

(33) 関東および周辺地域の地震観測記録を用いた基盤における最大加速度推定式の検討

東電設計(株) 安中 正、山谷 敦
東京電力(株) 桃林治彦、野沢是幸

1. まえがき これまでに多くの最大加速度推定式が提案されているが、震源深さが最大加速度にどのような影響を及ぼしているかという問題と断層近傍の最大加速度をどのように推定するかという問題に関してはあまり明確になっていない。前者に関しては震源深さをどのように考慮しているかにより、また後者に関してはどのような距離を用いるかにより最大加速度の評価が大きく変わる場合がある。関東地方では震源がやや深い最上部マントルの地震活動が非常に活発であり、震源深さの影響を明らかにすることが特に重要である。本研究では、東京電力(株)の地震観測点のデータに基づき、断層近傍の最大加速度の特徴と調和的かつ震源深さの影響を考慮した最大加速度推定式を示す。

2. データ及び解析方法 関東及び周辺地域の41観測点で得られている記録のうち、1971年から1986年の間に発生した震源深さが100km未満の45個の地震の記録を用いた。地震の震央分布を図-1に示す。表層地盤のS波速度が300m/s未満の観測点については1次元波動理論により推定されている基盤波形¹⁾を用い、その他の観測点については観測波形をそのまま用いた。最大加速度は高周波数および低周波数の雑音を除くためにバンドパスフィルターを通した波形から決定した。ただし、計器の振幅特性が0.2Hz程度から30Hz程度の範囲でほぼ平坦であることから計器特性の補正は行っていない。解析に用いたデータは水平2成分の最大加速度の平均値であり、データ数は319個である。データの分布を図-2に示す。マグニチュードが大きくて震央距離が小さい領域にはデータがない。従って、最大加速度が100galを超えているのは1個だけであり、大部分は数galから数十galの範囲にある。

解析に用いた方法は2段階の回帰方法²⁾であり、各観測点の最大加速度の平均的な違いを示す観測点補正値を考慮している。ただし、通常の1段階の回帰方法も比較のために用いている。2段階の回帰方法の第1段階の回帰式は次のとおりである。

$$\log a_{ij} = \sum_k \delta_{ki} \alpha_i + \sum_k \delta_{kj} \beta_j - c_d \log D_{ij} \quad (1)$$

ここで、添字*i*は地震の番号を、*j*は観測点の番号を示しており、 a_{ij} は最大加速度(gal)、 D_{ij} は距離である。 α_i 、 β_j 、 c_d が未知数であり、 α_i は*i*番目の地震の観測値の平均レベルを、 β_j は*j*番目の観測点の観測値の平均レベルを示している。 δ_{ki} および δ_{kj} はKroneckerのデルタである。観測点補正値 β_j は基盤のS波速度が大きいダム地点を除いた31地点の平均値が0となるように決定している。(1)式でマグニチュード等の代わりに α_i を用いているのがこの方法の特徴であり、距離減衰の形の検討とそのレベルの検討を分離しているのである。

