

震度*期待値に就いて

東大地震研究所

河角 廣

我が国のような地震国の構造物には耐震性が要求されるが、経済面からその耐震設計強度には可能な限りの制限が要請される。この要請に合理的にこたえる為には構造物の造られる地奥の地震の強さの期待値を知る事が先づ必要になる。次に如何ようにしてこの期待値を求めるかについて考えて見よう。

1. 地震発生 の 法 則

我々の現在の知識では将来如何なる地震がどのように起るかについて予想する事はまだできない。併し或る期間に或る地奥で感じる地震の振幅別の頻度には、石本-飯田の公式と呼ばれる関係があり、最大振幅が a と $a+da$ の間にある地震の数 dN は

$$dN = c' a^m da \quad (1)$$

の法則に従つて分布し、 m は2に近い定数である。一定の周期での地震波の加速度 α は

$$\alpha = (2\pi/\tau)^2 a \quad (2)$$

で与えられ、人間はこの加速度を感じる。その感覚の強さ I と刺激 α との間には、心理学に於ける *Weber-Fechner* の法則が成り立つ。すなわち

$$\alpha = A 10^{\beta I} \text{ (gals)} \quad (3)$$

I に我が国で一般に使われている気象庁の震度階* (但し $I=7$ だけは異なる) を用いる時は $A = 0.253$, $\beta = 0.5$ である。

震 度	0 無感	1 微震	2 軽震	3 弱震	4 中震	5 強震	6 烈震	8 激震
最大加速度(gals)	0.8	2.5	8	25	80	253	800	

(2), (3) 式によつて a を I に変換し、(1)を積分して、その期間 I に起つた或る震度 I 以上の地震の総数 N を求めれば、

$$N = C 10^{-\beta(m-1)I} \quad (4)$$

が得られる。一定の期間 I をとつて考えると、この式の C は一般に時間の函数になる。この場合に C の値の時間的変化については、まだたしかな法則性が知られていないので、現在この関係式(4)によつて将来の地震活動の予測は出来ない。

又若し大森博士が云われた様に、大地震は再び同一地奥に繰返して起る事がないとす

* 我が国ではこの人体感覚による地震の強さを地震学者は震度と呼んでいるが、工学方面に於いては佐野利器博士の提唱に従い、地震動による慣性の力(地震力)の重力に対する比 $K = \alpha/g$ を震度と呼びならわしている。この震度の定義の二重性はどうしても近い将来に改める必要がある。米国の学者が水平震度と云わず、横力係数と呼んでいるのは肯綮に當つてゐると思われる。

るならば、我々は過去に大地震の起つた事のない所が危険だと云い得るだけで、その外の予測は不可能になる。しかも大森説の根拠そのものにも疑いがある以上、安全を考えれば、至る所で起り得る地震の最大震度を期待すべきだと云うことになり、期待震度を考える事が無意味になる。狭い日本の中にも過去千余年間に余り強い地震を経験した事のない地方があり、世界には地震の恐怖を知らない所もある。この過去の歴史が将来に対する保証にならないとするよりも、むしろ歴史は繰返えすと考える方が自然であると思われる。

又一方今村博士の云われる様に、同一地真に大地震が再び繰返えされるのは800年乃至1000年だとするならば、この地震活動の僅か一 cycle 程度に過ぎない我が国の地震史によつて、その周期性を定め、将来を予測しても、偶然性に支配を受ける事の著しい地震の予知は、殆んど無意味に近いであらう。

併し、地震の発生が偶然性に左右される事が大きいと云つても、そこに何の秩序も存在しないと云うのではない。人の生死や火災の発生と同様に統計的法則が地震の発生をも支配している事は疑う余地がない。例えば、南海、東南海地方の大地震は百年未満或は百数十年の間隔を以つて起つており、決定論的には法則性はないが、この地方全体を平均的に見れば約100年毎に大地震が繰返えされると云うようなものである。この意味に於ては1000年余りの我が国の地震史から見た平均の活動状況は確率論的には或る程度の有意性を持つと云えるであらう。従つてこの様な平均的な地震活動状況が将来も続くものとして期待震度を定め、それによつて将来の地震による被害を推定し、その対策を主たる事は無意味ではなく、耐震設計の法的最低線も、地震保険の基礎も、之によつて合理的に定め得ると思われる。次に

