

工学的基盤における最大加速度等の断層面からの距離減衰の検討

運輸省港湾技術研究所 野津 厚*
運輸省港湾技術研究所 上部 達生*
運輸省港湾技術研究所 佐藤 幸博**

港湾地域強震観測等により得られている強震記録に基づき、工学的基盤での地震動の最大加速度および最大速度の距離減衰を検討した。工学的基盤における地震動は一次元の等価線形解析により求めた。回帰分析の目的変数としては工学的基盤における補正最大加速度・SMAC最大加速度・最大速度をとりあげた。一方、説明変数としては気象庁マグニチュードおよび断層面から観測地点までの最短距離を採用している。回帰分析手法としては、まず距離に関する回帰係数を求め、次にマグニチュードに関する回帰係数を求める二段階回帰分析手法を用いている。また、震源近傍における最大加速度等は、兵庫県南部地震により得られた値を反映させて決定した。得られた結果と、従来より港湾の分野で用いられてきている野田・上部の関係等との比較を行った。

1. はじめに

地震動の距離減衰式については、港湾の分野では野田ら¹⁾が1975年にSMAC-B2型強震計の記録に基づいて工学的基盤の最大加速度に関する距離減衰式を提案しており、これが一貫して用いられてきた。しかしながら、距離減衰式は統計解析に基づくものであるから、強震記録の蓄積が進んだ場合には新たなデータベースに基づき再検討を行うことが望ましい。また、野田らの式が提案された当時は得られていなかった震源近傍における強震記録が兵庫県南部地震で得られたので、これらの記録に基づいて距離減衰式の震源近傍における値を再検討する必要性が生じた。そこで、工学的基盤における最大加速度等の距離減衰式を新たに求めるとともに、野田らの式との比較を行った。

2. 統計解析の目的変数と説明変数

(1) 目的変数

一般に構造物を建設しようとするとき、工学的基盤面(N値50以上の地層の上面)より上の表層地盤に

キーワード：距離減衰、工学的基盤、断層面

* 運輸省港湾技術研究所構造部 0468-44-5030

**運輸省港湾技術研究所構造部 0468-44-5028

については比較的よく調査されており、その振動特性を検討することは可能である。一方、工学的基盤面以下の地盤条件については不明な点が多い。そこで、工学的基盤における地震動(正確には工学的基盤面に下方から入射する地震動の2倍)を統計的方法により求め、これを入力条件として表層地盤の地震応答解析を行うことが多い。このため、本検討では工学的基盤における地震動の最大加速度および最大速度を目的変数とした。基盤地震動は主としてSHAKE²⁾により求めた。成分については、水平2成分のうち大きい方と水平2成分の平均値の両者について検討した。

また、強震記録の最大加速度は観測に用いられた計器の特性により異なる値となることが知られている。例えば、港湾地域強震観測で用いられているSMAC-B2型とERS型の強震計を比較すると、ERS型は高周波帯域においてSMAC-B2型よりも感度が高いため、より大きな最大加速度を与える傾向にある。従ってこれら二つのタイプの強震計によって得られた最大加速度を混用して統計解析を行うことは好ましくない。港湾技術研究所では、ERS型強震計による記録からSMAC-B2型強震計による記録と直接比較可能な波形(SMAC相当波形)を求める手法を提示している³⁾。また、SMAC-B2型強震計により得られた記録からERS型強震計による記録(正確には若干の計器補整が加えられた補正記録)と等価な波形(これも補正記録と呼ばれる)を求めることもできる。そこで以下で

は補正記録の最大加速度を補正最大加速度、SMAC-B2型強震計による記録およびSMAC相当波形の最大加速度をSMAC最大加速度と呼んで区別する。本検討では工学的基盤における地震動の補正最大加速度とSMAC最大加速度のそれぞれについて距離減衰式を求めた。

(2) 説明変数

統計解析のための説明変数としては「地震の規模」を示す指標と「震源からの距離」を示す指標が必要である。「地震の規模」を示す指標としてここでは気象庁マグニチュードを用いた。「震源からの距離」を示す指標としては、「震央距離」や「震源距離」は震源近傍に近づくにつれて距離のパラメタとして不適当となるため、ここでは「断層面距離」を指標として用いた。地震学の成果として震源の断層面が与えられている地震⁴⁾についてはこれを参考として断層面距離を求めた。また、それ以外の地震では野田¹⁾に準じて震源を中心とする球状の震源域を仮定し、この震源域から観測地点までの最短距離をもって断層面距離の代用とした。この球の半径は次式により求める⁵⁾。

$$\log_{10} r = 0.5M - 2.25$$

ここで

r : 震源域の半径 (km)

M : 気象庁マグニチュード

近年の規模の大きな地震についてはほぼ漏れなく震源断層が与えられている。また規模の小さい地震については、球状の震源域を仮定して求めた距離と「断層面距離」との差は大きくない。従って一部の地震について厳密な意味での「断層面距離」が用いられていないことの影響は小さいと考えられる。

3. データベースの作成

データベース作成の手順は次の通りである。

まず港湾地域強震観測で得られている強震記録のうち、下記の2つの条件を満たすものを選択した。

- 1) 水平2成分のオリジナル最大加速度のうち少なくとも一方が50Galを越えていること
 - 2) 当該観測点で工学的基盤までの地盤条件が既知であること
- 次に、採用した地表または基盤での実測記録をも

とに、地盤の地震応答計算プログラムSHAKE²⁾を用いて基盤での地震動（正確には基盤面への入射地震動の2倍）を求めた。また、花咲港など、岩盤上に設置された強震観測点で得られた記録はそのまま基盤での地震動として採用した。さらに、強震計の計器特性を考慮して、基盤での補正最大加速度・SMAC相当最大加速度・最大速度を求めた。最大速度を求める際には固定フィルタを用いる方法³⁾を用いた。