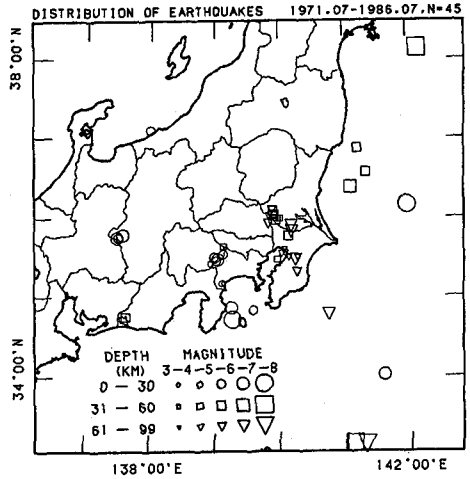


図-1 解析に用いた地震の震央分布図

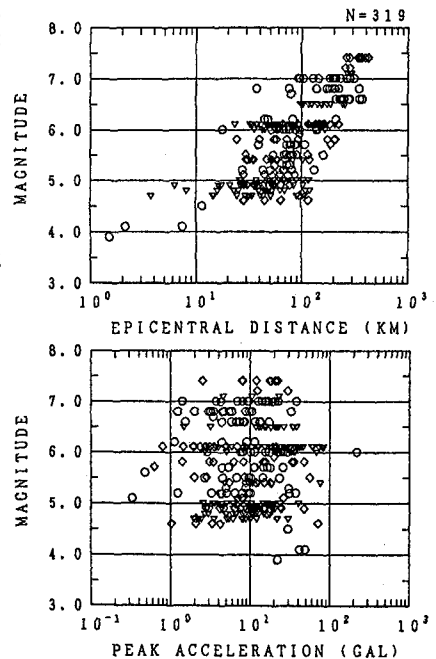


図-2 データの分布。震源の深さにより記号を分けている
○: 0-30km, ◇: 31-60km, ▽: 61-99km

第2段階の回帰では α_i を目的変数とし、地震の特性を示すパラメータを説明変数として回帰する。説明変数として用いるパラメータおよび回帰式の形は α_i の特徴に基づいて適切に決定する必要がある。本研究では後述する結果に基づいて次の式を用いている。

$$\alpha_i = c_m M_i + c_h H_i + c_0 \quad (2)$$

ここで、 M_i はマグニチュード、 H_i は震源深さ(km)である。

3. 震源深さの影響 距離Dの形を仮定し、(1)、(2)式を用いて解析した結果を表-1に示す。誤差の2乗和と重相関係数は第1段階の回帰に対するものである。Dの中に震源深さが含まれている場合には c_h が比較的大きくなっている。 α の回帰に(2)式を用いているのはこのためであり、 α に対する震源深さの影響を無視することはできない。震源距離Rを用いた場合を例に、 α に対してMとHが関係していることを示したのが図-3と図-4である。すなわち、図-3は α とMの間により相関があることを示しており、図-4は α をMだけで回帰した場合の残差(O-C)と震源深さの間にかなり明瞭な正の相関があることを示している。震央距離 Δ を用いた場合の誤差の2乗和は他と比べかなり大きくなっており、 Δ 以外の項を追加することが必要と考えられる。 Δ 以外の項を追加すると Δ が小さい範囲で最大加速度がほぼ一定となる。問題はその範囲が震源深さとどのように関係しているかという点であり、表-1の結果によると震源距離あるいは震源距離+定数(C(M))を用いるのがよいと考えられる。同様の傾向は(2)式を(1)式に代入した式を用いて通常の1段階の方法で回帰した場合の結果(表-2)にもみられる。

4. 断層近傍の最大加速度の特徴 断層近傍の最大加速度の特徴として、①断層近傍の最大加速度の評価には断層面までの最短距離を用いるのが適当であること、②断層近傍では最大加速度がほぼ一定になる範囲があり、マグニチュードが大きいほどその範囲が大きくなること、③断層近傍の最大加速度はマグニチュードによりあまり変化せずほぼ一定であることが指摘されている。②と③の特徴は次の形でモデル化することができる。³⁾

$$D = R + C(M)$$

$$C(M) = c_1 \exp(c_2 M) \quad (3)$$

ここでRは断層面までの最短距離であり、 $R = 0 \text{ km}$ の時に最大加速度がマグニチュードによらず一定となるためには、

$$c_m = c_2 \cdot c_1 \log e \quad (4)$$

の関係が成立している必要がある。図-2に示したように、今回のデータの中には断層近傍のデータがないため、データから c_1 と c_2 を決定することは困難である。そこで、これまでの研究成果^{3), 5)}と次に示す検討結果と調和するように c_1 と c_2 を決定することにした。

図-5は、小地震の記録から大地震の記録を合成する方法⁴⁾を用いて、表-3に示した代表的な2つのタイプの地震の断層近傍の最大加速度分布を検討した結果であり、1983年8月8日山梨県東部地震(M=6.0)の静岡県駿東部の観測点(震源距離28km)の基盤波形¹⁾を小地震の記録として用いている。断層面にどの程

表-1 2段階の回帰方法を用いた場合の距離Dの違いによる結果の比較
(Δ :震央距離, R:震源距離, H:震源深さ)

D	誤差の2乗和	重相関係数	c_0	c_m	c_h
Δ	13.82	0.865	1.075	0.470	0.00303
$\Delta+30$	11.50	0.889	1.949	0.538	0.00174
R	11.10	0.893	2.163	0.594	0.00711
$\Delta+H$	11.39	0.890	2.235	0.566	0.00961
$R+0.147 \exp(0.732M)$	10.96	0.895	2.443	0.674	0.00717
$R+0.35 \exp(0.65M)$	10.93	0.895	2.579	0.704	0.00715

