

建物・構築物の免震構造に関する検討チームでの主な論点とその対応の基本方針・考え方

令和2年11月9日

建物・構築物の免震構造に関する検討チーム

建物・構築物の免震構造に関する検討チームは、今後免震構造を採用する発電用原子炉施設の建物・構築物について合理的かつ効率的に設置（変更）許可、設計及び工事の計画の認可に係る審査を実施するため、免震構造に関する技術的事項（免震構造の審査の考え方、基準地震動、設計に関する基本事項、免震装置の品質管理）を主な論点として検討し、規制要求に関する基本的考え方を以下のとおりとりまとめた。検討に際しては、公開の会合を開くとともに、外部専門家、免震装置メーカー、原子力エネルギー協議会(ATENA)及び事業者から意見を聴取した。

1. 免震構造に関する技術的事項

- ・ 免震構造の審査の考え方（免震装置の役割、要求性能等）
- ・ 免震構造の設計に用いる基準地震動（長周期成分、継続時間等）
- ・ 免震構造の設計に関する基本事項（免震装置の許容限界、他施設や設備への影響等）
- ・ 免震装置の品質管理（特に地震後の維持管理）に関する留意事項

2. 免震構造の審査の考え方

(1) 対象構造物

(論点)

- ・ 免震構造のメリット、デメリットを踏まえた、審査の対象とすべき建物・構築物について

(基本方針)

- ・ 一部の安全上重要な施設、重大事故等対処施設を間接支持する建屋等、限定された範囲の建屋を対象とする。
- ・ 原子炉建屋等の多くの安全上重要な施設を支持する建屋は対象としないものとする。

(考え方)

- ・ 免震構造は、免震構造建屋の上部構造に対する地震力の低減、地震時の作業環境の向上等の効果が期待できる。一方、免震構造は、基礎－免震層－上部構造が直列に接続するシステムであり、免震層（免震装置）の機能の喪失が間接支持する上部構造の機能に大きな影響を及ぼすおそれがある。設計時の許容限界を超えた場合の冗長性は耐震構造程大きくはないと考えられるため、安全上重要な施設等を支持する建屋を免震構造とするには、原子炉施設における設計等の実績を積み重ねる必要がある。そのため、本検討チームの議論を踏まえ作成する建物・構築物の免震構造に関する審査ガイド（以下「審査ガイド」という。）では、多様性等の観点から機能を代替する施設等である重大事故等対処施設を間接支持する建屋及び緊急時対策所等を対象とする。
- ・ ただし、多くの安全上重要な施設等を間接支持するような建屋については、本審査ガイドの適用対象としないが、本審査ガイドの考え方を参考とすることは可能なものとする。
- ・ また、免震装置については、品質の信頼性や一般建築物での実績等を踏まえ国土交通大臣認定を得た装置を用いることを基本とする。ただし、大臣認定と同等の確認を行うことで新たに開発した装置又は大型化等した装置も適用できるものとする。

(2) 設計方針

(論点)

- ・ 建屋の用途、荷重組合せに応じた設計クライテリアの使い分けについて

(基本方針)

- ・ 本資料では、免震装置※のうち特に、免震構造設計の成立性の観点で重要となる装置として、支承装置（積層ゴム）及び減衰装置（履歴系ダンパー）を対象とする。
- ・ 支承装置（積層ゴム）は、基準地震動 S_s に対して基本的に弾性範囲で設計する。なお、履歴系ダンパーについては、「4. (5) 履歴系ダンパーの評価、余震・誘発地震による影響」において、基本方針、考え方を示す。
- ・ 弾性範囲として設定する支承装置（積層ゴム）の許容限界は、一般建築物で採用実績のある値を適用できるものとする。ただし、試験等により妥当性が確認された場合、一般建築物で採用される以外の許容限界も設定できるものとする。
- ・ 上部構造、下部構造は、基準地震動 S_s に対し、要求性能に応じて機能を保持する設計とする。

(考え方)

- ・ 原子炉施設の耐震安全性を確保するため、耐震設計と同様に免震構造の建屋及び免震装置に関しても、基準地震動 S_s に対し、安全機能を保持する設計とする。
- ・ 免震層は上部構造の地震力低減及び上部構造を間接支持する機能を有するため、支承装置（積層ゴム）が基準地震動 S_s に対して弾性範囲に留まる設計とする。例えば、積層ゴムについては、ハードニングやボイド等の発生による積層ゴムの機能の低下が上部構造の機能喪失につながるおそれがないようおおむね弾性範囲（例えば、せん断ひずみ 250%以下、引張面圧 $1\text{N}/\text{mm}^2$ 以下）とする。ただし、試験等で妥当性が確認された場合、上部構造の特性、要求性能及び地震動の組合せにより、上記と異なる値を許容限界として適用することができる。この場合、必要に応じて地震時及び地震後においても支承装置（積層ゴム）に必要な機能が保持されていることを、維持管理活動（目視、シミュレーションによる評価等）の中で確認する。
- ・ 上部構造について、緊急時対策所の様に特定の部位に対して居住性（空調性能とあいまった気密性又は遮蔽性）が要求される建屋に関しては、弾性範囲の変形に留めることで居住性を確保することとする。また、特定部位に対して居住性が要求されない建屋であって安全上重要な施設又は重大事故等対処施設が設置される建屋に関しては、部位に要求される機能（間接支持、波及的影響防止）に応じて終局限界に対して妥当な安全余裕を確保することとする。
- ・ 下部構造の許容限界については、免震構造の性能確保の観点から、原則としてほぼ弾性範囲に留める設計とする。
- ・ 表 1 に地震動の組合せと設計評価の考え方の例を示す。

※ 審査ガイド（ドラフト）では、免震装置として、支承装置（支持機能を有する装置、例えば、積層ゴム、すべり支承等）と減衰装置（減衰機能を有する装置、例えば、履歴系ダンパー、流体ダンパー等）を対象としている。

