博 士 学 位 論 文
Doctoral Thesis

論文題目

Thesis Title

免震建物用変位検知型

性能可変オイルダンパーの開発とそのロバスト性

東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科

Graduate School of Engineering、

TOHOKU UNIVERSITY

専攻/Department： 都市・建築学専攻

学籍番号/ ID No： C0TD9704

氏 名 /Ｎａｍｅ： 小山 慶樹

Development and Robustness of a Passive Variable Orifice Oil Damper
with Sensing Threshold Displacements for Seismically Isolated Buildings

The Tokachi Offshore Earthquake in September 2003 and the Tohoku Pacific Earthquake in March 2011 caused significant damage from large earthquakes, drawing particular attention to long-period ground motions. In response to these events, in June 2016, the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) announced a countermeasure for long-period ground motions in the Nankai Trough, requiring safety assessments for structures exposed to seismic forces that exceed previous design standards. In general, seismically isolated buildings have a long primary natural period, and excessive horizontal displacement of the seismic isolation layer during long-period ground motions can result in a significant reduction in occupant performance due to collision with retaining walls. As a countermeasure against excessive horizontal displacement of the seismic isolation layer, stiffness and damping are added to the isolation layer to suppress horizontal displacement, but this increases the seismic force borne by the superstructure and may compromise the response reduction effect of the seismic isolation building.

In response to these challenges, researchers are actively developing oil dampers with the ability to passively detect threshold displacements and passively adjust damping forces when significant horizontal displacements occur during severe earthquakes. Several of these dampers under development provide two-stage velocity damping by switching damping coefficients once the threshold displacement is exceeded. Ongoing developments include dampers that increase the damping force only when displacements exceed the threshold, and dampers that maintain the increased damping force after the threshold has been exceeded, requiring resetting of the pins to restore the original damping performance after the earthquake event.

This study focuses on the development of a passive variable orifice oil damper(PVOD) with sensing threshold displacements that passively and continuously increases the damping force when significant horizontal displacements occur in the base isolation layer during an earthquake, maintains the increased damping force during the earthquake, and passively returns to the original damping performance after the earthquake has ended. The aim is to achieve the same level of response reduction as conventional base-isolated buildings for moderate to large earthquakes and to suppress the maximum displacement in the base-isolated layer during long-period ground motions.

The characteristic feature of the developed damper is the installation of a small oil-filled cylinder outside the uniflow type oil damper. When the damper experiences a displacement above a threshold value, the small cylinder moves in response, passively closing the valve and increasing the damping force. In addition, the changed damping performance has a self-regenerating characteristic, gradually returning to its original performance over time. In previous studies, there was a problem with air entering the small cylinder, resulting in insufficient increase in damping force as intended. To overcome this problem, holes have been made in the small cylinder rod cover to allow air to be purged horizontally without the need to position the damper vertically. This improvement ensures that full air purge can be achieved. In addition,

the valves that control the damper's damping performance can be adjusted externally without having to dismantle the damper.

Dynamic load tests were carried out to verify the damping performance using five PVODs with maximum damping forces in the 500 kN class. The results showed that the damping force increased in proportion to the displacement of the small cylinders and that the damping force could be adjusted to within +29% in the low speed range below the relief speed and -7% in the high speed range relative to the design standard. In addition, the time dependence of the self-regeneration characteristics of the damper was investigated and it was confirmed that the damper returned to its initial performance after approximately 4 minutes when the small cylinder was moved 25 cm. The maximum time difference between the start of movement of the small cylinder and the increase in damping force was 0.05 seconds.

A design method was proposed to evaluate the upper limit by considering the presence or absence of PVOD-specific self-reproduction characteristics, and the seismic performance of the developed PVODs was evaluated by applying them to actual seismically isolated buildings. In the case where the damping was simply multiplied by 1.5, the maximum horizontal displacement of the seismic isolation layer during long-period earthquake motions was reduced by 25%, but the response of the superstructure during moderate and large earthquakes was on average 20% greater than that of a conventional seismically isolated building. On the other hand, where the same number of PVODs were installed as in conventional seismically isolated buildings, the maximum horizontal displacement of the seismically isolated layer during long-period earthquake motions was effectively reduced by about 15% and the response of the superstructure during moderate and large earthquakes was comparable to that of conventional seismically isolated buildings, meeting the target seismic performance.

To verify the robustness of the seismic performance of isolated buildings using PVOD, Monte Carlo simulations were performed 10,000 times. Ensemble averages of the peak ground acceleration were modelled in increments of 100 cm/s^2 from 100 cm/s^2 to 1,000 cm/s^2. The results showed that PVOD reduced the expected peak acceleration response of the superstructure by approximately 10% for input levels below the moderate earthquake, compared to a model with a simple 1.5-fold increase in damping force. The regression characteristics of the PVOD were found to have a very small effect on the peak response values: a 10% increase in the damping force of the PVOD increased the expected peak acceleration response of the superstructure by 2% and reduced the expected peak horizontal displacement of the isolator by 5%. This indicates that the effect of changes in damping force on the horizontal displacement of the isolator is greater than its effect on acceleration. The coefficient of variation of the top surface acceleration response tended to increase for large earthquakes compared to conventional dampers due to the non-linear characteristics of the damper.

Based on the previous, this paper has developed a PVOD that can suppress excessive displacement during long-period seismic motion and make the response of the superstructure equivalent to that of ordinary seismically isolated buildings during moderate to large earthquakes, showing that the damper is applicable to actual seismically isolated buildings.

目　次

1　序　章

1.1 研究背景

構造設計者は、建物が負担すべき荷重や動的外乱を設定し、それにより、構造骨組に生じる応力・変位を解析により求め、入力レベルに対応した性能を設定し応力・変位が判定値を満たすことを検証する。そこで重要となる要素の一つは入力レベルの設定であり、自然環境、特に地震環境の評価が重要となる。建築構造物の性能評価基準を設定するためには、入力レベルに加えて社会が建築物に求めている性能を把握する必要があり、構造設計は自然環境による影響に加え、社会の要求に対して配慮し、それら含めた総合的な判断が求められる。

構造設計者が判断材料の基準とする我が国の建築基準法は 1950 年に施行された。1978 年 6 月 12 日の宮城県沖地震を受けて 1981 年 6 月に改正され、高さ 60m 超の建物に対する大臣認定制度導入や保有水平耐力計算が追加された。また、1995 年 1 月 17 日に発生した直下型地震による衝撃的な揺れが観測された兵庫県南部地震を受け、2000 年 6 月には性能規定の導入など、更なる建築基準法の改正が行われた。2001 年には超高層建築物の審査基準が建築基準法 38 条から法 20 条第一項第一号に移行し、設計用入力地震動は標準波に加えて告示波やサイト波を考慮するようになった。このように、建築基準法における耐震設計法は大きな地震を経験し、耐震性能が向上するように改正されてきた。

近年では、2003 年 9 月 26 日の十勝沖地震において、震源から 250km 以上離れた苫小牧で発生したスロッシングによる石油タンク火災を契機に本格的な長周期地震動の研究[1)、2)など]が注目された。また、2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では、複数の震源領域における連動型地震となり、日本国内観測史上最大のモーメントマグニチュード M_w 9.0 を記録し、首都圏や大阪湾岸の超高層建築物において大きな揺れが観測された[3)など]。これらを受け、2016 年 6 月 24 日に国土交通省から「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動対策について」（国住指第 1111 号）[4)]が全国の建築行政機関や指定性能評価機関に対して通知され、それまでの設計基準を超えたエネルギーを有する地震動に対して構造物の安全性検討が必要となった。

構造物の耐震安全性を向上させる手段として免震構造や制震構造などが挙げられる。免震という言葉は、昭和初期に岡隆一が「免震基礎に対する一考察」[5)]を建築雑誌に発表しており、古くから用いられ研究[6),7)など]されていたが、実施例は少なかった。免震構造が現在のように構造設計の手段の一つとして考えられるようになった契機は、1982 年に多田英之・山口昭一により設計された八千代台免震住宅（**写真 1.1**）である。また、ビル物の建物としては、1986 年に竣工した奥村組技術研究所（**写真 1.2**）があり、小山ら[8),9)]により 30 年実建物に用いられた積層ゴム支承の経年変化に関する論文を発表するなど、免震装置の信頼性に関する研究などが行われている。また、1995 年 1 月 17 日に発生した兵庫県南部地震時において、旧郵政省のウェストビルや松村組研究所などの免震建物の耐震安全性が広く認知された。この地震を契機に免震建物は急速に普及し、2021 年末時点で約 5,300 棟弱（戸建て

住宅を除く）の実績[10]があり、現在でも多くの研究や様々な免震装置の開発が行われ、免震技術の発展は継続している。

しかし、先に述べた長周期地震動時において免震建物では、免震層に生じる水平変位が過大になり、上部構造が擁壁などの隣接構造物に衝突して想定外の事象が生じる可能性がある。このことから、長周期地震時の免震層の過大な水平変位を抑制する、より高度な免震性能が要求されている。

写真 1.1　八千代台免震住宅

写真 1.2　奥村組技術研究所

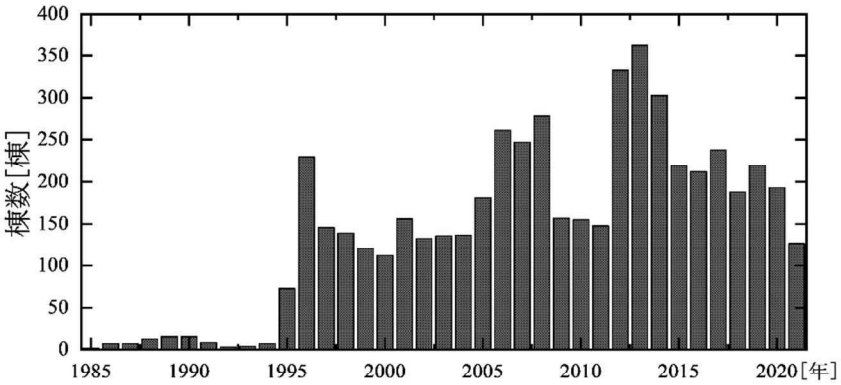


図 1.1　免震建築物計画推移

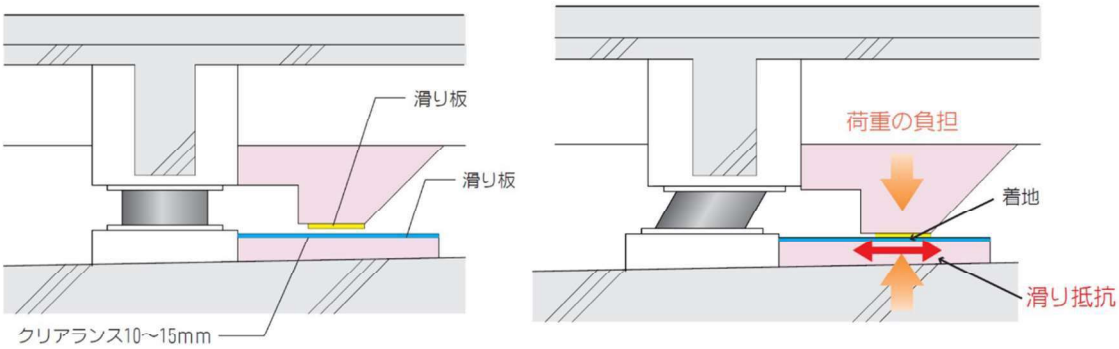
1.2 既往研究

免震建物の過大変位対策には、擁壁衝突を許容する場合と許容しない場合に大別される。免震建物の擁壁衝突時の上部構造の挙動については、振動台よる試験体レベルでの実験[14),15)]や実建物による実験およびそのシミュレーション[16)]など限られた知見があるが、衝突時の上部構造の応答加速度が大きくなることに加え、解析上の問題、例えば、上部構造の非線形性や衝突荷重の評価、擁壁背面土の水平剛性、ねじれ振動の影響、杭・地盤のモデル化未解明な部分が多くあり、擁壁衝突時の上部構造の挙動を十分に把握するには至っていない。

また、擁壁衝突の影響を低減させるための緩衝材、例えば、**写真 1.3** に示した高減ゴム製の緩衝材[17),18)]や、上部構造の擁壁衝突は回避するが免震装置の損傷・破断を許容する**図 1.2** に示したソフトランディング構法[19),20)]などが提案されている。

(a) 取り付け事例　(b) 圧縮試験前　(c) 圧縮試験後

写真 1.3　衝撃緩衝材の例[17),18)]



(a) 通常時　(b) 大地震時

図 1.2　ソフトランディング構法[19),20)]

また、国外においても、免震建物の巨大地震時に適切な抵抗力を摩擦や粘性減衰を付加することで、水平力と加速度応答を大きく増加させることなく、免震層の水平変位を効果的に抑制できることが John F Hall ら[11]などによって示されている。しかし、過度に減衰を追加すると、高次モードの応答が大きくなり、加速度応答や層間変形角が増加することが指摘されている[12]。そこで、Hamed Zargar ら[13]は一般的な地震動では剛性や減衰を付加せず、大きな地震時のみ剛性や減衰を付加することが有効な手段の一つであることに着目し、変位を閾値とした、剛性付加や減衰付加による上部構造の応答低減効果や変位抑制効果を解析的な検討から示し、特に、剛性付加よりも減衰付加の方が応答加速度と免震層の水平変位を抑制しやすいことを示した。

国内では、免震建物の過大な変位を抑制する構法として免震層に水平剛性を付加する構法がある。例えば、**図 1.3** に示した建物重量を負担しないシアキーを有する積層ゴム[21)~24)]や、**図 1.4** に示した積層ゴムと弾性すべり支承を組合せた過大変位抑制免震支承[25)~27)]などが開発され、その変位抑制効果が示されている。

また、減衰材であるオイルダンパーに不感帯を設け、**写真 1.4** や**図 1.5** に示すように、一定の変位以上に免震層に水平変位が生じた場合のみ減衰力を発揮する構法[28)~31),32),33)]が提案され、実建物に付加的な要素として設けられている事例がある。

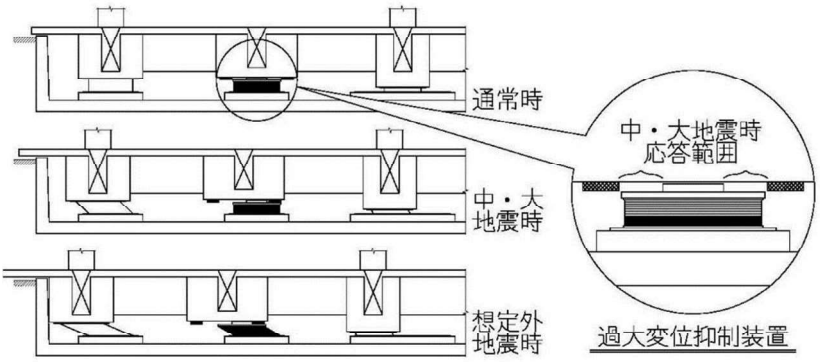


図 1.3　積層ゴムによる剛性付加[21)~24)]

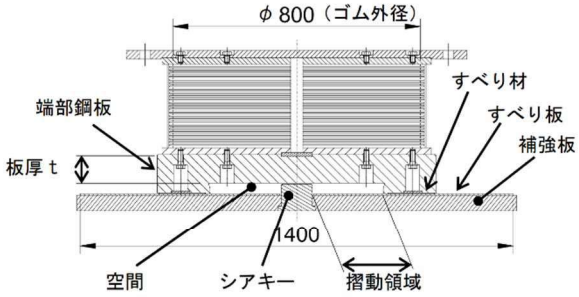


図 1.4 積層ゴムと弾性すべり支承を組合せた支承材 [25)~27)]

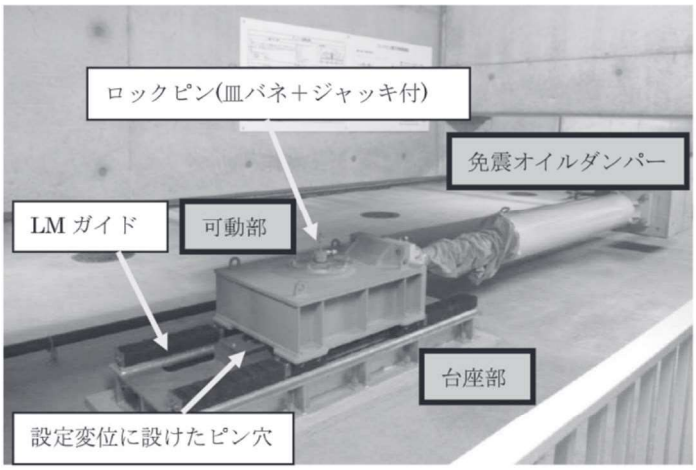


写真 1.4　免震ダンパー接続型付加減衰 [28)~31)]

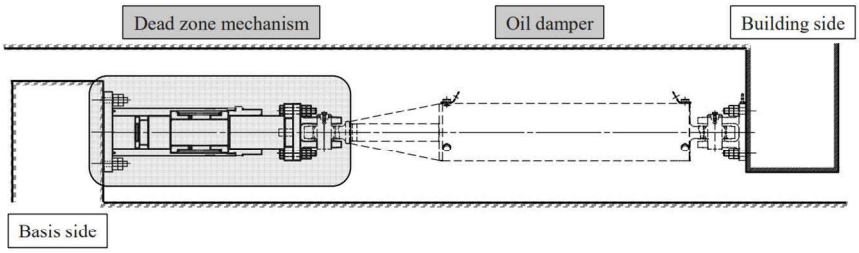


図 1.5　不感帯機構付きオイルダンパー[32)]

ダンパーの減衰係数を切り替えることで、免震建物の過大な変位を抑制する構法が提案されている。構造物の応答に応じて性能を変化させる装置は、川島ら [34)]が提案したバリアブルダンパーのようにセミアクティブ制御に基づくものをはじめとして、アクティブ制御に基づくものもなど国内外を問わず多数提案され、実建物に適用されている [35)]。例えば、2001 年に竣工した慶應義塾大学矢上キャンパス創想館(**写真 1.5**)には、主軸方向に 4 基、計 8 基のセミアクティブダンパーが設けられており、4 段階の減衰係数に切り替えることができるようになっている [36),37)]。セミアクティブ、アクティブ制御に関しては、制御理論が多種多様のものがあり、建築分野ではスカイフック理論や最適制御理論に基づき、免震装置のストロークや制御出力を考慮して設計される [38)]。しかし、一般の設計者には難解で制御の

部分がブラックボックスとして扱われてしまう傾向がある。また、制御システムの導入、維持管理が必要で、建物の揺れを検知するセンサーと制御力を決定するための演算を行うコンピューターが必要で定期的なメンテナンスや更新が必要である。さらに、電気が通電していることが前提であるため、地震時の停電に対する対処、制御性能の確保が難しく、広く普及するには課題がある。

(a)創想館外観

(b)セミアクティブダンパー外観

写真 1.5 創想館に用いられたセミアクティブダンパー[36),37)]

一方で、オイルダンパーに特殊な機構を組合せ、パッシブで減衰力を切替える性能可変オイルダンパーの開発も行われている。例えば、**写真 1.6**、**図 1.6** に示した速度を検知して減衰力を切り替える機構が荻野ら[39)~43)]によって試行されている。また、変位を検知して減衰力を切替える性能可変オイルダンパーも提案され、実建物へ適用している事例がある。

例えば、**図 1.7** に示した免震層の変位が閾値を超えた場合のみ減衰力が増加するデュアルフィットダンパー[44),45)]や、免震層の変位が閾値を超えた場合は、それ以降の一次減衰係数を大きくして、減衰力を増加させる T-S オイルダンパー[47)~50)]が開発され、免震建物に適用されている。また、免震層の変位に応じて減衰力をパッシブかつ段階的に変化させる性能可変オイルダンパーが井上・五十子ら[51)~63)]により開発されており、これまで縮小試験体実験と変位検知部の部分試験体実大実験が実施されている。

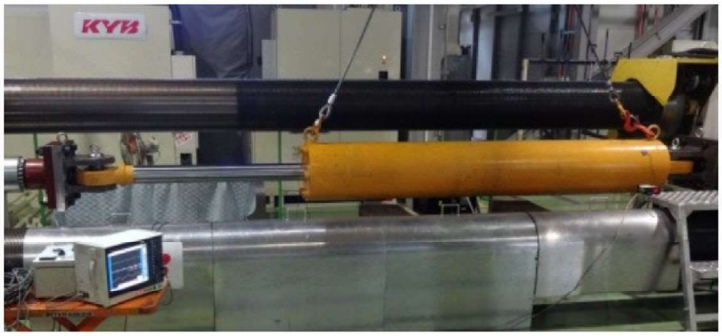


写真 1.6　外観（速度依存型）[39)~43)]

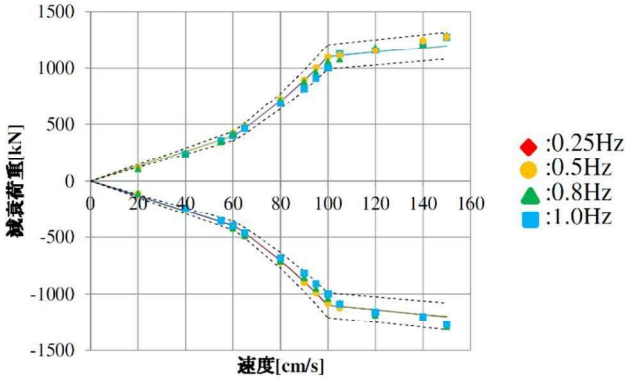
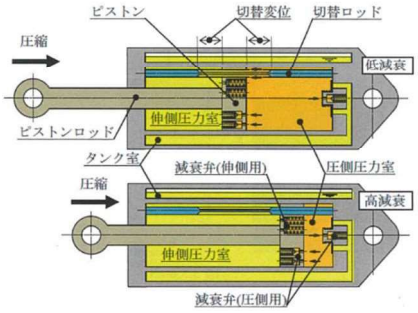
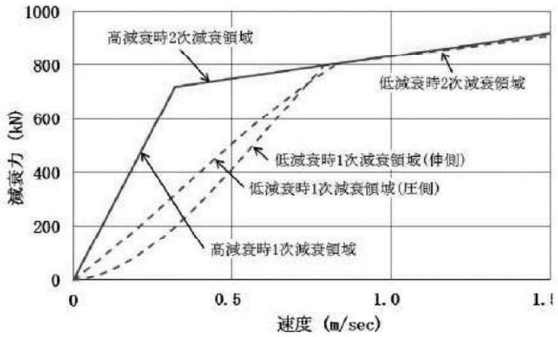


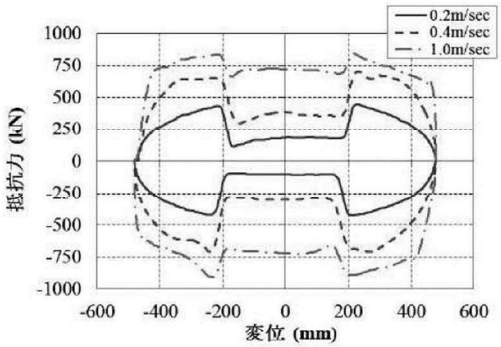
図 1.6　減衰力と速度の関係（速度検知型）[39)~43)]



(a) 機構模式図

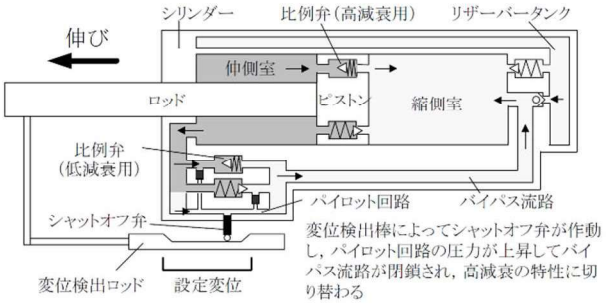


(b) 速度と減衰力の関係

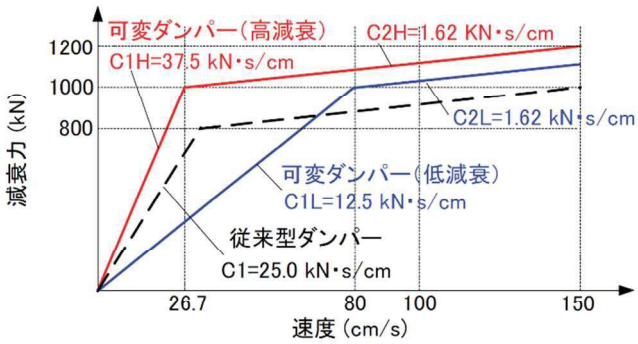


(b) 変位と減衰力の関係

図 1.7　デュアルフィットダンパー[44),45)]



(a) 機構模式図



(b) 速度と減衰力の関係

図 1.8　T－S オイルダンパー[47)～50)]

1.3　研究目的および論文構成

一般に、免震層の水平変位を抑制するためには、免震層の水平剛性や減衰量を付加するなどの対策があるが、上部構造が負担する地震力が増加してしまうといったデメリットが生じてしまう。そこで、本研究では免震層の変位を検知して減衰力を変化することで、中小地震時の応答加速度を低減しつつ、巨大地震時に生じる免震層の過大な水平変位を抑制することが可能な振動制御装置を開発することを目的とする。実免震建物のダンパー改修や狭小敷地に計画される免震建物へ適用することを目指し、実大の性能可変オイルダンパー試験体を製作して、実験から減衰性能を検証し、建物に適用した場合の変位抑制効果や上部構造への影響について検討を行う。

本論の構成は以下の概要で構成されている。

２章　性能可変オイルダンパーの構成や機構、その作動原理を示し、減衰係数の切替え機構を示す。また、設計時に用いる減衰力と速度の関係式を示し、本ダンパーの構成部材や品質基準、防錆基準、据付精度、形状および寸法の公差などの品質基準を示す。

３章　5 基の 500kN 級性能可変オイルダンパーを製作し、その性能確認試験を実施し、減衰性能や製造ばらつきを示す。まず、試験機の概要および測定計画を示す。正弦波加振による試験を実施し、その水平性能を明らかにする。次に、温度や周波数依存性、繰り返しによる耐久性、長周期地震動時の水平性能に与える影響に対して、免震材料の材料認定と同等の試験を実施し、減衰性能に与える影響を明らかにする。また、限界速度や限界減衰力による座屈試験を実施し、ダンパーの限界性能についても確認を行う。さらに、減衰性能が切替る時間遅れについて、三角波を実施し小形シリンダが作動してから減衰力が増加するまでの時間遅れを実験から明らかにし、ダンパーの履歴吸収エネルギーに影響を与えないことを示す。

４章　実存する免震建物を対象に性能可変オイルダンパーを適用した設計事例を示し、その変位抑制効果や最大応答値を評価し、通常のバイリニア型のオイルダンパーによる変位抑制を行った場合との上部構造の最大応答値の比較を行う。

５章　建物の構造性能を確定、入力地震動を不確定として扱い、入力地震動の不確定性が変位検知型性能可変オイルダンパーの最大応答値に与える影響について検討する。入力地震動はパワースペクトルと振幅包絡線でモデル化した。モンテカルロシミュレーションを 10,000 回実行し、位相特性の影響を平均化して、構造物の頂部最大応答加速度や免震層の最大水平変位の期待値 E、標準偏差 σ、および変動係数 $c.o.v$ を評価し、ロバスト性に与える影響について検討した。

６章　５章までに得られた知見をまとめた。

2　変位検知型性能可変オイルダンパーの概要

2.1　変位検知型性能可変オイルダンパーの構成

性能可変オイルダンパーは、免震建物の減衰材として免震層に設けられる。性能可変オイルダンパーの建物取付け例を**図 2.1** に、外観を**図 2.2** にそれぞれ示す。性能可変オイルダンパーは流体系の減衰材として、地震発生時などに生じる上部構造と下部構造の速度差に応じて減衰力を発揮し、免震建物に適度な減衰を付与する。本オイルダンパーは、減衰力を伝達するピストンロッド、両端ピン、作動油圧力室内のシリンダ、作動油タンク室の外シリンダ、減衰力発生機構の減衰弁、減衰弁ばね、作動油、および気密機構のパッキンなどから構成される。また、ある一定以上の変位がダンパーに生じると、ダンパーの軸変形に連動してオイルが充填された小形シリンダがパッシブに作動し、減衰力を無段階で増加させる機構を有する。減衰力が生じると、ダンパーに吸収されたエネルギーは作動油などの熱エネルギーとして蓄えられ、大気に放出される。

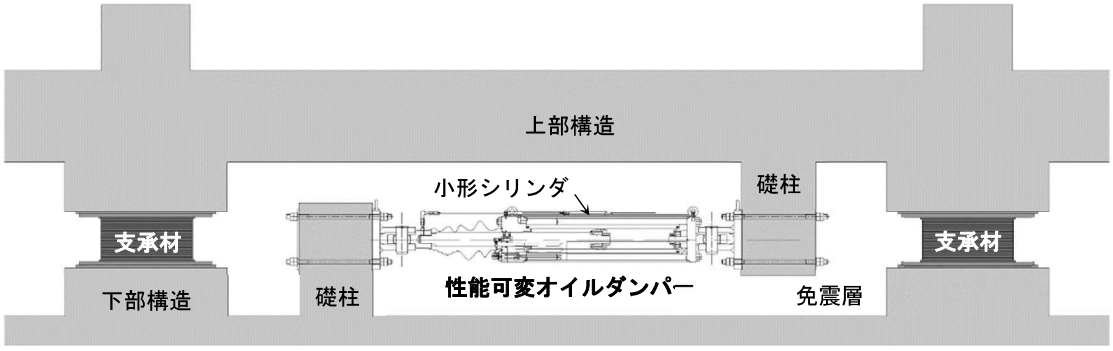


図 2.1　建物取付け例

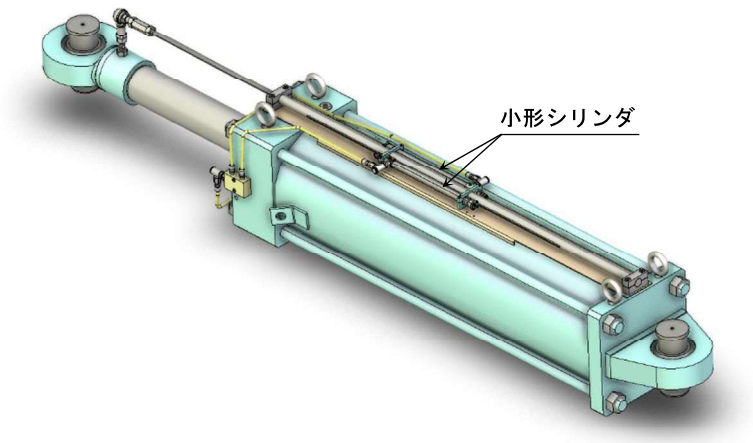


図 2.2　性能可変オイルダンパーの外観

2.2　変位検知型性能可変オイルダンパーの機構

性能可変オイルダンパーの機構模式図を**図 2.3** に示す。本ダンパーはユニフロー式のオイルダンパーの外部にオイルが充填された小形シリンダが設置されている点が特徴である。ガイドロッドの端部とその両側の小形シリンダとの間隔を設定クリアランス L_s と称し、設計者が任意に規定することが可能である。設定クリアランス L_s 以上の変位がダンパーに生じた場合、ガイドロッドの先端部のセットプレートがストッパと干渉し、小形シリンダのロッドを作動させパイロット油を吐出させる。吐出したパイロット油は、配管とパイロットケースを通してばね座を押し込み、調圧弁ばねを圧縮し減衰力が増加する。押し込まれたパイロット油は地震終了後に圧縮された調圧弁ばねにより小形シリンダ側に自動で押し戻されて性能可変前の減衰性能に戻る。

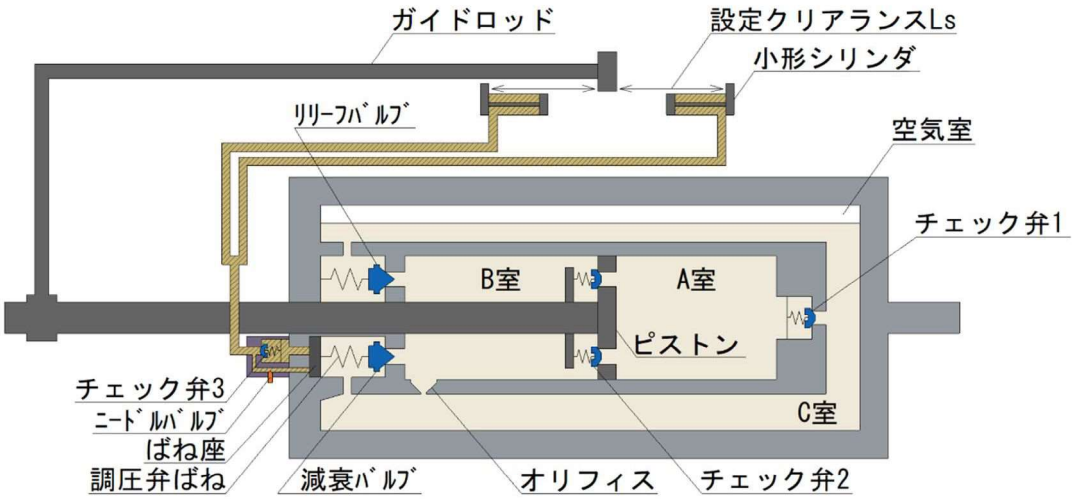


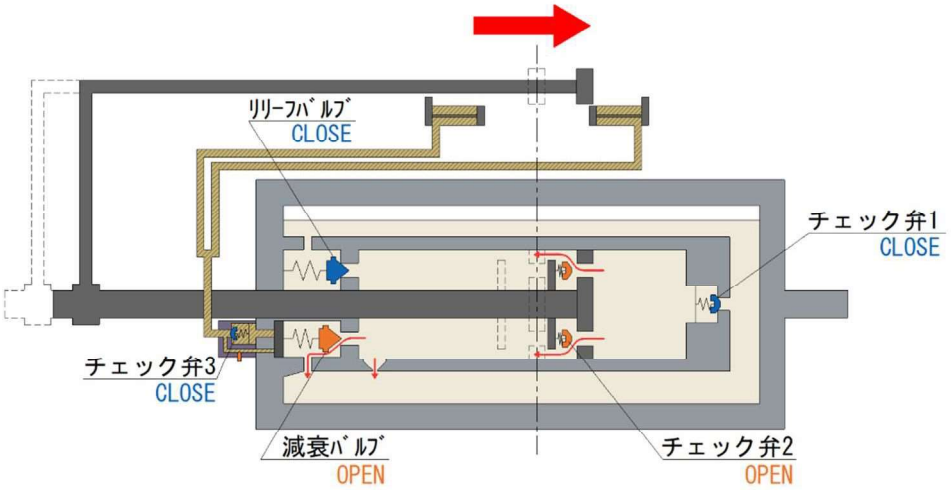
図 2.3　性能可変オイルダンパーの機構模式図

性能変化前の圧縮時と引張時における作動原理を**図 2.4**、**図 2.5** に示す。圧縮時には、チェック弁 1 は閉じており、A 室内の作動油が直接 C 室に流出することはなく、チェック弁 2 を介して A 室から B 室へ流出する。これに伴い、B 室内の作動油が押し出され、減衰バルブとオリフィスを介して C 室へ流出する。減衰力が大きくなるとリリーフバルブが開き、二次減衰係数 C_2 へ変化し、減衰力ー速度関係がバイリニア特性となる。

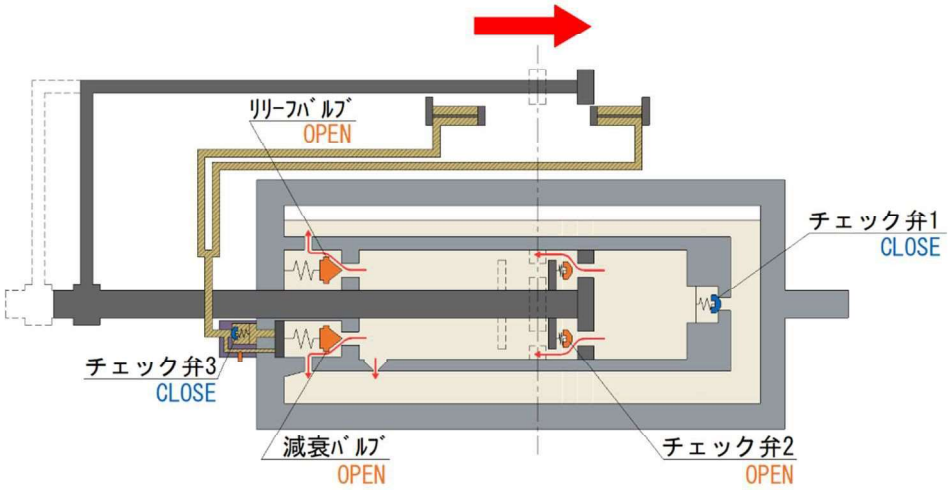
引張時には、チェック弁 2 が閉じているので、作動油が B 室から A 室へ流出することはない。B 室内の作動油は減衰バルブとオリフィスを介して C 室へ流出する。圧縮時、引張時ともに、チェック弁 1 とチェック弁 2 が作動し、内部の作動油の流れが常に一方向となり、ダンパーの部材長を短くすることができる。なお、圧縮側と引張側の減衰性能を同一とするため、調圧弁を流れる油量が同じになるようにロッド径とピストン径の比は $1:\sqrt{2}$ としている。また、減衰力が大きくなると、圧縮時と同様にリリーフバルブが開き、二次減衰係数 C_2

へ変化し、減衰力ー速度関係がバイリニア特性となる。

以上のように、ユニフロー式オイルダンパーは圧縮時と引張時で作動原理が異なるが、チェック弁 1、2 の開閉に伴い、減衰バルブとオリフィスに流れる油量は圧縮時と引張時で常に同量となり、減衰力を発揮することができる。また、ユニフロー式を採用することで、性能可変機構を司る調圧弁やリリーフ特性を付与するリリーフ弁は外部から部品調整が可能で、計画特性が得られない場合でも、ダンパーを解体することなく性能調整が行える特徴がある。

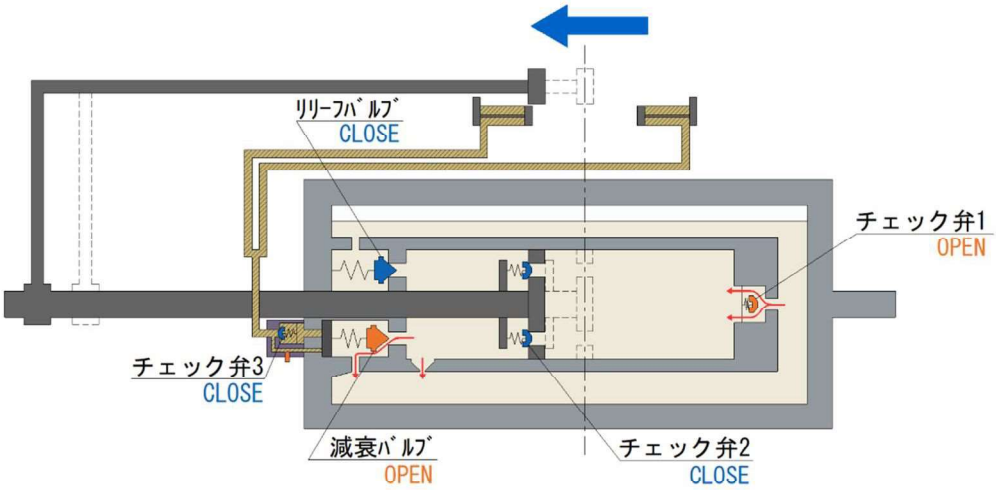


(a-1) 圧縮側、C_1 特性時

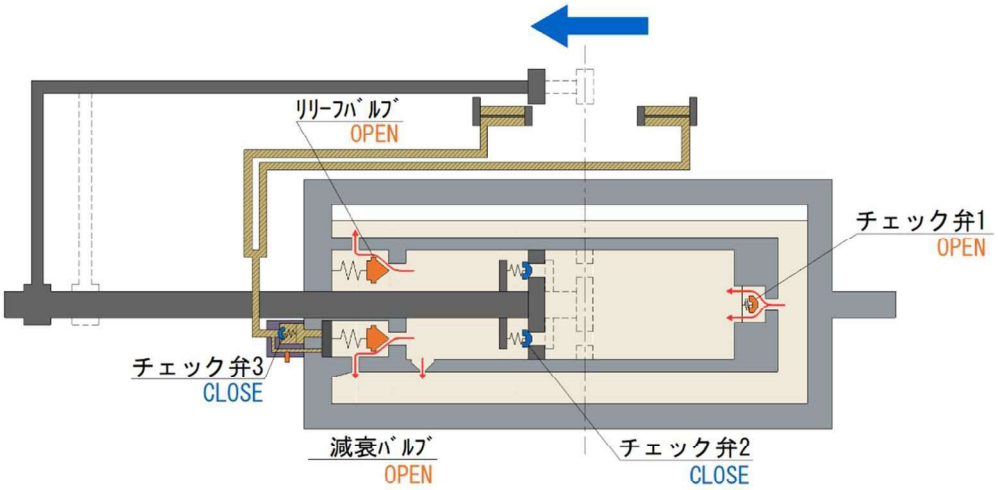


(a-2) 圧縮側、C_2 特性時

図 2.4　性能変化前の作動原理（圧縮側）



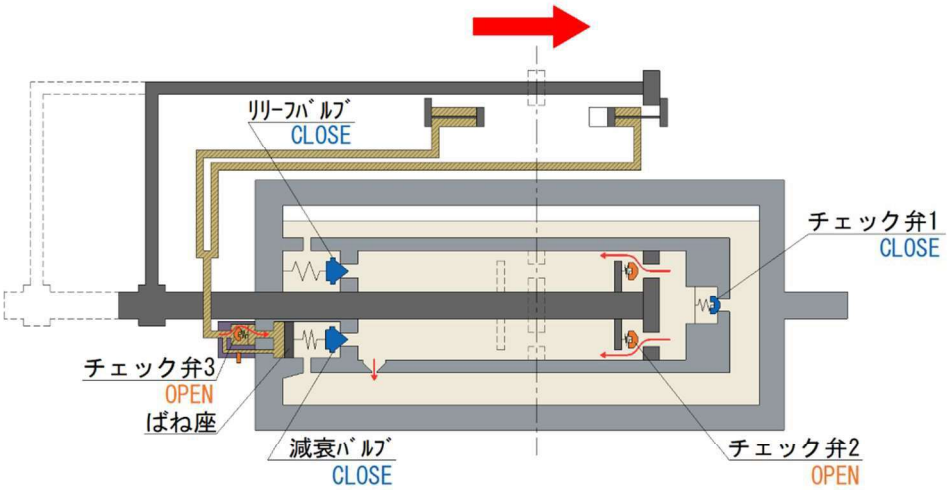
(b-1) 引張側、C_1 特性時



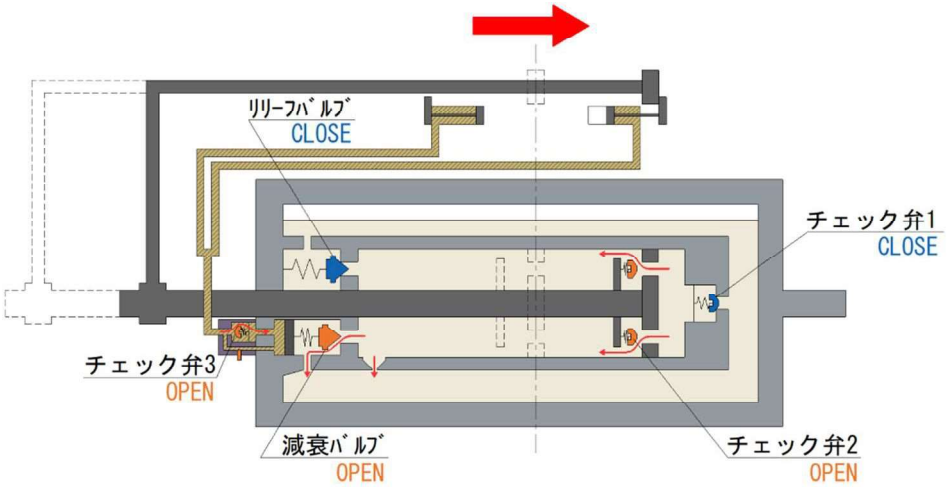
(b-2) 引張側、C_2 特性時

図 2.5　性能変化前の作動原理（引張側）

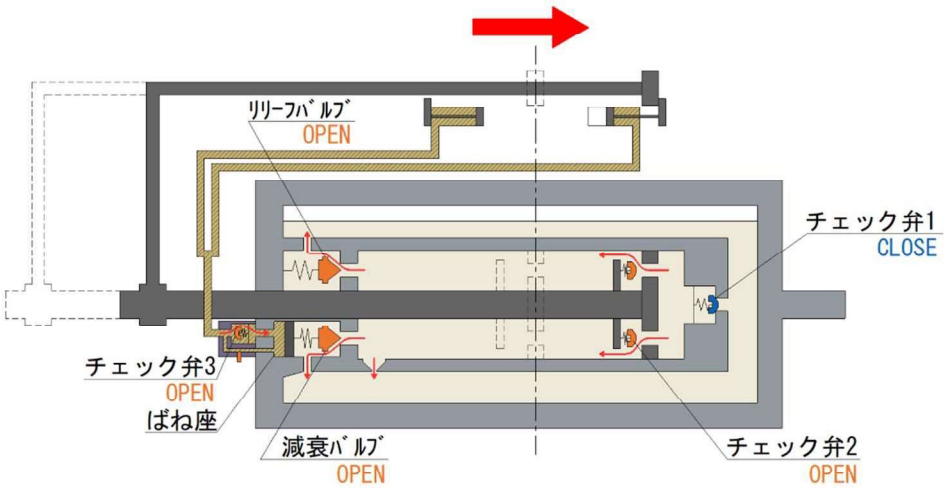
次に、性能変化後の圧縮時と引張時における作動原理を図 2.6、図 2.7 に示す。ダンパーの変位が設定クリアランス L_S 以上となり、ガイドロッドの先端部のセットプレートがストッパと干渉し、小形シリンダのロッドを作動させ、小形シリンダ内に充填された作動油が加圧され、チェック弁 3 が開き、ばね座を押込む。押し込まれた作動油は、調圧弁ばねを圧縮し、減衰バルブが閉じることで減衰力が増加する。減衰力が大きくなると、減衰バルブ、リリーフバルブの順にバルブが開き、3 段階の減衰係数となる。ここで、ばね座の押し込み量が大きくなると調圧弁ばねの圧縮力が大きくなることから、小形シリンダの作動距離が大きくなると、減衰バルブが開く減衰力も大きくなる。



（a-1） 圧縮側、${}_{v}C_{1}$ 特性時

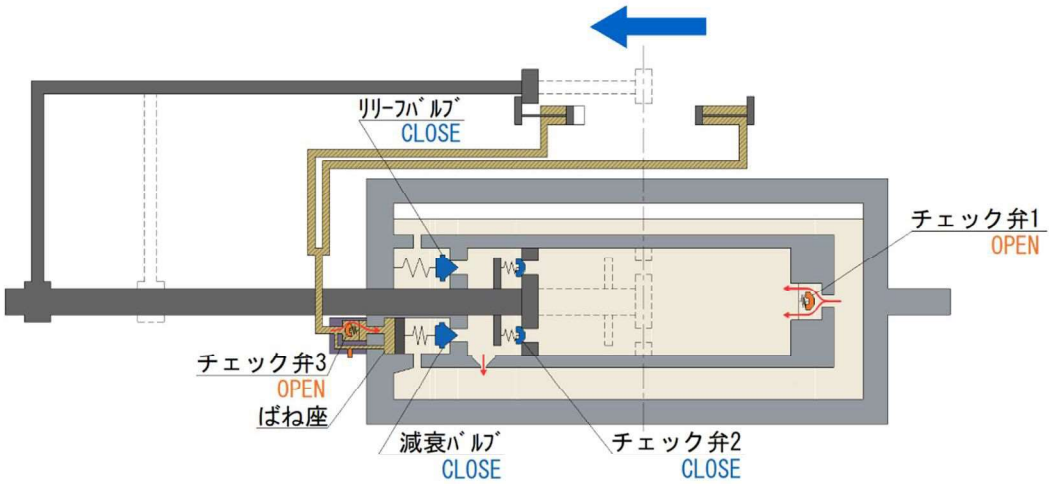


（a-2） 圧縮側、${}_{v}C_{2}$ 特性時

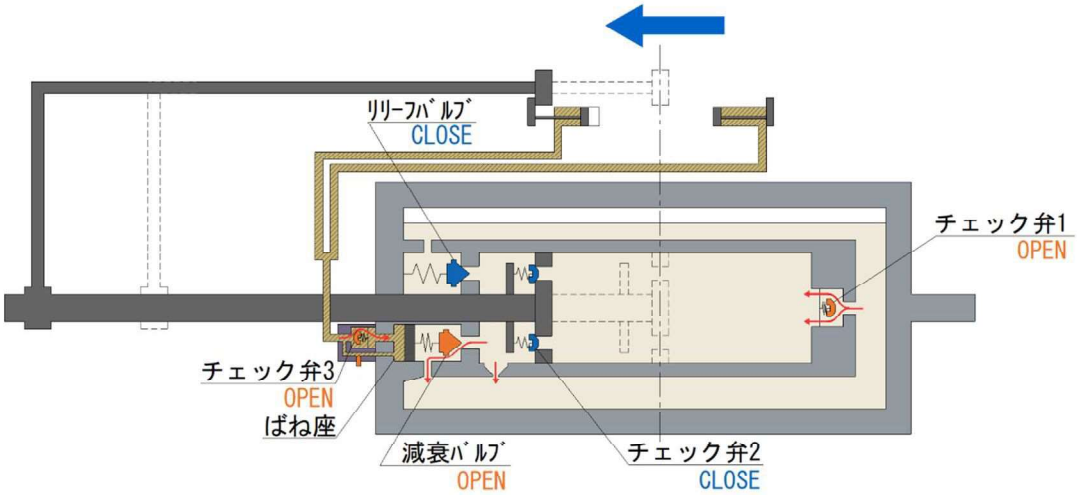


（a-3） 圧縮側、${}_{v}C_{3}$ 特性時

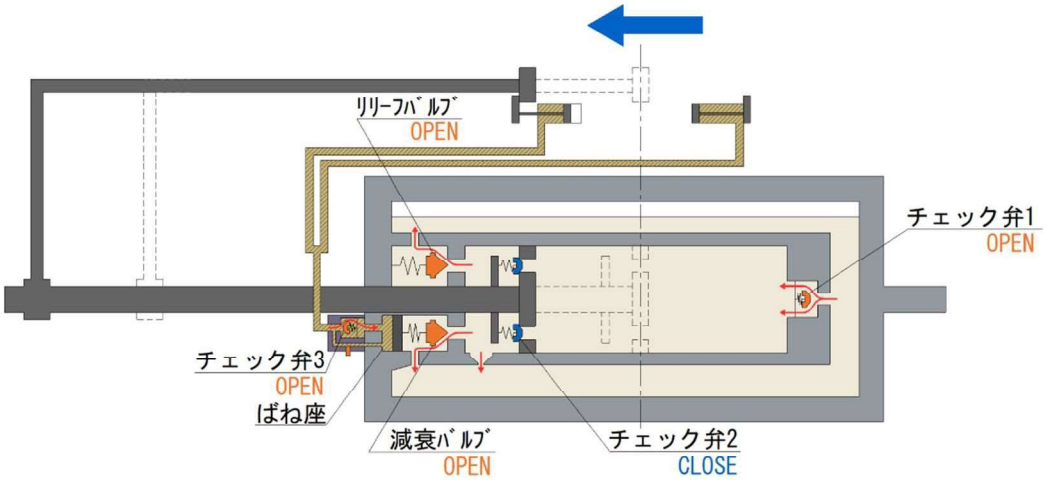
図 2.6　性能変化後の作動原理（圧縮側）



(b-1) 引張側、${}_{v}C_{1}$ 特性時



(b-2) 引張側、${}_{v}C_{2}$ 特性時



(b-3) 引張側、${}_{v}C_{3}$ 特性時

図 2.7　性能変化後の作動原理（引張側）

性能が変化した状態から、ばね座を押し込んだ小形シリンダ内の作動油は、**図 2.8** に示すように調圧弁ばねによって小形シリンダ内に押し戻され、性能変化前の状態に時間を掛けて徐々に戻る。その時間依存性については、ニードルバルブの開閉状態を調整することで調整することが可能である。圧縮側と引張側の性能変化前後のバルブの開閉状況一覧を**表 2.1** に示す。

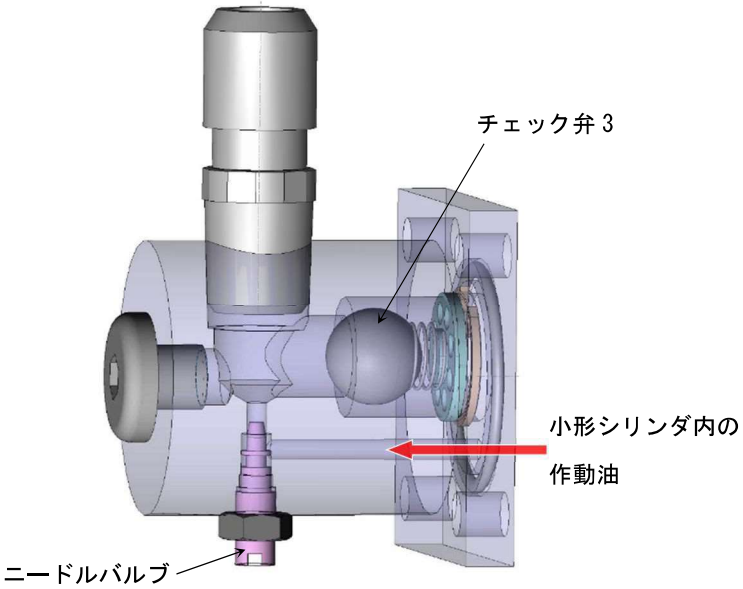
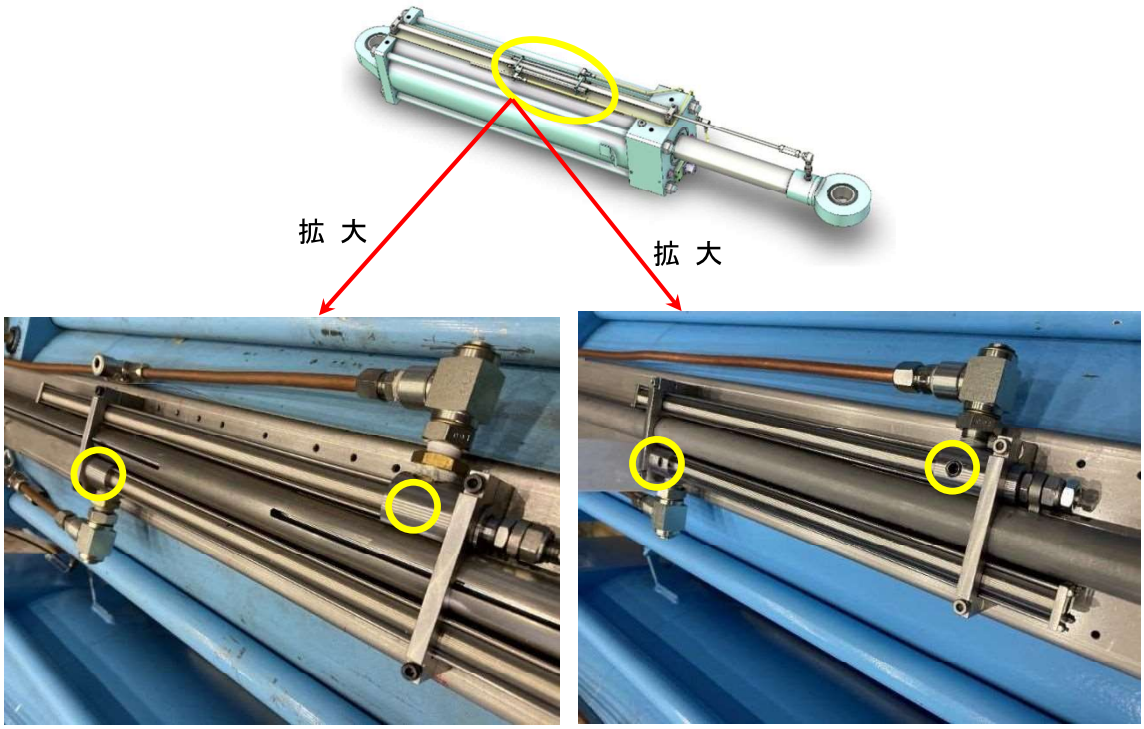


図 2.8　回帰特性を調整するニードルバルブ

表 2.1　バルブ開閉状況一覧

			チェック弁			減衰バルブ	リリーフバルブ
			1	2	3		
圧縮側	性能変化前	C_1	CLOSE	OPEN	CLOSE	OPEN	CLOSE
		C_2	CLOSE	OPEN	CLOSE	OPEN	OPEN
	性能変化後	vC_1	CLOSE	OPEN	OPEN	CLOSE	CLOSE
		vC_2	CLOSE	OPEN	OPEN	OPEN	CLOSE
		vC_3	CLOSE	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN
引張側	性能変化前	C_1	OPEN	CLOSE	CLOSE	OPEN	CLOSE
		C_2	OPEN	CLOSE	CLOSE	OPEN	OPEN
	性能変化後	vC_1	OPEN	CLOSE	OPEN	CLOSE	CLOSE
		vC_2	OPEN	CLOSE	OPEN	OPEN	CLOSE
		vC_3	OPEN	CLOSE	OPEN	OPEN	OPEN

既往の研究では、小形シリンダ内のエア(空気)が問題で、減衰力の増加が想定以下に留まってしまう問題があった。小形シリンダのエアを抜くためには、ダンパーを垂直に立てて、パイロットケース部を上にする必要があった。そこで、小形シリンダのエア抜き作業を容易にするために、小形シリンダのロッドカバー部に孔を設け、水平にダンパーを置いた状態で、小形シリンダ内のエア抜き作業が行えるように改良した。小形シリンダのエア抜き孔を**写真 2.1** に示す。



(a) 改良前　　(b) 改良後

写真 2.1　小形シリンダのエア抜き孔

2.3　変位検知型性能可変オイルダンパーの基本特性

免震層の最大水平変位 $\delta_{\max}(t)$ が設定クリアランス L_S 未満の場合、オイルダンパーの減衰力 $F_d(t)$ は次式から求める。

$$\left.\begin{array}{ll} |V(t)| < V_r \text{の場合} & F_d(t) = C_1 \times V(t) \\ |V(t)| \geq V_r \text{の場合} & F_d(t) = sign\left(V(t)\right) \times (F_r + C_2 \times \left(|V(t)| - V_r\right) \end{array}\right\} \tag{2.1}$$

ここで、$V(t)$:ある時刻の速度

F_d :減衰力

F_{dd} :切片減衰力

$F_{d\max}$:最大減衰力

C_1 :性能変化前の一次減衰係数

C_2 :性能変化前の二次減衰係数（$= \left(F_{d\max} - F_{dd}\right) / {}_DV_{\max}$）

${}_DV_{\max}$:設計用限界速度(=150 [cm/s])

F_r :性能変化前のリリーフ減衰力（$= C_1 \left\{F_{dd} / \left(C_1 - C_2\right)\right\}$）

V_r :性能変化前のリリーフ速度（$= F_{dd} / \left(C_1 - C_2\right)$）

ダンパーの最大水平変位 $\delta_{\max}(t)$ が設定クリアランス L_S 以上になると、小形シリンダの作動距離 X_c に比例して無段階で、かつ、パッシブに減衰力 $F_d(t)$ が変化する。性能変化後で、かつ、第一折れ点の減衰力 F_{r1} が最大リリーフ減衰力 $F_{r\max}$ 未満の場合の減衰力 $F_d(t)$ は次式から求める。

$$\left.\begin{array}{l} |V(t)| < V_{r1} \text{の場合} \\ \qquad F_d(t) = {}_v\boldsymbol{C}_1 \times V(t) \\ V_{r1} \leq |V(t)| < V_{r2} \text{の場合} \\ \qquad F_d(t) = sign\left(V(t)\right) \times \left\{F_{r1} + {}_v\boldsymbol{C}_2 \left(|V(t)| - V_{r1}\right)\right\} \\ |V(t)| \geq V_{r2} \text{の場合} \\ \qquad F_d(t) = sign\left(V(t)\right) \times \left\{F_{r1} + {}_v\boldsymbol{C}_2 \left(V_{r2} - V_{r1}\right) + {}_v\boldsymbol{C}_3 \left(|V(t)| - V_{r2}\right)\right\} \end{array}\right\} \tag{2.2}$$

ここで、${}_v\boldsymbol{C}_1$：性能変化後の一次減衰係数

${}_v\boldsymbol{C}_2$：性能変化後の二次減衰係数（$=C_1$）

${}_v\boldsymbol{C}_3$：性能変化後の三次減衰係数（$=C_2$）

F_{r1}：第一折れ点荷重

（$=\alpha\times K_{sp}\times X_c\times\zeta$、ただし、$F_{r\max}$未満）

F_{r2}：第二折れ点荷重（$=F_{r1}+{}_v\boldsymbol{C}_2(V_{r2}-V_{r1})$）

$F_{r\max}$：最大リリーフ荷重

（$=\min\left(\alpha\times K_{sp}\times X_{c\max}\times\zeta,\ \dfrac{{}_v\boldsymbol{C}_1\times F_{dd}}{{}_v\boldsymbol{C}_1-{}_v\boldsymbol{C}_3}\right)$）

V_{r1}：第一折れ点速度$(=F_{r1}/{}_v\boldsymbol{C}_1)$

V_{r2}：第二折れ点速度

（$=\{F_{dd}-(1-{}_v\boldsymbol{C}_2/{}_v\boldsymbol{C}_1)F_{r1}\}/({}_v\boldsymbol{C}_2-{}_v\boldsymbol{C}_3)$）

$\alpha=A_C/A_{SP}\times A_P/A_V$

A_C：小形シリンダ断面積

A_{SP}：ばね座面積

A_P：ピストン面積

A_V：減衰バルブ面積

K_{sp}：調圧弁ばね剛性

X_c：小形シリンダの作動距離（$=\delta_{\max}(t)-L_S$）

$X_{c\max}$：小形シリンダの最大作動距離

ζ：低減倍率

次に、ダンパーの最大水平変位$\delta_{\max}(t)$が設定クリアランスL_S以上で、かつ第一折れ点のリリーフ減衰力F_{r1}が最大リリーフ減衰力$F_{r\max}$の場合の減衰力$F_d(t)$は次式から求める。

$$\left.\begin{array}{ll}|V(t)|<V_{r1}\text{の場合} & F_d(t)={}_v\boldsymbol{C}_1\times V(t)\\ |V(t)|\geq V_{r1}\text{の場合} & F_d(t)=sign\big(V(t)\big)\times\Big\{F_{r1}+{}_v\boldsymbol{C}_3\big(|V(t)|-V_{r1}\big)\Big\}\end{array}\right\}\tag{2.3}$$

以上のことより、性能変化前の(2.1)式はバイリニア型の減衰力ー速度関係となり、性能変化後は、小形シリンダの作動距離X_cに応じて、(2.2)式または(2.3)式となり、トリリニア型からバイリニア型の減衰力ー速度関係となる。

ここで、最大減衰力 $F_{d\max}$ を 500kN の性能可変オイルダンパーの減衰力(設計基準値)と速度の関係を**図 2.9** に示す。ダンパーの最大変位 $\delta_{\max}(t)$ と設定クリアランス L_S から求まる小形シリンダの作動距離 X_c によって、バイリニア型からトリリニア型、バイリニア型へ減衰力が無段階で変化する。

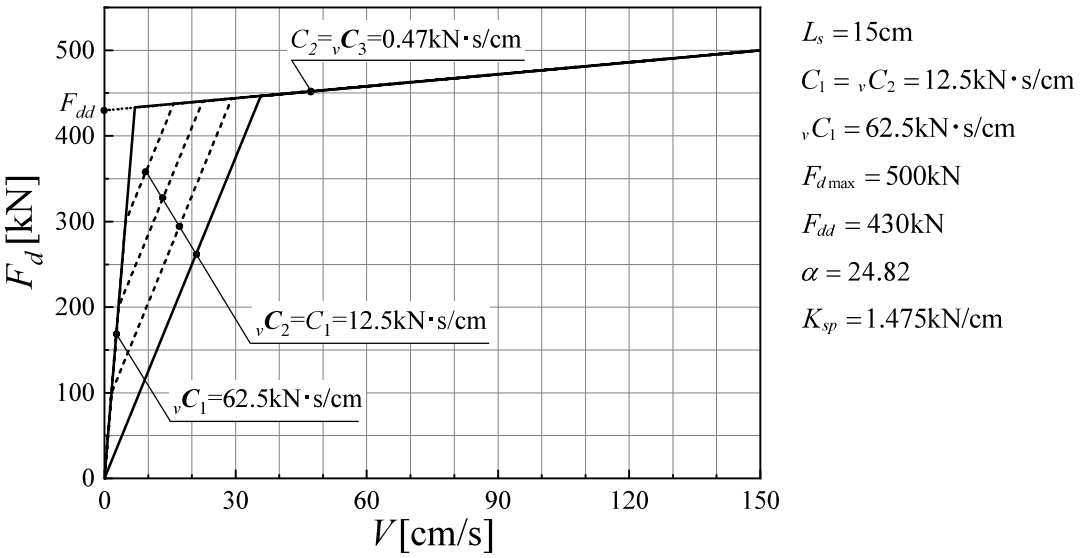


図 2.9　減衰力(設計基準値)と速度の関係

性能可変オイルダンパーの減衰力算定フローを**図 2.10** に示す。

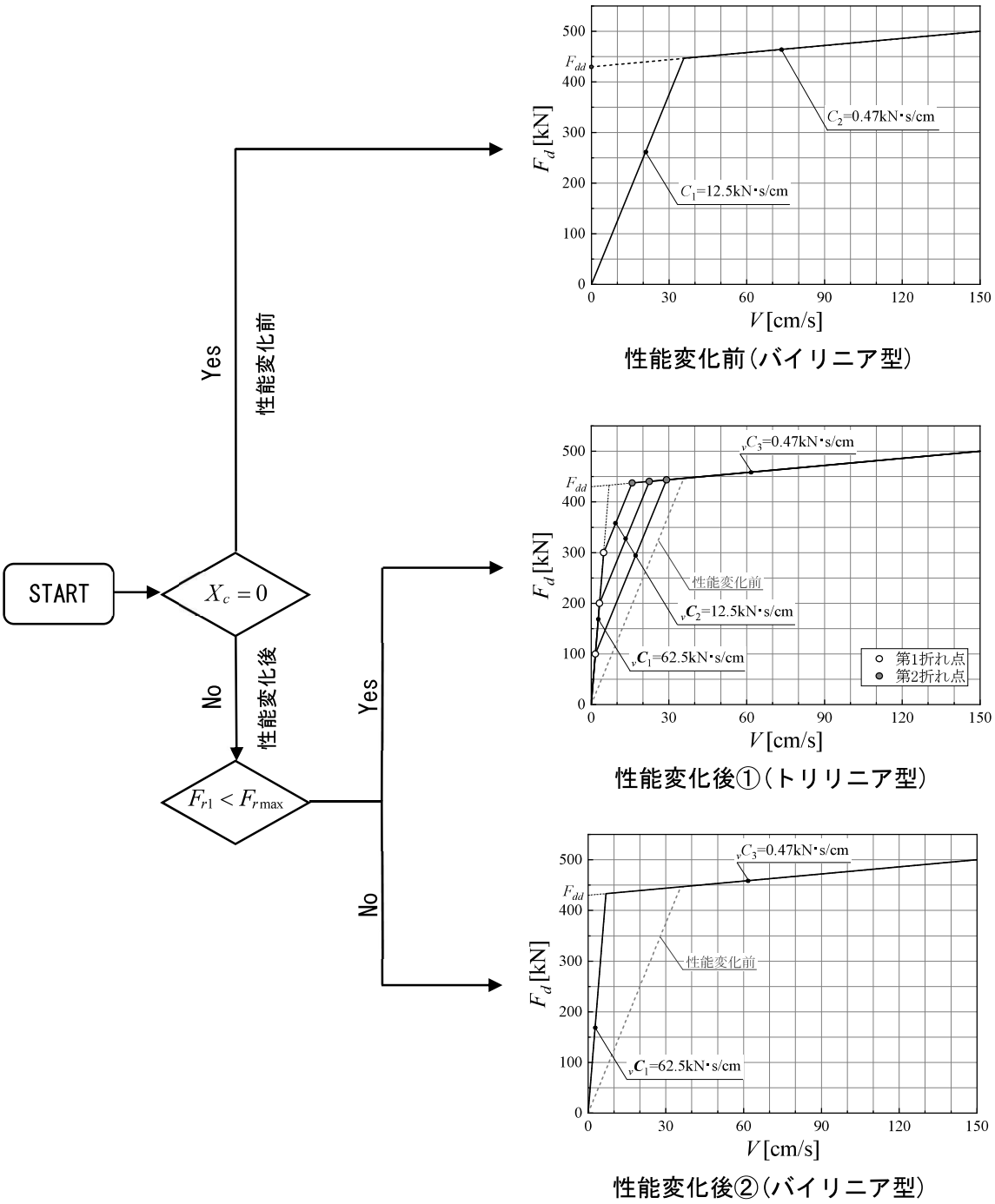


図 2.10　性能可変オイルダンパーの減衰力算定フロー図

2.4　構成部材料

性能可変オイルダンパーの材料構成を、図 2.11、表 2.2 に示す。ダンパー本体はシリンダ、ロッド、ピストンなどで構成され、作動油が内封されている。一般的なオイルダンパーと同様に取付けピン、ブラケットで免震建物に取付けられる構造で、⑩から㉓の構成部材で減衰力を変化させる。ダンパー1 基あたりの重量は、概ね 580kg である。

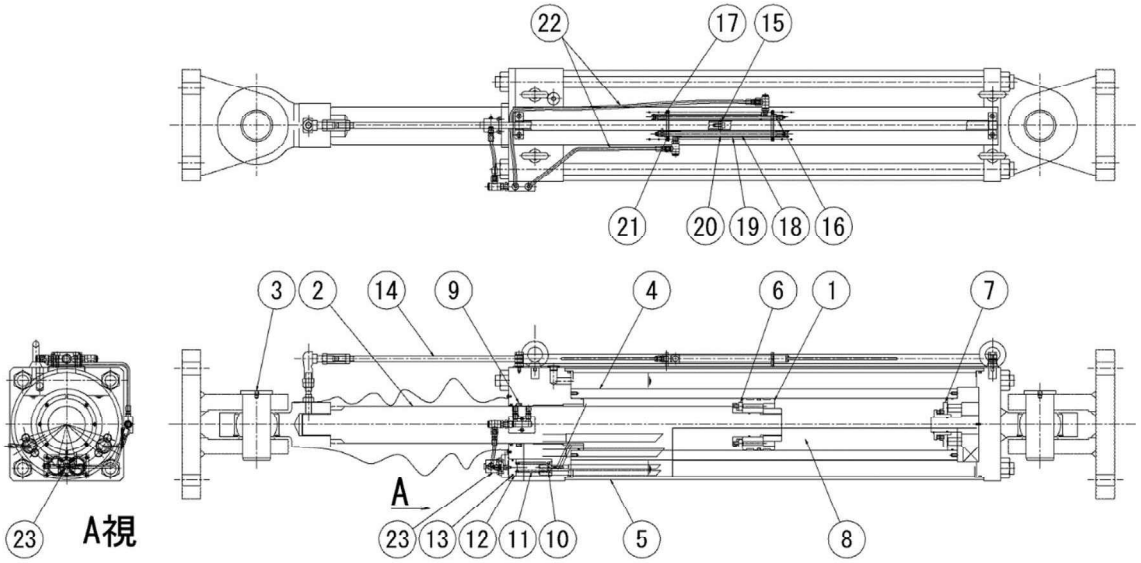


図 2.11　性能可変オイルダンパー姿図

表 2.2　材料の構成

項番	機能	部品名称	材料	適用規格 （日本産業規格）
①	力の伝達	ピストン	鋳鉄品	JIS G 5502
②		ロッド	構造用炭素鋼鋼材	JIS G 4051※1
③		両端ピン	構造用炭素鋼鋼材	JIS G 4051
④	圧力室	内シリンダ	構造用炭素鋼管	JIS G 3478
⑤	作動油タンク室	外シリンダ	構造用鋼管	JIS G 3445
⑥	減衰方向切替弁	逆止め弁	構造用炭素鋼鋼材	JIS G 4051
⑦				
⑧	減衰力の発生	作動油	鉱物油	ENEOS㈱ ダンパオイル N10
⑨	気密機構	パッキン	ウレタンゴム	NOK㈱ U801
⑩	減衰力可変機構	調圧弁	構造用炭素鋼鋼材	JIS G 4051
⑪		調圧弁バネ	ピアノ線 SWP-B	JIS G 3522
⑫		バネ座	アルミニウム	JIS H 4080
⑬	気密機構	パッキン	ニトリルゴム	㈱坂上製作
⑭	変位の伝達	ガイドロッド	SUS440 相当	JIS G 4303※1
⑮		セットプレート	SUS304	JIS G 4303
⑯		ストッパ	SUS304	JIS G 4303
⑰		ピストン	アルミニウム	JIS H 4040
⑱		ロッド	SUS440 相当	JIS G 4303※1
⑲	パイロット油の発生	チューブ	SUS304	JIS G 3446
⑳		作動油	鉱物油	ENEOS㈱ ダンパオイル N10
㉑	気密機構	パッキン	ニトリルゴム	㈱坂上製作
㉒	パイロット油の配管	配管	りん脱酸銅パイプ	JIS H 3300 C1220T 外径ϕ8 肉厚 1mm
㉓	パイロット油の制御	パイロットケース	構造用炭素鋼鋼材	JIS G 4051

※1 森本精密製硬クロムメッキ品

2.5　品質基準

品質基準一覧を**表 2.3** に示す。

表 2.3　品質基準一覧

	項　　目			材料・値	備　　考
材料の構成	ピストン			鋳鉄品	JIS G 5502
	ロッド			構造用炭素鋼	JIS G 4051
	両端ピン			構造用炭素鋼	JIS G 4051
	内シリンダ			構造用炭素鋼管	JIS G 3478
	外シリンダ			構造用鋼管	JIS G 3445
	減衰弁			構造用炭素鋼	JIS G 4051
	作動油			鉱物油	ENEOS（株） ダンパオイル
	パッキン			ウレタンゴム	NOK（株） U801
各部の形状および寸法	ロッド径	ϕd	[mm]	100	
	外シリンダ外径	ϕD	[mm]	298.5	
	内シリンダ内径	ϕD_i	[mm]	140	
	取付けピン穴径	ϕP	[mm]	75	
	基準長さ	L_c	[mm]	1300	
	ピン間距離	L	[mm]	最小長：1700 最大長：2500	
限界性能	限界変形	$\pm S$	[mm]	400	
	荷重履歴			2.1 項参照	
	限界速度	V_{max}	[m/s]	1.0	
	最大抵抗力	F_{max}	[kN]	500	
水平性能 (抵抗力−速度関係)	性能変化前	性能種別		バイリニア型	
		最大リリーフ減衰力	F_1 [kN]	446.7	
		最大リリーフ点速度	V_1 [m/s]	0.357	
		1 次減衰勾配	C_1 [kN･s/m]	1250	
		2 次減衰勾配	C_2 [kN･s/m]	47	

水平性能 (抵抗力−速度関係)	性能変化後	性能種別	トリリニア型、またはバイリニア型		
		最大リリーフ減衰力	$F_{r\max}$ [kN]	433.2～446.7	
		最大リリーフ点速度		6.9～35.7	
		1次減衰勾配	${}_{v}C_1$ [kN・s/m]	6250	
		2次減衰勾配	${}_{v}C_2$ [kN・s/m]	1250	
		3次減衰勾配	${}_{v}C_3$ [kN・s/m]	47	
製造ばらつき	C_1、C_2のばらつき			-7%～+29%	
水平性能の変化率	温度依存性			±1%未満	
	繰返し耐久性			±1%未満	
防錆	外周塗装（基準塗膜厚）		[μm]	60以上	

