

複数同時またはシーケンシャルに発生する自然外部事象に対するリスク評価法の研究

東京都市大学 ○大鳥 靖樹*
東京都市大学 牟田 仁*
東京都市大学 山川 裕久

複合事象 自然外部事象 リスク評価
システム解析 残留熱除去系

研究の目的

2011年の福島原子力発電所の地震と津波による事故や、2018年の台風と高潮による関空の機能停止など、複数の自然外部事象が同時またはシーケンシャル（連続）に発生することによって、従来の想定を超える被害が発生しており、効果的な対策を立てる上で、安全評価手法とシミュレーションプラットフォーム（SPF）の構築が喫緊の課題となっている。

本研究の目的は、複数の事象が同時または連続して発生する自然外部事象に対するリスク評価法の構築とそれを具現化するためのSPFの開発を行うとともに、実機レベルの複雑なシステムへの適用性を検討することである。

研究の内容

(1) 複合事象に対するリスク評価法の提案

① 評価フローの提案

評価手法を構築するために予備的検討として地震と津波の組合せ発生に関して検討を行った。太平洋沿岸と日本海沿岸の2地点を例示地点として選定し、解析を実施した。解析の結果、可能性のあるすべての地震のイベントを考慮した場合、地震の揺れの強さと津波の高さの関係はばらつきが大きいものの、特定の震源に限定して比較を行うと、両者には強い相関があることがわかった。その結果を踏まえ、図1に示す複合事象に対するリスク評価フローを提案した。

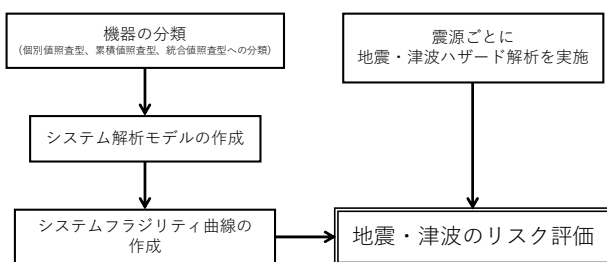


図1 地震と津波の複合事象に対するリスク評価手順

② 機器（SSC）の分類法の提案

複合事象に対するリスク評価のシステム解析モデルを構築する上で、SSCを表1に示す個別値照査型、累積値照

査型、統合値照査型の3つに分類することを提案した。

個別値照査型は、地震と津波で損傷モード・損傷指標が異なっているため、それぞれの荷重効果に対して別々に照査を行い“ORゲート”を用いて機能喪失の判定を行う。累積値照査型は、地震と津波に対する損傷部位、損傷モードが同じでかつ、損傷指標が疲労のように累積効果のあるSSCが対象である。統合値照査型は、地震と津波の両方の荷重効果が組合せて機能喪失が起こることを想定しており、両者を説明変数とした関数（ fragility curve）で機能喪失のクライテリアを定義する。例えば、津波防護施設の場合、地震による津波の防護・浸水防止機能の低下を評価した上で、津波の影響を評価することになる。すなわち、地震の大小によって津波に対する耐力が変化することになる。

表1 機器の分類

種類	概要	SSCの例
個別値照査型	地震と津波の荷重効果を個別に照査して、システム解析上“OR”回路で基事象の生起判定を行う。	動的機器、電気的機器等
累積値照査型	地震と津波による荷重効果の累積値で照査した結果を用いて基事象の生起判定を行う。	機器・配管や支持構造物等の疲労
統合値照査型	地震と津波による荷重効果を合わせて基事象の生起判定を行う。	防潮堤、水密扉等

③ シミュレーションプラットフォーム（SPF）の開発

②のSSCの分類を踏まえ、複合事象の重畳を考慮したリスク評価のためのSPFを開発した。SPFはMATLABとSIMULINKをベースにコード開発を行った。図2にSPFの構成を示す。SPFは、MATLABで機器単体の損傷判定を実施し、SIMULINKでシステムとしての損傷判定を行う構成になっており、SIMULINKはMATLABプログラムから制御する構成になっている。乱数生成においては損傷相関等が考慮可能である。また、リスクの定量化は、DQFM法と同様の考え方を適用した。

