

リスクマネジメント基盤技術としての地震リスク評価の信頼度向上に関する研究

研究代表者 村松 健 学校法人五島育英会東京都市大学工学部原子力安全工学科
参画機関 学校法人五島育英会東京都市大学、国立大学法人東京大学、
独立行政法人日本原子力研究開発機構、株式会社シー・エス・イー・ジャパン
研究開発期間 平成24年度～26年度

1. 研究開発の背景とねらい

福島第一原子力発電所事故を受けて原子力発電所の安全強化が進められているが、中長期的には、安全向上への継続的努力が必要であり、それを合理的に進めるための技術基盤が求められている。地震起因事象の確率論的リスク評価（地震PRA）は、基準地震動を超える地震のリスクを考慮して安全を一層確実にするための改善方策を検討するうえで有力な手段であるが、一方で、その活用は円滑に進んで来たとは言えない。その原因の一つとして、不確実さの評価やその意思決定での考慮方法に関する十分な検討及び合意形成がなされていないことが考えられる。

そこで、本研究では、地震PRAの手法について炉心損傷頻度評価に伴う不確実さをより適切に取り扱うための新たな数学的枠組みと専門知を活用したフラジリティ評価の手法を検討・提案するとともに、その適用に必要な地震時システム信頼性解析用計算コードを開発することにより、地震PRAの信頼度を向上させ、活用促進に資することを目的として、次の4項目を実施する。

- 1) 確率モデル及び認識論的不確実さの取り扱いに関する検討
- 2) フラジリティ評価における認識論的不確実さの評価に関する検討
- 3) モデルプラントでの試行研究による有用性の実証
- 4) 計画の運営

2. 研究開発成果

2. 1 確率モデル及び認識論的不確実さの取り扱いに関する検討

2. 1. 1 確率モデル等の検討

地震PRAにおいて炉心損傷頻度を評価する手順は概略的には、①サイトを襲う地震動の強さに応じた超過発生頻度を求めるハザード評価、②地震動強さに応じた個別の機器や建屋の損傷確率を求めるフラジリティ評価及び③炉心損傷に至る事故シナリオ(事故シーケンス)を明確にし、その発生頻度を評価する事故シーケンス評価で構成される。現在の手法のレビューから、炉心損傷頻度算出の数学的な枠組みが比較的単純であることが、3次元応答解析などの最新の手法の導入をしにくくしていることを明らかにした。例えば、入力地震動の強さを基準面での最大加速度のみで表現する枠組みが、震源特性の特徴を詳細な構造応答解析に反映しにくいと言った制約につながっている。そこで最新の評価手法を取り入れやすくするために、新たな枠組みとして次の4要素からなる枠組みを提案した。

- (1) 地震ハザードを発生頻度の重み付きの時刻歴波形の集合で表現する。
- (2) 建屋応答解析を3次元の確率論的応答解析により行う。
- (3) 炉心損傷頻度を計算するためには、モンテカルロ法によるフォールトツリー定量化手法を用いる。
- (4) 以上の3要素からなる計算を実用的な時間で行うためにスーパーコンピュータによる並列計算を活用する。

この枠組みは、機器の損傷メカニズムや事故シナリオの詳細なモデル化を可能にするので、地震 PRA の事故シナリオ分析能力の向上や不確実さの低減を実行しやすくする。

2. 1. 2 計算コードの開発

上述の新たな枠組みを実現するためのシステム信頼性解析コードとして、日本原子力研究開発機構が開発した SECOM2-DQFM コードを改良し、現在一般的に用いられている応答係数法によるフラジリティ評価の枠組みに沿った不確実さ解析を行う機能を整備した。さらに、並列計算機能を付加して、数百並列の計算が効率よくできることを確認した。

2. 2 フラジリティ評価における認識論的不確実さの評価に関する検討

2. 2. 1 フラジリティ評価における専門家意見抽出の試み

建屋・機器フラジリティ評価においては認識論的不確実さの評価が不可欠である。しかしながら既往の PRA 手法の研究においては、認識論的不確実さに関して十分な評価がなされているとは言い難い。そこで本研究ではハザード評価において開発されてきた専門家の意見を活用する手法を用いて、建屋・機器の地震応答解析モデルに関する認識論的不確実さの特定と定量化を試みる。

24年度には、建屋・機器のフラジリティ評価で標準的に用いられる埋込み SR (Sway-Rocking) モデルのための地盤解析 (1次元波動論) に関して、アンケートと意見交換による専門家からの認識論的不確実さに関する専門知の抽出を試みた。

