

免震構造に対する原子力エネルギー協議会 (ATENA) の取組状況について

(重大事故等対処施設免震構造設計ガイドラインの検討)

原子力エネルギー協議会
2020年7月

1 ATENA重大事故等対処施設免震構造設計ガイドラインの検討経緯

1. 2018年9月に、ATENA内において、「SA設備を収納する建屋の免震設計ガイドライン」の策定がテーマとして決定

【背景】

- 免震構造は、建物と地盤との間に免震装置を設置し、建物に揺れが直接伝わらないようにした構造であり、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、免震構造は短周期成分を低減して影響を受けにくくする振動特性を有している。
- 発電用原子炉施設においては、免震構造の認可実績がないことから、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。

2. 2018年12月、上記テーマを検討するために、「建屋免震ワーキンググループ」を発足、設計ガイドラインの策定を開始した

【建屋免震ワーキンググループメンバー構成】

ATENA、中部電力、東京電力HD、関西電力、東芝ESS、日立GE、三菱重工業、電中研、大林組、鹿島建設、清水建設、大成建設、竹中工務店

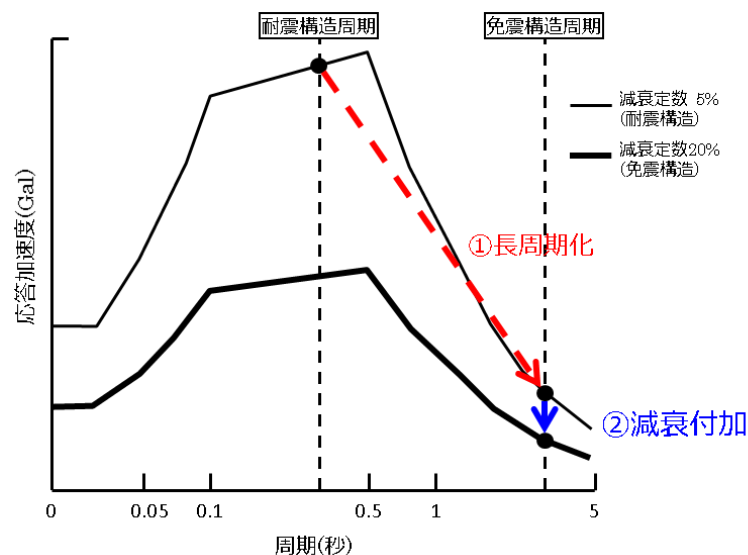
3. 本ガイドラインは、ATENAの内部レビューに加え、外部レビューとして（一社）日本免震構造協会のレビューも受けている。

2 ATENA重大事故等対処施設免震構造設計ガイドライン（案）の目次

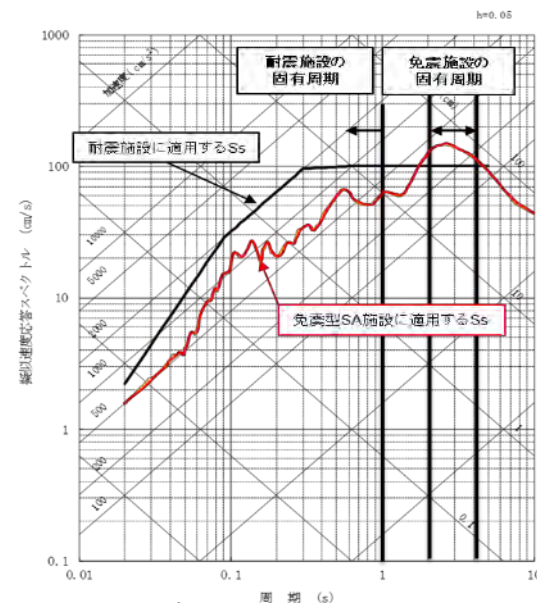
ATENA 重大事故等対処施設免震構造設計ガイドライン （案）	【参考】NRA建物・構築物の免震構造に関する審査ガイド （ドラフト）
1. 適用範囲 2. 用語と略称 2.1 用語の定義 2.2 略称 3. 基本方針 4. 耐震設計要求事項 5. 免震設計評価法 5.1 基準地震動の評価法 5.2 地震応答解析法 6. 免震型SA施設の荷重組合せと許容限界 6.1 免震層の荷重組合せと許容限界 6.2 建物・構築物の荷重組合せと許容限界 6.3 機器・配管系の荷重組合せと許容限界 7. 免震型SA施設の各部設計 7.1 免震層の設計 7.2 建物・構築物の設計 7.3 機器・配管系の設計 8. 参考文献 9. 添付書類 - 添付資料1 免震型SA施設の試設計例（硬岩サイト） - 添付資料2 免震型SA施設の試設計例（軟岩サイト） 本ガイドラインは、設計の仕様規定化を主目的としていることから、品質管理、維持管理にかかわる内容は、免震建物の維持管理基準（日本免震構造協会）、JEAG4614（日本電気協会）等に拠ることとした。	1. 総則 1.1 目的 1.2 適用範囲 1.3 本ガイドの適用に当たっての留意事項 1.4 専門用語の定義 2. 基本事項 2.1 免震設計の基本方針 2.2 免震設計における重要度分類 2.3 基準地震動 3. 免震構造物の設計に係る事項 3.1 使用材料及び材料定数 3.2 荷重の組合せ 3.3 許容限界 3.4 地震応答解析 3.5 免震構造物の設計 3.6 免震構造に伴う設備設計 3.6.1 免震構造物－非免震構造物間のインターフェース 3.6.2 免震構造の採用により設計条件が厳しくなる設備の耐震安全性 3.6.3 免震構造の応答性状による影響 3.7 その他留意事項 4. 免震構造物の品質管理・維持管理に係る事項 4.1 免震要素の品質管理 4.2 免震要素の製造時における試験による性能確認 4.3 免震構造物の使用前検査 4.4 供用期間中における免震要素の維持管理 5. 附則

3 ATENA重大事故等対処施設免震構造設計ガイドラインの特徴（1）

- 本ガイドラインは、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を対象としている。
- 原子炉建屋等の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に対し、免震構造は短周期成分を低減して影響を受けにくくする振動特性を有している。
- したがって、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を持たせる効果があり、安全性向上が期待できる。
- 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、地震力を低減できることから、活用できる設備の範囲を広げることが可能となる。