2.6 防錆の基準

防錆など性能維持のための基準は以下のように定める。

a) 塗装基準

塗装基準を表2.4に示す。

表2.4 塗装基準（フタル酸樹脂塗装）

下塗り	ラスゴンペイント(K)白 107-101 (JIS K 5625 シアミド鉛錆止めペイント同等品)
上塗り	JIS K 5572 フタル酸樹脂(10B7/6)
塗膜厚さ	60μm 以上(下塗り+上塗り)

b) ロッド表面処理の基準

ロッドの表面処理の基準を表2.5に示す。

表2.5 ロッド表面処理基準

表面処理	適用範囲	メッキ厚さ
硬質クロムメッキ	JIS H 8615	φ10,φ14:10μm以上 φ100:20μm以上

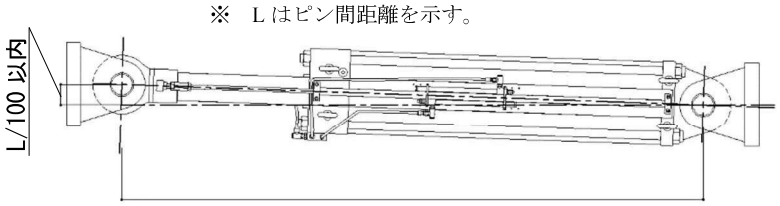
2.7　据付精度の基準

ダンパーの据付精度を**表 2.6**、**図 2.12** に示す。

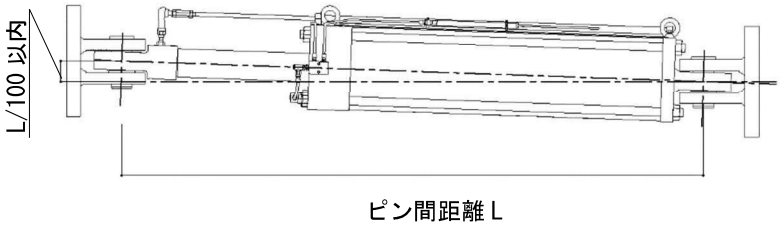
表 2.6　据付精度基準

	基準値
平面方向	L※ / 100 以内
上下方向	L※ / 100 以内

※　L はピン間距離を示す。



(a)　平面図



(b)　立面図

図 2.12　設置基準

2.8　形状および寸法

部の寸法、および寸法精度を**表 2.7** に示す。

表 2.7　寸法および寸法精度基準

測定部位		項目	基準寸法 [mm]	公差
ダンパー本体	ロッド	外径	ϕ 100	$f8^{-0.036}_{-0.090}$
	外シリンダ	外径	ϕ 298.5	±1.0%
	内シリンダ	内径	ϕ 140	$H8^{+0.063}_{0}$
	取付けピン	外径	ϕ 75	$e8^{-0.060}_{-0.106}$
小形シリンダ	ロッド	外径	ϕ 10	$g6^{-0.005}_{-0.014}$
	ガイドロッド	外径	ϕ 14	$f8^{-0.016}_{-0.043}$

3　加振機実験に基づく減衰性能の評価

3.1 試験体数と試験条件

試験体数と試験条件を**表 3.1** に示す。試験体は様々な管路の圧力損失やダンパーの剛性などの影響があるので、実大・実速度を原則とする。

表 3.1　試験体数と試験条件

申請内容		試験体の条件		
		試験体	数量	条件
材料の構成		－	－	ミルシートによる確認
各部の形状、寸法および寸法精度		実大	4	－
水平性能	抵抗力－速度	実大	4	最大速度 V_{max} が 10、25、50、75cm/s、加振周期 T が 3.0s の正弦波加振を実施し、減衰力と速度の関係を確認する。
水平性能の変化率	温度依存性	実大	1	-10 から+60℃まで 10℃ごとに、1 サイクルあたりの履歴吸収エネルギー ΔW_d を 20℃における値に対する比率を示す。
	周波数依存性	実大	2	加振周期 T が 0.5、1.0、2.0、3.0、5.0、7.0、10.0s、最大速度 V_{max} が 10、25、50、75cm/s の正弦波加振を実施し、減衰力と速度の関係を確認する。
	繰り返し耐久性	実大	1	60 年期待値回数を 1000 回と想定し、減衰性能の変化率が小さいことを確認する。
	長周期地震動	実大	1	長周期地震動を想定し、累積変形量が 50m 以上の加振を行い、ダンパーの表面温度が許容温度を超えないこと、および減衰性能の変化率が小さいことを確認する。
	小形シリンダの回帰特性	実大	4	小形シリンダに強制変位 $X_{c\max}$ を 25、15、5cm 与え、原点復帰することを確認する。
	性能が変化するまでの時間依存性	実大	2 (1)	ダンパー2 体を対象に、最大変位 30cm、速度 10、15、20、25cm/s の三角波を実施し、小形シリンダが作動する時刻と減衰力が増加する時刻を確認し、その時間差を確認する。 また、ダンパー1 体を対象に、長周期地震動時に想定される免震層の変位をダンパーへ加振し、その時間差を考慮した場合と考慮しない場合の履歴吸収エネルギーを比較し、その差が小

				さいことを確認する。
限界性能	限界変形	実大	4	－
	限界速度 荷重履歴	実大	1	最大速度 V_{max} =100cm/s（加振周期 T =2.0s）の正弦波加振を実施し、有害な損傷が生じないことを確認する。
	座屈試験 （最大減衰力）	実大	1	試験体下に別試験体同等品を吊り下げ、1G 相当の負荷を与え、最伸び状態で静的加振を行い、座屈および油漏れなど有害な損傷が生じないことを確認する。
	耐熱試験	実大	1	ダンパー表面温度が 80℃以上のときに正弦波加振を行い、油漏れなど有害な損傷が生じないことを確認する。

3.2 試験装置概要

試験体および性能試験装置立面図を**図 3.1** に、試験装置外観を**写真 3.1** に示す。また、加振機 1 基あたりの仕様を**表 3.2** に、加振機設備用静圧継手の仕様を**表 3.3** にそれぞれ示す。性能可変オイルダンパーの限界変形は±400mm、設計用限界速度 $_DV_{max}$ は 150cm/s である。これに対し、加振機 1 台あたりの最大変位は±300mm、最大速度が 50cm/s である。そこで、静圧継手を介して加振機を 2 台直列に接続することで、最大速度 100cm/s まで加振でき、ダンパーストローク±400mm にも対応可能となる加振装置とした。

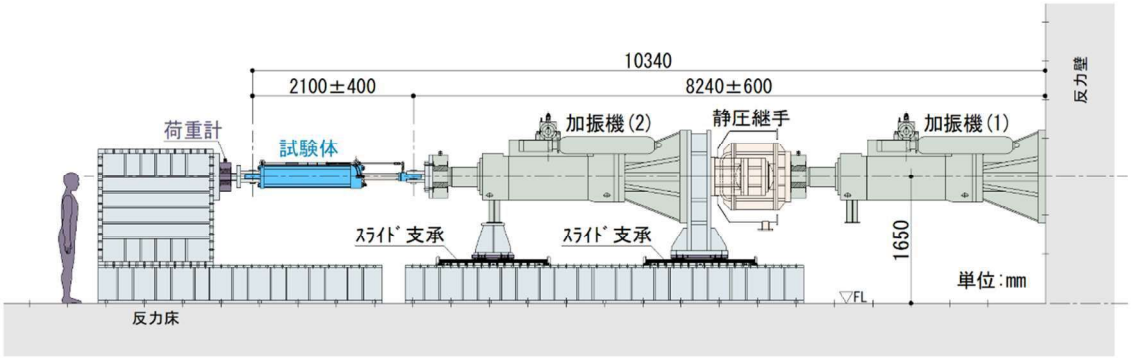


図 3.1　試験装置立面図

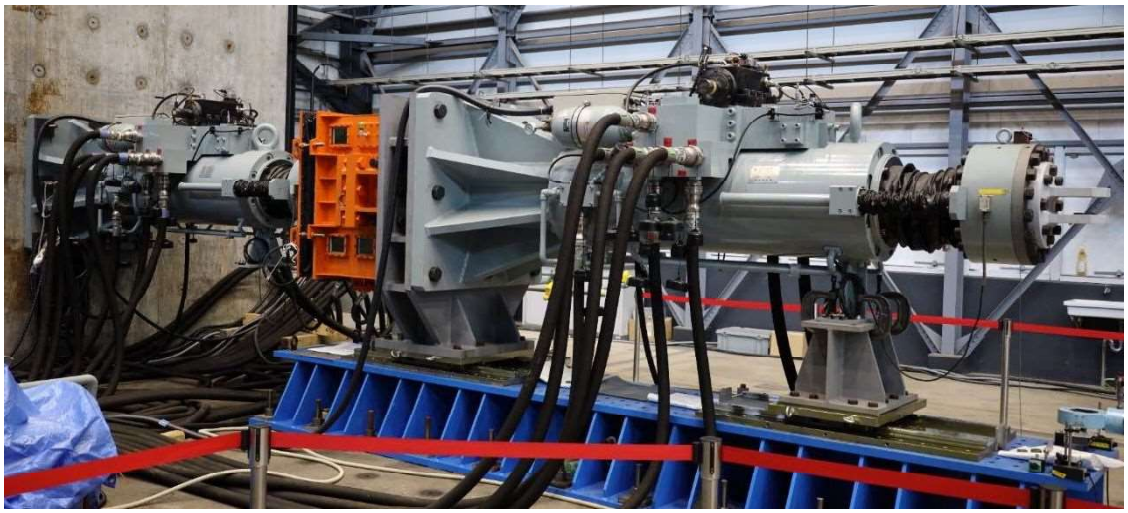


写真 3.1　試験装置外観

表 3.2　加振機仕様

項　目	仕　様
最大出力（動的／静的）	±100ton／±130ton
有効ストローク	±300mm
最大速度	50cm/s
周波数範囲	DC～30Hz
変位検出器	±300mm
荷重検出器	±200ton
重量	6.63ton

表 3.3　加振機設備用静圧継手仕様

項　目	仕　様
許容荷重	±150ton
許容回転角度	±3°
許容変位	±20mm
重量	1.52ton

3.3 測定計画

性能可変オイルダンパーの水平性能を測定する場合の測定器配置図を**図 3.2** に、測定機器一覧を**表 3.4** に示す。サンプリング周波数は 100[Hz]とした。計測記録に対して、0.002Hz から 30Hz のバンドパスフィルタ処理を行い、加振周期 T の 1/20 の移動平均処理したものを測定結果として扱うこととした。

ダンパーの変位 $\delta(t)$ は D1、D2 で測定した測定結果を平均して、次式から算定した。

$$\delta(t) = \left(\delta_{D1}(t) + \delta_{D2}(t)\right)/2 \tag{3.1}$$

小形シリンダの作動距離 $X_c(t)$ は D3、D4 で測定した測定結果を用いて、次式から算定した。

$$Xc(t) = \delta_{D3}(t) + \left|\delta_{D4}(t)\right| \tag{3.2}$$

ダンパー変位 $\delta(t)$ を高速フーリエ変換して振動数領域に変換し、次式からダンパー速度 $V(\omega)$ を算定し、逆フーリエ高速変換し時間領域に戻して評価した。

$$V(\omega) = \delta(\omega) \times i\omega \tag{3.3}$$

また、減衰力は L1 により測定し、測定器として引張・圧縮両用型のロードセルを用いた。**図 3.2** に示すようにダンパーの減衰力を直接ダンパーから測定する計画とした。従って、加振機脚元のスライド支承から生じる摩擦力や加振機の摺動摩擦などは考慮する必要がなく、ダンパーの減衰力を測定することが可能である。

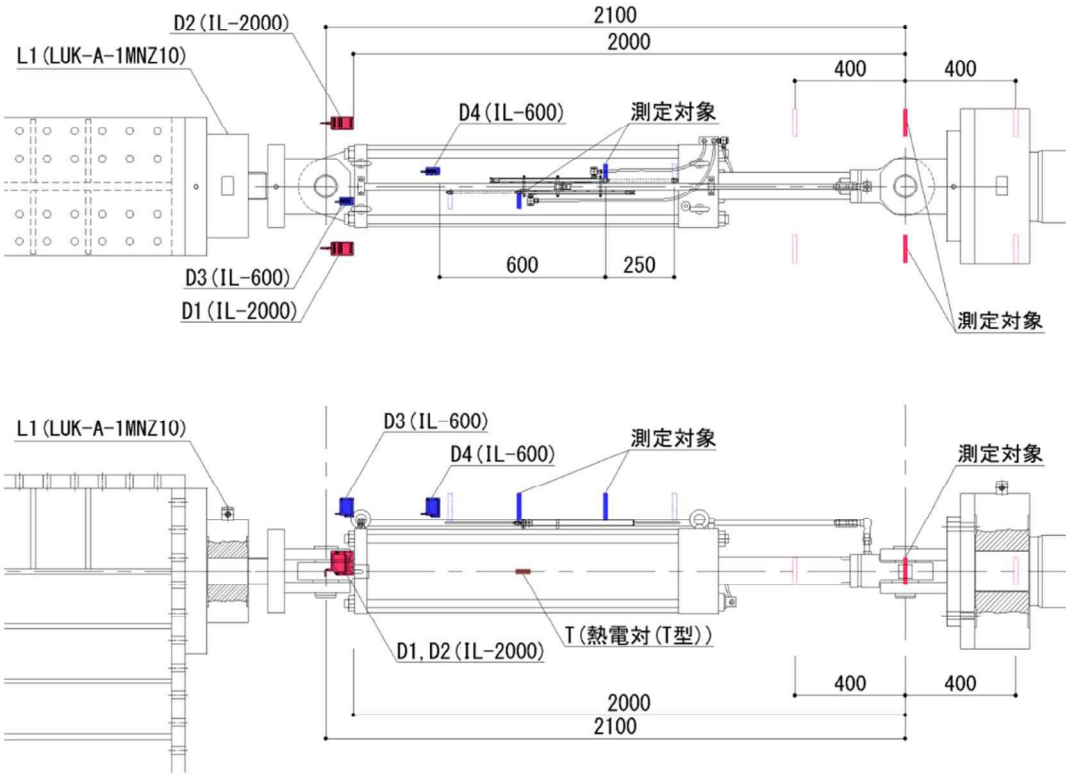


図 3.2　測定器配置図

表 3.4　測定機器一覧

	記号	製品名	メーカー	備考
データロガー	―	SIRIUS-CD	デュージャパン(株)	―
レーザー変位計	D1	IL-2000	(株)キーエンス	ダンパー軸変位
	D2	IL-2000	〃	〃
	D3	IL-600	〃	小形シリンダの作動距離
	D4	IL-600	〃	〃
ロードセル(引張圧縮両用型)	L1	LUK-A-1MNZ10	(株)共和電業	減衰力
熱電対	T	T-G-0.65B	(株)東京測器研究所	ダンパー表面温度

試験データの計測システム図を図 3.3 に示す。計測に用いたデータロガーは 1 台で 16 チャンネルまでシステム構成が可能で、電圧やひずみ、熱電対などの入力に対応することが可能である。データロガー①で制御盤から加振機の入力変位、応答変位、トリガー信号などを、データロガー②でダンパーの変位、小形シリンダの作動距離を各 2 ヶ所、ダンパーの減衰力、ダンパー中央の表面温度をそれぞれ計測した。

計測されたデータは、データ収録用パソコン内のハードディスクに専用収録ソフトを介してバイナリデータとして保存される。保存されたデータの拡張子は dxd である。dxd データを専用ソフトで読み取り、csv データに変換したものを計測記録として扱う。

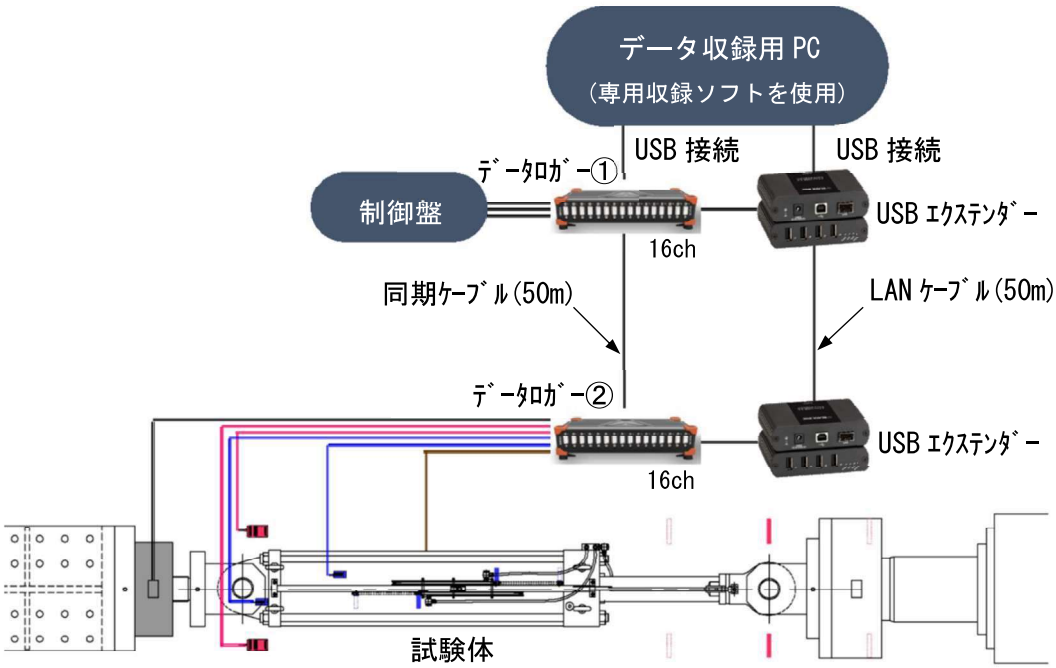


図 3.3　試験データの計測システム図

3.4 減衰性能の基本特性

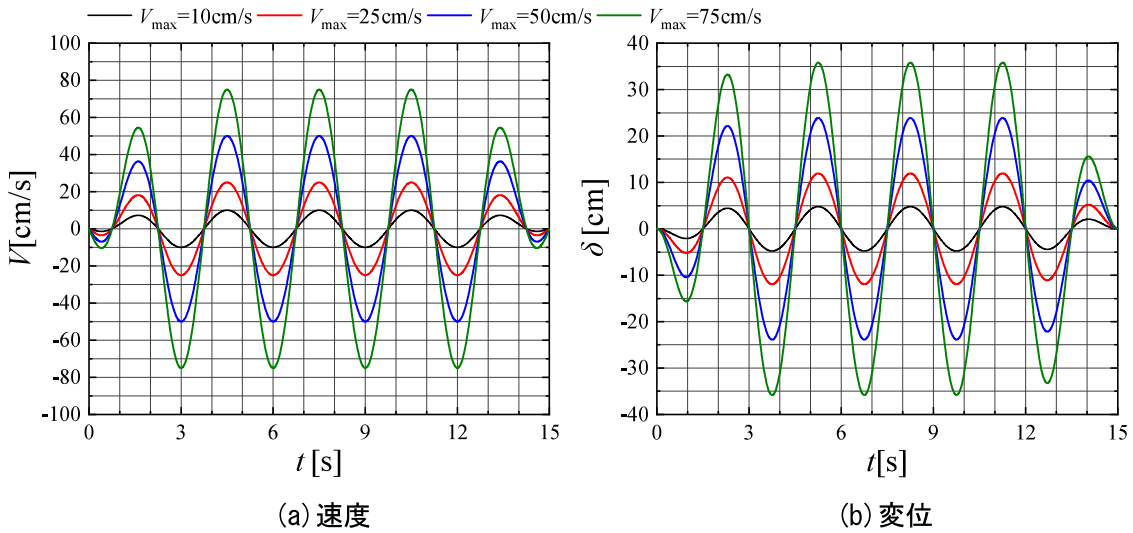
a) 試験概要

性能可変オイルダンパーを性能試験装置に取り付けて、所定速度の正弦波加振により性能確認を行う。計測する速度の点は、性能変化前の減衰係数C_1、および減衰係数C_2の領域でそれぞれの直線性を近似できる２点とし、最大速度が 10、25、50、75cm/s となる正弦波加振を行う。また、小形シリンダの作動距離X_cに応じて減衰力F_dが変化することを確認するために、小形シリンダに 5cm から 25cm まで 5cm 刻みで強制変位を与え、正弦波加振して水平性能を確認した。ここで、ダンパー本体のロッドと小形シリンダのガイドロッドは切り離した状態で加振し、小形シリンダの作動距離X_cにダンパーの変位δが影響しないように配慮した。

試験条件一覧を**表 3.5** に示す。加振波は、定常 3 波の前後に 1 波の予備加振を設けた正弦波とした。入力した加振波の時刻歴波形を**図 3.4** に示す。

表 3.5　試験条件一覧

ダンパーNo		1、2、3、5 の計 4 体
小形シリンダの作動距離X_c[cm]		0、5、10、15、20、25
加振波	加振周期T[s]	3.0
	最大速度V_{max}[cm / s]	10、25、50、75



(a) 速度　　(b) 変位

図 3.4　加振波の時刻歴波形

b) 試験結果①　減衰力と変位の関係

小形シリンダの作動距離 X_c の違いによる定常 3 サイクル目の減衰力とダンパー変位の関係を**図 3.5** から**図 3.8** に示す。図より、最大速度 V_{max} が 10、25cm/s の場合には小形シリンダの作動距離 X_c に応じて、最大減衰力 $F_{d\max}$ が大きくなっていることが分かる。小形シリンダの作動距離 X_c が 15cm、20cm、25cm の場合には、最大減衰力 $F_{d\max}$ は概ね同程度となっていることが分かる。また、最大速度 V_{max} が 50、75cm/s の場合には、最大減衰力 $F_{d\max}$ は小形シリンダの作動距離 X_c に依らず、概ね一定の値を示しており、リリーフバルブが開くことでダンパーの減衰力が過度に大きくならないことを確認した。

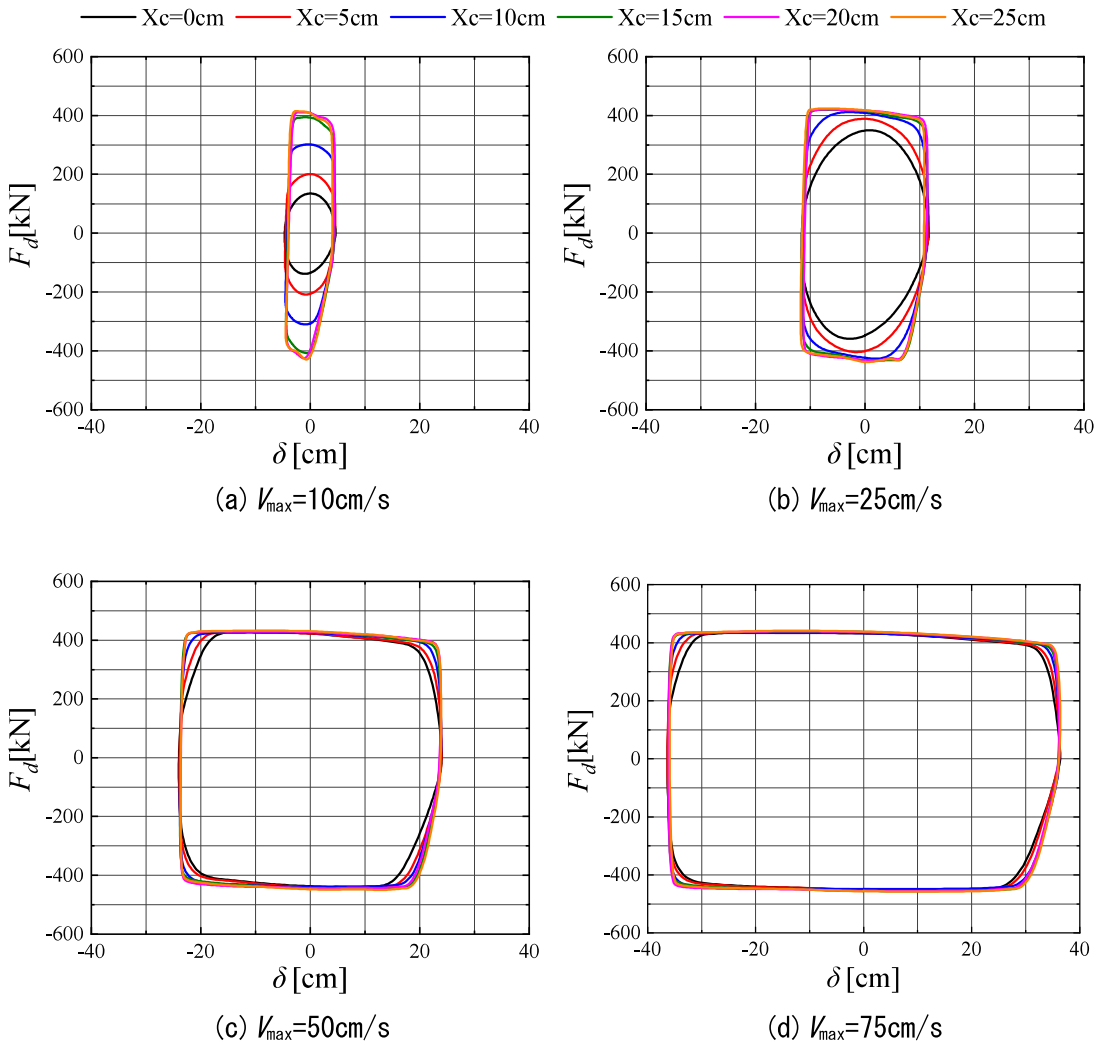
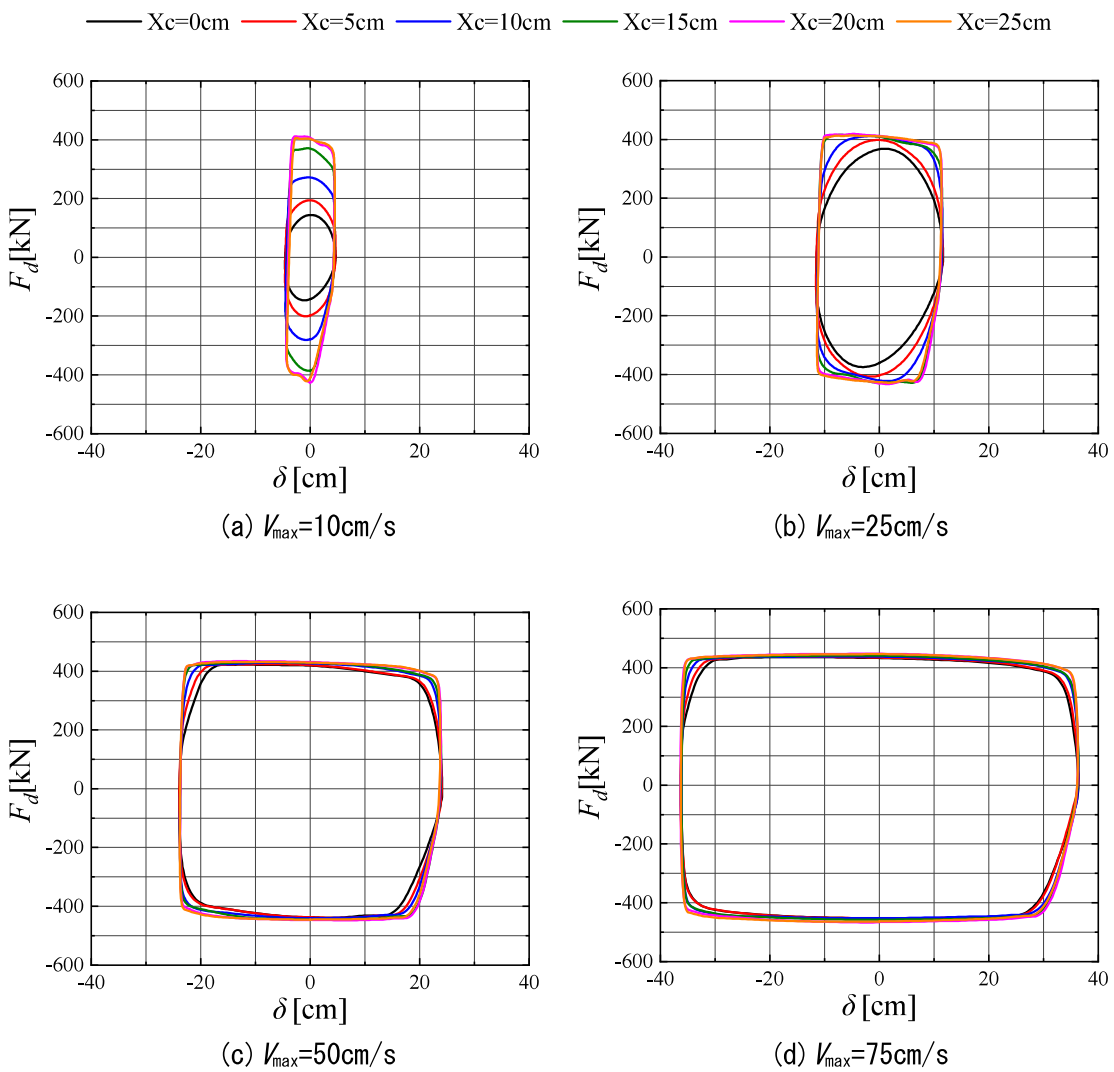


図 3.5　減衰力とダンパー変位の関係（ダンパーNo.1、正弦波）



(a) V_{max}=10cm/s　　(b) V_{max}=25cm/s

(c) V_{max}=50cm/s　　(d) V_{max}=75cm/s

図 3.6　減衰力とダンパー変位（ダンパーNo.2、正弦波）

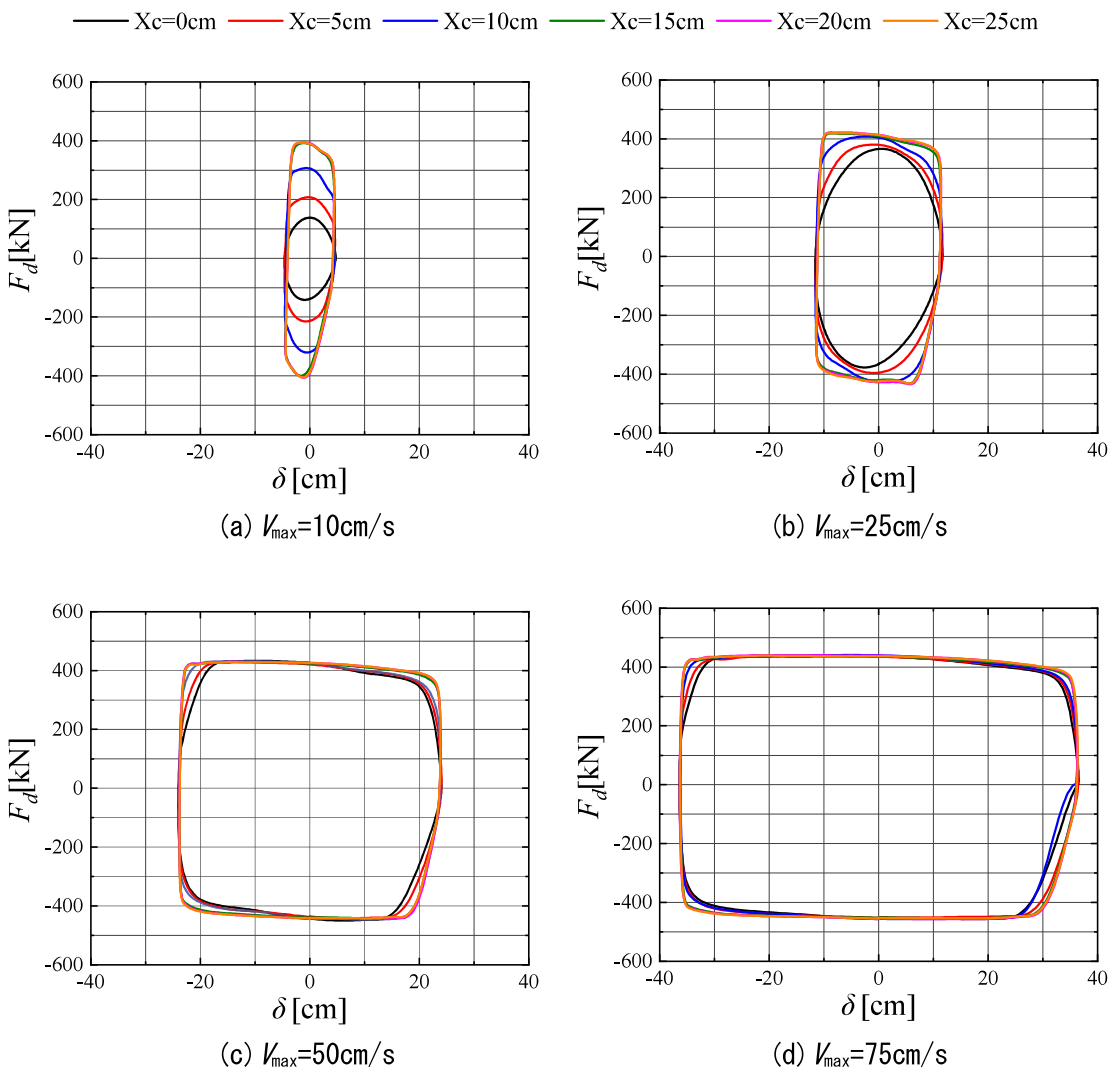


図 3.7　減衰力とダンパー変位（ダンパーNo.3、正弦波）

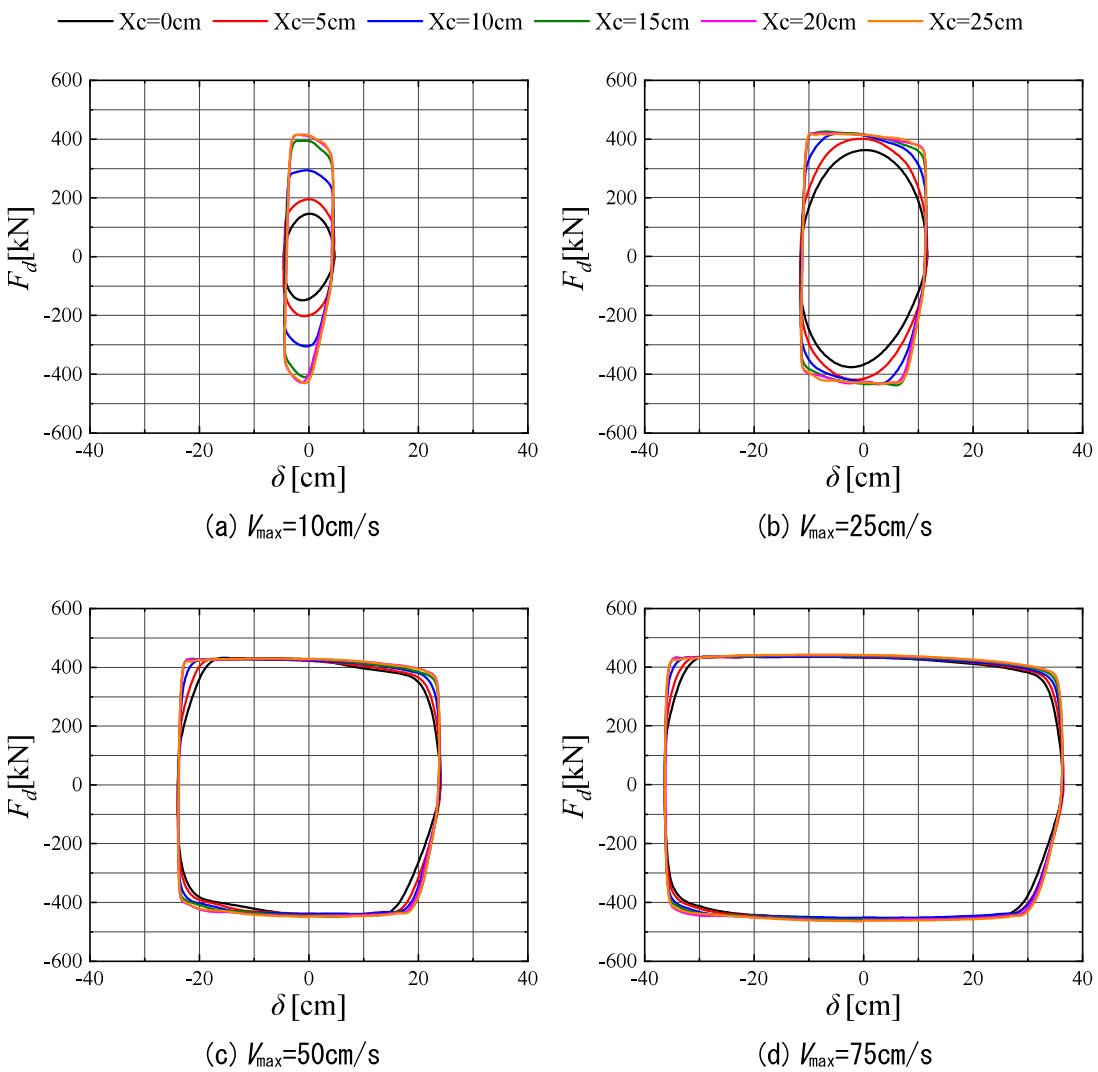


図 3.8　減衰力とダンパー変位（ダンパーNo.5、正弦波）

定常 3 サイクル目の履歴吸収エネルギー ΔW_d を表 3.6 に示す。表より、ダンパーの違いによらず、最大速度 V_{max} が 10、25cm/s でかつ小形シリンダの作動距離 X_c が 0、5、10cm の場合には、定常 3 サイクル目の履歴吸収エネルギー ΔW_d は小形シリンダの作動距離 X_c に応じて大きくなっており、減衰性能が増加していることが分かる。また、最大速度 V_{max} が 50、75cm/s の場合には、定常 3 サイクル目の履歴吸収エネルギー ΔW_d が概ね同程度となっていることが分かる。

表 3.6　定常 3 サイクル目の履歴吸収エネルギー ΔW_d 一覧

	V_{max} [cm/s]	ΔWd [kN・cm]					
		Xc=0cm	Xc=5cm	Xc=10cm	Xc=15cm	Xc=20cm	Xc=25cm
No.1	10	1961	3143	4638	5883	5937	5958
	25	12624	14966	16912	17861	17854	18029
	50	37092	38183	39041	39688	39650	40032
	75	59735	60436	61293	61939	62025	62144
No.2	10	2091	3010	4225	5574	6120	5893
	25	13200	15019	16627	17534	17835	17679
	50	36983	37751	38801	39525	40061	39847
	75	60104	60443	61509	62076	63369	63116
No.3	10	1980	3334	4585	5708	5904	6191
	25	12981	14885	16578	17742	18087	18324
	50	37343	38240	39273	39858	40380	40781
	75	60619	61300	62001	62834	63707	63538
No.5	10	2091	3061	4563	5873	5941	6114
	25	13196	15342	16990	17809	17775	17948
	50	37200	38064	38843	39431	39639	39822
	75	60087	60919	61327	62107	62427	62752

変位ー減衰力の関係が、第二象限から第一象限に向かって、また、第四象限から第三象限に向かって減衰力の絶対値が小さくなる傾向がある。この現象の解明のため、ここでは、ダンパー内の作動油の圧縮剛性を考慮した Maxwell モデルでその現象が説明できるか検討した。Maxwell モデルを**図 3.9** に、検討例を**図 3.11** に示す。図より、ダンパー作動油の圧縮剛性を考慮することで、圧縮開始時の減衰力が小さくなることは再現できるが、第二象限から第一象限に向かって、また、第四象限から第三象限に向かって減衰力の絶対値が小さくなる現象は再現できなかった。今後の課題とする。

図 3.9　Maxwell モデル

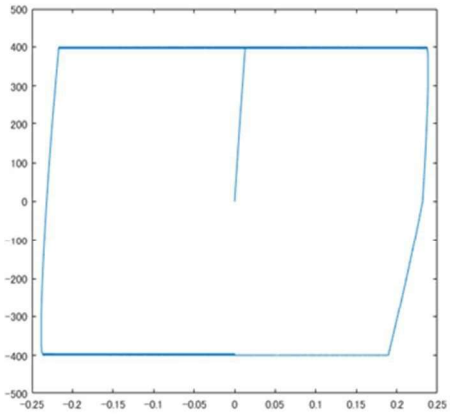


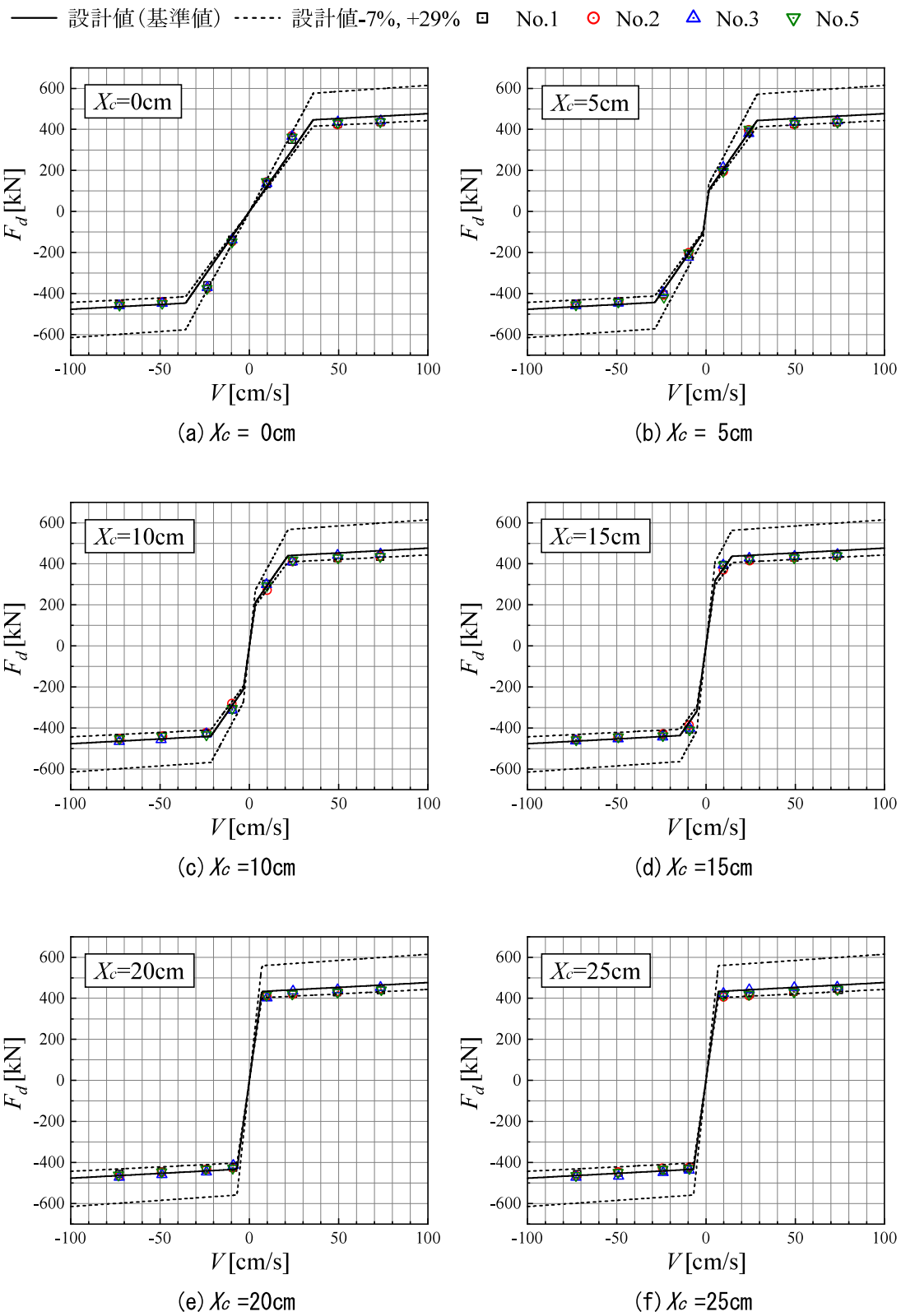
図 3.10　Maxwell モデル検討例

c）試験結果②　減衰力と速度の関係

定常 3 サイクル目の最大および最小の減衰力および速度を算定し、減衰力と速度の関係を確認する。試験結果を**図 3.11** に示す。ここで、図中のプロットが No.1、No.2、No.3、No.5 の試験結果を示す。図より、小形シリンダの作動の有無によらず、ダンパーの減衰力は個体間で概ね同程度であり、建物に本ダンパーを配置した場合、捩じれ振動などは生じにくいことが分かる。また、実線は設計値（基準値）を示し、破線は設計値－7%および、＋29%の減衰力をそれぞれ示している。ここで、設計値は(2.1)式～(2.3)式を用いて算定し、定数は**表 3.7** に示した値とした。**表 3.8**、**表 3.9** に試験結果より得られた減衰力の判定結果を示す。図、表より、ダンパーNo.1、2、3、5 全てで、減衰力が設計値－7%から＋29%の範囲に入っていることを確認した。ここで、性能変化前の一次減衰係数 C_1 領域では、設計値よりも大きい減衰力を発揮できるように調整し、リリーフ速度以降の高速領域では、免震層より上部の構造躯体に過度な減衰力を負担させないように設計値よりも小さくなるように減衰力を調整した。

表 3.7　設計値諸元

設定クリアランス	L_S	[cm]	15.0
性能変化前の一次減衰係数	C_1	[kN/(cm/s)]	12.5
性能変化後の一次減衰係数	${}_v\boldsymbol{C}_1$	[kN/(cm/s)]	62.5
切片減衰力	F_{dd}	[kN]	430.0
最大減衰力	$F_{d\max}$	[kN]	500.0
面積比	α	[－]	24.82
調圧弁ばね剛性	K_{sp}	[kN/cm]	1.475
低減係数	ζ	[－]	0.58



(a) X_c = 0cm　(b) X_c = 5cm

(c) X_c =10cm　(d) X_c =15cm

(e) X_c =20cm　(f) X_c =25cm

図 3.11　減衰力と速度の関係

表 3.8　判定結果一覧(ダンパーNo.1、No.2)

		No.1								No.2							
		試験値				設計値			判定	試験値				設計値			判定
		V	Fd	Xc	温度	dFd[kN]				V	Fd	Xc	温度	dFd[kN]			
		[cm/s]	[kN]	[cm]	[℃]	最小	標準	最大		[cm/s]	[kN]	[cm]	[℃]	最小	標準	最大	
Xc=0cm	引張	9.8	134.8	0.0	10.0	112.2	121.9	157.3	**OK**	9.6	144.1	0.0	24.4	110.9	120.6	155.5	**OK**
		23.8	349.5	0.0	10.5	274.1	298.0	384.4	**OK**	23.8	368.2	0.0	24.6	273.3	297.1	383.3	**OK**
		49.5	426.4	0.0	14.3	416.8	453.1	584.5	**OK**	49.3	422.5	0.0	28.4	416.8	453.0	584.4	**OK**
		73.5	435.8	0.0	19.8	427.2	464.3	599.0	**OK**	73.4	435.6	0.0	32.8	427.1	464.3	598.9	**OK**
	圧縮	-9.7	-138.3	0.0	10.0	-111.5	-121.2	-156.3	**OK**	-9.7	-146.3	0.0	24.4	-111.3	-120.9	-156.0	**OK**
		-23.6	-359.4	0.0	10.5	-271.0	-294.6	-380.0	**OK**	-23.4	-374.4	0.0	24.6	-269.0	-292.4	-377.2	**OK**
		-49.0	-441.8	0.0	14.3	-416.7	-452.9	-584.2	**OK**	-48.6	-439.2	0.0	28.4	-416.5	-452.7	-584.0	**OK**
		-72.8	-451.7	0.0	19.8	-426.8	-464.0	-598.5	**OK**	-72.6	-453.2	0.0	32.8	-426.8	-463.9	-598.4	**OK**
Xc=5cm	引張	9.7	200.9	4.9	9.6	184.7	200.7	258.9	**OK**	9.7	194.0	5.0	9.6	186.8	203.0	261.9	**OK**
		23.9	388.6	4.9	10.5	348.0	378.2	487.9	**OK**	24.0	398.2	5.0	10.4	350.2	380.7	491.1	**OK**
		49.5	426.9	4.9	16.2	416.8	453.1	584.5	**OK**	49.4	423.9	5.0	14.9	416.8	453.0	584.4	**OK**
		73.4	434.8	4.9	22.0	427.1	464.2	598.9	**OK**	73.3	437.1	5.0	20.2	427.1	464.2	598.8	**OK**
	圧縮	-9.6	-208.4	4.9	9.6	-183.9	-199.9	-257.9	**OK**	-9.7	-200.7	5.0	9.6	-186.8	-203.0	-261.9	**OK**
		-23.7	-404.1	4.9	10.5	-345.8	-375.9	-484.9	**OK**	-23.7	-406.7	5.0	10.4	-347.2	-377.3	-486.8	**OK**
		-49.1	-441.6	4.9	16.2	-416.7	-452.9	-584.3	**OK**	-48.8	-439.5	5.0	14.9	-416.6	-452.8	-584.1	**OK**
		-72.9	-450.6	4.9	22.0	-426.9	-464.0	-598.6	**OK**	-73.1	-452.5	5.0	20.2	-427.0	-464.1	-598.7	**OK**
Xc=10cm	引張	9.5	301.8	10.7	41.6	267.5	290.7	375.0	**OK**	9.9	271.8	10.0	40.0	262.2	285.0	367.6	**OK**
		24.1	411.6	10.1	42.3	406.0	441.3	569.2	**OK**	24.1	411.4	10.0	41.6	405.9	441.2	569.2	**OK**
		49.3	428.0	9.9	46.5	416.8	453.0	584.4	**OK**	49.5	428.9	10.0	46.2	416.8	453.1	584.5	**OK**
		73.3	434.3	9.9	52.3	427.1	464.2	598.8	**OK**	73.0	437.9	10.0	50.9	427.0	464.1	598.7	**OK**
	圧縮	-9.5	-310.3	10.7	41.6	-268.3	-291.6	-376.2	**OK**	-9.8	-281.0	10.0	40.0	-260.9	-283.5	-365.8	**OK**
		-23.8	-426.5	10.1	42.3	-405.8	-441.1	-569.0	**OK**	-24.2	-422.2	10.0	41.6	-406.0	-441.3	-569.2	**OK**
		-48.8	-439.8	9.9	46.5	-416.5	-452.8	-584.1	**OK**	-48.6	-440.2	10.0	46.2	-416.4	-452.7	-583.9	**OK**
		-72.9	-449.2	9.9	52.3	-426.9	-464.0	-598.6	**OK**	-72.6	-452.8	10.0	50.9	-426.8	-463.9	-598.4	**OK**
Xc=15cm	引張	9.7	394.1	15.0	10.5	334.0	363.1	468.4	**OK**	9.8	371.0	15.0	10.9	334.4	363.5	468.9	**OK**
		24.3	419.9	15.1	11.9	406.0	441.3	569.3	**OK**	24.4	415.3	15.0	12.4	406.1	441.4	569.4	**OK**
		49.6	431.0	15.0	18.3	416.9	453.2	584.6	**OK**	49.2	430.9	15.0	17.8	416.7	453.0	584.3	**OK**
		73.4	438.9	15.1	24.5	427.1	464.2	598.9	**OK**	73.4	441.1	15.0	23.7	427.1	464.2	598.9	**OK**
	圧縮	-9.3	-407.7	15.0	10.5	-330.0	-358.7	-462.8	**OK**	-9.4	-386.1	15.0	10.9	-330.1	-358.8	-462.9	**OK**
		-24.0	-433.5	15.1	11.9	-405.9	-441.2	-569.1	**OK**	-24.0	-428.0	15.0	12.4	-405.9	-441.2	-569.1	**OK**
		-49.1	-446.9	15.0	18.3	-416.7	-452.9	-584.3	**OK**	-49.2	-445.7	15.0	17.8	-416.7	-453.0	-584.3	**OK**
		-72.9	-456.6	15.1	24.5	-426.9	-464.0	-598.6	**OK**	-72.7	-457.9	15.0	23.7	-426.8	-463.9	-598.5	**OK**
Xc=20cm	引張	9.5	411.2	20.0	44.3	399.7	434.4	560.4	**OK**	9.8	411.8	20.1	10.7	399.8	434.6	560.6	**OK**
		24.4	420.9	20.0	44.7	406.1	441.4	569.4	**OK**	24.3	418.7	20.1	12.8	406.0	441.4	569.3	**OK**
		49.0	429.7	20.0	49.2	416.6	452.9	584.2	**OK**	49.8	433.9	20.1	30.6	417.0	453.2	584.7	**OK**
		73.6	439.2	20.0	55.1	427.2	464.4	599.0	**OK**	73.5	447.3	20.1	35.4	427.2	464.3	599.0	**OK**
	圧縮	-9.1	-425.3	20.0	44.3	-399.5	-434.3	-560.2	**OK**	-9.3	-425.8	20.1	10.7	-399.6	-434.4	-560.3	**OK**
		-24.2	-434.2	20.0	44.7	-406.0	-441.3	-569.3	**OK**	-24.0	-432.5	20.1	12.8	-405.9	-441.2	-569.1	**OK**
		-49.2	-444.1	20.0	49.2	-416.7	-453.0	-584.3	**OK**	-49.2	-448.1	20.1	30.6	-416.7	-452.9	-584.3	**OK**
		-72.7	-455.5	20.0	55.1	-426.8	-463.9	-598.5	**OK**	-72.8	-466.8	20.1	35.4	-426.8	-464.0	-598.5	**OK**
Xc=25cm	引張	9.6	415.1	25.0	12.4	399.7	434.5	560.5	**OK**	9.9	406.5	25.0	47.7	399.8	434.6	560.6	**OK**
		24.7	424.2	25.0	14.1	406.2	441.5	569.6	**OK**	24.1	413.1	25.0	47.2	405.9	441.2	569.2	**OK**
		49.0	432.2	25.0	20.9	416.6	452.9	584.2	**OK**	49.2	431.4	25.0	50.3	416.7	453.0	584.3	**OK**
		74.6	441.4	25.0	46.3	427.6	464.8	599.6	**OK**	73.5	445.9	25.0	53.3	427.1	464.3	598.9	**OK**
	圧縮	-10.3	-429.3	25.0	12.4	-400.0	-434.8	-560.9	**OK**	-9.1	-422.1	25.0	47.7	-399.5	-434.3	-560.2	**OK**
		-23.8	-438.5	25.0	14.1	-405.8	-441.1	-569.0	**OK**	-24.4	-427.9	25.0	47.2	-406.1	-441.4	-569.4	**OK**
		-48.9	-450.2	25.0	20.9	-416.6	-452.8	-584.2	**OK**	-49.3	-445.7	25.0	50.3	-416.8	-453.0	-584.4	**OK**
		-72.1	-457.6	25.0	46.3	-426.6	-463.7	-598.1	**OK**	-72.7	-464.7	25.0	53.3	-426.8	-463.9	-598.4	**OK**

表 3.9　判定結果一覧(ダンパーNo.3、No.5)

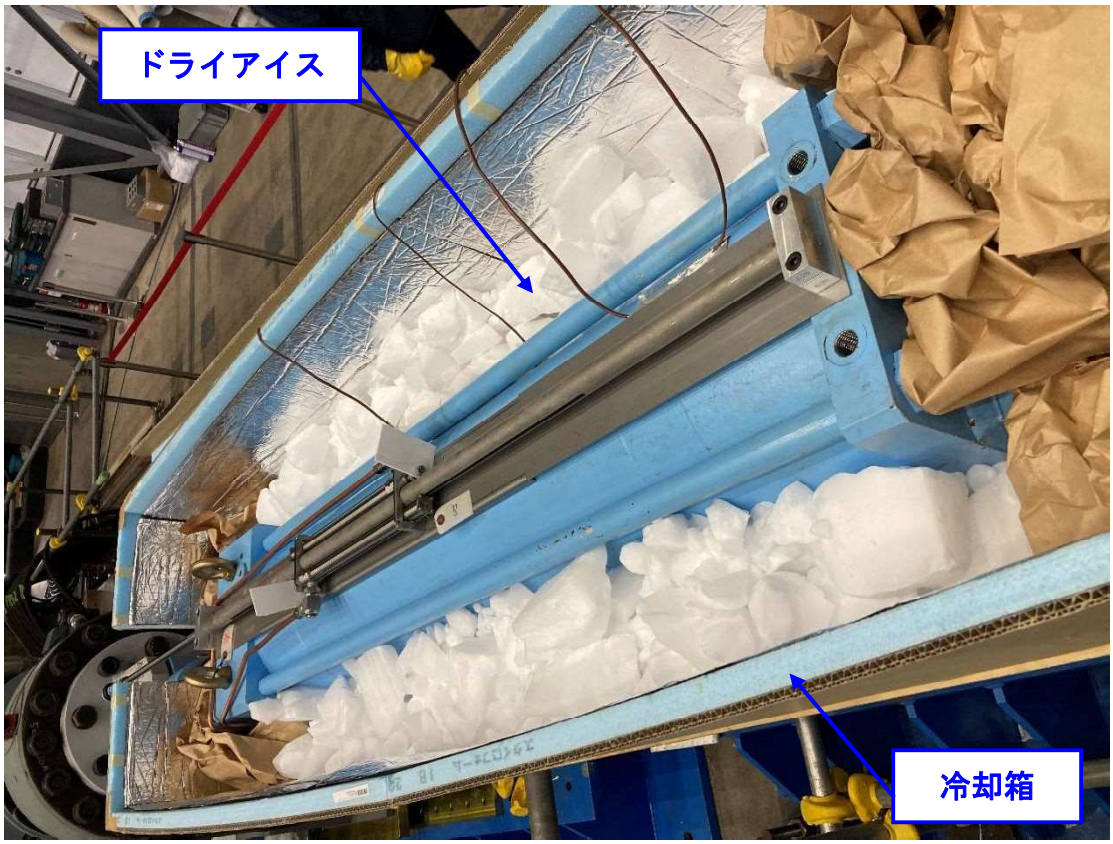
		No.3								No.5							
		試験値				設計値			判定	試験値				設計値			判定
		V	Fd	Xc	温度	dFd[kN]				V	Fd	Xc	温度	dFd[kN]			
		[cm/s]	[kN]	[cm]	[℃]	最小	標準	最大		[cm/s]	[kN]	[cm]	[℃]	最小	標準	最大	
Xc=0cm	引張	9.7	136.7	0.0	40.3	112.1	121.8	157.2	**OK**	9.6	145.9	0.0	8.8	110.5	120.1	154.9	**OK**
		23.9	365.8	0.0	40.3	274.6	298.5	385.0	**OK**	23.9	362.7	0.0	9.3	275.3	299.2	386.0	**OK**
		49.5	436.7	0.0	42.9	416.9	453.1	584.5	**OK**	49.5	432.4	0.0	13.8	416.9	453.1	584.5	**OK**
		73.5	442.2	0.0	46.8	427.2	464.3	599.0	**OK**	73.3	436.9	0.0	18.6	427.1	464.2	598.8	**OK**
	圧縮	-9.7	-138.6	0.0	40.3	-111.6	-121.3	-156.4	**OK**	-9.7	-148.4	0.0	8.8	-112.0	-121.7	-157.0	**OK**
		-23.5	-370.7	0.0	40.3	-270.4	-293.9	-379.2	**OK**	-23.7	-375.8	0.0	9.3	-272.6	-296.3	-382.2	**OK**
		-48.8	-447.7	0.0	42.9	-416.6	-452.8	-584.1	**OK**	-48.8	-448.0	0.0	13.8	-416.6	-452.8	-584.1	**OK**
		-72.9	-459.1	0.0	46.8	-426.9	-464.0	-598.6	**OK**	-72.7	-456.5	0.0	18.6	-426.8	-463.9	-598.5	**OK**
Xc=5cm	引張	9.7	214.5	5.1	37.4	186.7	202.9	261.8	**OK**	9.7	195.4	5.0	9.6	186.2	202.4	261.1	**OK**
		24.0	379.5	5.0	37.8	350.3	380.7	491.1	**OK**	24.1	401.1	5.0	10.3	350.9	381.4	492.0	**OK**
		49.7	435.0	5.0	42.8	417.0	453.2	584.6	**OK**	49.8	429.3	5.0	14.3	417.0	453.2	584.7	**OK**
		73.7	442.0	5.0	46.3	427.3	464.4	599.1	**OK**	73.7	435.9	5.0	19.7	427.2	464.4	599.1	**OK**
	圧縮	-9.8	-223.3	5.1	37.4	-187.5	-203.8	-262.9	**OK**	-9.6	-202.3	5.0	9.6	-184.9	-200.9	-259.2	**OK**
		-23.9	-396.4	5.0	37.8	-349.6	-380.0	-490.2	**OK**	-23.6	-418.7	5.0	10.3	-345.9	-375.9	-484.9	**OK**
		-49.0	-446.8	5.0	42.8	-416.6	-452.9	-584.2	**OK**	-49.1	-441.6	5.0	14.3	-416.7	-452.9	-584.3	**OK**
		-72.9	-458.7	5.0	46.3	-426.9	-464.0	-598.6	**OK**	-72.9	-455.7	5.0	19.7	-426.9	-464.0	-598.6	**OK**
Xc=10cm	引張	9.6	299.2	10.0	10.2	259.0	281.5	363.2	**OK**	9.8	293.4	10.0	41.0	260.4	283.0	365.1	**OK**
		24.1	410.0	10.0	10.5	405.9	441.2	569.2	**OK**	24.2	418.7	10.0	41.7	406.0	441.3	569.3	**OK**
		49.4	441.1	10.0	13.5	416.8	453.1	584.5	**OK**	49.7	428.6	9.9	45.2	416.9	453.2	584.6	**OK**
		73.4	448.6	10.0	18.9	427.1	464.3	598.9	**OK**	73.3	435.7	9.9	49.8	427.1	464.2	598.8	**OK**
	圧縮	-9.7	-312.1	10.0	10.2	-259.3	-281.9	-363.6	**OK**	-9.6	-304.8	10.0	41.0	-258.1	-280.5	-361.9	**OK**
		-24.0	-428.1	10.0	10.5	-405.9	-441.2	-569.2	**OK**	-24.0	-433.7	10.0	41.7	-405.9	-441.2	-569.1	**OK**
		-49.3	-457.3	10.0	13.5	-416.8	-453.0	-584.4	**OK**	-49.1	-439.5	9.9	45.2	-416.7	-452.9	-584.2	**OK**
		-72.9	-465.8	10.0	18.9	-426.9	-464.0	-598.6	**OK**	-72.7	-452.8	9.9	49.8	-426.8	-463.9	-598.5	**OK**
Xc=15cm	引張	9.7	394.2	14.9	40.3	333.1	362.1	467.1	**OK**	9.8	394.8	15.0	9.7	334.3	363.4	468.8	**OK**
		24.2	428.1	14.9	40.0	406.0	441.3	569.3	**OK**	24.2	425.3	15.0	10.7	406.0	441.3	569.3	**OK**
		49.6	436.6	14.9	42.3	416.9	453.1	584.6	**OK**	49.5	428.9	15.0	15.9	416.8	453.1	584.5	**OK**
		73.7	446.1	14.9	45.1	427.2	464.4	599.1	**OK**	73.5	439.5	15.0	22.1	427.1	464.3	598.9	**OK**
	圧縮	-9.1	-401.6	14.9	40.3	-326.4	-354.8	-457.7	**OK**	-9.2	-409.4	15.0	9.7	-327.9	-356.4	-459.8	**OK**
		-24.2	-444.1	14.9	40.0	-406.0	-441.3	-569.3	**OK**	-24.1	-437.9	15.0	10.7	-405.9	-441.2	-569.2	**OK**
		-49.2	-453.3	14.9	42.3	-416.7	-452.9	-584.3	**OK**	-49.1	-443.8	15.0	15.9	-416.7	-452.9	-584.2	**OK**
		-73.0	-463.1	14.9	45.1	-426.9	-464.1	-598.7	**OK**	-72.7	-458.0	15.0	22.1	-426.8	-463.9	-598.5	**OK**
Xc=20cm	引張	9.9	402.0	20.0	22.0	399.8	434.6	560.7	**OK**	9.5	414.8	20.0	42.2	399.7	434.4	560.4	**OK**
		24.4	435.3	20.0	23.5	406.1	441.4	569.4	**OK**	24.1	421.0	20.0	42.6	405.9	441.2	569.2	**OK**
		49.4	441.4	20.0	28.4	416.8	453.0	584.4	**OK**	49.4	428.6	20.0	47.2	416.8	453.1	584.5	**OK**
		73.4	453.2	20.0	33.7	427.1	464.3	598.9	**OK**	73.9	441.2	20.0	52.5	427.3	464.5	599.2	**OK**
	圧縮	-9.0	-414.0	20.0	22.0	-399.5	-434.2	-560.1	**OK**	-9.3	-428.1	20.0	42.2	-399.6	-434.3	-560.3	**OK**
		-24.0	-446.1	20.0	23.5	-405.9	-441.2	-569.2	**OK**	-24.4	-432.8	20.0	42.6	-406.1	-441.4	-569.4	**OK**
		-49.0	-459.9	20.0	28.4	-416.7	-452.9	-584.2	**OK**	-49.1	-446.4	20.0	47.2	-416.7	-452.9	-584.3	**OK**
		-72.9	-472.3	20.0	33.7	-426.9	-464.0	-598.6	**OK**	-73.3	-461.7	20.0	52.5	-427.1	-464.2	-598.8	**OK**
Xc=25cm	引張	9.8	423.7	25.0	15.1	399.8	434.6	560.6	**OK**	9.8	415.8	25.1	13.0	399.8	434.6	560.6	**OK**
		24.3	441.3	25.1	16.8	406.0	441.4	569.3	**OK**	24.2	418.8	25.1	14.8	406.0	441.3	569.2	**OK**
		49.5	452.5	24.9	9.8	416.8	453.1	584.5	**OK**	49.3	429.8	25.1	20.6	416.8	453.0	584.4	**OK**
		73.5	454.5	24.9	29.8	427.2	464.3	599.0	**OK**	73.6	443.1	25.1	26.2	427.2	464.4	599.0	**OK**
	圧縮	-9.3	-438.1	25.0	15.1	-399.6	-434.3	-560.3	**OK**	-9.3	-430.3	25.1	13.0	-399.6	-434.3	-560.3	**OK**
		-24.0	-449.3	25.1	16.8	-405.9	-441.2	-569.2	**OK**	-24.1	-432.4	25.1	14.8	-406.0	-441.3	-569.2	**OK**
		-49.0	-467.5	24.9	9.8	-416.6	-452.9	-584.2	**OK**	-49.3	-449.0	25.1	20.6	-416.8	-453.0	-584.4	**OK**
		-72.8	-471.7	24.9	29.8	-426.9	-464.0	-598.5	**OK**	-72.8	-463.8	25.1	26.2	-426.9	-464.0	-598.6	**OK**

3.5 減衰性能の変化率

3.5.1 温度依存性

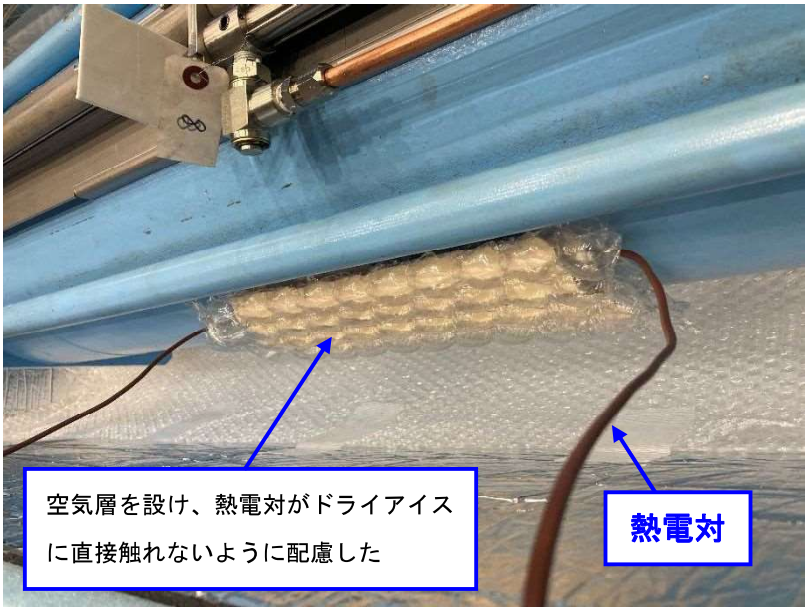
a) 試験概要

ダンパー表面温度を低温から高温に変化させ、温度変化が安定した状態で、各温度における減衰性能値の変化率を確認することを目的とする。試験機および計測装置、計測装置配置は水平性能を確認したものと同じとした。試験体数は 1 体とし、ダンパーNo.4 を用いた。試験体を覆うように冷却箱を設け、**写真 3.2** に示すようにダンパー周囲にドライアイスを投入し、ダンパー表面温度を－20℃程度に冷却する。ダンパーの表面温度が概ね目標温度(－20℃)に冷却されたことを確認し、ドライアイスを撤去後、**図 3.12** に示した加振周期 T が 3.0 秒、最大速度 V_{max} が 50[cm/s]の正弦波加振を行い、ダンパー表面の温度変化が安定したところで、同じ加振を行いダンパーの表面温度を上昇させながら、ダンパーの変位および減衰力を測定した。サンプリング周波数は 100Hz とし、定常 3 サイクル目の測定結果から 1 ループあたりの履歴吸収エネルギー ΔW_d を算定した。



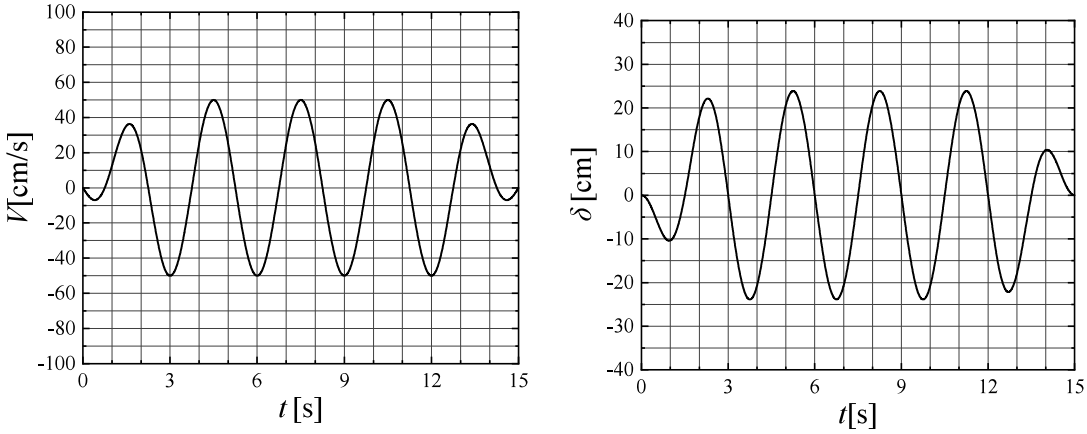
(a) ドライアイス投入状況

写真 3.2　ダンパー冷却状況



(b) 温度測定状況

写真 3.2　ダンパー冷却状況



(a) 速度　　(b) 変位

図 3.12　入力波の時刻歴波形（加振周期 T=3 秒、最大速度 V_{max}=50cm/s）

b) 試験結果

定常 3 サイクル目の減衰力と変位の関係を**図 3.13** に示す。1 回目から 11 回目までの減衰力と変位の関係は概ね同程度と評価でき、温度依存性が小さいことが確認できる。**表 3.10** に定常 3 サイクル目のダンパー表面の平均温度 T、履歴吸収エネルギー ΔW_d を示す。ここで、括弧内数値は、20℃における各種性能値を 100 とした場合の変化率を示す。

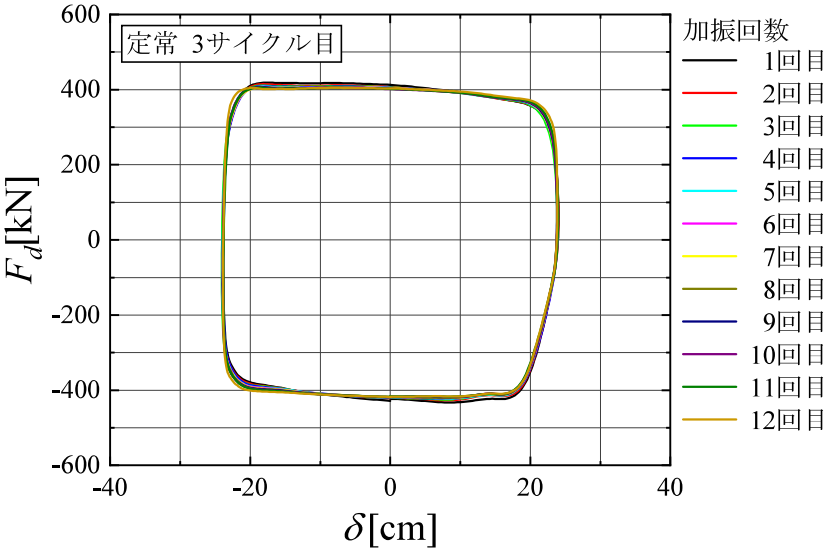


図 3.13　変位と減衰力の関係（定常 3 サイクル目）

表 3.10　ダンパー表面温度と各種減衰性能値の関係

加振回数	ダンパー表面温度 [℃]	ΔW_d [kN･cm]
1	-14.97	37386 (101.00)
2	-9.32	37127 (100.30)
3	0.90	37039 (100.06)
4	10.96	36978 (99.90)
5	20.71	37018 (100.01)
6	30.56	36979 (99.90)
7	40.19	36933 (99.78)
8	47.32	36970 (99.88)
9	52.76	36968 (99.87)
10	58.00	36917 (99.74)
11	63.04	36929 (99.77)
12	69.39	37180 (100.45)
—	基準値(20℃)	**37015 (100.00)**

※ ( )内数値は、20℃における性能値を100とした場合の変化率を示す。

ダンパー表面温度 T における履歴吸収エネルギー ΔW_d の変化率を次式で直線補間する。

$$温度変化率[\%] = \alpha(T-20)\times 100 \tag{3.4}$$

ここで、α:変化係数

性能測定値と直線補間した変化率との関係を**図 3.14** に、直線補間した場合の変化率一覧を**表 3.11** に示す。図、表より、(3.4)式の変化係数 α は極めてゼロに近い値となり、0℃～30℃の範囲では、＋0.1%から－0.05%と極めて僅かな温度依存性が確認できる程度である。

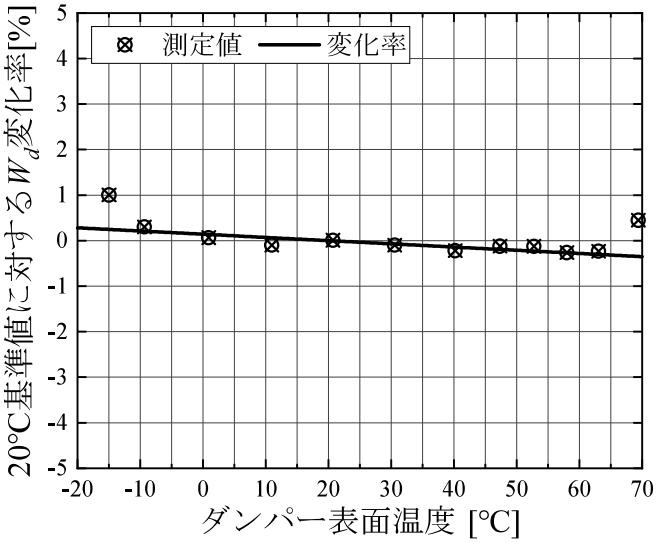


図 3.14　ダンパー表面温度と変化率の関係

表 3.11　直線補間した場合の変化率一覧

α(T-20)×100[%]