2. 耐震設計の基準震度 について考えて見よう。過去の地震活動を将来の鑑と見る我々の立場が許されるなら、一地真に於てかつて経験した最高震度を基準震度に採る事が可能な場合には、地震の頻度など顧慮する必要がなく、その建物の強度が持続する間我々の安全感は100%充される。然しなから我々の知る限りでも地震の最大加速度は時に重カ以上に達した場合があり、経済的に設計可能な域をほるかに超えている。然し考える構造物の耐用年限が短い場合には、前述(1)式或は(4)式が示す様に、強い地震程起る回数が少いから、上述の様な最高震度を設計基準に用いる事は、特に重要構造物か或は危険の惧れのある場合でない限り、不経済であらう。従つて問題の構造物の耐用期間中に遭遇する可能性のある最高震度に耐え得られる様に設計するのが最も合理的であらう。但しここに云う最高震度も決定論的のものでなく、確率論的の期待値によらざるを得ない事は云うまでもない。すなわち問題の耐用期間n年の間にその震度がI以下の地震には遭遇する可能性があるが、I以上の強さの地震の来襲回数、期待値は1に達しないと云う限界震度I₀を以て上に述べた最高震度の期待値とする事が許されるであらう。

上述の(4)式から(その式のmを簡單の爲に2とおき、 $\beta = 0.5$ とすれば)

$$N(I)/T = (C/T) 10^{-0.5I} = \rho \quad (5)$$

(Tは地震史のある年数)は或る一年間に震度I以上の地震の起る確率であり、逆に

$$I/N(I) = (T/C) 10^{0.5I} = \bar{I} \quad (6)$$

は震度I以上の地震の所謂再来年数である。従つて \bar{I} はこの(6)式が示すように震度の函数であり、(6)に(3)式を代入すれば

$$\bar{I} = (I/CA) \alpha \quad (7)$$

となつて、再来年数は地震の最大加速度に比例する。建造物の耐用年数 n が指定されれば、その n を丁度再来年数とする地震の最大加速度 α が(7)式から決定出来る。筆者は数年前日本の地震史にある限りの大地震について、それらの大きさ及び震央を定め、それらによる日本国内各地の震度を推定して、 $N(I)$ の統計を作つた。そして実際の $N(I)$ と耐用年数 n とから

$$N(I) = I/n \quad (8)$$

の関係を究す I を求め、それを(3)式によつて α に変換した。この α の日本国内の分布図が



第1図 A: $n=75$ 年, B: $n=100$ 年, C: $n=200$ 年
を再来年数とする最高震度期待値

第1図に示してあるものである。この図の期待値が、建築基準法その他に於て設計震度の基準として用いられたのであるが、この期待値の計算に当り、(3)式のAに前述の0.253を用いた、0.45を用いたか、それは $N(I)$ の計算の手續に關係した事からである。地震の大きさ(M_k)と震度分布の關係式

$$e^I = \left(\frac{100}{\Delta}\right)^2 e^{M_k - 0.00183(\Delta - 100)} \quad (9)$$

を定める時各地の震度は地盤係数によつて標準地盤のものに引き直して用い、その震央距離 Δ (km単位)との平均關係を用いたから、 I は平均値と見なければならぬ。平均の震度と加速度の關係を表わす時の筆者の定めた実験式(3)の係数Aは0.45であるからである。なほ標準の地盤には全国測候所の地盤の平均をとつたから、沖積層と洪積層との中間位と考えられる。

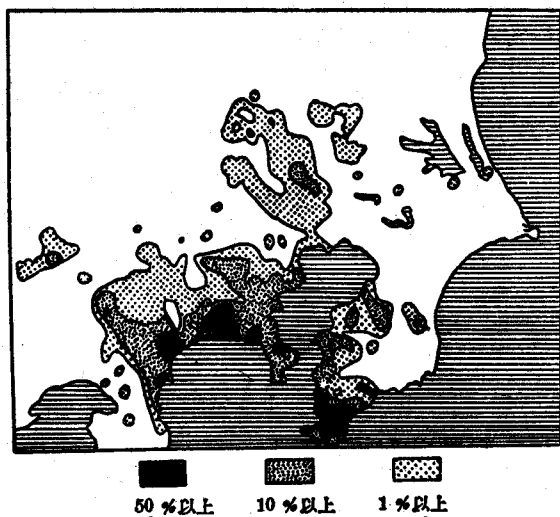
3. 震度期待値と危険率 次に確率論的に考えて見よう。上に述べた所により、強さ I 以上の地震が任意の年に起る確率は $p=1-q$ で、(5)式で与えられるから、この様な地震が n 年間起らない確率は

