

LHS 法を用いた地震リスクの直接評価

電力中央研究所 フェロー会員 ○平田 和太

1. 目的

構造物の地震リスク評価を行うに当たっては、サイトの地震動強度の年超過発生確率（地震ハザード）と地震動強度を与条件とする条件付損傷確率（脆弱性）から年損傷確率（以下、地震リスク）が算出されるが、構造物の応答特性や終局挙動を考慮すると単一の地震動強度指標を用いた評価ではリスク評価の精度には限界が生じる。ここでは地震動の不確実さと構造物の不確実さを同時に考慮し、地震リスクを直接評価する方法について検討を行った。

2. 領域震源の離散化

震源が特定できない地震動は領域震源として設定されるが、領域震源を有限個の震源で代表させることを考える。領域震源はサイトを中心とする半径 100km の円形領域とし、地震の最大、最小規模を $m_{max}=6.0$, $m_{min}=7.5$, また、領域内で発生する地震の規模別発生頻度は $G-R$ 式に従うとして、パラメータは $\nu=1.26 \times 10^{-6}/\text{km}^2$, $b=0.9$ とした。地震規模、震源からの距離（ここでは等価震源距離¹⁾）を使用）を等分割して、各グループ (bin) の中心での (m_i, d_j) ($i=1 \sim N_m, j=1 \sim N_d$) をその bin での代表値とした評価を行う。領域震源の離散化例を図 1 に示す。

3. 離散化震源を用いた地震リスク評価

(1) LHS 法を用いた地震ハザードおよび脆弱性の評価

離散化した震源の一つ (m_i, d_j) を考える。この震源で発生する地震によるサイトでの地震動強度 A （以下では加速度応答スペクトル $S_A(T, h)$ ）は文献 2) に基づく距離減衰式により与えた。地震動強度 A の確率密度関数を $f_A(a|m_i, d_j)$ とすると、領域震源に対するハザード $H(a)$ （ここでは年超過確率とする）は次式で与えられる。

$$H(a) \approx \nu(A > a) = \nu \sum_j \sum_i f(m_i) f(d_j) \Delta m \Delta d \int_a^\infty f_A(a|m_i, d_j) da \quad (1)$$

ただし、 ν は領域震源内での地震発生率、 $f_M(m_i) \Delta m$ は m_i についての生起確率で $G-R$ 式より算出、 $f_D(d_j) \Delta d$ は d_j についての生起確率で、円形領域の仮定から算出される。ここでは上式右辺の積分項をラテン超方格法 (LHS 法) により評価する。即ち、確率密度関数を等確率となる N_L 個の区間に分割し、各区分からサンプル値を抽出して、 $A > a$ となるサンプル数 $N(\cdot)$ を総サンプル数 N_L で除することにより、 $N(A_k > a|m_i, d_j; k=1 \cdots N_L)/N_L$ で近似するものとする。

脆弱性 $F(a)$ は、地震動強度の $A=a$ に対する条件付破壊確率、即ち応答 $S(a)$ が耐力 R を上回る確率とし、LHS 法により $S(a)$ および R をサンプリングし、 $S(a)$ が R を上回るサンプル数 $N(\cdot)$ を全サンプル数 N_L で除することにより、以下のように近似的に評価する。

$$F(a) = \text{Prob}(S(a) > R) \approx N(S_{k1}(a) > R_{k2} | k1, k2 = 1 \cdots N_L) / N_L \quad (2)$$

ここでは、 $S(a) = C \times a$ 、即ち、応答は地震動強度に比例するものとし、 C を確率変数とした。また、このときの a の値は各離散化震源 (m_i, d_j) に対する地震動強度の中央値としている。 C と R は対数正規分布とし、対数標準偏差は $\beta_C = 0.3$, $\beta_R = 0.3$ とした。

(2) 地震リスクの直接評価

次に、LHS 法を用いて地震動の不確実性と構造物の応答、耐力の不確実さを同時に評価し、地震リスクを直接算出することを考えてみる。サイトでの地震動強度 A 、応答 $S(a)$ ($=C \times a$)、耐力 R を確率変数とし、各々の確率密度関数を N_L 個の区間に分割し、各区分から得られるサンプル値から、破壊するケースをカウントする。震源 (m_i, d_j) で発生した地震による破壊確率は近似的に、

$$(P_F)_{ij} \approx N(S(a_{k1}) > R_{k2} | m_i, d_j; k1, k2 = 1 \cdots N_L) / N_L = N(C_{k3} \times a_{k1} > R_{k2} | m_i, d_j; k1, k2, k3 = 1 \cdots N_L) / N_L \quad (3)$$

で与えられ、想定した領域震源で発生する地震による構造物の地震リスクは(3)式に地震 (m_i, d_j) の発生確率を乗じて、離散化震源についての総和をとることにより、次式で与えられる。

$$P_{F/year} = \nu \sum_j \sum_i f(m_i) f(d_j) \Delta m \Delta d \times (P_F)_{ij} \quad (4)$$

