

【ノート】

地震危険度の解析における歴史地震資料の評価について

A NOTE ON UNCERTAINTY EVALUATION OF HISTORICAL
EARTHQUAKE DATA FOR SEISMIC RISK ANALYSIS

亀田 弘 行*

By Hiroyuki KAMEDA

1. 結 言

耐震設計のための地震荷重の評価を合理的に行うためには、地震危険度 (seismic risk) の解析を十分に実施することが重要である。この場合、過去の破壊的地震に関する資料が基本的なデータであるが、ある限られた地域を襲う破壊的地震の再現期間は世界有数の地震国であるわが国でも十～百数十年のオーダーであるから、近代的な観測態勢が整う前の時代の地震史料もできる限り活用するのが望ましい。このような、いわゆる歴史地震¹⁾も含めて、わが国では過去 1300 年を超える時代について、600 個に及ぶ被害地震資料が、先人の努力によって集積され (たとえば文献 10)), 地震危険度の解析に活用されてきた。

わが国で初めて地震危険度の分布図を作成した河角²⁾の研究結果は「河角マップ」として著名であるが、ここでは過去の地震資料は完全であるとして議論が進められている。すなわち、ある地点について、 t 年間に n 回の地震が記録されている場合には、その再現期間を t/n と考えるのである。しかし、古い時代に起った破壊的地震のいくつかは、こうした資料に収録もれとなっているかも知れないことは容易にうかがえる。江戸が政治の中心として整備された 17 世紀から、急に東京での被害地震が増加し、逆により古い歴史を持つ京都については、それ以前にも多くの被害地震が記録されている³⁾ ことなどはその傍証となるであろう。このように、歴史地震資料の正確さは、時代により、また場所によって異なる社会条件に影響されている可能性が強い。

地震危険度の解析においてこのような問題に対処する場合、二つの方法が考えられる。一つは信頼度が低いと考えられる古い時代の地震資料を捨て、最近の時代の資

料のみを用いて解析を行うことで、このような考えでいくつかの研究が行われている (たとえば文献 4), 7))。その場合、最近の 90~100 年間の地震資料が用いられるのが普通である。しかしながら、近い将来に統計解析に十分な数の地震資料が得られるとは考えられないことを考慮すると、古い時代の地震資料を完全に無視することは得策とはいえない。古い時代の資料には記録もれがあるかも知れないが、少なくとも記録された地震は実際に起ったと考えるべきであり、この情報をなんらかの形で地震危険度の解析に生かすのが望ましい。したがって、この問題を扱う第二の方法としては、最近の時代の信頼できる資料と、古い時代の信頼度が低い資料を異なるウェイトで評価することにより、すべての資料を合理的に解析に取入れることが考えられる。このような観点から、後藤・亀田³⁾は最近 200 年間の地震資料をそれ以前の資料より加重評価して解析を行い、地震危険度の分布図を求めた。さらに、片山⁵⁾は古い時代でも強い地震ほど記録がよく残されている可能性が高いことを統計的に示し、このような加重評価は地震の強度別に分けて考えるべきことを指摘している。

以上のように、歴史地震を含むわが国の地震資料を地震危険度評価のために有効に活用するには、資料の信頼度とその扱いについて、なおきめ細かな検討を必要とする。本文はそのための一方法として、歴史地震資料に含まれる不確定性を考慮しつつ地震危険度を解析するための考え方を提案しようとするものである。ここでは地震の年間発生率 λ に的を絞って議論を進めることとするが、バイズの方法に従ってこの年間発生率を確率変数とみなし、地震資料の不確定性をも加味した確率分布を求める。そして地震資料の扱いについての意思決定としては、平均発生率の分布の幅が小さい (たとえば変動係数が小さい) 場合を採用すべきことを論ずる。計算例として、東京および京都に関する結果を示す。