免震構造による応答低減の模式図



耐震と免震設計に用いる S_s 例

3 ATENA重大事故等対処施設免震構造設計ガイドラインの特徴（2）

- 本ガイドラインでは、SA適用施設に対する要求機能を明確にするとともに、建屋および免震装置への要求性能を明確にし、『仕様規定』とすることを目指している。
- 同ガイドラインの設計手法に基づいた試解析例を添付し、具体的設計の見える化を行っている。

主な項目	特徴
①入力地震動	・水平2方向の地震動の組合せ方法、模擬地震動の作成方法等について提示
②応答解析モデル	・免震層の3次元挙動を考慮できるモデル化例を提示 ・各免震装置について解析に必要な復元力特性等の設定値について、国交大臣認定品から設定することとし、設定例を提示
③免震装置の特性値	・免震装置の種別ごとに、特性値・変動幅について整理。 ・設計時に考慮すべき特性値・変動幅を明確にし、その組み合わせ方法を提示
④免震装置の許容限界	・免震装置について、応答特性を踏まえた具体的な許容限界値を設定し、その根拠・考え方を明確化
⑤建物・構築物の許容限界	・上部架構、免震層、下部構造の許容限界を設定し、その根拠、考え方を明確化
⑥機器・配管系の設計	・機器・配管系の設計において免震建屋の応答特性への配慮を記載 ・渡り配管等の変位に留意すべき設備について、変位に対する確認方法を提示
⑦試設計例	・免震型SA施設の試設計例として、硬岩サイト及び軟岩サイトの2例の具体的設計例を添付資料として提示

① 入力地震動

➤ 設計に用いる地震動

免震建屋の構造特性を考慮し、施設の設計に用いる基準地震動 S_s は、やや長周期帯域の振幅特性及び継続時間が適切に評価された地震動を設定する。また、一般免震建築物に対して一定以上の耐震性を確保する観点から、水平方向の基準地震動 S_s 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。

➤ 水平2方向の組合せ方法

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。

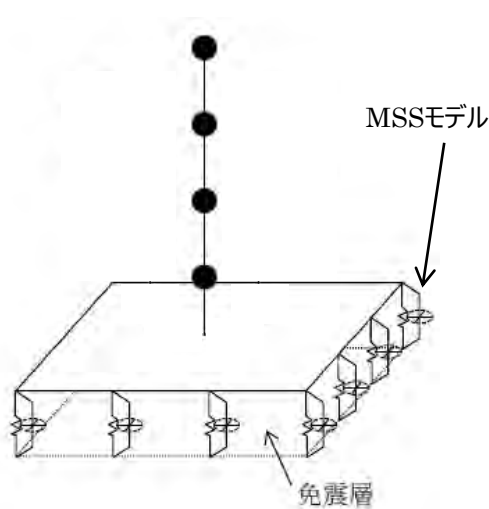
➤ 水平2方向入力用模擬地震動の作成

水平2方向に作用する模擬地震動の相関係数は、U.S.NRC REGULATORY GUIDE 1.92に引用されている米国土木学会の文献※およびNUREG-0800の3.7.1 SEISMIC DESIGN PARAMETERSを参考に0.16以下とする。

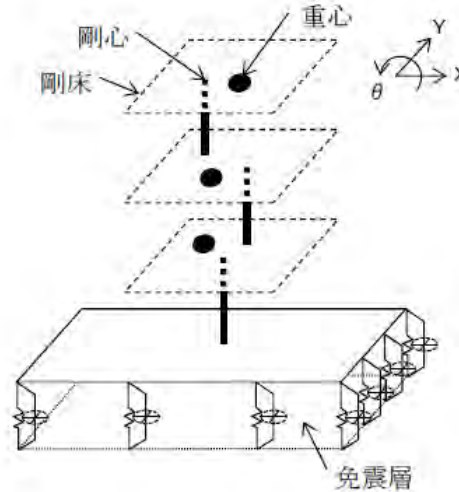
※C. Chen, "Definition of Statistically Independent Time Histories," Journal of the Structural Division, Vol. 101, No. ST2, ASCE, Virginia, February 1975

② 応答解析モデル

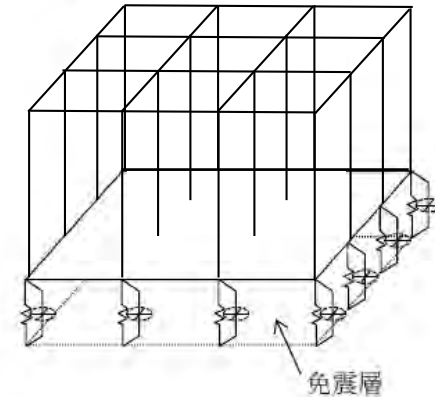
- 免震層の3次元挙動（ねじれ、ロッキング）を考慮できるモデル（MSSモデル等）を提示している。
- 基本的にねじれ応答が生じにくいように設計するが、上部架構が不整形な場合など複雑な挙動の考慮が必要な場合には、ねじれ振動モデルや立体フレームモデルを用いる。
- 免震装置の復元力特性は、複数の免震装置を集約してモデル化することもできる。



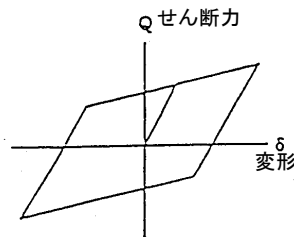
a) 多質点系モデル



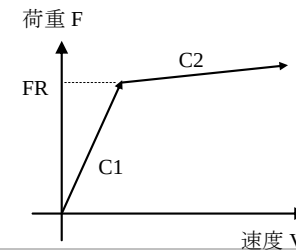
b) ねじれ振動モデル



c) 立体フレームモデル



アイソレータの
せん断力－変形関係の例
(鉛入り積層ゴム)



ダンパーの
減衰力－速度関係の例
(オイルダンパー)