4. 評価結果

図2にLHSによる地震ハザード曲線を理論値と比較した例を、図3にLHSによる fragility 曲線を理論値と比較したものを示す。両者とも理論値とほぼ一致していることが確認できる。図4は耐力の中央値を S_a 換算で $R_m=200\text{cm/s}^2$, 400cm/s^2 とした場合について(3)(4)式による地震リスク評価の結果を示す。 N_L の増加によりリスクの評価値は収束に向かうが、リスクの平均値(異なる乱数セットによるLHSの)は理論値とほぼ同等か若干上回る結果となっている。

5. まとめ

地震リスクの直接評価について検討を行った。理論値と対応可能な条件下でのリスクを算定したが、提案手法は確率変数の分布形の如何に係わらず、また、地震動の距離減衰式を用いない場合でも適用可能である。

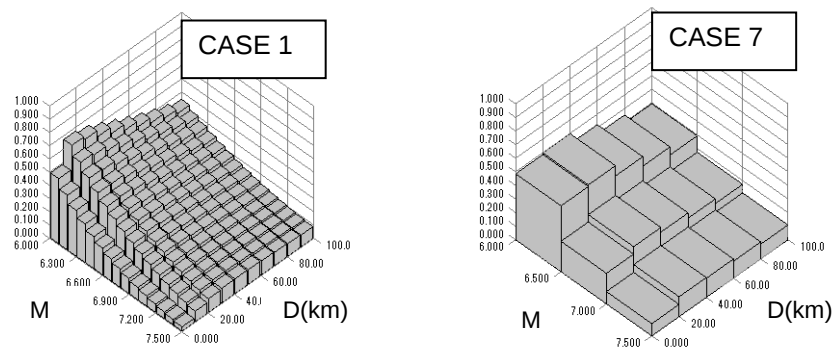


図1 領域震源の離散化例(各震源によるサイトでの $S_a(T=0.02\text{s}, h=5\%)$ を発生確率の重みを付けて表示)

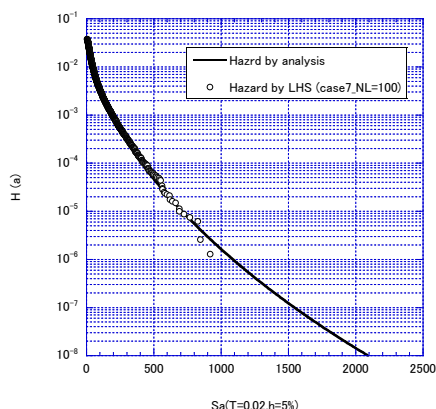


図2 LHSによる地震ハザード曲線

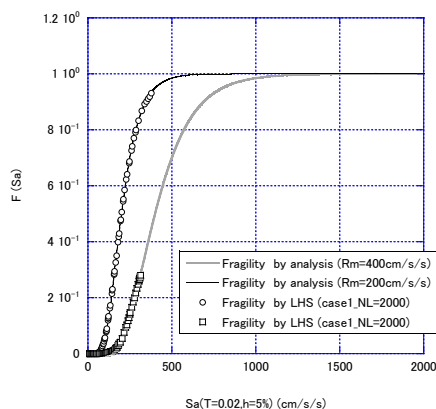


図3 LHSによる fragility 曲線

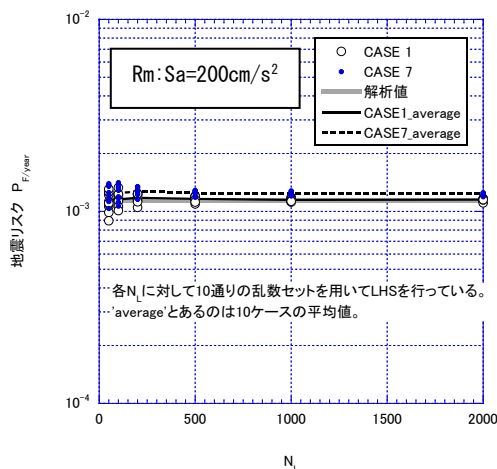
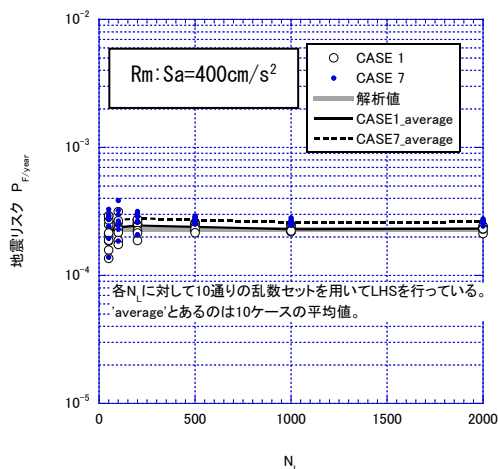


図4 地震リスクの直接評価と解析値との比較

参考文献

- 1) Ohno, S. et al: Revision of Attenuation Formula Considering the Effect of Fault Size , Tectonophysics, Vol. 218, pp. 69-81, 1993
- 2) Nishimura, I, Noda, S., et al: Response Spectra for Design Purpose of Stiff Structures on Rock Sites, SMIRT16 Paper#1133, 2001

キーワード 地震リスク, 地震ハザード, fragility, ラテン超方格法, 領域震源

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 (一財) 電力中央研究所 TEL 04-7182-1181