

ベイズ推定を用いた原子力発電所屋外重要土木構造物のフラジリティ曲線算定

一般財団法人 電力中央研究所 正会員 ○片山 吉史
 一般財団法人 電力中央研究所 正会員 酒井 俊朗
 東京都市大学 正会員 大鳥 靖樹

1. はじめに

地震を起因とした確率論的リスク評価(地震 PRA)では、地震ハザード曲線とフラジリティ曲線の積分によって設備の年損傷確率を算定する。一般に、フラジリティ曲線は、耐力中央値 A_m とばらつき β の2つの母数をもつ対数正規累積分布関数で表され、 A_m と β を精度よく推定することが重要である。また、フラジリティ曲線算定には、物性値や地震動をばらつかせた多数回の地震応答解析が必要であるが、解析モデルは年々詳細化しており、計算時間の問題が出てきている。「原子力学会地震 PRA 標準」¹⁾には、地震動を5～7レベルで物性値をばらつかせた解析が示され、1レベルで100回とすると、 $(5\sim7) \times 100 = 500 \sim 700$ 回程度の地震応答解析が必要となる。本検討では、地震応答解析数の低減を目的とし、ベイズ推定を用いたフラジリティ曲線算定手法を検討する。

2. ベイズ推定を用いたフラジリティ曲線算定手法

本検討では、事前(事後)確率密度関数を A_m と β を確率変数とする結合確率密度関数として、式(1)式を用いて A_m と β を推定する。

$$f_1(A_m, \beta | \varepsilon) = k \times P(\varepsilon | A_m, \beta) \times f_0(A_m, \beta) \quad \text{式(1)}$$

ここで、 $f_0(f_1)$: 事前(事後)確率密度関数、 k : 係数、 P : A_m と β が、ある値をとるときの解析結果が生起する確率であり、式(2)により算定する。

$$P(\varepsilon | A_m, \beta) = \binom{N}{r} \times [F_x(A_m, \beta)]^r \times [1 - F_x(A_m, \beta)]^{N-r} \quad \text{式(2)}$$

ここで、 $F_x(A_m, \beta)$: フラジリティ曲線、 N : 解析回数、 r : 損傷した解析回数

A_m と β の推定値は、 f_1 の周辺確率密度関数の期待値として算定し、 $f_0=f_1$ として事前分布を更新する。なお、既往研究では、事前分布は実験・観測データ等を用いて評価しているが、本検討では裕度解析(地震動を構造物が損傷するまで漸増させて応答解析を行い、限界の地震動を評価する方法)により評価する。

3. 事前分布の予備的検討

A_m と β の事前分布として、 A_m の中央値 $\widetilde{A}_m$ とばらつき β_{A_m} 、 β の中央値 $\widetilde{\beta}$ とばらつき β_β を設定する必要があるが、ここでは、パラメータスタディによって解析回数を少なくする設定を検討する。フラジリティ曲線の正解値は、 $A_m=1000\text{Gal}$ 、 $\beta=0.4, 0.2, 0.1$ の3ケースを想定する。 $\widetilde{A}_m$ は裕度解析による $\widetilde{A}_m=1000\text{Gal}$ を設定し、 β_{A_m} は $\beta_{A_m}=0.4, 0.2, 0.1$ でパラメータスタディを行う。 β についての情報はないため、 $\widetilde{\beta}=0.4, 0.2, 0.1$ 、 $\beta_\beta=0.4, 0.2, 0.1$ でパラメータスタディを行う。収束判断は、推定した A_m と β によるフラジリティ曲線による年損傷確率 P_F とフラジリティ曲線の正解値による年損傷確率 P_{F0} の比が $0.5 < P_F/P_{F0} < 1.5$ を目安とする。また、年損傷確率算定に用いた地震ハザード曲線は、超過頻度 $1 \times 10^{-2}/\text{年}$ と $1 \times 10^{-5}/\text{年}$ の2点を通る、べき乗関数を想定し、前者に対応する PGA を 200Gal 、後者に対応する PGA を $600, 800, 1000\text{Gal}$ とした3ケースを考慮する。

