

(58) 免震装置の終局破断限界を考慮した次世代軽水炉免震建屋の挙動解析

An Vibrating Response Analysis of the Isolated LWR Building
considering the Shock by Failure of Multi-layer Rubber Isolator

星名博文*, 趙 哲林*, 丹羽一邦**
Hirofumi Hoshina, Tetsurin Chou, Kazukuni Niwa

*工修, (株) テラバイト, 技術部 (〒113-0034 東京都文京区湯島 3 丁目 21 番 4 号)

** 工修, (株) テラバイト, 取締役 (〒113-0034 東京都文京区湯島 3 丁目 21 番 4 号)

Key Words: (Next Generation LWR, Isolated Reactor Building, Seismic Isolator, FEM Simulation)

キーワード: 次世代軽水炉, 免震建屋, 免震装置, 終局破断限界挙動, FEM シミュレーション

1. はじめに

世界的に原子力発電所の新規建設が計画されており, 次世代軽水炉の研究開発が実施されている^{1)~4)}.

次世代軽水炉の主要コンセプトの一つに, 建設地点の地震条件に依存しない設計と耐震安全性を強化するために免震技術が適用されており, 免震装置の基本試験や破断試験及び免震建屋の解析評価手法が検討されている.

本論文では 3 次元ソリッド要素を用いた免震装置単体の終局破断限界挙動解析を行い, 免震装置の履歴特性及び終局破断限界について実験結果との検証を行う. 次に, 非線形ビームモデルで同等の結果が得られることを確認した上で, 設計地震動を超える場合の破壊を考慮した非線形ビームモデルによる免震装置 400 個を有する次世代軽水炉免震建屋全体モデルの地震応答解析を実施し, 免震装置の破断による衝撃応答を考慮した挙動について考察する.

2. 免震装置単体の破断挙動実験結果の検証解析

鉛プラグ入り積層ゴム免震装置単体の終局破断挙動実験結果の検証解析を実施し, 本解析モデルの妥当性を確認する. ここでは 3 次元ソリッド要素及び非線形ビーム要素を用いた鉛プラグ入り積層ゴム免震装置による非線形応答解析を行い, その非線形応答特性「水平荷重-水平変位関係」及び終局破断限界挙動を把握する. 解析には汎用構造解析ソフトウェア LS-DYNA を使用する.

解析対象は, 鉛プラグ入り積層ゴム免震装置¹⁾: ゴム外径 800mm×ゴム 1 層厚 5.7mm-ゴム層数 22 (鉛プラグ径 160mm), 天然ゴム (G4) とする.

図-1 に 3 次元ソリッド要素による免震装置単体の解析モデルを示す. 解析モデルの規模は, 約 19000 要素である.

鉛プラグの物性値⁵⁾ は, 移動硬化則による弾完全塑性体にてモデル化し, 上下フランジ及び中間鋼板は, 弾性体にてモデル化した. 天然ゴムの公称応力-公称ひずみ関係及びダメージ曲線は, ゴム材料特性試験結果⁶⁾ を参考にした. ただし, 本解析における積層ゴムの破断ひずみは, 実験結果¹⁾と同様に 526%と設定し, ダメージを伴う非圧縮性ゴム材料モデルにてモデル化した.

境界条件及び荷重条件は, 免震装置の下面を完全拘束とし, せん断変形率 100%, 200%, 250%, 300%, 400% の 5 水準で各々 1 ループの漸増荷重を行い, その後一方向に破断するまで荷重した.

図-2 に実験結果と 3 次元ソリッド要素モデルによる解析結果での免震装置の荷重-変位曲線を示す. 図中, 点線が実験結果¹⁾の荷重-変位曲線をトレースしたものであり, 実線が本解析による荷重-変位曲線を示す. 図に示すように, 実験結果と解析結果の荷重-変位曲線はほぼ同等となった.

また, 免震装置の積層ゴムと鉛を積層ゴム要素及び減衰要素にてヒステリシスを有する非線形材料モデルのビーム要素でモデル化した場合についても同様な解析を行った.

