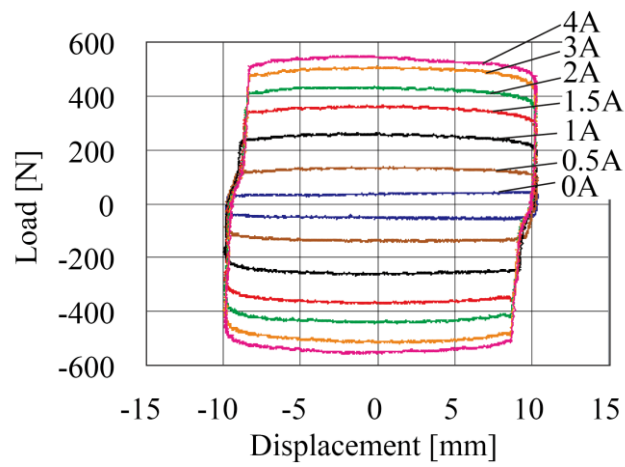
Fig.4-2 と 4-3、すなわちダンパモデル A とダンパモデル B との結果を比較してみると、まず履歴曲線の矩形形状が、ダンパモデル B の方が明瞭な矩形（長方形）となっている。このことから、ダンパモデル A でダンパの適用範囲（減衰変更範囲）を増やすための課題とされた、グリースの粘性抵抗が低減されているとすることができる。

ただし、ピストン外面とシリンダ内面間の隙間については、ダンパモデル A : 0.9mm、ダンパモデル B : 1mm と殆ど変わらない。ダンパモデル B が、ダンパモデル A に対して寸法が約 2 倍であることから、グリースの粘性抵抗力に比べてダンパの容量（減衰力）が大きく、この粘性抵抗力の影響が小さくなったということが考えられる。

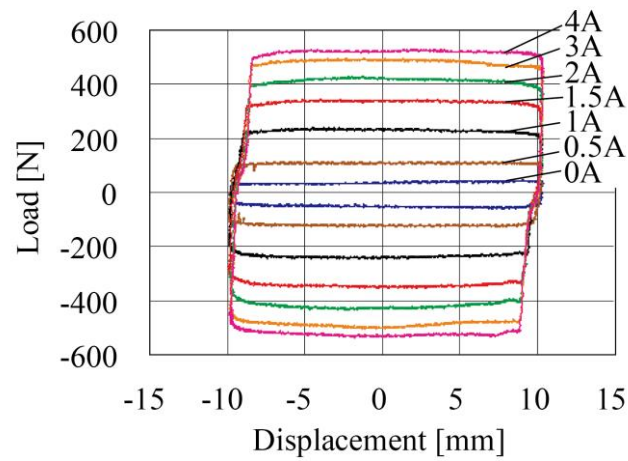
このことは、ダンパモデル B では、減衰力は駆動振動数によらず概ね一定となったことから推測できる。

以上から、円筒型 **MR** グリースダンパ（可変減衰ダンパ）の特性としては、以下のような内容が挙げられる。

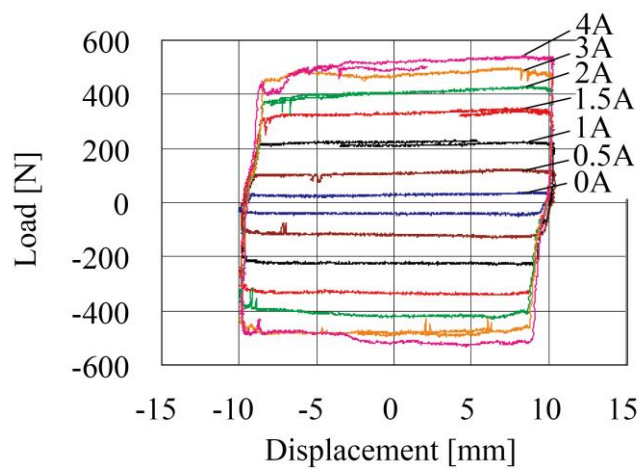
- ・減衰力は、磁場の強さに応じて増加する。
- ・履歴曲線（変位－力）は、矩形形状である。
- ・比較的大きな容量（数百 N 以上）では、振動数によらず電流の強さ、すなわち磁場の強さで減衰力が決まる。



(a) 振動数 : 1.0Hz



(b) 振動数 : 0.5Hz



(c) 振動数 : 0.05Hz

Fig.4-3 MR グリースダンパ モデル B の履歴特性 (振幅 : 10.0 mm)

4.3 モデル試験

MR グリースダンパの効果を検証するために、前節で試作した小型のダンパモデル A を用いたセミアクティブ振動制御システムを 3 層（3 階建て）の構造モデルに設置して、試験を実施した。

(1) セミアクティブ振動制御アルゴリズム

セミアクティブ制御として、簡単なスカイフック制御則を用いた。ダンパでコイルに電流が供給されない時（off 状態）は、グリース粘性抵抗力によって発生する最小減衰力、コイルに電流が供給される時（on 状態）では、一定の電流がコイルに供給され、その磁場によってダンパに大きな減衰力が発生する。

on、off の規則性は以下の様に定めた。

$$I = \begin{cases} I_0 & (\text{on}) & \text{if } \dot{x}(\dot{x} - \dot{x}_0) > 0 \\ 0 & (\text{off}) & \text{if } \dot{x}(\dot{x} - \dot{x}_0) \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 \dot{x} 、 \dot{x}_0 は、それぞれ構造モデルの最上層床の絶対速度と地盤部分の絶対速度である。

(2) 加振試験

Fig.4-4 に試験装置の概要図を示す。

構造モデルは、各層の床を模する 3 枚の鉄板と、これらを連結・支持する柱となる高さ方向の 2 枚の鉄板（板バネ）から成っている。1 層目に、V 字形状の斜材があり、ダンパモデルは、斜材の頂部と 2 層目床の間に設置した。各層は 1.5kg で、この構造モデルの全重量は 7.5kg であった。

構造モデルを設置したベースプレートは線形軸受で支持され、加振試験は加振器（電動アクチュエータ）によってベースプレートが加振されることで実施される。

計測は、最上層と基盤の変位をレーザー変位計で計測、さらに速度を、計測変位を微分することで求めた。

この試験では、コイルへの電流は 4A とした。

加振試験は、正弦波加振試験と正弦波掃引（スイープ）加振試験を実施した。

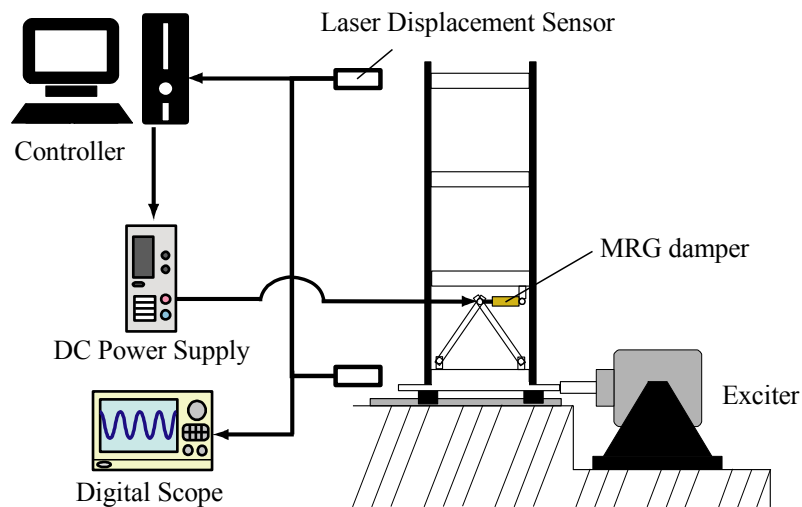


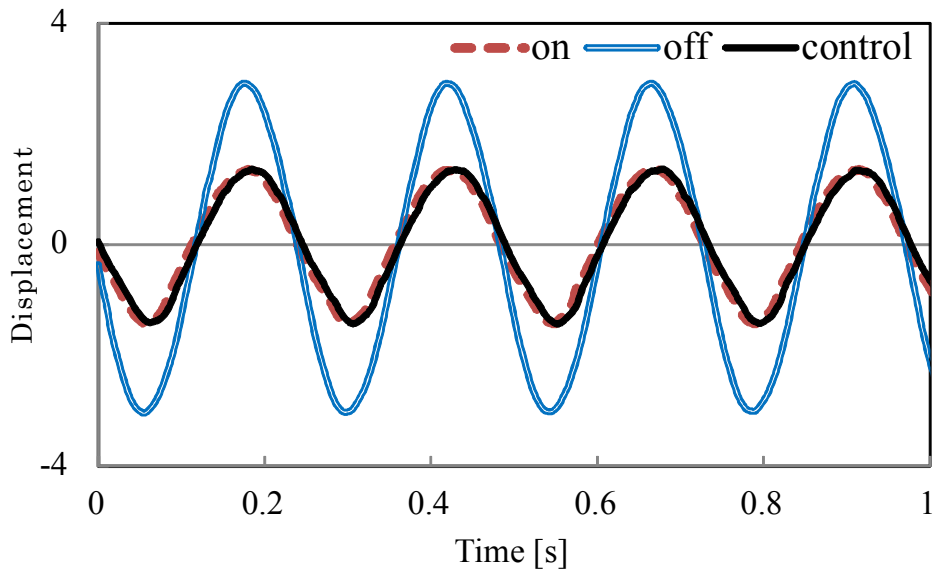
Fig.4-4 加振試験の概要図

(3) 正弦波加振試験の結果

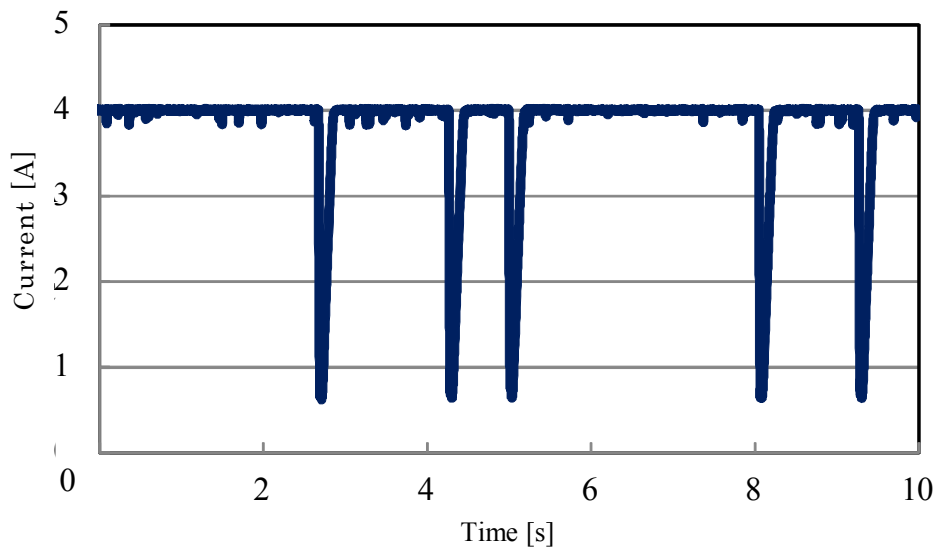
定常振幅、定常振動数の正弦波で試験体が加振された時の結果として、最上層の変位と、ダンパへの供給電力の時刻歴波形を Fig.4-5、4-6 に示す。Fig.4-5 は、振幅 0.3mm、本試験体の 1 次固有振動数である振動数 4.1Hz における加振試験結果、Fig.4-6 は、振幅 0.3mm、振動数 5.0Hz での加振試験結果である。これらの図には、0A (off) と 4A (on) の一定電流での結果を重ねてある。

これらの図から、off 状態での変位応答が on 状態のそれより大きく、ダンパによる減衰効果があることが分かる。共振振動数である 4.1Hz (Fig.4-5) の方が、この効果が明瞭である。

制御あり状態 (control) において、電流については振動数 4.1Hz では殆ど on 状態、振動数 5.0Hz では頻繁に on、off 状態が切り替わった。これは駆動振動数 4.1Hz が共振振動数であることから、応答が大きく最上層床と地盤の速度差も大きいと考えられる。

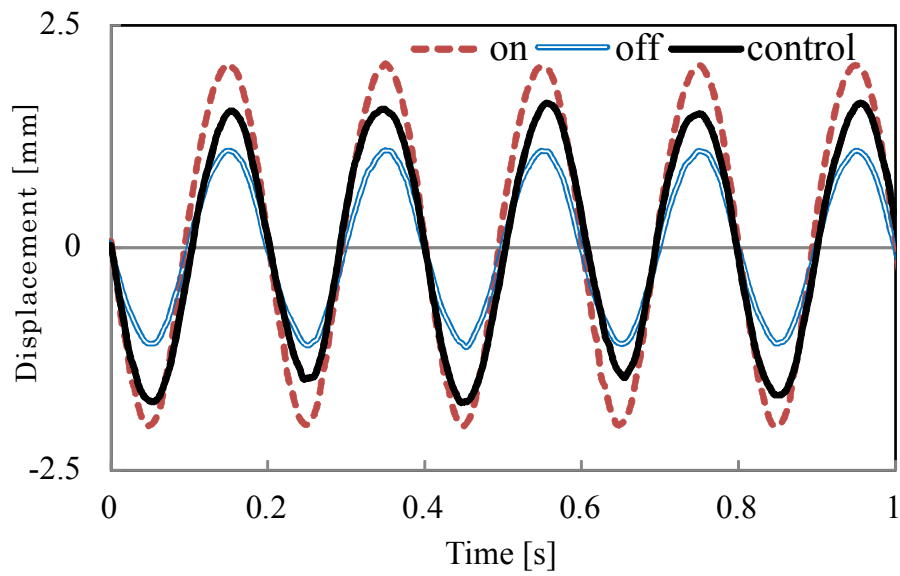


(a) 最上層変位

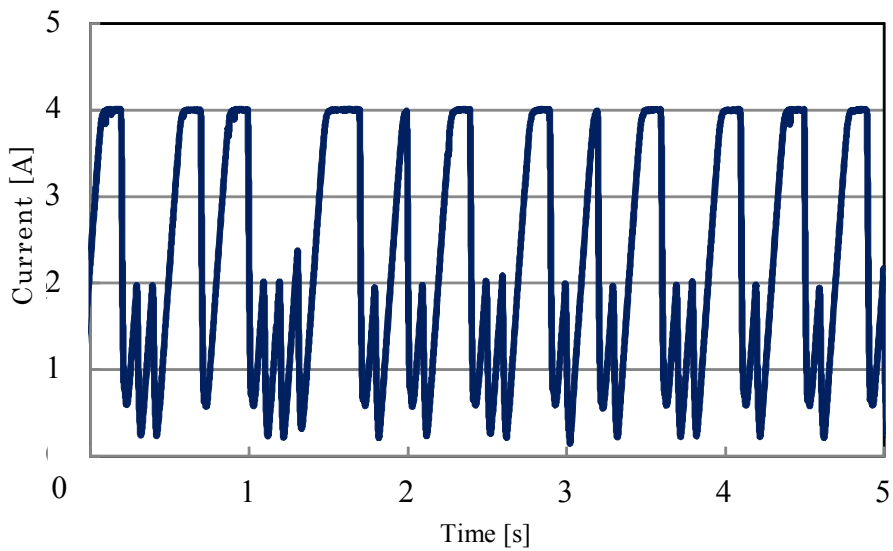


(b) ダンパの電流値

Fig.4-5 時刻歴応答波形（振動数：4.1Hz）



(a) 最上層変位



(b) ダンパの電流値

Fig.4-6 時刻歴応答波形 (振動数 : 5.0Hz)

(4) 正弦波掃引（スイープ）加振試験の結果

振動数範囲：2～20Hz、掃引速度：0.15Hz/s、振幅：0.3mm（定常振幅）で、正弦波掃引試験を実施した。この結果として、最上層の応答変位を Fig.4-7 に示す。図の横軸は振動数、縦軸は変位である。

図から、低い振動数範囲では、制御ありの応答は on 状態に近く、1 次の共振振動数（4.1Hz）では off 状態に比べて小さいことが分かる。しかし、2 次の共振振動数（約 12Hz）以上の比較的高い振動数範囲では、制御ありの応答は off 状態に近く、3 次の共振振動数（約 18Hz）では、off 状態よりも大きな応答になっている。これは、計測点（レーザー変位計の設置場所）が、最上層と基盤の 2 ヶ所だけであるため、最上層部分で顕著な変形（変位）を示す 1 次の振動モードについては計測、制御側の対応が十分であるが、2 次以降の振動モードの計測、制御側の対応には不十分であるためと考えられる。

以上から、高い次数まで対応できるような振動制御を行うには、計測点の増加、位置検討等を含め振動制御システムの見直し、対応させる必要があると考えられる。

また、MR 効果が働いている on 状態、control 状態の応答曲線については共振振動数のピークが、off 状態（MR 効果の無い状態）に比べて高振動数側に傾いたハードバネ特性を示しており、MR 効果により「剛な非線形バネ特性」が現れているということが出来る。

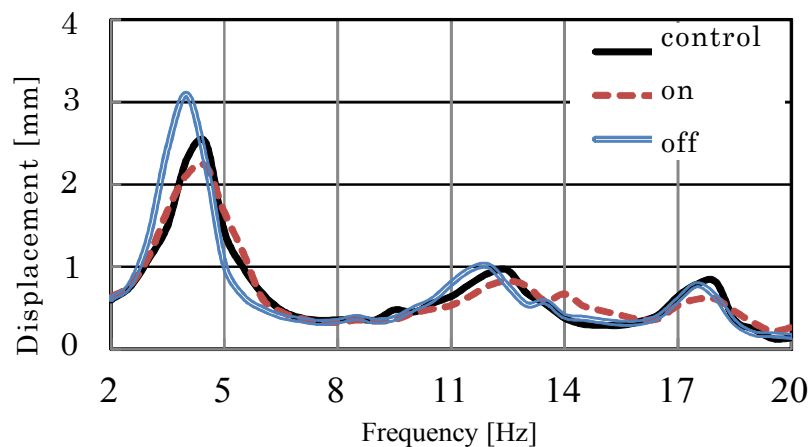


Fig.4-7 正弦波掃引試験の結果

(5) モデル試験のまとめ

試作したダンパモデル A を用いたセミアクティブ振動制御システム試験結果から、MR グリースダンパは、構造物の振動応答を低減して、振動制御の効果があることが分かった。特に、構造物の 1 次固有振動数付近のような応答の比較的大きい場合には、効果も大きい。

しかし、応答が小さい 2 次以降の振動数域では振動制御の機能としては不十分で、あまり効果が見られなかった。これは、今回の実験に用いた振動制御システムが、2 次以降の固有振動数（振動モード）には対応できていないことによる。実際の構造物への適用を考える場合は、制御対象とする振動モード、固有振動数を把握し、それらに対応できるシステムを構築する必要があると考える。

4.4 まとめ

MR グリースを作動流体とした可変減衰ダンパとして円筒型を選択、仕様の異なる2つのダンパモデルを試作し、それを用いて加振試験を行いダンパの特性の把握を行い、以下のような結果が得られた。

・円筒型 MR グリース可変減衰ダンパの特性としては、以下のような内容が挙げられる。

①減衰力は、磁場の強さに応じて増加する。

②履歴曲線（変位－力）は、矩形形状である。

③比較的大きな容量（数百 N 以上）では、振動数によらず電流の強さ、すなわちダンパのピストンの速度によらず、磁場の強さで減衰力が決まる。

・試作したダンパモデルの内、小型のダンパモデル A を用いたセミアクティブ振動制御システムを、3層から成る構造モデルに設置して試験結果を行い、以下のような結果が得られた。

①MR グリースダンパは、構造物の振動応答を低減して、振動制御の効果があることが分かった。

②振動制御の効果は、構造物の1次固有振動数付近のような応答の比較的大きい場合には、特に効果も大きい。

③しかし、応答が比較的低い振動数域では振動制御の機能としては不十分で、あまり効果が見られなかった。これは、制御則（アルゴリズム）の検討が不十分で、構造物の応答やダンパの特性に対して、適した制御則となっていないためと考えられる。改良することで、より広い振動数域で効果が得られると考える。

5. 数値解析による実構造物への適用検討

MR グリースダンパの実機への適用として、耐震デバイスとして用いることを考え、その効果（地震応答の低減）の確認、および検討を FEM 解析により行った。

検討例としては、実在の工場の材料運搬用コンベアの機械棟を用いた。

解析には以下の汎用有限要素法（FEM）コードを使用した。

解析コード : ABAQUS Ver6.8-2

5. 1 解析モデル

検討例として用いた機械棟は、3階建てで鉄骨骨組み構造である。寸法と重さは、以下のとおりである。

縦 : 6.0 m

横 : 14.5 m

高さ : 19.5 m (3階建て、2F : 7.1 m、3F : 14.6 m)

重さ : 約 100 t

この機械棟は、中央に車両の出入り口（開口部）やコンベヤ貫通部があり、壁面に沿って機械、分電盤が設置されているため、補強のためのブレース等の設置に大きな制約があることが特徴である。現状である基本状態としては、通常タイプのブレース（以下、通常ブレース）が設置された状態であるが、そのブレースの配置もこの制約の影響が大きい。

解析による評価を行うに当たって、比較のために現状に加えて鉄骨骨組みのみ（以下、ブレースなし）の状態についても解析、評価を行う。

また、同様に比較のために、既に製品化され、地震対策として広汎に適用、施工されている座屈拘束ブレースを設置した状態についても解析、評価を行った。用いる座屈拘束ブレースとしては、新日鉄エンジニアリング株式会社のアンボンドブレース（以下、UBブレース）を想定した。

以上の解析モデルの種類をまとめると以下の4ケースになる。

- ・通常ブレース : 現状、通常タイプのブレースを設置（基本状態）
- ・ブレースなし : 鉄骨骨組みのみ
- ・MR グリースダンパ : 通常タイプのブレースに代えて MR グリースダンパを設置
- ・UB ブレース : 通常タイプのブレースに代えて UB ブレースを設置。
耐震補強ケースとして、効果を MR グリースダンパのケースと比較。

(1) モデル化方法

各部は以下のようにモデル化した。

◆基本要素

- ・鉄骨（柱・梁）
要素：ビーム要素、 材料特性：バイリニア特性
- ・通常ブレース
要素：トラス要素、 材料特性：バイリニア特性

・構造部材+機器

各層の4隅部の節点に、集中マスとして、以下のようにモデル化した。

ただし機器の配置等を考慮して、同じ層でも多少の大小はある。

- 1層（2階の床）：9t／節点
- 2層（3階の床、低い側の屋根）：11t／節点
- 3層（3階側（高い側）の屋根）：4t／節点
- 上記の他に1層と2層の間（2階）の柱に1ヶ所（1節点）だけ、5tの集中マスを設置

◆材料特性

・鉄骨、および通常ブレース等は鋼製で、材料特性として以下の数値を用いた。

ヤング率：205.9 GPa ポアソン比：0.3

降伏応力：258.3 MPa

・バイリニア特性（弾塑性）の設定

鉄骨、通常ブレースの弾塑性特性は、バイリニアの非線形材料として設定し、一般的に用いられる第二勾配／第一勾配＝1/100を採用した（Fig.5-1）。

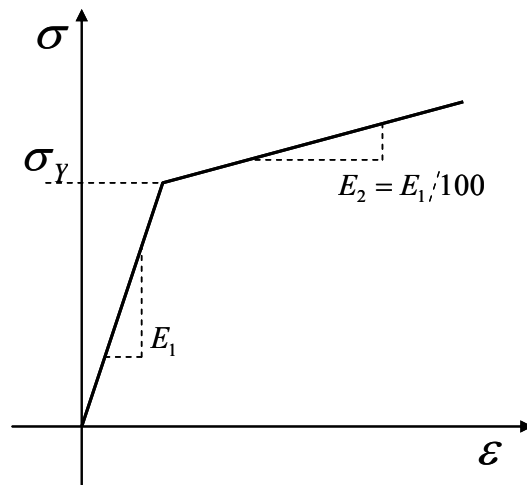


Fig.5-1 バイリニア材料特性

◆減衰

減衰の設定については種々提案されているが、今回の検討対象のような鉄骨構造の建屋に対し、レベル2相当の入力地震波（応答が降伏点またはそれ以上となることを考慮すべき地震動）を与える場合は、2%～5%程度が適当であるとされている。したがって、今回の検討では安全側の設定として2%を採用した。

なお、解析モデルでは初期剛性比例型減衰で設定している。解析中の剛性変化には追随していない。

◆UB ブレースのモデル化

比較解析に用いる弾塑性ブレースは、先に記したように

・アンボンドブレース（製作・販売：新日鉄エンジニアリング(株)）

とした。選択した理由としては、カタログ品として汎用に広く普及しているためである。

このアンボンドブレースの中で最も降伏軸力の低い

製品記号：UB225-050（降伏軸力：500 kN）

を適用対象としている。

解析モデルとして入力する数値としては

断面積：2200 mm²

降伏応力：227MPa（=500 kN／2200 mm²）

である。モデル化に当たっては、通常ブレースと同じく、トラス要素を用い、バイリニアの材料特性で設定した。なお、1次勾配には一般の鋼材のヤング率を用い、2次勾配は1次勾配の1/100とした。

適用箇所によってブレース長さが異なるが、必要な長さに調整が可能であるとの回答を新日鉄エンジニアリング(株)殿より頂いている。

解析に用いたモデルでは、現状での通常タイプの全てのブレースを、この UB ブレースに置き換えたモデルとなっている。

(2) MR グリースダンパのモデル化

ここで使用する MR グリースダンパは、前章で試作、評価を行った円筒型とした。その仕様は、以下のように設定した。

容量については、

- ・通常ブレースモデルでの解析結果で、ブレースに発生する力が最大で降伏力を 50kN 程度上回ること、
- ・比較とする UB ブレースモデルで設定する UB ブレースの降伏軸力が 500kN であること

から 100kN、500kN の 2 種を設定した。

ストロークについては、同じく通常ブレースモデルの解析結果で伸びが 13cm 程度であることから、15cm と設定した。

これらの仕様を Table 5-1 にまとめて示す。この仕様のダンパ実機を製作することは、十分に可能であることも付記しておく。

Table 5-1 モデル化する MR グリースダンパの仕様

Stroke	±150 mm
Capacity (Force)	100 kN、500kN
Diameter of piston rod	50 mm
Inner diameter of cylinder	200 mm

ダンパの配置方法としては、耐震補強のためのダンパ設置で広く使われている

- ・H 型鋼材を V 字型の組み、その頂点と鉄骨の接合部（交差部）との間に設置する形式

とした。ただし、メンテナンス等の際のアクセスが容易であることから、下に凸となるような逆 V 字型に鋼材を配し、ダンパは下側に設置する。この概念図を Fig.5-2 に示す。

次に、モデル化は、前章の結果から矩形形状の履歴特性となるようにする必要がある。これについては、材料の弾塑性特性を用いて設定した。具体的には、第 1 勾配、第 2 勾配の数値を調整した。

実際にモデル化を行った容量 100kN の MR グリースダンパモデルについて、振動数：1Hz、変位振幅：100mm の条件での試計算結果（履歴特性）を Fig.5-3 に

示す。図から、摩擦減衰を有する矩形の履歴曲線となっており、設定どおりのモデルと成っていることが分かる。

また、4.3 節で用いたセミアクティブ振動制御は適用せず、地震の比較的大きな横揺れの加速度によって、錘が台座から外れ落下することでスイッチが入る（電流が流れる）簡易な機械式スイッチ機構を想定した。

ここで、セミアクティブ振動制御を適用しなかったのは、以下のような理由による。

- ・水平、上下の各方向に振動モードがあり、それらのモード形状も単純ではなく、計測点が多数必要と考えられることなどからシステムの構成が複雑になると思われる。
- ・従って、4.3 節での試験の知見だけでは、実構造物への適用には十分ではない。
- ・また、今回の適用対象とした構造物は、粉塵や振動等の存在する環境下にあることから、電子的な機器はあまり設置すべきではない。

さらに、地震時のみ磁場を発生させる（MR 効果を発生させる）のは、上記のセミアクティブ振動制御の不適用理由でもある振動、あるいは衝撃が発生する環境下であるため、通常時はオイルダンパとして、それらのエネルギーを吸収する効果を見込むためもある。

以上より、数値解析は、これにより電流が流れている、すなわち磁場が発生している条件で行った。

さらに、このスイッチとしては「緊急地震速報（警報）」によって、ON となる機構も付加することが考えられる。

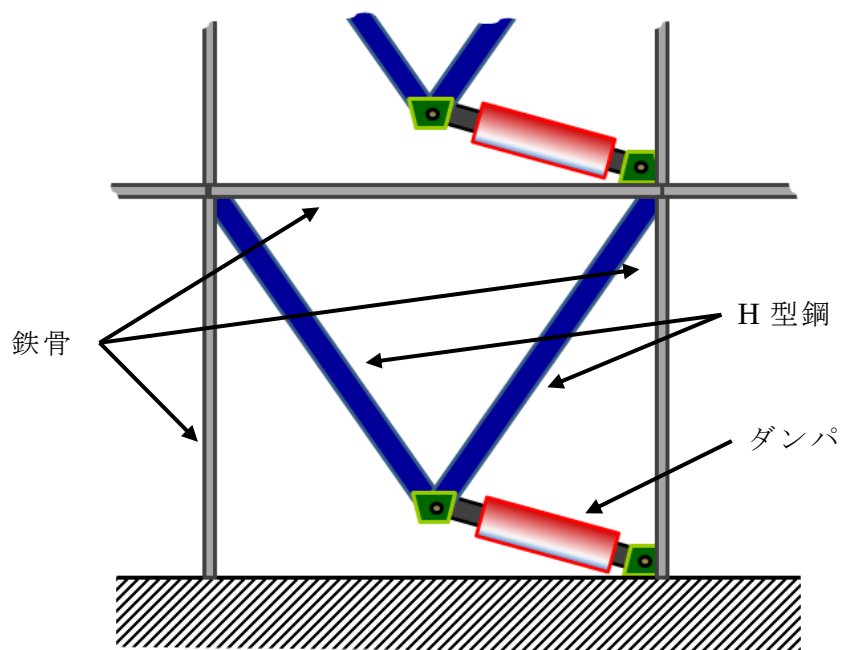


Fig.5-2 ダンパ設置方法

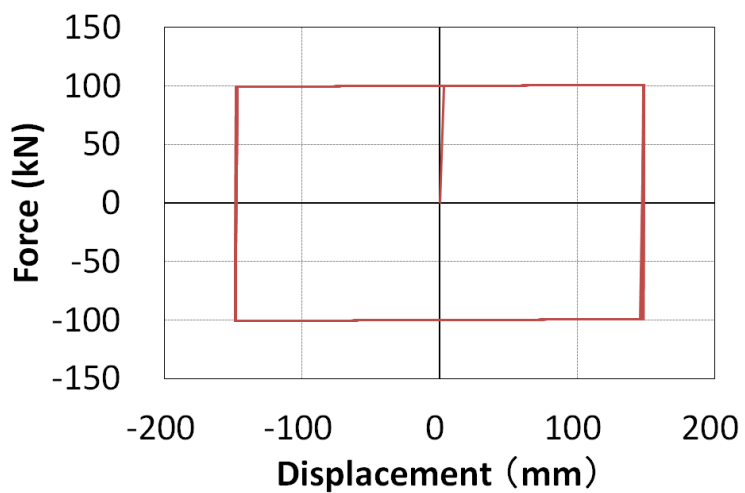


Fig.5-3 MR グリースダンパモデル (容量 : 100kN) の履歴特性

(3) 解析モデルケース

前述の4種類の解析モデルに加えて、2つの容量のMRグリースダンパを用いることから、Table 5-2に示す5ケースの解析モデルを用いた。

Table 5-2 解析モデルケース

	ケース名称 (モデル名称)	内 容
①	ブレースなし	鉄骨骨組みのみで、ブレース等の補強が全くないモデル
②	通常ブレース	現状（基本状態）のモデル
③	UBブレース	現状の通常ブレースをUBブレースに置き換えたモデル
④	100kN	容量100kNのMRグリースダンパを配したモデル
⑤	500kN	容量500kNのMRグリースダンパを配したモデル

また、解析モデルは、前述の寸法について縦をX方向、横をY方向としている。

すなわち

X方向（縦） : 6.0 m

Y方向（横） : 14.5 m

Z方向（高さ） : 19.5 m（3階建て、2F : 7.1 m、3F : 14.6 m）

となっている。

以下に各ケースの解析モデル図を示す。

① ブレースなし

Fig.5-4 にブレースなし（鉄骨骨組みのみ）の解析モデルを示す。
梁と柱のみで、節点数は 236、要素数は 274 である。

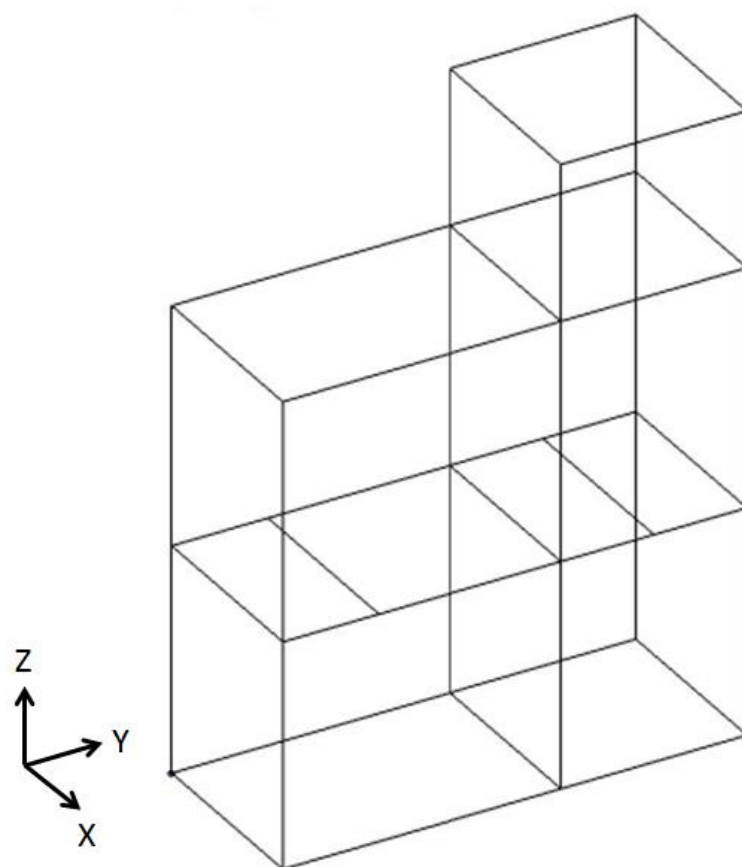


Fig.5-4 解析モデル：鉄骨骨組みのみ（ブレースなし）

② 通常ブレース

Fig.5-5 に通常ブレース（現状）の解析モデルを示す。

節点数は 236、要素数は 290 である。ブレースは 16 本が設置されている。

横側の面（Y-Z 面）にブレースが入っていない箇所（面）、あるいは交差していないのは、前述のように、壁面に沿って開口部や設備が置かれているためである。

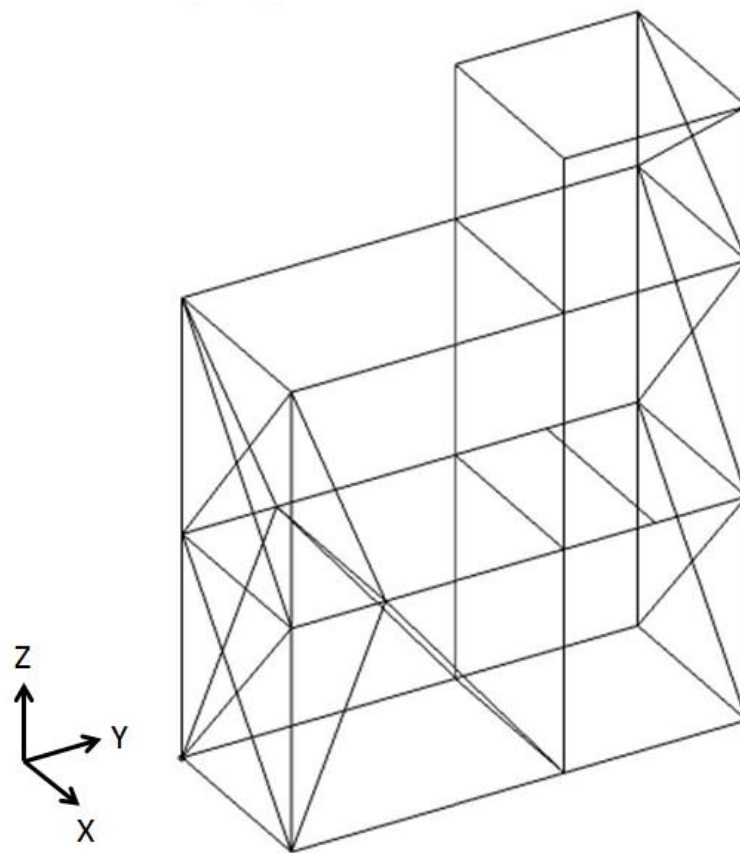


Fig.5-5 通常ブレース（現状、基本状態）

③ UB ブレース

Fig.5-6 に UB ブレースの解析モデルを示す。

節点数は 236、要素数は 290 である。

先に述べたように、UB ブレースモデルは、通常ブレースを全て UB ブレースに置き換えている。従って UB ブレース数や節点数、要素数は通常ブレースモデルと同じである。