* 正会員 工博 京大工学部助教授 工学部交通土木工学教室

2. 歴史地震資料の不確定性を考慮した年間地震発生率

以下の解析では、ある地点を襲う破壊的地震の時系列をポアソン過程と仮定する。この時系列を支配するパラメーターは年間（平均）発生率 ν のみであるが、 ν の値は限られた数の地震資料から推定されるので、その推定値は推定誤差に基づく不確定性を含んでいる。そこで、ここでは、地震資料数が有限であること、および古い時代の地震資料の信頼度が低いという、2種の不確定要因を考慮して議論を進める。

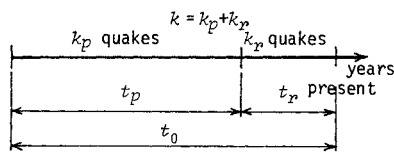


Fig. 1

まず、ある地点について、過去 t_0 年間に k 回破壊的地震が来襲したという記録があるとする。これら k 回の地震のうち、最近の t_r 年間での k_r 回の地震は信頼できる資料であり、それ以前の t_p 年間で k_p 回という記録には問題があるとする。すなわち、 t_p 年間に起った地震が資料から抜けている可能性があるとする。このような状況を、模式的に Fig. 1 に示した。以上より、 t_0 年間全体で実際に起った地震の数は、次式のように表現できよう。

$$K = Ak_p + k_r \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 A は記録から抜けているかも知れない地震を補うための、 k_p に対する未知の補正係数である。当然、 A は確率変数として扱うから、 K もまた確率変数である。

破壊的地震の資料のように標本数が十分でない場合にはベイズの方法¹⁾が有効である。すなわち、年間発生率 ν の真の値は未知であるから、これを確率変数 N として扱う。 ν の値に関しては事前情報がなく、 N の事前分布として一様分布を用いる場合を考えると、 t 年間に q 回の地震があったという統計資料を得た場合の N の事後分布は、次のようなガンマ分布になる²⁾。

$$f_N(\nu|K=q; t) = \frac{\nu^q t^{q+1} e^{-\nu t}}{\Gamma(q+1)} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $\Gamma(x)$ はガンマ関数である。この場合の N の平均値 μ_N 、標準偏差 σ_N 、および変動係数 δ_N は次式で与えられる¹⁾。

$$\mu_N = \frac{q+1}{t}, \sigma_N = \frac{\sqrt{q+1}}{t}, \delta_N = \frac{1}{\sqrt{q+1}} \dots\dots\dots (3)$$

ところが、 K は式 (1) で表される確率変数であるから、式 (2) にさらに歴史地震資料の不確定性を加味した N の分布は次式のように表される。

$$f_{N''}(\nu) = \int_{a_l}^{a_u} f_N(\nu|K=ak_p+k_r; t_0) f_A(a) da \\ = \int_{a_l}^{a_u} \frac{\nu^{(ak_p+k_r)t_0} t_0^{(ak_p+k_r+1)} e^{-\nu t_0}}{\Gamma(ak_p+k_r+1)} f_A(a) da \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $f_A(a)$ は A の確率密度、 a_u および a_l は、補正係数 A の上・下限である。式 (4) により $f_{N''}(\nu)$ が求まると、将来の t 年間に地震に見舞われない確率は、

$$P(\text{no earthquakes in } t \text{ years}) = \int_0^\infty e^{-\nu t} f_{N''}(\nu) d\nu \dots\dots\dots (5)$$

以上より、 $f_A(a)$ の設定法が残された問題となる。統計データの不備に対する補正項として A を考えているのであるから、 $f_A(a)$ の設定は経験による直観や判断力によるほかはなく、この意味で困難な問題であるが、ここでは、一つの考え方として次のような方法を採用する。まず、統計資料 k_p は、 t_p 年間に起った地震回数下限値を与えると考えると、 $a_l=1$ とする。次に、 A の上限値 a_u は、式 (3) の μ_N で与えられる年間発生率の期待値が、最近の t_r 年間と以前の t_p 年間で等しくなるように定める。これらの考えを適用すると、 a_l, a_u が次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} a_l &= 1 \\ a_u &= a_l + 2(a_m - a_l) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ただし、

