

京都大学工学部 正会員 ○野田 茂
京都大学工学部 正会員 山田 善一

1. まえがき

従来の点震源・線震源モデルにおける距離減衰公式を用いた危険度解析は幾つかの欠点と不確定さを有する。この認識より、著者は面震源の破断分割モデルに発震機構と、その震源モデルの決定パラメータに数値実験を導入した危険度予測の方法を提案した。すなわち、Fig. 1 に示すような任意の空間的位置と形状からなる活断層に、Fig. 2 のような破断領域と分割要素を考えた移動震源モデルの検討より、これまでの微小震源位置と当該地点間のM-μ式で説明できなかったFig. 3の等危険度曲線が求められた。この観点から、本報告ではMIT, USCなどの研究による面的な断層モデルの特徴を生かしたライフライン系の連結機能の推定に関する危険度解析を行った。そのトポロジーはFig. 4のように設定し、SSSPネットワークモデルとFig. 3の楕円等震度線を取り入れることにより、各リンクの疎通性は検討した。

2. 矩形断層震源モデル

まずFig. 4のようなシステム内の各リンクを構成する要素の危険度推定は、Cornell, Kiureghian³⁾と基本的に同等である。震源規模Mと破断長さLの経験的な関係式は、 $S = e^{a_1 M - a_2} \varepsilon_s$ (1) (a_1, a_2 : 定数, ε_s : 誤差項)で示される。矩形断層内に破断が一樣に生起すると仮定するならば、地震発生による要素の抵抗強度を超過する確率は、

$$P[Y > a_g] = 1 - e^{-\sum_{j=1}^n \lambda_j \int \int \int P[Y > a_g | M, \varepsilon_r, \varepsilon_s] f(M) f(\varepsilon_r) f(\varepsilon_s) d\varepsilon_s d\varepsilon_r dM} \quad (2)$$

(n : 断層数, λ_j : j 断層の地震発生数/年/面積, ε_r : 外力強度のばらつき, $f(\cdot)$: p.d.f.)である。Fig. 4のように各パラメータを決めると、式(2)の被積分関数の条件付超過確率は、以下のように各ケースに応じて求められる。但し、 $X_1 = \sqrt{R^2 - r_0^2}$, $X_2 = \sqrt{R^2 - r_0^2}$, $Y_0 = \sqrt{R^2 - h^2} - d$, $A_F = Wl$

$$P[Y > a_g | M, \varepsilon_r, \varepsilon_s] = P[1.]$$

(I) $R < r_0$ のケース

$$1) X_1 + \frac{S}{2} \leq l_2 \text{ かつ } l \leq l_2 \text{ のとき, } P[1.] = 0 \quad \text{以下, 式(3)}$$

$$2) l < l_1 \text{ かつ } X_1 \leq l_2 \text{ のとき, } P[1.] = 0$$

$$3) l \geq l_1 \text{ かつ } X_1 + \frac{S}{2} \leq l_2 \text{ のとき, } P[1.] = \frac{(S + X_1) Y_0}{A_F}$$

$$4) l_1 \leq \frac{S}{2} \text{ のとき, } P[1.] = \frac{Y_0}{W}$$

$$5) l_2 \leq \frac{S}{2} \text{ かつ } X_1 + \frac{S}{2} > l_1 \text{ のとき, } P[1.] = Y_0 \left(\frac{1}{W} - \frac{(l_1 - \frac{S}{2})^2}{2 X_1 A_F} \right)$$

$$6) l_2 \leq \frac{S}{2} \text{ かつ } X_1 + \frac{S}{2} \leq l_1 \text{ のとき,}$$

$$P[1.] = \frac{Y_0}{2 A_F} \left\{ X_1 + S + 2 l_2 \cdot \operatorname{sgn}(l - l_2) \right\} \quad \operatorname{sgn}: \text{符号関数}$$

$$7) X_1 + \frac{S}{2} \geq l_1 \text{ のとき, } P[1.] = Y_0 \left\{ \frac{1}{W} - \frac{(l_1 - \frac{S}{2})^2 + \operatorname{sgn}(l - l_1) \cdot (l_2 - \frac{S}{2})^2}{2 X_1 A_F} \right\}$$

$$8) \text{その他, } P[1.] = \frac{Y_0}{2 A_F} \left[X_1 + S + \operatorname{sgn}(l - l_1) \cdot \left\{ 2 l_2 - \frac{(l_2 - \frac{S}{2})^2}{X_1} \right\} \right]$$

