

震度と震度継続時間の同時予測手法の提案

岐阜大学工学部 学生会員 ○伴 乙希
岐阜大学工学部 正会員 能島暢呂

1. 研究の背景と目的

海溝型巨大地震では地震動の継続時間が長時間化する。地震動継続時間は、構造物・地盤の被害や人間の避難行動に大きく影響を与えることが懸念され、その評価や予測は重要である。被害想定や地域防災計画の検討で多用される震度については、距離減衰式による簡便な推定法はほぼ確立されている。一方、継続時間については有効な評価方法がなかったため、観測震度または予測震度を与件とした継続時間予測モデル¹⁾が提案された。しかしそこでは震度情報を確定値として扱っており、そのばらつきを考慮するには至っていない。本研究では、予測震度のばらつきを考慮した継続時間予測モデルに拡張し、震度予測マップとあわせ震度継続時間マップを作成する体系を構築することを目的とする。

2. 震度継続時間の予測式のモデル化¹⁾

既往研究¹⁾では1996年～2013年に発生した35地震で観測されたK-NET強震記録（一部JMA強震記録を追加）の分析に基づいて、震度継続時間予測モデルが提案された。気象庁の計測震度の算出方法を修正してリアルタイムな計測震度時刻歴を求め、所定の震度閾値を超過した正味の時間を震度継続時間 D_{UAI} と定義している。8種類の計測震度レベル(0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0)の継続時間 D_{UAI} が計測され、重回帰分析により予測モデルが構築された。説明変数としては、震度差 ΔI (観測震度と対象とする計測震度レベルとの差分)、モーメントマグニチュード M_w に加えて、文献²⁾で使われているパラメータ(浅部地盤特性として地表面から地下30mまでの推定平均S波速度 AVS_{30} 、深部地盤特性として $Vs=1400m/s$ 層上面深度 $Z_{1.4}[m]$ 、地震タイプを表す二値ダミー変数 F_1 (内陸地殻内)、 F_2 (プレート境界)、 F_3 (プレート内))が採用されている($i_1, i_2, m, r, v, z, f_k, c$:モデル係数、 σ :残差標準偏差)。

$$\log_{10} D_{UAI} = i_1 \cdot \log_{10} \Delta I + i_2 \cdot (\log_{10} \Delta I)^2 + m \cdot M_w + r \cdot \log_{10} R + v \cdot \log_{10} AVS_{30} + z \cdot \log_{10} Z_{1.4} + \sum_k F_k \cdot f_k + c \pm \sigma$$

予測震度と震度継続時間の関係を図-1に示す。例えば $M_w=9, I^*=3.5$ 、予測震度5.5の場合には $D_{UAI}=60s$ と予測され、 $M_w=6, I^*=2.5$ 、予測震度4の場合には $D_{UAI}=20s$ と予測される。

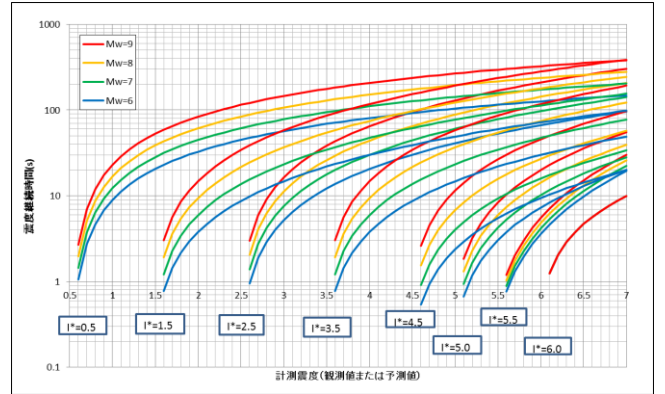


図1 震度情報を与件とする震度継続時間の条件付予測モデル ($R=20km, AVS_{30}=300m/s, Z_{1.4}=200m, F_2=1$)

