

清水建設(株) 大崎研究室 正員 ○奥村 俊彦
同 技術研究所 正員 石川 裕

1. はじめに

近年、原子力発電所に代表される重要構造物の地震リスクを確率論的に評価する試み¹⁾が注目されている。リスク評価のうち、構造物の応答・損傷度評価においては応答スペクトルの確率論的評価が必要とされるが、応答の評価手法のうち現在最も実用的とされる¹⁾安全係数法では、規準化スペクトルの確率論的評価を行い、これを最大加速度の地震危険度解析の結果と合わせて応答スペクトルを評価している。さて、ここで評価する規準化スペクトルのばらつきは、主として地震の規模と距離(M, R)の組み合わせに起因するものであり、加速度レベルによりその形状が異なるものと考えられる。そこで、本稿では加速度レベルに応じた規準化スペクトルの評価のための定式化を行った。

2. 規準化スペクトルの推定式

最大加速度 Y および応答スペクトル S_A のアテニュエーション式が、マグニチュード M と距離 R の関数として以下の形で与えられているものとする。

$$Y = a_1 \times 10^{\frac{a_2 M}{2}} \times (R + R_0)^{-a_3} \quad \dots\dots(1) \quad S_A = b_1 \times 10^{\frac{b_2 M}{2}} \times (R + R_0)^{-b_3} \quad \dots\dots(2)$$

この時、規準化スペクトル(応答倍率) X は、 S_A を Y で除したものととして次式で表される。

$$X = \frac{S_A}{Y} = \frac{b_1}{a_1} \times 10^{\frac{(b_2 - a_2)M}{2}} \times (R + R_0)^{-(b_3 - a_3)} = c_1 \times 10^{\frac{c_2 M}{2}} \times (R + R_0)^{-c_3} \quad \dots\dots(3)$$

したがって、式(3)に式(1)を代入して距離の項を消去すると、次式を得る。

$$X = c_1 \times \left(\frac{Y}{a_1} \right)^{\frac{c_3}{a_3}} \times 10^{\frac{c_2 a_3 - c_3 a_2}{a_3} M} \quad \dots\dots(4)$$

3. 最大加速度が与えられた場合の規準化スペクトル

最大加速度 $Y = y$ が与えられた条件下でのマグニチュードの確率関数 $P(m_i | Y = y)$ は次式で算定される。

$$P(m_i | Y = y) = \frac{P(Y = y | m_i) \cdot P(m_i)}{P(Y = y)} = \frac{P(Y = y | m_i) \cdot P(m_i)}{\sum_i P(Y = y | m_i) \cdot P(m_i)} \quad \dots\dots(5)$$

式(5)で $P(m_i | Y = y)$ が算定されれば、加速度 y が与えられた条件下での規準化スペクトル X の分布関数は

$$P(X \leq x | Y = y) = \begin{cases} P(M \leq m^* | Y = y) ; (c_2 a_3 - c_3 a_2) / a_3 > 0 \\ P(M \geq m^* | Y = y) ; (c_2 a_3 - c_3 a_2) / a_3 < 0 \end{cases} \quad \dots\dots(6)$$

となる。ただし、 m^* は $X = x$ となるマグニチュードであり、式(4)より得られる。

4. 試算例

一例として、円形震源の場合の計算を行った。解析条件、および Y, S_A のアテニュエーション式の係数を表-1、表-2に示す。アテニュエーション式は、川島ら²⁾による2種地盤のものを用いている。表-2には、規準化スペクトル X の推定式(式(4))の係数も併せて示してある。

図-1に、最大加速度が与えられた条件下でのマグニチュードの累積分布関数 $P(M \leq m_i | Y = y)$ を示す。この分布は加速度レベルに依存しており、最大加速度が大きくなるにつれてマグニチュードの大きい地震の寄与率が高くなっていることがわかる。

図-2には、図-1をもとに算定した規準化スペクトルの中央値を示す。図は、最大加速度が100~500galの場合の規準化スペクトルを比較したものであるが、加速度レベルの増大に伴い、規準化スペクトルは0.2秒より長周期側で大きく、逆に短周期側では幾分小さくなる傾向を示している。これは、図-1に示したように加速度が大きくなるにつれてマグニチュードの大きい地震の寄与率が高くなることから、特に式(4)の M の係数の大きい長周期側において、最大加速度の差の影響が現れているものと考えられる。

