

地盤の影響を考慮した震動継続時間および その関連パラメータの統計解析

A STATISTICAL ANALYSIS OF DURATION AND ITS RELATED PARAMETERS WITH EMPHASIS ON SOIL CONDITIONS

神山 眞*

By Makoto KAMIYAMA

The characteristics of the duration, total power, and *rms* value of strong earthquake ground motions are investigated with the aid of the wave propagation theory and statistical technique. It is made clear from some theoretical estimations how the duration and its related parameters are affected by the soil layer conditions. A new multiple regression analysis which includes not only the earthquake factors but also the local site conditions as its independent variables is developed and applied to the duration and its related parameters using strong-motion earthquake records. By combining the theoretical and statistical results, semi-empirical expressions are derived in order to predict the duration and its related parameters.

1. ま え が き

従来、耐震設計における入力地震動の指標として重要視されてきたのは最大振幅値、スペクトル特性などである。しかし、厳密な意味で何が構造物の震害を最も支配するパラメータかは必ずしも明らかでない。

たとえば、地震時における構造物の非線形応答や砂地盤の液化化などでは震動の振幅、スペクトル特性に加え、震動継続時間が重要な役割を演じることが指摘されている¹⁾。さらに、震動振幅やスペクトル振幅が大きかったにもかかわらず、震動継続時間が短かったために、さほどの震害が生じなかった地震の例も報告されている²⁾。このような事例を考えると、最大振幅値、スペクトル特性に劣らず、震動継続時間は耐震解析を行ううえで無視し得ない重要なパラメータと考えられる。

これまで、工学的観点から震動継続時間を論じた研究はいくつかあるが³⁾⁻⁵⁾、その多くは震動継続時間をおもに地震の規模と地震波の伝播経路の関数と考え、統計的に考察したものである。しかし、これまでの地震観測の経験から同一の地震で、ほぼ同じ震央距離の地点でも観測点の違いにより震動継続時間が大幅に異なることが指

摘されている。このことは震動継続時間もスペクトル特性などと同様に地盤条件により大きな影響を受けることを示唆するものと思われる。したがって、震動継続時間のより厳密な考察には、地震の規模などに加え、地盤条件の影響の定量的な考察が必須と考えられる。

本論文は震動継続時間およびそれに関連する震動パラメータについて、特に地盤条件の影響を中心として理論的に考察するとともに、それらの結果を強震記録の統計解析結果に適用して、震動継続時間および関連パラメータの半経験式を導いたものである。

以下では、最初に地盤条件のみに起因する震動継続時間およびその関連パラメータの大小を評価する一方法を理論的に検討する。次に、日本で得られている強震記録を用いて震動継続時間およびその関連パラメータに関する統計解析を行う。この中では、各観測点の地盤条件を間接的に考慮した重回帰分析を施し、震動継続時間のマグニチュード、震央距離、震源深さ依存性とともな地盤条件の影響を統計的に明らかにする。さらに、理論的結果と統計解析を結びつけ、地盤構造が既知で、マグニチュード、震央距離、震源深さが与えられた場合の震動継続時間およびその関連パラメータに関する予測式を誘導する。

* 正会員 工修 東北工業大学助教授 工学部土木工学科
(〒982 仙台市八木山香澄町 35-1)

2. 震動継続時間などに及ぼす地盤構造の影響に関する理論的検討

(1) 地盤構造による震動継続時間などの評価法

後に述べるように震動継続時間の定義は難しい問題である。ここでは、地盤構造のみに原因する震動継続時間の大きさを抽出することを目的とするので、絶対的な継続時間を議論しないで、後述の係数を導入して継続時間を間接的に表現する。また、地震波の種類は震動継続時間を支配する重要な要素と考えられるが、P波、S波、表面波などすべての地震波を含めて議論すると、地盤条件固有の関数として震動継続時間を評価することが困難となる。そこで、ここではS波が鉛直下方から入射するS波重複反射の伝播特性のみを考える。地盤構造による地震波の増幅の度合はS波重複反射と表面波などの他の波動伝播とで類似な関係が確かめられているので⁶⁾、このような簡約化を行っても地盤構造のみに原因する継続時間の評価という目的にはさほどの誤りはないと考えられる。

