

地震動強さのばらつきが確率論的地震動評価に与える影響

内山 泰生*¹・坂本 成弘*²

Keywords : seismic hazard, variance of attenuation relationship, peak velocity

地震危険度, 距離減衰式のばらつき, 最大速度値

1. はじめに

将来発生するであろう大地震時に対象地点でどの程度の地震動強さになるのか、あらかじめ把握しておくことは構造物の耐震安全性や地域防災計画を検討するため重要な課題である。

地震動強さの評価方法は、決定論的な方法と確率論的な方法に大別される。決定論的な方法とは、東京における関東地震、名古屋における東海・東南海地震のように特定の震源断層を想定して地震動強さを評価することである。一方、確率論的な方法とは、活断層や過去に発生した地震等の対象地点に影響をおよぼす全ての地震について考慮し、地震動強さを確率的に評価する方法である。したがって、特定の震源断層を想定して決定論的に評価した地震動強さは予測される1つのシナリオにすぎないことから、対象地点周辺における地震活動が反映された確率論的な方法と組み合わせて地震動強さを総合的に評価していく必要があると考えられる。

確率論的な評価は、河角¹⁾や Cornell²⁾の研究以来、多くの研究が行われている。近年では、文部科学省・地震調査研究推進本部による確率論的地震動予測地図³⁾、米国の耐震設計で用いられている確率論的な評価結果に基づく設計用地震動⁴⁾などで活用されているが、用いるパラメータの不確定性など、問題点も指摘されている。

確率論的な地震動強さの評価では、対象地点に影響をおよぼす地震の発生可能性(頻度)や地震動強さなど不確定な要因を確率的にモデル化している。したがって、これらの不確定なパラメータのばらつきを小さくすることによって、評価精度が向上することになる。そこで、本研究では、地震動強さのばらつきに関する、最新の研究成果を確率論的地震動評価に導入し、評価結果に与える影響について検討を行う。

2. 確率論的地震動評価

確率論的地震動評価は、対象地点における地震動強さとそれをある期間内に上回る確率を評価する手法である。このため、特定の期間内で地震が発生する可能性とそれによる地震動強さを確率的にモデル化することになる。以下に、それぞれのモデル化方法の概要を整理する。

2.1 地震活動のモデル化

対象地点周辺における地震活動は、震源を予め特定できる陸域の活断層帯による地震と関東地震や東海地震のようなプレート境界で発生する大地震、震源を予め特定できないこれ以外の地震(ランダム地震)の3グループに分け、それぞれについて地震の規模(マグニチュード)や発生可能性を確率モデルで評価する。

2.1.1 震源を予め特定できる地震

対象とする震源が固有の地震規模と活動間隔で活動するものとする。地震の発生は、最新の活動からの経過年と活動間隔の変動係数を用いて、BPT分布⁵⁾に従うものとする。この場合、今後 T 年間で地震が発生する可能性 P_n は(1)から(3)式で評価される。

$$P_n(T_p, T) = 1 - \phi(T_p + T) / \phi(T_p) \quad (1)$$

$$\phi(t) = 1 - \left\{ \Phi(u_1(t)) + e^{2/\alpha^2} \Phi(-u_2(t)) \right\} \quad (2)$$

$$u_1(t) = \alpha^{-1} (t^{1/2} T_e^{-1/2} - t^{-1/2} T_e^{1/2}) \quad (3a)$$

$$u_2(t) = \alpha^{-1} (t^{1/2} T_e^{-1/2} + t^{-1/2} T_e^{1/2}) \quad (3b)$$

ここで、 T_p は最新活動からの経過年、 $\phi(t)$ は信頼度関数で平均活動間隔 T_e と活動間隔のばらつきの変動係数 α 、標準正規分布の累積確率分布関数 Φ で評価される。