(II) $R \geq r_0$ のケース

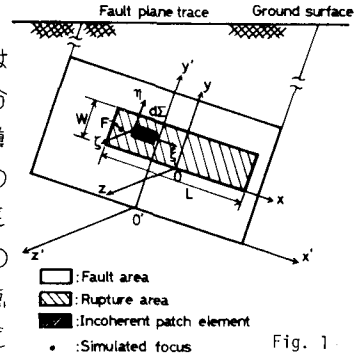


Fig. 1

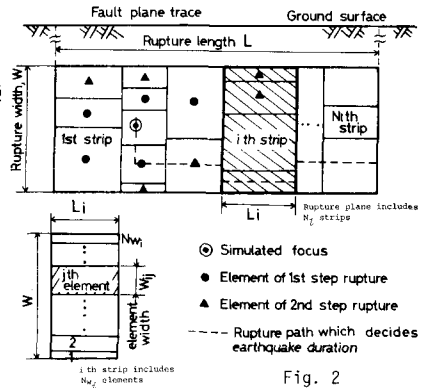


Fig. 2

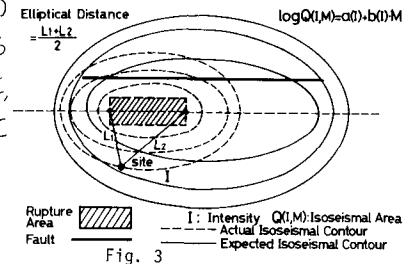


Fig. 3

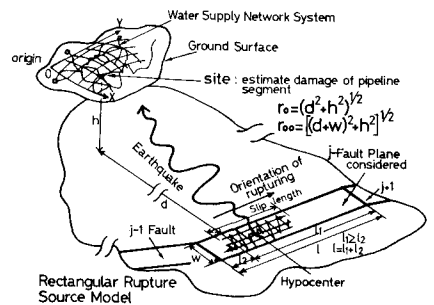
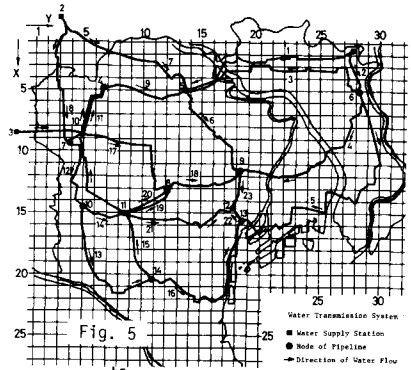


Fig. 4

- 1) $l_1 - X_2 \leq \frac{S}{2}$ のとき, $P[\cdot] = 1$
- 2) $X_1 + \frac{S}{2} \leq l_2$ のとき, $P[\cdot] = H(l_1 - l_2) \cdot \frac{X_1 + X_2 + S}{l}$
- 3) $X_2 + \frac{S}{2} < l_2$ かつ $X_1 + \frac{S}{2} \leq l_1$ のとき,

$$P[\cdot] = \frac{X_1 + X_2 + S}{2l} + \text{sgn}(l_1 - l_2) \cdot \left\{ \frac{(l_2 - X_2 - \frac{S}{2})^2}{X_1 - X_2} + \frac{l_2}{l} \right\}$$
- 4) $X_2 + \frac{S}{2} \leq l_2$ かつ $X_1 + \frac{S}{2} > l_1$ のとき

$$P[\cdot] = 1 - \frac{(l_1 - X_2 - \frac{S}{2})^2 + \text{sgn}(l_1 - l_2) \cdot (l_2 - X_2 - \frac{S}{2})^2}{2l(X_1 - X_2)}$$
- 5) $X_1 + \frac{S}{2} \leq l_1$ のとき, $P[\cdot] = \frac{X_1 + X_2 + S}{2l} + \text{sgn}(l_1 - l_2) \cdot \frac{l_2}{l}$
- 6) その他, $P[\cdot] = 1 - \frac{(l_2 - X_2 - \frac{S}{2})^2}{2l(X_1 - X_2)}$



ここで, Attenuation 式には,

$$Y = b_1 e^{\frac{b_2}{b_3 - M}} \left\{ H(M_0 - M) + H(M - M_0) \cdot \left(\frac{e^{a_1 M_0 - a_2}}{2} + C_1 \right) \cdot \left(\frac{e^{a_1 M - a_2}}{2} + C_1 \right) \right\} \cdot (\sqrt{R^2 + C_2^2} + C_1) \cdot b_4 e^{\frac{b_5}{b_6 - M}} \cdot E_Y \quad (4)$$

