

# (10) 最大地震動の予測式

建設省土木研究所 正員 川島一彦  
 “ 〇正員 相沢 興  
 “ 正員 高橋和之

## 1. まえがき

公共土木施設の耐震設計の合理化を図るとともに各種の地震防災上の措置を講じるためには、地震動の特性を正しく知ることが必要とされる。本小文は、我国の地盤上と得られた20/197成分の水平加速度強震記録をもとに最大地震動(最大加速度, 最大速度, 最大変位)の距離減衰特性に関して、距離減衰式に及ぼす説明変数の項数および地盤条件依存性を検討したものであり、実用的な最大地震動の予測式を提案するものである。

## 2. 解析に用いた強震記録

解析対象とした記録は、建設省土木研究所および運輸省港湾技術研究所により、我国の67地点の地盤上において観測・数値化された197組(水平2成分/197)の加速度強震記録であり、これらは合計90回の浅発地震(震源深さ60km以内)により得られたSMAC型強震計記録である。また、加速度強震記録には数値化精度と考慮した計器補正を加えらるとともに、これを同波数領域で数値積分して速度、変位を計算した。この加速度、速度、変位記録から水平2成分の合成効果を考慮して最大加速度 $\tilde{a}_{max}$ 、最大速度 $\tilde{v}_{max}$ 、最大変位 $\tilde{d}_{max}$ を求め、これを解析対象とした。各観測地点の地盤種別は、1種(道路橋示方書による1種地盤)、2種(同、2種および3種地盤)、3種(同、4種地盤)の3区分に分類した。解析対象とした記録の各地盤種別ごとの震央距離 $\Delta$ 、マグニチュードM、震源深さ $D_p$ および最大地震動( $\tilde{a}_{max}$ ,  $\tilde{v}_{max}$ ,  $\tilde{d}_{max}$ )の頻度分布は、それぞれ図1および図2に示すとおりである。

## 3. 距離減衰式の形式の検討

一般に最大地震動 $X$ ( $X: \tilde{a}_{max}, \tilde{v}_{max}, \tilde{d}_{max}$ )の距離減衰式として以下式を仮定しているものが多い。

$$\log X(M, \Delta, G_i) = \log a(G_i) + b(G_i)M + c(G_i) \log(\Delta + \Delta_0) \quad (1)$$

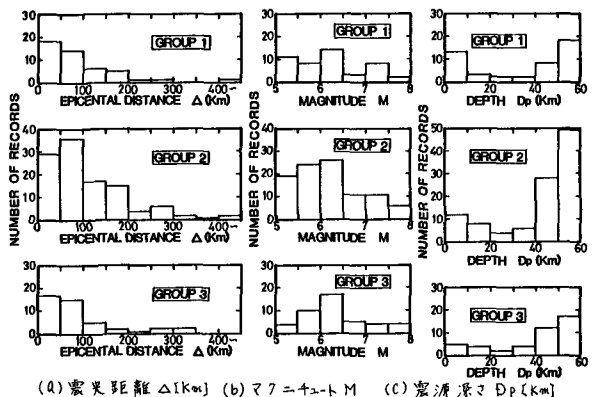
ここで、M,  $\Delta$ ,  $\Delta_0$ はそれぞれマグニチュード、震央距離、 $\Delta$ が小さい範囲での $X$ を調整する定数である。

また、 $G_i$ は地盤種別( $i=1, 2, 3$ )であり、 $a(G_i), b(G_i), c(G_i)$ は $G_i$ ごとに定められる係数である。

最大地震動に影響を与える要因としては、

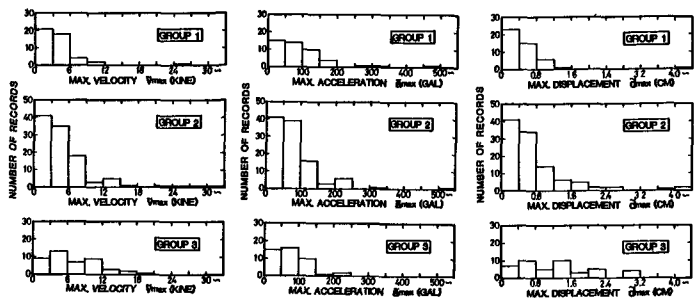
この他に伝播経路の特性、震源機構などがあるが、現状では工学的に統一された資料が得られるのは上記のM,  $\Delta$ ,  $G_i$ と震源深さ $D_p$ と考えられる。