表1 地震動の組合せと設計評価の考え方（積層ゴムの例）

地震動の組合せ	積層ゴムの許容限界* ¹				備考
	せん断ひずみ		引張面圧		
	一般建築物で 用いられる 弾性範囲 例： 250%程度 以下	一般建築物で 用いられる 弾性範囲以上* ² 例： 250%程度 以上	部材認定 許容値 例： 1N/mm ² 以下	部材認定 許容値以上* ³ 例： 1N/mm ² 以上	
[断層モデル波] 水平1方向+鉛直方向	●	—	●	—	・緊急時対策所に関しては、居住性確保のため、上部構造は弾性範囲の設計とする。 ・重大事故等対処施設が設置される建屋等に関しては、部位に要求される機能（間接支持、波及的影響防止）に応じて終局限界に対して妥当な安全余裕を確保した設計とする。
[断層モデル波] 水平2方向+鉛直方向	●	—	●	—	
[応答スペクトル波] 水平1方向+鉛直方向	●	—	●	—	
[応答スペクトル波] 水平1方向(斜め)+鉛直方向	●	—	●	△* ⁵	
[応答スペクトル波] 水平2方向+鉛直方向	●	△* ⁴	●	△* ⁵	

- : 適用
- △ : 条件付で適用
- : 適用外

- *¹ : 支承装置(積層ゴム)は、基準地震動 S_s に対して基本的に弾性範囲で設計する。
- *² : 試験等により、繰り返し载荷での顕著なひずみの蓄積がなく、ほぼ弾性的な挙動が確認された範囲(図1参照)
- *³ : 試験等により、1N/mm²を超える面圧又はひずみによる評価の妥当性が確認された場合に適用(図2参照)
- *⁴ : ひずみ硬化域の挙動をモデル化した解析評価を行う。
併せて、維持管理にて積層ゴムの性能が保持されていることを確認する。
- *⁵ : 許容限界に応じて適切に引張剛性をモデル化した解析評価を行う。
併せて、維持管理で積層ゴムの変形性能、支持性能が保持されていることを確認する。

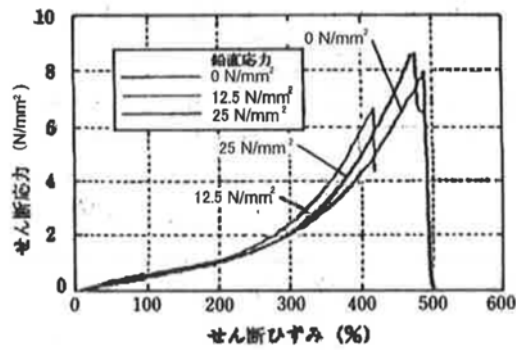
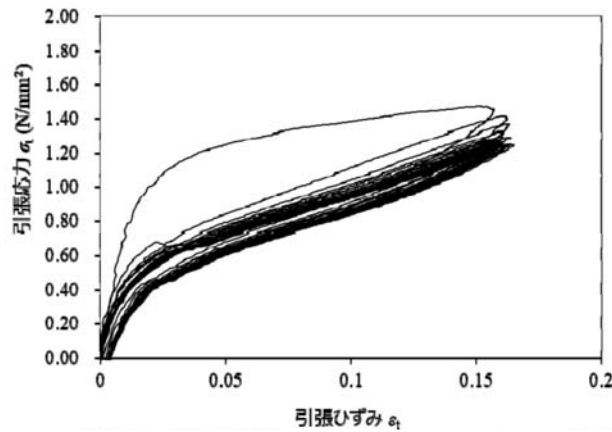
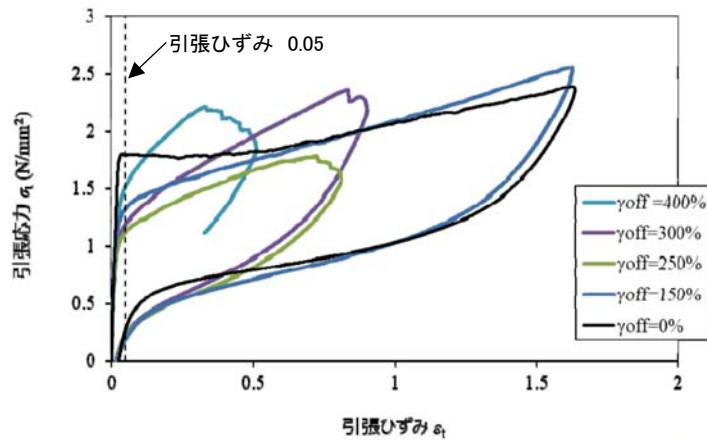


図1 圧縮せん断試験の例

出典：「JSSI 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」
 (一社)日本免震構造協会 (2018年)



繰り返し引張試験：せん断ひずみ(オフセット)250%，引張ひずみ 15%，20 サイクル



せん断ひずみ(オフセット)0,150,250,300,400%における引張試験

図2 引張試験の例

出典：建物・構築物の免震構造に関する検討チーム 第3回会合 資料2-1 免震用積層ゴム支承の許容引張応力等基準および維持管理について(一部加筆)

3. 免震構造の設計に用いる基準地震動

(1) 基準地震動 S_s の策定

(論点)

- ・免震構造の設計に用いる基準地震動（以下略して「基準地震動」という。）の策定における国土交通省（以下「国交省」という。）の技術的助言[※]の反映に係る考え方

(基本方針)

- ・免震構造の設計に用いる基準地震動の策定方法は、新規基準の「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の評価方法を用い、必要に応じて他の施設とは別に策定することで、国交省の技術的助言での検討方法と同等とみなすことが可能である。
- ・ただし、国交省の技術的助言で検討している地域に原子力発電所が立地している場合は、国交省の技術的助言での検討結果の地震動に対する影響を確認する。
- ・基準地震動の策定にあたっては、下記に留意する。
 - + やや長周期の地震動に影響を与える要因を適切に考慮する。
 - + やや長周期帯域の地震動レベルについては、地震ハザード評価結果等を踏まえ適切に設定する。
 - + 応答スペクトルに基づく地震動の継続時間は断層モデルを用いた手法による地震動の継続時間と比較検証する。

(考え方)