③ 免震装置の特性値（アイソレータの復元力特性、特性変動の設定） 1/4

- 復元力特性の各設定値の設定方法を提示
- 復元力特性における不確かさの設定方法を提示
- 免震装置の特性値はメーカー毎に異なるため、各免震装置の国土交通大臣認定資料、メーカー資料に基づき設定する。

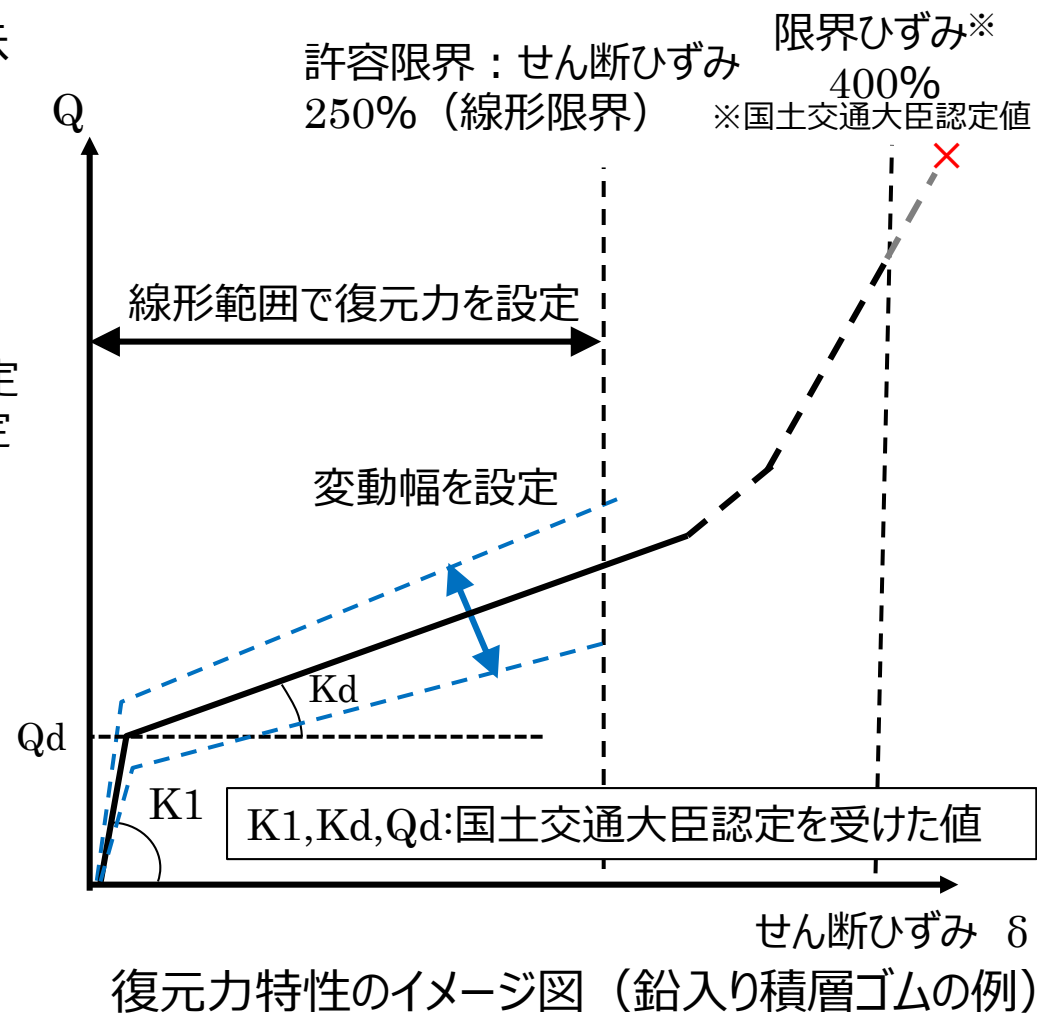
＜免震装置の不確かさ設定方法＞

上部構造への影響大：剛性が硬く（最大）なるように設定

免震層への影響大：剛性が柔らかく（最小）なるように設定

鉛入り積層ゴムのばらつき設定例

		K1, Kd, Qd
製造ばらつき		$-\alpha 1\% \sim +\alpha 2\%$
環境温度		$-\beta 1\% \sim +\beta 2\%$
経年変化		$0\% \sim +\gamma\%$
設定値	硬い（最大）	$+(\alpha 2 + \beta 2 + \gamma)\%$
	柔らかい（最小）	$-(\alpha 1 + \beta 1)\%$



③ 免震装置の特性値（ダンパーの減衰力特性、特性変動の設定） 2/4

- 減衰力特性の各設定値の設定方法を提示
- 減衰力特性における不確かさの設定方法を提示
- 免震装置の特性値はメーカー毎に異なるため、各免震装置の国土交通大臣認定資料、メーカー資料に基づき設定する。