ここでは、距離減衰式中の説明変数の組合せが $X$ の距離減衰特性を近似する上でどのような影響があるかを検討するために、 $\Delta_0 = 30\text{km}$ とした式(1)に $D_p$ の項を加



(a) 震央距離  $\Delta$  [km] (b) マグニチュード M (c) 震源深さ  $D_p$  [km]

図1 解析対象とした強震記録の地震諸元の頻度分布



(a) 最大加速度  $\tilde{a}_{max}$  [gal] (b) 最大速度  $\tilde{v}_{max}$  [cm/sec] (c) 最大変位  $\tilde{d}_{max}$  [cm]

図2 解析対象とした最大地震動の頻度分布

えるとともに、それぞれの項の2乗の項および相互の積の項を考慮して地盤種別ごとの $\chi^2$ で仮定する。

$$\log X = a_0 + a_1 M + a_2 \log(\Delta + 30) + a_3 D_p + a_4 M^2 + a_5 \left\{ \log(\Delta + 30) \right\}^2 + a_6 D_p^2 + a_7 M \log(\Delta + 30) + a_8 M D_p + a_9 D_p \log(\Delta + 30) \quad (2)$$

ここで、 $a_0$ は定数項であり、 $a_i (i=0, \dots, 9)$ は $G_i (i=1, 2, 3)$ ごとに定められる係数である。この式(2)の中から定数項以外の $n$ 個( $n=1, 2, \dots, 9$ )の項を取り出した重回帰分析による重相関係数 $R$ が最大となる項の組合せを総当たり法により $G_i (i=1, 2, 3)$ ごとに求めた結果が図3である。これによれば、1)  $\tilde{a}_{max}$ ,  $\tilde{v}_{max}$ ,  $\tilde{d}_{max}$ のいずれの場合も、 $n$ の増加に伴う $R$ の変化は、 $G_i$ によらずおおむね同じであり、 $n=9$ の場合に当然 $R$ は最大となる。ただし、 $n \geq 2$ では $n$ の増加によって $R$ はほとんど増加しないため、 $n=2$ の回帰式に他の説明変数を追加したとしても著しい精度の向上は期待できず、2) 同一の $n$ に対する回帰式に選択される項の組合せは、 $\tilde{a}_{max}$ ,  $\tilde{v}_{max}$ ,  $\tilde{d}_{max}$ ごとに同一とはなく、また、 $G_i$ によっても変化している。しかしながら、 $n=2$ の場合については、3種の $\tilde{a}_{max}$ 、1種の $\tilde{v}_{max}$ および $\tilde{d}_{max}$ を除く他の $n-2$ をすべて $M$ および $\Delta$ の組合せである。また、 $M, \Delta$ の組合せに対する3種の $\tilde{a}_{max}$ 、1種の $\tilde{v}_{max}$ および $\tilde{d}_{max}$ の $R$ は、それぞれ0.641, 0.753, 0.757であり、これらは図3に示した $R$ とほとんど変わらない。式(2)の回帰式の計算例として $n=9$ の場合の $\tilde{a}_{max}$ を示すと図4のようになる。これによれば、 $\Delta$ の増加に伴う $\tilde{a}_{max}$ の変化が非常に小さく、地震動の距離減衰特性に関する従来の経験的事実とほぼ一致しない。また、このよう傾向は $n \geq 3$ の場合にも同様である。これに対して、 $n=2$ の場合(図6)には、 $M, \Delta, G_i$ の変化に伴い比較的調和のとれた変化を示す。