- ・原子力発電所には、国交省の技術的助言で検討している関東平野のような比較的軟らかく厚い堆積層は存在しないものと考えられることから、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の評価方法を用いることで、免震構造に適用できる基準地震動を策定することが可能である。
- ・ただし、評価にあたっては、サイトにおける地震観測記録やシミュレーション解析の結果を踏まえ、やや長周期の地震動に影響を与えるサイト固有の要因（やや長周期の地震動に影響を与えるようなパラメータ）を検証、特定した上で、それらの要因の不確かさを考慮することとする。
- ・基準地震動の策定にあたって、やや長周期帯域の地震動レベル（スペクトル振幅）については、サイト固有の要因の不確かさを考慮した評価結果に基づいて設定することとし、断層モデルを用いた手法による評価結果や一様ハザードスペクトルを踏まえて適切に設定する。
- ・応答スペクトルに基づく地震動（模擬地震動）の継続時間の妥当性については、断層モデルを用いた手法による地震動評価結果の継続時間と比較することにより検証する。
- ・また、免震構造の設計に用いる地震動としては、「震源を特定せず策定する地震動」も考慮する。
- ・本審査ガイドにおいて、「やや長周期」とは2秒程度以上10秒程度以下の周期帯域を対象とする。

※：国土交通省国住指第1111号「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)」(平成28年6月)

(2) 基準地震動 S_s の水平方向成分と鉛直方向成分の組合せ

(論点)

- ・基準地震動 S_s の水平方向成分、鉛直方向成分の組合せの考え方

(基本方針)

- ・基準地震動 S_s の水平方向成分及び鉛直方向成分は適切に組み合わせることとする。
- ・応答スペクトル波の水平2方向入力では、組み合わせる地震動の位相特性を適切に設定する。

- ・地震動の入力方向については、建築物の平面直交主軸2方向に加えて免震装置にとって最も厳しくなる方向に対し、応答スペクトル波の水平1方向及び鉛直方向の地震動とする。

(考え方)

- ・基準地震動 S_s の水平2方向及び鉛直方向の地震動を適切に組み合わせることとする。
- ・応答スペクトルに基づく水平方向の地震動は1波のみであることから、水平2方向の評価においては、その位相特性が異なる地震動を適切に設定する。
- ・免震装置の設計においては、建屋の斜め方向に地震動を入力した場合に建屋隅角部に配置された免震装置の応答が大きくなることが想定されることから、応答スペクトル波の水平1方向及び鉛直方向の地震動による建屋の斜め方向からの入力による影響について確認する。ただし、構造上の特徴等によって、これ以外の方向で免震装置の応答が顕著に大きくなる場合については、この方向についても検討を行う。

4. 免震構造の設計に関する基本事項

(1) 許容限界

(論点)

- ・一般建築物で適用される免震装置の許容限界の適用性

(基本方針)

- ・一般建築物で広く適用されている国土交通大臣認定（以下「大臣認定」という。）の免震装置の許容限界を適用する。
- ・ただし、試験等で妥当性が確認された許容限界も設定可能とする。

(考え方)

- ・許容限界について、大臣認定された免震装置が用いられることを前提に、大臣認定において妥当性が確認された許容値を許容限界として定める。
- ・ただし、上記許容限界と異なる値や指標等についても、試験等によりその値や指標等が妥当であることを確認できれば、それを許容限界として設定可能とする。

(2) 積層ゴムの許容限界（せん断ひずみ、引張面圧）

(論点)

- ・一般建築物で使用される積層ゴムの許容限界（せん断ひずみ、引張面圧）の適用性
- ・積層ゴムの引張面圧に係る評価として、ひずみ指標による評価の適用性

(基本方針)

- ・積層ゴムのせん断ひずみは、一般建築物で弾性範囲として適用実績のある値を許容限界とする。
- ・積層ゴムの引張評価は、面圧による評価を基本とし、一般建築物で弾性範囲として適用実績のある値を許容限界とする。
- ・ただし、「2. (2) 設計方針」の（考え方）に示された事項を前提に、試験等により妥当性が確認された場合、上記と異なる許容限界を適用できるものとする。

(考え方)

- ・積層ゴムのせん断ひずみにおける許容限界については、装置メーカー等により妥当性が確認され一般建築物での適用実績があり弾性範囲として用いられている値（例えば、250%程度）を用いる。
- ・ただし、繰り返し载荷による顕著なひずみの蓄積がなく、ほぼ弾性的な挙動が試験等で確認された場合、この確認された範囲まではせん断ひずみの許容限界として適用可能とする。
- ・積層ゴムの引張応力の許容限界については、装置メーカー等により妥当性が確認され一般建

建築物において適用実績がある値（例えば、 $1\text{N}/\text{mm}^2$ ）を適用する。ただし、試験等の応力-ひずみ関係により発生ひずみの状態確認を含め積層ゴムの性能が維持されていることが確認された値については、許容限界として設定できる。

- ・また、引張ひずみ指標による評価等、他の指標による評価については、実大規模の試験等によるデータを蓄積し、許容限界として設定することの妥当性が確認された指標については、許容限界として設定可能とする。

（3）積層ゴムの軸力再配分

（論点）

- ・一部の積層ゴムの性能の低下による他の積層ゴムの軸力再配分を考慮した設計の適用性

（基本方針）

- ・一部の積層ゴムの性能の低下による他の積層ゴムの軸力再配分（軸力負担の変化）を考慮した設計を適用する場合は、必要に応じて適切に評価すること。ただし、その影響度がサイト固有の条件により異なることから、個別の審査において検討する。

（考え方）

- ・一部の免震装置（主に積層ゴム）において免震性能の低下又は材料特性の変化が生じた場合、他の免震装置による軸力の再配分を考慮した評価については、サイト固有の条件（採用する免震装置の構造・仕様及び配置、上部構造の構造計画、設備の設置状況、建屋の応答性状等）を踏まえて個別の審査において検討する。

（4）長時間継続する地震動による影響

（論点）

- ・長時間継続する地震動による免震装置の力学特性の変化等

（基本方針）

- ・長時間継続する地震動の影響については、必要に応じて適切に評価すること。ただし、その影響度がサイト固有の条件により異なることから、個別の審査において検討する。

（考え方）

- ・免震装置（主に鉛プラグ入り積層ゴム）の長時間継続するやや長周期の地震動による積層ゴムの力学特性への影響は、サイト固有の条件（サイトのやや長周期の地震動が支配的になる震源の有無、そのような震源と敷地との位置関係、採用する免震装置の構造・仕様及び配置、建屋の応答性状等）を踏まえて個別の審査において検討する。なお、大臣認定を受けた積層ゴムの力学特性の変化については、既往のデータに基づいて評価するとともに、必要に応じて試験又は解析により検証する。

