ATENA 20-NE01 Rev.0

重大事故等対処施設
免震構造設計ガイドライン

原子力エネルギー協議会

2020 年 9 月

【はじめに】

免震構造は，建物と地盤の間に免震装置を設置し，建物に揺れが直接伝わりにくくした構造であり，大地震に対する上部構造物への影響低減及び居住性の継続的な確保などの観点で優れている。また，耐震構造が主に地震動の短周期成分の影響を受けやすい振動特性であるのに対し，免震構造は地震動の短周期成分の影響を低減する振動特性を有している。

原子力発電所施設においては，免震構造の許認可実績がないことから，その第一歩として，今後免震構造の採用が見込まれる重大事故等対処施設について，免震構造設計の検討を行ってきた。重大事故等対処施設は一般汎用設備を活用する場合も多く，免震建屋に収納することで，活用できる設備の範囲を広げることが可能となる。また，免震構造の重大事故等対処施設は，耐震構造の設計基準対象施設と異なる振動特性を有していることから，耐震構造にとって厳しい短周期成分が卓越した地震動に対して，耐震構造の設計基準対象施設と同時損傷に至る可能性を低減でき，大地震に対するバックアップ設備としての多様性も期待できる。

一方，既存の原子力関係施設を念頭に置いた免震構造に関する指針類として以下があるものの，いずれも設計基準対象施設全体を対象とした指針及び手引きであり，耐震設計上の重要度分類が規定されていない重大事故等対処施設に対する詳細な免震設計の技術事項までは定められていない。

①「原子力発電所免震構造設計技術指針（JEAG4614－2019）」（日本電気協会）
②「免震構造の審査手引きの提案（JNES－RC－2013－1001）」（原子力安全基盤機構）
③「免震構造の試評価例及び試設計例（JNES－RE－2013－2020）」（原子力安全基盤機構）

よって，今回対象とするのは重大事故等対処施設に要求される，基準地震動 Ss に対する設備の間接支持機能及び波及的影響の防止機能について，その要求を具体的に明記した免震構造設計ガイドラインを策定し提案するものである。

改定履歴

改定年月	版	改定内容	備考
2020 年 9 月 29 日	Rev. 0	新規制定	

目　次

1. 適用範囲

本ガイドラインは，免震装置を用いて，建屋全体を水平方向に免震する重大事故等対処施設（以下，「免震型 SA 施設」という）の耐震設計に適用する。

本ガイドラインで対象とする建物・構築物及び機器・配管系は，重大事故等対処施設のうち，常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備を収納する重大事故等対処施設とする。

一般に，免震装置は，建屋の鉛直荷重を支持し，水平方向の変形性能を確保するアイソレータ，及び上部構造の振動エネルギーを免震層で吸収するダンパーから構成される（図 1-1 参照）。アイソレータは，積層ゴム支承，すべり支承及び転がり支承に大別され，これらのうち復元機能を持つのは積層ゴム支承である。積層ゴム支承には，天然ゴム系積層ゴム，鉛入り積層ゴム及び高減衰積層ゴム，すべり支承には，剛すべり，弾性すべり及び曲面すべり，転がり支承には，レール式転がり及びボールベアリングがある。ダンパーは，履歴減衰型及び粘性減衰型に大別される。履歴減衰型ダンパーは，変形履歴に伴うエネルギー消費を利用するものであり，鋼材ダンパー，鉛ダンパー等の弾塑性型ダンパー，摩擦ダンパー等がある。粘性減衰型ダンパーは，流体の抵抗を利用するものであり，オイルダンパー等がある。

本ガイドラインでは，仕様を明確にするため，免震型 SA 施設に採用が見込まれる国土交通大臣認定を取得している免震装置を原則とし，採用実績を踏まえてアイソレータは天然ゴム系積層ゴム，鉛入り積層ゴム，剛すべり支承及び弾性すべり支承，ダンパーは鋼材ダンパー及びオイルダンパーを対象とする。ただし，これら以外の免震装置についても，本ガイドラインと同様にその仕様及び性能を明確にすることができれば，これを排除するものではない。

- 免震装置
  - アイソレータ
    - 積層ゴム支承：$\boxed{\text{天然ゴム系積層ゴム}}$，$\boxed{\text{鉛入り積層ゴム}}$，高減衰積層ゴム
    - すべり支承：$\boxed{\text{剛すべり}}$，$\boxed{\text{弾性すべり}}$，曲面すべり
    - 転がり支承：レール式転がり，ボールベアリング
  - ダンパー
    - 履歴減衰型：$\boxed{\text{鋼材ダンパー}}$，鉛ダンパー，摩擦ダンパー
    - 粘性減衰型：$\boxed{\text{オイルダンパー}}$，粘弾性ダンパー

$\boxed{}$：本ガイドラインで対象とするもの

図 1-1　免震装置の分類

本ガイドラインは，免震型 SA 施設の上部構造として，気密性及び遮蔽性などの機能が必要なく，基準地震動 Ss に対する設備の間接支持機能及び波及的影響の防止機能を要求機能とする施設を適用対象としている。このため，上部架構の主な構造形式は，工事期間が短く，施工性もよい鉄骨造のラーメン構造を想定しているが，鉄筋コンクリート造などの他の構造形式にも適用可能である。

2. 用語と略称

2.1　用語の定義

本ガイドラインにおける用語は次の定義による。

設計基準対象施設	：原子炉施設のうち，運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故の発生を防止し，又はこれらの拡大を防止するために必要となる施設
耐震重要施設	：設計基準対象施設のうち，地震の発生によって生ずるおそれがある安全機能の喪失に起因する放射線による公衆への影響の程度が特に大きいものをいい，耐震Sクラスの施設
設計基準事故対処設備	：設計基準事故に対処するための安全機能を有する設備
重大事故等対処施設	：原子炉施設のうち，重大事故等に対処するための機能を有する施設
重大事故等対処設備	：原子炉施設のうち，重大事故等に対処するための機能を有する設備
常設重大事故等対処設備	：重大事故等対処設備のうち常設のもの。可搬型重大事故等対処設備と接続するものにあっては，接続するために必要な原子炉施設内の常設の配管，弁，ケーブルその他の機器を含む。
可搬型重大事故等対処設備	：重大事故等対処設備のうち可搬型のもの
重大事故防止設備	：重大事故等対処設備のうち，重大事故に至るおそれがある事故が発生した場合であって，設計基準事故対処設備の安全機能又は使用済燃料貯蔵槽の冷却機能若しくは注水機能が喪失した場合において，その喪失した機能（重大事故に至るおそれがある事故に対処するために必要な機能に限る）を代替することにより重大事故の発生を防止する機能を有する設備
常設重大事故防止設備	：重大事故防止設備のうち常設のもの
常設耐震重要重大事故防止設備	：常設重大事故防止設備であって，耐震重要施設に属する設計基準事故対処設備が有する機能を代替するもの
重大事故緩和設備	：重大事故等対処設備のうち，重大事故が発生した場合において，当該重大事故の拡大を防止し，又はその影響を緩和するための機能を有する設備

常設重大事故緩和設備：重大事故緩和設備のうち常設のもの

SA 設備：常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備

免震型 SA 施設：免震構造を導入した常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備を収納する重大事故等対処施設並びにそれに設置されている常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備

免震建屋：免震構造を導入した建屋

耐震建屋：免震構造を導入しない耐震構造の建屋

免震機能：建物・構築物及び機器・配管系を支持するとともに，これらに対する地震力を低減する機能をいう。

免震装置：免震機能を実現するための装置の総称。上部構造と下部構造の間に免震装置ペデスタルを介して設置され，上部構造を支持すると同時に固有周期を長周期化させるアイソレータ及び上部構造の振動エネルギーを吸収するダンパーをいう。国土交通大臣認定における「免震材料」に相当する。

国土交通大臣認定：免震装置は平成12年5月31日建設省告示第1446号において建築材料に指定されており，建築基準法第37条第二号に基づき取得する必要がある国土交通大臣の認定をいう。

アイソレータ：上部構造を支持する支持機能と水平方向の固有周期を長周期化させる機能を有する免震装置をいう（一部，上部構造の振動エネルギーを吸収する機能を有する免震装置も含む）。ここでは，天然ゴム系積層ゴム，鉛入り積層ゴム，剛すべり支承及び弾性すべり支承をいう。

天然ゴム系積層ゴム：ゴム材料として天然ゴムを用いた積層ゴムをいう。

鉛入り積層ゴム：天然ゴム系積層ゴムに鉛プラグを圧入することによって減衰性能を持たせた積層ゴムをいう。

剛すべり支承：上部構造を支持するとともに，水平方向に対してはすべり機構のみによって固有周期を長周期化させる，すべり支承をいう。

弾性すべり支承：上部構造を支持するとともに，水平方向に対してはすべり機構及び積層ゴムによって固有周期を長周期化させる，すべり支承をいう。

ダンパー	：上部構造の振動エネルギーを吸収する機能を有する免震装置をいう。アイソレータは含めない。
オイルダンパー	：内包するオイルの粘性及び流体抵抗によってエネルギーを吸収するダンパーをいう。
鋼材ダンパー	：鋼材の変形に伴う塑性化によってエネルギーを吸収するダンパーをいう。
波及的影響	：地震発生時に，耐震下位クラスの損傷により耐震上位クラスの安全機能へ影響を与えることをいう。
免震層	：上部構造と下部構造の間に挟まれた免震装置が設置される層をいう。免震装置ペデスタルを含む。
上部構造	：建物・構築物のうち免震層より上の部分をいう。上部架構と上部基礎版が上部構造に含まれる。
下部構造	：建物・構築物のうち免震層より下の部分をいう。下部基礎版，擁壁が下部構造に含まれる。（杭等の地業を除く）
免震装置ペデスタル	：上部基礎版から免震装置，免震装置から下部基礎版への荷重を伝達するための台座をいう。
上部基礎版	：免震層上部に位置する版状の部材をいう。
下部基礎版	：免震層下部に位置する版状の部材をいう。
設計支持荷重	：アイソレータが長期に支持する設計用鉛直荷重をいう。
線形限界	：天然ゴム系積層ゴムにおいて，変形の増加に伴う荷重の増加が線形と見なせる限界をいう。鉛入り積層ゴムにおいては，鉛が降伏後の二次剛性が線形と見なせる限界をいう。その領域を超えると急激に剛性が変化し，繰り返し変形に対して力学特性が大きく変化するようになる。
線形限界変位	：天然ゴム系積層ゴム及び鉛入り積層ゴムの線形限界における変位をいう。
基準面圧	：免震装置のメーカーが免震装置の基本性能を測定する際に定める面圧であり，水平方向の変形が0の時の圧縮限界強度の10%～30%に相当する面圧をいう。
P－⊿効果	：水平変形に伴い，軸力が付加的な曲げモーメントを生じさせる現象をいう。
渡り配管	：免震型SA施設と隣接する建屋，又は免震型SA施設と地盤とにまたがる配管をいう。

2.2　略称

本ガイドラインでは，次の略称を用いる。

設置許可基準規則	：実用発電用原子炉及びその附属施設の位置，構造及び設備の基準に関する規則（平成25年6月28日 制定，平成29年12月14日までの改正含む）
技術基準規則	：実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則（平成25年6月28日 制定，平成30年2月2日までの改正含む）
設置許可基準規則解釈	：実用発電用原子炉及びその附属施設の位置，構造及び設備の基準に関する規則の解釈（平成25年6月19日 制定，平成30年1月24日までの改正含む）
技術基準規則解釈	：実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈（平成25年6月19日 制定，平成30年1月24日までの改正含む）
平成25年規制基準	：上記の設置許可基準規則，技術基準規則，設置許可基準規則解釈，技術基準規則解釈の総称
設計・建設規格	：日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2005,2007年版） 第Ⅰ編 軽水炉規格
JEAC4601-2015	：原子力発電所耐震設計技術規程　JEAC4601-2015
JEAG4601-2015	：原子力発電所耐震設計技術指針　JEAG4601-2015
JEAG4601-2015-SA編	：原子力発電所耐震設計技術指針　重大事故等対処施設編（基本方針）　JEAG4601-2015［2016年追補版］
JEAG4614-2019	：原子力発電所免震構造設計技術指針　JEAG4614-2019
告示波	：平成12年5月31日建設省告示第1461号第四の規定による解放工学的基盤における地震動

（本頁以下余白）

3. 基本方針

免震型 SA 施設は，重大事故等対処施設のうち常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備（以下，「SA 設備」という）が設置されることを想定した免震構造の施設であり，導入によって構造形式の多様化による耐震安全性の向上が期待できる。

免震型 SA 施設は，SA 設備に適用される地震動による地震力に対して機能を喪失しないよう，免震構造の応答特性に十分留意して設計する必要がある。

このため次の基本方針に従い免震型 SA 施設を設計する。

(1) 実用発電用原子炉及びその付属施設の位置，構造及び設備の基準を定める規則等（以下，「平成 25 年規制基準」という）に基づき設計を行う。

(2) 免震型 SA 施設は，基準地震動 Ss による地震力に対して，施設に設計上要求されている機能を喪失しないように設計を行う。免震型 SA 施設の建屋においては，SA 設備の間接支持機能が要求される部位はその機能が基準地震動 Ss による地震力に対して損なわれることがないように設計するとともに，間接支持機能の要求のない部位については，基準地震動 Ss による地震力に対して建屋内に収納された SA 設備並びに周囲の耐震重要施設及び重大事故等対処施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。また，免震装置に支持される上部構造は免震機能が発揮されるように構造計画を行う。上部架構の構造形式は，主として鉄骨造のラーメン構造を想定しているが，鉄筋コンクリート造などの他の構造形式にも適用可能である。

(3) 免震型 SA 施設は，基準地震動 Ss による地震力に対して，十分な支持性能を有する地盤に設置する。

(4) 非免震部分との取り合い部分については，免震部分との相対変位が大きくなるため，それに留意した設計とする。

(5) 免震装置は，国土交通大臣認定を受けたものを前提とし，性能が十分に確認されたものを用いる。

(6) 基礎形式は直接基礎を基本とする。ただし，杭基礎の場合にも適用可能であり，「乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵建屋の基礎構造の設計に関する技術規程 JEAC4616-2009」が参考になる。

(7) 免震構造は，鉛直荷重の支持機能，水平方向の復元機能及び減衰機能を免震層に集中させた構造形式であるため，設計の想定を超えた地震動に対しても，即座に免震層が支持性能を失うような脆性的な損傷に至らないよう配慮する必要がある。免震層の設計においては，内蔵する機器への影響に配慮して，上部構造が擁壁へ衝突することのないようクリアランスを確保しつつ，各免震装置の終局状態を踏まえて設定した許容値を満足させ，免震システム全体の性能を十分に発揮できるような構造計画とする。それにより，一部の免震装置の損傷が即座に免震層の支持性能の喪失につながらない高い耐震安全性を確保する。

4. 耐震設計要求事項

免震型SA施設のうち，建屋に設置されているSA設備は，基準地震動Ssに対して重大事故等に対処するために必要な機能が損なわれないことが要求されている。

免震型 SA 施設において間接支持機能を有する建屋及び免震装置は，基準地震動 Ss に対して「間接支持構造物」としての機能が損なわれないことが要求されている。

また，「間接支持構造物」の機能の要求がない部位については，基準地震動Ssに対してその損傷によって建屋内に収納されたSA設備並びに周囲の耐震重要施設及び重大事故等対処施設へ波及的影響を及ぼさないことが要求されている。

なお，建築物の場合には建築基準法等の各種法令による要求に対しても満足させる必要がある。

（本頁以下余白）

5. 免震設計評価法

免震型 SA 施設の設計に関する基本的な方針は，「平成 25 年規制基準」の考え方を基本とする。

免震型 SA 施設は基準地震動 Ss に基づく地震力に対して必要な機能が損なわれるものでないよう設計を行うが，免震構造を導入した一般建築物に対する基準類（建築基準法・同施行令，告示等）も適用する。

5.1 基準地震動の評価法

免震型 SA 施設の設計に用いる地震動は次のとおりとする。

「平成 25 年規制基準」において，基準地震動 Ss は施設に大きな影響を与えるおそれがあると想定する地震動とされており，「JEAG4601-2015」の「1.1～1.4 及び附属書 1.1」に示されている手法により策定する。

免震型 SA 施設は，積層ゴムのひずみレベルが 150%～250%程度における水平方向の固有周期が 2 秒～4 秒程度の範囲にあり，その固有周期は耐震建屋（周期 1 秒以下）と比較して，やや長周期帯域（周期 2～5 秒程度）に存在する。免震型 SA 施設の構造特性を考慮し，施設の設計に用いる基準地震動 Ss は，やや長周期帯域の振幅特性及び継続時間を適切に評価する。そのため，耐震建屋の基準地震動 Ss とは別に，免震型 SA 施設の設計に用いる地震動として，やや長周期帯域の振幅特性及び継続時間を考慮した基準地震動 Ss を個別に設定することもできる。

耐震型施設を念頭に置いた基準地震動 Ss の検討用地震の選定においては，震源を敷地の比較的近傍とする加速度レベルの高い地震を対象として検討が加えられてきている。免震型 SA 施設に対しては，やや長周期帯域の振幅が大きい地震についても基準地震動 Ss の検討用地震の対象として検討に含めることが必要となる。また，南海トラフの地震のような巨大地震で発生する長周期地震動（周期 2 秒～20 秒）についても，やや長周期帯域の振幅に注目して評価する。長周期地震動については，免震装置の繰り返し変形に対する影響が考えられるため，継続時間の特性についても考慮する。

また，「JEAG4614-2019」と同様に，免震型 SA 施設についても一般免震建築物に対して一定以上の耐震余裕を確保する観点から，水平方向の基準地震動 Ss の応答スペクトルが，平 12 建告 1461 号による「告示波」のうち極めて稀に発生する地震動の 1.5 倍を下回る場合は，極めて稀に発生する地震動の 1.5 倍による地震力に対して必要な機能が損なわれるものでないよう設計することとする。

やや長周期帯域の振幅特性及び継続時間の評価（南海トラフの地震のような巨大地震を含む）については，「JEAG4601-2015」の「1.2.3.1 敷地における地震動特性」に震源特性，伝播経路特性及び地盤の増幅特性を考慮することが示されている。ここで，やや長周期帯域の振幅特性及び継続時間は当該敷地及び地震波伝播経路のより深い地下構造の影響を受けること及びやや長周期帯域には表面波が卓越する場合が考えられることを考慮する必要が

ある。この場合，「JEAG4601-2015」の「1.2.3.3 断層モデルを用いた方法」に示される震源断層及び地震波伝播経路の深い地下構造等の影響を考慮した適切な方法による地震動評価が参考となる。

南海トラフの巨大地震に対する評価については，最新の研究成果が，建築研究資料「長周期地震動に対する超高層建築物等の安全対策に関する検討」No.127 号（2010 年(平成 22 年)12 月）[5.1-1] にまとめられており，観測記録を基に設定した長周期地震動に対する距離減衰式，経時特性等が提案されている。また，国土交通省「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（技術的助言）」[5.1-2] では関東地方，静岡地方，中京地方及び大阪地方を対象に南海トラフ沿いの巨大地震による速度応答レベルが示されている。これらの知見については，免震型 SA 施設の構造形式及び設置される立地条件を踏まえた上で必要なものは考慮する。

（本頁以下余白）

5.2 地震応答解析法

地震応答解析は，建物・構築物，機器・配管系，免震装置及び地盤の挙動を適切に評価できる解析モデル及び解析手法によって行う。この際，免震装置のモデル化に当たっては，国土交通大臣認定資料等に基づき適切に復元力特性を設定するとともに，免震装置の製品のばらつき，経年変化，使用環境条件等を考慮する。

免震型SA施設の建屋及び免震層の水平方向の地震応答解析のモデル化に当たっては，地震動の入力エネルギー及び水平変形のほとんどが免震層に集中する免震建屋特有の応答性状を考慮する必要がある。免震建屋の応答は，水平変形が集中する免震層の動的特性に大きく依存しており，上部構造の特性の影響は比較的少ない。したがって，免震層については信頼性の高いモデル化が要求され，免震装置の動的な実挙動を十分反映されたものとする。その他の部位のモデル化については，原則として「JEAC 4601-2015」に準ずる。

5.2.1 入力地震動の組合せ

基準地震動 Ss に対する検討においては動的水平地震力及び動的鉛直地震力を考慮する。「設置許可基準規則解釈」では『基準地震動による地震力は，基準地震動を用いて，水平２方向及び鉛直方向について適切に組み合わせたものとして算定すること』と記載されている。

水平地震力と鉛直地震力の組合せは，単独方向の最大応答解析結果を「JEAG4614-2019」の「7.3.3.2 水平地震力と鉛直地震力による荷重の組合せ法」で示す，その使用が妥当とされる組合せ方法で足し合わせるか，若しくは同時入力解析を行う方法がある。水平 2 方向入力の影響を受ける部位については，水平 2 方向同時入力又は水平 2 方向と鉛直方向の同時入力を行い，その影響を検討する。

理論的手法，半経験的手法（経験的グリーン関数法，統計的グリーン関数法）及びハイブリッド法を用いた断層モデルを用いた手法による地震動評価（「JEAG4601-2015」の「1.2.3.3 断層モデルを用いた方法」）では，評価地点の水平 2 成分の相互関係が考慮された水平 2 方向地震動が計算されるため，得られた結果をそのまま用いて免震建屋の応答を評価できる。

一方，応答スペクトルに基づく地震動評価（「JEAG4601-2015」の「1.2.3.2　経験的な方法」）は，観測された強震動記録を基に統計処理を行った結果を用いており，統計処理を行う母集団は水平 2 成分の相互関係が考慮されていないため，ランダムな位相を持つ模擬地震波が 1 方向の地震動として作成されている。そのため，もう一方の水平方向の入力については，異なった位相特性を持つ模擬地震波を作成し，水平 2 方向に作用するものとして免震建屋の応答を評価する。

なお，応答スペクトルに基づく模擬地震波の水平 2 方向の位相特性については，NUREG-0800 の 3.7.1 SEISMIC DESIGN PARAMETERS において，水平 2 方向及び鉛直方向の地震動が独立であるべきとしており，それぞれの地震動の加速度時刻歴の相関係数が 0.16 以下なら独立とみなせるとしている。0.16 以下を独立とみなす根拠については，U.S.NRC REGULATORY

GUIDE 1.92 に引用された，米国土木学会の文献(5.2-1)に記載があり，地震観測記録の相関係数の絶対値の平均の最大値が 0.16 程度であることから，相関係数が 0.16 以下であれば独立とみなせるとしている。したがって，本ガイドラインでも上記を参考に,水平 2 方向に作用する地震動の相関係数は 0.16 以下とする。

5.2.2 入力地震動評価

地震応答解析に用いる水平方向及び鉛直方向の入力地震動は，建物・構築物が設置される周辺の地盤状況に応じて，適切な方法に基づき「5.1 基準地震動の評価法」で解放基盤において設定された基準地震動 Ss を地震応答解析モデルへの入力地震動に変換する。入力地震動の作成については「JEAC 4601-2015」の考え方に準ずる。

「設置許可基準規則解釈」では，解放基盤表面について，『「解放基盤表面」とは，基準地震動を策定するために，基盤面上の表層及び構造物が無いものとして仮想的に設定する自由表面であって，著しい高低差がなく，ほぼ水平で相当な拡がりを持って想定される基盤の表面をいう。ここでいう上記の「基盤」とは，おおむねせん断波速度 Vs＝700m/s 以上の硬質地盤であって，著しい風化を受けていないものとする。』と定義している。

基準地震動 Ss から入力地震動への変換においては建物・構築物が設置される周辺の地盤状況に留意する。

地震応答解析モデルとして，SR モデル（スウェイ・ロッキングモデル），FEM モデル及び多質点系並列地盤モデルによる離散系モデルを採用した場合の入力変換については「JEAG4614-2019」の「5.4 地震応答解析法」に示された方法を使用する。

また，長辺長さが 100m を超えるような建屋については，設計で仮定されている一様鉛直伝播だけでなく斜め入射による影響についても必要に応じて検討する。長大建物への位相差入力に対する検討については，日本免震構造協会「免震建築物のための設計用入力地震動作成ガイドライン」(5.2-2)の「3.4 長大建物への位相差入力」に示された手法によって検討する。

5.2.3 建屋のモデル化

地震応答解析のためのモデル化に当たっては，水平方向では耐震建屋の地震応答解析モデルに比べ長周期化すること，免震層に水平変形が集中すること，免震層が非線形性を有していること等の免震建屋固有の特性を考慮して行う。

(1) 上部構造のモデル化

上部構造のモデル化では，建物・構築物の形状，剛性及び減衰の評価が対象となる。また，上部構造は弾性範囲内であることを原則とするため，剛性は線形でモデル化することができる。剛性評価に関しては「JEAC 4601-2015」の方法に準ずるものとするが，免震建屋では一般に上部構造の剛性を大きく評価するほど応答倍率が減少する傾向となるので，剛性に

対する不確かさを考慮しないことを基本とする。減衰の評価に関しては，上部構造の減衰が応答に与える影響は小さい[(5.2-3)]。そのため，耐震建屋と同じ減衰定数を用いることができる。減衰評価法としては，「JEAC 4601-2015」の方法に準じ，ひずみエネルギー比例型減衰及びレーリー減衰を用いることができる。なお，上部構造の形式により適切に減衰定数を評価する。

上部構造のモデル化においては，解析の目的に応じて，例えば下記の各方法を用いることができる。図 5.2-1 に上部構造のモデル化の例を示す。

1) 多質点系モデル

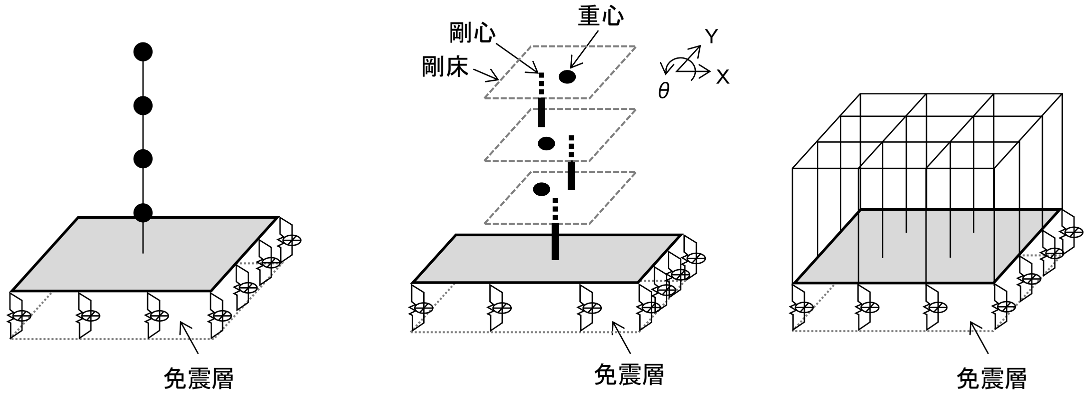
免震層及び上部構造各部の応答を求める場合には，上部構造の各階を質点に置き換えた多質点系モデルを用いる。必要に応じて，上部構造を更に平面的に分割した多軸モデルとする。

2) ねじれ振動モデル

ねじれ振動及び水平 2 方向入力に対する応答を求める場合には，各階の床を剛な床版とし，各床の自由度を，水平 2 方向の変位と回転変位としたねじれ振動モデルを用いる。

3) 立体モデル

上部建屋の不規則な配置等を考慮して上部構造各部の応答を詳細に求める場合には，上部構造全体を立体構造とした立体フレームモデル等を用いる。



a) 多質点系モデル　　b) ねじれ振動モデル　　c) 立体フレームモデル

図 5.2-1　上部構造のモデル化の例

(2) 下部構造のモデル化

下部基礎版の面外，面内剛性を考慮した検討結果[(5.2-4),(5.2-5)]によると，基礎に浮き上がりの生じない範囲においては，下部基礎版を剛構造と仮定したモデルとの応答の差異はほと

んど見られない。したがって，浮き上がりが生じないと考えられる場合は下部基礎版を，剛構造としてモデル化してよい。

なお，下部基礎版の局部的な面外変形によって応答に有意な影響を与えることが予想される場合には，それらを考慮できる適切なモデル化を行う。

免震装置を支持する免震装置ペデスタルは，免震層のモデル化にあわせ免震装置の下部に適切にモデル化する。免震装置を介して伝わる鉛直力及び水平力を評価する場合は，耐震建屋の柱部材と同様にモデル化する。しかしながら，一般に免震装置ペデスタルの剛性は免震装置の剛性に比べて十分大きく，下部基礎版も剛構造と判断される場合は下部基礎版だけをモデル化してよい。

(3) 支持地盤のモデル化

支持地盤のモデル化は，「JEAC 4601-2015」に示されているように弾性波動論によって求める地盤ばねを用いる。

また，下部基礎版の一部が地盤から浮き上がることを許容する場合には，耐震建屋と同様に地盤の回転ばねに幾何学的非線形性を考慮したモデルを用いることができる。

支持地盤のモデル化は耐震建屋に準じて行う。

(4) 免震層のモデル化

免震型 SA 施設の地震応答解析モデルにおいて，免震装置の特性は免震型 SA 施設の応答に大きく影響を与えるので，免震層のモデル化では免震装置ごとに復元力特性を設定する。なお，複数の免震装置を集約してモデル化することができる。

1) 復元力特性のモデル化

各種免震装置の復元力特性モデルは，免震装置の種類に応じ国土交通大臣認定取得時の資料等による適切な設計式に基づき設定する。

復元力特性のモデル例としては，図 5.2-2，図 5.2-3 及び図 5.2-4 に示すようなモデルがあり，採用する免震装置の種類に応じ，その特性を反映した適切なモデルを設定する。

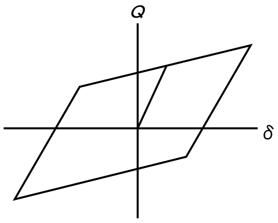
積層ゴム支承については，既往の研究[(5.2-6)～(5.2-8)]において，天然ゴム系積層ゴムと鋼棒ダンパーの組合せ，鉛入り積層ゴム，高減衰積層ゴムの 3 種類の免震装置を対象に振動台試験を実施するとともに，シミュレーション解析を行っておりモデル化の参考となる。

すべり支承については，動摩擦耐力μＮで剛性が変化するバイリニア型の非線形特性によってモデル化することが多い。

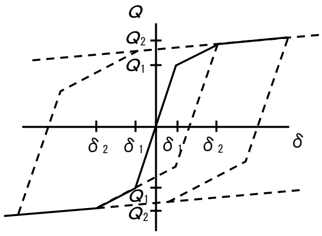
鋼材ダンパーについては，降伏せん断力 Qy で剛性が変化するバイリニア型の非線形特性によってモデル化することが多い。

また，オイルダンパーについては，減衰力が速度関係で与えられることが多い。

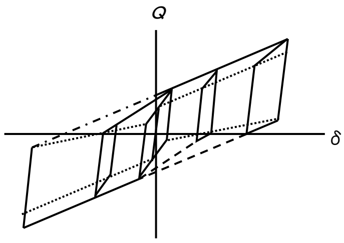
軸Ｑ：せん断力
軸 δ：せん断ひずみ



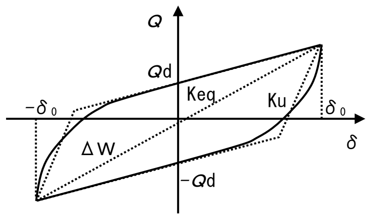
a) バイリニアモデル



b) トリリニアモデル



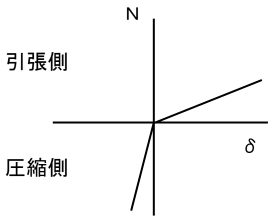
c) 修正トリリニアモデル



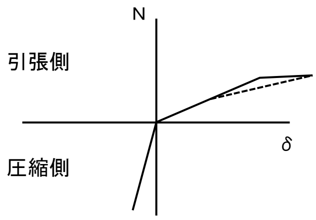
d) 修正バイリニアモデル (5.2-13)

（水平方向）

縦軸Ｎ：軸力
横軸 δ：軸ひずみ



e) 非線形弾性モデル (5.2-14)

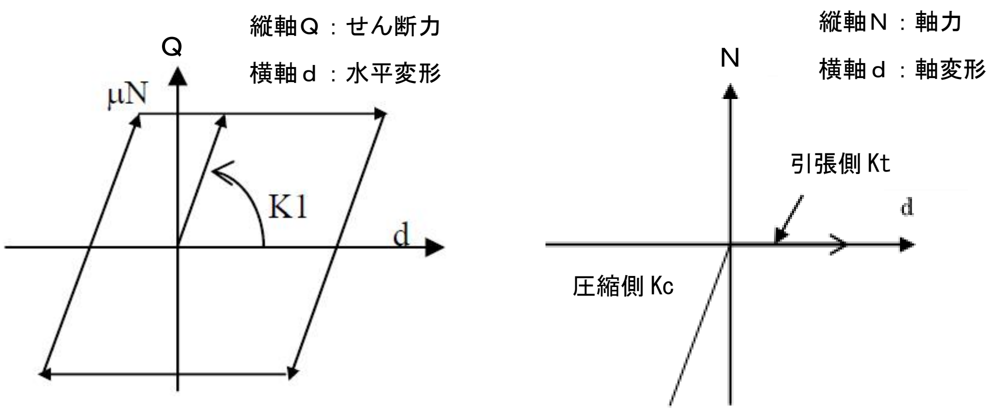


f) 非線形履歴モデル (5.2-15)

（鉛直方向）

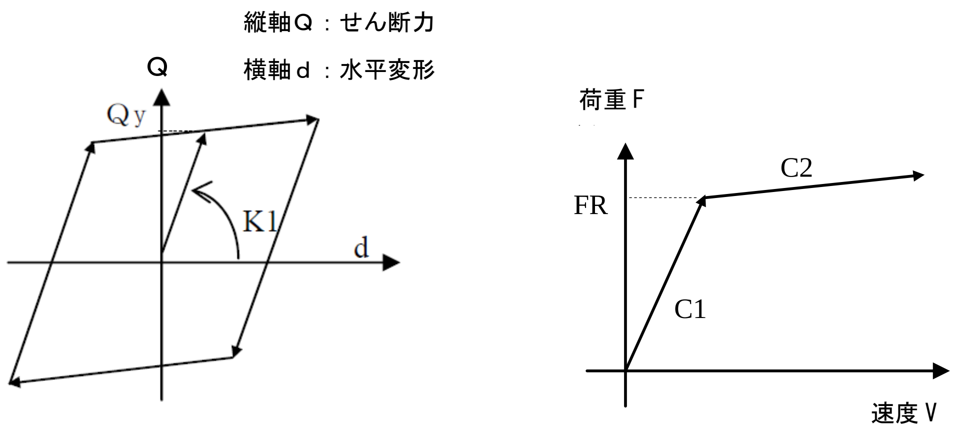
図 5.2-2　鉛入り積層ゴムの非線形特性の例

（本頁以下余白）



（水平方向）　（鉛直方向）

図 5.2-3　弾性すべり支承の非線形特性の例



（鋼材ダンパーの非線形特性）　（オイルダンパーの減衰力－速度関係）

図 5.2-4　ダンパーの非線形特性の例

（本頁以下余白）

各種免震装置の剛性，減衰等の設定パラメータには不確かさがあり，地震応答解析による応答値に影響を与えることが考えられるため，これらの設定パラメータの不確かさにも配慮する。例えば，水平方向地震応答においては免震層のロッキングによる回転剛性の変動の影響は小さいが，水平剛性の変化が建屋の応答に与える影響は比較的大きい。一般に，免震装置の剛性を高く評価すると応答加速度は大きくなるが免震層の応答変位は小さくなるというように，応答加速度と変位はトレードオフの関係になる。このため，設定された復元力特性モデルは応答加速度並びに変位の両面において相反するものとなり，必ずしも安全側の評価にはならない。したがって，免震装置の経年変化又は使用環境条件等によって免震装置の力学特性に無視できない変化が予想される場合には，免震装置特性を考慮した地震応答解析を行い，評価対象に応じて厳しい条件で設計する必要がある。

免震装置の特性の不確かさとしては，製品のばらつき，温度変化及び経年変化の３要因を考慮する。これらの変動特性は，免震装置の国土交通大臣認定取得時の資料等に変動率が記載されており，地震応答解析において特性不確かさの範囲を設定する際にはこれを使用する。製品のばらつき，温度変化及び経年変化の組合せとしては何通りか考えられるが，免震装置の剛性及び減衰が「標準」,「剛性最大＋減衰最大」,「剛性最小＋減衰最小」となる 3 種類の組合せを選定して地震応答解析を行うことを原則とする。なお，3 種類の組合せによって建屋の最大応答をおおむね包絡すると考えられるが，オイルダンパーのように速度依存性をもつ粘性減衰型のダンパーを用いる場合は，減衰特性が上部建屋の応答に影響を与えるため,「剛性最大＋減衰最小」,「剛性最小＋減衰最大」の組合せについても検討することとする。文献[5.2-3),(5.2-9]では，免震装置を含む免震建屋の主な特性（地盤，建屋，免震装置）が応答に及ぼす影響を感度解析によって確認しており，免震装置の特性の不確かさが建屋の応答に与える影響が大きいことを示している。

免震装置の特性変動に関して，アイソレータについては「7.1.1 アイソレータの設計」に，ダンパーについては「7.1.2 ダンパーの設計」にそれぞれ詳細を示す。

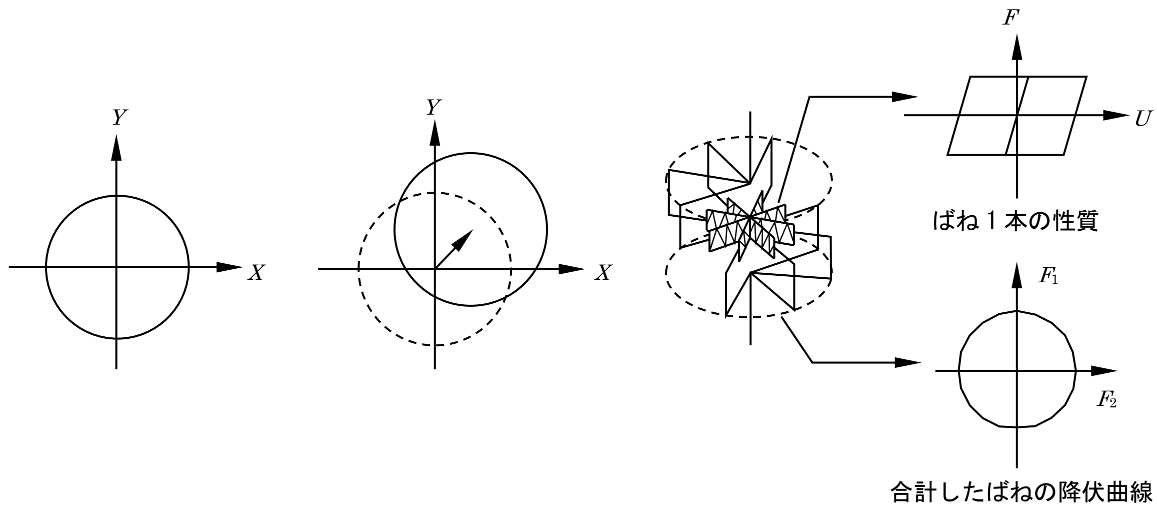
天然ゴム系積層ゴム及び鉛入り積層ゴムの積層ゴム支承に作用する地震時軸力は，転倒モーメント又は鉛直地震力に伴い増減する。文献[5.2-10]によれば，軸力が設計支持荷重の 20 倍まで増加しても積層ゴム支承の水平剛性の軸力依存性は，小さいとされている。また，文献[5.2-11]によれば設計支持荷重 4903kN（500tf）の積層ゴム（直径 1600mm，ゴム 9.0mm×25 層，内部補強鋼板 5.8mm×24 層）の場合，直径とゴム総厚の比が 7 倍程度と形状が偏平であるため，水平剛性の軸力依存性はほぼ無視できるとされている。

しかし，積層ゴム支承の水平剛性の軸力依存性は，形状によって異なる。水平剛性の軸力依存性は，文献[5.2-11]に示されているように，積層ゴムの形状によって定まる 1 次形状係数 S_{f1}（受圧面積/ゴム一層の自由面積）と 2 次形状係数 S_{f2}（ゴム直径/ゴム総厚）に依存しており，S_{f2} が４以上又は，$\sigma/(S_{f1}\cdot S_{f2})<0.25$　（ここで，σ：鉛直応力度（kg/cm^2））となる場合には，文献[5.2-12]に基づきその特性を確認し，水平剛性を決定する必要がある。

積層ゴム支承の鉛直剛性の水平変位依存性については，文献[5.2-11]では，水平変位の増加

に伴い鉛直剛性が低下するとされているが水平変位が線形限界までであればその影響は小さい。

ねじれ振動及び水平 2 方向の同時入力を考慮する場合は，免震装置の方向性を考慮する必要がある。水平 2 方向（X，Y 方向）の変位履歴に応じて生ずる X，Y 方向の反力が X と Y の間で独立な関係では表現できず，互いに影響しあう。このモデル化のためには図 5.2-5 の a)に示す降伏曲線を円形とした塑性理論，第 2 剛性がゼロでないダンパーの場合には b)に示す移動硬化モデル等を用いることができる。このほか，c)に示す一つの平面内に多数のばねを等角度に配置し，その合計としての性質が 2 方向の相互影響を考慮した形になる Multiple Shear Spring Model（MSS モデル）を用いることができる。



a）円形の降伏曲線　　b）移動硬化モデル　　c）Multiple Shear Spring Model

図 5.2-5　ねじれ振動に対する免震装置のモデル化方法

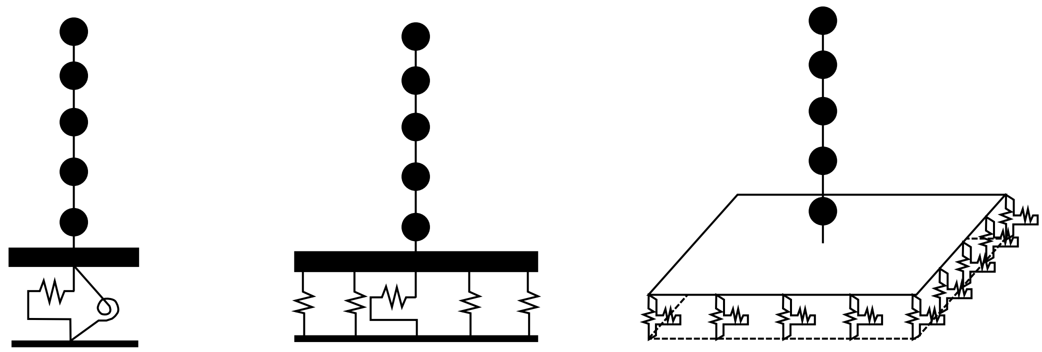
2）免震装置モデルの集約化

直径が大きく扁平な形状の積層ゴム支承を用いた場合には，文献[5.2-11]に示されているとおり，転倒モーメントの軸力変動が積層ゴム支承の水平方向復元力特性に与える影響は小さい。また，積層ゴム支承の鉛直剛性は水平変位に依存するが，鉛直剛性の変化が水平方向応答に与える影響も小さいと考えられる。したがって，上部及び下部基礎版を剛構造に仮定し，免震装置群全体を 1 組の水平及び回転ばねに集約することができる。

なお，上部構造からの転倒モーメントによって一部の積層ゴム支承が引張域に入る場合は，鉛直方向の剛性低下が予想される。この場合，鉛直方向の非線形性を考慮したモデルを適切に集約配置した振動モデル等によって，上部及び下部基礎版間の回転動についての非線形性を考慮することができる。

必要に応じて，ねじれ振動及び水平 2 方向入力の影響を検討する場合には，上部基礎版及び下部基礎版の相対変位並びに免震装置の面圧変動が免震装置の配置によって異なること

を考慮し，各々の免震装置群を平面的に幾つかのブロックにまとめ，ブロックごとに免震装置モデルを集約化する方法もある。免震層のモデル化の例を図 5.2-6 に示す。



a) 1組の水平ばねと回転ばねに集約　b) 集約水平ばねと分散鉛直ばね　c) 水平ばねと鉛直ばねを水平面上に分散

図 5.2-6　免震層のモデル化の例（上部構造が多質点系モデルの場合）

3) 繰り返し変形に対する影響検討

入力地震動の継続時間が長く免震層に多数回繰り返し変形が生じる場合は，免震装置の種類により繰り返し変形の影響を受けるため，検討が必要となる。

鉛入り積層ゴムについては，せん断変形する際の塑性履歴エネルギー吸収によって，鉛プラグが発熱して温度上昇することで切片荷重が低下する。そのため，多数回繰り返し変形による切片荷重の低下を考慮した影響検討を行う必要がある。

鋼材ダンパーについては，繰り返し変形によって疲労が蓄積され，最終的には破断に至るため，累積疲労損傷度よる評価を実施する。また，多数回繰り返し変形によって，降伏荷重が徐々に低下するため，降伏荷重の低下を考慮した影響検討を行う必要がある。

繰り返し変形に対する具体的な検討方法については，免震装置の種類ごとに「7.1　免震層の設計」において示す。

(5) 地震応答解析方法

水平方向及び鉛直方向の地震応答解析は「5.2.2 入力地震動評価」に記載した入力地震動を用いて実施する。地震応答解析に際しては，各部位の振動特性を適切に評価した解析モデルを用いる。上部構造，下部構造，支持地盤及び免震層のモデル化については，各々前述した手法によって解析モデルを作成する。

免震装置として，荷重－変形関係に非線形性を有するものが用いられる場合の地震応答解析には，原則として「JEAC 4601-2015」に記載されているモーダルアナリシス法，周波数応答解析法等のような振動系の線形性を前提とした解析手法は適用が難しい。このため地震応答解析は，次に示す構造物等の非線形特性を踏まえた直接積分法による時刻歴応答解

