解説シリーズ

原子力発電所に対する津波を起因とした確率論的
リスク評価

第3回(最終回) 建屋・機器フラジリティ評価

鹿島建設(株) 美原 義徳

標準委員会では津波 PRA 標準を2012年2月8日に発行した。この標準について3回に分けて解説し、第3回では建屋・機器フラジリティ評価手順と要求事項について解説を行う。建屋・機器フラジリティ評価とは、炉心損傷に寄与する建屋及び機器の損傷確率を求めることであり、「評価対象と損傷モードの設定」、「評価手法の選択」、「現実的耐力の評価」、「現実的応答の評価」及び「損傷確率等の評価」の手順から構成される。本稿では、それらの詳細を述べる。また、原子力学会の津波 PRA 分科会で検討を行っている、東北地方太平洋沖地震での津波波力等による被害状況に関する最新知見を反映したフラジリティ評価事例の検討状況についても触れる。

I. はじめに

日本原子力学会の標準委員会ならびにリスク専門部会では、津波の確率論的リスク評価(PRA: Probabilistic Risk Assessment)を実施することが喫緊の課題であるとの判断から津波 PRA 分科会を設置し、津波 PRA 標準(AESJ-SC-RK 004: 2011)を2012年2月8日に発行した¹⁾。

前々稿(第1回)では津波 PRA 標準の評価手順全体の概要を、前稿(第2回)では津波ハザード解析について述べた。本稿では、最終稿として、津波 PRA 標準の評価手順の中から建屋・機器フラジリティ評価について述べる。また、建屋・機器フラジリティ評価では、津波による被害事例を踏まえることが非常に重要であるので、東北地方太平洋沖地震等の最新知見を反映した評価事例の検討状況についても触れる。

II. 建屋・機器フラジリティ評価

1. 評価手順の概要

津波 PRA 標準における建屋・機器フラジリティ評価手順は、「評価対象と損傷モードの設定」、「評価手法の選択」、「現実的耐力の評価」、「現実的応答の評価」及び「フラジリティの評価」の各評価ステップから構成され

る。建屋・機器フラジリティ評価では、前稿で述べた「津波ハザード評価」から得られるフラジリティ評価用津波諸元(津波水位の時間変化等)に基づき、津波による建屋及び機器の様々な損傷モードに対する損傷確率(任意の津波高さにおける現実的応答が現実的耐力を上回る確率)を算定し、その評価結果は前々稿で述べた「事故シナシエンス評価」に用いることとなる。また、「事故シナシエンス評価」で得られる炉心損傷頻度に影響を与える建屋・機器に対して、津波対策を実施し、フラジリティ評価を改善するプロセスを繰り返し行うことで、津波に対する全体リスクが低減されることになる。建屋・機器フラジリティ評価手順の流れを第1図に示す。

第1図 建屋・機器フラジリティ評価手順の流れ

The Tsunami Probabilistic Risk Assessment of Nuclear Power Plants(3); Outline of Tsunami Fragility Analysis: Yoshinori MIHARA.

(2012年10月4日受理)

■前回のタイトル

第2回 津波ハザード解析

2. 評価対象と損傷モードの設定

(1) 評価対象物の選定

フラジリティ評価の対象は、前々稿で述べた建屋・機器リストに記載されたものとする。さらに、評価対象物の選定に当たっては、炉心損傷に大きな影響を及ぼすもの、過去の津波 PRA で安全上重要な機器とされているもの、過去の津波による被害事例から損傷しやすいことが分かっている施設及びシビアアクシデント対策に関連する建屋・機器に留意する。

(2) 損傷モード及び部位の抽出

東北地方太平洋沖地震の津波による被害事例からは、様々な損傷モードが報告されている^{2,3)}。それらを踏まえて、建屋及び機器のフラジリティ評価では、津波の被水・没水(第2図)、波力(第3図(a))、洗掘(第3図(c))、漂流物衝突(第3図(b))及び海底砂移動による損傷モードを考慮する。津波の洗掘及び海底砂移動による損傷モード及び部位の抽出では、津波水位の時間変化に加えて、津波ハザード評価から得られるサイト周辺地域の隆起あるいは沈下に留意する。なお、津波による対象漂流物の選定に際しては、当該サイトに影響を与える可能性のある漂流物の位置・種類・頻度に留意し、支配的な津波波源から当該サイトまでに存在する漂流物の発生頻度が炉心損傷頻度に比べて小さい場合、もしくは、当該サイトに接岸していない船舶に対しては対象外としてもよい。