（5）履歴系ダンパーの評価、余震・誘発地震による影響

（論点）

- ・鋼材ダンパー等の履歴系ダンパーの累積疲労を考慮した評価の考え方
- ・地震動の作用により累積疲労するような履歴系ダンパーの余震や誘発地震による影響

（基本方針）

- ・履歴系ダンパーを採用する場合には、累積疲労損傷度の評価指標を適用し許容限界に対して十分な余裕を確保する設計とする。また、履歴系ダンパーは、積層ゴムの許容限界としている水平変形量に対し減衰性能を有する設計とする。
- ・上記に加え、地震発生後の維持管理により、履歴系ダンパーの減衰機能を維持していることが確認できる設計とする。

- ・なお、余震・誘発地震による影響については、その影響度がサイト固有の条件により異なることから、個別審査において検討する。

(考え方)

- ・鋼材ダンパー等の履歴系ダンパーは、既往の地震経験や試験等の実績を踏まえ、累積疲労損傷度等を評価指標として許容限界を設定し、許容限界に対して十分な余裕を確保していることを設計で確認する。
- ・また、地震発生後の維持管理体制を構築し、地震後速やかに点検等を実施し、必要に応じ補修を行うなど、減衰機能を維持することを確認する。
- ・余震や誘発地震の考慮に係る具体的な確認内容については、サイト固有の条件（採用する減衰装置の構造、サイトのやや長周期の地震動が支配的になる震源の有無、その様な震源と敷地との位置関係等）を踏まえて個別の審査において検討する。

(6) フェールセーフの取り扱い

(論点)

- ・原子炉施設の免震構造建屋におけるフェールセーフの取り扱い

(基本方針)

- ・基準地震動 S_s に対する設計の範囲において、免震装置以外の鉛直荷重支持機能を担保する装置等は必要としないものとする。
- ・なお、安全性のより一層の向上の観点から、鉛直荷重支持機能を担保する装置等を設置する場合については、その設置による他施設等への影響を確認する。

(考え方)

- ・一般建築物におけるフェールセーフは、想定を超える地震動に対して、免震部材が荷重支持機能を喪失しないように変形を抑制するもの又は免震部材が荷重支持機能を喪失しても別の機構が荷重支持機能を肩代わりするものとしている。本審査ガイドでは、安全性のより一層の向上を目的に、設計を超える水平方向の過大な変形により免震装置に損傷等が生じて荷重支持機能を喪失するおそれがある場合を想定し、これに対する鉛直荷重支持機能を担保する装置等を設置することをフェールセーフの対象とする。
- ・なお、審査ガイドは基準地震動 S_s に対して免震構造の成立性を求めており、それ以上の地震動を想定することを求めるものではないことから、免震装置とは別の鉛直荷重支持機能を担保する装置の設計を要求するものではない。ただし、事業者が上部構造の機能喪失までの冗長性を確保するため、安全性のより一層の向上の観点から鉛直荷重支持機能を担保する装置等を設置する場合、その装置等の設置による免震性能や機器設備等への影響を確認する。

(7) 免震構造に伴う設備設計への影響

(論点)

- ・免震構造物と非免震構造物の間の渡り配管等のインターフェース部の健全性評価、免震構造を採用することによる他施設、設備への影響

(基本方針)

- ・渡り配管や大口径配管については、免震-非免震構造物間の相対変位への追随性を十分に検討する。
- ・プールやタンク等の流体を内包する設備については、スロッシングの影響について検討する。

(考え方)

- ・免震構造物と非免震構造物間での振動特性等の相違から、両構造物間の相対変位に追随できる渡り配管等の検討が必要となる。

- ・免震構造物を採用することにより建物の固有周期が長周期側へシフトすることでプールやタンク等の流体のスロッシングの影響が顕著となるおそれがある。このため、流体を内包するような建屋については免震構造を採用する事による水平方向周期の長周期化の程度を確認するとともにスロッシングの影響について検討するものとする。

5. 免震装置の品質管理（特に地震後の維持管理）に関する留意事項

（１）地震観測装置等の維持管理への活用

（論点）

- ・これまでの大地震後の免震装置の継続使用の実績を踏まえた地震後の免震装置の確認方法
- ・地震中、地震後の免震装置の挙動をリアルタイムで計測、管理する地震観測装置等（例えば、一般建築物で採用事例のあるヘルスマonitoring等）の適用性

（基本方針）

- ・免震装置の維持管理として、大地震後の目視による応急点検に加え、地震観測・評価技術等により免震装置の特性変化の評価を行うものとする。

（考え方）

- ・緊急時対策所のように地震後においても使用を継続できる設計とする場合は、損傷の有無を即時に確認する場合のリアルタイムの評価、地震後の状態確認として、計測した地震動の時刻歴データによるシミュレーション解析の実施等、各設計方針に応じた計測・評価方法により免震装置の維持管理を行うこととする。また、観測した記録について、上書き等によりデータが消失しないよう留意する。

（２）別置き試験体の設置

（論点）

- ・原子力発電所サイトの免震構造建屋における別置き試験体による維持管理の考え方

（基本方針）

- ・免震装置（主に積層ゴム）の維持管理に係る別置き試験体については、これに代わる手段等で適切に管理することで、免震構造の建屋個別に試験体を設置することは要求しないものとする。

（考え方）

- ・個別サイトに別置き試験体を設置しなくとも工場にて別置き試験体を設置し、管理するあるいは地震観測の結果や免震構造の建屋の加振等により、得られる免震層の振動特性を評価することで免震装置の維持管理を行うことができると考えられるため、免震構造の建屋において各々別置き試験体を設置することは要求しないものとする。
- ・なお、免震装置の経年劣化については、発電所施設の高経年化技術評価においても評価対象になるものと考えられる。

6. その他

【B、Cクラスの免震構造建屋の設計方針】

（論点）

- ・審査ガイドにおけるB、Cクラスの建屋の取り扱い

（基本方針）

- ・Bクラスの建屋については、Sクラス建屋を対象とした審査ガイドのうち地震動や許容限界をBクラスとして読み替えて準用する。
- ・Cクラスの建屋については、一般建築物と同等の設計が行われていることを確認する。

