

(22) 千葉実験所における地震動観測

— その3 観測記録に基づく距離減衰特性 —

東京大学大学院 ○安藤 陽一
東京大学大学院 Turgay Türker
東京大学生産技術研究所 片山 恒雄

1. はじめに

地表における最大加速度の距離減衰特性を明らかにすることは、耐震工学の分野における重要なテーマの一つである。最大加速度の距離減衰式については様々な地盤条件のもとに、各々異なったデータベース、減衰式モデル、解析手法を用いて数多くの研究がなされている。最大加速度はばらつきの幅が広く、そのため観測値はしばしば予測値と大きく異なることがある。たとえば、ある一地震を取り上げ地震諸元のパラメータを固定したとしても、ほぼ同一の地盤と考えられる小さな区域内においても観測値はばらつき、このような観点からの最大加速度予測値の定量的な検討も行われるべきだと考えられる。この報告においては、東京大学生産技術研究所千葉実験所の地表(GL-1m)で得られた記録に基づき、最大加速度の距離減衰特性を求めるとともに、実験所内の数m~数百m離れた地点間の最大加速度のばらつきについて評価する。

2. 最大加速度の距離減衰式について

使用データの特性：千葉実験所の地盤構造はだまかには地表面から関東ローム、凝灰質粘土、洪積砂となっており、道路橋示方書の示す2種地盤に分類される。距離減衰特性の解析に用いた最大加速度記録はCO観測孔の地表(GL-1m)の地震計で得られたものである。対象としたのは1982年7月~1988年10月に起こったマグニチュード2.9~7.9の141地震で、震央位置分布は図1に示すように近距離小地震が多い。データ数は141成分、最大加速度の定義は水平2成分の最大値の大きい方を採用した。震央距離は1~819kmで、最大加速度は数gal、数十galがほとんどであり、100gal以上のものは、千葉県東方沖地震の記録(326gal)のみである(図2, 前報その1参照)。表1に諸元間の相関係数、表2に震央距離、マグニチュードによる地震の分類表を示す。

最大加速度の距離減衰式：使用データは多地点記録ではないので、層別因子を用いない最小2乗法により一括回帰を行った。減衰式のモデルとしては以下の4通りのものを考えた。定数 D_0 、 X_0 を0から5刻みに変化させていき、各モデルに対して重相関係数 ρ を最大にする D_0 、 X_0 を求め、回帰分析を行った。その重相関係数を併記する。

$$(A) \log A = aM + b \log(D + D_0) + d \quad \rho \text{ は } 0.59$$

$$(B) \log A = aM + b \log(X + X_0) + d \quad \rho \text{ は } 0.63$$

$$(C) \log A = aM + b \log(D + D_0) + cH + d \quad \rho \text{ は } 0.60$$

$$(D) \log A = aM + b \log(X + X_0) + cH + d \quad \rho \text{ は } 0.72$$

ここで A:最大加速度(gal) M:マグニチュード X:震源距離(km) H:震源深さ(km) D:震央距離(km)

モデル(C)、(D)は震源深さの項 cH を含んでおり、震源深さを独立変数として評価しないモデル(A)、(B)に比べ重相関係数がかなり大きい。また震源深さの項を加えることによって、 c の値が正であれば、直下型地震に対するモデル(B)の過大な距離減衰特性を補正することができる。例えばマグニチュードが同一で震源深さ $H=10\text{km}$ と $H=100\text{km}$ の地震が起こったとすれば、震央における加速度予測値の比(前者の予測値/後者の予測値)はモデル(B)の回帰結果で21程度、モデル(D)のもので11程度となった。モデル(B)では深さ方向の減衰が過大に評価されているように思われる。またモデル(D)はマグニチュード、震源距離が等しい地震については震源深さの大きいものほど大きな加速度を予測する。よく似た傾向は既往の研究でも指摘されている⁽¹⁾⁽²⁾。

もっとも重相関係数の高かったモデル(D)を採用して回帰したのが次の減衰式である。

$$\log A = 0.448M - 2.081 \log(X + 20) + 0.0023H + 2.92 \quad \text{----(1)}$$

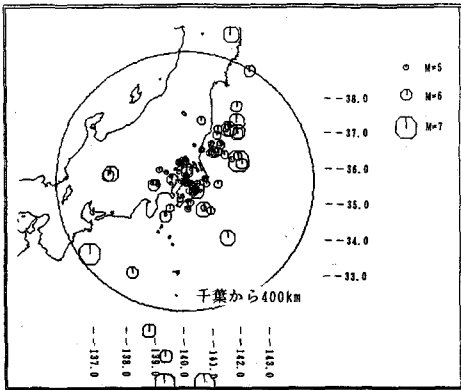


図1 震央位置分布

表1 諸元間の相関係数

	LOG A	MAG	LOG D	LOG R	H	R
LOG A	1	0.10960	-0.1730	-0.2206	-0.0516	-0.2182
MAGNITUDE	0.10960	1	0.73713	0.85507	0.46747	0.72119
LOG D	-0.1730	0.73713	1	0.82141	0.37450	0.69879
LOG R	-0.2206	0.85507	0.82141	1	0.64562	0.91057
H	-0.0516	0.46747	0.37450	0.64562	1	0.81066
R	-0.2182	0.72119	0.69879	0.91057	0.81066	1