$$a_m = \frac{(k_r+1)t_p - t_r}{k_p t_r} \dots\dots\dots (7)$$

また、 $k_p=0$ の場合には、 a_l, a_m を次のようにおけばよい。

$$a_l = 0 \dots\dots\dots (6)'$$

$$a_m = \frac{(k_r+1)t_p - t_r}{t_r} \dots\dots\dots (7)'$$

$f_A(a)$ の分布形も当然未知であるが、ここでは、 A のばらつきが大きい場合として一様分布、比較的ばらつきが小さい場合として a_m を最頻値とする三角形分布の2つの場合を比較する。

3. 東京、京都に関する計算結果

以上の方法を、東京および京都に関する地震資料に適用して、その有用性を検討する。地震資料としては、震度 V 以上の地震に関する宇佐美・久本^{3),9)}のデータを、期間を1976年まで延長して用いる。資料の信頼度が高いとする最近の t_r 年間としては、次のような3つの場

Table 1 Classification of Historical Ages for Uncertainty Analysis of Earthquake Data

Site (t_0)	Case	t_p , years	t_r , years
Tokyo (1 159 years)	A	1067 (818~1884)	92*(1885~1976)
	B	959 (818~1776)	200 (1777~1976)
	C**	774 (818~1591)	385 (1592~1976)
Kyoto (1 378 years)	A	1286 (599~1884)	92*(1885~1976)
	B	1178 (599~1776)	200 (1777~1976)
	C***	201 (599~ 799)	1177 (800~1976)

* Earthquake catalogue for this period is most complete (4).
 ** The city of Tokyo was developed in late 16th century.
 *** The city of Kyoto was developed in late 8th century.

合を考える。Case A: $t_r=92$ 年 (1885~1976)。これは、服部⁹⁾により、信頼度が高いとされた期間である。Case B: $t_r=200$ 年 (1777~1976)、明確な区分ではないが、江戸中期以降で、比較的記録の保存がよからうと考えられる期間。Case C: 東京については $t_r=385$ 年 (1592~1976)、京都については $t_r=1177$ 年 (800~1976)。これらは、それぞれ江戸および平安京が整備された時期以降を含むもので、東京について 1592 年以降としたのは、宇佐美・久本⁹⁾の考察に従ったものである。これらの各 Case を **Table 1** に一括して示した。

Table 1 の年代区分に従って整理した地震資料を **Table 2** の (1), (3), (5) 欄に示した。ただし、 N_0 , N_p , N_r は、それぞれ t_0 年, t_p 年, t_r 年間の期間における N を表わす。 t_p 期間の地震資料は不完全と考えているから、その不確定性を考慮していない δ_{N_0} , δ_{N_p}

にはあまり意味はない。

歴史地震資料を考慮した N の確率密度 $f''_N(\nu)$ を式 (4) から算出し、その平均値 μ''_N と変動係数 δ''_N を **Table 2** の (7) 欄に示した。得られた $f''_N(\nu)$ の形状は A の分布 $f_A(a)$ に依存するが、これを簡単のため式 (2) と同様のガンマ分布と仮定すると、次式が得られる。

$$f''_N(\nu) \cong \frac{\nu^{k''} \Gamma''(k''+1) e^{-\nu \Gamma''}}{\Gamma''(k''+1)} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、

$$k'' = \frac{1}{\delta''^2_N} - 1, \Gamma'' = \frac{1}{\mu''_N \delta''^2_N} \dots\dots\dots (9)$$

パラメーター k'' および Γ'' は、修正されたモデルにおける等価な地震数および等価な記録期間ともよべるが、これは当然ながら、過去 Γ'' 年間に k'' 回の地震が実際に起ったことを意味するものではなく、 t_0 年間に k 回という地震資料を含む不確定性は、 Γ'' 年間に k'' 回という仮想的データの不確定性と同等であると解すべきである。式 (9) から算出した k'' , Γ'' の値を **Table 2** の (8) 欄に示した。また、**Table 2** において、 $\delta_{N''}$ はほとんどの場合について δ_{N_0} より大きい値を示しているが、両者の差は、式 (1) の A により考慮した、 t_p 期間の資料の不確定性の影響を表わす。