2.1.2 震源を予め特定できない地震

日本全国を地震活動が均質であると見なされる地震活

* 1 技術センター建築技術研究所防災研究室

* 2 (株)篠塚研究所

動域に分割し、各活動域内における地震発生が空間的、時間的に一様に Gutenberg-Richter 式 (G-R 式) に従うものとする。即ち、マグニチュード M 以上の地震の発生頻度 (個数) $N(M)$ は(4)式となる。

$$\log N(M) = a - bM \quad (4)$$

ここで、 a および b は各活動域ごとに決まる定数であり既往の地震活動 (歴史地震) 等によって設定される。

地震規模 (マグニチュード) について(4)式を離散化すると、マグニチュード M の地震の発生確率 P_m が得られる ((5)式)。

$$P_m(M) = \nu \frac{10^{-b(M-0.5\Delta M)} - 10^{-b(M+0.5\Delta M)}}{10^{-bM_L} - 10^{-bM_U}} \quad (5)$$

ここで、 ΔM は地震規模の刻み幅、 M_L は最小マグニチュード、 M_U は限界マグニチュードであり、 ν は M_L 以上の地震の発生頻度である。 ΔM には 0.05、 M_L には 5 程度が用いられ、 M_U は地帯構造や既往の地震活動等を考慮して活動域別に設定される。

2.2 地震動強さのモデル化

ある震源から発生した地震によって、対象地点で観測される地震動強さ A は、断層と対象地点との距離 X と発生した地震の規模 M 等によって距離減衰式を用いて評価する。しかし、実際に観測される地震動強さはばらつきを持っている。そこで、対象地点での地震動強さは、距離減衰式による地震動強さを中央値とする対数正規分布に従うものとする。即ち、地震動強さ a の超過確率 $P_A(a)$ は(6)式となる。

$$P_A(a | A_{mid}) = \int_a^{\infty} \frac{1}{\sigma_{ln} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln a' - \ln A_{mid}}{\sigma_{ln}}\right)^2\right] da' \quad (6)$$

ここで、 A_{mid} は距離減衰式により評価される地震動強さの中央値、 σ_{ln} は距離減衰式のばらつきである。

2.3 地震ハザードの評価

地震活動および地震動強さをモデル化した(1)、(5)、(6)式から、対象地点における地震ハザード $H(a)$ を評価することができる。

発生過程が BPT 分布に従う震源を予め特定できる地震の場合には(7)式、ポアソン過程に従う震源を予め特

定できない地震の場合には(8)式で地震ハザードが表される。(7)式の Π は、考慮する各地震 i についての積であり、(8)式の Σ は、考慮する地震活動域を分割した各位置での各マグニチュードの地震 i についての和である。対象地点に影響を与える全ての地震について(7)および(8)式を用いて地震ハザードを評価し、(9)式から最終的な地震ハザードを評価する。

$$H_n(a) = 1 - \Pi_i \{1 - P_{n,i} \cdot P_{A,i}\} \quad (7)$$

$$H_m(a) = 1 - \exp\left\{-\sum_i (P_{m,i} \cdot P_{A,i})\right\} \quad (8)$$

$$H(a) = 1 - \{1 - H_n(a)\} \{1 - H_m(a)\} \quad (9)$$

3. 地震動強さとばらつきの評価

地震動強さの評価には、2.2 で示したように、地震記録の回帰分析から得られている距離減衰式を用いる。一般に回帰分析から評価された距離減衰式のばらつきは常用対数で 0.3~0.5 程度の値になる場合が多く、大きなばらつきを有している。このため、再現期間 500 年、1000 年といった大きな地震動強さの超過確率を大きくしてしまう問題点がある。

近年の地震観測網の整備により、震源近傍を含む多数の地震記録が蓄積されてきている。これらの地震記録を用いて、距離減衰式⁶⁾や距離減衰式のばらつき⁷⁾に関する検討が行われている。そこで、これら最新の知見を確率論的地震動評価に適用し、地震動強さの不確定性が評価結果に与える影響について検討を行う。