表-2 1段階の回帰方法を用いた場合の距離Dの違いによる結果の比較
(Δ :震央距離, R:震源距離, H:震源深さ)

D	誤差の2乗和	重相関係数	c_0	c_m	c_h
Δ	20.83	0.801	0.971	0.434	0.00279
$\Delta+30$	19.04	0.820	1.674	0.485	0.00184
R	18.23	0.828	1.649	0.486	0.00645
$\Delta+H$	18.29	0.828	1.760	0.475	0.00840
$R+0.147 \exp(0.732M)$	18.16	0.829	1.838	0.543	0.00644
$R+0.35 \exp(0.65M)$	18.20	0.828	1.922	0.560	0.00642

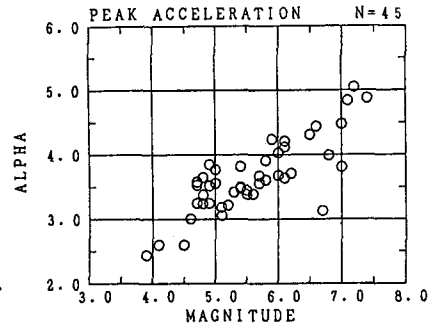


図-3 D=Rの場合の α とマグニチュードの関係

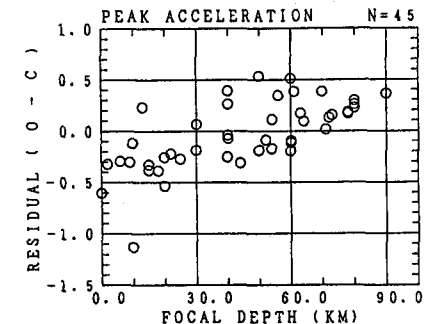


図-4 D=Rの場合の α の残差と震源深さの関係

度近い所まで方法を適用できるかという問題はありますが、垂直断層型の地震の場合には断層面までの最短距離が5km程度以下の範囲で、傾斜断層型の地震の場合には10km程度以下の範囲で最大加速度がほぼ一定になる傾向がみられる。この距離はこれまでの観測結果^{3), 5)} とほぼ一致している。なお、垂直断層型の場合には断層面までの最短距離と最大加速度がよく対応しているが、傾斜断層型の場合には断層面の真上にある点の方が距離が同じで断層面から離れている点よりも最大加速度が大きい傾向がある。

表-3 合成に用いた断層モデルの諸元

断層の型	垂直断層	傾斜断層
モーメントマグニチュード	7.4	7.9
断層の長さ (km)	80	95
断層の幅 (km)	15	54
くい違い量 (m)	3.7	4.8
傾斜角 (度)	90	25
断層上縁の深さ (km)	0.0	1.9
破壊速度 (cm/秒)	2.5	2.0
立上り時間 (秒)	3.0	5.0
断層面の分割数	8 × 3	9 × 9

(縦貫のS波速度は 3.5km/秒)

5. 最大加速度推定式 表-1と表-2の回帰係数を比較すると、表-1の方が全般に大きい傾向がある。これは回帰方法の違いによるものであり、表-1の場合には各地震毎に残差の平均が0となるようにしているのに対し、表-2の場合にはそのような条件はおかず全データの残差の平均のみを0としているためである。データ数が多い地震については残差の平均を0としてよいが、データ数が少ない地震については問題があると考えられる。そこで、最終的に推定式を決定する場合には、データ数が10個以上ある地震についてのみ残差の平均を0とするようにした。

c_1 と c_2 を決定するためには c_m と c_d が必要なることから、繰り返し計算により(4)式および $C(M)$ に関するこれまでの研究成果と図-5の結果を満足するように決定した。図-5に示した曲線は最終的に得られた $c_d = 2.212$ の場合に最適なものであり、そのときの $C(M)$ は49km (垂直断層) と55km (傾斜断層) である。この $C(M)$ の大きさと調和する値として最終的に $c_1 = 0.35$, $c_2 = 0.65$ とした。ダム地点を除いた31地点の平均的な最大加速度推定式は次のとおりである。

$$\log a = 0.627M + 0.00671H - 2.212 \log D + 1.711$$

$$D = R + 0.35 \exp(0.65M) \quad (5)$$

第1段階の回帰の重相関係数は0.868 残差の標準偏差は0.211 である。観測値と計算値の比較結果を図-6に示す。図-7は(5)式による減衰曲線の例である。Hを変化させた場合、 Δ が小さい所ではHが小さい方が最大加速度が大きくなっているが、 Δ が大きいところでは逆にHが大きいほど最大加速度が大きくなっているのがこの式の特徴であ