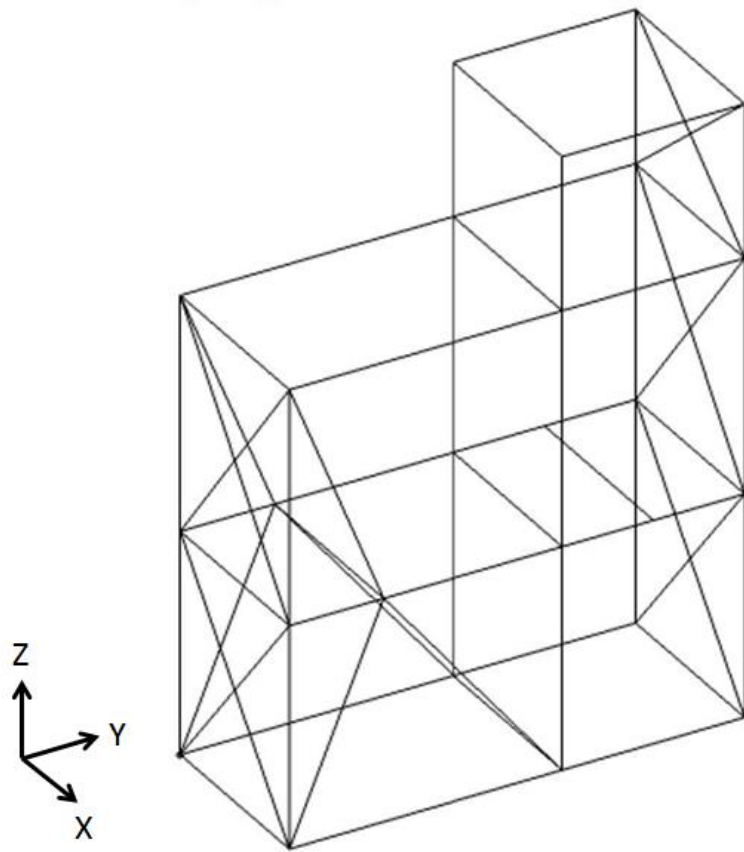


Fig.5-6 UB ブレース

④ 100kN (MR グリースダンパモデル)

⑤ 500kN (MR グリースダンパモデル)

Fig.5-7 に 100kN、500kN (MR グリースダンパモデル) の解析モデルを示す。2種の容量のモデルとも配置等は全く同じモデルで、ダンパの容量だけが変わっている。

節点数は 243、要素数は 297 である。

MR グリースダンパは縦側の面 (X-Z 面) の 5ヶ所、および横側の面 (Y-Z 面) で 1F の 2ヶ所の通常ブレースを置き換えるように設置している。なお、横側の面 (Y-Z 面) の 2F の 2ヶ所は、通常ブレースのままである。

また、MR グリースダンパの設置方法は、先に述べたように H 型鋼材を V 字型の組み、その頂点と鉄骨の接合部 (交差部) との間に設置する形式をとった。

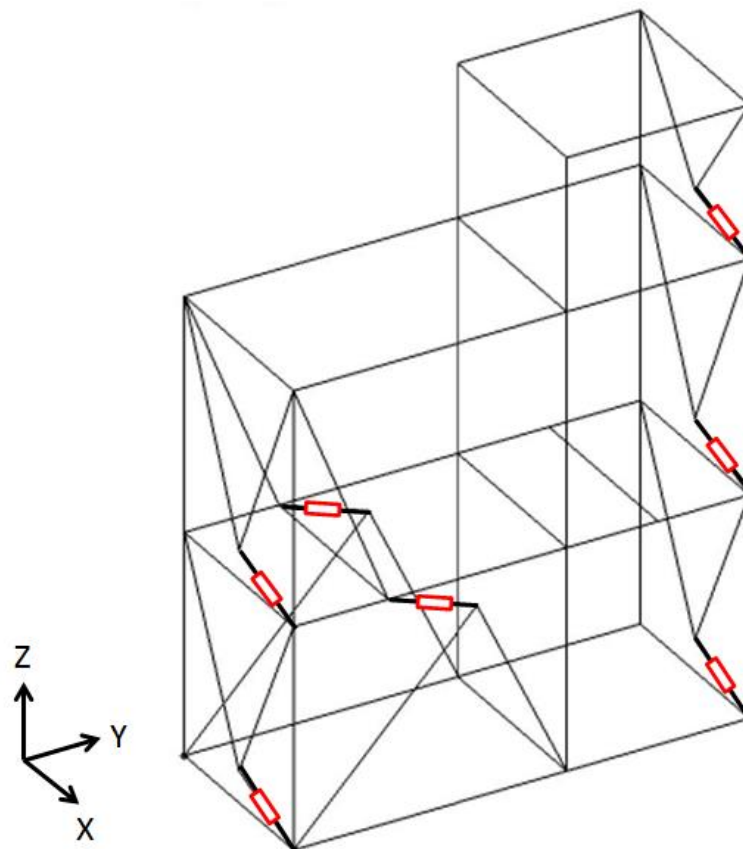


Fig.5-7 100kN、500kN (MR グリースダンパモデル)

5.2 入力地震波

解析には、近年に頻発している大地震の中で震災を伴ったものから、以下の3種の地震波を用いた。

入力方向はNS方向をX方向に、EW方向をY方向に、UD方向をZ方向にした。

(A) JMA 神戸波（兵庫県南部地震（1995年1月17日）・

観測点：JMA 神戸海洋気象台）

この兵庫県南部地震は、直下型（活断層型）地震であり、JMA 神戸波の波形も直下型地震の特性を顕著に示している。実験や解析において広汎に用いられている

<M（マグニチュード）7.3、観測点での震度：7（当初は6）>

(B) K-NET 塩竈波（東北地方太平洋沖地震（2011年3月11日）・

観測点：K-NET・塩竈（観測点コード：MYG012））

この東北地方太平洋沖地震は、典型的なプレート型（海溝型）地震である。この宮城県の塩竈市での観測波を選択したのは、比較的海に近い平地であり、今回の検討例の機械棟のような構造物も多いためである。

<M（マグニチュード）9、観測点での震度：6強>

(C) K-NET 熊本波（熊本地震（2016年4月16日）・観測点：K-NET・熊本

（観測点コード：KMM006））

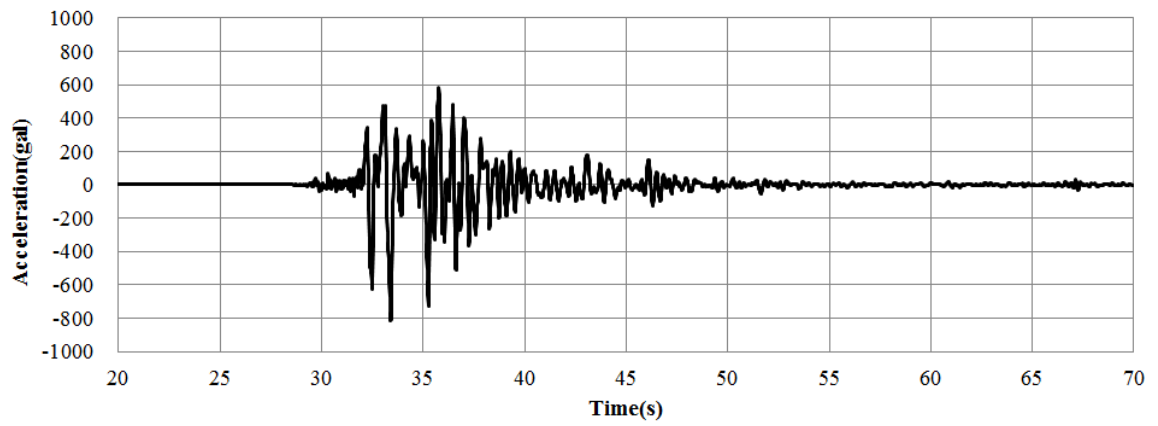
喫緊の地震であり、これまでの余震の回数が非常に多いこと等を含めて、これまでの地震とは異なる特徴を有する。

<M（マグニチュード）7.3、観測点での震度：6強>

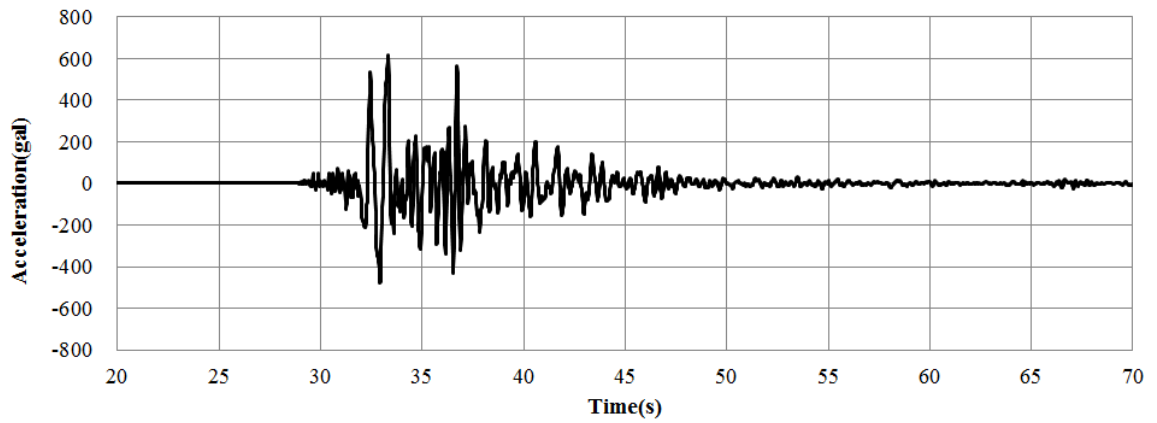
それぞれの地震の各方向の最大加速度値を Table 5-3 に、時刻歴波形を Fig.5-8～5-10 に示す。各図とも横軸は時間、縦軸が加速度である。

Table 5-3 各地震波の最大加速度値

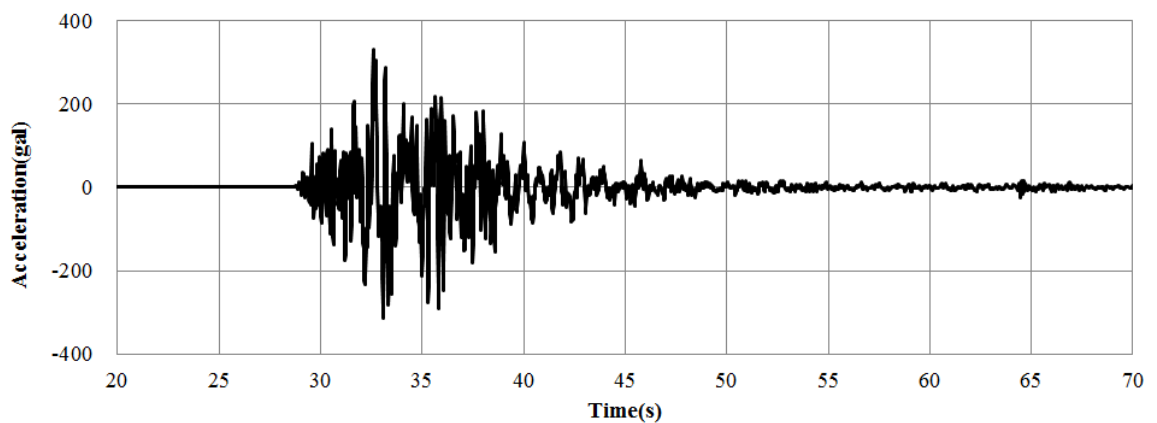
地震波	最大加速度（gal）		
	NS 方向	EW 方向	UD 方向
JMA 神戸波	818	617	332
K-NET 塩竈波	761	1970	501
K-NET 熊本波	828	617	534



(a) NS 方向 (X 方向入力)

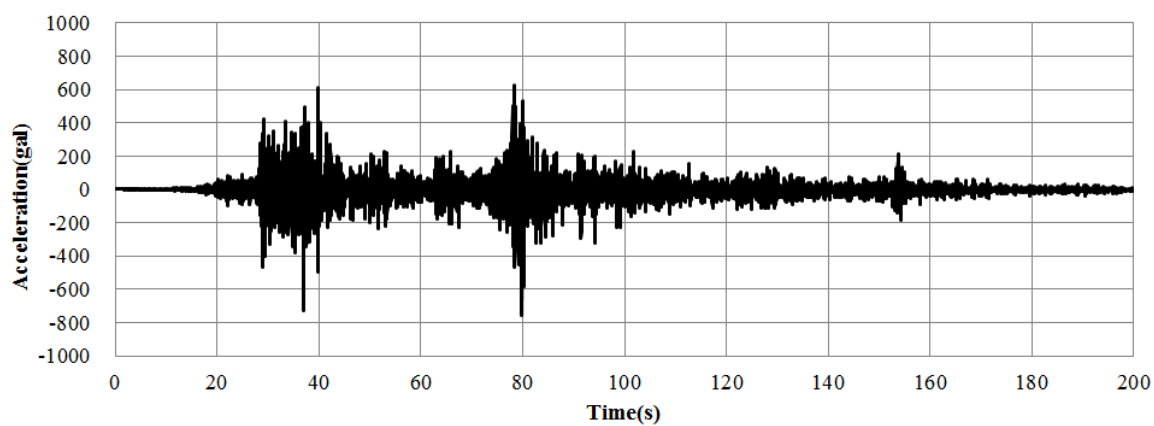


(b) EW 方向 (Y 方向入力)

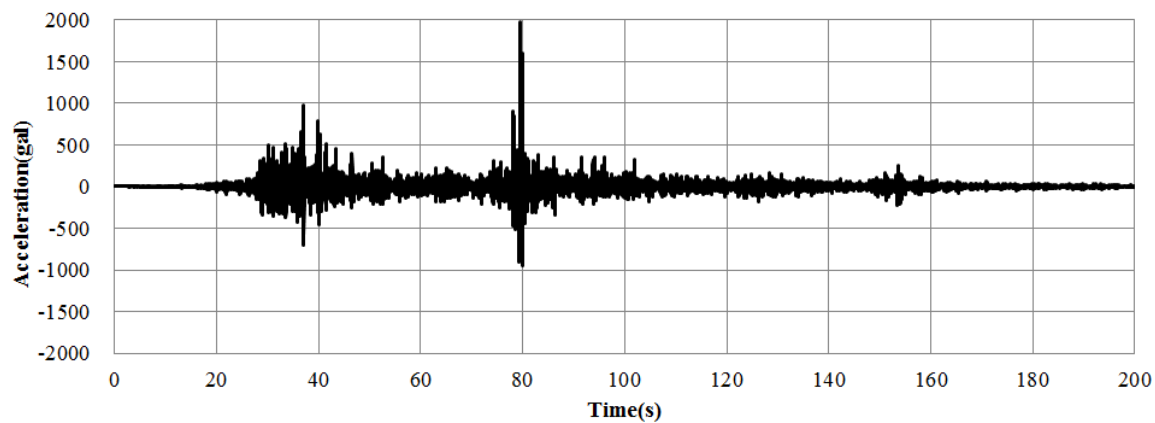


(c) UD 方向 (Z 方向入力)

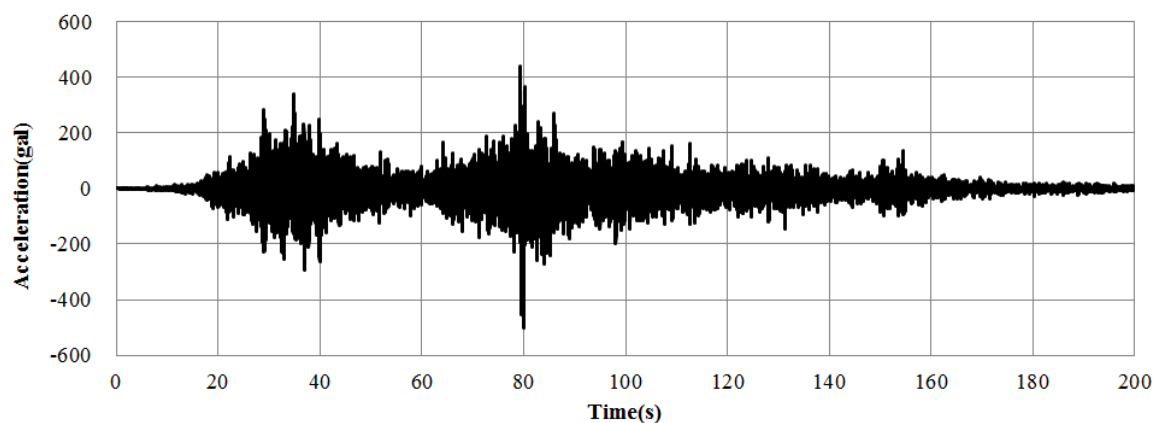
Fig.5-8 JMA 神戸波時刻歴加速度波形 (入力波形)



(a) NS 方向 (X 方向入力)

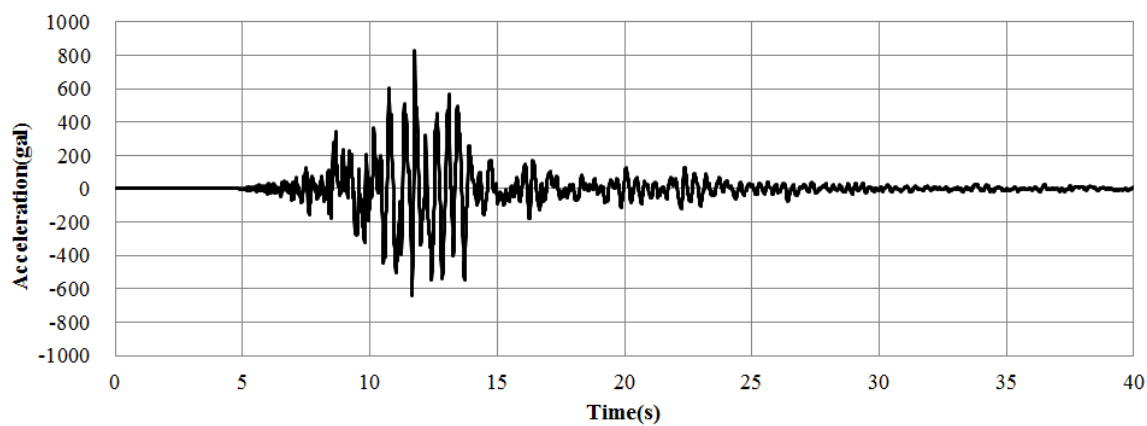


(b) EW 方向 (Y 方向入力)

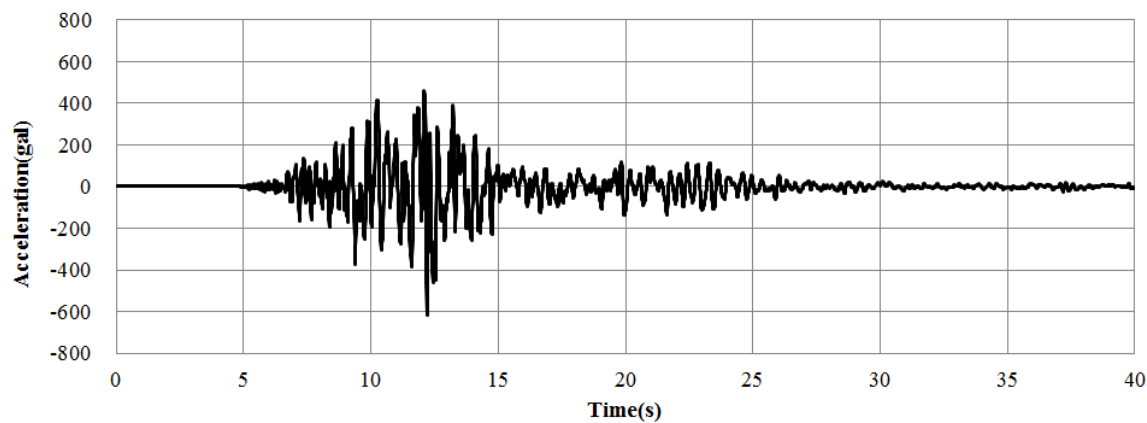


(c) UD 方向 (Z 方向入力)

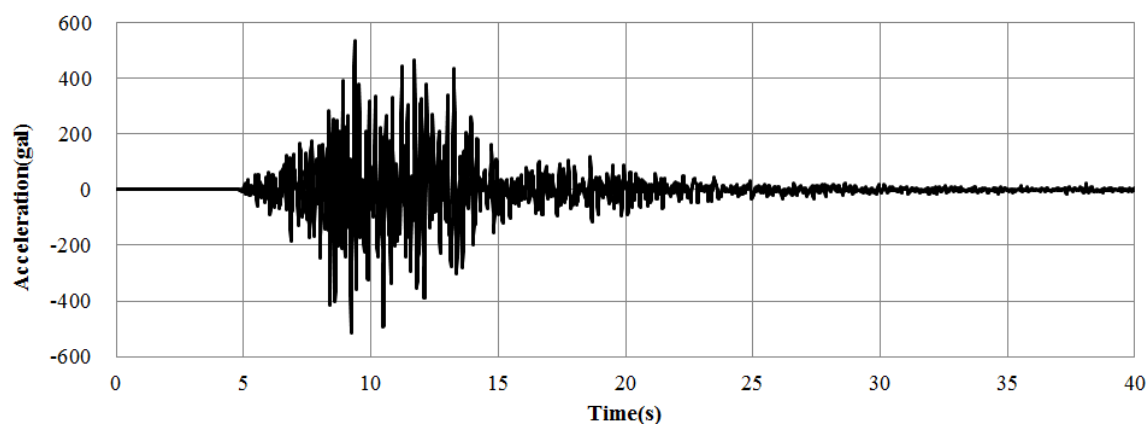
Fig.5-9 K-NET 塩竈波時刻歴加速度波形 (入力波形)



(b) NS 方向 (X 方向入力)



(c) EW 方向 (Y 方向入力)



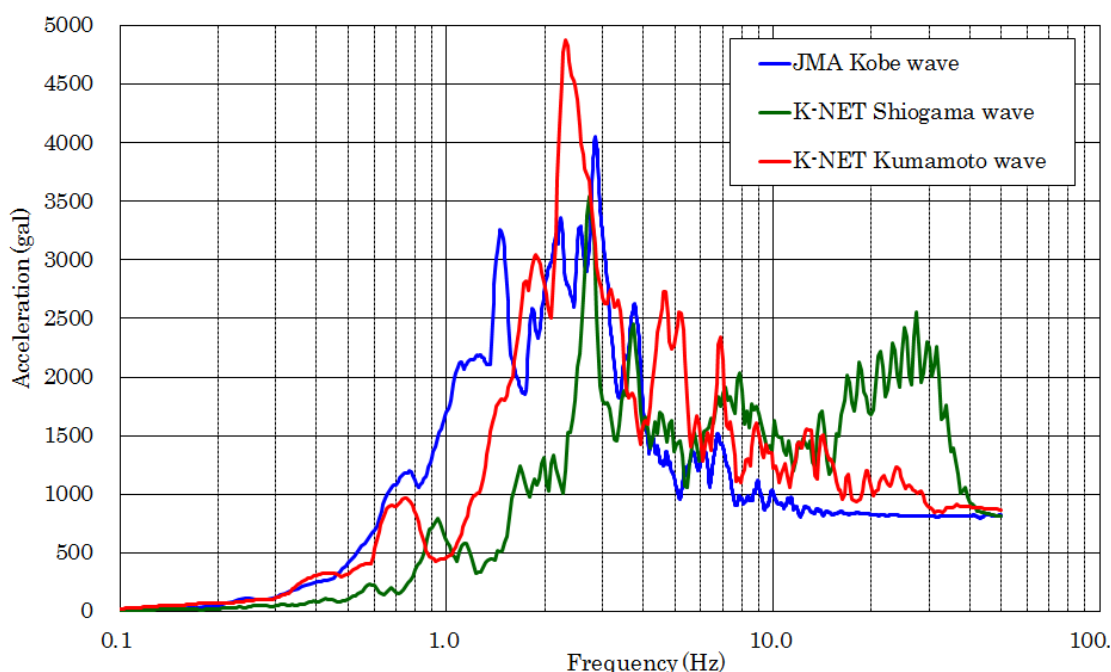
(d) UD 方向 (Z 方向入力)

Fig.5-10 K-NET 熊本波時刻歴加速度波形 (入力波形)

次に Fig.5-11 に各入力波の加速度応答スペクトルを示す。(a)が NS 方向 (X 方向)、(b)が EW 方向 (Y 方向)、(c)が UD 方向 (Z 方向) で、各図とも横軸が振動数、縦軸が応答加速度となっており、減衰は 2%で算出している。

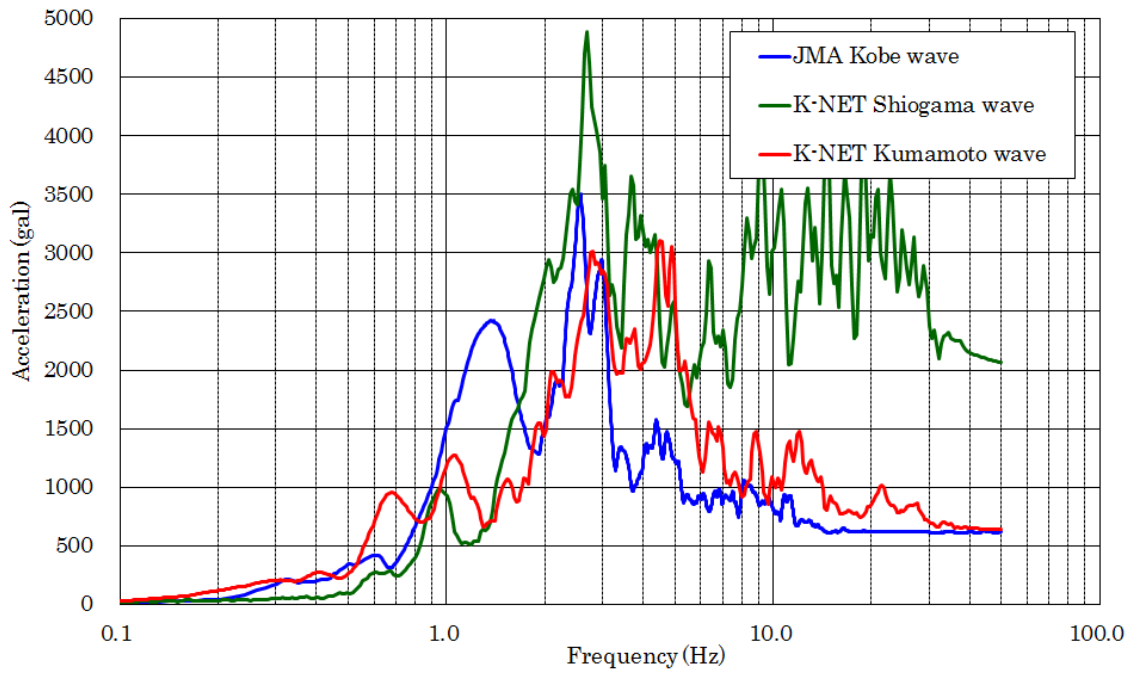
図から、(a)の NS 方向は、1~3Hz の振動数範囲での応答加速度が大きい、すなわち卓越振動数であることが分かる。この範囲には、一般の建造物、構造物の 1 次固有振動数 (通常は 1~2Hz 程度) があることから、大きな応答を生じさせると考えられる。(b)の EW 方向については、JMA 神戸波が 1~3Hz の振動数範囲が卓越振動数範囲であるが、他の 2 波は 2~5Hz の振動数範囲、あるいはそれ以上での振動数域となっており、特性に差が見られる。(c)の UD 方向については、各波とも水平の 2 方向に比べて応答は小さくなっている。

各波について見ると、JMA 神戸波は他の 2 波に比べて、水平方向で低い振動数側の 1~2Hz の応答が大きい。K-NET 塩竈波は入力加速度が EW 方向の方が大きく、これが応答スペクトルにも表れている。K-NET 熊本波は UD 方向の成分が他の 2 波に比べて大きいこと、NS 方向で 2.3Hz に特に大きなピークがあることが特徴的である。

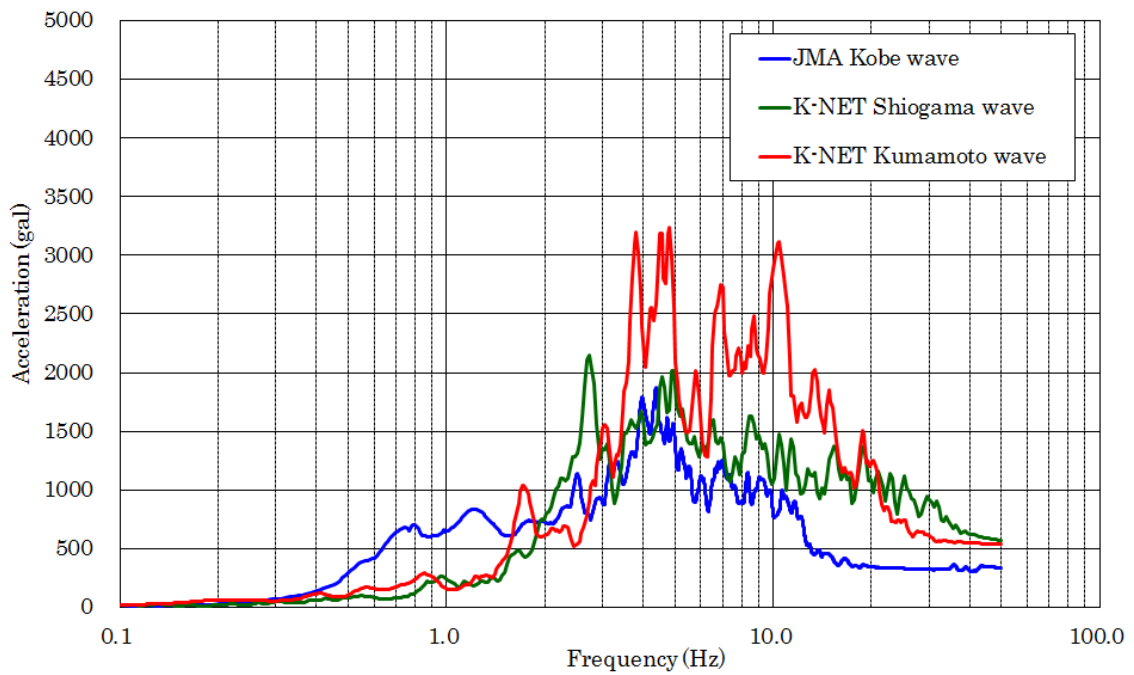


(a) NS 方向 (X 方向入力)

Fig.5-11 入力波の加速度応答スペクトル



(b) EW 方向 (Y 方向入力)



(c) UD 方向 (Z 方向入力)

Fig.5-11 入力波の加速度応答スペクトル

5.3 固有値解析結果

地震波による時刻歴応答解析を実施する前に、解析モデルケースの確認、および振動特性を把握するため固有値解析を実施した。その結果を Table 5-4～5-7 に示す。下線付きの次数は、刺激係数が大きい、すなわち主要な振動モードである。なお、MR グリースダンパモデルのケース（100kN、500kN の各解析モデルケース）については、同じモデルであることから 100kN のモデルケースのみを示す。

さらに、固有値解析から得られた主要な振動モードで、比較的低い固有振動数（5Hz 以下）について、そのモード形状を Fig.5-12～5-15 に示す。地震波の卓越振動数は数 Hz の低い振動数であるため、高い振動数については励振されることが殆どないためである。

ブレースの有無や種類に関係なく、1～5 次程度が水平方向についての主要モード、15 次付近が上下方向の主要モードである。

刺激係数から、X 方向についてはブレースの種類によらず、支配的なモードが複数、近傍の次数、振動数に存在していることがわかる。これらの振動数は、ブレースなしケースよりもブレース有り（通常ブレース、UB ブレース、100kN の各ケース）の方が高く、補強により剛性が増している、すなわち「補強が効いている」ことが言える。ただし、ブレースの種類（補強の種類）による差は、振動数があまり変わらないことから、明確には見られない。

Y 方向についても、「補強が効いている」ことに関しては X 方向と同様であるが、刺激係数の大きな次数は 1 つだけになっている。これは、Y 方向に対して設置されているブレース（補強）が少ないためにモード形状が複雑にならず、比較的単純な形状であるためとも考えられる。

Table 5-4 固有値解析結果（モデルケース：ブレースなし）

モード No.	固有周 期 [sec]	固有振動数 [Hz]	刺激係数		
			X	Y	Z
<u>1</u>	<u>1.86</u>	<u>0.54</u>	<u>213.10</u>	<u>1.46</u>	<u>0.03</u>
<u>2</u>	<u>1.65</u>	<u>0.61</u>	<u>213.93</u>	<u>-1.46</u>	<u>0.01</u>
<u>3</u>	<u>1.21</u>	<u>0.83</u>	<u>0.14</u>	<u>298.58</u>	<u>-0.47</u>
4	0.76	1.31	2.46	-9.52	0.04
5	0.59	1.68	31.72	-0.06	-0.05
6	0.58	1.73	84.50	-0.65	-0.03
7	0.51	1.97	11.96	6.66	0.02
8	0.35	2.87	-1.43	92.26	1.70
9	0.31	3.19	5.71	6.77	0.42
10	0.30	3.38	1.46	34.35	0.63
11	0.22	4.57	0.20	20.63	-4.33
12	0.21	4.76	-0.44	5.88	-2.13
13	0.19	5.28	-4.03	-0.16	0.09
14	0.13	7.90	0.06	-6.10	-1.26
<u>15</u>	<u>0.07</u>	<u>14.64</u>	<u>-0.16</u>	<u>0.30</u>	<u>180.22</u>
<u>16</u>	<u>0.06</u>	<u>15.45</u>	<u>0.18</u>	<u>0.22</u>	<u>132.02</u>
<u>17</u>	<u>0.06</u>	<u>17.45</u>	<u>0.13</u>	<u>-0.09</u>	<u>142.68</u>
<u>18</u>	<u>0.06</u>	<u>18.13</u>	<u>-0.15</u>	<u>-0.09</u>	<u>130.75</u>
19	0.04	24.64	0.01	-0.02	-1.06
20	0.04	26.54	-0.01	-0.06	0.79

※1～3次の固有振動モード形状を Fig.5-12 に示す。

Table 5-5 固有値解析結果（モデルケース：通常ブレース）

モード No.	固有周 期 [sec]	固有振動数 [Hz]	刺激係数		
			X	Y	Z
<u>1</u>	<u>0.68</u>	<u>1.48</u>	<u>10.08</u>	<u>273.60</u>	<u>1.51</u>
2	0.63	1.57	89.86	-45.18	-0.02
<u>3</u>	<u>0.51</u>	<u>1.96</u>	<u>105.47</u>	<u>16.73</u>	<u>0.38</u>
<u>4</u>	<u>0.35</u>	<u>2.90</u>	<u>186.88</u>	<u>-1.95</u>	<u>1.71</u>
<u>5</u>	<u>0.29</u>	<u>3.43</u>	<u>188.82</u>	<u>-2.91</u>	<u>0.03</u>
6	0.24	4.10	-2.90	-97.47	-3.23
7	0.23	4.36	-4.36	-22.30	-2.55
8	0.20	5.06	-1.58	1.88	-1.21
9	0.18	5.47	7.11	86.48	-6.45
10	0.17	5.94	-8.15	67.22	-3.55
11	0.13	8.00	0.32	-18.35	-1.06
12	0.11	9.12	73.33	0.07	-4.88
13	0.10	9.84	63.47	0.13	1.36
14	0.07	14.09	5.92	0.06	27.68
<u>15</u>	<u>0.06</u>	<u>15.40</u>	<u>-0.96</u>	<u>0.34</u>	<u>221.58</u>
<u>16</u>	<u>0.05</u>	<u>18.87</u>	<u>0.26</u>	<u>-0.40</u>	<u>191.48</u>
17	0.05	21.75	-5.13	-0.10	28.28
18	0.04	22.22	4.51	0.00	4.56
19	0.04	24.69	0.13	-0.09	2.34
20	0.04	26.60	0.12	-0.14	-2.71