(考え方)

- ・ B、Cクラスの建屋及び同クラスの設備の間接支持構造物である建屋に免震構造を採用する場合、基本的な設計方針を確認することとするが、Bクラスについては免震構造の建屋の建築確認申請で要求される地震力が原子炉施設に要求される地震力を上回ることが確認（図3参照）できれば、Bクラスの建屋及び免震層並びに設置される設備等の詳細設計の確認は不要とする。ただし、B、Cクラスの建物が近接するSクラス施設へ波及的影響を与える可能性がある場合については、基準地震動 S_s に対する評価を行うこととする。

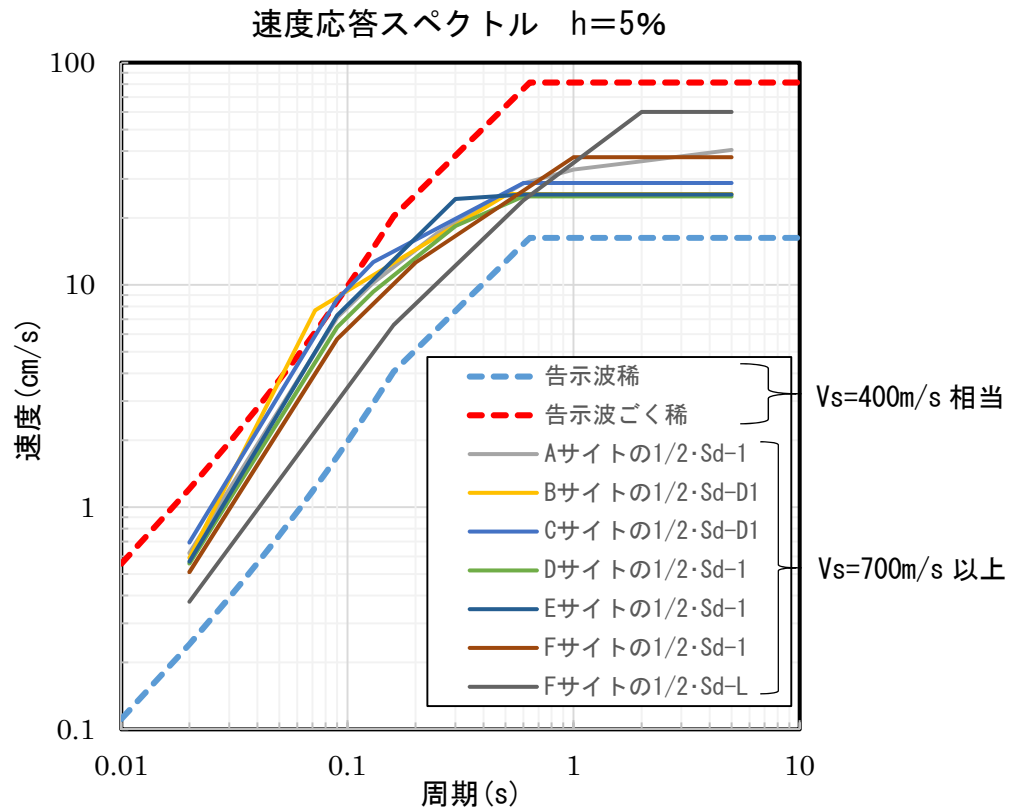


図3 警告波と $1/2S_d$ の速度応答スペクトルの比較の例

外部専門家、装置メーカー、事業者等からのご意見等

1. 免震構造の審査の考え方

(1) 対象構造物

【久田先生】

○免震構造と耐震構造のメリットとデメリットについて

- ・免震構造は、想定内の地震に対しては高いレベルで居住性を確保し、機能継続が可能（中越沖地震、東北地方太平洋沖地震等での実績）。
- ・一方、発生頻度が低く規模が大きい地震（ 10^{-5} 程度以下）に対して脆弱性あり（フェールセーフ機能の付加や、代替施設として耐震構造の併用による多重化でリスクは低減可能）。
- ・耐震構造 ⇒長周期地震動に有利
- ・免震構造 ⇒短周期地震動に有利

○施設の用途や構造特性を考慮した安全対策の推進

- ・代替不可能な施設（原子炉建屋等）→免震構造は慎重に判断
- ・代替可能な施設（緊急時対策所、S A設備等建屋）→耐震構造と免震構造の多重化によるリスク低減

○基準地震動 S_s の策定過程において保守性を考慮することによるデメリット

- ・基準地震動は認識論的不確実さが大きく、保守性の考慮により過度に大きな地震動を設定すると、免震設計の自由度が阻害され、基準地震動よりも発生頻度の高い小さな地震動に対する免震構造の優位性（上部構造に対する地震力の低減効果、地震時の作業環境の向上効果等）が低減。

2. 免震構造の設計に用いる基準地震動

(1) 基準地震動 S_s の策定

【久田先生】

- ・国交省の基整促波は、関東平野や大阪盆地など軟弱で厚い堆積層があるサイトの長周期地震動で、非常に長い継続時間となるが、静岡の主要動は 100~200 秒程度。
- ・連動地震や余震への配慮は必要（免震装置の経時劣化等）。
- ・免震設計用の長周期、長継続時間の地震動の作成については、現行の S_s の策定方法でカバーできている。
- ・ローカルな影響はケースバイケースで絶対無いとはいえないが、観測記録とシミュレーションを合わせて総合的に考えることで対応可能と考える。

(2) 基準地震動 S_s の水平方向成分と鉛直方向成分の組合せ

【久田先生】

- ・「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の3成分を考慮することで良いと考える。
- ・理論的手法（活断層など震源近傍など）や数値解析手法（差分法、有限要素法、遠地巨大地震等）による長周期地震動の数値シミュレーションを用いることで、諸特性（震源特性・伝播特性・サイト特性）への配慮が可能。

【菊地先生】

- ・水平2方向にはSRSSを適用してもよいが、水平+上下へのSRSSの適用には疑問あり（水平動固有周期3~5秒の振動モデルと上下動固有周期0.3秒前後の振動モデルでは、同時刻に最大値が重なることが十分に考えられる）。
- ・水平+上下には、絶対値とか時刻歴波形の重ね合わせを用いる。

