

(96) 日本各地における地震危険度の確率統計論的研究

早稲田大学 小松原 芳彦 *

 " 松井 源 吾 **

 " 西 谷 章 ***

はじめに

建築構造物の設計震度のゾーニングは、主に、1951年の河角広による日本各地の最大加速度の期待値の分布図によっている。それから35年余り経った現在までに、多くの地震データの修正および追加がなされてきた。一方巨大原子力プラントの建設などに伴い、耐震信頼性、安全性解析を適用し、破壊確率についての研究もなされてきている。必要となる終局耐力の大きさ及び耐震信頼性は本来構造物の使用期間中にどの程度の大きな地震にみまわれるかという問題と直接につながっている。つまり、ある地点がある規模以上の地震を受ける確率の推定が必要になってくる。本研究では、最新の被害地震のデータを採用し、平均発生率を用いる解析と極値分布による解析により、各都市における地震の再現期間および発生確率を求めた。極値分布による解析においては信頼レベルを適用し、求められた確率の信頼性をも考慮した。

1 本研究で適用したデータについて

昭和62年版理科年表の『日本附近の被害地震年代表』に与えられている、江戸時代以降（1605年以降）地震のうちで、年代、震源の北緯、東経、マグニチュードの明白なものを本論文の主データとする。ただし、震源の北緯、東経は不明瞭であるが、過去の文献から明らかに震央が京都又は奈良にあると判断されるものは付け加えた。また、宇津の『日本付近のM6.0以上の地震および被害地震の表：1885年～1980年』により修正されているデータは、こちらを採用した。

2 被害地震が震源から任意の距離離れた場所に及ぼす影響について

日本の浅発地震に対する震度 I （気象庁震度階）、震央距離 Δ （km）、マグニチュード M （気象庁方式）の Δ の回帰直線 $I = 0$ のデータを含まない場合の関係式として、宇津によるものを採用する。

$$I = I_{100} - b(\Delta - 100) \quad (1)$$

$$\text{ただし、 } I_{100} = 1.45M - 5.8 \quad (2) \quad b = 0.121 - 0.026M + 0.015M^2 \quad (3)$$