析によることを原則とする。

1) 免震層の水平方向又は鉛直方向の荷重－変形関係の非線形性

「(4) 免震層のモデル化」で述べたように，各種免震装置は，水平方向又は鉛直方向の荷重－変形関係に非線形性が存在する場合には，これを考慮する。

2) 免震層の回転方向の荷重－変形関係の非線形性

免震層の端部の積層ゴム支承が引張域に入る場合には，鉛直方向の剛性低下が予想される。この場合，鉛直方向の非線形性を考慮した積層ゴム支承モデルを適切に配置した振動モデルによって，上部基礎版及び下部基礎版間の回転動についての非線形性を考慮する。

3) 下部基礎版の浮き上がり非線形性

「(3) 支持地盤のモデル化」で述べたように，下部基礎版の一部が地盤から浮き上がる可能性がある場合には，地盤のロッキングばねに幾何学的非線形性を考慮する。

（本頁以下余白）

6. 免震型 SA 施設の荷重組合せと許容限界

6.1　免震層の荷重組合せと許容限界

6.1.1　免震層の荷重組合せ

免震層の設計において考慮する荷重は,「平成 25 年規制基準」及び「JEAC4601-2015」に準じ,免震構造に固有の荷重については,「JEAG4614-2019」に準ずるものとし,①常時荷重,②運転時荷重,③地震時荷重,④事故時荷重,⑤試験時荷重,⑥地震以外の自然現象による荷重,及び⑦免震装置の取替え時に生じる荷重を考慮する。

免震層の設計において考慮する荷重の組合せは,原則として「平成 25 年規制基準」,「JEAC4601-2015」及び「JEAG4614-2019」に準ずるものとし,常時作用している荷重,運転時に作用する荷重と水平及び鉛直方向の基準地震動 Ss による地震力の組合せを考慮する。なお,上記④～⑦の荷重については,施設の状況及び荷重の発生状況を踏まえて,基準地震動 Ss による地震力を含む荷重の組合せを考慮する。例えば,多雪地域では積雪荷重を基準地震動 Ss による地震力を含む荷重の組合せを考慮する。

6.1.2　免震層の許容限界

基準地震動 Ss による地震力を含む荷重の組合せに対する免震層の許容限界は,上部構造が維持すべき機能及び免震装置の特性のばらつき等の影響を考慮して設定する。

アイソレータは,上部構造への水平方向の地震力を低減するとともに,上部構造の鉛直荷重を支持していることから,アイソレータの性能の変化によって上部構造が維持すべき機能に影響を及ぼさないように許容限界を設定する。また,ダンパーの許容限界は,ダンパーの減衰性能の変化が上部構造の維持すべき機能に影響を及ぼさないように設定する。免震装置ペデスタル及びクリアランスについても,免震装置の許容限界まで,免震装置ペデスタルが荷重支持性能を維持し,上部構造が擁壁に衝突することのないように許容限界を設定する。以上を満たすものとして定めた,基準地震動 Ss による地震力の組合せに対する免震層の許容限界を表 6.1.2-1 に示す。

（本頁以下余白）

表 6.1.2-1　免震層の許容限界

免震層		評価項目	許容限界
アイソレータ	天然ゴム系積層ゴム 及び 鉛入り積層ゴム	せん断ひずみ	250%(線形限界)
		圧縮応力度	基準面圧×2 かつ 圧縮限界強度×2/3
		引張応力度	1.0MPa
	剛すべり支承 及び 弾性すべり支承	水平変形	限界変形
		圧縮応力度	基準面圧×2
ダンパー	鋼材ダンパー	水平変形	限界変形
		累積疲労損傷度	1.0
	オイルダンパー	水平変形	限界変形
		最大速度	限界速度
免震装置ペデスタル		応力度	短期許容応力度
クリアランス		水平距離	免震層の最大応答変位×1.5

以下では，表 6.1.2-1 に示した項目とその許容限界について説明する。

(1) アイソレータの許容限界

1) 積層ゴムの許容限界

積層ゴムの許容限界は，せん断ひずみ，圧縮応力度及び引張応力度を設定する。

(a) せん断ひずみ

積層ゴムの水平変形性能は，用いられるゴム材料及び形状によって異なるが，せん断ひずみが 250%程度を超えると，積層ゴムにハードニングが生じ，剛性が急激に高くなる[(6.1.2-1)]。そして，積層ゴムにハードニング挙動が発生すると，上部構造への入力が増大するため積層ゴムの地震力低減機能が十分に発揮されなくなるとともに，ゴム層の一部にボイドなどの損傷が発生して積層ゴムの力学特性に繰り返し載荷に対する不可逆的な変化が現れる。

したがって，積層ゴムが想定する性能を発揮でき，かつ信頼性の高いモデル化が可能な範囲として，せん断ひずみの許容限界を線形限界とし，国土交通大臣認定を取得した積層ゴムの性能データに基づいて，せん断ひずみの線形限界が 250%以上あることを確認した上で，その値を 250%とする。なお，国土交通大臣認定を取得した積層ゴムの性能データに基づいて，せん断ひずみの線形限界が 250%以上であることを確認することができない場合には，性能データ又は試験によって確認された線形限界せん断ひずみを許容限界とする。

また，線形限界に対して積層ゴムの破断は変位に換算して 1.5 倍程度の余裕度があることが知られており[(6.1.2-2)(6.1.2-6)]，上記の許容限界を用いることで免震構造としての高い耐

震安全性を確保できる。

(b) 圧縮応力度

積層ゴムの水平変形性能は，積層ゴムが支持する荷重（作用面圧）によって変化する可能性がある。一般に，積層ゴムの基本特性値は，基準面圧下で確認されたものであるため，作用面圧と基準面圧の差が大きい場合には，特性値の面圧依存性を考慮する必要があり[(6.1.2-3)]，信頼性の高いモデルの設定が難しくなる。また，座屈挙動などの発生によって積層ゴムの力学性能が低下するおそれもある。

したがって，積層ゴムが地震動による軸力変動によらず，安定して水平変形性能を発揮でき，積層ゴムの国土交通大臣認定においてその特性値が確認されている条件の範囲内として，圧縮応力度の許容限界は，基準面圧の 2 倍かつ圧縮限界強度の 2/3 とする。

(c) 引張応力度

積層ゴムに引張荷重を漸増して与えると，ある荷重レベル（降伏荷重）から鉛直剛性が急激に軟化してその後破断に至ることが確認されている[(6.1.2-1)]。また，降伏荷重を超過すると，繰り返し載荷に対して引張剛性が徐々に低下していくなど，複雑な挙動が現れて信頼性の高いモデル化が困難になるとともに，積層ゴムに不可逆的な力学特性の変化が発生する[(6.1.2-4)]。そのため，積層ゴムが安定した鉛直支持性能を発揮できるよう引張応力度の許容限界を設定する必要がある。

最近の実験研究[(6.1.2-5)]によって，G4 積層ゴムのせん断ひずみの線形限界に関する評価が行われ，引張応力度 1MPa 作用時におけるせん断ひずみの線形限界は 250%以上となることが確認されており，圧縮領域だけでなく，引張領域においても引張応力度 1MPa 作用下までであればせん断線形限界ひずみを一定とみなせることが分かっている。また，「JEAG4614-2019」では，積層ゴムの引張応力度の許容限界として引張線形限界応力度が設定されており，破断試験等が困難である場合，せん断線形限界ひずみが引張荷重下で一定として取扱える引張応力度（引張せん断線形限界応力度）を用いるとしている。したがって，前述の試験[(6.1.2-5)]を踏まえ，「JEAG4614-2019」の考え方に基づき引張線形限界応力度を評価すると，引張線形限界応力度は 1MPa となる。さらに，引張線形限界応力度 1MPa に対して積層ゴムの引張破断応力度は 2 倍程度以上の余裕度があることが確認されており[(6.1.2-4)][(6.1.2-6)]，許容限界を引張応力度 1MPa とすることによって，免震構造としての高い耐震安全性を確保できる。

一方，国土交通大臣認定を受けた積層ゴムの引張許容限界は積層ゴムの種類によらず 1MPa となっている[(6.1.2-3)]。

以上より，積層ゴムの鉛直剛性の軟化によって鉛直支持性能に影響を与えることがなく，信頼性の高いモデル化が可能な範囲として，積層ゴムの引張応力度の許容限界を 1MPa とする。

2) すべり支承の許容限界

すべり支承の許容限界は，水平変形及び圧縮応力度を設定する。

(a) 水平変形

すべり支承は，一般にすべり材がすべり板上をすべりながら移動する構造となっている。すべり板の可動領域を超える変形に対しては，その性能が十分に発揮されなくなるため，すべり板の可動領域に基づく限界変形が定められている。

したがって，すべり支承の水平変形の許容限界は，想定する水平変形性能を発揮することができるよう，すべり板の可動領域に基づく限界変形とする。

(b) 圧縮応力度

すべり支承の摩擦係数は，圧縮荷重に依存して変化する[(6.1.2-3)]。すべり支承の基本特性値は，積層ゴムと同様，基準面圧下で確認されたものであるため，作用面圧と基準面圧の差が大きい場合には，特性値の面圧依存性を考慮する必要がある。

したがって，圧縮応力度の許容限界は，すべり支承が地震力による軸力変動によらず，想定する水平変形性能を発揮でき，国土交通大臣認定においてその特性値が確認されている条件の範囲内である，基準面圧の 2 倍とする。

(2) ダンパーの許容限界

1) 鋼材ダンパーの許容限界

鋼材ダンパーの許容限界は，水平変形及び累積疲労損傷度を設定する。

(a) 水平変形

鋼材ダンパーの水平変形性能は，形状及び大きさによって異なるものの，国土交通大臣認定で限界変形が設定されている[(6.1.2-3)]。

したがって，鋼材ダンパーの水平変形の許容限界は，必要な減衰性能を維持でき，国土交通大臣認定においてその特性が示されている限界変形とする。

(b) 累積疲労損傷度

鋼材ダンパーは，地震動による繰返し変形によって疲労破壊を生じる可能性があるため，「JEAG4614-2019」では累積疲労損傷度を指標とする照査法が提示されており，これと同じ方法で評価することにする。

したがって，鋼材ダンパーが地震動によって疲労破壊を生じないよう，「JEAG4614-2019」の「7.1.3 (2) 項」に提示された方法による累積疲労損傷度を許容限界とし，その値は，同項と同様に 1.0 とする。

なお，水平二方向加力を受けることによって鋼材ダンパーにねじり変形が生じ，鋼材ダンパーの履歴特性が変化する場合には，水平二方向の変形に対応した累積疲労損傷度に基づき評価する。

2) オイルダンパーの許容限界

オイルダンパーの許容限界は，水平変形及び最大速度を設定する。

(a) 水平変形

オイルダンパーは，機械的に動くことができる限界値を超えると機械的な破損を生じることから，限界変形が規定されている[(6.1.2-3)]。

オイルダンパーの水平変形の許容限界は，必要な減衰機能を維持でき，国土交通大臣認定においてその特性が示されている限界変形とする。

(b) 最大速度

オイルダンパーは，安定して減衰性能を発揮できるように最大速度の基準値が定められている。基準値を超えても直ちに破損するわけではないが，その減衰力は低減する可能性がある[(6.1.2-3)]。

したがって，最大速度の許容限界は，国土交通大臣認定においてその特性が示されている限界速度とする。

(3) 免震装置ペデスタルの許容限界

免震装置ペデスタルの許容限界は，応力度を設定する。

免震装置ペデスタルは，上部構造の荷重を下部基礎版へ伝達するため，損傷によって荷重の支持性能を発揮できなくなる可能性がある。このため，免震装置ペデスタルを弾性範囲に留めておく必要がある。

したがって，塑性変形によって荷重支持性能に影響を及ぼすことのないように，免震装置ペデスタルの許容限界は，短期許容応力度とし，免震装置に設定する許容限界まで支持性能が発揮されるように設定する。

(4) クリアランスの許容限界

免震層のクリアランスの許容限界は，上部構造と擁壁の水平距離を設定する。

上部構造が擁壁へ衝突することによって，上部構造の応答が増大するとともに，機器の機能に影響を及ぼす可能性があるため，基準地震動 Ss による地震力の組合せに対して，上部構造が擁壁へ衝突することのないようにクリアランスを確保する必要がある。免震構造を導入した一般建築では，水平クリアランスの目安として免震層の大地震時応答変位量の 1.5 倍程度とすることが多い[(6.1.2-7)]。

したがって，基準地震動 Ss による地震力の組合せに対する水平距離の許容限界は，免震層の最大応答変位の 1.5 倍以上とし，免震装置に設定する許容限界まで擁壁に衝突することのないように設定する。

（本頁以下余白）

6.2　建物・構築物の荷重組合せと許容限界

6.2.1　建物・構築物の荷重組合せ

建物･構築物の設計において考慮する荷重は,「平成 25 年規制基準」及び「JEAC4601-2015」に準じ，免震構造に固有の荷重については，「JEAG4614-2019」に準ずるものとし，①常時荷重，②運転時荷重，③地震時荷重，④事故時荷重，⑤試験時荷重，⑥地震以外の自然現象による荷重，及び⑦免震装置の取替え時に生じる荷重を考慮する。

建物･構築物の設計において考慮する荷重の組合せは, 原則として「平成 25 年規制基準」,「JEAC4601-2015」及び「JEAG4614-2019」に準ずるものとし，常時作用している荷重，運転時に作用する荷重と水平及び鉛直方向の基準地震動 Ss による地震力の組合せを考慮する。なお, 上記④～⑦の荷重については, 免震型 SA 施設の状況及び荷重の発生状況を踏まえて, 基準地震動 Ss による地震力を含む荷重の組合せを考慮する。例えば，多雪地域では積雪荷重を基準地震動 Ss による地震力を含む荷重の組合せを考慮する。

6.2.2　建物・構築物の許容限界

基準地震動 Ss による地震力を含む荷重の組合せに対する建物・構築物の許容限界は，上部構造が維持すべき機能である機器・配管系の間接支持機能を考慮して設定する。

また，波及的影響を防止する必要がある部位については，要求機能を維持できると認められる許容限界を設定する。

上記を満たすものとして定めた，基準地震動 Ss による地震力の組合せに対する建物・構築物の許容限界を表 6.2.2-1 に示す。

表 6.2.2-1　建物・構築物の許容限界

建物・構築物		評価項目	許容限界
上部構造	上部架構	応力度	短期許容応力度※1
		層間変形角	1/200
	上部基礎版	応力度	短期許容応力度※2
下部構造	下部基礎版	応力	終局耐力※3
	擁壁	応力	終局耐力※3

※1：短期許容応力度を超える場合には，塑性変形によって上部構造及び機器・配管系の間接支持機能に影響を及ぼすことがないことを確認するとともに，上部架構の荷重増分による静的弾塑性解析等により，基準地震動 Ss による地震力を含む荷重の組合せに対する応答がおおむね弾性範囲に留まり，降伏耐力に対して妥当な安全余裕を有していることを確認する。

※2：短期許容応力度を超える場合には，静的弾塑性解析等により，基準地震動 Ss による地震力を含む荷重の組合せに対しておおむね弾性範囲に留まることを確認する。

※3：下部基礎版（擁壁）の変形等により免震性能を低下させる有害な変形が生じないように留意する。

以下では，表 6.2.2-1 に示した項目とその許容限界について説明する。

(1) 上部構造の許容限界

1) 上部架構の許容限界

上部架構の許容限界は，上部架構に生じる応力度及び層間変形角を設定する。

上部架構は，比較的長い周期で振動するため，地震荷重が準静的に作用する。そのため，上部架構が降伏耐力を超える地震荷重を受ける場合には，上部架構の塑性変形が急激に進行すると考えられる[6.2.2-1]。このため，地震時においても上部架構をおおむね弾性範囲に留めておく必要がある。したがって，基準地震動 Ss による地震力を含む荷重の組合せに対する上部架構の許容限界は，塑性変形によって機器・配管系の間接支持機能に影響を及ぼすことのないように，短期許容応力度を基本とする。短期許容応力度を超える場合には，塑性変形によって上部構造及び機器・配管系の間接支持機能に影響を及ぼすことがないことを確認するとともに，上部架構の荷重増分による静的弾塑性解析等により，基準地震動 Ss による地震力を含む荷重の組合せに対する応答がおおむね弾性範囲に留まり，降伏耐力に対して妥当な安全余裕を有していることを確認する。

また，非構造部材の落下等による建屋に収納される SA 設備及び周辺に隣接する S クラス設備及び SA 設備への波及的影響防止の観点から，層間変形角の許容限界を 1/200 以内とする。

2) 上部基礎版の許容限界

上部基礎版の許容限界は，応力度を設定する。

基準地震動 Ss による地震力を含む荷重の組合せに対する上部基礎版の許容限界は，塑性変形によって上部架構の必要な機能及び機器・配管系の間接支持機能に影響を及ぼすことのないように，短期許容応力度を基本とする。短期許容応力度を超える場合には，静的弾塑性解析等により，基準地震動 Ss による地震力を含む荷重の組合せに対しておおむね弾性範囲に留まることを確認する。

(2) 下部構造の許容限界

1) 下部基礎版の許容限界

下部基礎版の許容限界は，応力を設定する。

基準地震動 Ss による地震力を含む荷重の組合せに対する下部基礎版の許容限界は，その構造，形状及び使用材料が，耐震建屋と同様であることから，耐震建屋の許容限界に準拠するものとし，終局耐力を許容限界とする。ただし，下部基礎版の変形等により免震性能を低下させる有害な変形が生じないように留意する。

2) 擁壁の許容限界

擁壁の許容限界は，応力を設定する。

基準地震動 Ss による地震力を含む荷重の組合せに対する擁壁の許容限界は，下部基礎版

の許容限界と同様に，耐震建屋の許容限界に準拠するものとし，終局耐力を許容限界とする。ただし，擁壁の変形等により免震性能を低下させる有害な変形が生じないように留意する。

（本頁以下余白）

6.3　機器・配管系の荷重組合せと許容限界

免震型SA施設の機器・配管系に対する設計上考慮する荷重の組合せと許容限界の考え方は，原則として「平成25年規制基準」及び「JEAC 4601-2015」による。

渡り配管については，免震構造を適用することによって地震時の建屋間相対変位が増大することから，相対変位によって発生する二次応力に十分考慮した設計をする必要がある。

地震時の相対変位吸収策として渡り配管に伸縮継手を採用する場合は疲労評価による確認を行うこととし，基準地震動Ss作用時の伸縮継手に加わる繰返し回数は許容繰り返し回数以下とする。許容繰返し回数の算出については，「設計・建設規格」の「PPC-3416伸縮継手」の規定によるものとする。また，渡り配管に伸縮継手構造を採用する場合には，基準地震動Ss作用時に伸縮継手構造に発生する最大相対変位（設計変位）が試験等によって確認された設計可動量以下とする。

免震建屋と耐震建屋，又は免震建屋と地盤とにまたがるケーブルトレイ，電線管については，地震時の慣性力に加えて相対変位に対して機能を維持できる設計とする。

（本頁以下余白）

7. 免震型 SA 施設の各部設計

7.1　免震層の設計

免震装置は，上部構造を支持する機能並びに上部構造及び機器・配管系への地震力を低減する機能を有している。

免震装置は，上部構造の要求性能に応じた十分な強度を持ち，想定される荷重状態において上部構造の荷重を安全に支持することが要求される。また，地震力を低減する機能を有する免震装置は，想定される地震動に対する上部構造等の応答を目標とする範囲に低減する必要があるため，免震装置の基本構造，使用材料，設計支持荷重，固有周期，減衰特性値等を想定した上で，免震装置の寸法，形状及び個数を決定し，「6.1 免震層の荷重組合せと許容限界」に示す荷重及びその組合せによって生じる免震装置の応力度等が免震装置の許容限界内であることを確認することとする。また，供用期間中において，免震装置の機能維持に支障を来すような異常が認められた場合に，免震装置の補修及び交換が可能な設計とする。

以下に，既往研究から得られた知見，免震装置メーカーの技術資料等に基づき，設計支持荷重，固有周期及び減衰特性値についての設計条件としての考え方を示す。

(1) 設計支持荷重

免震建屋では，アイソレータにて搭載する機器等の重量も含めた鉛直荷重を受け持つ必要がある。このアイソレータ 1 個の設計支持荷重は，免震建屋の鉛直荷重と支承材の設置個数によって算出される。

積層ゴム支承の場合は，この設計支持荷重を積層ゴム免震支承の受圧面積で除したものが長期鉛直応力度となる。この長期鉛直応力度は，積層ゴムメーカーが提示する基準面圧，もしくは水平復元力特性等の面圧補正式の適用範囲内になるように設計支持荷重を設定する。なお，長期鉛直応力度が面圧補正式の適用範囲から外れる場合には，実験結果等から水平復元力特性等を設定する。

(2) 固有周期

重大事故等対処施設の機器・配管系を設計する上では，応答加速度を低く抑えるとともに，地震力を低減する振動数領域を広くする観点から免震建屋の固有周期は長い方が望ましい。ただし，固有周期を長くし過ぎると，地震動の特性によっては，免震層の相対変位が過大となり，クリアランスの設定，免震装置の選定，及び渡り配管の設計が困難になる場合がある。このように，免震設計においては，免震層の振動特性等を考慮して，入力に対し応答加速度，地震力，相対変位等の複数の目標値を達成できるような適切な固有周期（第 1 剛性及び第 2 剛性）を設定する。

また，水平免震方式における鉛直方向の固有周期は，上下応答及びロッキング応答に過大な影響がないよう設定する必要がある。

（3）減衰特性値

地震時の相対変位の増加は，免震装置，免震ー非免震部の渡り配管等の破損を生じさせるおそれがある。この相対変位の抑制を目的に，免震装置へエネルギー消費機能が付加される。積層ゴム支承を用いた免震装置には，天然ゴム系積層ゴムとエネルギー消費機能を有するダンパーとを組合せたもの，エネルギー消費機能を積層ゴム支承に組入れた鉛入り積層ゴムがある。

天然ゴム系積層ゴムと弾塑性型ダンパーの組合せ及び鉛入り積層ゴムの要素特性値として，免震建屋の固有周期に関わる第 1 剛性，第 2 剛性及び減衰特性値に関わる降伏荷重特性値の設定が必要となる。また降伏荷重特性値については，既往研究例[7.1-1]より一般に降伏荷重が高い場合は，床応答スペクトルの短周期領域の応答加速度が大きくなる傾向を有すると報告されている。また，免震建屋の固有周期とのパラメトリックな解析によって，免震装置が受け持つ支持荷重 W に対して，降伏荷重を 0.05W～0.1W とした場合，機器・配管系の設計上における所定の応答目標値を達成できると報告されているが，この場合についても，前項（2）の第 1 剛性，第 2 剛性と同様，今後設計される重大事故等対処施設については，入力に対し目標値を達成できるような適切な降伏荷重特性値を各々設定する。

本節では,「7.1.1　アイソレータの設計」において天然ゴム系積層ゴム，鉛入り積層ゴム，剛すべり支承及び弾性すべり支承の設計について述べ,「7.1.2　ダンパーの設計」において鋼材ダンパー及びオイルダンパーの設計について述べる。その他に「7.1.3　免震装置ペデスタルの設計」において各免震装置のペデスタルの設計について述べ,「7.1.4　クリアランスの設計」において離隔距離及びエキスパンションジョイントの設計について述べ,「7.1.5　その他留意事項」において免震構造特有の留意事項について述べる。

（本頁以下余白）

7.1.1　アイソレータの設計

アイソレータは，長期の荷重とともに地震時における変動荷重を十分支持し，上部構造及び機器・配管系への地震力の低減を確実に行うことができ，発生する応力度，ひずみ及び変形が許容限界に達しないよう安全上適切に設計を行う。アイソレータは国土交通大臣認定を受けたものから選定し，定められたクライテリアを満足することを地震応答解析に基づき確認するとともに，上部構造の機能及び地震力低減機能を確保するように適切な設計を行う。

(1) 天然ゴム系積層ゴム

1) 天然ゴム系積層ゴムの選定

「6.1　免震層の荷重の組合せと許容限界」に定める荷重の組合せについて，天然ゴム系積層ゴムの応力度及びひずみが許容限界内となるように，国土交通大臣認定を受けた天然ゴム系積層ゴムから選定する。

2) 地震応答解析モデルの設定時の留意点

天然ゴム系積層ゴムは，円形状のゴムシートと中間鋼板を接着した多層構造であり，水平方向に対する復元力機能と，鉛直方向に対する支持機能を有する。なお，天然ゴム系積層ゴムは減衰性能を持たないため，減衰性能を有する免震装置との併用が必要である。

以下に，地震応答解析モデルを設定する際の留意点を述べる。

(a) 水平特性

天然ゴム系積層ゴムにせん断力が作用する時，中間鋼板はゴム層のせん断変形を拘束しないため，天然ゴム系積層ゴムの水平剛性はゴム単体と同じとなる[7.1.1-1]。その復元力特性は，250%程度までは水平せん断ひずみに比例してせん断力も大きくなり，ほぼ一様の水平剛性を示す[7.1.1-2]。その後，水平剛性は徐々に大きくなり（ハードニングと呼ばれる），最終的には破断に至る。また，天然ゴム系積層ゴムは，減衰性能を有していない積層ゴム支承である。

本ガイドラインでは，「6.1.2(1) アイソレータの許容限界」に定めた許容限界（線形限界）の範囲内における復元力特性は線形とし，減衰定数は0とする。

なお，水平特性の各種諸元には次のような依存性がある。

a) せん断ひずみ依存性

天然ゴム系積層ゴムのせん断ひずみ依存性は小さい[7.1.1-3]ため，本ガイドラインでは水平剛性のせん断ひずみ依存性を考慮しない。

b) 振動数（速度）依存性

天然ゴム系積層ゴムの振動数依存性は小さく，設計に影響を及ぼすほどの依存性は認められない(7.1.1-1)ため，本ガイドラインでは水平剛性の振動数依存性を考慮しない。

c) 面圧依存性

天然ゴム系積層ゴムの水平剛性は，面圧が高くなるに従い低下する傾向があるものの，基準面圧程度以下では面圧依存性が小さい(7.1.1-3)ため，本ガイドラインでは水平剛性の面圧依存性を考慮しない。ただし，基準面圧を上回る面圧でも面圧依存性が小さいことが望ましいため，本ガイドラインでは，長期面圧を基準面圧程度以下と規定する。また，極端に低面圧などで使用する場合には，選定した製品ごとの国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料から，設計時の水平剛性を設定する。

d) 繰り返し依存性

天然ゴム系積層ゴムは，復元力特性が線形でエネルギー吸収しないため温度上昇もほとんどなく，水平剛性の変動がないこと(7.1.1-4)から，本ガイドラインでは水平剛性の繰り返し依存性を考慮しない。

上記を踏まえ，選定した製品ごとの国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料に記載されている各種諸元及び依存性に関する式を用いて地震応答解析モデルの水平特性を設定する。

(b) 鉛直特性

天然ゴム系積層ゴムは，ゴムが横にはみださないように中間鋼板を挿入している。この中間鋼板にはゴムを拘束する働きがあり，圧縮領域での鉛直剛性が高くなる(7.1.1-1)。「6.1.2(1) アイソレータの許容限界」で定めた許容限界の範囲内，すなわち，鉛直応力度の限界，せん断ひずみの限界，座屈で決まる限界の内側の領域において，その復元力はおおむね線形であり，積層ゴムの鉛直剛性は，ゴムの材料特性と1次形状係数によって決定される。

天然ゴム系積層ゴムの引張領域は，積層ゴムに引張荷重を漸増して与えると，初期のある引張応力レベル（降伏荷重）までは線形であるものの，その後は応力－ひずみ曲線が急激に軟化してその後破断に至る。初期の引張側の剛性は，フランジ部の剛性等にも影響されるため，厳密な算定は困難であるものの，荷重－変形関係の原点と引張降伏荷重を結んで求めた引張剛性は，圧縮剛性の 1/10～1/20 程度の値が実験を通して得られている(7.1.1-3)。本ガイドラインでは，応力評価を基本とすることから，保守的な設定として引張剛性は圧縮剛性の 1/10 とする。

上記を踏まえ，選定した製品ごとの国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料に記載されている各種諸元を用いて地震応答解析モデルの鉛直特性を設定する。

3) 地震応答解析モデルの不確かさの設定方法

「5.2 地震応答解析法」に従い，免震設計において地震応答解析モデルで考慮すべき不確かさは，製造ばらつき，温度変化及び経年変化とする。これらを反映すべき特性値として水平剛性がある。

(a) 製造ばらつき

国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料に記載された製造ばらつきの範囲内で水平剛性のばらつきを設定する。

(b) 温度変化

敷地近傍の気温の観測記録等から年間を通した温度の変動を想定し，選定した製品ごとの国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料から，温度による変化式を用いて温度変化による水平剛性のばらつきを設定する。

(c) 経年変化

施設の供用期間を設定し，選定した製品ごとの国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料から，供用期間中に想定される経年変化による水平剛性のばらつきを設定する。

設計においては，それぞれの不確かさを組合せ，天然ゴム系積層ゴムの水平剛性が標準，最大，最小となるケースについて地震応答解析を実施する。標準ケースに加えて不確かさを考慮したケースも評価することで，保守的な設計を実施する。ここでは，「免震部材標準品リスト 2009」(7.1.1-5)を参考として，天然ゴム系積層ゴムの特性値の不確かさの設定例を表7.1.1-1 に示す。

表　7.1.1-1　天然ゴム系積層ゴムの特性値の不確かさの設定例

		A 社	B 社
製造ばらつき	水平剛性 Kh	－10%～＋10%	－10%～＋10%
温度変化※1	水平剛性 Kh	－ 6%～＋ 9%	－ 5%～＋ 8%
経年劣化※2	水平剛性 Kh	0%～＋10%	0%～＋10%

※1) 20℃を基準とした-10℃～40℃の変化率

※2) 初期値に対する 60 年相当の変化率

4) 耐震性能の照査方法

(a) 水平変形

「5.2 地震応答解析法」及び「6.1 免震層の荷重の組合せと許容限界」に従い，地震応答解析モデルの免震層水平ばねの応答変位を天然ゴム系積層ゴムのゴム総厚で除すことによ

ってせん断ひずみを求め，最大せん断ひずみが許容限界内であることを確認する。

(b) 鉛直応力度

「5.2 地震応答解析法」及び「6.1 免震層の荷重の組合せと許容限界」に従い，地震応答解析モデルの免震層鉛直ばねの応答軸力を天然ゴム系積層ゴムのゴム面積で除すことによって天然ゴム系積層ゴムに作用する鉛直応力度を求め，最大圧縮応力度及び最大引張応力度が許容限界内であることを確認する。

地震時における天然ゴム系積層ゴムの鉛直応力度を求める方法は，「JEAG4614-2019」の「7.1.3　健全性評価」に従う。具体的には，水平地震動と鉛直地震動に対して別々の解析を実施する場合，水平地震動（ロッキング）による鉛直応力度と鉛直地震動による鉛直応力度の和を求める方法として，①絶対値和による方法，②二乗和平方根（SRSS）による方法，③組合せ係数による方法，及び④時刻歴和による方法がある。加えて，水平地震動と鉛直地震動を同時に入力して解析を実施する場合，⑤鉛直ばねの応答を直接用いる方法がある。このうち，天然ゴム系積層ゴムの鉛直応力度を求める方法は，最も保守的な評価となる①を原則とする。ただし，①絶対値和による方法は，過度に保守的な評価となる場合もあることから，その場合は次の緩和策を採用してもよいこととし，①の値が圧縮となる場合には，④又は⑤のいずれかを用いてもよく，①の値が引張となる場合には，②，③及び⑤の最大値を用いてもよい。（詳細は「JEAG4614-2019」の参考資料４を参照）

(c) 水平２方向入力に対する影響検討

水平 2 方向入力時における天然ゴム系積層ゴムのせん断ひずみは，同時入力解析の各方向に対する水平ばね（MSS モデル）の応答を直接用いたベクトル和にて最大値を求め，水平 1 方向入力時のせん断ひずみと比較し，その影響を検討する。また，鉛直応力度については，水平 2 方向同時入力解析の鉛直ばねの応答を直接用いて最大値を求め，最大圧縮応力度及び最大引張応力度が許容限界内であることを確認する。

(d) 多数回繰り返し変形に対する影響検討

天然ゴム系積層ゴムは，復元力特性が線形でエネルギー吸収しないため温度上昇もほとんどなく，水平剛性の変動がないこと(7.1.1-4)から，多数回繰り返し変形に対する影響検討は必要ない。

5) 耐久性に関して設計上検討すべき事項

天然ゴム系積層ゴムは，長期荷重下でクリープによって鉛直変形が生じる。設計時にクリープ変形が過大とならないよう天然ゴム系積層ゴムのゴム総厚を設定する。なお，クリープひずみは，選定した製品ごとの国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料を用いて適切に設計時に評価する。

(2) 鉛入り積層ゴム

1) 鉛入り積層ゴムの選定

「6.1 免震層の荷重の組合せと許容限界」に定める荷重の組合せについて，鉛入り積層ゴムの応力度及びひずみが許容限界内となるように，国土交通大臣認定を受けた鉛入り積層ゴムから選定する。

2) 地震応答解析モデルの設定時の留意点

鉛入り積層ゴムは，支持機能と復元機能を有する天然ゴム系積層ゴムの中心部に鉛プラグを挿入して，減衰機能を加えた積層ゴム支承である。

以下に，地震応答解析モデルを設定する際の留意点を述べる。

(a) 水平特性

鉛入り積層ゴムは，水平剛性とともに鉛の降伏による履歴減衰を有する積層ゴム支承である。その復元力特性は鉛プラグの降伏点の前後で剛性が大きく異なるバイリニア型復元力特性を示す。詳細には，鉛プラグが降伏する前の水平剛性は，鉛の水平剛性が支配的となり，水平剛性が高くなる。鉛プラグが降伏した後の剛性は，天然ゴム系積層ゴム部分の弾性が支配的となり，水平剛性が低くなる。せん断ひずみの小さい領域では鉛プラグの影響を受けて，積層ゴムだけの水平剛性よりやや大きな値となるが，せん断ひずみ 100%～250%程度では積層ゴムだけの水平剛性となり(7.1.1-6)，その後は，天然ゴム系積層ゴムと同様に，250%程度を超える大変形領域では，せん断力は徐々に大きくなり，最終的に破断に至る。

鉛入り積層ゴムは，水平剛性とともに鉛の降伏による履歴減衰を有する積層ゴム支承である。鉛入り積層ゴムの二次剛性（降伏後剛性）は，積層ゴムの水平剛性に鉛プラグによる水平剛性増加分を加算して求める。一次剛性は，試験による荷重－変形関係に対して履歴面積が一致するよう二次剛性（降伏後剛性）に対する倍率を掛けることで求める。鉛入り積層ゴムの切片荷重（鉛プラグの降伏荷重）は，鉛の降伏せん断応力度と鉛プラグの水平断面積によって計算する。

本ガイドラインでは，「6.1.2(1) アイソレータの許容限界」に定めた許容限界（線形限界）の範囲内における復元力特性は，鉛プラグの降伏荷重（切片荷重）と降伏前水平剛性（一次剛性）及び降伏後水平剛性（二次剛性）で表されるバイリニアモデル又は修正バイリニアモデルとする(7.1.1-3)。ここで，修正バイリニアモデルはひずみ依存性を考慮して，最大変形に応じて二次剛性を変化させたモデルである。バイリニアモデル及び修正バイリニアモデルには，荷重－変形関係を一次剛性と二次剛性の二直線で表現した折れ線型モデル及び滑らかな関数を使って降伏点前後の復元力特性を連続的に表現した菊地モデル(7.1.1-7)などの曲線型モデルを使用することができる。

なお，水平特性の各種諸元には次のような依存性がある。

a）せん断ひずみ依存性

鉛入り積層ゴムには，前述したとおり，せん断ひずみの大きさに応じて鉛プラグの寄与率による影響が異なることが起因したせん断ひずみ依存性がある。復元力特性にバイリニアモデルを用いる場合には，復元力特性のパラメータの設定時に仮定した変形量と地震応答解析結果での変形量がおおむね一致していることを確認するものとする。一方，修正バイリニアモデルを用いる場合には，国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料の水平特性の各種諸元が試験結果と一致するようなひずみ依存性を考慮する。

選定した製品ごとの国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料から，せん断ひずみ依存式を用いて設計時の降伏後剛性及び切片荷重を設定する。

b）振動数依存性

鉛入り積層ゴムの鉛プラグが影響するせん断ひずみが小さい領域を除き，振動数依存性は小さく，設計に影響を及ぼすほどの依存性は認められないため，本ガイドラインでは鉛入り積層ゴムの復元力特性を規定する降伏後剛性及び切片荷重の振動数依存性を考慮しない。

c）面圧依存性

せん断ひずみが 100%以上の範囲では，面圧依存性は小さいため[7.1.1-8]，本ガイドラインでは鉛入り積層ゴムの復元力特性を規定する降伏後剛性及び切片荷重の面圧依存性を考慮しない。ただし，極端に低面圧などで使用する場合には，選定した製品ごとの国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料から，設計時の降伏後剛性及び切片荷重を設定する。

d）繰り返し依存性

鉛入り積層ゴムは，せん断変形する際の塑性履歴エネルギー吸収によって，鉛プラグが発熱して温度上昇する。この温度上昇に伴う繰返し依存性として，降伏後剛性はほとんど変化しないが，切片荷重（鉛プラグの降伏応力）及び履歴減衰が低下していく特性がある[7.1.1-4]。このため，多数回繰り返し変形による切片荷重の低下を考慮した影響検討を行う必要がある。

上記を踏まえ，選定した製品ごとの国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料に記載されている各種諸元及び依存性に関する式を用いて地震応答解析モデルの水平特性を設定する。

(b）鉛直特性

鉛入り積層ゴムの鉛直剛性は，積層ゴム部分に依存するため，「(1）天然ゴム系積層ゴム」に従う。

上記を踏まえ，選定した製品ごとの国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料に記載されている各種諸元を用いて地震応答解析モデルの鉛直特性を設定する。

3) 地震応答解析モデルの不確かさの設定方法

「5.2 地震応答解析法」に従い，免震設計において地震応答解析モデルで考慮すべき不確かさは，製造ばらつき，温度変化及び経年変化とする。これらを反映すべき特性値として降伏後剛性及び切片荷重がある。

(a) 製造ばらつき

国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料に記載された製造ばらつきの範囲内で降伏後剛性及び切片荷重のばらつきを設定する。

(b) 温度変化

敷地近傍の気温の観測記録等から年間を通した温度の変動を想定し，選定した製品ごとの国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料から，温度による変化式を用いて温度変化による降伏後剛性及び切片荷重のばらつきを設定する。

(c) 経年変化

施設の供用期間を設定し，選定した製品ごとの国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料から，供用期間中に想定される経年変化による降伏後剛性及び切片荷重のばらつきを設定する。なお，一般的には切片荷重の経年変化は小さいため，経年変化による切片荷重のばらつきを考慮しないメーカーもあることから，その場合には切片荷重のばらつきは設定しない。

設計においては，それぞれの不確かさを組合せ，鉛入り積層ゴムの降伏後剛性及び切片荷重が標準，最大，最小となるケースについて地震応答解析を実施する。標準ケースに加えて不確かさを考慮したケースも評価することで，保守的な設計を実施する。

ここでは，「免震部材標準品リスト 2009」[7.1.1-5] を参考として，鉛入り積層ゴムの特性値の不確かさの設定例を表 7.1.1-2 に示す。

（本頁以下余白）

表 7.1.1-2　鉛入り積層ゴムの特性値の不確かさの設定例

		A 社	B 社
製造ばらつき	降伏後剛性 Kd	－15%～＋15%	－10%～＋10%
	切片荷重 Qd	－15%～＋15%	－10%～＋10%
温度変化※1	降伏後剛性 Kd	－5.3%～＋5.6%	－5%～＋6%
	切片荷重 Qd	－16.1%～＋19.2%	－21%～＋23%
経年劣化※2	降伏後剛性 Kd	0%～＋10%	0%～＋10%
	切片荷重 Qd	0%～＋5%	－

※1：20℃を基準とした 0℃～40℃の変化率

※2：初期値に対する 60 年相当の変化率

4) 耐震性能の照査方法

(a) 水平変形

「5.2 地震応答解析法」及び「6.1 免震層の荷重の組合せと許容限界」に従い，地震応答解析モデルの免震層水平ばねの応答変位を鉛入り積層ゴムのゴム総厚で除すことによってせん断ひずみを求め，最大せん断ひずみが許容限界内であることを確認する。

(b) 鉛直応力度の評価

「5.2 地震応答解析法」及び「6.1 免震層の荷重の組合せと許容限界」に従い，地震応答解析モデルの免震層鉛直ばねの応答軸力を鉛入り積層ゴムのゴム面積で除すことによって鉛入り積層ゴムに作用する鉛直応力度を求め，最大圧縮応力度及び最大引張応力度が許容限界内であることを確認する。

地震時における天然ゴム系積層ゴムの鉛直応力度を求める方法は，「(1) 天然ゴム系積層ゴム」に従う。

(c) 水平 2 方向入力に対する影響検討

「(1) 天然ゴム系積層ゴム」に従う。

(d) 多数回繰り返し変形に対する影響検討

鉛入り積層ゴムは，多数回繰り返し変形によって，降伏後剛性はほとんど変化しないものの，切片荷重（鉛プラグの降伏応力）の低下が生じる[7.1.1-4]ため，これを考慮した影響検討を行う。この影響評価方法としては，鉛プラグの降伏応力低下を考慮しない地震応答解析から累積吸収エネルギー量を求め，これに応じた降伏応力の低減比率を設定し，それを考慮して再度地震応答解析を実施する簡易応答評価法[7.1.1-2]を用いることができる。

5) 耐久性に関して設計上検討すべき事項

天然ゴム系積層ゴムと同様に，長期荷重下ではクリープによって鉛直変形が生じる。設計時にクリープ変形が過大とならないよう鉛入り積層ゴムのゴム総厚を設定する。なお，クリープひずみは，選定した製品ごとの国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料を用いて適切に設計時に評価する。

(3) 剛すべり支承

1) 剛すべり支承の選定

「6.1 免震層の荷重の組合せと許容限界」に定める荷重の組合せについて，剛すべり支承の応力度及び水平変形が許容限界内となるように，国土交通大臣認定を受けた剛すべり支承から選定する。

2) 地震応答解析モデルの設定時の留意点

剛すべり支承は，すべり材とすべり板で構成され，主に支持機能を有するアイソレータである。また，すべり材とすべり板の間の摩擦係数に応じた減衰機能も有する。すべり支承には高摩擦タイプ・中摩擦タイプ・低摩擦タイプがあり，長期面圧下における摩擦係数は，高摩擦タイプで 0.10～0.15，中摩擦タイプで 0.07 前後，低摩擦タイプで 0.01～0.03 である。ただし，原子力関係施設においては，摩擦による減衰に期待した設計がなされることは少ないことから，ここでは低摩擦タイプに対象を絞り記載する。なお，剛すべり支承は単独では復元機能がないため，復元機能を有する積層ゴム支承等との併用が必要である。

以下に，地震応答解析モデルを設定する際の留意点を述べる。

(a) 水平特性

剛すべり支承は，作用する水平力がすべり材とすべり板の間の摩擦抵抗力を超えると滑り始める。剛すべり支承は，すべり部が滑り始めることによって，摩擦によるエネルギー吸収によって免震層の水平変形を低減する。ただし，ここでは低摩擦タイプを対象とすることから，摩擦による減衰性能（応答低減効果）は小さいため，考慮しなくてもよい。

一次剛性は，滑り出すまでの水平荷重と水平変形との関係によって求める。ただし，剛すべり支承の一次剛性はかなり高い値となることが一般的であり，厳密な測定が難しく，降伏点も低いことから，規定はしていない。二次剛性は，滑りが生じた後，可動範囲の水平方向の荷重と変形の関係から求められる。ただし，滑り状態では，水平変形の増大によって復元力は変化しないため，二次剛性はゼロとする。滑り出しの降伏荷重（切片荷重）は，鉛直荷重と摩擦係数から算定される。

本ガイドラインでは，「6.1.2(1) アイソレータの許容限界」に定めた許容限界（限界変形以内）の範囲内における復元力特性は，剛塑性型のバイリニアモデルとする[7.1.1-3]。

なお，水平特性の各種諸元には次のような依存性がある。

a) せん断ひずみ依存性

剛すべり支承については，せん断変形ではなく滑るため，せん断ひずみに対する依存性はない。

b) 振動数（速度）依存性

選定した製品ごとの国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料から，速度依存式を用いて設計時の摩擦係数を設定する。

c) 面圧依存性

選定した製品ごとの国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料から，面圧依存式を用いて設計時の摩擦係数を設定する。ただし，地震時の変動軸力の影響が小さくなるように，かつ引張が生じないように，すべり支承を極力建屋の中心付近に配置するよう計画する。

d) 繰り返し依存性

剛すべり支承は，繰り返し回数によって摩擦係数が変化するため，耐久性の観点からも，繰り返し回数による摩擦係数の変化を考慮する必要があるが，低摩擦タイプは繰り返し回数の影響が小さい[7.1.1-4]ため，本ガイドラインでは摩擦係数の繰り返し依存性を考慮しない。

上記を踏まえ，選定した製品ごとの国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料に記載されている各種諸元及び依存性に関する式を用いて地震応答解析モデルの水平特性を設定する。