また、神戸市開発局により提供を受けた平成7年兵庫県南部地震のポートアイランドにおける観測記録からSHAKEによりK.P.-79mへの入射地震動を求め、データベースに加えた。また、関西地震観測研究協議会より提供を受けた平成7年兵庫県南部地震の神戸大学および千早における強震記録および神戸海洋気象台における強震記録をデータベースに加えた。これらの記録を採用したのは、記録の得られた地点の地盤条件が工学的基盤に比較的近いと考えたことと、震源近傍におけるデータが不足しているためである。

以上の記録につき、気象庁マグニチュードと断層面距離を調べた。

さらに、Campbell⁶⁾が作成した米国における最大加速度のリストのうち地盤条件がC (soft rock) またはD (hard rock) であるものを最大加速度データベースに加えた。このリストには各記録の表面波マグニチュードが与えられているが、後の統計解析では表面波マグニチュードと気象庁マグニチュードの区別は特に行わなかった。またCampbellのリストに与えられている断層面距離をデータベースに加えた。

つぎに、水平2成分の最大地動の平均値を問題にしているため、水平2成分のうち1成分が欠けているデータは除外した。また、後述のように二段階回帰分析⁶⁾を行う関係上、一つの地震について複数の記録が得られていない場合にはその記録を削除した。また、複数のデータが得られている場合であっても、地震ごとの距離の回帰係数を求め、その値が非現実的な値となる場合にはその記録を除外した。具体的には

$$\log_{10} A = a M - b \log_{10} X + c$$

により地震ごとに距離の回帰係数 b を求め、その値が-2未満または10より大となる場合にはその記録を除

外した。ここにAは補正最大加速度 (Gal)、Mは気象庁マグニチュード、Xは断層面距離 (km)、a、b、cは回帰係数である。

このようにして作成したデータベースのデータ数は、補正最大加速度に関して71記録142成分、最大速度に関しては59記録118成分である。水平二成分の平均値に関する距離減衰式を求める際にはこのデータベース全体を用い、水平二成分の大きい方に関する距離減衰式を求める際にはデータベースの半分を用いた。

4. 距離減衰式の関数形

距離減衰式は、その導出の際に用いたデータの存在範囲を超えて外挿して用いられることがしばしばある。たとえば、記録の得られている距離の範囲を超えて震源近傍での地震動を予測するような場合である。このような外挿に耐える距離減衰式を求めるためには、地震動の理論的背景に基づいた回帰モデルを設定する必要がある。福島⁷⁾は震源至近距離で最大加速度がほぼ一定値に飽和し、震源域から離れた距離においては実体波による点震源の幾何減衰と粘性減衰の性質を持つようなモデルとして、次式に示すモデルを用いている。

$$\log_{10} A = a M - \log_{10} (R + d 10^{eM}) - b R + c$$

ここにAは最大加速度 (Gal)、Mはマグニチュード、Rは距離 (km)、a、b、c、d、eは回帰係数である。本検討では補正最大加速度、SMAC最大加速度、最大速度の三者に対してこのモデルを適用することとした。このモデルでは回帰係数にa = eという条件を付すと断層面近傍での最大加速度は $A_{R=0} = 10^c / d$ なるマグニチュードによらない一定値に収束する。本検討では震源近傍での最大加速度がマグニチュードによらないとの立場から、最大加速度に関する距離減衰式を求める際にはa = eという条件を付すこととした。最大速度についての距離減衰式を求める際には同様の条件は付していない。

5. 回帰分析手法 - 二段階回帰分析

統計解析により距離減衰式を求める際、最大加速度等のデータベースに対して単純に重回帰分析を当てはめた場合には、不当に小さい距離に関する回帰係数が求まる恐れがあると指摘されている^{7)、8)}。この難点を回避するために二段階回帰分析が有効であることが過去の研究により確かめられている^{7)、8)}。そこで、本検討では二段階回帰分析を行うこととした。回帰分析の手順は次の通りである。

1) 回帰係数dとeの初期値を設定する

2) 地震ごとの回帰係数 l_j を用意し、第1段階として

$$\log_{10} A = \delta_{ij} l_j - \log_{10} (R + d 10^{eM}) - b R$$

により距離の回帰係数bと地震ごとの回帰係数 l_j の値を求める。ここにAは補正最大加速度などの目的変数、Rは断層面距離、 δ_{ij} はi番目のデータがj番目の地震によるものである場合に1、そうでない場合に0である。

3) 第二段階として、

$$l_j = a M_j + c$$

により回帰係数aとcを求める。

4) もしeとaが一致していなければe = aとおき2)をもう一度行う。

5) もし2)を行った結果前回と同じbが得られなければ3)からもう一度やり直す。bが収束したら計算を終了する。

以上の方法により回帰分析を行うと、パラメタdおよびeの初期値の設定によって、断層面近傍での目的変数の値は様々に異なる値をとる。この原因としては、震源近傍におけるデータ数が遠方でのデータ数と比較して依然として少ないことがあげられる。そこで本検討では震源近傍の工学的基盤における最大加速度等の値を、神戸市内の強震記録および地盤条件を考慮してあらかじめ設定し、この値を満足するように収束計算時のパラメタdおよびeの初期値を設定することとした。

6. 回帰分析結果と考察

回帰分析の結果得られた距離減衰式は次の通りである。水平二成分の大きい方に対して

$$\begin{aligned} \log_{10} A_{COR} &= 0.55M - \log_{10}(X + 0.005 \cdot 10^{0.55M}) - 0.00122X + 0.502 \\ \log_{10} A_{SMAC} &= 0.53M - \log_{10}(X + 0.0062 \cdot 10^{0.53M}) - 0.00169X + 0.524 \\ \log_{10} V &= 0.48M - \log_{10}(X + 0.014 \cdot 10^{0.43M}) - 0.00060X - 0.324 \end{aligned}$$