※1、3～5 次の固有振動モード形状を Fig.5-13 に示す。

Table 5-6 固有値解析結果（モデルケース：UB ブレース）

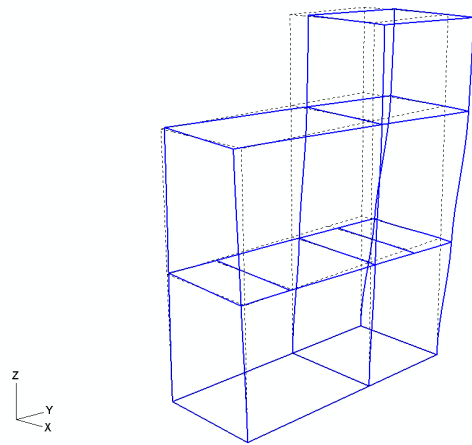
モード No.	固有周 期 [sec]	固有振動数 [Hz]	刺激係数		
			X	Y	Z
<u>1</u>	<u>0.60</u>	<u>1.66</u>	<u>106.40</u>	<u>12.16</u>	<u>0.48</u>
<u>2</u>	<u>0.53</u>	<u>1.90</u>	<u>-12.03</u>	<u>264.77</u>	<u>3.96</u>
3	0.45	2.24	78.29	32.00	0.63
<u>4</u>	<u>0.33</u>	<u>3.02</u>	<u>190.73</u>	<u>-1.89</u>	<u>2.02</u>
<u>5</u>	<u>0.26</u>	<u>3.78</u>	<u>186.03</u>	<u>-3.55</u>	<u>-0.01</u>
6	0.23	4.40	0.51	-89.19	-6.87
7	0.22	4.57	-20.12	-9.45	-2.76
8	0.20	5.09	-8.05	0.74	-1.23
9	0.15	6.75	10.92	93.75	-9.30
10	0.13	7.82	-9.76	97.18	-8.04
11	0.12	8.29	-3.02	-43.96	0.65
12	0.10	9.99	76.85	0.20	-6.12
13	0.09	11.00	64.88	0.69	1.62
<u>14</u>	<u>0.07</u>	<u>15.31</u>	<u>6.07</u>	<u>0.21</u>	<u>140.91</u>
<u>15</u>	<u>0.06</u>	<u>15.62</u>	<u>-4.93</u>	<u>0.22</u>	<u>173.14</u>
<u>16</u>	<u>0.05</u>	<u>19.82</u>	<u>-0.01</u>	<u>-0.56</u>	<u>191.61</u>
17	0.04	23.26	-5.33	-0.25	24.81
18	0.04	24.10	4.86	0.00	2.32
19	0.04	24.79	-0.67	0.23	-7.03
20	0.04	26.69	0.44	0.43	-7.86

※1、2、4、5次の固有振動モード形状を Fig.5-14 に示す。

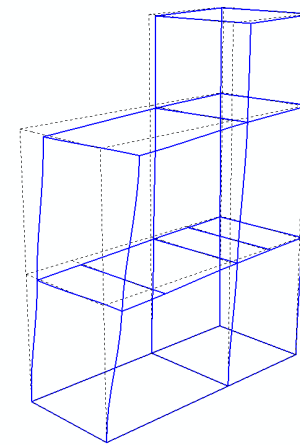
Table 5-7 固有値解析結果 (モデルケース : 100kN)

モード No.	固有周 期 [sec]	固有振動数 [Hz]	刺激係数		
			X	Y	Z
<u>1</u>	<u>0.63</u>	<u>1.59</u>	<u>33.37</u>	<u>214.52</u>	<u>0.78</u>
<u>2</u>	<u>0.61</u>	<u>1.65</u>	<u>80.81</u>	<u>-102.36</u>	<u>0.25</u>
3	0.47	2.12	79.34	16.73	0.92
<u>4</u>	<u>0.30</u>	<u>3.35</u>	<u>193.61</u>	<u>1.06</u>	<u>6.73</u>
<u>5</u>	<u>0.23</u>	<u>4.30</u>	<u>175.36</u>	<u>5.65</u>	<u>3.67</u>
6	0.22	4.48	-1.75	44.25	6.73
7	0.21	4.70	39.85	-18.46	-0.31
8	0.19	5.21	-10.97	1.48	-2.36
9	0.14	7.35	-5.18	76.40	2.73
<u>10</u>	<u>0.10</u>	<u>10.49</u>	<u>-7.75</u>	<u>157.74</u>	<u>23.94</u>
11	0.09	11.16	14.54	90.78	20.65
<u>12</u>	<u>0.07</u>	<u>14.32</u>	<u>71.52</u>	<u>0.30</u>	<u>127.35</u>
<u>13</u>	<u>0.06</u>	<u>15.40</u>	<u>-56.13</u>	<u>0.43</u>	<u>182.24</u>
14	0.06	16.19	73.46	-13.63	56.87
<u>15</u>	<u>0.05</u>	<u>18.59</u>	<u>-23.53</u>	<u>-30.06</u>	<u>180.89</u>
16	0.04	23.58	3.42	0.07	13.54
17	0.04	24.68	-0.21	-3.27	2.82
18	0.04	26.56	-0.01	0.22	-0.18
19	0.04	27.44	-0.94	13.35	-3.47
20	0.03	28.76	0.54	-0.40	62.71

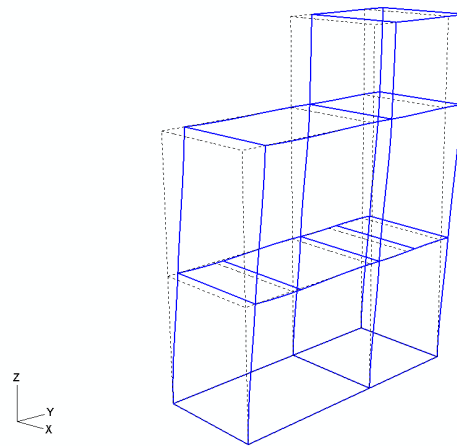
※1、2、4、5次の固有振動モード形状を Fig.5-15 に示す。



(a)1次モード (0.54Hz)

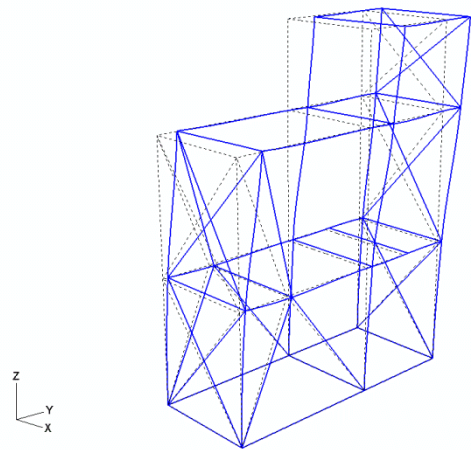


(b)2次モード (0.61Hz)

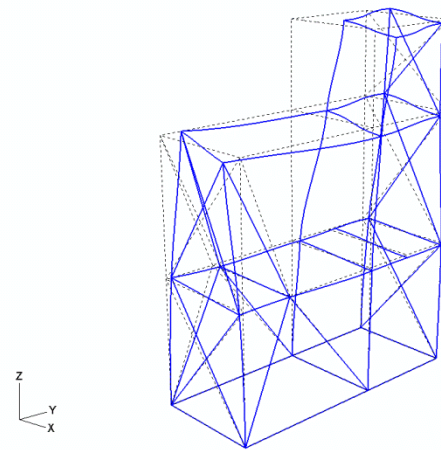


(c)3次モード (0.83Hz)

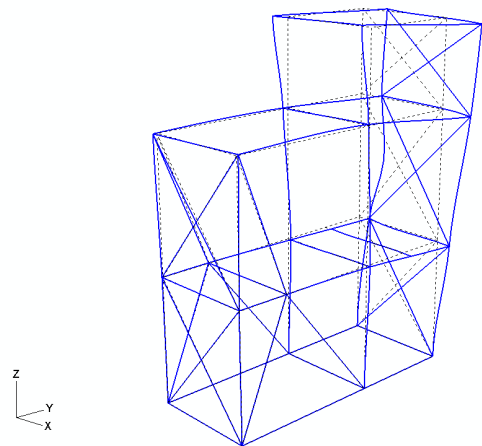
Fig.5-12 主要モード図 (モデルケース：ブレースなし)



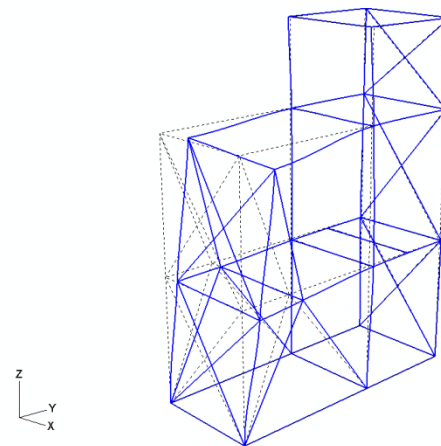
(a)1次モード (1.48Hz)



(b)3次モード (1.96Hz)

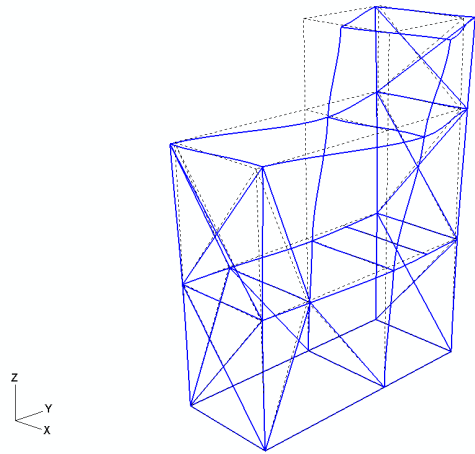


(c)4次モード (2.90Hz)

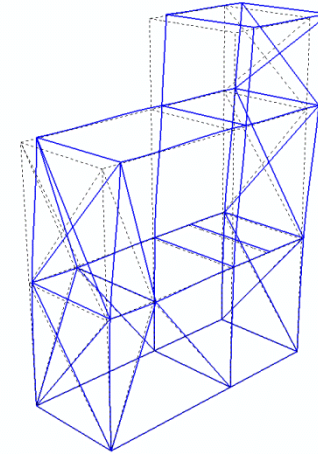


(d)5次モード (3.43Hz)

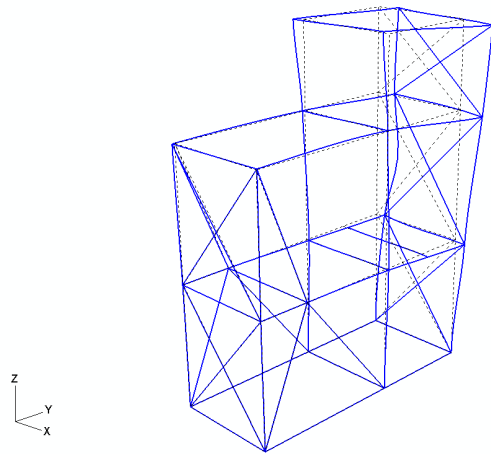
Fig.5-13 主要モード図 (モデルケース：通常ブレース)



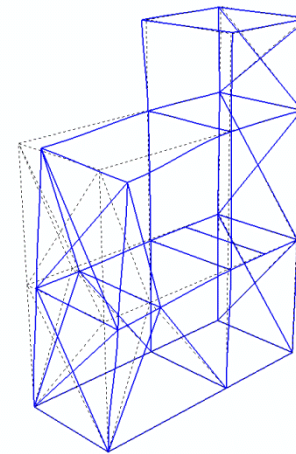
(a)1次モード (1.66Hz)



(b)2次モード (1.90Hz)

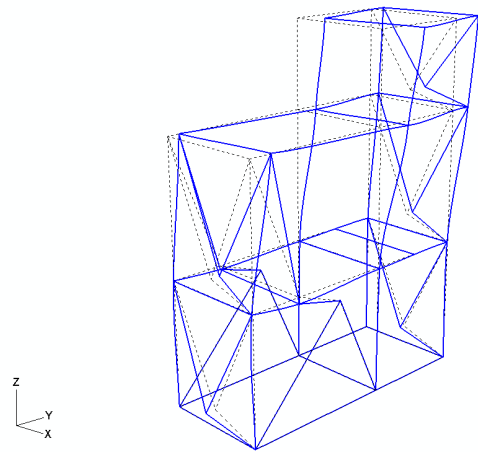


(c)4次モード (3.02Hz)

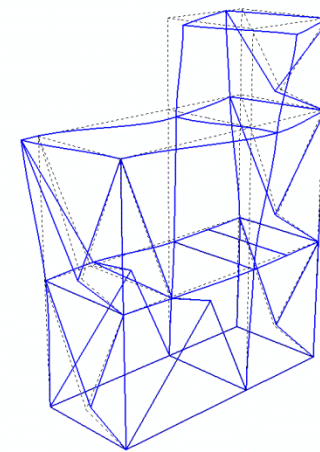


(d)5次モード (3.78Hz)

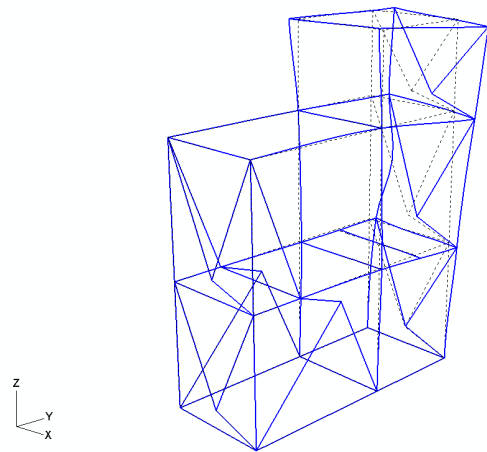
Fig.5-14 主要モード図 (モデルケース : UB ブレース)



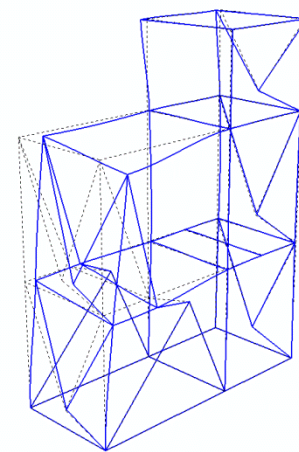
(a)1次モード (1.59Hz)



(b)2次モード (1.65Hz)



(c)4次モード (3.35Hz)



(d)5次モード (4.30Hz)

Fig.5-15 主要モード図 (モデルケース : 100kN)

5.4 地震応答解析結果

地震応答解析結果を以下に詳細に示す。

地震波は 5.2 節でも述べたように

- (A) JMA 神戸波
- (B) K-NET 塩竈波
- (C) K-NET 熊本波

の 3 波である。

(1) 結果の評価方法について

結果、および評価方法については、2.3 節で示した建築基準法の耐震設計に準じて行った。具体的には層間変形角を用いて、耐震性の評価を行った。

今回の適用対象が、工場の材料運搬用コンベアの機械棟であることから、プラント等の重要度分類に応じたような専用の耐震設計基準（例えば原子力発電プラント、高圧ガスプラントなど）を用いることも考えられる。しかし、専用基準がない場合、あるいはそういったプラント内でも、設置場所等から適用範囲外であったりすると、建築基準法の耐震設計に基づくことになる。以上の観点から、本研究でも建築基準法の耐震設計を適用した。

◆層間変形角

層間変形角は、層の変形を床面と天井面（上層の床面）との差（変形）について、構造物ごと、層（階）ごとの高さの違いを考慮して標準化するものである。水平方向の応答変位について以下の式で定義される。

$$\theta_n = \frac{\delta_n}{h_n}$$

$$h_n = H_{n+1} - H_n$$

θ_n : Interlayer-deformation-angle at n-th story (n 層の層間変形角)

δ_n : maximum response displacement at n-th story (n 層の最大層間変位)

h_n : interlamellar height at n-th story (n 層の層間の高さ)

H_n : height at n-th story (n 階の高さ)

本研究では、最大層間変位 δ_n については、各階の 4 隅の節点と、梁同士が交わる節点の層間変位の中の最大値（絶対値）を用いている。

◆具体的な基準値

2.3 節で示した 2 段階の耐震設計の考え方を、評価にも適用する。

建築基準法の鉄骨造での基準値を用いて、それぞれの段階の層間変形角については、

① 損傷限界（1 次設計）：1/150

→ 構造物が壊れない、機能が損なわれない（弾性設計）

② 安全限界（2 次設計）：1/40

→ 構造物は壊れても止むを得ないが、人命は損なわない（弾塑性設計）の数値を評価値として設定する。

(2) 解析結果

5.2 節でも述べたように、地震波の入力方向はそれぞれ

X 方向入力波：NS 方向、 Y 方向入力波：EW 方向、

Z 方向入力波：UD 方向

とした。

◆最大層間変位・時刻歴応答波形：JMA 神戸波

まず、Fig.5-8、5-9、5-10 に、それぞれ JMA 神戸波の各方向についての層間変位の時刻歴応答波形を示す。横軸に時間、縦軸は層間変位である。各ケースとも、それぞれの層（階）で最大層間変位を示した節点の変位である。

波形から、水平 2 方向については、どちらの方向についても 1、2 層ではブレースなし、および通常ブレースのケースで 15～20cm 程度の大きな変位となっており、さらに両ケースとも 40s 付近で数 cm の基線の移動、すなわち残留変位も生じている。

これに対して、MR グリースダンパケース、UB ブレースのケースでは、通常ブレースケースの 1/2～1/5 程度まで最大変位が小さくなっている。また、Y 方向では残留変位が生じている。3 層については、各ケースとも 1、2 層に比べて変位が小さく、残留変位も発生していない。

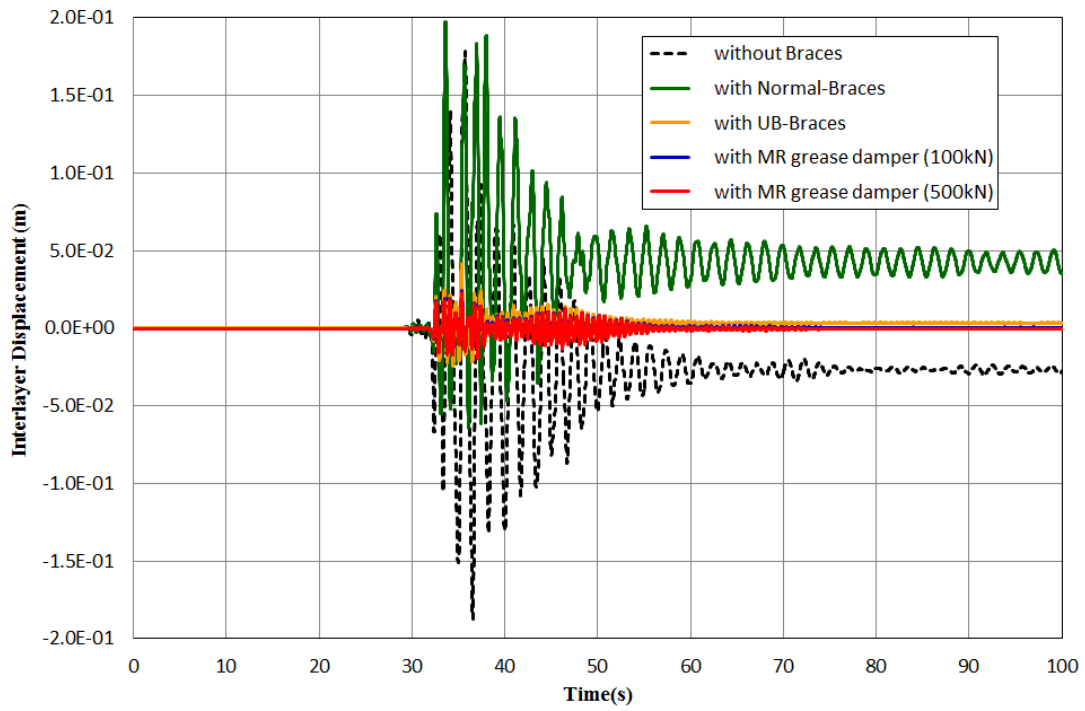
Y 方向において、MR グリースダンパ、UB ブレースのケースの変位が、ブレースなし、および通常ブレースのケースに比べて、X 方向ほど小さくないのは、Y 方向でのブレース、ダンパの設置数が少ないためと考えられる。また、MR グリ

ースダンパと、UB ブレースのケースとを比較すると、2 層 (Fig.5-9(b)) において UB ブレースケースは残留変位が生じていないが、MR グリースダンパケースでは生じており、最大変位も大きい。これは、MR グリースダンパケースでは、2 層については設置されていない (通常ブレースのまま) ために、応答が大きくなったことによると考えられる。MR グリースダンパが設置されている 1 層については、逆に UB ブレースケースの最大変位が大きく、残留変位も生じている。

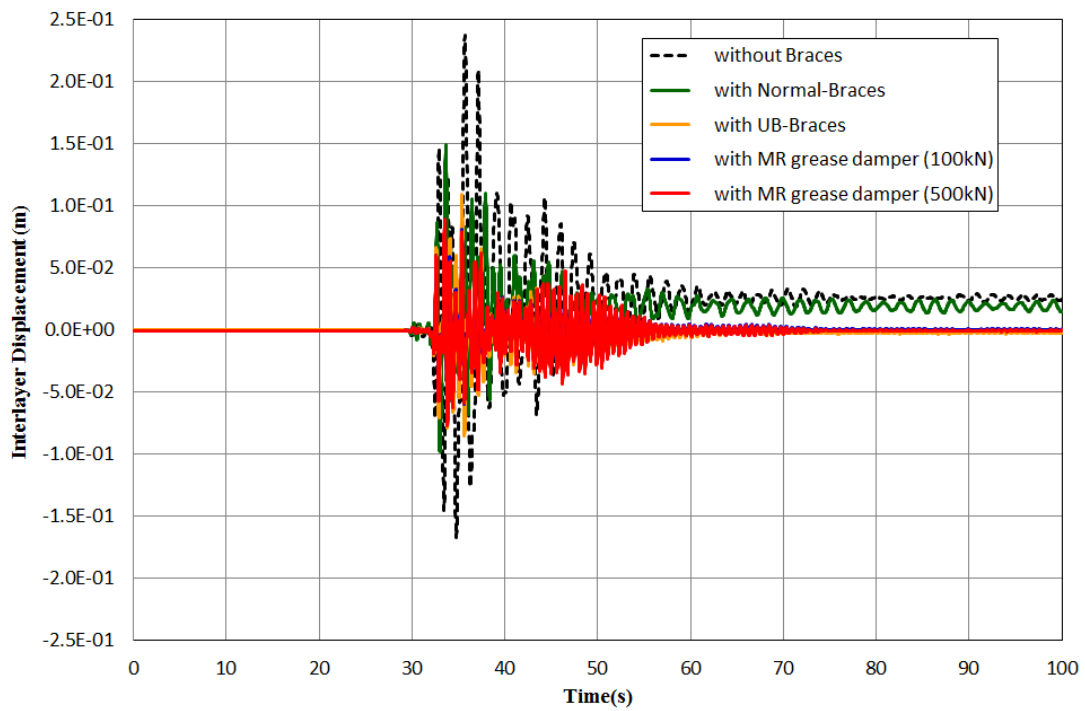
Z 方向については、最初から各ケースで、1、2 層では 1mm 弱、3 層では 0.1m m 程度、基線が下向きに移動しているが、これは自重 (重力) による変形 (初期変位) である。また、ブレースなし、通常ブレースのケースでは僅かではあるが残留変位もあるが、変位は数 mm 程度と水平方向に比べて一桁小さい値である。

このことから、MR グリースダンパ、UB ブレースの設置により、耐震性が向上したとすることができる。さらに、Y 方向の 1 層 (Fig.5-9(a)) のように、UB ブレースケースよりも MR グリースダンパケースの方が、最大変位が小さく、残留変位の発生もないことから、応答の低減効果が高いと考えられる箇所もある。

また、Fig.5-8、5-9、5-10 のどの方向についても、MR グリースダンパの容量による差 (100kN と 500kN) は見られない。

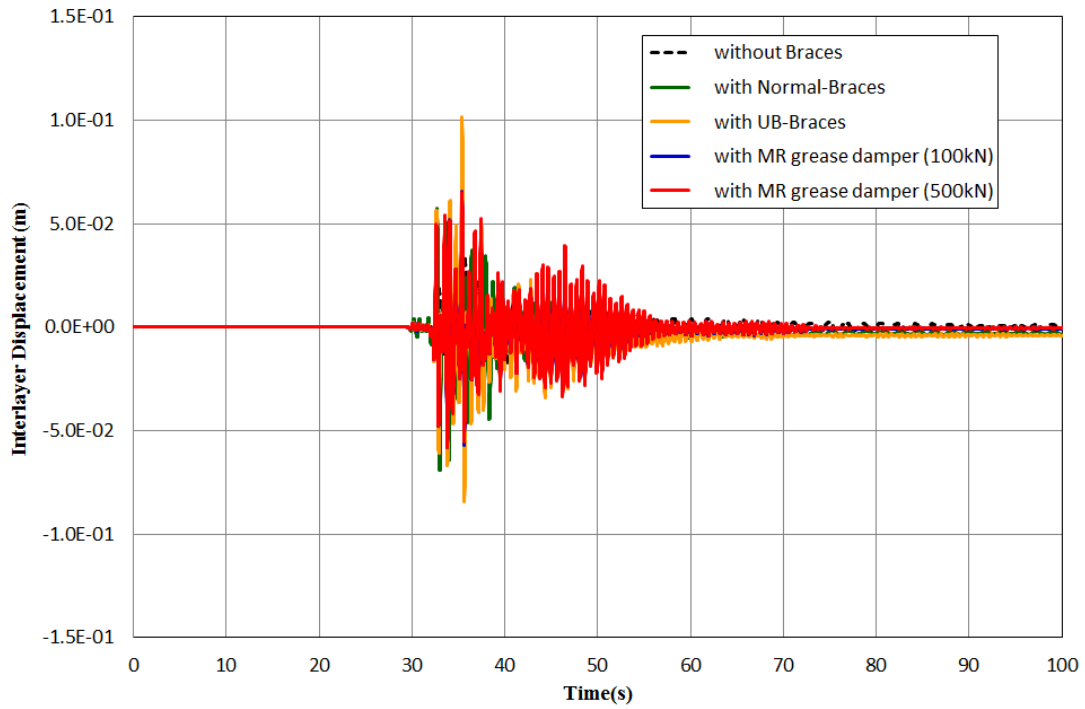


(a) 1 層



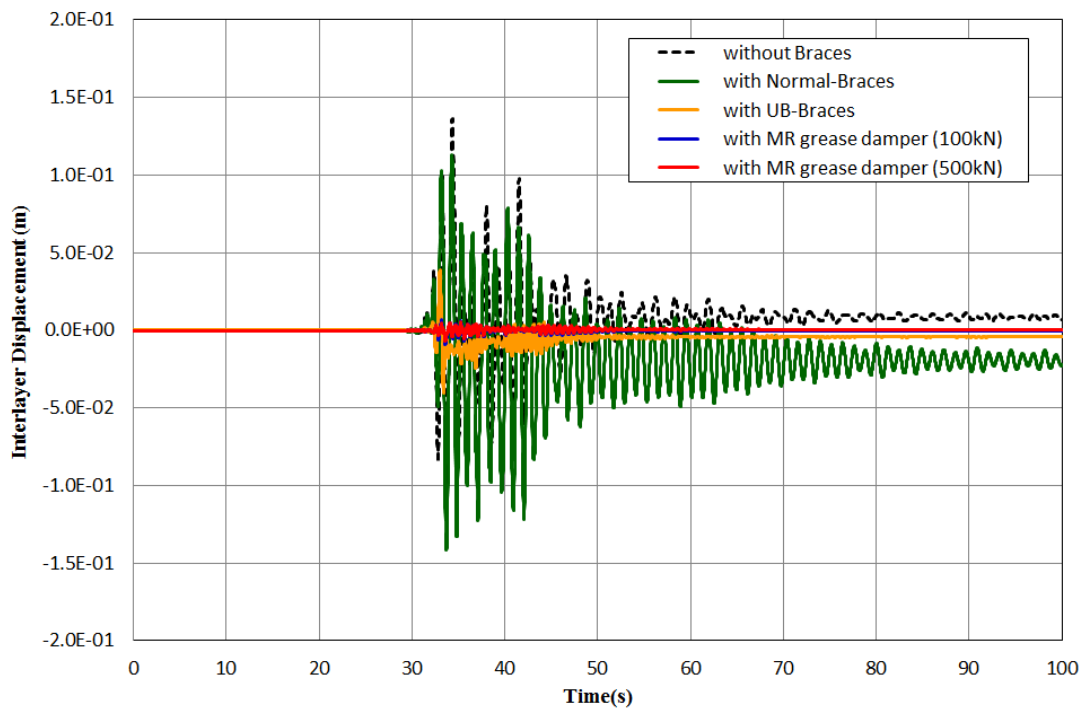
(b) 2 層

Fig.5-8 NS 方向 (X 方向)・層間変位時刻歴応答波形 (JMA 神戸波)



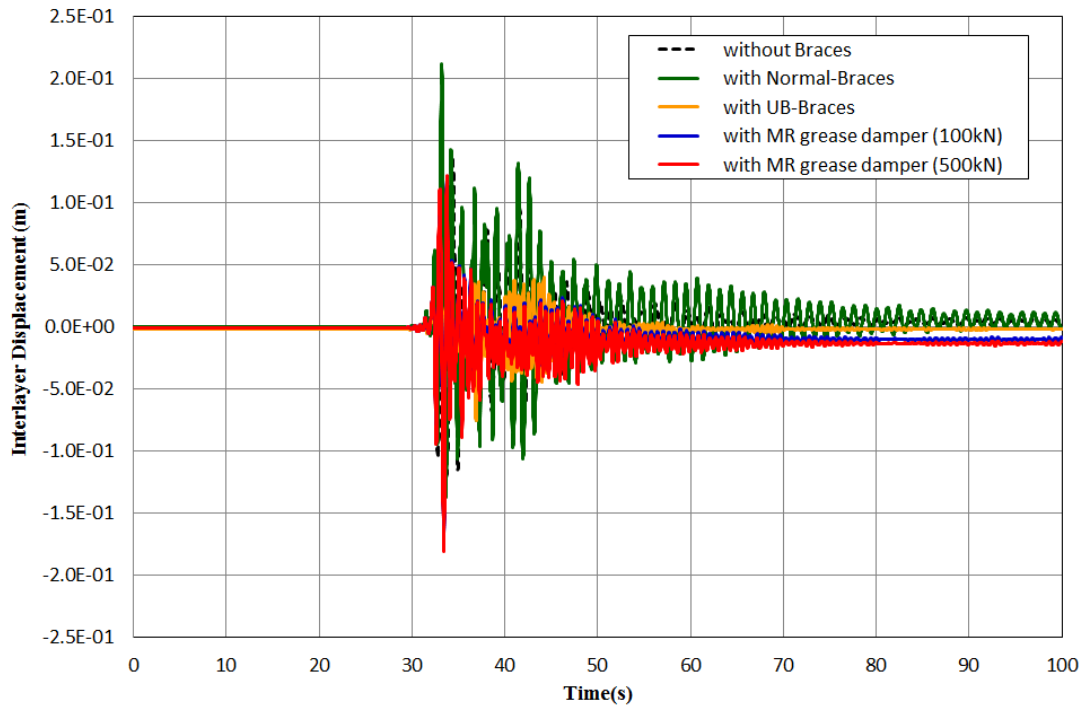
(c) 3 層

Fig.5-8 X 方向 (NS 方向)・層間変位時刻歴応答波形 (JMA 神戸波)

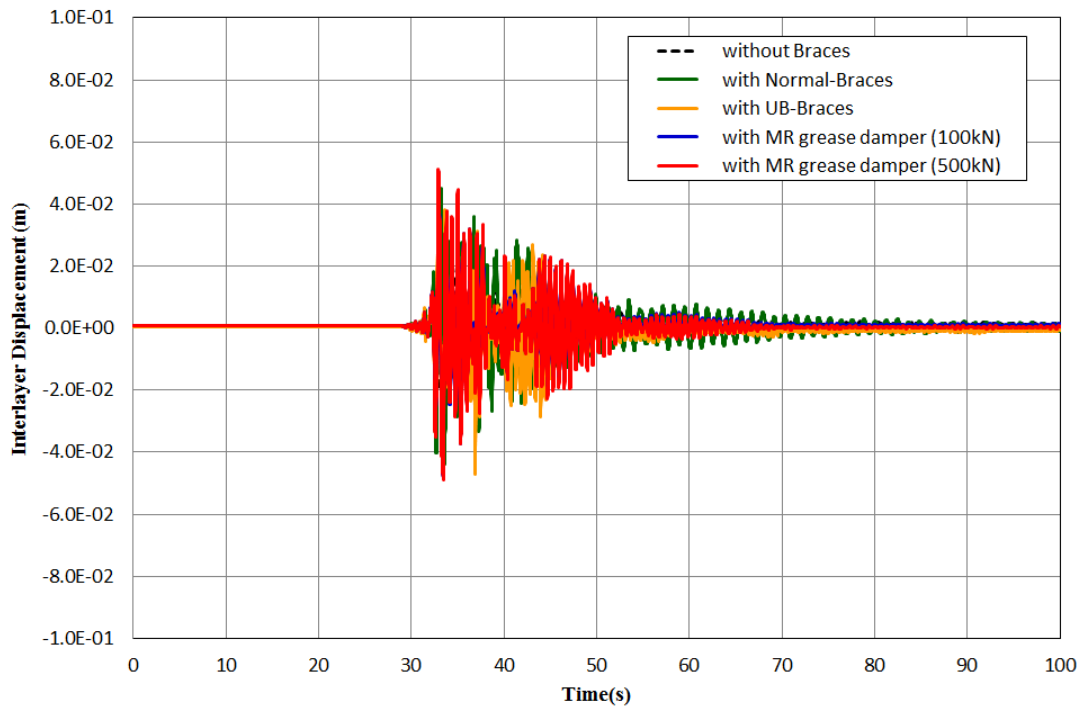


(a) 1 層

Fig.5-9 Y 方向 (EW 方向)・層間変位時刻歴応答波形 (JMA 神戸波)