(b) 鉛直特性

剛すべり支承の鉛直剛性は，剛となることから，基準値を設けていない[7.1.1-3]。

剛すべり支承の圧縮領域は，すべり材の降伏点から圧縮限界を求めるが，降伏点が現れない場合は，目視にてすべり材が横にフローし始めた荷重を確認し，この時の荷重を圧縮限界強度とする。

剛すべり支承の引張領域は，引張力によって，すべり材とすべり板が離れてしまうことから，鉛直剛性はゼロとなる。

上記を踏まえ，選定した製品ごとの国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料に記載されている各種諸元を用いて地震応答解析モデルの鉛直特性を設定する。

3) 地震応答解析モデルの不確かさの設定方法

「5.2 地震応答解析法」に従い，免震設計において地震応答解析モデルで考慮すべき不確

かさは，製造ばらつき，温度変化及び経年変化とする。これらを反映すべき特性値として摩擦係数がある。

(a) 製造ばらつき

国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料に記載された製造ばらつきの範囲内で摩擦係数のばらつきを設定する。

(b) 温度変化

すべり支承の摩擦係数の温度依存性はごくわずかである[7.1.1-3]ため，本ガイドラインでは温度変化による摩擦係数のばらつきを考慮しない。

(c) 経年変化

すべり支承の摩擦係数の経年変化は小さい[7.1.1-3]ため，本ガイドラインでは経年変化による摩擦係数のばらつきを考慮しない。

設計においては，それぞれの不確かさを組合せ，剛すべり支承の摩擦係数が標準，最大，最小となるケースについて地震応答解析を実施する。標準ケースに加えて不確かさを考慮したケースも評価することで，保守的な設計を実施する。

ここでは，「免震部材標準品リスト2009」[7.1.1-5] を参考として，剛すべり支承の特性値の不確かさの設定例を表7.1.1-3に示す。

表7.1.1-3　剛すべり支承の特性値の不確かさの設定例

		A社	B社
製造ばらつき	摩擦係数μ	−55%～+55%	−30%～+30%
温度依存	摩擦係数μ	−	−
経年劣化	摩擦係数μ	−	−

4) 耐震性能の照査方法

(a) 水平変形

「5.2 地震応答解析法」及び「6.1 免震層の荷重の組合せと許容限界」に従い，地震応答解析モデルの免震層水平ばねの応答変位から剛すべり支承の水平変形を求め，最大水平変形が許容限界内であることを確認する。

(b) 鉛直応力度

「5.2 地震応答解析法」及び「6.1 免震層の荷重の組合せと許容限界」に従い，地震応答解析モデルの免震層鉛直ばねの応答軸力を剛すべり支承のすべり材面積で除すことによっ

て剛すべり支承に作用する鉛直応力度を求め，最大圧縮応力度が許容限界内であることを確認する。

地震時における剛すべり支承の鉛直応力度を求める方法は，「(1) 天然ゴム系積層ゴム」に従う。ただし，剛すべり支承は，すべり材とすべり板が離れてしまうことから，引張応力度は生じない。

(c) 水平 2 方向入力に対する影響検討

水平 2 方向入力時における剛すべり支承の水平変形は，同時入力解析の各方向に対する水平ばねの応答を直接用いたベクトル和にて最大値を求め，水平 1 方向入力時のせん断ひずみと比較し，その影響を検討する。また，鉛直応力度については，水平 2 方向同時入力解析の鉛直ばねの応答を直接用いて最大値を求める。ただし，剛すべり支承は，すべり材とすべり板が離れてしまうことから，引張応力度は生じない。

(d) 多数回繰り返し変形に対する影響検討

継続時間の長い長周期地震動を想定するような場合には，繰り返し回数によって摩擦係数が変化するため，耐久性の観点からも，繰り返し回数による摩擦係数の変化を考慮する必要があるが，低摩擦タイプは繰り返し回数の影響が小さい[7.1.1-4]ため，摩擦係数の変化を考慮した影響検討は必要ない。

5) 耐久性に関して設計上検討すべき事項

剛すべり支承のすべり材は，外気に接することが少ない構造であるが，耐久性の高い材料を選択することで品質の劣化を防止する。また，外気に接する金属面には防錆処理を施す。加えて，設置環境を考慮すると，すべり板に塵・埃が堆積し，すべり材の摺動に悪影響を与えることが予測されるため，必要に応じて防塵カバーを取り付ける。

剛すべり支承は，鉛直剛性が高いため，クリープは微小であり，鉛直方向のクリアランスを決定する要因となることは少ない。ただし，剛すべり支承のクリープ変形量と積層ゴム支承及び弾性すべり支承のクリープ変形量は差が大きいため，積層ゴム支承又は弾性すべり支承と併用する場合は，その変形差により生じる応力等が上部基礎版に及ぼす影響を検討する必要がある。

(4) 弾性すべり支承

1) 弾性すべり支承の選定

「6.1 免震層の荷重の組合せと許容限界」に定める荷重の組合せについて，弾性すべり支承の応力度及び水平変形が許容限界内となるように，国土交通大臣認定を受けた弾性すべり支承から選定する。

2) 地震応答解析モデルの設定時の留意点

弾性すべり支承は，すべり部分(すべり材とすべり板を示す)と積層ゴム部分から構成されるアイソレータであり，積層ゴム支承とすべり支承の両部材の利点を活用している。また，剛すべり支承と同じく，ここでは低摩擦タイプに対象を絞り記載する。なお，弾性すべり支承についても単独では復元機能がないため，復元機能を有する積層ゴム支承等との併用が必要である。

以下に，地震応答解析モデルを設定する際の留意点を述べる。

(a) 水平特性

弾性すべり支承は，地震初期には積層ゴム部分が水平方向に変形し，作用する水平力がすべり材とすべり板の間の摩擦抵抗力を超えると滑り始める。弾性すべり支承は，積層ゴム部分がある程度変形した後に滑り始めるため，剛すべり支承の高い初期剛性が緩和されて，滑らかな変形性能を有している[7.1.1-3]。

弾性すべり支承は，地震初期には積層ゴム部分が変形し長い周期特性によって，地震力を低減し，大地震時には滑り始めることによって，弾性すべり支承に作用する水平荷重が頭打ちになると同時に摩擦によるエネルギー吸収によって免震層の水平変形を低減する。ただし，ここでは低摩擦タイプを対象とすることから，摩擦による減衰性能（応答低減効果）は小さいため，考慮しなくてもよい。

一次剛性は，積層ゴム部分の剛性によって決まる。弾性すべり支承の積層ゴム部分は，積層ゴム支承と比べて，ゴム総厚は薄く，二次形状係数が大きく，ゴム材料も比較的硬い材料が用いられていることが多い。二次剛性は，剛すべり支承と同様にゼロとする。滑り出しの降伏荷重（切片荷重）は，鉛直荷重と摩擦係数から算定される。

本ガイドラインでは，「6.1.2(1) アイソレータの許容限界」に定めた許容限界（限界変形以内）の範囲内における復元力特性は，完全弾塑性のバイリニアモデルとする[7.1.1-3]。

なお，弾性すべり支承については，一次剛性は積層ゴム部分の水平剛性によって決まり，降伏荷重はすべり部分の摩擦係数によって決まり，その水平特性の各種諸元には次のような依存性がある。

a) せん断ひずみ依存性

積層ゴム部分は，「(1) 天然ゴム系積層ゴム」に従い，本ガイドラインでは水平剛性のせん断ひずみ依存性を考慮しない。

すべり部分は，せん断ひずみに対する依存性はない。

b) 振動数（速度）依存性

積層ゴム部分は，「(1) 天然ゴム系積層ゴム」に従い，本ガイドラインでは水平剛性の振動数依存性を考慮しない。

すべり部分は,「(3) 剛すべり支承」に従い,速度依存式を用いて設計時の摩擦係数を設定する。

c) 面圧依存性

積層ゴム部分は,「(1) 天然ゴム系積層ゴム」に従い,本ガイドラインでは水平剛性の面圧依存性を考慮しない。

すべり部分は,「(3) 剛すべり支承」に従い,面圧依存式を用いて設計時の摩擦係数を設定する。

d) 繰り返し依存性

積層ゴム部分は,線形性を有し減衰の少ないゴム材料を用いるため,繰り返し回数による水平剛性の変化は小さいことから,本ガイドラインでは水平剛性の繰り返し依存性を考慮しない。

すべり部分は,「(3) 剛すべり支承」に従い,繰り返し回数による摩擦係数の変化を考慮する必要があるが,低摩擦タイプは繰り返し回数の影響が小さい[7.1.1-4]ため,本ガイドラインでは摩擦係数の繰り返し依存性を考慮しない。

上記を踏まえ,選定した製品ごとの国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料に記載されている各種諸元及び依存性に関する式を用いて地震応答解析モデルの水平特性を設定する。

(b) 鉛直特性

弾性すべり支承の鉛直剛性は,積層ゴム部分とすべり材の直列ばねとして算出するか,実験によって定める[7.1.1-3]。

弾性すべり支承の圧縮領域は,すべり材,又は,積層ゴム部分のいずれか小さい方の圧縮限界とする。

弾性すべり支承の引張領域は,剛すべり支承と同様に,鉛直剛性はゼロとなる。

上記を踏まえ,選定した製品ごとの国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料に記載されている各種諸元を用いて地震応答解析モデルの鉛直特性を設定する。

3) 地震応答解析モデルの不確かさの設定方法

「5.2 地震応答解析法」に従い,免震設計において地震応答解析モデルで考慮すべき不確かさは,製造ばらつき,温度変化及び経年変化とする。これらを反映すべき特性値として水平剛性及び摩擦係数がある。

(a) 製造ばらつき

国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料に記載された製造ばらつきの範囲内で水平剛性及び摩擦係数のばらつきを設定する。

(b) 温度変化

積層ゴム部分は,「(1) 天然ゴム系積層ゴム」に従い,温度変化による水平剛性のばらつきを設定する。

すべり部分は,「(3) 剛すべり支承」に従い,本ガイドラインでは温度変化による摩擦係数のばらつきを考慮しない。

(c) 経年変化

積層ゴム部分は,「(1) 天然ゴム系積層ゴム」に従い,経年変化による水平剛性のばらつきを設定する。

すべり部分は,「(3) 剛すべり支承」に従い,本ガイドラインでは経年変化による摩擦係数のばらつきを考慮しない。

設計においては,それぞれの不確かさを組合せ,弾性すべり支承の水平剛性及び摩擦係数が標準,最大,最小となるケースについて地震応答解析を実施する。標準ケースに加えて不確かさを考慮したケースも評価することで,保守的な設計を実施する。

ここでは,「免震部材標準品リスト 2009」(7.1.1-5) を参考として,弾性すべり支承の特性値の不確かさの設定例を表 7.1.1-4 に示す。

表 7.1.1-4　弾性すべり支承の特性値の不確かさの設定例

		A 社	B 社
製造ばらつき	一次剛性 K1	−20%～＋20%	−20%～＋20%
	摩擦係数 μ	−30%～＋30%	−20%～＋20%
温度変化※1	一次剛性 K1	−6%～＋9%	−5%～＋20%
	摩擦係数 μ	−	−
経年劣化※2	一次剛性 K1	0%～＋15%	0%～＋20%
	摩擦係数 μ	−	−

※1：20℃を基準とした-10℃～40℃の変化率

※2：初期値に対する 60 年相当の変化率

4) 耐震性能の照査方法

(a) 水平変形

「5.2 地震応答解析法」及び「6.1 免震層の荷重の組合せと許容限界」に従い,地震応答

解析モデルの免震層水平ばねの応答変位から弾性すべり支承の水平変形を求め，最大水平変形が許容限界内であることを確認する。

(b) 鉛直応力度

「5.2 地震応答解析法」及び「6.1 免震層の荷重の組合せと許容限界」に従い，地震応答解析モデルの免震層鉛直ばねの応答軸力を積層ゴム部分のゴム面積で除すことによって弾性すべり支承に作用する鉛直応力度を求め，最大圧縮応力度が許容限界内であることを確認する。

地震時における弾性すべり支承の鉛直応力度を求める方法は，「(1) 天然ゴム系積層ゴム」に従う。ただし，弾性すべり支承は，すべり材とすべり板が離れてしまうことから，引張応力度は生じない。

(c) 水平 2 方向入力に対する影響検討

「(3) 剛すべり支承」に従う。

(d) 多数回繰り返し変形に対する影響検討

積層ゴム部分は，線形性を有し減衰の少ないゴム材料を用いるため，繰り返し回数による水平剛性の変化は小さい。一方，すべり部分は，「(3) 剛すべり支承」に従い，繰り返し回数による摩擦係数の変化を考慮する必要があるが，低摩擦タイプは繰り返し回数の影響が小さい[7.1.1-4]ため，摩擦係数の変化を考慮した影響検討は必要ない。

5) 耐久性に関して設計上検討すべき事項

弾性すべり支承のクリープは，積層ゴム部分に依存し，クリープひずみは積層ゴム部分の値と同じ傾向を示すため，選定した製品ごとの国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料を用いて適切に設計時に評価する。

すべり部分は，「(3) 剛すべり支承」に従う。

（本頁以下余白）

7.1.2　ダンパーの設計

地震時のエネルギー消費によって，上部構造の応答低減が確実に行え，積層ゴムの線形限界変位まで変形が追従し必要な減衰性能を維持するようダンパーを設計する。ダンパーは国土交通大臣認定を受けたものから選定し，定められたクライテリアを満足することを地震応答解析に基づき確認するとともに，上部構造の機能及び地震力低減機能を確保するように適切な設計を行う。

(1) 鋼材ダンパー

1) 鋼材ダンパーの選定

「6.1 免震層の荷重の組合せと許容限界」に定める荷重の組合せについて，鋼材ダンパーの変形と累積疲労損傷度が許容限界内となるように，国土交通大臣認定を受けたダンパーから選定する。

2) 地震応答解析モデルの設定時の留意点

鋼材ダンパーは，鋼材の塑性変形によるエネルギー吸収を利用した免震装置である。以前はループ状鋼棒ダンパーの使用例が多かったが，現在では U 型ダンパーが主流となっているため，U 型ダンパーに対象を絞り，記載する。

鋼材ダンパーは，成分管理を厳しくした SN490B 相当材を U 字形に冷間曲げ加工した後，熱処理を施して製作される。U 型ダンパー単体では復元力特性に方向性が存在するため，U 型ダンパー単体を放射状又は直交する 2 本を 1 単位として複数本組み合わせて構成し，方向性を極力なくしている。

鋼材ダンパーの復元力特性は紡錘型の履歴特性を示す。降伏荷重までの弾性時の荷重と変形の関係（剛性）はほぼ線形の特性を示し，降伏荷重以降の剛性は大きく低下する。この復元力特性のモデル化にはバイリニア型が用いられることが多いため，本ガイドラインではバイリニア型でモデル化することとする。

なお，鋼材ダンパーの各種諸元には次のような依存性がある。

(a) 速度（振動数）依存性

実大試験体を用いた準静的と動的の載荷実験結果を比較し，両者の履歴曲線はほぼ一致し，繰返し変形性能及びエネルギー吸収量は著しく低下しないことが確認されている[7.1.2-1]ことから，鋼材ダンパーの速度（振動数）依存性は考慮しない。

(b) 繰り返し依存性

繰り返し変形によって疲労が蓄積され，最終的には破断に至る。破断に至るまでの繰り返し変形性能の評価には，鋼材の一般的な疲労照査と同様に Miner 則に基づく累積疲労損傷度が適用可能である[7.1.2-2]。

また，長時間継続する地震動に対する多数回繰り返し変形によって，降伏荷重は徐々に低下し，破断前には 0.7～0.8 倍程度まで低下することが確認されている(7.1.2-3)。このため，多数回繰り返し変形による降伏荷重の低下を考慮した影響検討を行う必要がある。

3) 解析モデルの不確かさの設定方法

「5.2 地震応答解析法」に従い，免震設計において地震応答解析モデルで考慮すべき不確かさは，製造ばらつき，温度変化及び経年変化とする。これらを反映すべき特性値として一次剛性及び降伏荷重がある。

(a) 製造ばらつき

国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料に記載された製造ばらつきの範囲内で一次剛性及び降伏荷重のばらつきを設定する。

(b) 温度変化

敷地近傍の気温の観測記録等から年間を通した温度の変動を想定し，温度変化に伴う降伏荷重のばらつきを選定した製品ごとの国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料から設定する。

(c) 経年変化

鋼材ダンパーは鋼製のため，機械的諸性質に経年変化を生じることはない(7.1.2-4) ことから，本ガイドラインでは鋼材ダンパーの経年変化による特性値のばらつきを考慮しない。

設計においては，それぞれの不確かさを組合せ，鋼材ダンパーの一次剛性及び降伏荷重が標準，最大，最小となるケースについて地震応答解析を実施する。標準ケースに加えて不確かさを考慮したケースも評価することで，保守的な設計を実施する。

ここでは，「免震部材標準品リスト 2009」(7.1.2-4) を参考として，鋼材ダンパーの特性値の不確かさの設定例を表 7.1.2-1 に示す。

（本頁以下余白）

表 7.1.2-1　鋼材ダンパーの特性値の不確かさの設定例

		A 社	B 社
製造ばらつき	一次剛性 K1	－10%～＋10%	－10%～＋10%
	降伏荷重 Qy	－10%～＋10%	－10%～＋10%
温度変化※	一次剛性 K1	0%	0%
	降伏荷重 Qy	－3%～＋3%	－3%～＋3%
経年劣化	一次剛性 K1	0%	0%
	降伏荷重 Qy	0%	0%

※：20℃を基準とした-10℃～40℃の変化率

4) 耐震性能の照査方法

(a) 最大変形

「5.2 地震応答解析法」及び「6.1 免震層の荷重の組合せと許容限界」に従い地震時の鋼材ダンパーの変形を求め，最大変形が許容限界内（限界変形以下）であることを確認する。

(b) 累積疲労損傷度

「5.2 地震応答解析法」及び「6.1 免震層の荷重の組合せと許容限界」に従い地震時の鋼材ダンパーの変形を求め，累積疲労損傷度が許容限界内（1.0 以下）であることを確認する。

なお，水平一方向加力を受ける鋼材ダンパーの累積疲労損傷度の評価には，Miner 則に基づく評価方法が適用可能である。水平二方向加力を受ける場合，鋼材ダンパーのねじれ変形の影響によって水平一方向加力に比べ繰り返し変形性能が低下すること，鋼材ダンパーのねじれ変形の蓄積によって上下架台に接触する可能性があることが報告されている[7.1.2-5]。そこで，水平二方向加力を受ける場合の鋼材ダンパーの健全性評価については，文献[7.1.2-6]で提案されている水平二方向の変形に対応した累積損傷度に基づく評価方法によって健全性を評価する。

(c) 多数回繰り返し変形に対する影響評価

長時間継続する地震動に対する多数回繰り返し変形によって，鋼材ダンパーの吸収エネルギーは徐々に低下することが確認されている。繰り返し変形による鋼材ダンパーの一次剛性及び二次剛性の変化はほとんどなく，吸収エネルギーの低下は主に降伏荷重の低下によるものである。そこで，繰り返し変形に対する影響評価には，累積変形量に応じた降伏荷重の低減を考慮した簡易応答評価法[7.1.2-7]を用いる。具体的には，降伏荷重の低減を考慮しない地震応答解析から求めた累積変形量に応じた降伏荷重の低下式を用いて低減降伏荷重を設定し，再度地震応答解析を実施する方法である。

5) 耐久性に関して設計上検討すべき事項

耐久性については，さび止め塗料などの防錆処理が施されていれば問題となることはないと考えられる。ただし，地震時に塑性変形に伴う塗装の剥離が見られた場合には，耐久性を維持するために補修塗装を施すことが望ましい。

(2) オイルダンパー

1) オイルダンパーの選定

「6.1 免震層の荷重の組合せと許容限界」に定める荷重の組合せについて，オイルダンパーの変形と速度が許容限界内となるように，国土交通大臣認定を受けたダンパーから選定する。

2) 地震応答解析の不確かさの設定方法

オイルダンパーは作動速度に応じた減衰力を発生させエネルギーを吸収する免震装置である。オイルダンパーの減衰力特性には，大別するとリニア型とバイリニア型の 2 種類があり，履歴曲線は，リニア型は楕円形状に，バイリニア型は矩形形状となるため，選定した製品の特性に合わせて，これらのいずれかを適切に選択してモデル化する。

なお，オイルダンパーには次のような依存性がある。

(a) 振動数依存性

オイルダンパーは作動油の圧縮性による剛性を持っている。この剛性は減衰に対して直列に作用し，減衰係数が小さくなる方向に作用するが，長周期である免震部材では通常無視できる[(7.1.2-8)]ことから，オイルダンパーの振動数依存性は考慮しない。

(b) 繰り返し依存性

機械部品による摩耗によるが，地震・風振動の回数程度では，ほとんど変化しない[(7.1.2-8)]ことから，オイルダンパーの繰り返し依存性は考慮しない。

3) 解析モデルの不確かさの設定方法

「5.2 地震応答解析法」に従い，免震設計において地震応答解析モデルで考慮すべき不確かさは，製造ばらつき，温度変化及び経年変化とする。これらを反映すべき特性値として減衰係数がある。

(a) 製造ばらつき

国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料に記載された製造ばらつきの範囲内で減衰係数のばらつきを設定する。

(b) 温度変化

敷地近傍の気温の観測記録等から年間を通した温度の変動を想定し，温度変化に伴う減衰係数のばらつきを国土交通大臣認定資料及びメーカー技術資料から設定する。

(c) 経年変化

機能部品が油中に密閉されており，また，ほとんど作動せず，摩耗及び高温状態になることもないため，経年変化は無視できる (7.1.2-3) ことから，本ガイドラインではオイルダンパーの経年変化による特性値のばらつきを考慮しない。

設計においては，オイルダンパーの減衰係数が標準，最大，最小となるケースについて地震応答解析を実施する。標準ケースに加えて不確かさを考慮したケースも評価することで，保守的な設計を実施する。

ここでは，「免震部材標準品リスト 2009」(7.1.2-4) を参考として，オイルダンパーの特性値の不確かさの設定例を表 7.1.2-2 に示す。

表 7.1.2-2　オイルダンパーの特性値の不確かさの設定例

		A 社	B 社
製造ばらつき	減衰係数	−15%～＋15%	−15%～＋15%
温度変化※	減衰係数	−10%～＋10%	−5%～＋5%
経年劣化	減衰係数	0%	0%

※：20℃を基準とした，（A 社）-20℃～80℃の変化率，（B 社）-10℃～60℃の変化率

4) 耐震性能の照査方法

「5.2 地震応答解析法」及び「6.1 免震層の荷重の組合せと許容限界」に従い地震時のオイルダンパーの変形及び速度を求め，最大変形及び最大速度が許容限界内（限界変形及び限界速度以下）であることを確認する。

5) 耐久性に関して設計上検討すべき事項

耐久性については，油中に密閉されている機能部品が問題になる可能性は低いと考えられる。一方，外気に触れる部品についてもさび止め塗料などの防錆処理が施されていれば問題となることはないと考えられる。また，ロッド部については，防錆処理に加えて，埃及び接触による傷防止の観点から，防塵カバーをつけることが望ましい。

（本頁以下余白）

7.1.3　免震装置接合部及びペデスタルの設計

(1) アイソレータ

接合部及びペデスタルの設計は「免震部材の接合部・取付け躯体の設計指針」(7.1.3-1)に従い行う。

接合部及びペデスタルに作用する外力はアイソレータが支える軸力，アイソレータの許容限界時の水平変形によるせん断力及び曲げモーメント，並びに P-⊿効果による付加曲げモーメントとする。

接合部及びペデスタルの設計は，上記外力に対して短期許容応力度設計を行う。

(2) 鋼材ダンパー

接合部及びペデスタルの設計は「免震部材の接合部・取付け躯体の設計指針」(7.1.3-1)に従い行う。

接合部及びペデスタルに作用する外力はダンパーの減衰力に基づくせん断応力及び曲げモーメントであり，設計用最大水平変形は免震層としての限界変形（設計で採用する全ての免震装置の許容限界のうちの最小値）とする。接合部及びペデスタル設計に用いるダンパー減衰力は，復元力特性に基づき算定される減衰力と実験結果に基づく減衰力のうち，大きい方の値を採用し，かつ，ダンパーの特性変動を考慮する。

接合部及びペデスタルの設計は，上記外力に対して短期許容応力度設計を行う。

(3) オイルダンパー

接合部及びペデスタルの設計は「免震部材の接合部・取付け躯体の設計指針」(7.1.3-1)に従い行う。

接合部及びペデスタルに作用する外力はダンパーに作用する減衰力及びダンパー自重とする。減衰力の大きさは，ダンパーの最大減衰力に対して特性変動を考慮して決定する。

接合部及びペデスタルの設計は，上記外力に対して短期許容応力度設計を行う。

7.1.4　クリアランスの設計

(1) 離隔距離の設計

水平方向のクリアランスの許容限界は，基準地震動 Ss 時の免震層最大応答変位の 1.5 倍以上とし，免震装置に設定する許容限界まで擁壁に衝突することのないようにする。また，鉛直方向の離隔が干渉することによって免震建屋の応答に影響を与えないように設定する。鉛直方向のクリアランスは，供用期間中に免震層のクリープ変形によって生じる沈下，地震時の上下応答及びロッキング応答を考慮し，想定される変形量から 1.5 倍以上の余裕を確保する。

(2) エキスパンションジョイントの設計

2011 年東北地方太平洋沖地震では地震時の動的な挙動に追従できず，エキスパンションジョイントが破損した事例が多く見られた。そのため，緊急時に動線となるエキスパンションジョイントは動的性能が確認された製品を用いるか，もしくは動的な挙動に追従できることを実験等によって確認することとする。これは，「免震エキスパンションジョイントガイドライン」（一般社団法人日本免震構造協会）で示されている性能指標の分類では A 種に相当する。

(3) 可動範囲の確認

免震型 SA 施設の設計では土木系・建築系・機械系と，所掌区分が多業種に渡るので，地震時の可動範囲に関して意思疎通を図り，設計時・施工時・竣工時・稼働時の各段階において業種を横断した可動部分のチェックを実施する。

7.1.5　その他留意事項

免震層の設計において高い耐震安全性を確保するためには，鉛直荷重を支持し，地震動によるエネルギーを吸収する免震装置を含む免震層の脆性的な損傷を防止する必要がある。

免震装置を含む免震層の終局状態としては，①積層ゴム支承の破断・座屈，②すべり支承の脱落，③鋼材ダンパーの破断，④オイルダンパーの限界速度超過，⑤免震装置ペデスタルの破損，⑥擁壁への衝突等が想定される。

①については，許容限界を線形限界としており，基準地震動 Ss の最大応答を上回った場合においても，即座に脆性的な損傷に至ることはない。

②については，クリアランス寸法まですべり支承が脱落しないよう限界変形を設定することで防止可能である。

③及び④については，減衰性能が低下するものの，直接的に脆性的な損傷に至ることはない。

⑤については，各免震装置の許容限界時の発生応力に対して短期許容応力度設計を行うこととしており，基準地震動 Ss の最大応答を上回った場合においても，即座に脆性的な損傷に至ることはない。ただし，免震装置に対して先行破壊を防止するよう配慮することが望ましい。

⑥については，基準地震動 Ss に対して生じる免震層最大応答変位の 1.5 倍以上のクリアランス寸法を確保することとしており，基準地震動 Ss の最大応答を上回った場合においても，即座に擁壁へ衝突することはない。

したがって，上記のような設計及び配慮を行うことで，免震層の脆性的な損傷を防止することが可能となる。

7.2　建物・構築物の設計

建物・構築物の設計上考慮すべき荷重の種類は「6.2　建物・構築物の荷重の組合せと許容限界」に示すものとし，建物・構築物の設計応力は，これらの荷重を組合せた各荷重時に発生する応力とする。

7.2.1　上部構造の設計

上部構造は，上部基礎版より上部の上部架構は鉄骨造を，上部基礎版は鉄筋コンクリート造を，主な構造形式とする。免震建屋は，構造物の振動特性を計画的に制御することによって，構造物の地震荷重を低減するものなので，動的な応答解析を基本に検討評価する。したがって，上部構造の構造計画に当たっては，振動系を構成する質量分布及び剛性等の評価を十分正しく行うことが基本となる。応答解析では耐震型と同様に質点を層ごとに集約した多質点系モデルを用いることを基本とするが，偏心率が国土交通省建築基準法施行令第 82 条の 6 に示される 0.15 を超えるような偏心が大きい場合や，水平 2 方向入力の検討など，ねじれの影響を考慮する必要がある場合には，上部構造を 3 次元的にモデル化して応答を評価する。なお，壁式構造など上部構造が十分な剛性を有する場合にはこの限りではない。また，水平方向の地震動に対するロッキング挙動によって生じる鉛直方向の地震力が無視できない場合は，3 次元モデル等によってその影響を確認する。使用する材料のばらつきが応答に影響を与える可能性がある場合には，その変動幅を適切に設定し，応答に与える影響を確認する。

上部構造全体としては，免震型 SA 施設内に収納された SA 設備及び周囲の耐震重要施設，重大事故等対処施設の機能に波及的影響を及ぼさないように設計する。基本的には，基準地震動 Ss によって上部構造の構造部材に作用する応力が短期許容応力度以内であることを確かめる。短期許容応力度を超えた場合には，上部構造がおおむね弾性範囲であることを確かめる。短期許容応力度設計の具体的な方法は，鉄骨造を基本とする上部架構は「鋼構造許容応力度設計規準」(日本建築学会) 等に，鉄筋コンクリート造を基本とする上部基礎版は「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説」(日本建築学会) 等に示されている。また，おおむね弾性範囲であることの確認は，静的弾塑性解析等を用いることが考えられる。

また，非構造部材の落下等による波及的影響防止の観点から，層間変形角が 1/200 以内であることを確認する。

鉛直動に対する建屋の設計目標は耐震型と同様とする。また，重要機器近傍の間仕切り壁，天井，内・外装材，設備等においては，重要機器の機能を阻害しないよう適切に配慮する。

擁壁衝突時に誘発される衝撃的な加速度応答を精度よく求めることは困難であり，そのため重要機器への影響を評価することも困難であることから，擁壁への衝突は許容しない。建屋と擁壁のクリアランスは応答解析結果における免震層の相対変位を考慮し，隣接する構造物との間隔は免震効果を阻害しないよう十分余裕をもって適切に設定する。

水平 2 方向入力の検討では，隅柱等影響が想定される部位について水平 2 方向の影響を

確認する。

7.2.2　下部構造の設計

下部基礎版は，鉄筋コンクリート造の直接基礎を想定している（杭基礎も適用可能）。また，下部基礎版を地表面より下方に設置する場合には，側方地盤の安定化，免震層の保護のために一般的に下部基礎版から立ち上がる擁壁が設置される。

機能維持検討に際しては，これらの下部構造を構成する各部の形状を考慮して応力を適切に評価し，耐震建屋と同様に部材に作用する応力が終局耐力以内であることを確認する。また，下部基礎版の変形等により免震性能を低下させる有害な変形が生じないように留意する。擁壁には支持機能の維持は求められないが，擁壁が崩壊・傾く等によって，免震建屋及び周囲の耐震重要施設へ波及的影響を及ぼさない設計とする。擁壁は常時土圧，地震時土圧及び水圧荷重等に対して健全性を評価する。

また，建物・構築物の基礎は設計荷重に対して，十分な支持性能を有する地盤に設置する。接地圧の評価は，耐震建屋と同様に，支持地盤に作用する応力が極限鉛直支持力度以内であることを確かめる。

7.2.3　その他留意事項

免震構造の特徴として，比較的長い周期で振動するため，上部構造には地震荷重が準静的に作用する。そのため，降伏耐力を上回る地震荷重を受ける場合には，上部架構の塑性変形が急激に進行する可能性がある。

したがって，建物・構築物の設計に高い耐震安全性を確保するためには，上部架構の急激な塑性変形を防止することが肝要である。具体的には，上部架構に十分な剛性及び耐力を確保することで実現可能であるが，降伏耐力に対して妥当な安全余裕を有していることを確認することも有効である。そのひとつの手段として，上部架構の荷重増分による静的弾塑性解析によって，上部架構の荷重－変形関係を把握し，構造計画の妥当性を確認する。

上記のような設計及び配慮を行うことで，建物・構築物の脆性的な損傷を防止することが可能となる。

なお，下部構造については，耐震建屋と同様の設計及び配慮を行うことで，脆性的な損傷を防止することが可能である。

（本頁以下余白）

7.3　機器・配管系の設計

7.3.1　基本方針

機器・配管系の耐震設計に当たっては,「平成 25 年規制基準」及び「JEAC 4601-2015」に準拠して設計を行うものとし，基準地震動 Ss に対して安全であることを確認する。

また，機器・配管系の構造計画では，免震装置の特性及び免震建屋の応答特性に配慮して設計を行う。留意点を次に記載する。

・渡り配管等の免震構造物ー非免震構造物間の設備については，地震時の相対変位が大きくなることに十分留意し，相対変位に追従できる構造とする。また，設備の地震時の相対変位量と他の構造物とのクリアランスを比較し，免震機能を阻害するような干渉等が生じないような配置とする。

・プールやタンクなど流体を内包する設備については，地震時のスロッシングによる設計条件が非免震時よりも厳しくなる可能性があることに配慮して，設計を行う。

7.3.2　設計用地震力

免震型発電用原子炉施設の機器・配管系の設計用地震力の考え方は，原則として「平成 25 年規制基準」及び JEAG4601 による。渡り配管等の設計用地震力は表 7.3.2-1 に基づき算定する。

表 7.3.2-1　渡り配管等の設計用地震荷重

重大事故等対処施設の設備別分類	静的地震力		動的地震力		建屋変位による地震荷重	
	水平	鉛直	水平	鉛直	水平	鉛直
常設耐震重要重大事故防止設備・常設重大事故緩和設備	―	―	K_h(Ss)※1	K_v(Ss)※2	D_h(Ss)※3	D_v(Ss)※4

※1：K_h(Ss)は，水平方向の基準地震動 Ss による機器・配管系の水平地震力

※2：K_v(Ss)は，鉛直方向の基準地震動 Ss による機器・配管系の鉛直地震力

※3：D_h(Ss)は，水平方向の基準地震動 Ss によって定まる建屋変位による機器・配管系の水平地震荷重

※4：D_v(Ss)は，鉛直方向の基準地震動 Ss によって定まる建屋変位による機器・配管系の鉛直地震荷重

また，免震建屋内の機器・配管系及び渡り配管等の耐震計算における水平地震力と鉛直地震力の組合せ法は以下とする。

水平地震動と鉛直地震動を別々に動的解析モデルへ入力して地震荷重を求める場合，両者の荷重組合せには次の方法が適用できる。

(1)　絶対値和

水平地震力による荷重と鉛直地震力による荷重を絶対値和する方法

(2) 代数和法

水平地震力による荷重と鉛直地震力による荷重を計算時刻ステップごとに代数和する方法

なお，上記の方法において，地震力による荷重のかわりに応力を組み合わせてもよい。

また，水平地震動と鉛直地震動を動的解析モデルへ同時入力することによって，地震力による荷重を求める方法を用いてもよい。

7.3.3　地震応答解析

免震型発電用原子炉施設の機器・配管系の地震応答解析，設計用減衰定数は原則として，「JEAC 4601-2015」によるものとする。

渡り配管の解析に当たっては，免震建屋と耐震建屋の特性の異なる建屋応答を入力する必要がある。渡り配管の解析手法については，「JEAG4614-2019」に記載されるように渡り配管を模擬した振動試験による妥当性の確認が行われており，包絡応答スペクトル解析法や多入力解析手法等が適用可能である。

また，「JEAC4601-2015」での配管設計用減衰定数の適用条件である「配管系全体として，配管系支持具の位置及び方向が局所的に集中していないこと」を逸脱する可能性が考えられ，減衰定数は安全側に 0.5%又は試験等によって確認された値とする。

なお，機器・配管の解析に適用する免震建屋応答（設計用床応答スペクトル，時刻歴及び相対変位）の策定に当たっては，免震装置の製品のばらつき，温度依存性，供用期間中の経年劣化の不確かさを考慮した複数の復元力特性モデルによる地震応答解析で得られた値を考慮する。

また，「7.2　建物・構築物の設計」の検討において，上部構造物のねじれ挙動やロッキング挙動が免震建屋の応答に影響を与えることが確認される場合には，それらの挙動を考慮した免震建屋の地震応答解析結果等を用いて，機器・配管系に対する影響を確認する。

7.3.4　渡り部に関する確認事項

(1) 伸縮継手を採用する場合の確認項目

免震・非免震建屋間で発生する変位対策として，渡り配管に伸縮継手を採用する場合は，設計上定める条件で応力が繰返し加わる場合において疲労破壊が生じないよう疲労評価を行うこととし，地震時に伸縮継手に加わる繰返し回数が許容繰り返し回数以下となることを確認する。

また，基準地震動 Ss 作用時の伸縮継手の最大相対変位（設計変位）が，試験で確認された許容変位（設計可動量）内に収まることを確認する。

試験にて伸縮継手の許容変位(設計可動量)を算出する場合の試験例[(7.3.4-1)]を表 7.3.4-1，渡り配管の免震継手システムの例[(7.3.4-1)]を図 7.3.4-1 に示す。

なお，同種製品に対して検査が行われている場合は，その報告書（試験成績書）を参照することで試験に代えることができる。

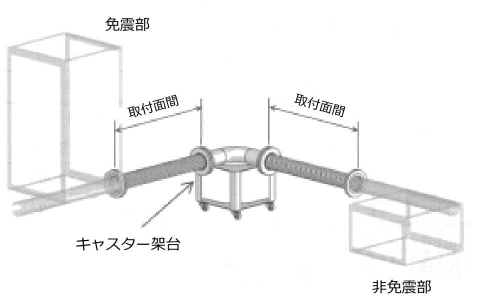
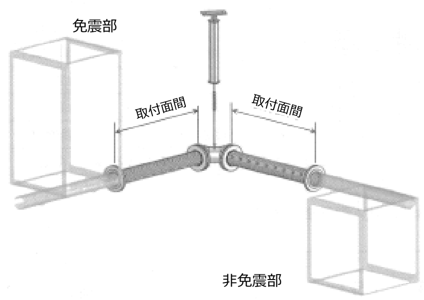
表 7.3.4-1　伸縮継手の許容変位試験内容例

試験項目	内容	判定
水平方向変位性能※1	水平変形：±設計可動量 試験圧力：設計圧力 試験速度：基準地震動 Ss による最大相対変位発生時の速度以上 サイクル数：基準地震動 Ss による最大相対変位相当のサイクル数	外観上，異常がないこと
耐圧性能※2	試験圧力：水圧　最高使用圧力の 1.5 倍 　　　　　気圧　最高使用圧力の 1.25 倍 保持時間：10 分	漏水等の異常がないこと

※1：本検査は相対変位に対する吸収性能を確認することを目的としていることから，試験内容については，適切な条件の組合せによって性能を確認してもよいものとする。また，鉛直方向試験が必要な構造については，その変位・荷重に対する考慮を行う。

※2：水平方向変位性能試験後に実施することによって，変位が生じた後の耐圧性能を確認する。試験条件は「設計・建設規格」に準拠する。

（本頁以下余白）

キャスタータイプ	ばね吊タイプ
	
・継手をL字二本組みとすることで水平二次元方向360°に円滑な変位追随または吸収が可能である ・キャスター架台で支持することで配管レベルが安定する ・複数配管の免震化が可能である	・継手をL字二本組みとすることで水平二次元方向360°に円滑な変位追随または吸収が可能である ・付属部分がコンパクトであり省スペース等が可能である ・複数配管の免震化が可能である

注）免震建物の設備標準（一般社団法人日本免震構造協会出版）からの抜粋

図 7.3.4-1　渡り配管の免震継手システムの例

(2) 渡り部に敷設されるケーブル類の確認項目

渡り部に敷設されるケーブル類は免震層の最大変位量に十分に追随できるよう水平及び鉛直の最大変位量以上の余長をもたせる。

余長を持たせたケーブル等の必要長さの算出例(7.3.4-1)を次に示す。

L≧1.2（ℓ＋δ）

L：ケーブル等の必要長さ

ℓ：ケーブル等を敷設する際の最短長さ

δ：最大水平変位

（本頁以下余白）

8. 参考文献

(5.1-1) 建築研究所：建築研究資料，長周期地震動に対する超高層建築物等の安全対策に関する検討，No.127 号，2010 年(平成 22 年)12 月

(5.1-2) 国土交通省：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（技術的助言），国住指第 1111 号，平成 28 年 6 月 24 日

(5.2-1) C. Chen, "Definition of Statistically Independent Time Histories," Journal of the Structural Division, Vol. 101, No. ST2, ASCE, Virginia, February 1975

(5.2-2) 日本免震構造協会：免震建築物のための設計用入力地震動作成ガイドライン＜改定版＞，2018 年 12 月

(5.2-3) 竹内義高ほか：原子力施設の免震技術の開発 （その 11），日本建築学会大会学術講演梗概集，2014 年，pp.1149-1150.

(5.2-4) K.Ishida et al.：Elastic-plastic Analysis of Base mat Concrete for Base Isolated FBR, Trans. of 11th SMiRT, Tokyo, Japan, 1991.

(5.2-5) 守屋圭司ほか：ＦＢＲ免震システム確証試験 基礎版の弾塑性解析による終局状態の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，1990 年，pp.781-782.

(5.2-6) 外村憲太郎ほか：ＦＢＲ免震システム確証試験 振動台による加振試験（その 7） シミュレーション解析条件，日本建築学会大会学術講演梗概集，1990 年，pp.775-776.

(5.2-7) 高柳武平ほか：ＦＢＲ免震システム確証試験 振動台による加振試験（その 8） シミュレーション解析結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，1990 年，pp.777-778.

(5.2-8) K.Ishida et al.：Shaking Table Test on Base Isolated FBR plant model Part1, Part2, Trans. of 11th SMiRT, Tokyo, Japan, 1991.

(5.2-9) 吉田伸一ほか：原子力施設の免震技術の開発 （その 10），日本建築学会大会学術講演梗概集，2014 年，pp.1147-1148.

(5.2-10) 藤田隆史ほか：建物免震用の積層ゴムに関する実験的研究（第 1 報，50 トン用積層ゴムの静的加力試験），日本機械学会論文集Ｃ編，53 巻，485 号，1987 年，pp.71-76.

(5.2-11) 電力中央研究所：高速増殖炉免震設計法に関する研究，総合報告：U34，平成 10 年 12 月

(5.2-12) 加藤雄一ほか：ＦＢＲ免震型プラントの構築に関する研究（その 19），（その 20），日本建築学会大会学術講演梗概集，1992 年，pp.1585-1588.

(5.2-13) ブリヂストン：鉛プラグ挿入型積層ゴム支承　技術資料，平成 20 年 7 月 25 日

(5.2-14) 日本建築学会：免震構造設計指針，2001 年，第Ⅱ編解説編，p.96

(5.2-15)　吉川和秀ほか：ＦＢＲ免震型プラントの構築に関する研究（その 21），日本建築学会大会学術講演梗概集，1993 年，pp.1581-1582.

(6.1.2-1)　建築研究所ほか：改正建築基準法の免震関係規定の技術的背景－免震建築物の構造関係規定と免震部材の品質－，2001 年

(6.1.2-2)　矢花修一ほか：積層ゴム免震要素の線形限界に関する検討（その１）（その２），日本建築学会大会学術講演梗概集，1996 年 9 月，pp.691-694.

(6.1.2-3)　日本免震構造協会：免震部材標準品リスト 2009，2009 年 11 月

(6.1.2-4)　大鳥靖樹：積層ゴム免震要素の引張許容応力設定に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，1997 年 9 月，pp.535-536.

(6.1.2-5)　エネルギー総合工学研究所：原子力発電施設への免震技術の適用検討，2018 年 12 月

(6.1.2-6)　池田正樹ほか：原子力施設の免震技術の開発（その 25）実規模免震装置の破断試験（破断局面に関する詳細評価），日本建築学会大会学術講演梗概集，2016 年 8 月，pp.1343-1344.

(6.1.2-7)　日本免震構造協会：時刻歴応答解析による免震建築物の設計基準・同マニュアル及び設計例，2018 年 5 月

(6.2.2-1)　菊地優ほか：免震構造物の安全性評価に関する一考察，日本建築学会構造系論文集，第 470 号，1995 年 4 月，pp.65-73.

(7.1-1)　Y. Sonoda et al.：Feasibility study on the seismic isolation of pool type LMFBR，Trans. of 9th SMiRT，Lausanne，Switzerland，1987.

(7.1.1-1)　日本ゴム協会ほか：改訂版　設計者のための建築免震用積層ゴム支承ハンドブック，2017 年 6 月，p.138，p.164，p.168，p.169，p.170，p.171，p.188，p.215，p.257

(7.1.1-2)　日本建築学会：免震構造設計指針，2013 年，p.27-40，p.275-276，p.302

(7.1.1-3)　建築研究所ほか：改正建築基準法の免震関係規定の技術的背景－免震建築物の構造関係規定と免震部材の品質－，2001 年，p.16，p.37，p.132，p.138-139，p.145，p.148，p.149，p.151-154，p.163，p.168-169，p.177-185，p.187-192，p.194

(7.1.1-4)　北村春幸，大宮幸：建築技術，2017 年 12 号，長周期地震動対応を行う際の注意点，pp.116-125.

(7.1.1-5)　日本免震構造協会：免震部材標準品リスト 2009，2009 年 11 月，p.749

(7.1.1-6)　日本免震構造協会：時刻歴応答解析による免震建築物の設計基準・同マニュアル及び設計例，2018 年 5 月，p.32，p.37，p.78-79

(7.1.1-7)　M. Kikuchi and I. D. Aiken：An analytical hysteresis model for elastomeric seismic isolation bearings，Earthquake Engineering and Structural Dynamics，Vol. 26，1997，pp.215-231.