水平二成分の平均値に対して

$$\begin{aligned}\log_{10}A_{COR} &= 0.59M - \log_{10}(X + 0.003 \cdot 10^{0.59M}) - 0.00156X + 0.232 \\ \log_{10}A_{SMAC} &= 0.51M - \log_{10}(X + 0.0069 \cdot 10^{0.51M}) - 0.00119X + 0.532 \\ \log_{10}V &= 0.49M - \log_{10}(X + 0.014 \cdot 10^{0.43M}) - 0.00070X - 0.436\end{aligned}$$

ここに

A_{COR} : 補正最大加速度 (Gal)

A_{SMAC} : SMAC最大加速度 (Gal)

V : 最大速度 (kine)

M : 気象庁マグニチュード

X : 断層面距離 (km)

である。これらの曲線を図示すると図-1~3に示すとおりとなる。図-4ではSMAC最大加速度の距離減衰式(水平2成分の平均値)を野田ら¹⁾による式と比較している。両者は目的変数・説明変数とも共通であるから、直接比較可能である。新旧の距離減衰式は震源近傍では値が異なるものの、遠方(数10km以遠)においては互いに整合性のあるものとなっている。このことは、野田らの式が当時の限られたデータの中で地震動の距離減衰特性を良く捉え得ていたことを意味すると考えられる。

7. まとめ

- 1) 強震記録の統計解析により工学的基盤における補正最大加速度、SMAC最大加速度および最大速度の距離減衰式を新たに求めた。
- 2) SMAC最大加速度に関する距離減衰式は、従来より

港湾の分野で用いられている野田らの式と遠方(数10km以遠)において整合するものとなった。

【参考文献】

- 1) 野田節男, 上部達生, 千葉忠樹: 重力式岸壁の震度と地盤加速度, 港湾技術研究所報告, 第4巻, 第4号, pp67-111, 1975年12月
- 2) P.B. Schnabel, J. Lysmer and H.B. Seed: SHAKE - A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC 70-10, Col. of Eng., University of California at Berkeley, 1970
- 3) 松永康男, 桜井博孝, 森田年一, 井合進: 港湾地域強震観測年報(1992年&1993年), 港湾技研資料, No.776, 1994年6月
- 4) 佐藤良輔編: 日本の地震断層パラメーター・ハンドブック, 鹿島出版会, 1989年3月
- 5) 勝又護: 地震動の最大加速度の推定, 験震時報, 第37巻, 第3号, pp79-87, 1972年1月
- 6) Kenneth W. Campbell: Near-Source Attenuation of Peak Horizontal Acceleration, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 71, No.6, pp2039-2070, December 1981
- 7) 福島美光: 地震波の発生, 伝播の理論を背景とした入力地震動の経験的予測, ORI研究報告, 93-07, 清水建設株式会社, 1994年3月
- 8) 井合進, 倉田栄一, 向井健: 地震最大加速度の距離減衰, 港湾技研資料, No.724, 1992年3月

ATTENUATION OF PEAK BASE-LAYER ACCELERATION, ETC. FROM FAULT PLANE

Atsushi Nozu, Tatsuo Uwabe, Yukihiro Sato

Attenuation characteristics of peak base-layer motion (2E) is studied using accelerograms obtained mainly by strong motion observation in port and harbour area in Japan. In this study, "base layer" means the base of engineering definition. Database for the regression analysis consists of base-layer motions, which are obtained by 1-D equivalent-linear analysis of ground. Using two-step regression analysis, empirical attenuation relations for peak corrected acceleration, peak SMAC-equivalent acceleration and peak velocity on base layer are derived. JMA magnitude and fault distance are used as explanatory variables. Results are compared with conventional Noda-Uwabe attenuation relations.