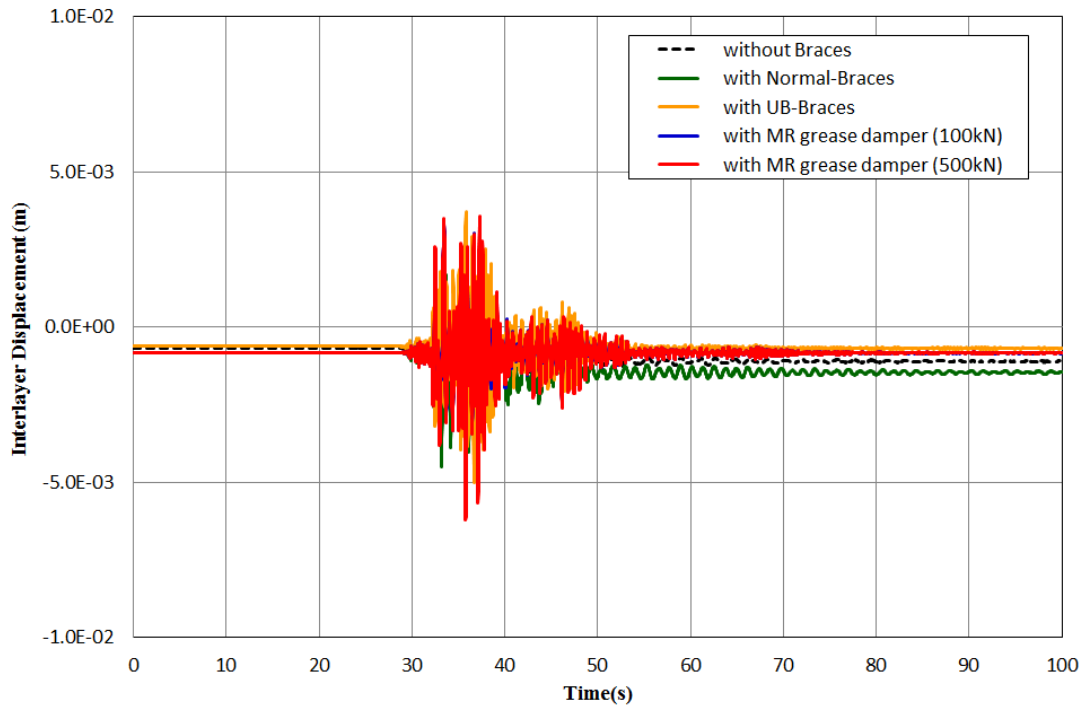


(b)2 層

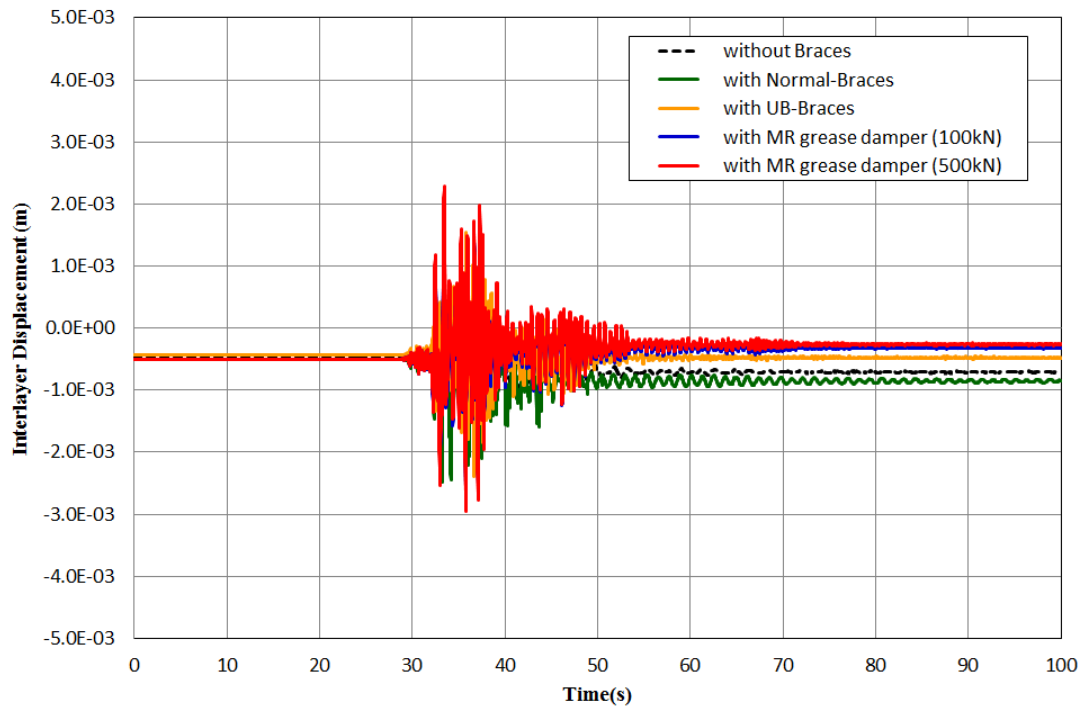


(c)3 層

Fig.5-9 Y 方向 (EW 方向)・層間変位時刻歴応答波形 (JMA 神戸波)

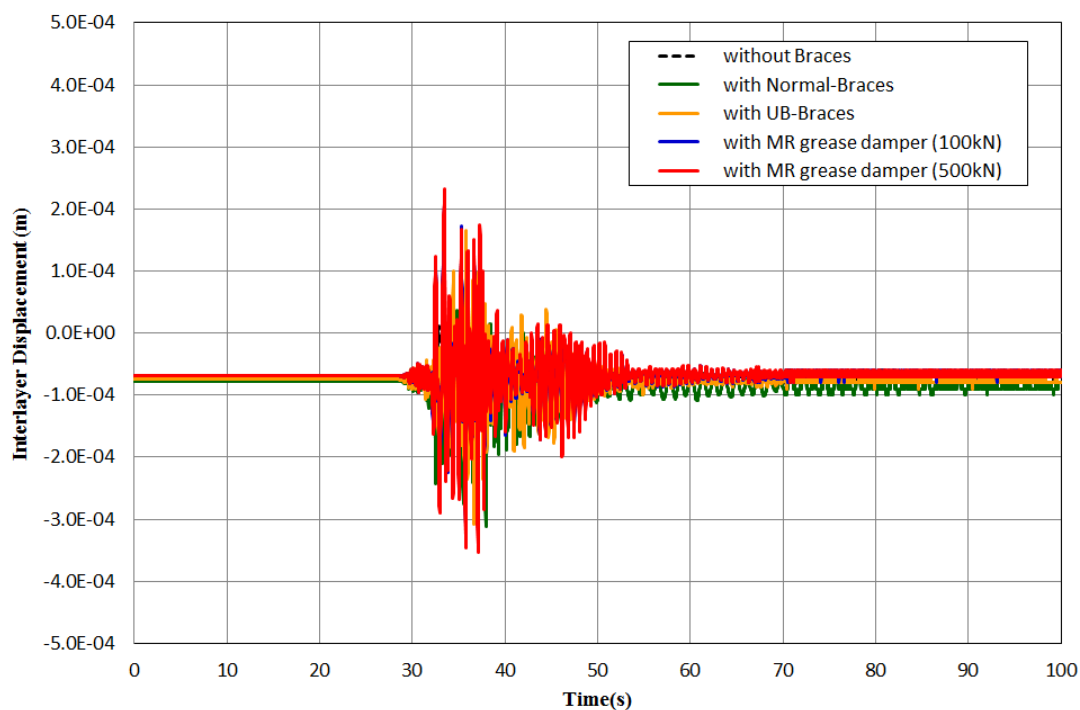


(a) 1 層



(b) 2 層

Fig.5-10 Z 方向 (UD 方向)・層間変位時刻歴応答波形 (JMA 神戸波)



(c)3 層

Fig.5-10 Z 方向 (UD 方向) ・層間変位時刻歴応答波形 (JMA 神戸波)

◆最大層間変位・時刻歴応答波形：K-NET 塩竈波

Fig.5-11、5-12、5-13 に、それぞれ K-NET 塩竈波の各方向についての層間変位の時刻歴応答波形を示す。JMA 神戸波と同様に、横軸は時間、縦軸は層間変位で、各ケースとも、それぞれの層で最大層間変位を示した節点の変位である。

水平 2 方向については、1、2 層で、X 方向ではブレースなし、Y 方向では通常ブレースのケースで 10~20cm 程度の大きな変位となっている。また、1 層の X 方向では両ケースで、1 層の Y 方向、2 層の X、Y 方向では通常ブレースのケースにおいて、85s 付近で 1cm 以下程度の残留変位も生じている。

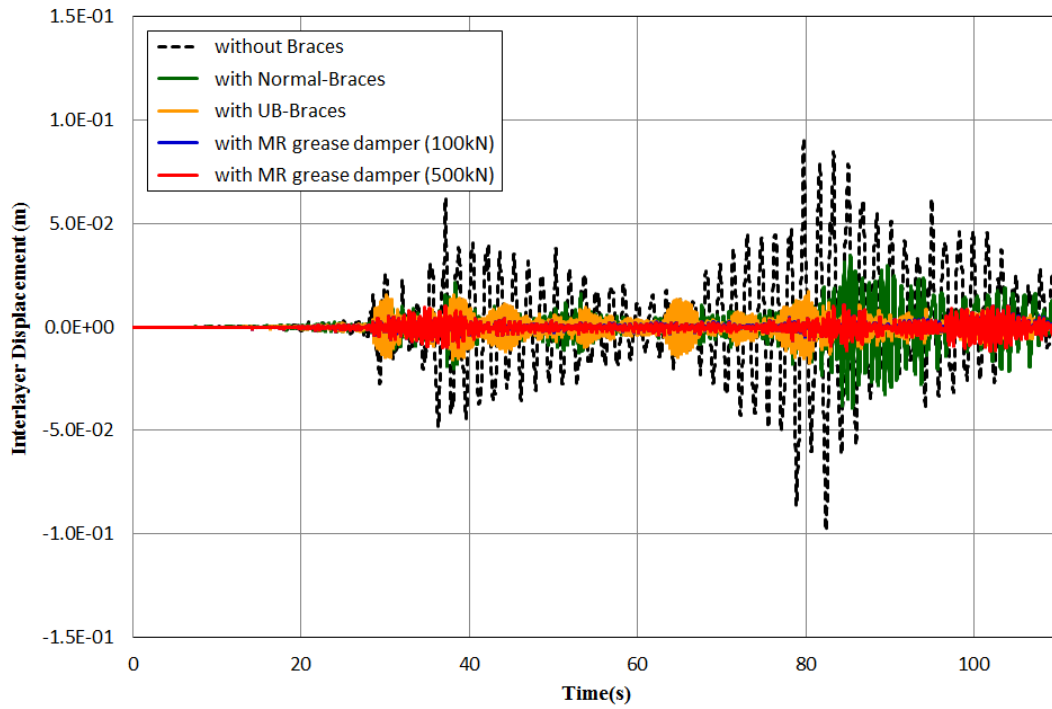
これに対して、MR グリースダンパ、UB ブレースのケースでは 1、2 層、および X、Y の両方向で、ブレースなし、通常ブレースケースよりも変位が小さく、特に 1 層では応答の低減効果が大きい。ただし、UB ブレースケースの 1 層、Y 方向では 35s 辺りで残留変位が生じている。3 層については、各ケースとも 1、2 層に比べて変位が小さく、残留変位も発生していない。また最大変位にも各ケース間の差が殆ど見られない。

Z方向については、JMA神戸波と同様に、各ケースで変位は数mm程度と水平方向に比べて一桁小さい値である。残留変位も発生していない。各層で基線が最初から下向きに移動しているのは自重（重力）による変形（初期変位）である。

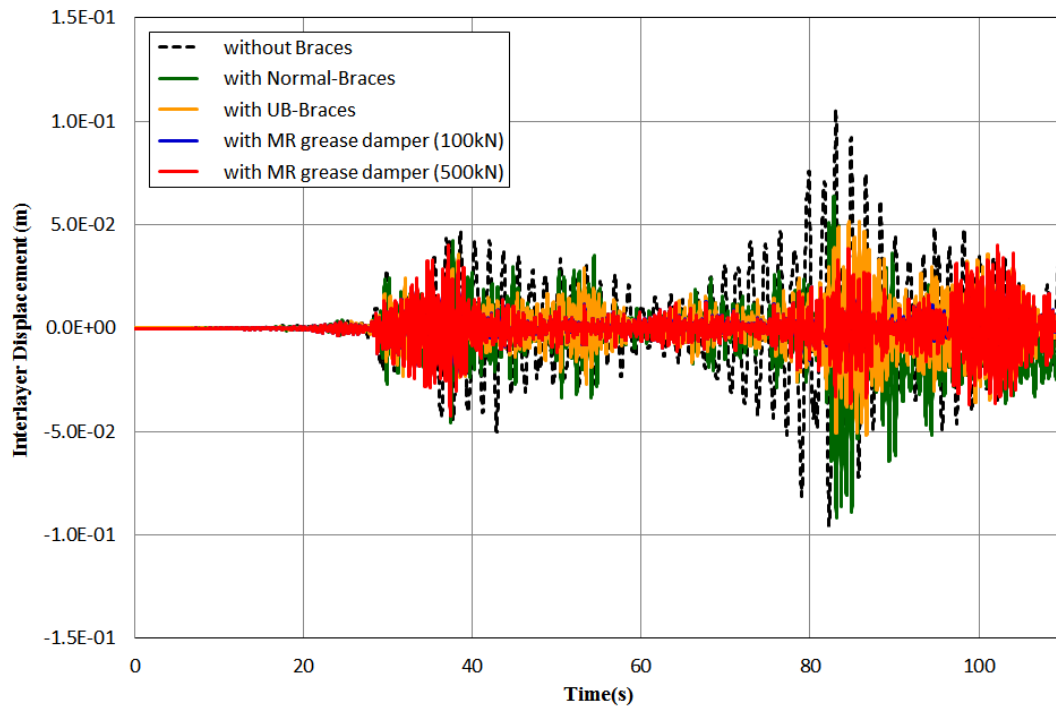
以上から、JMA神戸波での結果と同様に、MRグリースダンパ、UBブレースの設置、すなわち耐震対策を実施することで耐震性が向上したとすることができる。また、UBブレースケースの1層、Y方向では35s辺りで残留変位が生じていることから、UBブレースケースよりもMRグリースダンパケースの方が、応答の低減効果が高いとも考えられる。

Fig.5-11、5-12、5-13のどの方向についても、MRグリースダンパの容量による差（100kNと500kN）は見られないことも、JMA神戸波の結果と同じである。

JMA神戸波では、地震による揺れが始まってからすぐに最大応答が生じているが、K-NET塩竈波は、かなりの時間が経過してから最大応答に到っている。これは、兵庫県南部地震が直下型、東北地方太平洋沖地震がプレート型（海溝型）であるという地震の特性による。また、入力波最大加速度が大きい入力波の方が大きな応答を生じていることにはなっていない。これは地震波と構造物の振動特性の差、例えば地震波の卓越振動数と構造物の共振振動数（固有振動数）との違い等が応答に影響するためである。

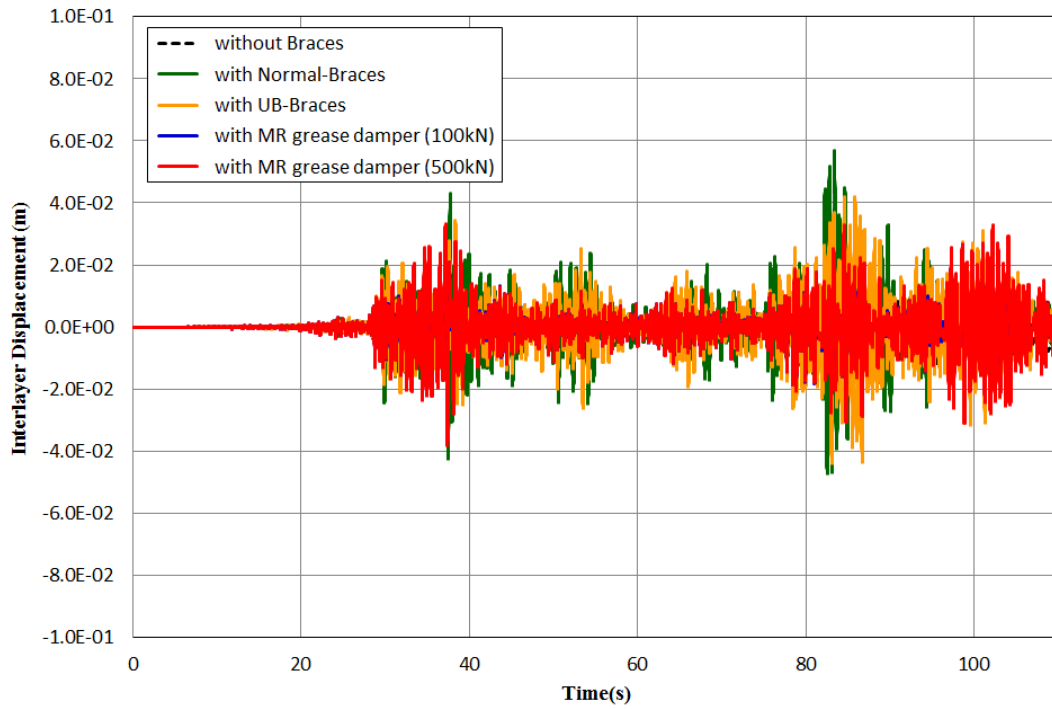


(a) 1 層



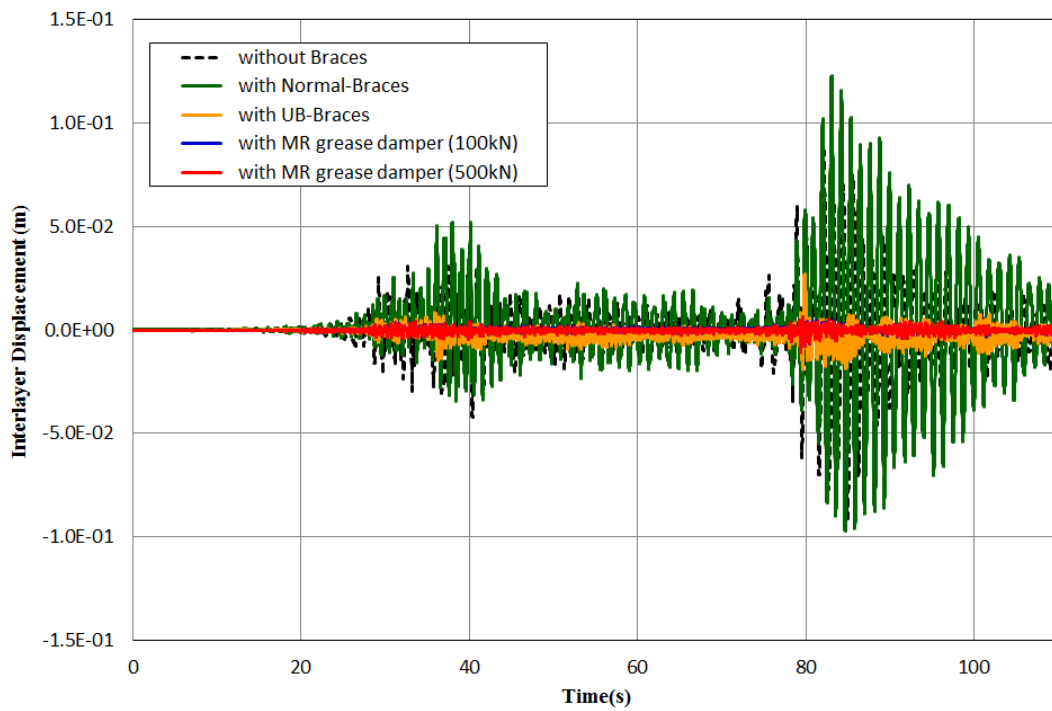
(b) 2 層

Fig.5-11 X 方向 (NS 方向)・層間変位時刻歴応答波形 (K-NET 塩竈波)



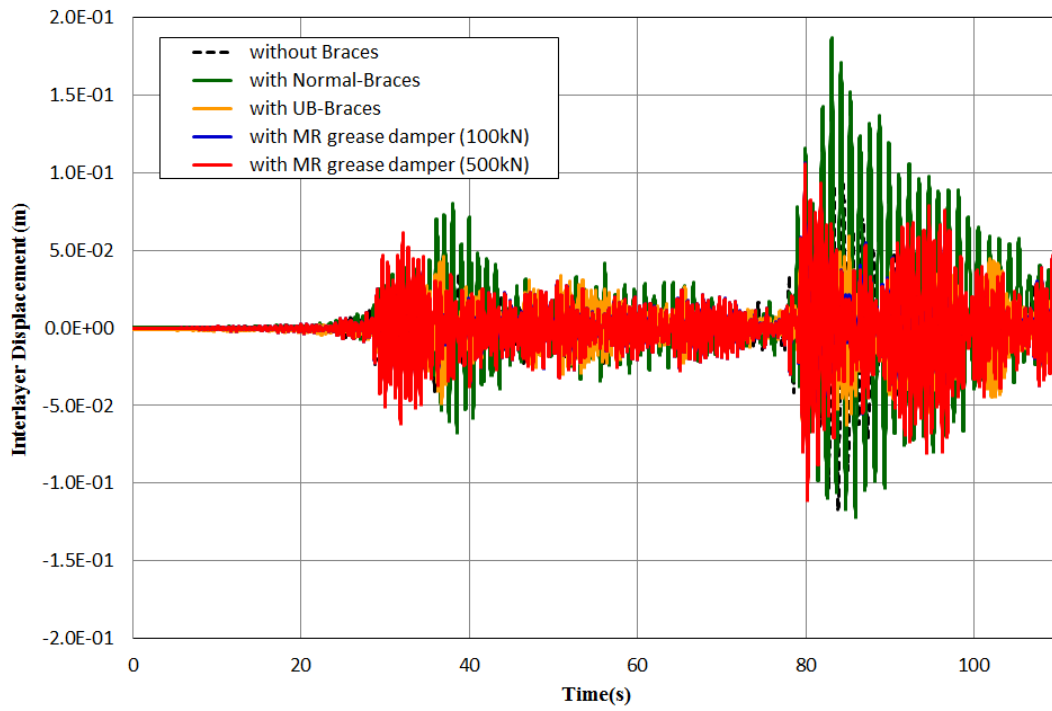
(c) 3 層

Fig.5-11 X 方向 (NS 方向)・層間変位時刻歴応答波形 (K-NET 塩竈波)

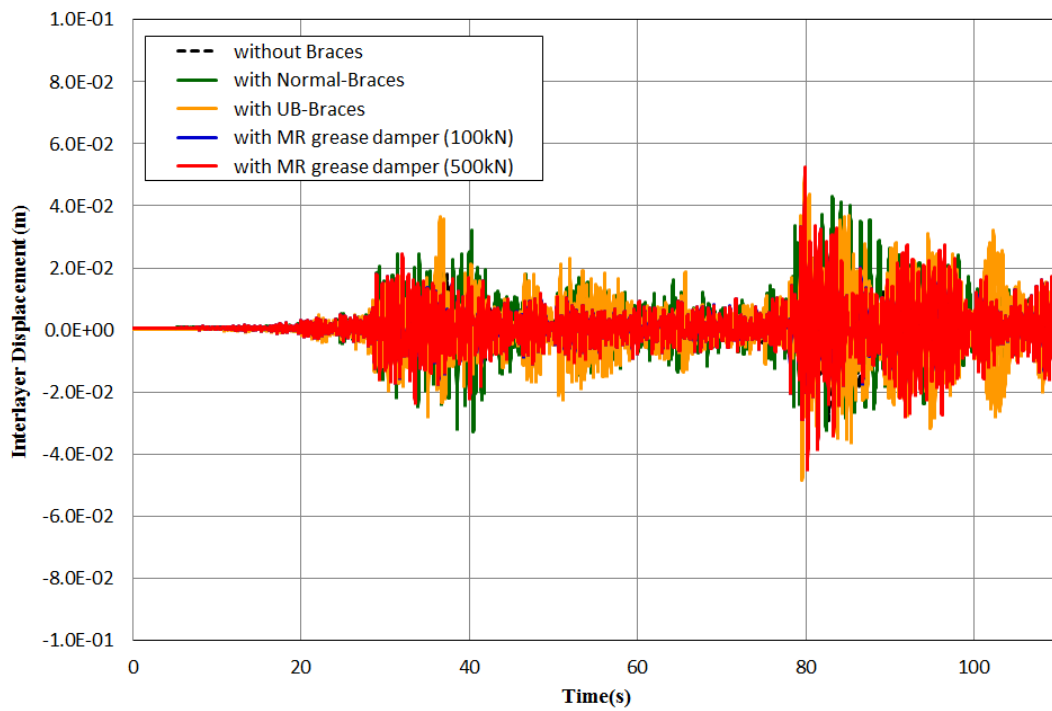


(a) 1 層

Fig.5-12 Y 方向 (EW 方向)・層間変位時刻歴応答波形 (K-NET 塩竈波)

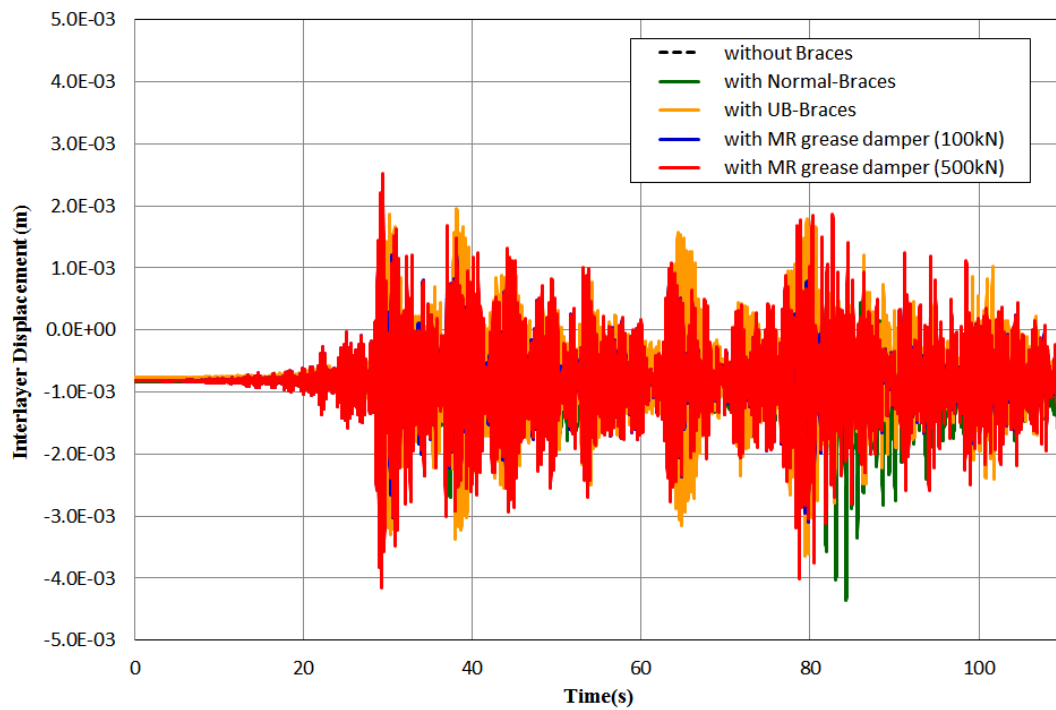


(b)2 層

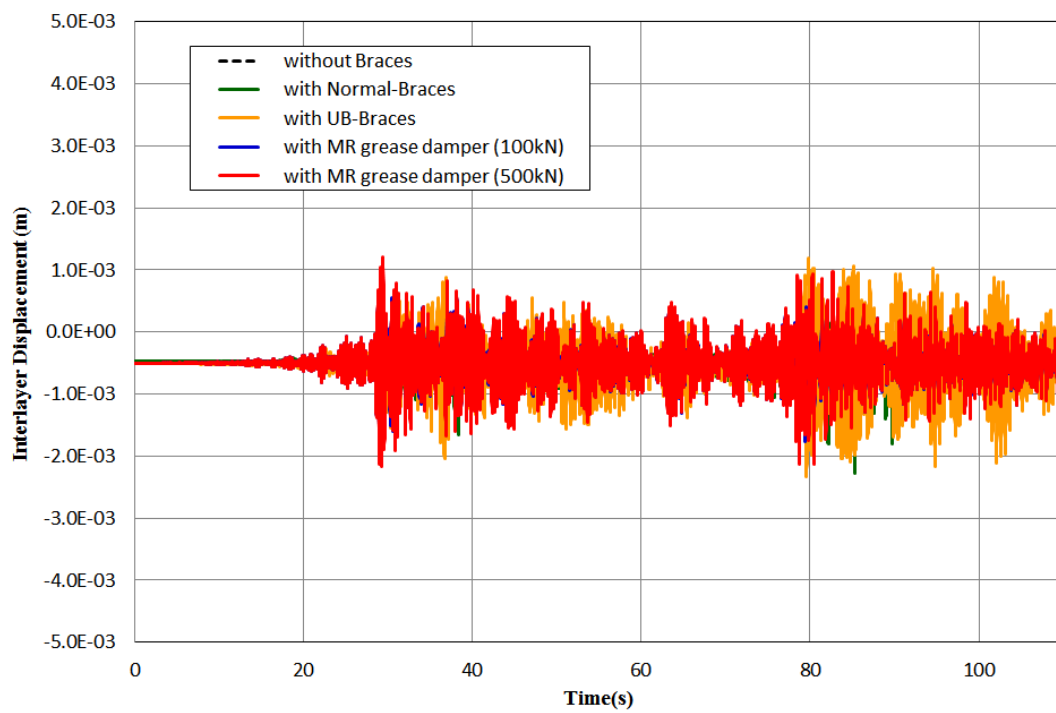


(c)3 層

Fig.5-12 Y 方向 (EW 方向)・層間変位時刻歴応答波形 (K-NET 塩竈波)

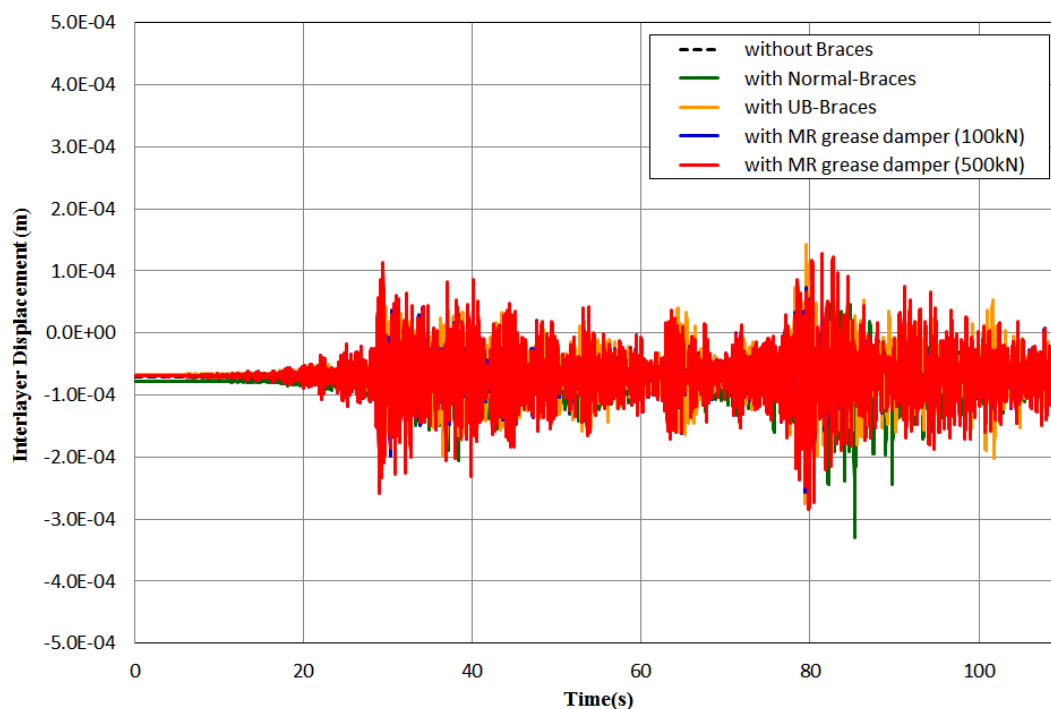


(a) 1 層



(b)2 層

Fig.5-13 Z 方向 (UD 方向)・層間変位時刻歴応答波形 (K-NET 塩竈波)



(c)3 層

Fig.5-13 Z 方向 (UD 方向)・層間変位時刻歴応答波形 (K-NET 塩竈波)

◆最大層間変位・時刻歴応答波形：K-NET 熊本波

Fig.5-14、5-15、5-16 に、それぞれ K-NET 熊本波の各方向についての層間変位の時刻歴応答波形を示す。先の 2 波と同じく、横軸は時間、縦軸は層間変位で、各ケースとも、それぞれの層で最大層間変位を示した節点の変位である。

水平 2 方向については、1、2 層で X 方向ではブレースなし、Y 方向では通常ブレースのケースで 15～25cm 程度の変位となっている。また、1 層の X 方向ではブレースなしのケースで、1 層の Y 方向、2 層の X、Y 方向では両ケースで、12s 付近で残留変位も生じている。残留変位は Y 方向が数 cm 程度と、X 方向に比べて大きな変位となっている。

これに対して、MR グリースダンパ、UB ブレースのケースでは X、Y の両方向で、ブレースなし、通常ブレースのケースに比べて、1 層では 1/10 程度、2 層でも 1/2 程度まで変位が低減している。ただし、UB ブレースケースは、1 層の両方向、2 層の Y 方向では 12s 付近で残留変位が生じている。3 層については、各ケ

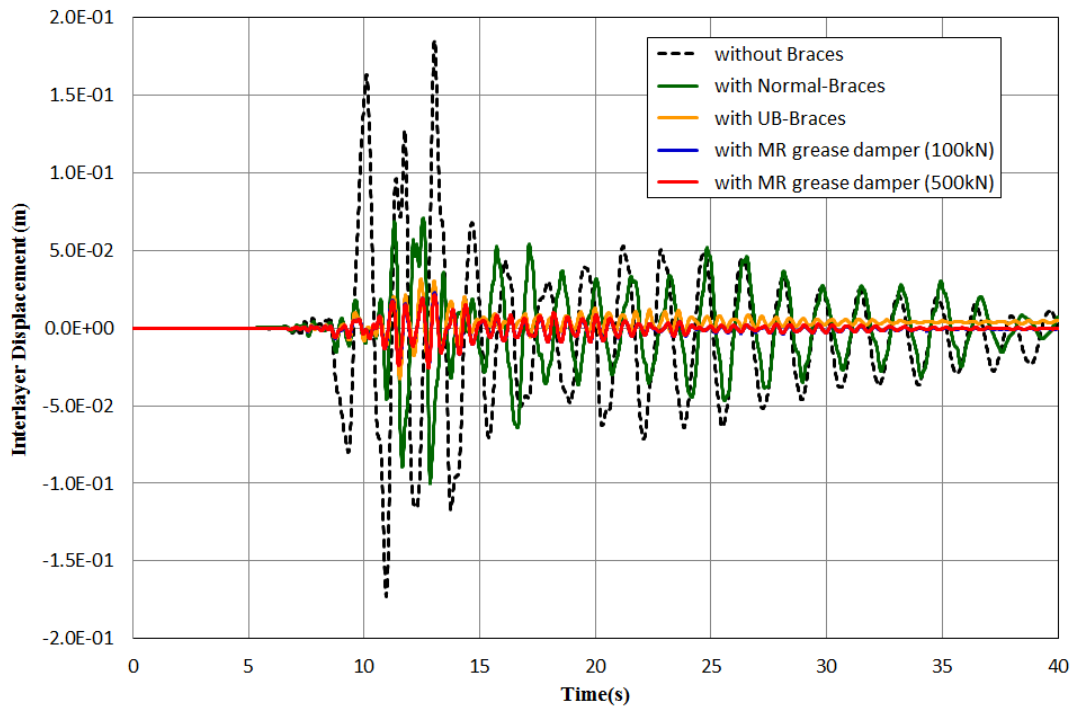
ースとも 1、2 層に比べて変位が小さい。また最大変位にも各ケース間の差が殆ど見られない。また、X 方向、Y 方向の各ケースで数 mm 程度の残留変位の発生が見られる。

Z 方向については、先の 2 波と同様に、各ケースで変位は数 mm 程度と水平方向に比べて一桁小さい値である。ブレースなし、通常ブレースのケース、また一部では UB ブレースのケースでも残留変位が生じているが、0.1mm 以下であるので有意な変位ではないと考えられる。各層で基線が最初から下向きに移動しているのは自重（重力）による変形（初期変位）のも、先の 2 波と同様である。