$$P(\bar{I}_n < I_{\bar{I}}) = q^n = (1-p)^n = (1 - 1/\bar{I})^n \quad (10)$$

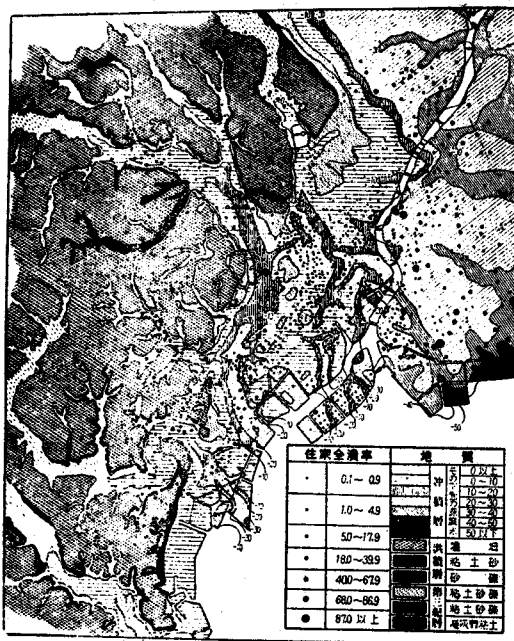
である。こゝに \bar{I}_n は n 年間に起つた地震の最高震度であり、 $I_{\bar{I}}$ は \bar{I} 年を再来年数とする地震の震度である。従つて n 年間に強さ $I_{\bar{I}}$ 以上の地震が少くとも一回起る確率は

$$P(\bar{I}_n \geq I_{\bar{I}}) = 1 - q^n = 1 - (1 - 1/\bar{I})^n = U \quad (11)$$

である。すなわち再来年数以内でも $I_{\bar{I}}$ 以上の震度の地震が起る確率(危険率) U は相當大きい。(第1表参照) 例へばこの危険率 U を夫々0.5, 0.3, 0.2 及び0.1にする年数 n は第2表の通りである。この表を見ると危険率 $U=0.5$ にする年数は再来年数 \bar{I} の約1/1.45 (この比を $1/\gamma$ と表わせば), $U=0.3$ に対しては $\gamma=2.8$, $U=0.2$ に対しては $\gamma=4.5$, $U=0.1$ に対しては $\gamma=9.5$ 夫々の γ は U の逆数に近い。換言すると危険率の小さいのは再来年数の何分の一かに當る短期間に限ら



木造家屋全壊百分率
 第2圖 大正12年關東地震木造家屋被害圖
 (松澤博士による)



第3圖 地質と沖積層の厚さとの関係 ×印は全壊率零の地点

第1表 $U = P(I_n - I)$

n	T	2	10	20	25	50	75	100	200	400
1		0.500	0.100	0.050	0.040	0.020	0.013	0.010	0.005	0.0025
2		0.750	0.190	0.122	0.078	0.040	0.027	0.020	0.010	0.005
5		0.988	0.410	0.226	0.185	0.096	0.065	0.049	0.025	0.012
10			0.651	0.401	0.335	0.183	0.126	0.096	0.040	0.025
20			0.878	0.642	0.558	0.332	0.236	0.182	0.095	0.049
30			0.958	0.785	0.706	0.455	0.332	0.260	0.140	0.072
50				0.923	0.870	0.636	0.489	0.395	0.222	0.118
75					0.953	0.780	0.635	0.529	0.313	0.171
100						0.867	0.739	0.634	0.394	0.221
200						0.982	0.932	0.866	0.633	0.394
400								0.982	0.865	0.633

第2表

U	T	2	10	25	50	75	100	200	400
0.5		2.00	6.6	17.0	34.3	51.6	69.0	138.3	267.9
0.3		0.65	3.5	8.7	17.7	26.6	35.5	71.2	142.5
0.2		0.42	2.2	5.5	11.1	16.6	22.2	44.5	89.2
0.1		0.21	1.1	2.6	5.2	7.9	10.5	21.0	42.1

れから、重要構造物で耐用年数の n 年間危険率を U 以下にとめこおきたい時は、その n 年の n 倍を再来年数とする震度の地震に耐えられる様に設計する事が必要になる。(7)式によれば再来年数と最大加速度の間には比例関係があるから、上述の様に再来年数で定めた期待震度を n 倍すれば、危険度 U に対応する設計震度を得られる。念の爲に附言するが、再来年数を耐用年数にする時の危険率 U は0.75~0.63である。

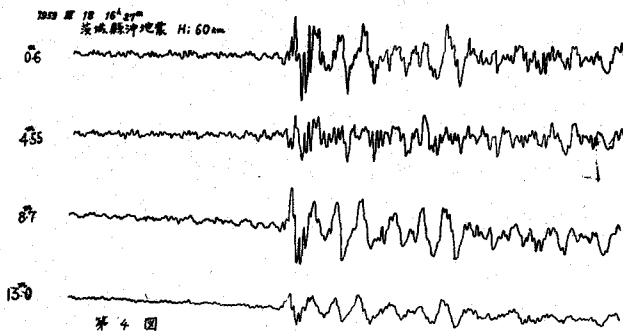
4 地盤係数 地震に対し地盤の良否がある事は我が国では古くからよく知られていた。1例として関東地震による木造家屋の全壊率の分布(オ2図)及び、その東京市内の地質との関係図(オ3図)を示す。オ2図により河川の流域が被害率が大きいため、オ3図からは山手の洪積台地に被害少く、下町では沖積層の厚さが被害に著しい影響を持つ事が、明かに知られるであろう。