温度[℃]	-10	0	10	20	30	40	50	60	α
ΔW_dの変化率[%]	**＋0.16**	**＋0.10**	**＋0.05**	**±0.00**	**－0.05**	**－0.10**	**－0.16**	**－0.21**	**-0.0000520203**

3.5.2　周波数依存性

a）試験概要

各速度において、加振周期 T をパラメータとした加振試験を実施して、減衰力と速度の関係を確認し、ダンパーが適用できる周波数領域を定めることを目的とする。試験体数は 2 体とし、試験対象としたダンパーは No.1 と No.4 とした。また、水平性能試験同様に小形シリンダに強制変位を与え、作動距離 X_c もパラメータとした。周波数依存性を確認した試験条件一覧を**表 3.12** に示す。ここで、ダンパーの最大変形量が 40cm なので、加振波の最大変位が 40cm 以下となるものについて実施した。試験装置、計測装置、およびその配置は水平性能を確認したものと同じとした。

表 3.12　周波数依存性の試験条件

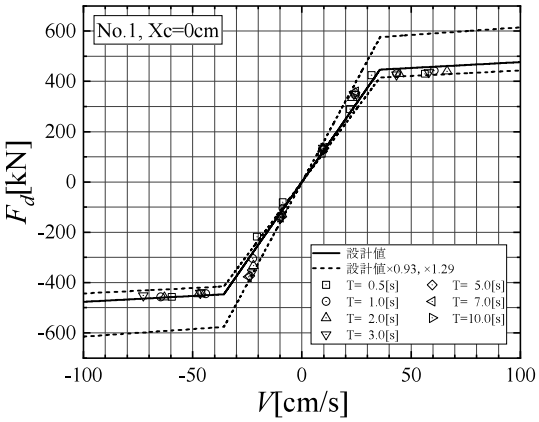
ダンパーNo.		No.1、　No.4
小形シリンダの作動距離 X_c [cm]		0、10※、20
加振波	加振周期 T[s]	0.5、1.0、2.0、3.0、5.0、7.0、10.0
	最大速度 V_{max}[cm/s]	10、25、50、75

※）No.1 のみ実施し、No.4 は対象外とした。

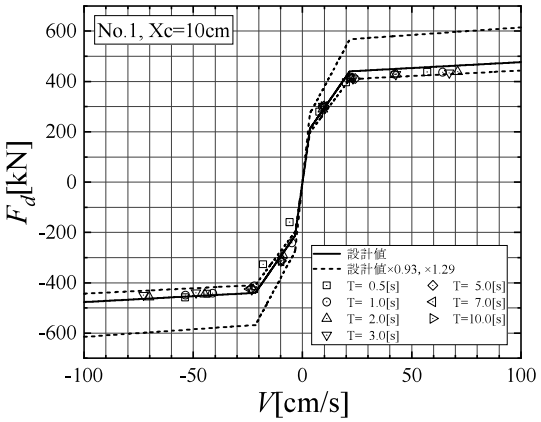
b）試験結果

定常 3 サイクル目の最大、最小となる減衰力と速度の関係を**図 3.15** に、測定結果を**表 3.13** に示す。図より、最大速度 V_{max} が 10cm/s 以下の低速領域において、加振周期 T が 0.5 秒および 1.0 秒の場合、減衰力が設計値よりも小さくなる傾向を示し、製造ばらつきを考慮した公差以下となる場合がある。これに対し、加振周期 T が 2.0 秒以上となると、減衰力は概ね一定値を示し安定した減衰性能を発揮しており、小形シリンダの作動距離 X_c やダンパーの違いによらず、同様の傾向を示した。

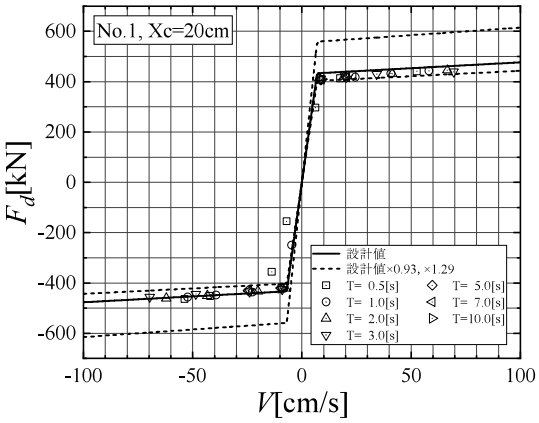
以上のことから、本ダンパーを取り付ける免震建物は、固有周期が 2.0 秒以上を対象とすることで、安定した減衰性能を確保できる。



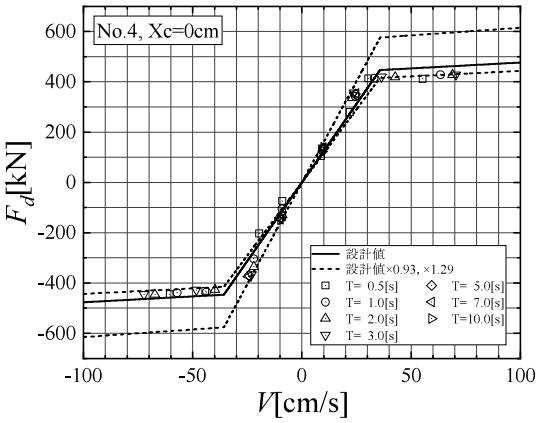
(a)No.1, Xc=0cm



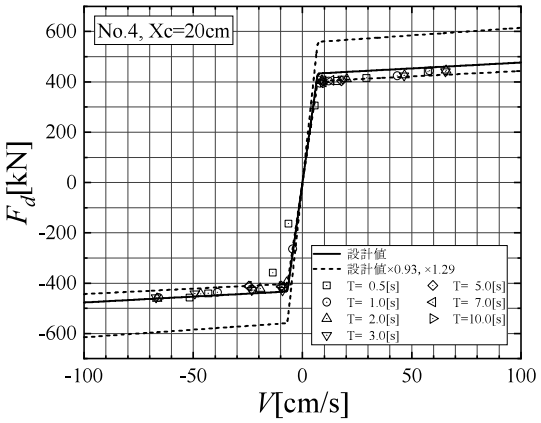
(b)No.1, Xc=10cm



(c)No.1, Xc=20cm



(d)No.4, Xc=0cm



(e)No.4, Xc=20cm

図 3.15　加振周期の違いによる減衰力と速度の関係

表 3.13　加振周期の違いによる減衰力と最大速度の測定値一覧

		T=0.5[s]		T=1.0[s]		T=2.0[s]		T=3.0[s]		T=5.0[s]		T=7.0[s]		T=10.0[s]	
		V [cm/s]	*Fd* [kN]	*V* [cm/s]	*Fd* [kN]	*V* [cm/s]	*Fd* [kN]	*V* [cm/s]	*Fd* [kN]	*V* [cm/s]	*Fd* [kN]	*V* [cm/s]	*Fd* [kN]	*V* [cm/s]	*Fd* [kN]
No.1	Xc=0cm	9.1	112.0	9.7	128.1	9.5	131.0	9.8	134.8	9.9	133.5	10.0	134.4	9.9	134.2
		22.1	289.6	24.5	347.2	23.1	335.3	23.8	349.5	24.3	355.0	24.6	358.0	—	—
		31.9	424.4	43.4	431.2	44.5	429.7	43.2	426.4	—	—	—	—	—	—
		56.3	430.2	60.5	442.4	66.4	440.5	58.1	435.8	—	—	—	—	—	—
		-8.8	-80.8	-8.6	-104.7	-9.1	-128.8	-9.5	-138.3	-9.8	-140.1	-9.8	-141.1	-9.9	-141.3
		-20.6	-217.5	-22.5	-304.4	-22.1	-333.2	-22.9	-359.4	-24.0	-373.6	-24.4	-377.6	—	—
		-46.0	-442.1	-44.0	-444.0	-47.2	-446.1	-46.5	-441.8	—	—	—	—	—	—
		-59.5	-457.1	-64.6	-457.2	-63.0	-458.4	-72.6	-451.7	—	—	—	—	—	—
	Xc=10cm	7.6	279.7	9.1	298.8	9.3	288.8	9.4	301.8	9.8	302.4	9.8	300.8	9.8	300.3
		19.9	397.1	22.3	413.1	22.4	410.6	23.1	411.6	24.1	411.8	21.9	413.1	—	—
		21.9	416.7	42.1	428.5	42.9	429.7	42.7	428.0	—	—	—	—	—	—
		57.1	437.6	64.2	436.7	71.0	438.6	67.1	434.3	—	—	—	—	—	—
		-5.9	-159.0	-4.9	-242.1	-8.9	-290.2	-9.3	-310.3	-9.9	-314.4	-9.8	-313.1	-9.9	-312.5
		-18.1	-326.2	-22.1	-412.3	-22.7	-427.8	-23.2	-426.5	-23.6	-422.5	-24.3	-425.1	—	—
		-43.7	-443.4	-41.1	-441.8	-44.8	-445.8	-48.8	-439.8	—	—	—	—	—	—
		-53.8	-458.0	-53.6	-449.2	-70.2	-456.7	-72.8	-449.2	—	—	—	—	—	—
	Xc=20cm	6.2	297.1	8.8	406.6	7.9	415.4	8.7	411.2	8.7	406.7	8.9	408.9	9.2	409.4
		17.6	413.0	24.4	417.4	19.3	419.9	19.8	420.9	20.3	416.8	20.5	417.9	—	—
		23.1	424.8	40.8	432.2	41.4	431.5	34.3	429.7	—	—	—	—	—	—
		52.6	440.7	58.1	443.2	66.6	445.1	69.5	439.2	—	—	—	—	—	—
		-7.0	-154.5	-4.7	-249.2	-7.5	-421.2	-9.0	-425.3	-9.7	-420.0	-9.5	-420.8	-9.7	-421.7
		-13.8	-355.7	-22.7	-436.4	-20.1	-432.8	-23.9	-434.2	-24.6	-430.2	-24.4	-430.9	—	—
		-42.0	-451.5	-39.3	-448.1	-43.4	-450.5	-48.5	-444.1	—	—	—	—	—	—
		-53.8	-464.1	-52.3	-456.0	-62.1	-461.0	-69.7	-455.5	—	—	—	—	—	—
No.4	Xc=0cm	8.7	104.1	9.4	125.1	9.6	132.4	9.8	138.0	9.9	136.1	9.9	138.9	9.9	139.7
		21.9	279.5	24.5	342.1	23.0	335.9	23.8	357.3	24.5	350.9	24.7	354.1	—	—
		30.3	413.5	33.0	413.6	42.7	418.8	36.4	420.5	—	—	—	—	—	—
		55.3	411.7	63.5	428.8	69.0	427.9	70.5	428.2	—	—	—	—	—	—
		-9.0	-74.1	-9.1	-105.4	-9.0	-129.6	-9.5	-140.5	-9.6	-142.8	-9.8	-147.4	-9.8	-148.9
		-19.6	-203.1	-22.1	-303.5	-22.0	-335.6	-23.1	-366.8	-24.2	-369.5	-24.5	-374.4	—	—
		-44.2	-431.8	-43.6	-435.3	-39.9	-426.8	-48.3	-427.9	—	—	—	—	—	—
		-60.5	-444.4	-57.1	-438.9	-67.3	-446.2	-72.3	-445.8	—	—	—	—	—	—
	Xc=20cm	5.5	305.7	7.9	394.3	8.8	405.5	8.6	411.6	9.3	397.0	9.6	398.9	9.6	399.8
		15.9	403.0	12.0	402.8	20.2	411.2	18.4	411.9	17.9	404.5	13.0	405.6	—	—
		29.3	415.7	43.4	424.5	46.7	426.1	46.5	425.3	—	—	—	—	—	—
		57.4	440.0	58.1	443.9	65.7	445.6	65.5	441.3	—	—	—	—	—	—
		-6.4	-163.2	-4.5	-264.1	-7.3	-396.4	-9.1	-427.8	-9.7	-411.6	-9.6	-414.3	-9.4	-413.6
		-13.6	-358.0	-22.8	-426.9	-19.4	-421.2	-23.2	-427.4	-24.5	-411.6	-24.7	-412.5	—	—
		-43.2	-440.5	-38.9	-436.1	-46.6	-442.4	-49.3	-441.8	—	—	—	—	—	—
		-51.7	-457.2	-65.9	-457.0	-66.5	-461.3	-67.0	-456.9	—	—	—	—	—	—

表中 ー印は、最大変形が 40cm 以上となる加振のため、実施していない。

3.5.3　繰り返し耐久性

a) 試験概要

4 章で検討した建物モデルにおいて、極めて稀に発生する地震動(レベル 2)および長周期地震動(CH2)を外乱としたときのダンパー 1 本あたりの履歴吸収エネルギーΣW_dおよび、累積変形量$\Sigma\delta$を**表 3.14** に示す。ここで、極めて稀に発生する地震動(レベル 2)とは、過去に受けたことのある地震動のうち最強と考えられるもの、および将来において受けることが考えられる最強の地震動[64]を想定している。表より、レベル 2 地震動時における履歴吸収エネルギーΣW_dの最大値は 3916kN･m(告示波 3)、累積変形量Σδの最大値は 12.0m(告示波 3)である。長周期地震動時の履歴吸収エネルギーΣW_dは 7996kN･m、累積変形量$\Sigma\delta$は 26.6m である。また、「免震建築物の耐風設計指針(2023)」でオイルダンパーに想定される長時間の風荷重時[65]における本ダンパーの履歴吸収エネルギーΣW_dは概ね 1776kN･m、累積変形量$\Sigma\delta$は 28.8m である。

また、地震動についてのようなハザードカーブを想定し、各最大地動加速度における地震動の発生頻度と、それに対応するオイルダンパーの履歴吸収エネルギーの 60 年累積値を算定した。**図 3.16**、**表 3.14** に算定結果を示す。図、表より、オイルダンパーの履歴吸収エネルギーの 60 年累積の期待値は、概ね 8,000kN･m であった。

そこで、建物の耐用年数中の地震動および風荷重時における履歴吸収エネルギーΣW_d、および累積変形量$\Sigma\delta$に対して、安全率 5.0 以上を考慮した外乱を想定し、その前後の常温状態における減衰性能値の変化率を確認することを目的とする。

繰返し耐久性に考慮した入力波は、加振周期 3 秒、最大速度 15cm/s の 1000 サイクルの正弦波加振とした。200 サイクルを 1 波とし、5 回の加振を実施して合計で 1000 サイクル加振とした。試験機および計測装置、計測装置配置は水平性能を確認したものと同じとした。試験体数は 1 体とし、ダンパーNo.4 を用いた。比較する加振波一覧などを**表 3.16** に示す。1000 サイクル加振する前に、水平性能の確認で用いた加振周期T が 3 秒、最大速度V_{max}が 10、25、50cm/s となる正弦波加振を行い、減衰性能の確認を行う。

次に、**図 3.17** に示した加振周期T を 3.0 秒、最大速度V_{max}を 15[cm/s]とした正弦波を入力波とし、定常 190 波、その前後に 5 波の予備加振を設けた計 200 波の正弦波を 1 回の加振として実施し、ダンパーの温度が概ね常温になった状態で、再度同じ入力波をダンパーへ入力し、合計 1000 サイクルとなるように 5 回実施した。

最後に、水平性能確認で用いた加振周期 3 秒、最大速度が 10、25、50cm/s となる正弦波加振を行い、1000 サイクル前後での減衰性能の比較を行う。

表 3.14　ダンパー履歴吸収エネルギーおよび累積変形量

		外乱①						外乱②	外乱③	最大値	最大値×安全率※1)	1000ｻｲｸﾙ加振(測定結果)	判定
		レベル2(標準特性時、小形シリンダの回帰特性なし)						長周期(CH2)	風荷重				
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI						
履歴吸収エネルギー ΣW_d[kN･m]	X方向	2024	2553	3916	677	734	1213	7996	1776	7996	39980	40464	OK
	Y方向	1981	2530	3845	667	722	1198	7870					
免震層の累積変形量 $\Sigma\delta$[m]	X方向	5.6	7.7	12.0	2.8	3.9	4.4	26.6	28.8	28.8	144.0	274.5	OK
	Y方向	5.5	7.6	11.9	2.8	4.0	4.4	26.3					

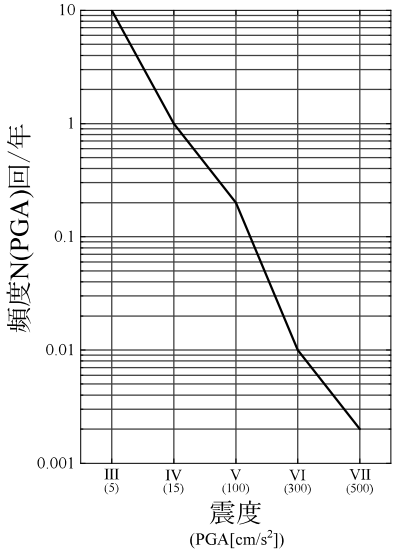


図 3.16 ハザード曲線

表 3.15　累積エネルギー期待値

震度	PGA [cm/s2]	年発生 [回]	60年発生 [回]	1回あたりの履歴吸収ｴﾈﾙｷﾞｰ	60年間の累積ｴﾈﾙｷﾞｰ期待値[kN/m]
III	5	10	600	0.8	480
IV	15	1	60	7.2	432
V	100	0.2	12	320	3840
VI	300	0.01	0.6	2880	1728
VII	500	0.002	0.12	8000	960
				累積期待値	7440

表 3.16　比較条件

ダンパーNo.		No.4
加振波	加振周期 T[s]	3.0
	最大速度 V_{max}[cm/s]	10、25 、50

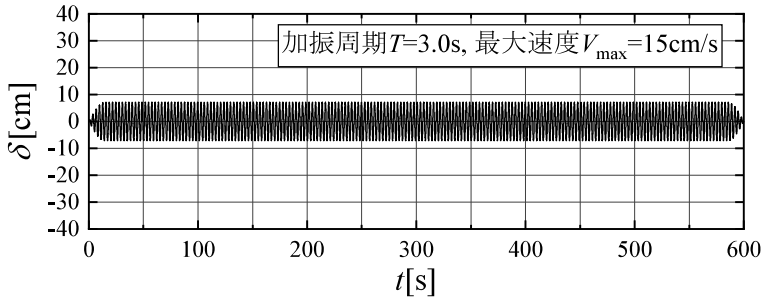
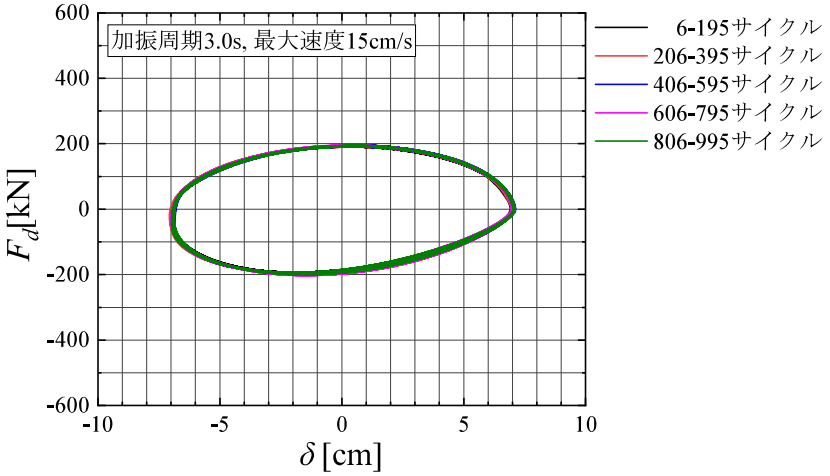


図 3.17　1000 サイクル加振に用いる加振波

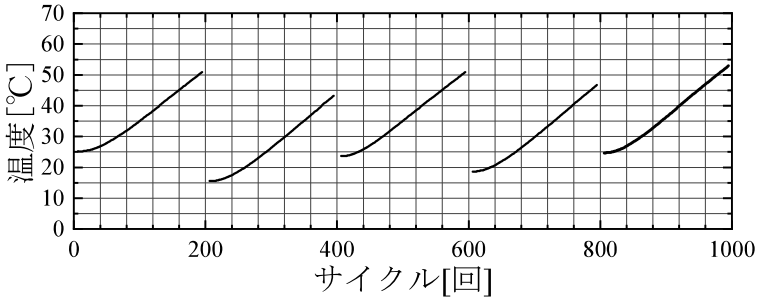
（加振周期 T=3 秒、最大速度 V_{max}=15cm/s）

b) 試験結果

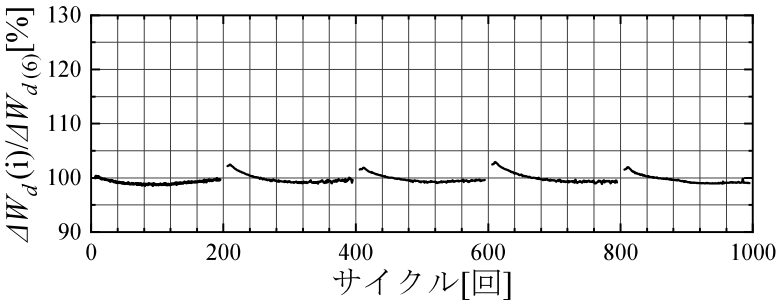
1000 サイクル中の性能変化の確認を行う。多数回繰り返し中における減衰性能を図 3.18 に示す。(a) より、減衰力 F_d と変位 δ の関係は多数回繰り返し中においても大きな変化は確認できず、安定した履歴ループを示している。また、6 ループ目の履歴吸収エネルギー $\Delta W_{d(6)}$ を 100%とし、各サイクルにおける履歴吸収エネルギーを比較しても、大きな変化は見受けられず、安定したエネルギー吸収能力を有していることが分かる。



(a) 減衰力と変位の関係



(b) ダンパーの表面温度



(c) 1 サイクルあたりの履歴吸収エネルギーの比較

図 3.18　多数回繰り返し中における減衰性能

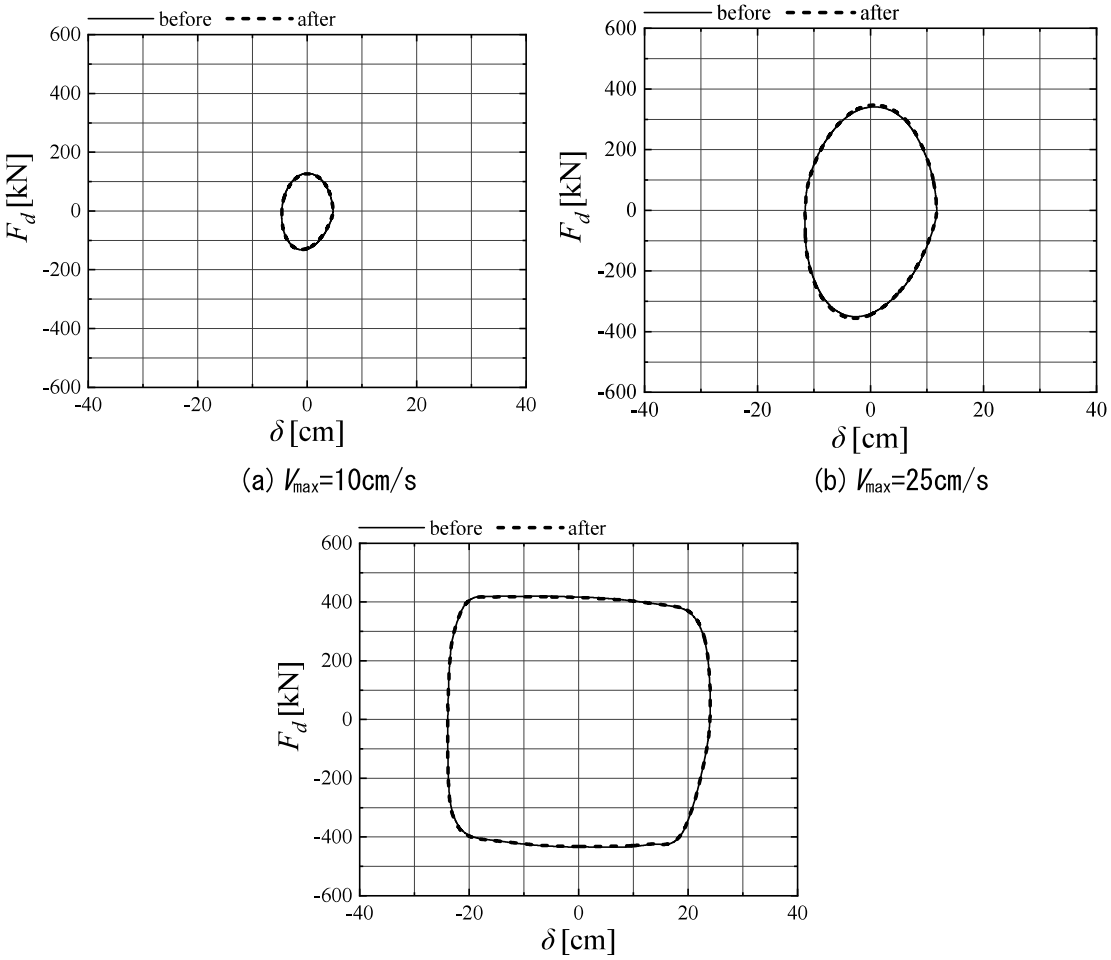
1 加振あたりの履歴吸収エネルギーおよび累積変形量を**表 3.17** に示す。表より、5 加振した合計の履歴吸収エネルギーΣW_dは 40,000kN･m を超え、累積変形量$\Sigma\delta$は概ね 275mとなり、想定した安全率が確保されていることが分かる。

表 3.17　1 加振あたりの履歴吸収エネルギーおよび累積変形量

サイクル	履歴吸収エネルギー ΣW_d[kN･m]	累積変形量 $\Sigma\delta$[m]
1~200	8050.9	54.91
201~400	8103.2	54.82
401~600	8101.5	54.92
601~800	8118.4	54.90
801~1000	8089.6	54.91
合計	40463.6	274.46

次に、1000 サイクル前後における減衰力と変位の関係を**図 3.19** に定常 3 サイクル目の履歴吸収エネルギーの比較を**表 3.18** に示す。図より、1000 サイクル前後で減衰力と変位の関係に大きな差異は確認できず、繰り返し加振の影響がないことが分かる。また、表より 1000 サイクル前後における履歴吸収エネルギーも 1%未満の差異はあるものの、概ね同程度であることが確認できる。

以上のことより、繰り返し加振前後においてもダンパーは同程度の減衰性能を示し、安定した減衰力を発揮していることが確認できる。



(a) V_{max}=10cm/s　　(b) V_{max}=25cm/s

(c) V_{max}=50cm/s

図 3.19　1000 サイクル前後における減衰力と変位の関係

表 3.18　定常 3 サイクル目の履歴吸収エネルギーの比較

T [s]	V_{max} [cm/s]	前／後	ΔW_d [kN･cm]	最大値 F_d [kN]	最大値 δ [cm]	最大値 V [cm/s]	最小値 F_d [kN]	最小値 δ [cm]	最小値 V [cm/s]
3	10	前	1866.5	127.8	4.7	9.8	-132.2	-4.7	-9.7
		後	1846.6	126.7	4.7	9.8	-131.1	-4.6	-9.7
		後／前[%]	**98.9**	**99.1**	**100.4**	**99.4**	**99.2**	**99.5**	**99.7**
3	25	前	12313.1	341.1	11.7	23.9	-350.9	-11.6	-23.6
		後	12432.9	346.9	11.7	23.9	-356.1	-11.6	-23.7
		後／前[%]	**101.0**	**101.7**	**99.8**	**99.9**	**101.5**	**99.8**	**100.0**
3	50	前	37957.9	419.7	24.0	49.3	-434.6	-23.9	-48.8
		後	37908.7	417.8	24.0	49.6	-432.4	-23.9	-49.1
		後／前[%]	**99.9**	**99.6**	**100.0**	**100.6**	**99.5**	**100.0**	**100.7**

3.5.4　長周期地震動

a) 試験概要

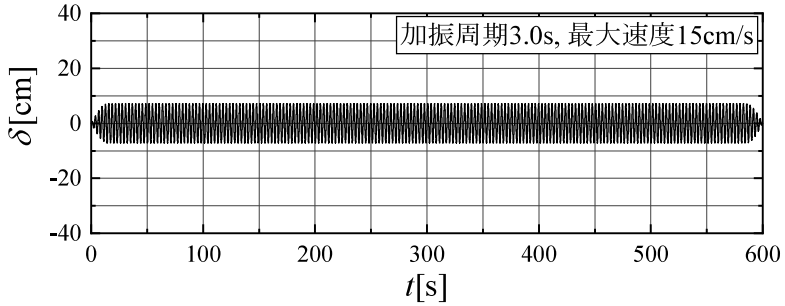
長周期地震動を想定し、1 回の加振でダンパーの累積変形量 $\Sigma\delta$ が 50m 以上となる加振を実施して、ダンパーの表面温度が許容値を超えないこと、および、減衰性能の変化率が小さいことを確認する。また、ダンパーの履歴吸収エネルギー W_d とダンパーの表面温度の関係を確認する。試験機、計測装置、およびその配置は水平性能を確認したものと同じとした。試験体数は 1 体とし、ダンパーNo.4 を用いた。

ここで、入力する加振波は定常波の前後に 5 波の予備加振を設けた正弦波とし、最大速度 V_{max} は 15cm/s に固定し、加振周期 T を 3 秒、10 秒とした正弦波を 10 分間連続で実施した。

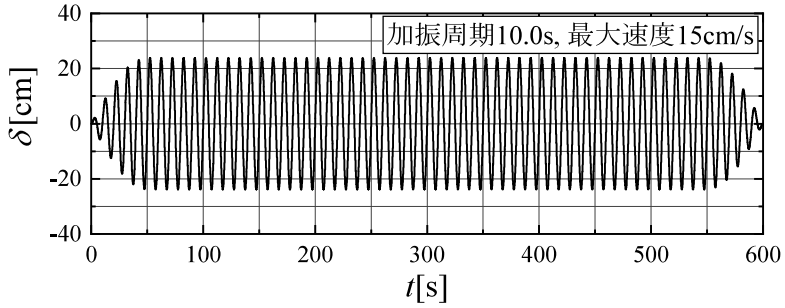
加振周期が 10 秒の場合には、片振幅の最大変位が概ね 23.9cm となることから、設定クリアランス L_s 以上の変位がダンパーに生じる。ここで、小形シリンダの作動距離 X_c はある一定の時間を掛けて元の位置に戻ろうとする、即ち、作動距離 X_c がゼロに戻ろうとする特性があるが、本項ではパイロットケースに設けたニードルバルブを全閉状態にして、小形シリンダの作動距離 X_c が一定となるようにし、ダンパーの履歴吸収エネルギー性能が高い状態を維持したまま加振し、ダンパーの表面温度の上昇を安全側に評価した。**表 3.19** に試験条件一覧を、**図 3.20** に入力した加振波形を示す。

表 3.19　長周期地震動に対する試験条件

ダンパーNo.		No.4
加振波	加振周期 T [s]	3.0、10.0
	最大速度 V_{max} [cm/s]	15
	継続時間[s]	600



(a) 加振周期 T=3 秒、最大速度 V_{max}=15cm/s（性能変化なし）

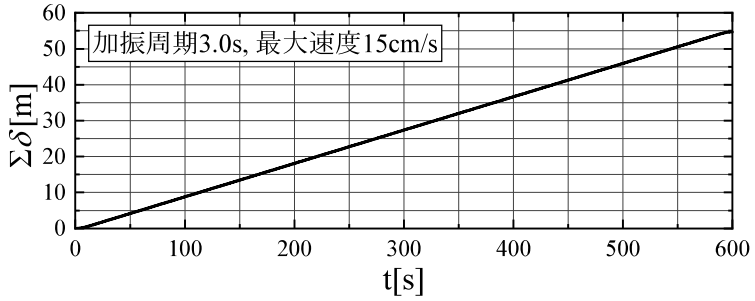


(b) 加振周期 T=10 秒、最大速度 V_{max}=15cm/s（性能変化あり）

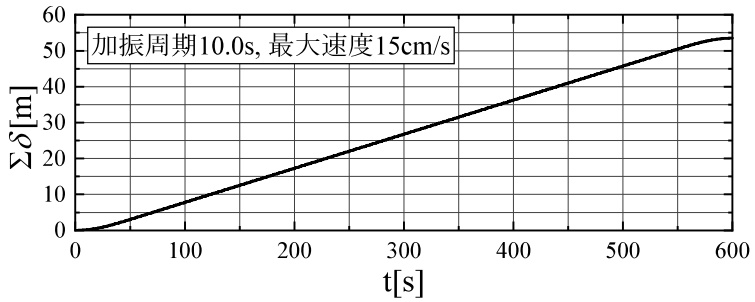
図 3.20　長周期地震動に考慮した加振に用いる加振波形

b) 試験結果

ダンパーの累積変形量を図 3.21 に、加振中のダンパー表面温度を図 3.22 に、ダンパーの変位と減衰力の関係を図 3.23 に、1 サイクルあたりの履歴吸収エネルギーの変化率を図 3.24 に、履歴吸収エネルギーの累積値とダンパー表面の温度上昇の関係を図 3.25 にそれぞれ示す。図 3.21 より、ダンパーの累積変形量は、加振周期 T が 3 秒の場合は概ね 54.7m、10 秒の場合は概ね 53.5m となり、両加振とも 50m以上あることが確認できる。図 3.24(a) より、性能変化しない場合は、6 サイクル目の履歴吸収エネルギーに対する 195 サイクル目の履歴吸収エネルギーの変化率が-2.3%と減少した。これに対し、性能変化する場合は(b)に示すように、＋5%と増加した。これは、急激な温度上昇に伴い、ダンパーの空気室圧力が上昇しダンパーの減衰力が上昇したことが原因と考えられるが、いずれにしても減衰性能の変化率は小さいことが確認できる。図 3.25 より、ダンパー表面の温度上昇は性能変化しない場合で＋31℃、性能変化する場合で概ね＋51℃となった。

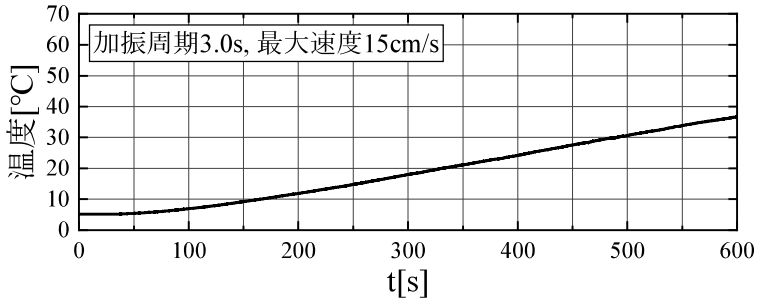


(a) 加振周期 T=3 秒、最大速度 V_{max}=15cm/s

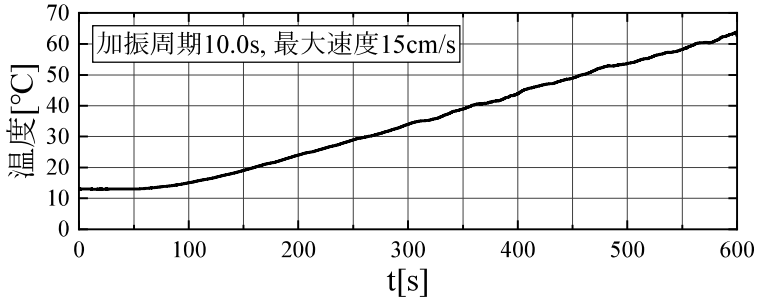


(b) 加振周期 T=10 秒、最大速度 V_{max}=15cm/s

図 3.21　ダンパーの累積変形量 Σδ



(a) 加振周期 T=3 秒、最大速度 V_{max}=15cm/s



(b) 加振周期 T=10 秒、最大速度 V_{max}=15cm/s

図 3.22　ダンパーの表面温度

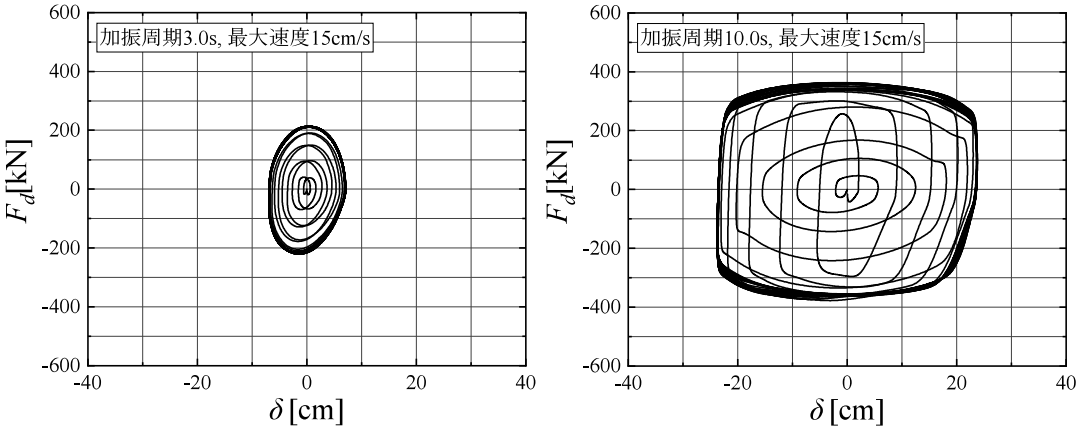
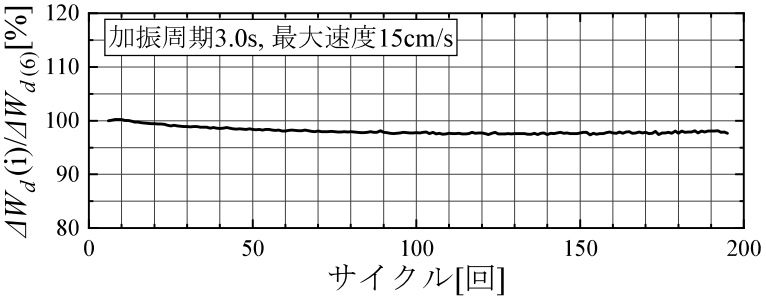
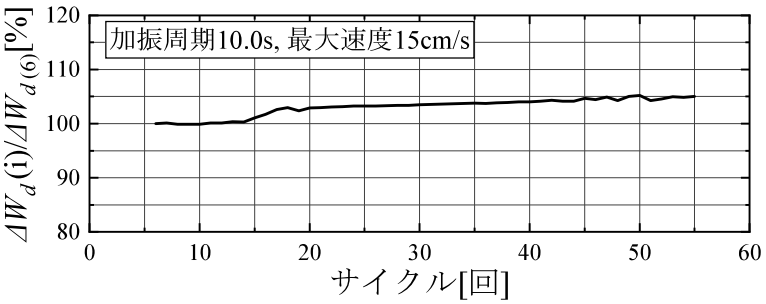


図 3.23　減衰力と変位の関係



(a) 加振周期 T=3 秒、最大速度 V_{max}=15cm/s



(b) 加振周期 T=10 秒、最大速度 V_{max}=15cm/s

図 3.24　1 サイクルあたりの履歴吸収エネルギー ΔW_d の変化

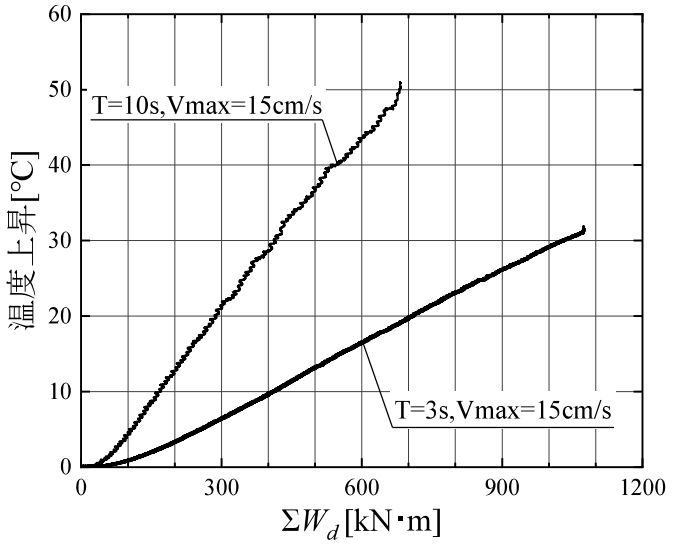
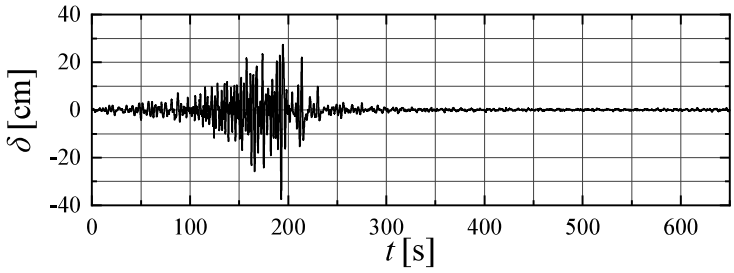


図 3.25　履歴吸収エネルギーの累積値とダンパー表面温度上昇の関係

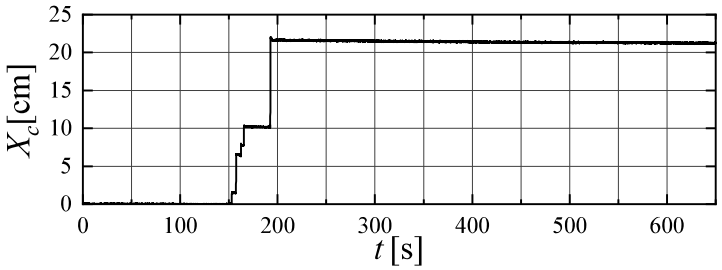
次に、本ダンパー設置予定の建物で想定した長周期地震動 CH2 相当の免震層の変位をダンパーに外力として入力した場合の加振を実施し、ダンパー表面の温度上昇を確認する。ここで、履歴吸収エネルギーを大きく評価するため、ニードルバルブは全閉とし小形シリンダの作動距離 X_c が一定値を保持するように、即ち性能変化を維持するようにした。

測定結果を図 3.23 に示す。ダンパーの表面温度は、免震層の最高温度を再現するため、概ね 30℃とし、加振を行った。加振前のダンパー表面温度は概ね 28.3℃であり、加振中の最高温度は 49.2℃であった。以上のことより、想定する長周期地震動 CH2 におけるダンパー表面の温度上昇は概ね＋20.9℃と想定される。

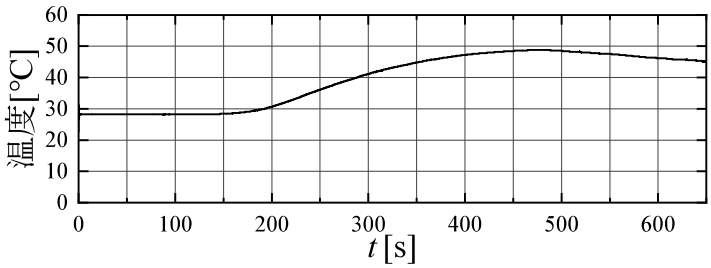
以上のことから、免震層の最高温度が 30℃と想定すると、想定した長周期地震動 CH2 が生じた場合、ダンパーの表面温度は＋21℃程度と想定されることから、ダンパー表面温度は約 50℃程度まで上昇するものと想定でき、ダンパーの許容温度 60℃以下となることを確認した。



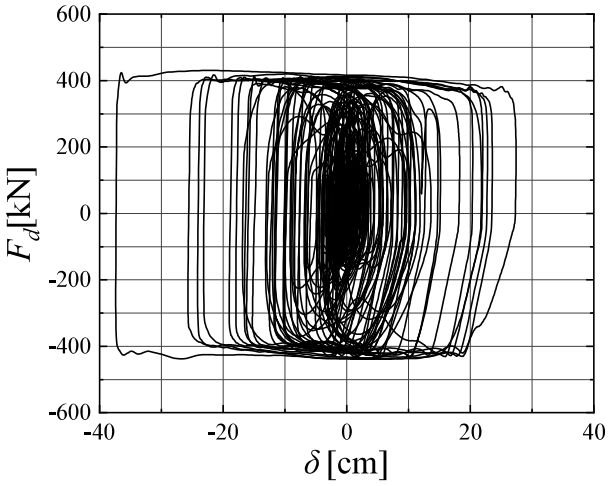
(a) ダンパー変位 δ



(b) 小形シリンダの作動距離 X_c



(c) ダンパー表面温度



(d) 減衰力－変位

図 3.26　長周期地震動 CH2 相当におけるダンパーの応答（No. 4、全閉）

3.5.5　小形シリンダの回帰特性

a) 試験概要

設定クリアランス L_s 以上の変位がダンパーに生じると、小形シリンダのロッドが作動し、パイロット油を吐出させる。吐出したパイロット油は、配管とパイロットケースを通してばね座を押込み、調圧弁ばねを圧縮して減衰力が増加する。従って、減衰力の増加は小形シリンダの作動距離 X_c に依存して、減衰力が増加する。小形シリンダが作動すると同時に、圧縮された調圧弁ばねの力により、ばね座が押し返され吐出したパイロット油はニードルバルブ部を経由して押し戻され、性能変化前の位置に小型シリンダを戻す回帰特性を有している。

ここでは、ダンパー本体のロッドと小形シリンダのガイドロッドを切り離した状態とし、小形シリンダに強制変位 X_{cmax} を与え、その回帰特性を測定する。対象とした試験体および小形シリンダに与えた強制変位 X_c を**表 3.20** に示す。なお、小形シリンダに与えた強制変位は引張側と圧縮側の 2 パターンで実施し、水平性能を測定したときと同様に、小形シリンダの作動距離 X_c をレーザー変位計にて測定した。サンプリング周波数は 100[Hz]とし、計測記録は 0.002Hz から 30Hz のバンドパスフィルタ処理を行い、0.1 秒間分の計測記録を移動平均したものを測定結果とした。

表 3.20　小形シリンダの回帰特性に対する試験条件

ダンパーNo.	1、2、3、5
小形シリンダの作動距離 X_c	25、15、5

b) 試験結果

小形シリンダの最大作動距離 X_{cmax} が 25cm の場合の回帰特性を**図 3.27** に示す。ここで、横軸は時間 t[s]、縦軸は小形シリンダの作動距離 X_c を示す。なお、図中赤線は設計用小形シリンダの回帰特性を示し、作動距離 X_c が 25cm の場合は概ね 233 秒で元の位置に戻る。
図より、いずれのダンパーも設計用回帰特性よりも時間を掛けて元の位置に戻ることが確認できる。また、ダンパーの違いによらず、概ね同程度の回帰特性を有していることが分かる。

最大作動距離 X_{cmax} の違いによる小形シリンダの回帰特性を**図 3.28** に示す。最大作動距離 X_{cmax} の違いによらず、概ね同様の回帰特性を有しており、再現性があることが分かる。

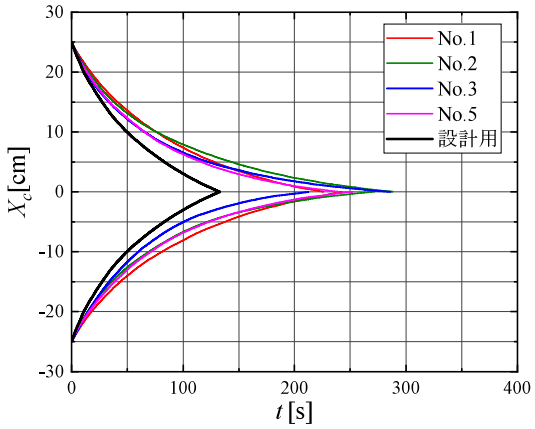
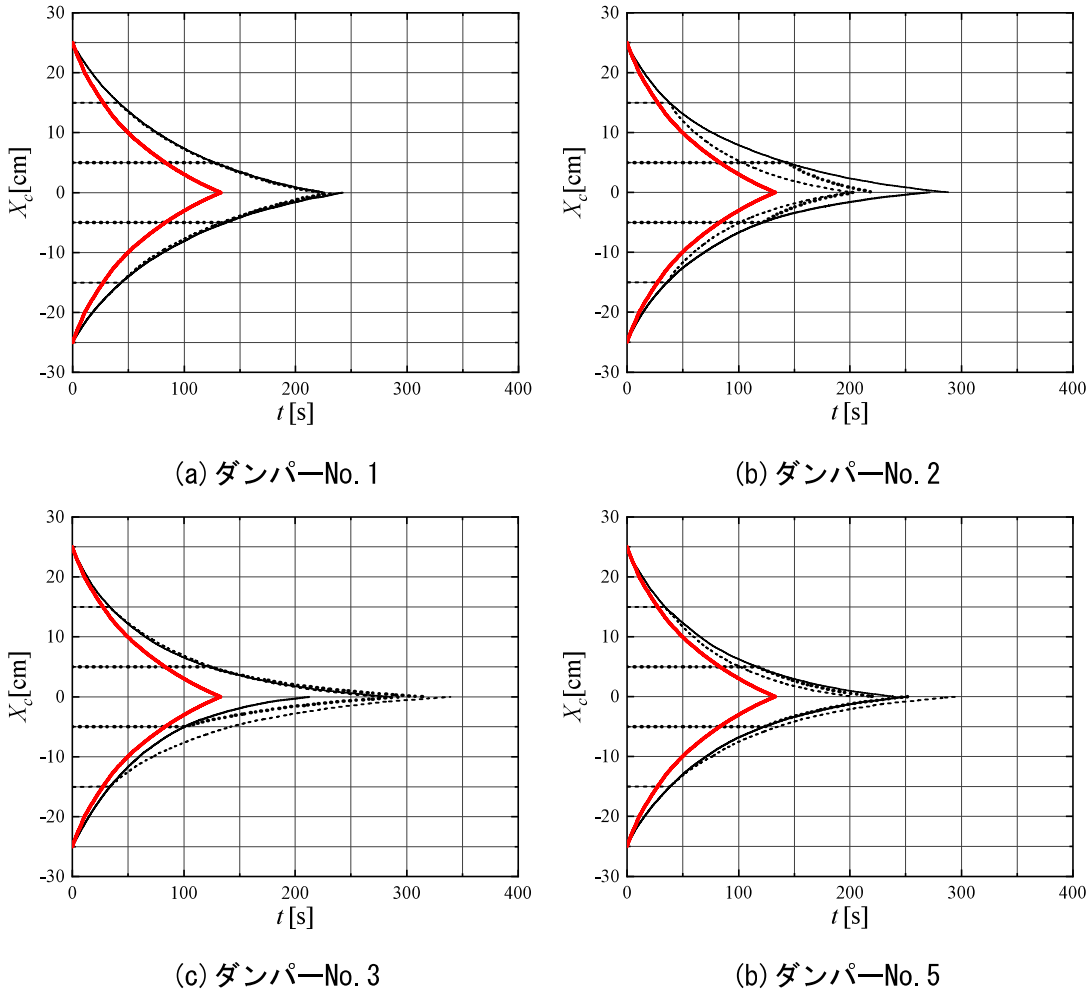


図 3.27　設計用小形シリンダの回帰特性と測定値の比較（X_{cmax}=25cm）



(a) ダンパーNo. 1

(b) ダンパーNo. 2

(c) ダンパーNo. 3

(b) ダンパーNo. 5

図 3.28　最大作動距離 X_{cmax} の違いによる小形シリンダ回帰特性の比較

3.5.6　性能変化の時間依存性

a) 試験概要

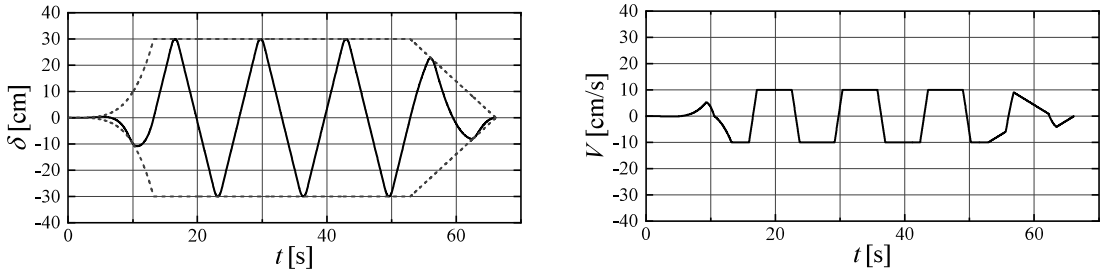
小形シリンダが作動してから、減衰性能が変化するまでの時間遅れ T_L を確認する。試験体数は 2 体とし、対象としたダンパーは No.3 と No.5 とした。試験装置、計測装置、およびその配置は水平性能を確認したものと同じとした。ここで、小形シリンダが作動してから減衰性能が変化するまでの時間を評価できるように、サンプリング周波数は 2,000Hz として減衰力が増加するまでの時間を計測できるように配慮した。

加振波は最大変位を 30cm、低速領域を対象に最大速度を 10、15、20、25cm/s とした速度一定の三角波とした。なお、入力波の速度が切り替わる付近では平滑化処理を行い、試験機に過度な加速度が生じないように配慮した。また、加振波は定常 3 サイクルの前後に 1 サイクル分のテーパーを設けた。テーパー部で小形シリンダが作動しないように、テーパー部の最大変形が設定クリアランス L_s (=15cm)以下になるように振幅包絡線を設けた。試験条件一覧を表 3.21 に、加振波の時刻歴波形を図 3.29 に示す。

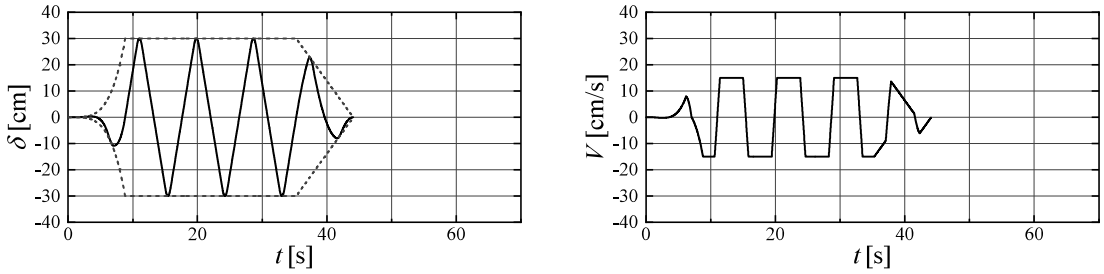
次に、ダンパーNo.5 を対象に CH2 相当の変位波形を入力し、減衰性能が変化するまでの時間遅れの影響が、ダンパーの履歴吸収エネルギーに与える影響について検討する。

表 3.21　試験条件一覧（減衰性能の切替）

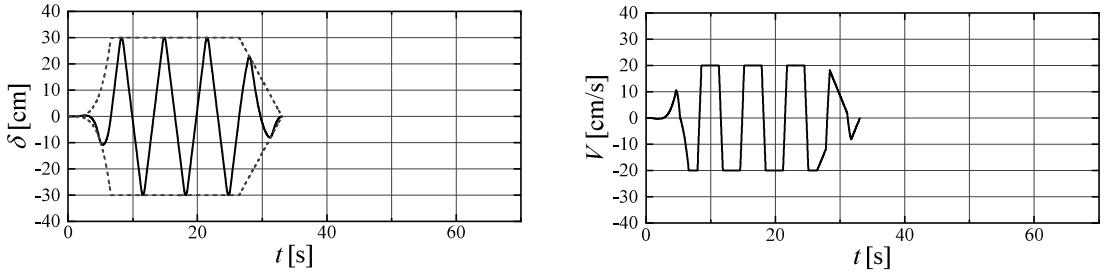
ダンパーNo.		No.3、No.5
加振波	最大変位 δ_{max}[cm]	30
	最大速度 V_{max}[cm/s]	10、15、20、25
	サンプリング周波数[Hz]	2000



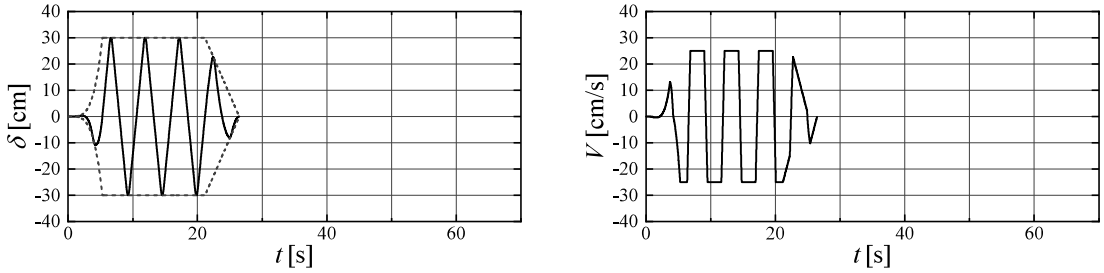
(a) δ_{max}=30cm、 V_{max}=10cm/s



(b) δ_{max}=30cm、 V_{max}=15cm/s



(c) δ_{max}=30cm、 V_{max}=20cm/s



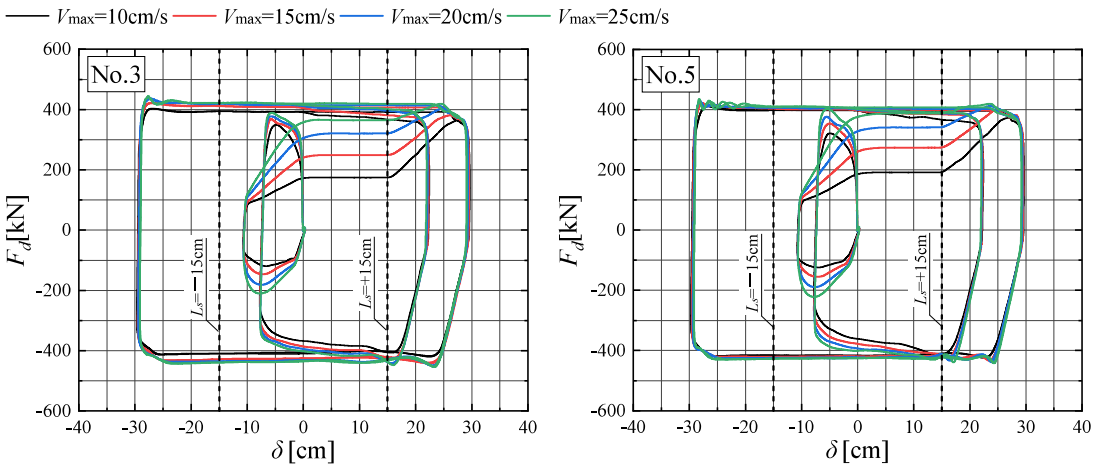
(d) δ_{max}=30cm、 V_{max}=25cm/s

図 3.29　加振波形（三角波）

b) 試験結果

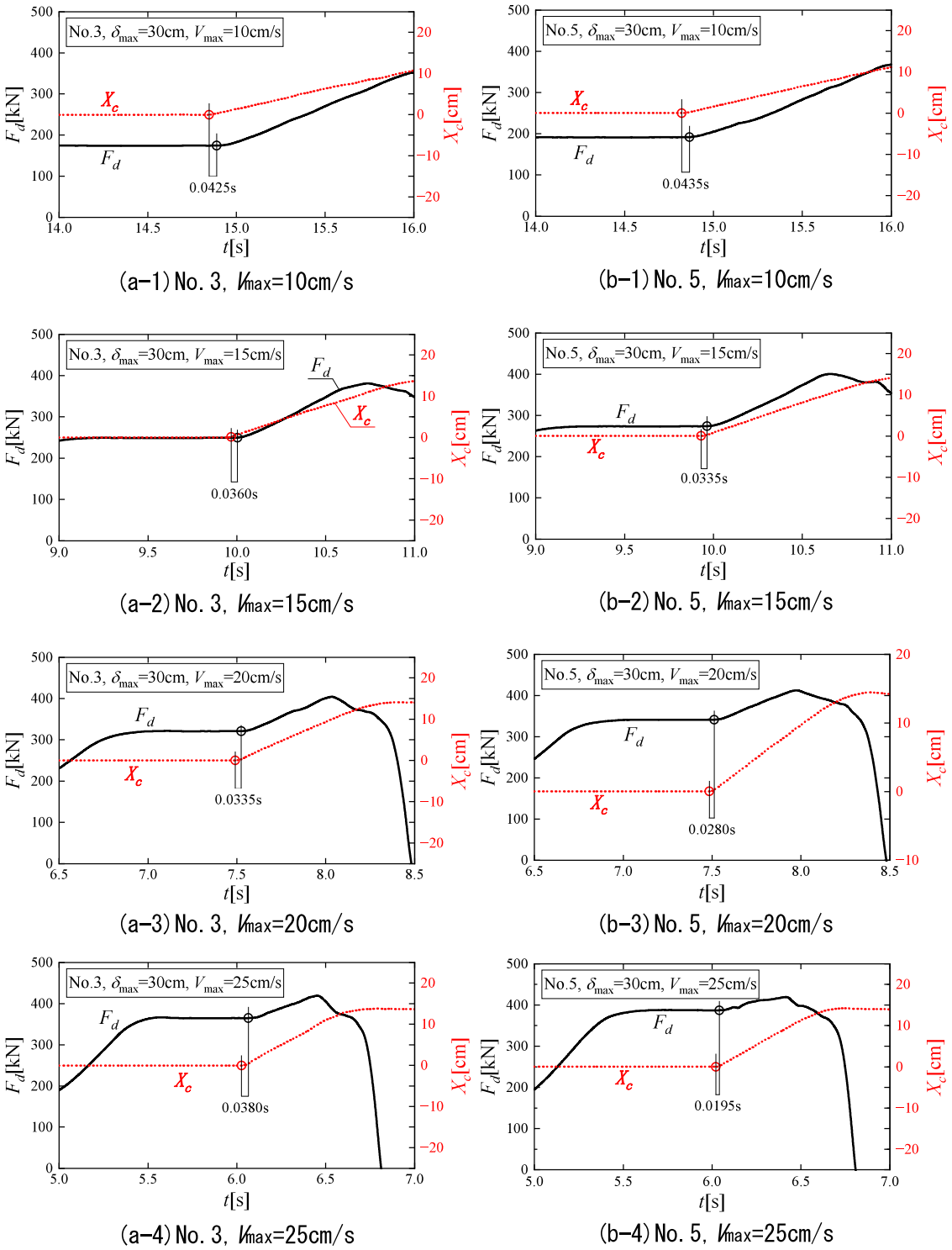
減衰力とダンパー変位の関係を**図 3.30** に示す。最大速度の違いによらず、ダンパー変位が 15cm を超えた時点で減衰力が増加しており、減衰係数が変化していることが分かる。

次に、減衰力と小形シリンダの作動距離の時刻歴を**図 3.31** に示す。図中の黒線が減衰力 F_d、点線が小形シリンダの作動距離 X_c の時刻歴をそれぞれ示し、○印は X_c が作動した点、または F_d が増加を開始した点をそれぞれ示している。小形シリンダが作動するまでは、ダンパーの減衰力は概ね一定値を示し、性能が変化していないことが分かる。小形シリンダが作動してから減衰力 F_d が増加するまでの時間遅れ T_L は、0.019 秒から 0.0435 秒であった。また、ダンパーの最大速度 V_{max} が速くなるほど、減衰力 F_d が増加するまでの時間遅れ T_L は短くなる傾向がある。これは、小形シリンダ内の作動油が弾性変形してから、ばね座を押込むことに起因していると考えられるが、いずれにおいても、小形シリンダが作動してから、減衰性能が変化するまでの時間遅れは概ね 0.05 秒以下であることを確認した。



(a) No. 3　　(b) No. 5

図 3.30　減衰力とダンパー変位の関係（三角波）



(a-1) No. 3, Vmax=10cm/s　(b-1) No. 5, Vmax=10cm/s

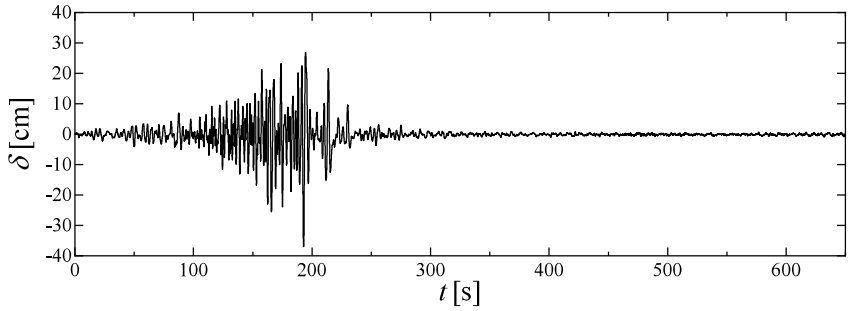
(a-2) No. 3, Vmax=15cm/s　(b-2) No. 5, Vmax=15cm/s

(a-3) No. 3, Vmax=20cm/s　(b-3) No. 5, Vmax=20cm/s

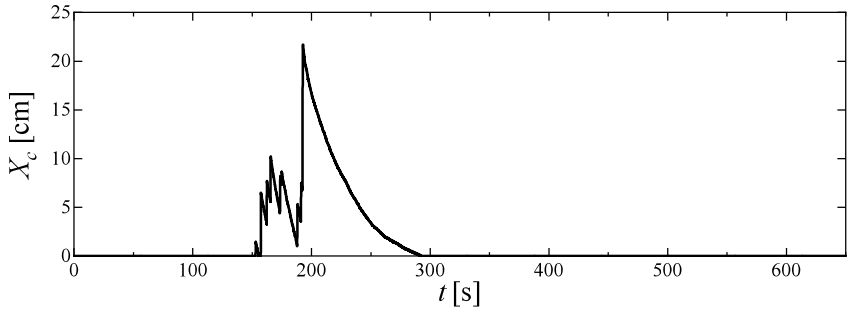
(a-4) No. 3, Vmax=25cm/s　(b-4) No. 5, Vmax=25cm/s

図 3.31　減衰力と小形シリンダの作動距離の時刻歴（三角波加振）

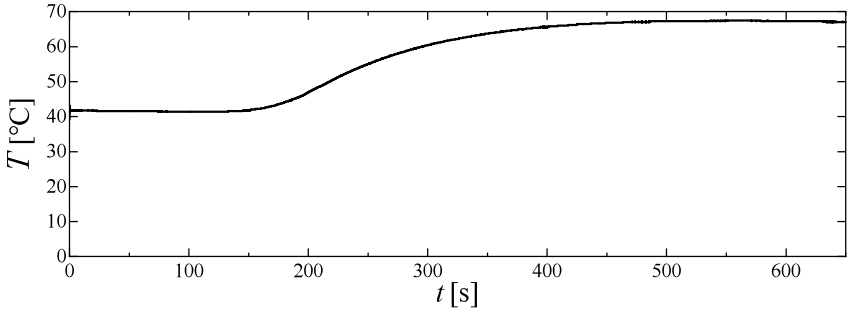
ダンパーNo.5 を対象に CH2 相当の時刻歴変位波形による加振を行い、測定結果および解析結果から時間遅れT_Lの影響がダンパーの履歴吸収エネルギーに与える影響を検討する。ダンパー変位δの時刻歴波形、小形シリンダの作動距離X_c、ダンパー表面温度Tの計測値を図 3.32 に示す。



(a) ダンパー変位δ



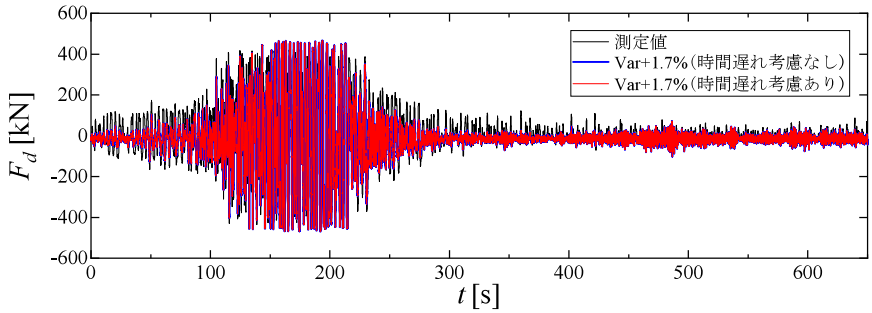
(b) 小形シリンダの作動距離X_c



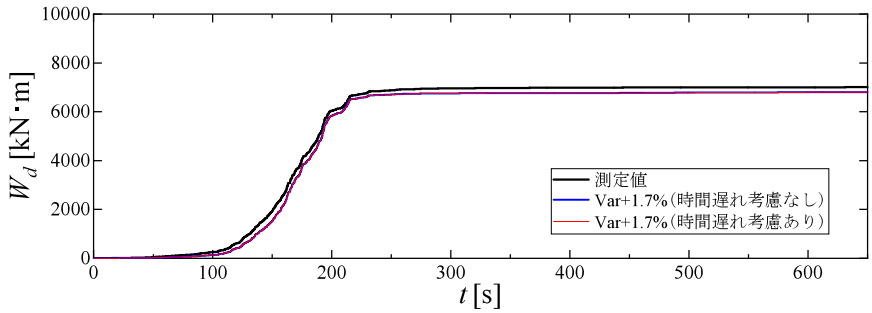
(c) ダンパーの表面温度T

図 3.32　ダンパー変位δ、小形シリンダの作動距離X_c、
ダンパー表面温度Tの時刻歴（測定値）

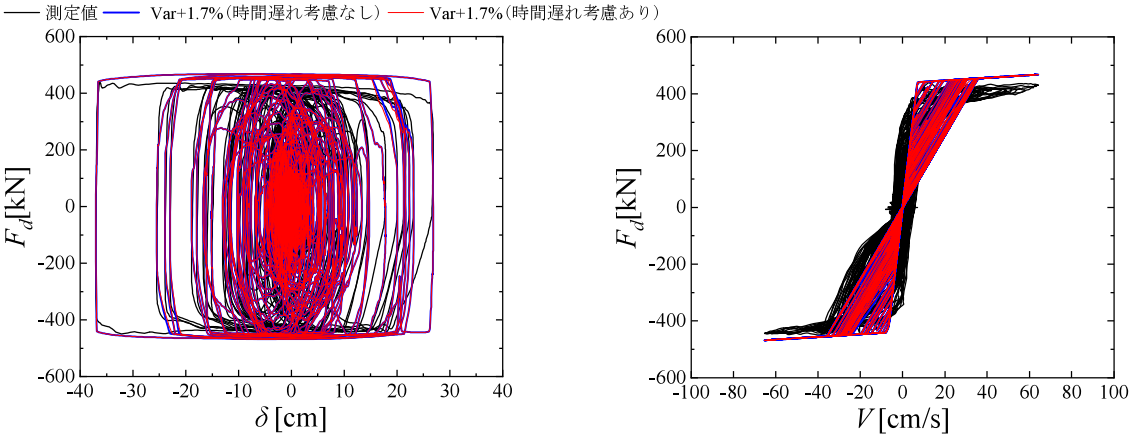
図 3.33 に測定値と算定値の比較を示す。ここで、図中黒線が測定値、青線が時間遅れを考慮しない場合、赤線が時間遅れを考慮した場合の算定値である。算定値の諸元は、表 3.7 に示した値を用いて、製造ばらつきを+1.7%とした。ダンパーの変位 δ(t)、小形シリンダの作動距離 X_c(t) は測定値を用いて減衰力 F_d を算定した。時間遅れ T_L を考慮する場合は 0.05 秒の時間遅れが常に生じているものと仮定した。ただし、0.05 秒前の X_c(t-0.05s) よりも X_c(t) が小さい場合は X_c(t) を用いて減衰力を小さく見積るように算定した。



(a) 減衰力 F_d



(b) 履歴吸収エネルギー W_d



(c) 変位と減衰力　　(d) 速度と減衰力

図 3.33　測定値と算定値の比較

図より、時間遅れの有無に関わらず解析から求まる減衰力は概ね測定値を精度よく再現している。また、測定値から算定した履歴吸収エネルギーに対する解析値の履歴吸収エネルギーの割合は、時間遅れを考慮しない場合で97.09%、考慮した場合で97.04%とその差は0.05%と極めて僅かであることを確認した。

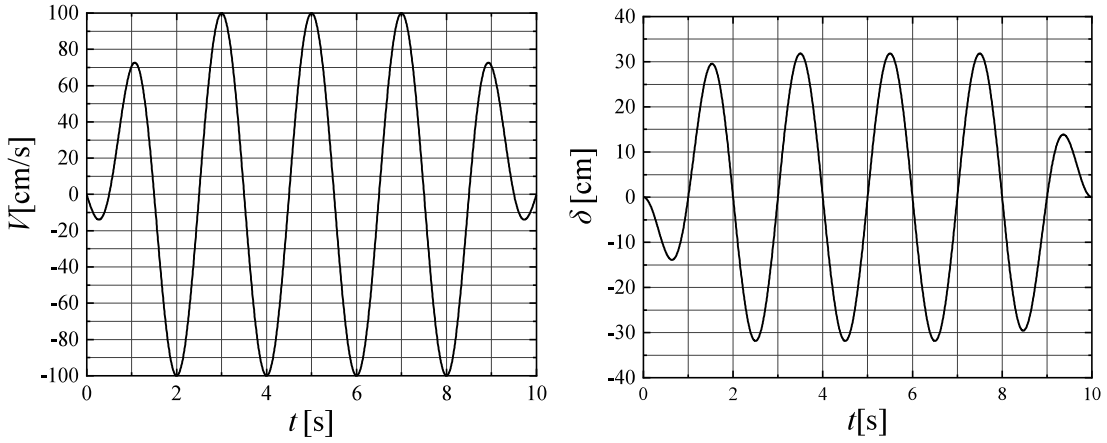
3.6 限界性能

3.6.1　限界速度

a) 試験概要

最大速度 V_{max} が 100cm/s の正弦波加振を実施し、油漏れなどの有害な損傷が生じないことを確認することを目的とする。試験機および計測装置、計測装置の配置は水平性能を確認したものと同じとした。試験体数は1体とし、ダンパーNo.4を用いた。加振波は、水平性能確認試験と同様に、定常 3 波の前後に 1 波の予備加振を設けた正弦波とし、加振周期 T を 2.0 秒、最大速度 V_{max} を 100cm/s とした。図 3.34 に加振波の時刻歴波形を示す。

ここで、想定している対象建物において、長周期地震時に生じる免震層の最大速度は概ね 85cm/s であることから、最大速度 V_{max} が 100cm/s の加振し、ダンパーの減衰性能を確認すれば、問題ないと判断した。



(a) 速度　　(b) 変位

図 3.34　加振波の時刻歴波形（T=2.0s、V_{max}=100cm/s）

b) 試験結果

定常 3 サイクル目の減衰力とダンパー変位の関係を**図 3.35** に、最大、最小減衰力と速度の関係を**図 3.36** に示す。**図 3.35** より、減衰力に著しい乱れなどは生じず、安定した減衰性能を有していることが分かる。また、**図 3.36** より、設計値に対する公差内（-7%~+29%）に最大、最小減衰力が納まっており、想定通りの減衰力を発揮していることが分かる。加振終了後、著しい損傷やオイル漏れなどはなく、本ダンパーは限界速度 100cm/s で加振しても問題ないことが確認できた。