文献 6)による最大速度値の距離減衰式は、(10)~(12)式、表-1 に示す各係数を用いて評価される。

$$\begin{aligned} \log V &= b - \log(X+C) - kX \quad (D \leq 30\text{km}) \\ &= b + 0.6 \log(1.7D+C) - 1.6 \log(X+C) - kX \quad (D > 30\text{km}) \end{aligned} \quad (10)$$

$$C = 0.0028 \cdot 10^{0.5M_w} \quad (11)$$

$$b = aM_w + hD + d + e \quad (12)$$

ここで、 V は工学的基盤における最大速度値(cm/s)、 M_w はモーメントマグニチュード (地震規模)、 X は震源からの距離(km)あるいは断層面からの最短距離(km)、 D は震源深さ(km)をそれぞれ示す。

地震動強さのばらつきは文献 6)では常用対数で 0.28 とされていたが、文献 7)での詳細な検討により、震源に近いほどまた地震動強さが大きいほど小さな値になるこ

とが指摘されている。この特性を震源距離および最大速度振幅値を用いて表すと(13)~(19)式ようになる。

$$\sigma_{vX} = (\sigma_{INTER-S}^2 + \sigma_{INTRA-S}^2 + \sigma_{INTRA-P}^2 + \sigma_{INTRA-G}^2)^{0.5} \quad (13)$$

$$\sigma_{INTER-S} = 0.1 \quad (14)$$

$$\sigma_{INTRA-S} = 0.05 \quad (15)$$

$$\sigma_{INTRA-P} = \begin{cases} (\alpha X)^2 + (0.001X)^2 & X \leq 40km \\ \{(44\alpha - 0.1\alpha X)^2 + (0.001X)^2\}^{0.5} & X > 40km \end{cases} \quad (16)$$

$$\sigma_{INTRA-G} = 0.14 \quad (17)$$

$$\alpha = 0.004 \quad (18)$$

$$\sigma_{vA} = \max(0.15, 0.3 - 0.005V) \quad (19)$$

ここで、(13)~(18)式の σ_{vX} は震源距離に依存したばらつきの評価式であり文献7)で提案されている。また、(19)式の σ_{vA} は最大速度振幅に依存したばらつきの評価式であり文献7)の結果を基に設定した値である。なお、(13)~(17)式の添え字は INTRA が一つの地震内でのばらつき、INTER が異なる地震間でのばらつきであり、震源(S)、伝播経路(P)地盤特性(G)に起因するばらつきであることを示す。これらの評価式によるばらつきは、図-1 に示すようになり、震源の近傍ではこれまでに示されていたばらつきの半分程度の値になる。

表-1 距離減衰式に用いる係数

Coefficients of Attenuation Equation

<i>a</i>	<i>k</i>	<i>h</i>	<i>e</i>
0.65	0.002	0.0024	-1.77

<i>d</i>		
地殻内	プレート境界	プレート内
0.00	0.05	0.15

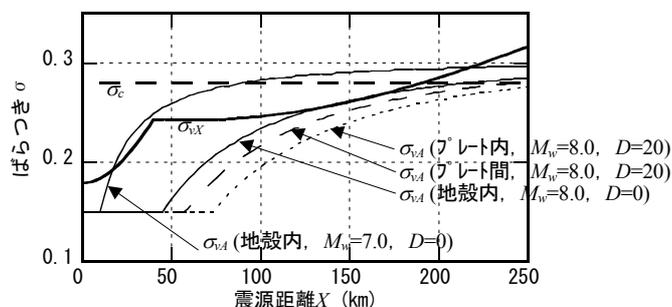


図-1 距離減衰式のばらつき
Variance of Attenuation Equation

4. 地震ハザードの評価結果

地震動強さのばらつきを文献6)に示される一定値($\sigma_c=0.28$)とした場合と(13)および(19)式に示すばらつき(σ_{vX} , σ_{vA})とした場合について、47都道府県庁位置を対象とした確率論的地震動評価を行い、ばらつきが評価結果に与える影響について検討を行う。なお、確率論的地震動評価は、図-2に示す震源を予め特定できる地震、図-3に示す地震活動域(ランダム地震)を用いて、神田他⁸⁾による方法を用いる。



図-2 活断層、プレート境界地震の位置
Active Faults and Oceanic Plate Boundaries for Seismic Sources