(1)式により求められる震度階に対応する地震動の最大加速度 a (gal) は、次の(4)、(5)、式で与えられる。

$$a = 0.45 \times 10^{1/2}, \quad 5.5 \leq I \quad (4)$$

$$a = 20 \times 10^{1/5}, \quad 5.5 \leq I \leq 6.5 \quad (5)$$

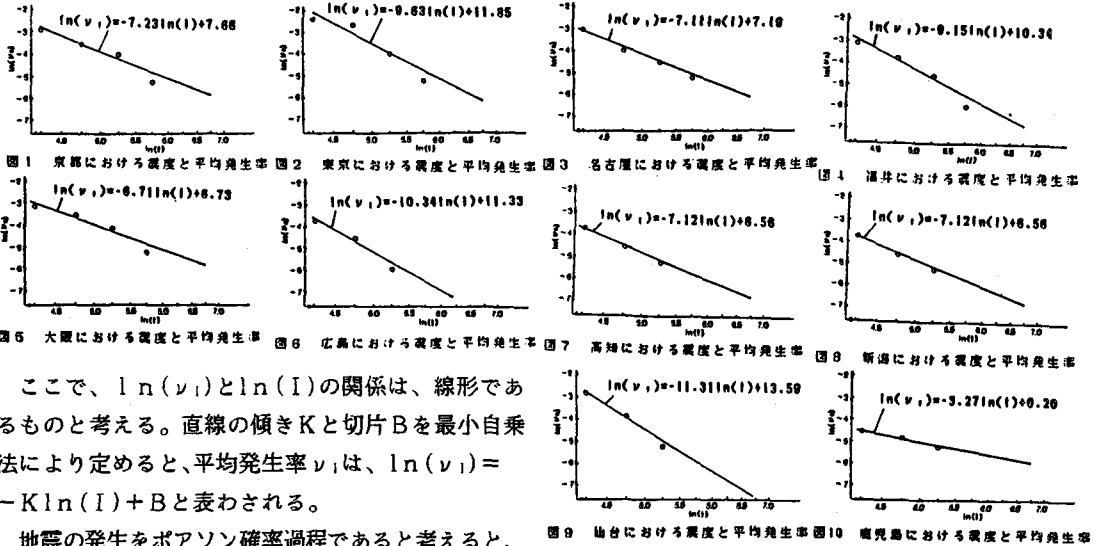
* 早稲田大学大学院生
日本建築学会正会員

** 早稲田大学教授
日本建築学会正会員
土木学会正会員

*** 早稲田大学理工学研究所特別研究員
日本建築学会正会員
土木学会正会員

3 平均発生率を用いる方法

震度 I 以上の被害地震が対象とする380年の間に起こった回数を N_i とする。 $N_i/380$ は平均発生率 ν_i となる。ここでは、通常の震度階よりも更に細かく、 $I \geq 4.25$ の時 $N_{4.5}$ 、 $I \geq 4.75$ の時 $N_{5.0}$ 、 $I \geq 5.25$ の時 $N_{5.5}$ 、 $5.75 \leq I$ の時 $N_{6.0}$ 、 $6.25 \leq I$ の時 $N_{6.5}$ 、 $I \geq 6.75$ の時 $N_{7.0}$ と定める。平均発生率の自然対数をとったものを Y 軸にとり、X 軸として各震度階の自然対数をとる。これを京都、東京、名古屋、福井、大阪、広島、高知、新潟、仙台、鹿児島についてプロットしたのが図1~10である。



ここで、 $\ln(\nu_i)$ と $\ln(I)$ の関係は、線形であるものとする。直線の傾き K と切片 B を最小自乗法により定めると、平均発生率 ν_i は、 $\ln(\nu_i) = -K \ln(I) + B$ と表わされる。

地震の発生をポアソン確率過程であると考え、 t 年間に震度 I 以上の地震が一度も起こらない確率は次の式で表される。

$$P_t(I) = \text{EXP}(-\nu_i t)$$

平均発生率 ν_i は $\ln(\nu_i) = -K \ln(I) + B$ により求められる。 K は直線の傾き、 B は切片を表す。(1)~(6)式を用いて求めた平均再現期間 t 年の震度階および最大加速度を示すのが表1である。震度5、6の平均再現期間を示すのが表2である。

宇佐美は京都および東京で起こった震度5以上の地震のデータを『京都が震度V以上の地震に襲われる確率』および、『東京が震度V以上の地震に襲われる確率』に示している。これ等のデータのうち1605年以降のものを用いて、(1)~(3)式を用いずに、京都、東京の震度5、6の平均再現期間を同様にして求めたため、京都では、震度5、6の平均再現期間はそれぞれ、23年、181年となり、東京では、それぞれ、9年、63年となる。

4 極値分布による解析

ある地点で N 年間にわたって毎日の地震震度（気象庁の震度階）の記録があるものとする。もちろん地震のない日がほとんどであろうからその場合には震度0となる。このようなデータの中から各年ごとに、最大震度をピックアップすれば、全部で N 個の各年ごとの極値が得られる。これを大きい順に並びかえ、極値の中で最大のものをランク $R = N$ として最小のものをランク $R = 1$ と呼ぶことにし、 $X_N, \dots, X_R, \dots, X_1$ と添字を付ける。ここで大きい方から $(N - R + 1)$ 番目（つまり小さい方から R 番目）の

極値、 X_R の累積分布関数を次のように算定する。

$$P(X_R) = R / (N + 1) \quad (6)$$

$$(6) \text{式の分布関数は } P(X_R) = \text{EXP}(-\text{EXP}(-y_R)) \quad (7) \text{ ただし } y_R = \alpha(X_R - U) \quad (8)$$

$$(5) \text{式と}(6) \text{式から } y_R = -\ln(-\ln(R / (N + 1))) \quad (9)$$

となる。 X を横軸に、 y を縦軸にとって、(1)~(5)式を用いて前述の各都市における380年間の震度4.25以上の極値をプロットしたのが図11~20である。図中の直線は、これらの極値についての分布を最小二乗法により近似した結果であるが、プロットした点は、ほぼ直線上にあることがわかる。(8)式と仮定しているので、 α が直線の傾きとなり、 $-\alpha U$ が y 切片となっている。各地のグラフは、プロットした点がほぼ直線上にのっていることを示している。

(6)式のような確率分布は y に関して平均値 \bar{y} 、標準偏差 S_y は $\bar{y} = 0.5772 \quad S_y = \pi / \sqrt{6}$ (10) となる。