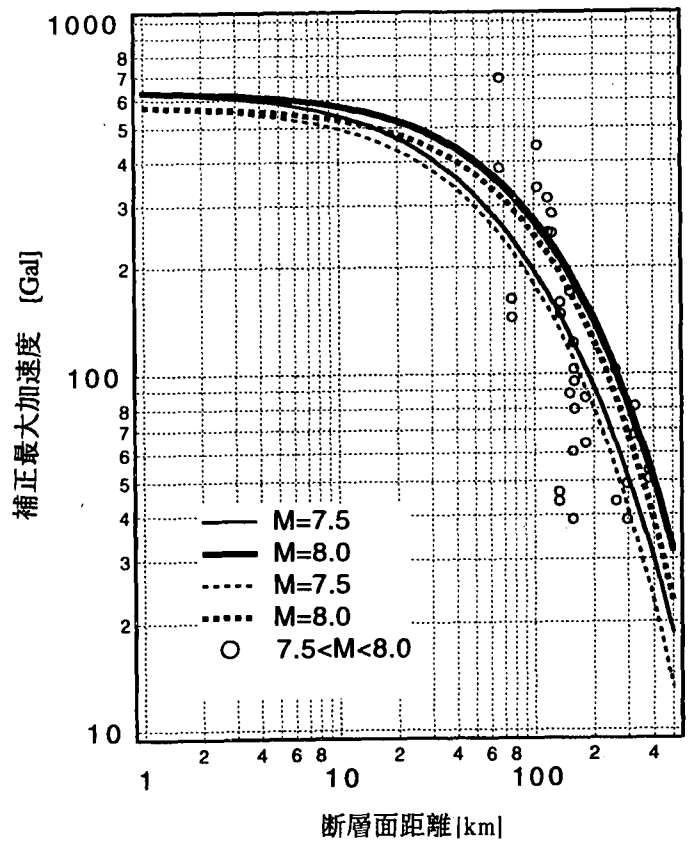
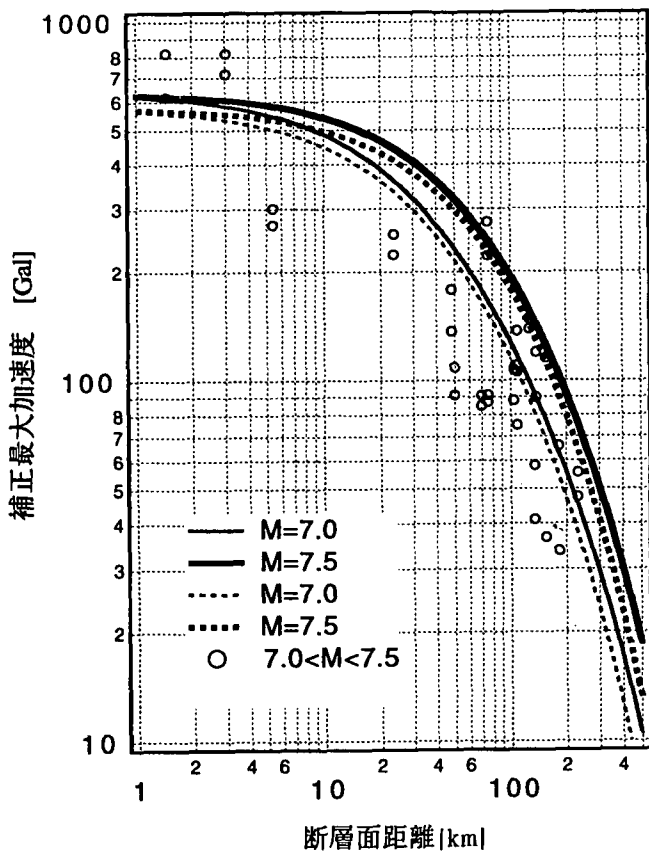
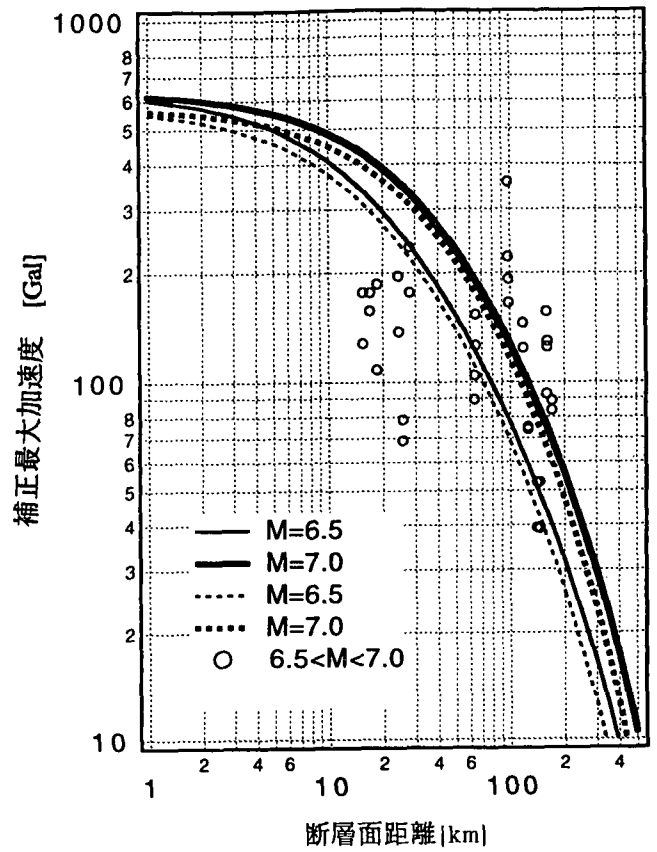
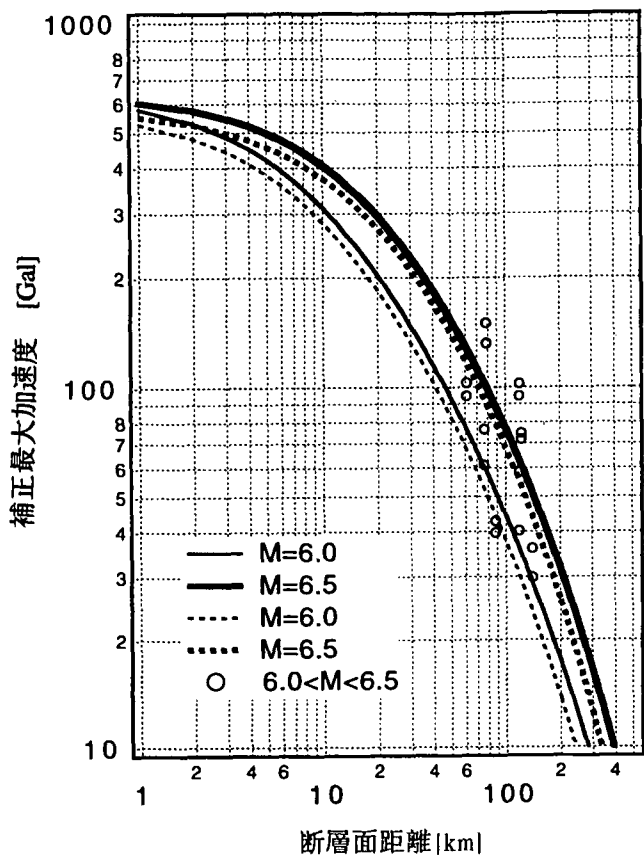


図-1 補正最大加速度の距離減衰式
 実線は水平二成分の大きい方についての式、
 破線は水平二成分の平均値についての式を示す。
 ○は統計解析に用いられたデータを示す。