(7.1.1-8)　電力中央研究所：高速増殖炉免震設計法に関する研究，総合報告：U34，平成 10 年 12 月

(7.1.2-1)　吉敷祥一ほか：免震構造用 U 字形鋼材ダンパーの繰り返し変形性能に関する研究-，日本建築学会構造系論文集 73(624)，2008 年 2 月，pp.333-340.

(7.1.2-2)　日本建築学会：免震構造設計指針，2013 年，pp.323.

(7.1.2-3)　日本免震構造協会：時刻歴応答解析による免震建築物の設計基準・同マニュアル及び設計例，2018 年 5 月，pp.54,pp.56.

(7.1.2-4)　日本免震構造協会：免震部材標準品リスト 2009，2009 年 11 月

(7.1.2-5)　渡辺厚ほか：免震U型ダンパーに関する実験的研究　その 4　2 方向載荷試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，2000 年 9 月，pp.661-662.

(7.1.2-6)　吉敷祥一ほか：水平２方向載荷下における繰り返し変形性能に関する実験-免震構造用U　字形鋼材ダンパーの水平２方向特性　その１-，日本建築学会構造系論文集 77(680)，2012 年 10 月，pp.1579-1588.

(7.1.2-7)　日本建築センター評定書「長周期地震動に対する免震材料の性能変化（新日鉄住金エンジニアリング式 U 型ダンパー）」BJC 評定 1B0019-01

(7.1.2-8)　建築研究所ほか：改正建築基準法の免震関係規定の技術的背景ー免震建築物の構造関係規定と免震部材の品質ー，2001 年，p.229

(7.1.3-1)　日本免震構造協会：免震部材の接合部・取付け躯体の設計指針（第 3 版），2020 年 1 月

(7.3.4-1)　日本免震構造協会：免震建物の設備標準，2020 年 6 月，p.Ⅳ-4，p.Ⅳ-17，p.Ⅴ-1

（本頁以下余白）

9. 添付書類

「重大事故等対処施設免震構造設計ガイドライン」に基づき，硬岩サイト及び軟岩サイトにおいて，免震型 SA 施設を設計する場合の試設計例を添付書類 1 及び添付書類 2 に示す。

添付書類 1　免震型 SA 施設の試設計例（硬岩サイト）

添付書類 2　免震型 SA 施設の試設計例（軟岩サイト）

免震型 SA 施設の試設計例（硬岩サイト）

1. はじめに

ここでは，重大事故等対処施設免震構造設計ガイドラインに基づき，せん断波速度が約 1,500m/s の硬質岩盤に設置された免震構造を採用した SA 施設（以下,「免震型 SA 施設（硬岩サイト)」という）を設計する場合の試設計例を示す。

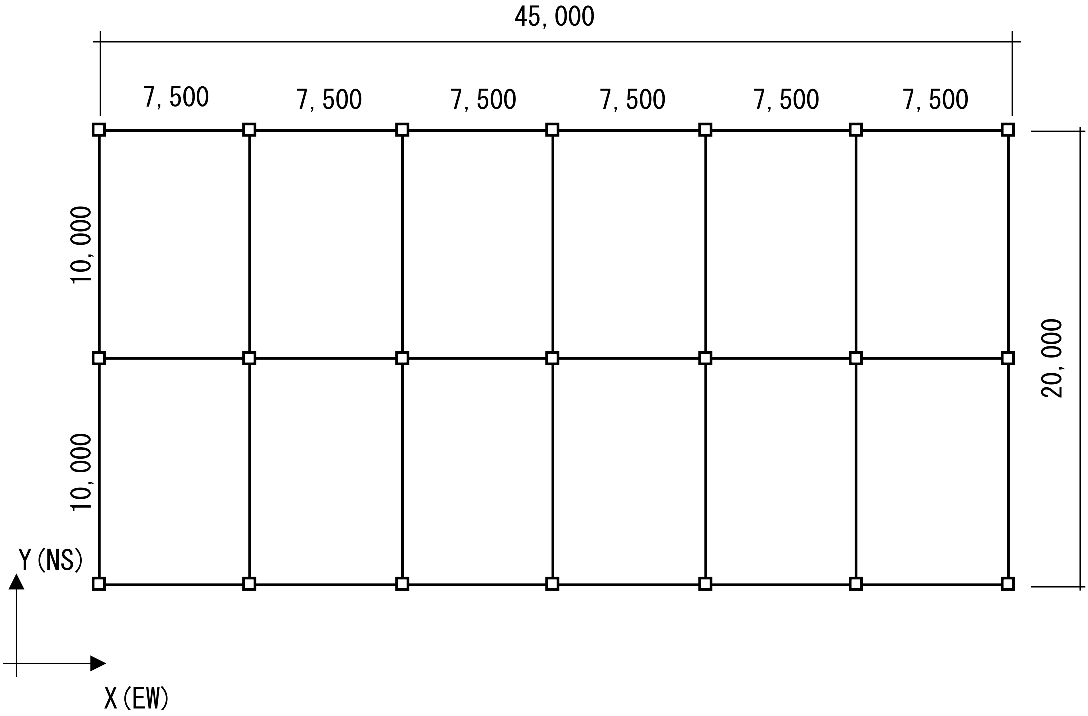
あわせて，水平 2 方向入力の影響検討，積載荷重の重量偏心によるねじれ振動の影響検討及び免震層の物性値のばらつきに伴う偏心によるねじれ振動の影響検討を行った。

2. 建屋概要

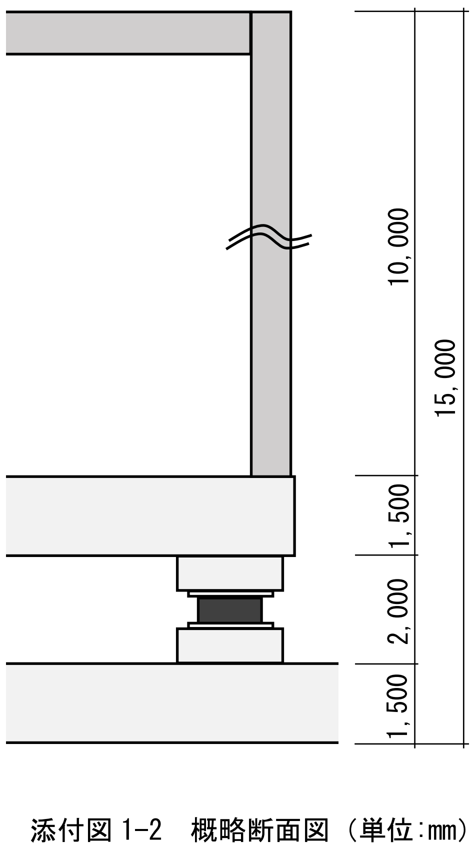
免震型 SA 施設（硬岩サイト）は，鉄骨造地上 1 階建，基礎底面からの高さは 15m，地上高さは 10m，平面形状は 45m×20mの矩形である。上部構造の架構形式は両方向ともブレース付ラーメン構造とし，上部構造及び上部基礎版（鉄筋コンクリート造）を含めた免震部重量は約 54,000kN である。免震装置として，鉛入り積層ゴム（8 基），弾性すべり支承（4 基）及びオイルダンパー（各方向 4 基，計 8 基）を配置した免震構造とする。

免震型 SA 施設（硬岩サイト）の概略平面図及び概略断面図をそれぞれ添付図 1-1 及び添付図 1-2 に示す。

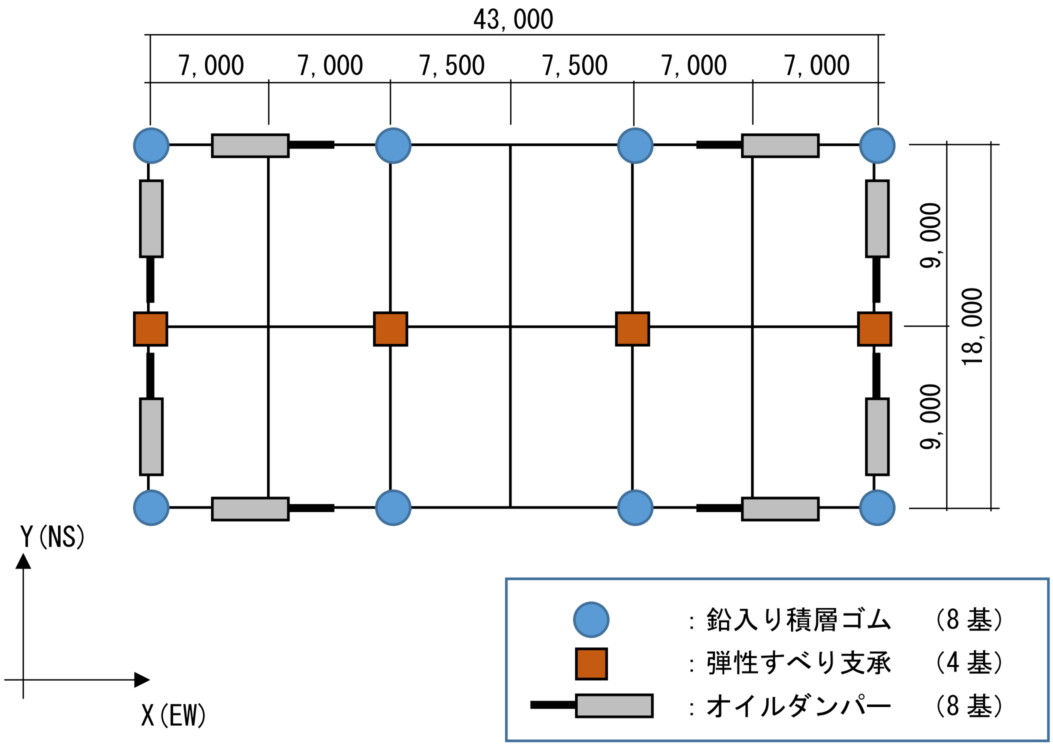
免震装置の配置図を添付図 1-3 に示す。また，免震装置は，国土交通大臣認定を取得しており，広く一般建物にも採用されているものを選定することとし，鉛入り積層ゴムの概要を添付図 1-4 に，弾性すべり支承の概要を添付図 1-5 に，オイルダンパーの概要を添付図 1-6 に示す。



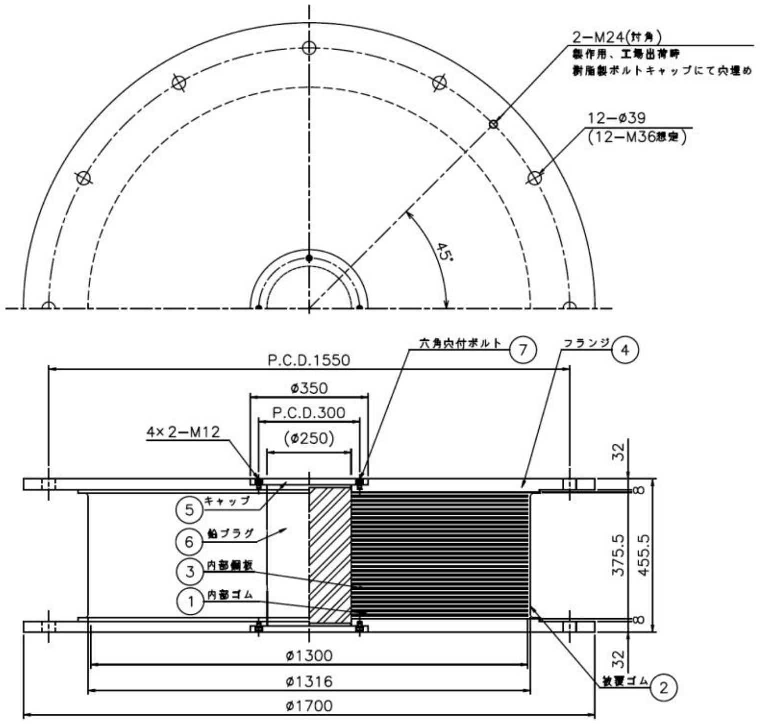
添付図 1-1　概略平面図（単位:mm）



添付図 1-2　概略断面図（単位:mm）

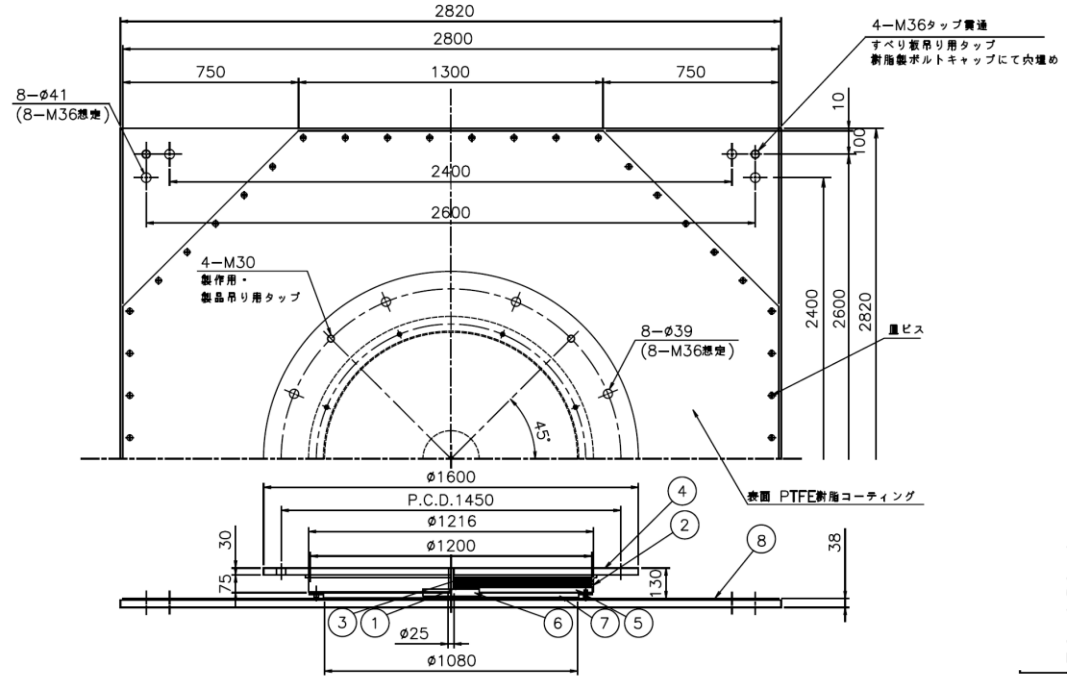


添付図 1-3　免震装置の配置図（単位:mm）



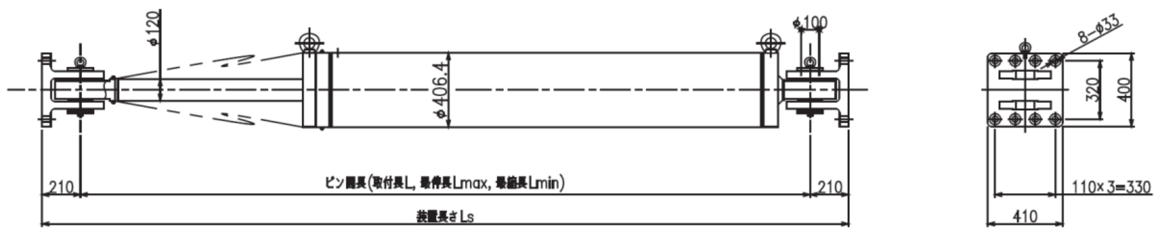
国土交通大臣認定番号	MVBR-0517
ゴムのせん断弾性係数(N/mm^2)	0.392
積層ゴム径(mm)	1,300
鉛プラグ径(mm)	250
ゴム総厚(mm)	252 (8.7mm×29 層)
使用数	8

添付図 1-4　鉛入り積層ゴムの概要



国土交通大臣認定番号	MVBR-0548
ゴムのせん断弾性係数(N/mm^2)	0.392
積層ゴム径(mm)	800
ゴム総厚(mm)	39.0
摩擦係数	0.010
すべり板外寸(mm)	2,800
使用数	4

添付図 1-5　弾性すべり支承の概要



国土交通大臣認定番号	MVBR-0511
種類（減衰力特性）	バイリニア型
最大減衰力(kN)	1,000
ストローク(mm)	±1,000
限界速度(cm/s)	150
1 次減衰係数 C1(kN s/cm)	25
2 次減衰係数 C2(kN s/cm)	1.695
リリーフ荷重 FR(kN)	800
リリーフ速度 VR(cm/sec)	32
使用数	各方向 4（合計 8）

添付図 1-6　オイルダンパーの概要

3. 地盤概要

地盤条件は，せん断波速度 1,650m/s の一様な硬質岩盤とする。添付表 1-1 に使用した地盤条件を示す。

添付表 1-1　地盤条件

単位体積重量 ρ（kN/m^3）	ポアソン比 ν	S 波速度 Vs（m/s）	せん断弾性係数 G（kN/mm^2）
25.5	0.40	1,650	7.08

4. 入力地震動

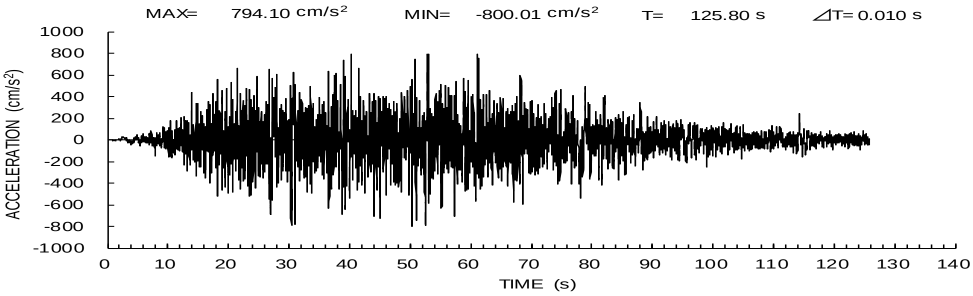
入力地震動については，応答スペクトルに基づく地震動評価により設定した地震動（以下，スペクトル波と呼ぶ）及び断層モデルを用いた手法による地震動評価により設定した地震動（以下，断層波と呼ぶ）を用いる。

水平方向のスペクトル波は，最大加速度が 800cm/s^2，長周期領域の擬似速度応答スペクトル（減衰 5%）が 200cm/s となるランダムな位相特性を持つ模擬地震波である。また，鉛直方向のスペクトル波は，最大加速度が 537cm/s^2，長周期領域の擬似速度応答スペクトル（減衰 5%）が 134cm/s となるランダムな位相特性を持つ模擬地震波である。水平方向及び鉛直方向の入力地震動の時刻歴波形と応答スペクトルを添付図 1-7 に示す。

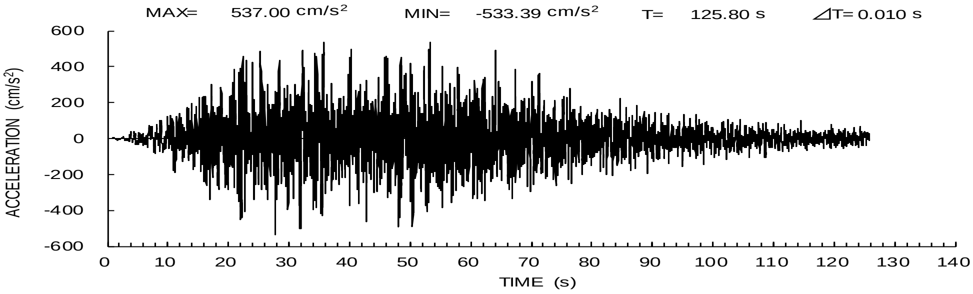
一方，断層波については，添付図 1-8 に示す入力地震動（三の丸波）[1)]を用いる。

入力地震動は下部基礎版下端への直接入力とし，スペクトル波については，水平 1 方向と鉛直方向の同時入力を代表ケースとして評価を実施し，断層波については，水平 2 方向と鉛直方向の 3 方向同時入力に対する評価を実施する。

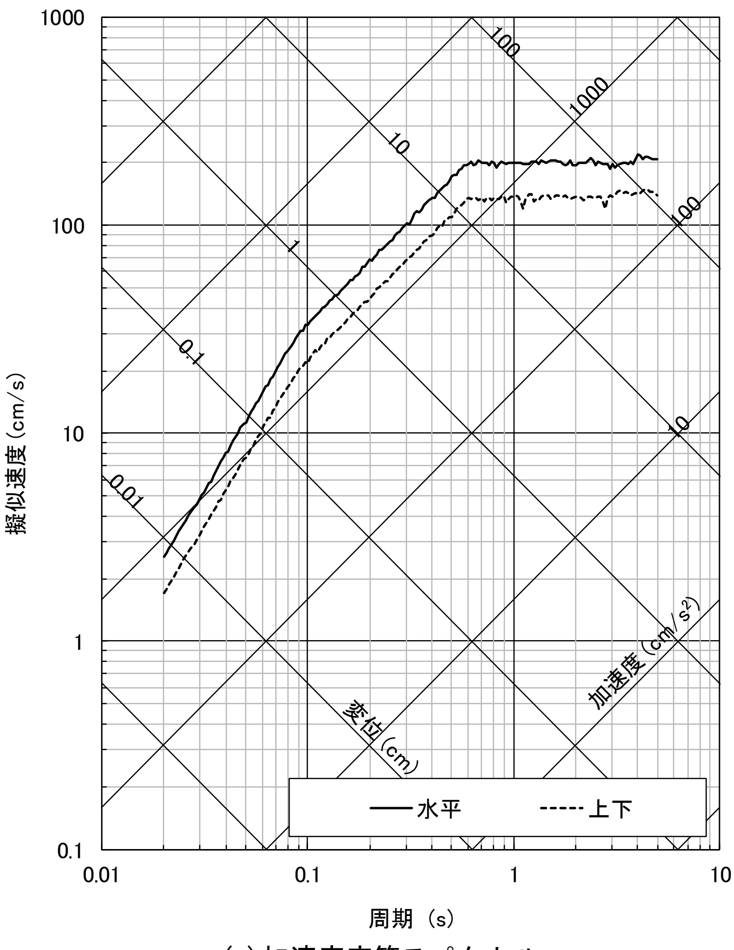
[1)] 愛知県設計用入力地震動研究協議会：愛知県設計用入力地震動の作成，想定地震による強震動予測，概要版（改訂版），2006.2



(a)加速度時刻歴波形（水平）

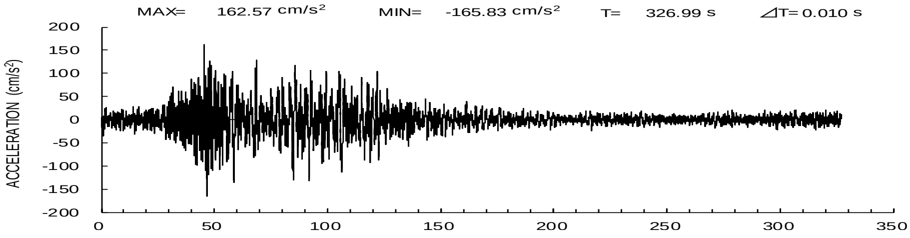


(b)加速度時刻歴波形（鉛直）

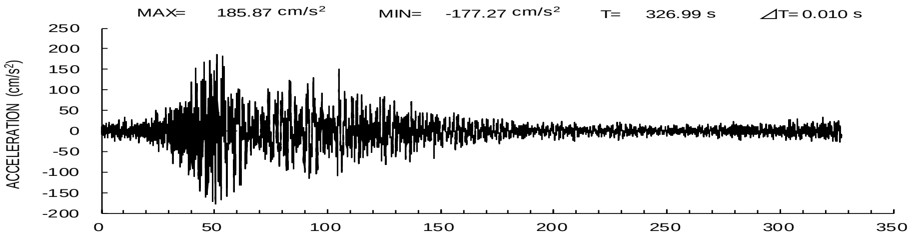


(c)加速度応答スペクトル

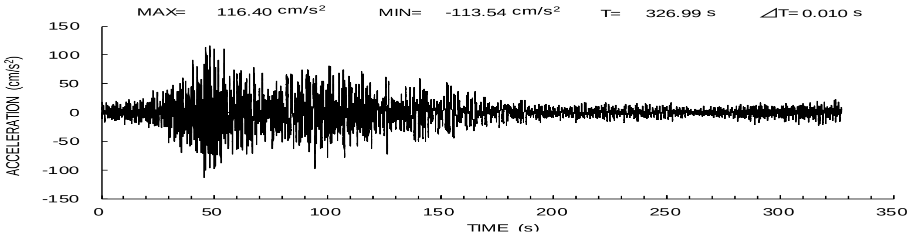
添付図 1-7　入力地震動（スペクトル波）



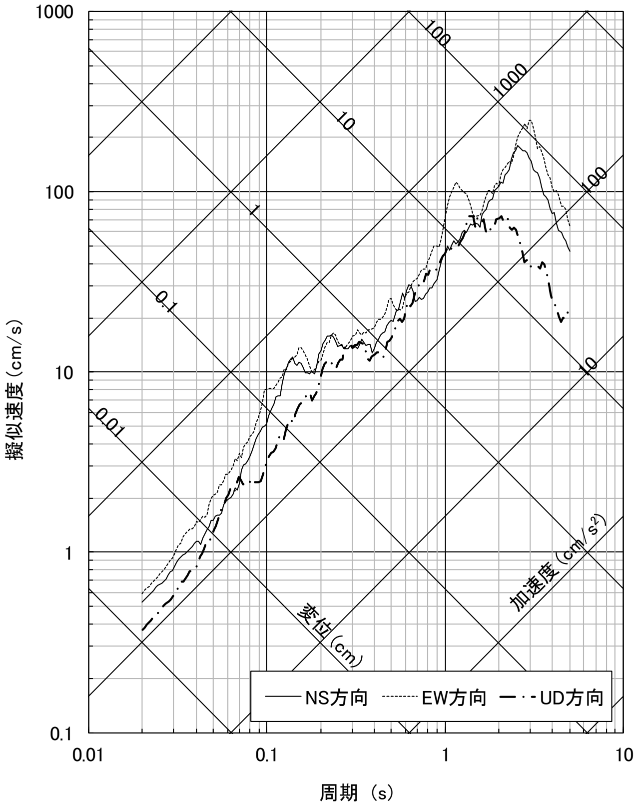
(a) NS 波



(b) EW 波



(c) UD 波



(d)擬似速度応答スペクトル(h=5%)

添付図 1-8　入力地震動（断層波）

5. 設計方針

(1) 上部構造

上部構造の許容限界を添付表 1-2 に示す。上部構造は，基準地震動 Ss の入力に対して短期許容応力度以下，かつ，層間変形角が 1/200 以内となることを確認する。本試設計例においては，上部構造の鉄骨部材が短期許容応力度に達すると考えられる層せん断力（X 方向：9,600kN，Y 方向：8,700kN）を許容限界とする。

添付表 1-2　上部構造の許容限界

項目	許容限界
せん断力	短期許容応力度以下 X 方向：9,600kN Y 方向：8,700kN
層間変形角	1/200 以内

(2) 免震装置

免震装置の許容限界を添付表 1-3 に示す。各免震装置は，基準地震動 Ss の入力に対して許容限界以内となることを確認する。

添付表 1-3　免震装置の許容限界

免震装置	評価項目	許容限界	備考
鉛入り積層ゴム	せん断ひずみ（%） [水平変形]（mm）	250（線形限界） [630]	国土交通大臣認定資料より設定
	圧縮応力度（N/mm²）	30	
	引張応力度（N/mm²）	1.0	
弾性すべり支承	水平変形（mm）	1,000	国土交通大臣認定資料より設定
	圧縮応力度（N/mm²）	40	
オイルダンパー	水平変形（mm）	1,000	国土交通大臣認定資料より設定
	最大速度（cm/s）	150	

(3) 水平クリアランス

水平クリアランスは，基準地震動 Ss の入力に対する最大応答変位の 1.5 倍を確保する。本試設計例では，鉛入り積層ゴムの許容水平変形 630mm に対して 1.5 倍以上となる 1,000mm を水平クリアランスとして確保することとした。

6. 地震応答解析

(1) 地震応答解析モデル

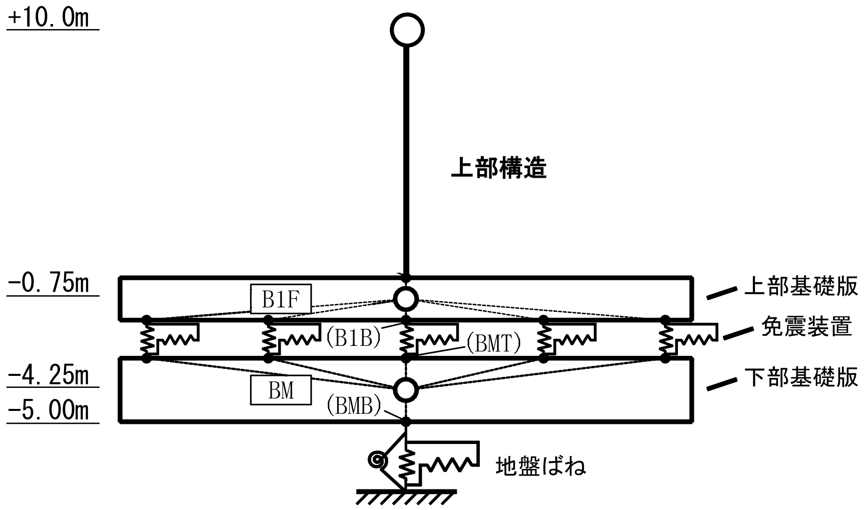
地震応答解析に用いる解析モデルを添付図 1-9 に,建屋モデル諸元を添付表 1-4 に示す。

上部構造の水平剛性は,曲げによる変形とせん断による変形をせん断変形に置き換えた等価せん断梁でモデル化する。鉛直剛性は,各柱の軸剛性の合計を軸ばねとして設定する。上部構造の減衰は水平及び鉛直方向ともひずみエネルギー比例型とし,減衰定数は 2%とする。

鉛入り積層ゴム及び弾性すべり支承の水平特性は,8 本の弾塑性せん断ばねを有する Multiple Shear Spring Model（MSS モデル）とし,減衰は履歴減衰のみ（内部減衰はゼロ）とする。一方,鉛直特性については,非線形弾性モデルでモデル化し,減衰は減衰定数 2%のひずみエネルギー比例型とする。

オイルダンパーの解析モデルには Voigt モデルを用いる。また,オイルダンパーの減衰力ー速度特性はバイリニアとしてモデル化を行う。

また,下部基礎版下の地盤ばねは,建屋基礎底面下の一様地盤を半無限に続く弾性体と仮定し,「原子力発電所耐震設計技術指針 追補版 JEAG 4601-1991」に基づく振動アドミッタンス理論による近似解法により動的地盤ばねとして評価する。



添付図 1-9　解析モデル

添付表 1-4　建屋モデル諸元

<table>
<tr><th rowspan="2"></th><th rowspan="2">高さ
[m]</th><th rowspan="2">重量
[kN]</th><th colspan="3">回転慣性重量
[×10^{6}kNm^{2}]</th><th colspan="3">弾性剛性
[kN/m]</th></tr>
<tr><th>X(EW)※1</th><th>Y(NS)※2</th><th>Z(UD)</th><th>X(EW)</th><th>Y(NS)</th><th>Z(UD)</th></tr>
<tr><td>屋上階</td><td>+10.0</td><td>12,800</td><td colspan="2">－　※3</td><td></td><td rowspan="2">3.812×10^{5}</td><td rowspan="2">3.830×10^{5}</td><td rowspan="2">1.514×10^{7}</td></tr>
<tr><td>上部
基礎版</td><td>-0.75</td><td>41,500</td><td>7.329</td><td>1.536</td><td>8.843</td></tr>
<tr><td>下部
基礎版</td><td>-4.25</td><td>34,800</td><td>6.143</td><td>1.285</td><td></td><td colspan="3" rowspan="2">※1：Y 軸回りの値を示す
※2：X 軸回りの値を示す
※3：上部建屋は等価せん断梁モデルである</td></tr>
<tr><td>下部
基礎版
底面</td><td>-5.00</td><td colspan="4"></td></tr>
</table>

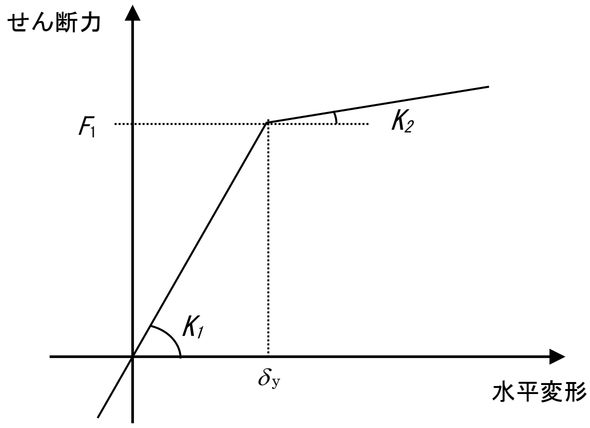
(2) 免震層のモデル化

免震層のモデル化においては，免震装置の集約は行わず，添付図 1-3 に示す各免震装置の配置に従い分散してモデル化を行う。以下に，各免震装置の解析モデル及び諸元を示す。

1) 鉛入り積層ゴム

(a) 水平特性

鉛入り積層ゴムの水平特性については，添付図 1-10 に示すバイリニアでモデル化する。鉛入り積層ゴム 1 基あたりの諸元を添付表 1-5 に示す。



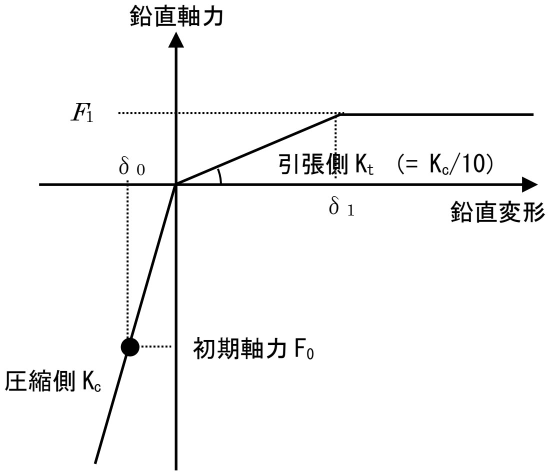
添付図 1-10 鉛入り積層ゴムの水平特性（バイリニア）

添付表 1-5 鉛入り積層ゴム 1 基あたりの諸元

初期剛性 K_1 (kN/m)	降伏変位 δ_y (m)	降伏後剛性 K_2 (kN/m)	（参考）降伏荷重(kN)
2.680×10^{4}	1.580×10^{-2}	2.060×10^{3}	424

(b) 鉛直特性

鉛入り積層ゴムの鉛直特性については，添付図 1-11 に示す非線形弾性モデルでモデル化する。鉛入り積層ゴム 1 基あたりの諸元を添付表 1-6 に示す。



添付図 1-11　積層ゴムの鉛直特性（非対称の非線形弾性モデル）

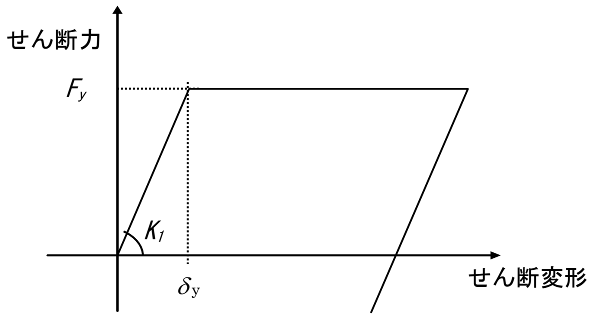
添付表 1-6　鉛入り積層ゴム 1 基あたりの諸元

圧縮剛性 Kc (kN/m)	引張剛性 Kt (kN/m)	δ_0 (m)	δ_1 (m)	（参考）初期面圧 (N/mm²)
6.210×10^{6}	Kc/10	-6.137×10^{-4}	2.881×10^{-3}	2.98

2) 弾性すべり支承

(a) 水平特性

弾性すべり支承の水平特性については，添付図 1-12 に示す完全弾塑性モデルでモデル化する。弾性すべり支承 1 基あたりの諸元を添付表 1-7 に示す。



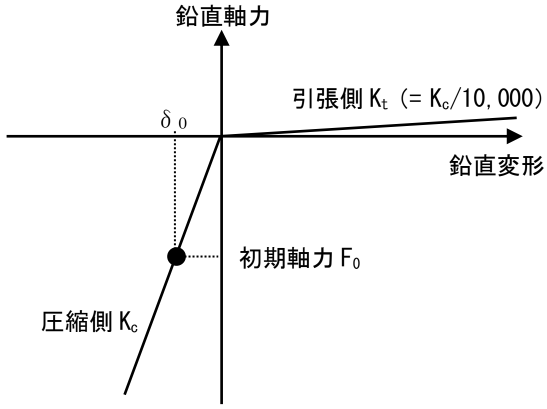
添付図 1-12　弾性すべり支承の水平特性（完全弾塑性モデル）

添付表 1-7　弾性滑り支承の水平特性

剛性 *K1* (kN/m)	降伏変位 δ_y (m)	剛性低減率
6.310×10^{3}	9.434×10^{-3}	0.001

(b) 鉛直特性

弾性すべり支承の鉛直特性については，添付図 1-13 に示す非線形弾性モデルでモデル化する。弾性すべり支承は引張剛性を持たないが，解析の安定性確保のために，非常に小さな値（圧縮剛性の 1/10,000）を設定する。弾性すべり支承 1 基あたりの諸元を添付表 1-8 に示す。



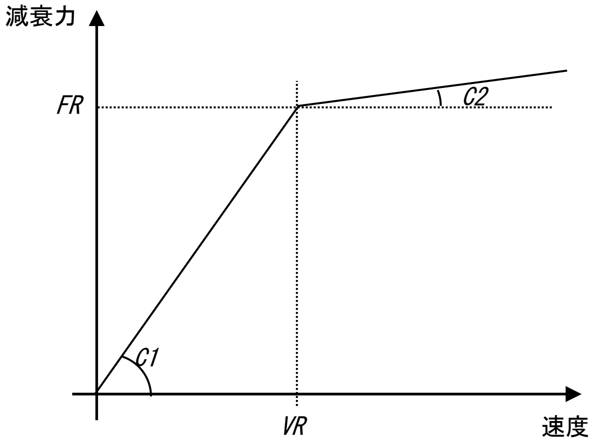
添付図 1-13　弾性すべり支承の鉛直特性（非対称の非線形弾性モデル）

添付表 1-8　弾性すべり支承の鉛直特性

圧縮剛性 Kc (kN/m)	引張剛性 Kt (kN/m)	δ_0 (m)	（参考） 初期面圧 (N/mm^2)
9.700×10^6	Kc/10,000	-6.137×10^{-4}	14.6

3) オイルダンパー

オイルダンパーの特性は，添付図 1-14 に示す通り，バイリニアの減衰力特性を持つオイルダンパーとしてモデル化した。オイルダンパー1 基あたりの諸元を添付表 1-9 に示す。



添付図 1-14　オイルダンパーの減衰力特性

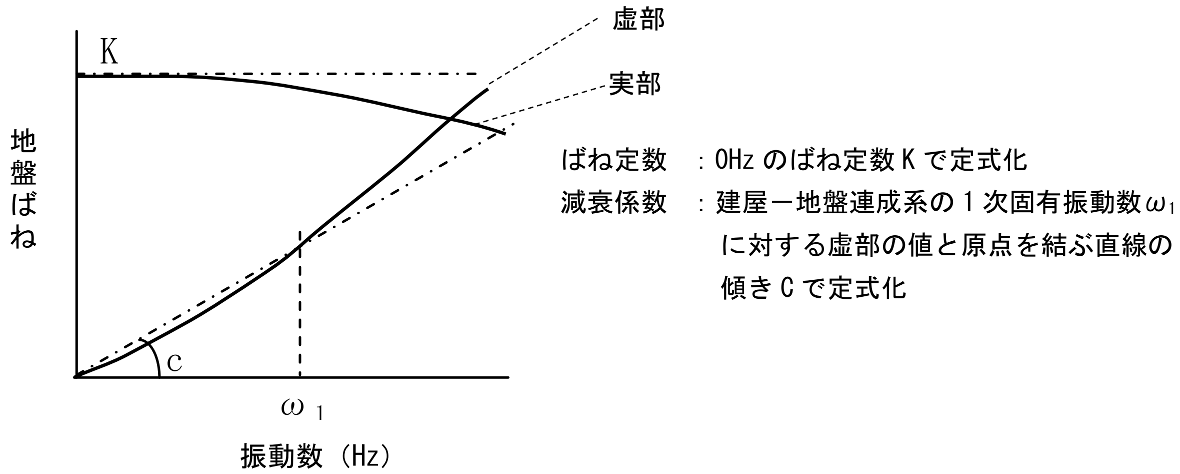
添付表 1-9　オイルダンパー1 基あたりの諸元

1 次減衰係数 C1 (kN･s/cm)	2 次減衰係数 C2 (kN･s/cm)	リリーフ荷重 FR (kN)	リリーフ速度 VR (cm/s)
25	1.695	800	32

(3) 地盤モデル

基礎底面地盤ばねは，建屋基礎底面下の一様地盤を半無限に続く弾性体と仮定し，JEAC4601 に基づく振動アドミッタンス理論による近似解法により動的地盤ばねとして評価する。基礎底面の代表変位は，水平・鉛直方向を一様分布・平均変位，回転方向を三角形分布・エネルギー平均回転角として評価する。時間領域の応答解析に適用するため，地盤ばね剛性を振動数ωに対して一定，減衰項をωの一次式で近似した JEAC4601 に示される地盤ばねを用いる。なお，水平方向の 1 次固有振動数ωについては，スペクトル波に対する最大応答変位がせん断ひずみγ=150%程度になることを想定し，せん断ひずみγ=150%に対する免震装置の等価剛性 を用いた固有値解析結果に基づき設定した。

地盤ばねの諸元を添付表 1-10 に示す。



添付図 1-15　地盤ばねの設定概念図

添付表 1-10　地盤ばね諸元

方向		ばね定数 [kN/m] [kN・m/rad]	減衰係数※1 [kN・s/m] [kN・m・s/rad]	1 次固有振動数※1 (Hz) (γ=150%時)
X	並進	5.80×10^{8}	3.26×10^{6}	0.342
	回転※2	2.90×10^{11}	5.42×10^{5}	
Y	並進	6.31×10^{8}	3.86×10^{6}	0.342
	回転※3	9.34×10^{10}	1.54×10^{4}	
Z		8.06×10^{8}	6.78×10^{6}	14.7

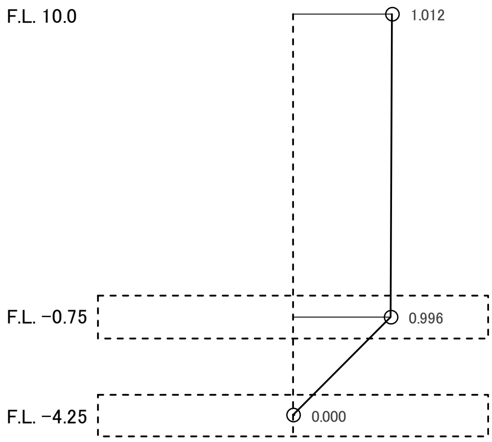
※1：ケース 1（標準）の値を示す
※2：Y 軸回りの値を示す
※3：X 軸回りの値を示す

(4) 固有値解析

水平方向については，下部基礎版を固定し，免震層の水平ばねはせん断ひずみγ＝150%の等価剛性を用いて固有値解析を実施する。また，鉛直方向については，建屋－地盤連成モデルを用いて固有値解析を実施する。

