

広域に散在する構造物の損傷相関の評価手法の検討

株式会社篠塚研究所 正会員 ○望月 智也
株式会社篠塚研究所 正会員 中村 孝明

1. はじめに

確率論的地震リスク評価において、構造物相互の相関を考慮した評価手法の構築は重要な課題の一つであり、特に実務面から簡便かつより精度の高い評価手法が望まれている。著者らは、文献1)において、相関のある確率変数を2つの完全相関成分に分離することで、損傷相関を考慮した組合せ事象を求める積分式を誘導している。本報は、文献1)を応用したより利便性の高い手法により、広域に散在する複数構造物を対象に、地震時における組合せ事象の確率評価を行い、提案手法の適用性を検討することを目的としている。

2. 損傷相関係数

n 個の構造物があり、それぞれの耐力の確率変数を C_i , $i=1\sim n$, 作用地震動の確率変数を R_i , $i=1\sim n$ として記述する。各確率変数は対数正規分布に従うものとし、それぞれ以下のように定義する。

$$\left. \begin{array}{l} f_{C_i}(\ln c | \lambda_{C_i}, \zeta_{C_i}) \\ f_{R_i}(\ln r | \lambda_{R_i}, \zeta_{R_i}) \end{array} \right\}, i=1\sim n \quad (1)$$

ここに、 λ は対数の平均値、 ζ は対数標準偏差である。次に、構造物の損傷状態を以下のように定義する。

$$C_i/R_j = F_i \leq 1.0, i=1\sim n \quad (2)$$

ここに、 C_i , $i=1\sim n$ は互いに独立、 R_i , $i=1\sim n$ は一定の相関を仮定する。そして、 F_i と F_j との共分散をとり、構造物間の損傷相関係数を求めると次式のようなになる。

$$\rho_{Fij} = \frac{\rho_{Rij} \zeta_{Ri} \zeta_{Rj}}{\zeta_{Fi} \zeta_{Fj}}, i \neq j \quad (3)$$

ここに、 ζ_{Fi} , $i=1\sim n$ は複合偏差である。また、 ρ_{Rij} は工学的基盤の最大加速度 (Peak Base-rock Acceleration 以下、PBA) の空間相関係数であり、次式²⁾で表される。

$$\rho_{Rij} = \exp(-d_{ij}/27.1) \quad (4)$$

ここに、 d_{ij} は構造物が立地するサイト間の相対距離で

ある。ここで、複合偏差 $\zeta_{Fi} = \zeta_F$, $i=1\sim n$ とする。また、(2)式より次式の関係を得る。

$$\zeta_F^2 = \zeta_{C_i}^2 + \zeta_{R_i}^2, i=1\sim n \quad (5)$$

$$\lambda_{F_i} = \lambda_{C_i} - \lambda_{R_i}, i=1\sim n \quad (6)$$

3. 損傷相関を考慮した組合せ事象の確率

Curnow and Dunnett³⁾が示した多次元同時確率分布の多重積分から、2重積分に帰着する方法を用いて、損傷相関を考慮した組合せ事象の確率 (積事象確率) を求める。積事象確率 $p(Z_i \leq h_i)$ は次式のように誘導できる。

$$p(Z_i \leq h_i) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^n \left[\Phi \left(\frac{h_i + \theta_{1i} y_1 + \theta_{2i} y_2}{\sqrt{1 - \theta_{1i}^2 - \theta_{2i}^2}} \right) \right] \cdot \phi_1(y_1) \phi_2(y_2) dy_1 dy_2 \quad (7)$$

ここに、 Φ , ϕ は標準正規分布の累積分布関数、確率密度関数である。また、2変数 θ_{1i} , θ_{2i} は、確率変数 Z_i , $i=1\sim n$ の相関係数 ρ_{Fij} と次式のような関係にある。

$$\rho_{Fij} = \theta_{1i} \theta_{1j} + \theta_{2i} \theta_{2j}, i \neq j, 0 < \theta_{1i}, \theta_{2i} \leq 1 \quad (8)$$

積分範囲 h_i , $i=1\sim n$ は、(2)式より $0 < F_i \leq 1.0$ であり、 $\ln(1.0)=0.0$ に注意すると、以下となる。

$$h_i = -\lambda_{F_i} / \zeta_F, i=1\sim n \quad (9)$$

さらに、(7)式より h_i は次式となる。

$$h_i = \frac{-(\lambda_{C_i} - \lambda_{R_i})}{\zeta_F}, i=1\sim n \quad (10)$$

(10)式から得られる積分範囲、ならびに(3)式から得られる損傷相関係数 ρ_{Fij} を(8)式に適用し、2変数 θ_{1i} , θ_{2i} , $i=1\sim n$ を求め、(7)式に適用すれば、損傷相関を考慮した積事象確率を求めることができる。様々な組合せ事象の確率も同様に評価できる。なお、2変数 θ_{1i} , θ_{2i} , $i=1\sim n$ については、非負値行列因子分解 (Nonnegative Matrix Factorization 以下、NMF)^{1),4)}を用いて求める。

キーワード 損傷相関, 積事象確率, 2重積分, 非負値行列因子分解

連絡先 〒160-0023 東京都新宿区西新宿 4-5-1 幸伸ビル新宿 3F 株式会社篠塚研究所 TEL: 03-5351-3781

4. 評価事例

(1) 評価概要

評価対象は、図 1 に示す徳島県及び大阪府に位置にする 8 つの構造物として、南海トラフで想定される海溝型地震 (M8.6) が発生した際の組合せ事象の確率を求める。このとき、各構造物が位置するサイトで予想される PBA は、安中らの距離減衰式⁹⁾を用いて算定するものとする。また、構造物の耐力中央値も PBA で与えられるものとした。地震時に各サイトで想定される PBA、耐力中央値及び地震動作用下における各構造物単独の損傷確率を表 1 に示す。

