

地震動の最大地動予測における N 値を用いた 地盤条件の評価法について*

USE OF N -VALUE PROFILES FOR ESTIMATION OF SITE-DEPENDENT EARTHQUAKE MOTIONS

後藤尚男**・亀田弘行***・杉戸真太****
By Hisao GOTO, Hiroyuki KAMEDA and Masata SUGITO

1. 緒 論

本研究は、地震動予測における地盤条件としてこれまで用いられてきた定性的な地盤種別に対して、 N 値を用いた定量的な地盤条件の評価法を提案し、強震記録より得られた地動加速度、速度、変位のアテニュエーションモデルに対して提案した地盤パラメーターを導入したものである。

想定された地震規模と震央距離から着目する地点での地震動強度を予測することは、耐震工学における基本的課題である。このため、過去の強震記録を用いてマグニチュードと震央距離から回帰分析の手法により地震動パラメーターを統計的に推定することが多く行われてきた。これらの研究は、過去十数年における強震記録の蓄積とともに行われてきたものであり、その予測モデルはアテニュエーション式（またはアテニュエーションモデル）とよばれている。これまでに対象とされた地震動パラメーターには地動最大加速度^{1),2)}のほか最大速度³⁾、最大変位⁴⁾、地震動継続時間⁵⁾、さらに非正常地震動⁶⁾等がある。わが国ではおもに最大加速度が扱われてきたが、片山・岩崎・佐伯⁷⁾は加速度応答スペクトルのアテニュエーションモデルを提案し、応用面でもその成果が取り入れられつつある⁸⁾。しかしながら、わが国における強震記録は大半が SMAC 型強震計で得られたものであり、2~3 Hz 程度以上の高振動数域での感度低下を考慮すると計器特性の補正を行ったうえで用いるべきである。また、近年特に耐震性が重視されてきた地下埋設構

造物に対しては最大速度や最大変位が有効な外力であるが、これらの地震動パラメーターを得るには加速度記録の基線に関する補正も必要である。このような理由から、補正加速度記録を用いて最大加速度、速度、変位のアテニュエーション式が提案されている⁹⁾。

ところで、これまでに提案されてきたアテニュエーションモデルのもつばらつきは一般にかなり大きい。この要因としては、比較的長周期の地動振幅強度で測られるマグニチュードを地震規模のパラメーターとしていること、震源特性や波動の伝播経路が一律でないこと、地震動の観測地点での地盤条件が異なること等が挙げられる。このうち、ごく表層付近の地盤条件による地震動強度の増幅特性の違いを取り入れるため、道路橋耐震設計指針¹⁰⁾に示された第1種~4種までの定性的な地盤種別ごとに、アテニュエーション式を作成した研究¹¹⁾もあるが、定性的な地盤分類のみではモデルのもつ不確定性は依然として大きい。また、これまでに提案されてきたアテニュエーション式を比較すると、同じ地震動パラメーターの回帰係数が回帰分析で対象とするデータにより比較的大きく異なっている。これは、データの絶対量が不十分であることによる不安定性によることも考えられるが、むしろマグニチュードや震央距離の各レベルでのアテニュエーション特性が異なることを示唆しているものと考えられる。

以上のことをふまえ、本研究ではまずデータセットによる回帰分析結果の相違について検討し、しかる後用いるべきデータを選んで最大加速度、速度、変位のアテニュエーション式を提示した。すなわち、最大加速度を対象として、わが国でこれまでに得られた加速度記録のおもなものをほとんど含む346成分を用いてマグニチュードおよび震央距離の各領域におけるアテニュエーション特性を検討した。これらの検討をもとに、計器特性および基線に関する補正¹²⁾を施した補正記録84成分を用いて、最大加速度、速度、変位のアテニュエーション式を

* 昭和55年度土木学会関西支部年次学術講演会 (I-49)、土木学会第35回年次学術講演会 (I-193, 昭55.9)、および第17回自然災害科学総合シンポジウム (昭55.10)にて一部発表。

** 正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学教室
*** 正会員 工博 京都大学助教授 工学部交通土木工学教室
**** 正会員 工修 京都大学助手 工学部交通土木工学教室

求めた。さらに、地盤特性を連続的な変量で表わし、アテニュエーションモデルに取り入れることを検討した。すなわち、 N 値を用いた地盤の軟弱さの程度を表わす指標を定義し、強震観測地点での地盤資料¹³⁾を用いて地震動強度と地盤の軟弱さとの相関関係を検討した。そして、最大加速度、最大速度に関しては、それぞれ定義された地盤パラメーターをアテニュエーションモデルに導入することにより、表層付近の地盤の軟弱さによる地震動強度の増幅特性を有効に取り入れることができ、さらにモデルの不確定性の減少に効果があることを示した。最後に、これらの結果をもとに地盤の軟弱度指数を定義し、地震動の激しさからみた地盤分類に応用できる定量的な地盤パラメーターとして提案した。

2. 最大地動のアテニュエーション特性

(1) M, Δ 領域による最大地動のアテニュエーション特性の相違

本節では、わが国でこれまでに得られた加速度記録のうち 10 gal^{注1)} を超えるおもなデータ^{14)~16)} (水平 2 方向のうちの大きい方のみ) 346 成分を用いて、マグニチュード M 、震央距離 Δ の各領域におけるアテニュエーション特性を検討する。そして、ここで得られた結果を、次節で提案する最大加速度、速度、変位のアテニュエーション式の算定に関して対象とすべきデータの範囲を判断するための基礎資料とする。図-1 に用いたデータの M, Δ 分布および最大加速度の頻度分布を示した。

さて、 M, Δ の各領域におけるアテニュエーション特性を検討するために、上記のデータをマグニチュード M 、震央距離 Δ (km) および最大加速度の期待値に関してそれぞれ二分し、次に示す回帰式を用いて各 M, Δ 領域でのアテニュエーション式を求める。