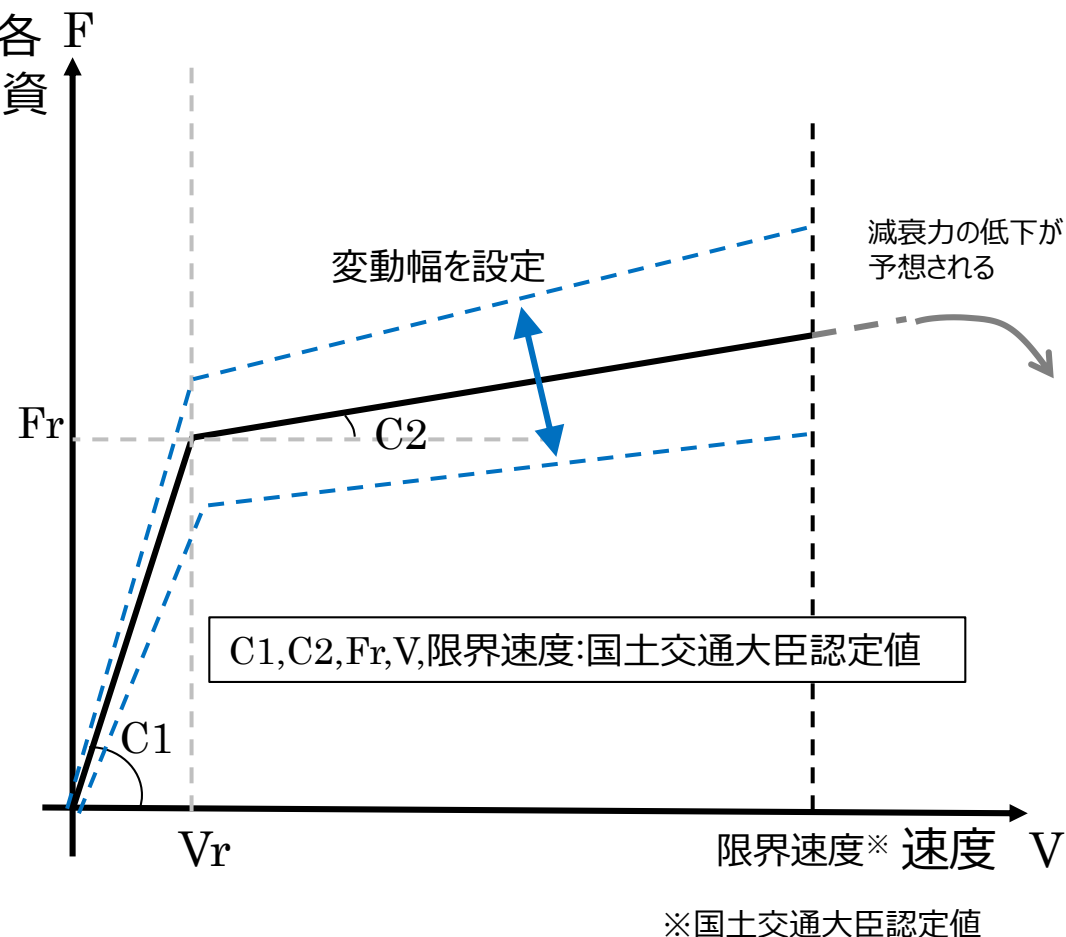
＜免震装置の不確かさ設定方法＞

上部構造への影響大：減衰が大きくなるように設定

免震層への影響大：減衰が小さくなるように設定

オイルダンパーの不確かさ設定例

		C1,C2
製造ばらつき		- $\alpha 1\%$ ～+ $\alpha 2\%$
環境温度		- $\beta 1\%$ ～+ $\beta 2\%$
設定値	減衰大	+ ($\alpha 2 + \beta 2$) %
	減衰小	- ($\alpha 1 + \beta 1$) %



減衰力特性のイメージ図（オイルダンパーの例）

③ 免震装置の特性値（各メーカーにおける特性値の設定値の例） 3/4

- 各免震装置の特性値はメーカー毎に異なるため、各免震装置の国土交通大臣認定資料、メーカー資料に基づき設定する。

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
製造ばらつき	降伏後剛性Kd	-15%～+15%
	切片荷重Qd	-15%～+15%
温度変化*1	降伏後剛性Kd	-5.3%～+5.6%
	切片荷重Qd	-16.1%～+19.2%
経年劣化*2	降伏後剛性Kd	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

不確かさの設定例	
Kd	-20.3%～+30.6%
Qd	-31.1%～+39.2%

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
製造ばらつき	減衰係数 C	-15%～+15%
温度変化*1	減衰係数 C	-10%～+10%
経年劣化	減衰係数 C	0%

不確かさの設定例	
C	-25%～+25%

*1) 20℃を基準とした、-20℃～80℃の変化率

③ 免震装置の特性値（各免震装置等の特性値の組み合わせ） 4/4

- 各免震装置の特性値の組み合わせは、免震装置の剛性及び減衰が「標準」、「剛性（アイソレータ）最大＋減衰（ダンパー）最大」、「剛性（アイソレータ）最小＋減衰（ダンパー）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、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（オイルダンパー）最小」、「剛性最小＋減衰（オイルダンパー）最大」の組合せについても必要に応じて検討することとする。

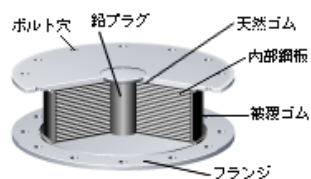
免震装置の特性値の組合せ方法

免震装置		標準ケース	不確かさケース	
			剛性最大＋減衰最大	剛性最小＋減衰最小
積層ゴム	アイソレータ	標準	最大	最小
すべり支承	アイソレータ	標準	最大	最小
鋼材ダンパー	ダンパー	標準	最大	最小
オイルダンパー	ダンパー	標準	最大（最小）	最小（最大）

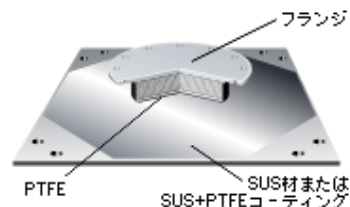
④ 免震装置の許容限界

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 および 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	降伏応力度
	剛すべり支承 および 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

※水平性能の安定性を考慮して保守的に設定した値



積層ゴム（鉛プラグ入り）



すべり支承（弾性）



鋼材ダンパー



オイルダンパー

⑤ 建物・構築物の許容限界

- 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。そこで、上部架構の許容限界は降伏耐力に対して余裕を持たせた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さ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 S_s 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。

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}
免震層	免震装置ペDESTAL	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
下部構造	下部基礎版	応力	終局耐力 ^{※3}
	擁壁	応力	終局耐力

※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さ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 S_s 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 S_s 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。