図-3 に実験結果と非線形ビーム要素モデルによる解析結果での免震装置の荷重-変位曲線を示す. 図中, 点線が実験結果¹⁾の荷重-変位曲線をトレースしたものであり, 実線が本解析による荷重-変位曲線を示す. 図に示すように, 実験結果と解析結果の荷重-変位曲線はほぼ同等となった.

図-4 に本解析による積層ゴムの変形破断を示す. 図

に示すように、上下層の積層ゴム最大引張り応力が発生する領域が破断の起点となって終局破断に至った。

ソリッド要素とビーム要素の検証解析により、鉛プラグ入り積層ゴム免震装置単体の終局破断挙動に関する本解析モデルの妥当性を確認した。

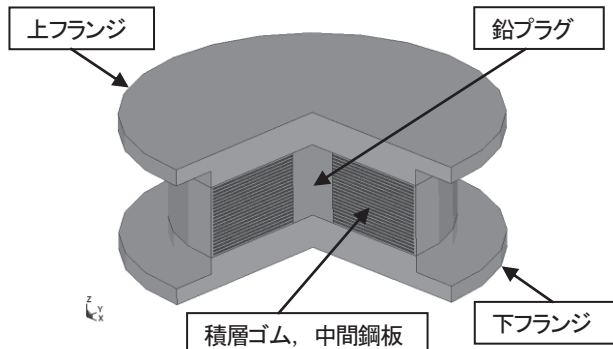


図-1 免震装置単体の解析モデル

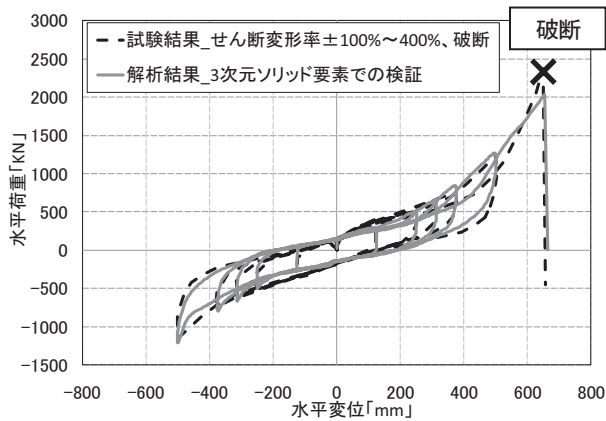


図-2 免震装置の荷重-変位曲線 (ソリッドモデル)

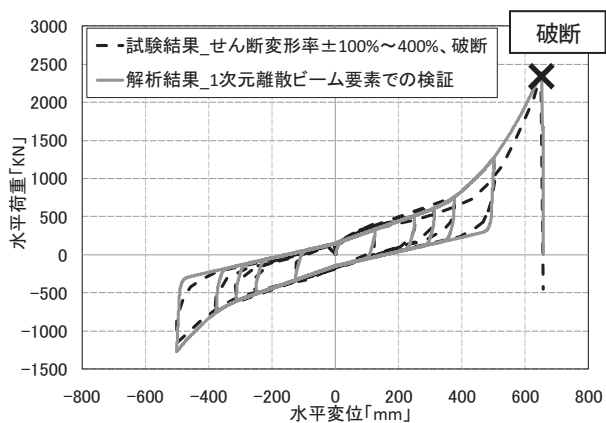


図-3 免震装置の荷重-変位曲線 (ビームモデル)

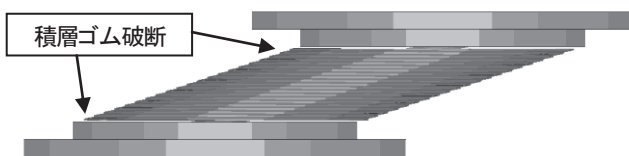


図-4 積層ゴムの変形及び破断

3. 水平免震システムの終局挙動実験結果の検証解析

大型震動台を用いた FBR 水平免震システムの終局挙動把握試験結果^{3),4)}の検証解析を実施し、本解析モデルの妥当性を確認する。ここでは非線形ビーム要素を用いた鉛プラグ入り積層ゴム免震装置水平免震システムの非線形応答解析を行い、その非線形応答特性「水平荷重-水平変位関係」及び終局挙動を把握する。