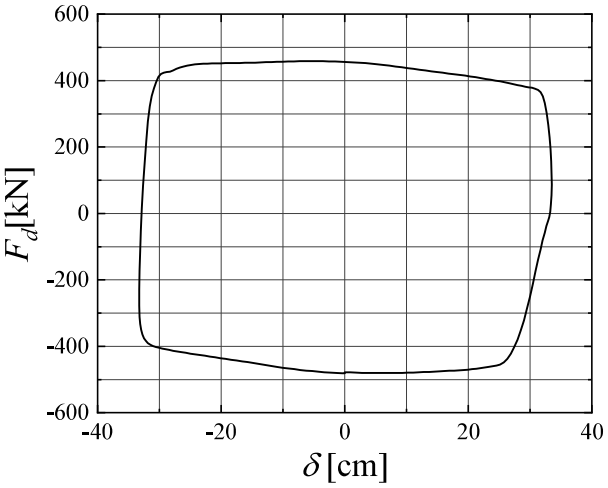


図 3.35　限界速度加振時における減衰力とダンパー変位の関係

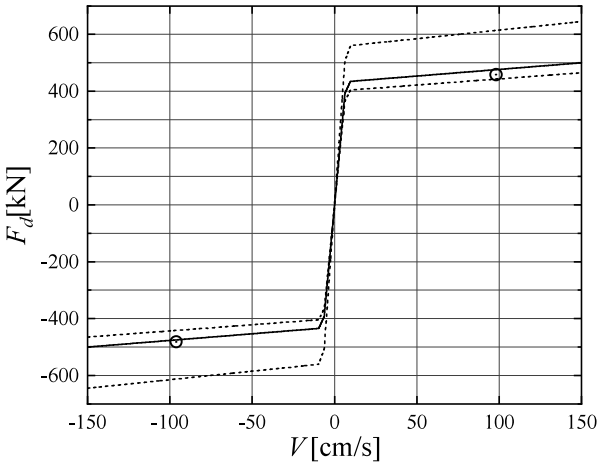


図 3.36　限界速度加振時における減衰力と速度の関係

3.6.2　耐座屈性能

a）試験概要

試験体を試験機に設置し、試験体下に他の試験体同等品を吊り下げて、1G 相当の負荷を与え、最伸び状態で静的な加振を行い、最大減衰力 500kN を生じさせ、ダンパーが座屈しないこと、および油漏れなどの有害な損傷が生じないことを確認する。座屈試験概要および測定機器配置図を**図 3.37** に、試験状況を**写真 3.3** に示す。測定器 D1、D2 でダンパー変位を測定し、D3、D4 でダンパー中央部の鉛直たわみを測定した。なお、鉛直たわみについては、ダンパー変位と同様にダンパーロッドが中立位置に設けられているときをゼロとした。ここで、試験体に設けられたオリフィス、減衰バルブ、リリーフバルブ部には栓をして、ダンパー内の作動油が流れないように配慮した。減衰バルブ、リリーフバルブに設けた栓を**写真 3.4** に示す。

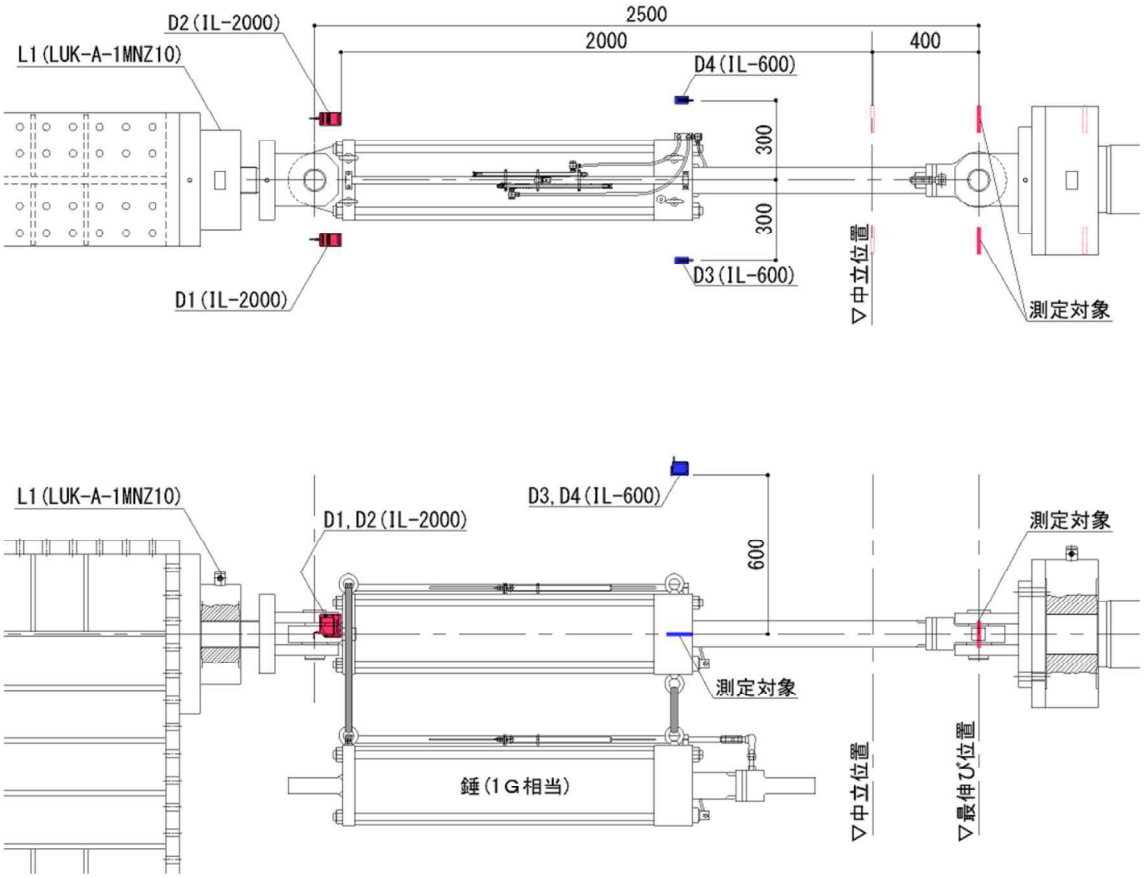


図 3.37　座屈試験時の測定機器配置図

写真 3.3　限界減衰力の試験状況(最伸び、1G 負荷)

写真 3.4　減衰バルブ、リリーフバルブ用栓

最伸び時におけるダンパーの座屈荷重 P_{cr} は次式から算定した。ここで、座屈荷重を安全側に評価するために、全断面をダンパーロッドと仮定した場合の座屈荷重を算定する。座屈荷重 P_{cr} は 1589kN と求まり、最大減衰力 500kN に対する安全率は概ね 3.18 となった。

$$\left.\begin{aligned} P_{cr} &= A\left(\sigma_s - \frac{\sigma_s^{\ 2}}{4\pi^2 nE}\lambda\right) \quad (0<\lambda<\sqrt{2n\pi^2 E/\sigma_s}\text{の場合}) \\ P_{cr} &= \frac{\pi^2 nEI}{L_k^{\ 2}} \quad (\lambda \geqq \sqrt{2n\pi^2 E/\sigma_s}\text{の場合}) \end{aligned}\right\} \tag{3.5}$$

ここで、n : 端末係数(= 1.0)

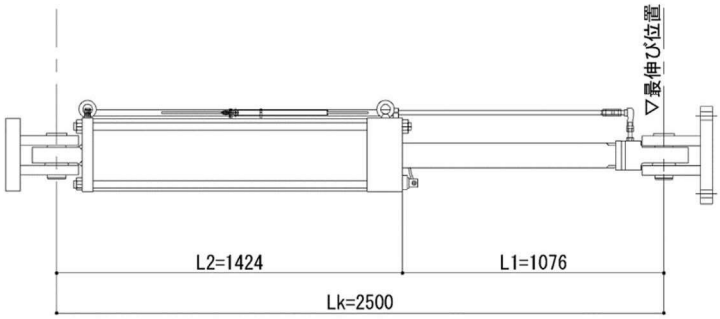
L_k : 部材長($= L_1 + L_2 = 2500mm$)

I : ロッドの断面二次モーメント(= $\pi/64 \cdot d_p^{\ 4}$)、d_p : ロッド径(=100mm)

E : ヤング係数(=$2.05\times10^5 N/mm^2$)

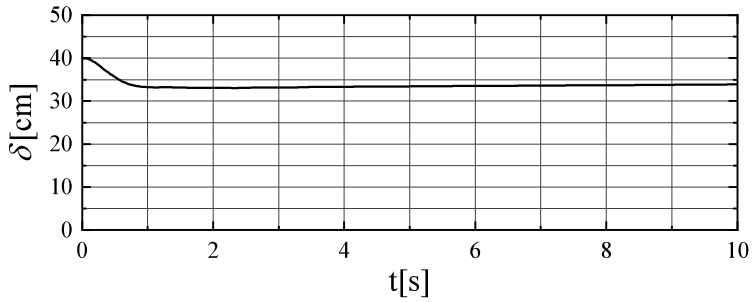
σ_s : 圧縮応力度(=$490 N/mm^2$)

λ : 細長比(= $L_k \big/ \sqrt{I/A}$ =100)

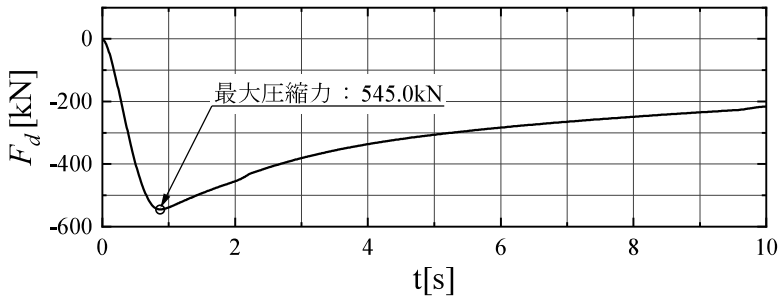


b) 試験結果

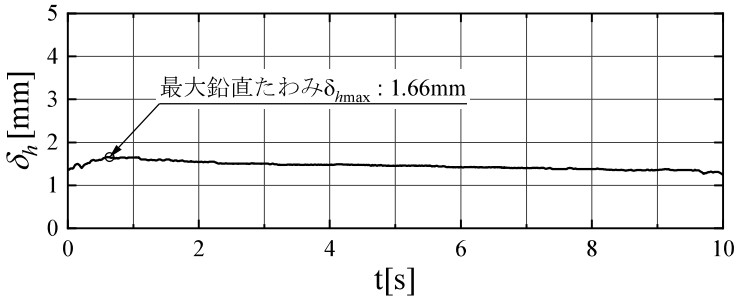
限界減衰力の試験結果を図 3.38 に示す。(a)より、ダンパーが最伸び状態から圧縮していることが分かる。また、(b)より最大圧縮力は 545kN となり、最大減衰力 $F_{d\max}$ (=500kN)以上の圧縮力が生じた。(c)より、ダンパーの鉛直方向のたわみは、ダンパーが最伸び状態で概ね 1.4mm、最大圧縮力時に 1.66mm となった。ダンパーに 1G 相当の鉛直荷重を負担させ、最大減衰力以上の圧縮力を負担させたが、座屈現象は見られなかった。また、損傷や油漏れは生じず、問題がないことが確認できた。



(a) ダンパー変位 δ



(b) 減衰力 F_d



(c) 鉛直たわみ δ_h

図 3.38　限界減衰力の試験結果

3.6.3　限界温度

a）試験概要

ダンパー表面温度を常温から高温に変化させ、温度変化が安定した状態で、各温度における減衰性能値の変化率を確認し、ダンパーの表面温度が 80℃以上となったときに加振し、有害な油漏れや損傷が生じないことを確認する。試験機および計測装置、計測装置配置は水平性能を確認したものと同じとした。試験体数は 1 体とし、ダンパーNo.5 を用いた。

加振波は、水平性能試験時に用いた正弦波とし、加振周期 3 秒、最大速度 50cm/s の正弦波を複数回実施して、ダンパー表面温度を上昇させた。

b）試験結果

定常 3 サイクル目の減衰力と変位の関係を**図 3.39** に示す。1 回目から 11 回目までの減衰力と変位の関係は概ね同程度であり、**3.5.1 項**で示した通り、温度依存性が小さいことが確認できる。**表 3.22** に定常 3 サイクル目のダンパー表面の平均温度 T 、履歴吸収エネルギー ΔW_d を示す。ここで、**3.5.1 項**で示した温度依存性を考慮して、基準温度(20℃)時における履歴吸収エネルギー ΔW_d を 1 回目の加振結果から算定し、基準温度に対する ΔW_d の変化率も併せて示す。

ダンパー表面温度が 81.20℃となった 11 回目の加振時にも履歴吸収エネルギー ΔW_d は 1 回目の履歴吸収エネルギー ΔW_d から概ね－1.68%減少するが、概ね同程度のエネルギー吸収性能を有しており、油漏れなども確認できず、問題ないことが確認できた。

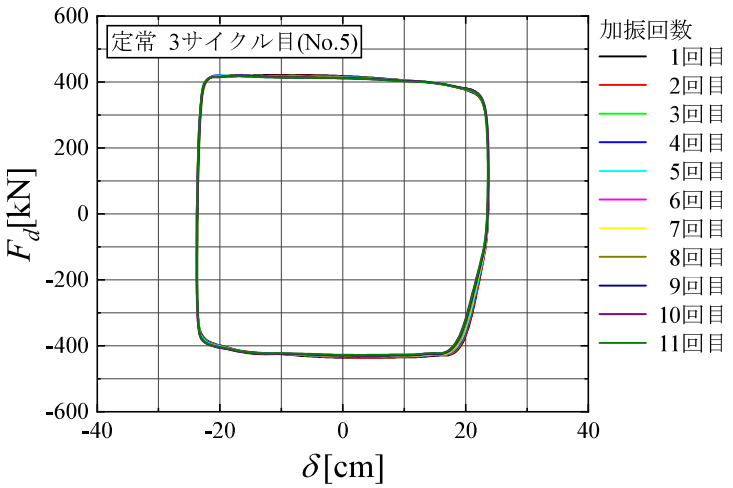


図 3.39　変位と減衰力の関係(定常 3 サイクル目)

表 3.22　ダンパー表面温度と履歴吸収エネルギーの関係

加振回数	ダンパー表面温度 [℃]	ΔW_d [kN・cm]
1	28.28	38526 (99.96)
2	36.39	38442 (99.74)
3	43.47	38365 (99.54)
4	49.75	38344 (99.48)
5	55.39	38254 (99.25)
6	60.63	38204 (99.12)
7	65.68	38173 (99.04)
8	71.18	38075 (98.79)
9	75.87	38070 (98.77)
10	80.13	37975 (98.53)
11	81.20	37880 (98.28)
—	基準値(20℃)	**38543 (100.00)**

※ ( )内数値は、20℃における性能値を100とした場合の変化率を示す。

4　変位検知型性能可変オイルダンパーを用いた免震性能の検証

4.1 解析モデル

4.1.1　建物概要

対象とした免震建物は、鉄骨造地上 6 階建て、軒高 23.2m の事務所ビルである。X 方向は 4 スパンから構成され、1 スパン 5.5m から 6.6m で全長が約 26m ある。Y 方向は 14.6m の 1 スパンから構成され、2 階より上階に約 2m の跳ね出しスラブを有する。2 階およびR 階の一部に吹き抜けがあり、アスペクト比はX 方向が 1.01、Y 方向が 1.68 である。

構造形式は、X(東西)、Y(南北)方向ともにラーメン構造を採用し、主体構造は鉄骨造としている。また、柱にはコンクリート充填鋼管造を採用し、床スラブには合成スラブ、一部鉄筋コンクリート造を採用している。建物の外観パースを図 4.1 に示す。

図 4.1　対象建物の外観パース

上部構造概要を以下に示す。

・架構形式　　ラーメン構造
・柱　　コンクリート充填鋼管造
・大梁・小梁　　鉄骨造
・床　　合成スラブ
　　鉄筋コンクリート造(型枠にデッキを使用)
・階段　　鉄骨造
・内壁　　乾式軽量間仕切
・外壁　　押出成形セメント板、ALC 板

基礎、杭の概要を以下に示す。

・基礎、基礎梁　鉄筋コンクリート造
・杭　　場所打ち鉄筋コンクリート造
　　アースドリル拡底工法
　　支持層：GL－24.5m 以深の砂質土層
　　杭先端：GL－26.0m

免震材料の概要を以下に示す。

・支承材　　天然ゴム系積層ゴム支承（10 基）
・減衰材　　オイルダンパー(X 方向２基、Y 方向２基)

地震時の安全性向上や事業継続計画(BCP)対策のため、最下階と基礎の間に免震層を設けた基礎免震構造である。免震装置として、支承材には φ600~650 の天然ゴム系積層ゴム支承を 10 基設け、減衰材には最大減衰力を約 500kN とするオイルダンパーを X、Y 方向ともに 2 基ずつ設けた。X、Y 方向ともにバランスよく免震材料を配置し、免震層の偏心率が 3%以下となるように免震装置を配置した。免震層伏図を**図 4.2** に示す。ここで、免震層に考慮した水平クリアランスは 40cm とした。1 階伏図を**図 4.3** に、基準階伏図を**図 4.4** に示す。また、Y1 通り軸組図を**図 4.5** に、X3 通り軸組図を**図 4.6** に示す。

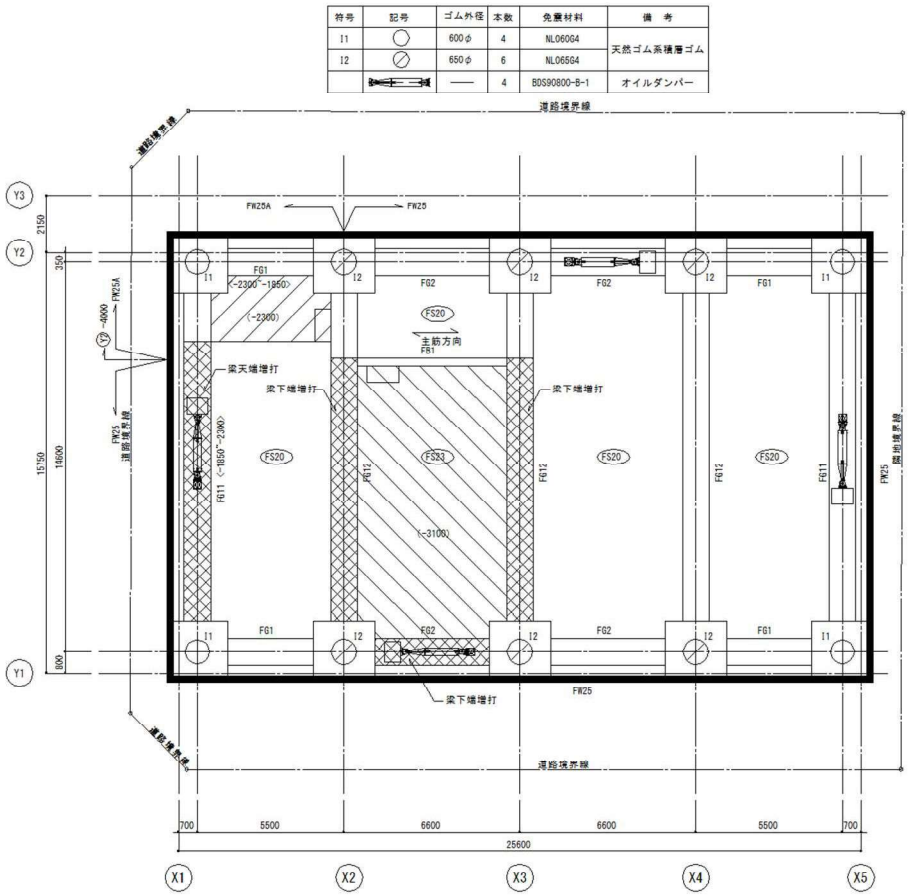

符号
記号
ゴム外径
本数
免震材料
備　考
I1
600φ
4
NL0600G4
天然ゴム系積層ゴム
I2
650φ
6
NL0650G4
4
BDS90800-B-1
オイルダンパー
道路境界線
FW25A
FW25
FG1
FG2
FS20
FS23
主筋方向
FR1
梁天端増打
梁下端増打
FG11
FG12
FW25A
FW25
Y3
Y2
Y1
X1
X2
X3
X4
X5
2150
350
15150
18600
800
700
5500
6600
25600

図 4.2　免震層伏図

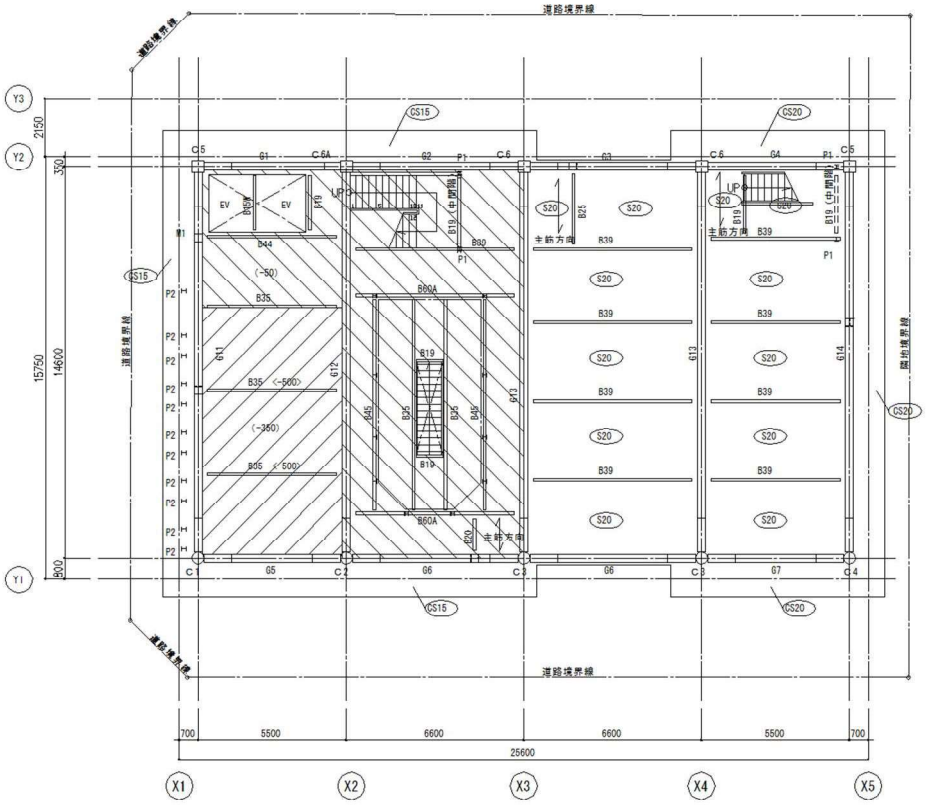


図 4.3　1 階伏図

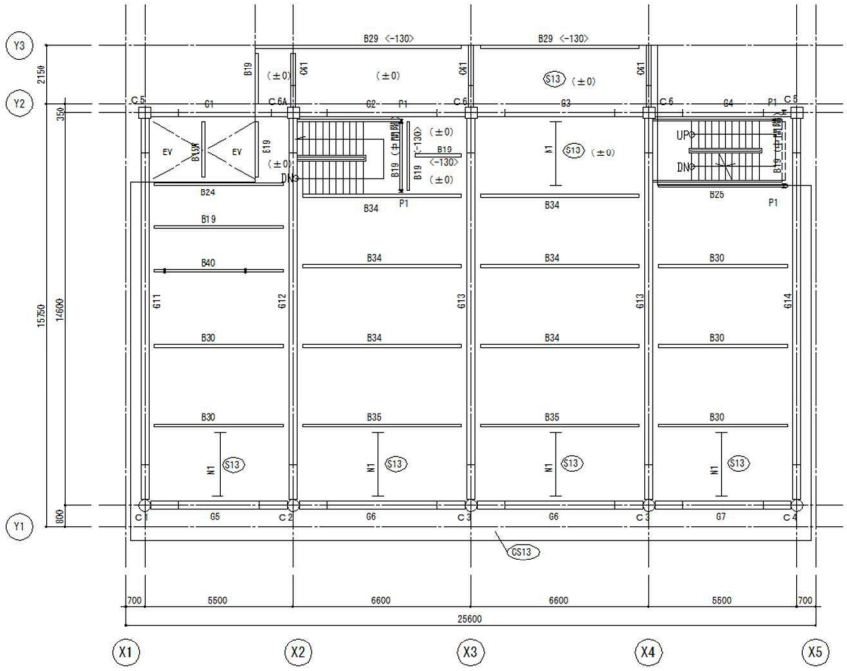


図 4.4　基準階伏図

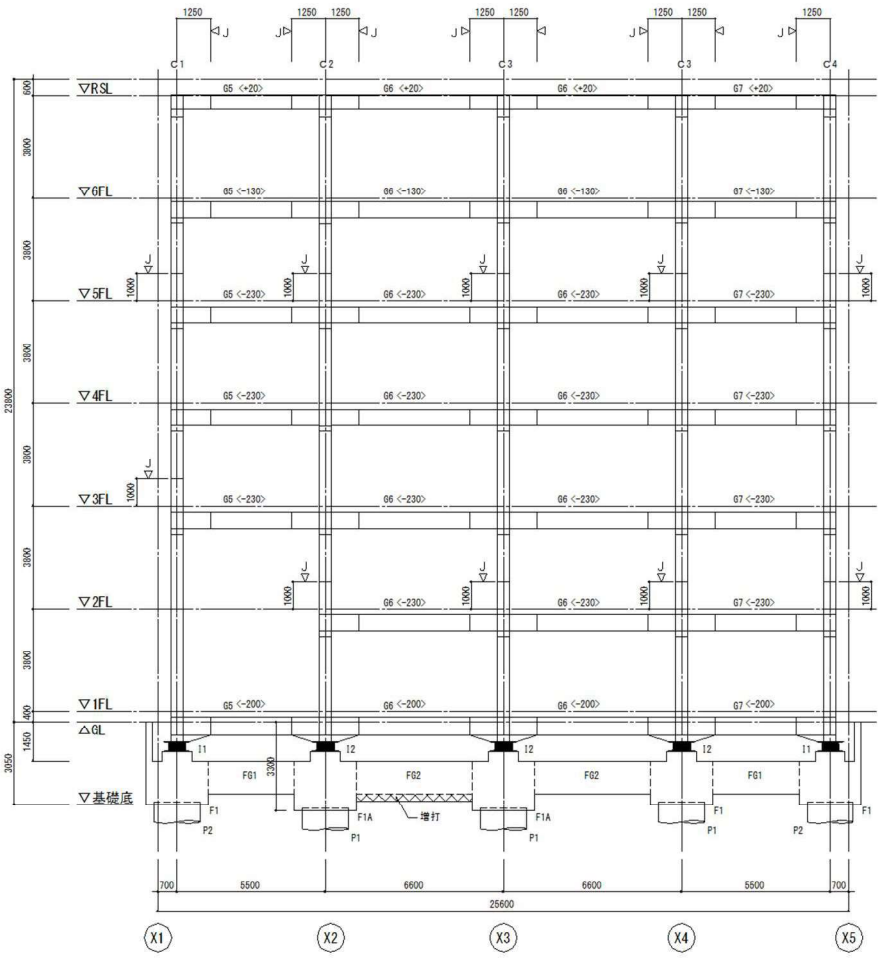


図 4.5　Y1 通り軸組図(X 方向)

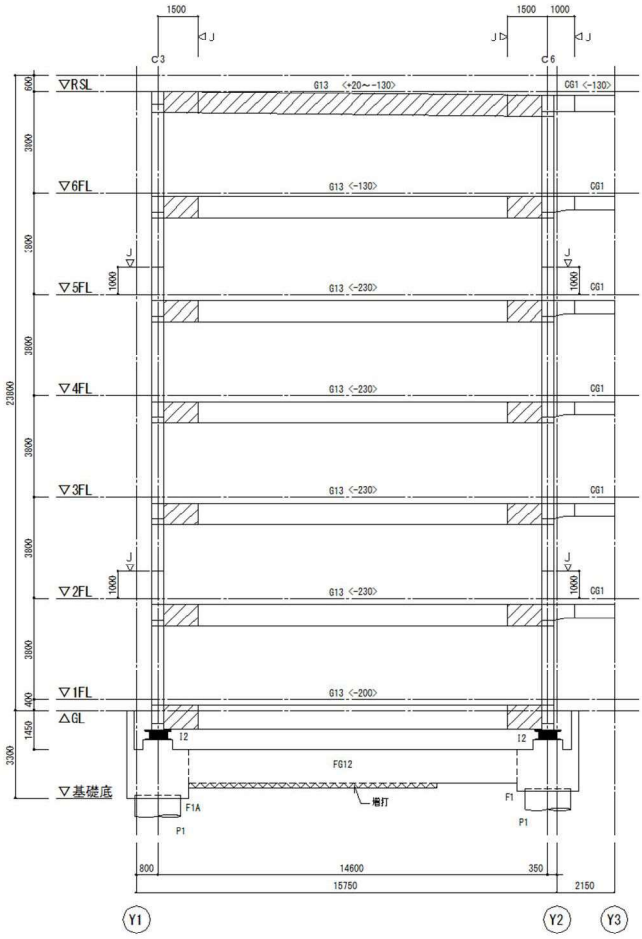
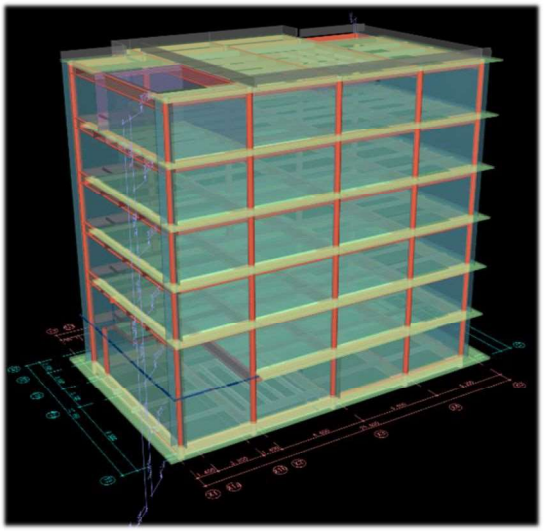


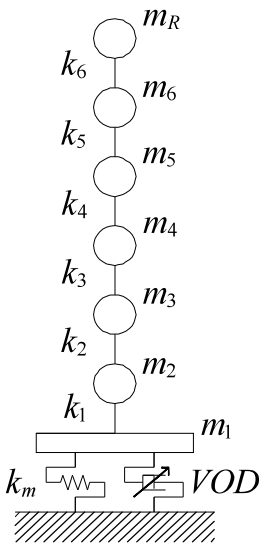
図 4.6　X3 通り軸組図(Y 方向)

4.1.2　解析モデル概要

解析モデルは、立体モデルを静的増分解析し、その結果から得た各層の復元力特性を等価なせん断ばねに置換し、各階床を質点とした 7 質点系等価せん断モデルとした(図 4.7)。この解析モデルを地震力の入力方向別に作成し、想定した入力地震動に対する構造物全体の応答性状について確認する。なお、時刻歴応答解析は運動方程式を直接積分する方法により行い、数値積分法には Newmark-β 法（β＝1/6）を用いた。



(a) 3 次元立体モデル



(b) 質点系等価せん断モデル

図 4.7　解析モデル

4.1.3　上部構造のモデル化

弾塑性解析に用いた復元力特性は、立体荷重増分解析によって得られた $Q-\delta$ 曲線を元に定める。各層の復元力特性は、立体骨組弾塑性増分解析により得られた層せん断力と層間変位（以下、$Q-\delta$ 関係）を用いて Tri-Linear にモデル化し、履歴則は Normal Tri-Linear モデルとした。

ここで、骨格曲線は以下の方法を用いて定めた。

1) 第 1 剛性 K_1 は初期剛性とする。
2) 第 3 剛性 K_3 は層間変形角が 1/100 の点における接線剛性とする。ただし、この変形角に達せず解析が終了した場合は、最終変形角の点における接線剛性とする。
3) 第 1 折点 Qc、第 2 折点 Qy は、$Q-\delta$ 関係と近似折線の下図に示す面積 A_1+A_2 と B が概ね等価になるように定める。

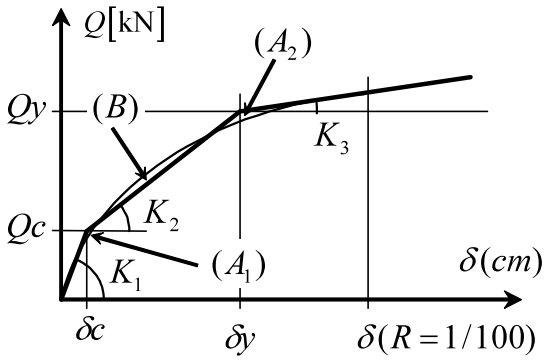


図 4.8　骨格曲線の設定方法

表 4.1　解析モデル諸元(X 方向)

	重量	初期剛性	折点荷重		剛性低下率	
	Wi[kN]	K_1[kN/cm]	Q_1[kN]	Q_2[kN]	α_2	α_3
6	4180	1435	2130	2245	0.22	0.06
5	3946	1592	2646	3456	0.71	0.04
4	2615	1689	2999	3983	0.77	0.09
3	2691	1764	3583	4366	0.67	0.12
2	2649	1879	3512	4737	0.71	0.15
1	2380	2315	4314	5476	0.53	0.10
免震層	4330	75.2※	—	—	—	—

※　免震層の初期剛性は免震材料の標準特性時（規定ひずみγ=100%）を示す。

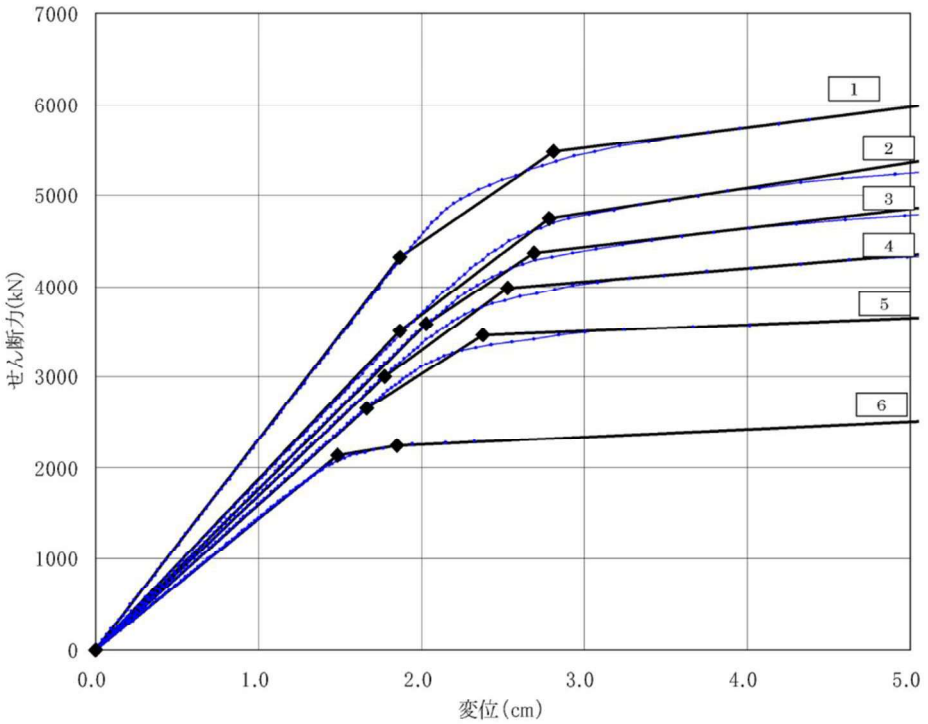


図 4.9　上部構造の復元力特性(X 方向)

表 4.2　解析モデル諸元(Y 方向)

	重量	初期剛性	折点荷重		剛性低下率	
	Wi[kN]	K_1[kN/cm]	Q_1[kN]	Q_2[kN]	α_2	α_3
6	4180	1529	2531	2897	0.74	0.63
5	3946	1452	3725	3952	0.80	0.46
4	2615	1459	3997	4546	0.79	0.39
3	2691	1527	4586	5238	0.64	0.30
2	2649	1613	5080	5907	0.52	0.37
1	2380	2020	4816	6685	0.67	0.45
免震層	4330	75.2※	―	―	―	―

※　免震層の初期剛性は免震材料の標準特性値を示す。

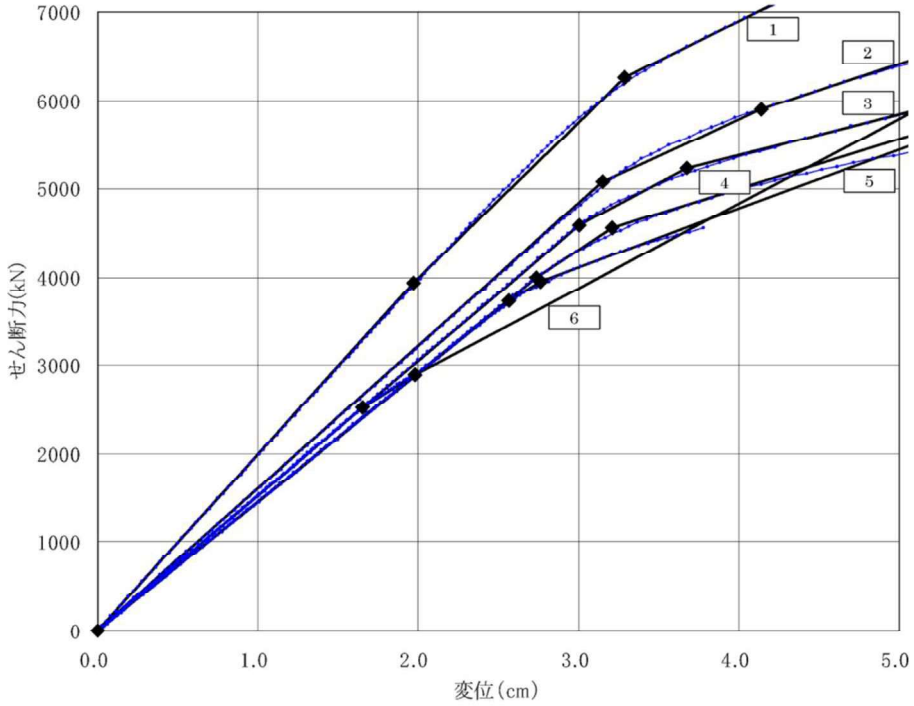


図 4.10　上部構造の復元力特性(Y 方向)

上部構造の減衰は、瞬間剛性比例型の内部粘性減衰とし、上部構造のみのモデルによる一次固有円振動数に対して $h=2\%$ とした。なお、免震層については内部粘性減衰を考慮せず、免震材料の履歴減衰のみを考慮した。

$$[C]=\frac{2h_1}{\omega_1}\left[K(t)\right] \tag{4.1}$$

ここで、$[C]$:減衰マトリクス

h_1:一次振動形に対する減衰定数(=2%)

ω_1:一次固有円振動数

$\left[K(t)\right]$:瞬間剛性

4.1.4　免震部材の基本モデル

a) 天然ゴム系積層ゴム支承(NRB)

天然ゴム系積層ゴム支承の水平特性は、せん断ひずみに比例した線形の復元力特性とする。天然ゴム系積層ゴム支承の水平剛性を**表 4.3** に、天然ゴム系積ゴム支承の荷重と変位の関係を**図 4.11** に示す。

表 4.3　天然ゴム系積層ゴム支承の水平剛性

	水平剛性[×10³kN/m]	基数
NL060G4	0.68	4
NL065G4	0.80	6

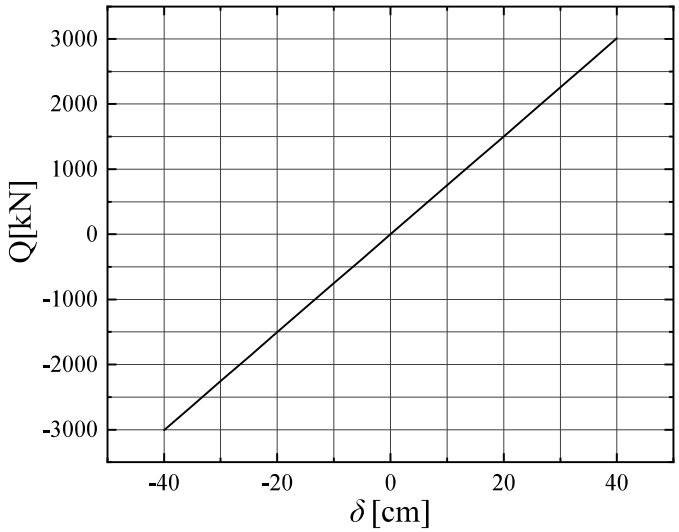


図 4.11　天然ゴム系積層ゴム支承の荷重 Q と変形 δ の関係

b) 性能可変オイルダンパー(VOD)

既存のオイルダンパー(以下、OD)は、大臣認定番号が MVBR-0326 で、減衰力と速度の関係がバイリニア型の減衰特性であった。建物の主軸方向にそれぞれ 2 基、計 4 基配置されている。

想定する長周期地震動時に擁壁衝突が生じる可能性があるため、OD から 2 章、および 3 章で示した性能可変オイルダンパー（以下、VOD）へ交換し、免震層に生じる過大な変位を抑制し、想定する長周期地震動時に擁壁衝突を回避することを目的とする。

既存ダンパーの減衰性能諸元を**表 4.4** に示す。また、性能可変オイルダンパーの減衰性能諸元を**表 4.5** に示す。

OD の一次減衰係数 C_1 は 12.5kN/(cm/s)で速度に比例した減衰力を発揮する。リリーフ荷重 F_r に達すると、減衰力の増加は頭打ちし、二次減衰係数 C_2＝0.85kN/(cm/s)となる。許容最大減衰力は 50kN、限界速度は 150cm/s であった。

これに対し、性能可変オイルダンパーの一次減衰係数 C_1 の基準値は既存ダンパーと同じとした。ダンパー変位が L_S 以上になると減衰力が増加し、性能変化後の一次減衰係数が ${}_{v}\boldsymbol{C}_1$ となる。小形シリンダの作動距離 X_c に応じて、第一折れ荷重 F_{r1} が変化し、性能変化前のバイリニア型からトリリニア型に変化し、更に第一折れ荷重 F_{r1} が $F_{r\max}$ に達するとバイリニア型となる。許容最大減衰力は既存ダンパーと同じ 500kN、限界速度は試験で確認した範囲として 100cm/s とした。既存ダンパーと性能可変オイルダンパーの性能線曲線を**図 4.12** に示す。ここで、性能可変オイルダンパーを検討する場合は、**図 4.13** に示した小形シリンダの回帰特性を考慮した。

表 4.4　既存ダンパー（OD）の減衰性能諸元

	一次減衰係数 C_1[kN/(cm/s)]	二次減衰係数 C_2[kN/(cm/s)]	リリーフ荷重 F_r[kN]	リリーフ速度 V_r[cm/s]
BDS90800－B－1 (MVBR－0326)	12.5	0.85	400	32

表 4.5　性能可変オイルダンパー(VOD)の減衰性能諸元(表 3.7 と同じ)

設定クリアランス	L_S	[cm]	15.0
性能変化前の一次減衰係数	C_1	[kN/(cm/s)]	12.5
性能変化前の二次減衰係数	C_2	[kN/(cm/s)]	0.47
性能変化後の一次減衰係数	${}_v\boldsymbol{C}_1$	[kN/(cm/s)]	62.5
性能変化後の二次減衰係数	${}_v\boldsymbol{C}_2$	[kN/(cm/s)]	12.5
性能変化後の三次減衰係数	${}_v\boldsymbol{C}_3$	[kN/(cm/s)]	0.47
切片減衰力	F_{dd}	[kN]	430.0
最大減衰力	$F_{d\max}$	[kN]	500.0
面積比	α	[−]	24.82
調圧弁ばね剛性	K_{sp}	[kN/cm]	1.475
低減係数	ζ	[−]	0.58
最大リリーフ荷重	$F_{r\max}$	[kN]	433.2
最大第一折れ点速度	$V_{r1\max}$	[cm/s]	6.9

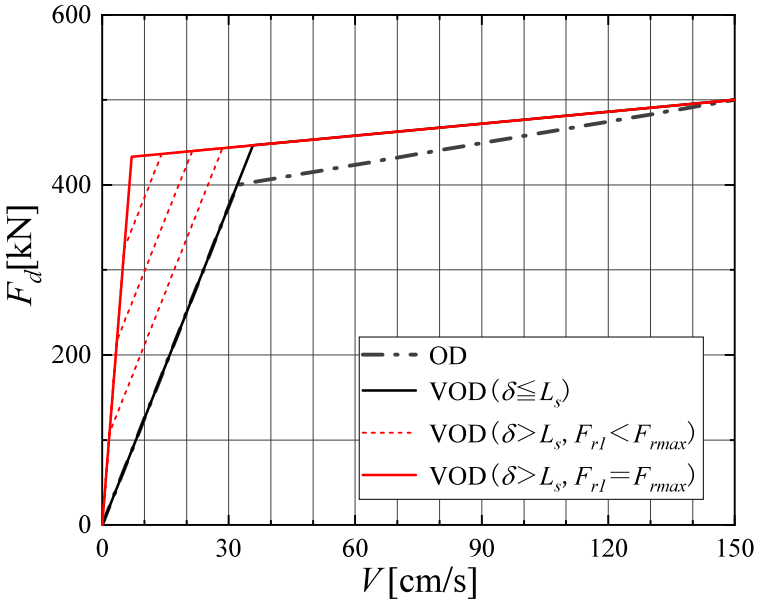


図 4.12　性能線図

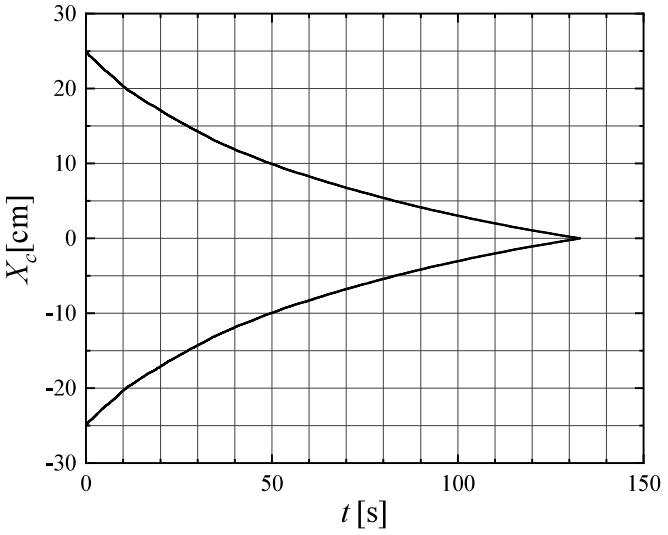


図 4.13　小形シリンダの回帰特性

4.1.5　免震部材の特性変化

a) 天然ゴム系積層ゴム支承(NRB)

天然ゴム系積層ゴム支承の特性変動を**表 4.6** に示す。ここで、最大特性は積層ゴム支承の水平剛性が大きくなる側、最小特性は小さくなる側として設定した。

表 4.6　天然ゴム系積層ゴム支承の等価水平剛性の特性変動

変動要因	条件	G0.40	
		最大特性[%]	最小特性[%]
温度依存	0℃～30℃	＋6	－3
経年変化	60 年 (竣工時から)	＋10	0
製造ばらつき	製品検査による	＋10※1	－10※1
合計	－	＋26	－13

※1）製品個々のばらつきは材料認定上の許容値である±20%以内とし、
全数検査の平均値を±10%以内とする

b) 性能可変オイルダンパー(VOD)

性能可変オイルダンパーは、温度依存性、耐久性試験などの結果から、特性の変動が非常に小さいので、設計式から求まる減衰力に対する試験結果から得られた減衰力の割合の上下限値を変化率として考慮する。性能可変オイルダンパーの特性変動を**表 4.7** に示す。

表 4.7　性能可変オイルダンパーの特性変動

	減衰係数 [%]	リリーフ荷重 [%]
最大特性	＋29%	＋29%
最小特性	－7%	－7%

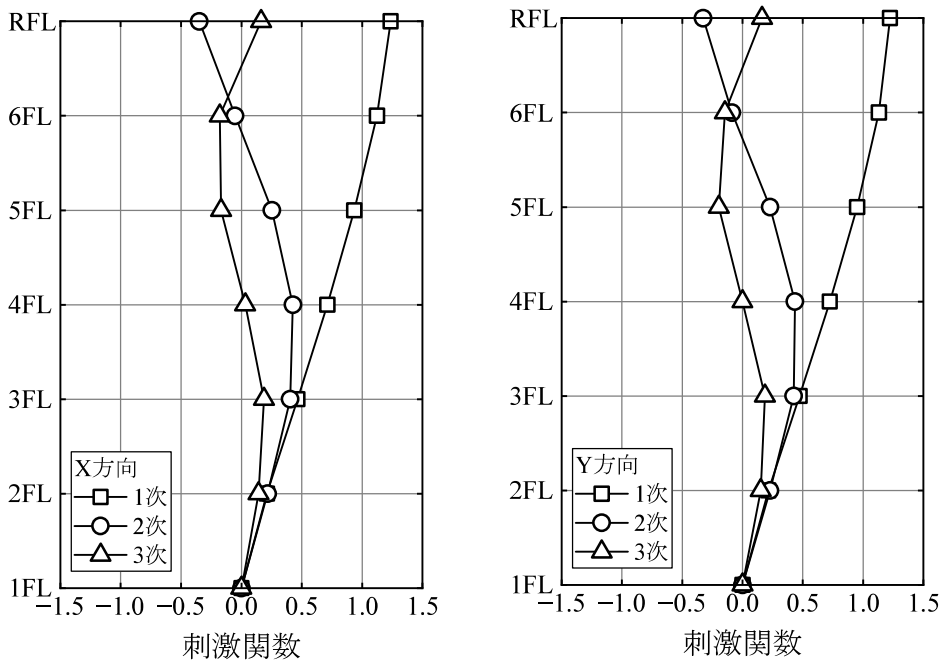
4.1.6　固有周期および固有振動モード

免震層より上部の基礎を固定とした場合の固有周期 T_i および刺激関数 β_u を**表 4.8** に、固有振動モード図を**図 4.14** に示す。

また、免震層の水平剛性（規定ひずみ γ =100%時）を考慮した場合の固有周期 T_i および刺激関数 β_u を**表 4.9** に、固有振動モード図を**図 4.15** に示す。

表 4.8　固有周期 T_i・刺激関数 β_u（基礎固定）

固有周期 T_i[s]	X方向						Y方向					
	1次	2次	3次	4次	5次	6次	1次	2次	3次	4次	5次	6次
	1.13	**0.37**	**0.24**	**0.18**	**0.14**	**0.13**	**1.21**	**0.39**	**0.24**	**0.19**	**0.15**	**0.13**
FL	刺激関数β_u											
1	0.212	0.217	0.142	0.162	0.135	0.132	0.214	0.228	0.151	0.148	0.129	0.130
2	0.465	0.404	0.187	0.109	-0.032	-0.132	0.473	0.424	0.186	0.085	-0.037	-0.131
3	0.712	0.427	0.032	-0.150	-0.115	0.094	0.724	0.434	-0.002	-0.149	-0.102	0.095
4	0.935	0.253	-0.167	-0.125	0.157	-0.052	0.950	0.229	-0.195	-0.082	0.154	-0.056
5	1.123	-0.053	-0.180	0.155	-0.057	0.012	1.131	-0.087	-0.146	0.153	-0.066	0.015
R	1.236	-0.350	0.163	-0.060	0.012	-0.002	1.222	-0.327	0.162	-0.073	0.018	-0.003



(a)X 方向　　(b)Y 方向

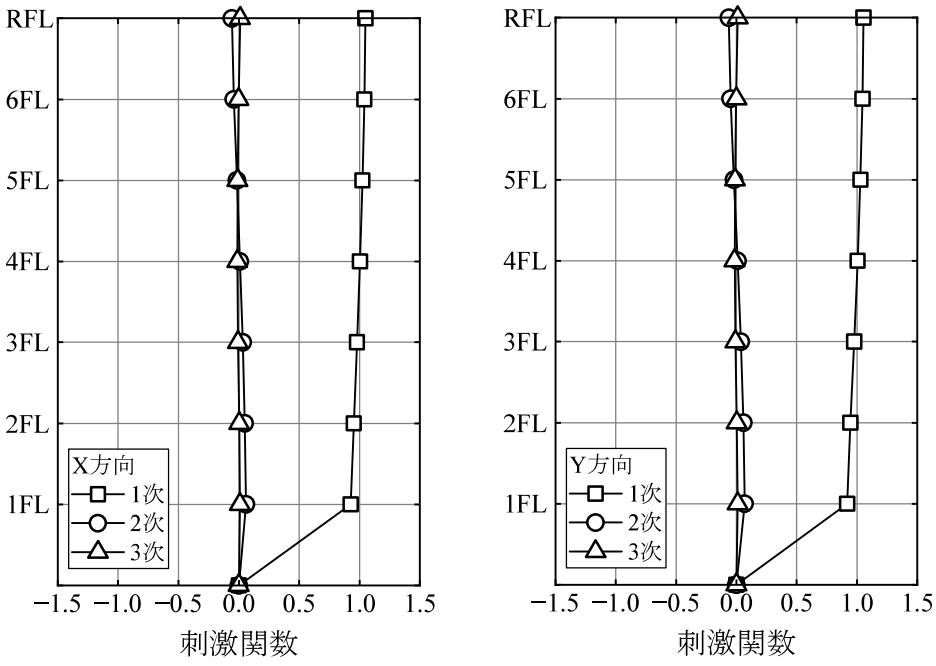
図 4.14　固有振動モード図（基礎固定）

表 4.9　固有周期 T_i・刺激関数 β_u(規定ひずみ γ=100%時)

標準特性														
固有周期 T_i[s]	X方向							Y方向						
	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次
	3.62	**0.64**	**0.32**	**0.22**	**0.17**	**0.14**	**0.12**	**3.64**	**0.68**	**0.33**	**0.23**	**0.18**	**0.15**	**0.13**
FL	刺激関数β_u													
1	0.928	0.059	0.009	0.002	0.001	0.000	0.000	0.917	0.068	0.010	0.002	0.001	0.000	0.000
2	0.952	0.050	0.003	-0.001	-0.002	-0.001	-0.001	0.946	0.058	0.003	-0.001	-0.002	-0.001	-0.002
3	0.979	0.033	-0.007	-0.004	-0.002	0.000	0.001	0.977	0.037	-0.009	-0.004	-0.002	0.000	0.001
4	1.003	0.010	-0.013	-0.002	0.002	0.001	-0.001	1.004	0.010	-0.015	-0.002	0.002	0.001	-0.001
5	1.024	-0.016	-0.011	0.002	0.002	-0.001	0.000	1.028	-0.020	-0.011	0.003	0.002	-0.002	0.000
6	1.040	-0.041	-0.002	0.004	-0.002	0.000	0.000	1.045	-0.047	0.000	0.004	-0.002	0.001	0.000
R	1.049	-0.057	0.010	-0.003	0.001	0.000	0.000	1.054	-0.062	0.011	-0.003	0.001	0.000	0.000

最小特性														
固有周期 T_i[s]	X方向							Y方向						
	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次
	3.87	**0.64**	**0.32**	**0.22**	**0.17**	**0.14**	**0.12**	**3.88**	**0.68**	**0.33**	**0.23**	**0.18**	**0.15**	**0.13**
FL	刺激関数β_u													
1	0.937	0.052	0.008	0.002	0.001	0.000	0.000	0.928	0.060	0.009	0.002	0.001	0.000	0.000
2	0.959	0.044	0.002	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.953	0.050	0.002	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
3	0.982	0.028	-0.006	-0.003	-0.002	0.000	0.001	0.980	0.032	-0.008	-0.004	-0.002	0.000	0.001
4	1.003	0.008	-0.011	-0.002	0.001	0.001	-0.001	1.004	0.008	-0.013	-0.001	0.002	0.001	-0.001
5	1.021	-0.014	-0.010	0.002	0.002	-0.001	0.000	1.024	-0.018	-0.010	0.003	0.002	-0.001	0.000
6	1.035	-0.036	-0.001	0.004	-0.002	0.000	0.000	1.040	-0.042	0.000	0.003	-0.002	0.001	0.000
R	1.043	-0.050	0.009	-0.003	0.001	0.000	0.000	1.048	-0.055	0.009	-0.003	0.001	0.000	0.000

最大特性														
固有周期 T_i[s]	X方向							Y方向						
	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次
	3.26	**0.64**	**0.32**	**0.22**	**0.17**	**0.14**	**0.12**	**3.28**	**0.67**	**0.33**	**0.23**	**0.18**	**0.15**	**0.13**
FL	刺激関数β_u													
1	0.909	0.074	0.012	0.003	0.001	0.001	0.000	0.897	0.085	0.013	0.003	0.001	0.001	0.001
2	0.940	0.063	0.003	-0.001	-0.002	-0.001	-0.002	0.931	0.073	0.003	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002
3	0.973	0.042	-0.009	-0.005	-0.003	0.000	0.001	0.970	0.048	-0.011	-0.005	-0.003	0.000	0.002
4	1.003	0.013	-0.016	-0.003	0.002	0.002	-0.001	1.004	0.014	-0.019	-0.002	0.002	0.002	-0.001
5	1.029	-0.019	-0.014	0.003	0.003	-0.002	0.000	1.033	-0.024	-0.014	0.004	0.002	-0.002	0.001
6	1.049	-0.050	-0.002	0.005	-0.003	0.001	0.000	1.056	-0.058	0.000	0.005	-0.003	0.001	0.000
R	1.061	-0.071	0.013	-0.004	0.001	0.000	0.000	1.067	-0.077	0.014	-0.004	0.001	0.000	0.000



(a)X 方向　　(b)Y 方向

図 4.15　固有振動モード図(標準特性、規定ひずみ γ =100%)

4.2 時刻歴応答解析概要

建物を質点系振動モデルに置換し、複数の設計用入力地震動による時刻歴応答解析を行って、対象建物の応答性状を確認する。

検討用入力地震動のレベルは、レベル１（稀に発生する地震動）とレベル２（極めて稀に発生する地震動）に加え、長周期地震動を対象とする。レベル 1 およびレベル 2 の地震動は、平成 12 年建設省告示第 1461 号第四号に定められた解放工学的基盤における加速度応答スペクトルを有し、建設地表層地盤による増幅を考慮して作成した地震波（以下「告示波」という）を検討用入力地震動とする。

代表的な観測地震波（3 波）の最大速度を 25cm/s および 50cm/s に基準化した地震動を、それぞれレベル 1 とレベル 2 の検討用入力地震動とする。また、長周期地震動(CH2)を考慮した。

稀に発生する地震動(レベル 1)として、以下の２種類を用いた。

- 建設省告示 1461 号第 4 号に規定された「稀に発生する地震動」に対する加速度応答スペクトルに適合し、建設地の地盤増幅特性を考慮して作成した模擬地震動（位相特性の異なる 3 波）
- 既往の観測地震波の最大速度を 25cm/s に基準化した地震動(3 波)

極めて稀に発生する地震動(レベル 2)として、以下の２種類を用いた。

- 建設省告示 1461 号第 4 号に規定された「極めて稀に発生する地震動」に対する加速度応答スペクトルに適合し、建設地の地盤増幅特性を考慮して作成した模擬地震動（位相特性の異なる 3 波）
- 既往の観測地震波の最大速度を 50cm/s に基準化した地震動(3 波)

4.3 入力地震動

告示波の解放工学的基盤における目標加速度応答スペクトルを**図 4.16** に示す。設計用入力地震動として採用した位相特性は、以下の 2 波に乱数位相を加えた 3 波とした。

i) 1940 年 5 月 18 日アメリカ合衆国カリフォルニア州インペリアルバレー地震におけるエルセントロ変電所建物の地下 1 階設置の強震計による加速度記録

ii) 1968 年 5 月 16 日十勝沖地震における八戸港湾の地盤上に運輸省港湾技術研究所(当時)によって設置されていた強震計による加速度記録

表 4.10　目標加速度応答スペクトル

周期 [s]	レベル 1 [m/s²]	レベル 2 [m/s²]
T <0.16	(0.64+6T)Z	レベル 1 の 5 倍
0.16≦ T <0.64	1.6Z	
0.64< T	(1.024/T)Z	

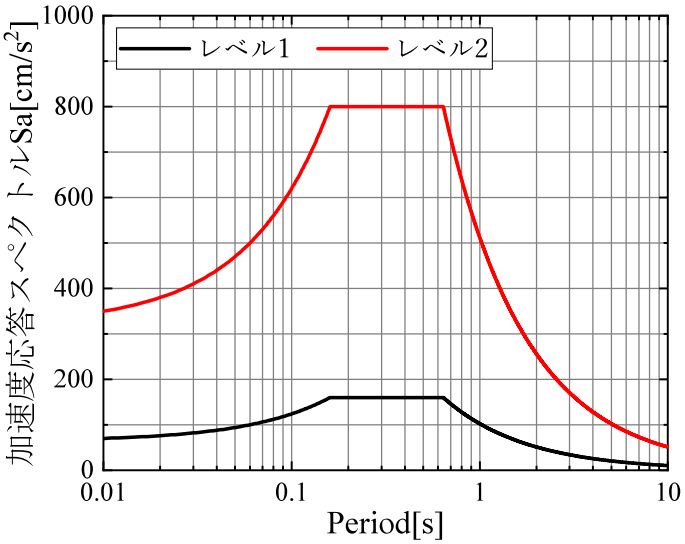


図 4.16　解放工学的基盤における目標加速度応答スペクトル

乱数位相を用いる場合には、「設計用入力地震動作成手法技術指針（案）」[64]に示された(4.2)、(4.3)式の包絡関数を用いた。**図 4. 17** に乱数位相に用いた包絡関数を示す。

レベル 1 の場合（継続時間 60 秒）

$$\left.\begin{array}{ll} e(t)=(t/5)^2 & 0\leqq t<5 \\ e(t)=1 & 5\leqq t<25 \\ e(t)=\exp\{-0.066(t-25)\} & 25\leqq t\leqq 60 \end{array}\right\} \tag{4.2}$$

レベル 2 の場合(継続時間 120 秒)

$$\left.\begin{array}{ll} e(t)=(t/5)^2 & 0\leqq t<5 \\ e(t)=1 & 5\leqq t<25 \\ e(t)=\exp\{-0.027(t-35)\} & 25\leqq t\leqq 60 \end{array}\right\} \tag{4.3}$$

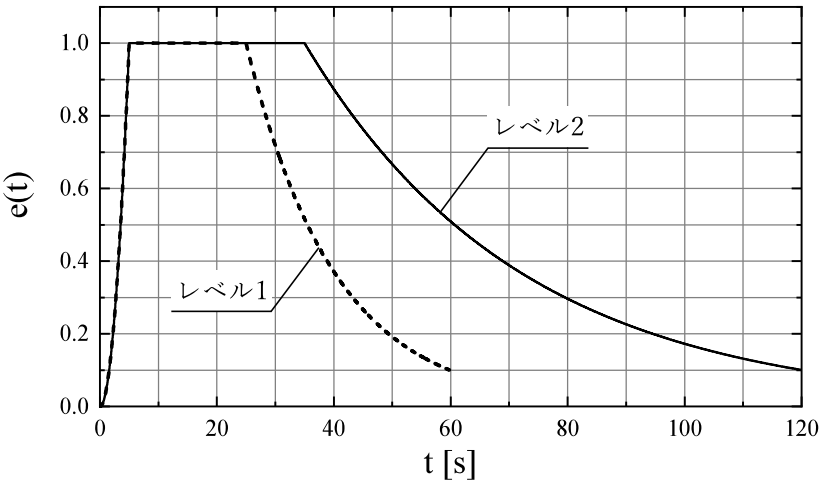


図 4. 17　乱数位相に用いた包絡関数

地盤の力学特性を**表 4. 11** に示す。土の非線形特性は、せん断剛性比 G/G_0 および減衰定数 hを次式でモデル化された Hardin-Drnevich(HD)モデルを用いた。

$$\left.\begin{array}{l} G/G_0=\dfrac{1}{1+\gamma/\gamma_{0.5}} \\ h=h_{\max}\left(1-G/G_0\right) \end{array}\right\} \tag{4.4}$$

ここで、　γ :せん断歪み[%]

$\gamma_{0.5}$:基準せん断歪み[%] (粘性土の場合0.18%、砂質土の場合0.10%)

$h_{\max}$:最大減衰定数[%] (粘性土の場合17%、砂質土の場合21%)

せん断歪みと低減係数、減衰定数の関係を**図 4. 18** に示す。

表 4.11　地盤の力学的特性

深度 [m]	土質	P 波速度 V_P [m/s]	S 波速度 V_S [m/s]	密度値 [g/cm³]	ポアソン比
1.0 ～ 4.0	粘土、礫混り細砂	380	110	1.60	0.454
4.0 ～ 6.5	細砂、砂質シルト	1500	140	1.60	0.496
6.5 ～ 11.0	細砂、礫混り砂	1500	140	1.85	0.496
11.0 ～ 14.0	シルト、細砂	1650	210	1.85	0.492
14.0 ～ 17.5	シルト、中砂	1650	270	1.85	0.486
17.5 ～ 21.0	細砂、シルト	1650	270	1.70	0.486
21.0 ～ 24.5	シルト質粘土	1650	230	1.80	0.490
24.5 ～ 29.0	シルト混り細砂、細砂	1650	230	1.85	0.490
29.0 ～ 32.5	砂混りシルト	1550	230	1.75	0.489
32.5 ～ 38.0	粘土	1550	230	1.65	0.489
38.0 ～ 47.0	シルト、粘土、砂互層	1670	270	1.95	0.487
47.0 ～ 56.0	砂礫	2100	420	2.20	0.479

※ 深度 47.0m を解放工学的基盤とする。

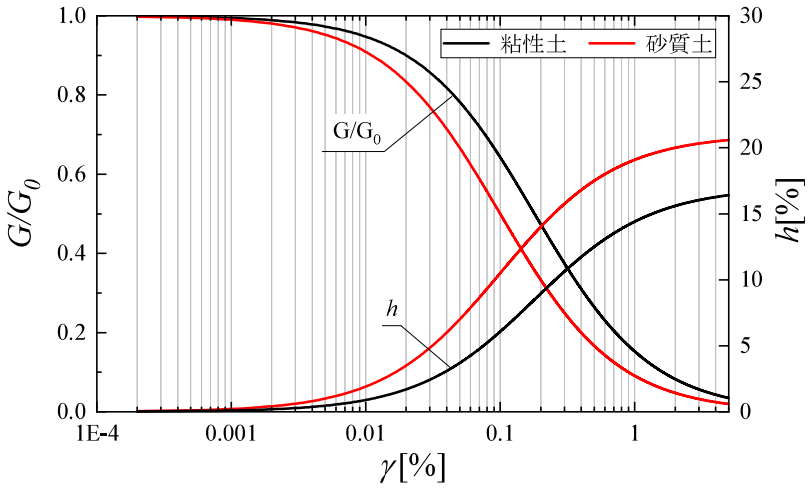
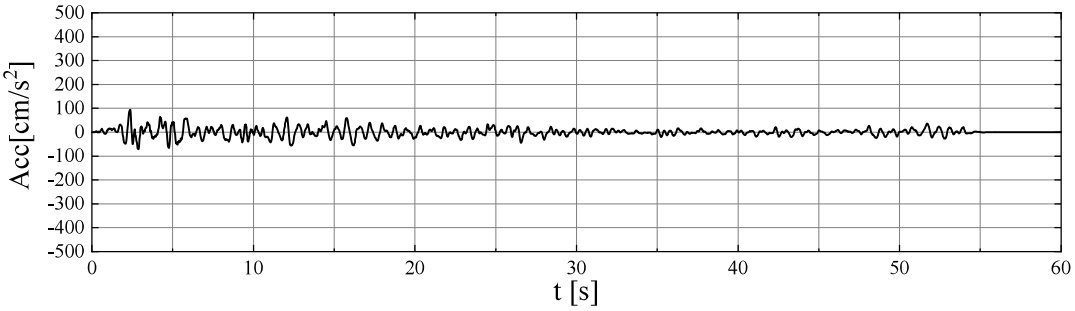
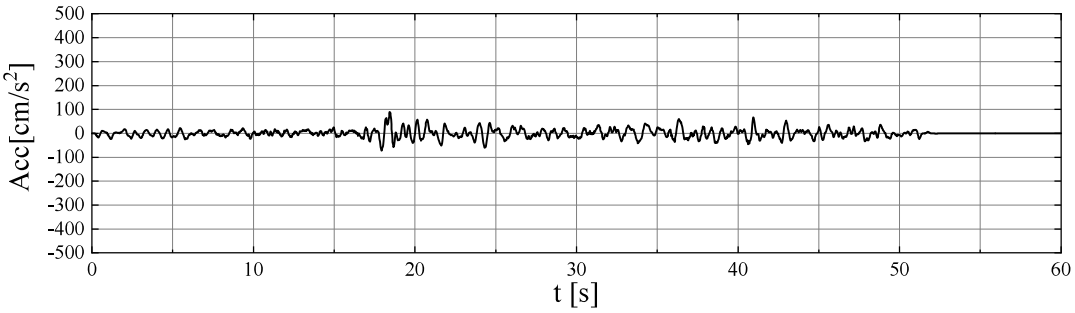


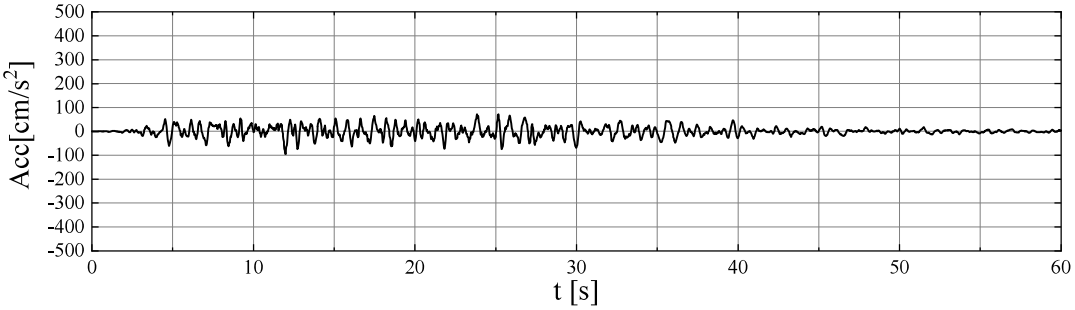
図 4.18　地盤の非線形特性



(a) 告示波 1(位相特性：El Centro NS)

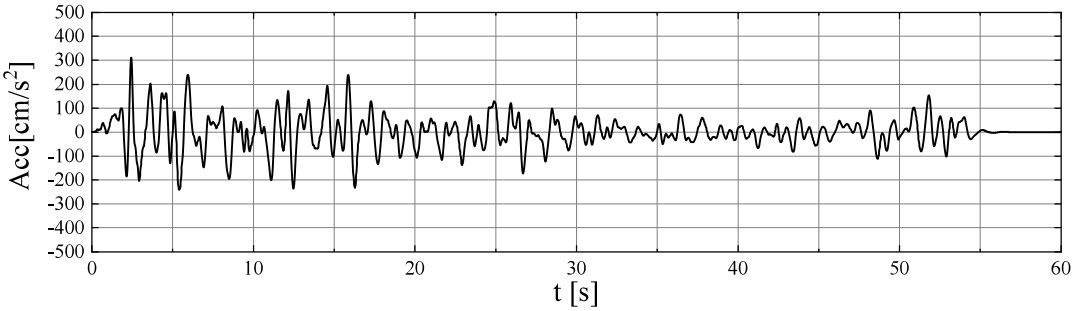


(b) 告示波 2(位相特性：Hachinohe NS)

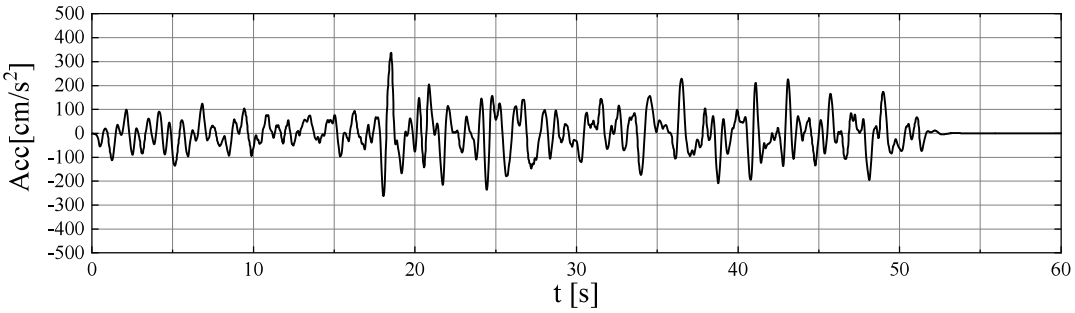


(c) 告示波 3(位相特性：乱数)

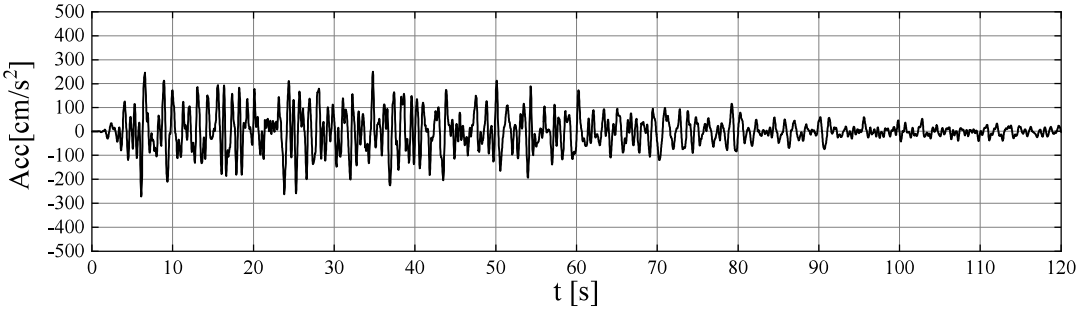
図 4.19　検討用入力地震動の加速度時刻歴波形(レベル 1)



(a) 告示波 1(位相特性：El Centro NS)



(b) 告示波 2(位相特性：Hachinohe NS)



(c) 告示波 3(位相特性：乱数)

図 4.20　検討用入力地震動の加速度時刻歴波形(レベル 2)

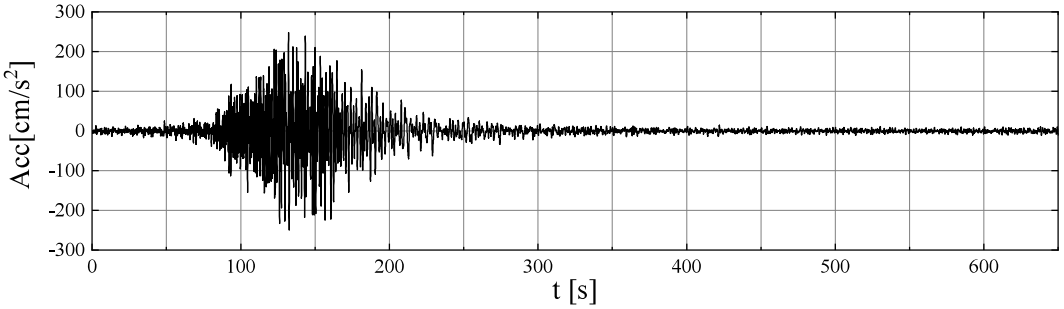
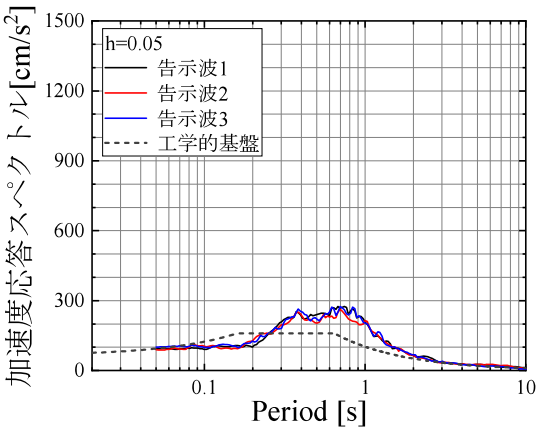
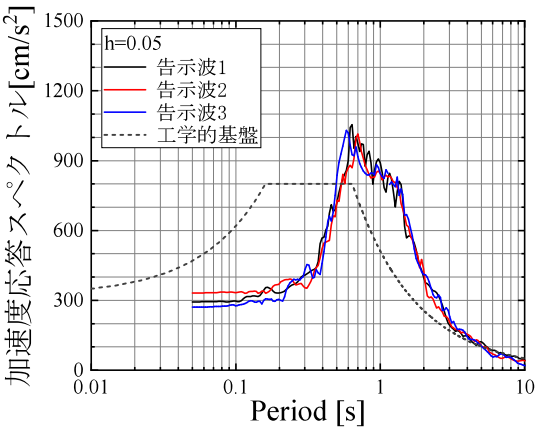


