

武蔵工業大学工学部 正会員 星谷 勝
武蔵工業大学大学院 学生会員 ○永田 茂

1. はじめに

近年、各種構造物の地震時の安全性・信頼性を確率論的に評価するための手法についての研究が盛んに行われている。この代表的な手法としては、米国を中心に原子力発電所の総合安全性を評価することを目的に構築された seismic-PRA (Probabilistic Risk Assessment、確率論的地震時危険度解析)¹⁾ が上げられる。わが国でも、seismic-PRAの重要性が認識されるようになり、この手法を用いた原子力発電所、高層建物、免震建物の地震時の総合安全性評価の報告がなされている²⁾⁻⁴⁾。

seismic-PRAは①サイトで期待される地震動のハザード解析、②地震の強さをパラメータとした構造物の確率論的損傷度解析からなり、最終的には①、②の結果を用いて損傷事象の年発生確率を算出する解析である。さて、②の損傷度解析では構造物の損傷確率の算定を行っており、その解析手法としては安全係数法が用いられている。安全係数法は、本質的に荷重抵抗係数設計法(LRFD法)と等価な手法であるため、損傷確率の算定を簡単に行うことが出来る反面、各種構造材料の材料試験や作用荷重の現場測定などから得られる詳細な確率特性を考慮した解析を行う場合には困難を伴う。

そこで、本報告では、seismic-PRAの損傷度解析の際に部材耐力や作用荷重に関して詳細な確率特性を考慮することの出来る1つの解析手順を示すものである。地震応答解析では、seismic-PRAと同様にSRSS法(2乗和平方根法)を用い、これと構造信頼性解析手法の修正1次近似2次モーメント法を結合することにより、材料特性や断面形状、さらに地震動特性について確率特性を考慮できる損傷度解析の手順を示した。

2. 解析手順

1) 設定した損傷モードに応じて、構造物の着目点*i*での耐力 F_{Ci} と地震力による応答値 F_{Ri} からなる損傷規準式 Z_i (構造物の損傷・非損傷を分ける境界となる)、

$$Z_i = g(F_{Ci}, F_{Ri}) = (F_{Ci}/F_{Ri}) - 1 \quad (1)$$

を設定する。ここで、水平1方向の地震力をうける構造物の着目点*i*での応答値 F_{Ri} 、例えば最大変位応答 $\eta_{i \max}$ や一般力 $F_{i \max}$ などは、SRSS法を用いると、

$$\eta_{i \max} = \sqrt{\{A_{cc} \sum_s \phi_{is} R_s S_{AN} / \omega_s^2\}^2} \quad (2)$$

$$F_{i \max} = \sqrt{\{A_{cc} \sum_s (\sum_r K_{ir} \phi_{rs}) R_s S_{AN} / \omega_s^2\}^2} \quad (3)$$

$$R_s = \sum_j \sum_k \phi_{js} m_{jk} l_k / \sum_j \sum_k \phi_{js} \phi_{ks} m_{jk} \quad (4)$$

となる。上式で、 ϕ_{js} はモードマトリックスの要素、 R_s は*s*次の刺激係数、 ω_s は*s*次の固有円振動数、 S_{AN} は設計用の規準化加速度スペクトル、 A_{cc} は地震動の最大加速度、 K_{ir} は要素剛性マトリックスの要素、 m_{jk} は質量マトリックスの要素、 l_k は0, 1の要素からなるベクトルの要素である。本解析では、構造材料のヤング率、断面2次モーメント、断面積、単位重量さらに地震動の最大加速度などを確率変数として扱えるようにしたため、これらのパラメータの関数として表される $\eta_{i \max}$ 、 $F_{i \max}$ などは確率変数となる。また、構造耐力 F_{Ri} についても、そのばらつきを考慮できるように確率変数とした。

2) 式(1)の F_{Ci} 、 F_{Ri} の算定式に含まれる確率変数をベクトル $\{X\}$ で表し(損傷規準式は $Z_i = g(\{X\})$ とする)、確率変数 $\{X\}$ の平均値、標準偏差、確率変数相互の相関係数を与えると、地震加速度 A_{cc} が作用する構造物の着目点*i*での損傷確率 $P_{fi/A_{cc}}$ は、修正1次近似2次モーメント法により、

$$P_{fi/A_{cc}} = \Phi(-\beta_i) \quad (5)$$

$$\beta_i = g(\{X^*\}) - \{X^*\} - \{\mu^N X\}^T \{ \partial g(\{X\}) / \partial \{X\} \} \{X^*\} / \sqrt{ \partial g(\{X\}) / \partial \{X\} \{X^*\}^T [V^N X] \partial g(\{X\}) / \partial \{X\} \{X^*\} } \quad (6)$$

