

建物・構築物の免震構造に関する審査ガイド

建物・構築物の免震構造に関する検討チーム 第2回会合

機器・設備に係る論点に対する意見

資料2-3

東京電機大学 理工学部 古屋 治

1. 機器・設備に関する論点

第2回会合での機器・設備に係る論点を次に示す。

- ① 免震設計用の鉛直方向地震動の設定及び利用
- ② 三方向成分の同時性を考慮した設計
- ③ 履歴系ダンパーの設計時の安全余裕の考え方
- ④ 免震構造と非免震構造の構造物間の渡り配管等のインターフェース部の健全性評価
- ⑤ 原子力発電所施設における大口径配管を用いる場合の設計上の留意事項
- ⑥ スロッシング以外に免震構造を作用することにより発電所設備に影響を与える可能性がある振動特性
- ⑦ 免震層ならびに履歴系ダンパーの十分な安全余裕に関する定量的指標
- ⑧ 履歴系ダンパーの維持管理における減衰の観点での確認方法

2. 機器・設備に関する論点への意見

①から⑧の論点に対しての意見をまとめる。

3. 参考情報

原子力分野以外の機械系構造物での免震構造の取り扱い状況について示す。

2. 機器・設備に関する論点への意見

①免震設計用の鉛直方向地震動の設定及び利用

- 原子力発電所免震構造設計技術指針（JEAG4614-2019）では、鉛直方向地震動の設定について特記はない（既往の基準地震動 S_s の設定に準ずる）。なお、基準地震動 S_s は地震学や地震工学等の分野における最新の知見に工学的判断を加えて作成することとしている。
- 免震設計用地震動の作成にあたっては、地震応答のばらつきに起因した過小評価を回避するため、免震構造の主要モードでの減衰を考慮してターゲットスペクトルを設定する（例えば参考文献①-1）。JEAG4601-2015では、非免震構造を念頭にターゲットスペクトルの減衰を $h=0.05$ として定義しているが、免震構造の場合、水平方向では少なくとも $h=0.2$ 以上となることが考えられる。鉛直方向についても減衰は、 $h=0.05$ と異なることが想定される。このため、詳細には、免震構造の水平・鉛直方向の減衰を考慮してターゲットを設定することが重要となる。
- 免震設計用の鉛直方向地震動の設定を検討する場合、NRC REGULATORY GUIDE 1.60（参考文献①-2）に準拠することが考えられる。ここでは、鉛直方向の地震動は水平方向のスペクトルを $2/3$ 倍としている（表2 注釈b）。

<参考意見>

- 免震設計用地震動を作成した場合、免震層の上部構造物（含む機器・配管等）での耐震安全裕度評価における従来の耐震設計基準地震動の取り扱い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。

<参考文献>

- ①-1 深沢，藤田，高減衰定数を有するターゲットスペクトルに適合した模擬地震動の作成，日本地震工学会論文集，2018年18巻4号，p. 4_75-4_90
- ①-2 REGULATORY GUIDE 1.60, DESIGN RESPONSE SPECTRA FOR SEISMIC DESIGN OF NUCLEAR POWER PLANTS, U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION OFFICE OF NUCLEAR REGULATORY RESEARCH, 2014.

2. 機器・設備に関する論点への意見

②三方向成分の同時性を考慮した設計

- 三方向成分の同時性を考慮した解析・設計は、基本的には不要と考える。
 - ・ 水平方向については、積層ゴム等アイソレータのばね要素が想定使用領域である線形限界内であれば、水平面内の地震応答に及ぼす影響は軽微である。
 - ・ 鉛直方向については、積層ゴムに引張が生じると、積層ゴムの構造健全性は十分に確保されるものの、一般に荷重-変位関係は非線形特性となる。当該非線形特性が機器の耐震設計に用いる床応答曲線に影響を及ぼすことが指摘されている。積層ゴムの引張り応答については、入力地震動の大きさと建屋の重心位置が関係する（重心位置が高い場合、転倒モーメントが励起されやすくなり、これにより外周部に配置した積層ゴムが引張りを伴う恐れがある）。
- 設計では、水平・鉛直の同時入力で解析・評価する。ここでは、水平方向に比べて鉛直方向での地盤と免震層の剛性が近傍となることから、地盤-免震層-建屋の相互作用に留意するため、地盤ばねを考慮した解析を実施する。次に、当該解析で得られた時刻歴波形を用いて、機器の耐震設計に用いる床応答曲線を作成する。
- 免震装置の力学特性に方向依存性を有する場合、水平2軸+鉛直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その使用が妥当とされる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・鉛直の組み合わせは、水平・鉛直を別々に解析する場合、絶対値和を基本とする（水平・鉛直を同時入力し、計算時刻毎に代数和する方法も適用可能）。