解析対象は、FBR 水平免震システム^{3),4)}であり、鉛プラグ入り積層ゴム免震装置:ゴム外径 505mm×ゴム 1 層厚 3mm-ゴム層数 24 (鉛プラグ径 112mm), 免震装置 6 個配置, 質量 600ton である。

図-5 に FBR 水平免震システムの解析モデルを示す。免震装置は、積層ゴムと鉛を積層ゴム要素及び減衰要素にてヒステリシスを有する非線形材料モデルのビーム要素にてモデル化した。免震装置以外のスラブ、壁、柱、基礎版は線形のビーム要素にてモデル化した。免震装置 6 個の上端を剛梁にてモデル化し、免震装置 6 個の下端を剛結としてモデル化した。

FBR 水平免震システムの終局挙動把握試験結果^{3),4)}における入力地震波は、暫定設計地震動 (水平方向) をバンドパスフィルタ処理した入力加振波の 4 倍入力であり、水平免震システムの長辺方向一方向に入力した。ただし、本解析では図-6 に示す日本建築センター模擬地震波 BCJ-L2 (最大加速度 356gal) の 4 倍入力とし、水平免震システムの長辺方向一方向に入力した。

解析には汎用構造解析ソフトウェア「LS-DYNA」を使用し、陽解法による非線形地震応答解析を実施した。時刻歴応答解析における解析継続時間は 50(s), 時間積分分には陽的時間積分法とし、時間積分間隔は $\Delta t=10^{-5}$ (s) 程度である。

図-7 に水平免震システム終局挙動試験及び本解析による荷重-変位曲線を示す。図中、点線は水平免震システム終局挙動試験結果^{3),4)}の荷重-変位曲線をトレースしたものであり、実線が本解析による荷重-変位曲線を示す。図に示すように、試験結果と本解析による荷重-変位曲線は概ね同等となった。