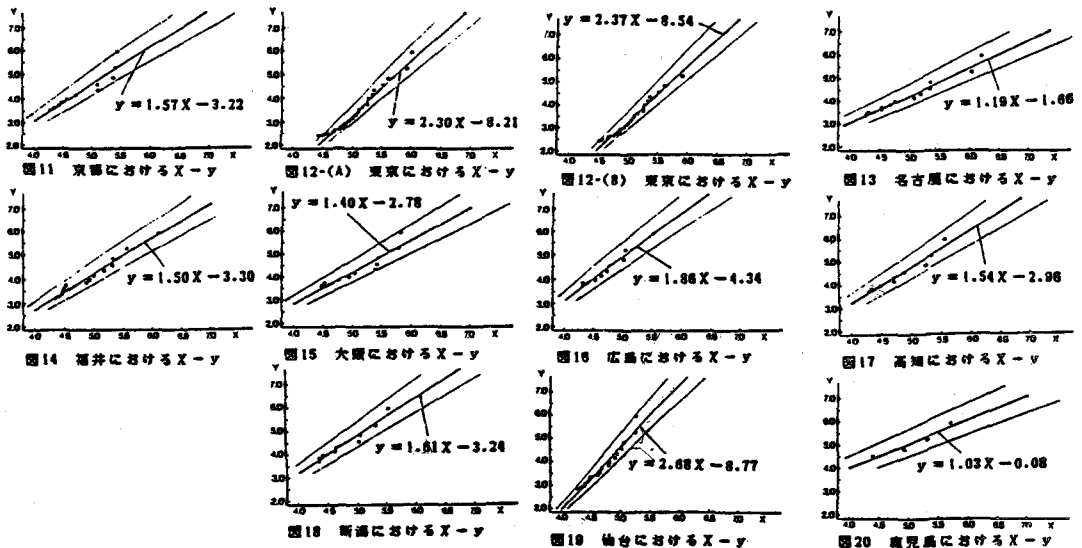
$$X = U + 0.5772 / \alpha \quad (11) \quad S_x = \pi / (\sqrt{6} \alpha) \quad (12) \text{ となる。}$$

$y = -\alpha(X - U)$ が与えられたときの X の変動値はGauss分布となり、このときの標準偏差 σ_x は次の式で近似できる。

$$\sigma_x^2 = (1 + 0.8885(y - \bar{y}) + 0.6687(y - \bar{y})^2) S_x^2 / N \quad (13)$$

$$(13) \text{式の } \bar{y} = 0.5772 \text{ であり、 } \sigma_x^2 = (0.7100 + 0.1667y + 0.6687y^2) S_x^2 / N \quad (14) \text{ と簡単になる。}$$

以上により、 σ_x の値が得られるので、各 y についての X の変動幅が求まる。すでに述べたように変動値はガウス分布しているので、 $y = -\alpha(X - U)$ の直線の両側に $2\sigma_x$ とれば95%の確率でこれらの範囲内におさまることになる。図10~20各都市における信頼レベル95%の計算例である。ただし、図12-(A)のように直線の両側に $2\sigma_x$ の範囲に収まらないデータがある場合にはそのデータを取り除き、図12-(B)のように修正する。



各震度階 X について、平均再現期間を T_x とあらわせば分布関数 $F(X)$ との関係は

$$F(X) = 1 - 1 / T_x \quad (15) \text{ と表わせるので } 1 - 1 / T_x = \text{EXP}(-\text{EXP}(-y)) \quad (16) \text{ となり}$$

$$T_x = 1 / [1 - \text{EXP}\{-\text{EXP}(-y)\}] \quad (17) \text{ で求められる。}$$

(6)~(17)式を用いて $y = -\alpha(X - U)$ の直線の両側の $2\sigma_x$ の X 、 y の値により求めた平均再現期間 t 年の震度階および最大加速度を示すのが表3である。震度5、6の平均再現期間を示すのが表4である。

5 まとめ

地震の発生を確率的に論ずる場合、各震度階について、その震度階以上の年当りの平均発生率 λ の値を算定し、各地震が全くの独立事象であるとして、ポアソン過程を用いて将来の地震の発生を予測するのが簡便である。しかし、平均再現期間の長い地震の妥当な平均発生率は、短い期間のデータから求めるのは困難である。ポアソン過程による方法と比較して、極値分布による方法では、変動幅を提示することができ、分布にある幅を持たせることができるので、この中に取まらないデータが存在している場合にはそれらを除き、改めて4に述べた方法を繰返して直線を決定することができる。ポアソン過程による方法と、極値分布による方法で、危険側の確率をとった場合に、100年またはそれ以上の差がみられる。ポアソン分布による方法のみで評価した場合、地震力を過小に見積もり過ぎてしまう恐れがあることがわかる。