さて、Fig.1に示すような基盤を含めてn層から成る平行多層地盤を考える。ここで、表面層は粘弾性、基盤は弾性として、簡単化のため地盤の応力-ひずみの非線形性は考えないことにする。

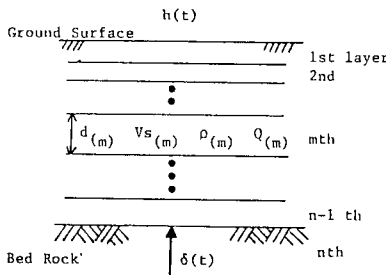


Fig.1 Multiple-layered ground.

いま、基盤にデルタ関数型の地震波 $\delta(t)$ が入射したとすると、地表にインパルス応答 $h(t)$ が生じる。このような応答は地盤を構成するパラメーターのみによって決まる量である。したがって、入射する地震波の性質によらない地盤固有の関数として震動継続時間およびその関連パラメーターを評価するにはインパルス応答 $h(t)$ について議論するのが適当であろう。そこで、 $h(t)$ について次の量を考える。

$$C_p = \int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) dt \dots\dots\dots (1)$$

$$C_m = \int_{-\infty}^{\infty} t^2 h^2(t) dt \dots\dots\dots (2)$$

式(1)の C_p は $h(t)$ の全パワーを表わすパラメーター

であり、式(2)の C_m は $h^2(t)$ の二次モーメントである。いずれも地盤固有のパラメーターである。以下、 C_p 、 C_m をパワー係数、モーメント係数と呼ぶ。次に、 C_p 、 C_m より、次の量を定義する。

$$C_{du} = \sqrt{C_m/C_p} \dots\dots\dots (3)$$

$$C_{rms} = \sqrt{C_p/C_{du}} \dots\dots\dots (4)$$

式(3)の C_{du} は、 $h^2(t)$ の原点に関する回転二次半径であり、 $h(t)$ の震動継続時間の長さを間接的に表現するパラメーターと考えられる。このような C_{du} と実際の継続時間の関係の模式的説明が、地震記録を例として Fig.2 に示されている。ここで、 C_{du} は各地震記録の記録始まりを原点と仮定して求めている。なお、Fig.2の t_b は後述する「b継続時間」である。

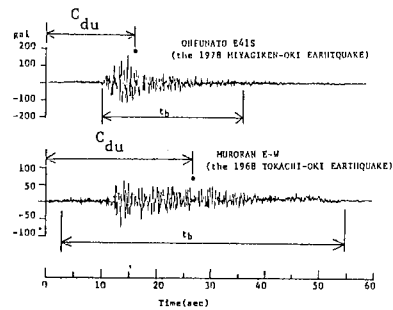


Fig.2 Illustration of C_{du} .

一方、式(4)の C_{rms} は $h(t)$ の全パワーを $h(t)$ の時間長を測る一尺度である C_{du} で除した平方根であるから、 $h(t)$ の2乗平均平方根に類似する量と考えられる。

C_{du} 、 C_{rms} とともに $h(t)$ から定まり、しかも $h(t)$ が地盤固有の量であることから、 C_{du} 、 C_{rms} を地盤構造のみに原因する震動継続時間および rms 振幅値の大小を表わすパラメーターとして用いることができる。そこで、 C_{du} 、 C_{rms} をおのおの継続時間係数、 rms 係数と呼ぶことにする。

以上に定義した諸係数は数値計算には不都合な形で与えられている。そこで、周波数領域に変換して考える。いま、 $h(t)$ の Fourier 変換を $H(\omega)$ とする。

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-i\omega t} dt \dots\dots\dots (5)$$

周知のように $H(\omega)$ は周波数応答関数である。 $H(\omega)$ を用いると式(1)、(2)は Parseval の公式から次のように周波数領域で表わされる。

$$C_p = \int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |H(\omega)|^2 d\omega \dots\dots\dots (6)$$

$$C_m = \int_{-\infty}^{\infty} t^2 h^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{dH(\omega)}{d\omega} \right|^2 d\omega \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $|\cdot|$ は絶対値を表わす。