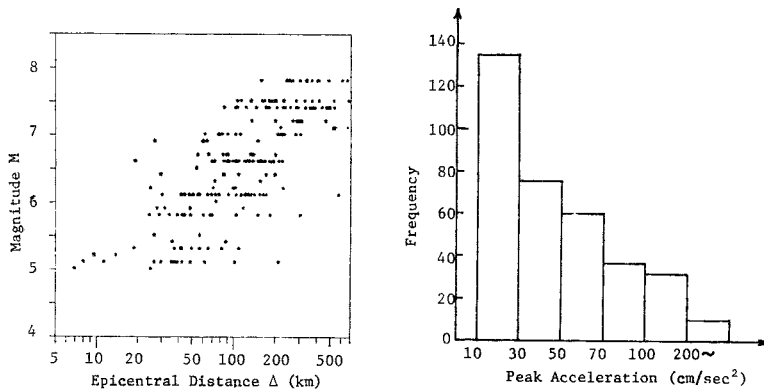


図-1 強震記録の M, Δ 分布と最大加速度の頻度分布

注 1) 1 gal=1 cm/sec²

$$\bar{Y} = b_0 \cdot 10^{b_1 \cdot M} / (d+c)^{b_2} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 \bar{Y} ：推定される地震動パラメーター (ここでは最大加速度)、 c ：定数 (km)、 b_0, b_1, b_2 ：回帰係数である。式 (1) のアテニュエーション式は、これまで地震動パラメーターの回帰式として多く利用されてきたものである。定数 c は、対象とするデータの震源深さの範囲や震央距離の範囲に対して決めるべきものである。ここで対象としているデータの震源深さは 0~60 km、震央距離は 10 km 程度以上であることより、 c の値は 10~数 10 km 程度の値にとればよいと考えられる。したがって、ここでは 30 km とした。

次にデータのばらつき U を次式に示すように実記録 Y とその地震の M, Δ から式 (1) により得られる期待値 \bar{Y} との比として表現する。

$$U = Y/\bar{Y} \dots \dots \dots (2)$$

したがって、

$$Y = U\bar{Y} = U\{b_0 \cdot 10^{b_1 \cdot M} / (d+c)^{b_2}\} \dots \dots \dots (3)$$

さて、ここで地震動データを M, Δ に関してデータ数が等しくなるよう以下のように分割した。

- 領域 $M_1 : M \geq 6.6$
- $M_2 : M < 6.6$
- $D_1 : \Delta \leq 119$ km
- $D_2 : \Delta > 119$ km
- $Y_1 : \bar{Y}^* \geq 39$ gal を与える M, Δ 領域
- $Y_2 : \bar{Y}^* < 39$ gal " " "

ただし、 \bar{Y}^* は上記の全データ (領域 T) を用いたアテニュエーション式の期待値を示しており、 $\bar{Y}^* = 39$ gal を与える $M-\Delta$ 曲線によりデータは二分されている。

表-1 に各 M, Δ 領域におけるアテニュエーション特性を示し、図-2 に各領域の M, Δ 分布を示した。また、図-3~5 に各領域でのアテニュエーションモデルの最大加速度の期待値 \bar{Y} と、マグニチュード M 、震央距離 Δ との関係を示した。これらの結果より以下のことがいえよう。

(i) 領域 M_1, M_2 における解析結果を比較すると、マグニチュードの係数 b_1 が領域 M_1 で大きく、また変動係数 δ_{M_1} が δ_{M_2} に比較して大きい。マグニチュード M は比較的長周期の地動振幅強度で測られるが、 M が大きくなると必ずしも地震規模を的確に表わさなくなることが指摘されている¹⁷⁾。図-6 は Geller¹⁸⁾ による表面波マグニチュード M_s と震源域面積 S および Seismic Moment M_0 との関係を示したも

表-1 M, d 領域による最大加速度のアテニュエーション特性 (地盤条件を考慮しない場合, 未補正記録 346 成分によるもの)

データの内容	領域名	アテニュエーション式	変動係数	データ数
全データ	T	$\bar{Y} = 78.0 \times 10^6 \cdot 3.66M / (d+30)^{1.067}$	0.696	346
$M \geq 6.6$	M_1	$\bar{Y} = 10.0 \times 10^6 \cdot 4.92M / (d+30)^{1.083}$	0.758	173
$M < 6.6$	M_2	$\bar{Y} = 375.0 \times 10^6 \cdot 2.17M / (d+30)^{1.158}$	0.603	173
$d \leq 119$ km	D_1	$\bar{Y} = 175.4 \times 10^6 \cdot 2.83M / (d+30)^{1.166}$	0.713	173
$d > 119$ km	D_2	$\bar{Y} = 41.5 \times 10^6 \cdot 3.66M / (d+30)^{1.068}$	0.671	173
$\bar{Y}^* \geq 39$ gal 以上 える M, d 領域	Y_1	$\bar{Y} = 61.0 \times 10^6 \cdot 2.75M / (d+30)^{0.891}$	0.773	173
$\bar{Y}^* < 39$ gal を与 える M, d 領域	Y_2	$\bar{Y} = 67.9 \times 10^6 \cdot 2.16M / (d+30)^{0.789}$	0.601	173

* 領域 T (全データ) におけるアテニュエーション式による期待値 (アテニュエーション式: $\bar{Y} = b_0 \cdot 10^6 \cdot M / (d+30)^{b_1}$, M : マグニチュード, d : 震央距離 (km))

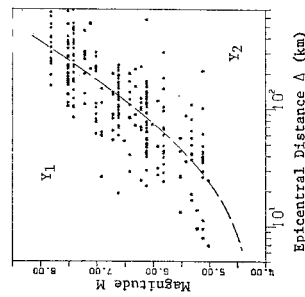
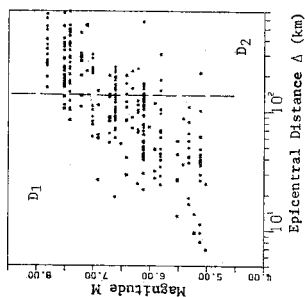
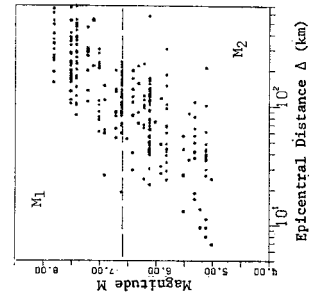