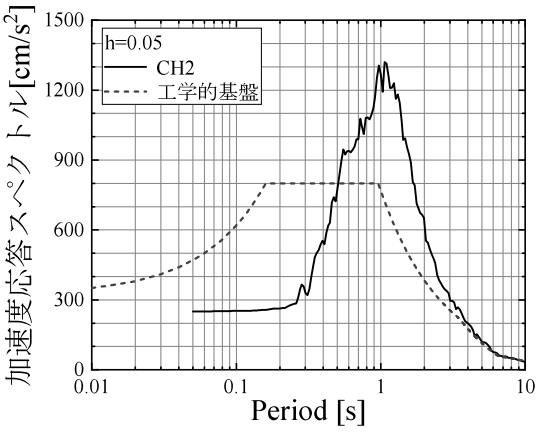
図 4.21　検討用入力地震動の加速度時刻歴波形(CH2)



(a) レベル 1



(b) レベル 2



(c) 長周期地震動 CH2

図 4.22　設計用入力地震動の加速度応答スペクトル(h=0.05)

4.4 時刻歴応答解析結果

時刻歴応答解析結果の最大応答値を下図に示す。入力レベルの違い、加力方向、免震装置の特性、小形シリンダの回帰特性の有無に分けてそれぞれの最大応答値を示す。なお、図中(d)、(e)に示す赤線が許容応力度、青線が弾性限界耐力をそれぞれ示す。

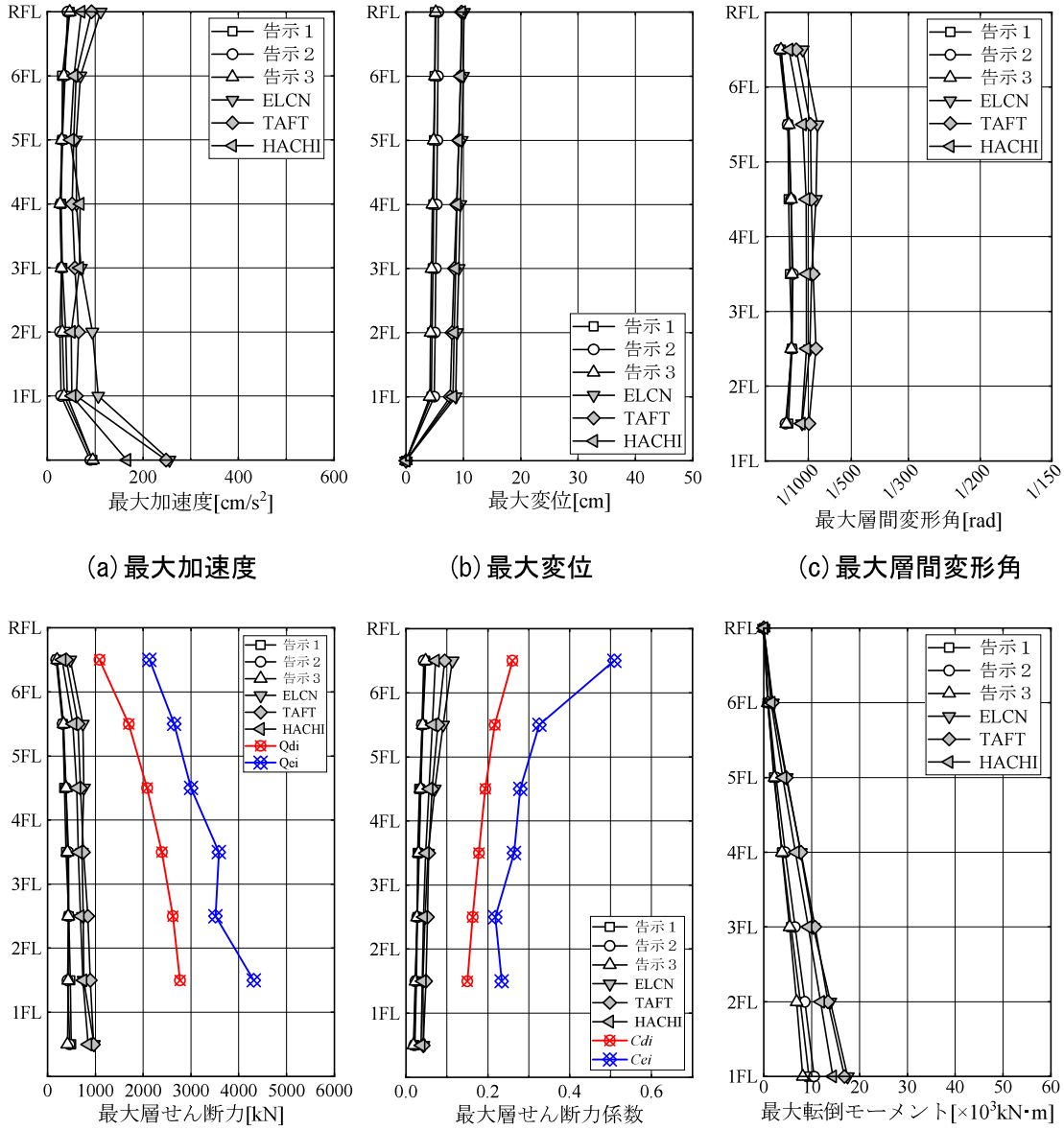
【標準特性】 図 4.23 最大応答値(レベル 1、X 方向、標準特性)
図 4.24 最大応答値(レベル 1、Y 方向、標準特性)
図 4.25 最大応答値(レベル 2、X 方向、標準特性、回帰特性なし)
図 4.26 最大応答値(レベル 2、X 方向、標準特性、回帰特性あり)
図 4.27 最大応答値(レベル 2、Y 方向、標準特性、回帰特性なし)
図 4.28 最大応答値(レベル 2、Y 方向、標準特性、回帰特性あり)
図 4.29 最大応答値(CH2、X 方向、標準特性、回帰特性なし)
図 4.30 最大応答値(CH2、X 方向、標準特性、回帰特性あり)
図 4.31 最大応答値(CH2、Y 方向、標準特性、回帰特性なし)
図 4.32 最大応答値(CH2、Y 方向、標準特性、回帰特性あり)

【最小特性】 図 4.33 最大応答値(レベル 1、X 方向、最小特性)
図 4.34 最大応答値(レベル 1、Y 方向、最小特性)
図 4.35 最大応答値(レベル 2、X 方向、最小特性、回帰特性なし)
図 4.36 最大応答値(レベル 2、X 方向、最小特性、回帰特性あり)
図 4.37 最大応答値(レベル 2、Y 方向、最小特性、回帰特性なし)
図 4.38 最大応答値(レベル 2、Y 方向、最小特性、回帰特性あり)
図 4.39 最大応答値(CH2、X 方向、最小特性、回帰特性なし)
図 4.40 最大応答値(CH2、X 方向、最小特性、回帰特性あり)
図 4.41 最大応答値(CH2、Y 方向、最小特性、回帰特性なし)
図 4.42 最大応答値(CH2、Y 方向、最小特性、回帰特性あり)

【最大特性】 図 4.43 最大応答値(レベル 1、X 方向、最大特性)
図 4.44 最大応答値(レベル 1、Y 方向、最大特性)
図 4.45 最大応答値(レベル 2、X 方向、最大特性、回帰特性なし)
図 4.46 最大応答値(レベル 2、X 方向、最大特性、回帰特性あり)
図 4.47 最大応答値(レベル 2、Y 方向、最大特性、回帰特性なし)
図 4.48 最大応答値(レベル 2、Y 方向、最大特性、回帰特性あり)
図 4.49 最大応答値(CH2、X 方向、最大特性、回帰特性なし)
図 4.50 最大応答値(CH2、X 方向、最大特性、回帰特性あり)
図 4.51 最大応答値(CH2、Y 方向、最大特性、回帰特性なし)
図 4.52 最大応答値(CH2、Y 方向、最大特性、回帰特性あり)

4.4.1　標準特性の場合

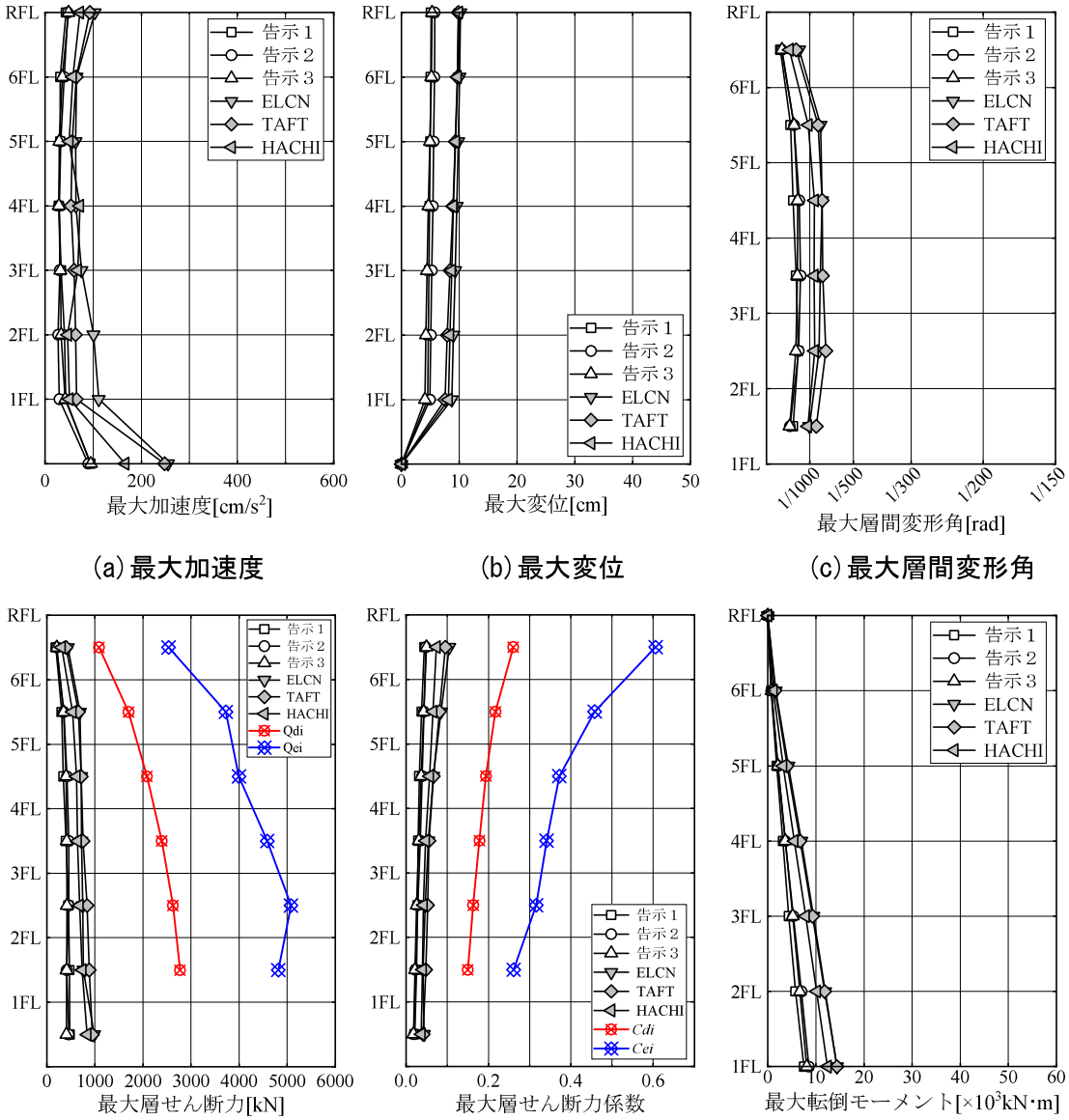
a) 稀に発生する地震動（レベル 1）



(a) 最大加速度　(b) 最大変位　(c) 最大層間変形角

(d) 最大層せん断力　(e) 最大層せん断力係数　(f) 最大転倒モーメント

図 4.23　最大応答値（レベル 1、X 方向、標準特性）

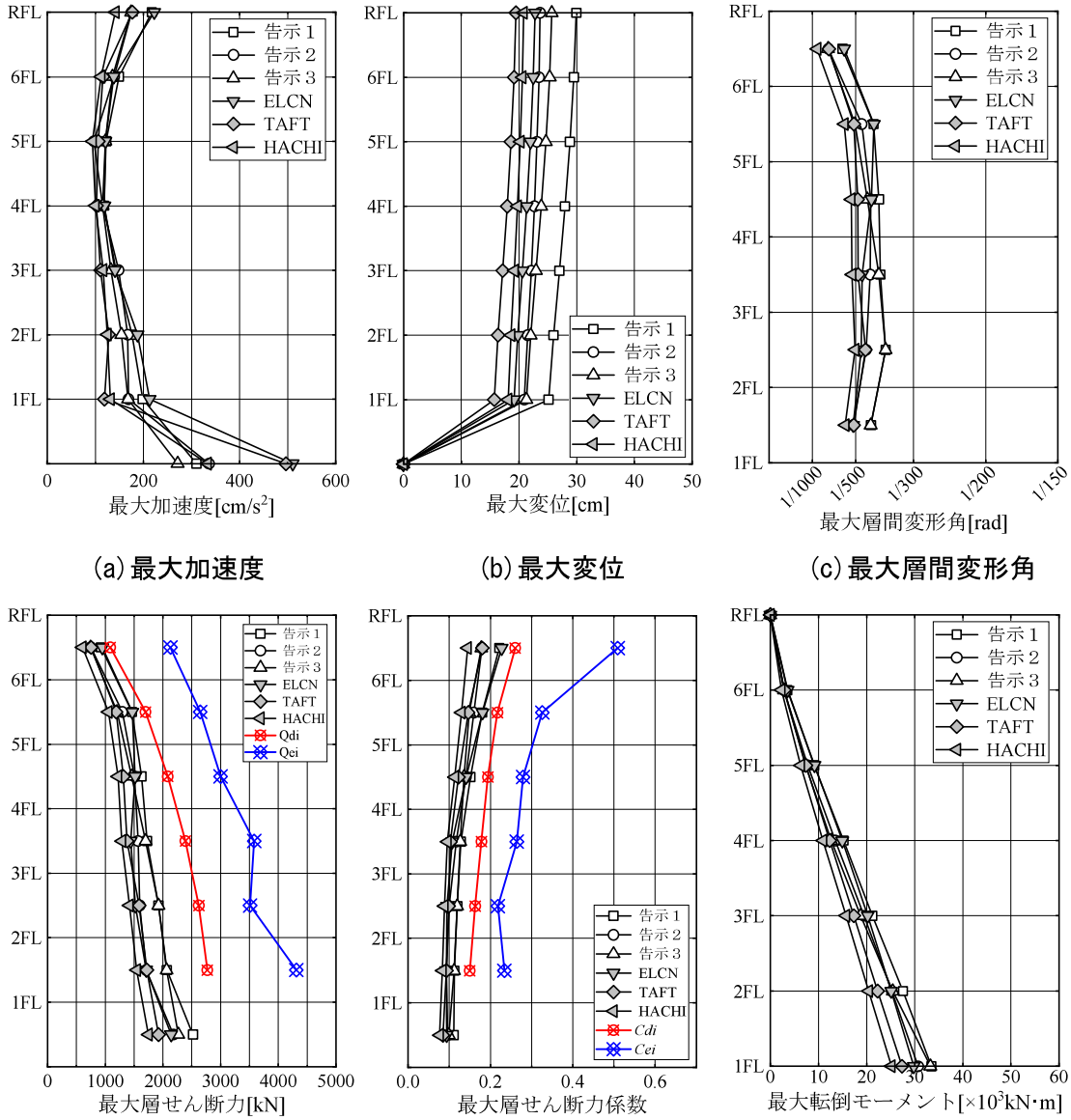


(a) 最大加速度　(b) 最大変位　(c) 最大層間変形角

(d) 最大層せん断力　(e) 最大層せん断力係数　(f) 最大転倒モーメント

図 4.24　最大応答値（レベル 1、Y 方向、標準特性）

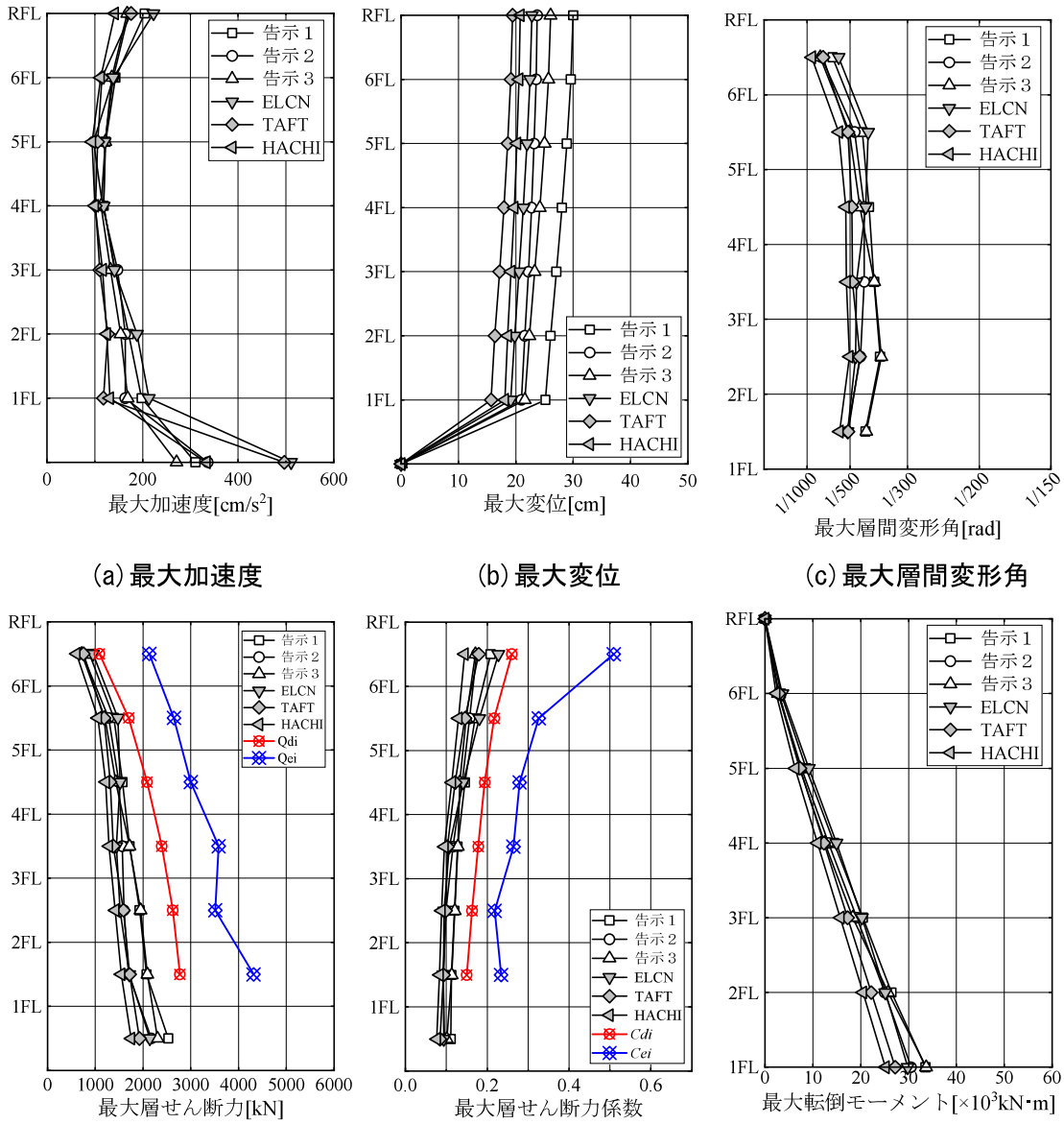
b) 極めて稀に発生する地震動（レベル 2）



(a) 最大加速度　(b) 最大変位　(c) 最大層間変形角

(d) 最大層せん断力　(e) 最大層せん断力係数　(f) 最大転倒モーメント

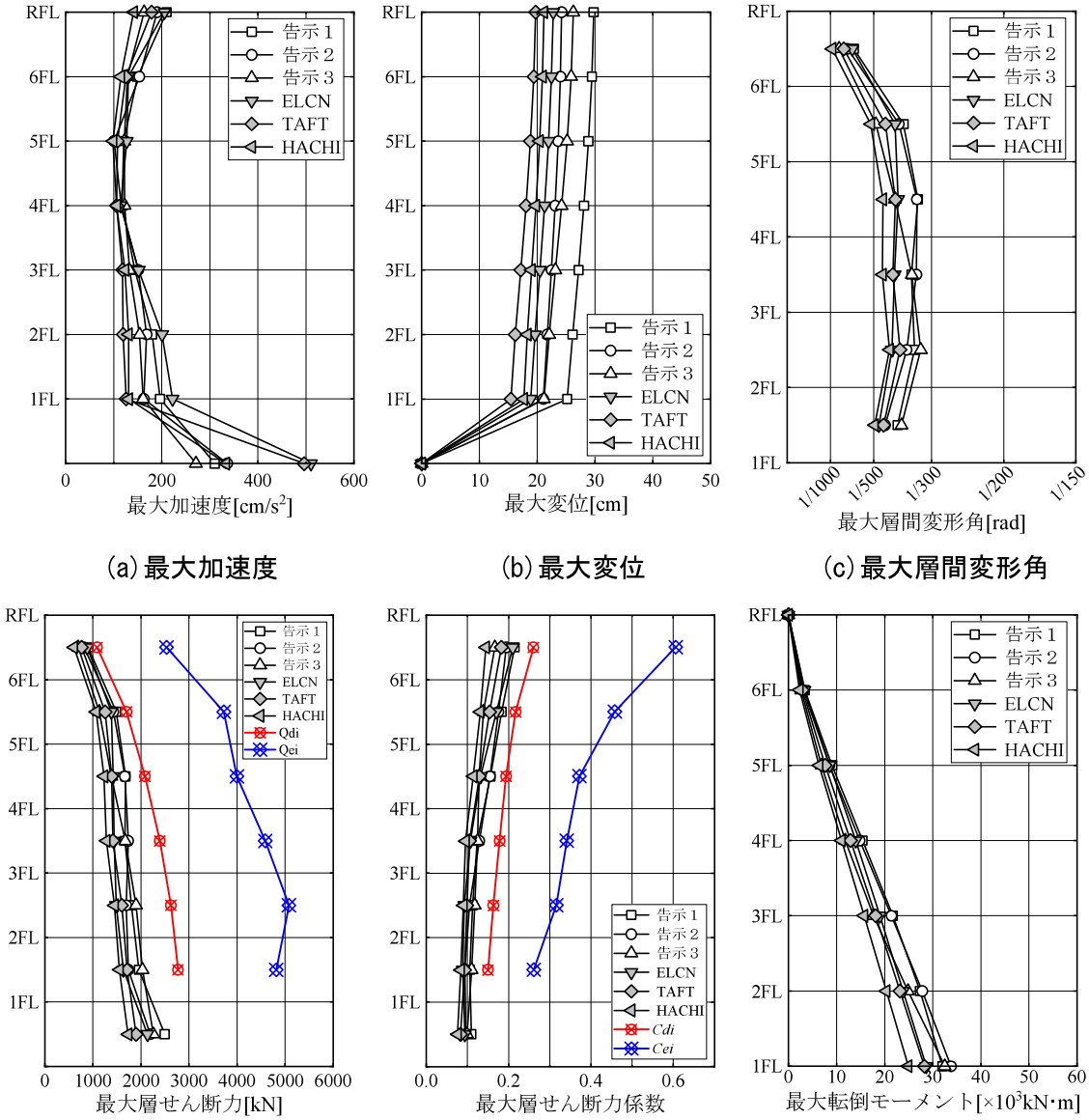
図 4.25　最大応答値（レベル 2、X 方向、標準特性、回帰特性なし）



(a) 最大加速度　(b) 最大変位　(c) 最大層間変形角

(d) 最大層せん断力　(e) 最大層せん断力係数　(f) 最大転倒モーメント

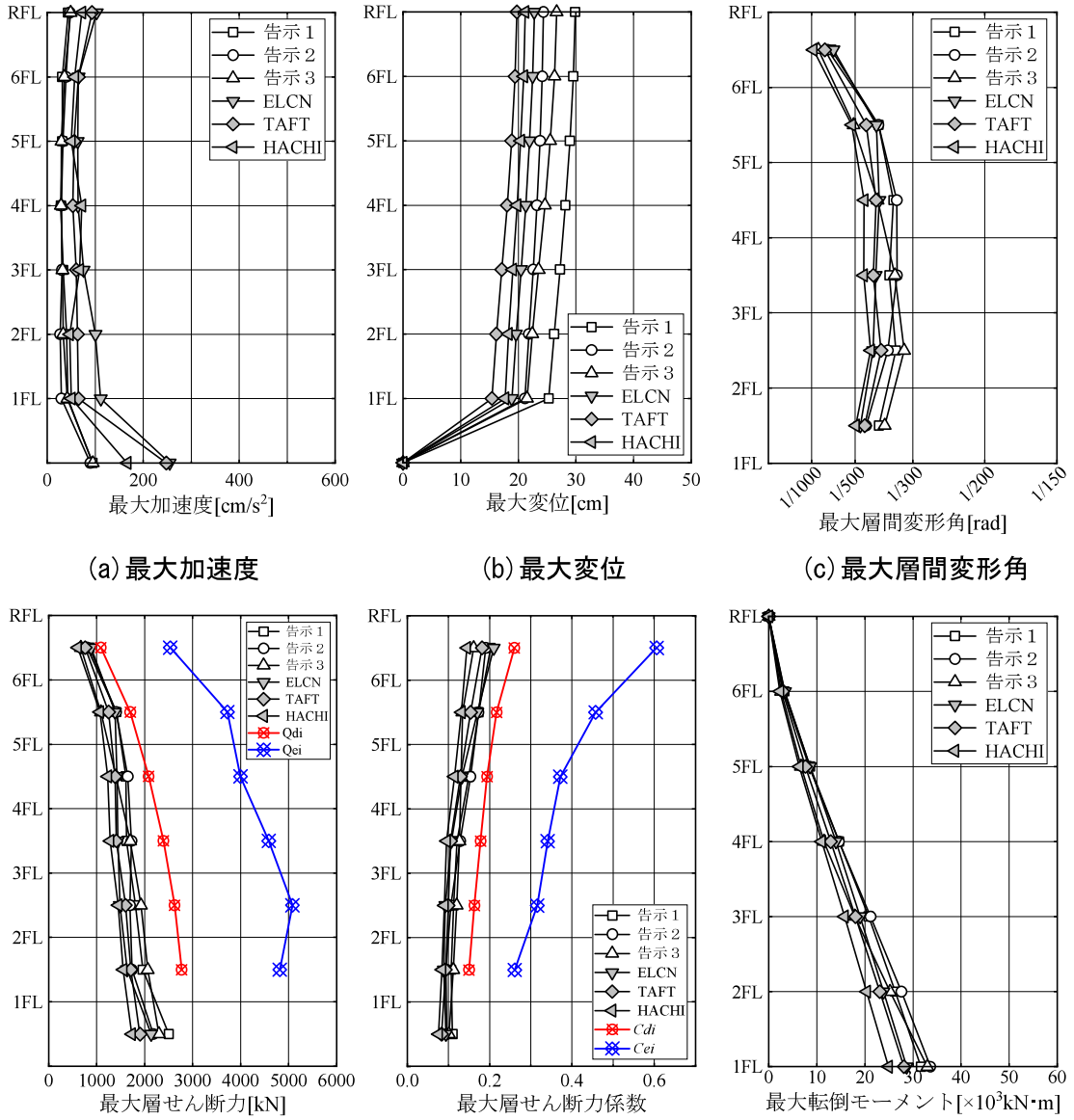
図 4.26　最大応答値（レベル 2、X 方向、標準特性、回帰特性あり）



(a) 最大加速度　(b) 最大変位　(c) 最大層間変形角

(d) 最大層せん断力　(e) 最大層せん断力係数　(f) 最大転倒モーメント

図 4.27　最大応答値（レベル 2、Y 方向、標準特性、回帰特性なし）

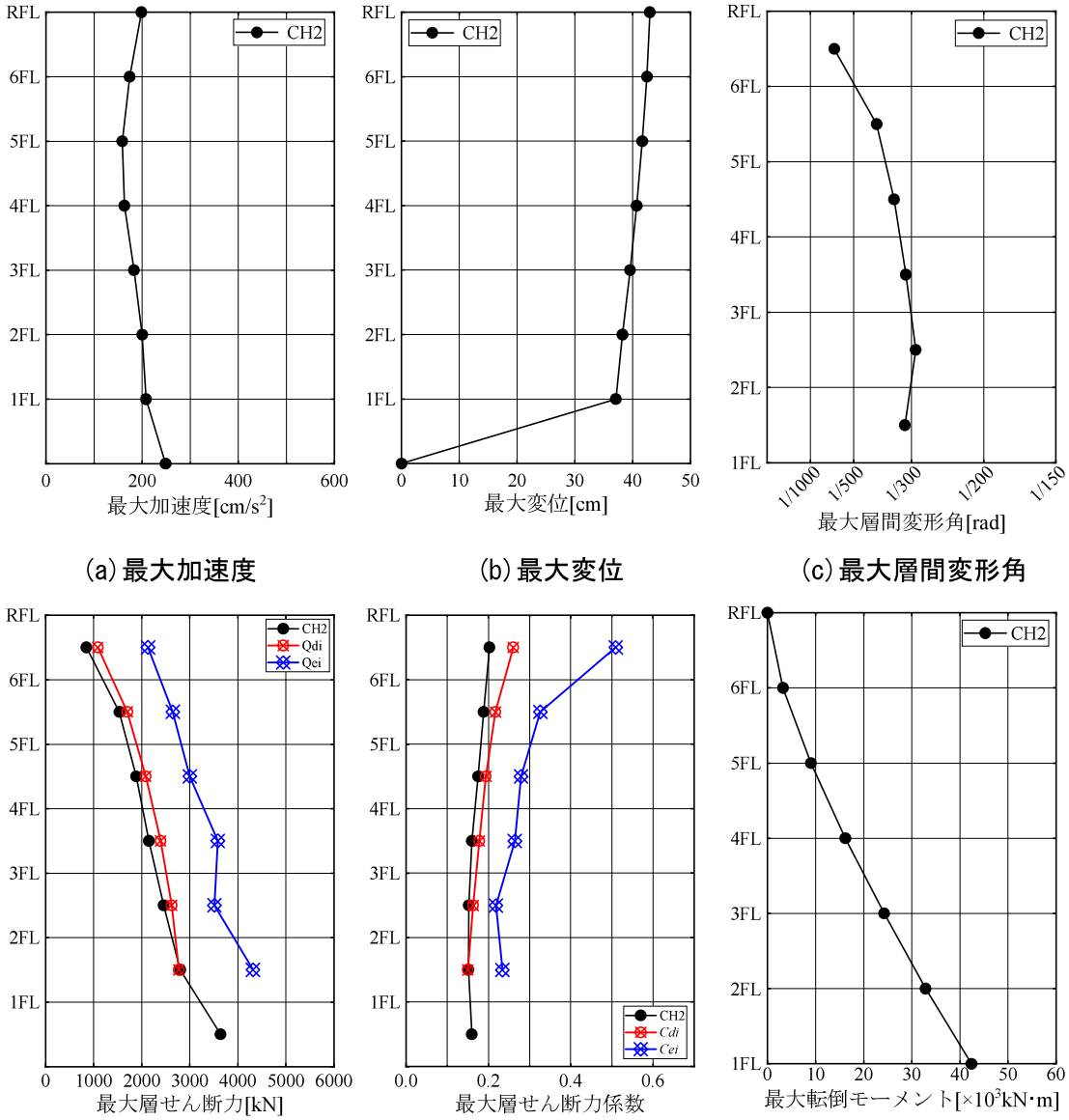


(a) 最大加速度　(b) 最大変位　(c) 最大層間変形角

(d) 最大層せん断力　(e) 最大層せん断力係数　(f) 最大転倒モーメント

図 4.28　最大応答値（レベル 2、Y 方向、標準特性、回帰特性あり）

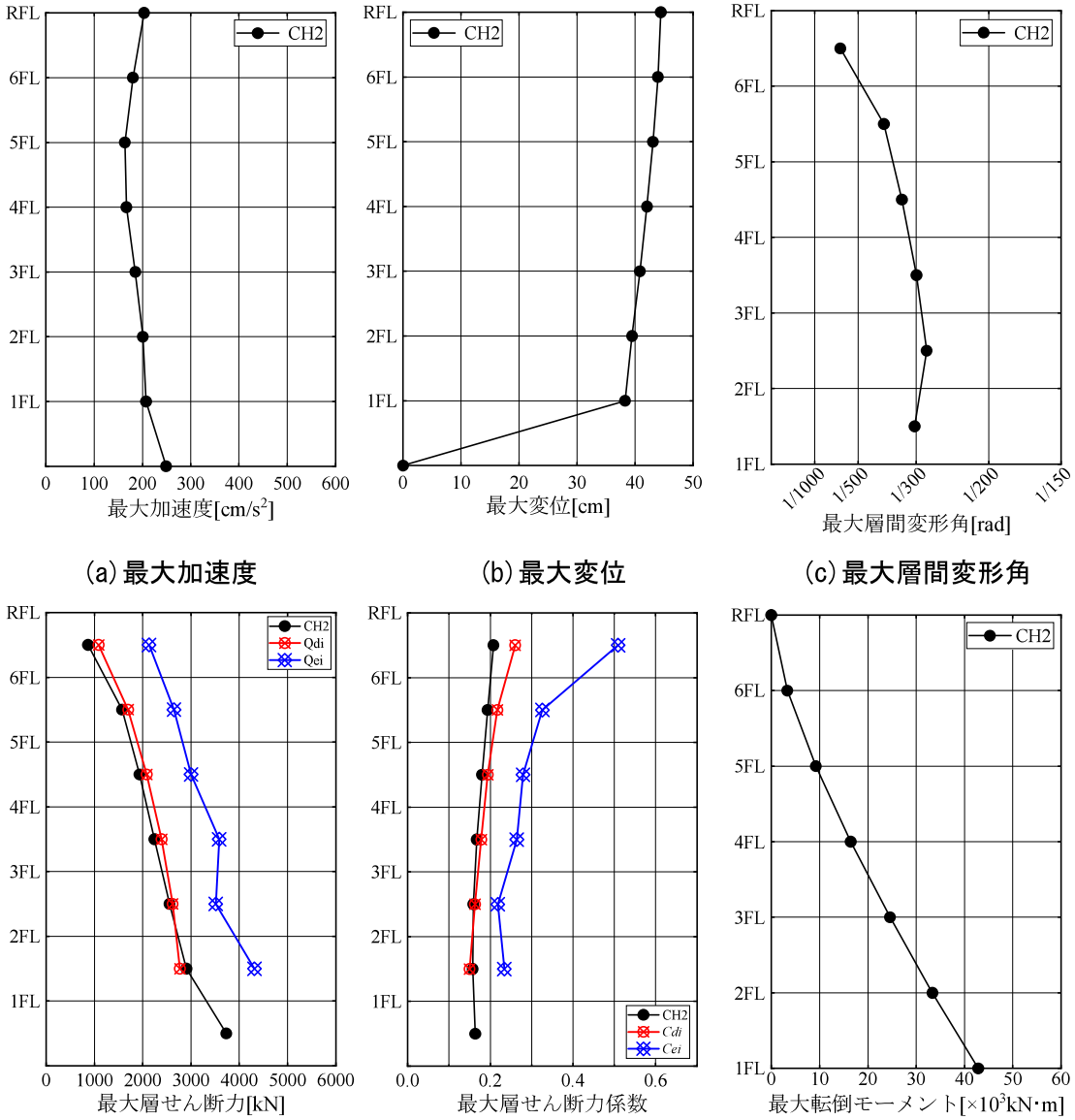
c) 長周期地震動(CH2)



(a)最大加速度　(b)最大変位　(c)最大層間変形角

(d)最大層せん断力　(e)最大層せん断力係数　(f)最大転倒モーメント

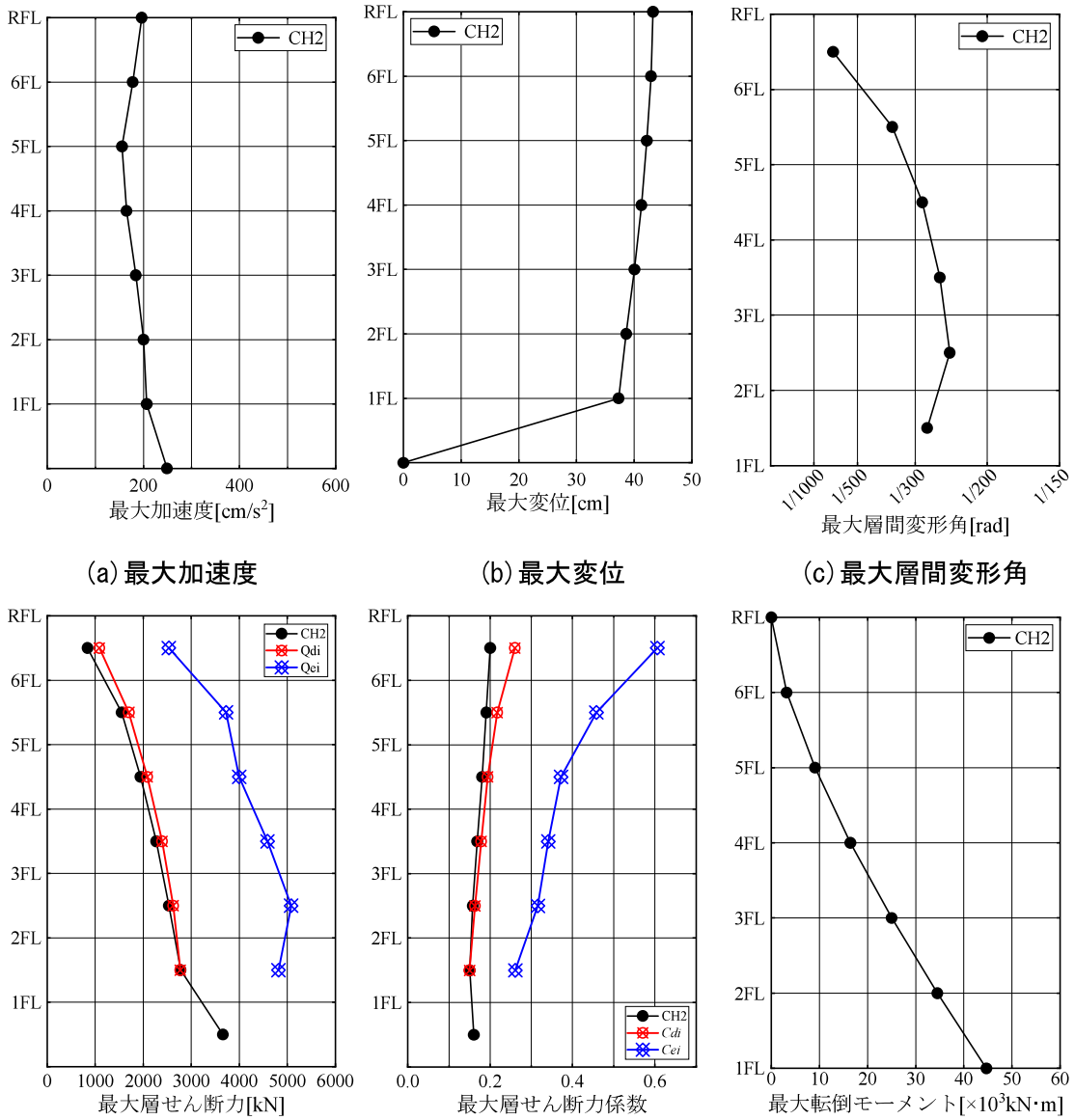
図 4.29　最大応答値(CH2、X 方向、標準特性、回帰特性なし)



(a) 最大加速度　(b) 最大変位　(c) 最大層間変形角

(d) 最大層せん断力　(e) 最大層せん断力係数　(f) 最大転倒モーメント

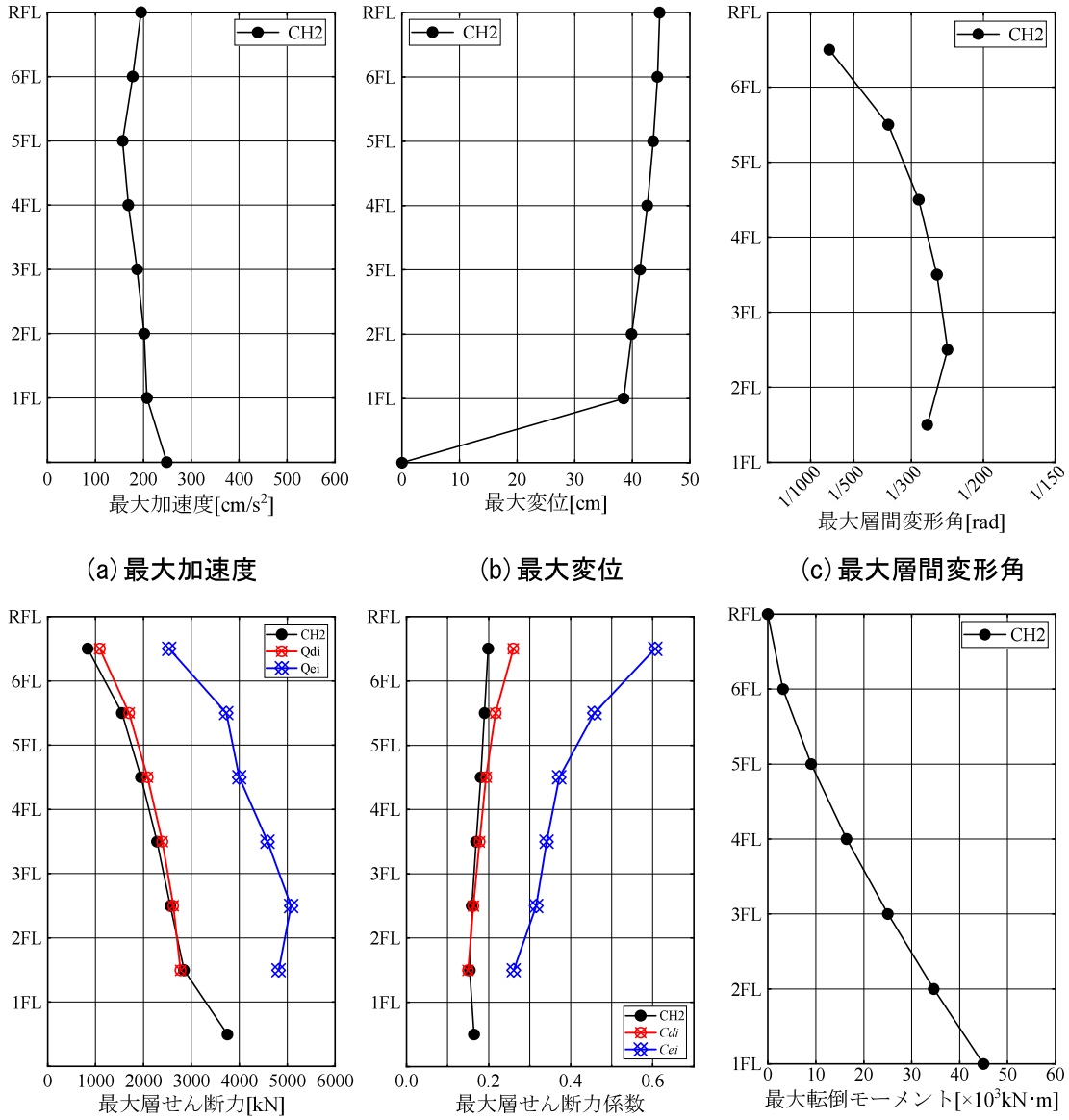
図 4.30　最大応答値(CH2、X 方向、標準特性、回帰特性あり)



(a) 最大加速度　(b) 最大変位　(c) 最大層間変形角

(d) 最大層せん断力　(e) 最大層せん断力係数　(f) 最大転倒モーメント

図 4.31　最大応答値(CH2、Y 方向、標準特性、回帰特性なし)



(a) 最大加速度　(b) 最大変位　(c) 最大層間変形角

(d) 最大層せん断力　(e) 最大層せん断力係数　(f) 最大転倒モーメント

図 4.32　最大応答値(CH2、Y 方向、標準特性、回帰特性あり)

d) 最大応答値一覧（標準特性）

標準特性時の最大応答値一覧を**表 4.12**～**表 4.15** に示す。

表 4.12　最大応答値一覧（X 方向、標準特性、回帰特性なし）

	X方向													
	標準特性													
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
加速度 [cm/s^2]	0	94.2	89.9	95.2	255.4	248.3	166.7	310.6	336.3	271.2	510.8	496.5	333.4	249.1
	1	42.0	28.6	35.0	106.7	61.2	51.5	198.4	169.0	168.1	213.0	118.9	131.3	208.2
	2	38.5	26.5	31.2	94.1	65.6	50.1	176.4	167.4	154.1	187.9	127.6	125.0	200.3
	3	31.4	29.7	29.5	70.4	57.6	67.3	142.9	148.4	132.5	141.0	110.7	116.2	183.0
	4	28.9	27.6	26.9	61.0	51.6	68.7	118.2	115.2	115.3	118.5	102.5	99.9	163.3
	5	31.2	31.5	30.3	60.4	55.2	48.0	122.3	97.2	121.0	120.9	106.3	94.0	158.7
	6	31.2	36.7	34.5	69.2	60.5	55.9	149.1	138.8	135.6	138.4	115.7	111.9	173.9
	R	46.4	42.3	46.9	111.5	92.4	70.8	217.3	175.6	174.4	222.8	176.9	141.7	198.6
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
速度 [cm/s]	0	11.6	16.1	12.2	25.0	25.0	25.0	52.3	57.9	56.5	50.0	50.0	50.0	29.2
	1	13.0	14.4	11.8	31.1	23.5	25.6	81.6	60.9	81.5	69.7	49.2	54.9	75.1
	2	13.6	15.4	12.6	32.6	24.9	26.6	83.5	61.8	83.2	71.0	50.7	56.0	75.2
	3	14.3	16.9	13.8	34.2	26.7	27.3	85.2	63.0	84.6	72.0	53.1	56.4	73.8
	4	15.3	18.4	15.1	35.2	28.5	29.1	86.0	66.0	85.1	72.7	56.3	57.9	73.7
	5	16.4	19.6	16.4	35.5	30.2	31.0	85.5	71.1	84.7	73.0	60.1	62.0	78.1
	6	17.4	20.4	17.7	35.3	31.6	32.0	84.6	76.0	83.4	72.6	63.5	64.2	83.1
	R	18.1	20.8	18.5	34.6	32.3	31.7	85.0	78.9	82.0	71.4	65.3	63.8	86.7
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
変位 [cm]	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1	4.44	4.93	4.15	8.65	7.68	8.19	25.10	20.90	21.27	19.12	15.71	18.08	37.08
	2	4.56	5.06	4.27	8.90	8.00	8.41	25.98	21.50	22.04	19.79	16.36	18.60	38.25
	3	4.68	5.21	4.43	9.18	8.41	8.65	27.00	22.13	22.96	20.58	17.17	19.19	39.55
	4	4.78	5.35	4.61	9.47	8.83	8.88	27.97	22.67	23.86	21.33	17.94	19.74	40.70
	5	4.89	5.47	4.82	9.72	9.19	9.19	28.81	23.11	24.66	21.96	18.60	20.20	41.68
	6	4.99	5.57	5.03	9.95	9.49	9.51	29.51	23.45	25.32	22.48	19.14	20.57	42.49
	R	5.07	5.63	5.16	10.09	9.66	9.71	29.92	23.64	25.70	22.80	19.44	20.77	42.97
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
層間変形角 [rad]	2	1/1864	1/2110	1/2048	1/1164	1/987	1/1191	1/426	1/515	1/426	1/515	1/512	1/570	1/314
	3	1/1613	1/1612	1/1657	1/963	1/849	1/1041	1/372	1/447	1/371	1/470	1/450	1/504	1/291
	4	1/1746	1/1550	1/1614	1/931	1/896	1/1045	1/389	1/428	1/395	1/466	1/487	1/522	1/312
	5	1/1836	1/1664	1/1665	1/846	1/934	1/1056	1/394	1/426	1/441	1/423	1/489	1/528	1/341
	6	1/1888	1/1918	1/1818	1/826	1/953	1/1152	1/414	1/467	1/503	1/413	1/511	1/576	1/395
	R	1/2766	1/3031	1/2737	1/1152	1/1388	1/1809	1/591	1/730	1/736	1/576	1/726	1/904	1/645
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
Q [kN]	1	493.1	460.4	414.9	966.7	962.1	844.8	2520.4	2182.6	2264.5	2141.9	1923.1	1748.9	3640.2
	2	472.5	417.5	429.9	756.4	892.0	739.6	2068.4	1709.2	2064.0	1709.6	1719.4	1543.2	2801.9
	3	443.0	443.5	431.4	743.1	841.9	686.3	1922.9	1599.3	1923.2	1520.5	1588.1	1417.7	2453.0
	4	384.3	433.3	415.8	720.7	749.3	642.3	1726.7	1568.7	1698.8	1440.6	1379.0	1285.6	2149.9
	5	350.3	386.1	385.8	759.8	688.2	608.7	1629.6	1508.7	1458.2	1518.4	1314.4	1218.3	1882.2
	6	321.3	315.9	333.4	735.3	636.8	526.2	1464.3	1296.9	1203.7	1469.4	1186.6	1052.7	1531.9
	R	197.7	180.3	199.8	475.3	393.9	302.0	926.5	748.5	743.3	949.7	754.1	604.0	846.8
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
Ci [-]	1	0.022	0.020	0.018	0.042	0.042	0.037	0.111	0.096	0.099	0.094	0.084	0.077	0.160
	2	0.026	0.023	0.023	0.041	0.048	0.040	0.112	0.093	0.112	0.093	0.093	0.084	0.152
	3	0.028	0.028	0.027	0.046	0.052	0.043	0.120	0.099	0.120	0.095	0.099	0.088	0.153
	4	0.029	0.032	0.031	0.054	0.056	0.048	0.129	0.117	0.126	0.107	0.103	0.096	0.160
	5	0.033	0.036	0.036	0.071	0.064	0.057	0.152	0.140	0.136	0.141	0.122	0.113	0.175
	6	0.040	0.039	0.041	0.090	0.078	0.065	0.180	0.160	0.148	0.181	0.146	0.130	0.189
	R	0.047	0.043	0.048	0.114	0.094	0.072	0.222	0.179	0.178	0.227	0.180	0.144	0.203
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
転倒モーメント [kN･m]	1	7361	8105	8108	14916	14469	12537	33468	30713	33259	29813	27322	25143	42405
	2	5737	6548	6578	12572	11455	10197	27558	25233	25429	25125	22265	20432	32851
	3	4580	4909	5021	10133	9050	7847	21197	19430	18744	20249	17330	15709	24247
	4	3300	3311	3480	7470	6532	5457	15181	13478	12629	14927	12318	10919	16187
	5	1971	1874	2024	4588	3916	3146	9081	7763	7298	9169	7365	6293	9035
	6	751	685	759	1806	1497	1148	3521	2844	2825	3609	2866	2295	3218
	R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 4.13　最大応答値一覧（X 方向、標準特性、回帰特性あり）

		X方向												
		標準特性												
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
加速度 [cm/s^2]	0	94.2	89.9	95.2	255.4	248.3	166.7	310.6	336.3	271.2	510.8	496.5	333.4	249.1
	1	42.0	28.6	35.0	106.7	61.2	51.5	198.0	163.7	168.8	213.0	118.0	131.2	207.5
	2	38.5	26.5	31.2	94.1	65.6	50.1	171.0	163.6	153.9	187.9	127.1	125.0	200.7
	3	31.4	29.7	29.5	70.4	57.6	67.3	142.8	147.6	132.7	141.0	110.5	116.2	185.2
	4	28.9	27.6	26.9	61.0	51.6	68.7	118.4	116.0	113.4	118.5	101.3	99.9	166.8
	5	31.2	31.5	30.3	60.4	55.2	48.0	122.5	97.5	122.2	120.9	105.8	94.0	163.6
	6	31.2	36.7	34.5	69.2	60.5	55.9	142.9	138.6	135.6	138.4	114.9	111.9	180.2
	R	46.4	42.3	46.9	111.5	92.4	70.8	204.4	170.9	167.9	222.8	175.9	141.7	203.5
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
速度 [cm/s]	0	11.6	16.1	12.2	25.0	25.0	25.0	52.3	57.9	56.5	50.0	50.0	50.0	29.2
	1	13.0	14.4	11.8	31.1	23.5	25.6	81.8	60.3	81.6	69.7	49.3	54.9	75.0
	2	13.6	15.4	12.6	32.6	24.9	26.6	83.7	61.3	83.3	71.0	50.8	56.0	75.0
	3	14.3	16.9	13.8	34.2	26.7	27.3	85.4	62.6	84.8	72.0	53.3	56.4	73.7
	4	15.3	18.4	15.1	35.2	28.5	29.1	86.1	66.0	85.4	72.7	56.6	57.9	75.8
	5	16.4	19.6	16.4	35.5	30.2	31.0	85.7	71.1	85.0	73.0	60.1	62.0	80.5
	6	17.4	20.4	17.7	35.3	31.6	32.0	84.7	75.8	83.9	72.6	63.4	64.2	85.7
	R	18.1	20.8	18.5	34.6	32.3	31.7	85.1	78.6	82.7	71.4	65.2	63.8	89.4
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
変位 [cm]	1	4.4	4.9	4.1	8.6	7.7	8.2	25.2	21.0	21.6	19.1	15.7	18.1	38.3
	2	4.6	5.1	4.3	8.9	8.0	8.4	26.0	21.6	22.4	19.8	16.4	18.6	39.5
	3	4.7	5.2	4.4	9.2	8.4	8.7	27.1	22.2	23.3	20.6	17.2	19.2	40.8
	4	4.8	5.3	4.6	9.5	8.8	8.9	28.0	22.7	24.2	21.3	17.9	19.7	42.1
	5	4.9	5.5	4.8	9.7	9.2	9.2	28.9	23.2	25.0	22.0	18.6	20.2	43.1
	6	5.0	5.6	5.0	9.9	9.5	9.5	29.6	23.5	25.7	22.5	19.1	20.6	43.9
	R	5.1	5.6	5.2	10.1	9.7	9.7	30.0	23.7	26.1	22.8	19.4	20.8	44.4
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
層間変形角 [rad]	2	1/1864	1/2110	1/2048	1/1164	1/987	1/1191	1/425	1/517	1/421	1/515	1/512	1/571	1/303
	3	1/1613	1/1612	1/1657	1/963	1/849	1/1041	1/371	1/447	1/367	1/470	1/450	1/504	1/280
	4	1/1746	1/1550	1/1614	1/931	1/896	1/1045	1/391	1/429	1/391	1/466	1/487	1/522	1/299
	5	1/1836	1/1664	1/1665	1/846	1/934	1/1056	1/410	1/430	1/450	1/423	1/491	1/528	1/333
	6	1/1888	1/1918	1/1818	1/826	1/953	1/1152	1/437	1/475	1/504	1/413	1/513	1/576	1/386
	R	1/2766	1/3031	1/2737	1/1152	1/1388	1/1809	1/628	1/750	1/764	1/576	1/730	1/904	1/629
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
Q [kN]	1	493.1	460.4	414.9	966.7	962.1	844.8	2527.9	2171.8	2302.3	2141.9	1923.1	1749.6	3729.9
	2	472.5	417.5	429.9	756.4	892.0	739.6	2073.2	1700.9	2092.6	1709.6	1719.4	1542.2	2904.5
	3	443.0	443.5	431.4	743.1	841.9	686.3	1926.9	1597.9	1947.0	1520.5	1588.1	1416.1	2555.8
	4	384.3	433.3	415.8	720.7	749.3	642.3	1715.1	1563.2	1717.2	1440.6	1379.0	1285.6	2242.0
	5	350.3	386.1	385.8	759.8	688.2	608.7	1566.2	1493.1	1426.6	1518.4	1308.9	1218.3	1932.2
	6	321.3	315.9	333.4	735.3	636.8	526.2	1386.4	1275.7	1203.5	1469.4	1182.4	1052.7	1571.2
	R	197.7	180.3	199.8	475.3	393.9	302.0	871.5	728.6	715.8	949.7	749.9	604.0	867.5
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
Ci [-]	1	0.022	0.020	0.018	0.042	0.042	0.037	0.111	0.095	0.101	0.094	0.084	0.077	0.164
	2	0.026	0.023	0.023	0.041	0.048	0.040	0.112	0.092	0.113	0.093	0.093	0.084	0.157
	3	0.028	0.028	0.027	0.046	0.052	0.043	0.120	0.099	0.121	0.095	0.099	0.088	0.159
	4	0.029	0.032	0.031	0.054	0.056	0.048	0.128	0.116	0.128	0.107	0.103	0.096	0.167
	5	0.033	0.036	0.036	0.071	0.064	0.057	0.146	0.139	0.133	0.141	0.122	0.113	0.180
	6	0.040	0.039	0.041	0.090	0.078	0.065	0.171	0.157	0.148	0.181	0.146	0.130	0.193
	R	0.047	0.043	0.048	0.114	0.094	0.072	0.208	0.174	0.171	0.227	0.179	0.144	0.208
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
転倒モーメント [kN･m]	1	7361	8105	8108	14916	14469	12537	33543	30516	33662	29813	27205	25143	42847
	2	5737	6548	6578	12572	11455	10197	26434	25003	25720	25125	22170	20432	33364
	3	4580	4909	5021	10133	9050	7847	20463	19186	18324	20249	17259	15709	24574
	4	3300	3311	3480	7470	6532	5457	14422	13257	12481	14927	12270	10919	16457
	5	1971	1874	2024	4588	3916	3146	8578	7605	7250	9169	7334	6293	9236
	6	751	685	759	1806	1497	1148	3312	2769	2720	3609	2850	2295	3296
	R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 4.14　最大応答値一覧（Y 方向、標準特性、回帰特性なし）

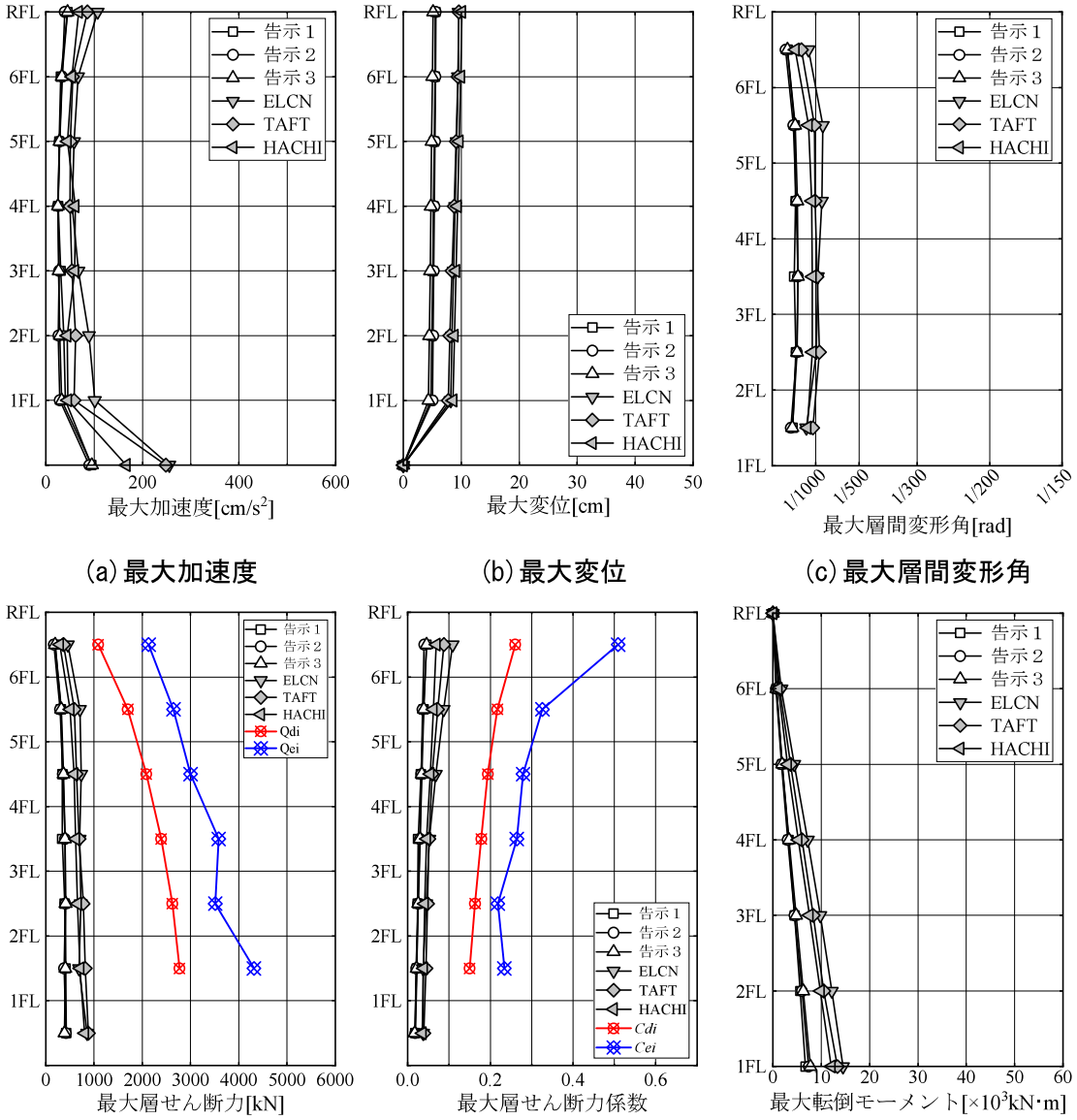
		Y方向												
		標準特性												
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
加速度 [cm/s^2]	0	94.2	89.9	95.2	255.4	248.3	166.7	310.6	336.3	271.2	510.8	496.5	333.4	249.1
	1	43.0	29.7	41.8	111.5	65.1	50.4	196.7	162.8	161.2	222.4	125.7	131.0	206.9
	2	40.4	27.2	33.2	100.7	63.3	46.7	179.9	168.8	154.0	201.0	119.9	131.1	200.2
	3	33.5	30.5	31.7	75.9	60.6	67.7	143.8	151.4	132.9	152.0	118.6	123.5	184.2
	4	28.5	29.2	28.5	64.1	53.6	72.1	118.0	115.5	122.7	114.2	106.0	106.2	164.6
	5	31.4	32.6	29.6	63.5	56.3	50.1	120.6	100.8	122.1	127.1	107.8	98.4	155.3
	6	31.4	39.4	35.7	65.2	64.8	57.3	149.7	153.5	128.6	130.2	125.4	114.7	177.7
	R	43.4	47.1	48.7	103.0	93.2	72.2	210.5	190.6	163.5	205.9	178.8	141.7	196.5
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
速度 [cm/s]	0	11.6	16.1	12.2	25.0	25.0	25.0	52.3	57.9	56.5	50.0	50.0	50.0	29.2
	1	12.6	13.2	11.6	30.4	23.0	26.0	76.0	57.6	81.2	67.2	48.1	56.3	72.1
	2	13.3	14.5	12.5	32.2	24.6	27.2	78.9	58.1	83.2	69.1	50.1	57.5	72.6
	3	14.2	16.4	13.8	34.1	26.6	28.0	82.1	59.9	84.9	71.0	53.2	57.8	73.8
	4	15.2	18.4	15.2	35.4	28.6	29.3	84.8	65.6	85.7	72.8	57.0	58.4	75.7
	5	16.7	20.0	16.6	36.0	30.5	31.6	86.3	72.7	85.3	74.0	61.4	63.2	78.7
	6	17.9	21.1	17.8	35.9	31.9	32.6	87.1	78.9	84.4	74.1	64.4	65.4	82.3
	R	18.5	21.6	18.5	35.5	32.5	32.4	87.4	82.0	84.1	73.4	65.5	65.2	84.7
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
変位 [cm]	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1	4.51	4.92	4.07	8.70	7.54	8.11	25.20	21.05	21.17	18.85	15.42	17.68	37.30
	2	4.64	5.07	4.21	8.97	7.91	8.37	26.13	21.74	22.06	19.60	16.17	18.29	38.62
	3	4.76	5.24	4.42	9.28	8.40	8.67	27.16	22.48	23.16	20.47	17.14	19.03	40.05
	4	4.86	5.41	4.65	9.56	8.89	8.97	28.08	23.11	24.23	21.28	18.05	19.75	41.25
	5	4.95	5.56	4.92	9.82	9.32	9.36	28.86	23.63	25.16	21.96	18.83	20.40	42.21
	6	5.04	5.68	5.16	10.05	9.65	9.70	29.47	24.03	25.89	22.48	19.43	20.91	42.92
	R	5.10	5.74	5.30	10.17	9.81	9.90	29.77	24.22	26.24	22.77	19.72	21.16	43.26
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
層間変形角 [rad]	2	1/1640	1/1860	1/1886	1/1015	1/873	1/1050	1/393	1/442	1/378	1/471	1/449	1/496	1/277
	3	1/1370	1/1352	1/1481	1/828	1/732	1/903	1/340	1/362	1/324	1/414	1/384	1/423	1/242
	4	1/1469	1/1271	1/1409	1/807	1/773	1/910	1/349	1/335	1/347	1/403	1/411	1/455	1/256
	5	1/1628	1/1325	1/1395	1/780	1/779	1/905	1/331	1/334	1/402	1/390	1/400	1/452	1/286
	6	1/1811	1/1574	1/1579	1/801	1/841	1/1038	1/372	1/388	1/489	1/401	1/441	1/519	1/356
	R	1/3154	1/2901	1/2806	1/1329	1/1467	1/1895	1/650	1/717	1/837	1/665	1/765	1/964	1/694
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
Q [kN]	1	475.0	455.8	404.4	984.6	945.7	839.0	2494.0	2192.2	2254.9	2131.1	1896.1	1730.6	3658.7
	2	468.7	413.4	407.6	757.3	880.4	732.7	1955.8	1737.8	2030.5	1632.7	1711.2	1549.8	2775.3
	3	447.8	454.3	414.2	742.4	838.2	679.7	1801.4	1693.5	1893.8	1485.0	1598.5	1448.7	2534.3
	4	395.3	457.2	412.2	720.3	751.2	638.3	1666.8	1733.1	1672.1	1439.9	1414.3	1277.8	2267.0
	5	341.1	419.2	397.9	712.2	712.7	613.8	1676.2	1664.2	1380.7	1423.1	1388.6	1228.7	1941.6
	6	305.5	351.1	350.1	690.7	657.8	532.4	1485.7	1426.1	1130.4	1380.4	1252.7	1065.2	1549.9
	R	184.8	200.8	207.7	439.2	397.4	308.0	897.2	812.3	697.0	877.7	762.2	604.2	837.7
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
Ci [-]	1	0.021	0.020	0.018	0.043	0.041	0.037	0.109	0.096	0.099	0.094	0.083	0.076	0.161
	2	0.025	0.022	0.022	0.041	0.048	0.040	0.106	0.094	0.110	0.088	0.093	0.084	0.150
	3	0.028	0.028	0.026	0.046	0.052	0.042	0.112	0.105	0.118	0.092	0.099	0.090	0.158
	4	0.029	0.034	0.031	0.054	0.056	0.048	0.124	0.129	0.124	0.107	0.105	0.095	0.169
	5	0.032	0.039	0.037	0.066	0.066	0.057	0.156	0.155	0.129	0.132	0.129	0.114	0.181
	6	0.038	0.043	0.043	0.085	0.081	0.066	0.183	0.175	0.139	0.170	0.154	0.131	0.191
	R	0.044	0.048	0.050	0.105	0.095	0.074	0.215	0.194	0.167	0.210	0.182	0.145	0.200
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
転倒モーメント [kN・m]	1	7507	8545	8101	14344	14386	12407	32009	33810	32477	28668	28234	24891	44702
	2	5745	7011	6668	11927	11784	10154	27344	27810	24829	23832	23164	20350	34506
	3	4363	5344	5170	9514	9307	7869	21729	21402	17653	19011	18111	15756	25005
	4	3125	3659	3627	6995	6718	5500	15411	14818	11834	13978	12903	11006	16436
	5	1863	2091	2119	4288	4010	3171	9052	8502	6889	8570	7649	6343	9071
	6	702	763	789	1669	1510	1170	3409	3087	2649	3335	2896	2296	3183
	R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 4.15　最大応答値一覧（Y 方向、標準特性、回帰特性あり）

		Y方向												
		標準特性												
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
加速度 [cm/s^2]	0	94.2	89.9	95.2	255.4	248.3	166.7	310.6	336.3	271.2	510.8	496.5	333.4	249.1
	1	43.0	29.7	41.8	111.5	65.1	50.4	196.3	156.1	161.3	222.4	125.7	130.8	207.8
	2	40.4	27.2	33.2	100.7	63.3	46.7	179.6	164.2	155.1	201.0	119.4	131.1	201.8
	3	33.5	30.5	31.7	75.9	60.6	67.7	143.7	150.5	132.9	152.0	118.7	123.5	187.1
	4	28.5	29.2	28.5	64.1	53.6	72.1	118.3	116.4	120.6	114.2	106.0	106.2	168.7
	5	31.4	32.6	29.6	63.5	56.3	50.1	113.5	100.9	123.6	127.1	107.4	98.3	156.9
	6	31.4	39.4	35.7	65.2	64.8	57.3	143.7	153.1	130.2	130.2	124.7	114.7	178.1
	R	43.4	47.1	48.7	103.0	93.2	72.2	198.4	186.6	157.6	205.9	178.0	141.7	195.3
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
速度 [cm/s]	0	11.6	16.1	12.2	25.0	25.0	25.0	52.3	57.9	56.5	50.0	50.0	50.0	29.2
	1	12.6	13.2	11.6	30.4	23.0	26.0	76.2	57.0	81.2	67.2	48.2	56.3	73.2
	2	13.3	14.5	12.5	32.2	24.6	27.2	79.0	57.5	83.3	69.1	50.2	57.5	73.9
	3	14.2	16.4	13.8	34.1	26.6	28.0	82.2	59.7	85.1	71.0	53.4	57.8	74.8
	4	15.2	18.4	15.2	35.4	28.6	29.3	84.9	65.8	85.9	72.8	57.2	58.4	77.8
	5	16.7	20.0	16.6	36.0	30.5	31.6	86.5	72.8	85.6	74.0	61.4	63.2	81.0
	6	17.9	21.1	17.8	35.9	31.9	32.6	87.2	78.6	84.9	74.1	64.3	65.4	84.8
	R	18.5	21.6	18.5	35.5	32.5	32.4	87.5	81.6	84.7	73.4	65.4	65.2	87.3
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
変位 [cm]	1	4.5	4.9	4.1	8.7	7.5	8.1	25.3	21.2	21.5	18.9	15.4	17.7	38.5
	2	4.6	5.1	4.2	9.0	7.9	8.4	26.2	21.8	22.4	19.6	16.2	18.3	39.9
	3	4.8	5.2	4.4	9.3	8.4	8.7	27.2	22.6	23.5	20.5	17.1	19.0	41.4
	4	4.9	5.4	4.7	9.6	8.9	9.0	28.2	23.2	24.6	21.3	18.1	19.8	42.6
	5	4.9	5.6	4.9	9.8	9.3	9.4	28.9	23.8	25.6	22.0	18.8	20.4	43.6
	6	5.0	5.7	5.2	10.0	9.6	9.7	29.5	24.2	26.3	22.5	19.4	20.9	44.4
	R	5.1	5.7	5.3	10.2	9.8	9.9	29.8	24.4	26.6	22.8	19.7	21.2	44.7
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
層間変形角 [rad]	2	1/1640	1/1860	1/1886	1/1015	1/873	1/1050	1/392	1/443	1/373	1/471	1/449	1/496	1/270
	3	1/1370	1/1352	1/1481	1/828	1/732	1/903	1/340	1/362	1/319	1/414	1/384	1/424	1/240
	4	1/1469	1/1271	1/1409	1/807	1/773	1/910	1/358	1/337	1/342	1/403	1/413	1/455	1/255
	5	1/1628	1/1325	1/1395	1/780	1/779	1/905	1/346	1/337	1/396	1/390	1/402	1/452	1/285
	6	1/1811	1/1574	1/1579	1/801	1/841	1/1038	1/393	1/393	1/508	1/401	1/443	1/519	1/357
	R	1/3154	1/2901	1/2806	1/1329	1/1467	1/1895	1/689	1/732	1/868	1/665	1/768	1/964	1/699
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
Q [kN]	1	475.0	455.8	404.4	984.6	945.7	839.0	2501.5	2179.4	2294.1	2131.1	1896.1	1728.5	3748.5
	2	468.7	413.4	407.6	757.3	880.4	732.7	1960.5	1733.4	2062.6	1632.7	1711.2	1549.3	2846.2
	3	447.8	454.3	414.2	742.4	838.2	679.7	1805.4	1692.5	1922.8	1485.0	1598.5	1447.2	2559.3
	4	395.3	457.2	412.2	720.3	751.2	638.3	1621.7	1725.6	1696.2	1439.9	1406.3	1277.8	2279.5
	5	341.1	419.2	397.9	712.2	712.7	613.8	1604.6	1647.6	1399.8	1423.1	1382.4	1228.7	1943.9
	6	305.5	351.1	350.1	690.7	657.8	532.4	1407.4	1405.6	1088.7	1380.4	1248.3	1065.2	1545.9
	R	184.8	200.8	207.7	439.2	397.4	308.0	845.6	795.6	671.9	877.7	759.0	604.2	832.7
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
Ci [-]	1	0.021	0.020	0.018	0.043	0.041	0.037	0.110	0.096	0.101	0.094	0.083	0.076	0.164
	2	0.025	0.022	0.022	0.041	0.048	0.040	0.106	0.094	0.112	0.088	0.093	0.084	0.154
	3	0.028	0.028	0.026	0.046	0.052	0.042	0.112	0.105	0.120	0.092	0.099	0.090	0.159
	4	0.029	0.034	0.031	0.054	0.056	0.048	0.121	0.128	0.126	0.107	0.105	0.095	0.170
	5	0.032	0.039	0.037	0.066	0.066	0.057	0.149	0.153	0.130	0.132	0.129	0.114	0.181
	6	0.038	0.043	0.043	0.085	0.081	0.066	0.173	0.173	0.134	0.170	0.154	0.131	0.190
	R	0.044	0.048	0.050	0.105	0.095	0.074	0.202	0.190	0.161	0.210	0.182	0.145	0.199
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
転倒モーメント [kN・m]	1	7507	8545	8101	14344	14386	12407	31644	33604	32981	28668	28119	24891	44963
	2	5745	7011	6668	11927	11784	10154	26301	27577	25205	23832	23067	20350	34623
	3	4363	5344	5170	9514	9307	7869	20760	21162	17911	19011	18036	15756	25028
	4	3125	3659	3627	6995	6718	5500	14635	14609	11466	13978	12854	11006	16410
	5	1863	2091	2119	4288	4010	3171	8556	8359	6687	8570	7621	6343	9036
	6	702	763	789	1669	1510	1170	3213	3023	2553	3335	2884	2296	3164
	R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4.4.2　最小特性の場合