式(6)、(7)における $H(\omega)$ 、 $dH(\omega)/d\omega$ は次のよう

に与えられる。なお、地盤の粘性は円振動数 ω によらず一定であるとする研究があるので⁷⁾、ここでは粘性の大きさを表わす係数 Q 値を ω によらず一定とした。

$$H(\omega) = 2 / \{L_{11} + L_{21} / (ikG_{(m)})\} \dots \dots \dots (8)$$

ここに、 $i = \sqrt{-1}$ 、 $k = \omega / V_{s(m)}$ 、 ω : 円振動数、 $V_{s(m)}$: n 層の S 波速度、 $G_{(m)}$: n 層の剛性率。

$$\begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} = [a_{(n-1)}] [a_{(n-2)}] \dots [a_{(m)}] \dots [a_{(1)}]$$

$$[a_{(m)}] = \begin{bmatrix} \cos(D_m) & \sin(D_m) / E_m \\ -E_m \sin(D_m) & \cos(D_m) \end{bmatrix}$$

ここに、

$$D_m = d_{(m)} \omega / (V_{s(m)} \sqrt{1 + i/Q_{(m)}})$$

$$E_m = \omega \rho_{(m)} V_{s(m)} \sqrt{1 + i/Q_{(m)}}$$

$d_{(m)}$: m 層の層厚、 $V_{s(m)}$: m 層の S 波速度、 $Q_{(m)}$: m 層の Q 値、 $\rho_{(m)}$: m 層の密度

$$\frac{dH(\omega)}{d\omega} = \frac{-2 \frac{dL_{11}}{d\omega} - 2 \frac{V_{s(m)}}{i\omega G_{(m)}} \frac{dL_{21}}{d\omega} + 2 \frac{L_{21} V_{s(m)}}{iG_{(m)} \omega^2}}{\left(L_{11} + \frac{L_{21} V_{s(m)}}{i\omega G_{(m)}} \right)} \dots \dots \dots (9)$$

ところで、式(6)、(7)は広義積分として与えられているので、 C_p 、 C_m を数値的に求めることはできない。

そこで、 $C_p \sim C_{rms}$ の各係数をパラメーターとしての本質は変えないで、数値計算可能なように新たに定義する。いま、式(6)、(7)の被積分項は ω に関する偶関数である。さらに、耐震工学で対象とする構造物の周期はせいぜい 0.05 秒 ($\omega = 40\pi$) から 20 秒 ($\omega = 0.1\pi$) である。また、式(6)、(7)の係数 $1/2\pi$ を削除しても C_p などのパラメーターとしての本質は変わらない。以上の諸点を考えて、 $C_p \sim C_{rms}$ の各係数を新たに次のように定義する。

$$C_p = \int_{0.1\pi}^{40\pi} |H(\omega)|^2 d\omega \dots \dots \dots (10)$$

$$C_m = \int_{0.1\pi}^{40\pi} \left| \frac{dH(\omega)}{d\omega} \right|^2 d\omega \dots \dots \dots (11)$$

$$C_{du} = \sqrt{C_m / C_p} \dots \dots \dots (12)$$

$$C_{rms} = \sqrt{C_p / C_{du}} \dots \dots \dots (13)$$

(2) 継続時間係数などの数値計算例

以上のように定義された C_p 、 C_m 、 C_{du} 、 C_{rms} などの係数を、最も簡単な地盤構造として Fig. 3 のような表面層一層の場合に適用して、震動継続時間などに対する地盤構造の影響を調べる。なお、数値積分は Simpson の公式で求めた。

Fig. 4 は $\rho_{(1)} = 1.5 \text{ Mg/m}^3$ 、 $d_{(1)} = 30 \text{ m}$ 、 $Q_{(1)} = 20$ 、 $V_{s(2)} = 500 \text{ m/s}$ 、 $\rho_{(2)} = 2.0 \text{ Mg/m}^3$ 、 $Q_{(2)} = \infty$ として、 $V_{s(1)}$ を 50 m/s から 300 m/s まで変えて求めた C_p と C_{du} を示している。また、Fig. 5 は同様な条件より求めた C_m と C_{rms} を示している。

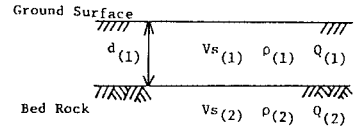


Fig. 3 Two layered ground.