リスク評価では、地震と津波が時間をおいて連続的に発生することも考慮するために表2に示す4段階で評価を行っている。4段階評価では、まず地震による機器の損

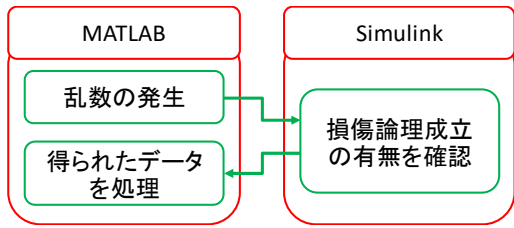


図2 シミュレーションプラットフォームの構成

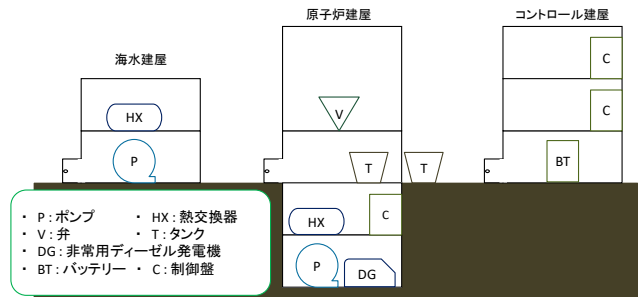


図3 残留熱除去系(RHR)の概要

表2 複合事象評価のための4段階評価手法の概要

ステップ	起因事象	個別値照査型 SSC		統合値照査型 SSC	累積値照査型 SSC
		地震BE	津波BE		
1	地震	機能維持判定	機能維持	機能維持	地震による累積指標の評価・機能維持判定
2		システム解析			
3	津波	Step1の判定保持	機能維持判定	機能維持判定	津波による累積指標の評価およびStep1の結果への加算・機能維持判定
4		システム解析			

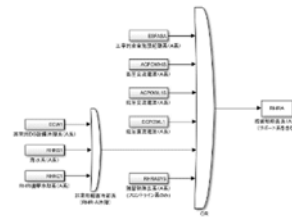


図4 RHRのシステム解析モデル

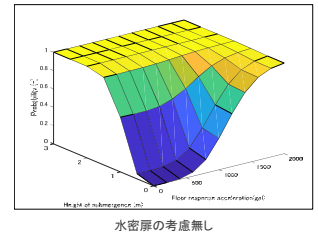


図5 地震・津波の複合事象に対するシステムフラジリティ曲面

傷を判定して、システムとしての機能維持判定を行う。次に、津波による機器の損傷判定を行ってからシステムとしての機能維持判定を再度実施する。各ステップでの各機器分類の扱いは表2に示している。4段階で評価を行うことにより、地震が発生してから津波が襲来するまでに行う機器の復旧効果等を考慮することが可能である。

④ 残留熱除去系への適用

③で開発したSPFを原子力プラントの安全上重要な系統の一つである残留熱除去系(RHR)へ適用し、実規模構造物への適用性を検討した。解析に用いた仮想のRHRに関連する機器配置概要図を図3に示し、SIMULINKで作成したシステム解析モデルを図4に示す。RHR系は本来系統が多重化されているが、ここでは単独の系統として取り扱い、システム構成は全ての機器の並列システムとした。

図5に地震・津波によるRHRのリスク評価結果を示す。平面軸は地震動の強さおよび浸水高さであり、垂直軸は機器損傷確率である。この図より、床応答加速度、浸水高さが増加するにつれて損傷確率が増加しており、想定通りの挙動が捉えられていることや、水密扉を考慮した場合、損傷確率の増加は水密扉がない場合に比べ緩やかになっており、水密扉の設置効果が捉えられていること等がわかる。これらのRHRの試解析より、今回開発したSPFにより地震・津波によるシステム損傷リスクが評価可能であることが確認できた。

研究の成果、新発見

本研究の主な成果を以下に述べる。

- 1) 太平洋沿岸地域と日本海沿岸地域の地震・津波のハザード解析の結果を分析し、震源ごとにリスク評価を実施するのが適切であることを明らかにした。
- 2) 複合事象に対するリスク評価を行う上で、機器の損傷照査を個別値照査型、累積値照査型、統合値照査型の3つに分類することを提案した。
- 3) 複合事象に対するシステムの安全評価を実施するためのシミュレーションプラットフォームを新たに開発するとともに、4段階評価方法を提案・実装した。
- 4) 残留熱除去系(RHR)を対象に試解析を行い、実構造物に適用可能であることを確認した。

今後の予定

今後は、本研究で得られた成果を取りまとめて、日本原子力学会の論文誌等に2編投稿予定で準備を進めている。また、本研究の成果をベースに『原子力プラントの内外構成要素間の相互作用を考慮したPRA手法の開発』と題して科研費基盤研究(C)(研究代表: 牟田、研究分担者: 大鳥)に応募し、採択されたため、複数プラントの評価等に研究を展開していく予定である。

謝辞

本研究は、2018年の10月より2019年3月末まで大成学術財団の研究助成を受けて実施した研究成果である。研究の推進に当たり多大なご支援を頂きましたことに深く感謝いたします。