⑥ 機器・配管系の設計 1/2

【機器・配管系の設計】

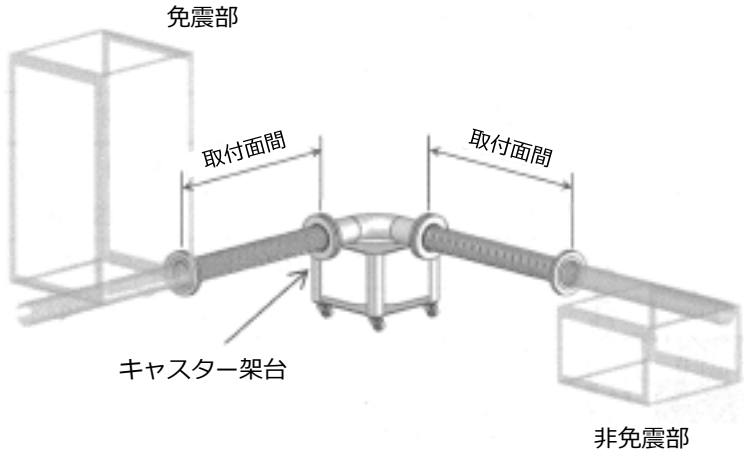
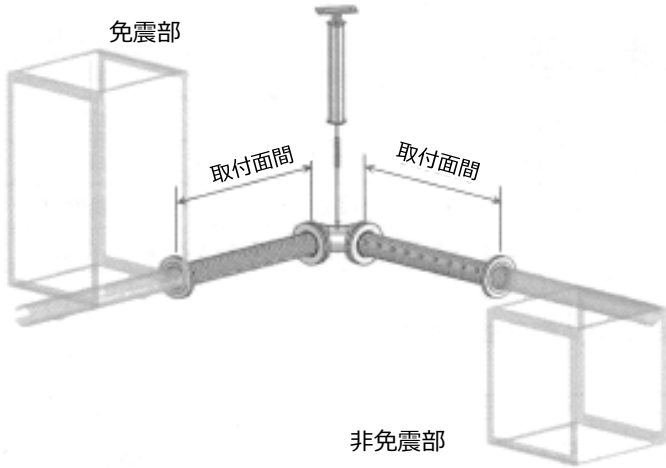
- 機器・配管系の設計は、原則としてJEAC4601-2015によるものとする。
- 設計に適用する免震建屋応答（設計用床応答スペクトル、時刻歴および相対変位）は、免震装置のばらつき等を考慮した複数の復元力特性モデルによる地震応答解析で得られた値を考慮する。
- ねじれ挙動やロッキング挙動が免震建屋の応答に影響を与えることが確認される場合には、それらの挙動を考慮した免震建屋の地震応答解析結果等を用いて、機器・配管系に対する影響を確認する。

【免震－非免震間の渡り配管に対する留意点】

- ・JSMEの規定に基づく、基準地震動 S_s 作用時の伸縮継手の疲労評価を行う。
- ・基準地震動 S_s 作用時の最大相対変位が、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。（許容変位の試験例を下表に示す。）

試験項目	試験内容	判定
水平方向 変位性能	水平変形：±設計可動量 試験圧力：設計圧力 試験速度：最大相対変位発生時の速度以上 サイクル数：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 (上記試験後に実施)	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

⑥ 機器・配管系の設計（渡り配管の設計例） 2/2

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°に円滑な変位追従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°に円滑な変位追従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