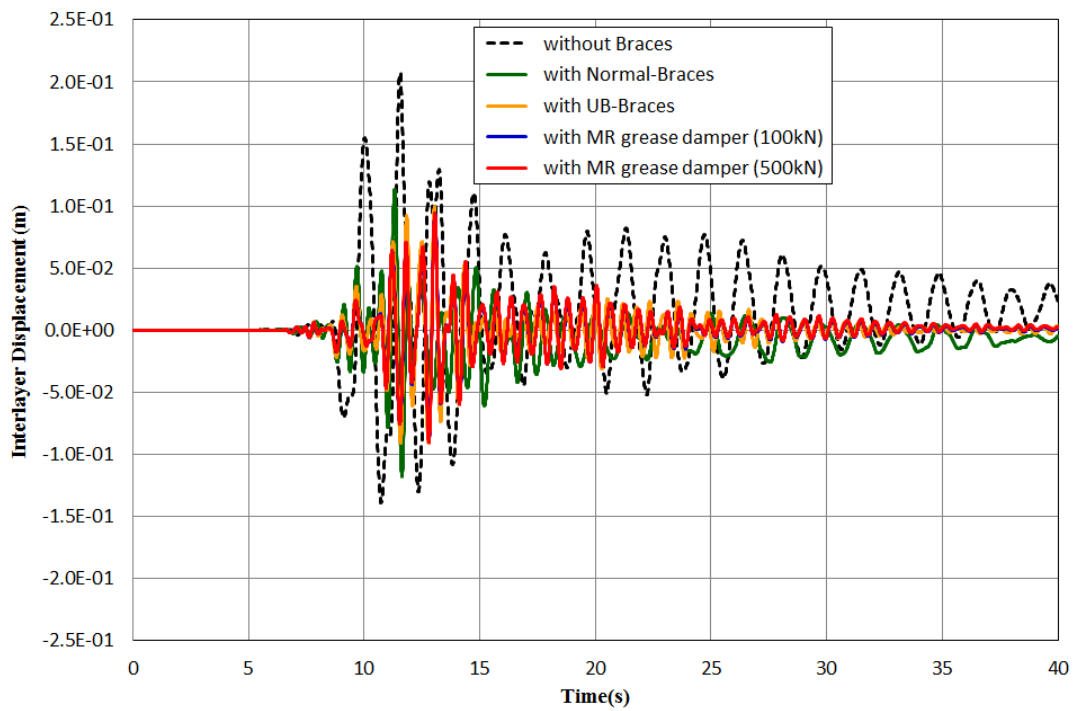
以上から、先の 2 波の結果と同様に、MR グリースダンパ、UB ブレースの設置、すなわち耐震対策を実施することで耐震性が向上したとすることができる。また、UB ブレースケースでは残留変位が生じていることから、UB ブレースケースよりも MR グリースダンパケースの方が、応答の低減効果が高いとも考えられる。

Fig.5-14、5-15、5-16 のどの方向についても、MR グリースダンパの容量による差（100kN と 500kN）は見られないことも、先の 2 波の結果と同じである。

K-NET 熊本波（熊本地震）は、揺れのピークが地震の始まりからすぐであることなどから直下型地震の特性に近い。ただし、応答の特性、例えば、1、2 層で X 方向ではブレースなし、Y 方向では通常ブレースのケースで大きな変位が生じていることなどは、プレート型地震である K-NET 塩竈波の傾向に近い。

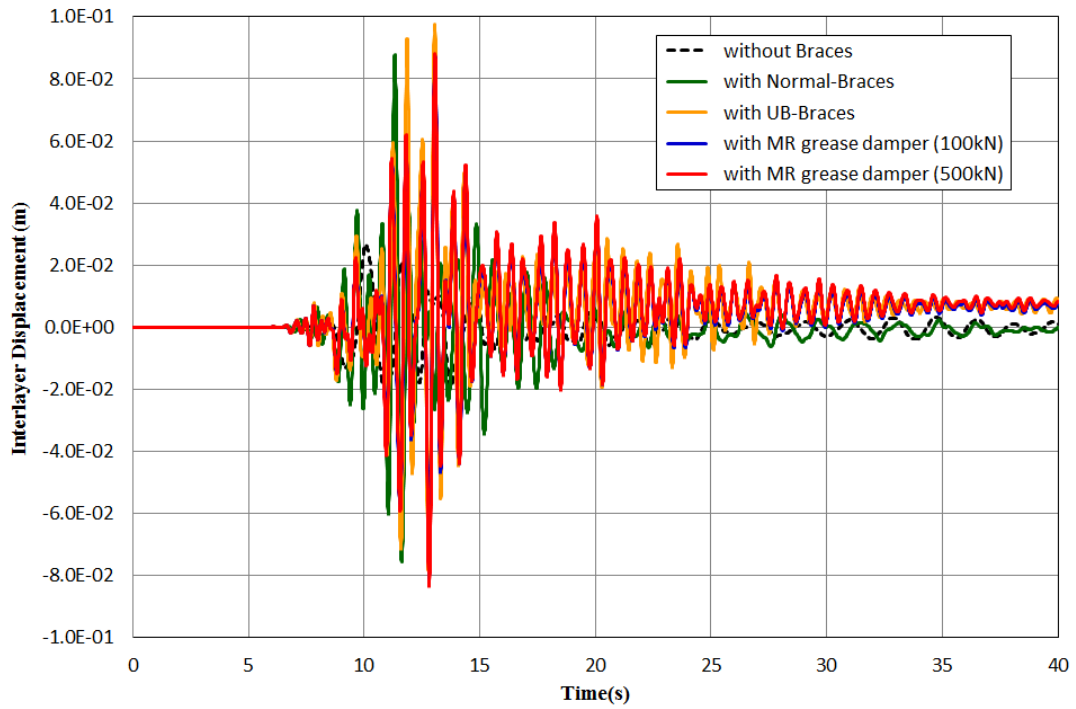


(a) 1 層



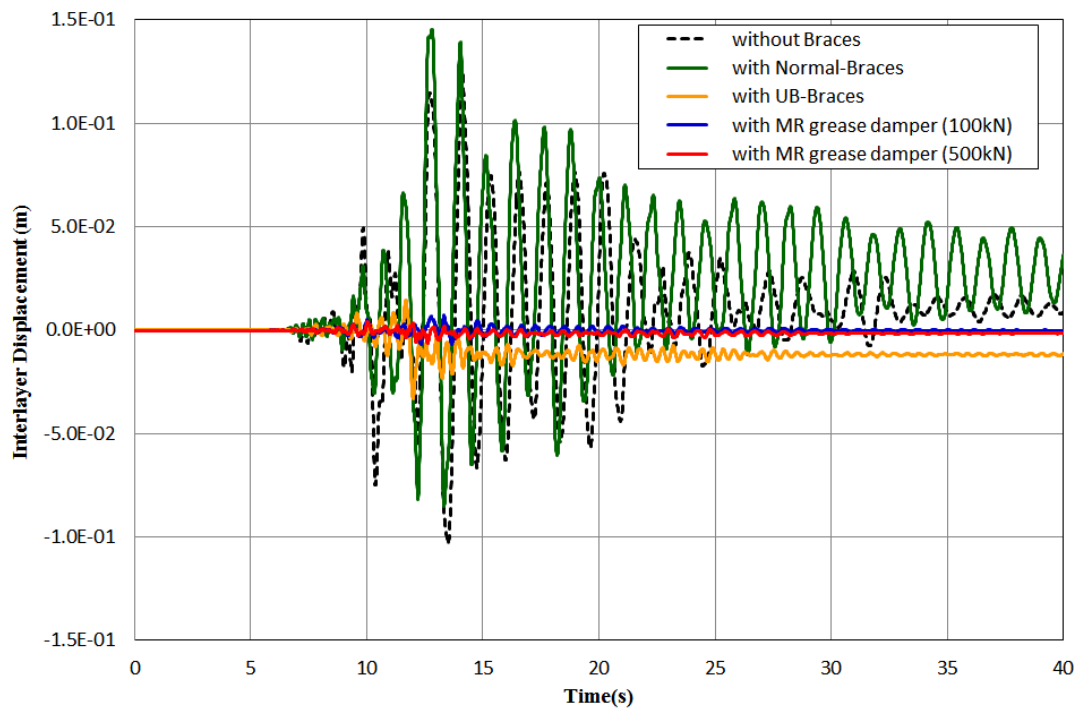
(b) 2 層

Fig.5-14 X 方向 (NS 方向)・層間変位時刻歴応答波形 (K-NET 熊本波)



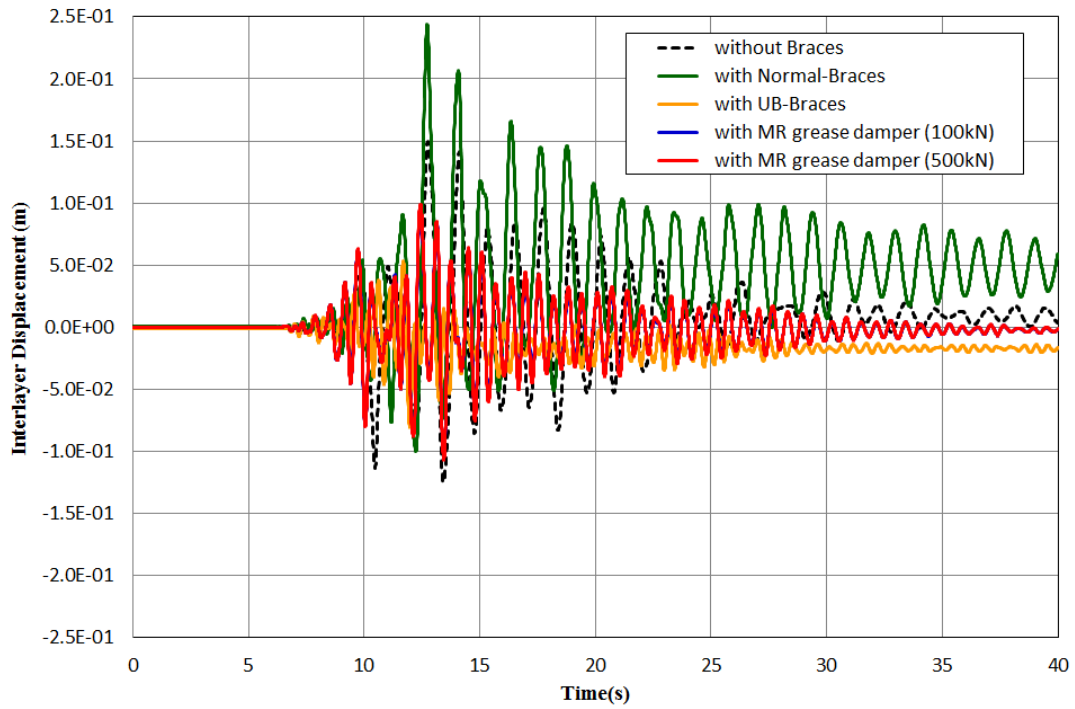
(c) 3 層

Fig.5-14 X 方向 (NS 方向)・層間変位時刻歴応答波形 (K-NET 熊本波)

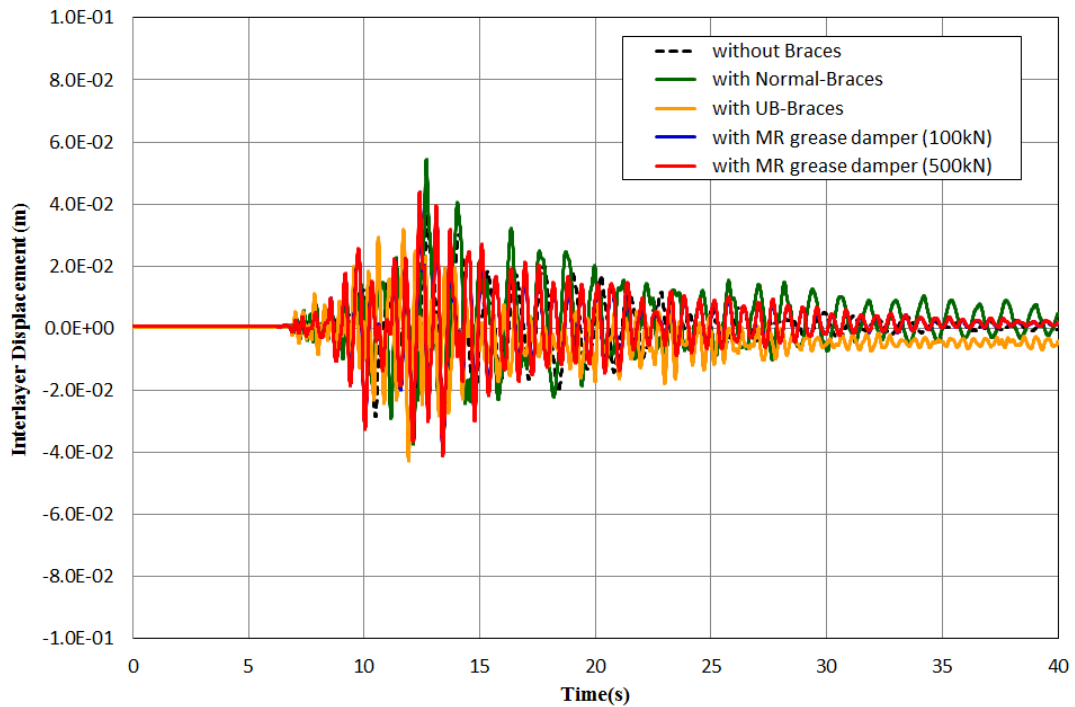


(a) 1 層

Fig.5-15 Y 方向 (EW 方向)・層間変位時刻歴応答波形 (K-NET 熊本波)

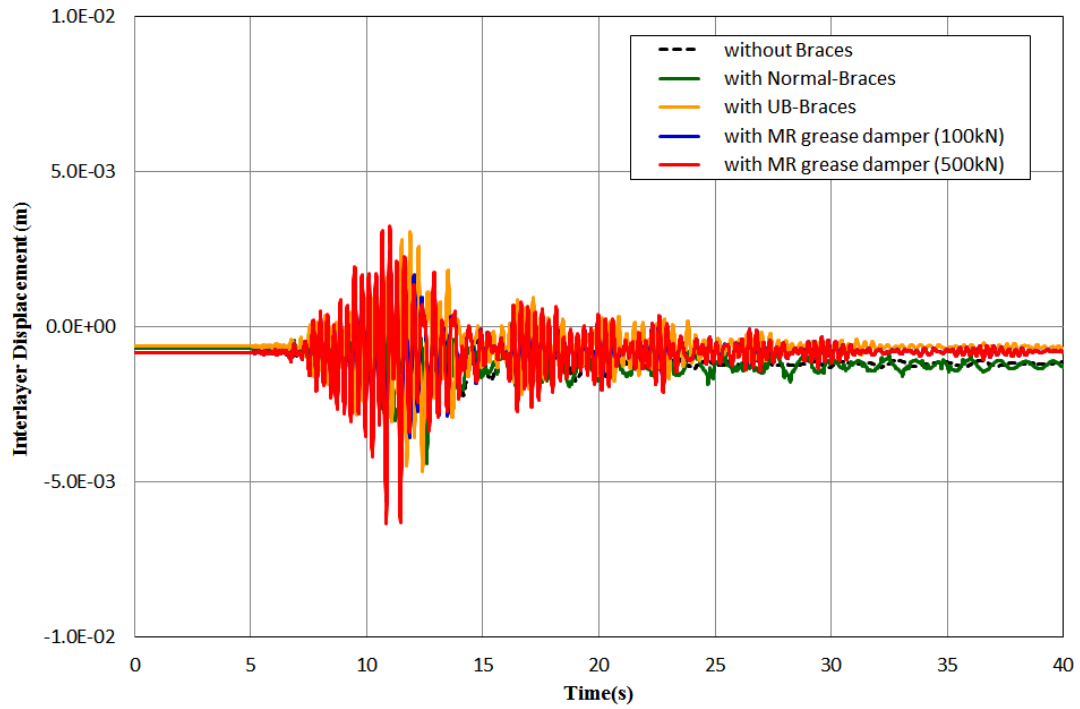


(b)2 層

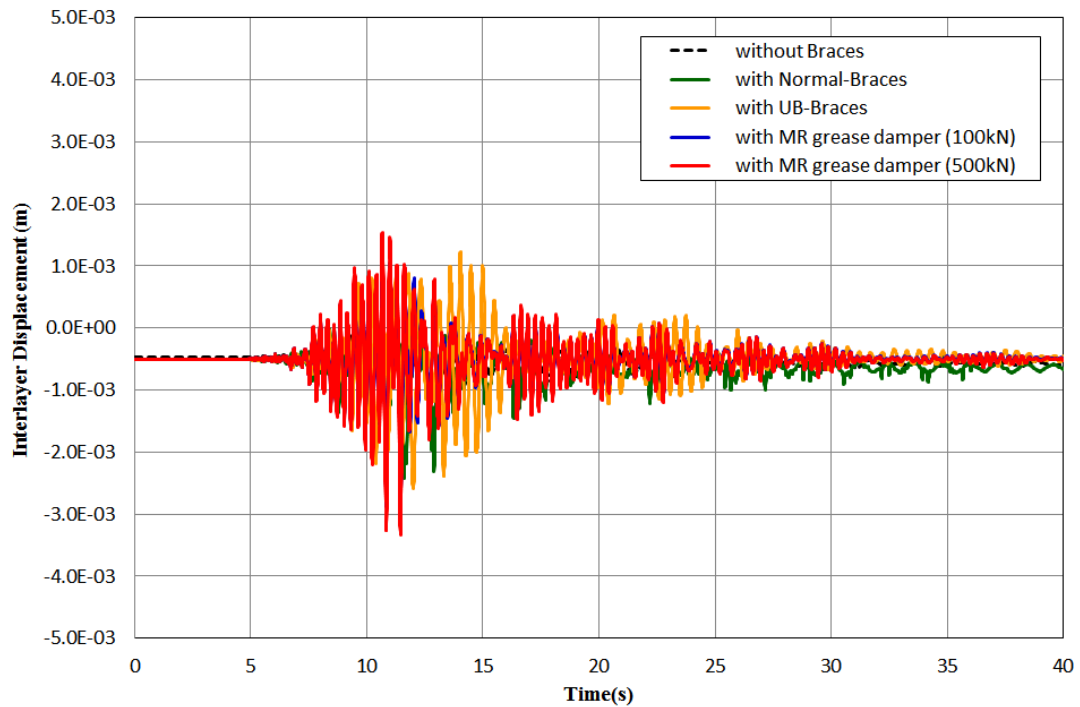


(c)3 層

Fig.5-15 Y 方向 (EW 方向)・層間変位時刻歴応答波形 (K-NET 熊本波)

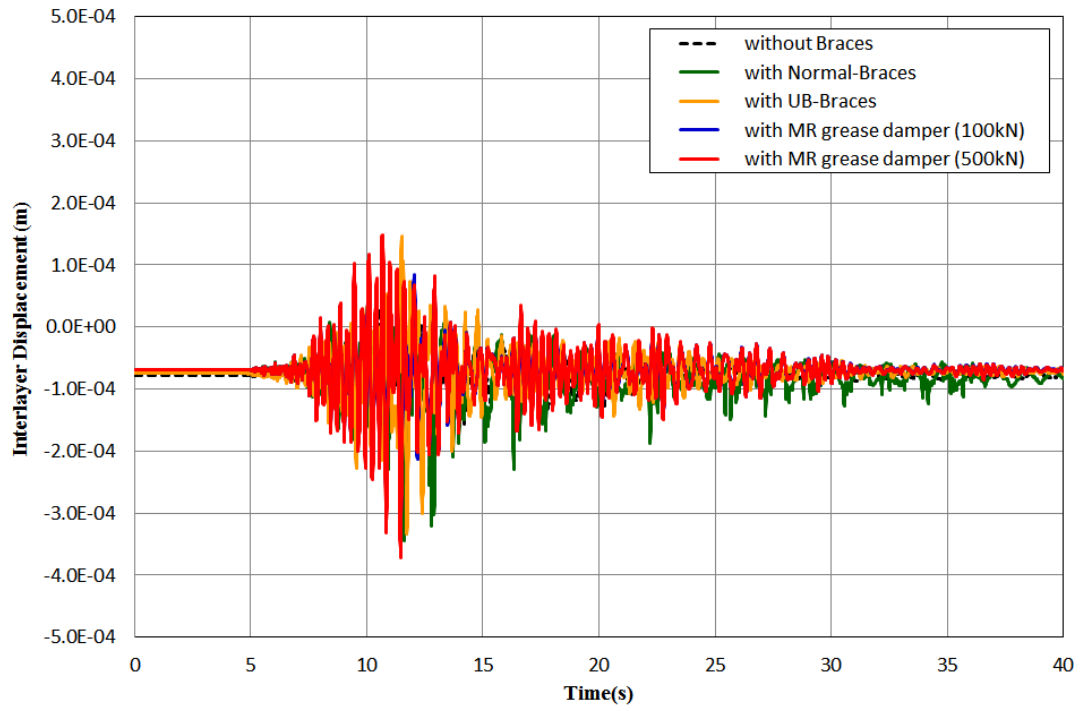


(a) 1 層



(b) 2 層

Fig.5-16 Z 方向 (UD 方向)・層間変位時刻歴応答波形 (K-NET 熊本波)



(c)3 層

Fig.5-16 Z 方向 (UD 方向)・層間変位時刻歴応答波形 (K-NET 熊本波)

◆最大層間変形角：JMA 神戸波

JMA 神戸波について、最大層間変形角をまとめたものを Fig.5-17 に X 方向 (NS 方向)、Fig.5-18 に Y 方向 (EW 方向) をそれぞれ示す。縦軸が高さで、対象とした機械棟の高さから、1 層目が 7.1m、2 層目が 14.6 m、3 層目が 19.5 m の位置である。横軸は (1) に算出式を示した層間変形角である。

また、図には ①損傷限界 (Damage limit) : 1/150、②安全限界 (Safety limit) : 1/40 の線もプロットしている。

これらの図から、まず時刻歴波形と同様に両方向 (X、Y) とも、通常ブレースのケースに比べて、UB ブレース、MR グリースダンパケースの方が概ね変位角が小さく、応答を低減する効果があると言える。ただし、3 層については必ずしも通常ブレースケースの方が大きいとは言えない。さらに通常ブレースケースよりも、ブレースなしケースの方が小さい。

MR グリースダンパケース、あるいは UB ブレースケースでは、安全限界を超えた結果にはなっていない。従って、MR グリースダンパ、あるいは UB ブレースを使うことで、JMA 神戸波に対しては、応答を塑性範囲で抑え崩壊させないようにすることができる。

次に、MR グリースダンパと UB ブレースの 2 つのケースについて結果を比べると、X 方向では MR グリースダンパケースの方が 3 割程度小さい値となっている。しかし、Y 方向では 1 層では MR グリースダンパケースの方が UB ブレースケースの 1/5 程度まで小さい値であるが、2、3 層で UB ブレースケースの小さく、特に 3 層では倍以上の数値になっている。以上のように、多少の優劣の差はあるが、構造物として重要である低層側での応答が抑えられることなどから、MR グリースダンパの方が応答を抑制する、すなわち耐震性を向上させる効果があると言える。

更に Fig.5-17、Fig.5-18 のどちらの方向についても、MR グリースダンパの容量による差 (100kN と 500kN の差) は見られない。従って、本構造物では容量の小さい 100kN でも十分な効果が得られるといえる。あるいは、更にスペック (容量、ストローク) を低くしたダンパでも同じ効果が得られるとも考えられる。

本研究の目的とは外れるが、通常ブレースケースとブレースなしケースで比較すると、通常ブレースケースの層間変形角が大きい。すなわち、応答が大きいという結果となっていることもわかる。

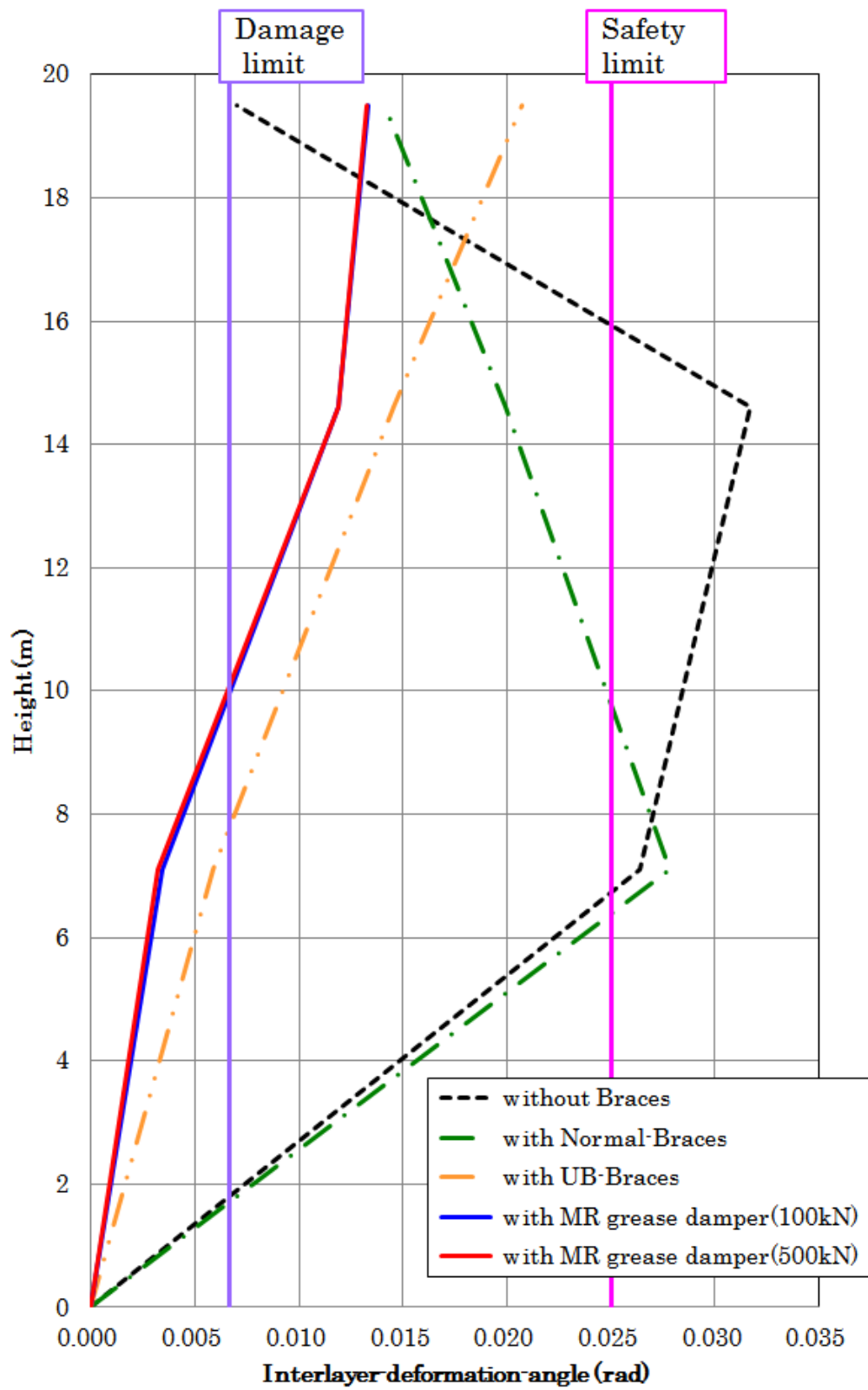


Fig.5-17 X方向 (NS方向)・最大層間変形角 (JMA 神戸波)

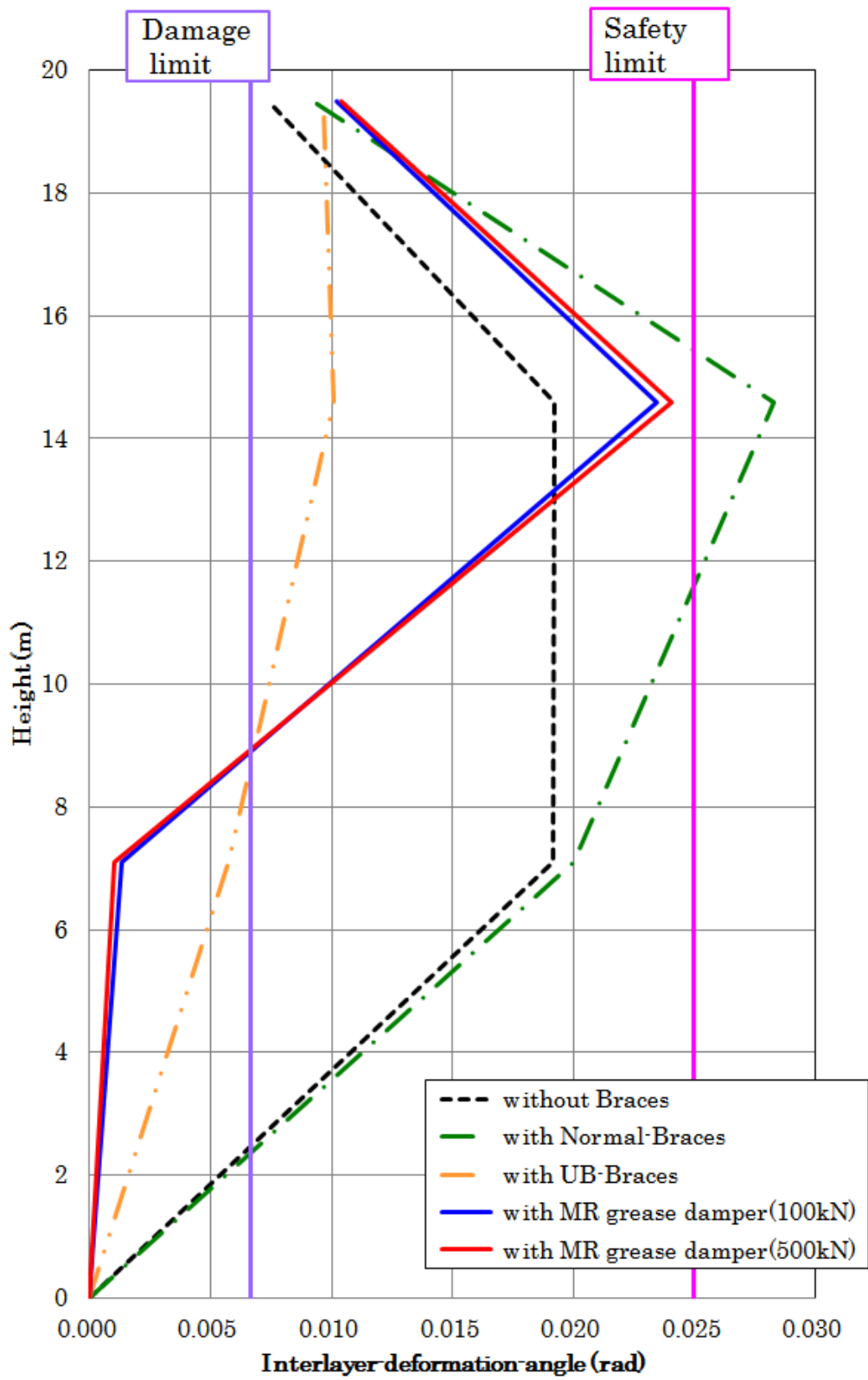


Fig.5-18 Y方向 (EW方向)・最大層間変形角 (JMA 神戸波)

次に、K-NET 塩竈波について、Fig.5-19 に X 方向（NS 方向）、Fig.5-20 に Y 方向（EW 方向）をそれぞれ示す。JMA 神戸波と同じく、縦軸が高さ、横軸は層間変形角で、①損傷限界（Damage limit）：1/150、②安全限界（Safety limit）：1/40 もプロットしている。

図から、JMA 神戸波と同様に両方向（X、Y）とも、通常ブレースケースに比べて、UB ブレースケース、MR グリースダンパケースの方が 1、2 層で概ね変位角が小さく、応答を低減する効果があると言える。ただし、3 層については必ずしも通常ブレースケースの方が大きいとは言えない。さらに通常ブレースケースよりも、ブレースなしケースの方が小さい。

次に、MR グリースダンパと UB ブレースの両ケースを比べると、X 方向の 1 層では、通常ブレースケースに対して MR グリースダンパケースが 1/3、UB ブレースケースが 1/2 と MR グリースダンパケースの方が 2～3 割小さい結果となっており、MR グリースダンパの効果が高い。Y 方向では、同じく通常ブレースケースに対して MR グリースダンパケースが 1 層で 1/10、2 層で 2/3、UB ブレースケースが 1 層で 1/5、2 層 1/2 と、1 層では MR グリースダンパの大きな効果が、2 層では UB ブレースの効果が多少高いという結果になっている。3 層では、両ケースとも概ね同じ数値になっている。以上から全体でみれば、MR グリースダンパの方が大きな効果が得られるという結果となる。

Fig.5-19、5-20 のどちらの方向についても、MR グリースダンパの容量による差は見られないことも、JMA 神戸波と同様である。

通常ブレースケースとブレースなしケースで比較については、JMA 神戸波の結果と異なり、Fig.5-19 の X 方向では、1、2 層で通常ブレースケースの層間変形角が小さい結果になっている。Y 方向（Fig.5-20）については、ブレースなしケースの層間変形角が小さい。

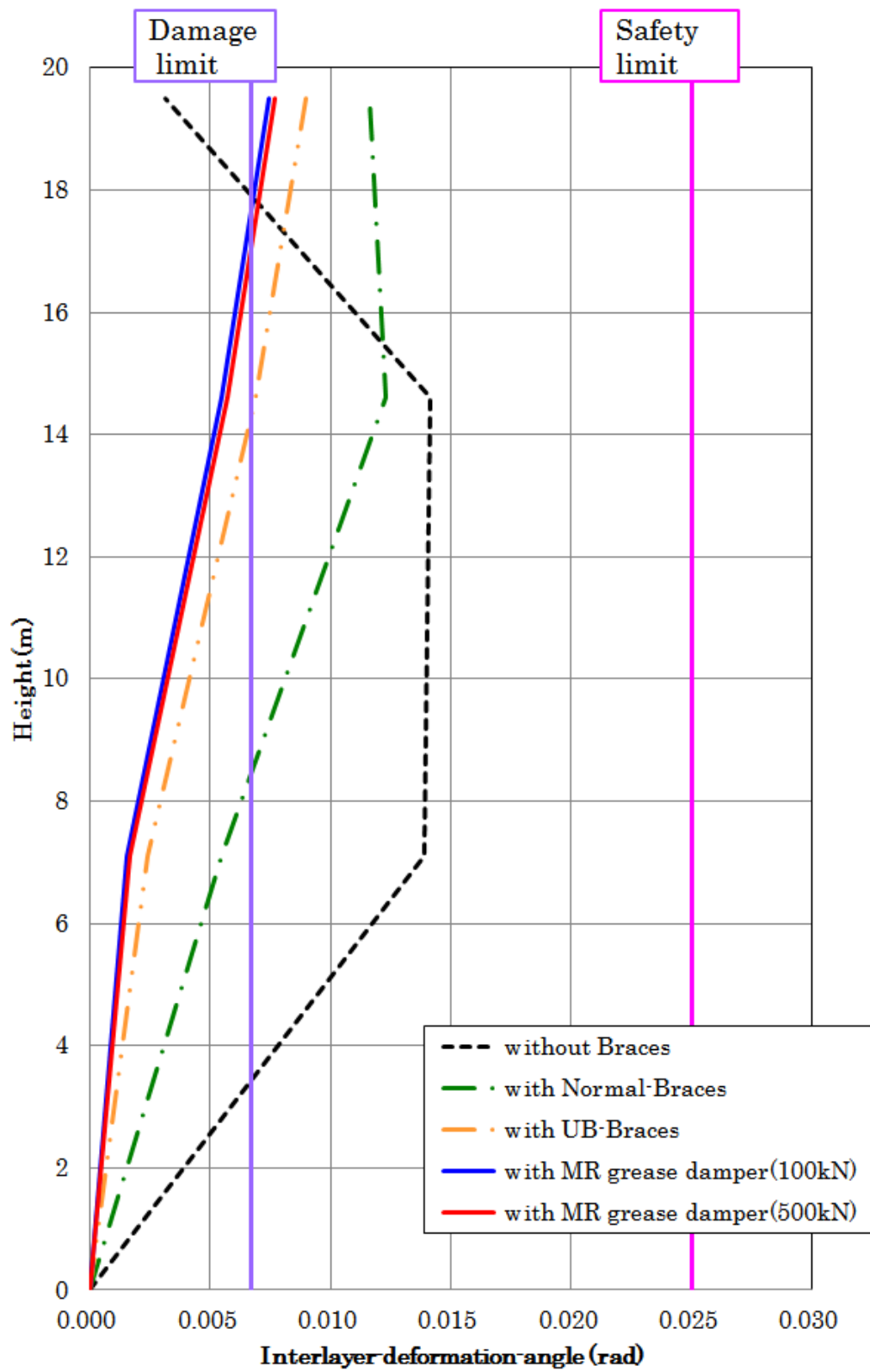


Fig.5-19 X方向 (NS方向)・最大層間変形角 (K-NET 塩竈波)

