

名城大学	理工学部	正	板橋	一雄
名古屋大学	工学部	正	松尾	稔
愛知県		正	浅井	厚視

1. まえがき

筆者らは、斜面や土構造物の耐震設計法を模索するために、①破壊事例の震度法・円弧すべり法による解析、②これらの解析から予測される震度と距離減衰式から推定される最大加速度との関係、等を提案してきた。¹⁾そして、地震外力(最大加速度)を評価するために、最近20年間に得られている資料を整理し、①最大加速度に関する地域別の距離減衰式の提案、②工学的な“地震の集”の明確化、③各“地震の集”において発生するマグニチュードの整理、などを行ってきた。²⁾そこで、この報告では、以上の事項を考慮した地震危険度解析の方法について示す。

2. 地震危険度解析に必要な項目と新しく考慮する点

Cornellは工学的な地震危険度解析と題して、確率論的地震危険度解析の方法を示している。³⁾それに必要な項目は、①地震動パラメータの距離減衰式、②地震源モデル、③マグニチュードMの頻度分布、④地震の発生時系列、の4項目である。Cornellは、地震動パラメータとして最大加速度Aを考え、式(1)を用いている。

$$A = b_1 \cdot e^{b_2 M} \cdot R^{-b_3} \quad (1)$$

また、震源モデルとして、距離Rに関する確率密度関数 $f_R(r)$ が比較的簡単な形となるような線形震源、環状震源を考えている。そして、マグニチュードに関してはGutenberg-Richter式(以下ではG-R式と記す)を用い、地震発生時系列はポアソン過程を考えている。

以上の仮定に加え、筆者らは震度Kと最大加速度Aとの関係式(2)を考慮する。¹⁾

$$K = c_1 \cdot A^{c_2} \quad (2)$$

また、最近20年間の地震発生資料を整理した結果、日本においてもマグニチュードの頻度分布がG-R式でよく表現できることがわかった。ただし、震源モデルとして線形や環状は考えにくく、ここでは円形震源を仮定した。円形震源と仮定する利点は、震源パラメータ(震源半径 l 、G-R式の b 値、最小マグニチュード m_0 、地震平均発生率 ν)が1組決められれば、どの建設サイトに対しても、それらのパラメータが不変なことである。

3. 円形震源を考慮した地震危険度解析

震度にもとづく斜面や土構造物の地震危険度解析を考えるため、式(1)、(2)より震度に関する距離減衰式を考える。

$$K = c_1 (b_1 \cdot e^{b_2 M} \cdot R^{-b_3})^{c_2} \quad (3)$$

また、マグニチュードの頻度分布に関しては、Cornellが示したと同様の累積分布関数 $F_M(m)$ を考える。

$$F_M(m) = 1 - \exp[-\beta(m - m_0)] \quad , \quad m_0 \leq m \quad (4)$$

ここに、 m_0 は考慮すべき最小のマグニチュードであり、 $\beta = b \cdot \ln 10$ である。

震源モデルとしては、図-1に示す半径 l の円形震源を考慮するので、建設地点から震源端までの距離を d とすると、距離Rに関する累積分布関数 $F_R(r)$ は、円形震源の全面積に対するハッチング部の面積の比となるから

$$F_R(r) = \frac{1}{\pi} \left[x_2 (1 - x_2^2)^{\frac{1}{2}} + \sin^{-1} x_2 + \frac{\pi}{2} \right] - \frac{1}{\pi} \left(\frac{r}{l} \right)^2 \left[x_3 (1 - x_3^2)^{\frac{1}{2}} + \sin^{-1} x_3 - \frac{\pi}{2} \right] \quad (5)$$

ここに、 x_2, x_3 は r の関数であり、次式で示される。

$$x_2 = \frac{r^2 - d^2 - 2dl - 2l^2}{2l(d+l)} \quad , \quad x_3 = \frac{r^2 + d(d+2l)}{2r(d+l)} \quad (6)$$

また、その確率密度関数 $f_R(r)$ は $f_R(r) = dF_R(r)/dr$ より、

$$f_R(r) = \frac{2}{\pi} (1-x_2^2)^{\frac{1}{2}} \frac{dx_2}{dr} - \frac{2}{\pi} \left(\frac{r}{l}\right)^2 (1-x_3^2)^{\frac{1}{2}} \frac{dx_3}{dr} + \frac{r}{l^2} - \frac{2r}{\pi l^2} x_3 (1-x_3^2)^{\frac{1}{2}} - \frac{2r}{\pi l^2} \sin^{-1} x_3, \quad d \leq r \leq d+2l \quad (7)$$

ここに、

$$\frac{dx_2}{dr} = \frac{r}{l(d+l)}, \quad \frac{dx_3}{dr} = \frac{r^2 - d(d+2l)}{2r^2(d+l)} \quad (8)$$