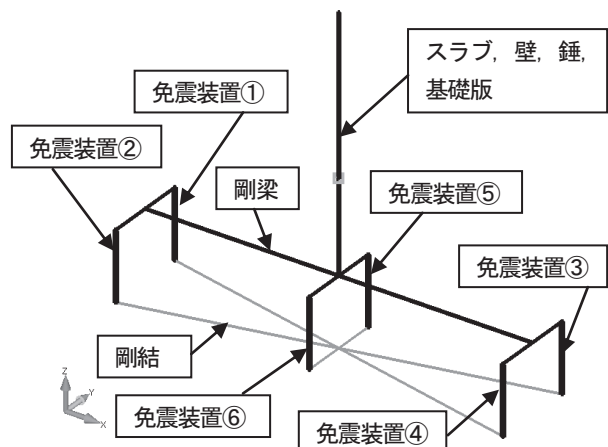


図-5 水平免震システム終局挙動試験の解析モデル

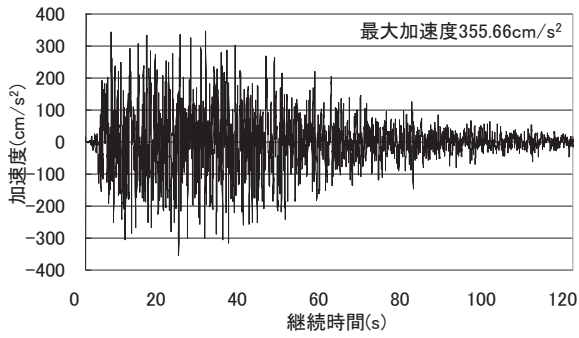


図-6 日本建築センター模擬地震波 BCJ-L2

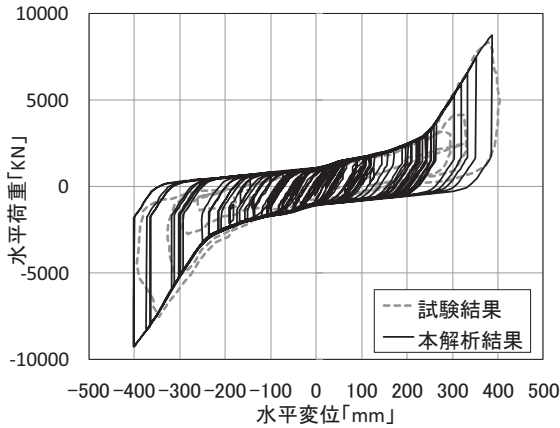


図-7 水平免震システムの荷重-変位曲線

4. 次世代軽水炉免震建屋の終局破断限界挙動解析

2章では鉛プラグ入り積層ゴム免震装置単体の終局破断挙動実験結果の検証解析, 3章では大型震動台を用いたFBR水平免震システムの終局挙動把握試験結果の検証解析を行い, 3次元ソリッド要素及び非線形ビーム要素による免震システム解析モデルの妥当性を確認した。

ここでは設計地震動を超える場合の破壊を考慮した非線形ビームモデルによる免震装置400個を有する次世代軽水炉免震建屋全体モデルの地震応答解析を実施し, 免震装置の破断による衝撃応答について検討を行った。

鉛プラグ入り積層ゴム大型免震装置は, 文献⁵⁾において最大の免震装置とし, ゴム外径1300mm×ゴム1層厚8mm-ゴム層数21(鉛プラグ径260mm)とした。なお, 解析手法は, 2章に示すものと同様とし, 大型免震装置単体の3次元ソリッド要素モデルと非線形ビーム要素ではほぼ同等の荷重-変位曲線が得られることを確認した。

免震建屋全体の解析モデルは, 400体の鉛プラグ入り積層ゴム大型免震装置を等間隔配置とし, 原子炉建屋はPWR 4LOOP 110万kWeクラス原子炉建屋^{7),8)}相当とした。PCCV及びREBは, コンクリートのひび割れを考慮した非線形材料モデルによる3次元積層シェル要素にてモデル化し, I/C及び基礎版は, 弾性体とし3次元ソリッド要素にてモデル化した。なお, 建屋の材料物性値は, JEAC4601-2008⁷⁾に示す値を使用した。

図-8に次世代軽水炉免震建屋の解析モデルを示す。

モデル規模は, 約11万要素である。免震装置単体モデルの固有値解析による第1周期は $T_1=0.9s$, 第2周期は $T_2=2.7s$ である。なお, 免震建屋全体モデルの固有値解析による1次周期は $T_1=0.9s$ である。

本解析では免震装置の破断特性のばらつきを考慮して, 破断変形率が350%のものを周囲に16個, 破断変形率400%を周囲に8個, 450%を368個, 500%を周囲に8個の合計400個を配置した。

本解析では, 自重負荷後に免震装置下端に地震波を水平2方向+上下方向(水平の2/3倍)に同時入力する。入力地震波は, 図-6に示す日本建築センター模擬地震波BCJ-L2とし, その3倍入力の場合について実施した。なお, 解析方法は, 3章に示すものと同様とした。