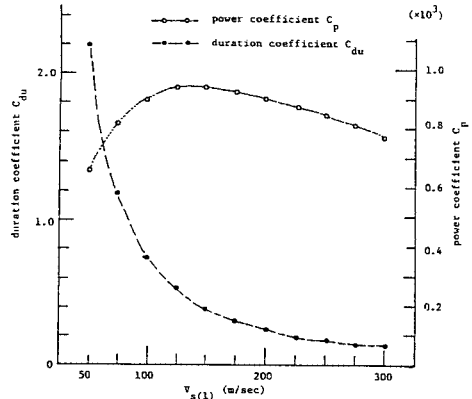


Fig. 4 Variation of C_p and C_{du} with S-wave velocity.

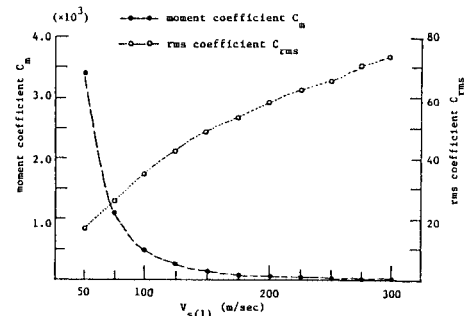


Fig. 5 Variation of C_m and C_{rms} with S-wave velocity.

Fig. 4 から他の条件が同じであれば、表面層の S 波速度が小さいほど、すなわち表面層が軟弱になるほど継続時間係数 C_{du} は大きくなるのがわかる。これは軟弱地盤ほど震動継続時間は長いという Trifunac⁴⁾ の定性的な指摘を理論的に説明するものである。一方、Fig. 5 から C_m は C_{du} と同様な変化を示すことがわかるが、パワー係数 C_p 、 rms 係数 C_{rms} はまったく異なった変化を示す。 C_p は $V_{s(1)}$ のある特定の値で極大となり、 C_{rms} は $V_{s(1)}$ が大きいほど大きく、 C_{du} と逆の変化を示している。 C_{rms} は地盤震動の振幅特性に関与するパラメーターであるが、Fig. 4 と Fig. 5 の比較から、地盤震動の継続時間と振幅特性は地盤構造により相反する効果を受けることがわかる。

次に、表面層の S 波速度などの諸係数を一定として ($V_{s(1)} = 100 \text{ m/s}$ 、 $\rho_{(1)} = 1.5 \text{ Mg/m}^3$ 、 $Q_{(1)} = 20$ 、 $\rho_{(2)} = 2.0$

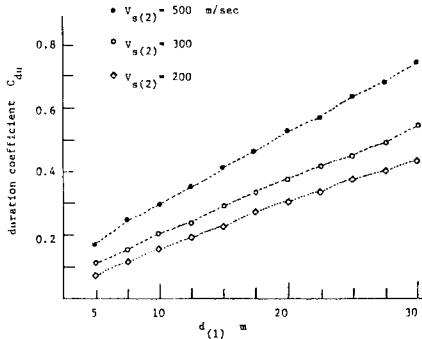


Fig. 6 Variation of C_{du} with layer thickness.

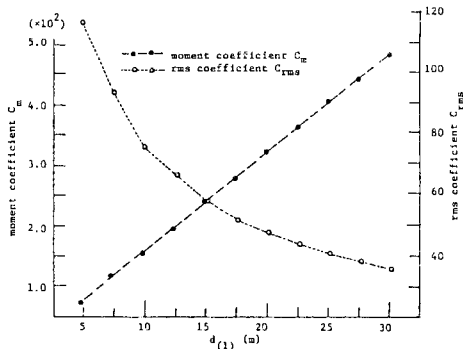


Fig. 7 Variation of C_m and C_{rms} with layer thickness.