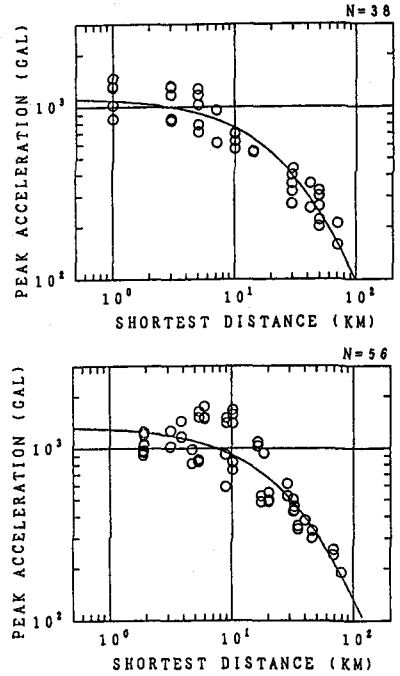


図-5 最大加速度と断層面までの最短距離の関係
上が表-3の垂直断層の場合、下が傾斜断層の場合

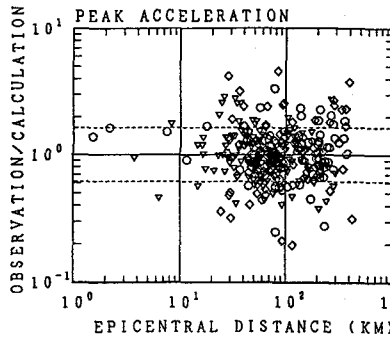


図-6 観測値と計算値の比と震央距離の関係、記号は図-2と同じである。

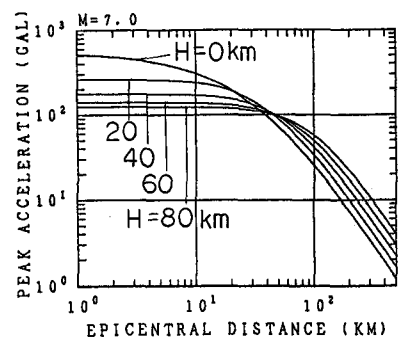
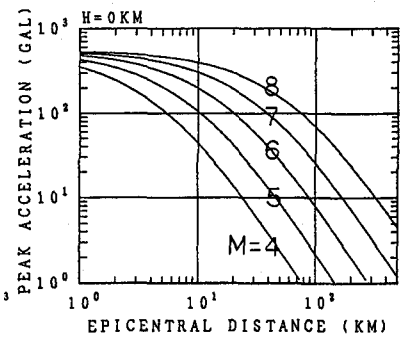


図-7 減衰曲線の例、上がHを0kmに固定してMを変化させた場合、下がMを7に固定してHを変化させた場合

り、0.00671H という項があるためである。震源距離が同じ場合に震源が深いほど最大加速度が大きくなる理由としては、伝播経路の減衰の違いと震源での応力降下量の違い⁶⁾が考えられる。

(5)式に対する各地点の観測点補正值と基盤のS波速度の関係を図-8に示す。S波速度が大きいほど観測点補正值が小さくなる傾向がみられる。ただし、S波速度が700m/s程度以下の観測点では補正值がS波速度にあまり関係なく ± 0.2 程度の範囲に分布しており、その範囲では(5)式が適用できると考えられる。S波速度が大きいのが関東周辺のダム地点であるため、減衰の違いや地形の影響等により最大加速度が小さくなっている可能性もあるが、関東地方平野部の観測点の最大加速度が「地震基盤」(S波速度3km/s)より上の層の影響で増幅している可能性が大きいと考えられる。