(3) 損傷評価の指標の選定

フラジリティ評価対象の損傷の程度を表すことができる現実的応答量を損傷評価の指標とする。損傷評価の指

第2図 津波による被水・没水の損傷概念

(a) 波力による転倒

(b) 漂流物衝突による局部損傷

(c) 洗掘による安定性の喪失

第3図 津波による被害事例²⁾

標は、建物・構築物及び機器に対する津波による被水・没水、波力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動に伴う機能喪失を表す物理量の遡上高、浸水高、堆積高、応力、変位などから適切に選定する。また、損傷評価の指標は、フラジリティ曲線(当該サイト海岸線での津波水位とこの水位による機能喪失確率との関係曲線)の横軸を規定する津波水位とは異なり、この津波水位で規定された津波が対象建物・構築物の場所まで浸水あるいは遡上した場合に、それらが機能喪失する損傷確率を求めるための指標である。損傷評価の指標の一例を第1表に示す。

(4) 不確かさ要因の分析

現実的耐力及び現実的応答の評価に当たっては、それぞれの確率量に影響を及ぼす要因(以下、不確かさ要因という)を分析・抽出する。なお、不確かさは、偶然的不確かさと認識論的不確かさに可能な範囲で分離して、整理する。例えば、津波の被水・没水の損傷モードを対象にした不確かさ要因の一例を第2表に示す。

3. 評価手法の選択

用途及び精度に応じて、対象物の現実的耐力及び現実的応答評価のための評価手法を選択する。選択に際しては、いずれかの手法を選択して評価してもよいし、適宜、組み合わせて評価してもよい。ただし、選択した評価手法の精度に応じて、認識論的不確かさを専門家による判断等に基づき適切に考慮する。なお、公開されていない新たな手法を選択してもよいが、その場合には、その手法の科学的合理性を定量的に示す必要がある。

第1表 損傷評価の指標の一例

対象設備	損傷モード	しきい値 (耐力)	損傷評価 の指標 (応答)
屋外	取放水設備	津波波力や漂流物の衝突による破損	構造強度
		浸水による取水ポンプの機能喪失	掘付高
		引き波による冷却水の喪失	炉心冷却 可能時間
		砂移動に伴う海底地形変化による取放水口の閉塞	水位低下 継続時間
屋内	送電設備	浸水による送電機能の喪失	掘付高
	炉心冷却設備	浸水による炉心冷却機能および熱除去機能の喪失	浸水高

第2表 被水・没水による不確かさ要因の一例

損傷 モード	評価 項目	一般的な不確かさ要因	
		偶然的不確かさ	認識論的不確かさ
被水 没水	耐力 評価	① 実験データに基づく耐水性に関する限界値 ② 複数の部品から構成された機器の設置高さ ③ 防水対策(シール等)の効果	① 実験データの統計的不足 ② 複数の津波による累積損傷の影響 ③ 防水対策(シール等)の施工誤差
	応答 評価	① 潮位のばらつき ② 浸水高及び浸水深のばらつき ③ 遡上解析モデル(パラメータ) ④ 屋内での流入量評価(パラメータ) ⑤ 屋内での浸水経路評価(パラメータ)	① 遡上解析モデル(モデル化及び解析手法) ② 屋内での流入量評価(モデル化及び評価手法) ③ 屋内での浸水経路評価(モデル化及び評価手法)

4. 現実的耐力の評価

津波による被水・没水、波力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動による構造的、機能的又は累積的損傷モードに対する現実的耐力の確率分布を評価する。津波の被水・没水による機能的損傷モードに対しては上下限値を有する確率分布を、津波の波力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動による構造的及び機能的損傷モードに対しては対数正規分布を仮定する。なお、求められている評価用途及び精度等に応じて、津波の被水・没水による機能的損傷モードに対する現実的耐力をステップ関数として取り扱ってもよいとしている。例えば、津波の被水・没水による機能的損傷モードに対する現実的耐力評価の一般的な概念を第4図に示す。

また、現実的耐力の評価は次の方法による。

- ・実験に基づく方法
- ・実験を含む経験に基づく方法
- ・解析を含む理論に基づく方法
- ・工学的な判断に基づく方法

ここで、現実的耐力評価に際しては、シビアアクシデント対策に基づく浸水対策等を必要に応じて考慮する。さらに、いずれの方法によっても確定的な損傷限界しか与えられない場合には、材料物性値などを確率変数とした不確実さ解析手法を用いて損傷限界の不確実さを評価する。材料物性値などの標準的なデータベースに関しては、地震PSA標準⁴⁾を参照してもよい。