この様な事実は弾性波の反射屈折の理論から説明出来る。地盤が軟かい程地震波は屈折の際その振幅が大きくなり、層状構造をなす地盤では、層の上面で反射された波が再び層の下底で反射され上に向う。その反射波と下から入つて来る波との位相差が同じになる様な周期の波はこの様な反射を繰返す事によって、共鳴的にその振幅の数倍にも大きくなる事がある。この様な構造を持つ地盤ではその様な特殊な周期を持つ波だけが目立つて大きくなり、卓越する。この事はオ4図に示す地盤層中の地震動の変化を見れば、容易に納得出来るであろう。この図は建設省建築研究所橋成のボーリング孔底に入れた地中

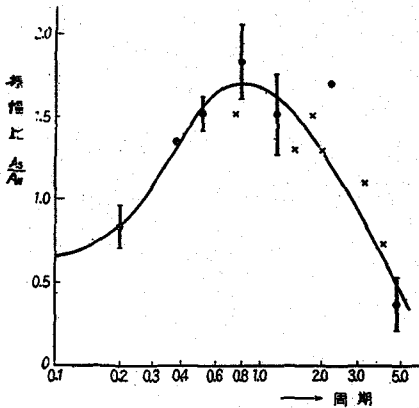
地震計の記録であり、卓越周期では約0.3秒、層の厚さ H は約13mであるから

$$\frac{1}{2}VT = H \quad (12)$$

によつて、この波の速度は約170mとなる。これが関東ローム中の横波の速度であると思われる。なおこの図から他の長い周期の波は上述の波程には変化を受けない事が知られる。



次に第5図に示すのは陽田公園と本郷で観測された同一地震の最大振幅の比である。



第5図 陽田公園及び本郷に於ける自然地震動振幅比スペクトル

之を見うと、0.2秒程度の短周期の地動に対しては、本郷の方が大きく、逆に1秒に近い周期の波に対しては陽田公園の方が約1.7倍程大きい事を示している。

この様に地盤による地震動の増大率すなわち地盤係数は周期の函数である事が知られる。例えば東京市内で従来地盤がよいと云われた山手の方が単周期の波については地盤係数が大きく、逆に本造家屋等に被害を与える長い周期の波については下町の方が地盤係数が大きくなる。この事は関東地震に際し、土蔵及び煉瓦造家屋は山手で、本造家屋は下町で被害が大きかった事と符合しており、十勝沖地震の時釧路市山手の基地で400 gals以上の加速度が推定されたのに、下町で大した被害がなかつた事も上の事実を裏書してい

ると思われ。最近村松柳彦、矢橋徳太郎の両氏が岐阜と横山ケム地帯とで地震の震度を比較して、近い地震の単周期の波の時だけ地盤の硬い横山の方が震度が大きい事を見出されたが、之も岩盤の表面の薄い風化層内での多重反射で説明出来るであろう。

5. 地震動本来のスペクトルと震度期待値

上に述べた日本国内各地の震度期待値は危険度Ⅱからの要請と、地盤及び構造物の周期によつて変えられなければならない事が明かになつた。従つてその場合には震源から送ら出される地震波本来のスペクトルが知られなければならない。この事に関して日本ではまだ決定的論議が出来るに足る観測がないが、米國に於ける強震記録の分析結果によると、速度スペクトル一定と考えればよいようである。明治24年10月28日の濃尾地震を名古屋測候所で観測した地震記象によれば0.07~0.08秒の地動が記録されており、加速度を求めると950~1320 galsとなる。この波が重なつてゐる周期1秒の波の加速度は43 galsとなるが約15秒の後地震計の錐針がはづれてその後の大きな地動は記録されていない。若し上述の速度スペクトル一定の假説が正しいならば $T=0.07$ 秒 $a=1320$ gals ならば1秒の波の加速度は93 galsとなる。 $T=0.08$ 秒で950 gals ならば $T=1$ 秒の波の加速度は76 galsとなる。之等の推定値が観測出来た43 galsと異なるのは、錐針のはづれた後たゞと大きな波が来た事と、名古屋測候所の地盤の卓越周期に近かつた0.07~0.08秒の波が共鳴的に大きくなったのかも知れないが、速度スペクトル一定の假説を裏書きすると思われないう程の大きな差ではないと思われ。

この速度スペクトル一定の假説が正しいならば、岩盤地帯に短周期の構造物を作ることを得策ではなく、その周期を地盤の卓越周期となるべく離すことも大事なことになる。