3. 予測震度のばらつきを考慮した継続時間予測式

既往研究¹⁾では予測震度を確定値として扱っているが、実際には予測震度自体がばらつきを持ち、震度継続時間の予測に影響を与える。予測震度のばらつきが震度継続時間に与える影響をモーメント近似により評価する。予測値を $Y = g(X)$ で表した場合、 X の平均値 μ_X 周りでテーラー展開して高次の項を無視して平均値と分散の近似解を求める。実用的には次式に示すように、最も重要な平均値は二次近似、分散一次近似の式を用いればよいとされる³⁾。

$$E(Y) \cong g(\mu_X) + \frac{1}{2} Var(X) \frac{d^2 g}{dX^2}$$
$$Var(Y) \cong Var(X - \mu_X) \left(\frac{dg}{dX} \right)^2 = Var(X) \left(\frac{dg}{dX} \right)^2$$

継続時間 D_{UAI} の常用対数関数 $\log D_{UAI}$ について上式を適用し、震度閾値 $I^*=2.5$ の場合の継続時間をグラフ化した結果を図-2に示す。黒の実線は予測モデル、黒の破線は予測モデルが本来持つばらつきの標準偏差 σ_D による推定幅、赤の実線は震度のばらつきを考慮した平均値、赤の破線は震度のばらつきと予測モデルが持つばらつきによる推定幅を示し、上で求めた $Var(Y)$ と σ_D を用いて $\pm \sqrt{Var(Y) + \sigma_D^2}$ とする。

4. 予測震度の平均が閾値以下になる場合の考慮

3)に示した方法は、予測震度が震度閾値を大幅に上回り、超過確率が1に近い場合にのみ適用できる。予測震度のばらつきを考慮すると、震度閾値以上の領域のみに限定して震度継続時間を評価する必要がある。そのため本研究では「切断正規分布」を導入する。これは確率変数 X の定義域が下限値 a 、上限値 b で切断された正規分布で、次式で表される。⁴⁾

$$f(x; \mu, \sigma, a, b) = \frac{\frac{1}{\sigma} \phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)}{\Phi\left(\frac{b-\mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a-\mu}{\sigma}\right)}$$

ただし、 μ ：平均、 σ ：標準偏差である。確率密度関数 $f(X)$ と累積分布関数 $F(X)$ の例を図 3 に示す。

本研究では下限を震度閾値 $a = I^*$ 、上限を $b = \infty$ とし、閾値超過確率を $P^* = P(I > I^*)$ として、まず閾値超過を条件とする継続時間を求める。3. で述べたモーメント近似を適用するにあたっては、平均値 μ_X と分散 $\text{Var}[X] = \sigma_X^2$ に代えて、切断正規分布の平均値 μ'_X と分散 $\sigma_X'^2$ を利用して評価する。さらに、確率 $P^* = P(I > I^*)$ で生じる評価値と、確率 $1 - P^* = P(I < I^*)$ で生じる評価値を加重平均することにより、震度継続時間とその標準偏差を求めるものとする。

$M_w=6.0$ 、閾値 $I^*=2.5$ の場合についての適用例を図 4 に示す（横軸は予測震度の平均値）。青の実線は切断正規分布により求められた継続時間の平均値であり、破線はその推定幅である。予測震度 2.5 以下の場合でも 2.5 以上となる揺れを観測する可能性があり、その条件下での評価値となっている。

赤の実線は、震度 2.5 以上となる確率 $P^* = P(I > 2.5)$ を考慮して求めた継続時間の平均値であり、破線はその推定幅である。予測震度が震度閾値 2.5 よりかなり大きい場合の確率は 1 に近くなり、元の条件付き予測モデルに漸近している。なお、超過確率が小さくなるほど震度継続時間は 0 に漸近するが、ここでは継続時間 0.1 秒を実質的な 0 とみなしている。

最後に図 5 は、震度継続時間の予測モデルである。予測震度の平均値を横軸として表示しているが、図 1 とは異なり、予測震度のばらつきと震度閾値の超過確率が考慮されている。

参考文献

- 1) 能島暢呂：観測震度または予測震度を与件とする震度継続時間の条件付き予測式，日本地震工学会論文集，第 14 巻，第 5 号，pp.50-67，2014.11.
- 2) Morikawa, N. and Fujiwara, H.: A New Ground Motion Prediction Equation for Japan Applicable up to M9 Mega-Earthquake, *Journal of Disaster Research*, Vol.8, No.5, pp.878-888, 2013.
- 3) 伊藤學・亀田弘行監訳，能島暢呂・阿部雅人共訳：土木・建築のための確率・統計の基礎，pp.228-229，丸善。
- 4) 蓑谷千風彦：統計分布ハンドブック，朝倉書店，2003，725p.

