

地震作用による斜面崩壊が原子力発電施設に及ぼす影響評価手法の構築

日本大学 正 ○中村 晋, 東京都市大学 正 吉田郁政
防衛大学校 正 別府万寿博, 東北大学大学院 正 河井 正

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震により発生した福島第一原子力発電所の事故後、高台配置したモバイル電源の機能維持、搬入路の走行性確保などの非常事態への対応などが必要となっている。このような施設を含み、原子力発電所の地震安全に必要な原子炉建屋、開閉所などの施設に及ぼす周辺斜面の影響を評価する手法の構築が必要となっている。その評価結果をリスク情報として活用することは、地震安全確保にとって重要である。

そこで、リスク情報の一つである確率論的リスク評価に資するため、地震に起因した斜面崩壊の影響に応じた限界状態を定義し、その限界状態に対する fragility 評価の考え方を体系的にとりまとめた。ここでは、その考え方の概要と、各限界状態に対する fragility 曲線の評価事例を示す。

2. フラジリティ評価の基本

地震により斜面崩壊が原子力発電施設の機能喪失に至る状態として、図-1に示すように、①地震動により斜面崩壊が生じる状態、②崩壊土塊が原子炉建屋や屋外の重要機器や設備に到達する状態、また対象施設に堆積する状態、③施設に到達した崩壊土塊の衝撃作用により施設が機能喪失に至る損傷が生じる状態の3つの状態が考えられる。それら3つの状態を限界状態として、原子力発電所の重要な安全機能を有する施設や設備への周辺斜面の不安定化が及ぼす影響の評価を行う。ここで、①は従来から考慮されてきた間接的な損傷限界であり安定限界とする。②は、斜面崩壊後、崩壊した土砂、

土塊・岩塊の施設への到達限界、③は土砂、土塊・岩塊の衝突による施設の直接的な損傷限界と定義する。

安定限界を超える限界状態に対して評価を行うことが必要な施設や設備については、斜面の崩壊形態として滑落型崩壊、また滑動型崩壊のいずれかを適切に評価することが必要である。ここで、滑落型崩壊が生じる斜面に対する影響評価は対象斜面の動的な応答から崩壊、滑落挙動まで一貫した解析に基づいて実施することが好ましい。それら挙動をシームレスに評価できる手法はあるものの、まだ課題も多いことから現状の評価体系を拡張し、斜面崩壊後の挙動についてはそれら手法を活用し、安定限界から順に限界状態ごとに評価する。

各限界状態を評価する上で、斜面内に崩壊が生じる領域の評価が必要となる。まず、安定限界に対する崩壊領域は、崩壊が始まると考えられる最小の地震動強さ(限界地震動強さ)で不安定になる領域と定義する。次に、斜面崩壊後の到達限界、さらに損傷限界を評価するための崩壊土塊量を設定する上で必要な崩壊領域は、地震動の作用に起因して崩壊する全領域とする。

3. 各限界状態に対する fragility 評価事例

別報¹⁾に示した斜面(図-2)および地盤材料モデルに対して各限界状態に対する fragility 曲線の評価事例を示す。fragility 評価用地震動は地震PRA標準²⁾の方法によりある地点における超過確率 10^{-4} 、 10^{-5} 、 10^{-6} に対する水平・鉛直成分の地震動として作成した。

安定限界に対する fragility 評価は対象斜面の崩壊形態を分析した上で実施する。fragility 曲線は、フ

ラジリティ評価用地震動を用いた地震応答解析により崩壊領域を設定し、その崩壊領域に対する崩壊確率と地震動強さの関係として求める。限界状態の評価指標、地震応答解析法には、地震PRA標準²⁾を参照し、力の釣り合いによるすべり安全率、等価線形化法

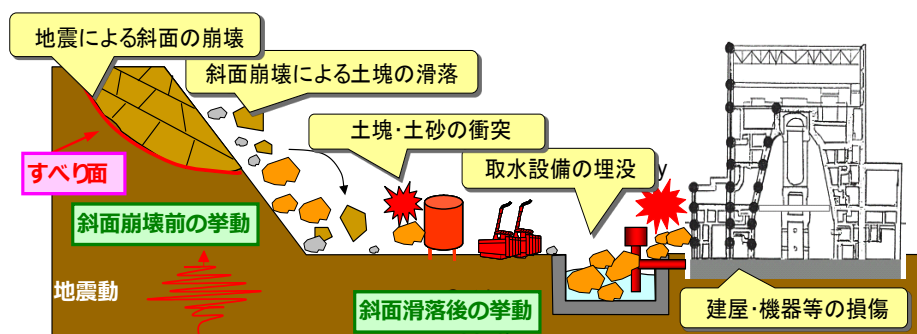


図-1 地震時の斜面崩壊の事故シナリオの概要

キーワード：地震動，斜面崩壊，安定限界，到達限界，損傷限界， fragility
連絡先：〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原1 日本大学 TEL 024-956-8712