図-2 M, d による領域の分割

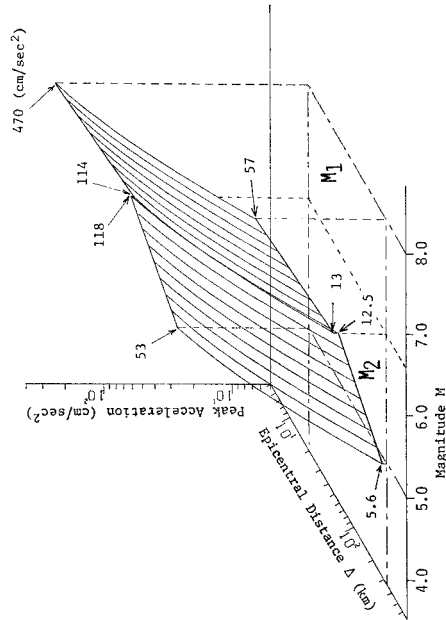


図-3 領域 M_1, M_2 における最大加速度のアテニュエーション特性

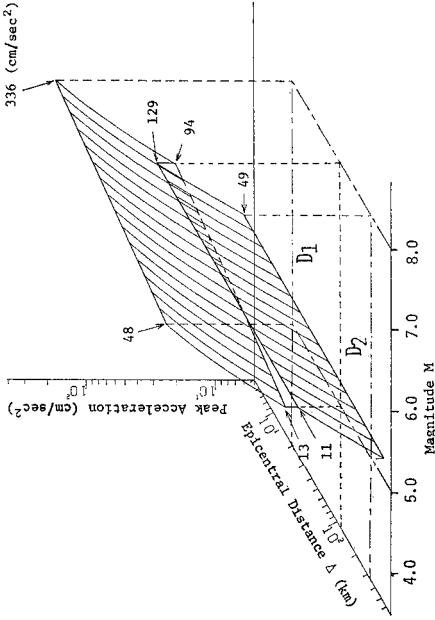


図-4 領域 D_1, D_2 における最大加速度のアテニュエーション特性

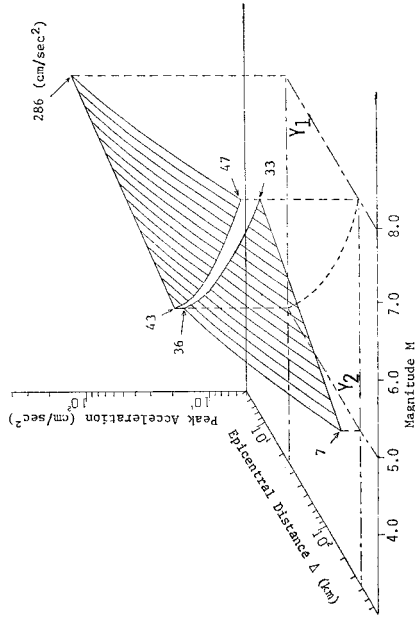


図-5 領域 Y_1, Y_2 における最大加速度のアテニュエーション特性

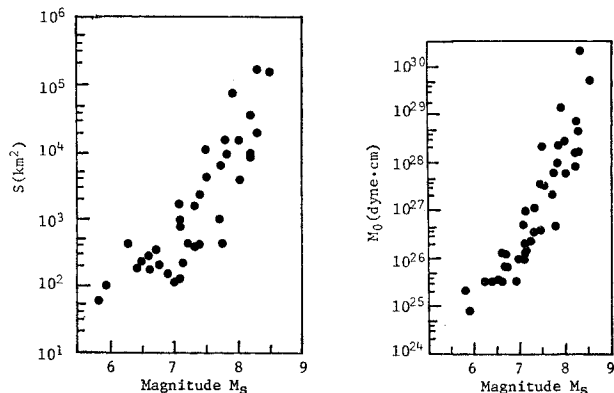


図-6 震源域面積 S およびサイズミックモーメント M_0 とマグニチュード M_s との関係⁽⁶⁾

のであるが、 $M_s=7$ 程度を境として、 M_s が大きい領域では M_s に対する S および M_0 の増加の傾向が相対的により顕著になっている。図の縦軸が対数軸であることを考慮すると、震源域面積や Seismic Moment のような物理量がマグニチュードに対して指数関数的に増大し、そのばらつきも M_s が大きいほど大きくなることはいえる。ここで用いている気象庁で決められたマグニチュード M は必ずしも表面波の振幅を用いてはいないが、比較的 M_s に近い値とされている²⁷⁾。これらのことより領域 M_1 での係数 b_1 が大きくなり変動係数 δM も大きい理由が容易に推察できる。また、このようなマグニチュードのレベルによるアテニュエーション特性の変化は Boore⁽⁹⁾ らによる米国の記録を用いた解析にもみられ、その定性的傾向はここで得られた結果と同様である。

(ii) 領域 D_1, D_2 における解析結果を比較すると震央距離の係数 b_2 は両領域で大差なく、最大加速度の減衰の度合が $\log(d+c)$ に対して比較的安定していることを示している。マグニチュードの係数 b_1 が領域 D_2 で大きくなるのは、この領域では比較的 M が大きいデータが多く (i) で述べた傾向がこの領域での解析結果にも現われているものと考えられる。

ここでは、 d に関してデータを二分しているため領域

の境界値が $d=119$ km となっている。このような解析はむしろ近距離型とそれ以外の地震に分ける、すなわち領域の境界値を $d=40\sim 50$ km 程度にと行うことも考えられるが、ここでは d の大小の各領域での定性的傾向をみるのみにとどめた。

(iii) 領域 Y_1 は最大加速度が平均的に 40 gal 程度を超えるような $M-d$ 領域であり、 Y_2 はその逆の領域である。両者の解析結果を比較すると、領域 Y_1 での変動係数が比較的大きく、 M が大きい領域が多く含まれていることによるものであろう。係数 b_1, b_2 も領域 Y_1 で多少大きくなっている。