- ・水平、上下同時入力では、各方向の減衰を独立に設定できないのであれば、別々に解析して重ね合わせる。
- ・引張側の復元力特性の設定に注意（引張剛性を圧縮剛性の1/10程度に低下させる）。
- ・引張剛性が圧縮剛性と同じなら、過度であっても安全側には変わらない。
- ・引張剛性をゼロと想定することは、引張を過小評価し危険側の想定となる。
- ・積層ゴムのせん断成分と軸成分の間に、せん断変形に応じて軸剛性が変化する（P-Δ効果など）という相互作用があるため、2次形状係数の小さい積層ゴムでは要考慮。
- ・水平2方向変形に対する破断クライテリアについては今後検討が必要ではないか（高減衰ゴム系積層ゴムでは検討済み、他の履歴減衰型免震装置では要確認）。

【古屋先生】

- ・三方向成分の同時性を考慮した解析・設計は、設備機器への影響を考える際には不要と考える。
- ・設計では、水平・鉛直地震力の2方向同時入力で解析・評価するが、免震装置の力学特性に方向依存性を有する場合、水平2方向及び鉛直方向の3方向を考慮した解析を実施する。
- ・水平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妥当な組合せ方法で足し合わせるか、もしくは同時入力解析を行う。
- ・機器・配管の設計での水平・鉛直地震力の組み合わせは、水平・鉛直地震力を別々に解析する場合、絶対値和を基本とする（水平・鉛直地震力を同時入力し、計算時刻毎に代数和する方法も適用可能）。
- ・三方向同時入力は、免震層の剛性低下による免震構造物の長周期化に寄与する可能性があるものの、上部構造物への地震力等の影響は逆に小さくなる可能性がある。
- ・免震設計用の地震動を作成した場合、免震層の上部構造（機器・配管等含む）での耐震安全余裕について考え方をまとめておく必要がある。耐震安全性評価においては、PRAなどを用いて安全評価上の同一指標により判断することが考えられる。

3. 免震構造の設計に関する基本事項

(1) 許容限界

【菊地先生】

- ・一般建築物
 - +せん断と軸力との組み合わせは、圧縮領域のみを対象
 - +引張は面圧（単体、全体、平均など）のみで確認
 - +メーカーの評価実績は豊富、ただし、実構造物の地震時挙動を動的に考慮した試験は難しくスケールダウンした装置による静的な試験を実施する程度
- ・原子炉施設
 - +せん断と軸力との組み合わせは、引張～圧縮の全領域を対象
 - +電共研「免震システムの評価手法開発」での検討対象積層ゴム（1600mm径LRBなど）に限れば、かなり踏み込んだ検討実績あり
- ・線形限界を超える挙動追跡では、以下の事項について確認が必要
 - +動的加力時の挙動（ひずみ速度、繰り返し変形の影響）
 - +水平2方向、水平変形+軸力の連成効果

(2) 積層ゴムの許容限界、せん断評価、引張評価

【菊地先生】

- ・引張載荷時の面圧（=軸力/断面）とは、あくまでも平均値であり、断面内で面圧は一様分布し

ているとは限らない。

- ・フランジプレートの面外変形の影響としては、フランジ外周部で局部的に大きな引張面圧になっていると考えられる。
- ・一般建築物において、(平均)引張面圧 $1\text{N}/\text{mm}^2$ を引張限界強度とした評価実績は豊富にある。
- ・原子炉施設に関する検討では、(平均)引張面圧 $1\text{N}/\text{mm}^2$ を引張限界強度とする前提で、データが分析・整理されている。
- ・(平均)引張面圧 $1\text{N}/\text{mm}^2$ では剛性低下するだけであり、直ちに破断するわけではない(ただし、大きく変形する)。
- ・理想的には、せん断変形をオフセットとして与えた状態における引張試験において、引張面圧 $1\text{N}/\text{mm}^2$ をチェックすべき。
- ・引張力が発生する状況では、転倒モーメントの影響が入り、せん断変形も発生している。そのような状況を再現する試験は、試験機能力・実験の安全性から非常に難しく、実施例がまだ少ない。

【ブリヂストン 室田主幹専任部員】

- ・積層ゴムに発生する引張応力が $1\text{N}/\text{mm}^2$ を超えるとポイドが発生する可能性があるが、そのポイドが、その後の水平方向の特性に与える影響は小さく免震装置の性能が急激に低下するとは考えられない。ただし、安全余裕の観点で見た場合、その余裕が十分であるかについては発生ひずみの状態も踏まえて評価すべき。

(3) 積層ゴムの軸力再配分

【菊地先生】

- ・剛性低下すれば免震装置間で軸力の再配分が生じるため、上部構造にそれを伝達できる耐力や剛性が担保できれば、引張面圧 $1\text{N}/\text{mm}^2$ の許容限界は安全側の評価と考えられる。
- ・軸力の再配分が評価できるように解析モデルの精度を十分に検討する。
- ・引張により破断が生じたとすると水平剛性の検討も必要。
- ・構造物全体として転倒しないまでも、軸力再配分で成立するなら、設計として成立すると考えられる。

(4) 長時間継続する地震動による影響

【久田先生】

- ・連動地震や余震に対して免震装置の経時劣化等の配慮が必要

【菊地先生】

- ・長周期大変形繰返しにより影響を受ける免震装置は、原子炉施設への適用を考える場合、国交省の技術的助言の対象地域外であっても繰返し変形の影響により線形限界を超える可能性が考えられる。
- ・鉛プラグ入り積層ゴムの熱・力学連成挙動解析事例によると、積層ゴムが変位した際に、大口径積層ゴムほど熱がたまりやすいため、大口径積層ゴムを利用すると考えられる原子炉施設では、熱による影響の有無について要注意。
- ・積層ゴムの発熱は体積、放熱は面積に比例するため、サイズが2倍なら発熱は8倍、放熱は4倍となる。

(5) 履歴系ダンパーの評価、余震・誘発地震による影響

【菊地先生】

○履歴系ダンパー（免震U型ダンパー）の評価事例

- ・時刻歴応答変位にレインフロー法を適用して変位ごとの疲労回数を求め、これにマイナー則を適用して累積損傷度を評価している。
- ・累積損傷度の評価式は、実験値の回帰式に対して安全係数 0.7704（非破壊確率 95%）が乗じられている。