以上の結果を用いて本解析法の意義を検討するため、**Table 2** の δ_{N_r} と δ''_N を比較する。これは、地震発生モデルを組立てる際に、(i) 最近の t_r 年間の資料のみ

Table 2 Uncertainty Analysis of Annual Occurrence Rate of Destructive Earthquakes

Site t_0 , years (1)	JMA int.	k , μ_{N_0} , δ_{N_0} (2)	Case	k_p	t_p years (3)	$\frac{\mu_{N_p}}{10^{-2}}$ year ⁻¹ (4)	δ_{N_p}	k_r	t_r years (5)	$\frac{\mu_{N_r}}{10^{-2}}$ year ⁻¹ (6)	δ_{N_r}	$f_A(a)$	$\frac{\mu''_N}{10^{-2}}$ year ⁻¹ (7)	δ''_N	k''	Γ'' years (8)
Tokyo (1 159)	$I \geq V$	$k=45$ $\mu_{N_0}=3.97 \times 10^{-2}$ year ⁻¹ $\delta_{N_0}=0.147$	A	34	1067	3.28	0.169	11	92	13.00	0.289	triangular uniform	13.00	0.295	10.5	89
			B	26	959	2.82	0.192	19	200	10.00	0.224	9.91	0.261	13.6	147	
			C	9	774	1.29	0.316	36	385	9.61	0.164	9.52	0.265	14.2	160	
	$I \geq VI$	$k=9$ $\mu_{N_0}=0.863 \times 10^{-2}$ year ⁻¹ $\delta_{N_0}=0.316$	A	7	1067	0.750	0.353	2	92	3.26	0.577	3.17	0.340	7.7	273	
			B	6	959	0.730	0.378	3	200	2.00	0.500	1.91	0.309	9.5	549	
			C	2	774	0.388	0.577	7	385	2.08	0.354	1.91	0.381	5.9	361	
Kyoto (1 378)	$I \geq V$	$k=41$ $\mu_{N_0}=3.05 \times 10^{-2}$ year ⁻¹ $\delta_{N_0}=0.154$	A	35	1286	2.80	0.167	6	92	7.61	0.378	triangular uniform	7.54	0.262	13.6	193
			B	33	1178	2.89	0.171	8	200	4.50	0.333	4.43	0.180	29.8	695	
			C	4	201	2.49	0.447	37	1177	3.23	0.162	4.43	0.220	19.6	466	
	$I \geq VI$	$k=11$ $\mu_{N_0}=0.871 \times 10^{-2}$ year ⁻¹ $\delta_{N_0}=0.251$	A	11	1286	0.933	0.289	0	92	1.09	1.000	triangular uniform	3.16	0.152	42.3	1371
			B	10	1178	0.934	0.302	1	200	1.00	0.707	3.16	0.153	41.9	1359	
			C	0	201	0.498	1.000	11	1177	1.02	0.289	1.014	0.273	12.4	1321	
											triangular uniform	1.014	0.279	11.8	1267	
											triangular uniform	0.927	0.281	11.7	1372	
											triangular uniform	0.927	0.282	11.6	1362	
											triangular uniform	0.947	0.278	11.9	1367	
											triangular uniform	0.947	0.281	11.7	1346	

を用い、式(2)で $q=k_r$, $t=t_r$ とするモデルをとるか、(ii) 全 t_0 年間の地震資料を用い、かつ式(4)または(8)により古い時代の資料の不確定性を考慮するモデルをとるか、の選択に関係する。たとえば、Table 2 において、太字で示した δ''_N の値は、対応する δ_N の値より小さい。この場合には、資料の不確定性を考慮してもなお、古い時代の地震資料が有意義であり、最近の時代のみを考慮することによって地震のサンプル数を減ずるより地震の発生率を精度よく推定しようものと考えられよう。