(M_0, b_1, C_1 : 定数, E_Y : 誤差項で対数正規分布に従う) を採用する。R は Fig. 3 のように当該地点と破断長に応じて決まる楕円距離であり, 震度 $I = \text{func.}(Y)$ に依存した楕円面積 $Q_{I,M}$ ($\log Q_{I,M} = a(I) + b(I)M$) を含む等震度線上にある。なお, 地震規模は $M_0 \leq M \leq M_u$ の範囲で分布するが, 式(2)における M の下限は次式を満たす M と M_e の最小値である。

$$b_4 e^{\frac{b_5}{b_6 - M}} \ln(\sqrt{R^2 + C_2^2} + C_1) - \frac{b_2}{b_3 - M} = \ln(b_1 E_Y / a_g) \quad (5)$$

3. ライフライン系の連結機能確率

ネットワークモデルが Fig. 5 で示される時, システムのトポロジーを正確に評価するために, リンク($i=1 \sim N$) は $\hat{L}$ 個の要素に分割する。そのとき $\hat{L}$ 番目の要素は断層内の破断運動によって 2. で示した式(2)のように破壊を生じるから, リンクの機能残存確率は,

$$P_S(L_i) = \prod_{\ell=1}^{\hat{L}} [1 - P_\ell(Y_\ell > a_{g\ell})] \quad (6)$$
 である。ところで非静定システムの信頼度の厳密な計算はかなり困難であるので, 本報告では Dr. Agha の SSSP 定式化⁵⁾ によることにする。まずシステムを等価な SSP モデルに変換し, k 番目の Tie-set ($k=1 \sim NT$) TS_k は $N_{L,k}$ 個のリンク $T_{NL,k}$ より構成されるとする。NT 個の Tie-set のうち任意の p Tie-set が疎通確率を有する確率は,

$$P_S[\text{any } p/NT] = \sum_{\lambda=1}^K K_{P\lambda} \sum_{j=1}^{NC_\lambda} T_{j\lambda} \quad (7)$$

ここで, $NC_\lambda = NT C_\lambda$, $K_{P\lambda} = K_{P(\lambda-1)(\lambda-1)} - K_{P(\lambda-1)}; 1 < P \leq \lambda$, $K_{P\lambda} = 0; P > \lambda$, $K_{1\lambda} = (-1)^{\lambda-1}$ 但し, $T_{j\lambda}$ は Tie-set の従属度によって次の 2 ケースの手続きで計算する。

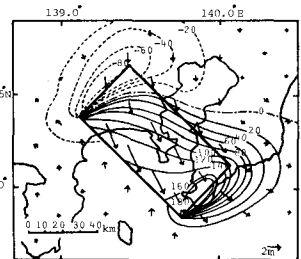
$$(i) \text{独立なとき, } T_{j\lambda} = \prod_{\forall k \in I_j} \prod_{\lambda=1}^{NL_k} P_S(L_{\lambda k}) \quad (8)$$

$$(ii) \text{従属するとき, } T_{j\lambda} = \prod_{\forall k \in I_j} P_S(L_k), \quad U_{j\lambda} = \bigcup_{\forall k \in I_j} TS_k \quad (9)$$

式(8), (9)の P_S は式(6)によって求める。 I_j は NC_λ のうち j 番目の組み合わせを定義する Tie-set: TS の番号である。この算定式にはある種の仮定も含まれるが, 上式によってシステムの連結機能を評価する。

4. 数値計算例

以上の方法を Fig. 5 に示した東京都の上水道管路網のモデルに適用した。断層モデルは関東地震の断層面を想定して, システムに対して面南部の位置に設定した。(Fig. 6) 2 重ルートを含む供給点 2 から需要点 12 までの連結パスは 11 個であり, この Tie-set のうち任意の p 個が同時に非連結となる確率は指数的に減少する。強度レベル a_g が上がれば, 2 個以上の Tie-set の破壊は無視できるほど小さい。ネットワークが完全な破壊を生じるとき, 各リンクの破壊によるシステムの地震時における Vulnerability は特にリンク 23・21 と 7 に集中した分布を示し, 供給点と需要点に連結したルートの耐震性が重要であることがわかった。ここで提起した方法は, 治断層に直面した地域にシステムを新設するときの形状配置と耐震性の評価に役立つと考えられる。



5. 参考文献 1) 山田, 野田, 袴田; 土木学会開会支部年議, 昭和 55 年 6 月 2) J.G. Anderson; USC Report NO. CE 78-11, August 1978.

3) C.A. Cornell との私信 4) A.D. Kiureghian & A.H.S. Ang; UIU-ENG-75-2023, SRS No. 419, October 1975.

5) G.T. Agha; BSSA, Vol. 67, No. 6, pp. 1625-1645, December 1977. 6) R.R. Willie; UCB, Operations Research Center, ORC 78-23, December 1978. 7) K.H. Law; M.S. Thesis, Carnegie Mellon University, November 1978.