表2 対象地震のD, Mによる分類表

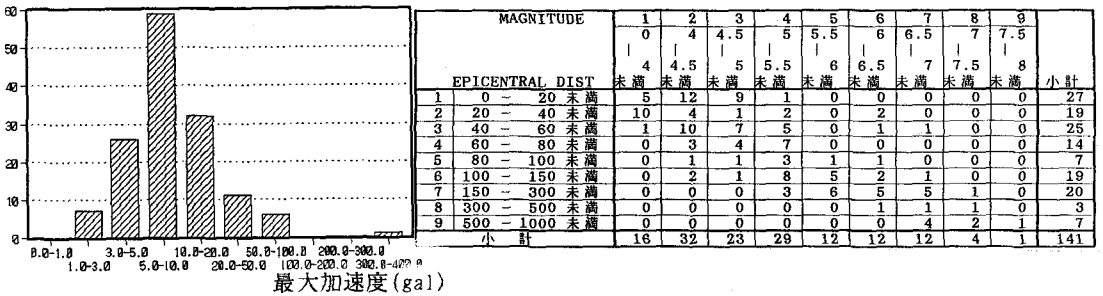


図2 水平最大加速度の分布

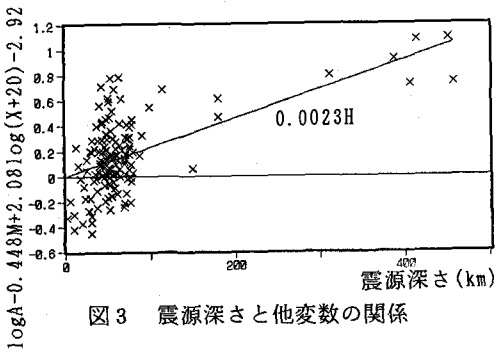


図3 震源深さと他変数の関係

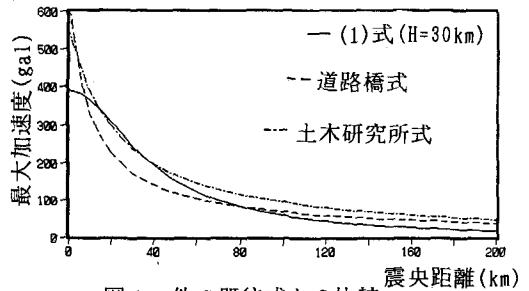


図4 他の既往式との比較

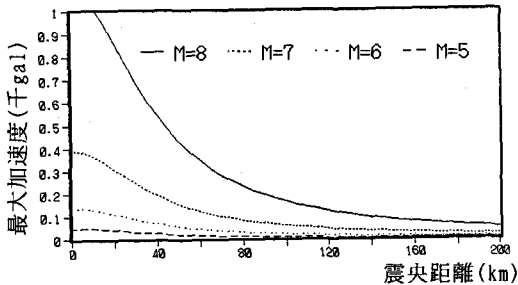


図5 H=30の地震による(1)式の距離減衰

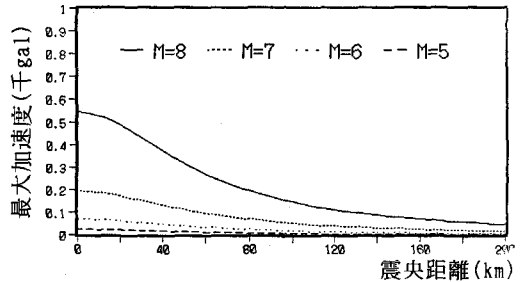


図6 H=50の地震による(1)式の距離減衰

$$\sigma_{\log A} = 0.2437 \quad \rho = 0.718$$

図3に震源深さと(1)式の他の変数の関係を示す。この図を見れば、 $\log A$ を震源深さの1次関数を加えて回帰しても差し支えないものと思われる。

道路橋示方書の式⁽³⁾(2種地盤)や土木研究所の式⁽⁴⁾(2種地盤)(この両者は震源深さの情報を用いていない)と式(1)の距離減衰特性を比較して図4に示す。式(1)は従来のものに比べて大きな距離減衰効果を示しているのが分かる。しかし、マグニチュードや震源距離などの説明変数の間に高い相関関係があることや近距離大地震データがないことを考えると、使用データの諸元の範囲を超えて、この回帰式を適用することに関しては、さらに今後検討することが必要である。