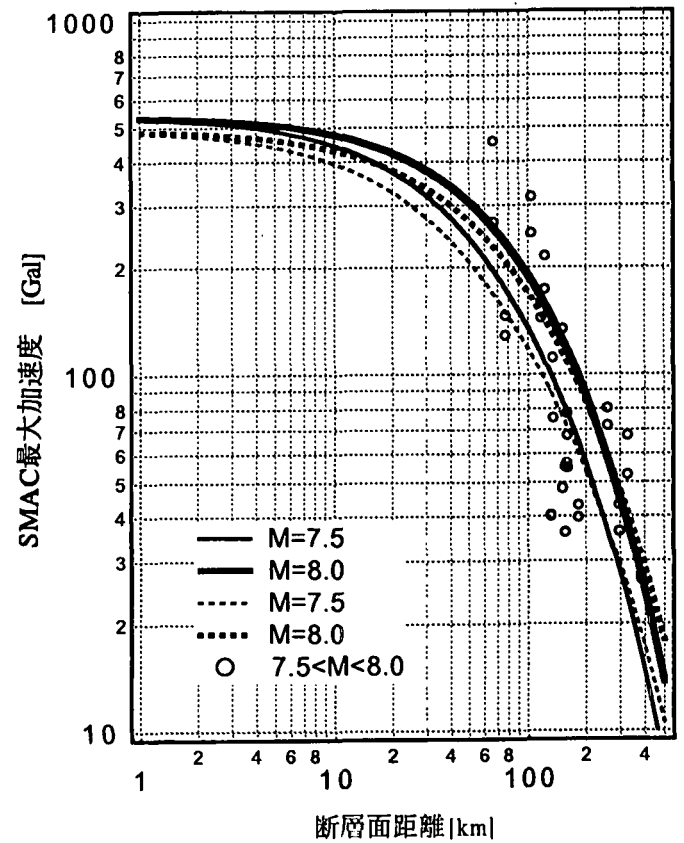
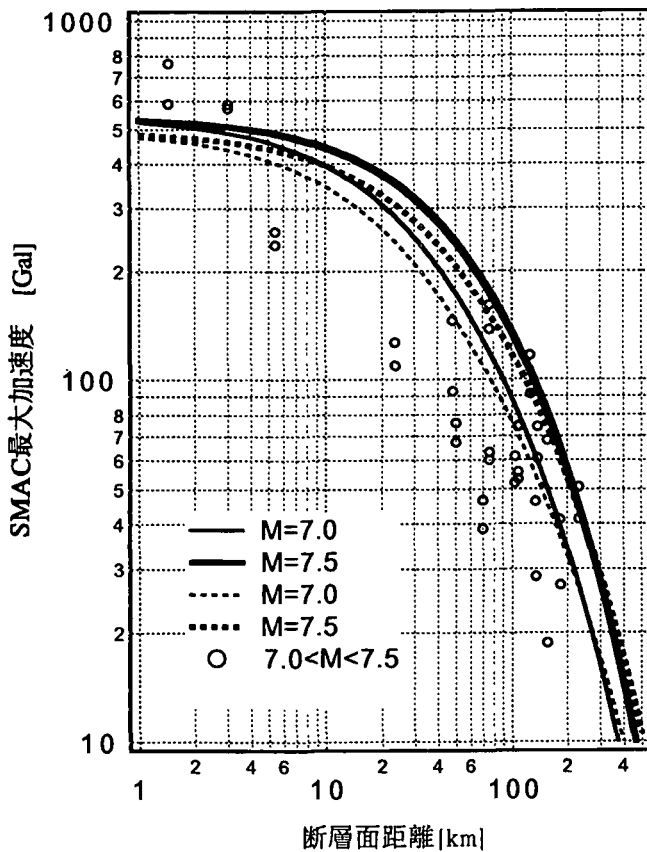
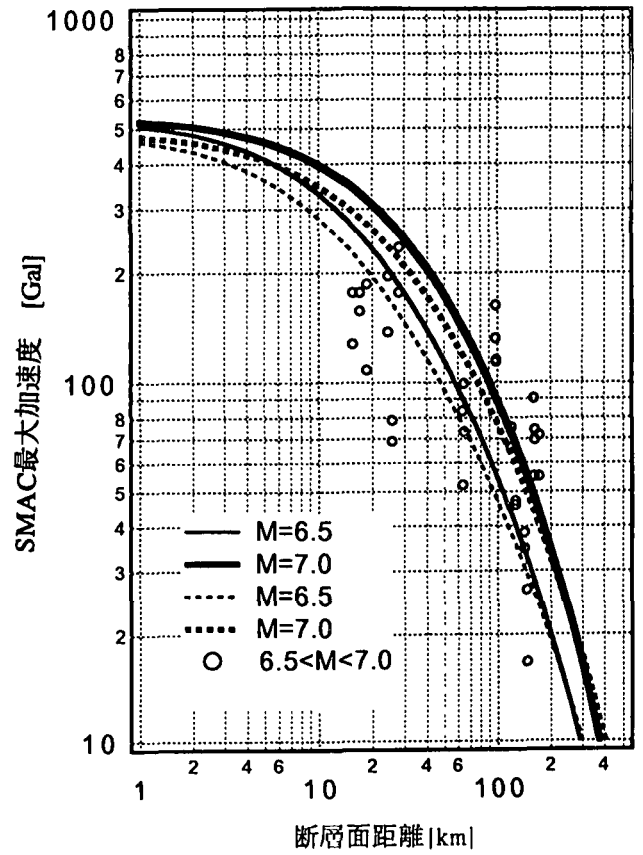
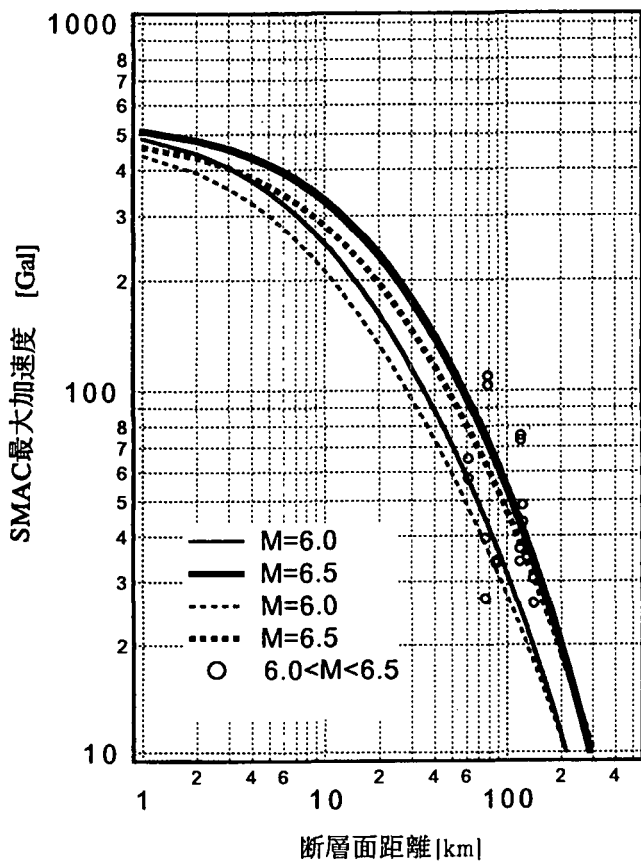