検討の対象とした地震応答解析モデルを図1に示す。特にこの中で地盤解析に不可欠な1次元波動論 (等価線形) の不確実さに焦点を当てる。また、専門家からより現実に即した意見抽出を行うために具体的な事例サイトを選定し、事前にサイトに関する情報や既往の不確実さに関する研究成果を提示する。入力地震動の大きさとしては S_s レベルの2倍程度を想定する。この条件下では建屋はほぼ線形状態、地盤は一部が非線形化する可能性がある想定になる。

定量化の手法の概要は、次の通りである。地震応答解析モデルに関する認識論的不確実さを明らかにするために専門家へのアンケート調査とそれに基づく専門家による意見交換を組織的に実施する。アンケートは1次元波動論を中心とした設問とするが、埋込み SR モデルやフラジリティ評価全般に関しても意見を求める。意見交換では TI (Technical Integrator) が進行役を務め、専門家は自由に意見を述べて課題の議論が深める。本研究では建築構造・地盤解析に精通した5人の専門家を選定し、都度調査結果や整理した意見を提示し、2回の意見交換を実施する。

アンケート調査の結果、専門家から出された建屋応答解析モデルの不確実さ因子の一例を表1に示す。不確実さの因子の中には、解析モデルに関する選択的な項目だけでなく、より複雑な判断を要するアナログ的な判断項目も示されている。1次元波動論は、実地盤を単純な成層地盤に置き換えて解析を行うため、実際にはどのような地盤にも存在する不整形性や、建設時に人工的に生じる埋戻し土などの建屋近傍の地盤性状を十分に表現できないことに起因する解析結果のばらつきを専門家が問題視していることが明らかとなった。

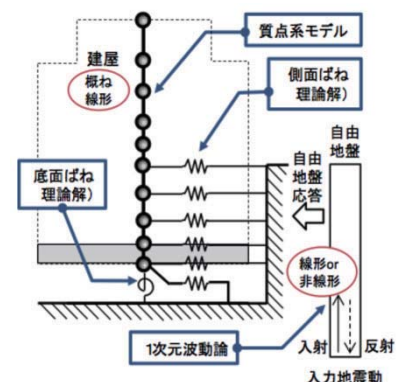


図1 埋め込み SR モデルの概要

表1 建屋応答解析の不確かさ因子の例

		建屋	地盤	相互作用	入力
選択項目	埋込みSRモデル	● 床柔性考慮 (一本棒、多本棒)	● 減衰タイプ ● 非線形モデル	● 埋め込み効果 (側面バネの有無) ● 側面回転バネ(有無)	● 側面からの 回転入力(有無)
	詳細な解放 (FEM等)	● 非線形モデル	● 非線形モデル	● 地盤バネの連成 ● 幾何学的非線形解析 (浮上り、剥離)	● 3方向同時 入力
アナログ的な専門家判断を伴う項目		● 質量や合成の縮約の方法	● 層所の設定 ● 地盤の分割モデル		● 入力基盤位置の設定

2. 2. 2 建屋・地盤に関する検討

建屋・地盤等に関する応答解析の認識論的不確かさ評価にかかわる専門家意見抽出のための情報提供を目的とするモデルプラントの建屋・地盤等に関する応答解析を行うための準備として、原子炉建屋モデルを作成した。

まず、基本方針として現実のサイトに設置された仮想的なプラントを設定して3次元解析モデルを作成することとし、建屋に関する公開情報を調査した。その結果、IAEAのKARISMA計画として、2007年の新潟県中越沖地震における柏崎刈羽原子力発電所7号機(ABWR)原子炉建屋の地震応答データを対象とした国際ベンチマークプロジェクトが実施されていることがわかり、これに参加することにより、モデル化に必要なデータを入手し、解析用データの整備を開始した。

モデル化の第一ステップとして、3次元形状モデルを作成した。壁及び床については、この3次元形状モデルデータ(彗犬ヅけ・ゾ)を元に有限要素メッシュを作成した。併せて材料定数データも作成した。モデルデータは、シェル要素、ソリッド要素、梁、トラス要素からなり、総要素数は14334、総節点数は11796、総自由度数は約6.5万自由度である。