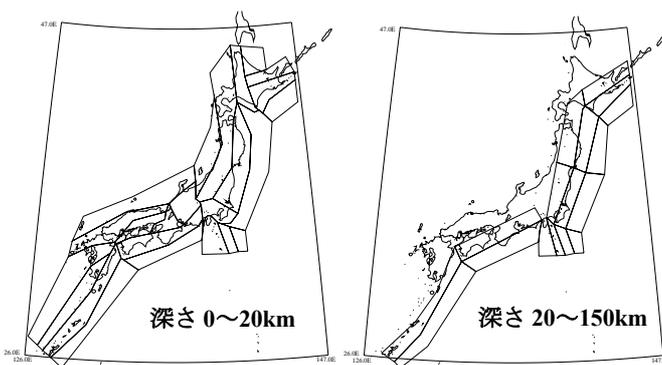


図-3 地震活動域
Seismic Activity Zones

4.1 地震ハザード

高知県、大阪府、鳥取県、石川県における地震ハザード(50年超過確率)を図-4に示す。また、表-2には、50年超過確率が0.395、0.049(再現期間100年、1000年に対応)の場合における最大速度値の一覧を示す。

高知県や大阪府のように、南海地震等の固有地震の影響が大きい地点では、距離減衰式のばらつきを σ_c とし

た場合よりも σ_{vX} 、 σ_{vA} とした場合の方が低超過確率時に小さな最大速度値となる。例えば、再現期間 1000 年では、 σ_c の場合に比べ σ_{vA} は 0.6 倍程度となる。これは、両地点とも南海地震の震源に近いため、図-1 に示すように σ_{vA} が σ_c の 0.5 倍程度の値をとるためである。一方、鳥取県や石川県のように固有地震の影響が小さい地点では、地震動強さのばらつきを σ_c 、 σ_{vX} 、 σ_{vA} とした場合で大きな違いは見られない。これは、南海地震の震源から離れているため、図-1 に示すように σ_{vA} 、 σ_{vX} が σ_c に近い値をとるためである。

図-5 には、ばらつきを σ_{vA} とした場合の 47 都道府県庁位置における 50 年超過確率 0.049 (再現期間 1000 年)における最大速度値を示す。ここで、図-5 の横軸は、ばらつきを σ_c とした場合の最大速度値と距離減衰式での中央値の比、縦軸はばらつきを σ_{vA} と σ_c とした場合の最大速度値比を示す。また、図中には σ_{vA} の下限值である 0.15 とした場合の比率を実線で示している。PGV 比が 0.8 程度以下で実線に近い値を示す観測点は、高知県や静岡県のように固有地震の影響が大きい地点、0.8 程度以下で実線からやや離れているのは、岐阜県や愛知県のように複数の固有地震による影響が大きい地点である。

以上から、距離減衰式のばらつきは、固有地震の影響が大きい地点、すなわち発生可能性が高い地震の震源に近い地点における低超過確率の地震動を評価する場合に重要なパラメータであると考えられる。

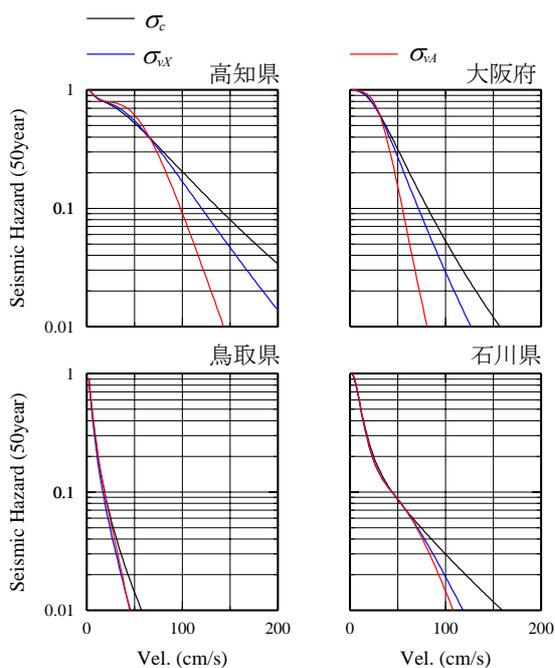


図-4 地震ハザード (50年超過確率)
Seismic Hazard Curve (50 years)