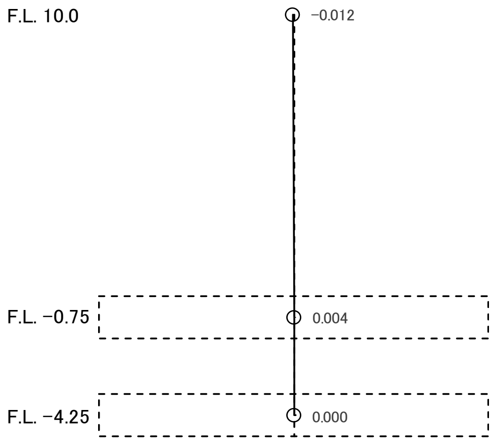
固有値解析結果を添付図 1-16～添付図 1-18 に示す。

固有周期 T_1= 2.93
振動数 f_1= 0.342
刺激係数 β_1= 1.012



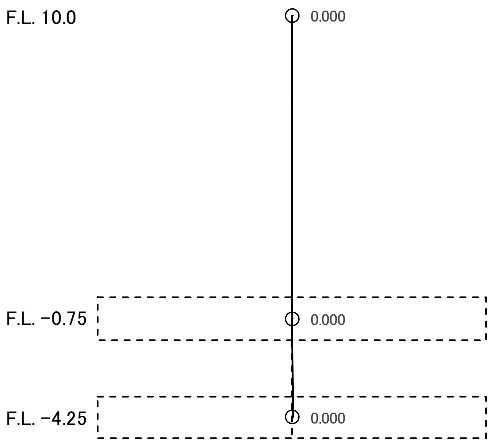
(a) 1 次

固有周期 T_2= 0.321
振動数 f_2= 3.11
刺激係数 β_2= 0.012



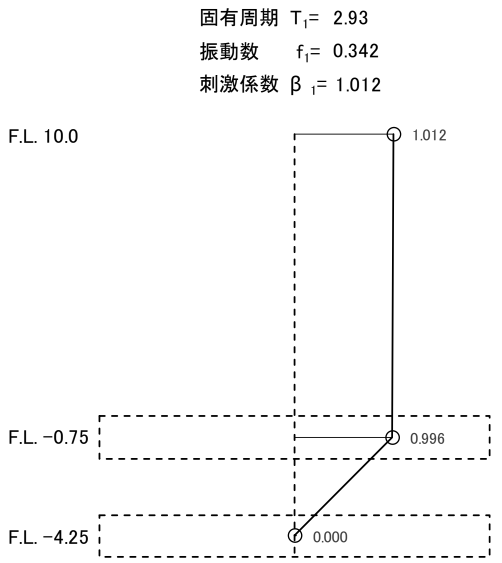
(b) 2 次

固有周期 T_3= 0.0424
振動数 f_3= 23.6
刺激係数 β_3= 0.000

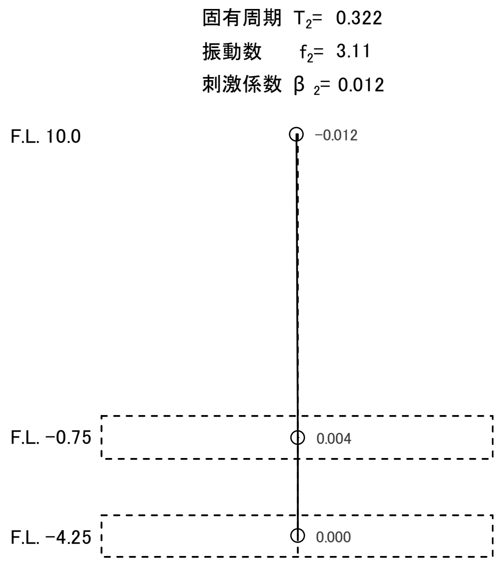


(c) 3 次

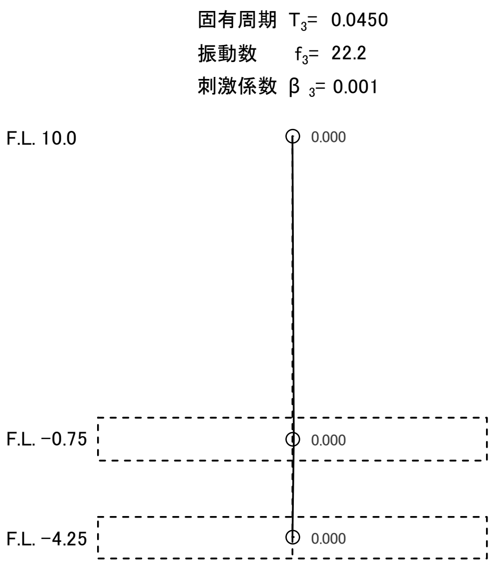
添付図 1-16 固有周期及び固有モード（X 方向）



(a) 1次



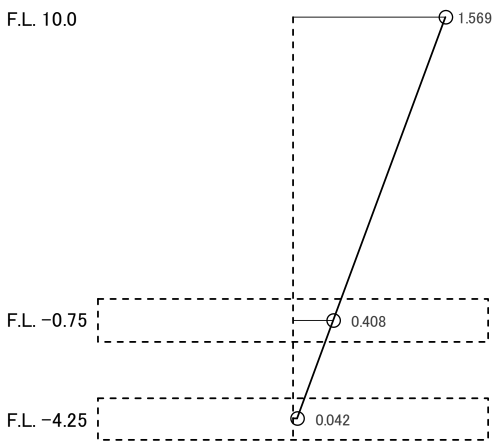
(b) 2次



(c) 3次

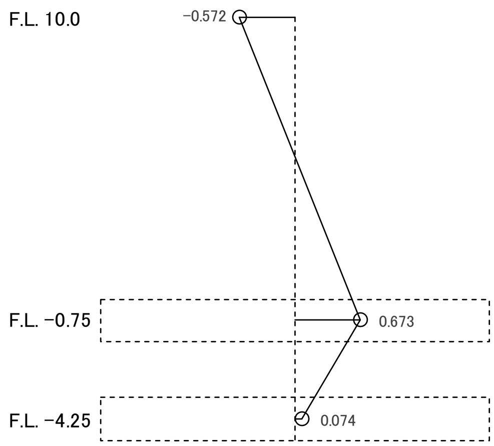
添付図 1-17　固有周期及び固有モード（Y方向）

固有周期 T_1= 0.0678
振動数 f_1= 14.7
刺激係数 β_1= 1.569



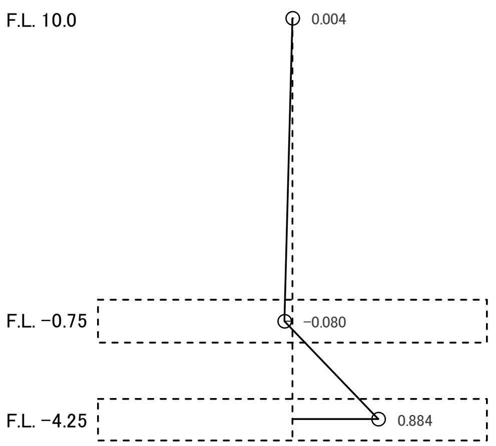
(a) 1 次

固有周期 T_2= 0.0396
振動数 f_2= 25.3
刺激係数 β_2= 0.673



(b) 2 次

固有周期 T_3= 0.0125
振動数 f_3= 80.3
刺激係数 β_3= 0.884



(c) 3 次

添付図 1-18 固有周期及び固有モード（Z 方向）

(5) 免震装置の特性値の不確かさ

地震応答解析においては，免震装置の特性の不確かさ（製造ばらつき，免震層の環境温度変化，経年変化）を考慮するとともに，添付表 1-11 に示す通り，全ての免震装置の剛性及び耐力が標準，最大（＋／＋ケース），最小（－／－ケース）となる 3 種類の組合せに加えて，アイソレータ（鉛入り積層ゴム及び弾性すべり支承）とオイルダンパーで異なる 2 種類の組合せ（＋／－及び＋／－ケース）を考慮する。

免震装置のパラメータの組合せを添付表 1-12～添付表 1-14 に示す。なお，環境温度変化の範囲については，日本のサイト条件を概ね包絡するよう気温統計等を踏まえて，-10℃～40℃と設定した。

添付表 1-11　パラメータの組合せ

解析パラメータ		標準ケース	免震装置特性変動考慮※			
			＋／＋	＋／－	－／－	－／＋
鉛入り積層ゴム	降伏後剛性 Kd	標準	最大	最大	最小	最小
	降伏荷重特性値 Qd	標準	最大	最大	最小	最小
弾性すべり支承	一次剛性 K1	標準	最大	最大	最小	最小
	摩擦係数 μ	標準	最大	最大	最小	最小
オイルダンパー	減衰係数 C1，C2	標準	最大	最小	最小	最大

※：＋／＋：アイソレータ最大／ダンパー最大の組合せ
　　＋／－：アイソレータ最大／ダンパー最小の組合せ
　　－／－：アイソレータ最小／ダンパー最小の組合せ
　　－／＋：アイソレータ最小／ダンパー最大の組合せ

添付表 1-12　鉛入り積層ゴムの特性値の不確かさの設定

	二次剛性 K2	切片荷重 Qd	根拠資料
製造ばらつき	−10%～+10%	−10%～+10%	国土交通大臣認定資料
温度変化	−5%～+10%	−21%～+36%	国土交通大臣認定資料
経年変化	0%～+10%	―	国土交通大臣認定資料
計	−15%～+30%	−31%～+46%	―

添付表 1-13　弾性すべり支承の特性値の不確かさの設定

	一次剛性 K1	摩擦係数 μ	根拠資料
製造ばらつき	−30%～+30%	−40%～+40%	国土交通大臣認定資料
温度変化	−5%～+8%	―	国土交通大臣認定資料
経年変化	0%～+10%	―	国土交通大臣認定資料
計	−35%～+48%	−40%～+40%	―

添付表 1-14　オイルダンパーの特性値の不確かさの設定

	1 次減衰係数 C1	2 次減衰係数 C2	根拠資料
製造ばらつき	−15%～+15%	−15%～+15%	国土交通大臣認定資料
温度変化	−10%～+10%	−10%～+10%	国土交通大臣認定資料
経年変化	―	―	国土交通大臣認定資料
計	−25%～+25%	−25%～+25%	―

(6) 地震応答解析結果

実施した解析ケースを添付表 1-15 に示す。スペクトル波については，水平 1 方向と鉛直方向の同時入力に対する地震応答解析結果を代表ケースとして，断層波については，水平 2 方向と鉛直方向の 3 方向同時入力に対する地震応答解析結果を以下に示す。

スペクトル波及び断層波に対する上部構造及び免震層の最大応答値を添付表 1-16～添付表 1-21 に示す。上部構造及び免震層の許容限界を満足している。

また，スペクトル波及び断層波に対する最大応答加速度，最大水平変位及び最大応答せん断力の結果を添付図 1-19～添付図 1-32 に示す。水平動については，入力地震動の最大応答加速度に比べ，建屋上部（上部基礎版及び屋根）の応答加速度は大きく低減されている。

添付表 1-15　解析ケース

<table>
<tr><th rowspan="2"></th><th rowspan="2">入力地震動</th><th colspan="3">入力</th><th rowspan="2">免震装置の特性値</th></tr>
<tr><th>X(EW)</th><th>Y(NS)</th><th>Z(UD)</th></tr>
<tr><td rowspan="6">標準ケース</td><td rowspan="5">スペクトル波</td><td>○</td><td>－</td><td>－</td><td rowspan="6">標準</td></tr>
<tr><td>－</td><td>○</td><td>－</td></tr>
<tr><td>－</td><td>－</td><td>○</td></tr>
<tr><td>○</td><td>－</td><td>○</td></tr>
<tr><td>－</td><td>○</td><td>○</td></tr>
<tr><td>断層波</td><td>○</td><td>○</td><td>○</td></tr>
<tr><td rowspan="3">免震装置の特性値の不確かさの影響確認</td><td rowspan="2">スペクトル波</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td><td rowspan="3">※＋／＋
＋／－
－／－
－／＋</td></tr>
<tr><td>－</td><td>○</td><td>○</td></tr>
<tr><td>断層波</td><td>○</td><td>○</td><td>○</td></tr>
</table>

※：＋／＋：アイソレータ最大／ダンパー最大の組合せケース
＋／－：アイソレータ最大／ダンパー最小の組合せケース
－／－：アイソレータ最小／ダンパー最小の組合せケース
－／＋：アイソレータ最小／ダンパー最大の組合せケース

添付表 1-16　上部構造の最大応答値（X 方向，スペクトル波入力）

項目	単位	標準ケース	免震装置の特性値の組合せ※				許容限界
			＋／＋	＋／－	－／－	－／＋	
層せん断力	kN	5,640	6,450	5,610	4,950	5,800	＜ 9,600
層間変形角	rad	1/676	1/591	1/680	1/770	1/657	＜ 1/200

※：＋／＋：アイソレータ最大／ダンパー最大の組合せケース
　　＋／－：アイソレータ最大／ダンパー最小の組合せケース
　　－／－：アイソレータ最小／ダンパー最小の組合せケース
　　－／＋：アイソレータ最小／ダンパー最大の組合せケース

添付表 1-17　免震層の最大応答値（X 方向，スペクトル波入力）

評価項目		標準ケース	免震装置の特性値の組合せ※1				許容限界
			＋／＋	＋／－	－／－	－／＋	
鉛入り積層ゴム	面圧※2（引張）(N/mm^2)	0.213	0.201	0.221	0.227	0.193	＞ -1.0
鉛入り積層ゴム	面圧※2（圧縮）(N/mm^2)	5.98	5.99	5.94	5.99	6.01	＜ 30
弾性すべり支承	面圧※2（圧縮）(N/mm^2)	29.3	29.3	29.1	29.4	29.4	＜ 40
オイルダンパー	最大速度（cm/s）	97.6	106	105	116	96.1	＜ 150
免震層全体	最大変位（mm）	287	248	288	378	273	＜ 630

※1：＋／＋：アイソレータ最大／ダンパー最大の組合せケース
　　＋／－：アイソレータ最大／ダンパー最小の組合せケース
　　－／－：アイソレータ最小／ダンパー最小の組合せケース
　　－／＋：アイソレータ最小／ダンパー最大の組合せケース
※2：面圧は圧縮力を正，引張力を負とする

【水平単独入力と鉛直単独入力の組合せによる鉛入り積層ゴムの面圧算定結果】

（X 方向，スペクトル波入力，標準ケース）

	組合せ方法				同時入力（再掲）	許容限界
	絶対値和	SRSS 法	組合せ係数法	時刻歴和		
面圧※（引張）(N/mm^2)	-0.232	0.047	-0.056	-0.015	0.213	＞ -1.0
面圧※（圧縮）(N/mm^2)	6.20	5.92	6.02	5.98	5.98	＜ 30

※：面圧は圧縮力を正，引張力を負とする

添付表 1-18　上部構造の最大応答値（Y 方向，スペクトル波入力）

項目	単位	標準ケース	免震装置の特性値の組合せ※				許容限界
			＋／＋	＋／－	－／－	－／＋	
層せん断力	kN	5,640	6,420	5,610	4,960	5,820	＜ 8,700
層間変形角	rad	1/680	1/597	1/683	1/772	1/658	＜ 1/200

※：＋／＋：アイソレータ最大／ダンパー最大の組合せケース
　　＋／－：アイソレータ最大／ダンパー最小の組合せケース
　　－／－：アイソレータ最小／ダンパー最小の組合せケース
　　－／＋：アイソレータ最小／ダンパー最大の組合せケース

添付表 1-19　免震層の最大応答値（Y 方向，スペクトル波入力）

評価項目		標準ケース	免震装置の特性値の組合せ※1				許容限界
			＋／＋	＋／－	－／－	－／＋	
鉛入り積層ゴム	面圧※2（引張）(N/mm^2)	-0.007	-0.001	0.101	-0.004	-0.013	＞ -1.0
	面圧※2（圧縮）(N/mm^2)	6.06	6.08	5.97	6.09	6.13	＜ 30
弾性すべり支承	面圧※2（圧縮）(N/mm^2)	28.9	28.9	28.9	28.9	28.9	＜ 40
オイルダンパー	最大速度（cm/s）	97.6	106	105	116	96.1	＜ 150
免震層全体	最大変位（mm）	288	248	287	379	273	＜ 630

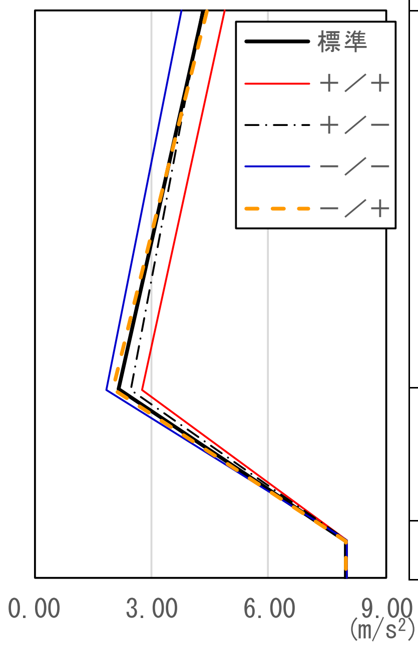
※1：＋／＋：アイソレータ最大／ダンパー最大の組合せケース
　　＋／－：アイソレータ最大／ダンパー最小の組合せケース
　　－／－：アイソレータ最小／ダンパー最小の組合せケース
　　－／＋：アイソレータ最小／ダンパー最大の組合せケース
※2：面圧は圧縮力を正，引張力を負とする

【水平単独入力と鉛直単独入力の組合せによる鉛入り積層ゴムの面圧算定結果】

（Y 方向，スペクトル波入力，標準ケース）

	組合せ方法				同時入力（再掲）	許容限界
	絶対値和	SRSS 法	組合せ係数法	時刻歴和		
面圧※（引張）(N/mm^2)	-0.642	-0.022	-0.219	-0.099	-0.007	＞ -1.0
面圧※（圧縮）(N/mm^2)	6.60	5.98	6.18	6.06	6.06	＜ 30

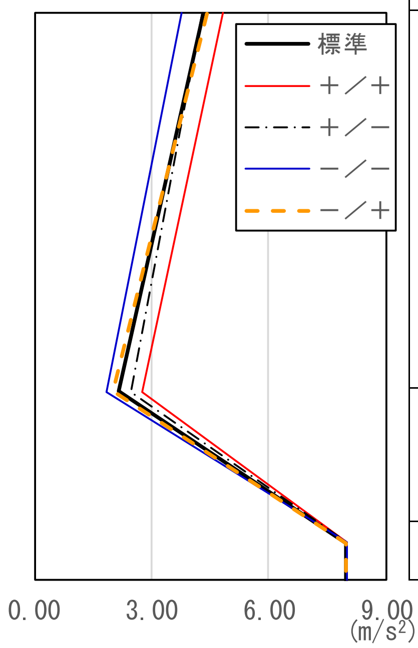
※：面圧は圧縮力を正，引張力を負とする



高さ	標準ケース	免震装置の特性値の組合せ			
		＋／＋	＋／－	－／－	－／＋
屋根	4.31	4.88	4.29	3.79	4.43
上部基礎版	2.18	2.77	2.49	1.86	2.04
下部基礎版	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
入力位置	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00

単位：m/s^2

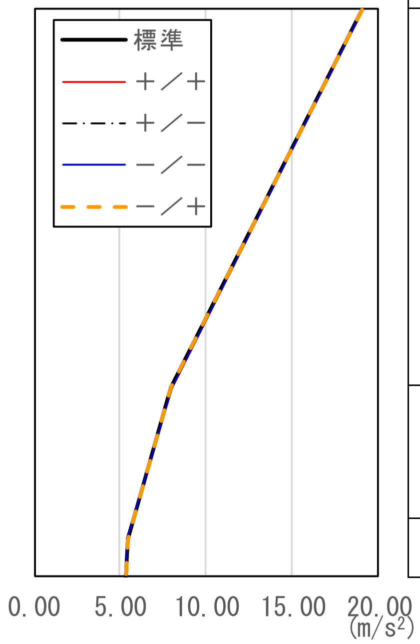
添付図 1-19　最大応答加速度（X 方向，スペクトル波入力）



高さ	標準ケース	免震装置の特性値の組合せ			
		＋／＋	＋／－	－／－	－／＋
屋根	4.31	4.86	4.29	3.79	4.44
上部基礎版	2.17	2.76	2.49	1.87	2.03
下部基礎版	7.99	7.99	7.99	7.99	7.99
入力位置	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00

単位：m/s^2

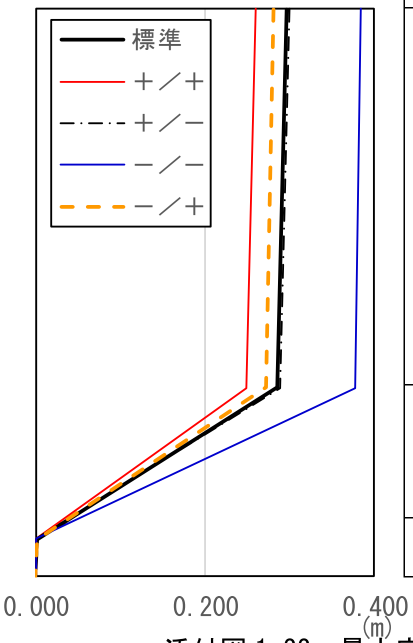
添付図 1-20　最大応答加速度（Y 方向，スペクトル波入力）



高さ	標準ケース	免震装置の特性値の組合せ			
		＋／＋	＋／−	−／−	−／＋
屋根	19.1	19.1	19.1	19.1	19.1
上部基礎版	7.96	7.96	7.96	7.96	7.96
下部基礎版	5.43	5.43	5.43	5.43	5.43
入力位置	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37

単位：m/s^2

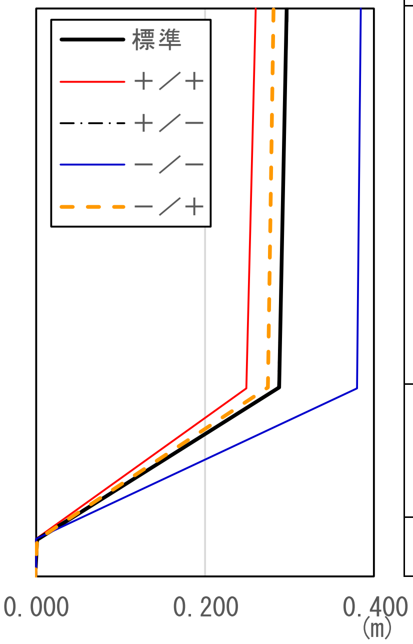
添付図 1-21　最大応答加速度（Z 方向，スペクトル波入力）



高さ	標準ケース	免震装置の特性値の組合せ			
		＋／＋	＋／－	－／－	－／＋
屋根	0.296	0.259	0.299	0.385	0.281
上部基礎版	0.287	0.248	0.288	0.378	0.273
下部基礎版	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
入力位置	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

単位：m

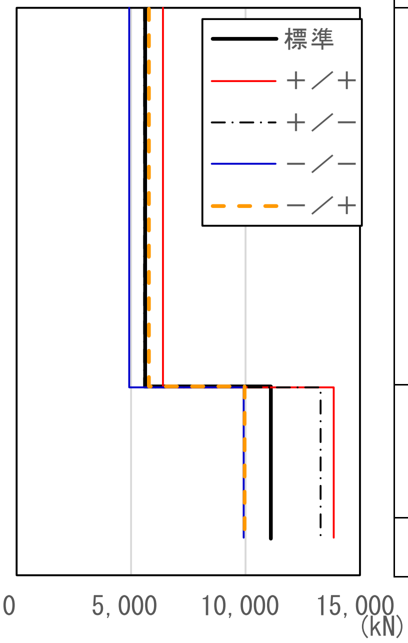
添付図 1-22　最大応答水平変位（X 方向，スペクトル波入力）



高さ	標準ケース	免震装置の特性値の組合せ			
		＋／＋	＋／－	－／－	－／＋
屋根	0.297	0.260	0.297	0.385	0.281
上部基礎版	0.288	0.248	0.287	0.379	0.273
下部基礎版	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
入力位置	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

単位：m

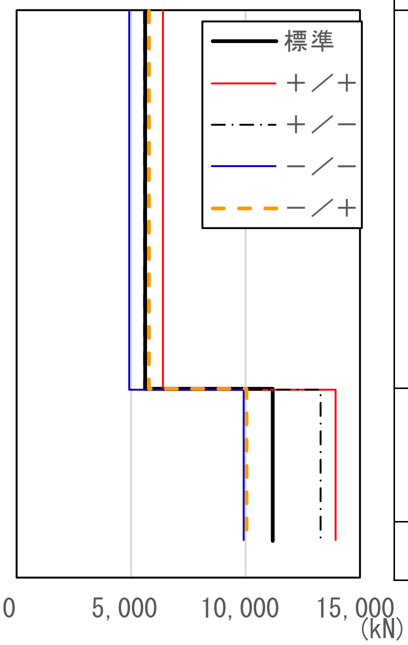
添付図 1-23　最大応答水平変位（Y 方向，スペクトル波入力）



高さ	標準ケース	免震装置の特性値の組合せ			
		＋／＋	＋／－	－／－	－／＋
屋根	－	－	－	－	－
上部基礎版	5,640	6,450	5,610	4,950	5,800
下部基礎版	11,200	13,900	13,300	9,930	10,000
入力位置	－	－	－	－	－

単位：kN

添付図 1-24　最大応答せん断力（X 方向，スペクトル波入力）



高さ	標準ケース	免震装置の特性値の組合せ			
		＋／＋	＋／－	－／－	－／＋
屋根	－	－	－	－	－
上部基礎版	5,640	6,420	5,610	4,960	5,820
下部基礎版	11,200	13,900	13,300	9,930	10,100
入力位置	－	－	－	－	－

単位：kN

添付図 1-25　最大応答せん断力（Y 方向，スペクトル波入力）

添付表 1-20　上部構造の最大応答値（断層波入力）

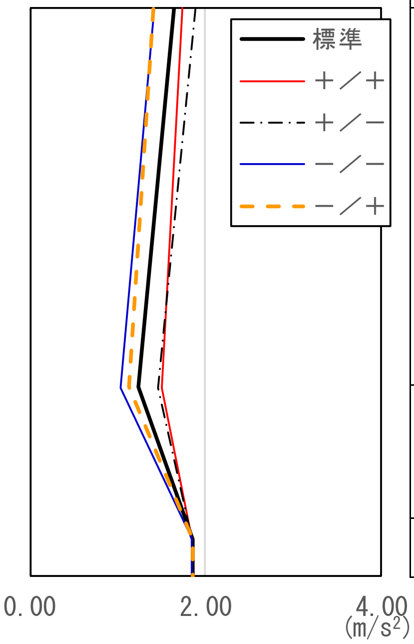
項目	単位	標準ケース	免震装置の特性値の組合せ※				許容限界
			＋／＋	＋／－	－／－	－／＋	
層せん断力（上段：X 方向）（下段：Y 方向）	kN	2,180	2,290	2,500	1,890	1,880	＜ 9,600
		1,830	1,940	1,910	1,610	1,690	＜ 8,700
層間変形角（上段：X 方向）（下段：Y 方向）	rad	1/1,750	1/1,660	1/1,520	1/2,020	1/2,020	＜ 1/200
		1/2,100	1/1,970	1/2,010	1/2,380	1/2,270	＜ 1/200

※：＋／＋：アイソレータ最大／ダンパー最大の組合せケース
　　＋／－：アイソレータ最大／ダンパー最小の組合せケース
　　－／－：アイソレータ最小／ダンパー最小の組合せケース
　　－／＋：アイソレータ最小／ダンパー最大の組合せケース

添付表 1-21　免震層の最大応答値（断層波入力）

評価項目		標準ケース	免震装置の特性値の組合せ※1				許容限界
			＋／＋	＋／－	－／－	－／＋	
鉛入り積層ゴム	面圧※2（引張）(N/mm^2)	2.24	2.18	2.19	2.33	2.28	＞ -1.0
	面圧※2（圧縮）(N/mm^2)	3.74	3.78	3.79	3.72	3.70	＜ 30
弾性すべり支承	面圧※2（圧縮）(N/mm^2)	17.8	17.6	17.7	17.8	17.8	＜ 40
オイルダンパー	最大速度 (cm/s)	27.7	25.3	28.6	36.4	28.2	＜ 150
免震層全体	最大変位 (mm)	124	86.9	104	187	131	＜ 630

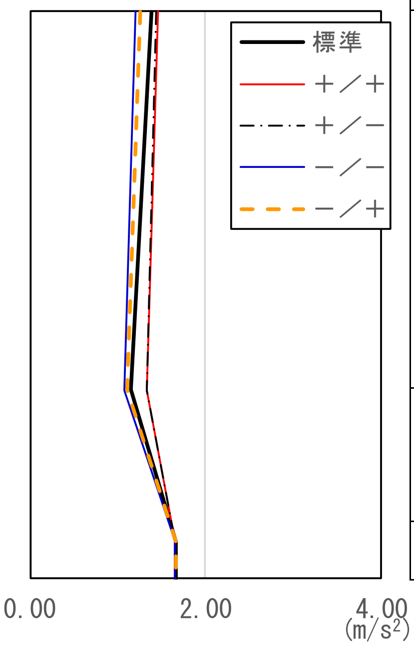
※1：＋／＋：アイソレータ最大／ダンパー最大の組合せケース
　　＋／－：アイソレータ最大／ダンパー最小の組合せケース
　　－／－：アイソレータ最小／ダンパー最小の組合せケース
　　－／＋：アイソレータ最小／ダンパー最大の組合せケース
※2：面圧は圧縮力を正，引張力を負とする



高さ	標準ケース	免震装置の特性値の組合せ			
		＋／＋	＋／－	－／－	－／＋
屋根	1.65	1.74	1.89	1.42	1.42
上部基礎版	1.25	1.52	1.47	1.04	1.13
下部基礎版	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86
入力位置	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86

単位：m/s^2

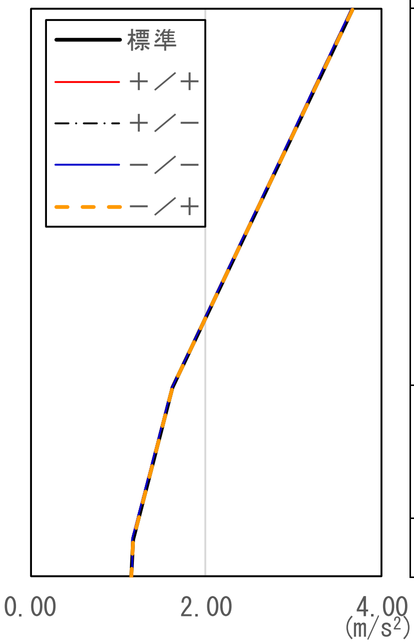
添付図 1-26　最大応答加速度（X 方向，断層波入力）



高さ	標準ケース	免震装置の特性値の組合せ			
		＋／＋	＋／－	－／－	－／＋
屋根	1.38	1.47	1.44	1.21	1.27
上部基礎版	1.15	1.33	1.33	1.09	1.10
下部基礎版	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
入力位置	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66

単位：m/s^2

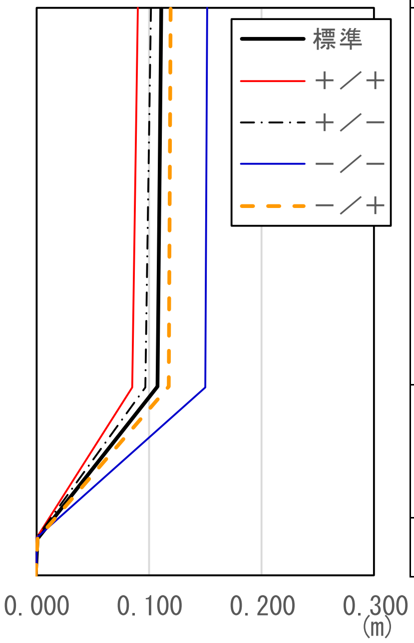
添付図 1-27　最大応答加速度（Y 方向，断層波入力）



高さ	標準ケース	免震装置の特性値の組合せ			
		＋／＋	＋／－	－／－	－／＋
屋根	3.67	3.67	3.67	3.67	3.67
上部基礎版	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62
下部基礎版	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
入力位置	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16

単位：m/s²

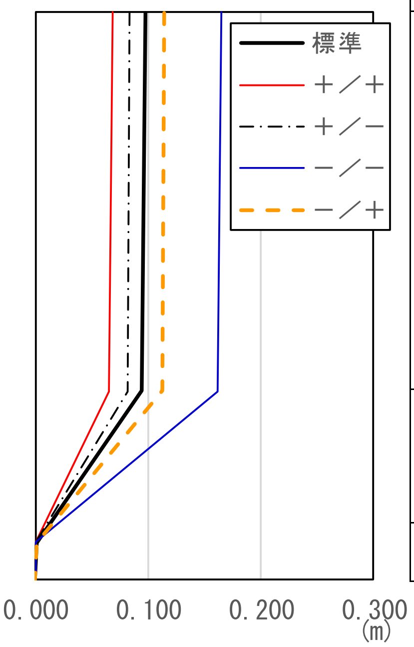
添付図 1-28　最大応答加速度（Z 方向，断層波入力）



高さ	標準ケース	免震装置の特性値の組合せ			
		+／+	+／−	−／−	−／+
屋根	0.111	0.090	0.101	0.152	0.120
上部基礎版	0.108	0.085	0.096	0.149	0.117
下部基礎版	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
入力位置	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

単位：m

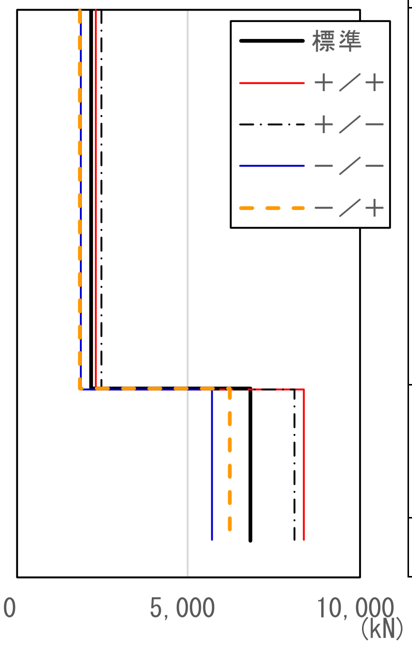
添付図 1-29　最大応答水平変位（X 方向，断層波入力）



高さ	標準ケース	免震装置の特性値の組合せ			
		+／+	+／−	−／−	−／+
屋根	0.097	0.068	0.084	0.165	0.114
上部基礎版	0.094	0.064	0.081	0.162	0.112
下部基礎版	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
入力位置	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

単位：m

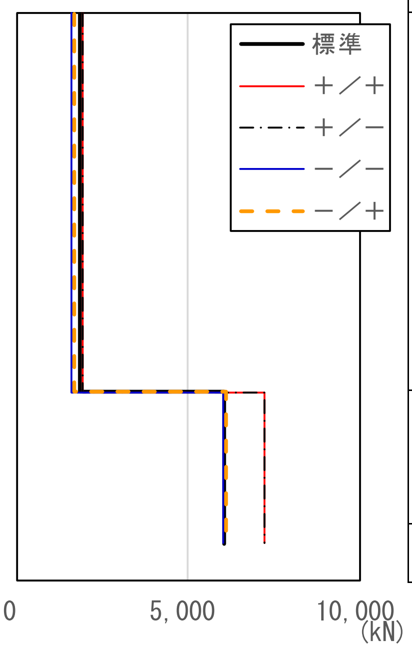
添付図 1-30　最大応答水平変位（Y 方向，断層波入力）



高さ	標準ケース	免震装置の特性値の組合せ			
		＋／＋	＋／－	－／－	－／＋
屋根	－	－	－	－	－
上部基礎版	2, 180	2, 290	2, 500	1, 890	1, 880
下部基礎版	6, 790	8, 350	8, 070	5, 700	6, 200
入力位置	－	－	－	－	－

単位：kN

添付図 1-31　最大応答せん断力（X 方向，断層波入力）



高さ	標準ケース	免震装置の特性値の組合せ			
		＋／＋	＋／－	－／－	－／＋
屋根	－	－	－	－	－
上部基礎版	1, 830	1, 940	1, 910	1, 610	1, 690
下部基礎版	6, 050	7, 220	7, 230	6, 020	6, 110
入力位置	－	－	－	－	－

単位：kN

添付図 1-32　最大応答せん断力（Y 方向，断層波入力）

7. 水平 2 方向入力の影響検討

(1) 検討条件

免震型 SA 施設（硬岩サイト）に対し，水平 2 方向入力の影響を検討する。

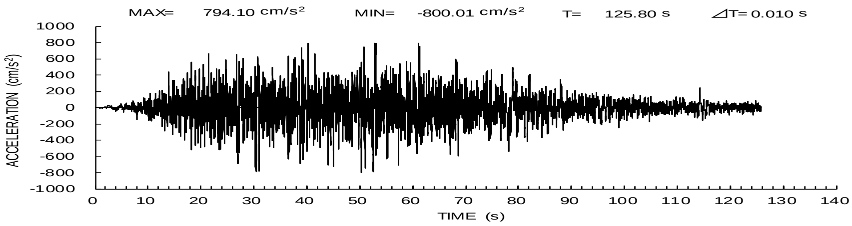
入力地震動は試設計に用いたスペクトル波及び断層波について検討する。

スペクトル波の水平 2 方向入力に対する影響検討として，水平 1 方向入力で用いた模擬地震波と同じ周期特性の異なる乱数位相を持つ模擬地震波を水平直交方向に入力し，水平 1 方向入力時の応答と比較する。鉛直方向の入力地震動は，水平 1 方向入力時と同じ模擬地震波を用いる。入力地震動の時刻歴波形と応答スペクトルを添付図 1-33 に示す。スペクトル波の水平方向と直交方向に作用させる異なる乱数位相の模擬地震波との相関係数は 0.0024 である。

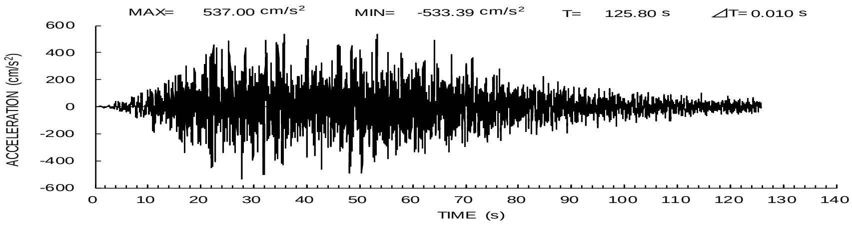
地震応答解析は，上記地震動を水平 2 方向と鉛直方向の 3 方向同時入力として実施する。入力方向については，試設計で用いた水平地震動（添付図 1-33(a)）を X 方向に，位相の異なる地震動（添付図 1-33(c)）を Y 方向に入力する。

断層モデル波は，3 方向入力による検討を基本としているため，本検討では水平 1 方向と鉛直方向の入力に対する解析を実施し，3 方向入力との違いを検討する。

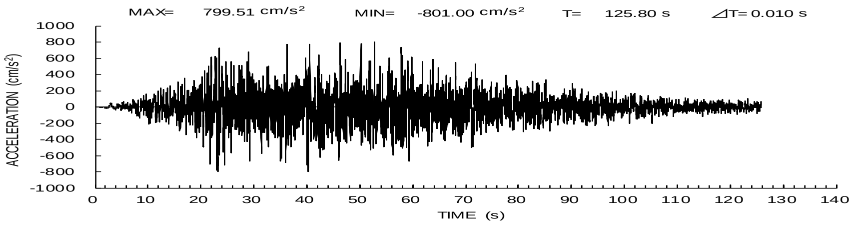
地震応答解析モデルは，試設計で用いたモデルと同じとし，免震装置の特性値は標準ケースを用いる。



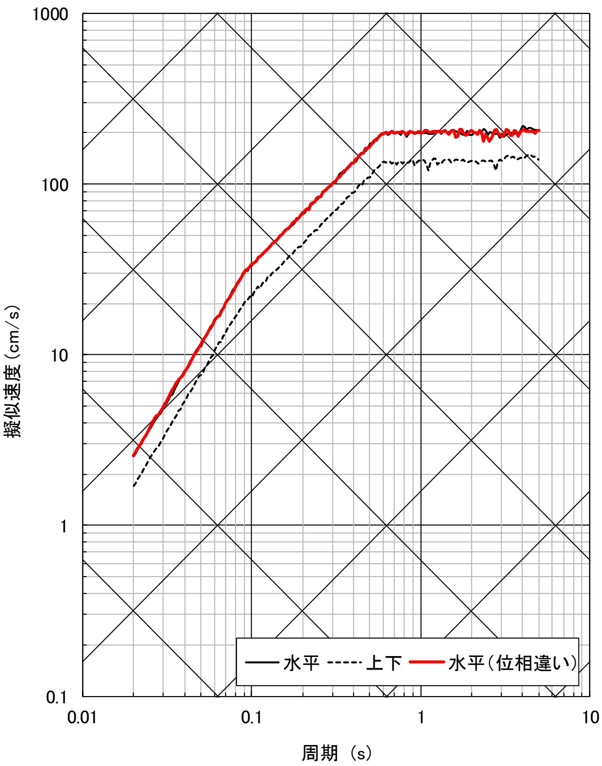
(a) 加速度時刻歴波形（水平）



(b) 加速度時刻歴波形（鉛直）



(c) 加速度時刻歴波形（水平：位相の異なる波）



(d) 加速度応答スペクトル(h=5%)

添付図 1-33　入力地震動（スペクトル波）

(2) 地震応答解析結果

水平 2 方向入力の影響検討として実施した地震応答解析結果のうち，上部構造及び免震層の最大応答値を添付表 1-22～添付表 1-25 に示す。

また，最大応答加速度，最大水平変位及び最大応答せん断力の結果を添付図 1-34～添付図 1-47 に，免震層の変位オービットを添付図 1-48～添付図 1-49 に示す。

水平 2 方向入力の場合，水平 1 方向入力よりも免震層への入力エネルギーが大きくなるため，免震層の応答は増幅している。特に，最大変位（ベクトル方向の最大変位）の増幅は顕著であるが，上部構造及び免震層の全ての応答は許容限界以下である。

添付表 1-22　上部構造の最大応答値（スペクトル波入力）

項目	単位	水平 1 方向入力		水平 2 方向入力	評価基準
		X+Z	Y+Z	X+Y+Z	
層せん断力	kN	5,640	5,640	5,630	X：＜ 9,600 Y：＜ 8,700
層間変形角	rad	1/676	1/680	1/680	＜ 1/200

添付表 1-23　免震層の最大応答値（スペクトル波入力）

評価項目		水平 1 方向入力		水平 2 方向入力	評価基準
		X+Z	Y+Z	X+Y+Z	
鉛入り積層ゴム	面圧※（引張）(N/mm^2)	0.213	-0.007	-0.001	＞ -1.0
	面圧※（圧縮）(N/mm^2)	5.98	6.06	6.13	＜ 30
弾性すべり支承	面圧※（圧縮）(N/mm^2)	29.3	28.9	29.3	＜ 40
オイルダンパー	最大速度 (cm/s)	97.6	97.6	99.3	＜ 150
免震層全体	最大変位 [mm]	287	288	336	＜ 630

※：面圧は圧縮力を正，引張力を負とする

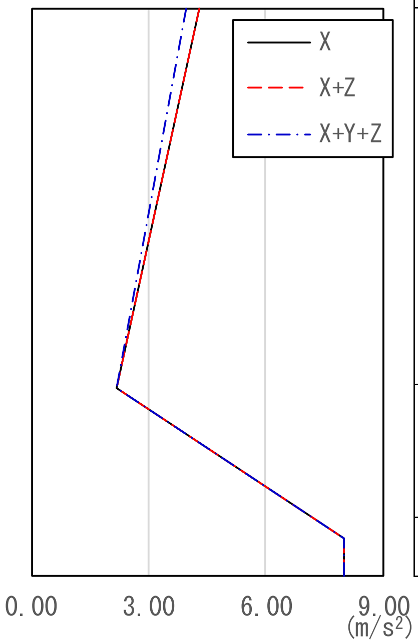
添付表 1-24　上部建屋の応答値（断層波入力，X：EW 波，Y：NS 波）

項目	単位	水平 1 方向入力		水平 2 方向入力	評価基準
		X+Z	Y+Z	X+Y+Z	
層せん断力	kN	2,220	1,820	2,180	X：＜ 9,600 Y：＜ 8,700
層間変形角	rad	1/1,710	1/2,110	1/1,750	＜ 1/200

添付表 1-25　免震層の応答値（断層波入力，X：EW 波，Y：NS 波）

評価項目		水平 1 方向入力		水平 2 方向入力	評価基準
		X+Z	Y+Z	X+Y+Z	
鉛入り積層ゴム	面圧※（引張） (N/mm^2)	2.32	2.23	2.24	＞ -1.0
	面圧※（圧縮） (N/mm^2)	3.61	3.72	3.74	＜ 30
弾性すべり支承	面圧※（圧縮） (N/mm^2)	17.7	17.5	17.8	＜ 40
オイルダンパー	最大速度 (cm/s)	27.2	21.8	27.7	＜ 150
免震層全体	最大変位 [mm]	115	80.0	124	＜ 630

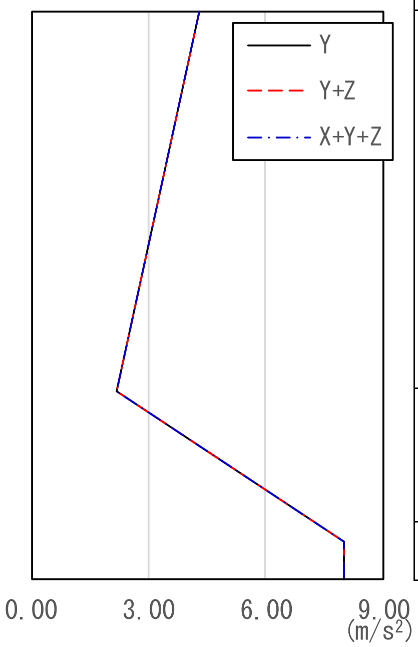
※：面圧は圧縮力を正，引張力を負とする



高さ	X	X+Z	X+Y+Z
屋根	4.31	4.31	3.99
上部基礎版	2.18	2.18	2.21
下部基礎版	8.00	8.00	8.00
入力位置	8.00	8.00	8.00

単位：m/s^2

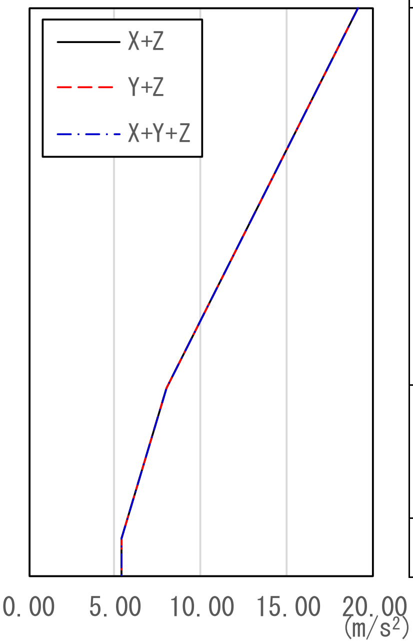
添付図 1-34　最大応答加速度（X 方向，スペクトル波入力）



高さ	Y	Y+Z	X+Y+Z
屋根	4.31	4.31	4.30
上部基礎版	2.17	2.17	2.20
下部基礎版	7.99	7.99	8.00
入力位置	8.00	8.00	8.01