以上より、最大地震動の距離減衰式の形式としては、現在一般によく用いられている式(1)に他の項を追加しても著しい予測精度の向上は期待できずと言える。

#### 4. 距離減衰式の地盤種別依存性

上記3つは地盤種別ごとに検討を行ったが、ここでは、上記3つの結果に基づき、式(1)の係数 $a, b, C$ が $G_i$ ごとに違つたとし、これらとそれぞれ独立に定める場合と、 $G_i$ によらず係数 $a, b, C$ は一定であるとして定める場合の距離減衰式を次式

$$\log X = \begin{cases} \log a + bM + C \log(\Delta + 30) & \gamma-2.1 \\ \log a + bM + C(G_i) \log(\Delta + 30) & \gamma-2.2 \\ \log a + b(G_i)M + C \log(\Delta + 30) & \gamma-2.3 \\ \log a(G_i) + bM + C \log(\Delta + 30) & \gamma-2.4 \\ \log a + b(G_i)M + C(G_i) \log(\Delta + 30) & \gamma-2.5 \\ \log a(G_i) + bM + C(G_i) \log(\Delta + 30) & \gamma-2.6 \\ \log a(G_i) + b(G_i)M + C \log(\Delta + 30) & \gamma-2.7 \\ \log a(G_i) + b(G_i)M + C(G_i) \log(\Delta + 30) & \gamma-2.8 \end{cases} \quad (3)$$

を仮定し、係数 $a, b, C$ の地盤種別依存性を検討する。ここで、 $a(G_i), b(G_i), C(G_i)$ は $G_i$ ごとに変化することと、 $a, b, C$ は $G_i$ によらず一定値をとることを表わしている。この式(3)の $\gamma-2.1 \sim 2.8$ の $R$ および自由度調整済み重相関係数 $R^*$ を求めた結果を図5に示す。これによれば、 $\gamma-2.1$ を除く $\gamma-2.2 \sim 2.8$ はほぼ同程度の $R$ を示し、また、 $\gamma-2.7, 8$ はこれらよりもやや大きい $R$ を示す。 $R^*$ は $\gamma-2.1 \sim 2.8$ と比較して

NUMBER OF TERMS	MULT. CORR. COEF. R										TERMS										MULT. CORR. COEF. R			ADJUSTED MULT. CORR. COEF. R*		
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	M	$\Delta$	$M^2$	$\Delta^2$	$M\Delta$	$M\Delta^2$	$\Delta M^2$	$\Delta^2 M$	$M\Delta$	GROUP 1	GROUP 2	GROUP 3	GROUP 1	GROUP 2	GROUP 3					
1																0.631	0.444	0.542	0.621	0.436	0.526					
2							⊙	⊙								0.769	0.686	0.680	0.757	0.678	0.660					
3							⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	0.805	0.722	0.719	0.789	0.713	0.694					
4							⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	0.813	0.735	0.728	0.794	0.722	0.695					
5							⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	0.820	0.741	0.735	0.794	0.725	0.692					
6							⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	0.821	0.748	0.742	0.790	0.730	0.691					
7							⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	0.823	0.754	0.750	0.786	0.733	0.691					
8							⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	0.825	0.756	0.750	0.782	0.735	0.681					
9							⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	0.825	0.757	0.751	0.776	0.730	0.669					

(a) MAXIMUM ACCELERATION  $\tilde{a}_{max}$

NUMBER OF TERMS	MULT. CORR. COEF. R										TERMS										MULT. CORR. COEF. R			ADJUSTED MULT. CORR. COEF. R*		
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	M	$\Delta$	$M^2$	$\Delta^2$	$M\Delta$	$M\Delta^2$	$\Delta M^2$	$\Delta^2 M$	$M\Delta$	GROUP 1	GROUP 2	GROUP 3	GROUP 1	GROUP 2	GROUP 3					
1																0.556	0.307	0.240	0.429	0.507	0.349					
2							⊙	⊙								0.757	0.694	0.539	0.778	0.738	0.569					
3							⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	0.797	0.730	0.605	0.829	0.749	0.621					
4							⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	0.816	0.733	0.643	0.835	0.748	0.659					
5							⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	0.824	0.737	0.665	0.836	0.751	0.678					
6							⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	0.831	0.745	0.672	0.834	0.751	0.672					
7							⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	0.833	0.748	0.677	0.829	0.751	0.664					
8							⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	0.834	0.751	0.678	0.824	0.751	0.652					
9							⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	0.834	0.753	0.679	0.819	0.749	0.639					