表-2 各都市における最大速度値
Peak Velocity for Each Site

	σ_c		σ_{vX}		σ_{vA}	
	0.395	0.049	0.395	0.049	0.395	0.049
50年超過確率	0.395	0.049	0.395	0.049	0.395	0.049
再現期間(年)	100	1000	100	1000	100	1000
高知県	66	178	66	148	66	113
大阪府	44	102	42	88	38	63
鳥取県	7	28	6	25	7	27
石川県	14	75	14	71	14	70

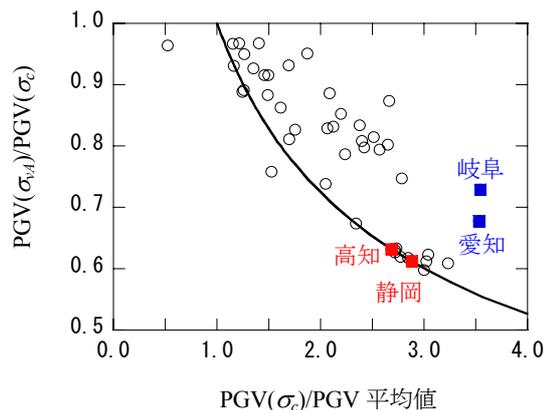


図-5 最大速度値の比率
Ratio of Peak Velocity

4.2 地震動強さの全国マップ

距離減衰式のばらつきを σ_c 、 σ_{vA} とした場合の、50 年超過確率 0.395、0.049 (それぞれ、再現期間 100 年、1000 年に対応) の最大速度値の全国マップを図-6 に示す。再現期間 100 年の場合には、東海地震、東南海地震、南海地震のプレート境界地震の影響が大きい。しかし、 σ_c 、 σ_{vA} とした場合の違いはあまり見られない。再現期間 1000 年の場合には、東海地震、東南海地震、南海地震のプレート境界地震に加えて糸魚川・静岡構造線のような内陸部の活断層による影響が大きくなっていく。また、これらの地震の影響が大きい地点では σ_{vA} とした場合が、 σ_c とした場合に比べて小さな地震動強さになることが分かる。

5. まとめ

確率的地震動評価の際に問題となるパラメータの不確定性のうち、地震動強さの不確定性 (距離減衰式のばらつき) が評価結果に与える影響について検討を行った。その結果、従来用いられていたばらつき一定の評価結果に比べ、ばらつきの特性を反映させた評価結果は小さな地震動強さになることを示した。特に、この傾向は、南海地震等の固有地震の影響が大きい地点 (震源から近

い)における低超過確率時の地震動強さで顕著になることを示した。

謝辞

本研究を行うにあたり、東京工業大学翠川三郎教授、東京大学地震研究所島崎邦彦教授より貴重なご助言を頂きました。記して謝意を表します。

参考文献

1)Kawasumi,H.: Measures of Earthquake Danger and Expectancy of Maximum Intensity Throughout Japan as Inferred from the Seismic Activity, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol.29, pp.469-482, 1951.
 2)Cornell,C.A.: Engineering Seismic Risk Analysis, Bull.

Seism.Soc. Am., Vol.58, No.5, pp.1583-1606, 1968.
 3) 文部科学省・地震調査研究推進本部ホームページ：
<http://www.jishin.go.jp/main/index.html>
 4) B.S.S.C : NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, FEMA302, 1997.
 5) 島崎邦彦：大地震発生の長期的評価，地学雑誌，110，pp.816-827，2001.
 6) 翠川三郎，大竹雄：震源深さによる距離減衰特性の違いを考慮した地震動最大加速度・最大速度の距離減衰式，第11回日本地震工学シンポジウム論文集（CD-ROM），2002.
 7) 翠川三郎，大竹雄：地震動強さの距離減衰式にみられるパラメータに関する基礎的分析，日本地震工学会論文集，第3巻，第1号，pp.59-70，2003
 8) 構造安全研究会：既存建物の標準的構造性能評価法の開発，平成13年度国土交通省建設技術開発費補助金研究成果報告書，2002.