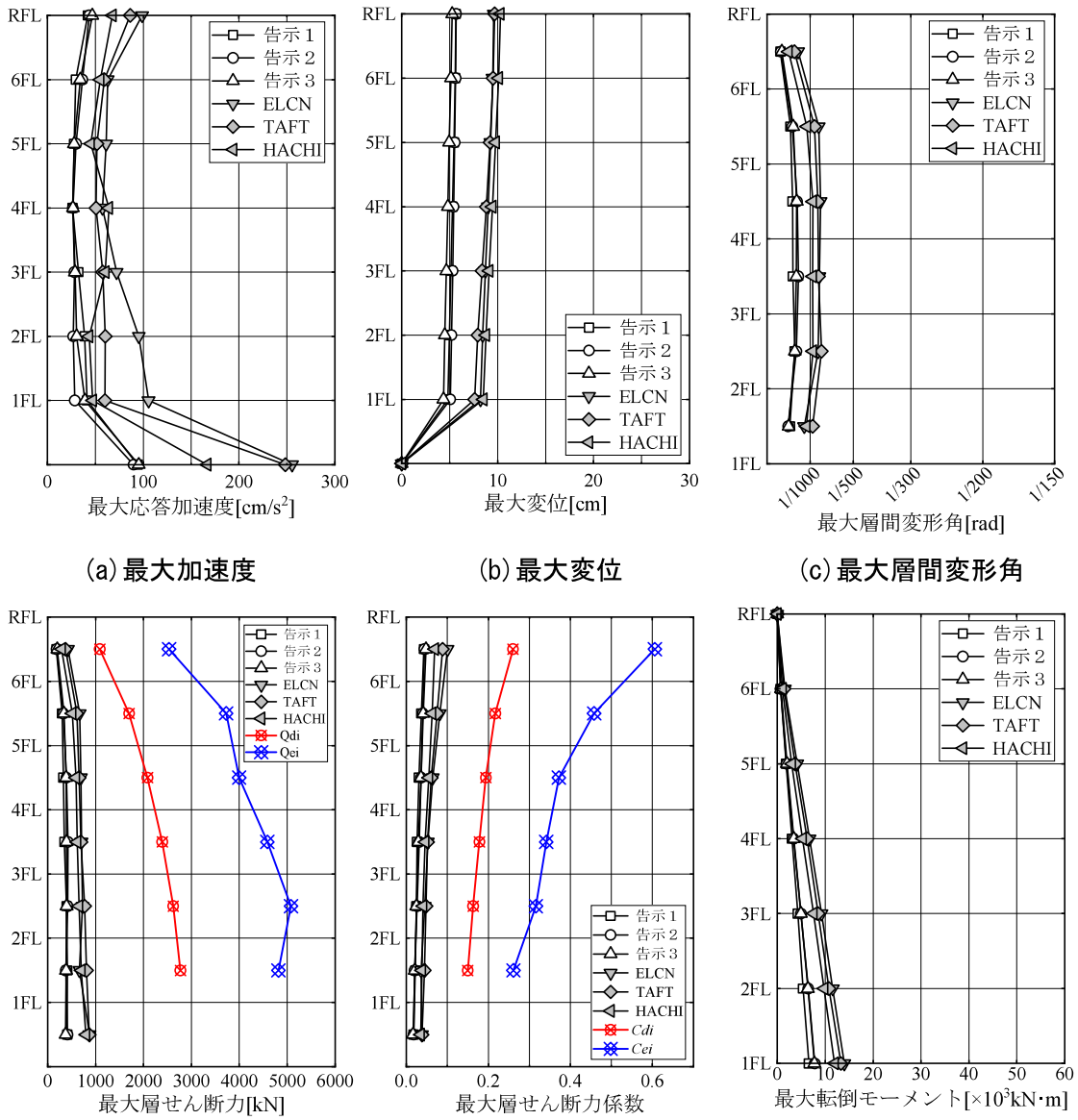
a) 稀に発生する地震動（レベル 1）



(a) 最大加速度　(b) 最大変位　(c) 最大層間変形角

(d) 最大層せん断力　(e) 最大層せん断力係数　(f) 最大転倒モーメント

図 4.33　最大応答値（レベル 1、X 方向、最小特性）

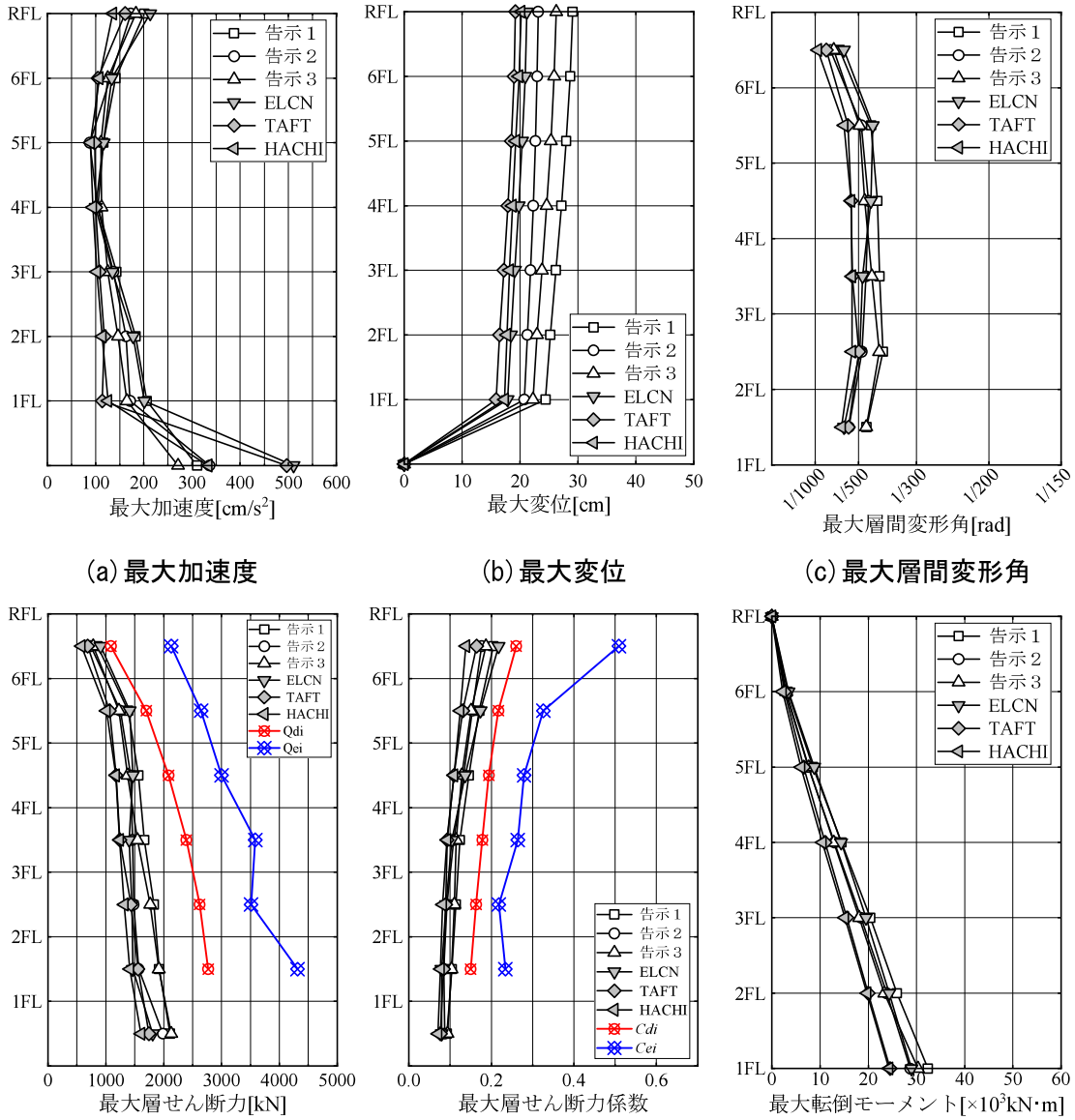


(a) 最大加速度　(b) 最大変位　(c) 最大層間変形角

(d) 最大層せん断力　(e) 最大層せん断力係数　(f) 最大転倒モーメント

図 4.34　最大応答値（レベル 1、Y 方向、最小特性）

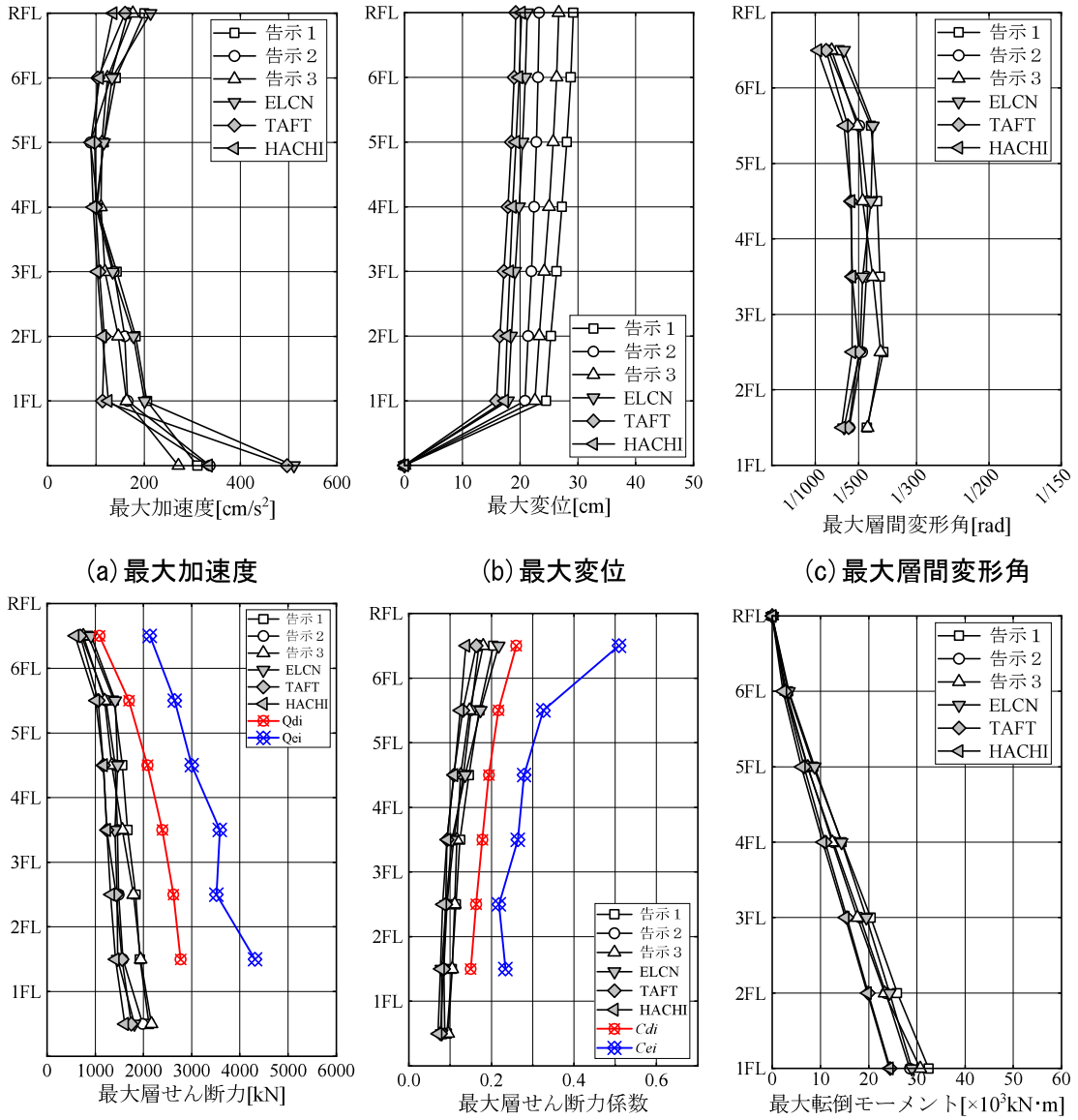
b) 極めて稀に発生する地震動（レベル 2）



(a) 最大加速度　(b) 最大変位　(c) 最大層間変形角

(d) 最大層せん断力　(e) 最大層せん断力係数　(f) 最大転倒モーメント

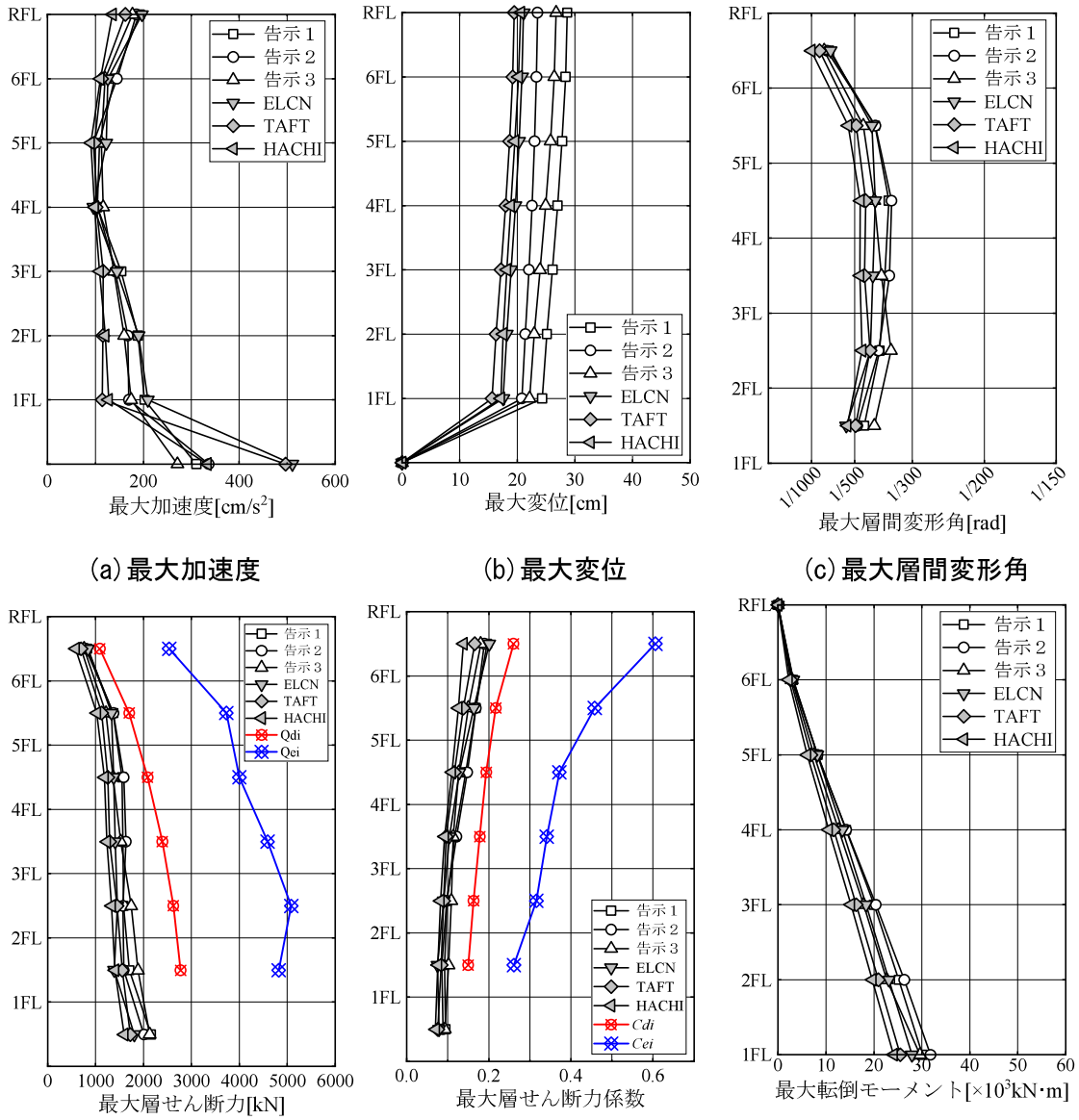
図 4.35　最大応答値（レベル 2、X 方向、最小特性、回帰特性なし）



(a) 最大加速度　(b) 最大変位　(c) 最大層間変形角

(d) 最大層せん断力　(e) 最大層せん断力係数　(f) 最大転倒モーメント

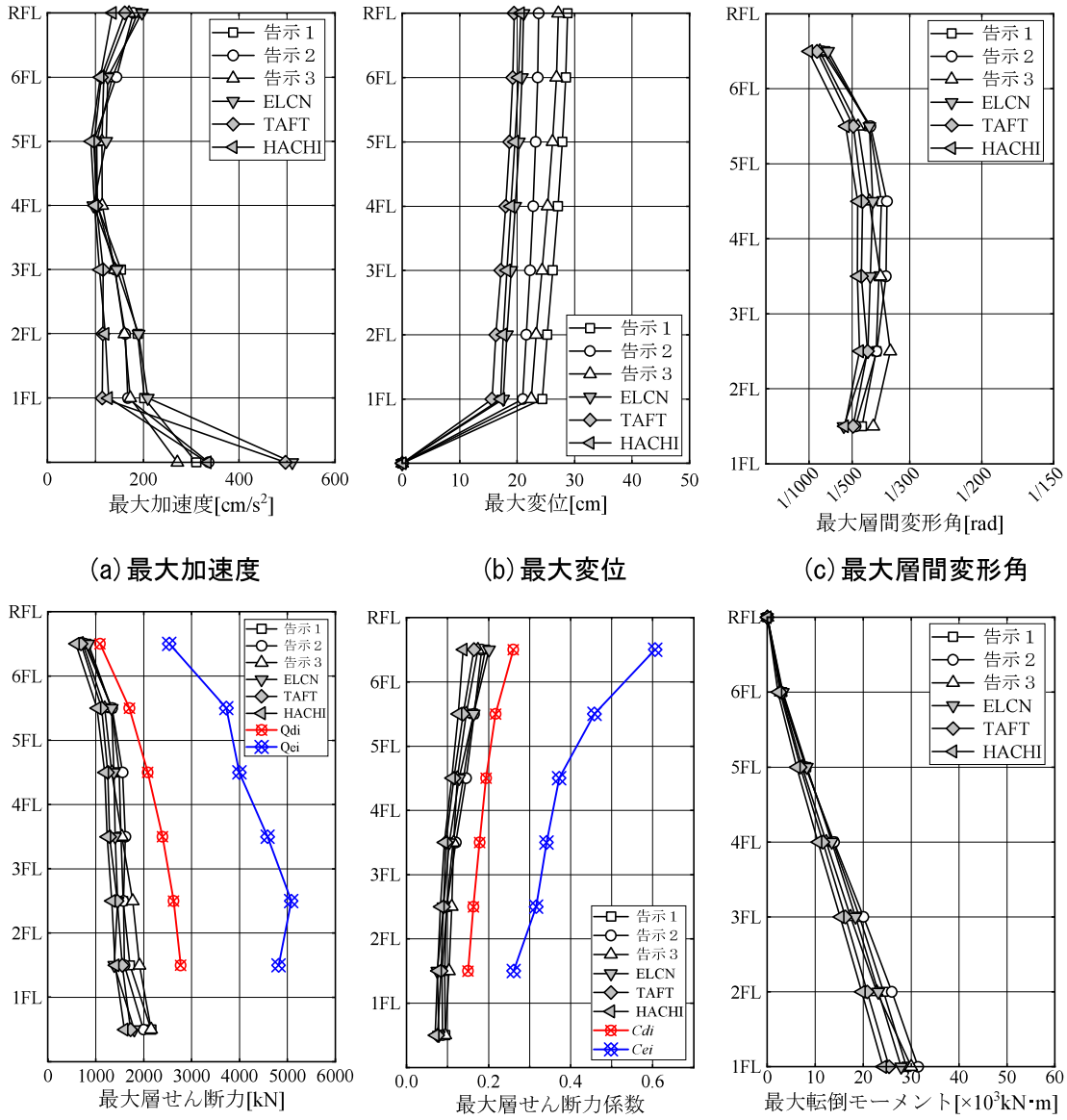
図 4.36　最大応答値（レベル 2、X 方向、最小特性、回帰特性あり）



(a) 最大加速度　(b) 最大変位　(c) 最大層間変形角

(d) 最大層せん断力　(e) 最大層せん断力係数　(f) 最大転倒モーメント

図 4.37　最大応答値（レベル 2、Y 方向、最小特性、回帰特性なし）

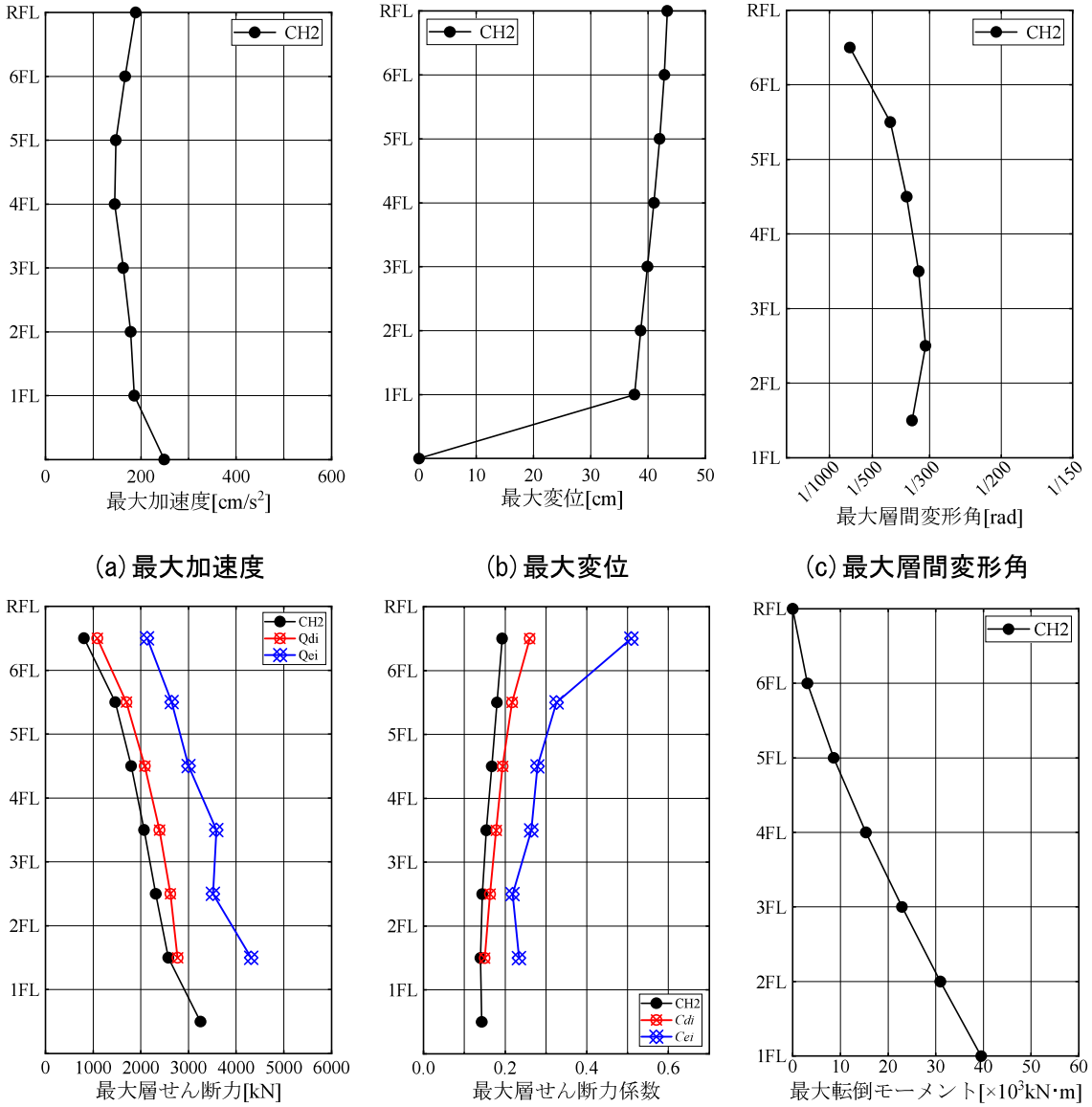


(a) 最大加速度　(b) 最大変位　(c) 最大層間変形角

(d) 最大層せん断力　(e) 最大層せん断力係数　(f) 最大転倒モーメント

図 4.38　最大応答値（レベル 2、Y 方向、最小特性、回帰特性あり）

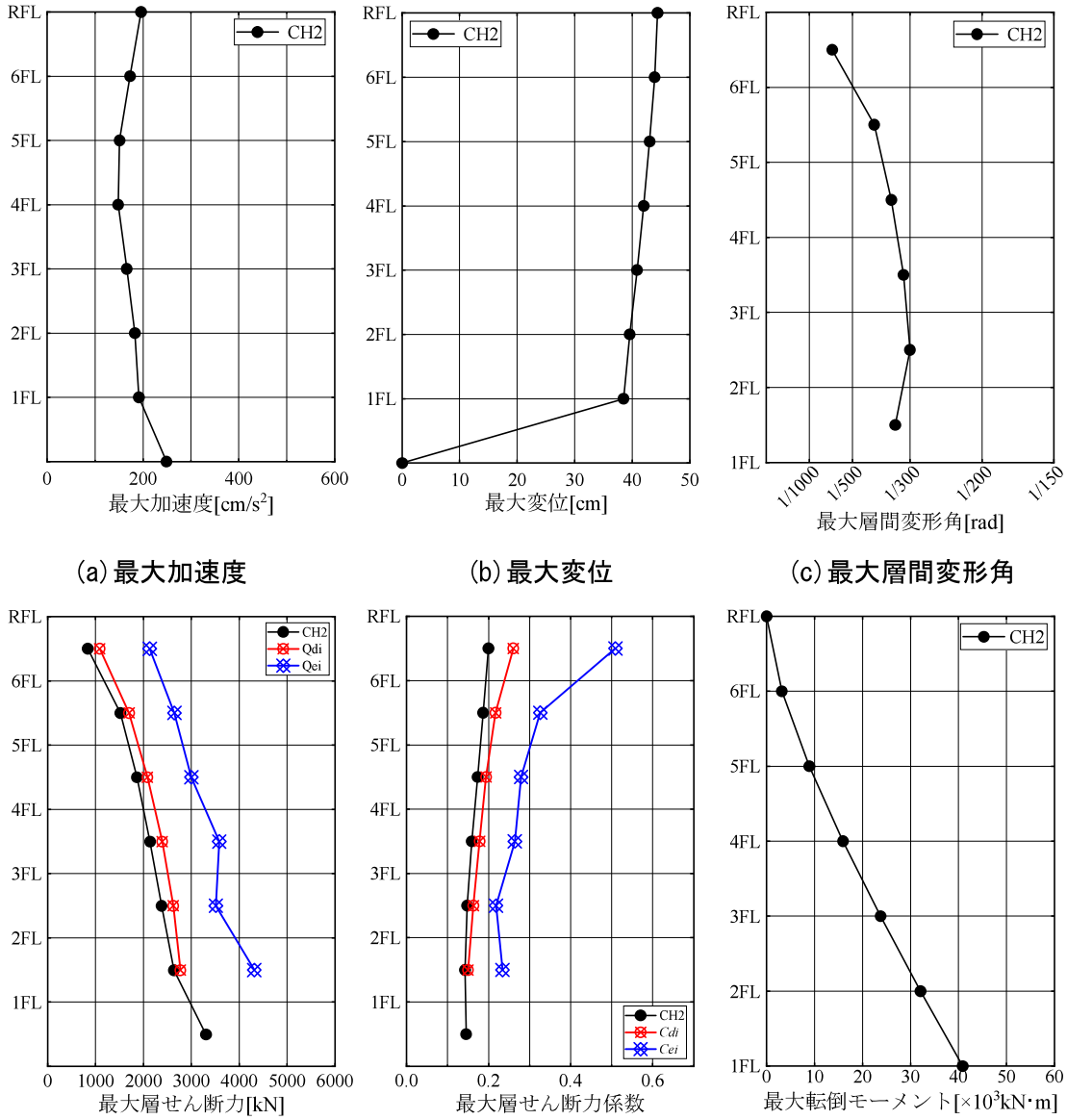
c) 長周期地震動(CH2)



(a)最大加速度　(b)最大変位　(c)最大層間変形角

(d)最大層せん断力　(e)最大層せん断力係数　(f)最大転倒モーメント

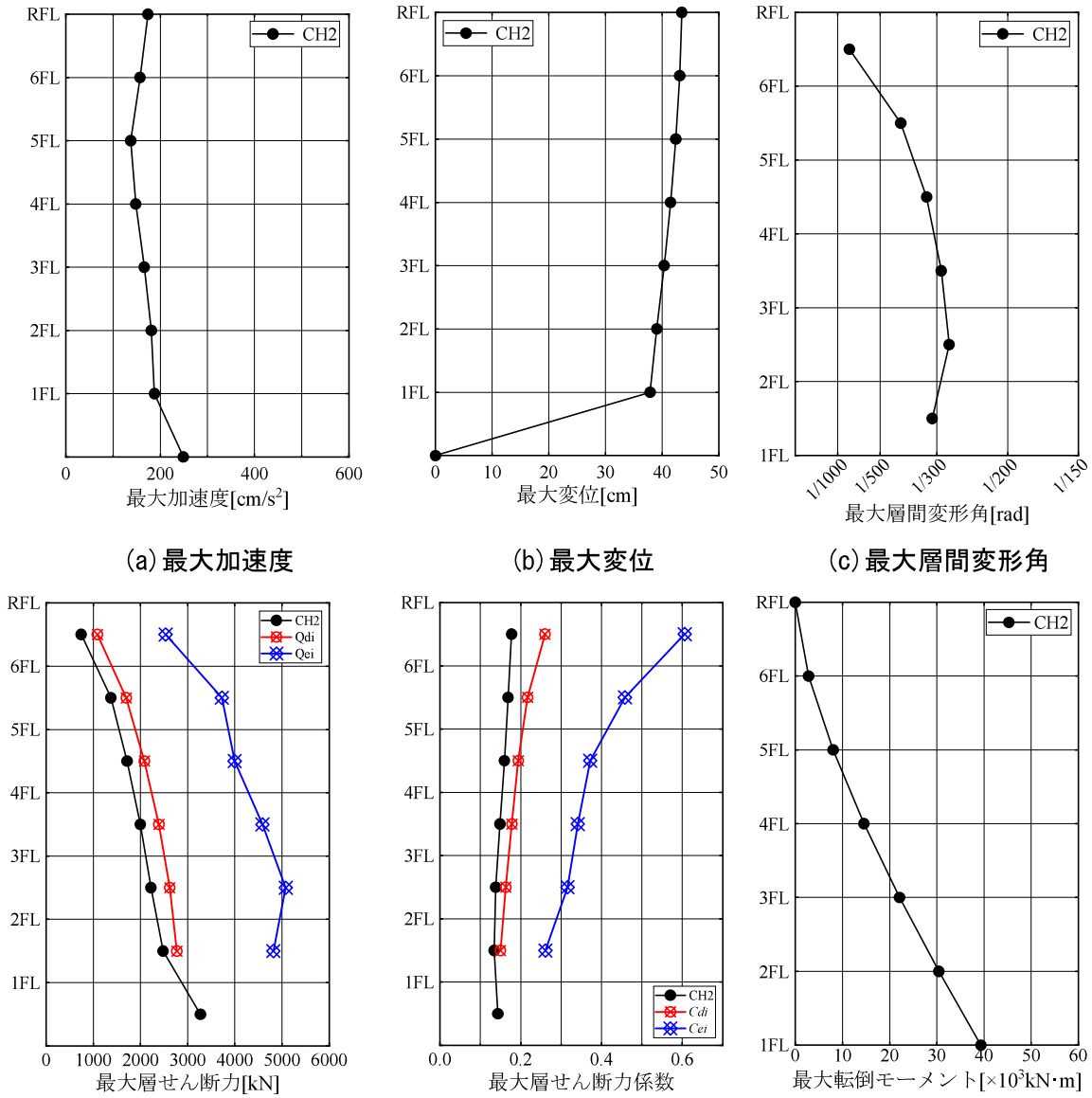
図 4.39　最大応答値(CH2、X 方向、最小特性、回帰特性なし)



(a) 最大加速度　(b) 最大変位　(c) 最大層間変形角

(d) 最大層せん断力　(e) 最大層せん断力係数　(f) 最大転倒モーメント

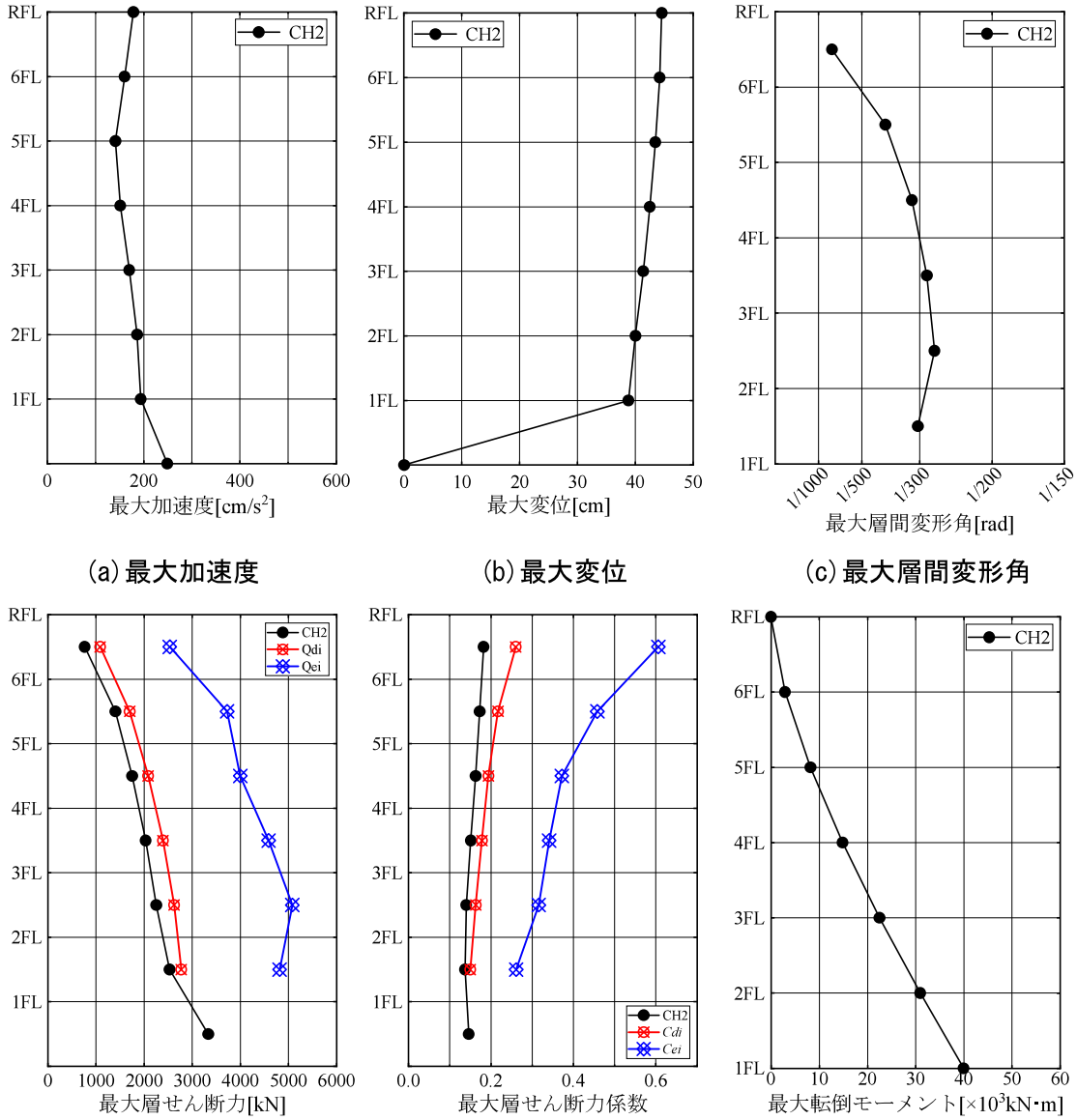
図 4.40　最大応答値(CH2、X 方向、最小特性、回帰特性あり)



(a) 最大加速度　(b) 最大変位　(c) 最大層間変形角

(d) 最大層せん断力　(e) 最大層せん断力係数　(f) 最大転倒モーメント

図 4.41　最大応答値(CH2、Y 方向、最小特性、回帰特性なし)



(a) 最大加速度　(b) 最大変位　(c) 最大層間変形角

(d) 最大層せん断力　(e) 最大層せん断力係数　(f) 最大転倒モーメント

図 4.42　最大応答値(CH2、Y 方向、最小特性、回帰特性あり)

d) 最大応答値一覧（最小特性）

最小特性時の最大応答値一覧を**表 4.16**～**表 4.19** に示す。

表 4.16　最大応答値一覧（X 方向、最小特性、回帰特性なし）

	X方向 最小特性													
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
加速度 [cm/s^2]	0	94.2	89.9	95.2	255.4	248.3	166.7	310.6	336.3	271.2	510.8	496.5	333.4	249.1
	1	40.5	28.5	32.6	101.1	58.5	45.2	206.2	171.5	165.0	201.1	113.9	125.8	186.1
	2	37.3	25.8	28.9	89.3	61.7	44.1	182.7	163.1	146.5	178.1	118.1	114.0	178.7
	3	30.6	27.3	26.5	67.2	54.0	59.9	143.4	136.8	125.1	134.9	107.9	102.5	162.7
	4	25.4	25.0	24.9	54.6	49.8	60.8	104.3	104.2	112.2	100.4	100.2	93.9	145.3
	5	27.6	28.8	28.5	58.1	50.6	44.7	115.9	88.0	111.0	116.4	98.5	89.3	147.3
	6	30.6	33.8	33.0	66.8	55.6	53.7	141.5	130.3	125.3	133.4	104.7	107.7	167.1
	R	45.0	39.2	44.8	106.8	85.7	67.7	200.8	173.2	183.4	213.2	161.1	135.5	189.0
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
速度 [cm/s]	0	11.6	16.1	12.2	25.0	25.0	25.0	52.3	57.9	56.5	50.0	50.0	50.0	29.2
	1	13.1	14.5	11.8	30.6	22.6	25.4	73.5	62.3	78.0	67.8	47.0	54.7	70.5
	2	13.7	15.4	12.5	32.1	24.2	26.3	74.8	63.1	79.2	68.9	49.1	55.5	70.4
	3	14.3	16.8	13.6	33.5	26.5	27.0	76.1	63.8	80.1	69.8	52.9	55.5	70.6
	4	14.8	18.2	14.9	34.4	28.6	27.4	76.7	65.6	80.3	70.6	57.3	54.3	71.2
	5	15.7	19.3	16.1	34.7	30.5	29.2	76.6	70.1	79.6	70.9	61.3	58.4	74.0
	6	16.4	20.1	17.3	34.5	32.1	30.1	77.1	75.1	78.6	70.6	64.7	60.8	78.1
	R	16.8	20.4	18.1	33.9	32.8	29.9	80.0	78.2	78.0	69.5	66.5	60.6	81.4
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
変位 [cm]	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1	4.77	5.04	4.34	8.17	7.73	8.56	24.40	20.73	22.22	17.86	15.87	17.33	37.62
	2	4.90	5.14	4.47	8.40	8.01	8.80	25.22	21.25	22.92	18.43	16.46	17.73	38.69
	3	5.05	5.25	4.61	8.66	8.39	9.08	26.19	21.80	23.76	19.11	17.19	18.17	39.91
	4	5.20	5.35	4.75	8.94	8.77	9.35	27.13	22.27	24.59	19.78	17.88	18.68	41.04
	5	5.33	5.45	4.87	9.21	9.10	9.63	27.97	22.65	25.31	20.39	18.47	19.25	42.02
	6	5.45	5.53	5.00	9.44	9.38	9.91	28.67	22.96	25.91	20.89	18.95	19.81	42.85
	R	5.53	5.58	5.13	9.57	9.54	10.10	29.07	23.12	26.25	21.20	19.22	20.20	43.34
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
層間 変形角 [rad]	2	1/2138	1/2339	1/2172	1/1280	1/1074	1/1245	1/459	1/562	1/460	1/601	1/566	1/622	1/342
	3	1/1839	1/1771	1/1746	1/987	1/922	1/1086	1/390	1/482	1/404	1/493	1/499	1/542	1/309
	4	1/1982	1/1693	1/1692	1/955	1/971	1/1087	1/403	1/460	1/434	1/478	1/540	1/542	1/325
	5	1/1870	1/1816	1/1741	1/875	1/1016	1/1100	1/412	1/449	1/467	1/438	1/547	1/549	1/357
	6	1/1937	1/2068	1/1900	1/858	1/1031	1/1203	1/437	1/485	1/495	1/430	1/571	1/601	1/414
	R	1/2853	1/3265	1/2864	1/1202	1/1498	1/1892	1/639	1/740	1/700	1/602	1/797	1/946	1/678
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
Q [kN]	1	423.1	418.1	385.3	856.2	882.4	804.0	2107.5	1986.8	2131.3	1812.7	1745.1	1608.1	3251.7
	2	412.0	376.7	405.4	689.0	820.3	707.2	1918.9	1566.2	1914.3	1465.9	1556.5	1415.4	2576.0
	3	388.7	403.8	409.2	724.8	775.5	658.2	1830.4	1481.7	1767.4	1450.2	1433.0	1318.0	2313.6
	4	338.5	396.7	396.7	702.6	691.2	617.5	1666.2	1458.3	1546.3	1403.3	1242.8	1239.3	2067.8
	5	343.7	353.9	369.0	734.7	633.0	584.3	1561.9	1430.3	1375.5	1466.1	1174.4	1171.8	1798.2
	6	313.1	293.2	319.0	707.2	588.2	504.0	1386.9	1251.4	1225.3	1411.2	1062.2	1009.1	1463.4
	R	191.7	167.3	190.9	455.4	365.2	288.7	856.0	738.5	781.9	908.7	686.7	577.5	805.8
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
Ci [-]	1	0.019	0.018	0.017	0.038	0.039	0.035	0.092	0.087	0.094	0.080	0.077	0.071	0.143
	2	0.022	0.020	0.022	0.037	0.044	0.038	0.104	0.085	0.104	0.079	0.084	0.077	0.140
	3	0.024	0.025	0.025	0.045	0.048	0.041	0.114	0.092	0.110	0.090	0.089	0.082	0.144
	4	0.025	0.030	0.030	0.052	0.051	0.046	0.124	0.109	0.115	0.104	0.093	0.092	0.154
	5	0.032	0.033	0.034	0.068	0.059	0.054	0.145	0.133	0.128	0.136	0.109	0.109	0.167
	6	0.039	0.036	0.039	0.087	0.072	0.062	0.171	0.154	0.151	0.174	0.131	0.124	0.180
	R	0.046	0.040	0.046	0.109	0.087	0.069	0.205	0.177	0.187	0.217	0.164	0.138	0.193
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
転倒 モーメント [kN・m]	1	6733	7391	7741	14512	13335	12064	32348	28703	30347	28975	24566	24300	39524
	2	5658	5986	6287	12194	10502	9802	25926	23792	23302	24337	19990	19707	30983
	3	4492	4493	4803	9793	8327	7531	20418	18507	18098	19541	15520	15112	22903
	4	3222	3058	3329	7194	6028	5229	14452	12974	12805	14355	11038	10477	15346
	5	1917	1750	1936	4407	3623	3011	8521	7553	7624	8794	6636	6026	8601
	6	728	636	725	1731	1388	1097	3253	2806	2971	3453	2609	2194	3062
	R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 4.17　最大応答値一覧（X 方向、最小特性、回帰特性あり）

	X方向													
	最小特性													
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
加速度 [cm/s^2]	0	94.2	89.9	95.2	255.4	248.3	166.7	310.6	336.3	271.2	510.8	496.5	333.4	249.1
	1	40.5	28.5	32.6	101.1	58.5	45.2	205.8	165.9	163.6	201.1	113.8	125.7	191.4
	2	37.3	25.8	28.9	89.3	61.7	44.1	182.4	159.8	146.0	178.1	117.6	114.0	183.2
	3	30.6	27.3	26.5	67.2	54.0	59.9	143.1	137.1	118.9	134.9	107.0	102.5	166.0
	4	25.4	25.0	24.9	54.6	49.8	60.8	101.9	104.1	110.3	100.5	99.6	93.9	148.1
	5	27.6	28.8	28.5	58.1	50.6	44.7	116.0	88.8	112.3	116.4	97.7	89.3	151.2
	6	30.6	33.8	33.0	66.8	55.6	53.7	140.9	130.1	124.2	133.4	104.0	107.7	172.9
	R	45.0	39.2	44.8	106.8	85.7	67.7	200.5	166.2	176.7	213.2	160.2	135.5	196.0
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
速度 [cm/s]	0	11.6	16.1	12.2	25.0	25.0	25.0	52.3	57.9	56.5	50.0	50.0	50.0	29.2
	1	13.1	14.5	11.8	30.6	22.6	25.4	73.5	61.9	78.0	67.8	47.1	54.7	70.3
	2	13.7	15.4	12.5	32.1	24.2	26.3	75.0	62.7	79.3	68.9	49.2	55.5	70.6
	3	14.3	16.8	13.6	33.5	26.5	27.0	76.3	63.5	80.2	69.8	53.0	55.5	70.6
	4	14.8	18.2	14.9	34.4	28.6	27.4	76.9	65.9	80.4	70.6	57.4	54.3	72.5
	5	15.7	19.3	16.1	34.7	30.5	29.2	76.8	70.5	79.9	71.0	61.4	58.4	76.1
	6	16.4	20.1	17.3	34.5	32.1	30.1	77.2	75.1	78.9	70.6	64.7	60.8	79.7
	R	16.8	20.4	18.1	33.9	32.8	29.9	80.1	77.9	78.5	69.5	66.4	60.6	83.1
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
変位 [cm]	1	4.8	5.0	4.3	8.2	7.7	8.6	24.5	20.9	22.6	17.9	15.9	17.3	38.5
	2	4.9	5.1	4.5	8.4	8.0	8.8	25.3	21.4	23.3	18.4	16.5	17.7	39.6
	3	5.1	5.3	4.6	8.7	8.4	9.1	26.3	21.9	24.2	19.1	17.2	18.2	40.8
	4	5.2	5.4	4.8	8.9	8.8	9.4	27.2	22.4	25.0	19.8	17.9	18.7	42.0
	5	5.3	5.5	4.9	9.2	9.1	9.6	28.1	22.8	25.7	20.4	18.5	19.2	43.0
	6	5.5	5.5	5.0	9.4	9.4	9.9	28.8	23.1	26.3	20.9	18.9	19.8	43.9
	R	5.5	5.6	5.1	9.6	9.5	10.1	29.2	23.3	26.7	21.2	19.2	20.2	44.4
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
層間変形角 [rad]	2	1/2138	1/2339	1/2172	1/1280	1/1074	1/1245	1/457	1/560	1/454	1/601	1/566	1/622	1/334
	3	1/1839	1/1771	1/1746	1/987	1/922	1/1086	1/389	1/481	1/399	1/493	1/499	1/542	1/300
	4	1/1982	1/1693	1/1692	1/955	1/971	1/1087	1/402	1/460	1/429	1/478	1/541	1/542	1/314
	5	1/1870	1/1816	1/1741	1/875	1/1016	1/1100	1/412	1/454	1/478	1/438	1/549	1/549	1/345
	6	1/1937	1/2068	1/1900	1/858	1/1031	1/1203	1/438	1/496	1/509	1/430	1/573	1/601	1/399
	R	1/2853	1/3265	1/2864	1/1202	1/1498	1/1892	1/640	1/771	1/726	1/602	1/801	1/946	1/654
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
Q [kN]	1	423.1	418.1	385.3	856.2	882.4	804.0	2110.3	1982.5	2165.5	1812.7	1745.1	1608.1	3307.2
	2	412.0	376.7	405.4	689.0	820.3	707.2	1925.5	1570.8	1940.7	1465.7	1556.5	1415.4	2635.5
	3	388.7	403.8	409.2	724.8	775.5	658.2	1836.0	1485.4	1788.6	1450.2	1433.0	1318.0	2380.5
	4	338.5	396.7	396.7	702.6	691.2	617.5	1671.3	1460.5	1563.0	1403.3	1239.7	1239.3	2137.4
	5	343.7	353.9	369.0	734.7	633.0	584.3	1560.5	1414.8	1345.1	1466.1	1169.6	1171.8	1863.2
	6	313.1	293.2	319.0	707.2	588.2	504.0	1385.2	1221.8	1191.7	1411.2	1058.3	1009.1	1517.2
	R	191.7	167.3	190.9	455.4	365.2	288.7	854.6	708.7	753.2	908.7	682.8	577.5	835.3
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
Ci [-]	1	0.019	0.018	0.017	0.038	0.039	0.035	0.093	0.087	0.095	0.080	0.077	0.071	0.145
	2	0.022	0.020	0.022	0.037	0.044	0.038	0.104	0.085	0.105	0.079	0.084	0.077	0.143
	3	0.024	0.025	0.025	0.045	0.048	0.041	0.114	0.092	0.111	0.090	0.089	0.082	0.148
	4	0.025	0.030	0.030	0.052	0.051	0.046	0.124	0.109	0.116	0.104	0.092	0.092	0.159
	5	0.032	0.033	0.034	0.068	0.059	0.054	0.145	0.132	0.125	0.136	0.109	0.109	0.173
	6	0.039	0.036	0.039	0.087	0.072	0.062	0.170	0.150	0.147	0.174	0.130	0.124	0.187
	R	0.046	0.040	0.046	0.109	0.087	0.069	0.204	0.170	0.180	0.217	0.163	0.138	0.200
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
転倒モーメント [kN･m]	1	6733	7391	7741	14512	13335	12064	32457	28545	30710	28975	24459	24300	40880
	2	5658	5986	6287	12194	10502	9802	25905	23565	23338	24337	19904	19707	32095
	3	4492	4493	4803	9793	8327	7531	20399	18224	17675	19541	15458	15112	23746
	4	3222	3058	3329	7194	6028	5229	14436	12685	12463	14355	10994	10477	15916
	5	1917	1750	1936	4407	3623	3011	8509	7326	7389	8794	6607	6026	8920
	6	728	636	725	1731	1388	1097	3248	2693	2862	3453	2595	2194	3174
	R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 4.18　最大応答値一覧（Y 方向、最小特性、回帰特性なし）

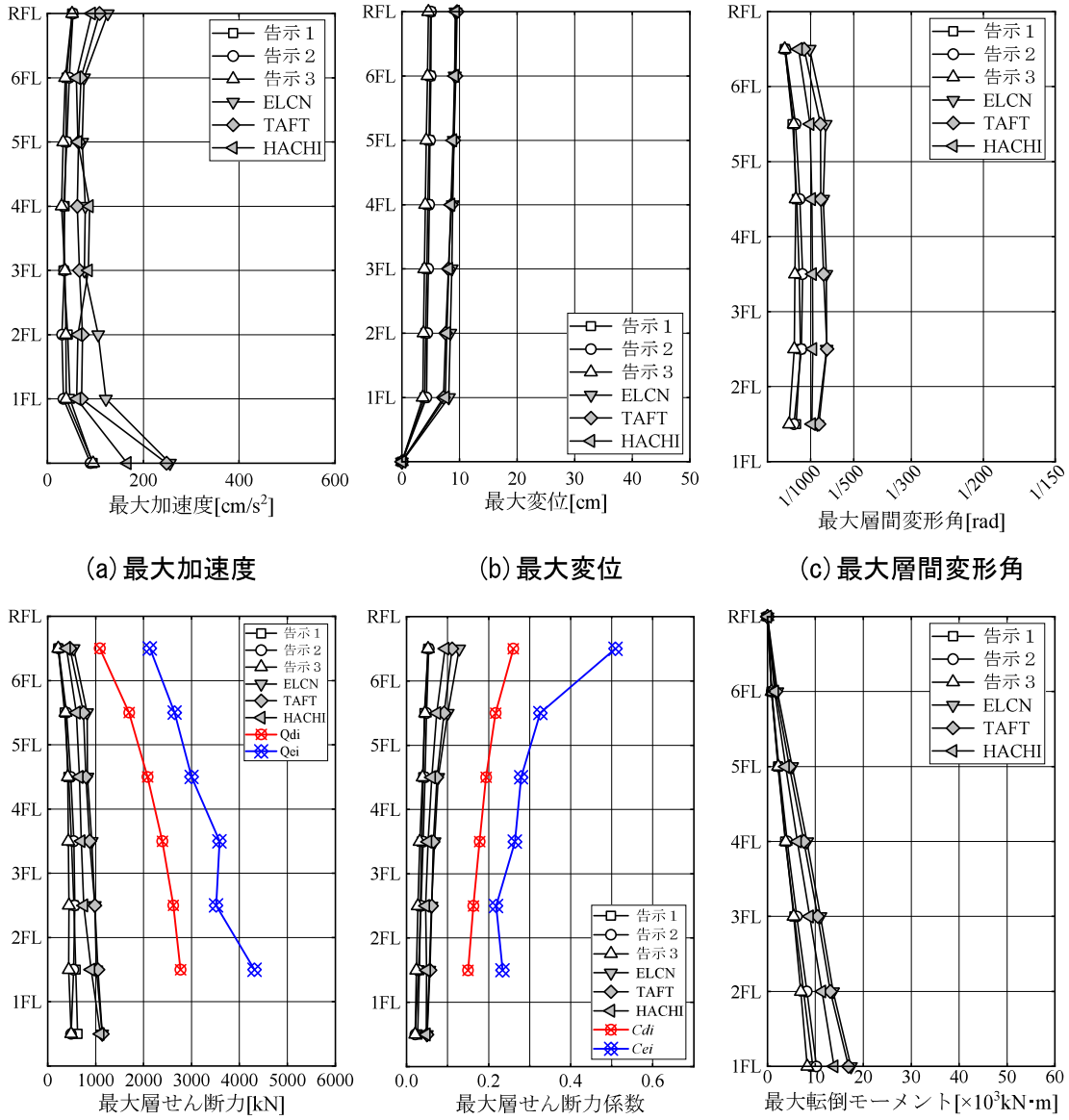
		Y方向												
		最小特性												
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
加速度 [cm/s^2]	0	94.2	89.9	95.2	255.4	248.3	166.7	310.6	336.3	271.2	510.8	496.5	333.4	249.1
	1	41.3	28.5	39.1	105.5	60.0	47.2	202.7	169.7	174.5	209.7	114.1	127.5	187.9
	2	39.0	26.9	30.6	95.4	60.5	43.5	188.7	167.4	160.0	190.0	115.7	120.5	181.1
	3	32.4	28.2	28.7	72.2	57.8	60.4	153.7	141.5	138.9	145.1	116.1	108.6	166.1
	4	26.2	26.5	26.6	57.5	50.7	64.1	103.8	104.3	116.3	96.1	101.9	98.4	148.0
	5	27.7	30.0	27.8	61.1	51.8	45.2	108.4	95.5	112.0	122.6	98.2	90.4	137.4
	6	29.7	36.5	34.2	62.9	59.5	55.0	139.8	145.0	120.2	125.6	113.3	110.4	157.2
	R	42.1	43.5	46.7	98.7	86.4	67.8	192.1	185.5	177.1	197.2	162.3	135.6	174.0
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
速度 [cm/s]	0	11.6	16.1	12.2	25.0	25.0	25.0	52.3	57.9	56.5	50.0	50.0	50.0	29.2
	1	12.7	13.3	11.6	29.9	22.2	25.8	72.1	59.4	77.0	65.4	46.5	55.9	70.3
	2	13.4	14.6	12.4	31.6	23.8	26.8	72.3	59.7	78.5	67.0	48.1	56.8	70.7
	3	14.1	16.4	13.7	33.4	26.5	27.6	72.3	60.9	79.8	68.8	53.0	56.9	70.8
	4	14.9	18.2	15.0	34.6	29.1	27.7	75.1	65.4	80.3	70.6	58.2	55.2	71.4
	5	16.1	19.7	16.3	35.1	31.1	29.8	77.4	72.1	80.0	71.8	62.6	59.5	74.1
	6	17.0	20.7	17.4	35.1	32.5	30.7	79.6	78.2	79.8	71.9	65.5	61.8	77.4
	R	17.3	21.2	18.1	34.7	33.0	30.5	81.8	81.3	80.3	71.2	66.7	61.7	79.2
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
変位 [cm]	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1	4.81	5.06	4.35	8.19	7.59	8.50	24.31	20.79	22.12	17.55	15.60	17.13	37.88
	2	4.95	5.18	4.49	8.43	7.93	8.78	25.15	21.38	22.94	18.18	16.28	17.55	39.07
	3	5.13	5.30	4.66	8.71	8.37	9.11	26.10	22.01	23.95	18.93	17.15	18.18	40.37
	4	5.29	5.40	4.81	8.99	8.82	9.44	26.99	22.55	24.92	19.66	17.97	18.86	41.49
	5	5.45	5.52	4.95	9.26	9.21	9.79	27.76	22.99	25.77	20.30	18.67	19.57	42.41
	6	5.57	5.62	5.14	9.49	9.52	10.11	28.37	23.33	26.43	20.81	19.20	20.22	43.12
	R	5.64	5.67	5.26	9.61	9.67	10.29	28.68	23.50	26.75	21.08	19.46	20.59	43.47
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
層間 変形角 [rad]	2	1/1886	1/2054	1/2001	1/1165	1/949	1/1098	1/452	1/485	1/408	1/555	1/496	1/548	1/310
	3	1/1565	1/1477	1/1559	1/847	1/795	1/942	1/389	1/392	1/352	1/424	1/425	1/461	1/276
	4	1/1671	1/1381	1/1473	1/827	1/839	1/946	1/370	1/357	1/382	1/414	1/449	1/471	1/291
	5	1/1702	1/1435	1/1455	1/805	1/848	1/942	1/359	1/351	1/408	1/404	1/444	1/470	1/323
	6	1/1857	1/1704	1/1647	1/833	1/911	1/1084	1/406	1/404	1/455	1/417	1/492	1/541	1/403
	R	1/3251	1/3140	1/2928	1/1386	1/1583	1/2014	1/712	1/737	1/773	1/694	1/843	1/1007	1/784
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
Q [kN]	1	406.4	413.7	373.7	870.0	868.2	797.1	2148.1	2007.2	2122.9	1801.2	1723.4	1594.3	3271.8
	2	407.6	374.3	384.1	660.9	809.6	700.2	1701.0	1583.4	1885.0	1385.3	1551.7	1401.9	2479.4
	3	392.1	415.7	393.5	725.4	771.8	651.8	1578.4	1566.8	1743.0	1451.1	1444.7	1331.8	2221.8
	4	347.7	421.0	394.5	702.8	692.6	614.1	1569.0	1627.9	1521.6	1403.6	1294.0	1232.9	1997.2
	5	326.4	387.1	381.6	689.7	655.3	589.6	1549.3	1583.6	1362.0	1376.1	1250.9	1182.6	1716.0
	6	297.9	324.4	335.7	664.5	607.4	510.3	1363.1	1370.1	1215.8	1326.4	1124.3	1021.8	1371.7
	R	179.3	185.5	199.0	420.9	368.1	289.1	819.1	790.6	754.8	840.5	691.7	578.3	741.8
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
Ci [-]	1	0.018	0.018	0.016	0.038	0.038	0.035	0.094	0.088	0.093	0.079	0.076	0.070	0.144
	2	0.022	0.020	0.021	0.036	0.044	0.038	0.092	0.086	0.102	0.075	0.084	0.076	0.134
	3	0.024	0.026	0.024	0.045	0.048	0.041	0.098	0.097	0.108	0.090	0.090	0.083	0.138
	4	0.026	0.031	0.029	0.052	0.052	0.046	0.117	0.121	0.113	0.104	0.096	0.092	0.149
	5	0.030	0.036	0.036	0.064	0.061	0.055	0.144	0.147	0.127	0.128	0.116	0.110	0.160
	6	0.037	0.040	0.041	0.082	0.075	0.063	0.168	0.169	0.150	0.163	0.138	0.126	0.169
	R	0.043	0.044	0.048	0.101	0.088	0.069	0.196	0.189	0.181	0.201	0.165	0.138	0.177
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
転倒 モーメント [kN･m]	1	6577	7839	7759	13978	13248	11954	30104	31793	29593	27907	25518	24093	39337
	2	5362	6454	6392	11588	10804	9770	25185	26329	22704	23125	20922	19651	30432
	3	4253	4929	4958	9206	8561	7559	20005	20404	17817	18371	16318	15171	22094
	4	3053	3378	3479	6741	6197	5275	14158	14219	12629	13454	11602	10569	14540
	5	1813	1931	2031	4120	3707	3037	8285	8208	7485	8224	6891	6079	8029
	6	681	705	756	1600	1399	1098	3113	3004	2868	3194	2628	2197	2819
	R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 4.19　最大応答値一覧（Y 方向、最小特性、回帰特性あり）

		Y方向												
		最小特性												
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
加速度 [cm/s^2]	0	94.2	89.9	95.2	255.4	248.3	166.7	310.6	336.3	271.2	510.8	496.5	333.4	249.1
	1	41.3	28.5	39.1	105.5	60.0	47.2	202.2	167.9	172.7	209.7	114.1	127.3	193.9
	2	39.0	26.9	30.6	95.4	60.5	43.5	188.3	162.4	160.7	190.0	115.5	120.5	186.4
	3	32.4	28.2	28.7	72.2	57.8	60.4	153.4	140.7	140.6	145.1	116.0	108.6	170.0
	4	26.2	26.5	26.6	57.5	50.7	64.1	103.7	104.4	114.0	96.1	101.9	98.4	151.5
	5	27.7	30.0	27.8	61.1	51.8	45.2	102.8	96.1	113.5	122.6	97.7	90.4	141.5
	6	29.7	36.5	34.2	62.9	59.5	55.0	135.2	144.0	117.4	125.6	112.6	110.4	160.3
	R	42.1	43.5	46.7	98.7	86.4	67.8	188.2	179.3	170.5	197.2	161.4	135.6	178.6
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
速度 [cm/s]	0	11.6	16.1	12.2	25.0	25.0	25.0	52.3	57.9	56.5	50.0	50.0	50.0	29.2
	1	12.7	13.3	11.6	29.9	22.2	25.8	72.1	58.7	77.0	65.4	46.5	55.9	72.5
	2	13.4	14.6	12.4	31.6	23.8	26.8	72.3	59.1	78.6	67.0	48.3	56.8	72.8
	3	14.1	16.4	13.7	33.4	26.5	27.6	72.4	60.6	79.8	68.8	53.2	56.9	72.4
	4	14.9	18.2	15.0	34.6	29.1	27.7	75.3	65.6	80.4	70.6	58.4	55.2	73.6
	5	16.1	19.7	16.3	35.1	31.1	29.8	77.6	72.2	80.2	71.8	62.6	59.5	76.5
	6	17.0	20.7	17.4	35.1	32.5	30.7	79.7	78.0	80.0	71.9	65.5	61.8	80.0
	R	17.3	21.2	18.1	34.7	33.0	30.5	81.9	80.9	80.6	71.2	66.6	61.7	81.9
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
変位 [cm]	1	4.8	5.1	4.3	8.2	7.6	8.5	24.4	21.0	22.5	17.6	15.6	17.1	38.8
	2	5.0	5.2	4.5	8.4	7.9	8.8	25.2	21.6	23.3	18.2	16.3	17.6	40.0
	3	5.1	5.3	4.7	8.7	8.4	9.1	26.2	22.2	24.3	18.9	17.2	18.2	41.4
	4	5.3	5.4	4.8	9.0	8.8	9.4	27.1	22.8	25.3	19.7	18.0	18.9	42.5
	5	5.4	5.5	4.9	9.3	9.2	9.8	27.9	23.2	26.2	20.3	18.7	19.6	43.5
	6	5.6	5.6	5.1	9.5	9.5	10.1	28.5	23.6	26.8	20.8	19.2	20.2	44.2
	R	5.6	5.7	5.3	9.6	9.7	10.3	28.8	23.7	27.2	21.1	19.5	20.6	44.6
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
層間 変形角 [rad]	2	1/1886	1/2054	1/2001	1/1165	1/949	1/1098	1/450	1/481	1/402	1/555	1/496	1/549	1/304
	3	1/1565	1/1477	1/1559	1/847	1/795	1/942	1/391	1/389	1/347	1/424	1/425	1/461	1/272
	4	1/1671	1/1381	1/1473	1/827	1/839	1/946	1/382	1/360	1/377	1/414	1/452	1/471	1/286
	5	1/1702	1/1435	1/1455	1/805	1/848	1/942	1/374	1/356	1/417	1/404	1/446	1/470	1/317
	6	1/1857	1/1704	1/1647	1/833	1/911	1/1084	1/418	1/413	1/468	1/417	1/494	1/541	1/394
	R	1/3251	1/3140	1/2928	1/1386	1/1583	1/2014	1/727	1/762	1/802	1/694	1/848	1/1007	1/764
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
Q [kN]	1	406.4	413.7	373.7	870.0	868.2	797.1	2156.8	1996.7	2154.0	1801.2	1723.4	1594.3	3332.3
	2	407.6	374.3	384.1	660.9	809.6	700.2	1708.1	1597.3	1912.8	1384.7	1551.7	1401.3	2528.9
	3	392.1	415.7	393.5	725.4	771.8	651.8	1569.9	1575.3	1767.5	1451.1	1444.7	1330.1	2252.7
	4	347.7	421.0	394.5	702.8	692.6	614.1	1521.4	1615.3	1541.7	1403.6	1286.1	1232.9	2030.4
	5	326.4	387.1	381.6	689.7	655.3	589.6	1487.0	1558.7	1331.2	1376.1	1244.9	1182.6	1750.2
	6	297.9	324.4	335.7	664.5	607.4	510.3	1323.8	1339.3	1180.9	1326.4	1119.6	1021.8	1403.4
	R	179.3	185.5	199.0	420.9	368.1	289.1	802.2	764.5	726.9	840.5	688.0	578.3	761.5
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
Ci [-]	1	0.018	0.018	0.016	0.038	0.038	0.035	0.095	0.088	0.095	0.079	0.076	0.070	0.146
	2	0.022	0.020	0.021	0.036	0.044	0.038	0.093	0.087	0.104	0.075	0.084	0.076	0.137
	3	0.024	0.026	0.024	0.045	0.048	0.041	0.098	0.098	0.110	0.090	0.090	0.083	0.140
	4	0.026	0.031	0.029	0.052	0.052	0.046	0.113	0.120	0.115	0.104	0.096	0.092	0.151
	5	0.030	0.036	0.036	0.064	0.061	0.055	0.138	0.145	0.124	0.128	0.116	0.110	0.163
	6	0.037	0.040	0.041	0.082	0.075	0.063	0.163	0.165	0.145	0.163	0.138	0.126	0.173
	R	0.043	0.044	0.048	0.101	0.088	0.069	0.192	0.183	0.174	0.201	0.165	0.138	0.182
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
転倒 モーメント [kN・m]	1	6577	7839	7759	13978	13248	11954	29034	31461	30021	27907	25402	24093	39960
	2	5362	6454	6392	11588	10804	9770	24272	25967	22827	23125	20824	19651	30975
	3	4253	4929	4958	9206	8561	7559	19244	20040	17387	18371	16244	15171	22536
	4	3053	3378	3479	6741	6197	5275	13705	13905	12280	13454	11551	10569	14863
	5	1813	1931	2031	4120	3707	3037	8079	7990	7247	8224	6859	6079	8224
	6	681	705	756	1600	1399	1098	3048	2905	2762	3194	2614	2197	2894
	R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4.4.3　最大特性の場合