一方、表-2 に、わが国における強震記録を用いたこれまでに提案された最大加速度のアテニュエーション式の例を示した。片山⁽¹⁰⁾ および佐伯・片山・岩崎⁽¹¹⁾ の全データにおけるアテニュエーション式は、本解析例における領域 T (全領域) あるいは領域 D_2 ($d \geq 119$ km) での式に比較的近い傾向にある。それに対して、後藤・亀田・今西・橋本⁽⁹⁾ のアテニュエーション式は、 M の係数 b_1 および d の係数 b_2 がともに小さく、本解析例では領域 Y_1 での式に近い傾向にある。片山⁽¹⁰⁾ あるいは佐伯・片山・岩崎⁽¹¹⁾ が対象としたデータが本解析における領域 T (全領域) に相当するものであり、後藤・亀田・今西・橋本⁽⁹⁾ が対象としたデータが領域 Y_1 に相当するものであることを考慮すると、本解析での結果はここで挙げた他のアテニュエーション式と定性的にほぼ一致しているといえる。

さて、これまでに得られた結果より、 $M-d$ 領域により最大加速度のアテニュエーション特性は多少異なることが示された。特に、 M に対する依存度が M が大きい領域と小さい領域で異なり、 M が大きい領域ではデータの変動も大きいことがわかった。

ところで、耐震工学の問題で対象となる地震動は、最大加速度で数 10 gal 以上のいわゆる強震が主であり領域 Y_1 に相当する地震である。したがって、地震動強度のアテニュエーション式を得る場合はこのような領域の

表-2 最大加速度のアテニュエーション特性に関する従来の研究

著者	地震動データセット	アテニュエーション式	データの変動係数
(1) 片山 (1974) ⁽¹⁰⁾	1963 年～1970 年にわが国で得られた 46 地震による 330 の記録。水平 2 成分の平均値、 $M=5.1\sim 7.8$	$A_{\max}=9.59 \times 10^{0.466M}/d^{1.290}$ $A_{\max}=203 \times 10^{0.411M}/(R+30)^{1.637}$	0.877 0.942
(2) 佐伯・片山・岩崎 (1977) ⁽¹¹⁾	わが国で得られた $M=5$ 以上の記録。第 1, 2, 3, 4 種地盤に対してそれぞれ 29, 74, 127, 68.	第 1 種地盤 $A_{\max}=28.5 \times 10^{0.207M}/d^{0.898}$ 第 2 種地盤 $A_{\max}=13.2 \times 10^{0.330M}/d^{0.806}$ 第 3 種地盤 $A_{\max}=32.1 \times 10^{0.254M}/d^{0.757}$ 第 4 種地盤 $A_{\max}=6.47 \times 10^{0.430M}/d^{0.977}$ 全データ $A_{\max}=18.4 \times 10^{0.302M}/d^{0.800}$	
(3) 後藤・亀田・今西・橋本 (1978) ⁽⁹⁾	基線補正と計器補正を行った記録 45 成分。沖積地盤で記録されたもので、最大加速度 50 gal 以上のもの。	$A_{\max}=407 \times 10^{0.160M}/(d+30)^{0.752}$	0.443

(A_{\max} : 最大加速度 (cm/s²), M : マグニチュード, d : 震央距離 (km), R : 震源距離 (km))

データを対象とし、なおかつ (i), (ii) で述べたことを考慮しておくことが重要と考えられる。以下次節では、ここで得られた結果をふまえ、領域 Y_1 に属する強震記録を対象として最大加速度・速度・変位のアテニュエーション式を提示する。

(2) 強震記録の補正効果を考慮した最大地動のアテニュエーション式

本節では前節の結果を考慮して領域 Y_1 に属する強震記録を対象とし、加速度記録を補正¹²⁾した補正加速度波形より最大加速度、最大速度、最大変位を求めて、これらの地震動パラメータのアテニュエーション式を提示する。対象としたデータは、1978年宮城県沖地震(18成分)および伊豆半島沖地震(6成分)を含む28地震による84成分である。特殊な地盤条件(岩盤あるいはきわめて軟弱な地盤)でのデータによるモデルのばらつきや回帰係数が大きく影響を受けることを避けるため、ここで用いたデータは一般の沖積および洪積地盤(第2,3種地盤²⁰⁾)に相当)で得られたものである。

図-7に対象としたデータの最大加速度の頻度分布を、図-8にデータの M -

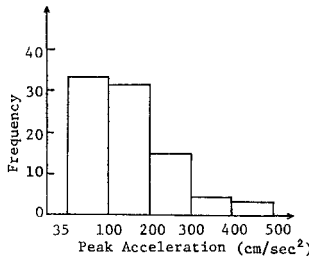


図-7 補正最大加速度の頻度分布 (補正加速度記録84成分)

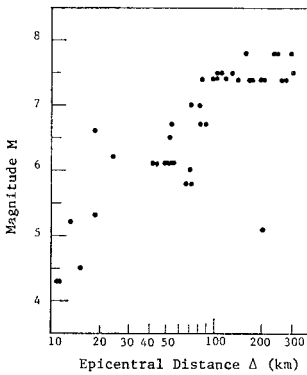


図-8 強震記録の M, Δ 分布 (28地震84成分)

表-3 補正最大地動のアテニュエーション特性 (第2,3種地盤での平均値)

	アテニュエーション式	変動係数 δU
最大加速度	$\bar{A} = 202 \times 10^0 \cdot 1.78 M / (\Delta + 30)^{0.666}$	0.578
最大速度	$\bar{V} = 1.17 \times 10^0 \cdot 232 M / (\Delta + 30)^{0.300}$	0.655
最大変位	$\bar{D} = 0.0288 \times 10^0 \cdot 356 M / (\Delta + 30)^{0.219}$	0.685

アテニュエーション式: $\left. \begin{matrix} \bar{A} \\ \bar{V} \\ \bar{D} \end{matrix} \right\} = b_0 \cdot 10^{b_1 M} / (\Delta + 30)^{b_2}$

- A: 最大加速度 (cm/s²)
- V: 最大速度 (cm/s)
- D: 最大変位 (cm)
- M: マグニチュード
- Δ : 震央距離 (km)

4分布を示した。さらに、式(1)において $c=30$ km として最大加速度、最大速度、最大変位についての回帰分析を行い、その結果を表-3に示した。なお、式(1)における定数項 c の値については前節でも述べたように