このような観点から Table 2 をみると、東京については、震度 I が V 以上の地震では、Case A, B, C いずれの場合でも最近の t_r 年間の資料のみを用いるべきである。震度 VI 以上の地震では、Case A, B の場合には本解析法により過去の全資料を用いるべきであるが、Case C については $f_A(a)$ の形状によって結論が異なるため、この結果のみでは判断できない。これらの結果は、強い地震ほど記録がよく残されているとする片山⁹⁾の指摘とも一致するが、本研究の方法は、古い地震資料の取捨選択のための定量的判断の一つの根拠を提供するものといえよう。さらに京都に関する結果をみると、いずれの場合でも δ''_N が δ_N より小さい値を示しており、震度 V 以上の地震についても、東京と比較して古い時代の資料が整っているであろうことを裏づけている。

4. 結 語

本研究では、歴史地震資料の不確定性を定量的に評価し、地震危険度の解析に取り入れるための一つの方法を提案した。東京および京都に関する数値計算結果は、本方法の有用性を示していると考えられる。本文で用いた最近の t_r 年間の設定、補正係数 A の上限値 a_u の考え方などは本解析法の説明のための暫定的なものであり、なお詳細な検討を要するものである。また、ある地域を襲う地震は、いくつかの異なる地震域に発生するのが普通であるから、地震域ごとの活動度の評価に本解析法を適用し、これをベースとした地震危険度の解析が展開されるのが望ましい。今後この方向の検討を行いたいと考えている。

従来、歴史地震史料の不確定性を判定する定量的方法が十分には整備されていなかったが、本解析法は、工学的地震危険度の解析において古い時代の資料を全面的に受け入れるか、まったく無視するかの二者択一の態度を避けるための一つの方法論を提供するものと考えている。本研究がこうした問題へのアプローチのための一助になれば幸である。

終りに、本文をまとめるにあたり、有益なご助言をいただいた京都大学後藤尚男教授に深謝の意を表するとともに、本研究の数値計算は京都大学大型計算機センターの FACOM M-190 によったことを付記する。

参 考 文 献

- 1) Ang, A.H-S., and Tang, W.H.: 伊藤 学・亀田弘行 訳: 土木・建築のための確率・統計の基礎, 丸善, 昭和52年.
- 2) Benjamin, J.R.: Probabilistic Models for Seismic Force Design, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 94, No. ST 5, pp. 1175~1196, May, 1968.
- 3) 後藤尚男・亀田弘行: 地震時における最大地動の確率論的研究, 土木学会論文集, 第159号, pp. 1~12, 昭和43年11月.
- 4) Hattori, S.: Regional Distribution of Presumable Maximum Earthquake Motions at Base Rock in the Whole Vicinity of Japan, Bulletin of the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Tokyo, Vol. 14, pp. 47~86, 1976.
- 5) 片山恒雄: 地震活動度・危険度の確率論的な考え方, 生産研究, 27巻5号, pp. 185~195, 昭和50年5月.
- 6) Kawasumi, H.: Measures of Earthquake Danger and Expectancy of Maximum Intensity Throughout Japan as Inferred from the Seismic Activity in Historical Times, Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol. 29, pp. 469~482, 1951.
- 7) Omote, S., and Matsumura, K.: A New Approach for Estimating Earthquake Risk, Proceedings of the 5th European Conference on Earthquake Engineering, Istanbul, 1975.
- 8) 宇佐美龍夫・久本壮一: 東京が震度 V 以上の地震に襲われる確率, 地震研究所彙報, 48巻, pp. 331~340, 昭和45年.
- 9) 宇佐美龍夫・久本壮一: 京都が震度 V 以上の地震に襲われる確率, 地震研究所彙報, 49巻, pp. 115~125, 昭和46年.
- 10) 宇佐美龍夫: 資料日本被害地震総覧, 東京大学出版会, 昭和50年.
- 11) 宇佐美龍夫: 歴史地震, 海洋出版, 昭和51年.

(1977.11.17・受付)