一方、損傷相関係数 ρ_{Fij} は、 $\zeta_F=0.5$, $\zeta_{Ri}=0.45$ とし、図 1 からサイト間の相対距離を求め、(4)式を用いて図 2 を算定した。また、(7)式の数値積分における離散化数は 100×100 , NMF の反復回数は 300 とした。

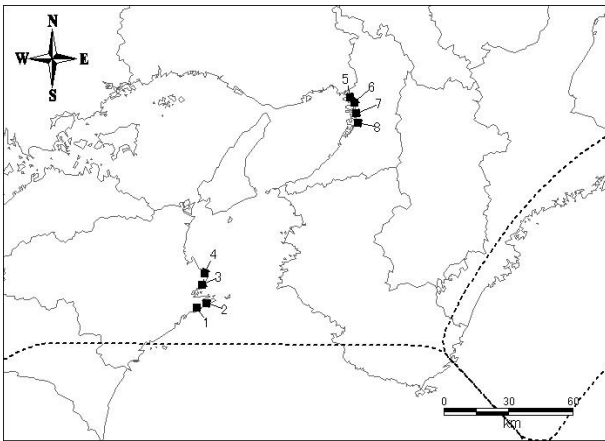


図 1 評価対象構造物の位置図

表 1 サイトで想定される PBA 及び耐力中央値等

サイト	サイトで想定される PBA(Gal)	耐力中央値 (Gal)	地震動作用下での損傷確率
1	413	468	0.40
2	403	523	0.30
3	370	448	0.35
4	346	369	0.45
5	171	389	0.05
6	178	566	0.01
7	185	599	0.01
8	191	436	0.05

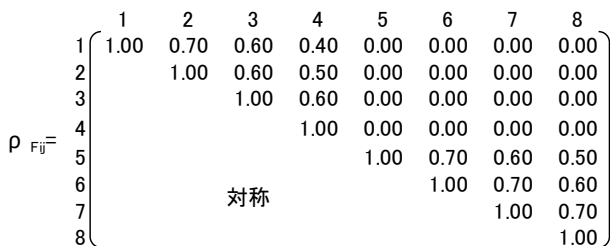


図 2 相関係数行列

(2) 評価結果

評価結果として、損傷構造物数の確率関数を図 3 に示す。図 3 は、例えば、横軸が「0」の場合、地震動作用下で、損傷する構造物が 1 つもないことを表し、「4」は 8 つの構造物中 4 構造物が損傷することを表す。なお、比較・検証のため、図 3 には試行回数を 100,000 としたモンテカルロ・シミュレーション (MCS) の結果を併記している。

図 3 より、提案手法から求めた解と MCS から求めた解 (確率) は、整合した結果となり、提案手法により相関を考慮した評価結果が得られていることが分かる。

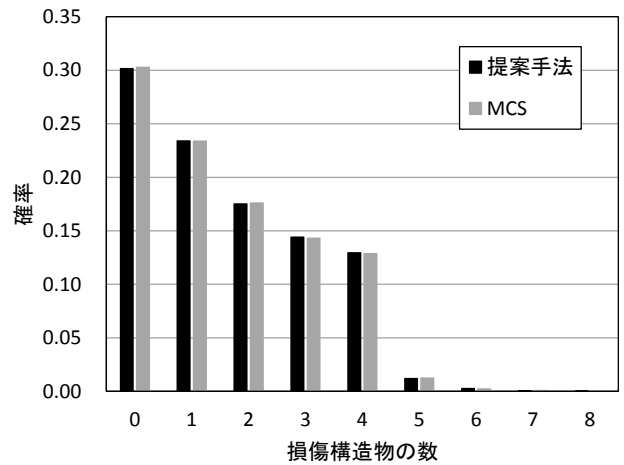


図 3 損傷構造物数の確率関数

5. まとめ

提案手法を用いて、広域に散在する構造物の損傷相関を考慮した組合せ事象の確率評価を行った。その結果、MCS とも整合した結果が得られ、提案手法の適用性が示された。この結果より、提案手法は損傷相関が適切に反映できる手法であること、また、比較的計算時間が少なく、精度よく解が求められる利便性の高い手法であることが示された。

参考文献

- 1) 中村孝明, 望月智也: 相関 2 変数による損傷相関の評価方法に関する基礎的研究, 第 14 回地震工学シンポジウム論文集, pp.1221-1227, 2014.12.
- 2) Wang M., and T. Takada: Macrospatial Correlation Model of Seismic Ground Motions, Earthquake Spectra, Vol.21, No.4, pp.1137-1156, Nov.2005.
- 3) Curnow, R. N. and Dunnett, C. W.: The numerical evaluation of certain multivariate normal integrals. Annals of Math. Stat., Vol.33, No.2, Sep., pp.571-579, 1962.
- 4) D. D. Lee, H. S. Seung : Learning the Parts of Objects by Non-Negative Matrix Factorization, Nature, Vol.401, pp.788-791, 1999.
- 5) 安中正, 山崎文雄, 片平冬樹: 気象庁 87 型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案, 第 24 回地震工学研究発表会公演論文集, pp.161-164, 1997.