と計算される。ここで、 $\{\mu^N x\}$ 、 $[V^N x]$ は任意の確率変数を正規分布近似した後の $\{X\}$ の平均値と共分散を表し、 $\{X^*$ は損傷と非損傷の境界の代表点(設計点)を表す。これらに関する詳細は文献5)を参照されたい。

3. 数値計算例

以下では、SRSS法と修正1次近似2次モーメント法を用いた、構造物の地震時損傷度解析の数値解析例を示すが、本解析で用いた数値は仮のものであることを明記しておく。

対象構造物としては、図-1に示す1層1スパンの骨組構造物を取り上げ、その構造諸元を表-1に示した。また、構造物に作用する地震動に関しては、地震動の周波数特性を規定する設計用加速度規準化スペクトル曲線 S_{AN} を図-2に示し、振幅特性を規定する最大加速度 A_{co} を表-1に示す対数正規確率変数として与えた(本解析例では、規準化スペクトル形状のばらつきは考慮していない)。本解析例では、以上のデータをを用いて構造物の柱の切斷破壊を破壊モードとしたときの損傷度曲線を上述の手順により算出した。具体的には、式(1)の損傷規準式の F_{ci} は表-1の値、 F_{ri} は表-1の値を用いて式(3)から計算される切斷応力をそれぞれ用いて、最大加速度 A_{co} を変化させたとき(平均値で5~80gal)の損傷確率を求めて図-3に記入したものである。

なお、文献1)にあるように、サイトで期待される地震動のハザード解析から得られるハザード曲線の加速度 A_{co} に対する微分値 dH/dA_{co} と、図-3に示す地震加速度 A_{co} のときの損傷確率 $P_{fi/A_{co}}$ より、構造物の損傷の年発生確率は、

$$P_f = \int P_{fi/A_{co}} \cdot dH/dA_{co} \cdot dA_{co} \quad (7)$$

となる。

4. まとめ

本報告では、seismic-PRAの損傷度解析において、構造信頼性解析手法の修正1次近似2次モーメント法が応用できることを示した。この方法では、各確率変数単位で確率特性を詳細に考慮することが可能であるため、地震時において構造損傷に寄与する要因を確率論的に評価するときなどの1つの手段となると思われる。

参考文献

- 1) 柴田他: 原子力発電所の地震時危険度の確率論的評価、日本原子力学会誌、Vol.28, No.1, pp.2-40, 1986.
- 2) 森下・板橋・武村・石田・太田: 原子力発電所建屋の確率論的信頼性評価の研究、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、pp.751-752, 昭和60年.
- 3) 加藤・三浦・山本・伊藤・武田: 高層建物の地震時リスク評価、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、pp.543-544, 昭和60年.
- 4) 称原・仙海・石井・石川: 免震構造物の確率論的リスク評価、JCOSSAR'87論文集、pp.111-116, 1987.
- 5) 永田・星谷: 骨組構造物の信頼性解析方法の提案、JCOSSAR'87論文集、pp.329-334, 1987.

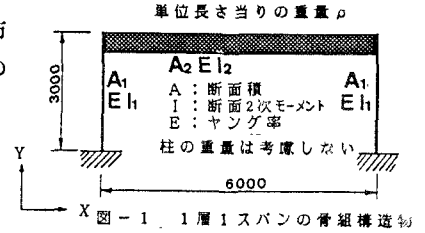


表-1 構造諸元、構造耐力、地震動特性

単位長重量	断面2次モーメント		断面積(mm ²)	
	I_1	I_2 (mm ⁴)	A_1	A_2
平均値	1.5	3.0E8	4.0E8	6.0E4
変動係数	0.25	0.25	0.25	0.25
分布形	正規	正規	正規	正規
ヤング率	切斷耐力		最大加速度	
E (kgf/mm ²)	F_{ci} (kgf/mm ²)		Acc(mm/s ²)	
平均値	2500.0	0.007	50.0-800.0	
変動係数	0.25	0.30	0.25	
分布形	正規	正規	対数正規	

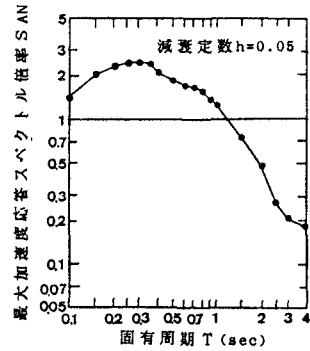


図-2 設計用規準化加速度スペクトル曲線

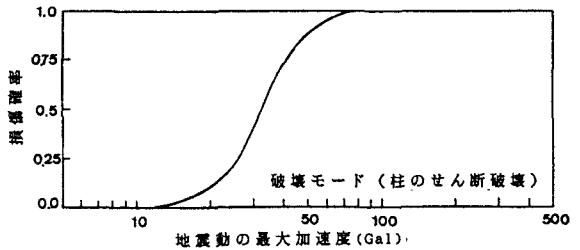


図-3 損傷度曲線