Mg/m^3 , $Q_{21}=\infty$, 表面層厚が変化したときの継続時間係数 C_{du} を求めたのが Fig. 6 である。同図には基盤の S 波速度が変化した場合も同時に示されている。

Fig. 6 から継続時間係数 C_{du} は表面層の厚さとともにほとんど直線的に増加することがわかる。しかも層厚による増加の割合は基盤と表面層の振動インピーダンス比 $(\rho_{11} V_{s11})/(\rho_{21} V_{s21})$ が小さいほど大きくなることがわかる。

また、同様な条件のもとに求められたモーメント係数 C_m と rms 係数が Fig. 7 に示されている。Fig. 7 から C_m が C_{du} と同様な変化を示すのに対して、 C_{rms} は表面層が薄いほど大きく、 C_{du} と相反する挙動を示すことがわかる。

以上の簡単な計算例から、震動継続時間およびその関連パラメーターの地盤構造による影響の一般的傾向を把握できる。なお、ここで定義した各係数のより複雑な実際の地盤構造への適用は 4. で述べる。

3. 震動継続時間およびその関連パラメーターの強震記録を利用した統計解析

(1) 強震記録における震動継続時間およびその関連パラメーターの定義

これまで、強震記録の震動継続時間の定義については

いくつかの提案がなされているが、観点が異なるのでそれらの優劣を論じるのは困難である。一方、もともと継続時間は目的に応じて定義されるものであり、継続時間の定義の優劣を画一的に評価するのは無意味な点もある。特に、工学的応用で重要なのは、目的に応じて適切な継続時間の定義を採用すること、各定義の相互関連を把握しておくことと思われる。以上から、ここでは各定義の優劣を論じないで、2つの代表的な定義に焦点を当て、相互関連に注目しながら統計解析する。

ここで用いた代表的継続時間は Bolt³⁾ による bracketed duration と Trifunac and Brady⁴⁾ によるパワーの蓄積時間に基づく継続時間である。bracketed duration は地震記録の振幅が「あるレベル」を最初に越える時間と最後に越える時間の時間長として継続時間を定めるものである。ここで「あるレベル」は後述の p 継続時間が全パワーの 90% 区間として定義されることに合わせて、「最大振幅の 10%」とすることとした。以下、この定義による継続時間を「 b 継続時間」と略称する。一方、Trifunac and Brady による定義は地震記録を $a(t)$ として、次式を満足する時間 t の最大と最小の差から継続時間を定めるものである。

$$0.05 \leq \int_0^t a^2(t)dt / \int_0^T a^2(t)dt \leq 0.95 \dots\dots\dots(14)$$

ここに、 T は地震記録の記録長である。

式(14)から、この定義は地震記録の全パワーの 90% を含む区間長として継続時間を求めるものである。以下、式(14)による継続時間を「 p 継続時間」と呼ぶことにする。

また、上述の継続時間のほかに、全パワー P_r , rms 振幅値 V_{rms} を次式のように定義して、これらも継続時間の関連パラメーターとして求めることにした。

$$P_r = \int_0^T a^2(t)dt \dots\dots\dots(15)$$

$$V_{rms} = \left(\int_0^T a^2(t)dt / T \right)^{1/2} \dots\dots\dots(16)$$

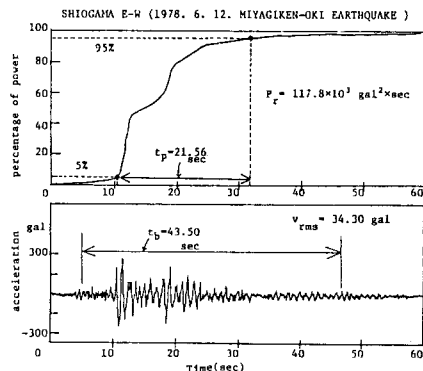


Fig. 8 Example of t_b , t_p , P_r and V_{rms} .