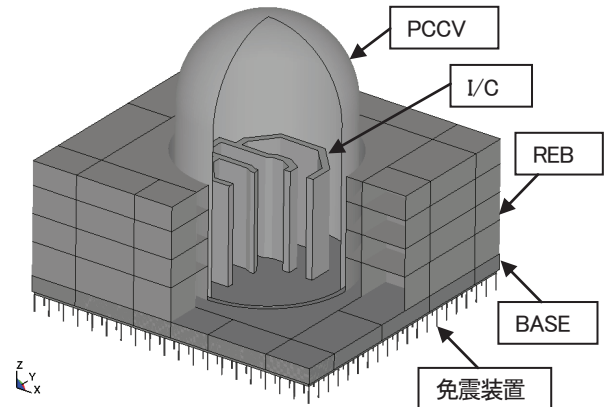


図-8 次世代軽水炉免震建屋の解析モデル

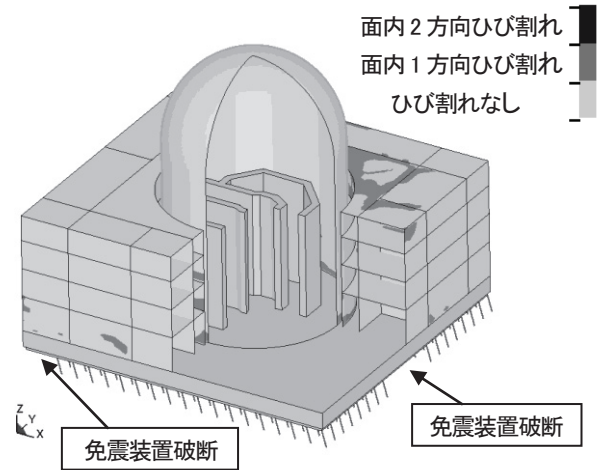


図-9 コンクリートのひび割れコンタ

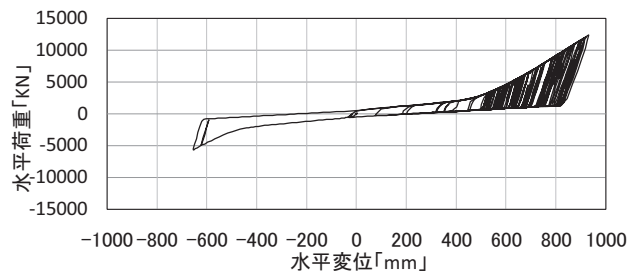


図-10 免震装置の荷重-変位曲線(破断無し)

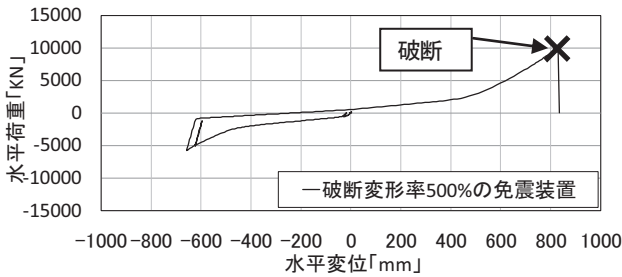


図-11 免震装置の荷重-変位曲線 (破断考慮)

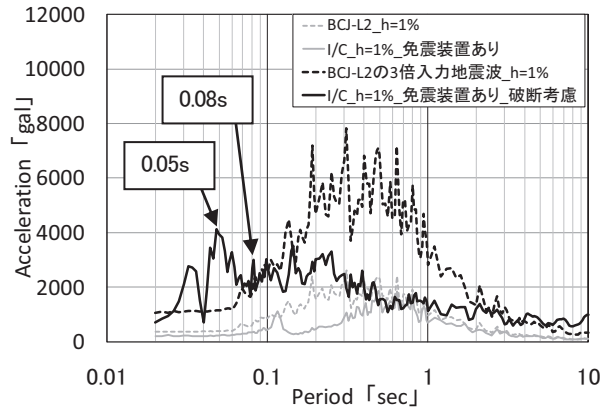


図-12 加速度応答スペクトル (入力地震波, I/C, h=1%)

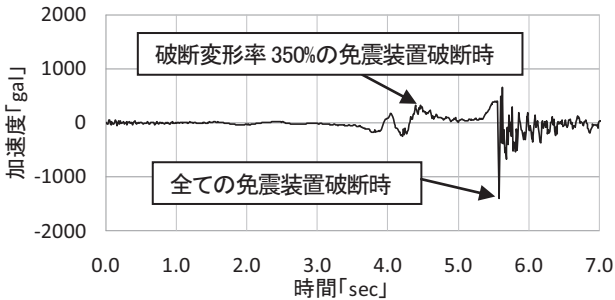


図-13 I/Cの加速度時刻歴 (BCI-L2の3倍入力)