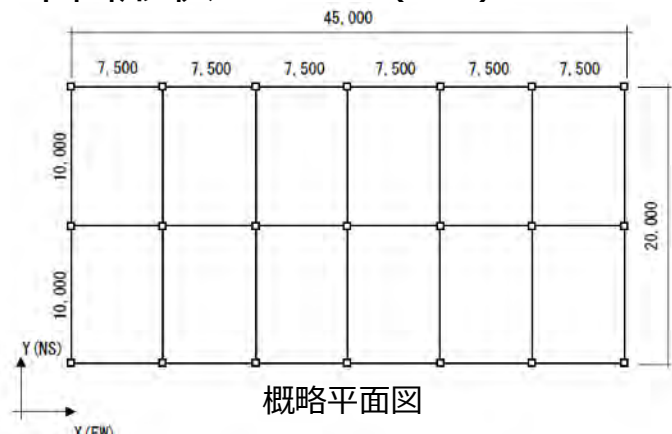
⑦ 試設計例（免震型SA施設の試設計例（硬岩サイト）） 1/7

せん断波速度が約1500m/sの硬質岩盤に設置された免震構造を採用したSA施設の試設計例

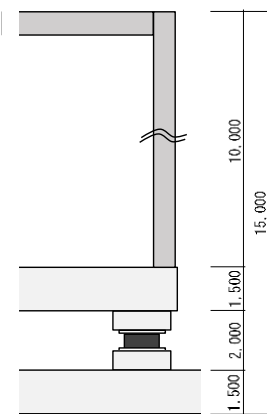
➤ 建屋概要

鉄骨造地上1階建（地上高さ：10m）

平面形状：20m（NS）×45m（EW）



概略平面図

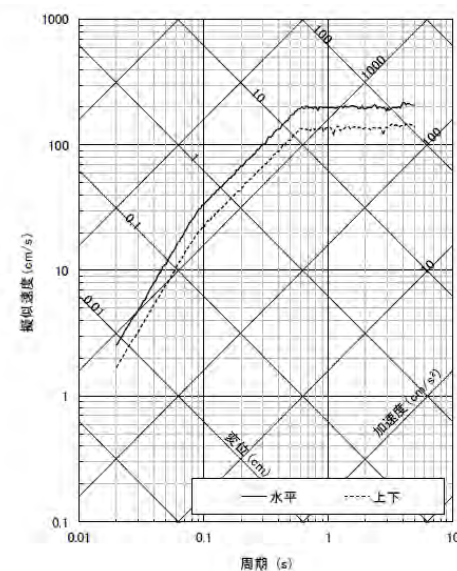


概略断面図

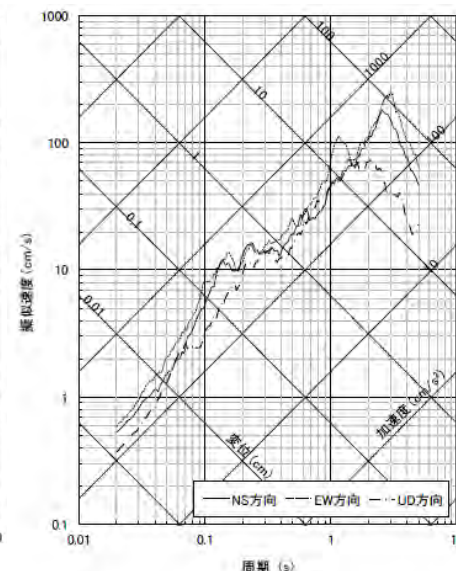
➤ 入力地震動

スペクトル波：S_s-D

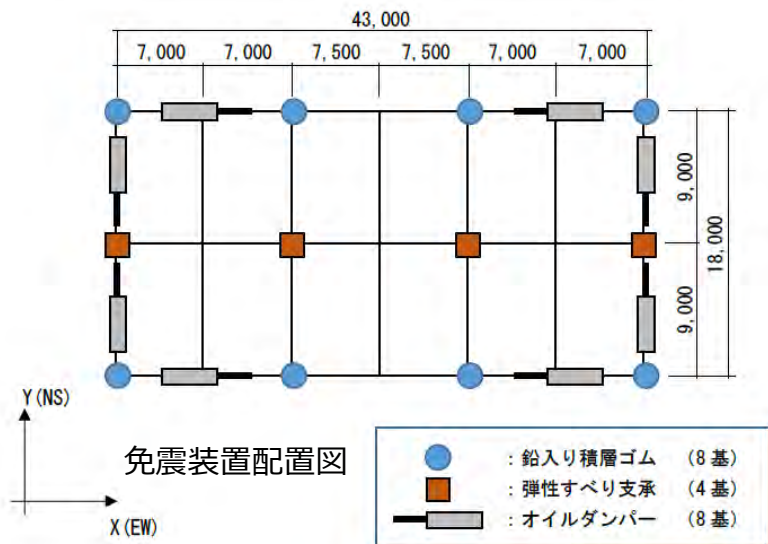
断層波：三の丸波



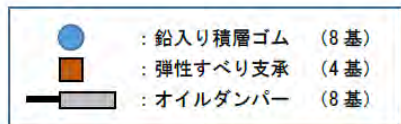
応答スペクトル波



断層モデル波



免震装置配置図



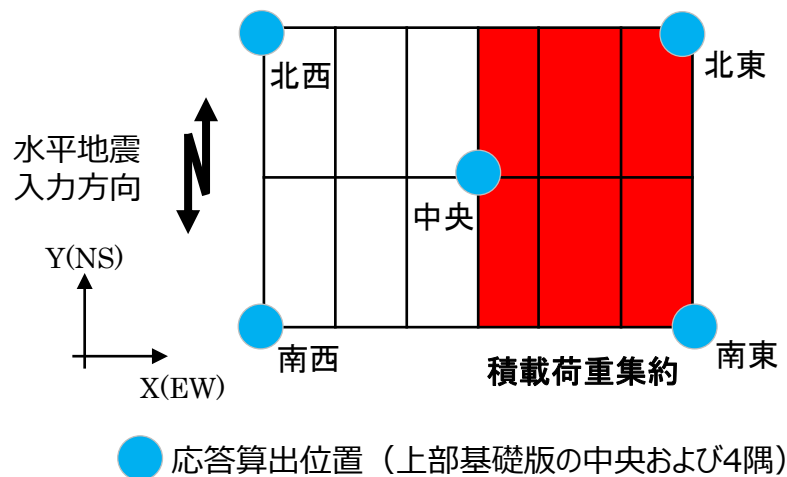
疑似速度応答スペクトル（h = 5%）

【積載荷重の重量偏心によるねじれ振動の影響検討】

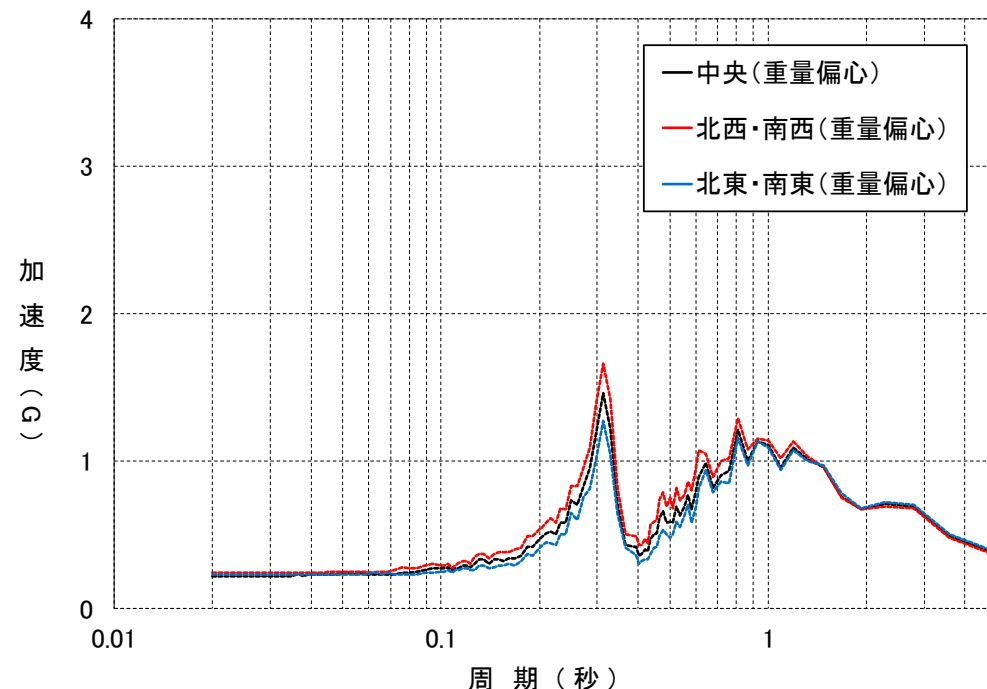
積載荷重を建屋片側半面にのみ付加し、重量偏心によるねじれ振動の影響を検討する。免震層の偏心率は6.01%※であり、免震装置の特性値は標準ケースとした。

短辺方向であるNS方向に地震動（スペクトル波）を入力したときの上部基礎版の中央および4隅の位置におけるNS方向の床応答スペクトルを示す。

※免震告示では免震層の偏心率を3/100以下にするよう求められている。超える場合は割り増しを考慮することが求められる。



重量偏心によるねじれ振動の影響検討概要
(偏心率6.01%)