に検討の余地はあるが、ここで用いたデータの震央距離もすべて 10 km を超えるものであり、また震源深さは 0~40 km の範囲にある。このような場合、 $c=0\sim 50$ km 程度の範囲におけるアテニュエーションモデルの期待値や変動係数はほとんど変化しない。参考までに図-9に、 $0 \leq c \leq 50$ km の範囲での最大加速度のアテニュエーション式まわりのデータの変動係数を示した。

さて、ここで得られた最大加速度の結果を前節の領域 Y_1 の結果と比較すると、 b_1, b_2 はともに小さいが b_0 が大きく、平均的に大きい加速度を与える回帰式となっている。ここで用いた強震記録の大部分を供給した SMAC-B2 型加速度計の場合、原記録を補正すると最大加速度は 1~3 割程度大きくなり¹²⁾、このような結果が得られた大きな要因であろう。またデータの変動係数 δU は、補正記録を用いた表-3の場合の方が表-1の場合より小さい。対象としている地盤がここでは沖・洪積地盤(第2・3種地盤)と限られており地盤条件が領域 Y_1 のそれより限定されていることによるものと考えられる。

さて、表-3の結果より、高振動数成分が卓越する最大加速度では b_2 の値が大きく相対的に距離減衰が顕著であり、逆に低振動数成分が卓越する最大変位では

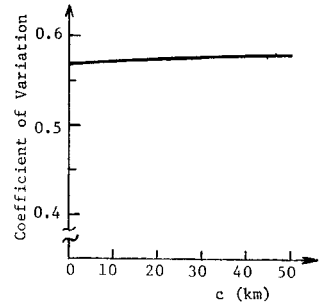


図-9 定数項 c とアテニュエーションモデルの変動係数

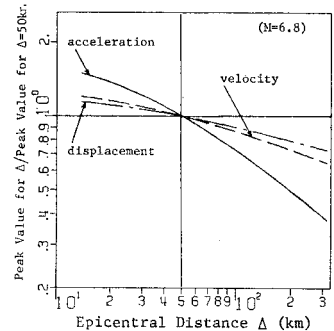
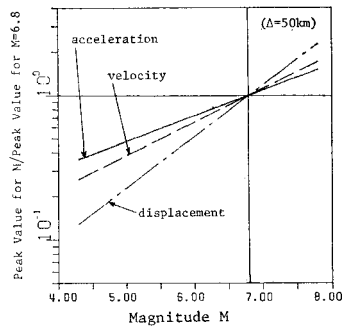


図-10 最大地動のマグニチュード、震央距離に対する依存度

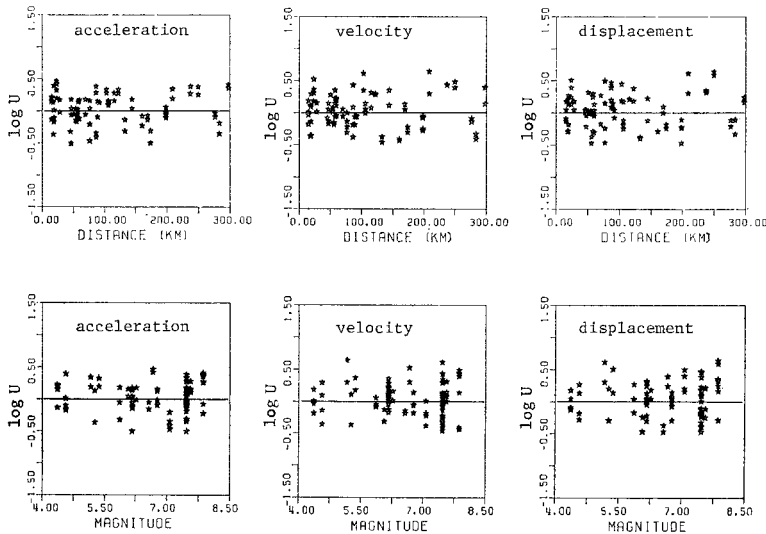


図-11 マグニチュード、震央距離に対する最大地動の平均値まわりのばらつき

b_1 の値が大きくマグニチュードへの依存度が強い。図-10 は、 $M=6.8$ 、 $d=50$ km での最大地動を規準として各最大地動の M 、 d に対する依存度を示したものである。

前節の考察 (i)、(ii) で述べた傾向をみるため、各最大地動の M 、 d 軸上でのデータのばらつき U を図-11 に示した。この図より、最大加速度、速度、変位ともマグニチュード、震央距離に対してほぼ一様にばらついているといえよう。したがって、ここでは最大加速度、速度、変位のアテニュエーション式の変動係数はそれぞれ一律に表-3 の値とし、次章での地盤条件を考慮したモデルの基礎モデルとする。

3. 最大地動予測における N 値を用いた地盤条件の評価

本章では、通常のボーリングを伴う地盤調査でほとんどの場合に測定される N 値を用いて地盤の軟弱さの指標を定義し、地震動強度のアテニュエーションモデルに連続量による地盤パラメータを導入する。

(1) N 値分布を用いた地盤の軟弱さの表現

一般に、ごく表層付近の地盤が軟弱なほど地表での地盤震動が大きくなることは、過去の多くの震害例からも明らかである。したがって、ここでは地盤の軟弱さの程度を表わす指標を次式のように定義し、地震動予測における地盤パラメータとしての有効性について以下に考察を加える。

$$S_i = \int_0^{d_s} \exp\{-r_1 \cdot N(x)\} \exp\{-r_2 \cdot x\} dx \cdots (4)$$

ここに、 $N(x)$ は深さ x (m) における N 値、 d_s (m) は N 値の得られているところまでの深さである。ただし、通常のボーリング調査における N 値の測定は、極端に軟らかい地盤を除いて N 値が 50 程度を超える深さまで行われることが多い。したがって、多くの場合 d_s は N 値がそれ以深で 50 程度以上となるところまでの深さと考えてもよいであろう。式 (4) の r_1 、 r_2 は定数である。このうち特に r_1 は正の定数とし、これにより S_i は N 値が小さく地盤が軟弱なほど大きな値をとるパラメータとした。また、 r_1 、 r_2 は次節で示すように、最大地動と