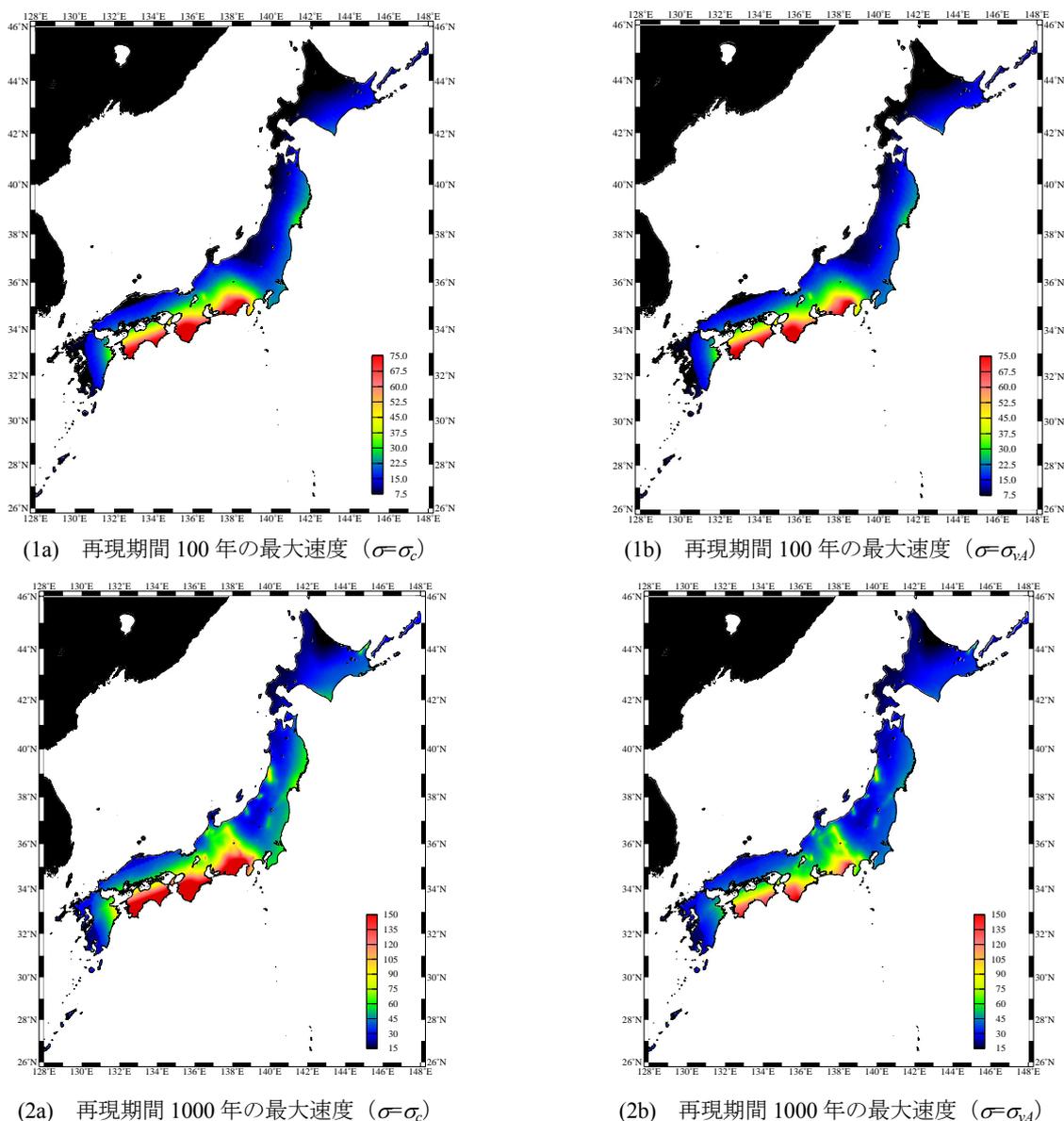


図-6 地震動強さの全国マップ
 Seismic Hazard Map