また、各階の柱・梁・壁・床の体積を求め、これより各階の質量を算定した。この質量と質点系モデルの各階の質量を比較し、各階の質量が質点系モデルと一致するように床の密度を決定した。この3次元モデルに境界条件を設定し、固有値解析を行い、固有振動数及び固有モードを求めた。その結果を質点系モデルの値と比較し、解析モデルの妥当性を確認した。

今後は、整備した原子炉建屋モデルデータを用いて、機器のフラジリティ評価のための建屋・地盤等の不確かさ評価にかかわる感度解析や応答解析を実施する予定である。また、KARISMA計画では、各国の解析が実施されているため、解析結果の比較等を行う予定である。

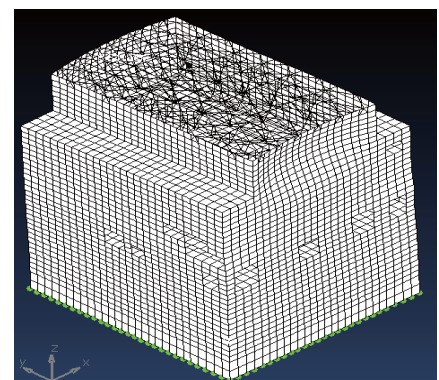


図2 固有値解析結果の例

2. 2. 3 機器・配管に関する検討

機械系専門家サブグループでは、確率論的及び確定論的設計手法における不確かさ因子に関する専門知を網羅的に抽出するため、原子力施設における機械系構造物の設計に携わる専門メーカーを中心に、電力会社、大学・研究所から8名の専門家を選出した。専門家サブグループでの意

見抽出から得られた不確かさの因子は、解析モデルでの不確かさ因子、機械構造物単体での不確かさ因子、地盤-建屋-機械構造物での相互作用での不確かさ因子の三つの要素に分類しまとめた。主な抽出結果を表2に示す。

表2 機器・配管系専門家グループでの意見抽出例

解析モデルでの不確かさ因子	建屋-機器連成時解析における各段階の不確かさの掛け合わせによる不確かさ、床柔軟性を考慮した際の機器・配管応答同定精度、変位入力による多入力評価、入力レベルと解析モデルの同定精度、弾塑性挙動に伴う減衰等の応答への影響など
機械構造物単体での不確かさ因子	材料定数のばらつき、材料許容値での裕度、実機レベル試験での確認済加速度をベースとした中央値の外挿、二次元解析モデルによる応答と現実的応答の差異、運転時・定検時の機器・配管の温度差による応力変動など
地盤-建屋-機械構造物の相互作用での不確かさ因子	地盤-建屋での不確かさ、入力地震動のバラツキが機器の現実的応答に与える影響度合い、二次元地震動入力と応答の組み合わせ、水平応答と上下応答のSRSS法による組み合わせ、不確かさ因子基礎が異なるタンク-配管-建屋での地盤相対変位、地盤定数の不確かさなど

2. 3 モデルプラントでの試行研究による有用性の実証

BWR5型プラントを想定した予備的なシステムモデルを用いて SECOM2-DQFM コードに新たに付加した不確かさ解析機能及び並列計算機能の検証を行った。また、これと並行して、上述の建屋・地盤に関する解析で対象とする ABWR をモデルプラントとすることとし、システム構成や機器の応答評価のためのプラント情報を収集し、SECOM2-DQFM 用の入力情報となるシステムモデルの整備を開始した。

2. 4 計画の運営

本事業の的確な運営と効果的な成果伝達を図るため、有識者及び産業界関係者6名で構成するレビュー委員会を設置し助言を受けるとともに、公開のワークショップを開催し、電気事業者、メーカー、建設会社等の地震PRAの実務者・専門家約50名の参加者を得て成果の報告と意見交換を行った。さらに日本原子力学会及び地震工学会にてシリーズ発表を行った。

3. 今後の展望

確率モデルの検討では、SECOM2-DQFM コードの改良を進め、従来法の枠組みで不確かさ評価及び重要度評価を行うバージョンを完成すると共に、新たな詳細応答解析を用いる数学的枠組みに基づくプログラム改良を進める。またモデルプラントを想定した地震PRAモデルを用いて試行を行う予定である。さらに専門知の活用については、建屋・地盤系及び機器系の専門家グループを中心に、質点系モデルとFEMモデルを用いた感度解析を活用しつつ、不確かさ因子の検討を進め、不確かさ評価を実施する際の参考となる事項を整理し、ガイドにまとめる予定である。