中央および4隅のNS方向の床応答スペクトル
(減衰2.0%、スペクトル波NS単独同時入力)

極端に偏心させた場合でも中央位置と4隅位置の応答の差異は軽微であり、ねじれ振動の影響は小さいと考えられる。実機的设计では必要に応じて、ねじれ振動の影響を設計に反映する。

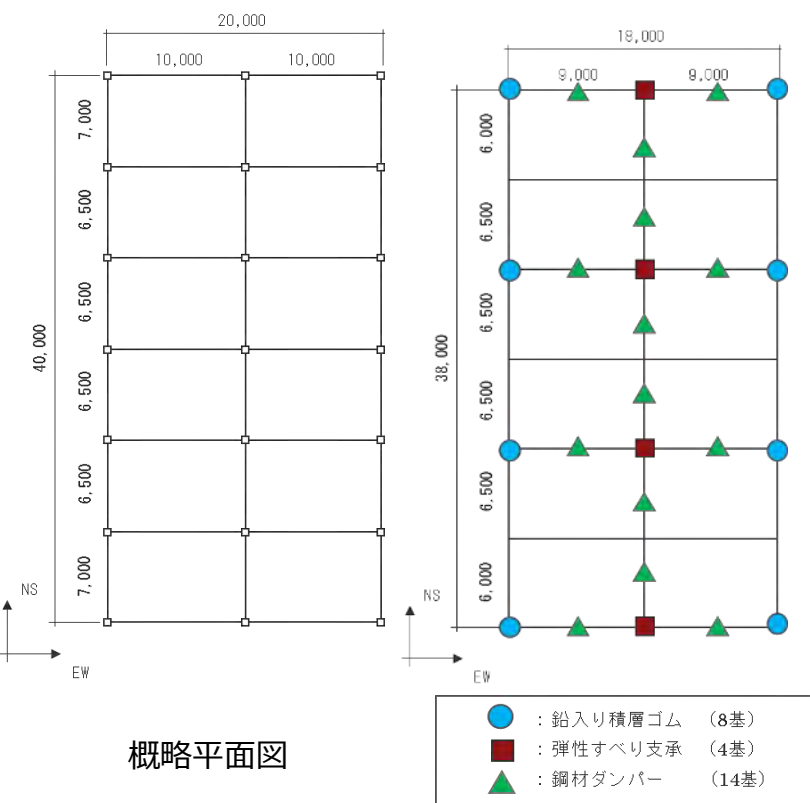
⑦ 試設計例（免震型SA施設の試設計例（軟岩サイト）） 4/7

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施設の試設計例

➤ 建屋概要

鉄骨造地上1階建（地上高さ：10m）

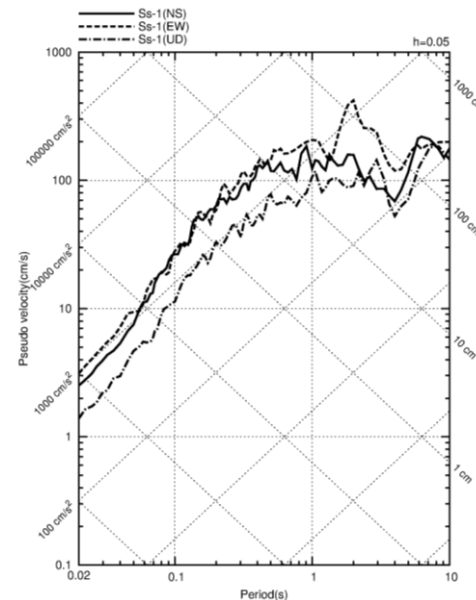
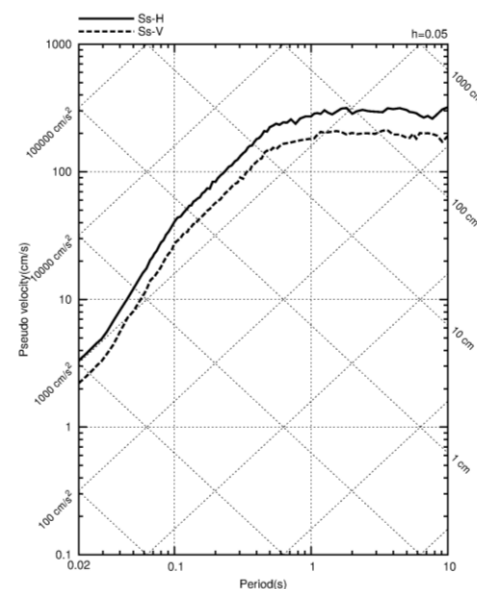
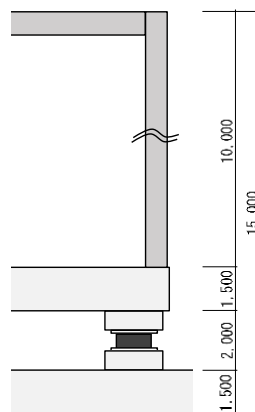
平面形状：40m（NS）×20m（EW）