(b) MAXIMUM VELOCITY  $\tilde{v}_{max}$

NUMBER OF TERMS	MULT. CORR. COEF. R										TERMS										MULT. CORR. COEF. R			ADJUSTED MULT. CORR. COEF. R*		
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	M	$\Delta$	$M^2$	$\Delta^2$	$M\Delta$	$M\Delta^2$	$\Delta M^2$	$\Delta^2 M$	$M\Delta$	GROUP 1	GROUP 2	GROUP 3	GROUP 1	GROUP 2	GROUP 3					
1																0.450	0.514	0.377	0.542	0.292	0.188					
2							⊙	⊙								0.789	0.743	0.596	0.744	0.687	0.506					
3							⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	0.841	0.757	0.655	0.780	0.720	0.564					
4							⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	0.851	0.759	0.698	0.795	0.721	0.594					
5							⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	0.856	0.764	0.723	0.799	0.722	0.608					
6							⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	0.858	0.767	0.727	0.802	0.727	0.603					
7							⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	0.858	0.770	0.729	0.798	0.727	0.594					
8							⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	0.858	0.773	0.730	0.793	0.727	0.580					
9							⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	0.858	0.773	0.730	0.787	0.726	0.563					

(c) MAXIMUM DISPLACEMENT  $\tilde{d}_{max}$

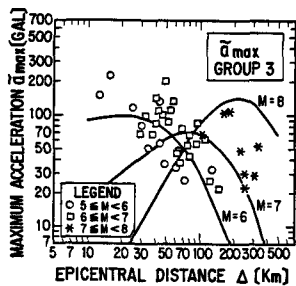
LEGEND  
 ○ GROUND GROUP 1  
 ● GROUND GROUP 2  
 / GROUND GROUP 3

図3 最大地震動の距離減衰式に含まれる項数の影響

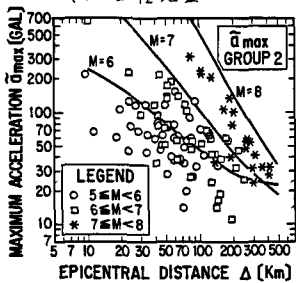
も基本的な傾向はRの場合と同じである。しかしながら、ケース7の場合にわずかに異なるがR\*が最大となり、この場合に最大地震動の距離減衰特性の予測精度が最もよいことを示している。ここで、ケース7,8の回帰式の係数a,b,cは表1のとおりであり、これによれば、係数a(q<sub>i</sub>)はケース7,8ともに1種地盤が、2,3種地盤よりも大きくなっている。係数b(q<sub>i</sub>)はいずれの地盤種別の場合にも $\tilde{a}_{max}$ ,  $\tilde{v}_{max}$ ,  $\tilde{d}_{max}$ の順に大きくなり、また、 $\tilde{a}_{max}$ ,  $\tilde{v}_{max}$ ,  $\tilde{d}_{max}$ のいずれの場合にも、1種地盤のb(q<sub>i</sub>)は2種, 3種地盤のb(q<sub>2</sub>), b(q<sub>3</sub>)よりも全体として小さい。ケース8では、係数c(q<sub>i</sub>)は $\tilde{a}_{max}$ ,  $\tilde{v}_{max}$ ,  $\tilde{d}_{max}$ のいずれの場合にも-1.2~-1.4の範囲であり、地盤種別による差は小さい。また、ケース7,8の距離減衰式をM=6.8について比較したのが図6である。これによれば、両者の差はごくわずかにあり実用上はほとんど差がないといってもよい。

### 5. 最大地震動の予測式

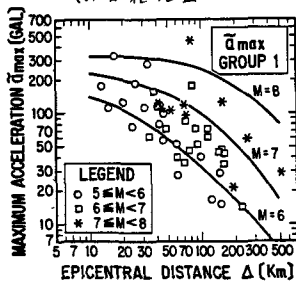
上記3.4の検討結果を総合すると、最大地震動の距離減衰式としては、Mおよびlog(Δ+Δ<sub>0</sub>)による式(3)のケース7およびケース8の両者が他のケースと比較して相対的に大きな重相関係数を与える。また、ケース7と8はほとんど差