3. 観測値のばらつきについて

最大加速度の式(1)による予測値と観測値を図7に示すが、これからも明らかなようにこの両者はしばしば大きく異なる値を示すことがある。予測値の観測値からのばらつきは、重回帰分析時に得られる目的変数の標準誤差 $\sigma_{\log A}$ で評価できる。このようなマクロな最大加速度のばらつきに加えて、ほとんどすべてのパラメータが等しいと思われる領域においてさえ観測値はばらつくのである。そこで千葉実験所のアレー観測記録をもとに、同一地震の最大加速度観測値がどのくらいばらつくかを定量的に解析することを試みた。片山ら⁽⁵⁾は千葉実験所の1982年～1984年の最大加速度記録からそのばらつきを解析しているが、今回の解析では空間的広がりの影響も考慮にいれた。観測地区はボーリング資料⁽⁶⁾によればほぼ成層構造を有しており、地区内には地表地中あわせて44台の地震計が設置されている。それらの中から空間的な広がりの影響を考慮し、以下のようなグループ分けを行った。(観測孔の配置は前報その1参照)

GROUP1: 地表(GL-1m)の5m区域内のC0, C1, C2, C3, C4観測孔の地震計

GROUP2: 地表(GL-1m)の15m区域内のC0, P1, P2, P3, P4観測孔の地震計

GROUP3: 地表(GL-1m)の約150m区域内のC0, P5, P6, P8, P0観測孔の地震計

GROUP4: 地中(GL-5m)の5m区域内のC0, C1, C2, C3, C4観測孔の地震計

GROUP5: 地中(GL-10m)の5m区域内のC0, C1, C2, C3, C4観測孔の地震計

約10gal以上の最大加速度値が観測された9地震(GROUP3は6地震)を、その震央方向(R)成分、震央直交方向(T)成分、上下動(UD)成分に分け、各GROUPの変動係数を得た(表3、図8～12)。その変動係数の平均値を見るとR, T成分ともに、広がり5mのGROUP1は約0.07、15mのGROUP2は約0.10、150mのGROUP3は約0.15と距離の増加とともにばらつきの幅は大きくなる傾向にある。また地震計の埋設深度が大きければ、変動係数は小さくなり、埋設深さ10mのGROUP5は地表のGROUP1の半分の変動係数を示した。震央方向成分、震央直交方向成分、上下方向成分には変動係数に大きな傾向の違いはみられなかった。

4. あとがき

今回示した最大加速度の距離減衰式は、既往のものと比較しても重相関係数が高い方に位置づけられるものと思われるが、対数軸上で0.247程度の標準誤差がある。最大加速度を対数正規分布と仮定すれば約16%の確率で予測値の1.7倍程度の値が現れる。このような大きな標準誤差が得る要因として文献⁽⁷⁾が詳しい。このような最大加速度の予測値の平均レベルのばらつきの問題のほかに、最大加速度は小さな区域内においても空間的にばらつき、千葉実験所のデータにおいては変動係数0.07～0.15程度を示す。最大加速度を推定する際は最大加速度がこのような大きくばらつく性質を考慮すべきものだと考える。

参考文献

- (1)安中他(1987)第19回地震工学研究発表会, 129-132 (2)野田・山田(1981)第36回年次学術講演会, 395-396
 (3)日本道路協会(1980)道路橋示方書・同解説, 108 (4)土木研究所(1983)土木研究所資料第1993号, 51 (5)片山・佐藤(1984)第39回年次学術講演会, 803-804 (6)片山(1986)地震動の工学的距離特性に関する実証的研究
 (7)田中・福島(1987)第15回地盤振動シンポジウム, 7-16

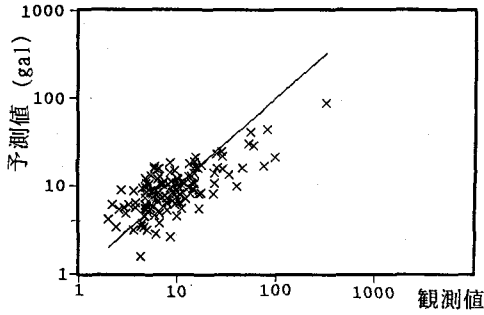


図7 観測値と予測値の関係 (gal)