地震発生過程を平均発生率 ν のポアソン過程とすれば、建設地点の震度の確率分布が次のように求められる。

距離 $R=r$ で地震が生じたとき、震度 K がある値 k を越える確率はマグニチュードと距離が独立ならば、式(9)で与えられる。

$$P[K \geq k | R=r] = k^{-\frac{\beta}{c_2 b_2}} (c_1 \cdot b_1^{c_2})^{\frac{\beta}{c_2 b_2}} e^{\beta m_0} r^{-\frac{b_3 \beta}{b_2}} \quad (9)$$

ここに、 $k_0 = c_1 \cdot b_1^{c_2} e^{\beta m_0} r^{-c_2 b_3}$ である。

震度 K の累積分布関数を $F_K(k)$ とすれば、

$$1 - F_K(k) = \int_D P[K \geq k | R=r] \cdot f_R(r) dD = k^{-\frac{\beta}{c_2 b_2}} (c_1 \cdot b_1^{c_2})^{\frac{\beta}{c_2 b_2}} e^{\beta m_0} \int_D r^{-\frac{b_3 \beta}{b_2}} \cdot f_R(r) dD = C \cdot G \cdot k^{-\frac{\beta}{c_2 b_2}} \quad (10)$$

$$\text{ここに、} C = (c_1 \cdot b_1^{c_2})^{\frac{\beta}{c_2 b_2}} \cdot e^{\beta m_0}, \quad G = \int_D r^{-\frac{b_3 \beta}{b_2}} \cdot f_R(r) dD \quad \text{である。} \quad (11)$$

したがって、建設地点で震度 K がある値 k を越える確率 P_k は次式となる。

$$P_k = P[K \geq k] = C \cdot G \cdot k^{-\frac{\beta}{c_2 b_2}} \quad (12)$$

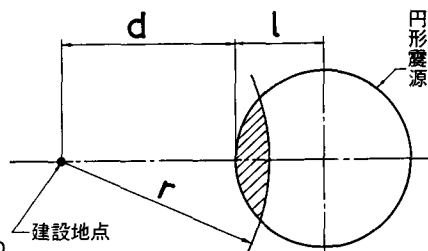
として、ポアソン過程の性質より、建設地点で上記事象が生ずる過程もポアソン過程となるので、 t 年間の最大震度 $K_{\max}^{(t)}$ の累積分布関数は次式となる。

$$P[K_{\max}^{(t)} \leq k] = \exp[-\nu t C G k^{-\frac{\beta}{c_2 b_2}}] \quad , \quad k_0 \leq k \quad (13)$$

以上示した式より、震源半径 l 、震源端までの距離 d 、 $G-R$ 式の b 値、最小マグニチュード m_0 、地震平均発生率 ν 、距離減衰式内に含まれるパラメータ b_1, b_2, b_3, c_1, c_2 が与えられれば、震度 K の分布が得られる。ここが問題となるのは、式(11)の G である。これは円形震源を仮定したため、非常に複雑な二重積分が必要となる。

そこで、図-2に示すような G に関する図を作成した。式(11)より、 b_2, b_3, β が異なっても $\frac{b_3}{b_2} \beta$ の値が同一であれば、 G は同じ値を示すことがわかる。図-2では $\frac{b_3}{b_2} \beta = 0.6, 0.8$ の場合であり、震源端までの距離 $d = 0 \sim 100 \text{ km}$ 、震源半径 $l = 10, 20, 30, 40 \text{ km}$ の場合が示してある。

参考文献 1) 松尾総・板橋一雄：斜面および土構造物の耐震性評価に関する研究，土木学会論文報告集，第352号，pp.139~147, 1984.
2) 松尾総・板橋一雄：震度を用いた斜面および土構造物の地震危険度解析に関する研究，土木学会論文報告集投稿中。3) Cornell, C.A.: Engineering Seismic Risk Analysis, BSSA, Vol. 58, No. 5, pp. 1607~1620, 1968.



- l : 円形震源の半径
- d : 建設地点と震源端の距離
- r : 距離
- b : Gutenberg-Richter式の b 値
- m_0 : マグニチュードの最小値
- ν : 地震平均発生率

図-1 円形震源モデル

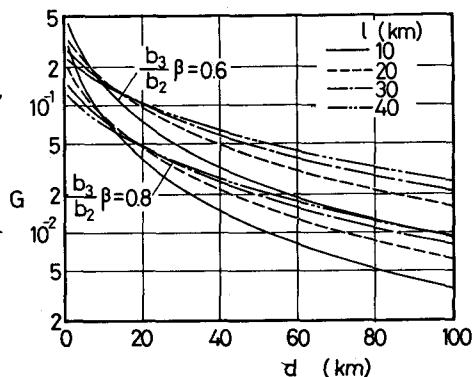


図-2 G の図