S_i との相関が最も高くなるように決定する。地盤の軟弱さを N 値を用いて地盤が軟弱なほど大きな値となるように表現する関数形は式 (4) 以外にも多く考えられる。このうち他の二、三の関数形を用いて次節で示すものと同様の解析を行ったが最大地動と S_i との相関に関しては大差はなく、その中でも相関の最も高い式 (4) の関数形を用いることとした。さらに、式 (4) の $\exp\{-r_2 x\}$ で示される深さ方向の重み関数は、これを考慮しない場合と比較して最大地動と S_i との相関がより高くなることより導入したものである。次節で示されるように r_2 も正の値をとり、このことは通常のボーリング資料が得られる 10~数 10 m 程度の範囲内において表層に近い部分の軟弱さが地表での地盤震動に大きく影響することを示すものと考えられる。

ところで、 N 値は比較的容易に得られる 1 つの土質定数であるが、その工学的応用事例が多くなってきた現在、土質による N 値の絶対値のもつ意味の違いを十分考慮する必要があることが指摘されている²¹⁾。たとえば粘性土ではそのコンシステンシーの程度を表わし、砂質土では相対密度を表わす指標として用いられるのもその一例である。また地盤の動特性を表わすパラメータとして S 波速度があるが、 N 値と S 波速度との関係を統計的に推定した研究も少なくない。その中でも、柴田²²⁾、田治米・望月・松田²³⁾、大久保・小川²⁴⁾らは土質によってその関係が異なることを指摘している。図-12 に文献 23) によるわが国の砂質土および粘性土での N 値と S 波速度との関係を、図-13 には文献 24) による大阪地盤での同様な解析結果を示した。周知のように、同一基盤に対する表層での地動振幅はその地盤での S 波速度に大きく依存しており、基盤と表層地盤の波動インピー

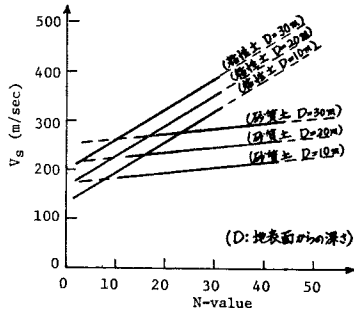


図-12 砂質土、粘性土における S 波速度と N 値の関係²⁴⁾

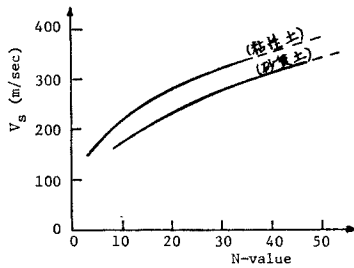


図-13 大阪地盤における S 波速度と N 値の関係²⁴⁾

ダンス比 $\rho_1 V_1 / \rho_2 V_2$ に支配される。このことと 図-12, 13 の結果とから、最大地動推定における地盤条件として N 値を利用する場合は土質によってある程度の修正をするのが妥当であろう。図-12, 13 において、N 値が 5~30 程度の範囲では、粘性土の S 波速度が砂質土に比べて大略 1~3 割程度大となっている。そこで、標準貫入試験がもともとは砂質土に対して適用されていたという歴史的背景を考慮して、砂質土を規準として他の土質の N 値を修正し、式 (4) の S_I の算定式に用いることとする。すなわち、 ζ_N を N 値の補正係数として粘性土、あるいは同様に砂質土より粒径の小さいシルトやローム等の土質に対しては ζ_N を 1.2 程度とする。一方、砂質土より粒径の大きな礫質土では、サンプラー先端での礫の抵抗が原因で N 値が過大となることが多く、同一の砂質土において数回測定した N 値のうち最小値に近い値がその層の他の土質定数とよく対応する事例の多いことが指摘されている²⁵⁾。したがって、礫質土に対しては ζ_N を小さくすることが妥当であろう。

このような理由から、最大地動の推定における地盤条件を N 値を用いて式 (4) で表わす場合、各土質に対して表-4 に示した N 値の補正係数 ζ_N を適用することとした。

表-4 最大地動推定における N 値の補正係数 ζ_N

土質	砂質土	粘性土, ローム, シルト	礫質土
ζ_N	1.0	1.2	0.8

(2) 地盤の軟弱さの指標 S_n とアテニュエーションモデルへの導入

2.(2) で得られた最大地動のアテニュエーションモデルと、そこで用いたデータが得られた強震観測地点の地盤資料¹³⁾とから、各最大地動に最適な地盤の軟弱さの指標を求める。

アテニュエーション式まわりのデータのばらつき U を、表層の地盤条件による最大地動の平均的な増減特性 C とそれ以外の要因 U_e とに分けることができよう。すなわち、

$$Y = U \cdot \bar{Y} = U_e \cdot C(S_n) \cdot \bar{Y} \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 S_n は以下に述べるように、 S_I の関数として定義される地盤の軟弱さの指標である。地盤条件による最大地動の増減率とでもいうべき C の常用対数を次式に示すように S_I の一次関数と仮定し、式 (6) まわりでのデータのばらつきが最小となるように係数 r_1, r_2, a_0, a_1 を決定する。

$$\log C = a_0 + a_1 S_I \dots \dots \dots (6)$$

このようにして、最大加速度、速度、変位に対する表層の地盤条件として有効な地盤パラメーターが得られるが、同じ地盤であっても最大加速度、速度、変位に対して S_I の値が大きく異なる。したがって、扱いを便利にするため S_I を正規化する²⁶⁾。すなわち、 $N(x)=0$ が半無限に続く地盤で $S_n=1, C=1$ のとき $S_n=0$ となるように S_n を定義する。このとき、

$$C(S_n) = 10^{(a_1/r_2 + a_0)S_n} = C_m S_n \dots \dots \dots (7)$$

$$S_n = (S_I - \beta) / (1/r_2 - \beta) \dots \dots \dots (8)$$

ただし、 $\beta = -a_0/a_1$ であり β は $C=1$ となるとき S_I の値である。また、 $C_m = 10^{(a_1/r_2 + a_0)}$ は地盤の軟弱さによる最大地動の補正係数 C の最大値である。表-5 に、式 (7), (8) 中のパラメーターの値および式 (5) の U_e の変動係数を示し、図-14~16 には、 S_n と回帰式からのデータの変動 $\log U$ との関係を示した。ここに示した地点数は 16 地点であり、対象となる強震記録は 58 成分である。最大加速度 (図-14) および最大速度 (図-15) においては、地盤パラメーター S_{na}, S_{nv} (添字の a, v, d はそれぞれ加速度、速度、変位を表わす) と $\log U$ とには比較的相関があり、地盤が軟弱なほど (S_n が大きいほど) 平均的に $\log U$ が大きいことを示している。図-14~16 中の実線は C と S_{na}, S_{nv}, S_{nd} との関係