各地震毎にデータと(5)式による減衰曲線を比較した例を図-9に示す。参考としてこれまでに提案されている減衰曲線をあわせて示している。ただし、各地点のデータは図-8に示した観測点補正値を用いて補正したものである。(5)式による曲線は金井-Seed式による曲線と形がよく似ており、震源が比較的浅い地震の場合は大きさもほぼ一致しているが、震源が深い地震の場合は金井-Seed式の方がかなり小さくなっている。

6. あとがき 震源深さが最大加速度の距離減衰の形とともにそのレベルにも関係していることを示し、断層近傍の最大加速度の特徴を満足するような制約条件をつけて最大加速度推定式を決定した。また、最大加速度の大きさが基盤のS波速度の大きさと関係している可能性が大きいことを示した。ただし、本研究で用いたデータは最大加速度が100gal以下のものがほとんどであり、最大加速度が大きい場合へそのまま外挿できるかどうかについてはさらに検討する必要がある。

参考文献 1) 藤井・他(1987)第19回地震工学研究発表会(投稿中) 2) Joyner and Boore(1981) BSSA, 71, 2011-2038 3) Campbell(1981) BSSA, 71, 2039-2070 4) Irikura(1986) 第7回日本地震工学会シンポジウム, 151-156 5) 表・他(1978)日本建築学会大会, 549-550 6) Hanks(1978) JGR, 84, 2235-2242 7) Kanai et al.(1966) BERI, 44, 1269-1296 8) Seed et al.(1969) ASCE, SM5, 1199-1218 9) 田村・他(1979)第15回地震工学研究発表会, 181-184 10) Kameda and Sugito(1984) Conf. on Str. Analysis and Design of Nuclear Power Plant 11) Kawashima et al.(1984) 8WCEE, 2, 257-264

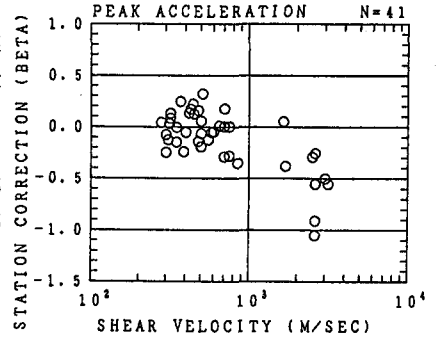


図-8 観測点補正值と基盤のS波速度の関係

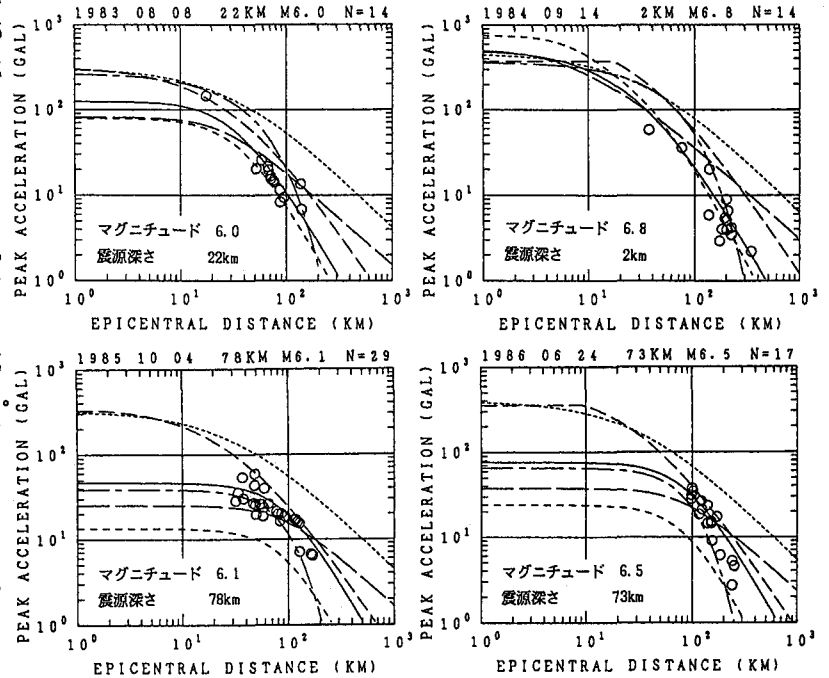


図-9 最大加速度の減衰曲線と観測データの比較

- (5)式
- - - 金井⁷⁾-Seed⁸⁾
- 田村⁹⁾
- - - 亀田¹⁰⁾
- · · 川島¹¹⁾
- - - Campbell³⁾