予備的検討の結果、 $\widetilde{A}_m$ の信頼性は高いため $\beta_{A_m}=0.1$ で解析回数が少なくなる。一方で、 $\widetilde{\beta}$ は一般的なばらつき 0.2 および β_β は広範囲に β を探索可能な 0.4 で解析回数が少なくなり、概ね解析回数200回で A_m と β は収束する。 A_m と β の推定値と解析回数との関係の例を図-1～図-2に示す。

4. 原子力屋外重要土木構造物への適用

上記予備的検討を踏まえて図-3～図-4に示す原子力発電所屋外重要土木構造物のフラジリティ曲線を算定する。物性値や入力地震動等の解析条件は、「土木学会原子力マニュアル」²⁾に従い、砂層は R-O モデル、構造物は M- ϕ モデルによって非線形性を考慮した2次元 FEM 非線形時刻歴解析を行う。また、曲げ破壊が先行したため、破壊判定基準は層間変形角 $1/100$ とする。物性値のばらつきとして砂層1、砂層2および岩盤の S 波速度を考慮し、それぞれ変動係

キーワード フラジリティ曲線、ベイズ推定、原子力発電所、地震 PRA、屋外重要土木構造物、耐震
 連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 原子力リスク研究センター TEL 04-7182-1181

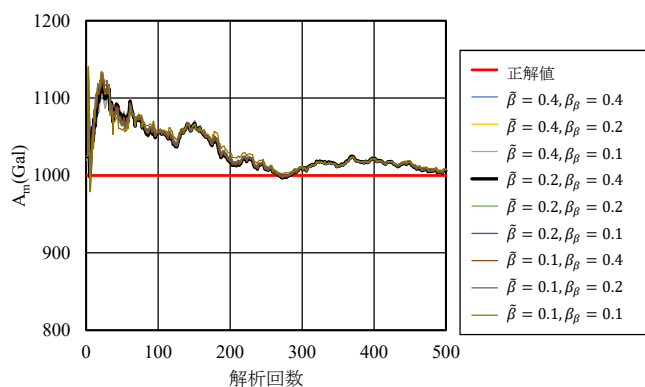
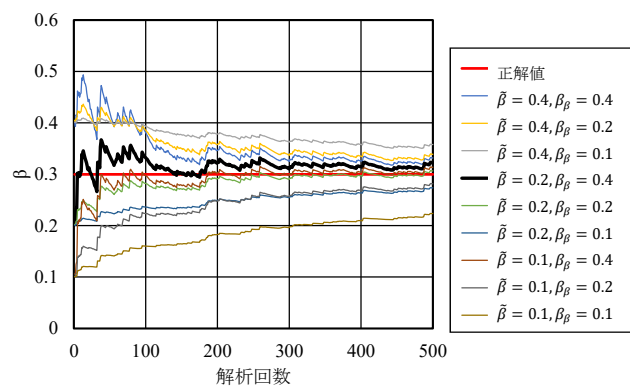
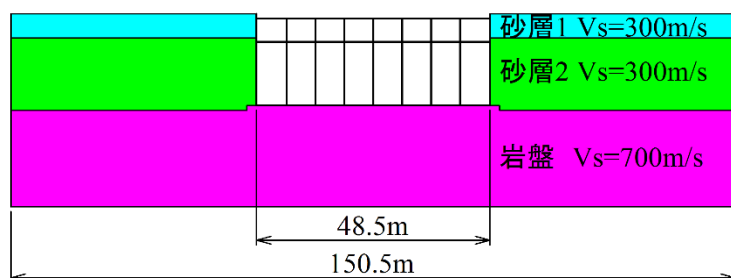
図-1 $\hat{A}_m$ と解析回数図-2 β と解析回数