(a) 1種地盤



(b) 2種地盤



(c) 3種地盤

図4 式(2)のk=9の場合の $\tilde{a}_{max}$ の地盤別

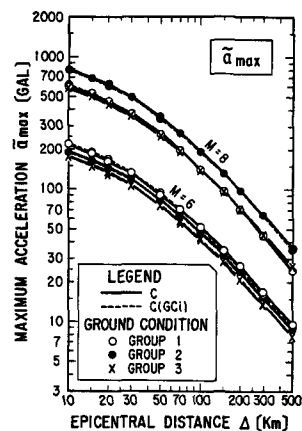
CASE NO.	CORRELATION COEFFICIENT R			ORDER
	0.65	0.70	0.75	
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

CASE NO.	CORRELATION COEFFICIENT R			ORDER
	0.65	0.70	0.75	
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

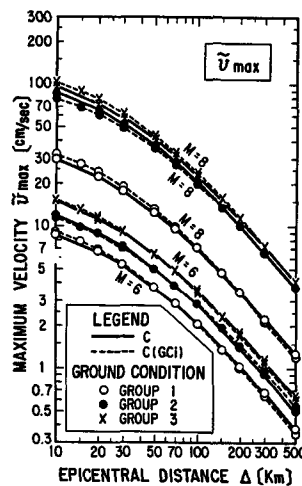
CASE NO.	CORRELATION COEFFICIENT R			ORDER
	0.70	0.75	0.80	
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

LEGEND			
CASE No.	COEFFICIENT a, b and c	CASE No.	COEFFICIENT a, b and c
1	a, b, c	5	a, b(q <sub>2</sub> ), c(GCI)
2	a, b, c(GCI)	6	a(GCI), b, c(GCI)
3	a, b(GCI), c	7	a(GCI), b(GCI), c
4	a(GCI), b, c	8	a(GCI), b(GCI), c(GCI)

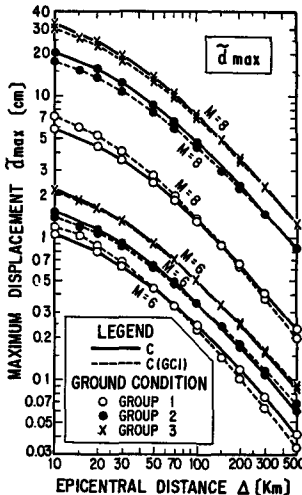
図5 最大地震動の地盤種別依存性



(a) 最大加速度



(b) 最大速度



(c) 最大変位

図6 ケース7とケース8の距離減衰式の比較

が無いことから、ここでは、 $\log(\Delta + \Delta_0)$ の項の係数Cがより簡単なT-スークを距離減衰式として提案する。

式(3)のT-スークの距離減衰式による予測値 $X^P$ の実際の値 $X^{OB}$ とこれから得られた地震のM,  $\Delta$ から式(3)のT-スークより求めた予測値 $X^P$ の比を次式により定義する。

$$U_x = X^{OB} / X^P \quad (X: \tilde{a}_{max}, \tilde{v}_{max}, \tilde{\sigma}_{max}) \quad (4)$$

$U_x$ の一例として、 $\tilde{a}_{max}$ の2種地盤の場合を示すと図7のようになり、 $U_a$ はM,  $\Delta$ により顕著な変化を示さない。このような傾向は他の場合でも同様である。そこで、地盤種別ごとに $\log U_x$ の頻度分布を求めた一例( $\tilde{a}_{max}$ の2種地盤の場合)が図8とあり、 $\log U_x$ の頻度分布は全体として正規分布により近似できることがわかる。 $\log U_x$ の標準偏差は表2に示すとおりであり、地盤種別および $\tilde{a}_{max}, \tilde{v}_{max}, \tilde{\sigma}_{max}$ によって大きく変化せず、全体で平均すると0.25程度となる。いま、 $\log U_x$ の頻度分布が正規分布に従うと仮定し、 $\sigma_x = 0.25$ とすると、 $\log U_x$ がある値を超えない確率P(非超過確率)を求めることができる。図8はこのようにして求めた非超過確率Pに対応する係数 $U_a, U_v, U_d$ とあり、式(3)のT-スークにこの係数を乗じることにより、所期の非超過確率に対する期待値を求めることができる。一例として $\tilde{a}_{max}$ の2種地盤のM=8の場合に対する各Pの期待値を示すと図10のようになる。