図-2 SMAC最大加速度の距離減衰式

実線は水平二成分の大きい方についての式、
 破線は水平二成分の平均値についての式を示す。
 ○は統計解析に用いられたデータを示す。

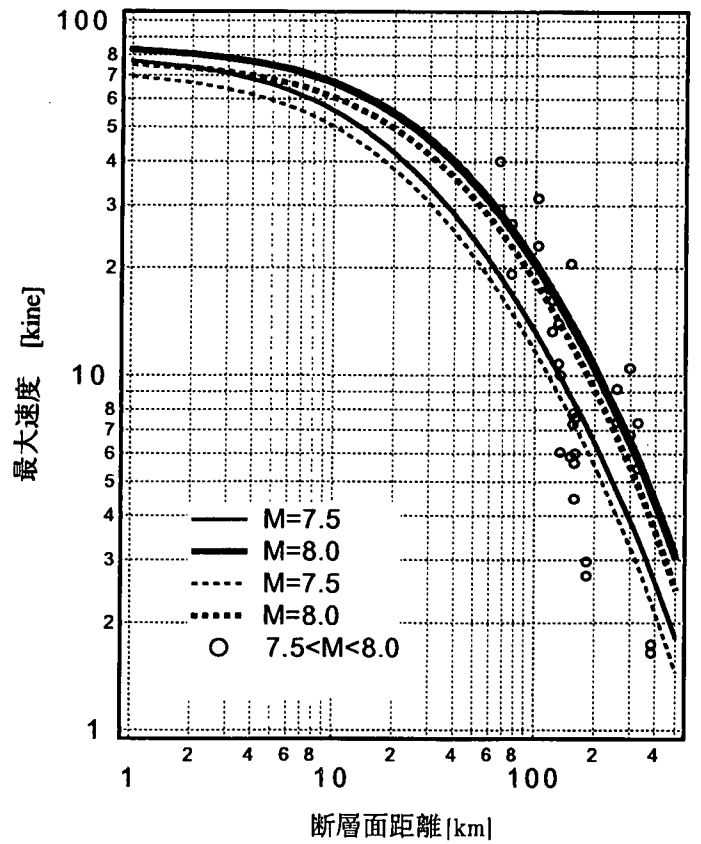
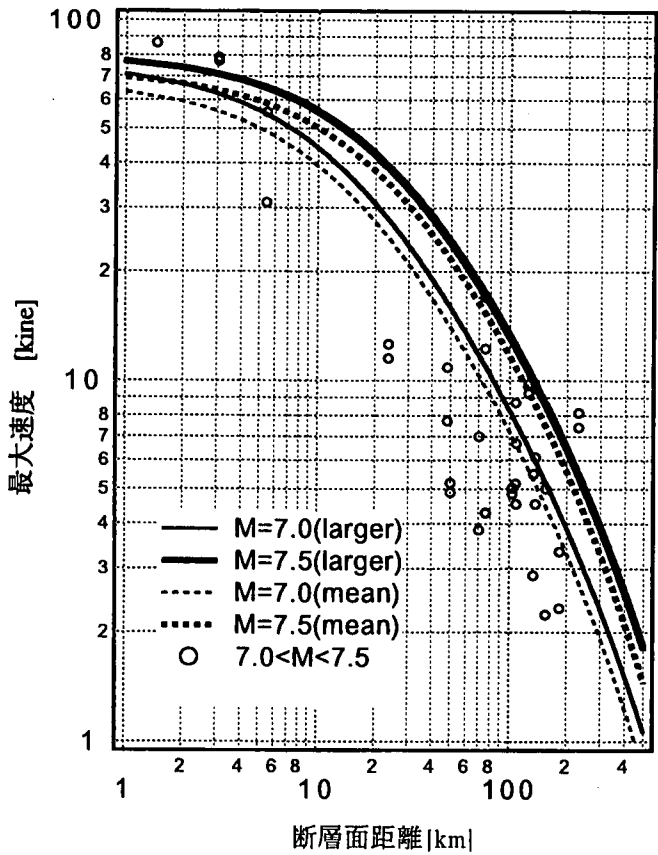
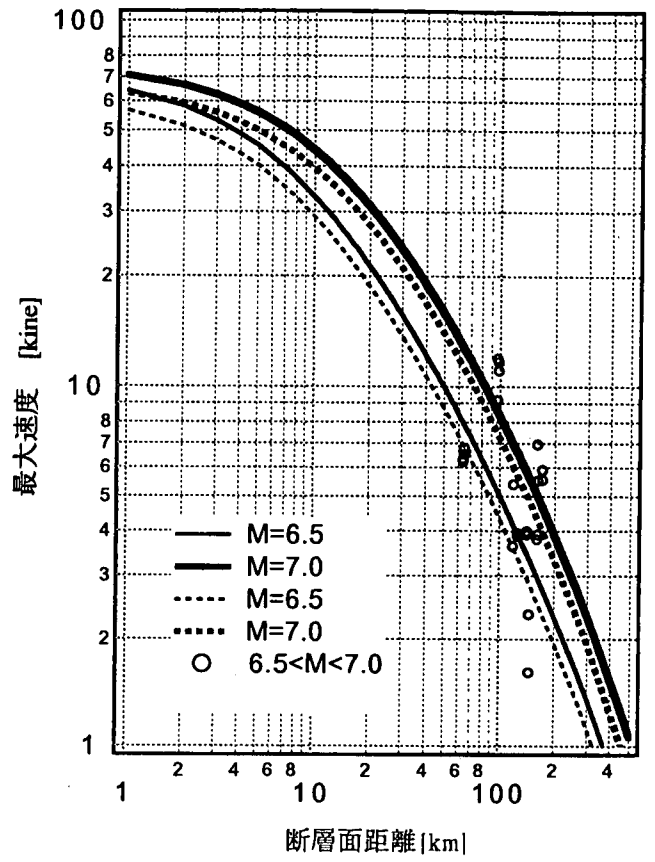
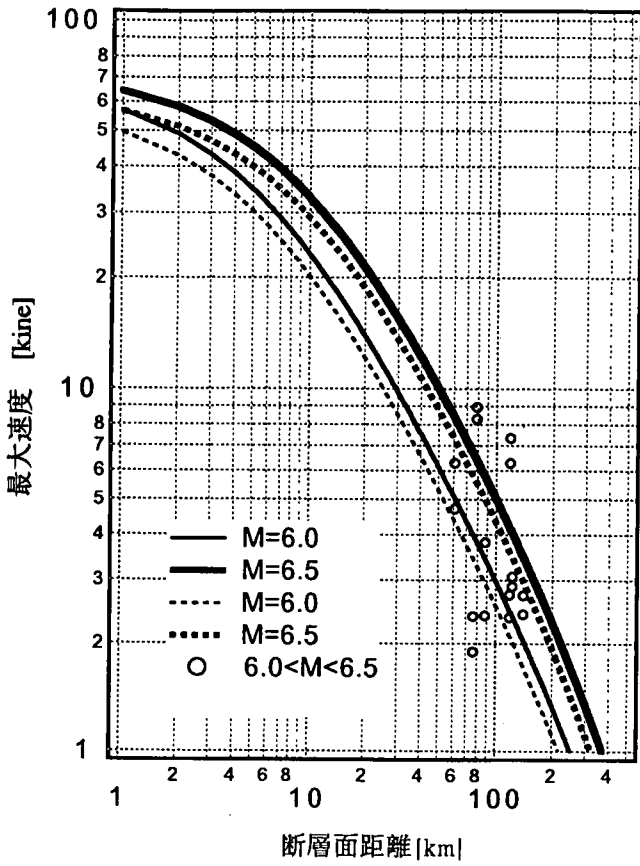