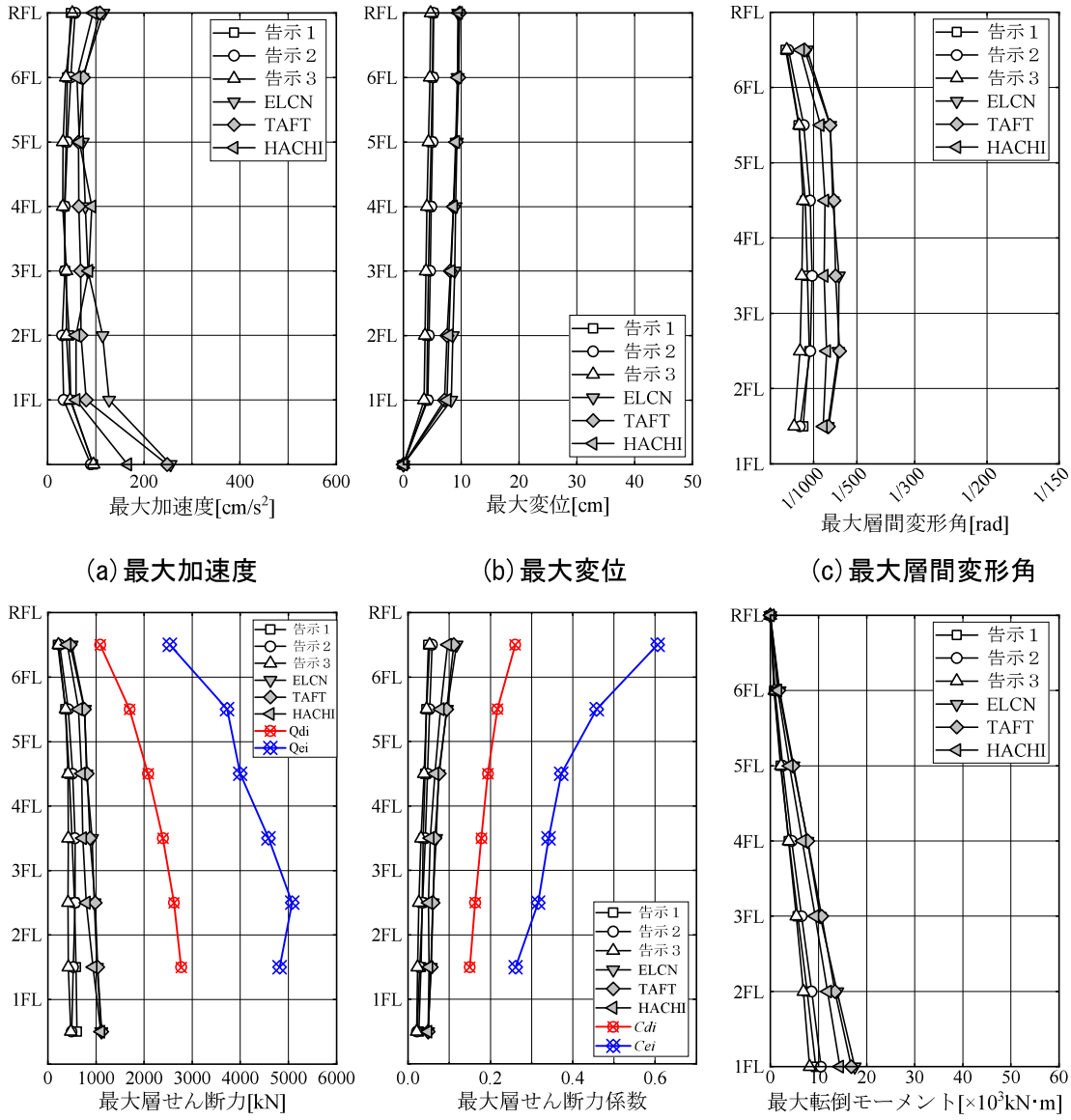
a) 稀に発生する地震動（レベル 1）



(a) 最大加速度　(b) 最大変位　(c) 最大層間変形角

(d) 最大層せん断力　(e) 最大層せん断力係数　(f) 最大転倒モーメント

図 4.43　最大応答値（レベル 1、X 方向、最大特性）

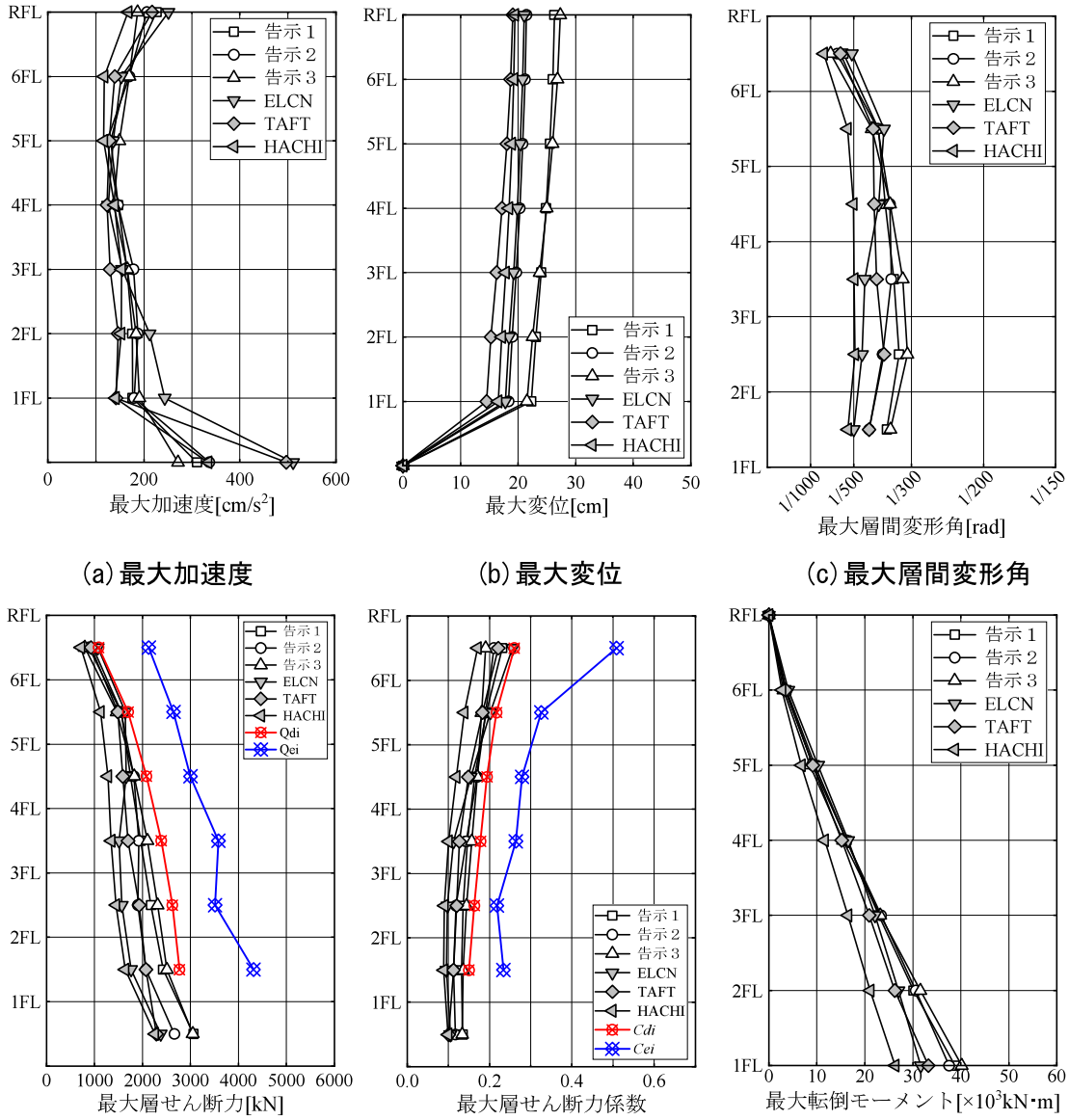


(a) 最大加速度　(b) 最大変位　(c) 最大層間変形角

(d) 最大層せん断力　(e) 最大層せん断力係数　(f) 最大転倒モーメント

図 4.44　最大応答値（レベル 1、Y 方向、最大特性）

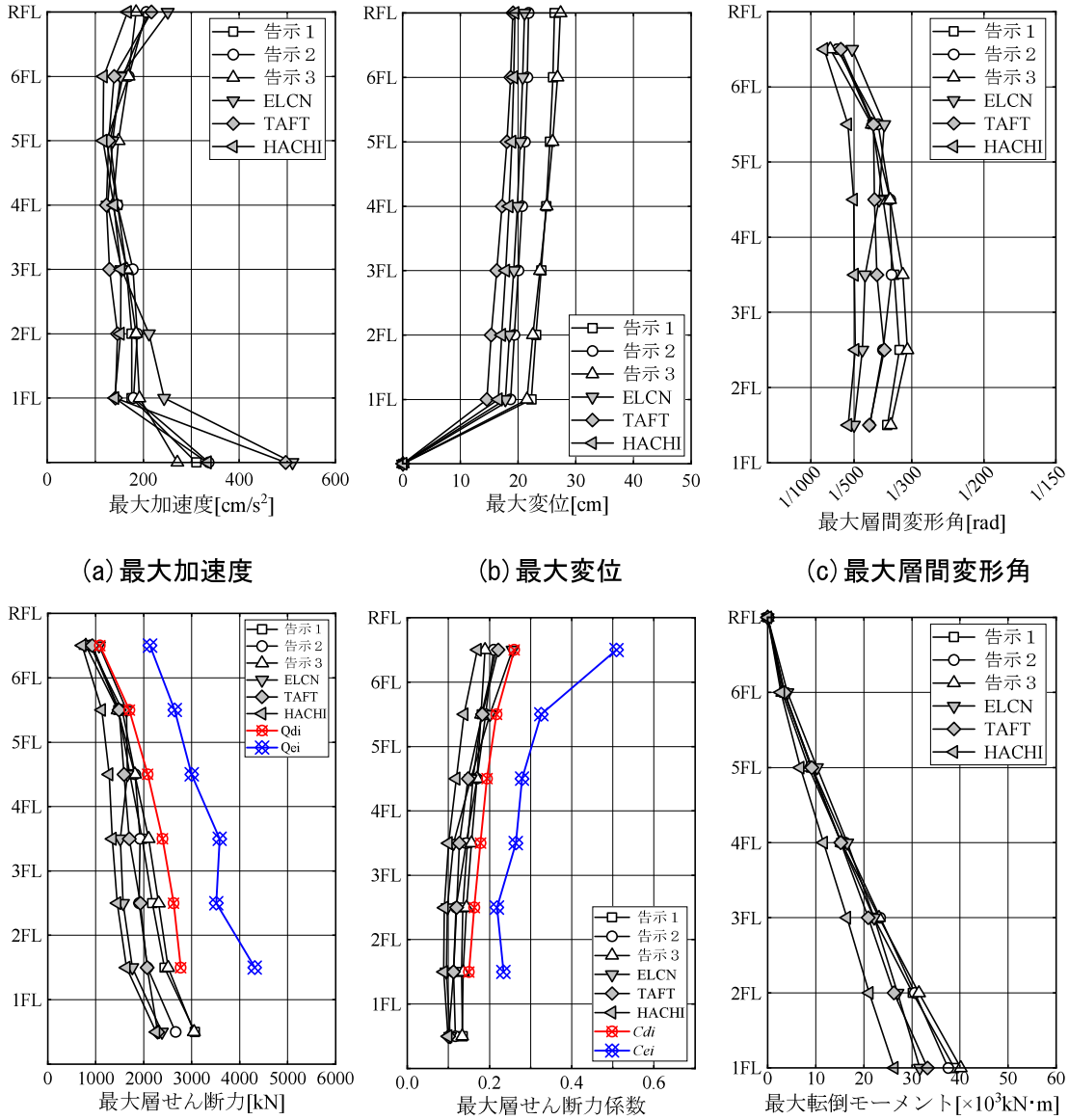
b) 極めて稀に発生する地震動（レベル 2）



(a) 最大加速度　(b) 最大変位　(c) 最大層間変形角

(d) 最大層せん断力　(e) 最大層せん断力係数　(f) 最大転倒モーメント

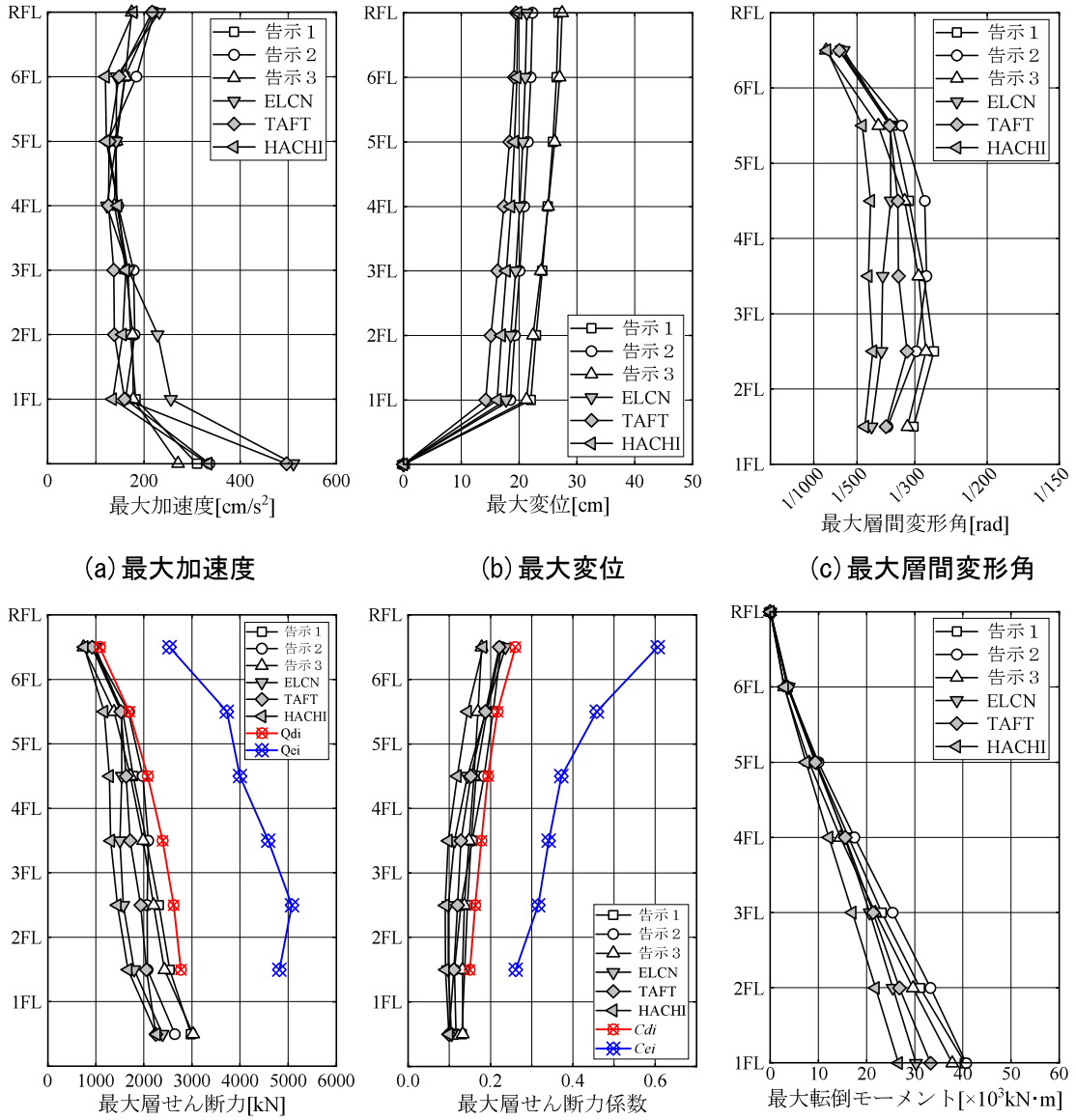
図 4.45　最大応答値（レベル 2、X 方向、最大特性、回帰特性なし）



(a) 最大加速度　(b) 最大変位　(c) 最大層間変形角

(d) 最大層せん断力　(e) 最大層せん断力係数　(f) 最大転倒モーメント

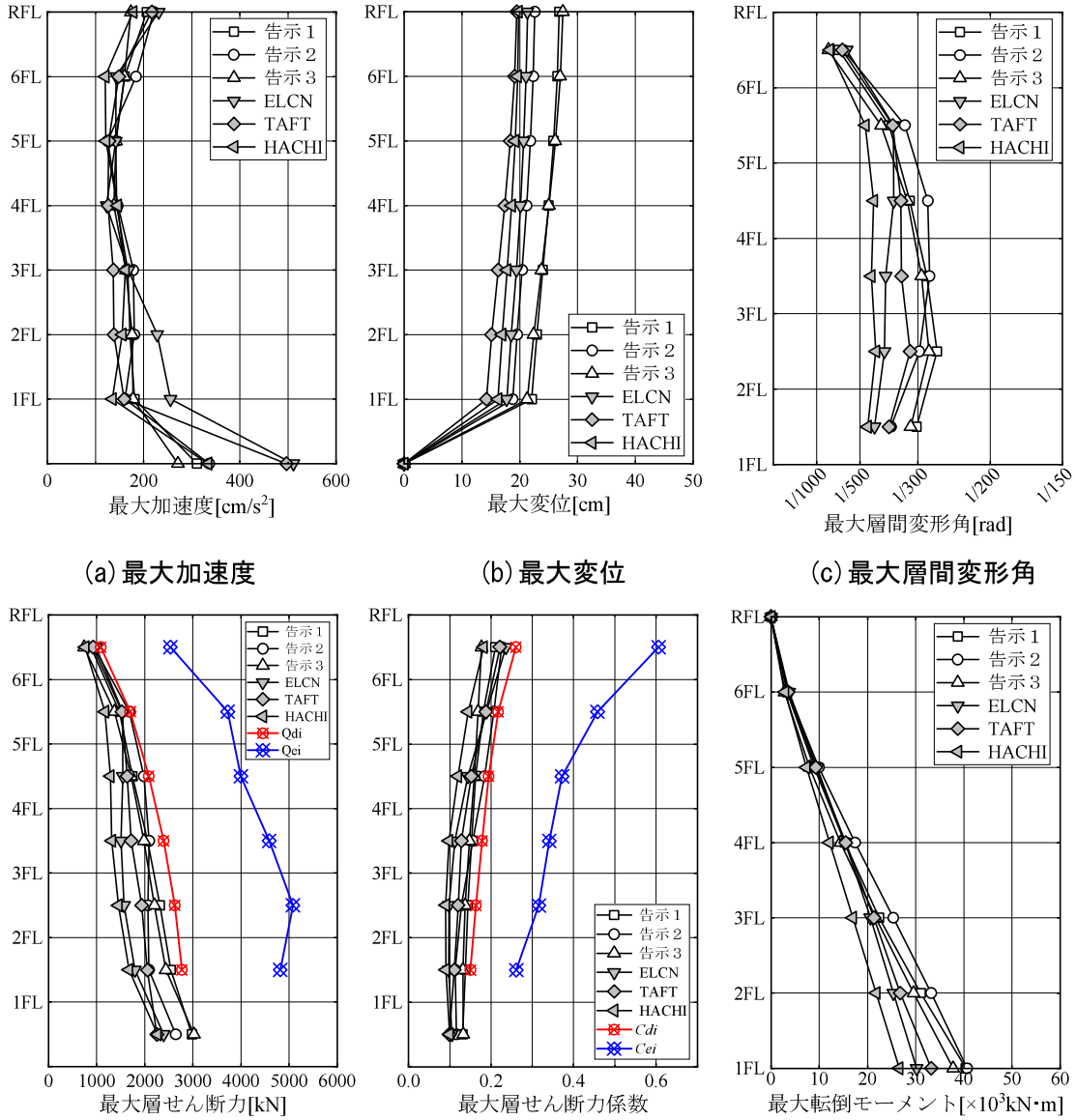
図 4.46　最大応答値（レベル 2、X 方向、最大特性、回帰特性あり）



(a) 最大加速度　(b) 最大変位　(c) 最大層間変形角

(d) 最大層せん断力　(e) 最大層せん断力係数　(f) 最大転倒モーメント

図 4.47　最大応答値（レベル 2、Y 方向、最大特性、回帰特性なし）

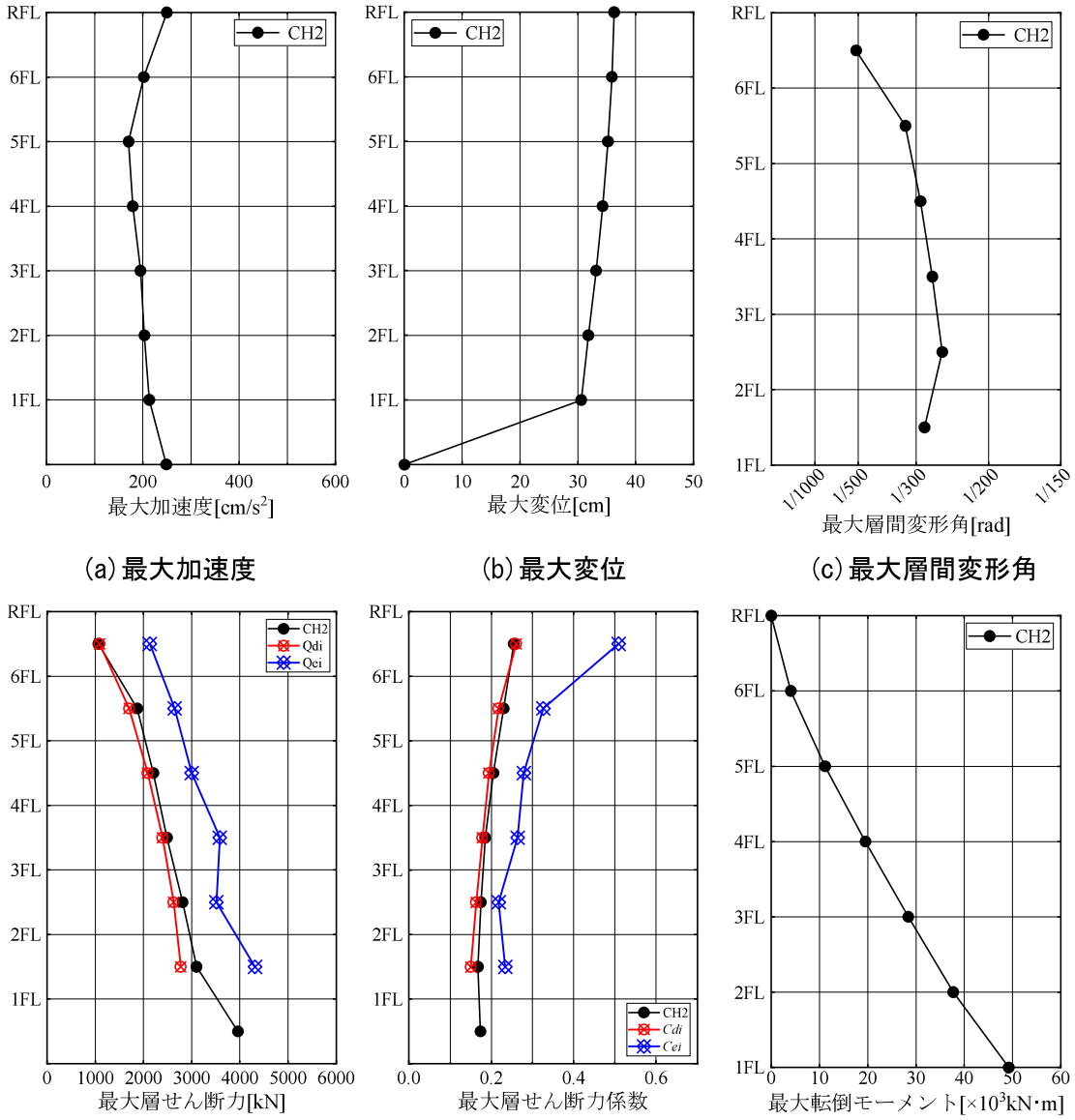


(a) 最大加速度　(b) 最大変位　(c) 最大層間変形角

(d) 最大層せん断力　(e) 最大層せん断力係数　(f) 最大転倒モーメント

図 4.48　最大応答値（レベル 2、Y 方向、最大特性、回帰特性あり）

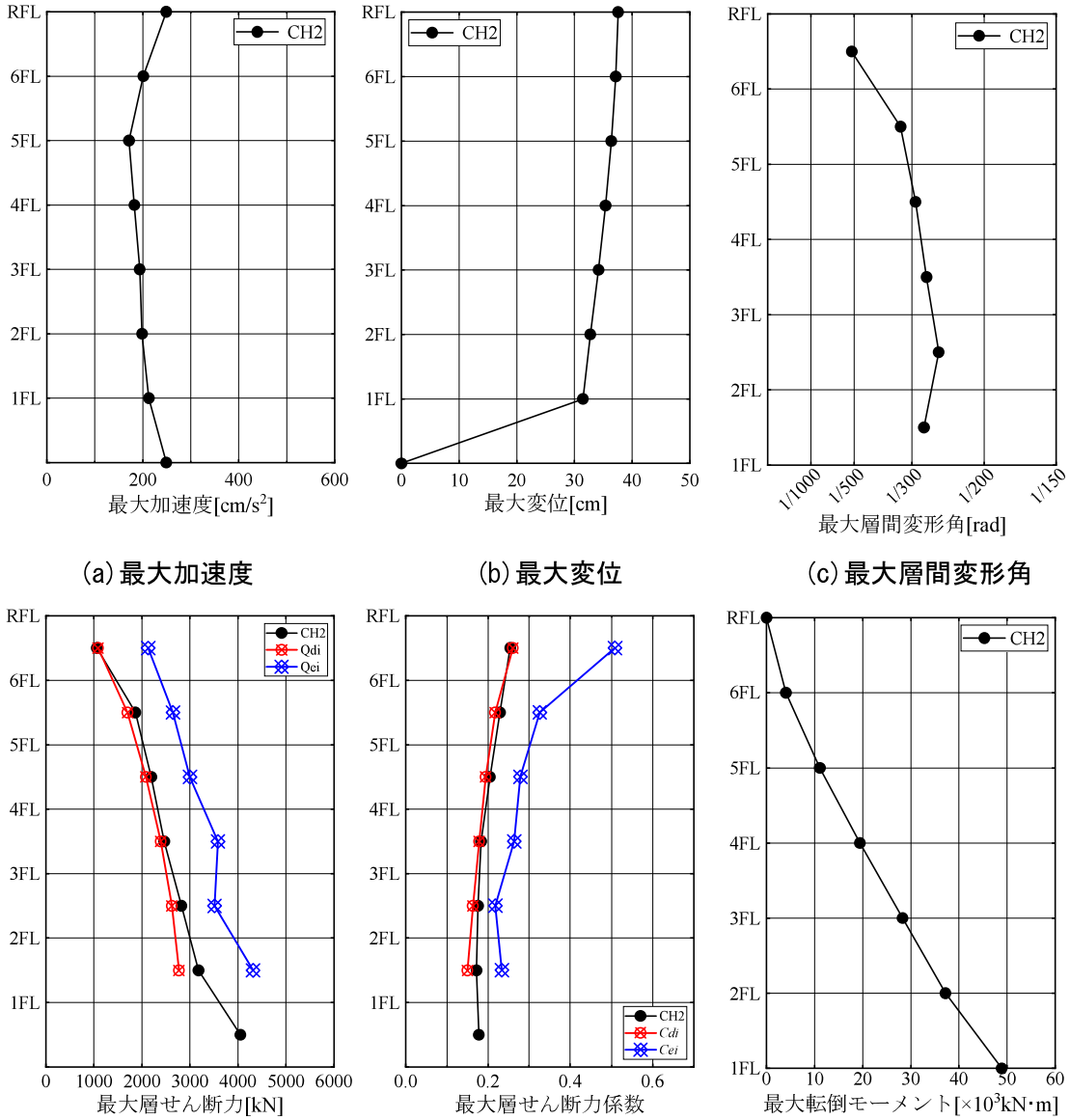
c) 長周期地震動(CH2)



(a)最大加速度　(b)最大変位　(c)最大層間変形角

(d)最大層せん断力　(e)最大層せん断力係数　(f)最大転倒モーメント

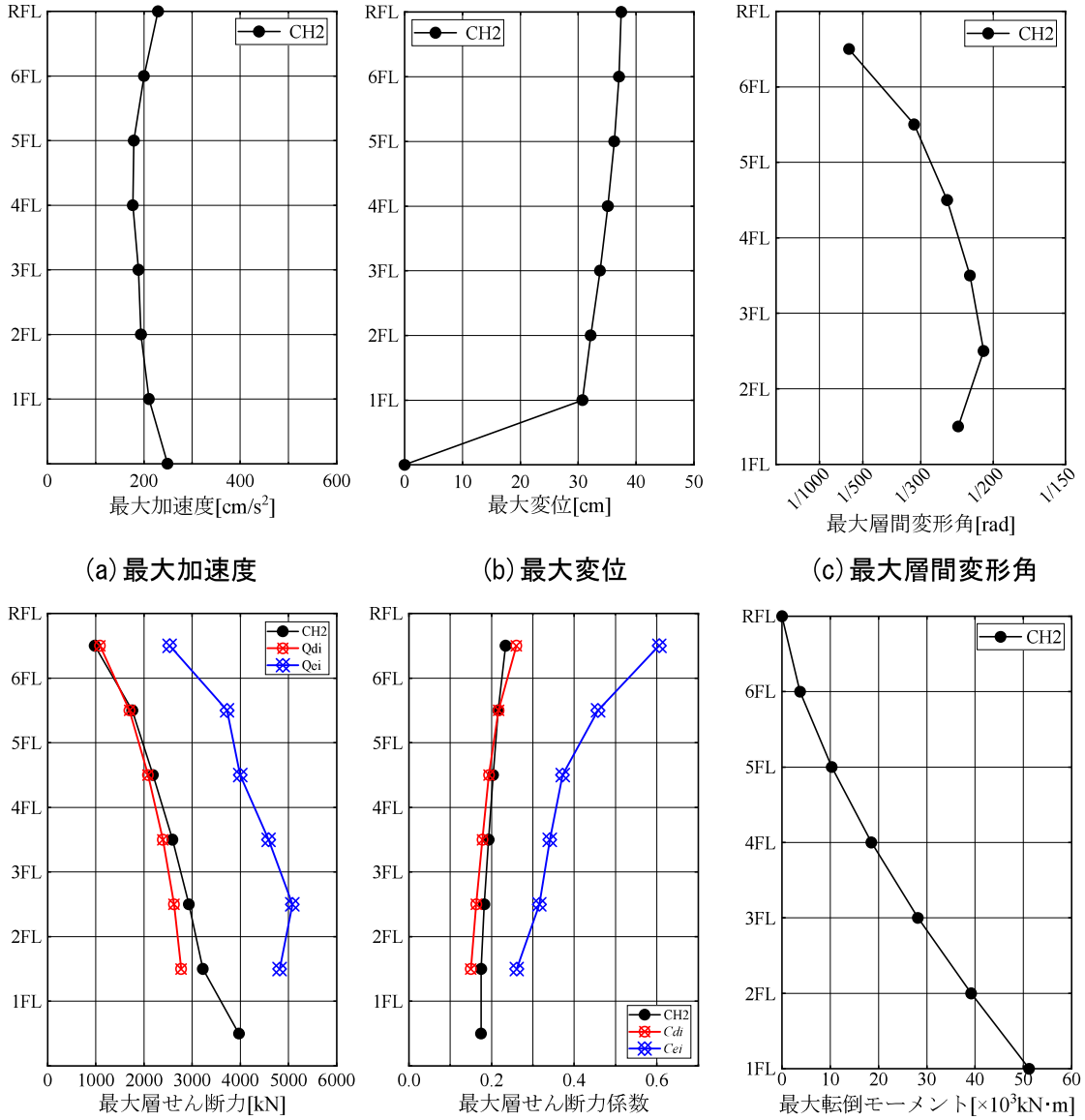
図 4.49　最大応答値(CH2、X 方向、最大特性、回帰特性なし)



(a) 最大加速度　(b) 最大変位　(c) 最大層間変形角

(d) 最大層せん断力　(e) 最大層せん断力係数　(f) 最大転倒モーメント

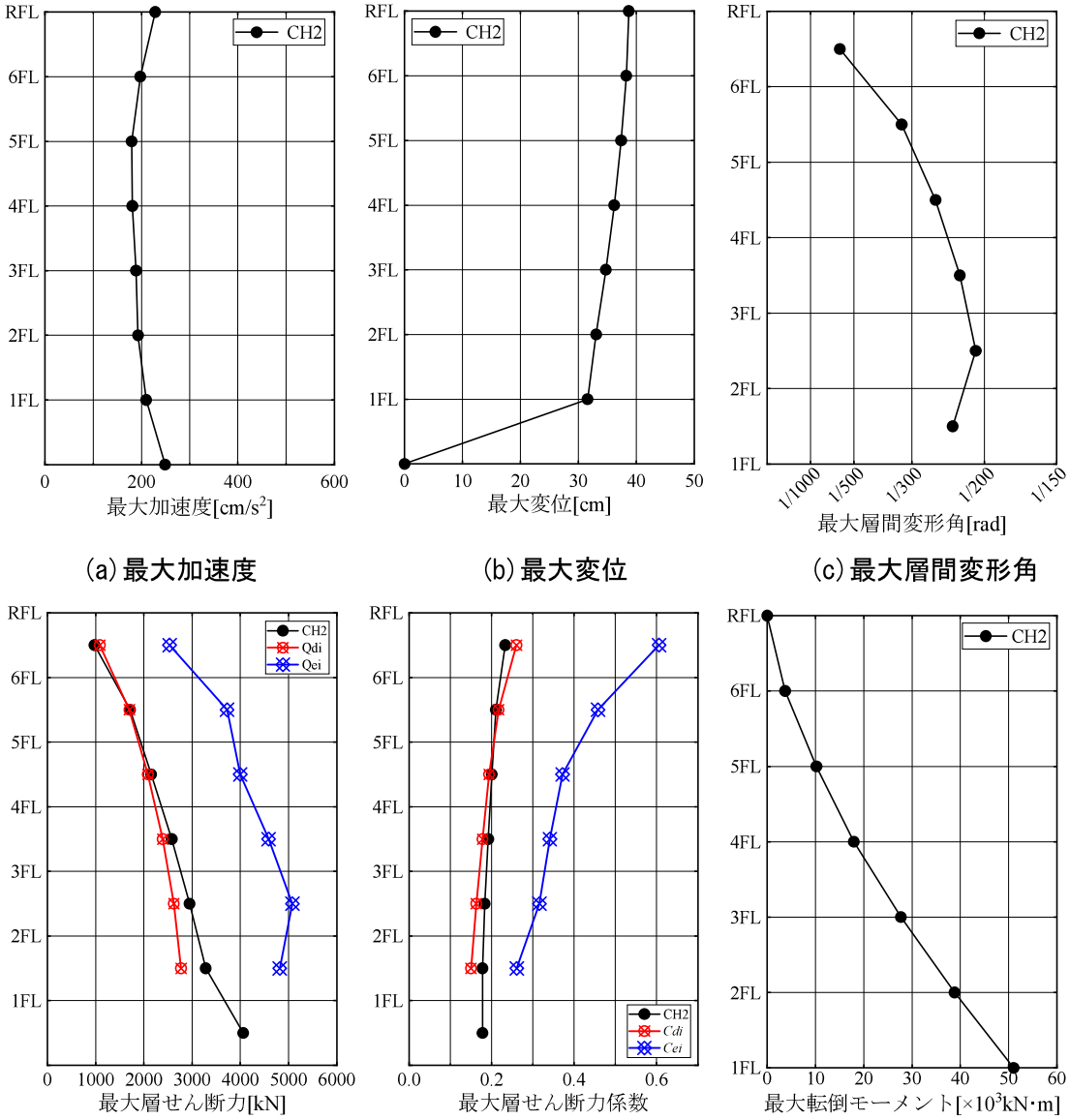
図 4.50　最大応答値(CH2、X 方向、最大特性、回帰特性あり)



(a) 最大加速度　(b) 最大変位　(c) 最大層間変形角

(d) 最大層せん断力　(e) 最大層せん断力係数　(f) 最大転倒モーメント

図 4.51　最大応答値(CH2、Y 方向、最大特性、回帰特性なし)



(a) 最大加速度　(b) 最大変位　(c) 最大層間変形角

(d) 最大層せん断力　(e) 最大層せん断力係数　(f) 最大転倒モーメント

図 4.52　最大応答値(CH2、Y 方向、最大特性、回帰特性あり)

d) 最大応答値一覧（最大特性）

最大特性時の最大応答値一覧を**表 4.20**～**表 4.23** に示す。

表 4.20　最大応答値一覧（X 方向、最大特性、回帰特性なし）

	X方向													
	最大特性													
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
加速度 [cm/s^2]	0	94.2	89.9	95.2	255.4	248.3	166.7	310.6	336.3	271.2	510.8	496.5	333.4	249.1
	1	46.6	33.4	39.0	121.8	71.3	60.9	176.3	179.5	190.5	243.6	141.8	140.5	213.7
	2	42.4	30.2	38.2	106.0	73.2	63.7	175.9	187.3	183.8	211.9	146.5	152.6	203.4
	3	33.9	35.0	36.7	77.3	66.8	85.2	165.2	178.2	165.6	154.6	129.3	153.5	195.3
	4	35.9	33.6	29.7	79.1	62.4	88.0	146.2	146.3	137.6	125.5	123.1	138.6	179.1
	5	38.2	39.9	32.5	72.6	65.0	63.7	131.3	123.2	149.1	136.1	128.0	116.3	170.6
	6	39.7	45.6	37.1	76.4	69.7	60.6	164.2	169.7	169.9	152.9	139.4	117.3	202.1
	R	51.7	53.0	51.2	125.5	108.5	92.0	226.4	206.4	186.8	250.9	216.9	167.3	249.9
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
速度 [cm/s]	0	11.6	16.1	12.2	25.0	25.0	25.0	52.3	57.9	56.5	50.0	50.0	50.0	29.2
	1	12.5	13.7	10.9	28.9	22.6	23.5	80.2	59.9	80.6	65.8	47.5	49.9	84.1
	2	13.3	15.0	11.9	30.6	24.2	24.6	83.2	61.1	82.7	67.3	49.4	51.2	84.6
	3	14.4	16.8	13.3	32.4	26.2	27.4	86.5	62.7	84.7	68.4	52.5	55.0	83.5
	4	15.7	18.6	14.9	33.5	28.1	30.6	89.3	67.5	85.7	69.1	56.3	61.3	80.7
	5	17.0	20.0	16.4	34.3	30.0	32.9	91.1	73.9	85.8	70.4	60.0	65.9	76.9
	6	18.2	21.0	17.9	36.0	31.5	34.0	91.6	79.6	85.2	71.8	63.1	68.0	75.5
	R	19.0	21.4	18.8	36.9	32.3	33.6	91.3	82.8	85.1	71.5	64.7	67.1	77.9
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
変位 [cm]	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1	3.93	4.23	3.60	8.13	7.22	7.53	22.26	18.33	21.52	17.76	14.53	16.54	30.59
	2	4.08	4.39	3.73	8.39	7.60	7.79	23.09	18.98	22.53	18.46	15.29	17.15	31.81
	3	4.28	4.56	3.87	8.64	8.09	8.11	24.00	19.67	23.76	19.24	16.26	17.83	33.15
	4	4.50	4.73	4.02	8.82	8.57	8.50	24.84	20.28	24.94	19.89	17.21	18.42	34.30
	5	4.70	4.87	4.22	9.00	8.99	8.85	25.51	20.79	25.98	20.39	18.03	18.90	35.21
	6	4.87	4.99	4.43	9.17	9.34	9.14	26.02	21.20	26.84	20.79	18.70	19.26	35.91
	R	4.96	5.05	4.58	9.30	9.54	9.32	26.30	21.45	27.34	21.08	19.09	19.42	36.29
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
層間変形角 [rad]	2	1/1507	1/1638	1/2006	1/866	1/840	1/975	1/362	1/425	1/351	1/500	1/425	1/538	1/284
	3	1/1314	1/1273	1/1622	1/729	1/726	1/952	1/328	1/375	1/309	1/456	1/370	1/494	1/254
	4	1/1362	1/1237	1/1572	1/734	1/770	1/960	1/342	1/349	1/319	1/444	1/395	1/498	1/270
	5	1/1478	1/1336	1/1535	1/776	1/809	1/977	1/367	1/353	1/352	1/388	1/405	1/503	1/291
	6	1/1716	1/1539	1/1650	1/742	1/818	1/1014	1/389	1/392	1/414	1/371	1/409	1/540	1/324
	R	1/2483	1/2421	1/2505	1/1024	1/1183	1/1396	1/567	1/621	1/685	1/512	1/592	1/768	1/513
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
Q [kN]	1	621.2	486.3	486.0	1134.1	1137.8	1096.2	3063.2	2665.0	3045.8	2380.3	2291.3	2256.4	3962.0
	2	584.2	537.7	439.1	1016.3	1047.7	903.7	2430.9	2070.7	2508.1	1761.7	2071.1	1637.6	3101.7
	3	543.7	561.9	440.8	980.6	985.0	750.7	2176.3	1905.5	2314.4	1568.3	1929.8	1446.2	2811.0
	4	493.0	542.7	427.0	914.3	872.0	698.9	1962.9	1923.4	2105.2	1511.7	1697.0	1346.5	2487.0
	5	434.5	480.8	418.8	829.2	794.3	657.7	1751.7	1822.0	1824.6	1658.3	1588.8	1277.5	2206.5
	6	353.5	393.8	367.5	818.3	742.1	598.1	1557.3	1548.1	1465.0	1636.6	1484.1	1123.6	1871.0
	R	220.3	225.7	218.2	534.8	462.3	392.2	965.0	879.7	796.5	1069.6	924.5	713.3	1065.3
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
Ci [-]	1	0.027	0.021	0.021	0.050	0.050	0.048	0.134	0.117	0.134	0.104	0.101	0.099	0.174
	2	0.032	0.029	0.024	0.055	0.057	0.049	0.132	0.112	0.136	0.095	0.112	0.089	0.168
	3	0.034	0.035	0.027	0.061	0.061	0.047	0.135	0.118	0.144	0.098	0.120	0.090	0.175
	4	0.037	0.040	0.032	0.068	0.065	0.052	0.146	0.143	0.157	0.113	0.126	0.100	0.185
	5	0.040	0.045	0.039	0.077	0.074	0.061	0.163	0.170	0.170	0.154	0.148	0.119	0.205
	6	0.044	0.048	0.045	0.101	0.091	0.074	0.192	0.191	0.180	0.201	0.183	0.138	0.230
	R	0.053	0.054	0.052	0.128	0.111	0.094	0.231	0.210	0.191	0.256	0.221	0.171	0.255
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
転倒モーメント [kN・m]	1	9455	10197	8316	17423	16901	13910	38780	37553	40194	31658	33224	26323	49229
	2	7543	8196	6961	13718	13127	11360	30149	30618	31540	27023	26263	21110	37732
	3	5583	6126	5439	11053	10452	8792	22859	23392	23218	22107	20907	16474	28420
	4	3709	4130	3817	8263	7595	6245	16186	16102	15427	16525	15189	11601	19511
	5	2179	2341	2225	5125	4577	3762	9577	9209	8571	10251	9152	6752	11150
	6	837	858	829	2032	1757	1490	3667	3343	3027	4064	3513	2710	4048
	R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 4.21　最大応答値一覧（X 方向、最大特性、回帰特性あり）

		X方向												
		最大特性												
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
加速度 [cm/s^2]	0	94.2	89.9	95.2	255.4	248.3	166.7	310.6	336.3	271.2	510.8	496.5	333.4	249.1
	1	46.6	33.4	39.0	121.8	71.3	60.9	175.8	179.5	192.1	243.6	141.8	140.5	212.8
	2	42.4	30.2	38.2	106.0	73.2	63.7	175.7	187.3	185.0	211.9	146.5	152.6	198.6
	3	33.9	35.0	36.7	77.3	66.8	85.2	165.1	178.2	165.8	154.6	129.3	153.5	193.7
	4	35.9	33.6	29.7	79.1	62.4	88.0	146.2	146.3	136.9	125.5	123.1	138.6	182.5
	5	38.2	39.9	32.5	72.6	65.0	63.7	131.4	123.7	148.6	136.1	128.0	116.3	171.6
	6	39.7	45.6	37.1	76.4	69.7	60.6	157.6	169.7	169.1	152.9	139.4	117.3	201.1
	R	51.7	53.0	51.2	125.5	108.5	92.0	211.6	206.4	185.3	250.9	216.9	167.3	248.9
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
速度 [cm/s]	0	11.6	16.1	12.2	25.0	25.0	25.0	52.3	57.9	56.5	50.0	50.0	50.0	29.2
	1	12.5	13.7	10.9	28.9	22.6	23.5	80.2	59.9	80.7	65.8	47.5	49.9	83.9
	2	13.3	15.0	11.9	30.6	24.2	24.6	83.2	61.1	82.9	67.3	49.4	51.2	84.5
	3	14.4	16.8	13.3	32.4	26.2	27.4	86.5	62.7	84.9	68.4	52.5	55.0	83.4
	4	15.7	18.6	14.9	33.5	28.1	30.6	89.3	67.5	86.0	69.1	56.3	61.3	80.7
	5	17.0	20.0	16.4	34.3	30.0	32.9	91.1	73.9	86.2	70.4	60.0	65.9	77.0
	6	18.2	21.0	17.9	36.0	31.5	34.0	91.7	79.6	85.7	71.8	63.1	68.0	75.5
	R	19.0	21.4	18.8	36.9	32.3	33.6	91.3	82.8	85.8	71.5	64.7	67.1	78.5
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
変位 [cm]	1	3.9	4.2	3.6	8.1	7.2	7.5	22.3	18.6	21.5	17.8	14.5	16.5	31.5
	2	4.1	4.4	3.7	8.4	7.6	7.8	23.1	19.3	22.5	18.5	15.3	17.2	32.7
	3	4.3	4.6	3.9	8.6	8.1	8.1	24.0	20.0	23.8	19.2	16.3	17.8	34.2
	4	4.5	4.7	4.0	8.8	8.6	8.5	24.9	20.7	24.9	19.9	17.2	18.4	35.4
	5	4.7	4.9	4.2	9.0	9.0	8.8	25.5	21.2	26.0	20.4	18.0	18.9	36.4
	6	4.9	5.0	4.4	9.2	9.3	9.1	26.0	21.6	26.8	20.8	18.7	19.3	37.1
	R	5.0	5.1	4.6	9.3	9.5	9.3	26.3	21.8	27.3	21.1	19.1	19.4	37.6
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
層間 変形角 [rad]	2	1/1507	1/1638	1/2006	1/866	1/840	1/975	1/362	1/423	1/351	1/500	1/425	1/538	1/277
	3	1/1314	1/1273	1/1622	1/729	1/726	1/952	1/328	1/375	1/309	1/456	1/370	1/494	1/253
	4	1/1362	1/1237	1/1572	1/734	1/770	1/960	1/342	1/349	1/320	1/444	1/395	1/498	1/272
	5	1/1478	1/1336	1/1535	1/776	1/809	1/977	1/375	1/353	1/353	1/388	1/405	1/503	1/293
	6	1/1716	1/1539	1/1650	1/742	1/818	1/1014	1/413	1/392	1/416	1/371	1/409	1/540	1/325
	R	1/2483	1/2421	1/2505	1/1024	1/1183	1/1396	1/606	1/621	1/691	1/512	1/592	1/768	1/515
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
Q [kN]	1	621.2	486.3	486.0	1134.1	1137.8	1096.2	3065.5	2665.0	3045.9	2380.3	2291.3	2256.4	4052.1
	2	584.2	537.7	439.1	1016.3	1047.7	903.7	2432.7	2079.7	2509.5	1761.7	2071.1	1637.6	3177.8
	3	543.7	561.9	440.8	980.6	985.0	750.7	2177.8	1905.5	2312.3	1568.3	1929.8	1445.7	2822.7
	4	493.0	542.7	427.0	914.3	872.0	698.9	1964.1	1923.4	2100.4	1511.7	1697.0	1346.5	2463.3
	5	434.5	480.8	418.8	829.2	794.3	657.7	1713.7	1822.0	1817.5	1658.3	1588.8	1277.5	2196.1
	6	353.5	393.8	367.5	818.3	742.1	598.1	1468.4	1548.1	1456.5	1636.6	1484.1	1123.6	1862.8
	R	220.3	225.7	218.2	534.8	462.3	392.2	902.2	879.7	789.9	1069.6	924.5	713.3	1061.2
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
Ci [-]	1	0.027	0.021	0.021	0.050	0.050	0.048	0.135	0.117	0.134	0.104	0.101	0.099	0.178
	2	0.032	0.029	0.024	0.055	0.057	0.049	0.132	0.113	0.136	0.095	0.112	0.089	0.172
	3	0.034	0.035	0.027	0.061	0.061	0.047	0.135	0.118	0.144	0.098	0.120	0.090	0.176
	4	0.037	0.040	0.032	0.068	0.065	0.052	0.146	0.143	0.156	0.113	0.126	0.100	0.183
	5	0.040	0.045	0.039	0.077	0.074	0.061	0.160	0.170	0.169	0.154	0.148	0.119	0.204
	6	0.044	0.048	0.045	0.101	0.091	0.074	0.181	0.191	0.179	0.201	0.183	0.138	0.229
	R	0.053	0.054	0.052	0.128	0.111	0.094	0.216	0.210	0.189	0.256	0.221	0.171	0.254
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
転倒 モーメント [kN･m]	1	9455	10197	8316	17423	16901	13910	38802	37553	40138	31658	33224	26317	48880
	2	7543	8196	6961	13718	13127	11360	30163	30618	31463	27023	26263	21110	37199
	3	5583	6126	5439	11053	10452	8792	22050	23392	23132	22107	20907	16474	28290
	4	3709	4130	3817	8263	7595	6245	15298	16102	15349	16525	15189	11601	19425
	5	2179	2341	2225	5125	4577	3762	9004	9209	8515	10251	9152	6752	11104
	6	837	858	829	2032	1757	1490	3428	3343	3002	4064	3513	2710	4033
	R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 4.22　最大応答値一覧（Y 方向、最大特性、回帰特性なし）

		Y方向												
		最大特性												
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
加速度 [cm/s^2]	0	94.2	89.9	95.2	255.4	248.3	166.7	310.6	336.3	271.2	510.8	496.5	333.4	249.1
	1	48.1	33.2	46.6	128.0	80.3	59.3	183.1	161.8	178.0	255.9	159.5	135.2	210.7
	2	44.9	30.0	38.9	114.2	69.2	58.8	171.9	180.8	176.5	228.5	138.4	155.9	194.1
	3	36.6	35.8	39.2	84.2	68.6	85.5	166.9	178.6	162.8	168.4	137.3	162.4	188.9
	4	35.3	35.5	31.4	78.3	65.1	91.8	143.8	146.6	138.8	123.5	126.5	146.1	176.9
	5	38.6	40.7	31.8	73.0	63.9	66.3	142.0	125.3	143.0	142.2	127.8	121.7	179.4
	6	40.9	47.9	37.9	72.6	74.2	61.0	160.7	184.5	160.9	143.4	148.6	120.2	200.3
	R	48.2	57.2	51.5	115.8	108.6	94.5	220.1	221.4	174.9	231.5	217.2	178.4	229.4
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
速度 [cm/s]	0	11.6	16.1	12.2	25.0	25.0	25.0	52.3	57.9	56.5	50.0	50.0	50.0	29.2
	1	11.6	12.5	10.7	28.5	22.4	24.1	78.9	56.1	80.1	64.0	47.0	51.7	82.7
	2	12.7	14.1	11.8	30.5	24.2	25.4	82.3	56.7	82.7	66.0	49.3	53.2	83.2
	3	14.1	16.4	13.4	32.6	26.4	27.2	86.2	59.4	85.1	68.0	52.9	54.4	82.0
	4	15.8	18.7	15.0	34.1	28.5	31.0	89.5	67.3	86.5	69.8	56.9	62.1	79.6
	5	17.4	20.5	16.6	35.0	30.3	33.7	91.8	75.6	86.7	71.6	60.7	67.3	77.5
	6	18.8	21.7	18.1	37.1	31.9	34.7	93.0	82.4	86.7	73.8	63.8	69.4	78.7
	R	19.5	22.2	18.9	37.9	32.6	34.4	93.5	85.7	87.0	73.9	65.1	68.9	81.1
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
変位 [cm]	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1	4.01	4.22	3.55	8.25	7.07	7.53	22.04	18.49	21.27	17.72	14.22	16.21	30.73
	2	4.13	4.41	3.70	8.56	7.52	7.85	22.93	19.26	22.40	18.52	15.11	16.95	32.15
	3	4.28	4.62	3.88	8.84	8.10	8.23	23.97	20.10	23.76	19.41	16.26	17.81	33.75
	4	4.56	4.83	4.06	9.03	8.66	8.65	24.97	20.86	25.03	20.11	17.38	18.58	35.12
	5	4.81	5.00	4.33	9.20	9.16	9.04	25.83	21.51	26.14	20.64	18.35	19.19	36.23
	6	5.00	5.14	4.56	9.37	9.54	9.35	26.48	22.03	27.01	21.06	19.10	19.62	37.05
	R	5.10	5.21	4.70	9.48	9.73	9.51	26.80	22.29	27.43	21.31	19.47	19.80	37.45
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
層間 変形角 [rad]	2	1/1320	1/1465	1/1814	1/753	1/743	1/819	1/303	1/370	1/316	1/428	1/374	1/459	1/238
	3	1/1113	1/1086	1/1464	1/636	1/625	1/770	1/265	1/297	1/279	1/390	1/317	1/423	1/209
	4	1/1168	1/1036	1/1380	1/632	1/663	1/805	1/282	1/278	1/293	1/386	1/338	1/442	1/224
	5	1/1247	1/1089	1/1330	1/694	1/680	1/795	1/313	1/281	1/323	1/360	1/340	1/432	1/254
	6	1/1529	1/1297	1/1508	1/722	1/727	1/867	1/355	1/330	1/401	1/361	1/363	1/472	1/314
	R	1/2836	1/2388	1/2653	1/1183	1/1260	1/1448	1/621	1/617	1/780	1/591	1/630	1/768	1/595
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
Q [kN]	1	602.0	490.5	477.1	1108.5	1116.5	1100.8	2978.4	2644.7	3025.3	2391.8	2249.9	2263.7	3972.5
	2	582.4	524.8	423.5	1020.0	1034.2	938.2	2537.5	2077.2	2429.8	1795.8	2053.6	1671.6	3223.3
	3	551.6	565.6	419.4	964.7	981.5	797.0	2313.7	2066.9	2201.4	1571.8	1935.8	1451.0	2931.4
	4	497.6	561.0	421.0	918.7	875.4	721.7	2054.7	2091.4	1984.9	1505.6	1717.6	1312.9	2591.1
	5	445.1	509.9	417.5	799.8	817.0	698.6	1775.9	1979.3	1718.5	1543.2	1634.6	1284.8	2185.0
	6	361.3	426.1	366.6	767.1	761.1	637.7	1558.0	1677.3	1377.8	1534.1	1522.6	1172.7	1756.6
	R	205.6	244.0	219.7	493.5	462.7	402.9	938.1	943.8	745.7	987.0	925.7	760.5	978.0
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
Ci [-]	1	0.026	0.022	0.021	0.049	0.049	0.048	0.131	0.116	0.133	0.105	0.099	0.099	0.174
	2	0.032	0.028	0.023	0.055	0.056	0.051	0.137	0.113	0.132	0.097	0.111	0.091	0.175
	3	0.034	0.035	0.026	0.060	0.061	0.050	0.144	0.129	0.137	0.098	0.120	0.090	0.182
	4	0.037	0.042	0.031	0.068	0.065	0.054	0.153	0.156	0.148	0.112	0.128	0.098	0.193
	5	0.041	0.047	0.039	0.074	0.076	0.065	0.165	0.184	0.160	0.144	0.152	0.120	0.203
	6	0.044	0.052	0.045	0.094	0.094	0.078	0.192	0.206	0.170	0.189	0.187	0.144	0.216
	R	0.049	0.058	0.053	0.118	0.111	0.096	0.224	0.226	0.178	0.236	0.221	0.182	0.234
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
転倒 モーメント [kN・m]	1	9451	10524	8154	17530	16828	14412	40384	40693	37763	30223	33268	26587	51201
	2	7626	8579	6864	13894	13397	11873	31057	33232	29589	25414	26807	21807	39186
	3	5699	6507	5392	10313	10671	9263	23104	25389	21793	20626	21350	16988	28127
	4	3811	4445	3793	7711	7755	6601	16213	17453	14491	15422	15515	12147	18495
	5	2121	2539	2219	4781	4650	3954	9485	9951	8046	9563	9303	7343	10318
	6	781	927	835	1875	1758	1531	3565	3586	2834	3750	3518	2890	3716
	R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 4.23　最大応答値一覧（Y 方向、最大特性、回帰特性あり）

		Y方向												
		最大特性												
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
加速度 [cm/s^2]	0	94.2	89.9	95.2	255.4	248.3	166.7	310.6	336.3	271.2	510.8	496.5	333.4	249.1
	1	48.1	33.2	46.6	128.0	80.3	59.3	181.5	161.8	178.0	255.9	159.5	135.2	209.9
	2	44.9	30.0	38.9	114.2	69.2	58.8	171.7	180.8	176.5	228.5	138.4	155.9	192.9
	3	36.6	35.8	39.2	84.2	68.6	85.5	166.9	178.6	163.1	168.4	137.3	162.4	188.9
	4	35.3	35.5	31.4	78.3	65.1	91.8	143.7	146.6	138.2	123.5	126.5	146.1	181.2
	5	38.6	40.7	31.8	73.0	63.9	66.3	142.1	125.3	142.6	142.2	127.8	121.7	179.8
	6	40.9	47.9	37.9	72.6	74.2	61.0	160.8	184.5	160.4	143.4	148.6	120.2	197.5
	R	48.2	57.2	51.5	115.8	108.6	94.5	206.4	221.4	173.8	231.5	217.2	178.4	228.7
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
速度 [cm/s]	0	11.6	16.1	12.2	25.0	25.0	25.0	52.3	57.9	56.5	50.0	50.0	50.0	29.2
	1	11.6	12.5	10.7	28.5	22.4	24.1	78.9	56.1	80.2	64.0	47.0	51.7	82.6
	2	12.7	14.1	11.8	30.5	24.2	25.4	82.4	56.7	82.9	66.0	49.3	53.2	83.1
	3	14.1	16.4	13.4	32.6	26.4	27.2	86.2	59.4	85.3	68.0	52.9	54.4	82.0
	4	15.8	18.7	15.0	34.1	28.5	31.0	89.5	67.3	86.8	69.8	56.9	62.1	79.7
	5	17.4	20.5	16.6	35.0	30.3	33.7	91.9	75.6	87.1	71.6	60.7	67.3	77.6
	6	18.8	21.7	18.1	37.1	31.9	34.7	93.1	82.4	87.2	73.8	63.8	69.4	78.7
	R	19.5	22.2	18.9	37.9	32.6	34.4	93.5	85.7	87.7	73.9	65.1	68.9	81.1
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
変位 [cm]	1	4.0	4.2	3.6	8.3	7.1	7.5	22.1	18.8	21.3	17.7	14.2	16.2	31.6
	2	4.1	4.4	3.7	8.6	7.5	7.8	23.0	19.5	22.4	18.5	15.1	17.0	33.1
	3	4.3	4.6	3.9	8.8	8.1	8.2	24.0	20.4	23.8	19.4	16.3	17.8	34.7
	4	4.6	4.8	4.1	9.0	8.7	8.7	25.0	21.2	25.0	20.1	17.4	18.6	36.2
	5	4.8	5.0	4.3	9.2	9.2	9.0	25.9	21.8	26.1	20.6	18.3	19.2	37.4
	6	5.0	5.1	4.6	9.4	9.5	9.4	26.5	22.3	27.0	21.1	19.1	19.6	38.3
	R	5.1	5.2	4.7	9.5	9.7	9.5	26.8	22.6	27.4	21.3	19.5	19.8	38.7
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
層間 変形角 [rad]	2	1/1320	1/1465	1/1814	1/753	1/743	1/819	1/302	1/368	1/316	1/428	1/374	1/460	1/234
	3	1/1113	1/1086	1/1464	1/636	1/625	1/770	1/265	1/297	1/279	1/390	1/317	1/423	1/208
	4	1/1168	1/1036	1/1380	1/632	1/663	1/805	1/282	1/278	1/293	1/386	1/338	1/442	1/225
	5	1/1247	1/1089	1/1330	1/694	1/680	1/795	1/318	1/281	1/324	1/360	1/340	1/432	1/258
	6	1/1529	1/1297	1/1508	1/722	1/727	1/867	1/375	1/330	1/403	1/361	1/363	1/472	1/323
	R	1/2836	1/2388	1/2653	1/1183	1/1260	1/1448	1/662	1/617	1/786	1/591	1/630	1/768	1/597
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
Q [kN]	1	602.0	490.5	477.1	1108.5	1116.5	1100.8	2980.9	2644.7	3023.6	2391.8	2249.9	2263.7	4060.4
	2	582.4	524.8	423.5	1020.0	1034.2	938.2	2539.2	2086.0	2434.0	1795.8	2053.6	1669.5	3281.9
	3	551.6	565.6	419.4	964.7	981.5	797.0	2315.2	2066.9	2202.6	1571.8	1935.8	1451.0	2946.7
	4	497.6	561.0	421.0	918.7	875.4	721.7	2056.1	2091.4	1983.4	1505.6	1717.6	1312.9	2576.6
	5	445.1	509.9	417.5	799.8	817.0	698.6	1744.6	1979.3	1714.5	1543.2	1634.6	1284.8	2151.4
	6	361.3	426.1	366.6	767.1	761.1	637.7	1473.2	1677.3	1371.8	1534.1	1522.6	1172.7	1712.0
	R	205.6	244.0	219.7	493.5	462.7	402.9	879.9	943.8	740.7	987.0	925.7	760.5	975.0
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
Ci [-]	1	0.026	0.022	0.021	0.049	0.049	0.048	0.131	0.116	0.133	0.105	0.099	0.099	0.178
	2	0.032	0.028	0.023	0.055	0.056	0.051	0.138	0.113	0.132	0.097	0.111	0.090	0.178
	3	0.034	0.035	0.026	0.060	0.061	0.050	0.144	0.129	0.137	0.098	0.120	0.090	0.183
	4	0.037	0.042	0.031	0.068	0.065	0.054	0.153	0.156	0.148	0.112	0.128	0.098	0.192
	5	0.041	0.047	0.039	0.074	0.076	0.065	0.162	0.184	0.160	0.144	0.152	0.120	0.200
	6	0.044	0.052	0.045	0.094	0.094	0.078	0.181	0.206	0.169	0.189	0.187	0.144	0.211
	R	0.049	0.058	0.053	0.118	0.111	0.096	0.210	0.226	0.177	0.236	0.221	0.182	0.233
	FL	LEVEL1						LEVEL2						CH2
		告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	告示1	告示2	告示3	ELCN	TAFT	HACHI	
転倒 モーメント [kN・m]	1	9451	10524	8154	17530	16828	14412	40413	40693	37788	30223	33268	26587	51044
	2	7626	8579	6864	13894	13397	11873	31079	33232	29572	25414	26807	21807	38815
	3	5699	6507	5392	10313	10671	9263	22412	25389	21751	20626	21350	16988	27683
	4	3811	4445	3793	7711	7755	6601	15356	17453	14441	15422	15515	12147	17951
	5	2121	2539	2219	4781	4650	3954	8940	9951	8006	9563	9303	7343	10205
	6	781	927	835	1875	1758	1531	3344	3586	2815	3750	3518	2890	3705
	R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4.4.4　免震性能の評価

小形シリンダの回帰特性を考慮しない場合、した場合の最大応答値一覧を表 4.24、表 4.25 に示す。

表 4.24　最大応答値一覧（回帰特性なしの場合）

小形シリンダの回帰特性なし		稀に発生する地震動(レベル1)		極めて稀に発生する地震動(レベル2)		参考波(長周期地震動CH2)	
		X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向
標準特性	最大絶対加速度 [cm/s2]	111.5 (RF,ELCN)	111.5 (1F,ELCN)	222.8 (RF,ELCN)	222.4 (1F,ELCN)	208.2 (1F)	206.9 (1F)
	免震層最大変位[cm]	8.6 (ELCN)	8.7 (ELCN)	25.1 (告示1)	25.2 (告示1)	37.1	37.3
	最大層間変形角 [rad]	1/826 (6F,ELCN)	1/732 (3F,TAFT)	1/371 (3F,告示3)	1/324 (3F,告示3)	1/291 (3F)	1/242 (3F)
	ベースシア係数	0.042 (ELCN)	0.043 (ELCN)	0.111 (告示1)	0.109 (告示1)	0.160	0.161
	免震層最大転倒ﾓｰﾒﾝﾄ [kN・m]	14,916 (ELCN)	14,386 (TAFT)	33,468 (告示1)	33,810 (告示2)	42,405	44,702
最小特性	最大絶対加速度 [cm/s2]	106.8 (RF,ELCN)	105.5 (1F,ELCN)	213.2 (RF,ELCN)	209.7 (1F,ELCN)	189.0 (RF)	187.9 (1F)
	免震層最大変位 [cm]	8.6 (HACHI)	8.5 (HACHI)	24.4 (告示1)	24.3 (告示1)	37.6	37.9
	最大層間変形角 [rad]	1/858 (6F,ELCN)	1/795 (3F,TAFT)	1/390 (3F,告示1)	1/351 (5F,告示2)	1/309 (3F)	1/276 (3F)
	ベースシア係数	0.039 (TAFT)	0.038 (ELCN)	0.094 (告示3)	0.094 (告示1)	0.143	0.144
	免震層最大転倒ﾓｰﾒﾝﾄ [kN・m]	14,512 (ELCN)	13,978 (ELCN)	32,348 (告示1)	31,793 (告示2)	39,524	39,337
最大特性	最大絶対加速度 [cm/s2]	125.5 (RF,ELCN)	128.0 (1F,ELCN)	250.9 (RF,ELCN)	255.9 (1F,ELCN)	249.9 (RF)	229.4 (RF)
	免震層最大変位 [cm]	8.1 (ELCN)	8.3 (ELCN)	22.3 (告示1)	22.0 (告示1)	30.6	30.7
	最大層間変形角 [rad]	1/726 (3F,TAFT)	1/625 (3F,TAFT)	1/309 (3F,告示3)	1/265 (3F,告示1)	1/254 (3F)	1/209 (3F)
	ベースシア係数	0.050 (TAFT)	0.049 (TAFT)	0.134 (告示3)	0.133 (告示3)	0.174	0.174
	免震層最大転倒ﾓｰﾒﾝﾄ [kN・m]	17,423 (ELCN)	17,530 (ELCN)	40,194 (告示3)	40,693 (告示2)	49,229	51,201

表 4.25　最大応答値一覧（回帰特性ありの場合）

小形シリンダの回帰特性あり		稀に発生する地震動（レベル1）		極めて稀に発生する地震動(レベル2)		長周期地震動(CH2)	
		X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向
標準特性	最大絶対加速度 [cm/s^2]	111.5 (RF,ELCN)	111.5 (1F,ELCN)	222.8 (RF,ELCN)	222.4 (1F,ELCN)	207.5 (1F)	207.8 (1F)
	免震層最大変位 [cm]	8.6 (ELCN)	8.7 (ELCN)	25.2 (告示1)	25.3 (告示1)	38.3	38.5
	最大層間変形角 [rad]	1/826 (6F,ELCN)	1/732 (3F,TAFT)	1/367 (3F,告示3)	1/319 (3F,告示3)	1/280 (3F)	1/240 (3F)
	ベースシア係数	0.042 (ELCN)	0.043 (ELCN)	0.111 (告示1)	0.110 (告示1)	0.164	0.164
	免震層最大転倒ﾓｰﾒﾝﾄ [kN・m]	14,916 (ELCN)	14,386 (TAFT)	33,662 (告示3)	33,604 (告示2)	42,847	44,963
最小特性	最大絶対加速度 [cm/s^2]	106.8 (RF,ELCN)	105.5 (1F,ELCN)	213.2 (RF,ELCN)	209.7 (1F,ELCN)	196.0 (RF)	193.9 (1F)
	免震層最大変位 [cm]	8.6 (HACHI)	8.5 (HACHI)	24.5 (告示1)	24.4 (告示1)	38.5	38.8
	最大層間変形角 [rad]	1/858 (6F,ELCN)	1/795 (3F,TAFT)	1/389 (3F,告示1)	1/347 (3F,告示3)	1/300 (3F)	1/272 (3F)
	ベースシア係数	0.039 (TAFT)	0.038 (ELCN)	0.095 (告示3)	0.095 (告示1)	0.145	0.146
	免震層最大転倒ﾓｰﾒﾝﾄ [kN・m]	14,512 (ELCN)	13,978 (ELCN)	32,457 (告示1)	31,461 (告示2)	40,880	39,960
最大特性	最大絶対加速度 [cm/s^2]	125.5 (RF,ELCN)	128.0 (1F,ELCN)	250.9 (RF,ELCN)	255.9 (1F,ELCN)	248.9 (RF)	228.7 (RF)
	免震層最大変位 [cm]	8.1 (ELCN)	8.3 (ELCN)	22.3 (告示1)	22.1 (告示1)	31.5	31.6
	最大層間変形角 [rad]	1/726 (3F,TAFT)	1/625 (3F,TAFT)	1/309 (3F,告示3)	1/265 (3F,告示1)	1/253 (3F)	1/208 (3F)
	ベースシア係数	0.050 (TAFT)	0.049 (ELCN)	0.135 (告示1)	0.133 (告示3)	0.178	0.178
	免震層最大転倒ﾓｰﾒﾝﾄ [kN・m]	17,423 (ELCN)	17,530 (ELCN)	40,138 (告示3)	40,413 (告示1)	48,880	51,044

a) 稀に発生する地震動(レベル 1)に対する免震性能

・ X,Y 両方向とも、各層に生じる最大層せん断力は設計用層せん断力以下であることから、全ての部材は許容応力度以下である。
・ 各層に生じる最大層間変形角は標準特性時に X 方向で 1/826、Y 方向で 1/732 である。免震装置の特性変動を考慮しても、両方向で最大値が 1/625 となり、耐震目標性能である 1/400 以下である。
・ 免震層の最大水平変位 δ_{1max} は、免震装置の特性変動を考慮した場合においても最大で 9cm 弱となり、耐震目標性能である安全変形（=24cm）以下である。

b) 極めて稀に発生する地震動(レベル 2)に対する免震性能

・ X,Y 両方向とも、各層に生じる最大層せん断力は設計用層せん断力以下であることから、全ての部材は許容応力度以下である。
・ 各層に生じる最大層間変形角は X 方向で 1/309、Y 方向で 1/265 となり、耐震目標性能である 1/200 以下である。
・ 免震層の最大水平変位 δ_{1max} は、免震装置の特性変動を考慮し場合においても最大で 25.3cm となり、耐震目標性能である性能保証変形（=36cm）以下である。

c) 長周期地震動(CH2)に対する免震性能

・ X,Y 両方向とも、各層に生じる最大層せん断力は弾性限耐力以下であることから、全ての部材は弾性範囲内である。
・ 各層に生じる最大層間変形角は X 方向で 1/253、Y 方向で 1/208 となり、耐震目標性能である 1/200 以下である。
・ 免震層の最大水平変位 δ_{1max} は、免震装置の特性変動を考慮しても最大で 38.8cm となり、耐震目標性能である水平クリアランス(=40cm)以下となり、擁壁衝突を回避できる。
・ 免震層に生じる最大相対速度 V_{max} は 84.1cm/s となり、性能可変オイルダンパーの限界速度(=100.0cm/s)以下である。

以上のことから、稀に発生する地震動(レベル 1)、極めて稀に発生する地震動(レベル 2)、および長周期地震動(CH2)いずれにおいても、免震層に生じる最大水平変位および上部構造に生じる水平力、層間変形角は耐震目標性能を満足していることを確認した。

4.4.5　ダンパーモデルの違いによる最大応答値の比較

ダンパーモデルの違いによる最大応答値の比較を行う。全てのケースで扱うダンパーの最大減衰力は 500kN 級とする。Case1 は**図 4.12** に示した速度と減衰力の関係が一般的なバイリニア型のオイルダンパー(OD)を 2 基主軸方向に設けた場合、Case2 は免震層の水平変位を小さくするために Case1 で用いた OD を 1 基追加して 3 基とした場合、Case3 は**図 4.12** に示した変位検知型性能可変オイルダンパー(VOD)を 2 基設けた場合でかつ、回帰特性を考慮しない場合、Case４は**図 4.13** に示した回帰特性を考慮した場合とした。**表 4.26** に検討した解析ケース一覧を示す。

外乱は、4.3 節に示した稀に発生する地震動(レベル 1)として 6 波、極めて稀に発生する地震動(レベル 2)として 6 波、および長周期地震動(CH2)の 1 波の計 13 波とした。

表 4.26　解析ケース

ケース	説　　明
Case1	OD モデル(NRB＋OD２台)
Case2	OD 追加モデル(NRB＋OD3 台)
Case3	VOD モデル(NRB＋VOD2 台) 小形シリンダの回帰特性なし
Case4	VOD モデル(NRB＋VOD2 台) 小形シリンダの回帰特性あり

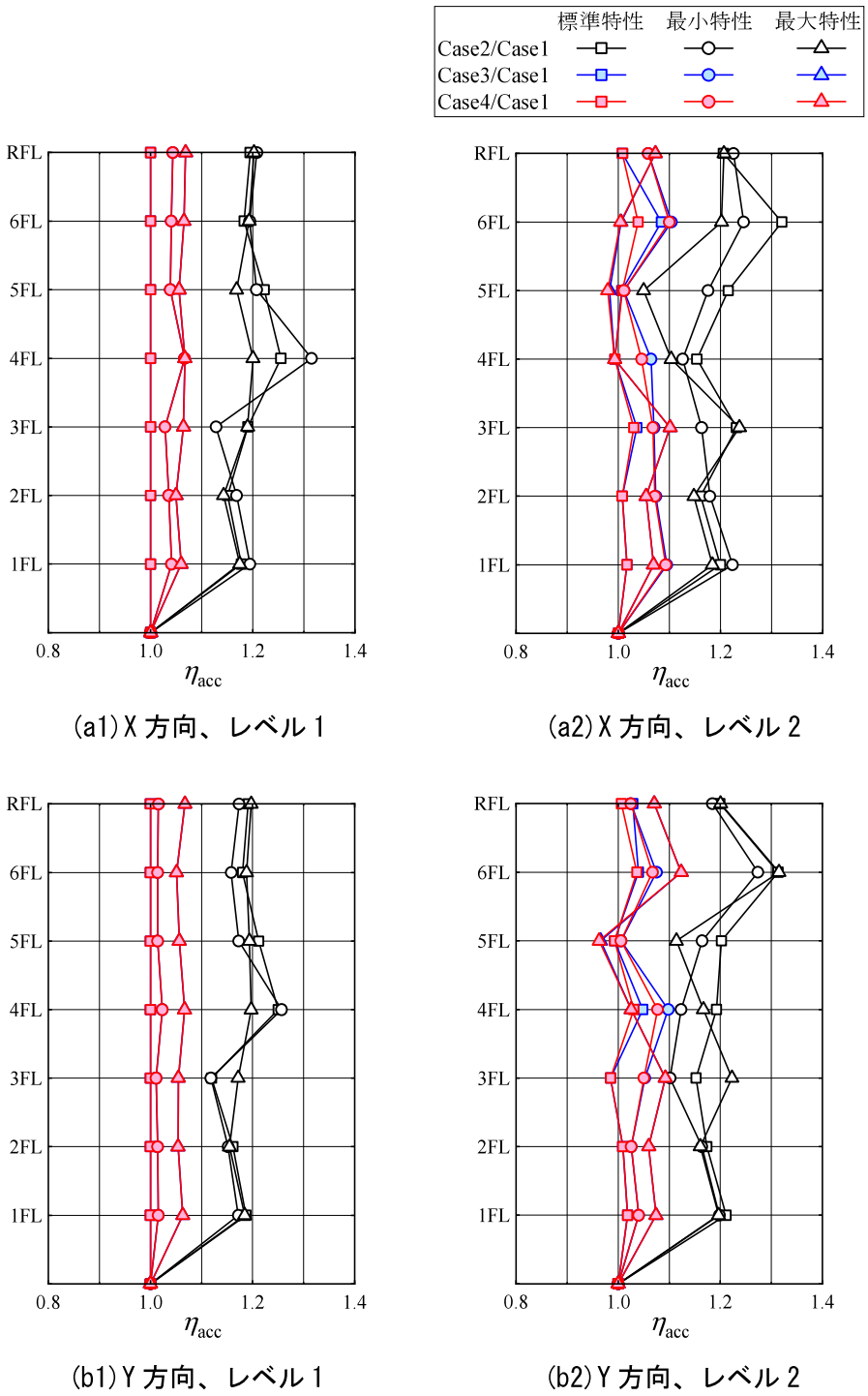
免震層の最大水平変位δ_{1max}を**表 4.27** に示す。表より、長周期地震動時において、Case 1 を除く全ての場合でδ_{1max}は 40cm 以下となっている。Case2 は Case1 に比べ、地震動のレベルによらずδ_{1max}を概ね 25%低減している。また、Case3 は Case1 に比べ、レベル 1 ではδ_{1max}が 15cm 以下なので同じ、レベル 2 ではδ_{1max}を概ね 16%低減、長周期地震動時は 18%低減している。回帰特性を考慮した Case4 は回帰特性を考慮しない Case3 に比べ、概ね 1cm 程度δ_{1max}が大きくなる傾向があるが、概ね同程度のδ_{1max}となった。

次に上部構造の加速度、層間変形角、層せん断力、転倒モーメントの最大応答値の比較を行う。Case1 以外の最大応答値を Case1 の最大応答値で除した値を最大応答倍率ηで定義する。**図 4.53～図 4.56** に稀に発生する地震動(レベル 1)、極めて稀に発生する地震動(レベル 2)における最大応答倍率ηを示す。

Case2 は Long 時の免震層変位を小さくするために OD を 1 基追加していることから L1 や L2 時にも免震層が負担する減衰力が大きくなり、上部構造の最大応答値が Case1 に比べ、平均で概ね 20%大きくなった。これに対して、Case3 の VOD の場合は、L1 時では免震層の最大水平変位が Ls(=15cm)未満であることから、Case1 と同じ最大応答値となった。L2 時は免震層の最大水平変位が Ls 以上となっているが、1~2%ほど最大応答値は大きくなるが、概ね Case1 と同程度であることが分かる。また、Case4 は Case3 と同等であることから、上部構造の最大応答値に与える小形シリンダの回帰特性の影響は小さいことが分かる。

表 4.27　免震層の最大水平変位一覧

		免震層の最大水平変位　δ_{1max}[cm]					
		X方向			Y方向		
		標準特性	最小特性	最大特性	標準特性	最小特性	最大特性
稀に生じる地震動(レベル1)	Case1	8.6	8.9	9.0	8.7	8.6	9.1
	Case2	6.8	7.3	6.6	7.0	7.2	6.8
	Case3	8.6	8.6	8.1	8.7	8.5	8.3
	Case4	8.6	8.6	8.1	8.7	8.5	8.3
極めて稀に生じる地震動(レベル2)	Case1	28.5	29.5	27.2	28.6	28.6	27.5
	Case2	21.5	23.3	19.9	21.5	23.2	19.7
	Case3	25.1	24.4	22.3	25.2	24.3	22.0
	Case4	25.2	24.5	22.3	25.3	24.4	22.1
長周期地震動(CH2)	Case1	43.6	45.7	40.7	43.6	44.2	40.7
	Case2	31.9	35.4	28.6	32.1	35.4	28.8
	Case3	37.1	37.6	30.6	37.3	37.9	30.7
	Case4	38.3	38.5	31.5	38.5	38.8	31.6