### 6. まとめ

今回の地盤上で得られた20197成分の水平加速度強震記録をもとに、最大地震動 $X$ ( $X: \tilde{a}_{max}, \tilde{v}_{max}, \tilde{\sigma}_{max}$ )の予測式を検討した結果をまとめると以下のとおりである。

1) 現在一般に用いられている式(1)による最大地震動の距離減衰式に、新たにM,  $\log(\Delta + \Delta_0)$ ,  $d_p$ の3乗項およびこれらの相互の積の項を追加しても著しい予測精度の向上は期待できず、したがって現状では、式(1)の回帰式が最も妥当な結果を与えると考えられる。

2) 式(1)の回帰式の係数 $a, b$ は地盤条件に依存するが、係数 $c$ は地盤条件に依存してもしなくても結果はほとんど差がなく、両者は、他に比較して予測精度が良い。

### 参考文献

1) 川島ら：最大地震動および地震応答スペクトルの推定法(その1~4)，土研資料1765, 1841, 1864, 1993号。

表1 T-スークの係数 $a, b, c$ の値

最大地震動	地盤種別	T-スーク			T-ス8		
		$a(G_i)$	$b(G_i)$	C	$a(G_i)$	$b(G_i)$	$c(G_i)$
$\tilde{a}_{max}$	1種	987.4	0.216	-1.218	1073	0.221	-1.251
	2種	232.5	0.313		227.3	0.308	-1.201
	3種	403.8	0.265		403.1	0.262	-1.208
$\tilde{v}_{max}$	1種	20.8	0.263	-1.222	22.9	0.271	-1.275
	2種	2.81	0.430		2.87	0.421	-1.183
	3種	5.11	0.404		5.14	0.415	-1.257
$\tilde{\sigma}_{max}$	1種	0.626	0.372	-1.258	0.866	0.393	-1.390
	2種	0.062	0.527		0.056	0.549	-1.179
	3種	0.070	0.534		0.070	0.575	-1.224

表2  $\log U_x$ の標準偏差

	$\log U_x$ の標準偏差 $\sigma$		
	1種	2種	3種
$\tilde{a}_{max}$	0.216	0.224	0.197
$\tilde{v}_{max}$	0.236	0.239	0.243
$\tilde{\sigma}_{max}$	0.262	0.258	0.262

$\sigma$ の平均値 $\bar{\sigma} \approx 0.25$

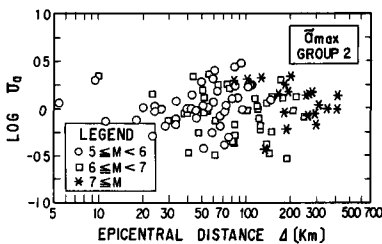


図7  $\log U_a \sim \Delta \sim M$ の関係

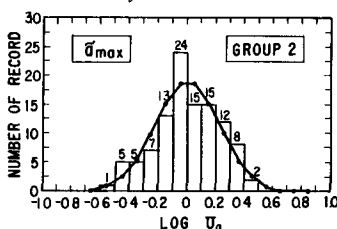


図8  $\log U_a$ の頻度分布

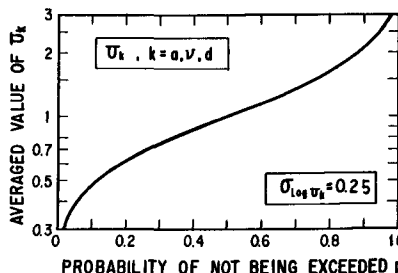


図9  $U_x$ とPとの関係

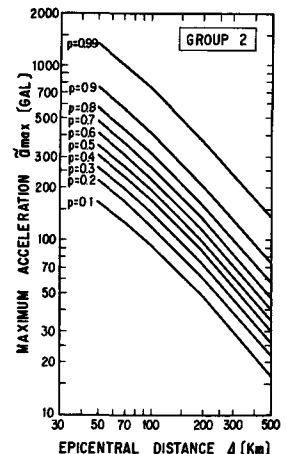


図10 2種地盤の $\tilde{a}_{max}$ のM=8の場合に対する各Pの期待値と $\Delta$ の関係