➤ 入力地震動

スペクトル波：Ss-D

断層波：Ss-1

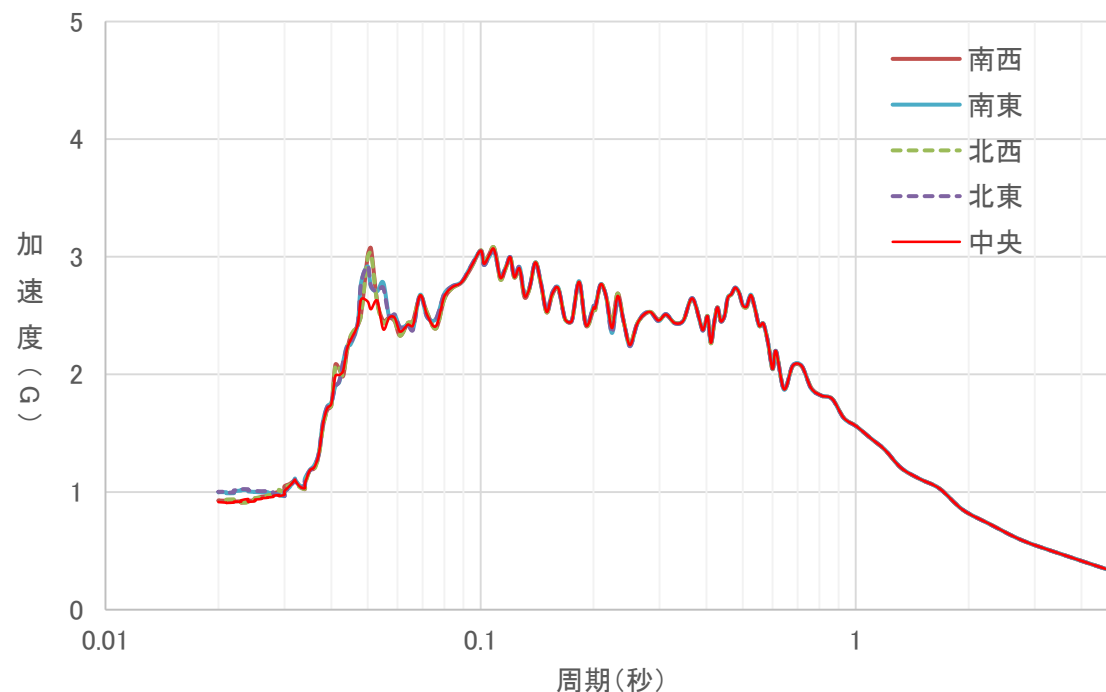
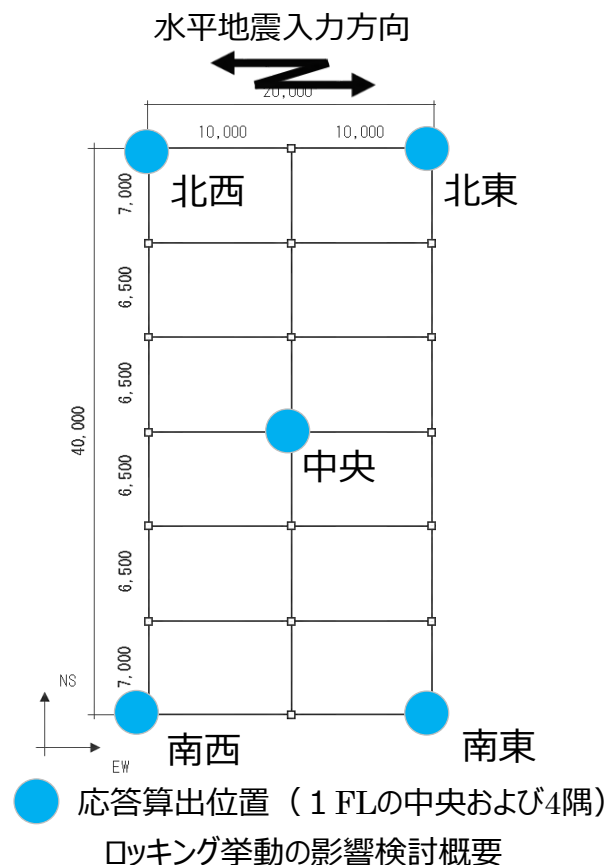


疑似速度応答スペクトル

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

【ロッキング挙動の影響検討】

ロッキング挙動の影響確認として、短辺方向であるEW方向および鉛直方向に地震動（スペクトル波）を同時入力したときの1FLの中央および4隅の位置における鉛直方向の床応答スペクトルを示す。



中央および4隅の鉛直方向の床応答スペクトル
（減衰2.0%、スペクトル波EW + UD同時入力）

一部の周期帯（0.05～0.06秒）においてロッキングの影響と考えられる鉛直応答のピークがみられるが、床の最大応答加速度（ZPA）はほぼ同等であり影響は小さいと考えられる。機器・配管系の配置や固有周期を踏まえて、必要に応じて設計に反映する。

⑦ 試設計例（免震型SA施設の試設計から得られた留意点（硬岩・軟岩サイト）） 7/7

➤ 応答解析結果まとめ

- ・免震装置の不確かさの組合せとして、免震層の剛性が大きくなるように組み合わせた際には上部構造の応答が大きくなり、剛性が小さくなるように組み合わせた際には免震層の応答が大きくなることを確認した。また、地震動のタイプによらず同様の傾向となることも確認した。
- ・水平2方向入力の影響確認を実施し、免震層の水平変位への影響を確認した。上部構造等その他の評価項目への影響は軽微であることを確認した。
- ・地震動の継続時間による繰返し変形による影響確認を実施、免震層の水平変位への影響を確認した。上部構造等その他の評価項目への影響は軽微である。各サイトで想定される地震動の特性を踏まえて、必要に応じて適切に考慮する必要がある。
- ・免震層にねじれが発生するように極端な設定を行い、応答への影響を把握した。免震層の水平応答には影響があるが、上部構造への影響は軽微である。応答スペクトルへの影響も軽微であると考えられる。ねじれに関して設計上、偏心率を小さくすることでねじれへの特別な配慮は不要と考えられるが、上部架構が不整形な場合など必要に応じてねじれ振動の影響について設計への反映を検討する。
- ・ロッキング挙動による影響についても検討し、鉛直の応答スペクトルのごく一部の周期帯でロッキングによるものと考えられるピークが発生しているが、床の最大応答加速度はほぼ同等であり影響は小さいと考える。実際の設計では、機器・配管系の配置等を踏まえて、必要に応じて設計に反映する。

4 まとめ

- ATENAにおいて、「重大事故等対処施設免震構造設計ガイドライン（案）」を策定した。
- 同ガイドラインは、原子力発電所内において免震構造を採用した重大事故等対処施設※の具体的設計に資するものであると考える。今後、そのような設計を行う原子力事業者においては、同ガイドラインに基づき設計することで、全原子力事業者のコミットメントを得ていく予定である。
- 同ガイドラインは、原子力規制庁の審査においても、具体的設計方法として参照できるものとする。
- 重大事故等対処施設※の免震建屋設計に関して、具体的な仕様を規定したガイドラインとして、同ガイドラインの技術的内容について確認いただき、コメントをいただきたい。

※ 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を対象としている。