図-3 解析モデル図(取水ピット)

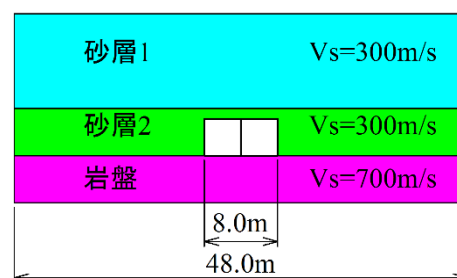


図-4 解析モデル図(海水管ダクト)

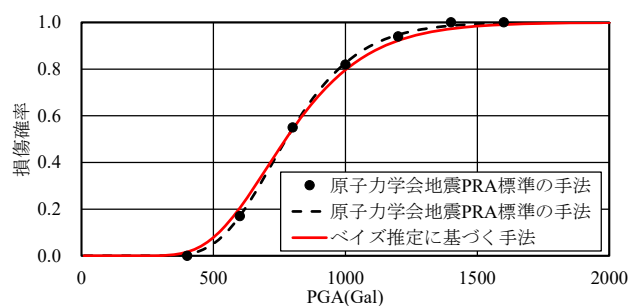


図-5 フラジリティ曲線(取水ピット)

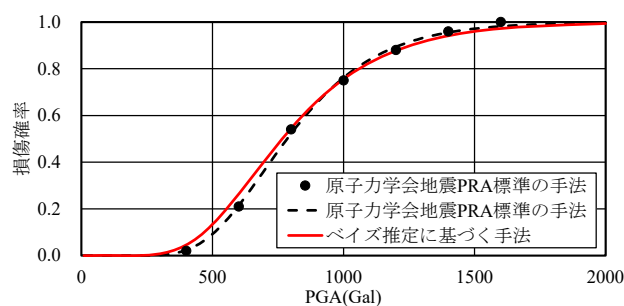


図-6 フラジリティ曲線(海水管ダクト)

数は 0.2 として、モンテカルロシミュレーション(以下、MCS)によってサンプリングする。事前分布は上記予備的検討を踏まえ、 $\hat{A}_m$ は裕度解析による限界加速度 780Gal(取水ピット)、800Gal(海水管ダクト)を設定し、 $\beta_{Am}=0.1$ 、 $\tilde{\beta}=0.2$ 、 $\beta_\beta=0.4$ とする。また、入力地震動の PGA は、400～1600Gal 間の一様分布を仮定して MCS でサンプリングする。

解析回数 200 回でのベイズ推定によるフラジリティ曲線を原子力学会地震 PRA 標準の手法と比較し、図-5～図-6 に示す。なお、前者による年損傷確率 P_F の後者による年損傷確率 P_{F0} の比 P_F/P_{F0} は、取水ピットで、1.58(地震ハザード曲線の 1×10^{-5} /年における PGA が 600Gal)、1.33(同 800Gal)、1.24(同 1000Gal)、海水管ダクトで、2.21(同 600Gal)、1.69(同 800Gal)、1.50(同 1000Gal)となり、原子力学会地震 PRA 標準の手法と同程度の年損傷確率となった。

5. まとめ

ベイズ推定を用いたフラジリティ曲線算定において、耐力中央値に関する事前分布を裕度解析によって設定する手法を検討した。同手法を原子力発電所屋外重要土木構造物に適用した結果、年損傷確率 P_F は、原子力学会地震 PRA 標準手法による年損傷確率 P_{F0} の 1.24～2.21 倍となり、同程度となった。なお、解析回数は本手法が 206 回（うち 6 回は裕度解析）、原子力学会地震 PRA 標準手法が 700 回であり、提案手法は解析コストを低減できる可能性がある。

【参考文献】

- 1) 日本原子力学会：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(AESJ-SC-P006:2015)
- 2) 土木学会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル, 2005 年 6 月