○累積損傷度による評価方法

- ・実測や実験結果の比較から、累積損傷度の評価法は十分妥当なものだと判断。
- ・安全余裕度については、他の免震装置との整合性をもって設定する。
- ・ダンパーの設計では、累積損傷度ではなく、最大応答変位でサイズや台数が決まる。累積損傷度の数値では余裕があるが、これで設計が決まった訳ではない。
- ・累積損傷度による評価は、地震によりどの程度損傷が累積したかを確認するのに十分妥当なものと考えている。
- ・このような評価が容易になるようにするためにも、モニタリングシステムを設置すべき。

【古屋先生】

○履歴系ダンパーの設計時の安全余裕の考え方

- ・弾塑性ダンパーの許容限界変形については、免震装置のばらつき（最大剛性，最小剛性）を考慮した上で、基準地震動 S_s による最大応答値に対して上回ることを確認する。
- ・弾塑性ダンパーの繰り返し耐力については、鋼材の一般的な疲労照査と同様にマイナー則に基づく累積疲労損傷度を適用し破断に至るまでの繰り返し変形性能を確認する。形状によっては水平 2 方向での変形性能も考慮する。
- ・弾塑性ダンパーの多くは、終局状態に向けて純せん断成分から軸力成分が作用し始めるため、骨格曲線にはハードニングが生じる。このため、JEAG4614-2013 での免震装置のハードニング特性を考慮した安全余裕の考え方に準拠し、ハードニング開始点に対して 1.5 以上の安全余裕を確保する（ハードニングの免震実効周期への寄与を避ける）。
- ・繰り返し変形性能の安全性を評価するうえで最新の専門知見をもとに過剰な指標にならないよう留意する。
- ・免震層での減衰要素の多様性を持たせることで安全余裕の確保に留意する。
- ・弾塑性ダンパー接合要素等、免震層の長期使用上での経年対策に留意する。

【日鉄エンジニアリング 渡辺シニアマネージャー】

- ・履歴系ダンパー（鋼材ダンパー）の累積損傷評価の原子炉施設への適用性について、一般建築物に比べて設計用地震動は大きいですが、東北地方太平洋沖地震の実測データや各種実験データを踏まえると累積損傷度による評価は、原子炉施設においても適用の可能性は高いと考える。

（6）フェールセーフの取り扱い

【菊地先生】

○フェールセーフの適用性

- ・建物が擁壁に衝突すると上部構造に過大な応答加速度が生じ、機器の損傷が危惧されるため、擁壁への衝突を前提とした設計はすべきではない。
- ・緩衝材のようなクリアランスを小さくするものは不要。原子炉施設では、一般建築物以上に免震クリアランスには余裕はあるはず。
- ・積層ゴムの破断変形以上の水平クリアランスを設けられれば、擁壁には衝突しない（衝突する前に、積層ゴムが損傷し荷重支持能力を喪失する）。
- ・ただし、積層ゴムの荷重支持能力喪失は何らかの方法で防ぐべき。

○免震層の過大変形と限界状態

- ・フェールセーフの設計における限界状態の設定については、擁壁への衝突及び上部建物過大応答は回避し、免震層が損傷する状態である限界状態3を選択するのが良い。
- ・積層ゴムの荷重支持能力喪失の対策要。
- ・破断変形を防止する高変形性能支承や変位抑制装置の導入。
- ・設計を超える地震力による免震装置（積層ゴム）の荷重支持能力喪失への対策としては、以下の様な例があげられる。
- ・高変形性能支承
 - 支承の径を大きくして変形能力を高める。
 - 複数の積層ゴムを組合せて、トータルで変形を大きくする。
- ・変位抑制装置
 - 可変減衰機構をもつオイルダンパー
(通常の減衰係数は低めで、大変形では減衰が大きくなる)
 - ソフトランディング
(積層ゴムの沈み込みによって、荷重の支持を分担する装置。
摩擦によって変形を押さえる。)

(7) 免震構造に伴う設備設計への影響

【古屋先生】

○渡り配管

- ・渡り配管等の免震構造物－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。
- ・端部のノズル部等は座屈による損傷がないことを確認する。
- ・伸縮継手、ケーブルなどについては、これまでの専門知見が集約されている免震構造協会等の資料を参考に確認項目を設定する。

○大口径配管

- ・規格基準に準拠し、SUS 等の実績がある材料を用いれば大口径配管の課題は少ないと思われる。ただし、口径に関わらず、異材配管溶接、減肉のモニタリング方法、適切なメンテナンス時期の設定などについては、留意する必要がある。
- ・JEAG4614-2019 での主な留意事項として、免震と非免震の渡り部に大口径配管を適用した場合の確認として配管要素の大変位試験が参照されている。この結果、破壊モードが疲労であり評価法としては既往の疲労評価が適用できることが確認されている。

○スロッシング以外に影響を与える可能性のある振動特性

- ・免震層によるフィルタ効果、および、加速度軽減効果により、免震層上部の耐震設計された構造物については、耐力的に課題が生じることはないと考ええる。
- ・スロッシング、渡り部の変位影響以外に特に留意事項はないと考える。
- ・相対的に固有周期が大きくなる機器や原子炉建屋の振動モードを抽出し、免震層の振動特性により有意な応答増幅がないことを確認する。
- ・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留意する。

4. 免震装置の品質管理（特に地震後の維持管理）に関する留意事項

(1) 地震観測装置等の維持管理への活用

【久田先生】

- ・強震計によるモニタリングはクライシスマネジメントだけでなく、メンテナンスやサイト固

有の地震動評価等に有効。ただし、多様なシステムがあり、施設の重要度や費用対効果などから適宜選択する。

【菊地先生】

- ・ 目視以上の点検には、変位履歴が必要。
- ・ けがき変位計記録を用いた免震 U 型ダンパーの残存疲労性能評価事例は多数あるが、原点付近の変位履歴の読み取りが困難。
- ・ 変位時刻歴データが得られれば、免震装置のリアルタイム損傷評価が可能。