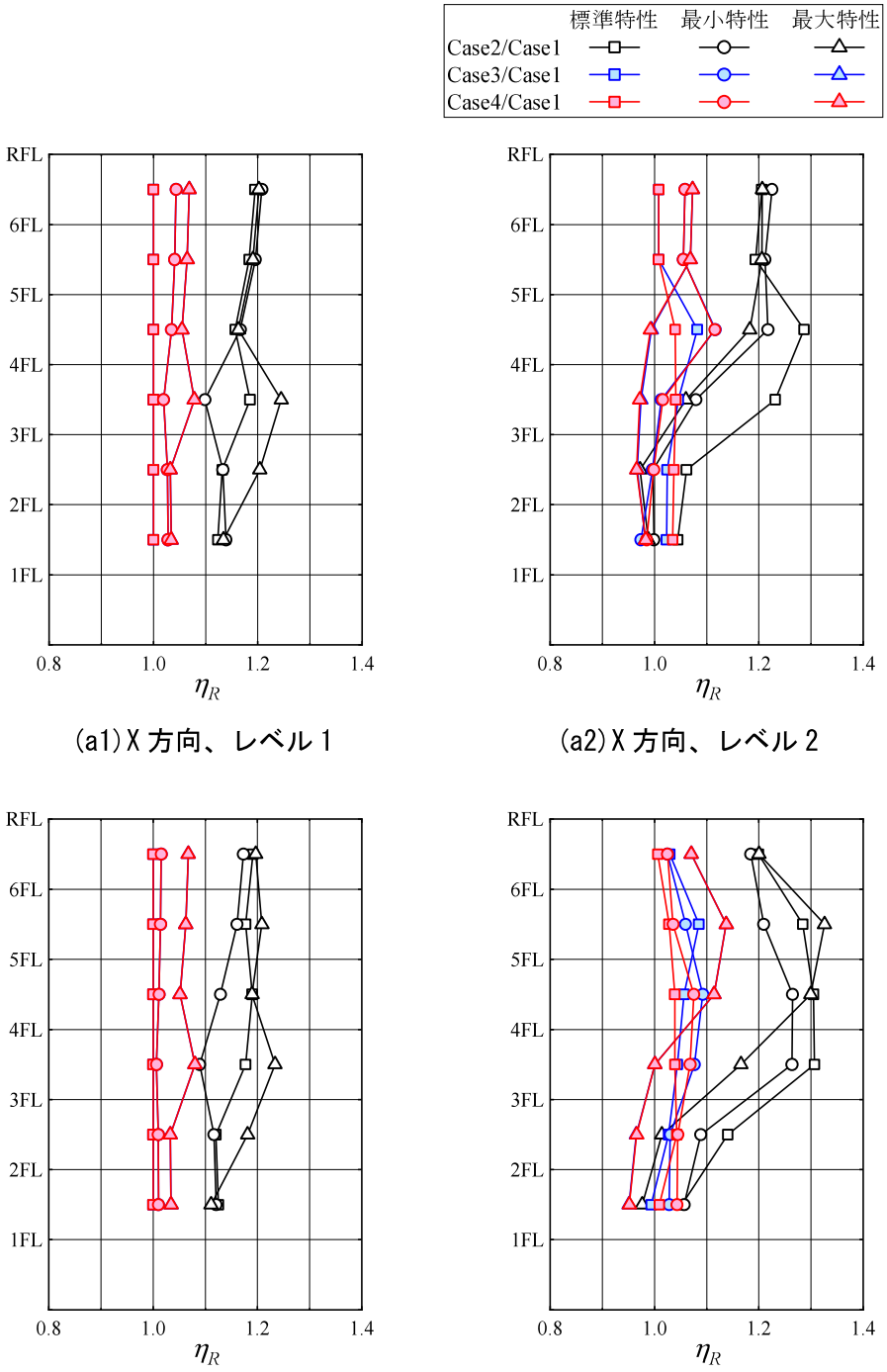
(a1)X 方向、レベル 1

(a2)X 方向、レベル 2

(b1)Y 方向、レベル 1

(b2)Y 方向、レベル 2

図 4.53　最大加速度倍率 η_{acc}



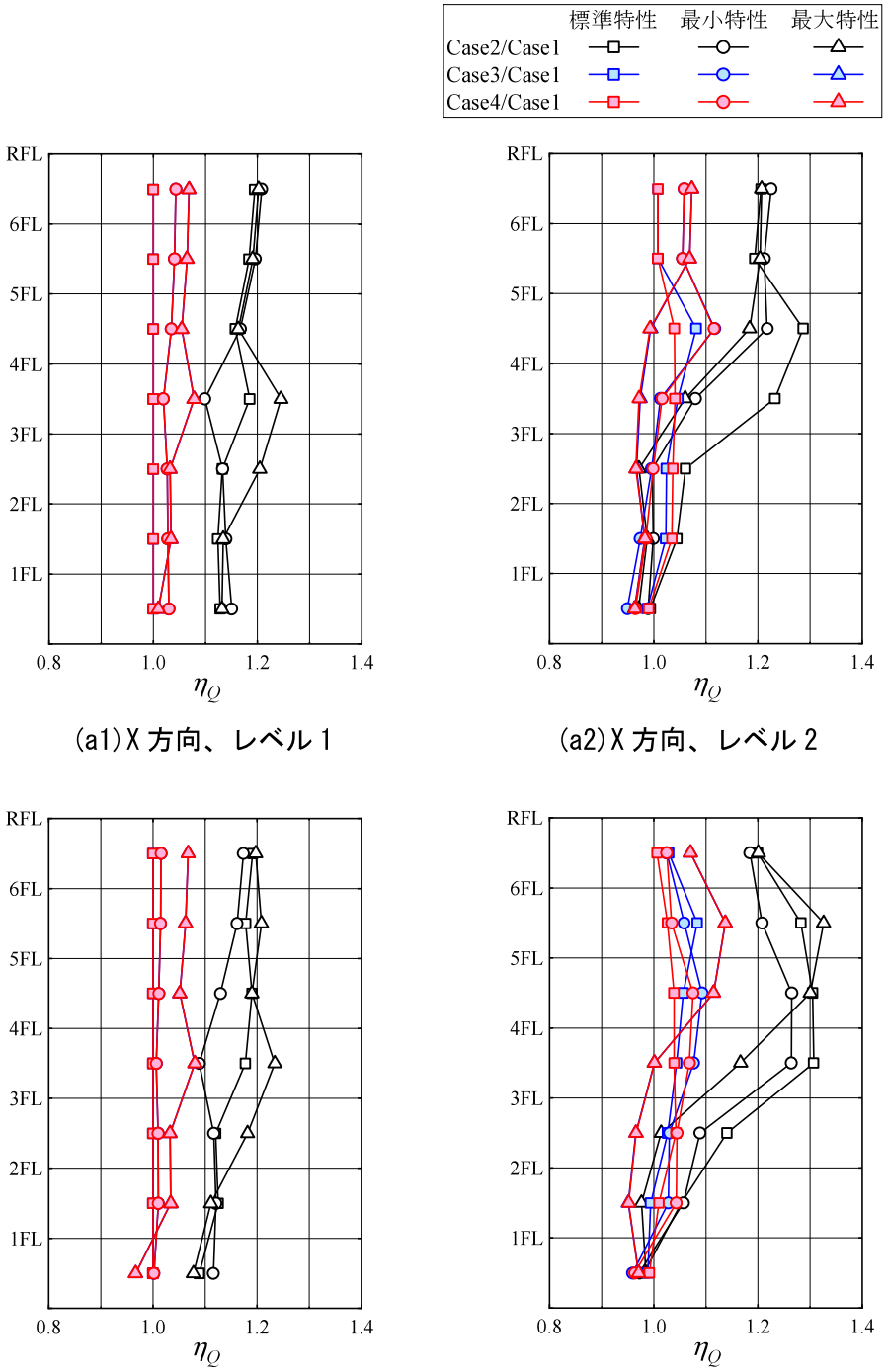
(a1)X 方向、レベル 1

(a2)X 方向、レベル 2

(b1)Y 方向、レベル 1

(b2)Y 方向、レベル 2

図 4.54　最大層間変形角倍率 η_R



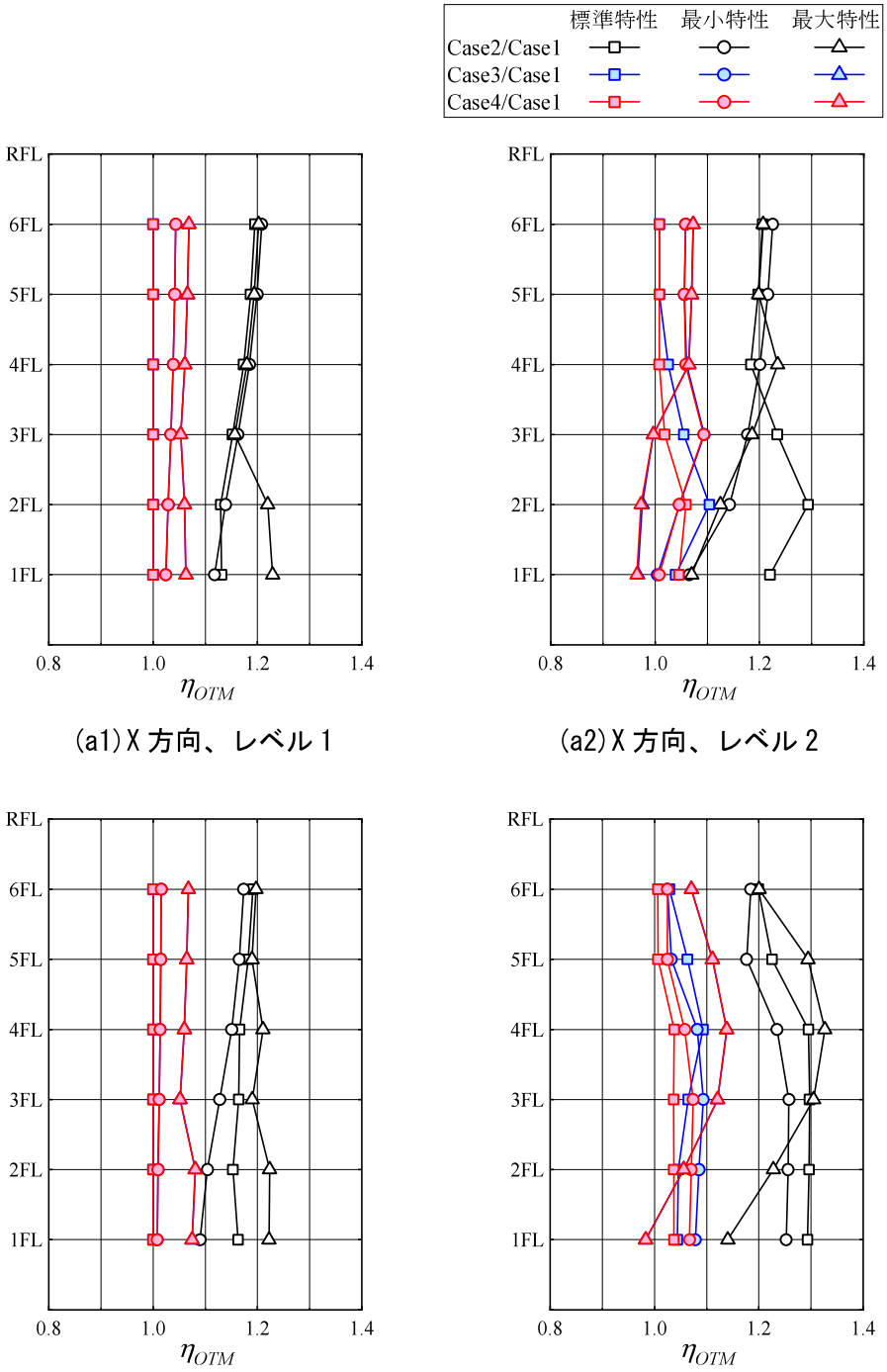
(a1)X 方向、レベル 1

(a2)X 方向、レベル 2

(b1)Y 方向、レベル 1

(b2)Y 方向、レベル 2

図 4.55　最大層せん断力倍率 η_Q



(a1)X 方向、レベル 1

(a2)X 方向、レベル 2

(b1)Y 方向、レベル 1

(b2)Y 方向、レベル 2

図 4.56　最大転倒モーメント倍率 η_{OTM}

5　変位検知型性能可変オイルダンパーのロバスト性

5.1　検討方針

ここでは、建物の構造性能を確定、入力地震動を不確定として扱い、入力地震動の不確定性が変位検知型性能可変オイルダンパーの最大応答値に与える影響について検討する。

入力地震動はパワースペクトルと振幅包絡線でモデル化した。モンテカルロシミュレーションを 10,000 回実行し、位相特性の影響を平均化して、構造物の頂部最大応答加速度や免震層の最大水平変位の期待値 E、標準偏差 σ、および変動係数 $c.o.v$ を評価し、ロバスト性に与える影響について検討した。

5.2　入力地震動のモデル化

5.2.1　入力地震動のパワースペクトル

入力地震動は、パワースペクトルと振幅包絡線関数でモデル化した。ここでは、地震動のスペクトルとして、次式の Clough-Penzien スペクトル[68)]を用いた。

$$S(\omega)=S_0\frac{\omega_g^4+4h_g^2\omega_g^2\omega^2}{\left(\omega_g^2+\omega^2\right)^2+4h_g^2\omega_g^2\omega^2}\cdot\frac{\omega^4}{\left(\omega_f^2+\omega^2\right)^2+4h_f^2\omega_f^2\omega^2} \tag{5.1}$$

ここで、ω は円振動数、S_0 は次式より求まるスペクトル強度である。

$$S_0=\frac{\sigma_{PGA}{}^2}{\pi}\cdot\frac{2h_gh_f\left[\left(\omega_g^2-\omega_f^2\right)^2+4\omega_g^2\omega_f^2\left(h_g^2+h_f^2\right)+4h_gh_f\omega_g\omega_f\left(\omega_g^2-\omega_f^2\right)\right]}{\omega_g^4\left(h_g\omega_f+h_f\omega_g\right)+4h_g^2\omega_g^2\left[h_g\omega_f^3+h_f\omega_g^3+4h_gh_f\omega_g\omega_f\left(h_g\omega_f+h_f\omega_g\right)\right]} \tag{5.2}$$

スペクトル強度 S_0 はピークファクターを 3.0 と仮定したときに、想定する最大地動加速度になるように設定した。本論では、Sues and Wen[69)]により提案されている地盤条件の Soft と Hard を用いる。文献 69)では、Kanai-Tajimi スペクトルで規定されているが、$\omega=0$ で特異となり地動速度の上限がなくなるため、ここでは Clough-Penzien スペクトルを用いてそれを回避した。Clough-Penzien スペクトルのパラメータを**表 5.1** に、入力地震動に用いたパワースペクトルを**図 5.1** に示す。図には、参考のため文献 69)で規定された Kanai-Tajimi スペクトルも示している。

表 5.1　入力地震動のスペクトル特性

	ω_g	h_g	ω_f	h_f
Ｓｏｆｔ(軟弱地盤)	10.9	0.96	1.00	0.995
Ｈａｒｄ(硬質地盤)	16.9	0.94		

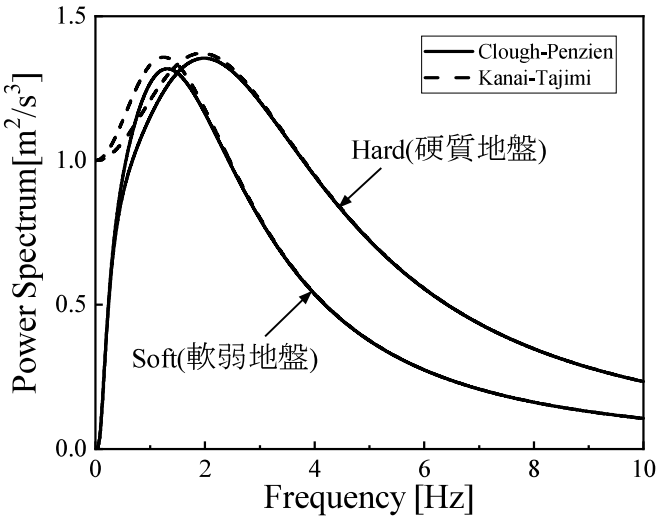


図 5.1　入力地震動のパワースペクトル

5.2.2　入力地震動の振幅包絡形状

本論で用いた振幅包絡形状は次式で示した大崎の振幅包絡線関数[70]を用いた。

$$\left.\begin{array}{ll} 0 \le t \le T_b & : e(t) = (t/T_b)^2 \\ T_b \le t \le T_c & : e(t) = 1.0 \\ T_c \le t \le T_d & : e(t) = e^{-a(t-T_c)} \end{array}\right\} \tag{5.3}$$

ここで、(5.3)式の T_d 、T_b 、T_c 、a は次式から算定する。

$$\left.\begin{array}{l} T_d = 10^{0.31M-0.774} \\ T_b = [0.12 - 0.04(M-7)]T_d \\ T_c = [0.50 - 0.04(M-7)]T_d \\ a = -\ln 0.1/(T_d - T_c) \end{array}\right\} \tag{5.4}$$

大崎の振幅包絡線関数は、地震のマグニチュード M をパラメータとし、入力地震動の地動加速度の時刻歴包絡曲線を求める振幅包絡線関数である。なお、ここでは便宜的にマグニチュード M を用いているが、振幅包絡線形状を規定するものであり、最大地動加速度を規定するものではない。入力地震動に用いた振幅包絡線形状を図 5.2 に示す。

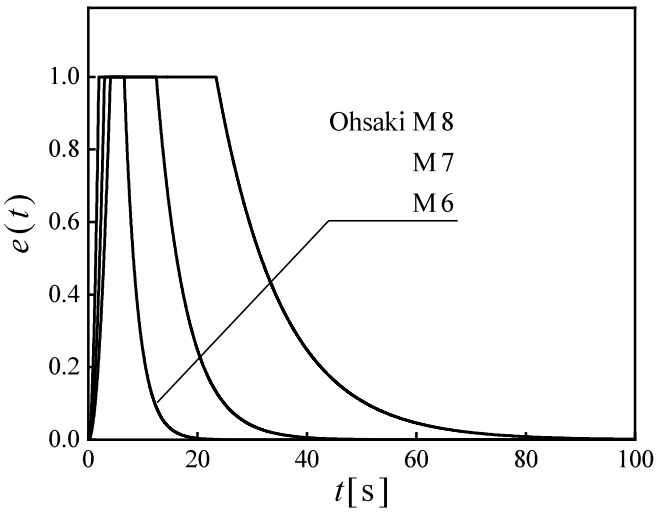


図 5.2　入力地震動に用いた振幅包絡線形状

5.3　解析モデル

検討に用いた上部構造の解析モデルは、**4.1.2 項**で用いた質点系等価せん断モデルとする。ここで、免震層に考慮した水平剛性は、天然ゴム系積層ゴム支承の標準特性時とし、上部構造の水平剛性は一次剛性のみを考慮し、上部構造の非線形性が最大応答値に与える影響については無視することとした。オイルダンパーは、4.4.5 項で用いたオイルダンパーおよび変位検知型オイルダンパーとした。ダンパーに考慮した製造ばらつきは、－30%~+30%まで 10%ピッチとした。地盤条件は**表 5.1** に示した Soft と Hard を用いた。また、振幅包絡線形状の影響を確認するために、**図 5.2** に示した M6,7,8 の振幅包絡線を用いた。**表 5.2** に検討用パラメータを示す。ここで、オイルダンパーの製造ばらつきは、**3 章**から得られたものよりも大きく設定し、－30%から＋30%としている。地震動の継続時間は振幅包絡線形状によらず 150 秒とし、解析時間刻みは 0.01 秒とした。

表 5.2　検討用パラメータ

上部構造		4.1.2 項参照、X 方向
免震装置	免震層の水平剛性	標準特性
	オイルダンパー	Case1, Case2, Case3, Case4 4.4.5 項参照
	オイルダンパーの製造ばらつき	－30, －20, －10, ±0, ＋10, ＋20, ＋30
入力地震動	地盤条件	Soft, Hard
	振幅包絡線	Ohsaki M6, M7, M8
	最大入力加速度 PGA[cm/s^2]	100～1000@100

※ 表中のアンダーラインを基準モデルとする

5.4　モンテカルロシミュレーションによるロバスト性の確認

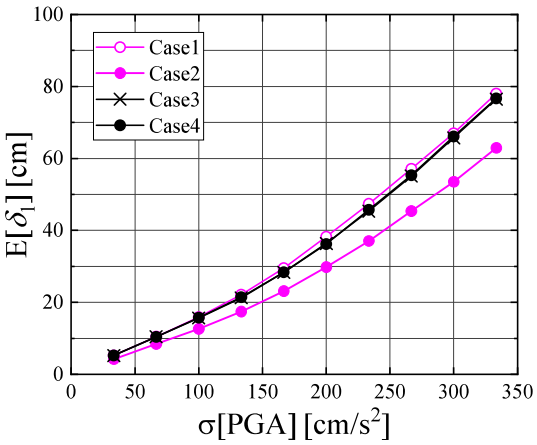
地盤条件は Soft、振幅包絡線は Ohsaki M7 におけるダンパーモデルの違いによる免震層の最大変位の期待値 $E[\delta_1]$、標準偏差 $\sigma[\delta_1]$、変動係数 $c.o.v[\delta_1]$、最上階の最大応答加速度の期待値 $E[ACC_R]$、標準偏差 $\sigma[ACC_R]$、変動係数 $c.o.v[ACC_R]$ を図 5.3 に示す。$E[\delta_1]$ は変位検知型性能可変オイルダンパー(以下、VOD)の設定クリアランス L_S 以上からその変位抑制効果が現れ、Case1 に比べ概ね 5%程度の変位抑制効果があり、PGA が大きくなってもその傾向は変わらない。また、小形シリンダの回帰特性の有無による違いはない。$\sigma[\delta_1]$ は Case3,Case4 ともに Case1 と同程度の値となった。$c.o.v[\delta_1]$ はダンパーモデルの違いによらず、PGA が 300cm/s² までは概ね 0.25、それ以降は徐々に増加傾向を示し、PGA が 800cm/s² で頭打ちして概ね 0.4 程度となった。これは、ダンパーの履歴特性の非線形性に影響していると考えられる。

$E[ACC_R]$ に着目すると、Case2 は Case1 に比べ PGA が小さいほど大きくなる傾向を示すが、VOD を用いた Case3、Case4 は PGA が 600cm/s² 未満は Case2 よりも小さくなり、上部構造の応答加速度が低減されていることが確認できる。$\sigma[ACC_R]$ は $\sigma[\delta_1]$ と同様の傾向を示し、Case3,Case4 ともに Case1 と同程度の値となった。$c.o.v[ACC_R]$ は PGA が 300cm/s²~600cm/s² の範囲では Case3,4 の方が Case1 より大きくなり、それ以上の PGA では小さくなっている。これは、VOD の性能の変化の有無が混在しているため、$c.o.v[ACC_R]$ が 300cm/s²~600cm/s² の範囲で大きくなったものと考えられる。

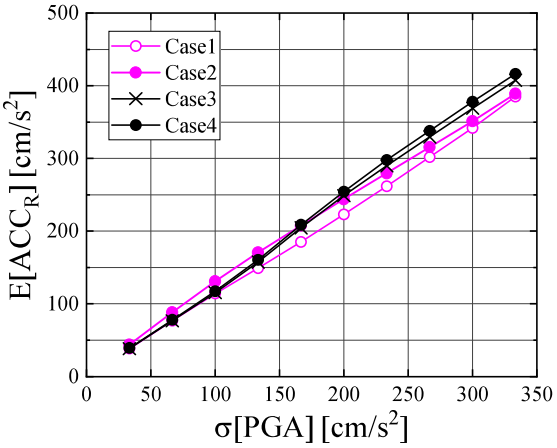
次に、製造ばらつきの違いを図 5.4 に示す。$E[\delta_1]$ は $E[ACC_R]$ に比べ、製造ばらつきの影響を受けやすく、減衰力が+10%ごとに、$E[\delta_1]$ は概ね 5%小さくなる傾向を示し、$E[ACC_R]$ は概ね 2%大きくなる傾向を示し、製造ばらつきよりの変化率よりも、$E[\delta_1]$、$E[ACC_R]$ の変化率は小さく、とくに、上部構造の応答加速度は影響を受けにくくロバスト性を有していることが確認できる。

地盤条件の違いを図 5.5 に示す。地盤条件が Hard より Soft の方が、$E[\delta_1]$、$\sigma[\delta_1]$、$c.o.v[\delta_1]$、$E[ACC_R]$、$\sigma[ACC_R]$、$c.o.v[ACC_R]$ 全て大きくなる傾向を示した。また、設定クリアランス L_S 以上の $E[\delta_1]$ になると、$c.o.v[\bullet]$ が大きくなる傾向が確認できた。

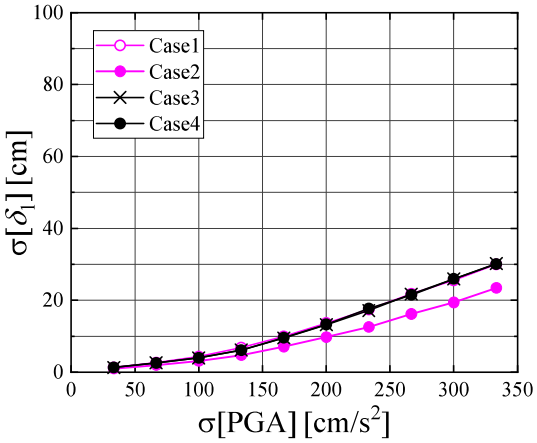
振幅包絡線形状の違いを図 5.6 に示す。定常($e(t)=1.0$)が長くなるほど最大応答値の期待値 $E[\bullet]$ は大きくなる傾向を示すが、標準偏差 $\sigma[\bullet]$ は概ね同程度であった。振幅包絡線形状の定常区間が小さくなると、$c.o.v[\bullet]$ は大きくなる傾向が確認できた。



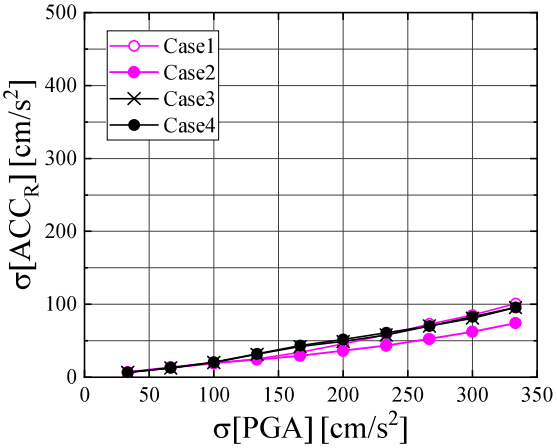
(a1) E[δ_1]



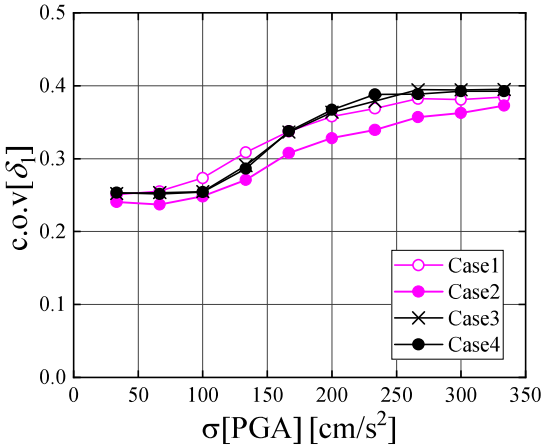
(b1) E[ACC_R]



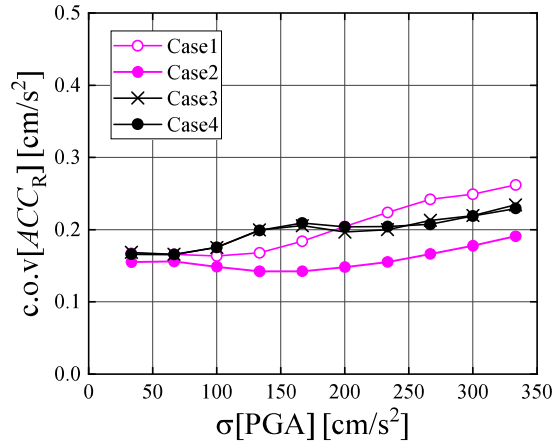
(a2) σ[δ_1]



(b2) σ[ACC_R]

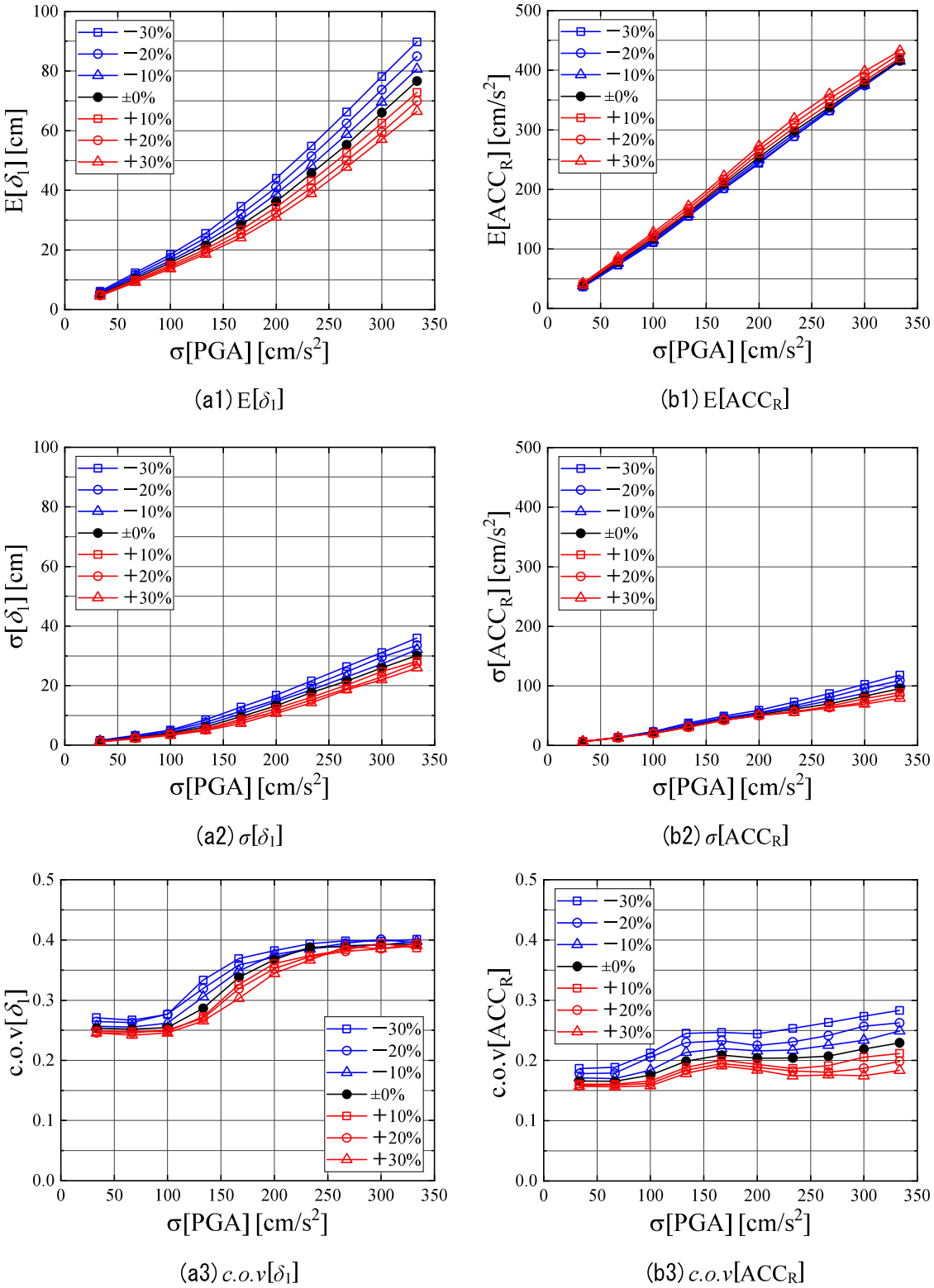


(a3) $c.o.v$[δ_1]



(b3) $c.o.v$[ACC_R]

図 5.3　ダンパーモデルの違い

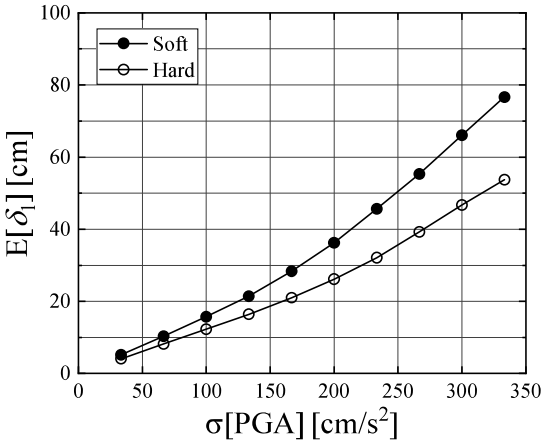


(a1) E[δ_1]　(b1) E[ACC_R]

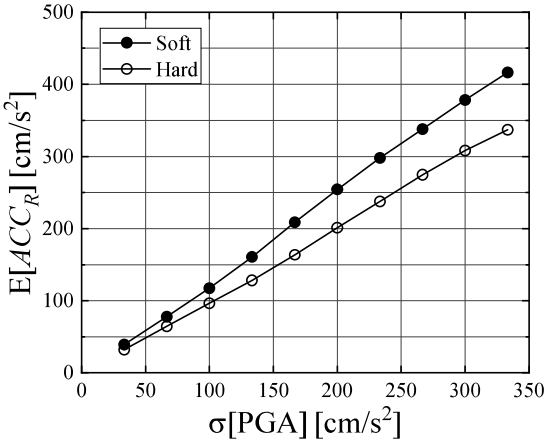
(a2) σ[δ_1]　(b2) σ[ACC_R]

(a3) $c.o.v$[δ_1]　(b3) $c.o.v$[ACC_R]

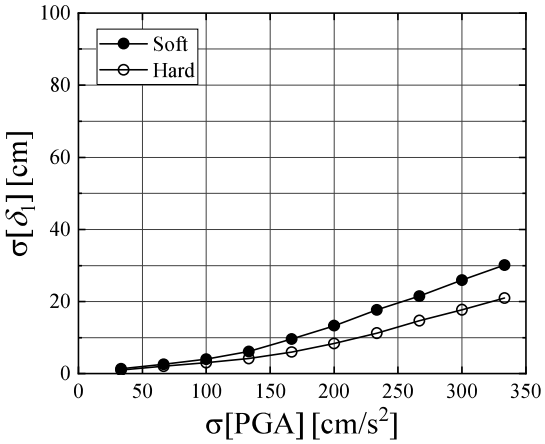
図 5.4　ダンパーのばらつきの違い



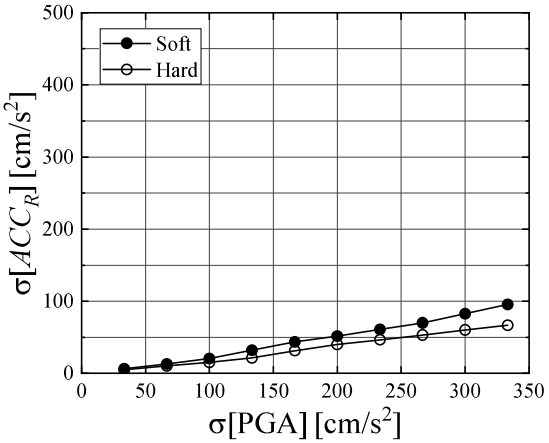
(a1) E[δ_1]



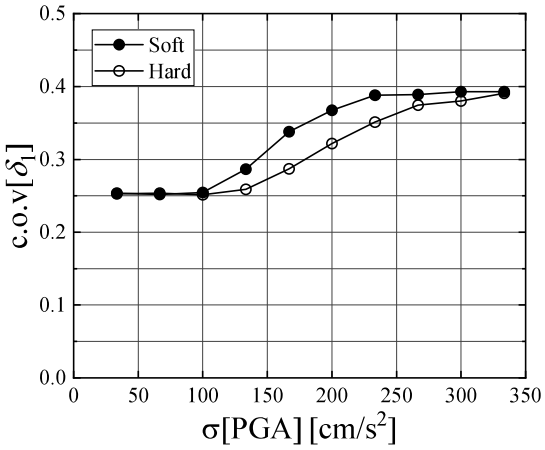
(b1) E[ACC_R]



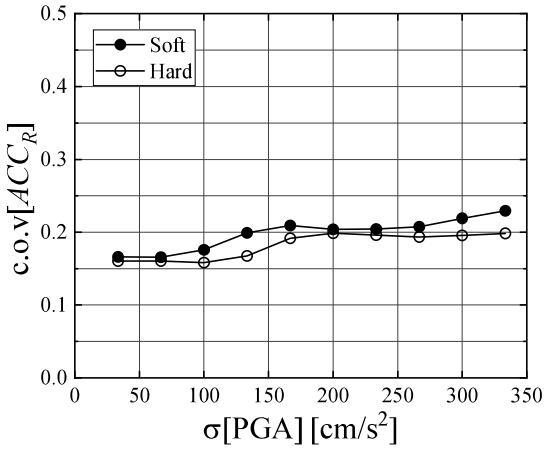
(a2) $\sigma[\delta_1]$



(b2) $\sigma[ACC_R]$

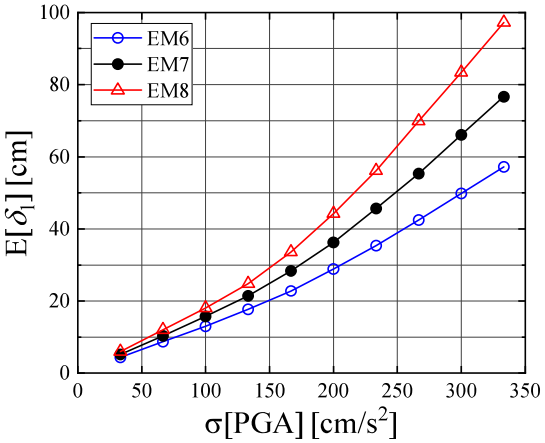


(a3) $c.o.v[\delta_1]$

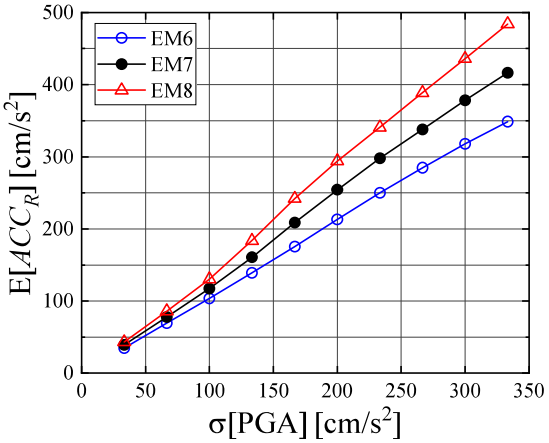


(b3) $c.o.v[ACC_R]$

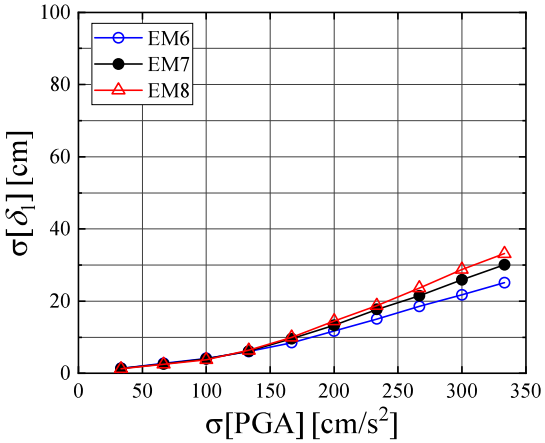
図 5.5　地盤条件の違い



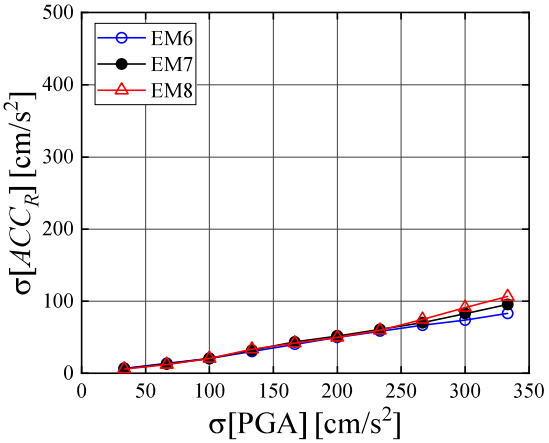
(a1) E[δ_1]



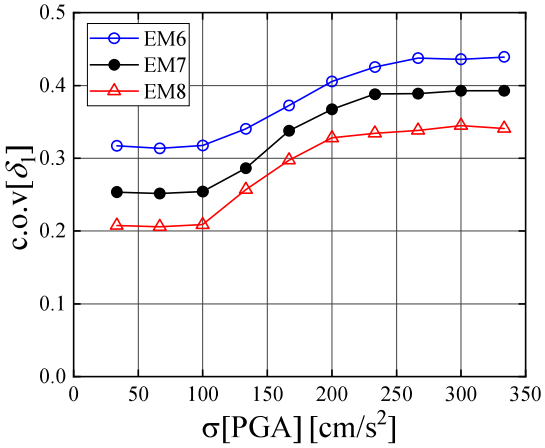
(b1) E[ACC_R]



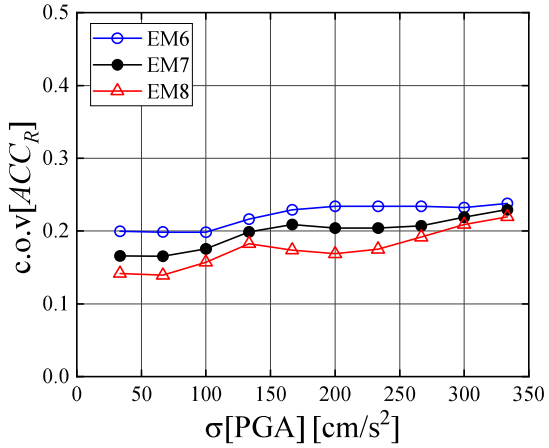
(a2) $\sigma[\delta_1]$



(b2) $\sigma[ACC_R]$



(a3) $c.o.v[\delta_1]$



(b3) $c.o.v[ACC_R]$

図 5.6　振幅包絡形状の違い

6 結　章

免震構造は、強い地震から建物を守る最良の方法の一つであり、建物の固有周期を長く設計し、上部構造に生じる加速度を大幅に減少させる効果がある。しかし、低周波領域に大きなエネルギーをもつ巨大地震の場合、免震層の水平変位が過大になり、擁壁衝突などが生じる可能性がある。過大な水平変位を抑制するために、水平剛性や減衰性能を免震層に付加すると上部構造に生じる加速度が大きくなってしまい、震性能が損なわれてしまう。

そこで、巨大地震に伴う長周期地震動時の過大変位を抑制しつつ、中大地震時の免震性能は一般の免震建物と同等の性能を維持するために、変位検知型の性能可変オイルダンパー(以下、VOD)を開発し、最大減衰力が 500kN 級の VOD 5 基による減衰性能確認実験を行った。また、VOD を用いた免震建物の設計法を提案して、モンテカルロシミュレーションを実施し、そのロバスト性を調査したものである。以下に、本論で得られた知見について記述する。

1 章では、免震建物の巨大地震対策に関する研究について調査した。

- 解析的な検討から、免震層の過大な変位を抑制するためには、剛性付加ではなく、減衰付加が効果的であることが得られている。
- アクティブ・セミアクティブによる変位制御の研究が 1990 年頃から行われ、オイルダンパーのオリフィスの大きさをセミアクティブ制御により変更させるセミアクティブダンパーが開発・実適用されたが、制御システムの導入やセンサー・システムの更新など定期的なメンテナンスを伴うことなどを理由に普及しなかった。
- 減衰力をパッシブに切り替えるオイルダンパーが開発されている。
- 速度依存型の性能可変オイルダンパーが開発されているが、開発途中である。
- 変位検知型の性能可変オイルダンパーは 3 種類開発されている。
- 1 つ目は、ダンパー変位が閾値以上になったときのみ減衰係数を切り替えて減衰力を増加させるもの。(2 段階)
- 2 つ目は、ダンパー変位が閾値以上になった以降は、減衰係数を切り替えて減衰力を増加させるもの。(2 段階)ただし、切り替わった減衰係数は地震終了後にピンを元に戻す管理が必要となる。
- 3 つ目は、ダンパー変位が閾値以上になると、その変位に応じて減衰力を無段階で増加させ、地震終了後は元の減衰性能に戻る回帰特性を有するもの。ただし、住宅を対象とした 50kN 級のダンパーや性能変化部のみを取り出して実験したものがあるが、性能変化させる機構で作動油内のエアが原因で想定通りに減衰力が増加しないなどの課題があった。

2章では、開発したVODの機構および品質について記述し、小形シリンダのエア抜き対策などの改良点について述べた。

3章では、最大減衰力500kN級のVOD 5基の減衰性能を確認した。

・小形シリンダの作動距離に応じて、減衰力が増加することを確認した。
・低減係数0.58とした減衰力の基準値を定め、基準値に対して、測定した減衰力は低速域で＋29%、高速域で－7%となった。
・温度依存性、繰り返し耐久性は通常のダンパーと同様に無視できる程度に小さい。
・短周期になると、減衰力を想定通りに発揮しない場合があるので、対象建物の一次固有周期は2.0秒以上とする。
・長周期地震動時においても、VODの温度上昇は最大で＋21℃程度で収まり、VODの限界温度80℃よりも小さい。
・減衰性能の回帰特性の時間依存性を小形シリンダの自由解放実験から評価し、小形シリンダの作動距離が25cmの場合は、圧縮側・引張側ともに4分程度で元の位置に戻ることを確認し、ダンパーの違いによらず、概ね同程度の回帰特性を有していることを確認した。
・減衰性能が変化するまでの時間遅れは、最大で0.005秒と極めて僅かであり、エネルギー吸収性能に与える影響は無視できる程度に小さいことを確認した。

4章では、速度－減衰力が通常のバイリニア型のオイルダンパーを2基設けた既存建物を基準とし、ダンパーモデルの違いによる最大応答値の比較を行い、変位検知型性能可変オイルダンパーの優位性を明らかにした。

・VODを用いた免震建物の免震性能は、回帰特性の有無を考慮した時刻歴応答解析を行い、その応答値の上限値で評価する設計法を提案した。
・長周期地震時に免震層の過大な水平変位を抑制するために、速度－減衰力が通常のバイリニア型のオイルダンパーを1基追加した場合、長周期地震動時の最大水平変位を25%小さくすることができるが、中・大地震時の上部構造の最大応答値は平均で概ね20%大きくしてしまう。
・これに対し、VODを2基用いた場合は、長周期地震動時の最大水平変位を18%小さくすることができ、中・大地震時の上部構造の最大応答値は概ね通常のオイルダンパーを2基用いた場合と概ね同程度に留めることができた。

5 章では、4 章で用いた解析モデルに対して、モンテカルロシミュレーションを 10,000 回実施し、ピークファクターのロバスト性について調査した。

- VOD の回帰特性の有無は、上部構造の最大応答値に与える影響は極めて小さい。
- 中・大地震相当の地震動に対しては、減衰性能を単純に 1.5 倍したものより、VOD は頂部最大応答加速度の期待値を平均で 10%小さくする効果がある。
- ダンパーの減衰力が 10%大きくなると、免震層の最大変位の期待値は概ね 5%小さくなり、頂部の最大加速度の期待値は 2%大きくなることから、最大加速度より免震層の最大変位の方が減衰力増減の影響を受けやすい。
- 振幅包絡線形状が Ohsaki　M8 から M6 になり、非定常性が強くなると、免震層の最大水平変位の変動係数が概ね 0.05 ずつ大きくなる。

以上のように、本論文では、中・大地震時は通常の免震建物と同等の応答低減効果があり、長周期地震動時の免震層の過大な水平変位を抑制する VOD を開発し、その減衰性能を確認した。また、本ダンパー特有の回帰特性や小形シリンダが動き出してから減衰力が切り替わるまでの時間遅れを明らかにし、実建物を例にその特徴を反映した設計法を提案し、VOD の優位性を示した。最後に、モンテカルロシミュレーションを行い、その本ダンパーの免震性能に対するロバスト性について調査した。

今後は、実建物への適用並びに最大減衰力が 1,000kN 級の性能可変オイルダンパーを開発し、より高度な免震性能の提案が行えるように研究を進めたい。

参考文献

1) 座間信作、2003 年十勝沖地震にみる石油タンク被害の特徴と対策、物理探査 第 59 巻 第 4 号、p.353－362、2006 年
2) 平田編、平成 15 年（2003 年）十勝沖地震に関する緊急調査研究報告書、東京大学地震研究所、2004 年
3) 国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人建築研究所、平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震被害調査報告、2012 年 3 月
4) 国土交通省住宅局建築指導課、超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について、国住指第 1111 号他、2016 年 6 月
5) 岡隆一、免震基礎に対する一考察、建築雑誌、昭和 3 年 511 号
6) 小堀鐸二、南井良一郎、制震系の解析（制震構造に関する研究 1)、日本建築学会論文報告集、第 66 号、1960 年 10 月
7) 小堀鐸二、南井良一郎、制震系の条件（制震構造に関する研究 2)、日本建築学会論文報告集、第 66 号、1960 年 10 月
8) Y.Koyama、S.Yamagami、H.Funaki、M.Misu、M.Shimizu、M.Takayama、A STUDY ON AGED DETERIORATION OF RUBBER BEARINGS INSTALLED IN THE ISOLATED BUILDING AFTER 30 YEARS IN USE、 *17th World Conference on Earthquake Engineering*、*Sendai*、 *Japan*、 2021.9
9) 舟木秀尊、小山慶樹、山上聡、1986 年に竣工した実免震建物における免震装置の水平剛性の評価、日本建築学会技術報告集 Vol.24、No.58、p.979-984、2018 年 2 月
10) 一般社団法人日本免震構造協会、免震建築物等の計画推移、2023 年 6 月
11) John F Hall、Keri L Ryan、Isolated Buildings and the 1997 UBC Near-Source Factors、*Earthquake Spectra* 2000.5、16(2)、p.3923-411
12) James M. Kelly、The role of damping in seismic islation、Earthquake Engineering & Structural Dynamics、1999.1,Vol.28(1)、 p. 3-20
13) Hamed Zargar、Keri L Ryan、Justin D.Marshall、Feasibility study of a gap damper to control seismic isolator displacements in extreme earthquakes 、 *Structural Control and Health Monitoring.* 2013; 20: p.1159-1175
14) 福井弘久、藤谷秀雄、向井洋一、伊藤麻衣、橋本将汰、Gilberto Mosqueda、振動台実験による免震試験体の擁壁衝突時の挙動、日本建築学会構造工学論文集 Vol.64B、 2018.3
15) 福井弘久、藤谷秀雄、向井洋一、伊藤麻衣、Gilberto Mosqueda、免震構造の擁壁衝突時の上部構造の応答評価と力積を用いた解析、日本建築学会構造系論文集 第 84 巻 第 766 号、1533-1543、 2019 年 12 月
16) 三輪田吾郎、小巻潤平、佐藤浩太郎、佐野剛志、勝俣英雄、多幾山法子、林康裕、実大免震建物の擁壁衝突実験とそのシミュレーション解析、日本建築学会構造系論文集 第

76 巻 第 663 号、899-908、 2011 年 5 月
17) 三輪田吾郎、佐野剛志、花村浩嗣、中塚光一、大住和正、安井雅明、衝突装置を含めた免震建物衝突設計手法の検討（その 5）高減衰ゴム製ブロックの復元力特性、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）、構造II、pp.551-552、 2016.8
18) 日本免震構造協会、免震建築紹介 ディスコ九州支店、MENSHIN、 pp.11-14、 2017.10
19) 大林組、免震建物用フェールセーフ技術、https://www.obayashi.co.jp/chronicle/detabase/t3-2.htm
20) 寺本彰、田中耕太郎、野畑有秀、木造 2 階建酒造建築に適用したソフトランディング免震構法、日本建築学会学術講演梗概集、構造II、2014 年 9 月
21) 伊藤敦、吉澤幹夫、田代康彦、吉田聡、加藤直樹、福田滋夫、谷川友秀、過大変位抑制積層ゴムの開発（その１）開発の背景と装置の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、構造II、p.429－430、2014 年 9 月
22) 福田滋夫、吉澤幹夫、田代靖彦、伊藤敦、吉田聡、加藤直樹、谷川友秀、過大変位抑制積層ゴムの開発（その 2）縮小体および実大試験体の静的試験、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、構造II、p.429－430、2014 年 9 月
23) 谷川友秀、吉澤幹夫、田代靖彦、伊藤敦、吉田聡、加藤直樹、福田滋夫、過大変位抑制積層ゴムの開発（その 3）実大試験体の動的試験、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、構造II、p.433－434、2014 年 9 月
24) 吉田聡、吉澤幹夫、田代靖彦、伊藤敦、加藤直樹、福田滋夫、谷川友秀、過大変位抑制積層ゴムの開発（その 4）変位抑制効果の検証、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、構造II、p.435－436、2014 年 9 月
25) 吉田聡、田代靖彦、 伊藤敦、加藤直樹、福田滋夫、吉澤幹夫、積層ゴムと弾性すべり支承を組み合わせた過大変位抑制免震支承の開発（その 1）開発の背景、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国) 、構造II、p.927-928、2017 年 8 月
26) 福田滋夫、田代靖彦、伊藤敦、吉田聡、加藤直樹、吉澤幹夫、積層ゴムと弾性すべり支承を組み合わせた過大変位抑制免震支承の開発（その 2）装置の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国) 、構造II、p.929-930、2017 年 8 月
27) 伊藤敦、田代靖彦、吉田聡、加藤直樹、福田滋夫、吉澤幹夫、積層ゴムと弾性すべり支承を組み合わせた過大変位抑制免震支承の開発（その 3）効果の検証、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国) 、構造II、p.931-932、2017 年 8 月
28) 安田拓矢、森高英夫、築谷朋也、福和伸夫、免震ダンパー接続型付加減衰機構の開発（その１）開発意図とモデルケーススタディー、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海) 、構造II、p.275-276、2012 年 9 月
29) 露木保男、鈴木和廣、安田拓矢、築谷朋也、村尾秀己、福和伸夫、免震ダンパー接続型付加減衰機構の開発（その 2）接続装置の作動実験、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海) 、構造II、p.277-278、2012 年 9 月

30) 安田拓矢、伊藤栄治、池田直子、築谷朋也、森高英夫、青木賢治、免震ダンパー接続型付加減衰機構の開発（その 3）実免震建物への適用事例、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海) 、構造II、p.279-280、2012 年 9 月
31) 築谷朋也、安田拓矢、伊藤栄治、池田直子、半田市新庁舎、一般社団法人日本免震構造協会、MENSHIN、90 号、p.8-11、2015 年 11 月
32) 谷地畝和夫、鈴木彰、齋藤雄太、得能将紀、小林正人、不感帯機構付きオイルダンパーを用いた免震建物の地震応答性状、日本建築学会構造系論文集 第 86 巻 第 781 号、pp.381-391、 2021.3
33) Hamed Zargar、Keri L. Ryan、Justin D. Marshall: Feasibility study of a gap damper to control seismic isolator displacements in extreme earthquakes 、 *Structural Control and Health Monitoring*、 20; pp.1159-1175、2013
34) 川島一彦、運上茂樹、バリアブルダンパーを用いた道路橋の地震時応答制御、土木工学会論文集、 No. 501/I-29; pp.143-152、 1994 年 10 月
35) B.F. Spencer Jr.、S. Nagarajaiah: State of the Art of Structural Control、*Journal of Structural Engineering*、*ASCE*、129(7)、 p.845-856、2003.7
36) 吉田和夫、藤尾忠洋、双線形最適制御理論とセミアクティブ免震制御への応用、日本機会学会論文集(C 編)、67 巻 656 号、p.96-102、2001 年 4 月
37) 慶應義塾大学、https://www.st.keio.ac.jp/education/learning/1707.html
38) 池田芳樹、日本における建築構造物のアクティブ・セミアクティブ振動制御、第１２回日本地震工学シンポジウム、pp.77-81、2006 年
39) 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、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州) 、構造II、p.409-410、2016 年 8 月
40) 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実験、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国) 、構造II、p.995-996、2017 年 8 月
41) 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、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国) 、構造II、p.997-998、2017 年 8 月
42) 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、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北) 、構造II、p.1029-1030、2018 年 9 月
43) 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、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道) 、構造II、p.655-656、2022 年 9 月
44) 福喜多輝、北村佳久、濱智貴、磯田和彦、榊原健人、可変減衰型オイルダンパーの開発

（その 1）ダンパーの基本特性と解析的検討、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国) 、構造II、p.991-992、2017 年 8 月
45) 庄司裕明、浅見達郎、佐藤浩太郎、横浜グランゲート、一般社団法人日本免震構造協会、MENSHIN、111 号、2021 年 1 月
46) 欄木龍大、長島一郎、新居藍子、木村雄一、西谷章：バイフロー式パッシブ可変オイルダンパーの開発とそれを用いた免震構造物の応答制御、日本建築学会構造系論文集 第 80 巻 第 713 号、p.1023-1032、 2015 年 7 月
47) 欄木龍大、長島一郎、新居藍子、青野英志、木村雄一、中島徹、細澤治、露木保男、巨大地震に対応する高性能免震技術の開発 （その 1）ストローク 1000mm のパッシブ切替型オイルダンパー性能試験、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) 、構造II、p.509-510、2015 年 9 月
48) 青野英志、新居藍子、欄木龍大、長島一郎、木村雄一、中島徹、細澤治、巨大地震に対応する高性能免震技術の開発（その 2）パッシブ切替型オイルダンパーを利用した高性能長周期免震、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) 、構造II、p.511-512、2015 年 9 月
49) 新居藍子、欄木龍大、長島一郎、木村雄一、中島徹、青野英志、細澤治、巨大地震に対応する高性能免震技術の開発（その 3）パッシブ切替型オイルダンパーを利用した既存免震建物のバリューアップ、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) 、構造II、p.513-514、2015 年 9 月
50) 青野翔、谷翼、欄木龍大、パルス性地震動に対するパッシブ切替型オイルダンパーの応答特性に関する検討（その 1）Ricker wavelet に対する応答特性、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道) 、構造II、p.663-664、2022 年 9 月
51) K. Ikago、I. Fukuda、H. Luo、D. Li、H. Kanno、N. Hori、REAL-TIME HYBRID TESTING OF A PASSIVE VARIABLE ORIFICE DAMPER INCORPORATED INTO BASE ISOLATED BUILDING、*17th World Conference on Earthquake Engineering*、*Sendai*、 *Japan*、 2020.9
52) 伊藤拓海、倉重万梨乃、五十子幸樹、減衰性能可変オイルダンパーによる免震構造物の地震時応答変位制御（その１）実物大部分試験体を用いた動的加振実験、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)、構造II、p.185-186、2019 年 9 月
53) 伊藤拓海、倉重万梨乃、五十子幸樹：減衰性能可変オイルダンパーによる免震構造物の地震時応答変位制御（その 1）実物大部分試験体を用いた動的加振実験、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、構造II、p.185-186、2019 年 9 月
54) 倉重万梨乃、伊藤拓海、五十子幸樹、減衰性能可変オイルダンパーによる免震構造物の地震時応答変位制御（その 2）性能可変オイルダンパーまたは既往セミアクティブダンパーを適用した設計比較、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)、構造II、p.187-188、2019 年 9 月
55) 倉重万梨乃、五十子幸樹、遺伝的アルゴリズムを用いた性能可変オイルダンパー付免震

建物の多目的最適設計、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)、構造II、p.821-822、2017 年 8 月
56) 池永昌容、三木広志、五十子幸樹、井上範夫、性能可変オイルダンパーを有する 4 質点系免震試験体の振動台実験およびその適用性の検討（その 1）性能可変オイルダンパーの概要・単体実験結果および振動台実験の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）構造II、p.391-392、2013 年 8 月
57) 三木広志、池永昌容、五十子幸樹、井上範夫、性能可変オイルダンパーを有する 4 質点系免震試験体の振動台実験およびその適用性の検討（その 2）振動台実験結果および VOD の適用性の解析検討、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）構造II、p.393-394、2013 年 8 月
58) 三木広志、池永昌容、五十子幸樹、井上範夫、性能可変オイルダンパーを有する 4 質点系免震構造物の振動台実験、日本建築学会技術報告集、第 19 巻 第 42 号、453-456、2013 年 6 月
59) 井上範夫、五十子幸樹 : 建築物の変位制御設計ー地震に対する免震・長周期建物の設計法ー、丸善出版、 2012 年 12 月
60) 三木広志、南雅之、渡辺真司、池永昌容、五十子幸樹、井上範夫、ユニフロー式性能可変オイルダンパーの開発とその応答性状に関する解析的検討、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）構造II、p.361-362、2012 年 9 月
61) 渡辺真司、池永昌容、三木広志、五十子幸樹、根本真孝、井上範夫、ユニフロー式性能可変オイルダンパーの開発とその応答性状に関する実験的検討（その 1）ユニフロー式性能可変オイルダンパーの概要と特性、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、構造II、p.457-458、2011 年 7 月
62) 三木広志、池永昌容、渡辺真司、五十子幸樹、根本真孝、井上範夫、ユニフロー式性能可変オイルダンパーの開発とその応答性状に関する実験的検討（その 2）単体加振実験および地震波加振実験の概要と結果、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）構造II、p.459-460、2011 年 7 月
63) 田部井直哉、堀則男、井上範夫、性能可変オイルダンパーの開発および免震構造物への適用性、日本建築学会構造系論文集 第 74 巻 第 636 号、pp.259-266、2009 年 2 月
64) 建設省建築研究所・財団法人日本建築センター、設計用入力地震動作成手法技術指針、1992.3、日本建築センター
65) 日本免震構造協会、免震建築物の耐風設計指針(2023)、2023 年 3 月
66) 日本建築センター、高層建築物の動的解析用地震動に関する研究（研究代表者 : 松島豊）、平成 6 年度研究助成報告書　No.9404、1993 年
67) Hardin、B.O. and Drnevich、V.P.、Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves、Proc. ASCE、SM7 p.667-692、1972
68) R.W.Clough、J.Penzen、Dynamics of Structures、McGraw-Hill、1986

69) Sue and Wen、Stochastic Evaluation of Seismic Structural Performance、J. Struct Eng、Vol.111、No6、p.1204-1218. 1984.
70) 大崎順彦、新・地震動のスペクトル解析入門、鹿島出版会、1994 年

既発表論文・著書および特許のリスト

○印は、査読付き論文を示す。

a) 本研究に関連する発表論文

○ [a1] 小山慶樹、山上　聡、舟木秀尊、五十子幸樹、井上範夫
「免震建物に適用する過大変位抑制用性能可変オイルダンパーの開発」
日本建築学会技術報告集、第 29 巻 第 72 号、701-706、2023 年 6 月

[a2] 小山慶樹、山上　聡、舟木秀尊
「免震建物に適用する過大変位抑制用性能可変オイルダンパーの開発
－500kN 級ダンパーの性能確認－」
奥村組技術研究年報 No.47、2022 年 9 月

[a3] 小山慶樹、山上　聡、舟木秀尊、五十子幸樹、井上範夫
「ビル物免震建物に適用可能な過大変位抑制用性能可変オイルダンパーの開発（その１）500kN 級ダンパーの性能確認」
日本建築学会大会学術講演梗概集、2022 年 7 月

[a4] Y.Koyama、S.Yamagami、H.Funaki、M.Misu、M.Shimizu、M.Takayama
「A STUDY ON AGED DETERIORATION OF RUBBER BEARINGS INSTALLED IN THE ISOLATED BUILDING AFTER 30 YEARS IN USE」
17th *World Conference on Earthquake Engineering*、*Sendai*、*Japan*、2020.9

○ [a5] 舟木秀尊、小山慶樹、山上聡
「1986 年に竣工した実免震建物における免震装置の水平剛性の評価」
日本建築学会技術報告集 Vol.24、No.58、p.979-984、2018 年 2 月

b) 特許リスト

No.1 発明の名称：オイルダンパシステム
日本国特許出願番号：特願 2021-079702（出願日：2021 年 5 月 10 日）
日本国特許公開番号：特開 2022-173786（公開日：2022 年 11 月 22 日）
整理番号：甲 P20200382　乙 A-3674　丁 T20-3139

No.2 発明の名称：オイルダンパシステム
日本国特許出願番号：特願 2021-079703（出願日：2021 年 5 月 10 日）
日本国特許公開番号：特開 2022-173787（公開日：2022 年 11 月 22 日）
整理番号：甲 P20200393　乙 A-3675　丁 T21-006

No.3 発明の名称：オイルダンパシステム
日本国特許出願番号：特願 2021-079704（出願日：2021 年 5 月 10 日）
日本国特許公開番号：特開 2022-173788（公開日：2022 年 11 月 22 日）

整理番号：甲 P20200394　乙 A-3676　丁 T21-007

No.4　発明の名称：オイルダンパシステム

日本国特許出願番号：特願 2021-079705（出願日：2021 年 5 月 10 日）

日本国特許公開番号：特開 2022-173788（公開日：2022 年 11 月 22 日）

整理番号：甲 P20200395　乙 A-3677　丁 T21-008

No.5　発明の名称：オイルダンパシステム

日本国特許出願番号：特願 2021-079706（出願日：2021 年 5 月 10 日）

日本国特許公開番号：特開 2022-173789（公開日：2022 年 11 月 22 日）

整理番号：甲 P20200396　乙 A-3678　丁 T21-009

No.6　発明の名称：オイルダンパシステム

日本国特許出願番号：特願 2022-010267（出願日：2022 年 1 月 26 日）

整理番号：甲 P20210268　乙 A-3716　丁 T21-272

No.7　発明の名称：流体制御バルブ

日本国特許出願番号：特願 2022-091443（出願日：2022 年 6 月 6 日）

整理番号：甲 P20220056　乙 A-3786　丁 T22-058

c）その他の論文など

○　[b1]　小山慶樹、大鳥靖樹、坂場律和、北村春幸

「非定常ランダム応答解析法を用いたエネルギー応答の統計的評価に関する研究－1 質点弾塑性系における基礎構築－」

構造工学論文集 B、Vol.64、p.207-213、2018 年 3 月

○　[b2]　舟木秀尊、小山慶樹、舟山勇司、隈澤文俊

「片側の柱脚が滑動する立体自動倉庫ラックの制振効果に関する研究」

構造工学論文集 B、Vol.64、p.287-294、2018 年 3 月

○　[b3]　舟木秀尊、小山慶樹、舟山勇司、澤田毅、隈澤文俊

「立体自動倉庫ラックに適用する積載物の落下防止を目的とした免震装置の開発」

日本建築学会技術報告集 Vol.24、No.56、p.47-52、2018 年 2 月

○　[b4]　千葉陽一、薩川恵一、北村春幸、小山慶樹

「低摩擦型すべり支承と積層ゴム・ダンパーを組合せた免震構造のエネルギーの釣合に基づく応答予測法」

日本建築学会構造系論文集 No.575、p.65-72、2004 年 1 月

[b5]　小山慶樹、山上　聡、舟木秀尊、床　圭司

「日進工具開発センター」

一般社団法人日本免震構造協会、MENSHIN、121 号、2023 年 7 月

[b6]　山上　聡、岸本　剛、小山慶樹、岡　靖弘、反町　敦、舩津昌史、上田　遼

「端部ＲＣ造･中央部Ｓ造で構成される複合構造梁の開発 ーその２ 靭性能の向上と損傷の抑制ー」
奥村組技術研究所年報 No.47、2022 年 9 月

[b7] 山上　聡、岸本　剛、小山慶樹
「ハイブリッド梁（端部 RC 造中央部 S 造梁）に関する実験的研究（その 2）実験結果」
日本建築学会大会学術講演梗概集、2022 年 7 月

[b8] 岸本　剛、山上　聡、小山慶樹
「ハイブリッド梁（端部 RC 造中央部 S 造梁）に関する実験的研究（その 1）実験概要」
日本建築学会大会学術講演梗概集、2022 年 7 月

[b9] 小山慶樹、山上 聡、舟木秀尊、安井健治
「オールラウンド免震®の実建物への適用（その 2） ー観測記録に基づく微振動対策ダンパーの適用効果ー」
奥村組技術研究所年報 No.47、2021 年 9 月

[b10] 安井健治、小山慶樹、柳沼勝夫、川澄悠馬
「係数励振を利用した制振技術の研究」
奥村組技術研究所年報 No.47、2021 年 9 月

[b11] 山上　聡、舟木秀尊、小山慶樹、山際創、三須基規、清水美雪、髙山峯夫、森田慶子
「竣工後 30 年経過した免震建物から抜取った天然ゴム系積層ゴムの性能検証(その 6)加力履歴と経年変化の関係」
日本建築学会大会学術講演梗概集、2021 年 7 月

[b12] 清水美雪、三須基規、舟木秀尊、山上　聡、小山慶樹、山際　創、髙山峯夫
「竣工後 30 年経過した免震建物から抜取った天然ゴム系積層ゴムの性能検証(その 5)限界変形試験後の亀裂調査」
日本建築学会大会学術講演梗概集、2021 年 7 月

[b13] S.Yamagami、H.Funaki、Y.Koyama、H.Yamagiwa
「Dynamic Characteristics of Seismically Isolated Structures in Microtremor」
17th World Conference on Earthquake Engineering、*Sendai*、*Japan*、2020.9

[b14] 舟木秀尊、山上　聡、小山慶樹、山際　創
「オールラウンド免震の実建物への適用
ー微振動対策ダンパーの性能確認ー」
奥村組技術研究所年報 No.46、2020 年 9 月

[b15] 岸本　剛、山上　聡、小山慶樹
端部 RC 造・中央部 S 造で構成される複合構造梁の開発

－終局強度と靭性能の評価－」
奥村組技術研究所年報 No.46、2020 年 9 月
[b16] 山上　聡、上　寛樹、舟木秀尊、小山慶樹
「実建物で供用している積層ゴムの経年変化
　－天然ゴム系積層ゴムのクリープ－」
奥村組技術研究所年報 No.46、2020 年 9 月
[b17] 小山慶樹
非線形履歴則を有する構造物の非定常入力における エネルギー応答の統計的評価法に関する基礎的研究
奥村組技術研究所年報 No.46、2020 年 9 月
[b18] 山上　聡、舟木秀尊、小山慶樹
「微振動における免震構造の動特性（その 2）強制振動試験の結果」
日本建築学会大会学術講演梗概集、2020 年 9 月
[b19] 小山慶樹、舟木秀尊、山上　聡
「微振動における免震構造の動特性（その 1）建物概要と常時微動計測結果」
日本建築学会大会学術講演梗概集、2020 年 9 月
[b20] 藤森智、石塚広一、市川一美、伊藤裕一、桑素彦、小山慶樹、佐藤正浩、霜田麻由美、竹内章博、徳武茂隆、中川理、中澤誠、中島徹、中村淳一、古橋剛、丸山東、室重行、吉田実
「免震部材の接合部・取付け躯体の設計指針(第 3 版)」
一般社団法人日本免震構造協会、2020 年 1 月
[b21] 藤森智、石塚広一、市川一美、伊藤裕一、桑素彦、小山慶樹、佐藤正浩、霜田麻由美、竹内章博、徳武茂隆、中川理、中澤誠、中島徹、中村淳一、古橋剛、丸山東、室重行、吉田実
「免震建物における対津波構造設計マニュアル
―津波を受ける免震建物の構造設計に当っての基本事項と設計例―」
一般社団法人日本免震構造協会、2019 年 10 月
[b22] 舟木秀尊、山上聡、小山慶樹
「免震建物における積層ゴムの経年変化―ゴム材料の基本特性―」
奥村組技術研究年報 No.45、2019 年 9 月
[b23] 山上聡、上寛樹、安井健治、舟木秀尊、小山慶樹
「2018 年北海道胆振東部地震のときに観測した札幌市内の免震建物の応答」
日本建築学会大会学術講演梗概集、p.271-272、2019 年 9 月
[b24] 舟木秀尊、山上聡、上寛樹、小山慶樹、三須基規、清水美雪、高山峯夫
「竣工後 30 年経過した免震建物から抜取った天然ゴム系積層ゴムの性能検

証(その 4)別置試験体と抜取り品の比較」
日本建築学会大会学術講演梗概集、p.93-94、2019 年 9 月
[b25] 清水美雪、三須基規、舟木秀尊、山上聡、上寛樹、小山慶樹、高山峯夫
「竣工後 30 年経過した免震建物から抜取った天然ゴム系積層ゴムの性能検証(その 3)試験片採取位置とゴム物性の関係」
日本建築学会大会学術講演梗概集、p.91-92、2019 年 9 月
[b26] 三須基規、清水美雪、福田滋夫、加藤直樹、山上聡、上寛樹、舟木秀尊、小山慶樹、高山峯夫
「竣工後 30 年経過した免震建物と天然ゴム系積層ゴムの性能検証」
昭和電線レビューVol.64Page.13-17、2019 年 3 月
[b27] 山上聡、上寛樹、舟木秀尊、小山慶樹
「竣工後 30 年を経過した免震建物に使用されている免震装置の性能検証」
奥村組技術研究年報 No.44、2018 年 9 月
[b28] 小山慶樹、舟木秀尊、舟山勇司、山上聡
「自動倉庫ラックに適用する制振構造の開発―制振部材の組合せ、および地震観測結果―」
奥村組技術研究年報 No.44、2018 年 9 月
[b29] 三須基規、山上聡、上寛樹、舟木秀尊、小山慶樹、高山峯夫
「竣工後 30 年経過した免震建物から抜取った天然ゴム系積層ゴムの性能検証(その 2)限界変形試験結果」
日本建築学会大会学術講演梗概集、p.999-1000、2018 年 9 月
[b30] 山上聡、上寛樹、舟木秀尊、小山慶樹、三須基規、高山峯夫
「竣工後 30 年経過した免震建物から抜取った天然ゴム系積層ゴムの性能検証(その 1)建物の静的加力実験との比較」
日本建築学会大会学術講演梗概集、p.997-998、2018 年 9 月
[b31] 山際創、舟木秀尊、小山慶樹
「自動倉庫ラックに適用する制振構造の開発(その 3)地震観測」
日本建築学会大会学術講演梗概集、p.425-426、2018 年 9 月
[b32] 小山慶樹、舟木秀尊、山際創
「自動倉庫ラックに適用する制振構造の開発(その 2)振動台実験結果とシミュレーションの妥当性」
日本建築学会大会学術講演梗概集、p.423-424、2018 年 9 月
[b33] 舟木秀尊、小山慶樹、山際創
「自動倉庫ラックに適用する制振構造の開発(その 1)概要と振動台実験」
日本建築学会大会学術講演梗概集、p.421-422、2018 年 9 月
[b34] 小山慶樹、舟木秀尊、舟山勇司

「自動倉庫ラックのパレット免震装置に関する研究」
奥村組技術研究年報 No.43、2017 年 9 月
[b35] 山上聡、舟木秀尊、安井健治、小山慶樹
「実免震建物における免震装置の水平剛性の評価」
奥村組技術研究年報 No.43、2017 年 9 月
[b36] 山上聡、舟木秀尊、安井健治、小山慶樹、三須基規、高山峯夫
「竣工後 30 年経過した免震建物に設置された天然ゴム系積層ゴムの経年変化」
日本建築学会大会学術講演梗概集、p.937-938、2017 年 8 月
[b37] 小山慶樹、舟木秀尊、舟山勇司、澤田毅
「自動倉庫ラックのパレット免震装置に関する研究(その 2)振動台実験」
日本建築学会大会学術講演梗概集、p.843-844、2017 年 8 月
[b38] 舟木秀尊、小山慶樹、舟山勇司、澤田毅
「自動倉庫ラックのパレット免震装置に関する研究(その 1)概要と基本特性」
日本建築学会大会学術講演梗概集、p.841-842、2017 年 8 月
[b39] 舟木秀尊、安井健治、山上聡、小山慶樹
「免震建物に設置された積層ゴムの経年変化」
奥村組技術研究年報 No.42、2016 年 9 月
[b40] 舟木秀尊、舟山勇司、小山慶樹
「立体自動倉庫に適用する制震技術の開発」
奥村組技術研究年報 No.42、2016 年 9 月
[b41] 舟木秀尊、小山慶樹、舟山勇司
「自動倉庫ラックの制振構造に関する研究(その 2)振動台実験」
日本建築学会大会学術講演梗概集、p.277-278、2016 年 8 月
[b42] 小山慶樹、舟木秀尊、舟山勇司
「自動倉庫ラックの制振構造に関する研究(その 1)概要と地震応答解析」
日本建築学会大会学術講演梗概集、p.275-276、2016 年 8 月
[b43] 藤森智、市川一美、伊藤裕一、公塚正行、小山慶樹、佐藤正浩、高原伸一、竹内章博、徳武茂隆、中川理、中島徹、中村淳一、平間光、古橋剛、丸山東、谷地畝和夫、山﨑達司
「免震部材の接合部・取付け躯体の設計指針(第 2 版)」
一般社団法人日本免震構造協会、2014 年 1 月
[b44] 大鳥靖樹、小山慶樹、石田勝彦、石田勝彦、北村春幸
「履歴型復元力特性を有する建築構造物のエネルギーの確率論的評価法(その 2)モンテカルロ・シミュレーション(MCS)による提案手法の検証」

日本建築学会学術講演梗概、B-2、p.329-330、2005 年 7 月
[b45] 小山慶樹、大鳥靖樹、石田勝彦、石田勝彦、北村春幸
「履歴型復元力特性を有する建築構造物のエネルギーの確率論的評価法
(その 1)エネルギーの確率論的評価法の提案」
日本建築学会学術講演梗概集、B-2、p.327-328、2005 年 7 月
[b46] 小山慶樹、大鳥靖樹、石田勝彦、北村春幸
「非定常入力に対する総エネルギー入力の確率論的評価」
日本建築学会学術講演梗概集、B-1、p.251-252、2004 年 7 月
[b47] 大鳥靖樹、小山慶樹、坂場律和
「非定常入力に対する RMS 応答の減衰補正係数に関する検討」
日本建築学会学術講演梗概集、B-1、p.249-250、2004 年 7 月
[b48] Keiichi Satsukawa、Youichi Chiba、Haruyuki Kitamura、Yoshiki Koyama
「Energy Balance-based Seismic Response Design Methods for Base Isolated Structure with Low Friction Elastic Sliding Bearings」
Council on Tall Buildings and Urban Habitat 、 *Seoul*、 *Korea*、 2004.10
[b49] 小山慶樹、千葉陽一、北村春幸
「低摩擦型すべり支承と積層ゴム・ダンパーを組合せた免震構造のエネルギーの釣合に基づく応答評価(その 2)応答性状の評価」
日本建築学会学術講演梗概集、B-2、p.451-452、2003 年 8 月
[b50] 千葉陽一、小山慶樹、北村春幸
「低摩擦型すべり支承と積層ゴム・ダンパーを組合せた免震構造のエネルギーの釣合に基づく応答評価(その 1)応答予測式の算出」
日本建築学会学術講演梗概集、B-2、p.449-450、2003 年 8 月

謝　辞

本論文は、東北大学名誉教授　井上範夫博士、東北大学教授　五十子幸樹博士のご指導のもとにまとめたものです。両先生の懇切なるご指導とご助言により本研究を進めることができました。ここに謹んで厚く御礼申し上げます。また、本論文の審査にあたっては、東北大学教授 木村祥裕博士、同大学准教授 髙橋典之博士にご指導を受け賜りました。両先生に深く感謝の意を表します。

本研究は、東北大学、シズメテック、奥村組の三社の共同研究の成果をまとめたものです。ダンパーの設計・製作をご担当頂きましたシズメテックの鎮目武治氏、鎮目真喜子氏、鈴木金二氏には、ダンパーの取り扱い方を始め、実験が行き詰ったときなどに暖かいご指導・ご助言を頂きました。ここに深く感謝致します。

博士号の取得に際してご支援を頂きました株式会社奥村組 奥村太加典 社長、小寺健司 専務執行役員、田中敦史 管理本部長、土屋完 建築本部長、岡田章 技術本部長に厚く御礼申し上げます。

株式会社奥村組技術本部技術研究所の川井伸泰 前所長、上寛樹 所長、白石浩司 前副所長、廣中哲也 副所長、舟木秀尊 建築研究グループ長、河野政典 前企画・管理グループ長、岸本剛 企画・管理グループ長には、研究の推進にあたってご配慮とご指導を頂戴しました。

特に、川井伸泰 前所長には加振機を連結するアイデアを頂戴し、最大速度 100cm/s の動的加振実験を行うことができました。新型コロナウイルス感染症が蔓延し、他機関へ本ダンパーを持ち込み実験する予定が白紙になり、研究の進め方を模索する中、多大なるご助言を頂戴し研究を遂行することができました。実験時には、同研究所建築研究グループ 山上聡 主管研究員、洲鎌星 研究員にご協力頂きました。奥村組名古屋支店の設計に対して、西日本支社建築設計部 古田英之課長にご協力頂きました。ここに深甚なる感謝の意を表します。

最後になりますが、これまで私を支えてくれた家族に感謝の意を表し、本論文の締めくくりとさせて頂きます。

2023 年 8 月

小山　慶樹