表-5 地盤条件を考慮した最大地動推定のためのパラメーター

	r_1	r_2	β	C_m	δU_e
最大加速度	0.015	0.194	3.761	2.238	0.499
最大速度	0.044	0.134	3.580	2.898	0.539
最大変位	0.030	0.200	3.186	1.832	0.665

盤条件の影響を比較的大きく受ける最大加速度，最大速度)の S_n の特性を包含した地盤パラメーターを定義し，地盤震動の激しさからみた地盤の軟弱度指数として提案する。

表-6 に，各強震観測地点での最大加速度，速度に対する地盤パラメーター S_{na} , S_{nv} を，図-18 には各地点における S_{na} と S_{nv} との関係を示した。これらの結果より，ここで対象としたデータの範囲内では S_{na} と S_{nv} との相関が強いことがわかる。したがって，上記の地盤震動の激しさからみた地盤の軟弱度指数としてここでは簡単に両者の平均値として次式のように定義する。

$$S_G = \frac{S_{na} + S_{nv}}{2} \dots\dots\dots (9)$$

各強震観測地点での地盤の軟弱度指数 S_G を表-6 に示した。

このようにして得られた地盤の軟弱度指数 S_G は，地

表-6 強震観測地点における地盤パラメーター S_{na} , S_{nv} , S_G

強震観測地点名	S_{na}	S_{nv}	S_G
鹿 島 (茨城県)	-0.142	-0.239	-0.191
室 蘭 (北海道)	0.049	-0.053	-0.002
八 戸 (青森県)	0.196	0.109	0.153
銅 路 (北海道)	-0.204	-0.077	-0.141
細 島 (宮崎県)	-0.255	0.004	-0.126
青 森 (青森県)	0.234	0.271	0.253
清 水 三 保 (静岡県)	-0.112	-0.092	-0.102
品 川 (東京都)	0.214	0.522	0.368
衣 浦 (愛知県)	0.177	0.276	0.227
板 島 (愛媛県)	0.541	0.415	0.478
豊 浜 (愛知県)	-0.248	-0.312	0.280
利 根 川 (茨城県)	0.123	0.033	0.078
落 合 (長野県)	0.092	0.004	0.048
新 天 龍 川 (静岡県)	-0.472	-0.331	-0.402
鹿 島 造 函 (茨城県)	-0.067	-0.143	-0.105
塩 釜 (宮城県)	0.578	0.575	0.577

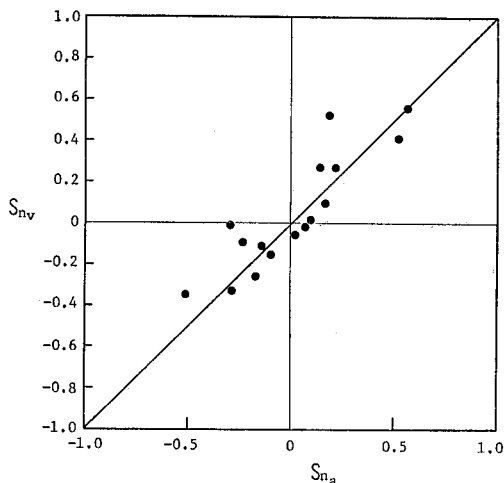


図-18 強震観測地点における地盤パラメーター S_{na} , S_{nv} の関係

盤震動の激しさからみた定量的な地盤パラメーターであり，先に示した最大加速度，最大速度に対する S_{na} , S_{nv} とあわせて耐震工学上有用な資料を提供すると考えられる。

さて，これまでに得られた結果は，一般の沖積および洪積地盤で得られた強震記録および地盤資料を基礎データとしており，岩盤もしくはそれに近い地盤や非常に軟弱な地盤に対しては上記の結果をそのまま用いることには問題がある。非常に堅固な地盤では，一般に高振動数成分が大きく卓越し，通常の土木構造物への影響が，同程度の最大加速度を記録した他の地盤と比較して相対的に小さい。したがって，主として通常の土木構造物の耐震の問題を対象として地盤の軟弱さによる地震動強度の増幅の度合を考える場合には，そういった特殊なデータを用いることによって有効な評価ができなくなることもあると考えられる。一方，非常に軟弱な地盤での強震記録には液状化等の地盤破壊あるいはそれに近い現象が反映されている場合が多く，数少ないこのようなデータが回帰分析結果に大きく影響することが考えられる。このような理由から，いわゆる第1種地盤および第4種地盤に相当するデータは用いなかった。したがって，このような特殊な地盤条件での地震動予測については別途行わなければならない。

4. 結 論

本研究では，地震動予測における従来の定性的な地盤種別に対して N 値を用いた定量的な地盤条件の評価法を提案し，補正加速度記録により得られた最大加速度，速度，変位のアテニュエーション式を用いて，提案した地盤パラメーターのアテニュエーションモデルへの導入法を検討した。得られた成果を要約すると以下のようになる。

- (1) 地震動最大加速度，速度，変位のアテニュエーション式を算出するにあたり，用いる強震記録のデータ構成の影響を調べた。その結果，耐震工学でももに対象となる最大加速度で 40~50 gal 程度以上の地震動に関するアテニュエーション式を得る場合，2.(1) で示した領域 Y_1 に相当する $M-d$ 領域のデータを用いるべきであることを示した。
- (2) わが国の沖積および洪積地盤で得られた最大加速度が 40 gal 程度を超える強震記録に計器補正と基線補正を施した 84 成分を用いて，地震動の最大加速度，最大速度，最大変位のアテニュエーション式を作成した。
- (3) N 値を用いた地盤の軟弱さを表わす指標 S_n を定義し，(2) で得られたアテニュエーション式と結合す