単位：m/s^2

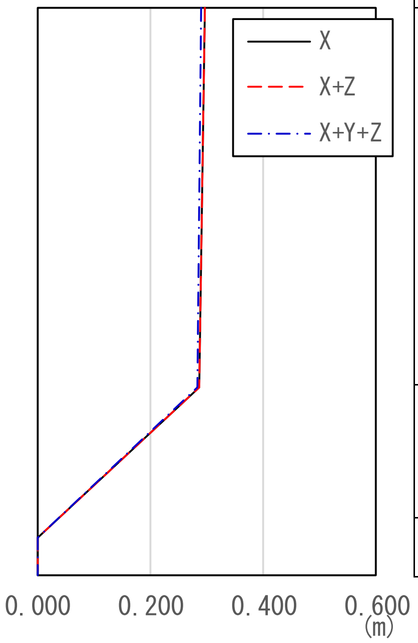
添付図 1-35　最大応答加速度（Y 方向，スペクトル波入力）



高さ	X+Z	Y+Z	X+Y+Z
屋根	19.10	19.10	19.10
上部基礎版	7.96	7.96	7.96
下部基礎版	5.43	5.43	5.43
入力位置	5.37	5.37	5.37

単位：m/s^2

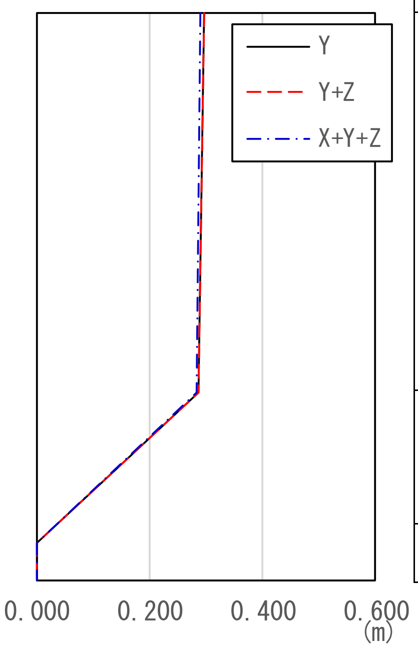
添付図 1-36　最大応答加速度（Z 方向，スペクトル波入力）



高さ	X	X+Z	X+Y+Z
屋根	0.296	0.296	0.289
上部基礎版	0.287	0.287	0.284
下部基礎版	0.000	0.000	0.000
入力位置	0.000	0.000	0.000

単位：m

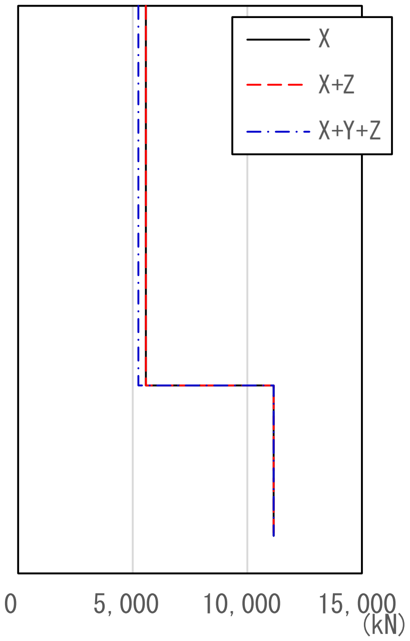
添付図 1-37　最大応答水平変位（X 方向，スペクトル波入力）



高さ	Y+Z	Y+Z	X+Y+Z
屋根	0.296	0.297	0.289
上部基礎版	0.287	0.288	0.284
下部基礎版	0.000	0.000	0.000
入力位置	0.000	0.000	0.000

単位：m

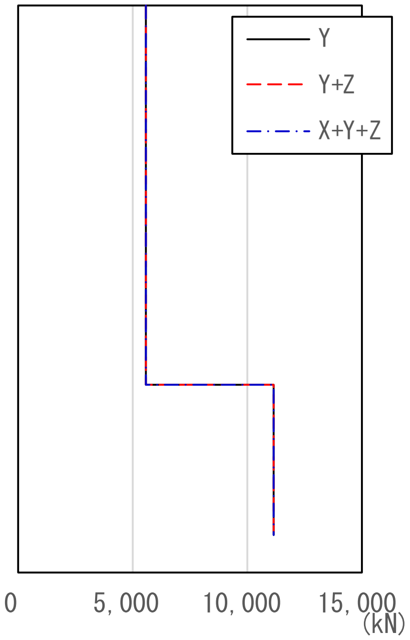
添付図 1-38　最大応答水平変位（Y 方向，スペクトル波入力）



高さ	X	X+Z	X+Y+Z
屋根	—	—	—
上部基礎版	5, 640	5, 640	5, 290
下部基礎版	11, 200	11, 200	11, 200
入力位置	—	—	—

単位：kN

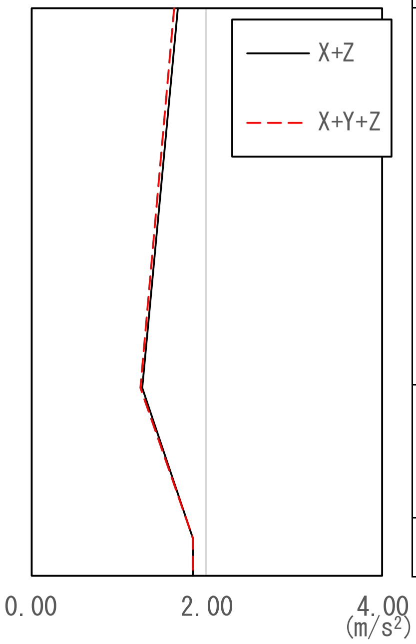
添付図 1-39　最大応答せん断力（X 方向，スペクトル波入力）



高さ	Y+Z	Y+Z	X+Y+Z
屋根	—	—	—
上部基礎版	5, 640	5, 640	5, 630
下部基礎版	11, 200	11, 200	11, 200
入力位置	—	—	—

単位：kN

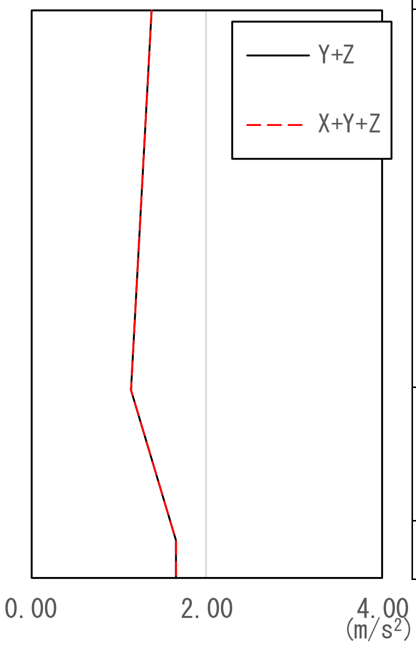
添付図 1-40　最大応答せん断力（Y 方向，スペクトル波入力）



高さ	X+Z	X+Y+Z
屋根	1.68	1.65
上部基礎版	1.26	1.25
下部基礎版	1.86	1.86
入力位置	1.86	1.86

単位：m/s^2

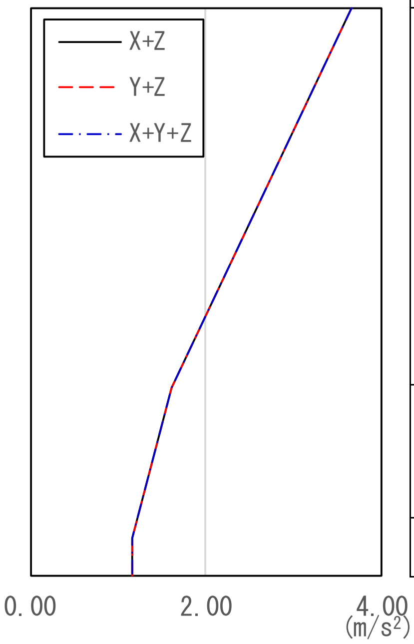
添付図 1-41　最大応答加速度（X 方向，断層波入力）



高さ	Y+Z	X+Y+Z
屋根	1.37	1.38
上部基礎版	1.14	1.15
下部基礎版	1.66	1.66
入力位置	1.66	1.66

単位：m/s^2

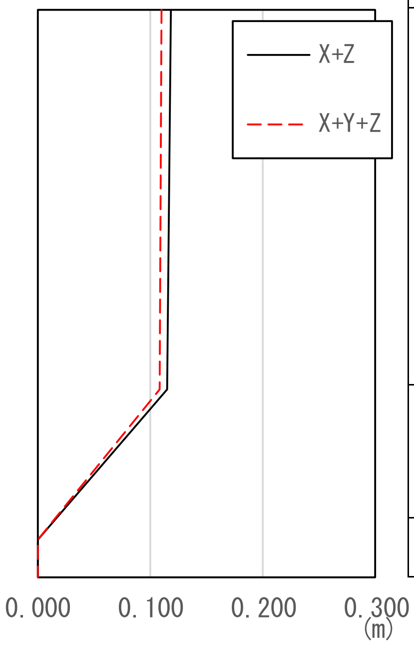
添付図 1-42　最大応答加速度（Y 方向，断層波入力）



高さ	X+Z	Y+Z	X+Y+Z
屋根	3.67	3.67	3.67
上部基礎版	1.62	1.62	1.62
下部基礎版	1.17	1.17	1.17
入力位置	1.16	1.16	1.16

単位：m/s^2

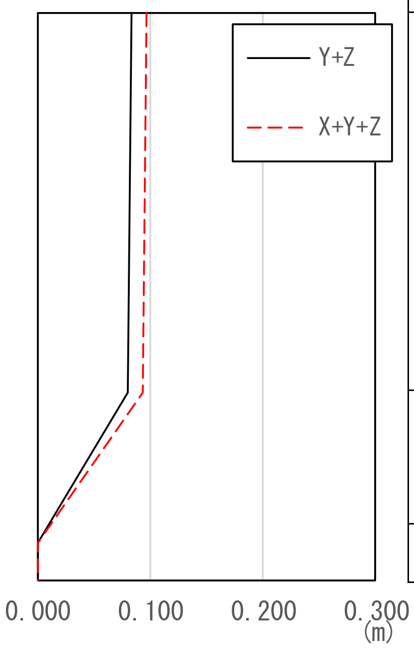
添付図 1-43　最大応答加速度（Z 方向，断層波入力）



高さ	X+Z	X+Y+Z
屋根	0.118	0.111
上部基礎版	0.115	0.108
下部基礎版	0.000	0.000
入力位置	0.000	0.000

単位：m

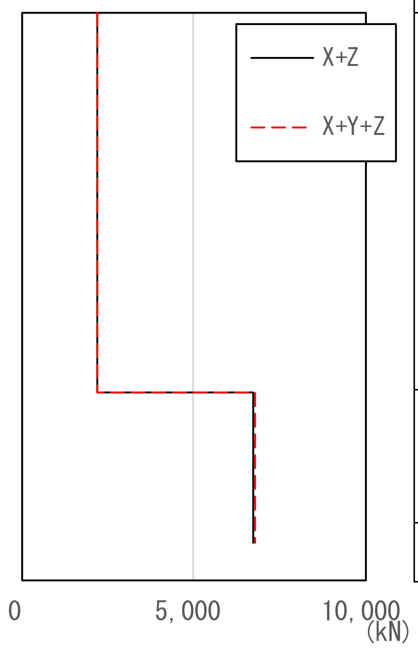
添付図 1-44　最大応答水平変位（X 方向，断層波入力）



高さ	Y+Z	X+Y+Z
屋根	0.083	0.097
上部基礎版	0.080	0.094
下部基礎版	0.000	0.000
入力位置	0.000	0.000

単位：m

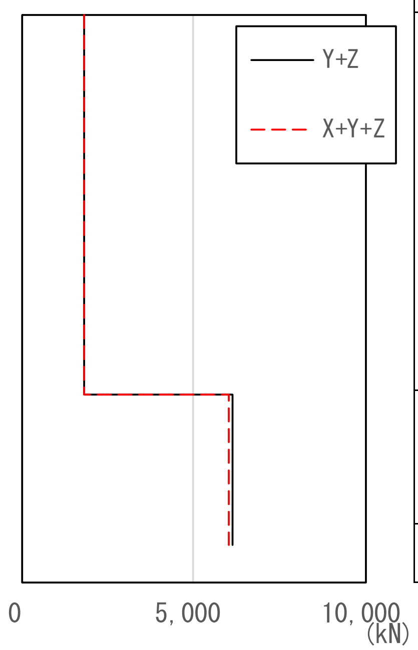
添付図 1-45　最大応答水平変位（Y 方向，断層波入力）



高さ	X+Z	X+Y+Z
屋根	—	—
上部基礎版	2,220	2,180
下部基礎版	6,730	6,790
入力位置	—	—

単位：kN

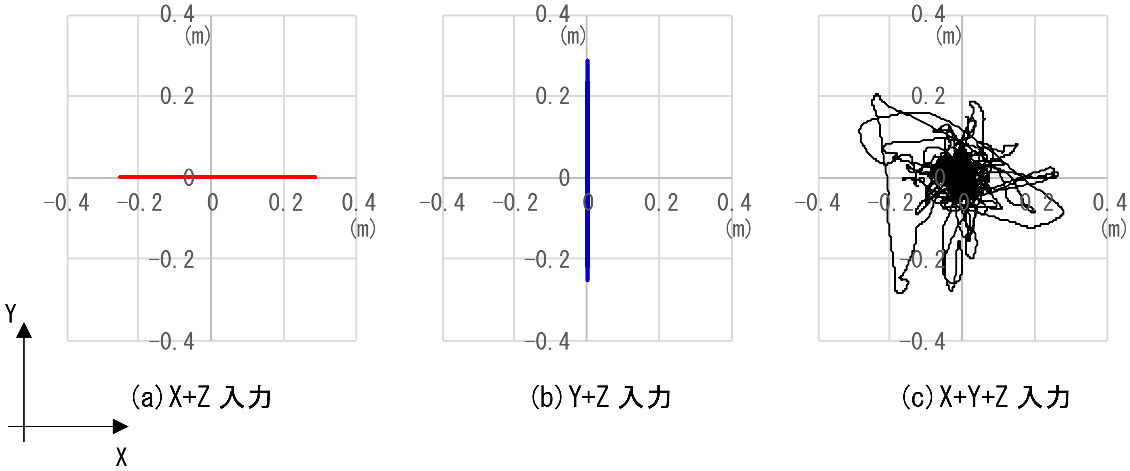
添付図 1-46　最大応答せん断力（X 方向，断層波入力）



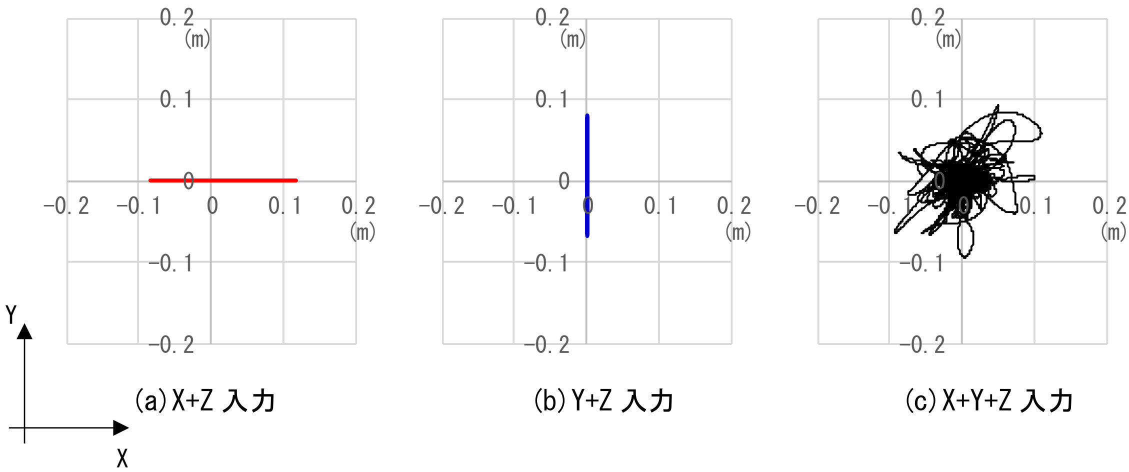
高さ	Y+Z	X+Y+Z
屋根	—	—
上部基礎版	1,820	1,830
下部基礎版	6,140	6,050
入力位置	—	—

単位：kN

添付図 1-47　最大応答せん断力（Y 方向，断層波入力）



添付図 1-48　免震層変位オービット（スペクトル波入力）



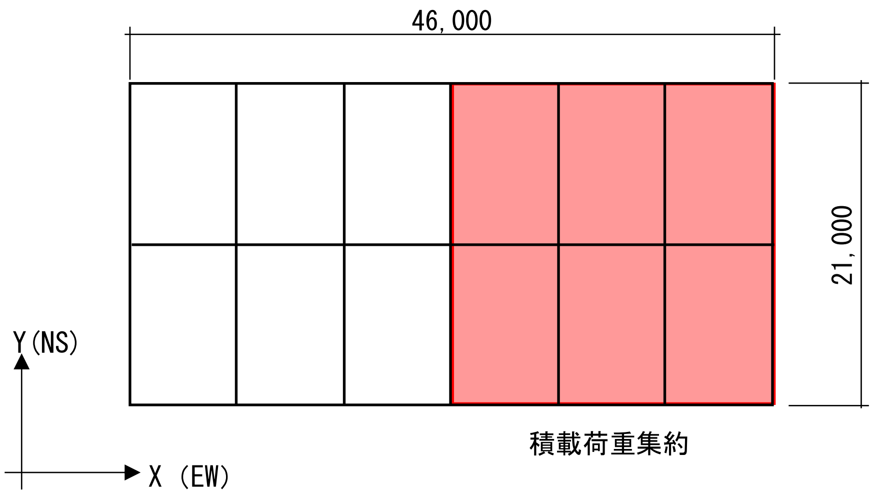
添付図 1-49　免震層変位オービット（断層波入力）

8. 積載荷重の重量偏心によるねじれ振動の影響検討

(1) 検討条件

積載荷重を建屋片側半面にのみ付加し，重量偏心によるねじれ振動の影響を検討する。添付図 1-50 に示す通り，上部基礎版の積載荷重(5,220kN)を東側半面（図の網掛け部）に付加する。免震装置の特性値は標準ケースとし，上記重量偏心を考慮する場合の免震層の偏心率は 0.0601（6.01%）である。なお，今回は影響検討を目的として，極端な積載荷重の偏りを生じさせたが，実際には設計段階等で適切に配慮されるため，一般的にはこのような大きな偏心率にはならない。

地震応答解析においては，短辺方向である Y 方向（NS 方向）及び Z 方向（UD 方向）に添付図 1-7 に示す地震動（スペクトル波）を入力する。



添付図 1-50　重量偏心によるねじれ振動の影響検討概要

(2) 地震応答解析結果

Y 方向と Z 方向の同時入力に対する地震応答解析結果を添付表 1-26～添付表 1-29 に示す。また，ねじれの影響を確認するために，Z 方向の入力影響を除いた Y 方向単独入力時の上部基礎版の中央及び 4 隅の床応答スペクトル（減衰 2.0%）を添付図 1-51 に示す。

上部構造及び上部基礎版中央部の応答は，ねじれ振動の影響は受けずほぼ同じ値を示す。

一方，免震層の応答は，重量偏心により増幅しているが，全ての項目について許容限界以下である。オイルダンパーの最大速度及び免震層の最大変位の増幅は，重量偏心によるねじれ振動の影響によるものであるが，鉛入り積層ゴム及び弾性すべり支承の面圧の増幅は，重量偏心によるねじれ振動の影響よりも初期面圧の影響が大きい。

また，機器・配管系の設計への影響という観点では，ねじれ振動の影響によって上部基礎版の最大応答加速度が 4 隅は中央部に比べて 1 割未満の増加が確認された。床応答スペクトルでは，4 隅の場所によっては中央部よりも大きな床応答スペクトルとなる場合があることが確認された。

添付表 1-26　上部構造の最大応答値（Y 方向，スペクトル波（Y+Z）入力）

項目	単位	標準ケース	重量偏心考慮	許容限界
応答せん断力	kN	5,640	5,630	< 8,700
層間変形角	rad	1/680	1/681	< 1/200

添付表 1-27　免震層の最大応答値（Y 方向，スペクトル波（Y+Z）入力）

評価項目		標準ケース	重量偏心考慮	許容限界
鉛入り積層ゴム	面圧※1(引張)(N/mm^2)	-0.007	-0.049	> -1.0
	面圧※1(圧縮)(N/mm^2)	6.06	6.95	< 30
弾性すべり支承	面圧※1(圧縮)(N/mm^2)	28.9	32.9	< 40
オイルダンパー	最大速度(cm/s)	97.6	103	< 150
免震層全体	最大変位[mm]	288	308※2	< 630

※1：面圧は圧縮力を正，引張力を負とする

※2：ベクトル方向の最大変位を示す

添付表 1-28　上部基礎版の最大応答加速度

（スペクトル波（Y+Z）入力，Y 方向，重量偏心考慮）

	中央	隅①※	隅②※	隅③※	隅④※
Y(NS)方向 (m/s^2)	2.18	2.33	2.23	2.33	2.23
X(EW)方向 (m/s^2)	0.009	0.258	0.258	0.247	0.247

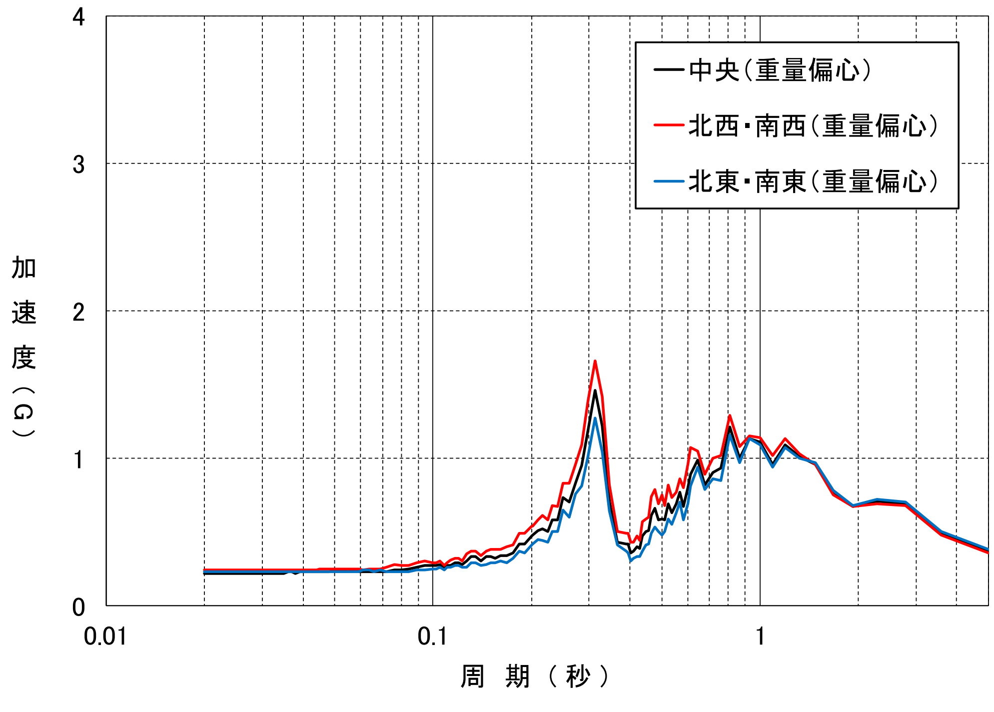
※ 隅①：左下（南西），隅②：右下（南東），隅③：左上（北西），隅④：右上（北東）

添付表 1-29　免震層の最大変位

（スペクトル波（Y+Z）入力，Y 方向，重量偏心考慮）

	中央	隅①※	隅②※	隅③※	隅④※
Y(NS)方向 (mm)	285	263	308	263	308
X(EW)方向 (mm)	0.061	17.3	17.3	17.2	17.2

※ 隅①：左下（南西），隅②：右下（南東），隅③：左上（北西），隅④：右上（北東）



添付図 1-51　上部基礎版の床応答スペクトル

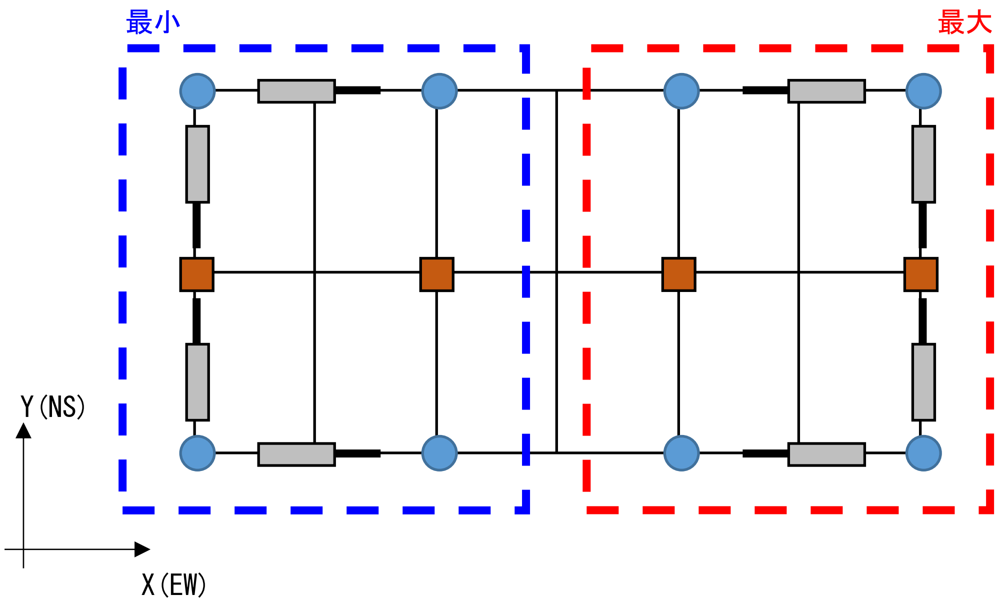
（減衰 2.0%，Y 方向，スペクトル波 Y 方向単独入力，重量偏心考慮）

9. 免震層の特性値のばらつきに伴う偏心によるねじれ振動の影響検討

(1) 検討条件

ここでは，免震装置の特性値（剛性，減衰）のばらつきに伴う偏心によって生じるねじれ振動の影響を検討する。免震装置の特性値は製造ばらつきのみを考慮し，免震装置の剛性が変動し得る範囲内で免震層の偏心率が最大となるように，添付表 1-30 のとおり，免震装置の特性値（剛性，減衰）のばらつきを片側で最大，もう片側で最小となるように設定する。なお，今回は影響検討を目的として，免震層の偏心率を 0.0845（8.45%）と大きな値に設定しているが，実際には施工段階で各免震装置の出庫検査結果に基づき偏心率が小さくなるよう免震装置を配置するため，一般的にはこのような大きな偏心率にはならない。

地震応答解析においては，短辺方向である Y 方向（NS 方向）及び Z 方向（UD 方向）に添付図 1-7 に示す地震動（スペクトル波）を入力する。



添付図 1-52　特性値のばらつきに伴う偏心によるねじれ振動の影響検討概要

添付表 1-30　免震装置の特性値のばらつきの設定（製造ばらつきのみ考慮）

	鉛入り積層ゴム		弾性すべり支承		オイルダンパー	
	二次剛性 K2	切片荷重 Qd	一次剛性 K1	摩擦係数 μ	1 次減衰係数 C1	2 次減衰係数 C2
最小	-10%	-10%	-30%	-40%	-15%	-15%
最大	+10%	+10%	+30%	+40%	+15%	+15%

(2) 地震応答解析結果

Y 方向と Z 方向の同時入力に対する地震応答解析結果を添付表 1-31～添付表 1-34 に示す。また，ねじれの影響を確認するために，Z 方向の入力影響を除いた Y 方向単独入力時の上部基礎版の中央及び 4 隅の床応答スペクトル（減衰 2.0%）を添付図 1-53 に示す。

上部構造及び上部基礎版中央部の応答は，ねじれ振動の影響は受けずほぼ同じ値を示す。

一方，免震層の応答は，ねじれ振動の影響により増幅している。特に，免震層変位の増幅が顕著ではあるが，本検討において設定した極端な偏心状態に対しても上部構造及び免震層の全ての応答は許容限界以下である。

また，機器・配管系の設計への影響という観点では，ねじれ振動の影響によって上部基礎版の最大応答加速度が 4 隅は中央部に比べて 1 割程度の増加が確認された。床応答スペクトルでは，4 隅の場所によって中央部よりも大きな床応答スペクトルとなる場合があることが確認された。

添付表 1-31　上部構造の最大応答値（Y 方向，スペクトル波（Y+Z）入力）

項目	単位	標準ケース	偏心考慮	許容限界
層せん断力	kN	5,640	5,630	＜ 8,700
層間変形角	rad	1/680	1/680	＜ 1/200

添付表 1-32　免震層の最大応答値（Y 方向，スペクトル波（Y+Z）入力）

評価項目		標準ケース	偏心考慮	許容限界
鉛入り積層ゴム	面圧※1（引張）(N/mm^2)	-0.007	-0.007	＞ -1.0
	面圧※1（圧縮）(N/mm^2)	6.06	6.06	＜ 30
弾性すべり支承	面圧※1（圧縮）(N/mm^2)	28.9	28.9	＜ 40
オイルダンパー	最大速度 (cm/s)	97.6	109	＜ 150
免震層全体	最大変位 [mm]	288	332※2	＜ 630

※1：面圧は圧縮力を正，引張力を負とする

※2：ベクトル方向の最大変位を示す

添付表 1-33　上部基礎版の最大応答加速度

（スペクトル波（Y+Z）入力，特性ばらつき偏心考慮）

	中央	隅①※	隅②※	隅③※	隅④※
Y(NS)方向 (m/s^2)	2.17	2.48	2.33	2.48	2.33
X(EW)方向 (m/s^2)	3.33×10^{-10}	0.389	0.389	0.389	0.389

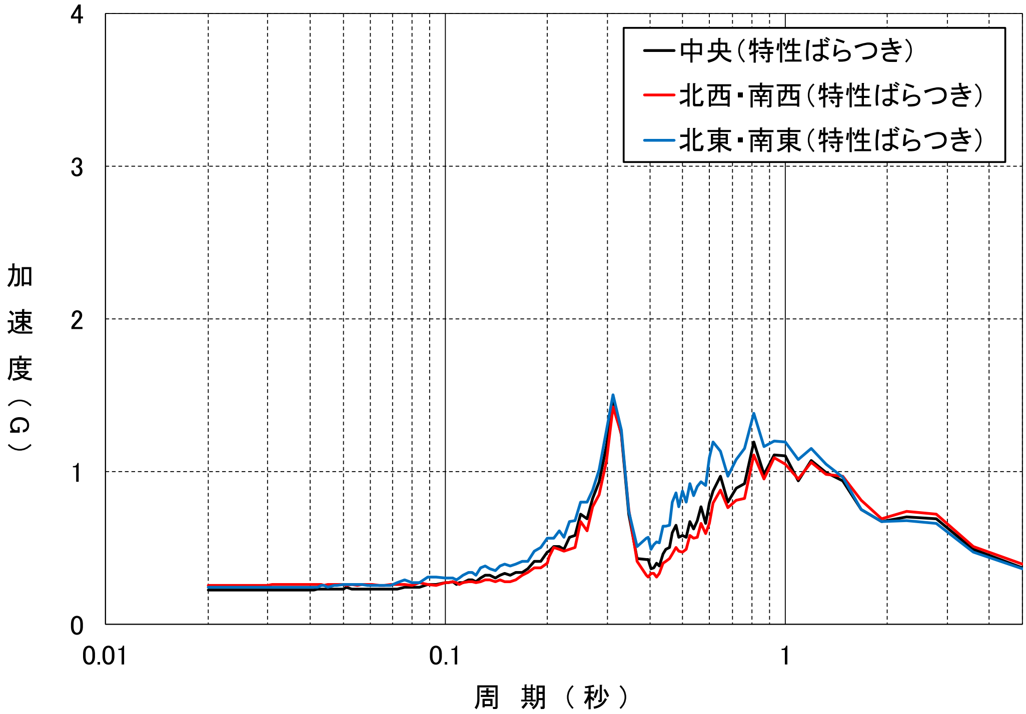
※ 隅①：左下（南西），隅②：右下（南東），隅③：左上（北西），隅④：右上（北東）

添付表 1-34　免震層の最大変位

（スペクトル波（Y+Z）入力，特性ばらつき偏心考慮）

	中央	隅①※	隅②※	隅③※	隅④※
Y(NS)方向 (mm)	286	331	243	331	243
X(EW)方向 (mm)	8.72×10^{-8}	34.4	34.4	34.4	34.4

※ 隅①：左下（南西），隅②：右下（南東），隅③：左上（北西），隅④：右上（北東）



添付図 1-53　上部基礎版の床応答スペクトル

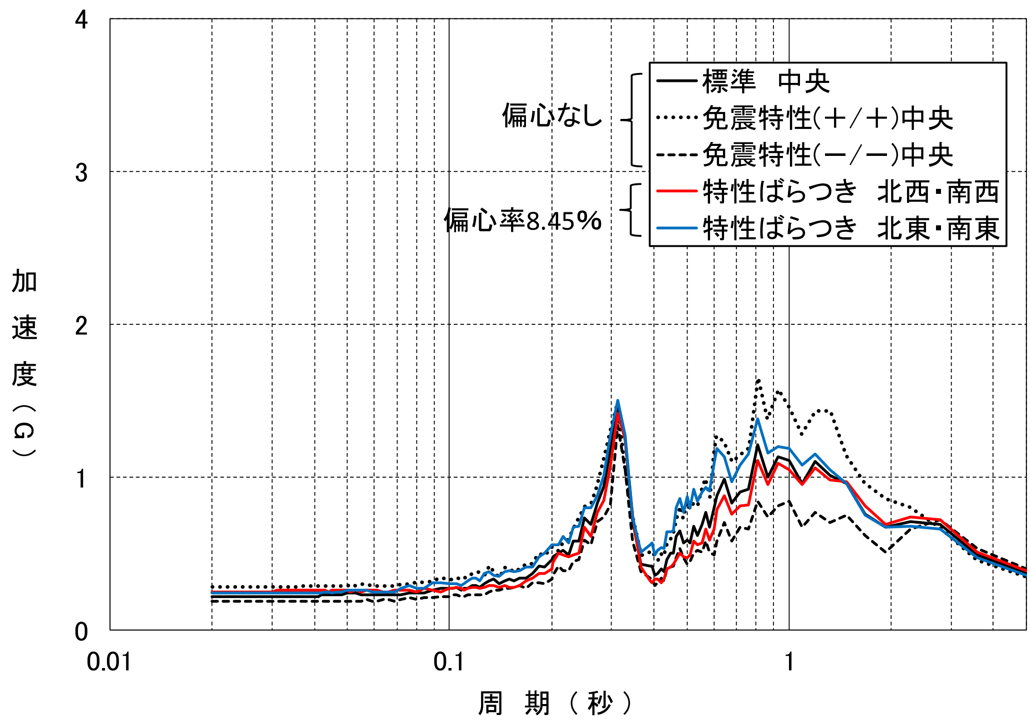
（減衰 2.0%，Y 方向，スペクトル波 Y 方向単独入力，特性ばらつき偏心考慮）

10. まとめ

せん断波速度が約 1,500m/s の硬質岩盤に設置された免震型 SA 施設について試設計検討を行い，主に免震装置（鉛入り積層ゴム，弾性すべり支承及びオイルダンパー）についての試設計例を示した。基準地震動 Ss（スペクトル波及び断層波）に対し，上部構造及び免震層の応答が設定した許容限界以下となることを確認した。

また，水平 2 方向入力の影響検討，重量偏心によるねじれ振動及び特性値のばらつきに伴う偏心によるねじれ振動の影響検討を実施した。水平 2 方向入力及びねじれ振動の影響により応答は増幅傾向にあるが，基準地震動 Ss に対する上部構造及び免震層の応答は，いずれも設定した許容限界以下となることを確認した。

さらに，機器・配管系の設計への影響という観点では，ねじれ振動の影響によって，上部基礎版の 4 隅の応答は増幅傾向となることが確認された。ただし，添付図 1-54 に示すように，偏心率 8.45%の特性のばらつきケースの 4 隅の床応答スペクトルは，偏心なしの 3 ケース（標準，免震装置特性＋／＋，免震装置特性－／－）の床応答スペクトルと比較して同程度であり，実際の上部構造の設計においては，偏心率をより小さく設計することから，ねじれ振動は抑制され，機器配管系への影響は小さくなると考えられる。実機の設計では，機器・配管系の配置や固有周期を考慮し，必要に応じて，ねじれ振動の影響を設計に反映することが考えられる。



添付図 1-54　上部基礎版の偏心なしと偏心考慮（特性ばらつき）の床応答スペクトル比較
（減衰 2.0%，Y 方向，スペクトル波 Y 方向単独入力）

免震型SA施設の試設計例（軟岩サイト）

1. はじめに

ここでは，重大事故等対処施設免震構造設計ガイドラインに基づき，せん断波速度が約700m/sの軟質岩盤に設置された免震構造を採用したSA施設（以下,「免震型SA施設（軟岩サイト)」という）を設計する場合の試設計例を示す。

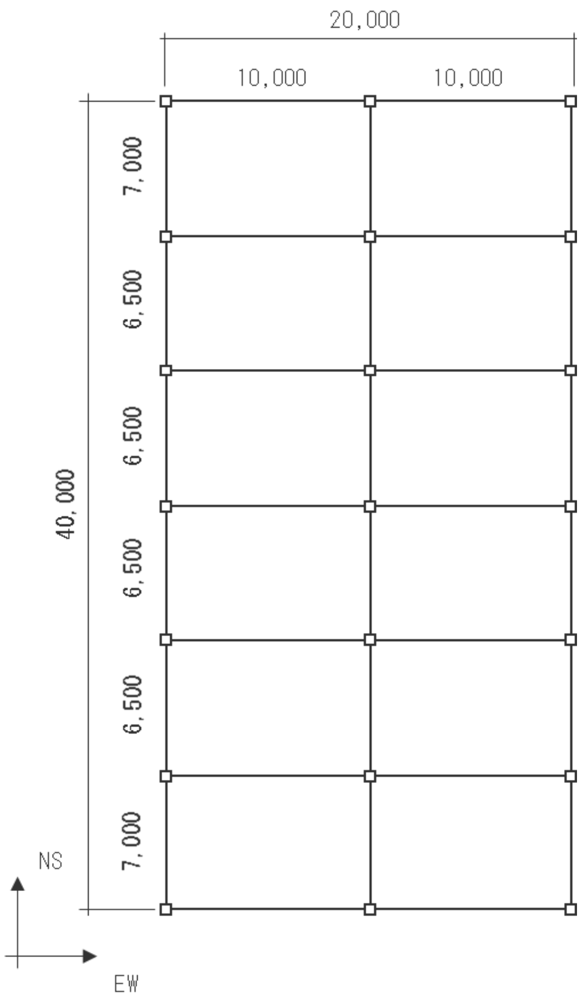
あわせて，水平2方向入力の影響検討，繰返し変形による免震装置の特性変化の影響検討及びロッキング応答の影響検討を行った。

2. 建屋概要

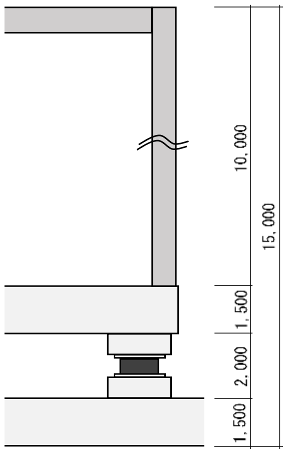
免震型SA施設（軟岩サイト）は，鉄骨造地上1階建，基礎底面からの高さは15m，地上高さは10mで，平面形状は40m（NS）×20m（EW）の矩形である。上部構造の架構形式は両方向とも純ラーメン構造とし，上部構造及び上部基礎版（鉄筋コンクリート造）を含めた免震部重量は約60,000kNである。免震装置として，鉛入り積層ゴム（8基），弾性すべり支承（4基）及び鋼材ダンパー（14基）を配置した免震構造とする。

免震型SA施設（軟岩サイト）の概略平面図及び概略断面図をそれぞれ添付図2-1及び添付図2-2に示す。

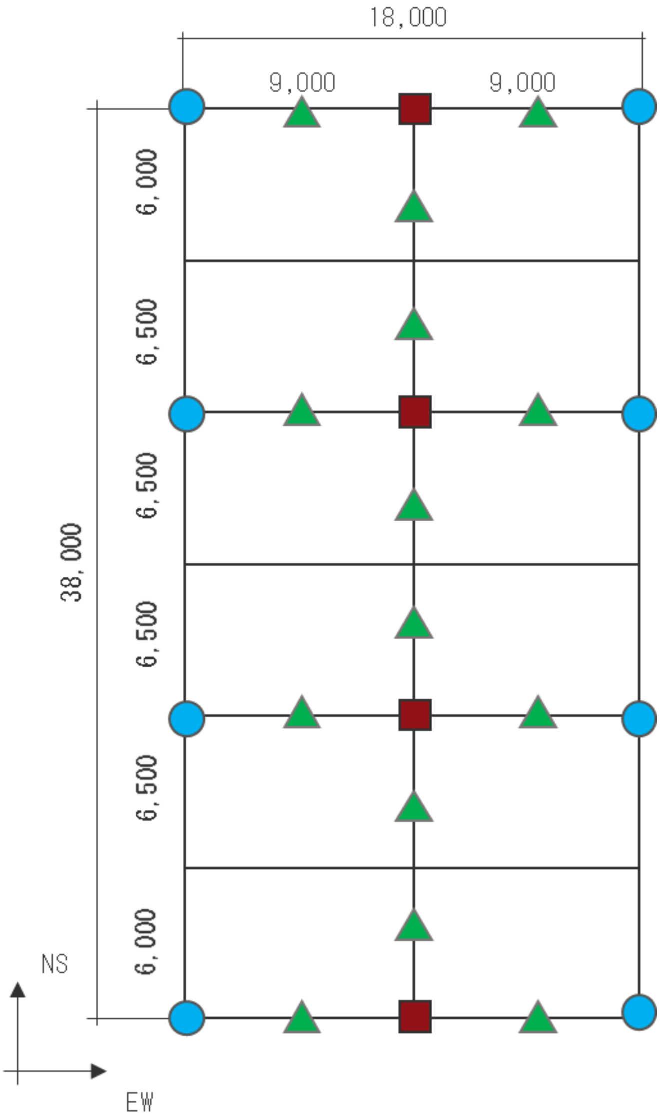
免震装置の配置図を添付図2-3に示す。また，免震装置は，国土交通大臣認定を取得しており，広く一般建築にも採用されているものを選定することとし，鉛入り積層ゴムの概要を添付図2-4に，弾性すべり支承の概要を添付図2-5に，鋼材ダンパーの概要を添付図2-6に示す。



添付図 2-1 概略平面図（単位:mm）

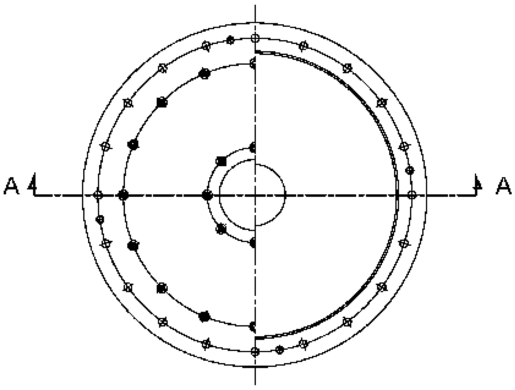


添付図 2-2 概略断面図（単位:mm）

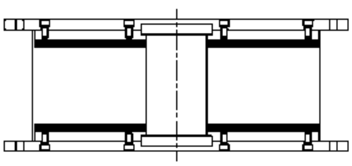


●	：鉛入り積層ゴム	（8基）
■	：弾性すべり支承	（4基）
▲	：鋼材ダンパー	（14基）

添付図 2-3 免震装置の配置（単位:mm）



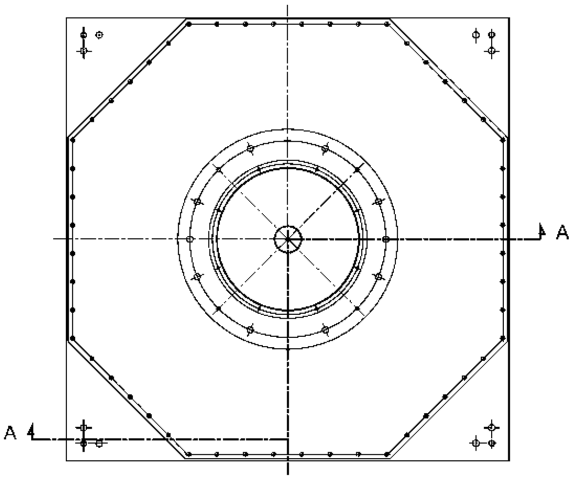
（平面図）



（A-A 断面図）

国土交通大臣認定番号	MVBR-0355
ゴムのせん断弾性係数(N/㎜²)	0.392
積層ゴム径(㎜)	1,400
鉛プラグ径(㎜)	300
ゴム総厚(㎜)	280(7.0㎜×40 層)
使用数	8