図-3 最大速度に関する距離減衰式
 実線は水平二成分の大きい方についての式、
 破線は水平二成分の平均値についての式を示す。
 ○は統計解析に用いられたデータを示す。

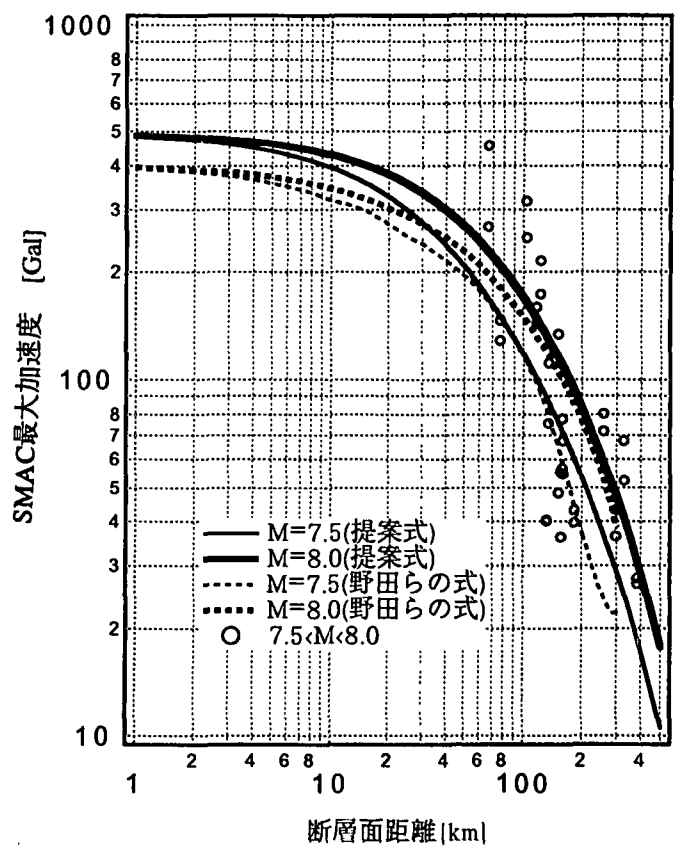
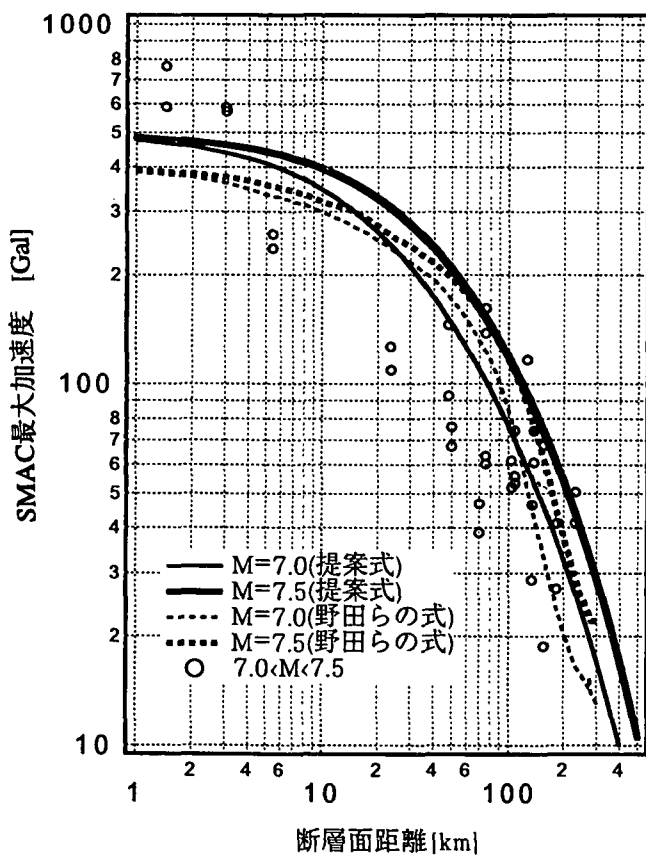