ることによって、地盤の軟弱さを考慮したアテニュエーションモデルを提案した。さらに、 S_n を組み込むことにより、アテニュエーション式まわりでのデータのばらつきが減少することを示した。

(4) 最大加速度、最大速度について別々に定義される S_n を平均化し、地盤の軟弱度を表わす単一の指標 S_G を定義した。

上記 (2)~(4) の結果は、沖積および洪積地盤上で得られた加速度記録および地盤資料をもとにしたものである。したがって、岩盤あるいはそれに近い堅固な地盤および非常に軟弱な地盤に対しては、別途解析を行う必要がある。また、 N 値を利用するにあたっての補正係数 ζ_N の値は、ここでは概略値として表-4 の値を用いたが、今後のこのような補正係数に関するデータの集積および解析結果により、さらに妥当な値が得られることが期待される。

最後に、本研究で用いた強震記録は過去数年にわたり建設省土木研究所および運輸省港湾技術研究所より提供していただいているものである。特に、運輸省港湾技術研究所、土田 肇氏・倉田栄一氏・井合 進氏および建設省土木研究所、岩崎敏男氏・川島一彦氏より本研究で用いたデータに関して多大なご助力を得た。また、本研究における数値解析のプログラムおよび地盤資料のデータ化に関しては、昭和 54 年度当研究室（京都大学工学部交通土木工学教室、路線施設学研究室）に在籍した原敏郎氏（現在 岐阜県土木部）に負うところが多い。ここに記してこれらの方々には深謝の意を表する次第である。

なお、本研究の数値計算は京都大学大型計算機センターの FACOM-M 200 システムによったことを付記する。

参考文献

- 1) 金井 清：地震動の振動特性に関する実験式，日本地震工学シンポジウム論文集，pp. 1~4, 1966. ほか。
- 2) Donovan, N.C.: A Statistical Evaluation of Strong Motion Data Including The February 9, 1971 San Fernando Earthquake, Proc. 5 WCEE, Rome, Vol. 1, pp. 1251~1261, 1973. ほか。
- 3) Trifunac, M.D. and A.G. Brady: Correlation of Peak Acceleration, Velocity, and Displacement with Earthquake Magnitude, Distance and Site Conditions, International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 4, No. 5, pp. 455~472, 1976, ほか。
- 4) Page, R.A., D.M. Boore, W.B. Joyner and H.W. Coulter: Ground Motion Values for Use in the Seismic Design of the Trans-Alaska Pipeline System, USGS Circular No. 672, Washington, 1972. ほか。
- 5) Housner, G.W.: Intensity of Ground Shaking Near the Causative Fault, Proc., 3 WCEE, Auckland, New Zealand, Vol. 1, pp. 94~109, 1965. ほか。
- 6) Kameda, H., M. Sugito and T. Asamura: Simulated Earthquake Motions Scaled for Magnitude, Distance, and Local Soil Conditions, 7 WCEE, Vol. 2, pp. 295~302, 1980.9.
- 7) 片山恒雄・岩崎敏男・佐伯光昭：地震動加速度応答スペクトルの統計解析，土木学会論文報告集，第 275 号，pp. 29~40, 1978.
- 8) 建設省：新耐震設計法（案），総プロ「新耐震設計法の開発」研究報告，1977.
- 9) 後藤尚男・亀田弘行・今西直人・橋本修身：強震記録の補正効果を考慮した地震動パラメータの統計的性質，第 5 回日本地震工学シンポジウム論文集，pp. 49~56, 1978.
- 10) Katayama, T.: Statistical Analysis of Peak Accelerations of Recorded Earthquake Motions, Seisan Kenkyu, Inst. Industrial Science, Univ. of Tokyo, Vol. 26, No. 1, pp. 18~20, 1974.
- 11) 佐伯光昭・片山恒雄・岩崎敏男：わが国の地盤上で得られた加速度記録の特性，土木学会第 32 回年次学術講演会，第 I 部，pp. 304~305, 1977.
- 12) 後藤尚男・亀田弘行・杉戸真太・今西直人：デジタルフィルターによる SMAC-B2 型加速度計記録の補正について，土木学会論文報告集，第 277 号，pp. 57~70, 1978.
- 13) 運輸省港湾技術研究所：港湾地域強震観測地点資料，その 1~その 4，港湾技研資料，1967~1978.
- 14) 岩崎敏男・片山恒雄・佐伯光昭：わが国の地盤上で得られた地震動の加速度波形記録および応答加速度スペクトルの特性について，土木学会耐震工学委員会研究会資料，昭 52.4.
- 15) 運輸省港湾技術研究所：港湾技研資料，No. 317, No. 319, 1979.
- 16) 建設省土木研究所：土木構造物における加速度記録，土木研究所報，Vol. 33, 1978.
- 17) 大塚道男：地震危険度予測への展望，第 8 回地盤震動シンポジウム講演集，pp. 7~12, 1980.
- 18) Geller, B.R.: Scaling Relations for Earthquake Source Parameters and Magnitudes, BSSA, Vol. 66, No. 5, pp. 1501~1523, 1976.
- 19) Boore, D.M., W.B. Joyner, A.A. Oliver and R.A. Page: Peak Acceleration, Velocity, and Displacement from Strong Motion Record, BSSA, Vol. 70, No. 1, pp. 305~321, 1980.
- 20) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，昭 55.5.
- 21) 阪口 理： N 値利用上の問題点，土と基礎，第 196 号，pp. 83~89, 1974.
- 22) 柴田 徹：地盤内・横波速度と標準貫入試験の N 値の関係，第 5 回土質工学研究発表会，pp. 101~106, 1969.
- 23) 田治米辰雄・望月利男・松田磐余：地盤と震害，槇書店，1977.
- 24) 大久保 彪・小川光喜：大阪地盤の S 波速度，第 9 回土質工学研究発表会，pp. 725~728, 1974.
- 25) 西垣好彦：標準貫入試験の機構（その 2），土と基礎，第 193 号，pp. 77~84, 1974.
- 26) 亀田弘行：都市の耐震防災，土木学会関西支部昭和 55 年度講習会テキスト，pp. 1~30.
- 27) 宇津徳治：地震学，共立出版，1977.