添付図 2-4　鉛入り積層ゴムの概要

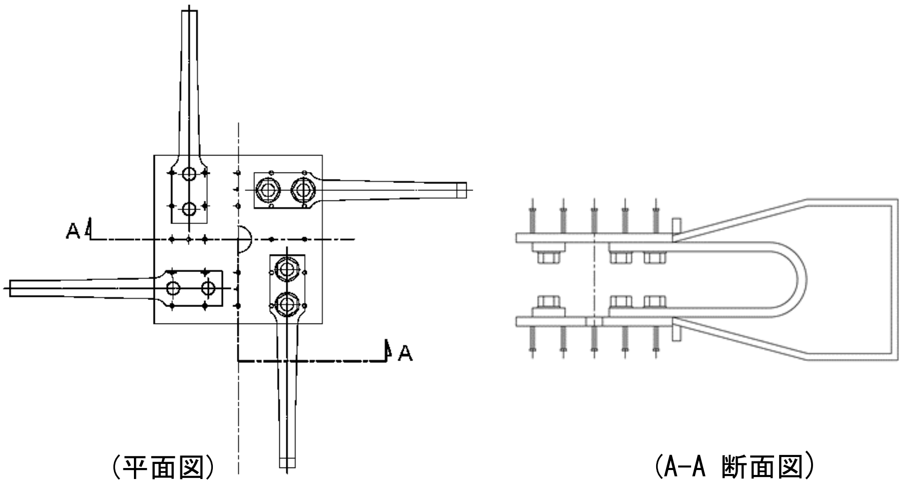


（平面図）

（A-A 断面図）

国土交通大臣認定番号	MVBR-0395
ゴムのせん断弾性係数(N/mm^2)	0.392
積層ゴム径(mm)	1,000
ゴム総厚(mm)	40（8.0mm×5 層）
摩擦係数	0.015
すべり板外寸(mm)	2,850
使用数	4

添付図 2-5　弾性すべり支承の概要



国土交通大臣認定番号	MVBR-0452
材料規格	SN490B
ダンパー本数	4
ダンパー部厚さ(mm)	55
使用数	14

添付図 2-6　鋼材ダンパーの概要

3. 地盤概要

地盤条件は，下部基礎版下端（GL0ｍ）から 50m（GL-50ｍ）をせん断波速度 700m/s，50m 以深（GL-50ｍ～）が 800m/s の 2 層の軟質岩盤とする。添付表 2-1 に使用した地盤条件を示す。

添付表 2-1　地盤条件

深さ	単位体積重量 ρ	ポアソン比 ν	S 波速度 Vs	せん断弾性係数 G
GL0m～GL-50m	20.3kN/m^3	0.42	700m/s	10.1×10^{5}kN/m^2
GL-50m 以深	20.3kN/m^3	0.42	800m/s	13.2×10^{5}kN/m^2

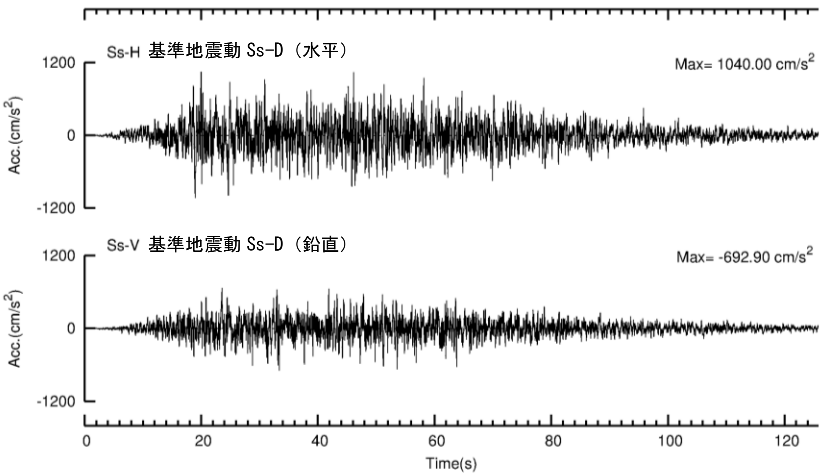
4. 入力地震動

入力地震動は基準地震動 Ss-D 及び基準地震動 Ss-1 を用いる。

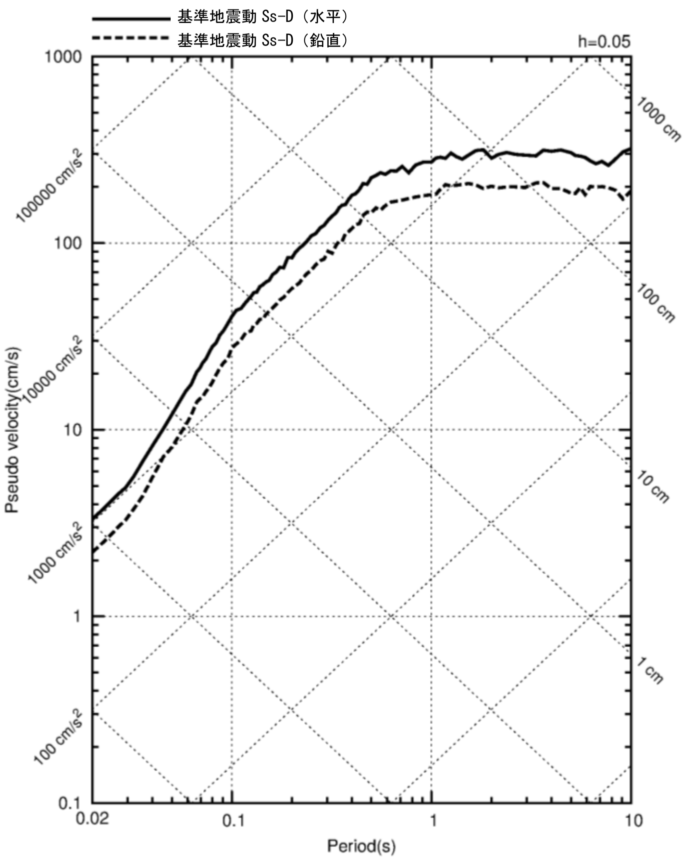
基準地震動 Ss-D は，応答スペクトルに基づく地震動評価により設定した，水平方向として最大加速度が 1,040cm/s^2,長周期領域の擬似速度応答スペクトル(減衰定数 5%)が 300cm/s となるランダムな位相特性を持つ模擬地震波である。また，鉛直方向として最大加速度が 692.9cm/s^2，長周期領域の擬似速度応答スペクトル（減衰定数 5%）が 200cm/s となるランダムな位相特性を持つ模擬地震波を用いる。水平方向及び鉛直方向の基準地震動 Ss を添付図 2-7 及び添付図 2-8 に示す。

基準地震動 Ss-1 は，南海トラフの巨大地震を想定し断層モデルを用いた手法による地震動評価により設定した地震動であり，NS 方向，EW 方向及び鉛直方向の 3 方向の入力地震動である。基準地震動 Ss-1 を添付図 2-9 及び添付図 2-10 に示す。

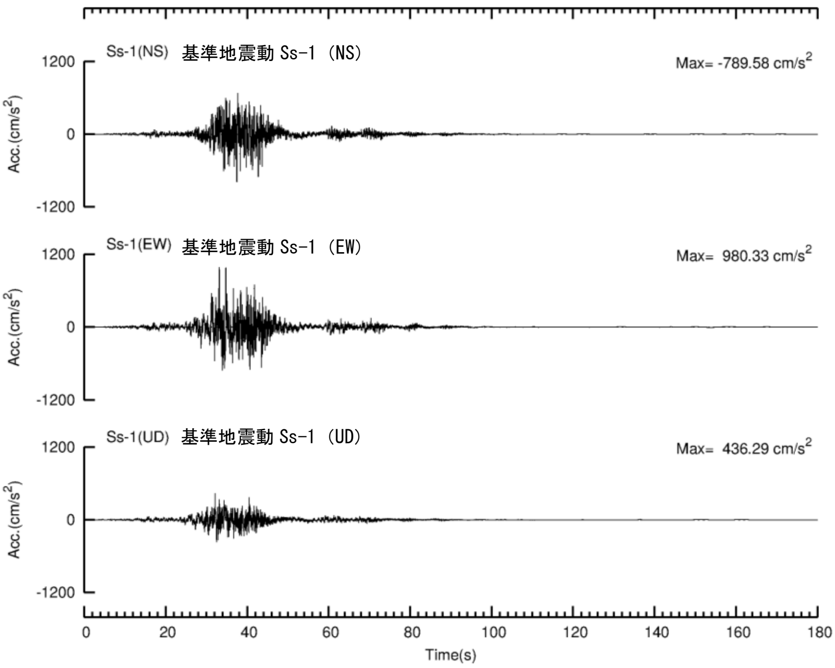
入力地震動は下部基礎版下端への直接入力とし，基準地震動 Ss-D については，水平 1 方向と鉛直方向の同時入力を代表ケースとして評価を実施し，基準地震動 Ss-1 については，水平 2 方向と鉛直方向の 3 方向同時入力に対する評価を実施する。



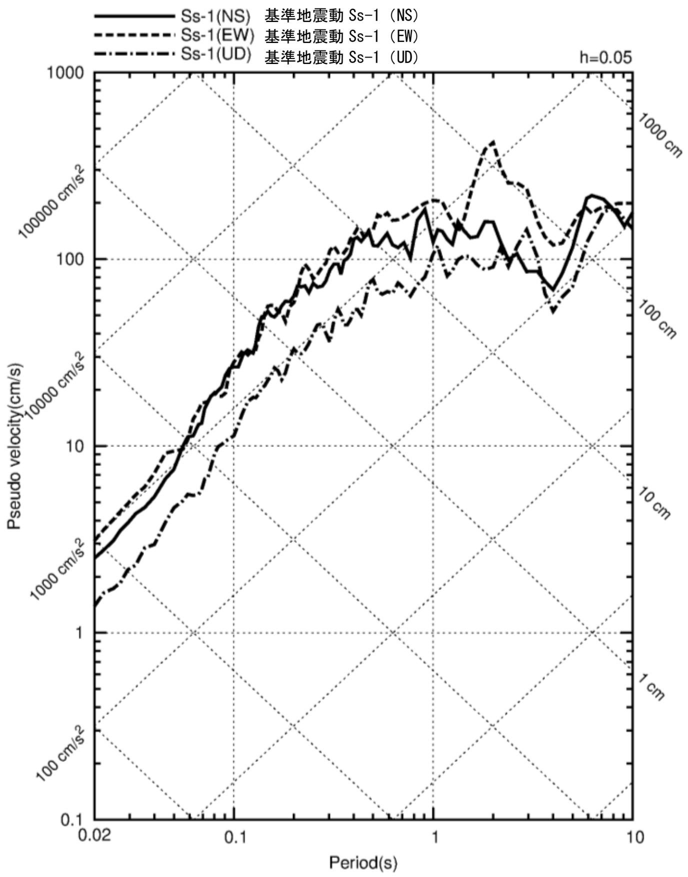
添付図 2-7　基準地震動 Ss-D の加速度波形



添付図 2-8　基準地震動 Ss-D の擬似速度応答スペクトル



添付図 2-9　基準地震動 Ss-1 の加速度波形



添付図 2-10　基準地震動 Ss-1 の擬似速度応答スペクトル

5. 設計方針

(1) 上部構造

上部構造は，基準地震動 Ss（Ss-D 及び Ss-1）の入力に対し短期許容応力度以内とする。また，層間変形角が 1/200 以下となることを確認する。本試設計例においては，上部構造の鉄骨部材が短期許容応力度に達すると考えられる層せん断力 20,000kN を許容限界とする。

(2) 免震装置

免震装置の許容限界を添付表 2-2 に示す。各免震装置は，基準地震動 Ss の入力に対して許容限界以内となることを確認する。

添付表 2-2　免震装置の許容限界

免震装置	評価項目	許容限界	備考
鉛入り積層ゴム	せん断ひずみ（%） ［水平変形］（mm）	250（線形限界） ［700］	国土交通大臣認定資料より設定
	圧縮応力度（N/mm^2）	30 （基準面圧の 2 倍以内）	
	引張応力度（N/mm^2）	1.0	
弾性すべり支承	水平変形（mm）	750	国土交通大臣認定資料より設定
	圧縮応力度（N/mm^2）	36 （基準面圧の 2 倍以内）	
鋼材ダンパー	水平変形（mm）	1,000	国土交通大臣認定資料より設定
	累積疲労損傷度	1.0 以下	

(3) 水平クリアランス

水平クリアランスは，基準地震動 Ss の入力に対し最大応答変位の 1.5 倍の水平離間距離を確保する。本試設計例では，鉛入り積層ゴムの許容水平変形 700mm に対して 1.5 倍以上となる 1,200m を水平クリアランスとして確保することとした。

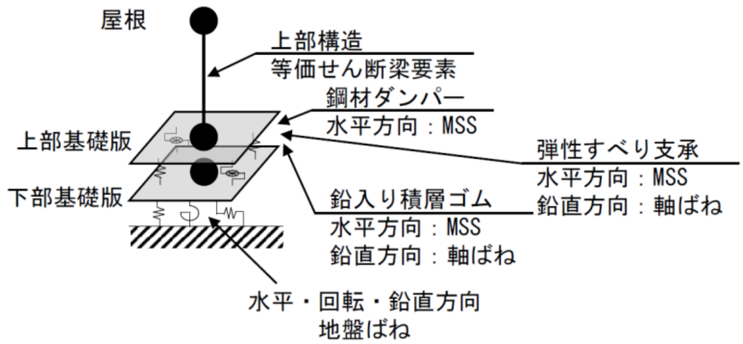
6. 地震応答解析

(1) 地震応答解析モデル

地震応答解析モデルを添付図 2-11 に示す。

上部架構は弾性とし，鉄骨部の水平剛性は曲げによる変形とせん断による変形をせん断変形に置き換えた等価せん断梁とする。水平方向の減衰は剛性比例の内部粘性減衰とし，減衰定数は上部基礎版固定時の水平方向 1 次固有周期に対して 2%とする。鉛直剛性は各柱の軸断面の合計から算出した軸ばねとし，鉛直方向の減衰は剛性比例の内部粘性減衰とし，減衰定数は地盤-免震層-上部架構連成系の鉛直方向 1 次固有周期に対して 2%とする。

また，下部基礎版底面に地盤ばねを設け，地震動は地盤ばねの外からの水平・鉛直同時入力とする。地盤のばねは，振動アドミッタンス理論により求めた振動数依存の複素ばねを「原子力発電所耐震設計技術指針 追補版 JEAG 4601-1991」に基づき設定する。



	階高 (m)	重量 (kN)	弾性剛性 (kN/m)		
			NS 方向	EW 方向	UD 方向
屋根		8,750			
	9.63		4.595×10^{5}	6.345×10^{5}	512.08×10^{5}
上部基礎版		51,000			
	3.4		—	—	—
下部基礎版		92,000			
	0.5		—	—	—
下部基礎底面（入力位置）		—			

添付図 2-11　免震型 SA 施設（軟岩サイト）の地震応答解析モデル

(2) 免震層のモデル化

免震層における鉛入り積層ゴム，弾性すべり支承及び鋼材ダンパーの非線形特性を以下に示す。いずれも，免震層の設計で標準的に用いられる 20℃時に対応したものである。

1) 鉛入り積層ゴム

計 8 基の鉛入り積層ゴム（φ1,400，ゴム総厚さ 280㎜）を，それぞれ修正バイリニア型にモデル化する。

鉛入り積層ゴムの特性を表す水平ばねに考慮する諸元を添付表 2-3 に示す。

添付表 2-3　鉛入り積層ゴム 1 基あたりの諸元

種類	積層ゴム部の断面積 Ar(㎜^{2})	鉛プラグの断面積 Ap(㎜^{2})	ゴム総厚 H(㎜)
φ1,400	1,468,695	70,686	280

添付表 2-4 に，低面圧時と基準面圧時の鉛入り積層ゴムの特性値を示す。本建屋では，鉛入り積層ゴムを低面圧（約 3N/㎜^{2}）で使用する。鉛入り積層ゴムは低面圧下では，基準面圧時と比較して，降伏後剛性 Kd は上昇し，降伏荷重特性値 Qd は低下する傾向にあることを考慮して，地震応答解析モデルにおいては低面圧時の値を採用する。メーカーによる確認試験に基づき，基準面圧時の値に対して低面圧時の降伏後剛性 Kd は 1.2 倍，降伏荷重特性値 Qd は 0.85 倍とする。

添付表 2-4　鉛入り積層ゴム 1 基あたりの特性値(Kd, Qd)

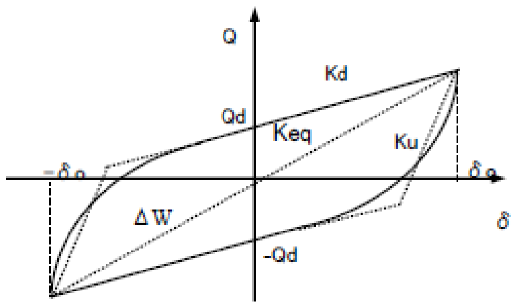
種類	面圧（ N/㎜^{2}）	降伏後剛性 Kd(kN･m)	降伏荷重特性値 Qd(kN)
φ1,400	低面圧 3	2,610 （下欄×1.2）	479.0 （下欄×0.85）
	基準面圧 15 （参考）	2,175	563.5

鉛入り積層ゴムの種々の振幅レベルにおける等価水平剛性を添付表 2-5 に示す。地盤ばねの減衰等を設定するための固有周期算定には，基準地震動 Ss 入力時の最大応答変位を想定し，等価な剛性がγ=150%程度であると仮定して算定する。また，鉛入り積層ゴムに与える非線形特性（水平）を添付図 2-12-1 に示す。

添付表 2-5　鉛入り積層ゴム１基あたりの等価剛性

種類	等価水平剛性 Keq(kN/m)			
	小振幅時 δ=2.8cm (γ=10%)	中振幅時 δ=28cm (γ=100%)	大振幅時 δ=46.6cm (γ=166.6%)	地盤ばね算定時 δ=42.0cm (γ=150%)
φ1,400	19,022	4,321	3,480	3,626

注）低面圧による補正考慮

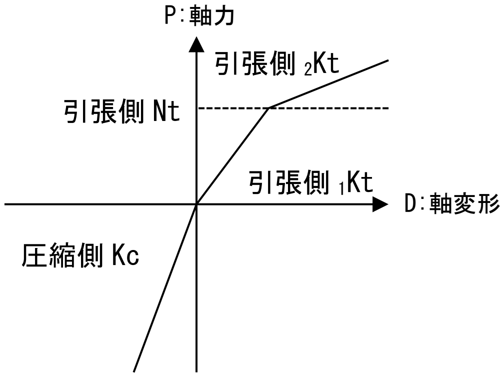


添付図 2-12-1　鉛入り積層ゴムに与える非線形特性（水平）

鉛入り積層ゴム 1 基あたりの鉛直ばねの諸元を添付表 2-6 に示し，鉛入り積層ゴムに与える非線形特性（鉛直）を添付図 2-12-2 に示す。天然ゴム系積層ゴムの既往の知見より，積層ゴムの引張特性には鉛入り積層ゴムの天然ゴム部分のみ寄与するとして，圧縮剛性の 1/10 と設定した。

添付表 2-6　鉛入り積層ゴム１基あたりの鉛直ばねの諸元

種類	鉛直剛性(kN/m)		
	圧縮側剛性 Kc	引張側剛性 $_1$Kt	引張側剛性 $_2$Kt
φ1,400	8.162×10^6	Kc/10	Kc/50



Nt:面圧 1N/mm² 相当軸力

添付図 2-12-2　鉛入り積層ゴムに与える非線形特性（鉛直）

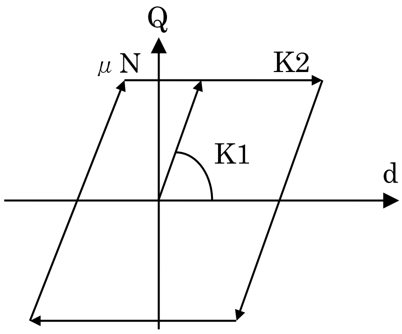
2) 弾性すべり支承

地震応答解析では，計 4 基の弾性すべり支承（低摩擦タイプ）をそれぞれ添付図 2-13 に示すように，弾性剛性を積層ゴムの剛性，摩擦力(摩擦係数 μ ×軸力 N)を超えると 2 次剛性となる非線形水平ばねにモデル化する。これにはバイリニア型の履歴特性を考慮する。解析に用いる諸元を添付表 2-7 に示す。

添付表 2-7　弾性すべり支承の水平ばねの諸元

種類	摩擦係数 μ	弾性剛性 K1 (kN/m)	2 次剛性 K2 (kN/m)
φ1,000	0.015	10,200	0

注）値は 1 基当たり



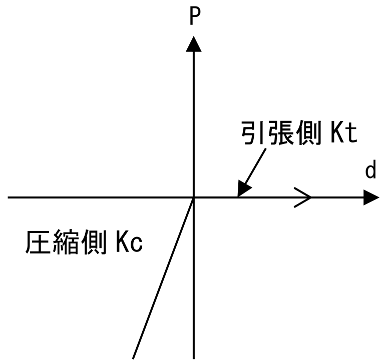
添付図 2-13　弾性すべり支承に与える非線形特性（水平）

弾性すべり支承の鉛直ばねの諸元を添付表 2-8 に，弾性すべり支承に与える非線形特性（鉛直）を添付図 2-14 に示す。

添付表 2-8　弾性すべり支承の鉛直ばねの諸元

種類	鉛直剛性(kN/m)	
	圧縮側剛性 Kc	引張側剛性 Kt
φ1,000	1.75×10^{7}	0

注）値は 1 基当たり



添付図 2-14　弾性すべり支承に与える非線形特性（鉛直）

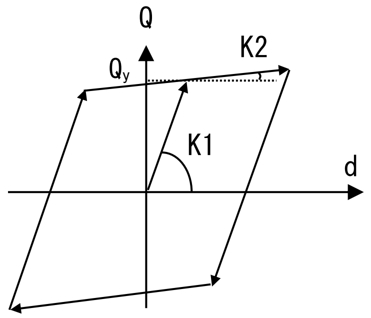
3）鋼材ダンパー

地震応答解析では，計 14 基の鋼材ダンパーをそれぞれ添付図 2-15 に示すように，弾性剛性を鋼材ダンパーの剛性，降伏荷重を鋼材ダンパーの降伏点とした非線形水平ばねにモデル化する。これにはバイリニア型の履歴特性を考慮する。解析に用いる諸元を添付表 2-9 に示す。

添付表 2-9　鋼材ダンパーの水平諸元

弾性剛性 K1 (kN/m)	2 次剛性 K2 (kN/m)	降伏荷重 Qy (kN)
11,600	196	432

注）値は 1 基当たり

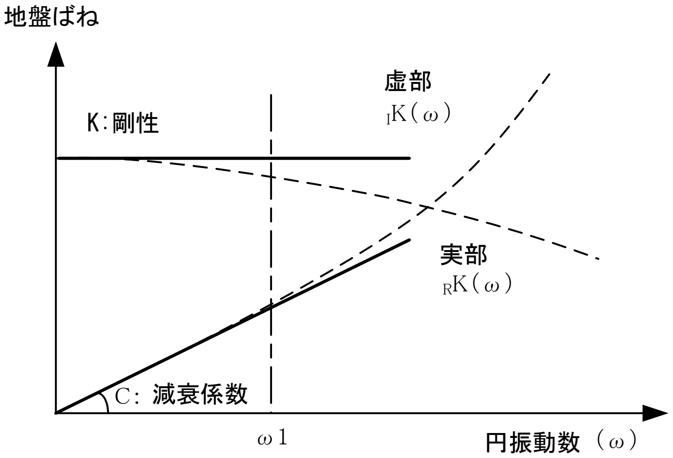


添付図 2-15　鋼材ダンパーに与える非線形特性

(3) 地盤モデル

下部基礎版下に設ける地盤のばねは，振動アドミッタンス理論により求めた振動数依存の複素ばねを「原子力発電所耐震設計技術指針 追補版 JEAG 4601-1991」に基づき，剛性は0Hzでの実部の値（静的ばね値）に，減衰係数は，免震層の標準特性での建屋－地盤連成モデルの一次固有振動数（※）での虚部の値と原点を結ぶ直線の傾きに，それぞれ近似する。地盤ばねの設定概念図を添付図2-16に示し，地盤ばねの算定結果を添付表2-10に示す。

注記（※）：水平については，免震層の水平ばねが地震時振幅レベル（せん断ひずみ γ＝150%）の等価剛性を用いた固有振動数とする。



添付図2-16　地盤ばねの設定概念図

添付表2-10　地盤ばね定数及び減衰係数

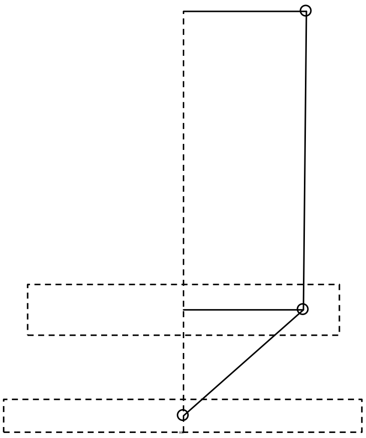
方向	成分	地盤ばね		減衰係数	
		ばね定数 （並進：N/m） （回転：N·m/rad）	採用 振動数 (Hz)	減衰係数 （並進：N·s/m） （回転：N·m·s/rad）	採用 振動数 (Hz)
NS方向	並進	9.834×10^{10}	0.00	1.449×10^{9}	0.44
	回転	4.957×10^{13}		4.088×10^{8}	
EW方向	並進	1.033×10^{10}	0.00	1.598×10^{9}	0.44
	回転	2.534×10^{13}		2.734×10^{8}	
鉛直方向	並進	1.446×10^{11}	0.00	3.473×10^{9}	13.11

(4) 固有値解析

固有値解析は，上部構造を弾性とし，刺激係数は最大変位の絶対値を 1.0 に規準化して算定する。水平方向では，下部基礎版を固定として，免震層の水平ばねが地震時振幅レベル（せん断ひずみγ＝150%）の等価線形値（等価剛性）をとる場合について実施する。また，鉛直方向では，建屋－地盤連成モデルとする。

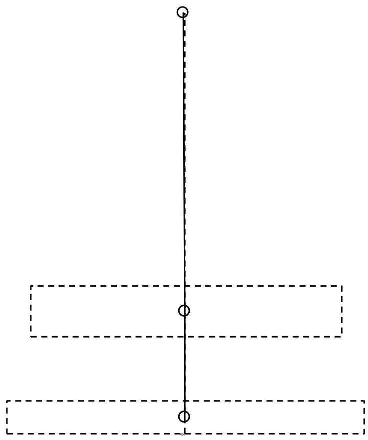
固有値解析の結果を添付図 2-17～添付図 2-19 に示す。

固有周期　T_1＝　2.270（s）
振 動 数　f_1＝　0.44（Hz）
刺激係数　β_1＝　1.013



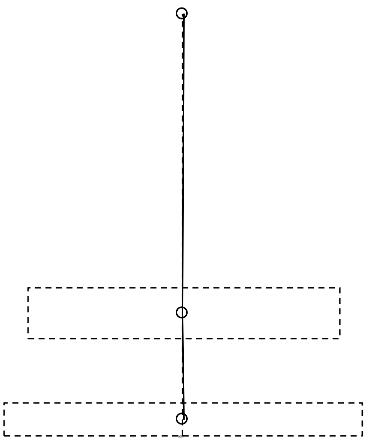
（a）　1次

固有周期　T_2＝　0.256（s）
振 動 数　f_2＝　3.91（Hz）
刺激係数　β_2＝　0.013



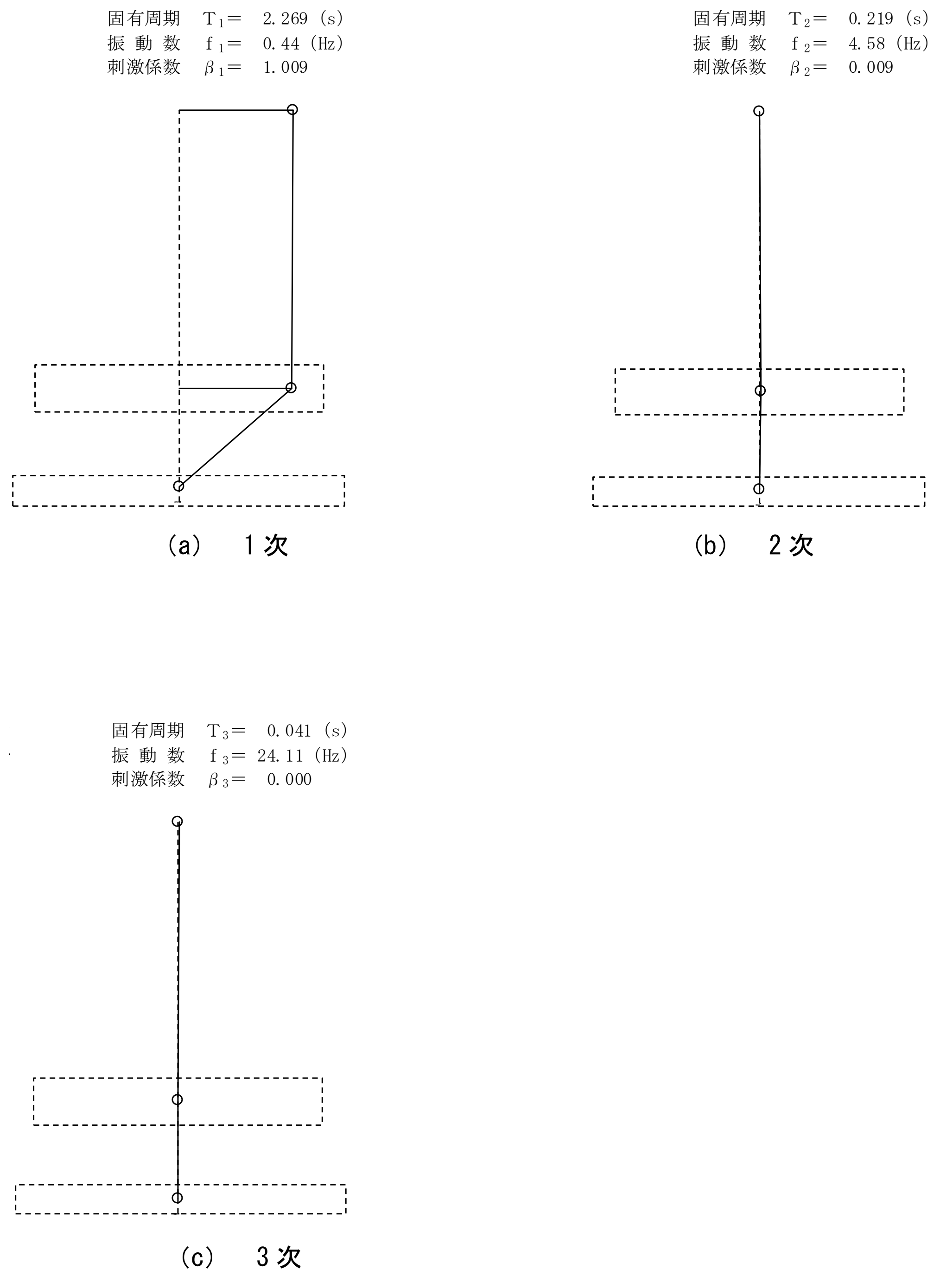
（b）　2次

固有周期　T_3＝　0.036（s）
振 動 数　f_3＝ 28.03（Hz）
刺激係数　β_3＝　0.999



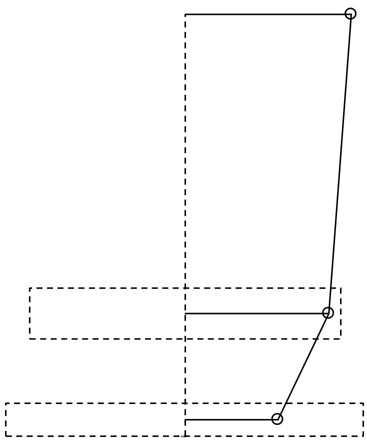
（c）　3次

添付図2-17　固有周期および固有モード（NS方向）



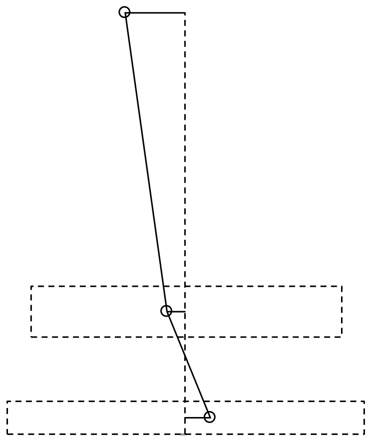
添付図 2-18　固有周期および固有モード（EW 方向）

固有周期　T_1＝　0.072 (s)
振 動 数　f_1＝ 13.89 (Hz)
刺激係数　β_1＝　1.374



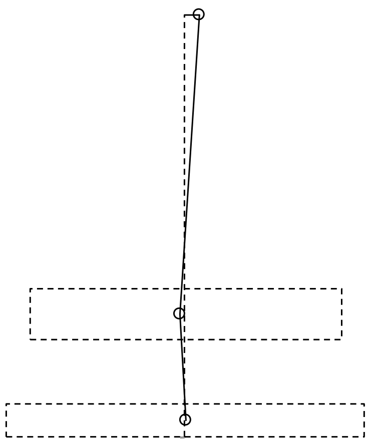
(a)　1次

固有周期　T_2＝　0.031 (s)
振 動 数　f_2＝ 31.85 (Hz)
刺激係数　β_2＝　0.501



(b)　2次

固有周期　T_3＝　0.023 (s)
振 動 数　f_3＝ 43.71 (Hz)
刺激係数　β_3＝　0.127



(c)　3次

添付図 2-19　固有周期および固有モード（鉛直方向）

(5) 免震装置の特性の不確かさ

地震応答解析においては，免震装置の特性の不確かさ（製造ばらつき，免震層の環境温度変化，経年変化）を考慮する。各パラメータの標準ケースに加え，剛性及び耐力が最大，最小となる組合せを選定して地震応答解析を実施する。

免震装置のパラメータの組合せを添付表 2-11 に免震装置の特性値の不確かさの設定を添付表 2-12 に示す。なお，環境温度変化の範囲については，建屋の建設が想定される地域の最低気温及び最高気温の統計より-5℃～32℃と設定した。

添付表 2-11　パラメータの組合せ

解析パラメータ		免震装置－σ 剛性最小 耐力最小	標準ケース 剛性標準 耐力標準	免震装置＋σ 剛性最大 耐力最大
鉛入り積層ゴム	降伏後剛性 Kd	－σ	標準	＋σ
	降伏荷重 Qd	－σ	標準	＋σ
弾性すべり支承	弾性剛性 K1	－σ	標準	＋σ
	摩擦係数 μ	－σ	標準	＋σ
鋼材ダンパー	弾性剛性 K1	－σ	標準	＋σ
	降伏荷重 Qy	－σ	標準	＋σ

添付表 2-12　免震装置の特性値の不確かさの設定

(1) 鉛入り積層ゴムの特性値の不確かさ

	鉛入り積層ゴム		根拠資料
	Kd	Qd	
製造ばらつき	-15%～+15%	-15%～+15%	国土交通大臣認定資料
温度変化	-4%～+7%	-10%～+25%	国土交通大臣認定資料
経年変化	0%～+10%	0%～+5%	国土交通大臣認定資料
計	-19%～+32%	-25%～+45%	―

(2) 弾性すべり支承の特性値の不確かさ

	弾性すべり支承		根拠資料
	K1	μ	
製造ばらつき	-30%～+30%	-50%～+50%	国土交通大臣認定資料
温度変化	-4%～+7%	0%	国土交通大臣認定資料
経年変化	0%～+10%	0%	国土交通大臣認定資料
計	-34%～+47%	-50%～+50%	―

(3) 鋼材ダンパーの特性値の不確かさ

	鋼材ダンパー		根拠資料
	K1	Q	
製造ばらつき	-10%～+10%	-10%～+10%	国土交通大臣認定資料
温度変化	0%	-3%～+3%	国土交通大臣認定資料
経年変化	0%	0%	国土交通大臣認定資料
計	-10%～+10%	-13%～+13%	―

(6) 地震応答解析結果

添付表 2-13 に示す解析ケースのうち，基準地震動 Ss-D については，水平 1 方向と鉛直方向の同時入力に対する地震応答解析結果を代表ケースとして，基準地震動 Ss-1 については，水平 2 方向と鉛直方向の 3 方向同時入力に対する地震応答解析結果を以下に示す。

基準地震動 Ss-D 及び基準地震動 Ss-1 に対する免震層及び上部構造の最大応答値を添付表 2-14 及び添付表 2-15 に示す。免震層及び上部構造の許容限界を満足している。

また，基準地震動 Ss-D 及び基準地震動 Ss-1 に対する最大応答加速度，最大応答水平変位及び最大応答せん断力の結果を添付図 2-20～添付図 2-33 に示す。水平動については，入力地震動の最大応答加速度(基準地震動 Ss-D:1,040m/s^2，基準地震動 Ss-1(NS):約 790m/s^2，基準地震動 Ss-1(EW):約 980m/s^2）に比べ，建屋上部（1F 及び RF）の応答加速度は大きく低減されている。

添付表 2-13　解析ケース

	入力地震動（基準地震動）	入力方向 長辺（NS）	入力方向 短辺（EW）	入力方向 鉛直	免震装置の特性値
標準ケース	Ss-D	○	―	―	標準
		―	○	―	標準
		―	―	○	標準
		○	―	○	標準
		―	○	○	標準
	Ss-1	○	○	○	標準
免震装置の特性値の不確かさの影響確認	Ss-D	○	―	○	+σ
		―	○	○	+σ
		○	―	○	−σ
		―	○	○	−σ
	Ss-1	○	○	○	+σ
		○	○	○	−σ

添付表 2-14　免震層及び上部構造の最大応答値（基準地震動 Ss-D）

【水平・鉛直同時入力の結果】

			標準ケース		免震装置の特性				許容限界
					＋σ		－σ		
			NS+UD	EW+UD	NS+UD	EW+UD	NS+UD	EW+UD	
鉛入り積層ゴム	面圧※（圧縮）(N/mm^2)		5.92	6.29	5.95	6.42	5.92	6.18	＜30.0
	面圧※（引張）(N/mm^2)		−0.10	−0.12	−0.08	−0.14	−0.09	−0.09	＞ -1.00
弾性すべり支承	面圧※（圧縮）(N/mm^2)		22.33	22.29	22.50	22.29	22.33	22.29	＜36.0
鋼材ダンパー	累積疲労損傷度		0.217	0.216	0.177	0.177	0.254	0.254	<1.000
免震層全体	最大変位(mm) (LRB せん断ひずみ)		470 (168%)	469 (168%)	416 (149%)	416 (149%)	552 (197%)	551 (197%)	<700 (<250%)
上部構造	最大層間変形角		1/796	1/1,262	1/588	1/1,005	1/985	1/1,743	< 1/200
	層せん断力 (×10^3kN)	NS 方向	5.18	−	7.01	−	4.18	−	20.0 (目安値)
		EW 方向	−	4.45	−	5.58	−	3.20	20.0 (目安値)

※：面圧は圧縮力を正，引張力を負とする

【水平単独入力と鉛直単独入力の組合せによる鉛入り積層ゴムの面圧算定結果】

（標準ケース）

		組合せ方法				同時入力（参考）	許容限界
		絶対値和	SRSS 法	組合せ係数法	時刻歴和		
面圧※（圧縮）(N/mm^2)	NS+UD	6.06	5.92	5.97	5.92	5.92	<30.0
	EW+UD	6.60	6.03	6.19	6.29	6.29	
面圧※（引張）(N/mm^2)	NS+UD	−0.46	−0.09	−0.21	−0.12	−0.10	>-1.0
	EW+UD	−0.74	−0.16	−0.33	−0.39	−0.12	

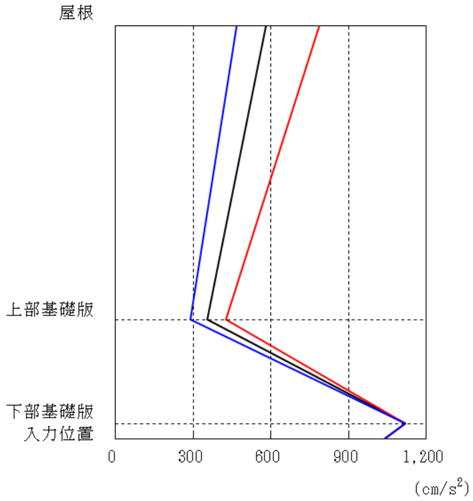
※：面圧は圧縮力を正，引張力を負とする

添付表 2-15　免震層及び上部構造の最大応答値（基準地震動 Ss-1：3 方向入力）

			標準ケース	免震装置の特性		許容限界
				+σ	−σ	
鉛入り積層ゴム	面圧※1（圧縮）（N/mm^2）		5.11	5.21	5.07	＜30.0
	面圧※1（引張）（N/mm^2）		0.61	0.71	0.80	＞-1.00
弾性すべり支承	面圧※1（圧縮）（N/mm^2）		18.17	18.16	18.20	＜36.0
鋼材ダンパー	累積疲労損傷度		0.056	0.041	0.066	<1.000
免震層全体	最大変位※2(mm) (LRB せん断ひずみ)		526 (188%)	398 (142%)	609 (217%)	<700 (<250%)
上部構造	最大層間変形角		1/1,061	1/937	1/1,444	< 1/200
	層せん断力 （$\times 10^3$kN）	NS 方向	3.88	4.39	2.85	20.0 （目安値）
		EW 方向	3.74	5.24	2.91	20.0 （目安値）

※1：面圧は圧縮力を正，引張力を負とする

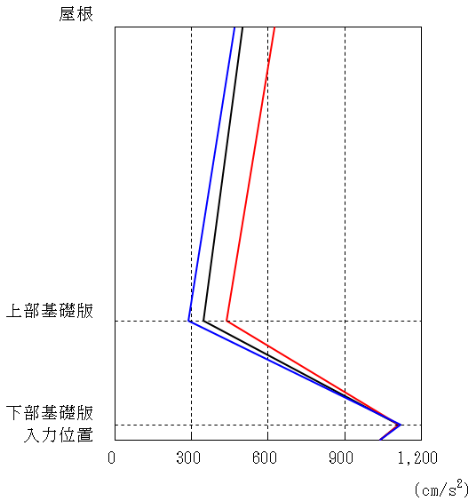
※2：免震層の最大変位は水平 2 方向の合成値



単位(cm/s^2)

高さ	標準ケース	免震装置の特性	
		+σ	-σ
屋根	581	786	469
上部基礎版	356	428	289
下部基礎版	1,118	1,118	1,118
入力位置	1,040	1,040	1,040

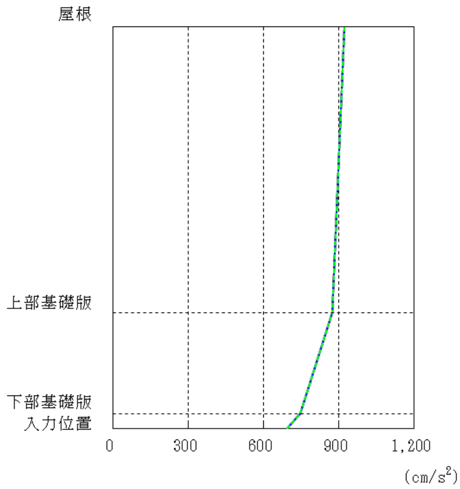
添付図 2-20　最大応答加速度（NS 方向）（Ss-D）



単位(cm/s^2)

高さ	標準ケース	免震装置の特性	
		+σ	-σ
屋根	498	625	358
上部基礎版	345	437	294
下部基礎版	1,112	1,112	1,112
入力位置	1,040	1,040	1,040

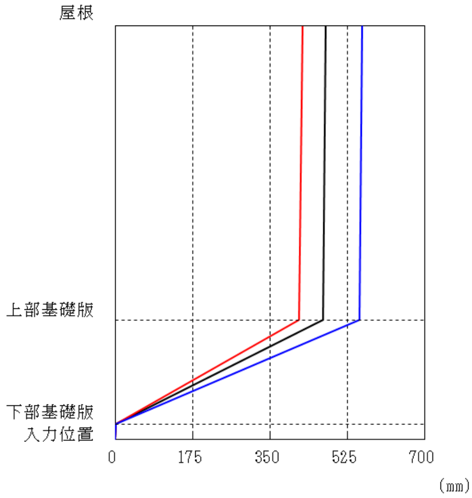
添付図 2-21　最大応答加速度（EW 方向）（Ss-D）



単位(cm/s²)

高さ	標準ケース		免震装置の特性			
			+σ		-σ	
	NS+UD	EW+UD	NS+UD	EW+UD	NS+UD	EW+UD
屋根	921	921	921	921	921	921
上部基礎版	875	874	874	872	874	874
下部基礎版	745	746	747	746	746	747
入力位置	693	693	693	693	693	693

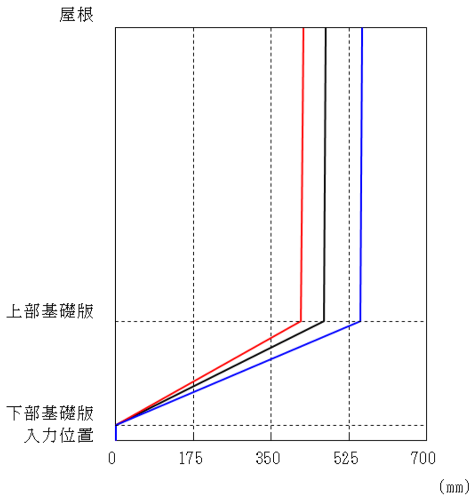
添付図 2-22　最大応答加速度（鉛直方向）（Ss-D）



単位(mm)

高さ	標準ケース	免震装置の特性	
		+σ	-σ
屋根	475	423	558
上部基礎版	469	415	551
下部基礎版	1	1	1
入力位置	0	0	0