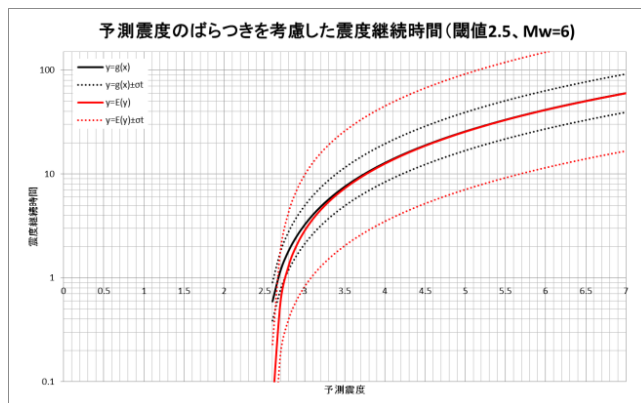


図 2 予測震度のばらつきを考慮した震度継続時間 ($M_w=6.0$ ，閾値 $I^*=2.5$)

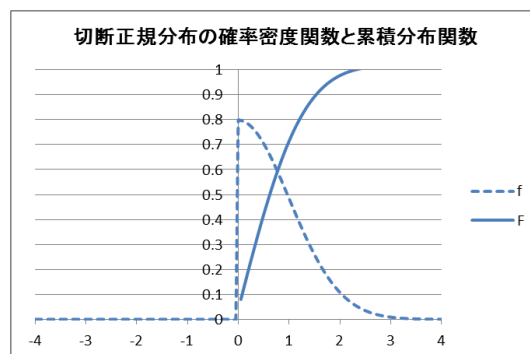


図 3 切断正規分布の例 ($\mu = 1, \sigma = 0, a = 0, b = 10$)

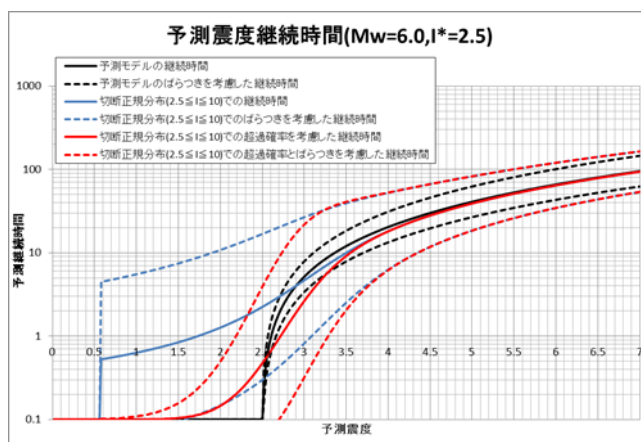


図 4 震度閾値超過確率を考慮した震度継続時間 ($M_w=6.0$ ，閾値 $I^*=2.5$)

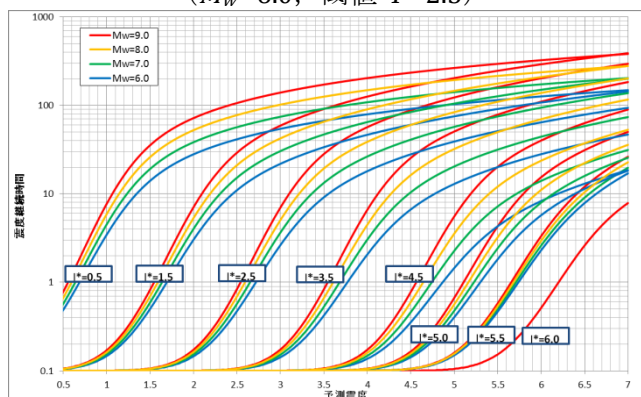


図 5 震度情報を与件としない震度継続時間の予測モデル