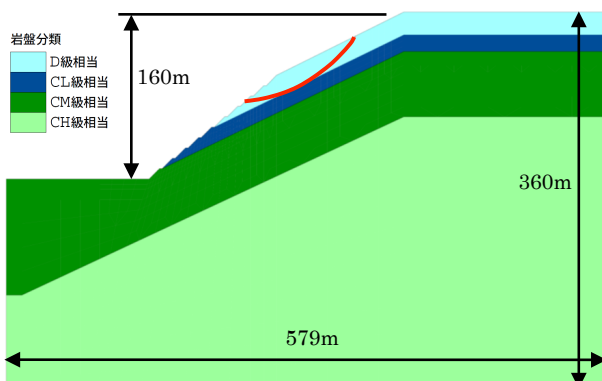


図-2 検討用斜面モデルと安定限界を示す崩壊領域

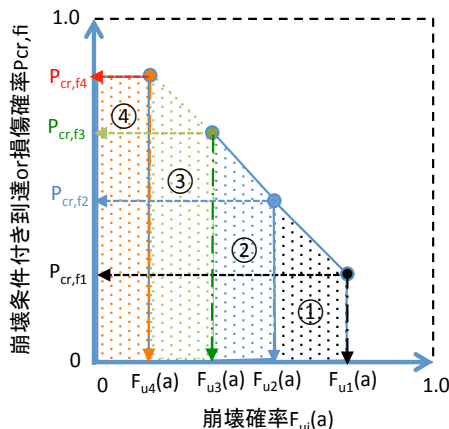


図-4 あるPGAに対する崩壊領域に応じた崩壊確率と崩壊条件付き到達・損傷確率の関係

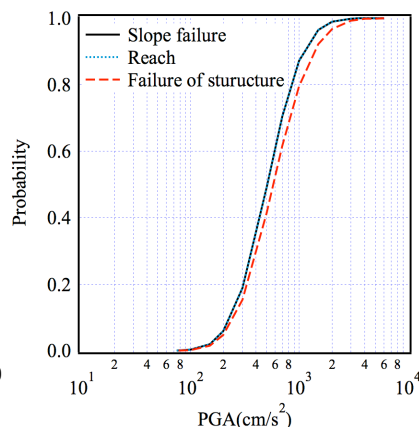


図-5 各限界状態に対する fragility 曲線の比較

により地盤材料の非線形性を考慮した手法を用いた。崩壊領域は非線形地震応答解析やMPMなどにより検証することが望ましい。得られた fragility 曲線と地震ハザードから崩壊確率を求め、その大きさに応じて到達・損傷限界の fragility 評価を実施する。到達・損傷限界に関する fragility 評価に必要な崩壊領域は、限界地震動強さ以上の fragility 評価用地震動に対して適宜設定する。前述の解析法を用いる場合、すべり安全率が1.0を下回る領域を包括する領域とした。各崩壊領域(i)に対して崩壊限界に対する fragility 曲線 $F_{ui}(a)$ (安定限界: $i=1$) を求める。

到達限界の fragility 評価は、図-3に示す様に各崩壊領域内の土塊が自重によりすべて滑落し、対象施設の幅(無限)に関する条件のもとで実施した群の滑落解析、個の転動解析により行う。評価指標は、損傷限界の評価も勘案し土塊の対象位置への到達速度とする。別報³⁾に示すように、対象施設を図-2の斜面モデル法尻から50m位置とし、質点解析により岩塊の転動解析を実施した。岩塊の到達速度とそれを超える岩塊の割合(超過確率)との関係(到達ハザード)より、限界値を0m/sとすると各崩壊領域の条件付き到達確率は1.0となった。あるPGAに対する到達確率は、

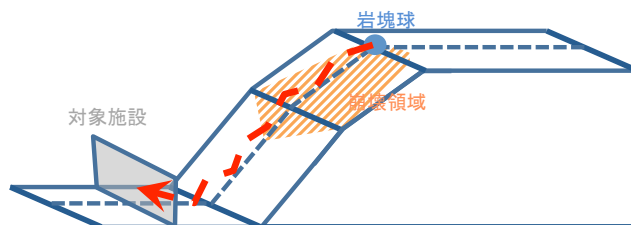


図-3 到達・損傷限界の評価に用いる滑落解析モデル

表-1 各限界状態の発生確率の比較

発生確率	構造物A	構造物B
損傷確率	4.6×10^{-5}	1.2×10^{-2}
到達確率	1.4×10^{-2}	
崩壊確率	1.4×10^{-2}	

図-4に示すように崩壊領域に応じた崩壊確率と各崩壊領域に対する条件付き到達確率との関係のハッチ部面積として得られる。各崩壊領域の条件付き到達確率は1.0であり、PGAと到達確率の関係である fragility 曲線、また到達確率は安定限界と同じである。損傷限界の fragility

評価は到達確率の大きさに応じて実施する。

損傷限界に対する fragility 評価は、別報⁴⁾に示したように、まず、RC版(厚さ1.0m:構造物A, 厚さ0.2m:構造物B)を対象部材とし、岩塊の衝撃作用に対して押し抜きせん断破壊、曲げ破壊に関する損傷確率と衝突岩塊の運動量との関係を求めた。次に、崩壊領域に応じた衝突ハザード(超過確率と運動量の関係)と合わせて条件付き損傷確率を求めた。損傷限界に対する fragility 曲線、損傷確率は到達確率と同じ考え方を用いて求めた。

最後に、各限界状態に対する fragility 曲線、発生確率は図-5、表-1の様に得られた。この様に地震に起因した斜面崩壊が原子力発電施設に及ぼす影響として、崩壊限界から到達限界、損傷限界に関する一連の fragility 曲線の評価手法を構築した。なお、本研究は平成28年度原子力施設等防災対策等委託費により実施したものである。

参考文献：1)西村聡他、二点推定法とモンテカルロシミュレーションによる斜面の安定限界に関する fragility 評価、土木学会第72回年次講演会、2017、2)日本原子力学会、日本原子力学会標準：原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準：2015、3)吉田郁政他：斜面崩壊による岩塊の衝突ハザードの提案、土木学会第72回年次講演会、2017、4)別府万寿博他、斜面崩壊に伴う岩塊衝突による鉄筋コンクリート版の損傷限界に関する評価手法の検討、土木学会第72回年次講演会、2017