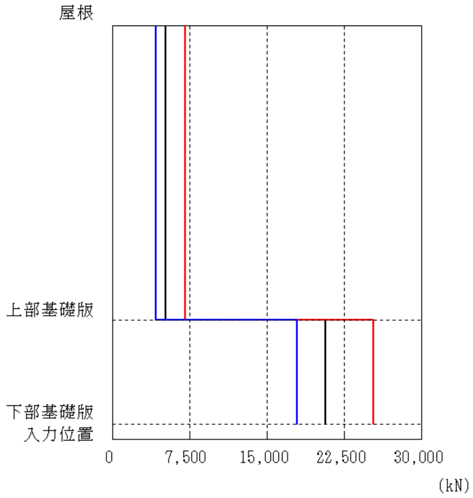
添付図 2-23　最大応答水平変位（NS 方向）（Ss-D）



単位(mm)

高さ	標準ケース	免震装置の特性	
		+σ	-σ
屋根	473	422	555
上部基礎版	469	416	551
下部基礎版	1	1	1
入力位置	0	0	0

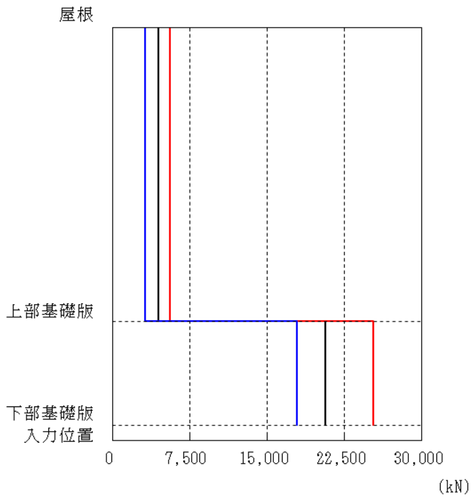
添付図 2-24　最大応答水平変位（EW 方向）（Ss-D）



単位(kN)

高さ	標準ケース	免震装置の特性	
		+σ	-σ
屋根	—	—	—
上部基礎版	5,177	7,005	4,182
下部基礎版	20,690	25,280	17,870
入力位置	—	—	—

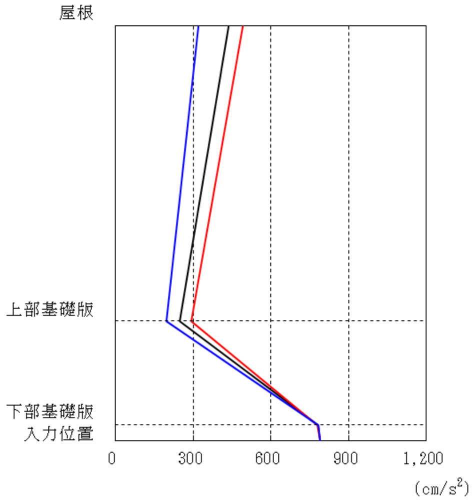
添付図 2-25　最大応答せん断力（NS 方向）（Ss-D）



単位(kN)

高さ	標準ケース	免震装置の特性	
		+σ	-σ
屋根	—	—	—
上部基礎版	4,445	5,578	3,197
下部基礎版	20,680	25,300	17,860
入力位置	—	—	—

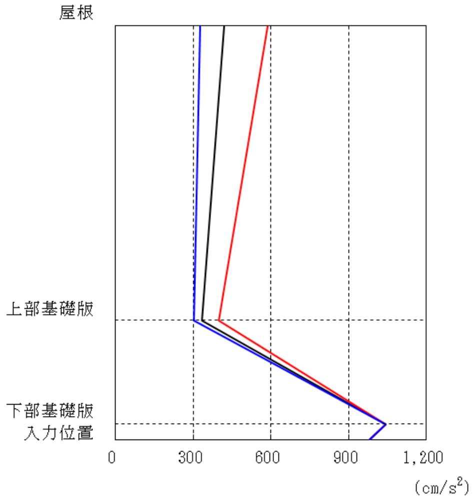
添付図 2-26　最大応答せん断力（EW 方向）（Ss-D）



単位(cm/s²)

高さ	標準ケース	免震装置の特性	
		+σ	-σ
屋根	435	493	320
上部基礎版	248	293	197
下部基礎版	784	780	782
入力位置	790	790	790

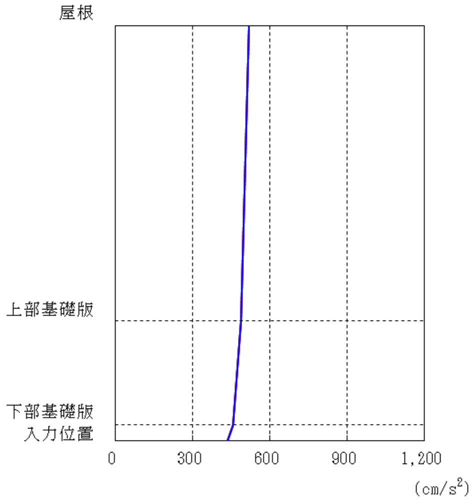
添付図 2-27　最大応答加速度（NS 方向）（Ss-1）



単位(cm/s²)

高さ	標準ケース	免震装置の特性	
		+σ	-σ
屋根	419	588	326
上部基礎版	335	400	301
下部基礎版	1,043	1,042	1,043
入力位置	980	980	980

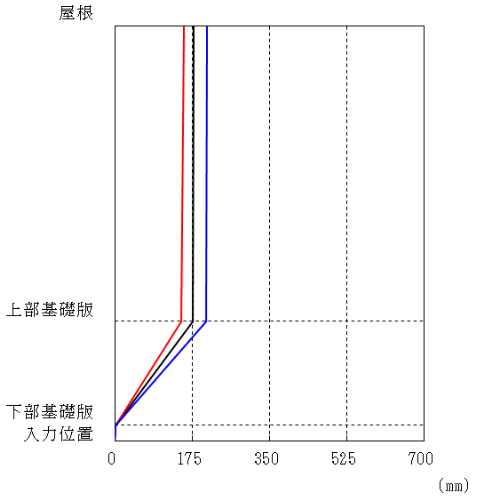
添付図 2-28　最大応答加速度（EW 方向）（Ss-1）



単位(cm/s^2)

高さ	標準ケース	免震装置の特性	
		+σ	-σ
屋根	518	518	518
上部基礎版	486	486	486
下部基礎版	455	455	455
入力位置	436	436	436

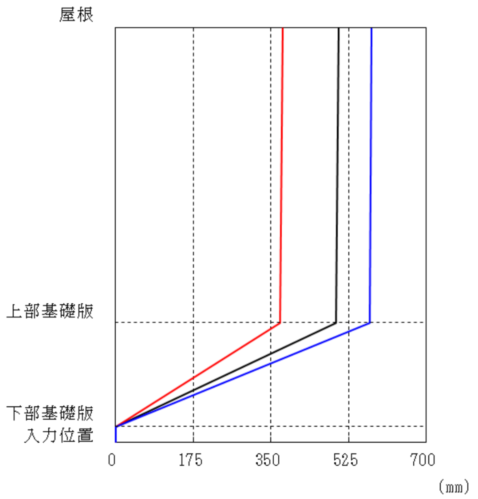
添付図 2-29　最大応答加速度（鉛直方向）（Ss-1）



単位(mm)

高さ	標準ケース	免震装置の特性	
		+σ	-σ
屋根	177	155	209
上部基礎版	175	150	207
下部基礎版	1	1	1
入力位置	0	0	0

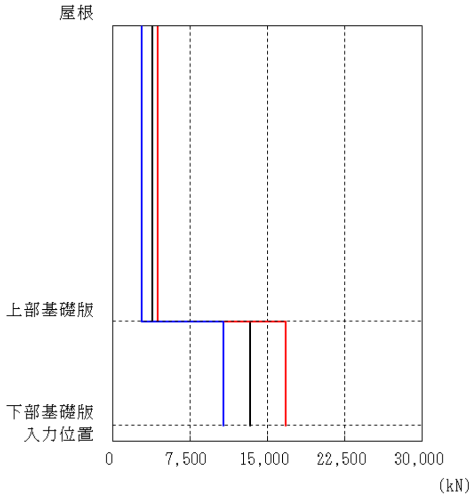
添付図 2-30　最大応答水平変位（NS 方向）（Ss-1）



単位(mm)

高さ	標準ケース	免震装置の特性	
		+σ	-σ
屋根	502	376	577
上部基礎版	496	370	573
下部基礎版	1	1	1
入力位置	0	0	0

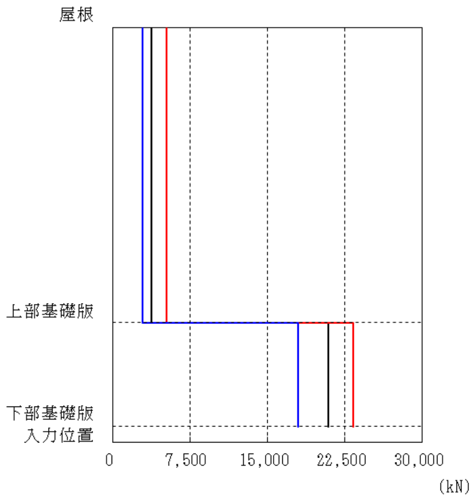
添付図 2-31　最大応答水平変位（EW 方向）（Ss-1）



単位(kN)

高さ	標準ケース	免震装置の特性	
		+σ	-σ
屋根	―	―	―
上部基礎版	3,878	4,394	2,850
下部基礎版	13,350	16,800	10,730
入力位置	―	―	―

添付図 2-32　最大応答せん断力（NS 方向）（Ss-1）



単位(kN)

高さ	標準ケース	免震装置の特性	
		+σ	-σ
屋根	―	―	―
上部基礎版	3,738	5,241	2,906
下部基礎版	20,880	23,320	18,000
入力位置	―	―	―

添付図 2-33　最大応答せん断力（EW 方向）（Ss-1）

7. 水平 2 方向入力の影響検討

(1) 検討条件

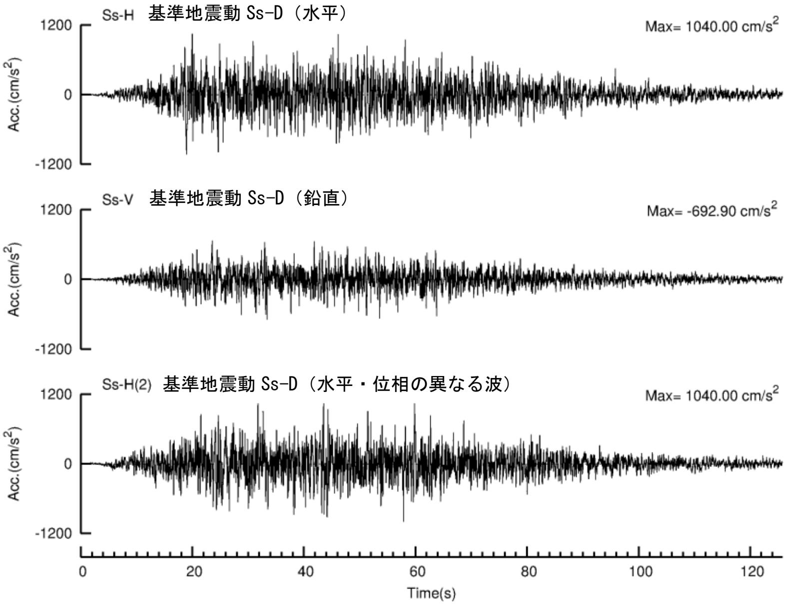
免震型 SA 施設（軟岩サイト）に対し，水平 2 方向入力の影響を検討する。

入力地震動は試設計に用いた基準地震動 Ss-D 及び Ss-1 について検討する。

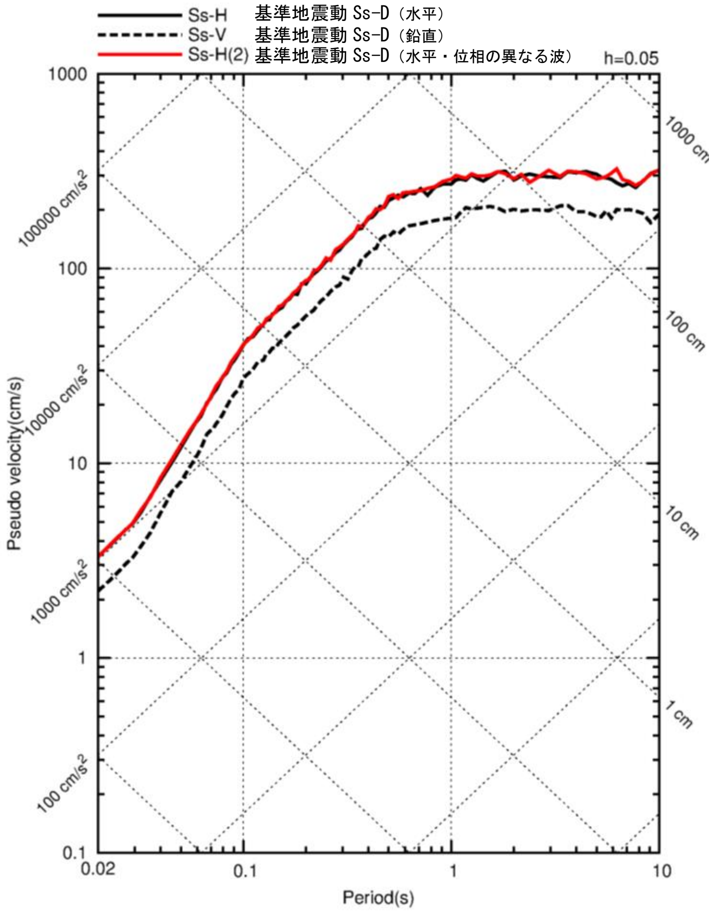
基準地震動 Ss-D は応答スペクトルにより設定したランダムな位相をもつ模擬地震波であるため，水平方向のもう一方の直交方向に作用する地震動は同じ応答スペクトルに適合した異なる乱数位相の模擬地震波を用い水平 2 方向と鉛直方向の 3 方向同時入力による解析を実施する。検討に用いる基準地震動 Ss-D を添付図 2-34 及び添付図 2-35 に示す。基準地震動 Ss-D の水平方向と直交方向に作用させる異なる乱数位相の模擬地震波との相関係数は 0.010 である。

基準地震動 Ss-1 は断層モデルを用いた手法による地震動のため，3 方向入力による検討を基本としている。本検討では，水平 1 方向と鉛直方向の入力に対する解析を実施し，3 方向入力との違いを検討する。

地震応答解析モデルは，試設計で用いたモデルと同じとし，免震装置の特性値は標準ケースを用いる。



添付図 2-34　基準地震動 Ss-D の加速度波形



添付図 2-35　基準地震動 Ss-D の擬似速度応答スペクトル

(2) 地震応答解析結果

水平 2 方向入力の影響検討の地震応答解析結果について，免震層及び上部構造の最大応答値を添付表 2-16 に示す。免震層及び上部構造の応答は許容限界を満足している。

また，添付図 2-36～添付図 2-42 に最大応答加速度，最大応答水平変位及び最大応答せん断力の結果を示す。免震層の層間変位のオービットを添付図 2-43～添付図 2-44 に示す。

水平 2 方向入力を考慮した場合，水平 1 方向入力に比べて免震層への入力エネルギー量が大きくなるため剛性が低下し免震層の変位が大きい結果となった。水平 2 方向入力を考慮した場合の上部構造の応答の変化については，スペクトル波と断層波で傾向が異なり，これは入力地震動の位相の違いにより，免震層の剛性低下の経時変化の様子が異なるためと考えられる。

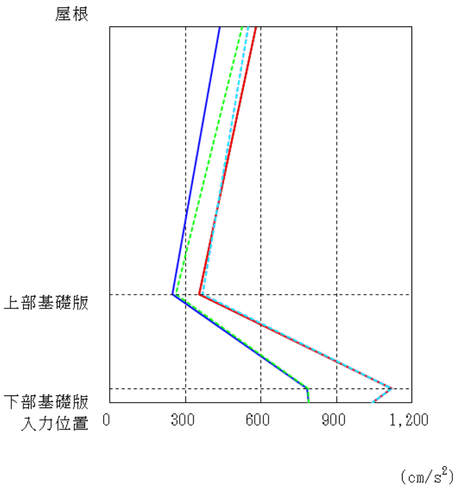
添付表 2-16　免震層及び上部構造の最大応答値

（水平 2 方向入力の影響検討）

			標準ケース			水平 2 方向入力の影響検討			許容限界
			Ss-D		Ss-1	Ss-D	Ss-1		
			NS+UD	EW+UD	NS+EW+UD	NS+EW+UD	NS+UD	EW+UD	
鉛入り積層ゴム	面圧※1（圧縮）(N/mm^2)		5.92	6.29	5.11	6.09	5.12	5.15	<30.0
	面圧※1（引張）(N/mm^2)		-0.10	-0.12	0.61	-0.13	0.87	0.62	> -1.00
弾性すべり支承	面圧※1（圧縮）(N/mm^2)		22.33	22.29	18.17	22.33	18.36	18.15	<36.0
鋼材ダンパー	累積疲労損傷度		0.217	0.216	0.056	0.213	0.023	0.067	<1.000
免震層全体	最大変位※2(mm) (LRB せん断ひずみ)		470 (168%)	469 (168%)	526 (188%)	556 (198%)	166 (59%)	497 (177%)	<700 (<250%)
上部構造	最大層間変形角		1/796	1/1,262	1/1,061	1/839	1/876	1/1,304	< 1/200
	層せん断力 ($\times 10^3$kN)	NS 方向	5.18	-	3.88	4.91	4.70	-	<20.0 (目安値)
		EW 方向	-	4.45	3.74	3.55	-	4.28	<20.0 (目安値)

※1：面圧は圧縮力を正，引張力を負とする

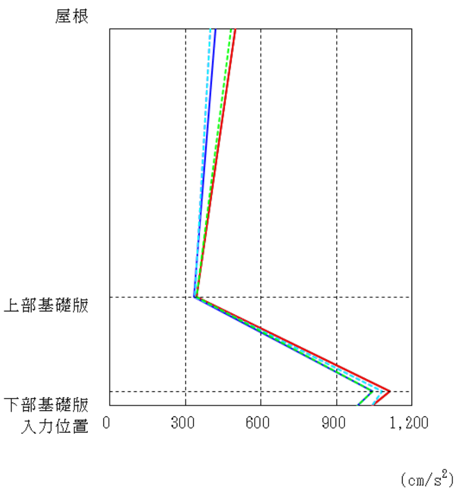
※2：免震層の最大変位は水平 2 方向の合成値



単位(cm/s²)

高さ	標準ケース			水平2方向入力の影響検討		
	Ss-D		Dd-1	Ss-D		Ss-1
	NS	NS+UD	NS+EW+UD	NS+EW	NS+EW+UD	NS+UD
屋根	581	581	435	551	551	527
上部基礎版	356	356	248	367	367	261
下部基礎版	1,118	1,118	784	1,118	1,118	786
入力位置	1,040	1,040	790	1,040	1,040	790

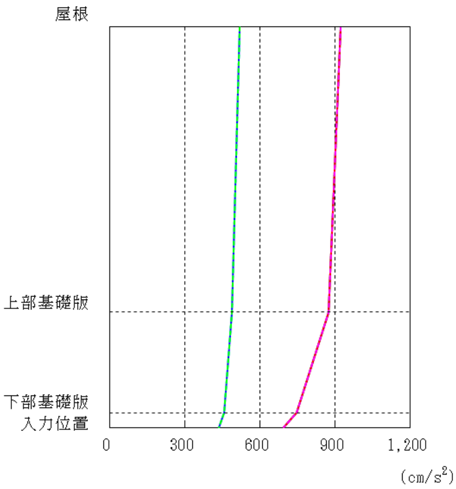
添付図 2-36　最大応答加速度（NS 方向）
（水平 2 方向入力の影響検討）



単位(cm/s²)

高さ	標準ケース			水平2方向入力の影響検討		
	Ss-D		Dd-1	Ss-D		Ss-1
	EW	EW+UD	NS+EW+UD	NS+EW	NS+EW+UD	EW+UD
屋根	498	498	419	398	398	480
上部基礎版	345	345	335	338	338	343
下部基礎版	1,112	1,112	1,043	1,081	1,081	1,043
入力位置	1,040	1,040	980	1,040	1,040	980

添付図 2-37　最大応答加速度（EW 方向）
（水平 2 方向入力の影響検討）



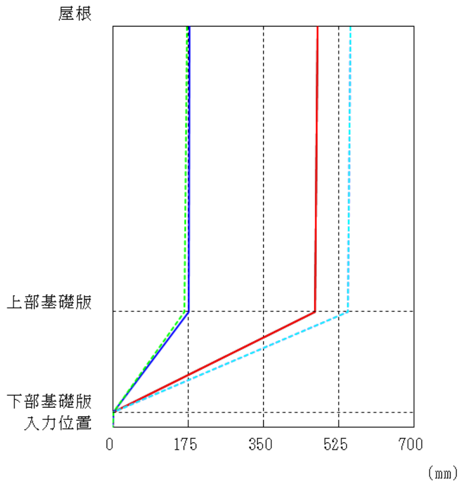
単位(cm/s^2)

高さ	標準ケース			水平2方向入力の影響検討		
	Ss-D		Dd-1	Ss-D		Ss-1
	NS+UD	EW+UD	NS+EW+UD	NS+EW+UD	NS+UD	EW+UD
屋根	921	921	518	921	518	518
上部基礎版	875	874	486	872	486	486
下部基礎版	745	746	455	746	455	455
入力位置	693	693	436	693	436	436

添付図 2-38　最大応答加速度（鉛直方向）
（水平 2 方向入力の影響検討）

単位（mm）

高さ	標準ケース			水平2方向入力の影響検討		
	Ss-D		Dd-1	Ss-D		Ss-1
	NS	NS+UD	NS+EW+UD	NS+EW	NS+EW+UD	NS+UD
屋根	475	475	177	552	552	172
上部基礎版	469	469	175	546	546	166
下部基礎版	1	1	1	1	1	1
入力位置	0	0	0	0	0	0

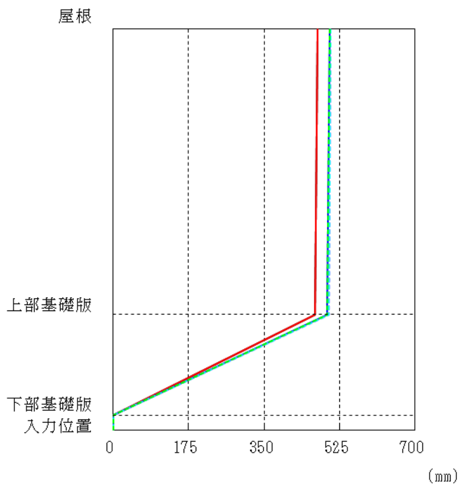


添付図 2-39　最大応答水平変位（NS 方向）

（水平 2 方向入力の影響検討）

単位（mm）

高さ	標準ケース			水平2方向入力の影響検討		
	Ss-D		Dd-1	Ss-D		Ss-1
	EW	EW+UD	NS+EW+UD	NS+EW	NS+EW+UD	EW+UD
屋根	473	473	502	503	503	502
上部基礎版	469	469	496	499	499	496
下部基礎版	1	1	1	1	1	1
入力位置	0	0	0	0	0	0

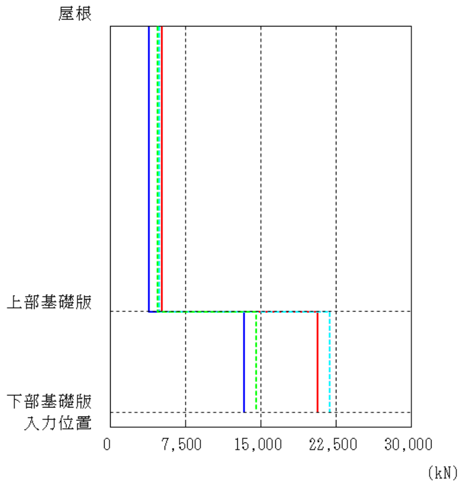


添付図 2-40　最大応答水平変位（EW 方向）

（水平 2 方向入力の影響検討）

単位(kN)

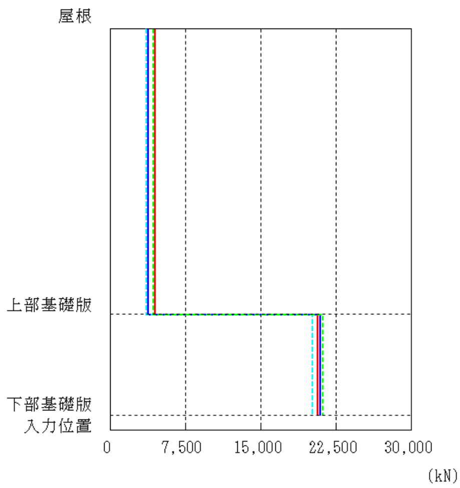
高さ	標準ケース			水平2方向入力の影響検討		
	Sa-D		Dd-1	Ss-D		Ss-1
	NS	NS+UD	NS+EW+UD	NS+EW	NS+EW+UD	NS+UD
屋根	—	—	—	—	—	—
上部基礎版	5,177	5,177	3,878	4,912	4,912	4,697
下部基礎版	20,690	20,690	13,350	21,900	21,900	14,530
入力位置	—	—	—	—	—	—



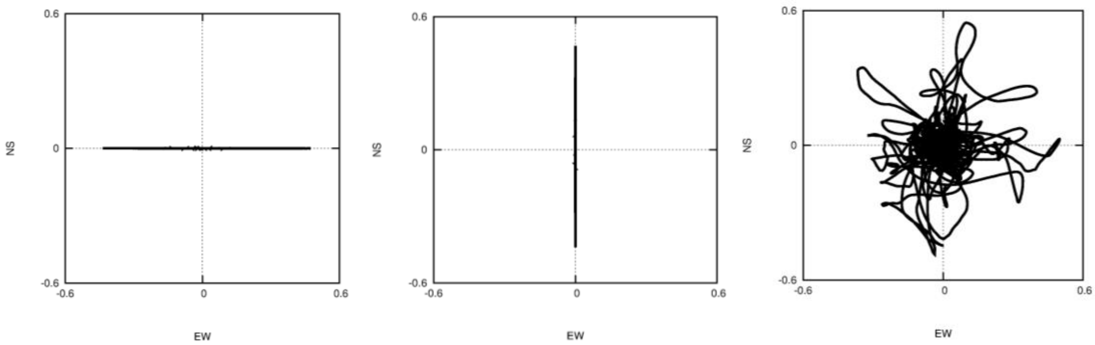
添付図 2-41　最大応答せん断力（NS 方向）
（水平 2 方向入力の影響検討）

単位(kN)

高さ	標準ケース			水平2方向入力の影響検討		
	Ss-D		Dd-1	Ss-D		Ss-1
	EW	EW+UD	NS+EW+UD	NS+EW	NS+EW+UD	EW+UD
屋根	—	—	—	—	—	—
上部基礎版	4,445	4,445	3,738	3,550	3,550	4,277
下部基礎版	20,680	20,680	20,880	20,140	20,140	21,220
入力位置	—	—	—	—	—	—

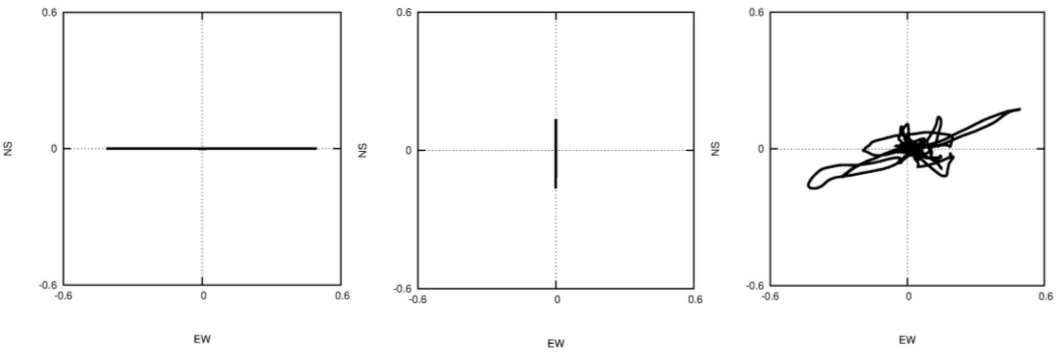


添付図 2-42　最大応答せん断力（EW 方向）
（水平 2 方向入力の影響検討）



(1) NS+UD 入力　　(2) EW+UD 入力　　(3) NS+EW+UD 入力

添付図 2-43　免震層の層間変位のオービット（Ss-D）（単位：m）
（水平 2 方向入力の影響検討）



(1) NS+UD 入力　　(2) EW+UD 入力　　(3) NS+EW+UD 入力

添付図 2-44　免震層の層間変位のオービット（Ss-1）（単位：m）
（水平 2 方向入力の影響検討）

8. 繰返し変形による免震装置の特性変化の影響検討

(1) 検討条件

繰返し変形による免震装置の特性変化について検討する。検討対象は，免震装置のうち鉛入り積層ゴム及び鋼材ダンパーとする。基準地震動 Ss-D 及び基準地震動 Ss-1 に対する標準ケースの入力条件に対し検討を実施する。

繰返し変形による特性変化の評価は，特性変化を考慮しない標準ケースの解析結果に基づいて，鉛入り積層ゴムは累積吸収エネルギー量から，鋼材ダンパーは累積変形量から特性変化後の等価な降伏荷重を設定する簡易応答評価法(※)を用いて実施した。

繰返し変形による特性変化を添付表 2-17 及び添付表 2-18 に示す。

注記(※)：参考資料

・日本建築センター評定書「長周期地震動に対する免震材料の性能変化（オイレス式鉛プラグ挿入型積層ゴム支承)」BJC 評定 IB0013-01

・日本建築センター評定書「長周期地震動に対する免震材料の性能変化（新日鉄住金エンジニアリング式 U 型ダンパー)」BJC 評定 IB0019-01

添付表 2-17　繰返し変形による特性変化（基準地震動 Ss-D）

(1) 鉛入り積層ゴム

解析ケース（解析方向）	NS+UD	EW+UD
降伏荷重 Qd（kN）	479.0	479.0
累積吸収エネルギー量（×10^3kN・m）	8.09	8.10
降伏応力度比率 k	0.620	0.619
特性変化後の降伏荷重 Qd’（＝k・Qd）（kN）	297.0	296.6

(2) 鋼材ダンパー

解析ケース（解析方向）	NS+UD	EW+UD
降伏荷重 Qd（kN）	432.0	432.0
累積変形量（m）	25.76	25.82
低減係数 α	0.871	0.871
特性変化後の降伏荷重 Qd’（＝α・Qd）（kN）	376.4	376.2

添付表 2-18　繰返し変形による特性変化（基準地震動 Ss-1）

(1) 鉛入り積層ゴム

解析ケース（解析方向）	NS+EW+UD
降伏荷重 Qd（kN）	479.0
累積吸収エネルギー量（×10^3kN・m）	2.99
降伏応力度比率 k	0.965
特性変化後の降伏荷重 Qd’（＝k・Qd）（kN）	462.2

(2) 鋼材ダンパー

解析ケース（解析方向）	NS+EW+UD
降伏荷重 Qd（kN）	432.0
累積変形量（m）	14.69
低減係数 α	0.927
特性変化後の降伏荷重 Qd’（＝α・Qd）（kN）	400.3

(2) 地震応答解析結果

繰返し変形による免震装置の特性変化に関する影響検討の地震応答解析結果について，免震層及び上部構造の最大応答値を添付表 2-19 に示す。免震層及び上部構造の応答は許容限界を満足している。添付図 2-45～添付図 2-51 に最大応答加速度，最大応答水平変位及び最大応答せん断力の結果を示す。

繰返し変形による免震装置の特性変化を考慮した場合，鉛入り積層ゴム及び鋼材ダンパーの降伏耐力が低下するため，上部構造の加速度及び層間変形角，層せん断力は小さくなり，免震層の最大応答変位は大きくなった。

添付表 2-19　免震層及び上部構造の最大応答値

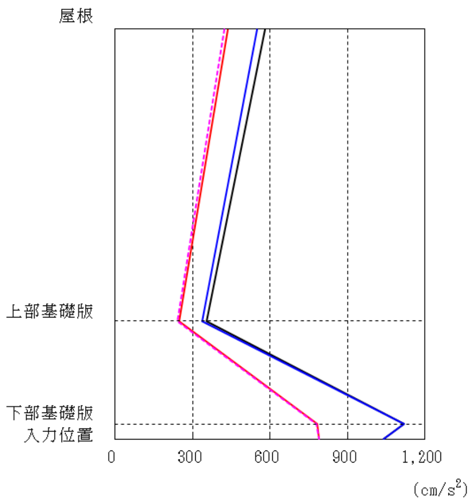
（繰返し変形の影響検討）

			標準ケース			繰返し変形の影響検討			許容限界
			Ss-D		Ss-1	Ss-D		Ss-1	
			NS+UD	EW+UD	NS+EW+UD	NS+UD	EW+UD	NS+EW+UD	
鉛入り積層ゴム	面圧※（圧縮）(N/mm^2)		5.92	6.29	5.11	5.92	6.18	5.09	<30.0
	面圧※（引張）(N/mm^2)		-0.10	-0.12	0.61	-0.09	-0.09	0.63	> -1.00
弾性すべり支承	面圧※（圧縮）(N/mm^2)		22.33	22.29	18.17	22.32	22.29	18.17	＜36.0
鋼材ダンパー	累積疲労損傷度		0.217	0.216	0.056	0.245	0.245	0.056	<1.000
免震層全体	最大変位(mm)（LRB せん断ひずみ）		470（168%）	469（168%）	526（188%）	549（196%）	546（195%）	551（197%）	<700（<250%）
上部構造	最大層間変形角		1/796	1/1,262	1/1,061	1/841	1/1,432	1/1,087	< 1/200
	層せん断力（×10^{3}kN）	NS 方向	5.18	–	3.88	4.90	–	3.78	20.0（目安値）
		EW 方向	–	4.45	3.74	–	3.89	3.60	20.0（目安値）

※：面圧は圧縮力を正，引張力を負とする

単位(cm/s²)

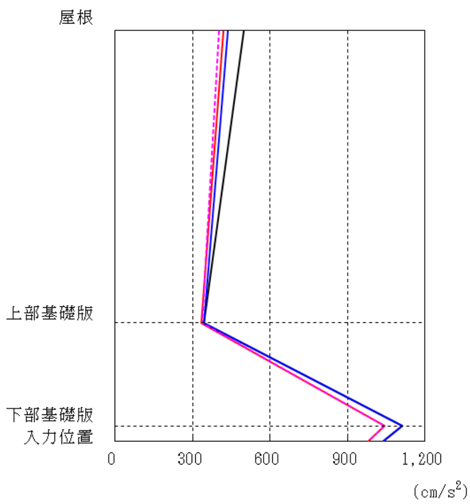
高さ	標準ケース		繰返し変形の影響検討	
	Ss-D	Ss-1	Ss-D	Ss-1
	NS+UD	NS+EW+UD	NS+UD	NS+EW+UD
屋根	581	435	549	424
上部基礎版	356	248	337	241
下部基礎版	1,118	784	1,118	781
入力位置	1,040	790	1,040	790



添付図 2-45　最大応答加速度（NS 方向）
（繰返し変形の影響検討）

単位(cm/s²)

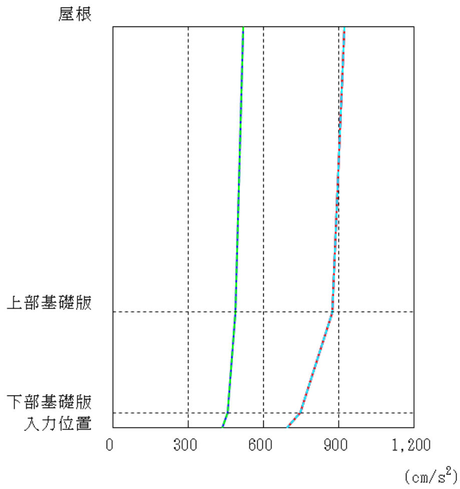
高さ	標準ケース		繰返し変形の影響検討	
	Ss-D	Ss-1	Ss-D	Ss-1
	EW+UD	NS+EW+UD	EW+UD	NS+EW+UD
屋根	498	419	437	403
上部基礎版	345	335	344	339
下部基礎版	1,112	1,043	1,112	1,043
入力位置	1,040	980	1,040	980



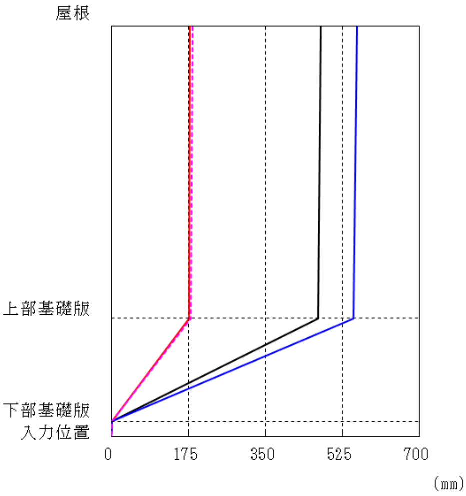
添付図 2-46　最大応答加速度（EW 方向）
（繰返し変形の影響検討）

単位(cm/s²)

高さ	標準ケース			繰返し変形の影響検討		
	Ss-D		Ss-1	Ss-D		Ss-1
	NS+UD	EW+UD	NS+EW+UD	NS+UD	EW+UD	NS+EW+UD
屋根	921	921	518	921	921	518
上部基礎版	875	874	486	874	874	486
下部基礎版	745	746	455	745	747	455
入力位置	693	693	436	693	693	436



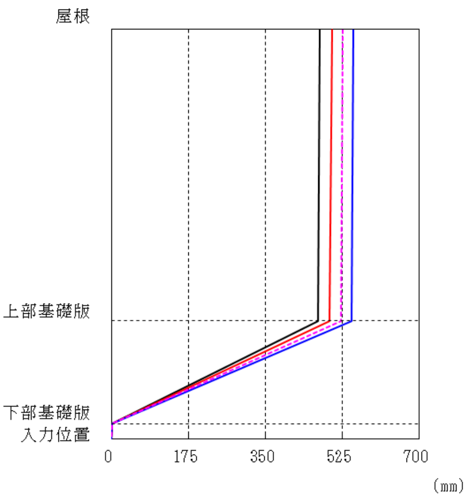
添付図 2-47　最大応答加速度（鉛直方向）
（繰返し変形の影響検討）



単位(mm)

高さ	標準ケース		繰返し変形の影響検討	
	Ss-D	Ss-1	Ss-D	Ss-1
	NS+UD	NS+EW+UD	NS+UD	NS+EW+UD
屋根	475	177	557	183
上部基礎版	469	175	549	181
下部基礎版	1	1	1	1
入力位置	0	0	0	0

添付図 2-48　最大応答水平変位（NS 方向）
（繰返し変形の影響検討）



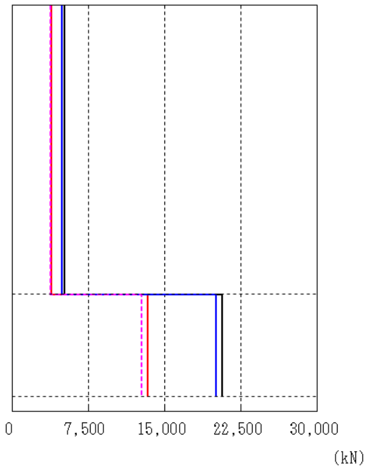
単位(mm)

高さ	標準ケース		繰返し変形の影響検討	
	Ss-D	Ss-1	Ss-D	Ss-1
	EW+UD	NS+EW+UD	EW+UD	NS+EW+UD
屋根	473	502	549	526
上部基礎版	469	496	546	521
下部基礎版	1	1	1	1
入力位置	0	0	0	0

添付図 2-49　最大応答水平変位（EW 方向）
（繰返し変形の影響検討）

単位(kN)

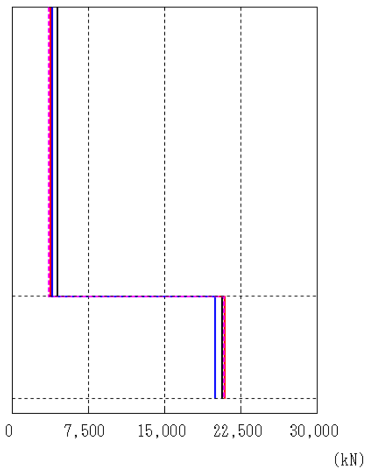
高さ	標準ケース		繰返し変形の影響検討	
	Ss-D	Ss-1	Ss-D	Ss-1
	NS+UD	NS+EW+UD	NS+UD	NS+EW+UD
屋根	—	—	—	—
上部基礎版	5,177	3,878	4,900	3,784
下部基礎版	20,690	13,350	20,030	12,760
入力位置	—	—	—	—



添付図 2-50　最大応答せん断力（NS 方向）
（繰返し変形の影響検討）

単位(kN)

高さ	標準ケース		繰返し変形の影響検討	
	Ss-D	Ss-1	Ss-D	Ss-1
	EW+UD	NS+EW+UD	EW+UD	NS+EW+UD
屋根	—	—	—	—
上部基礎版	4,445	3,738	3,894	3,597
下部基礎版	20,680	20,880	19,960	20,850
入力位置	—	—	—	—



添付図 2-51　最大応答せん断力（EW 方向）
（繰返し変形の影響検討）

9. ロッキング応答の影響検討

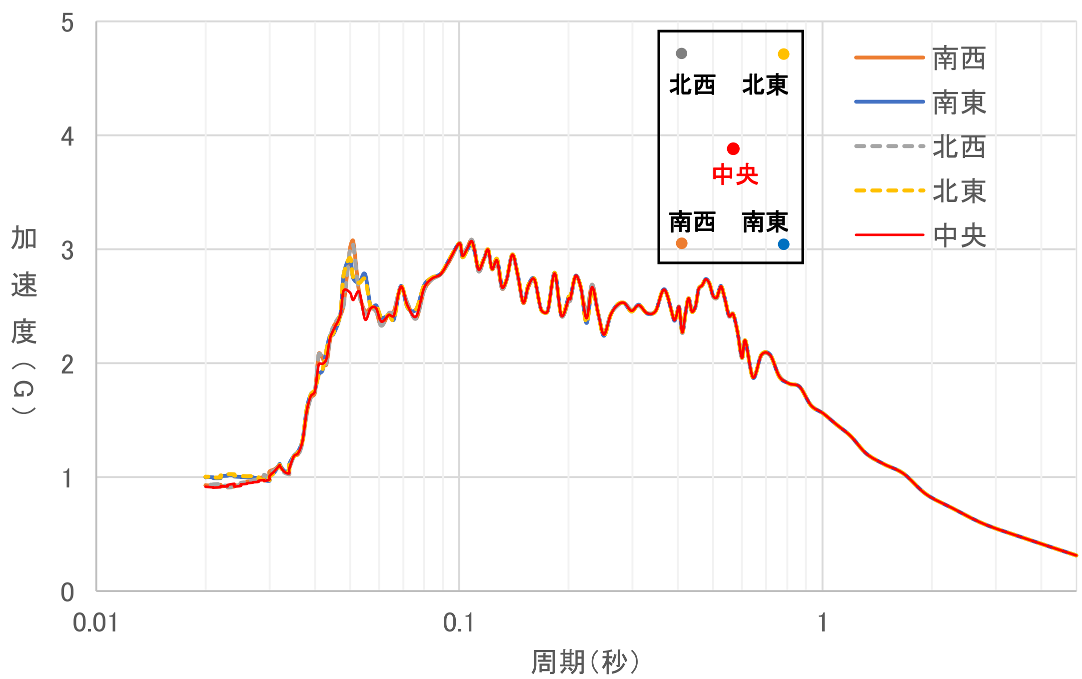
(1) 検討条件

建屋のロッキング応答の影響を検討するため，上部基礎版上の鉛直応答を比較する。基準地震動 Ss-D の入力に対して，水平方向（EW）及び鉛直方向の同時入力解析結果より算定した上部基礎版の中央位置と四隅の鉛入り積層ゴム位置での鉛直応答を比較する。

(2) 地震応答解析結果

添付図 2-52 に標準ケースにおける基準地震動 Ss-D 入力時の上部基礎版の鉛直方向の加速度応答スペクトルを示す。

添付図 2-52 の加速度床応答スペクトルから，0.05～0.06 秒付近に四隅の位置では，中央位置ではみられないピークが生じている。これは水平方向入力により，建屋のロッキング挙動が生じた影響と考えられる。機器・配管系の設計においては，このロッキング挙動による鉛直応答が影響する可能性があり，機器・配管系の配置や固有周期を考慮し，必要に応じてロッキング挙動の影響を設計に反映することが考えられる。



添付図 2-52　上部基礎版の鉛直方向の加速度応答スペクトル
（減衰 2.0%，Ss-D（EW+UD 同時入力），ロッキング応答の影響検討）

10. まとめ

せん断波速度が約 700m/s の軟質岩盤に設置された免震型 SA 施設について試設計検討を行い，主に免震装置（鉛入り積層ゴム，弾性すべり支承及び鋼材ダンパー）についての試設計例を示した。基準地震動 Ss（Ss-D 及び Ss-1）に対し，免震層及び上部構造の応答が設定した許容値を満足することを確認した。

また，水平 2 方向入力の影響検討，繰返し変形による免震装置の特性変化に関する影響検討を実施し，基準地震動 Ss に対する応答が設定した許容値を満足することを確認した。

さらに，ロッキング応答の影響検討を行い，機器・配管系の設計に対するロッキング挙動による鉛直応答の影響を確認した。

発行者：原子力エネルギー協議会

問合せ先 contact@atena-j.jp