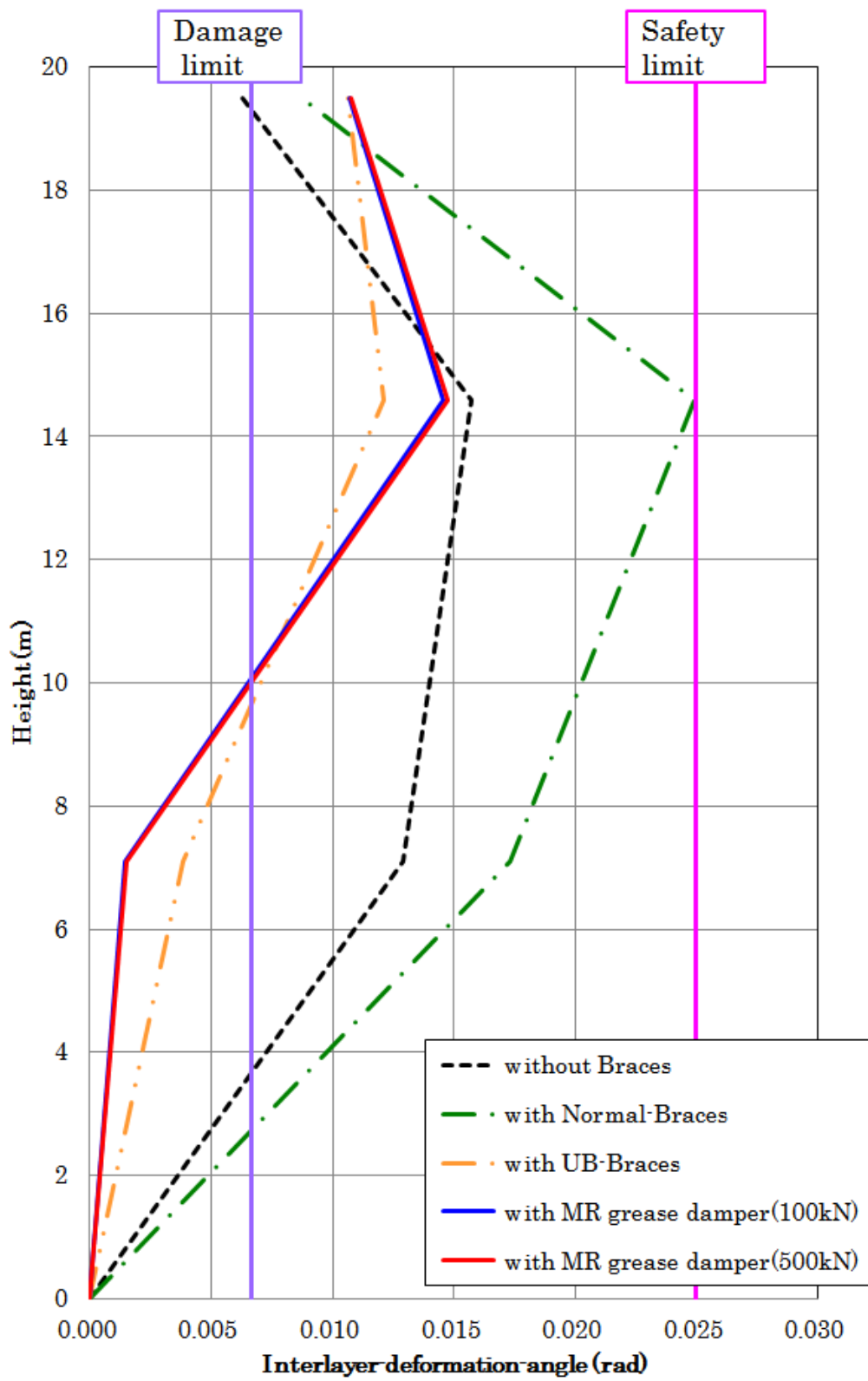


Fig.5-20 Y方向 (EW方向)・最大層間変形角 (K-NET 塩竈波)

K-NET 熊本波について、Fig.5-21 に X 方向 (NS 方向)、Fig.5-22 に Y 方向 (EW 方向) をそれぞれ示す。先の 2 波と同じく、縦軸が高さ、横軸は層間変形角で、① 損傷限界 (Damage limit) : 1/150、② 安全限界 (Safety limit) : 1/40 もプロットしている。

図から、2 波と同様に両方向 (X、Y) とも、通常ブレースケースに比べて、UB ブレースケース、MR グリースダンパケースの方が 1、2 層で変位角が小さく、応答を低減する効果があると言える。ただし、3 層については必ずしも通常ブレース、ブレースなしケースの方が大きいとは言えない。さらに通常ブレースケースよりも、ブレースなしケースの方が小さい。

MR グリースダンパと UB ブレースの両ケースを比べると、X 方向の 1 層では、通常ブレースケースに対して MR グリースダンパケースが 1/4、UB ブレースケースが 1/3 と MR グリースダンパの効果が高い。Y 方向では、同じく通常ブレースケースに対して MR グリースダンパケースが 1 層で 1/20、2 層で 1/2、UB ブレースケースが 1 層で 1/4、2 層 1/3 と、1 層では MR グリースダンパの大きな効果が、2 層では UB ブレースが多少効果が高いという結果になっている。以上から全体でみれば、MR グリースダンパの方が大きな効果が得られるという結果となる。

また、先の 2 波と同じく、Fig.5-21、5-22 のどちらの方向についても、MR グリースダンパの容量による差は見られない

通常ブレースケースとブレースなしケースで比較については、K-NET 塩竈波の結果と同様に、Fig.5-21 の X 方向では、1、2 層で通常ブレースケースの層間変形角が小さく、Y 方向 (Fig.5-22) については、ブレースなしケースの層間変形角が小さい。

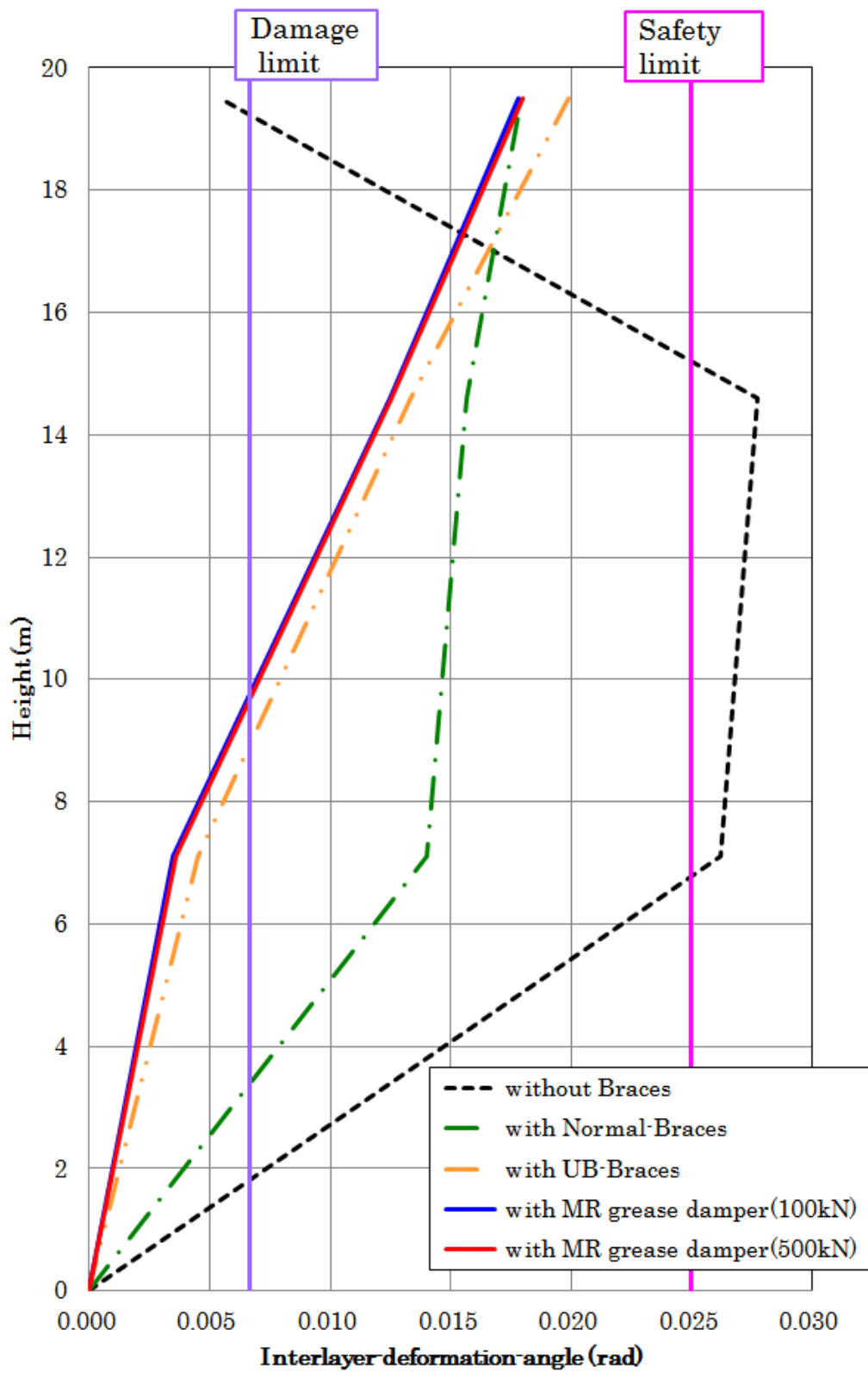


Fig.5-21 X方向 (NS方向)・最大層間変形角 (K-NET 熊本波)

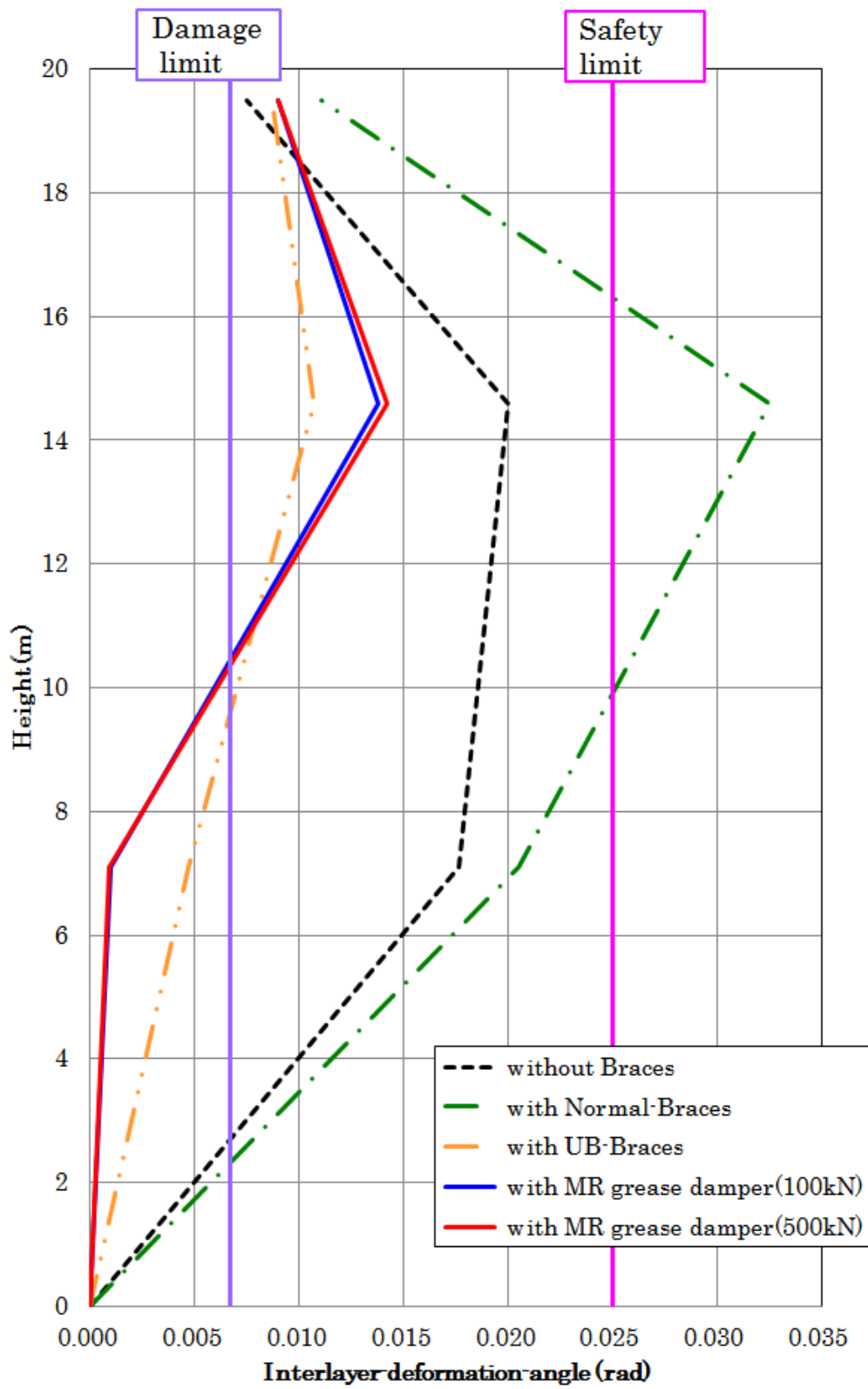


Fig.5-22 Y方向 (EW 方向)・最大層間変形角 (K-NET 熊本波)

(3) まとめ

実在の機械棟を対象に、MR グリースダンパによる耐震効果の確認を、

- ・ 通常ブレース : 現状、通常タイプのブレースを設置 (基本状態)
- ・ ブレースなし : 鉄骨骨組みのみ
- ・ UB ブレース : 通常タイプのブレースに代えて UB ブレースを設置

の 3 ケースと比較した。

具体的には

(A) JMA 神戸波、 (B) K-NET 塩竈波、 (C) K-NET 熊本波

の 3 種の地震波による応答解析を行った。

その結果を以下にまとめる。

- ① 水平 2 方向について、1、2 層では、ブレースなし、通常ブレースのケースに比べて、MR グリースダンパ、UB ブレースのケースでは応答を最大で 1/10 程度まで低減することが可能で、MR グリースダンパ、UB ブレース設置による耐震性向上の効果が認められる。
- ② MR グリースダンパと、UB ブレースのケースとを比較すると、応答低減効果の大小は地震波、層によって変わり、優劣が明確ではない。ただし、残留変位について、UB ブレースのケースの結果では発生数が多く、その点からは、MR グリースダンパが優れていると言える。
- ③ さらに、MR グリースダンパと、UB ブレースのケースの結果の比較で、残留変位について MR グリースダンパでの発生数が少ないことは、最近の地震で顕著な「大きな余震」、つまり震度の大きな地震が繰り返し襲来することへの対策として、MR グリースダンパの優位点であると考えられる。
- ④ 上下方向については、MR グリースダンパケースだけでなく、UB ブレースケースでもブレースなし、通常ブレースのケースに比べて、応答低減が確認できなかった。
- ⑤ 各ケースの結果から本研究で対象とした機械棟、地震波では、MR グリースダンパの容量による差 (100kN と 500kN) は見られなかった。

6. 地震応答解析結果の考察

5章で行った MR グリースダンパの耐震デバイスとしての検討のための地震応答解析結果について、本章で考察を行う。

ただし、5.4節の結果で、MR グリースダンパの容量について 100kN と 500kN とで殆ど差が見られなかったことから、本節で用いる MR グリースダンパの結果は 100kN のデータのみとする。

また、6.2節以降は、被害の大きい、言い換えると応答が大きい、JMA 神戸波について、考察、検討を行った。

6.1 被害評価の詳細

5.4節で実施した最大層間変形角による評価を、より詳細に検討する。

先に示した建築基準法の鉄骨造における層間変形角の基準値である

- ① 損傷限界（1次設計）：1/150
- ② 安全限界（2次設計）：1/40

に対して、層間変形角で設定される詳細な損傷区分を Table 6-1 に示す。

この表の区分を基に詳細な被害判定、さらには MR グリースダンパの効果を検討した。

Table 6-1 今回適用した評価基準（鉄骨造についての基準）

層間変形角	被害程度（状況）	使用可否
—	無被害（No damage）	機能維持 （修復不要）
	軽微な被害（No damage） （目立たないひび割れ等）	主要機能確保 （軽微な補修、継続使用可）
1/150(=0.0067) 以上	小破（Slight damage） （軽微なひび割れ）	指定機能確保 （小規模の修復で、ほぼ機能回復）
1/100(=0.0067) 以上	中破（Moderate damage） （比較的大きなひび割れ）	限定的な機能維持 （構造体の応急補強・補修が必要、中規模の補修後に使用可）
1/80(=0.0125) 以上	大破（Serious damage） （亀裂発生、壁面の剥落等）	人命保護 （使用困難、大規模な補強、補修が必要、もしくは解体）
1/40(=0.025) 以上	崩壊（Collapse）	解体、撤去

損傷限界

安全限界

◆JMA 神戸波の結果

JMA 神戸波の結果を前ページの Table 6-1 に示した評価基準に基づいて、各層の詳細な被害状況を記した図を Fig.6-1、6-2 に示す。Fig.6-1 が、最大加速度の大きい（818gal）NS 方向の波を入力した X 方向、Fig.6-2 が、EW 方向の波を入力した Y 方向の結果である。

図には、各ケースについて各層ごとに被害判定を示している。それぞれ、上段に被害判定、下段に最大層間変形角（括弧付き数値）を示している。

Fig.6-1 から、X 方向については、ブレースなしケースでは下側の 2 つの層、通常ブレースケースでは 1 層が安全限界（2 次設計）を超えた値、すなわち“崩壊（Collapse）”となっている。さらに通常ブレースケースでは、2、3 層が“大破（Serious damage）”となっており、通常ブレースだけでは被災を免れることはできず、耐震性の観点からは対策が必要と言える。

UB ブレースケースと MR グリースダンパケースについては、1 層は“軽微な被害（No damage）”で損傷限界（1 次設計）をこえておらず弾性範囲内に収まっているが、2、3 層は損傷が生じる状況となっている。ただし、どちらも大破以下で人命保護は確保されている結果となった。特に MR グリースダンパケースでは、2 層目は“中破（Moderate damage）”で、3 層だけが“大破”と、UB ブレースケースに比べて被害状況が緩やかである。このことから、MR グリースダンパの方が UB ブレースより耐震効果が高いと言える。

Fig.6-2 から、Y 方向については、ブレース無し、通常ブレースの両ケースで 1、2 層の被害が大きいこと、UB ブレースケースと MR グリースダンパケースについては、1 層は“軽微な被害（Slight damage）”で損傷限界（1 次設計）を超えていないこと等、傾向としては X 方向と同様である。しかし、被害状況は、X 方向に比べて大きくない。例えば“崩壊”と判定されるのは、通常ブレースケースの 2 層だけである。これは、JMA 神戸波の Y 方向の入力波（EW 方向波）の振幅が、X 方向（NS 方向波）に比べて小さいことによると考えられる。

また、全体的に X 方向に比べると 2 層の被害が大きい。これは、Y 方向は X 方向に比べて、ブレース、あるいはダンパが少ないことによる。

この 2 層については、MR グリースダンパケースよりも UB ブレースケースの耐震効果が高いように見える。これは、MR グリースダンパケースの 2 層の Y 方向が、MR グリースダンパが設置できずに通常ブレースのままであるのに対して、

UB ブレースケースでは、2 層の Y 方向も通常ブレースから UB ブレースに換えている。この影響によるものと考えられる。

3 層については Y 方向にブレース、ダンパは無いものの、1、2 層より高さも低く、面積、質量も小さいため、応答、変形が小さくなる。

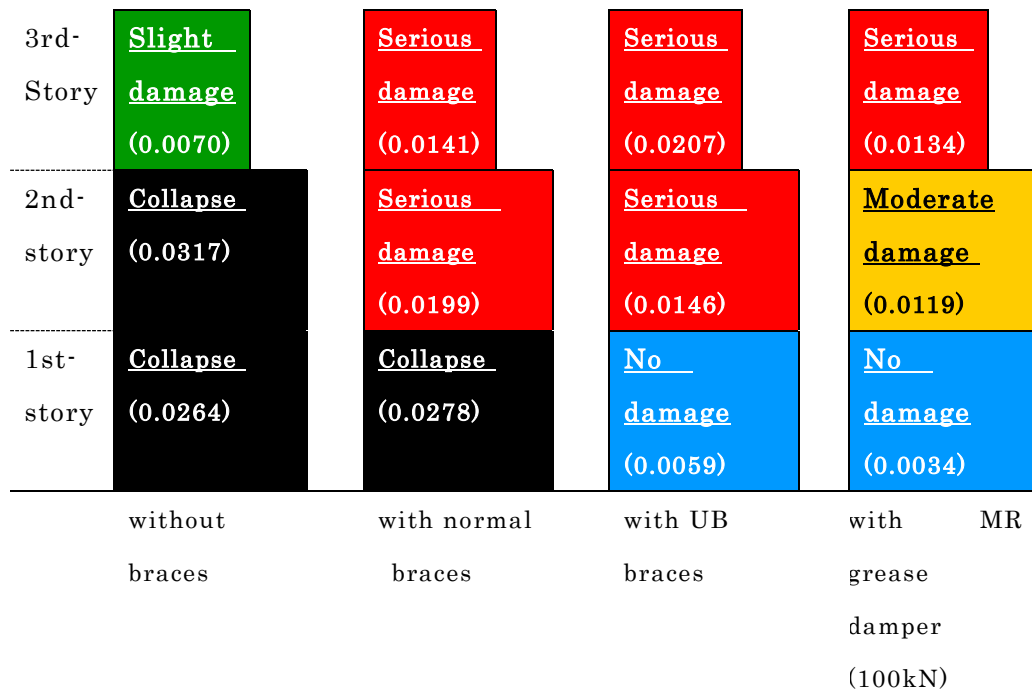


Fig.6-1 JMA 神戸波・X 方向（NS 方向波入力）の被害状況
（上段：被害状況、下段：層間変形角）

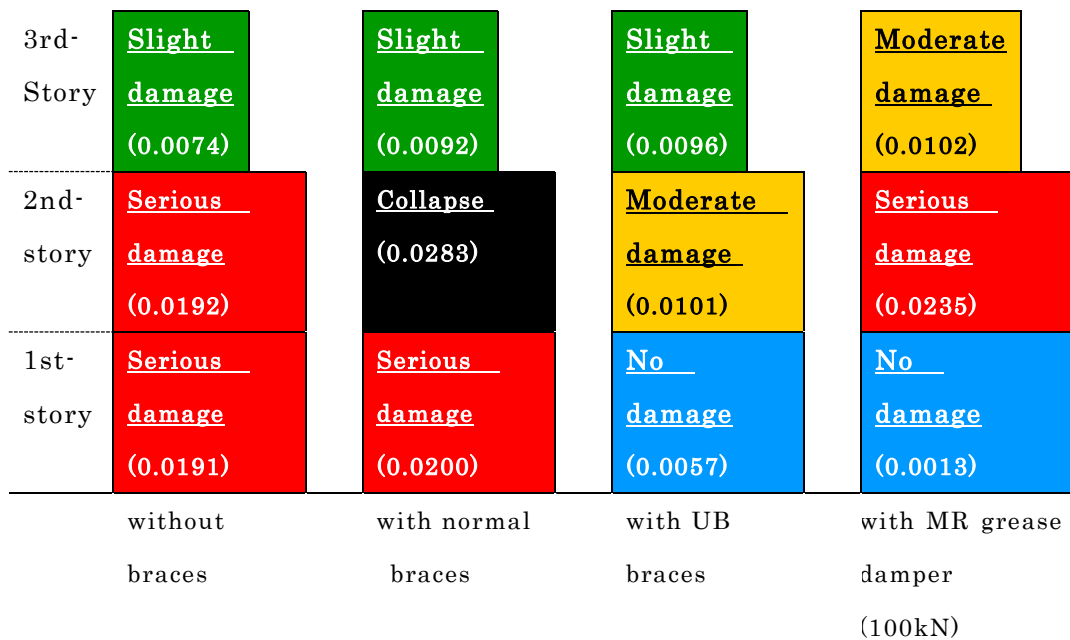


Fig.6-2 JMA 神戸波・Y 方向（EW 方向波入力）の被害状況
（上段：被害状況、下段：層間変形角）

◆K-NET 塩竈波の結果

K-NET 塩竈波について、各層の詳細な被害状況を記した図を Fig.6-3、6-4 に示す。Fig.6-3 が、NS 方向の波を入力した X 方向、Fig.6-4 が、EW 方向の波を入力した Y 方向の結果である。JMA 神戸波の図と同様に、各ケースについて各層ごとに被害判定を示している。それぞれ、上段に被害判定、下段に最大層間変形角（括弧付き数値）を示している。

Fig.6-3 から、X 方向については、ブレースなしケースでは、下側の 2 つの層が“大破”となっていることがわかる。他の 3 つのケースでは 1 層が“軽微な被害”で、2 層が通常ブレースケースでは“中破”、UB ブレースケースでは“小破”、MR グリースダンパケースでは“軽微な被害”となっている。このことから、MR グリースダンパ、UB ブレース、通常ブレースの順で耐震性が高いと言える。けれども実際の層間変形角を見ると、MR グリースダンパケースと UB ブレースケースとは僅差であるのに対して、UB ブレースケースと通常ブレースケースでは倍近い差がある。通常ブレースケースは“大破”に近い“中破”であることから、JMA 神戸波の結果と同様に、耐震性の観点からは MR グリースダンパ、UB ブレースの設置といった対策が必要と言える。

UB ブレースケースと MR グリースダンパケースとを比べると、1 層、3 層の被害状況は同じであるが、2 層でそれぞれ“小破”、“軽微な被害”と差が見られることから、MR グリースダンパの方が UB ブレースより耐震効果があると考えられることができる。

3 層については、ブレースなしケースだけが“軽微な被害”と、最も被害レベルが低い。JMA 神戸波の結果も同様である。これは、ブレースなしケースでは 1、2 層の剛性が 3 層の剛性より相対的に低く、そのために大きな応答（被害）が生じることで、3 層への地震エネルギーの伝達が小さくなるためと考えられる。しかし、1、2 層が“大破”、“崩壊”の被害状況では、3 層も無事ではないので、実質的には“軽微な被害”とは見なせない。

Fig.6-4 から、Y 方向については、1 層が“軽微な被害”、2、3 層が“中破”の UB ブレースケースが最も被害レベルが低い結果となっており、MR グリースダンパケースよりも UB ブレースケースの耐震効果が高いように見える。特に 2 層では被害状況に差が生じている。これは JMA 神戸波の結果と同じく、MR グリースダンパケースの 2 層が通常ブレースのままであることによると考えられる。

1 層は、同じ“軽微な被害”ながら、層間変形角の数値は MR グリースダンパケースの方が低く、上記の MR グリースダンパケースの 2 層の状況を加味すると、MR グリースダンパの方が UB ブレースより耐震効果がある言うことができると考える。

全体的に X 方向に比べると 2 層の被害が大きいのは、JMA 神戸波の結果と同じく、Y 方向は X 方向に比べて、ブレース、あるいはダンパが少ないことによると考えられる。

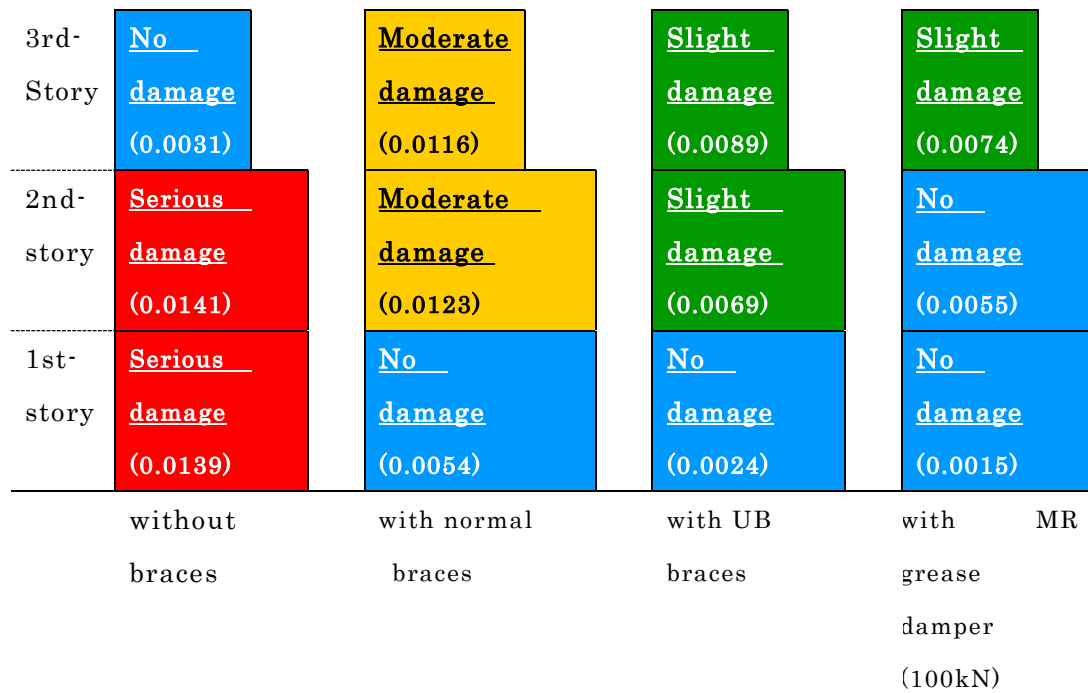


Fig.6-3 K-NET 塩竈波・X 方向（NS 方向波入力）の被害状況
（上段：被害状況、下段：層間変形角）

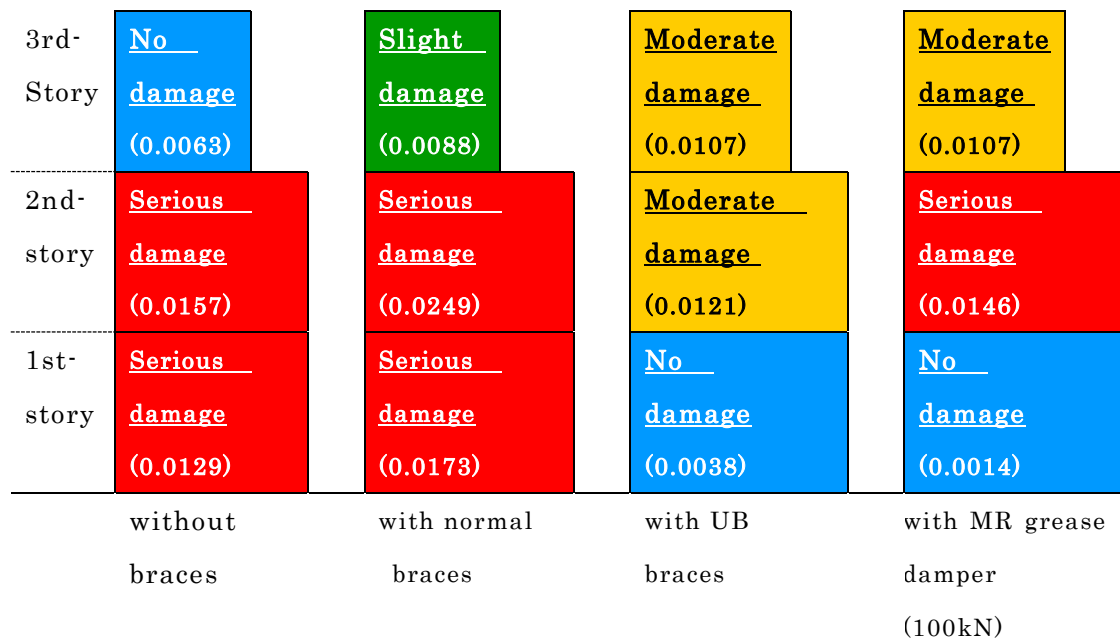


Fig.6-4 K-NET 塩竈波・Y 方向（EW 方向波入力）の被害状況
（上段：被害状況、下段：層間変形角）

◆K-NET 熊本波の結果

K-NET 熊本波について、各層の詳細な被害状況を記した図を Fig.6-5、6-6 に示す。Fig.6-5 が、NS 方向の波を入力した X 方向、Fig.6-6 が、EW 方向の波を入力した Y 方向の結果である。先の 2 波と同様に、各ケースについて各層ごとに被害判定を示しており、それぞれ、に上段が被害判定、下段が最大層間変形角（括弧付き数値）を示している。

Fig.6-5 から、X 方向については、ブレースなしケースでは下側の 2 つの層が“崩壊”、通常ブレースケースは全層が“大破”となっている。従って、通常ブレースの使用では、最低限の人命保護はできるが、構造物の被災を免れることはできず、耐震性の観点からは十分な対策とは言い難い。

UB ブレースケースと MR グリースダンパケースについては、1 層は“軽微な被害”で損傷限界（1 次設計）をこえておらず弾性範囲内に収まっているが、2、3 層は損傷が生じる状況となっている。UB ブレースケースでは 2、3 層で“大破”の状況であるのに対して、MR グリースダンパケースでは、2 層目は“中破”で、3 層だけが“大破”と、UB ブレースケースに比べて被害が軽くなっている。このことから、MR グリースダンパの方が UB ブレースより耐震効果が高いと言えることができる。

Fig.6-6 から、Y 方向では、ブレースなし、通常ブレースの両ケースで 1、2 層の被害が大きいこと、UB ブレースケースと MR グリースダンパケースについては、1 層は“軽微な被害”であること等、傾向としては X 方向と同様であるが、被害状況は、X 方向に比べて大きくない。例えば“崩壊”と判定されるのは、通常ブレースケースの 2 層だけである。

UB ブレースと MR グリースダンパのケースとを比べると、2 層について MR グリースダンパケースの方が“大破”で被害が重い。これは、前述のように、MR グリースダンパケースの 2 層が通常ブレースのままであることによると考えられる。従って、これを理由に、UB ブレースの方が MR グリースダンパより耐震効果が高いということとはできない。

3 層については Y 方向にブレース、ダンパは無いものの、1、2 層より高さも低く、面積、質量も小さいため、応答、変形が小さくなる。

3 波のケースを比べると、多少の被害の差はあるが、JMA 神戸波と K-NET 熊

本波の結果（被害状況）の傾向は近く、K-NET 塩竈波は異なった傾向を示している。また、これらの結果から、耐震対策である UB ブレース、MR グリースダンパを設置した方が被害が軽く、効果があることが分かる。

また、UB ブレースと MR グリースダンパとを比べると、その地震波、方向、あるいは層により差の大小はあるが、MR グリースダンパの耐震効果が高いと言える。解析結果に見られる方向、層による応答の差、あるいは被害状況の差については、入力波（地震波）の卓越振動数と固有振動数の違いやダンパ配置などの影響が考えられる。