表1 平均再現期間 t 年の

		震度Iと最大加速度A (gal)			
	t	25	50	75	100
京都	I	4.5	5.0	5.3	5.5
	A	80	135	188	240
東京	I	4.8	5.1	5.3	5.5
	A	111	167	216	254
名古屋	I	4.3	4.8	5.0	5.3
	A	65	108	150	190
福井	I	4.4	4.7	5.0	5.1
	A	71	106	136	183
大阪	I	4.4	4.9	5.2	5.4
	A	72	125	177	230
広島	I	4.1	4.4	4.5	4.7
	A	50	69	84	97
高知	I	4.0	4.4	4.6	4.8
	A	42	67	90	112
新潟	I	4.0	4.4	4.6	4.8
	A	42	67	90	112
仙台	I	4.4	4.7	4.9	5.0
	A	73	101	123	142
鹿児島	I	2.9	3.5	4.0	4.4
	A	12	28	44	67

表2 震度5,6の
平均再現期間(年)

	I	5	6
京都	25	106	
東京	14	96	
名古屋	33	139	
福井	31	194	
大阪	29	110	
広島	68	545	
高知	64	266	
新潟	64	266	
仙台	30	294	
鹿児島	112	215	

表3 極値分布による解析より求められた平均再現期間 t 年の
震度Iと最大加速度A (gal) (信頼レベル95%)

		震度Iと最大加速度A (gal) (信頼レベル95%)			
	t	25	50	75	100
京都	I	3.9 4.3	4.3 4.8	4.5 5.1	4.7 5.3
	A	38 66	61 117	80 163	96 206
東京	I	4.8 5.1	5.1 5.5	5.2 5.6	5.3 5.8
	A	114 163	155 238	185 268	210 285
名古屋	I	3.8 4.4	4.3 5.1	4.6 5.5	4.9 5.7
	A	35 73	66 155	94 241	120 280
福井	I	4.1 4.6	4.5 5.1	4.7 5.4	4.9 5.6
	A	49 86	79 156	105 220	128 263
大阪	I	4.0 4.5	4.5 5.1	4.7 5.4	4.9 5.7
	A	46 84	77 159	104 231	129 270
広島	I	3.9 4.3	4.2 4.7	4.4 4.9	4.5 5.1
	A	38 60	56 97	71 129	83 157
高知	I	3.8 4.2	4.2 4.7	4.4 5.0	4.6 5.2
	A	34 59	54 105	71 147	86 186
新潟	I	3.8 4.2	4.2 4.7	4.4 5.0	4.5 5.2
	A	35 59	54 101	70 140	84 175
仙台	I	4.3 4.6	4.6 4.9	4.7 5.1	4.8 5.2
	A	65 90	86 125	100 152	112 174
鹿児島	I	2.8 3.5	3.4 4.3	3.8 4.7	4.1 5.1
	A	12 27	24 63	36 105	47 150

表4

極値分布による解析より求められた

震度5,6の平均再現期間(年)

	I	5	6
京都	32 75	129 433	
東京	14 27	29 68	
名古屋	27 63	79 234	
福井	23 51	88 271	
大阪	24 53	83 249	
広島	38 94	201 748	
高知	36 90	145 500	
新潟	37 93	159 560	
仙台	20 42	219 836	
鹿児島	60 168	152 531	

参考文献

- (1) 宇津 徳治 : 震度-震央距離-マグニチュードの関係
その1. 東日本太平洋沖合を除く日本の浅発地震
1981年 Vol.59 地震研究所集報 pp219-pp233
- (2) 宇津 徳治 : 日本付近のM6.0以上の地震および被害地震の歳
: 1885年~1980年 1982年 Vol.57 地震研究所集報 pp401-pp463
- (3) 宇佐美 龍夫 : 東京が震度V以上の地震に襲われる確率、
1970年 Vol.48 地震研究所集報 pp331-pp340
- (4) 宇佐美 龍夫 : 京都が震度V以上の地震に襲われる確率、
1971年 Vol.49 地震研究所集報 pp115-pp125
- (5) 宇佐美 龍夫 : 資料日本被害地震論、東京大学出版会
- (6) 大崎 順彦 : 地震と建築、岩波新書
- (7) 理科年表、東京天文台編
- (8) Lawson, T. V.: Wind Effects on Buildings, Applied Science Publishers