5. 現実的応答の評価

(1) 基本事項

第4図 津波の被水・没水による機能的損傷モードに対する現実的耐力評価の一般的な概念¹⁾

津波による被水・没水、波力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動による構造的、機能的又は累積的損傷モードに対する現実的応答の確率分布を評価する。例えば、津波の波力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動による構造的損傷モードに対する現実的応答評価の一般的な概念を第5図に示す。

ここで、現実的応答の評価では、津波による浸水高、波力、流速、漂流物の衝撃荷重及び海底砂の移動量・範囲の評価に基づく現実的応答の評価が必要である。その際には、津波の押し波だけではなく、引き波による影響を考慮する。また、津波による浸水高、波力及び流速等に関連する現実的応答は確率変数として評価されるため、確定値しか与えられない場合には、評価方法を構成する各因子を確率変数とした不確実さ解析によって現実的応答の不確実さを評価する。不確実さ解析における、材料物性値などの標準的なデータベースに関しては、地震PSA標準⁴⁾を参照してもよい。

(2) 各損傷モードに対する現実的応答の評価

津波の被水・没水による屋外設備の損傷モードに対しては、遡上解析から得られる浸水高の評価に基づき算定する。屋内設備における津波の被水・没水の損傷モードに対しては、遡上解析、建物・構築物の局所的な構造損傷後の浸水経路及び複数の津波による累積効果を考慮し、当該機器周辺における浸水高に基づき算定する。

津波の波力による建屋・機器の損傷モードに対しては、遡上解析から得られる浸水高及び流速等に基づき、土木学会の評価法⁵⁾を用いて現実的応答を評価する。

津波の発生及び伝播に伴う海底砂移動による取放水設備の閉塞等の損傷モードに対しては、土木学会の評価法⁵⁾等を用いて津波による海底砂の移動量・範囲を評価する。

漂流物衝突による建屋・機器の損傷モードに対しては、遡上解析から得られる浸水高及び流速等の評価に基づき、土木学会の評価法⁵⁾等を用いて現実的応答を評価することが考えられる。

洗掘による建屋・機器の損傷モードに対しては、津波

第5図 津波の波力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動による構造的損傷モードに対する現実的応答評価の一般的な概念¹⁾

による浸水高及び流速等に基づき、鉄道構造物等維持管理標準の評価法等⁶⁾を用いて周辺地盤の洗掘深さ・範囲を算定し、建物・構築物の安定性を評価することが考えられる。

6. フラジリティの評価

(1) 偶然的不確実さに対する評価

任意の津波高さに対する損傷確率は、津波高さがある値のときの現実的応答が現実的耐力を上回る条件付損傷確率として算定する。ここで、任意の津波高さを連続的に与えて損傷確率を求めると、結果としてフラジリティ曲線が得られるが、津波高さごとの計算量が膨大となるので、第6図に示すように、離散的に得られた損傷確率を用いて最小2乗法などによって内挿してフラジリティ曲線を算定してもよい。ただし、最小2乗法などによって対数正規累積分布関数などで近似して連続的なフラジリティ曲線を算定する場合、近似を仮定する分だけ、不確かさが増えることに留意する。

(2) 認識論的不確実さに対する評価

偶然的不確実さに対するフラジリティ曲線の算定で得られるフラジリティ曲線の不確かさは、主として確率変数として考慮できる偶然的不確実さであり、現実的耐力評価及び現実的応答評価において確率変数として考慮していない要因及び認識論的不確実さは、偶然的不確実さに対するフラジリティ曲線に、第7図に示すように確率論的な考え方等を適用して信頼区間を含むフラジリティ曲線を算定する。ここで、選択した評価手法の精度等に対応するフラジリティ曲線の認識論的不確実さに関しては、専門家による判断等に基づきその値を適切に設定する必要がある。

現実的耐力評価で考慮した浸水対策の有無に着目した、津波の被水・没水、波力、洗掘、漂流物衝突及び海

第6図 近似したフラジリティ曲線の模式図¹⁾

第7図 信頼区間を含むフラジリティ曲線の模式図

第8図 浸水対策の有無に着目したフラジリティ曲線の一般的な概念¹⁾

底砂移動による各損傷モードに対するフラジリティ曲線の一般的な概念を第8図に示す。

7. フラジリティ評価例

津波の被水・没水、波力、洗掘、漂流物衝突及び海底砂移動による構造的及び機能的損傷に至る損傷モードに対するフラジリティ評価例のうち、津波の陸上遡上を考慮した、津波の被水・没水に対するフラジリティ評価例を示す。