<参考意見>

- 三方向成分の同時性により何を評価するかを明確にする（応力の重ね合わせ、時刻歴応答など）。
- ガイドでは終局を意識した記載となっているが、JEAG4614を含め線形限界内での使用を前提とした条件と異なる。
- 三方向同時入力は、免震層の剛性低下による長周期化に寄与する可能性があるものの、上部構造物への影響は逆に小さくなる可能性がある。
- 機器系の水平・鉛直の組合せについては、既往の配管解析結果（国プロ、JEAG参照）ではSRSSでも妥当な結果が得られるものの解析確認等がさらに必要との判断で絶対和としている。

2. 機器・設備に関する論点への意見

③履歴系ダンパーの設計時の安全余裕の考え方

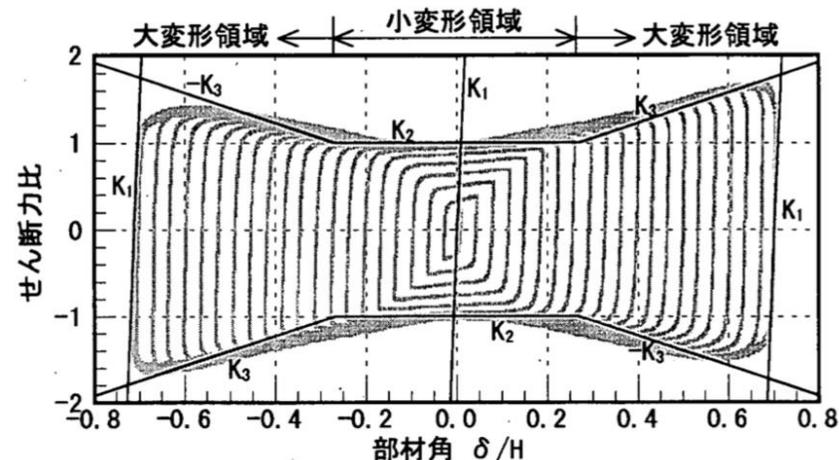
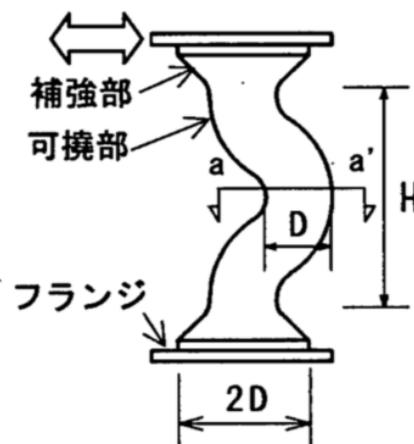
- 弾塑性ダンパーの許容限界変形については、免震装置のばらつき（最大剛性，最小剛性）を考慮した上で、基準地震動 S_s による最大応答値に対して上回ることを確認する。
- 弾塑性ダンパーの繰り返し耐力については、鋼材の一般的な疲労照査と同様にMiner則に基づく累積疲労損傷度を適用し破断に至るまでの繰り返し変形性能を確認する。形状によっては水平2方向での変形性能も考慮する。
- 弾塑性ダンパーの多くは、終局状態に向けて純せん断成分から軸力成分が作用し始めるため、骨格曲線にはハードニングが生じる（例えば参考文献③-1）。このため、JEAG4614-2013での免震装置のハードニング特性を考慮した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）

<参考意見>

- 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含め免震層の長期使用上での経年対策も十分に留意する。

<参考文献>

③-1 森田慶子，高山峯夫，免震構造用鉛ダンパーの実験的研究：別置型鉛ダンパーの復元力モデルと繰返し特性の評価について，日本建築学会構造系論文集，68巻570号 p. 53-60，2003.



2. 機器・設備に関する論点への意見

④免震構造と非免震構造の構造物間の渡り配管等のインターフェース部の健全性評価

- 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。
- 渡り配管の破損モードは、免震建屋とタービン建屋との相対変位を起因とする低サイクル疲労であることが想定されるため、基準地震動に対して当該配管に生じる相対変位が吸収可能となることに留意する。
- 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ガイドを参考に確認項目を設定する。

<参考意見>

- 健全性評価試験などは、日本産業規格（JIS）（参考文献④-1）、高圧ガス保安協会基準（参考文献④-2）等他分野の規格基準なども参照する。

<参考文献>

- ④-1 例えば、日本産業規格、ベローズ形伸縮管継手、JIS B 2353, 2013年
- ④-2 例えば、高圧ガス保安協会、可とう管に関する検査基準、KHKS 0803, 2009年

2. 機器・設備に関する論点への意見

⑤原子力発電所施設における大口径配管を用いる場合の設計上の留意事項

- 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
 - ・ 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。
 - ・ 多質点入力解析等の適用（床応答は免震層のバラツキを考慮して包絡する）
 - ・ 渡り部の配管減衰は原則として0.5%を適用（変位吸収のためサポート間隔が大きくなることを考慮して保守的に設定）。もしくは、試験等により確認された値。