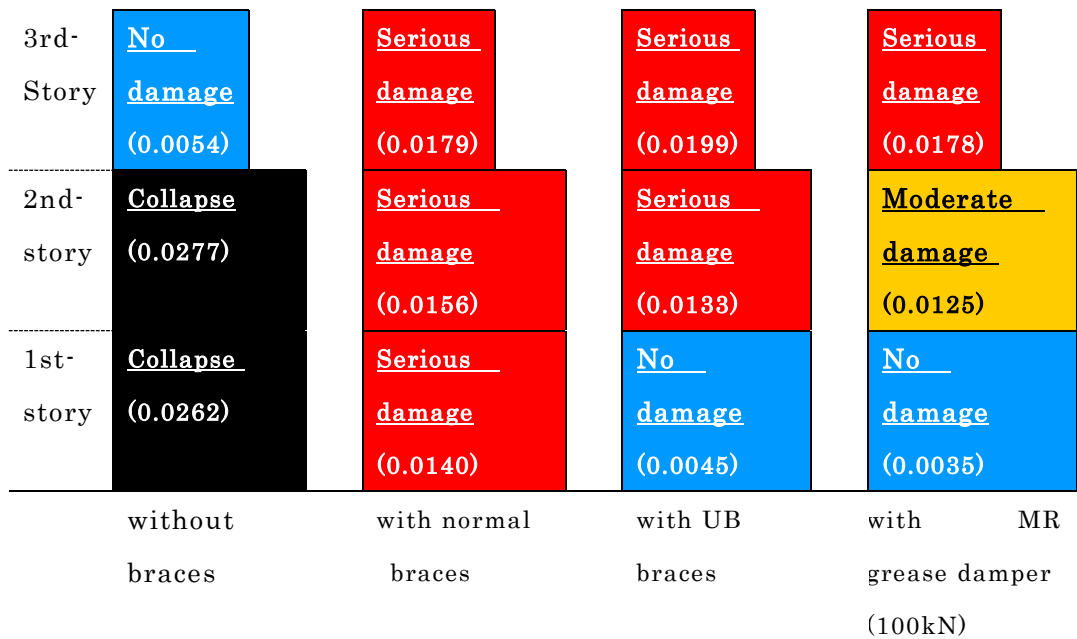


Fig.6-5 K-NET 熊本波・X 方向（NS 方向波入力）の被害状況
（上段：被害状況、下段：層間変形角）

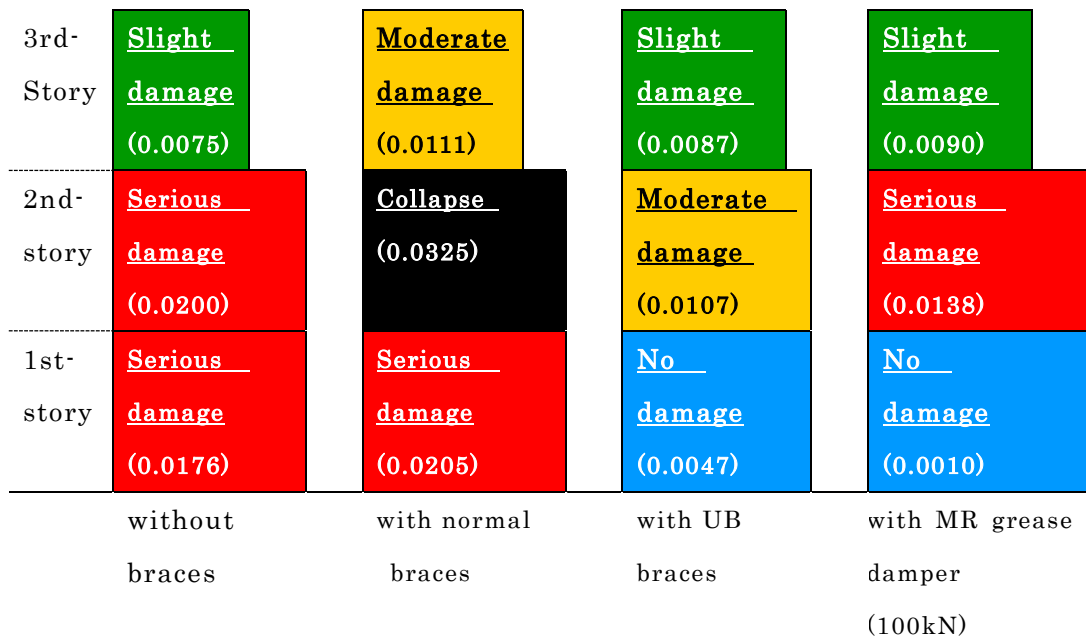


Fig.6-6 K-NET 熊本波・Y 方向（EW 方向波入力）の被害状況
（上段：被害状況、下段：層間変形角）

6.2 固有振動数と地震波卓越振動数の比較

入力波（地震波）の卓越振動数と本構造物の固有振動数について検討する。

Fig.6-7、6-8 に JMA 神戸波の結果として、入力波の加速度応答スペクトルに、構造物の固有振動数を重ねた図を示す。 Fig.6-7 が X 方向（NS 方向波入力）、Fig.6-8 が Y 方向（EW 方向波入力）で、それぞれの図の横軸は振動数、縦軸は応答加速度である。スペクトルは、地震応答解析のモデルと同じ減衰 2%である。

まず、Fig.6-7 の X 方向（NS 方向波入力）について検証する。

通常ブレースケースと MR グリースダンパケースの場合の固有振動数は、図からもわかるように、それぞれ 3.35Hz と 3.43Hz と近接していることから、地震波からの入力（振動数成分）に差が殆どなく、地震応答解析結果をそのまま比較できる。従って、通常ブレースケースでは“崩壊”と“大破”の被害状況だが、MR グリースダンパケースでは 3 層目だけが“大破”で 2 層目が“中破”、1 層目が“軽微な被害”まで低減でき、MR グリースダンパによる耐震性向上の効果が、顕著に見られる。

これらに対して、UB ブレースケースの固有振動数は 3.02Hz と、上述 2 ケースから多少離れている。図からもそれぞれの固有振動数での応答加速度値は、UB ブレースケースで 3100gal、通常ブレースケースと MR グリースダンパケースでは 1900gal 程度で、応答の主要動となる固有振動数の違いによって、UB ブレースケースの方が約 1.6 倍大きい応答加速度を生じている、すなわち地震による入力が多いことが推測される。

一方、解析結果の UB ブレースと MR グリースダンパのケースの最大層間変形角を比べると

1 層目：1.7（=0.0059/0.0034）

2 層目：1.2（=0.0146/0.0119）

3 層目：1.5（=0.0207/0.0134）

平均：1.5

と、前述の応答加速度比とほぼ一致した比になっていることから、最大層間変形角の差、すなわち応答の差は、地震波の入力差（成分差）によって生じていると推測できる。従って、地震波の入力差を加味すると、UB ブレースと MR グリースダンパとは同程度の耐震効果となっていと考えることができる。

次に、ブレースなしケースと通常ブレースケースとを比較すると、図からもわ

かるように、固有振動数はブレースなしケースが 0.61Hz、通常ブレースケースが 3.43Hz と離れている。地震波の振動数成分でもある応答加速度値も 700gal 程度と 1900gal 程度と 3 倍近い差がある。

一見するとブレースを付けたことで地震波の卓越振動数に近づけてしまったとも見なせるが、この地震波の成分差にも係わらず、被害状況はブレースなしケースでは 1、2 層が“崩壊”と大きい。従って、当然とは考えられるが、ブレースを付けることによって補強されたと言える。

Fig.6-8 の Y 方向 (EW 方向波入力) についても、ブレースなしケースの固有振動数が他の 3 つのケースから離れていること、地震波の卓越振動数 (ピーク) から離れていること、それにも係わらず大きな被害状況となっていることは、X 方向と同様である。

通常ブレースケース、UB ブレースケース、MR グリースダンパケースについては、通常ブレースケースと MR グリースダンパケースの固有振動数が比較的近いこと、UB ブレースの固有振動数がこれら 2 つのケースから多少離れていることも、やはり X 方向と同様である。しかし、X 方向と異なるのは、UB ブレースケースの固有振動数が他の 2 つのケースより低く、地震波の卓越周振動数から外れた谷間、すなわち成分が小さいことである。被害状況もこれを反映して、MR グリースダンパケースより UB ブレースケースの被害状況が軽くなっている。

このことから、地震波の入力差を考慮すると、X 方向と同様に UB ブレースと MR グリースダンパとの耐震効果の差は小さいと考えることができる。

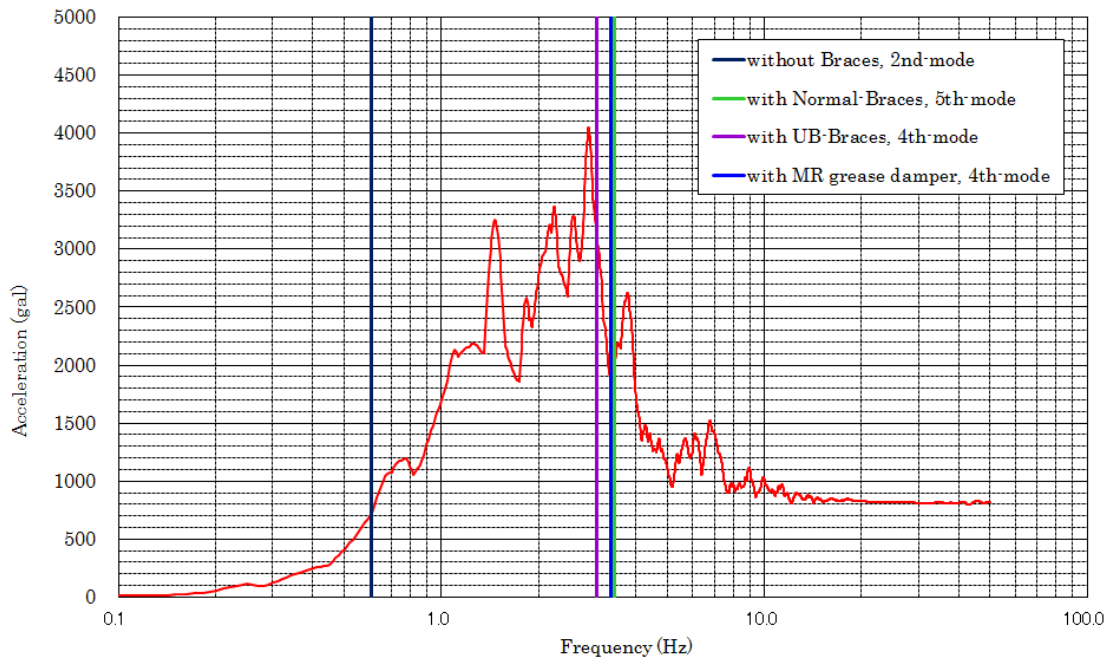


Fig.6-7 NS 方向波の加速度応答スペクトル ($h=2\%$) と X 方向の固有振動数

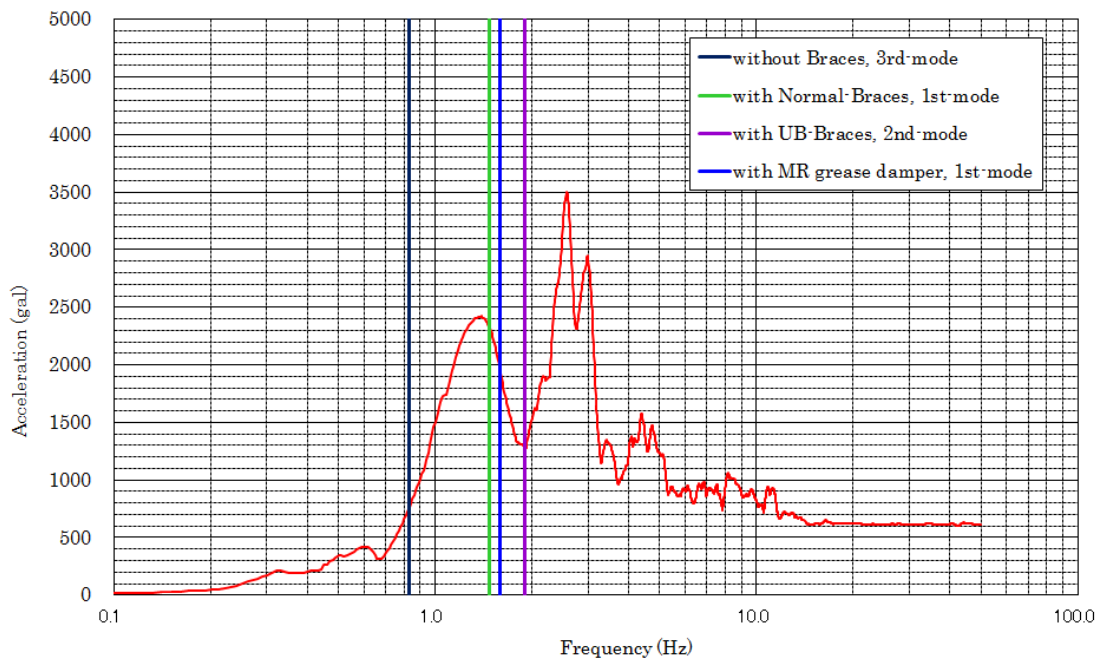


Fig.6-8 EW 方向波の加速度応答スペクトル ($h=2\%$) と Y 方向の固有振動数

6.3 固有振動数とダンパ配置について

次に MR グリースダンパの配置について考察する。

Table 6-2 に X、Y のそれぞれの主要モードの固有振動数を示す。X 方向で、「2F 側」、「3F 側」、「中央」と 3 種類の振動数があるのは、X 方向に対して刺激係数が比較的大きい上、変形する箇所が異なるモードが存在するためである。それぞれ

「2F 側」: 2F (2 層目) までしかない側が大きく変形するモード

「3F 側」: 3F (3 層目) のある側が大きく変形するモード

「中央」: Y 方向 (長手方向) の中央部付近がたわむように大きく変形するモード

である。

振動モードについては、5. 3 節の Fig.5-12~5-15 に示している。

Table 6-2 X、Y 方向の主要モードの固有振動数 (Hz)

ケース名称	X 方向			Y 方向
	2F 側	3F 側	中央	
ブレースなし	0.61	0.54	—	0.83
通常ブレース	3.43	2.90	1.96	1.48
UB ブレース	3.78	3.02	1.66	1.90
MR グリースダンパ	4.30	3.35	1.65	1.59

まず、X 方向について考える。Y 方向に比べて、補強 (ブレース、ダンパ) が密に入っているため、ブレースなしケースと補強有り (他の 3 つのケース) との「2F 側」、「3F 側」の各固有振動数の差が大きい。その中で、通常ブレースケースと UB ブレースケースの固有振動数の差は小さい。これは、ブレース自体の配置に差がないためである。

MR グリースダンパケースの固有振動数が高いのは、MR グリースダンパのモデル化において初期剛性が高くなるためと考えられる。

「中央」の固有振動数 (モード) については、ブレースなしケースでも同様な形状のモードが 1.31Hz に存在するが、その刺激係数 (有効質量) が他の主要モードに比べて 2 桁ほど小さいため、支配的なモードとは言えない。これは、ブレースなしケース以外の 3 つのケース、すなわち補強がある場合には、その補強の

ある端面（Y 方向に対して両端面、X-Z 面）が比較的剛な面となることから、中央部の変形により生じる端面の変形（回転）を抑制するように働くのに対して、ブレースなしケースでは端面が比較的柔で、中央部の変形により生じる端面の変形（回転）の抑制が相対的に弱いためと考えられる。

また、この「中央」の固有振動数については、UB ブレースケース、MR グリースダンパケースに対して、通常ブレースケースの振動数が高い。これは通常ブレースケースでは、端面部分の変形も伴うため、その端面の変形に対する剛性も連成されるためと考えられる。UB ブレース、MR グリースダンパの両ケースの場合は、通常ブレースケースよりも剛性が高くなり、中央部に比べて完全な剛と見なせるために、この連成が生じないと考えられる。連成が生じないことから、モードとしては変わらなくなるため、UB ブレースケースと MR グリースダンパケースの固有振動数はほぼ同じ値となっている。

Y 方向については、これまでに何度も記述しているように、X 方向に比べて、補強（ブレース、ダンパ）の設置数が少ない。これは、前述のように開口部や機器設置などの制約があり、補強の設置ができないためである。そのため、あまり効果的な設置状況とはなっていない。

固有振動数について見ると、ブレースなしケースが当然ながら最も低い振動数で、通常ブレースケース、UB ブレースケースと高くなっている。これは補強（ブレース設置）によるものだが、通常ブレースケースより、UB ブレースケースが高いのは、どちらのブレースも材料剛性（初期剛性）は同じであるが、断面積が異なること等による。

また、MR グリースダンパケースの振動数が、UB ブレースに比べて低いのは、1 層目のみを MR グリースダンパとして、2 層目は通常ブレースとしているため、UB ブレースケースほど剛性が高くならなかったためと考えられる。

6.4 残留変位での比較

次に JMA 神戸波の応答における残留変位について比較してみる。

Fig.6-9、6-10 に X、Y それぞれの方向についての残留変位を示す。これらは、これまでの層間変形角のような各層毎の数値ではなく、積算値、すなわち各層での地盤相対値となっている。

まず、Fig.6-9 の X 方向の残留変位を見ると、通常ブレースケースでは 0.02m～0.03m、ブレースなしケースでは 0.03m～0.04m の残留変位が生じている。ただし、今回の解析では材料の降伏（構造物の崩壊等）といった限界条件の設定をしていないため、最大層間変形角が安全限界を超えていることをも考慮すると、構造物が崩壊している状態であることが十分に考えられる。

この通常ブレースケース、ブレースなしケースに比べると、UB ブレースケースは最大で 0.003m、MR グリースダンパケースは最大 0.002m、と小さく、耐震性向上の効果が得られている。

次に Fig.6-10 の Y 方向の結果を見ると、通常ブレース、ブレースなしの両ケースで大きな残留変位が生じているのは、X 方向と同様である。通常ブレースケース、ブレースなしケースの残留変位と、UB ブレースケース、MR グリースダンパケースのそれとの差が、X 方向に比べて小さいのは、これらのデバイスの配置に起因すると考えられる。

これまでも述べたように、Y 方向ではブレース、あるいはダンパの配置が、X 方向ほど密に配されていない。このデバイスの配置の差は、UB ブレースケースと MR グリースダンパケースの間にも顕著に現れている。UB ブレースケースは、この Y 方向について、1 層に 2 本、2 層に 1 本が設置されているが、MR グリースダンパケースは 1 層に 1 本、2 層は通常ブレースのままである。図で、2 層目の MR グリースダンパの変位が大きいのは、このためであると考えられる。

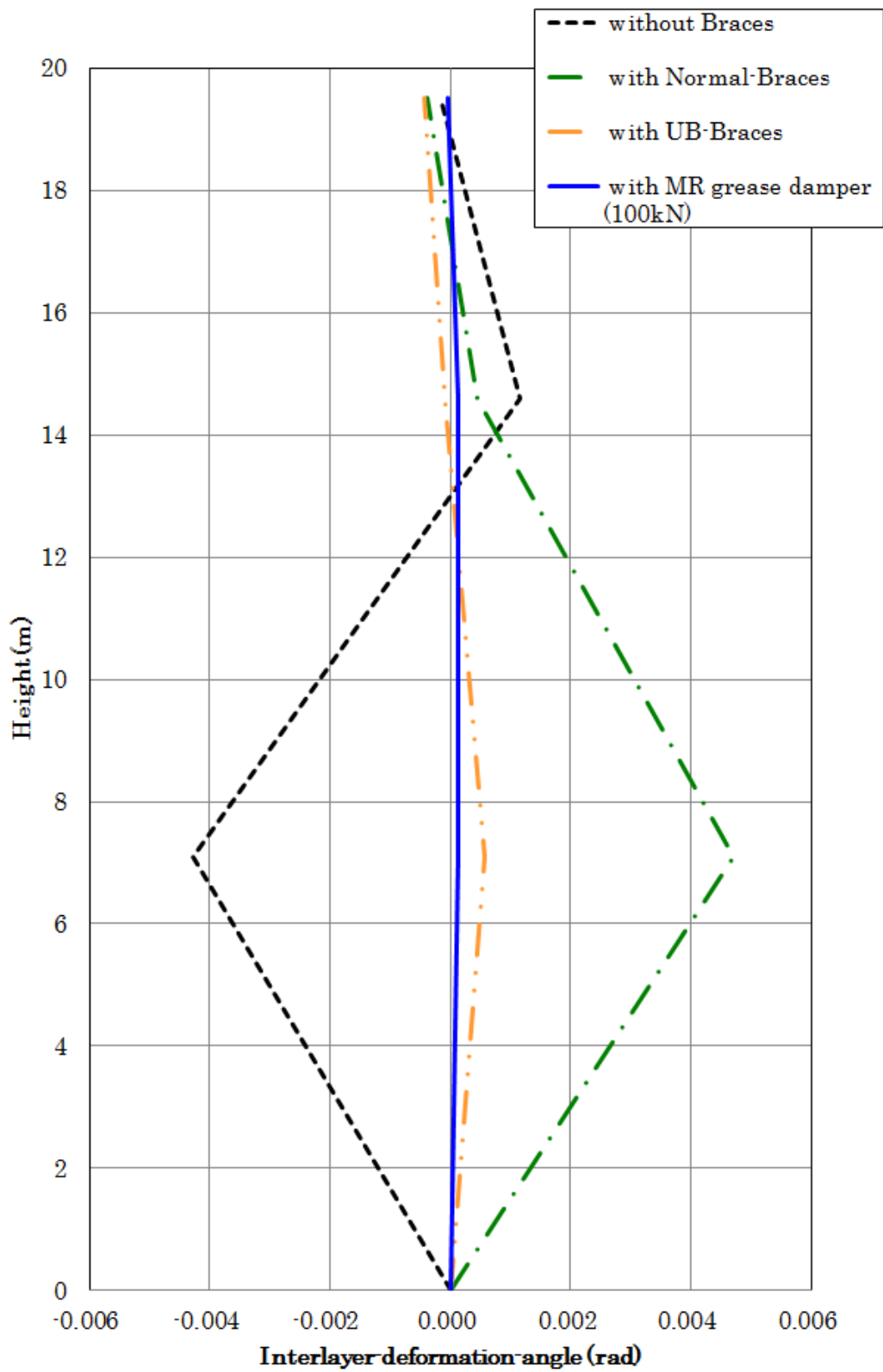


Fig.6-9 X方向 (NS方向入力) の残留変位 (地盤相対、積算)

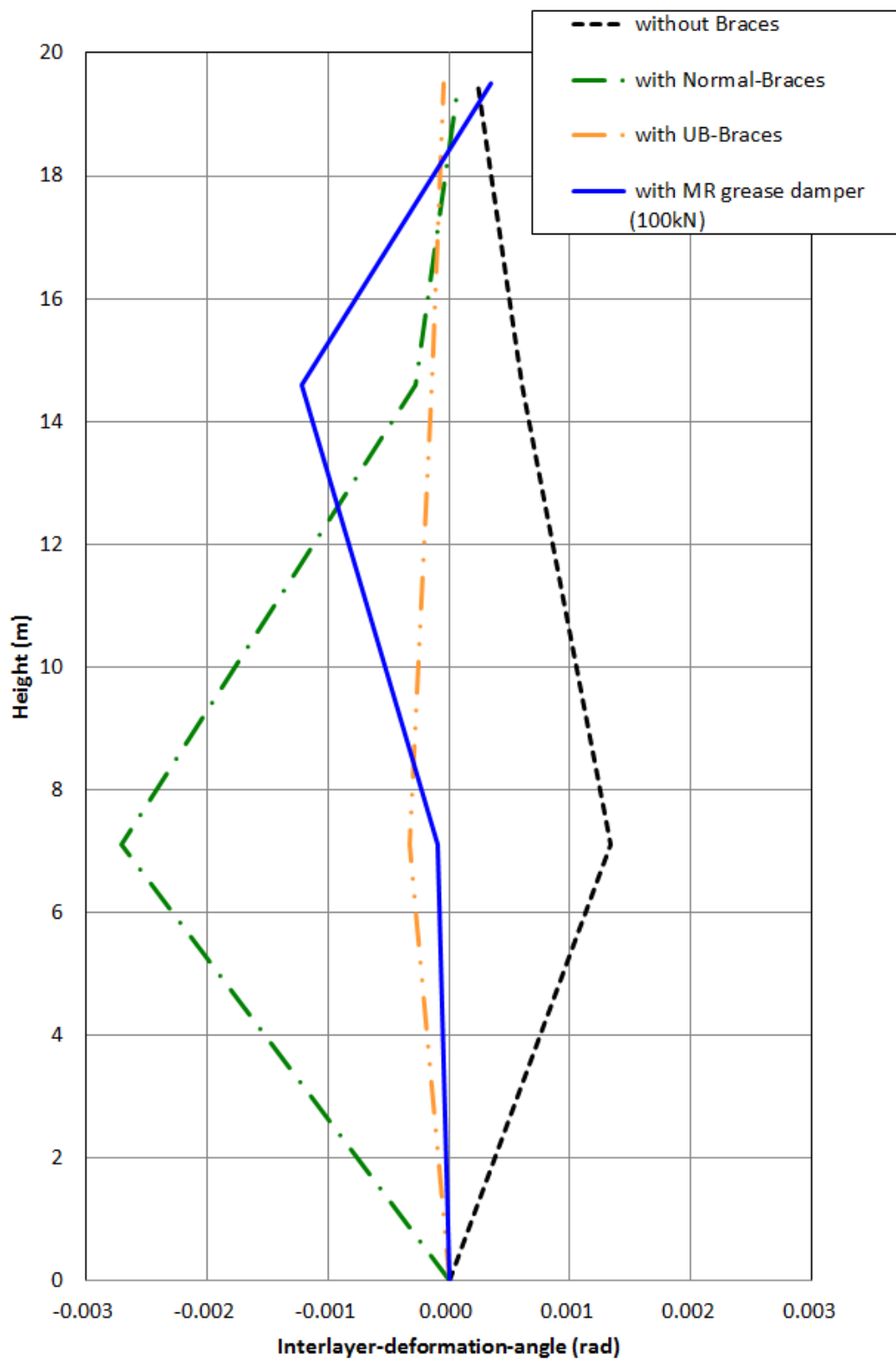


Fig.6-10 Y方向 (EW方向入力) の残留変位 (地盤相対、積算)

6.5 MR グリースダンパの優位性について

これまでの結果、考察からは、MR グリースダンパと UB ブレースのどちらを用いても、耐震性を向上させることができ、効果の程度は多少 MR グリースダンパの効果が高いように見えるが、概ね同等に近いということが分かった。

一方、2章でも述べたように、1995年の兵庫県南部地震以降、頻発するようになってきた震災を伴う大地震、中でも2011年東北太平洋沖地震や、近い将来の襲来が予見されている東海、東南海、南海、それらの3連動地震のような巨大地震においては、その本震だけでなく、比較的大きな前震・余震を伴うことが懸念されている。

従って、短いインターバルで襲来する複数の大地震、それぞれに効果的に働く事が、耐震デバイスにも要求されるようになる。

UB ブレースは、鋼材部分の塑性化が進展することでエネルギーの吸収を図ることから、地震の大きさによっては残留変形が生じて、地震に抗した後で交換が必要となる場合もあろう。しかし、上記のような短いインターバルでの前震、本震、余震というように、複数以上襲来するような場合には交換が間に合わず、耐震効果が低くなった状態で地震を受けることは想像に難くない。

これに対して、MR グリースダンパであれば、磁界の確保、言い換えると磁界を与えるための電力が確保できれば、何度でも同等の耐震効果が得られる。電力の確保にしても、予備バッテリーとの交換等で対応できることから、本震、余震それぞれに対応が可能という大きなアドバンテージを有していると考えられる。

また、本研究で用いた MR グリースダンパは円筒型であるが、同様な形式、構造はオイルダンパにも広く適用されおり、耐震／制振デバイスとしても広く用いられている。

このオイルダンパと MR グリースダンパとの大きな相違点は

- ・MR グリースダンパ (MR ダンパ) は、減衰力がピストン速度にあまり依存しない。

ことにある。従って、地震の卓越振動数、地震によって発生する構造物の揺れの振動数や振幅に関係なく、一定の減衰力が得られる、すなわち常に一定のエネルギー吸収能力が発揮されることである。

さらに、製品化されているオイルダンパを見ると、ストローク (伸縮量) が大きくない。これは、オイルダンパで大振幅を実現しようとする、作動油量も多

く必要であり、そのために作動油の剛性が低下、すなわちオイルダンパの剛性が低下することで、ダンパとしての機能が不十分になるためである。

例えば、カヤバ システム マシナリー株式会社のカatalogを見ると、最大のものでストロークは±80mm で、本研究での MR グリースダンパのストローク±100mm に及ばない。

一方、最近の地震のもう一つの着目点である、長周期地震については、“多くの繰り返し大振幅”の加振に対応すること、従って比較的低い変形速度(速度振幅)、大きなストローク(変位振幅)への対応が求められる。ピストン速度に関係なく常に一定のエネルギー吸収能力が発揮されること、大きなストロークが設定できることは、長周期地震への対応に関して大きな優位と考えられる。

従って、巨大地震対策の観点からは、MR グリースダンパの方が優れていると判断できる。

また、実機を例とした解析では適用しなかった制御システムを適用して、より効果の高い耐震性向上を行うことができることも、優位性にとらえることができる。昨今の注目、発展が著しい AI との組み合わせで、その構造物の特性、設置場所の地盤特性等をも考慮した最適なシステムとするといった冗長性もある。さらには、制御としては、ダンパとしての効果を適切な程度まで下げる(磁場、電力を下げる)ことで、バッテリー電源の消費を抑えて、耐震性の効果を維持するといったことも考えられる。

6.6 複数のデバイス使用の検討

実際の適用、特に既存構造物に対する補強、レトロフィット等を考えると、本研究の解析モデルにおける Y 方向のように、補強部材・デバイスの配置には制約があることが想定される。

その場合、UB ブレースのみ、MR グリースダンパのみということではなく、通常ブレースも含めて、複数の種類の部材・デバイスを組み合わせることが必要になるのは、当然のことである。例えば UB ブレースを上部、MR グリースダンパを下部というように複数の種類を組合せて使用し、更にはその配置の最適化を行うことで、より大きな応答抑制効果を得られる可能性がある。

◆ ケース 1

これまでの結果を基に組合せたケースについて、JMA 神戸波を入力波とした解析を実施した。

まず、ケース 1 として、具体的には詳細被害の状況から程度の低いものを選択して、以下のように組合せた。MR グリースダンパは、容量 100kN を用いた。これは容量の差、すなわち 100kN と 500kN との間で、耐震性向上効果の差が殆どなかったためである。

ケース 1

X 方向

1 層目：MR グリースダンパ 2 層目：MR グリースダンパ

3 層目：ブレースなし

Y 方向

1 層目：MR グリースダンパ 2 層目：UB ブレース

この組合せは、容量 100kN の MR グリースダンパケースで 2 層目・Y 方向を UB ブレースに変更（変更前は通常ブレース）、3 層目のダンパを外した状態である。言い換えると、容量 100kN の MR グリースダンパケースより耐震性を向上させるように改良を企図したケースである。

このケース 1 の結果である層間変形角を、これまでの単一デバイスケースの図（Fig.5-19、5-20）にプロットしたものを、Fig.6-11、6-12 に示す。

Fig.6-11 に示す X 方向については、1 層、2 層は概ね MR グリースダンパケースと同様であるが、3 層は MR グリースダンパケースより 4 割程度大きな変形を生じている。Fig.6-12 の Y 方向については、2 層で MR グリースダンパケースよ

りも小さくなっているが、**UB** ブレースケースに対して倍近い変形となっている。

以上から、このケース 1 は、容量 100kN の **MR** グリースダンパケースから、あまり顕著な耐震性向上とはなっていないと言える。

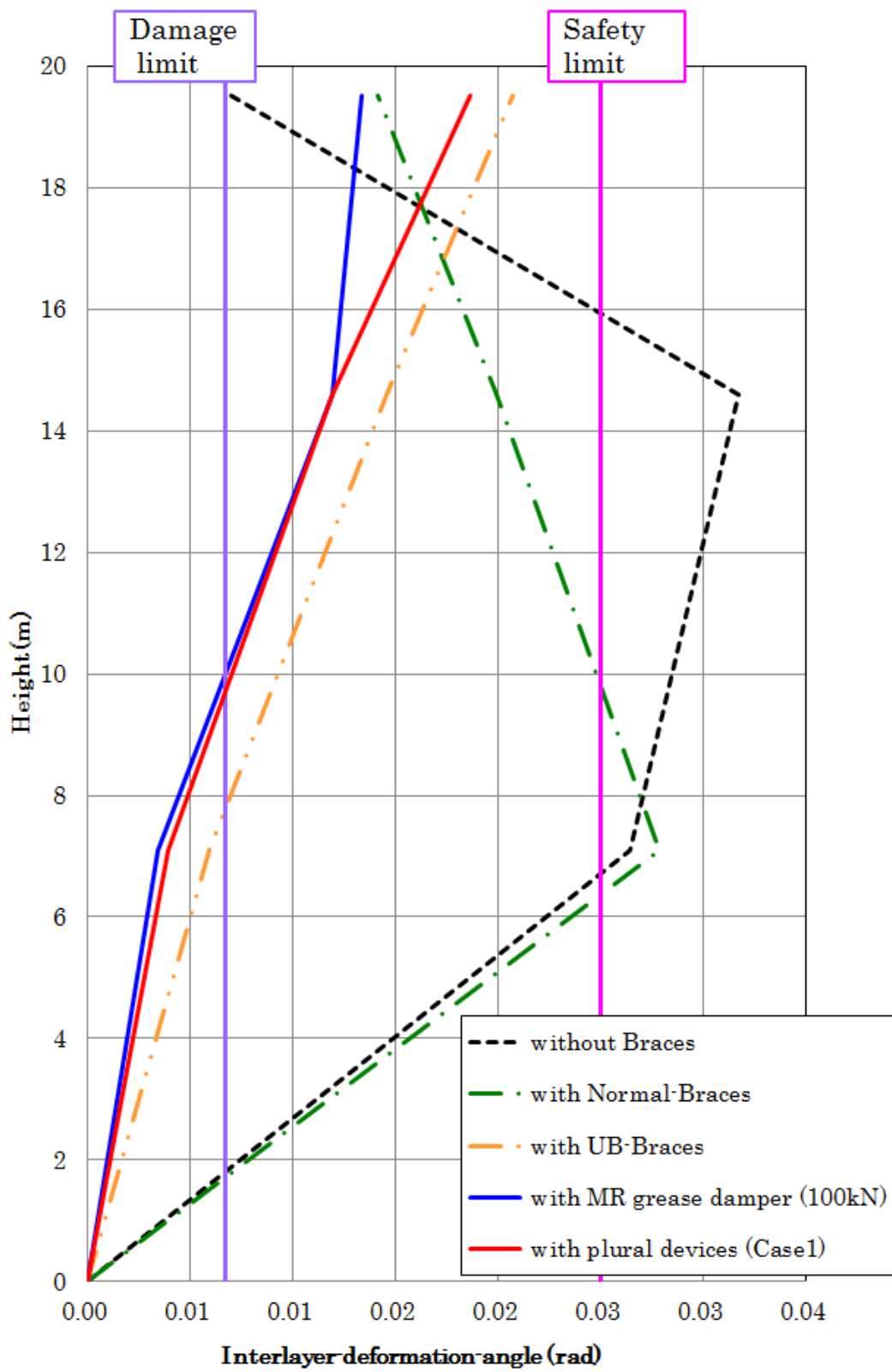


Fig.6-11 X方向 (NS 方向)・最大層間変形角・ケース 1 を追加 (JMA 神戸波)

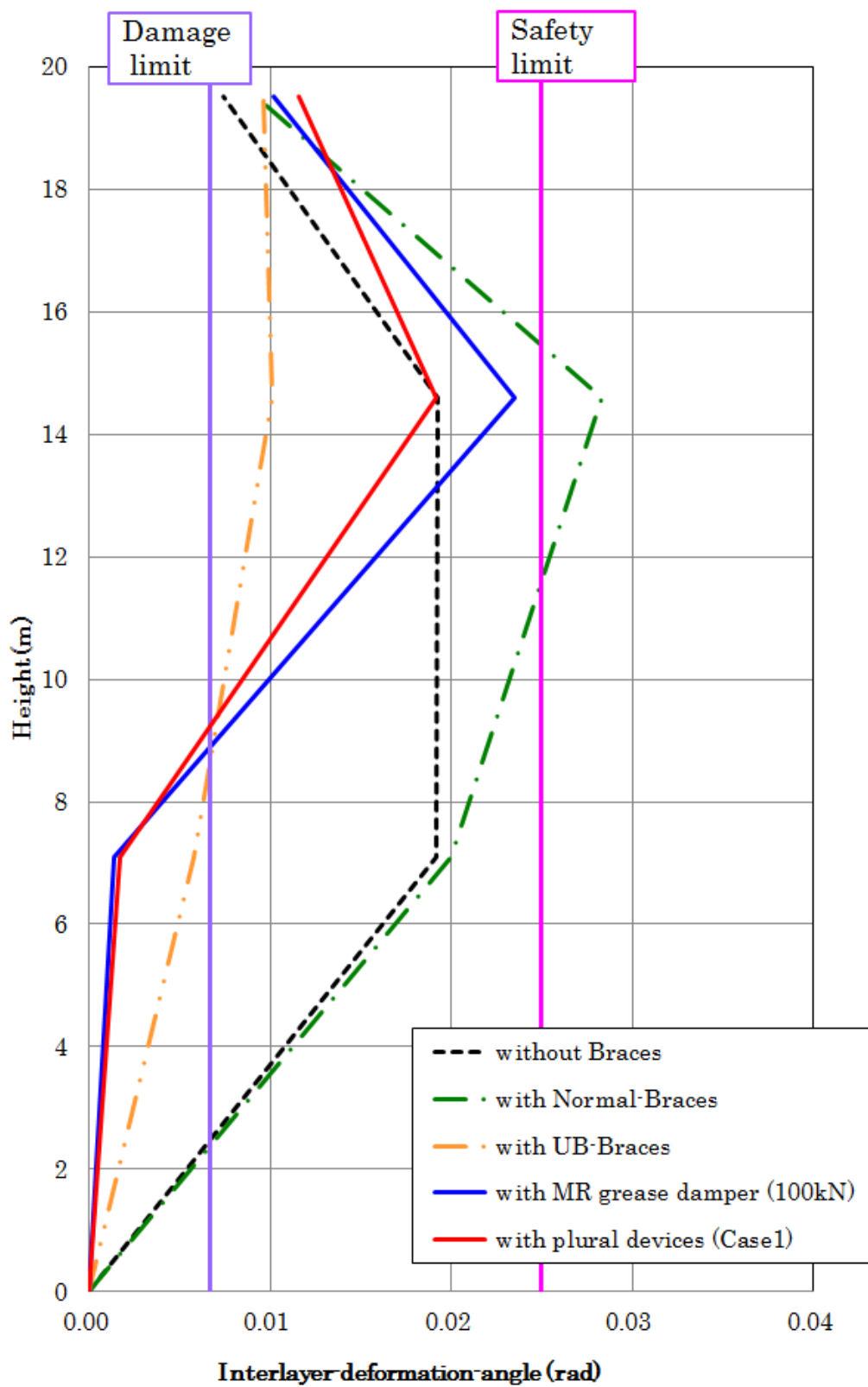


Fig.6-12 Y方向 (EW 方向)・最大層間変形角・ケース 1 を追加 (JMA 神戸波)