【古屋先生】

○履歴ダンパーの維持管理における減衰の観点での確認方法

- ・ 地震中および地震後の健全性を確認するために地震観測を実施することも考える。

(2) 別置き試験体の設置

【菊地先生】

- ・ 数十年にわたる運転期間において、積層ゴムの経年による力学性能の評価は必要（以下の 2 要因）。
 - クリープ変形による特性変化
 - ゴムの酸化による特性変化
- ・ 縮小試験体：クリープ変形の検証のための軸力導入が容易。
- ・ 実機：ゴムの酸化による特性変化を直接的に評価可能（縮小試験体ではスケール効果を考慮する必要あり）。
- ・ 理想的には実大を置きたいが、試験時のハンドリングが困難である、試験をする場所まで運ぶことが難しい等の問題もある。

【ブリヂストン 室田主幹専任部員】

- ・ 開発初期は、性能変化をモニタリングする目的で、製品と同じゴム材料による縮小体を製作して免震層に設置(サイト別置き)していたが、1990 年後半以降、工場での代表製品(工場別置き)によるモニタリングとなり、工場別置き初期のものでも 20 年を経過している。おおむね、加熱劣化促進による推定範囲に収まっている。工場別置きを設置により、サイト別置きはほとんどなくなってきている。

(3) 発電所における免震構造建屋の設計、地震時及び地震後の対応状況等

【事業者】

- ・ 女川原子力発電所においては、地上 8 階建の鉄骨造の事務所を免震構造で建設（2011 年 8 月竣工）しており、既往の強震観測記録、告示 3 波及びサイト波で設計を行い、さらに告示波レベル 2 の 1.5 倍の地震動を用いて余裕度の確認を行った。2011 年東北地方太平洋沖地震では、当建屋は建設中（躯体工事が終了し内装仕上げを工事中）であったが、目視点検により、上部構造、下部構造及び免震装置に異常が無いことを確認した。
- ・ 福島第一原子力発電所においては、地上 2 階建の SRC 造の緊急時対策室を免震構造で建設（2010 年 6 月竣工）しており、告示 3 波を 1.5 倍した地震波と基準地震動 S_s (S_{s1} 、最大加速度 450Gal、水平 1 方向を適用)を用いて設計を行った。2011 年東北地方太平洋沖地震では、地震観測記録が得られており、基礎上端で 756Gal、建物 1 階で 213Gal を確認した。地震後の目視点検では、建物及び免震装置に異常が無いことを確認した。また、建物内に設置されていた機器等の転倒も無かった。
- ・ 福島第二原子力発電所においては、地上 3 階建の RC 造の緊急時対策室を免震構造で建設（2010 年 3 月竣工）しており、告示 3 波を 1.5 倍した地震波と基準地震動 S_s (S_{s1} 、最大加

速度 450gal、水平 1 方向を適用)を用いて設計を行った。2011 年東北地方太平洋沖地震では、地震観測記録が得られており、基礎上端で 411Gal、建物 1 階で 184Gal を確認した。地震後の目視点検では、建物及び免震装置に異常が無いことを確認した。また、建物内に設置されていた機器等の転倒も無かった。

- ・ 東海第二発電所においては、地上 3 階建の RC 造の緊急時対策所を免震構造で建設 (2011 年 3 月竣工) しており、告示波 3 波及び観測波 3 波並びに告示波レベル 2 の 1.5 倍の地震動、基準地震動 (当時) を用いて設計を行った。2011 年東北地方太平洋沖地震では、当建屋は竣工前で未使用であったが、事務本館で執務していた職員は本震発生後、免震構造建屋に一時的に避難し地震後の対応を行った。地震後の目視点検では、建物周辺の外構仕上げの一部に不具合が確認されたものの建物構造体や免震装置には異常が無く、補修・交換といった対応は不要であった。

建物・構築物の免震構造に関する検討チーム 構成員名簿

原子力規制委員会

山中 伸介 原子力規制委員会委員
石渡 明 原子力規制委員会委員

外部専門家（順不同、敬称略）

菊地 優 北海道大学大学院 工学研究院 建築都市部門 教授
久田 嘉章 工学院大学 建築学部まちづくり学科 教授
古屋 治 東京電機大学 理工学部機械工学系 教授

原子力規制庁

大村 哲臣 審議官
川内 英史 技術基盤グループ安全技術管理官（地震・津波担当）
大浅田 薫 原子力規制部安全規制管理官（地震・津波審査担当）
大橋 守人 技術基盤グループ地震・津波研究部門 首席技術研究調査官
山崎 宏晃 技術基盤グループ地震・津波研究部門 統括技術研究調査官
猿田 正明 技術基盤グループ地震・津波研究部門 主任技術研究調査官
小林 恒一 技術基盤グループ地震・津波研究部門 主任技術研究調査官
日高 慎士郎 技術基盤グループ地震・津波研究部門 主任技術研究調査官
名倉 繁樹 原子力規制部地震・津波審査部門 安全管理調査官
江崎 順一 原子力規制部地震・津波審査部門 企画調査官
三浦 宣明 原子力規制部地震・津波審査部門 主任安全審査官
井上 超 原子力規制部地震・津波審査部門 主任安全審査官
大野 佳史 原子力規制部地震・津波審査部門 安全審査官

（所属及び役職は、令和 2 年 10 月時点のもの。）

建物・構築物の免震構造に関する検討チーム 開催経過

第1回 令和2年2月5日（水）

- (1) 「建物・構築物の免震構造に関する検討チーム」について
(免震構造の規制に係る経緯等)
- (2) 「建物・構築物の免震構造に関する検討チーム」の目的、主な検討事項等について
- (3) その他

第2回 令和2年6月18日（木）

- (1) 第1回会合での外部専門家からのご意見に対する対応方針
- (2) 検討事項に対する外部専門家からのご意見

第3回 令和2年7月28日（火）

- (1) 第2回会合での外部専門家からのご意見に対する対応方針
- (2) 免震装置メーカー等からの検討事項に関する技術的な観点での意見
- (3) 免震構造に対する事業者のこれまでの取組状況等

第4回 令和2年10月22日（木）

- (1) 第3回会合での外部専門家からのご意見に対する対応方針
- (2) フェールセーフに対する考え方
- (3) 建物・構築物の免震構造に関する検討チームでの主な論点の取りまとめ