<参考意見>

- 上記は原子炉建屋等に免震を採用する場合であり、SA施設では対象設備がない場合が考えられる。

2. 機器・設備に関する論点への意見

⑥スロッシング以外に免震構造を作用することにより発電所設備に影響を与える可能性がある振動特性

- 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摘出し、**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。
- 原子炉**建屋内の機器設備**は、建屋の一次固有周期（0.2～0.3秒程度）より**短周期側**の固有周期になるため免震の振動特性により**影響を受けることはない**と考える。
- **鉛直方向入力**については、建屋床応答などに影響が生じることは考えられるが、設置される機械構造物での**限界耐力等に影響を与えることはない**と考える。

<参考意見>

- **上記は原子炉建屋等に免震を採用する場合であり、S A施設では対象設備がない**場合が考えられる。

2. 機器・設備に関する論点への意見

⑦免震層ならびに履歴系ダンパーの十分な安全余裕に関する定量的指標

- 基準地震動 S_s による応答値が免震層に設置される各装置に対する基準値に対して下回ることを確認する。
- JEAG4614に準拠して、免震層および履歴系ダンパーは、基準地震動に対する応答が、それらの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ものとする。

<参考意見>

- 安全余裕の確保に関しては、鉛直支持性能の喪失により即座に機能喪失につながることから鉛直荷重を支持するアイソレータ（積層ゴム、すべり支承）に関してフェイルセーフ対策を確保する。
- 上部架構の塑性化を防止することが安全余裕を確保する上で有効と考える。
- SA施設は、重大事故時に設計基準事故対処施設（DB施設）の代替設備の役割を果たす。DB施設は、短周期地震動の影響を受けるのに対し、免震SA施設は、比較的長周期地震動の影響を受ける振動特性となる。このため、免震構造を採用することにより、機能維持の多様性が得られる。
- 地震後の免震層の残留変位や免震層基礎部の損傷、傾斜などは低確率ながら想定は必要と考える。

2. 機器・設備に関する論点への意見

⑧履歴系ダンパーの維持管理における減衰の観点での確認方法

- 基準地震動に対して、低サイクル疲労評価が十分な安全余裕を有していることを確認する。
- 予め別置き履歴系ダンパー等を導入するなどして、地震動のレベルが大きく、かつ塑性率が大きくなった場合、加力試験により設計時に見込んだ減衰から有意な低下（低下率の閾値は、設計時に想定した下限側）がないことを確認する。
- 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。
- 機能上支障となる損傷、変形、変位、緩み、錆、可動範囲に障害物が無いことを目視点検により確認する。

<参考意見>

- モニタリングなどによる降伏変位の経験量に応じて履歴系ダンパーの交換を前提にする場合には、疲労評価による維持管理は不要と考える。

3. 参考情報

ここでは、原子力分野以外の機械系構造物での免震構造の取り扱い状況について示す。

□ クレーン構造物の主な耐震設計基準

- 日本産業規格 JIS B 8842（策定中）クレーン — 耐震設計に関する原則
（概要）構造的不安定に対する余裕が少ないクレーン構造物でのレベル2地震動における構造部材の塑性化を考慮し、安全性及び経済性を両立させるために免震装置などを採用する場合がある。免震・制振クレーンの耐震設計にあたっては、クレーンと免震・制振装置との連成モデルを構築し、複数の適切な地震動に対して時刻歴応答法による解析を行うなどにより、免震装置が働き出す地震荷重（トリガー荷重）を算定し、クレーンの主要構造部材が弾性範囲内に収まる応力設計を行うことを原則とする。また、免震装置等の変形が過大にならないように十分配慮する。免震装置または制振装置の構造に非線形性が存在する場合には、これを適切な方法によって解析モデルに組み込むものとする。なお、免震・制振クレーンであっても、修正震度法に基づく一次評価を行い、両者の結果を比較して差異が生じた場合、その要因を分析して、両者から得られた結果の妥当性を評価する。ただし、この場合の設計水平震度 K_H の値は0.1以上を確保する必要がある。
- 国際標準化機構 ISO 11031:2016 Cranes-Principles for seismically resistant design
- 厚生労働省：クレーン構造規格
- 日本クレーン協会：クレーン耐震設計指針（JCAS1101-2018）
- 国土交通省：港湾の施設の技術上の基準を定める省令（第42条）

□ 高圧ガス設備の主な耐震設計基準

- 経済産業省告示第220号 高圧ガス設備等の耐震性能を定める告示
- 高圧ガス保安協会規格「高圧ガス設備等の耐震設計に関する基準」
- 高圧ガス設備等耐震設計基準