◆ケース 2

次に、ケース 1 の結果を踏まえて、ケース 2 として、以下のようなデバイスの組合せで、JMA 神戸波による応答解析を行った。MR グリースダンパについては、ケース 1 と同じく、容量 100kN を用いた。

ケース 2

X 方向

1 層目：MR グリースダンパ 2 層目：MR グリースダンパ

3 層目：MR グリースダンパ

Y 方向

1 層目：UB ブレース

2 層目：UB ブレース

このケース 2 の結果である層間変形角を、ケース 1 と同様に、これまでの単一デバイスケースの図 (Fig.5-19、5-20) にプロットしたものを、Fig.6-13、6-14 に示す。

X 方向 (Fig.6-13) については、1 層、2 層は概ね MR グリースダンパケースと同様であるが、3 層は 2 割程度大きな変形を生じている。Fig.6-14 の Y 方向については、概ね UB ブレースケースと同じで、3 層目では UB ブレースケースより、多少小さい応答結果になっている。

以上から考えると、このケース 2 は、ケース 1 より良い結果となっており、これまでの各デバイスのみのモデルでの結果も含めた中で、最も良い結果となっている。

本節で検討した 2 つのケースの結果を見ても、複数の種類の部材・デバイス、配置を組み合わせることで、より良い耐震向上 (応答抑制) 効果を得られる事が分かる。しかし、組合せによっては、あまり効果が向上せず、その構造物、入力波である地震波によって最適な組合せがあることが容易に推測できる。

ただし、今回の解析は、あくまでも JMA・神戸波という一つの地震波に対する結果である。もし実際に適用する場合には、対象とする構造物の立地場所での起こりうる地震、その周波数特性等を予測し、それに対応した部材・デバイスの選択、配置をする必要があるだろう。

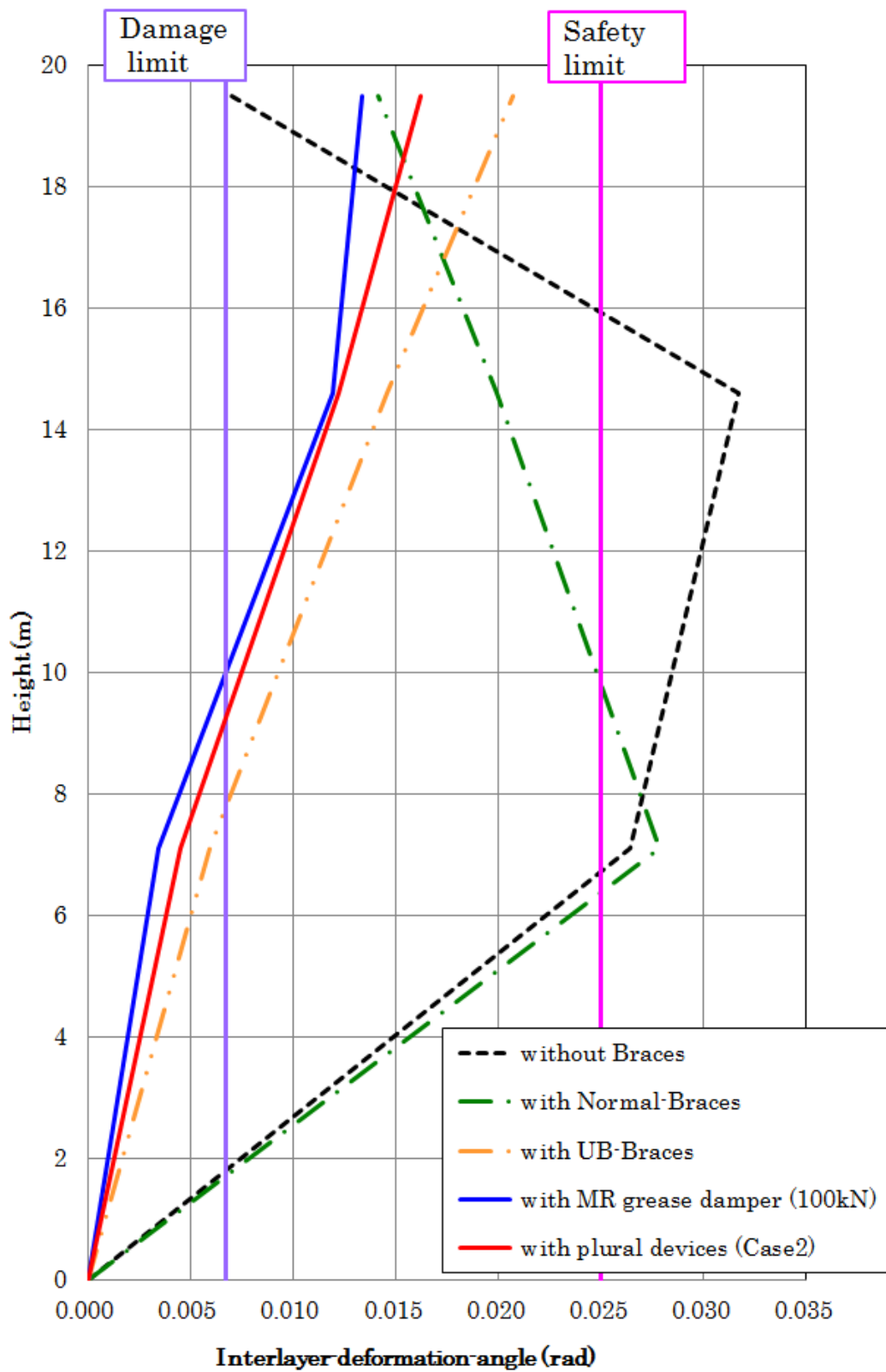


Fig.6-13 X方向 (NS方向)・最大層間変形角・ケース2を追加 (JMA神戸波)

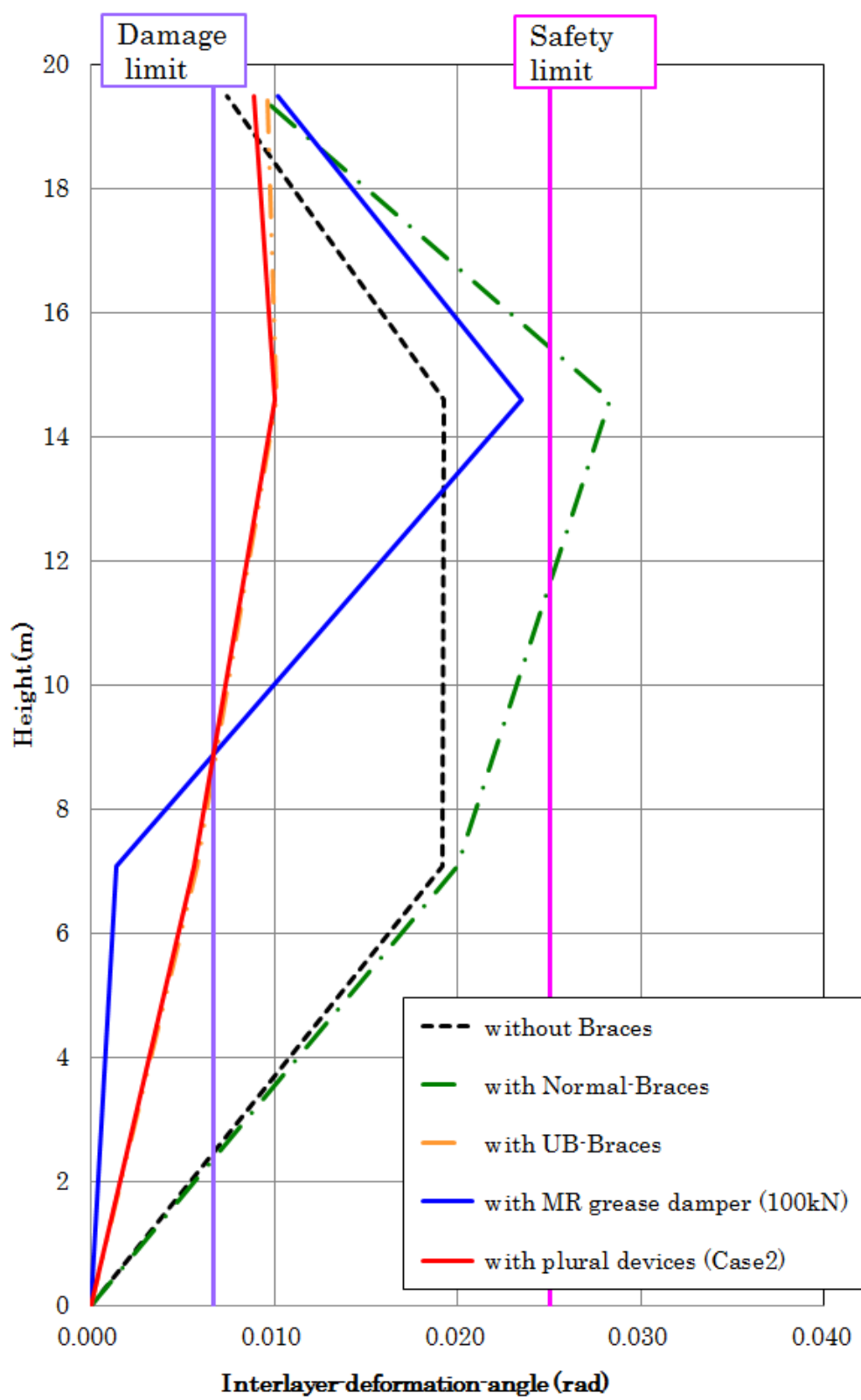


Fig.6-14 Y方向 (EW 方向)・最大層間変形角・ケース 2 を追加 (JMA 神戸波)

6.7 エネルギー吸収量での検討

UB ブレース、MR グリースダンパのエネルギー吸収量について比較する。

MR グリースダンパについては、その解析モデル化での設定から履歴特性（力－変位）が号要素の特性を、UB ブレースも柔要素と剛要素の混合構造ではあるが、剛要素特性に近いことから、累積塑性歪エネルギーの考え方をういてエネルギー吸収量を求める。

◆エネルギー吸収量の求め方

Fig.6-15 に例として示す完全弾塑性形の履歴特性（力－変位）において、累積塑性歪エネルギーの式は以下のとおりである。

$$W_p = Q_Y \delta_p = \eta Q_Y \delta_Y$$

ここで、 W_p ：累積塑性歪エネルギー

Q_Y ：降伏耐力

δ_p ：累積塑性変形（ $= \eta \delta_Y$ ）

δ_Y ：降伏耐力での弾性変形

η ：累積塑性変形倍率

また、図から累積塑性変形 δ_p は、以下のように求められる。

$$\delta_p = \delta_p^+ + \delta_p^- \quad \delta_p^+ = \delta_{p1} + \delta_{p3}$$

$$\delta_p^- = \delta_{p2} + \delta_{p4}$$

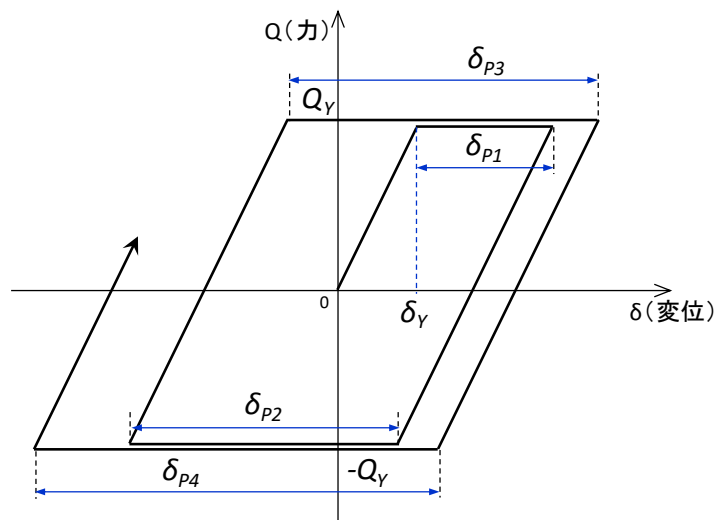


Fig.6-15 完全弾塑性形の履歴特性（復元力特性）

MR グリースダンパで、図における累積塑性変形、すなわち変位が発生するのは、ダンパとして働いている状態であるから、この W_p は、ダンパが吸収したエネルギー量である。また、UB ブレースにおいては、この累積塑性変形は言葉どおりにブレースの累積塑性変形量である。

◆エネルギー吸収量の比較

エネルギー吸収量の比較は、構造物の3F側（3Fのある側）の端面（XZ面）の1層に設置されている2本のUBブレース、MRグリースダンパとで行った。また、この比較については、100kN、500kNの2種のダンパについて実施した。

Fig.6-16にUBブレース、Fig.6-17、6-18にMRグリースダンパの容量100kN、500kNの履歴特性をそれぞれ示す。これら履歴特性から、累積塑性歪エネルギーの考え方をういてエネルギー吸収量を計算する。

図から累積塑性変形（変位）を求め、これに降伏耐力に相当するUBブレースの降伏軸力、MRグリースダンパの容量を乗じて算出した吸収エネルギー量の結果を以下に示す。

➤ MRグリースダンパ

・ 容量：100kN

累積塑性変形 正側： $1.84 \times 10^{-2} \text{m}$ 負側： $-1.96 \times 10^{-2} \text{m}$

合計： $3.80 \times 10^{-2} \text{m}$

吸収エネルギー量 $100 \text{kN} \times 3.80 \times 10^{-2} \text{m} = 3.80 \text{kN} \cdot \text{m} = \underline{3.80 \text{kJ}}$

・ 容量：500kN

累積塑性変形 正側： $1.48 \times 10^{-3} \text{m}$ 負側： $-1.41 \times 10^{-3} \text{m}$

合計： $2.89 \times 10^{-3} \text{m}$

吸収エネルギー量 $500 \text{kN} \times 2.89 \times 10^{-3} \text{m} = 1.46 \text{kN} \cdot \text{m} = \underline{1.46 \text{kJ}}$

➤ UBブレース

・ 要素 No.6003

累積塑性変形 正側： $2.95 \times 10^{-2} \text{m}$ 負側： $-2.04 \times 10^{-2} \text{m}$

合計： $4.99 \times 10^{-2} \text{m}$

吸収エネルギー量 $500 \text{kN} \times 4.99 \times 10^{-2} \text{m} = 24.95 \text{kN} \cdot \text{m} = \underline{24.95 \text{kJ}}$

・ 要素 No.6004

累積塑性変形 正側： $2.06 \times 10^{-2} \text{m}$ 負側： $-2.75 \times 10^{-2} \text{m}$

合計： $4.81 \times 10^{-2} \text{m}$

吸収エネルギー量 $500 \text{kN} \times 4.81 \times 10^{-2} \text{m} = 24.05 \text{kN} \cdot \text{m} = \underline{24.05 \text{kJ}}$

UBブレースの吸収エネルギー総量：49.0kJ

このエネルギー吸収量を比べると、容量：100kN での MR グリースダンパの 3.80kJ に対して、UB ブレースでは 49.0kJ と一桁近くも差がある。UB ブレースについては、弾性変形によるエネルギー吸収量も加わるので、実際の差はもっと大きいと考えられる。

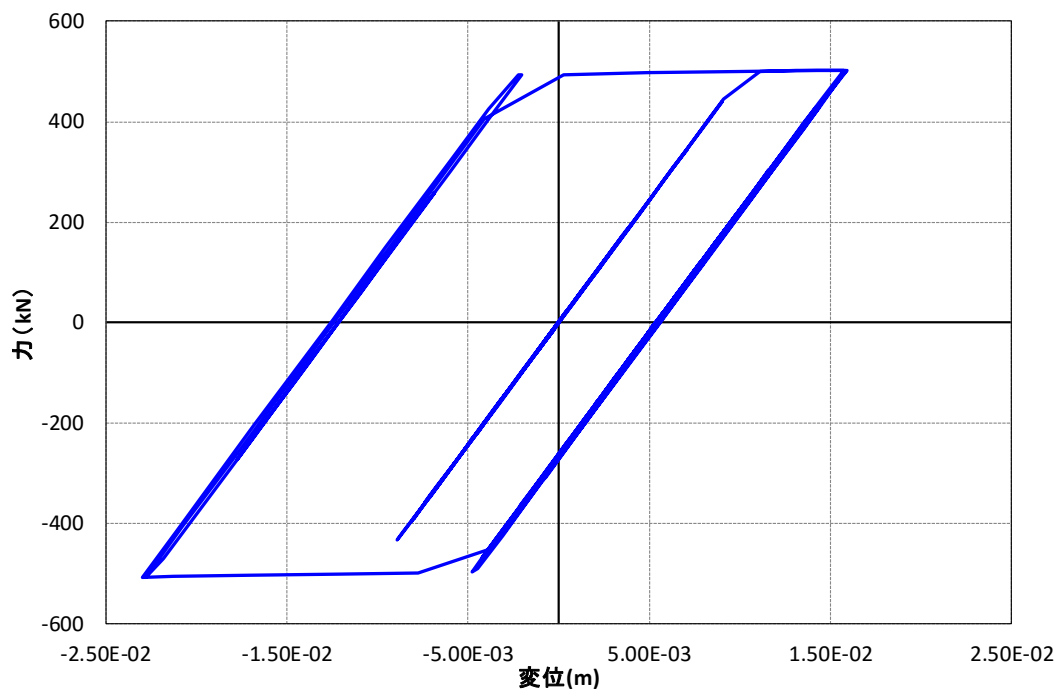
一方、これまでの結果、考察から、MR グリースダンパと、UB ブレースでの耐震効果がほぼ同等であることが分かっている。

従って、MR グリースダンパの耐震性向上効果は、このエネルギー吸収量の差分について、容量である 100kN まで剛性で補強したことによる効果と考えられる。すなわち 100kN まで構造物にかかる荷重を MR グリースダンパが分担（抵抗）することで、構造物にかかる荷重が低減されていると推測される。

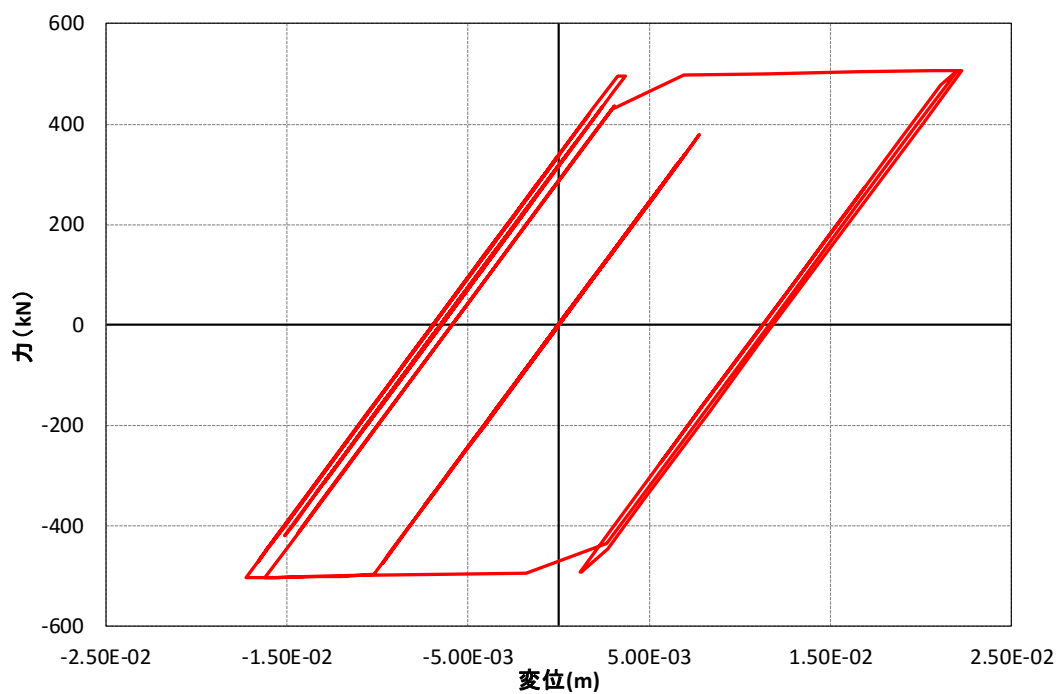
このことから、MR グリースダンパは、設定容量までは補強の効果、容量を超えるとダンパとして働くと考えることができる。

また、MR グリースダンパの容量：500kN と容量：100kN を比べると、容量：500kN の方がエネルギー吸収量が少ない。

この双方も同等の耐震効果であることから、容量：500kN の方が、当然ながら補強効果が大きく、そのためにダンパとしてのエネルギー吸収量は少なくなっていると考えられる。



(a) 要素 No.6003



(b) 要素 No.6004

Fig.6-16 UB プレースの履歴特性、地震波：JMA 神戸波

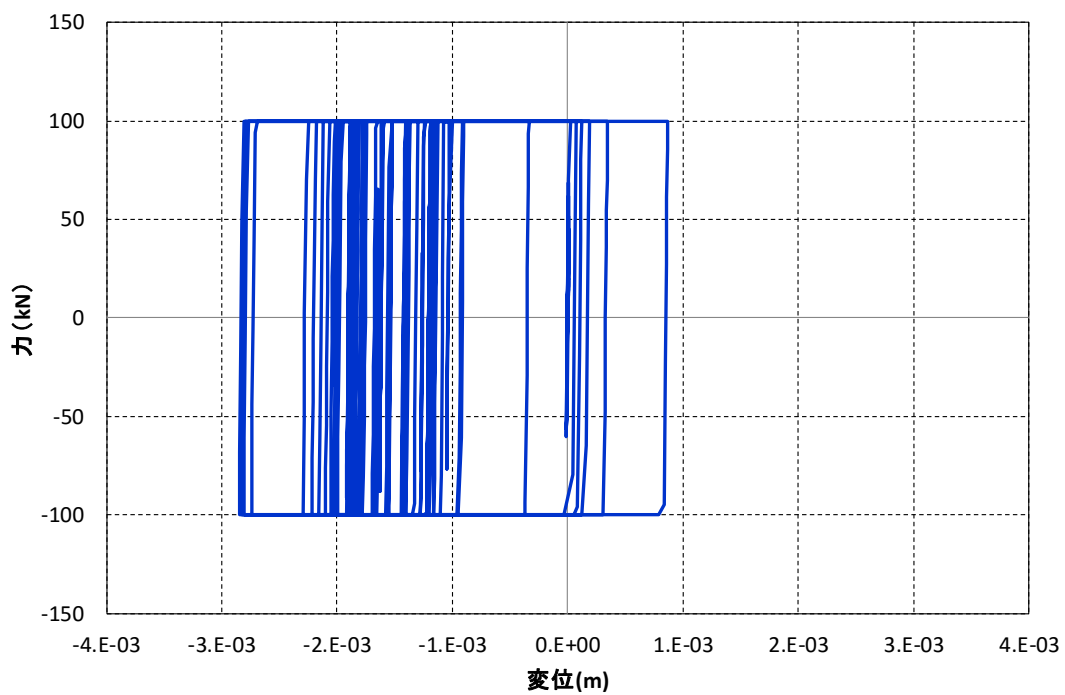


Fig.6-17 MR グリースダンパ（容量：100kN）の履歴特性、地震波：JMA 神戸波

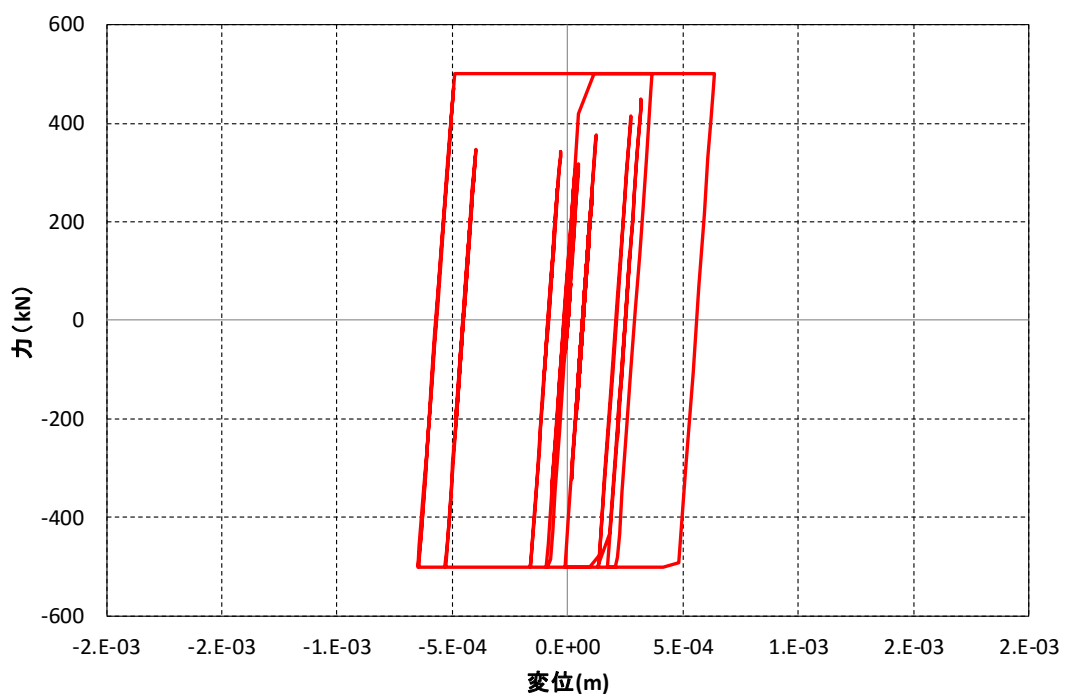


Fig.6-18 MR グリースダンパ（容量：500kN）の履歴特性、地震波：JMA 神戸波

7. 結言

本研究では開発した MR（磁気粘性）グリースの特性把握と円筒型の可変減衰ダンパへの適用検討、さらにはこの可変減衰ダンパの耐震デバイスとしての使用を考えて、実構造物を対象とした数値解析によってその効果を検証した。その結果、次のような結論を得た。

①MR 流体において問題となっている分散微粒子の沈降問題を解決するために、分散媒としてグリースを用いた MR グリースを開発した。この MR グリースについて試験、計測結果から、当初の目的どおりの特性を有することがわかった。

すなわち

- ・磁気粘性（MR）特性は、MR 流体と同等。
- ・長期間にわたる分散安定性の保持（MR 流体と比較して十分な分散安定性を保有）。

といった特性を持つことが示された。

このことから、MR グリースは MR 流体の機能を維持しつつ、その欠陥を克服した作動流体であることがわかった。

②MR グリースを作動流体とした可変減衰ダンパとして円筒型を選択、複数の試作ダンパを製作した。それを用いた特性把握試験から、この円筒型 MR グリース可変減衰ダンパの特性として以下のような結果が得られた。

- ・ダンパの減衰力は、磁場の強さに応じて増減。
- ・比較的大きな容量（数百 N 以上）では、振動数によらず電流の強さ、すなわちダンパのピストンの速度によらず、磁場の強さで減衰力が決定。
- ・履歴曲線（変位－力）は、摩擦減衰の特徴にピストンの往復動に起因する粘性による減衰力が重ねあわされた矩形形状。

③試作したダンパモデルを用いたセミアクティブ振動制御システムを、3 層から成る構造モデルに設置して試験結果を行い、以下のような結果が得られた。

- ・MR グリースダンパによる、構造物の振動応答の低減が可能。
- ・構造物の 1 次固有振動数付近のような比較的大きい応答において、高い振動制御機能を保有。
- ・応答が比較的小さい振動数域では、応答の低減効果あまり見られず、振動制御の機能は不十分。これは振動制御システムの適用にあたって、制御対象と

する振動モード、固有振動数を把握し、それらに対応できるシステムを構築することで可能。

④実在プラントの機械棟を対象に、MR グリースダンパによる耐震効果の確認を、耐震対策として広汎に適用されている座屈拘束ブレースとの比較も含めて、複数の地震波を入力波として用いた数値解析により行った。その結果を以下にまとめる。

- ・水平 2 方向については、ブレース材を MR グリースダンパへの交換、設置することで、応答層間変位を最大で 1/10 程度まで低減することが可能。このことから MR グリースダンパによる耐震性向上の効果を確認。
- ・MR グリースダンパと、座屈拘束ブレースの 2 つのケースを比較したところ、応答層間変位の低減は、最大で 1/10 程度で同等であること、さらに応答低減効果の大小は地震波、場所（層／階数、高さ、位置）によって入れ変わり、その優劣は不明確。ただし、残留変位について、座屈拘束ブレースでは変位量、発生箇所が多く、この点においては、MR グリースダンパが優位。
- ・MR グリースダンパが座屈拘束ブレースに比べて、残留変位の変位量、発生箇所が少ないことは、最近の地震で顕著な「大きな前震・余震」、つまり震度の大きな地震が繰り返し襲来する状況への対策として、MR グリースダンパの優位点と認識。
- ・MR グリースダンパは、設定容量までは補強の効果、容量を超えるとダンパとしてのエネルギー吸収効果により働くことを確認。
- ・MR グリースダンパは、振幅（速度）によらず常に一定のエネルギー吸収能力が発揮されること、大きなストロークが設定できることなどの優位性がある。これらは、「長周期地震動」への対応に関して大きな優位と考えられる。また、制御システム化による最適化、更に昨今の AI の発達とも組み合わせることも考えられ、今後の発展性も有する。

以上の結果から、MR グリースは、当初の開発目的どおりの特性を有することがわかった。また、円筒型の可変減衰ダンパへの適用が有効であること、さらにはこの MR グリースダンパの耐震デバイスとしての有効性を確認することができた。特に、最近の地震で着目されている特徴である「長周期地震動」と「大きな前震・余震」に対して、既存の耐震デバイスより効果が大きいとの結果が得られた。

<参考文献>

- [1] J. Rabinow, Magnetic fluid clutch, News Bull. J. Research Bur.Stand, Vol. 32, pp.54-60, 1948.
- [2] B.W. Hotten, Optical Studies of Lubricating Grease Structure, NLGI Spokesman, April, pp.14-19, 1955.
- [3] E.O. Foster, J.J. Kolfenbach, Viscoelastic Behavior of Grease, ASLE Transactions, Vol.2, No.1, pp.13-19, 1959.
- [4] 星野道男, グリースの付着性, 潤滑, 13 巻, 5 号, pp.207-212, 1968.
- [5] J. Rabinow, The Magnetic Fluid Clutch, Transactions of AIEE, Vol.67, pp.1308-1315, 1981.
- [6] 森内勉, 相原了, グリース潤滑とレオロジー, トライボロジスト, 36 巻, 5 号, pp.375-380, 1991.
- [7] J.D. Carlson, D.M. Catanzarite, and K.A.St. Clair, Commercial Magneto-Rheological Fluid Devices, 5th Int. Conf. on ER, MR Suspensions and Associated Technology, 1996.
- [8] 木村浩, 芝山淳, 山本雄二, 混成リチウム石けんグリースに関する研究, トライボロジスト, 46 巻, 8 号, pp.647-654, 2001.
- [9] F. Gordaninejad, B.M. Kaclicoglu and X. Wand, Study of a magneto-rheological grease (MRG) clutch, Proceedings of SPIE, Vol.6525, 2007.
- [10] 袖山博, 鈴木浩平, 岩田範生, 砂子田勝昭, バイパス式 MR ダンパの設計法に関する研究, 日本機械学会論文集, C 編, 70 巻, 691 号, pp.625-632, 2004.
- [11] C.H. Lee, D.W. Lee, J.Y. Choi, S.B. Choi, W.O. Cho and H.C. Yun, Tribological Characteristics Modification of Magnetorheological Fluid, Transactions of ASME, Journal of Tribology, Vol.133, 031801-1-6, 2011.
- [12] Y. Oya, S. Miyamoto, S. Morishita, T. Shiraishi, Experimental Study on Visualization of Grease Flow, JAST Journal of Japanese Society of Tribologists, Vol.56, No.4, pp.248-255, 2011.
- [13] 白石俊彦, 三井田悠磨, 杉山慎也, 森下信, 磁気粘性グリースの基本特性と可制御型ダンパへの適用, 日本機械学会論文集, C 編, 77 巻, 778 号, pp.2193-2200, 2011.

- [14] Z. Jiang, R. E. Christenson, A Fully Dynamic Magneto-rheological Fluid Damper Model, *Smart Materials and Structures*, Vol.21, No.6, 2012.
- [15] Y. Nagano, T. Nakagawa and K. Suzuki, A basic study for an elevator emergency stop device utilizing M.R. Fluid, *Proceedings of 15th International Conference on Electrical Machines and Systems*, pp.1-4, 2012.
- [16] M. Rahman, M.M. Rashid, A.G.A. Muthalif and B. Kasemi, Evaluation of Different Control Policies of Semi-Active MR Fluid Damper of a Quarter-Car Model, *Applied Mechanics and Materials*, Vol.165, pp. 310-315, 2012.
- [17] Y-J Cha, A.K. Agrawal and S.J. Dyke, Time delay effects on large-scale MR damper based semi-active control strategies, *Smart Materials and Structures*, Vol.22, No.1, 2013.
- [18] S. Sugiyama, T. Sakurai and S. Morishita, Vibration Control of a Structure Using Magneto-Rheological Grease Damper, *Frontiers of Mechanical Engineering*, Vol.8, No.3, pp.261-267, 2013.
- [19] S. Akao, T. Sakurai and S. Morishita, Development and investigation of an Energy-Regenerative MR Damper, *Proceedings of Asia-Pacific Vibration Conference*, 2015.
- [20] T. Sakurai, S. Morishita, Seismic Response Reduction of a Three-story Building by MR Grease Damper, *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2017.
- [21] 桜井朋樹, 森下信, 構造物の地震応答に対する MR グリースダンパの効果の検討, *日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2015 論文集*, 335, 2015.
- [22] 大崎順彦, 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994.
- [23] 谷順二 編著, インテリジェント材料・流体システム, コロナ社, 1999.
- [24] 柴田明徳, 最新耐震構造解析<第2版>, 森北出版, 2003.
- [25] 太田外氣晴, 座間信作, 巨大地震と大規模構造物, 共立出版, 2005.
- [26] 日本建築学会編, 長周期地震動と建築物の耐震性, 丸善, 2007.
- [27] 日本建築学会編, やさしくわかる建物振動制御, 丸善出版, 2014.
- [28] 秋山宏, エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂出版, 1999.
- [29] (国研) 防災科学技術研究所, K-NET (Kyoshin Net : 全国強震観測網)

(<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>)

[30] 内閣府 HP, 官報資料版 No.2436, 平成 17 年版防災白書のあらまし

(<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/index.html>)

[31] 気象庁 HP, 震度データベース検索

(<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.php>)

謝辞

本論文の完成にあたりまして、お世話になりました以下の方々に深甚なる感謝の意を表します。

指導教官として終始ご指導、ご鞭撻を賜りました副学長、環境情報学府教授 森下信 先生に心から御礼を申し上げます。本論文をまとめるまでの博士課程後期の9年間とその後の1年間のみならず、学部の1年間（4年生時）、博士課程前期の2年間まで含めると、13年間の長きに渡って研究だけに限らず多くのご助言、ご指導、ご鞭撻をいただきました。本当にありがとうございます。

研究、その他で様々にご協力、ご支援を賜りました、白石俊彦 准教授にも厚く御礼申し上げます。

また、白石 准教授も含め、ご指導、ご助言をいただきました、山田貴博 教授、中野健 教授、松井和己 准教授にも厚く感謝を申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、横浜国立大学大学院生（当時）の杉山 慎也 君と赤尾 慧 君にも多大の協力、支援をいただきました。ここに名前を記して、厚く御礼申し上げます。

さらには、長きに渡ってご迷惑をおかけした、森下・白石研究室の皆さまにも、感謝いたします。