図-9 に破断変形率 350%の免震装置が破断した時点でのコンクリートのひび割れコンタを示す。図中、濃灰色は面内1方向ひび割れを、灰色はひび割れ無しを表す。図に示すように、周辺建屋 REB に面内1方向ひび割れが発生した。また、破断変形率 450%の免震装置が破断すると PCCV 底部に面内2方向ひび割れが発生した。

図-10 及び図-11 に免震装置の荷重-変位曲線 (破断無し, 破断考慮) を示す。免震装置の破断を考慮した場合, 入力地震波が BCI-L2 の3倍入力と大きいため少ない履歴ループで破断に至った。

図-12 に加速度応答スペクトル (入力地震波, I/C, h=1%) を示す。図中, 灰色点線は BCI-L2 の加速度応答スペクトルを示し, 灰色実線は BCI-L2 入力による I/C の加速度応答スペクトルを示す。周期 0.5s~0.02s では免震装置の減衰効果により加速度応答スペクトルが低減している。また, 図中, 黒点線は BCI-L2 の3倍入力地震波の加速度応答スペクトルを示し, 黒実線は BCI-L2 の3倍入力による免震装置の破断を考慮した場合の I/C での加速度応答スペクトルを示す。周期 2s~0.2s では免震装置の減衰効果により加速度応答スペクトルが

低減しているが, 周期 0.08s (振動数 12.5Hz) では免震装置の破断による衝撃応答により入力地震波の加速度応答スペクトルの 1.5 倍になっており, 特に周期 0.05s (振動数 20Hz) では 4 倍に増大している。これは, 図-13 の I/C の加速度時刻歴に示すように, 全ての免震装置が破断する時の急激な加速度の増大によるものと考えられる。原子力機器は, 固有振動数 20Hz 以上のものが多く, 免震装置が破断した場合, 衝撃応答の影響が大きいと考えられる。

5. まとめ

次世代軽水炉免震設計・解析手法の確立を目的として, 設計地震動を超える入力に対する次世代軽水炉免震建屋の終局破断限界挙動について検討した。

本解析で得た知見を以下に示す。

- (1) 免震装置単体の終局破断限界挙動実験結果を非線形応答解析により検証し, 3次元ソリッドと非線形ビームモデルの妥当性を確認した。
- (2) 免震装置上下層ゴムの一部の損傷破損が起点となり, 積層ゴムの終局破断に至った。なお, 本解析結果は終局破断挙動実験結果と一致した。
- (3) 大型震動台を用いた免震システムの終局挙動把握試験結果を非線形応答解析により検証し, 本解析モデルの妥当性を確認した。
- (4) 次世代軽水炉免震建屋 (鉛プラグ入り積層ゴム免震装置 400 個) の終局破断限界挙動解析により, LS-DYNA による免震装置 400 個の非線形ビーム要素を用いた 3次元免震建屋モデルの非線形地震応答解析が可能である。免震装置の破壊を考慮でき, 免震装置の破壊による衝撃応答を調べることができる。

参考文献

- 1) 山本ほか, 次世代軽水炉の免震技術の開発 (その7~10), 日本建築学会大会学術講演概要集, 2010年9月。
- 2) 財団法人エネルギー総合工学研究所, 次世代軽水炉等技術開発に係る中間評価報告書, 2010年7月。
- 3) 北村ほか, 大型震動台を用いた FBR 水平免震システムの終局挙動把握試験 (その1~6), 日本建築学会大会学術講演概要集, 2009年8月。
- 4) 永田ほか, 大型震動台を用いた FBR 水平免震システムの終局挙動把握試験 (その7~11), 日本建築学会大会学術講演概要集, 2010年9月。
- 5) 理科年表, 国立天文台編, 丸善株式会社, 2009年。
- 6) 免震構造入門, 日本免震構造協会編, 株式会社オーム社, 1996年。
- 7) 社団法人日本電気協会原子力規格委員会, 原子力発電所耐震設計技術規程, JEAC 4601-2008, 2009年12月。
- 8) (社) 日本電気協会原子力専門委員会, 原子力発電所免震構造設計技術指針, JEAG 4614-2000, 2001年1月。