図-3(a),(b)は、それぞれ最大加速度が100 gal, 500 gal の場合の規準化スペクトルの中央値および16%, 84% 非超過値を示したものである。図-1に示されるように、最大加速度が500 gal の場合は、寄与する地震のマグニチュードの範囲が6.8~8.0と狭いのに対し、100 gal の場合には5.0~8.0の広い範囲の地震が影響することから、相対的に100 gal の場合の方がばらつきが大きくなる傾向となっている。

5. おわりに

本稿では、最大加速度に応じた規準化スペクトルの確率論的評価を行った。これより、最大加速度が大きい場合にはマグニチュードの大きい地震の寄与率が高いために長周期側でスペクトルが大きくなり、一方、最大加速度が小さい場合には、広い範囲のマグニチュードが影響することから、そのばらつきが大きくなることがわかった。

<参考文献>

- 1) 柴田 他：日本原子力学会誌, Vol28, No.1, 1986.
- 2) 川島 他：土木研究所報告, 第166号, 1980.

表-2 加速度応答スペクトル (式(2)) と
規準化スペクトル (式(4)) の係数

周期 (秒)	b_1	b_2	b_3	c_1	$\frac{c_3}{a_3}$	$\frac{(c_2 a_3 - c_3 a_2)}{a_3}$
0.1	848.0	0.262	1.178	3.647	-0.0340	-0.0407
0.15	629.1	0.288	1.178	2.706	-0.0340	-0.0147
0.2	466.0	0.315	1.178	2.004	-0.0340	0.0123
0.3	266.8	0.345	1.178	1.148	-0.0340	0.0423
0.5	102.2	0.388	1.178	0.440	-0.0340	0.0853
0.7	34.34	0.440	1.178	0.148	-0.0340	0.137
1.0	5.036	0.548	1.178	0.0217	-0.0340	0.245
1.5	0.719	0.630	1.178	0.00309	-0.0340	0.327
2.0	0.347	0.644	1.178	0.00149	-0.0340	0.341
2.5	0.361	0.586	1.178	0.00155	-0.0340	0.283

($h = 5\%$, $R_0 = 30 \text{ km}$)

表-1 解析条件

- (1) 円震源の半径 300 km
- (2) 最小マグニチュード 5.0
- (3) 最大マグニチュード 8.0
- (4) G-R式の b 値 1.0
- (5) 最大加速度のアテニュエーション式²⁾

$$Y = 232.5 \times 10^{0.313M} \times (R+30)^{-1.218}$$

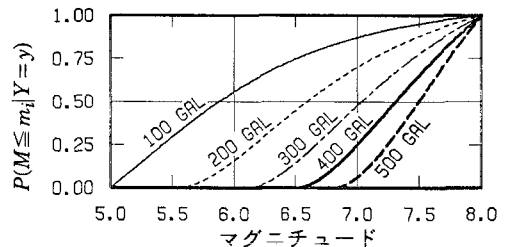


図-1 マグニチュードの分布関数

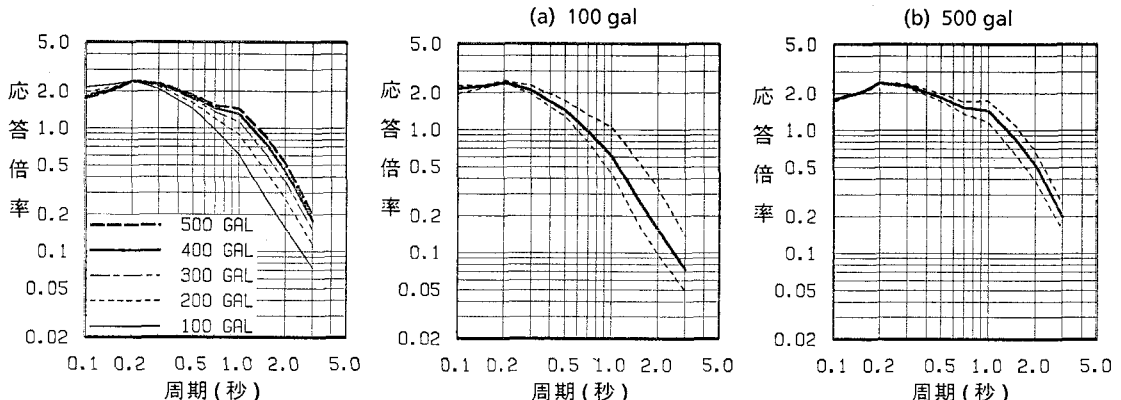


図-2 規準化スペクトルの中央値

図-3 規準化スペクトルの中央値および16%, 84%の非超過値