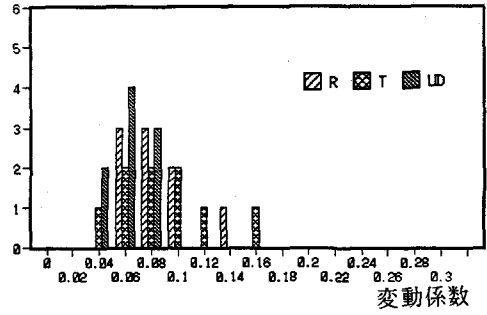


図8 GROUP1(5mGL-1m)の変動係数分布

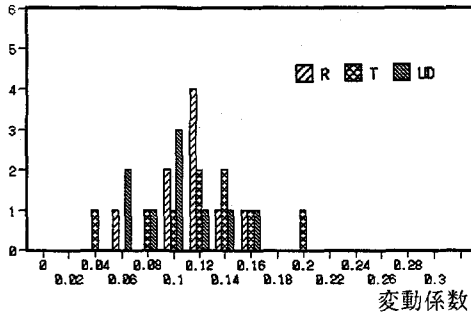


図9 GROUP2(15mGL-1m)の変動係数分布

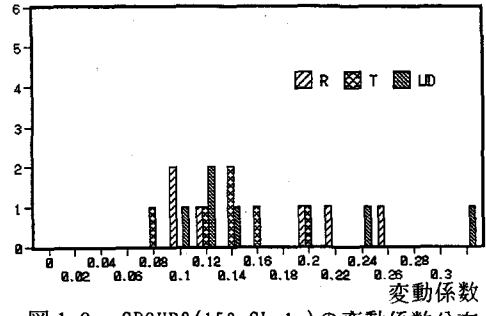


図10 GROUP3(150mGL-1m)の変動係数分布

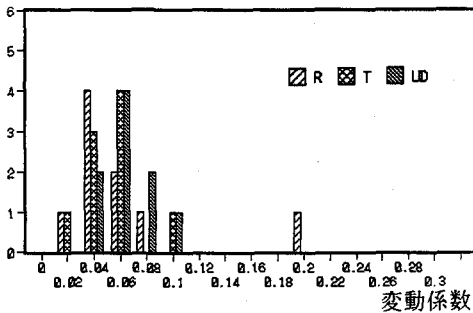


図11 GROUP4(5mGL-5m)の変動係数分布

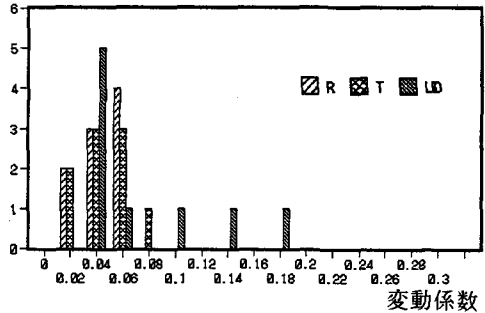


図12 GROUP5(5mGL-10m)の変動係数分布

表3 各地震による加速度の変動係数

DATE	Y	1985	1985	1985	1986	1987	1987	1988	1988	1988	
	M/D	6/8	10/4	11/6	2/12	12/17	12/17	1/16	3/18	8/12	
MAGNITUDE	km	4.8	6.1	5.0	6.1	6.7	4.6	5.2	6.0	5.3	平均
DEPTH	km	64	78	63	44	58	48	53	99	66	
EPC	D km	16	28	32	125	46	50	42	42	61	AVG
GROUP1	R	0.081	0.049	0.047	0.063	0.053	0.120	0.068	0.080	0.066	0.070
5m	T	0.085	0.076	0.038	0.152	0.087	0.102	0.043	0.062	0.055	0.078
GL-1m	UD	0.067	0.063	0.038	0.046	0.052	0.041	0.063	0.033	0.043	0.050
GROUP2	R	0.104	0.108	0.116	0.151	0.082	0.131	0.094	0.104	0.050	0.104
15m	T	0.183	0.123	0.036	0.082	0.155	0.116	0.074	0.136	0.110	0.113
GL-1m	UD	0.082	0.153	0.057	0.061	0.112	0.083	0.093	0.124	0.048	0.090
GROUP3	R	0.083	0.248	0.105	0.197				0.210	0.091	0.156
150m	T	0.125	0.140	0.069	0.180				0.111	0.120	0.124
GL-1m	UD	0.232	0.117	0.104	0.082				0.447	0.132	0.186
GROUP4	R	0.017	0.032	0.031	0.071	0.033	0.186	0.057	0.031	0.048	0.056
5m	T	0.037	0.015	0.054	0.090	0.032	0.048	0.048	0.027	0.041	0.043
GL-5m	UD	0.052	0.041	0.026	0.052	0.075	0.032	0.086	0.062	0.040	0.052
GROUP5	R	0.037	0.018	0.043	0.043	0.041	0.038	0.045	0.023	0.007	0.033
5m	T	0.027	0.027	0.026	0.072	0.014	0.041	0.047	0.040	0.019	0.035
GL-10m	UD	0.034	0.132	0.021	0.036	0.045	0.080	0.163	0.034	0.036	0.065