ここでは、開口部を有する原子炉建屋を対象とし、当該施設が立地する地点の津波による浸水高が開口部下端レベルを機能的損傷限界水位としてこのレベルを超えたときに機能的損傷モードに至ったこととする。

まず、評価対象地点の津波の浸水高(現実的応答)を評価するために、フラジリティ評価用の津波波源の設定及び、海岸線から評価対象地点までの陸上地形の影響を考慮した津波による陸上遡上解析を行う。ここでは、評価対象地点沖合に1周期分の正弦波を想定した。この正弦波の振幅及び周期をパラメータとした陸上遡上解析を行い、仮想波源ごとに評価対象地点における浸水高を評価

第9図 海岸線での最大津波水位と海岸線からの陸上遡上距離の関係

第10図 海岸線から200 m 地点における浸水高(左図)と海岸線での最大津波水位の関係と fragility 曲線の評価例(右図)¹⁾

した。海岸線での最大津波高さと海岸線からの陸上遡上距離の関係を第9図に示す。

最後に、海岸線から200 m 地点に原子炉建屋が立地すると、機能的損傷限界水位を超える条件付き確率により求めた fragility 曲線の評価例を第10図に示す。

Ⅲ. おわりに

原子力学会の津波 PRA 分科会では、最新知見を反映するための適用事例集を本標準の別冊として作成し、今後の発行を予定している。建屋・機器 fragility 評価に関連する適用事例としては、東北地方太平洋沖地震等の最新知見を反映した、津波の波力、漂流物衝突及び海底砂移動に対する fragility 評価例の作成に注力しているところである。また、建屋・機器 fragility 評価に与える影響が大きいと考えられる、地震と津波の相互作用についての改訂版の検討も開始した。

以上に示すように、建屋・機器 fragility 評価では現状で研究途上もしくは未開発の評価法が多く、特に以下の4項目に関しては、評価法の認識論的不確実さが大

きいために、精度の良い評価法の開発が今後望まれる。

- (1) 複数の津波による経時的な累積効果を考慮した、被水・没水による関連設備の累積的損傷に対する現実的耐力及び現実的応答評価法
- (2) 津波の洗掘による建物・構築物の安定性に係る構造的損傷に対する現実的耐力及び現実的応答評価法
- (3) 津波の漂流物衝突による関連設備の構造的及び機能的損傷に対する現実的耐力及び現実的応答評価法
- (4) 各損傷モードが複合した構造的、機能的及び累積的損傷に対する現実的耐力及び現実的応答評価法

最後に、津波 PRA 手法の標準策定により、我が国の原子力発電所における津波リスク評価が進み、安全設計・運転管理・安全規制などの広い分野におけるリスク情報の高度な活用による安全性の向上、意思決定プロセスの支援となることを期待するものである。

(用語解説)

- (1) 偶然的不確実さ

データ又は現象が持つ固有のランダム性による不確実さで、構造材料及び地盤などの物性値のばらつきがあげられる。

- (2) 認識論的不確実さ

解析手法又はモデル化における知識及び認識に係る不確実さで、研究が進展すれば確定できるが、現状では予測不可能な不確実さである。

— 参考資料 —

- 1) 日本原子力学会 標準委員会, 原子力発電所に対する津波を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準: 2011 (AESJ-SC-RK 004: 2011), (2011).
- 2) 東京大学生産技術研究所, 平成23年度建築基準整備促進事業「40. 津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」中間報告書その2, (2011. 10).
<http://www.mlit.go.jp/common/000172792.pdf>
- 3) 亀田弘行, 原子力発電所の安全に対する地震工学の課題, 日本地震工学会誌, 第15号, (2011. 10).
- 4) 日本原子力学会 標準委員会, 原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準: 2007 (AESJ-SC-P 006: 2007), (2007).
- 5) 土木学会 原子力土木委員会 津波評価部会, 原子力発電所の津波評価技術, p.321 (2002).
- 6) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編, 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編)基礎構造物・抗土圧構造物, (2007. 1).

著者紹介

美原義徳(みはら・よしのり)
鹿島建設(株) 原子力部
(専門分野/関心分野)建物・構築物の耐震設計及び構造解析, 鉄筋コンクリート構造物の破壊力学及びマイクロメカニクス。