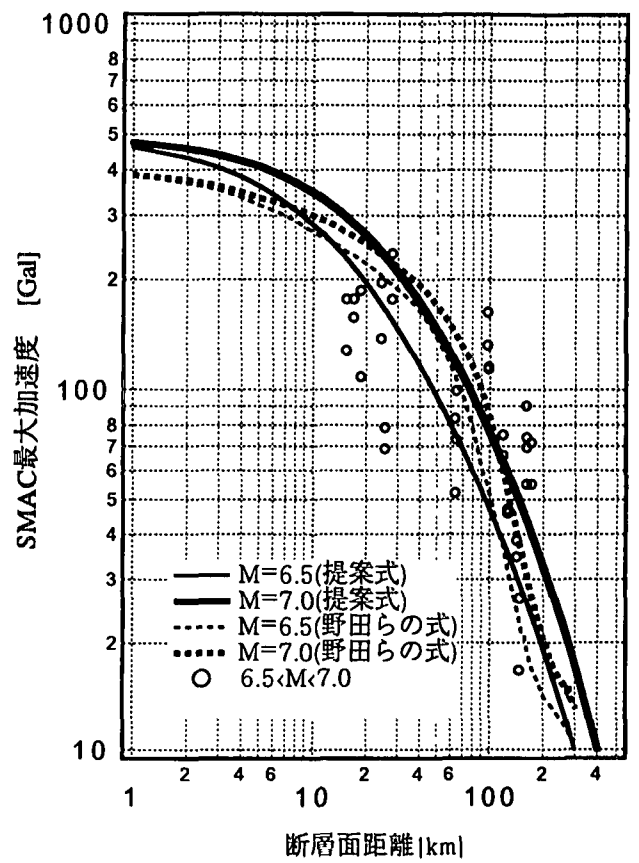
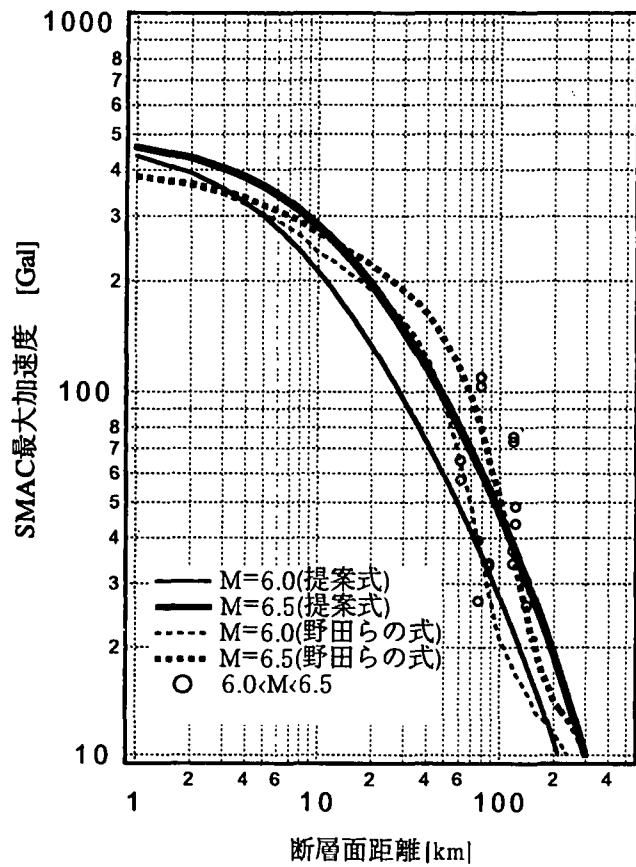


図4 SMAC最大加速度（水平二成分の平均値）に関する距離減衰式と野田らの式（1975）との比較
（両者の目的変数と説明変数は共通であるから直接比較できる）