上述の b 継続時間 t_b , p 継続時間 t_p , 全パワー P_r , rms 振幅値 V_{rms} の例がパワーの蓄積過程とともに Fig. 8 に示されている。

(2) 統計解析に用いた強震記録

この解析で用いた強震記録は日本で得られた水平最大加速度 20 cm/s^2 以上のほぼ完全な 98 記録^{8),9)} である。これらは、いずれも地盤上で得られた記録であり、一部欠測があるので 192 個の水平成分を有する。

これらの記録は後に述べる重回帰分析における理由から、一観測点で 3 記録以上の強震記録が得られている観測点を対象とした。対象とした観測点は Fig. 9 に示す 23 個の地点である。

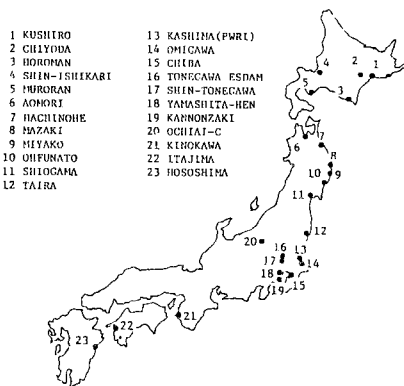


Fig. 9 Observation sites of strong-motion earthquake records.

一般に、同一の地震による水平動成分でも方向によりかなり異なった特性の記録が得られることが多いが、ここでは統計解析のデータセットを多くする便宜上、同一の地震による異なった方向の水平動成分をまったく独立した記録として扱った。したがって、この解析のデータセットは全水平動成分 192 である。

ここで扱ったデータセットの特性の一例として、地震のマグニチュードと震央距離の関係を示すと Fig. 10 のとおりである。Fig. 10 から、ここで用いたデータセッ

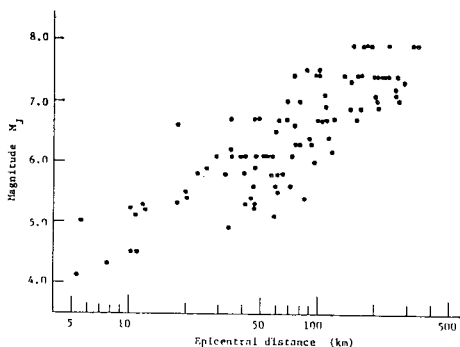


Fig. 10 Relation between magnitude and epicentral distance.

トは近距離での巨大地震が相対的に少ないことがわかる。

(3) 震動継続時間などの重回帰分析—その 1 (観測点の影響を無視した場合)

ここでは、前述した 4 つのパラメーターを各観測点の影響を考えないで重回帰分析した結果について述べる。重回帰分析の説明変数は既往の研究を参照して地震のマグニチュード M_j , 震央距離 Δ を用いる。さらに、この研究では震源深さの影響を検討する試みとして地震の震源深さ H も第 3 の説明変数として採用する。 H を新たに導入した理由は、前述の 4 つのパラメーターは伝播する地震波の波動特性によって変わると考えられるうえ、 H がこれに関与する重要な要素と考えたからである。

一方、採用する重回帰モデルであるが、これについては既往の研究¹⁰⁾ で多用されている次のモデルを仮定した。

$$y = a \cdot 10^{bM_j} \cdot \Delta^c \cdot 10^{dH} \dots \dots \dots (17)$$

ここに、 y : 目的変数, a, b, c, d : 帰係数, M_j : 気象庁マグニチュード, Δ : 震央距離 (km), H : 震源深さ (km)

式(17)の重回帰モデルを仮定して、最小二乗法により求められた重回帰式を各パラメーターごとにまとめると次のようになる。ただし、 R は重相関係数である。

- b 継続時間 t_b (s)

$$t_b = 0.477 \cdot 10^{0.28M_j} \cdot \Delta^{-0.022} \cdot 10^{-0.00002H} \dots \dots \dots (18)$$

($R=0.76$)

- p 継続時間 t_p (s)

$$t_p = 0.618 \cdot 10^{0.22M_j} \cdot \Delta^{0.047} \cdot 10^{-0.0014H} \dots \dots \dots (19)$$

($R=0.73$)

- 全パワー P_r (cm^2/s^2)

$$P_r = 2.8 \cdot 10^{0.67M_j} \cdot \Delta^{-0.589} \cdot 10^{0.00005H} \dots \dots \dots (20)$$

($R=0.72$)

- rms 振幅値 V_{rms} (cm/s^2)

$$V_{rms} = 1.99 \cdot 10^{0.21M_j} \cdot \Delta^{-0.302} \cdot 10^{0.00008H} \dots \dots \dots (21)$$

($R=0.57$)

紙数の関係から、式(18)~式(21)のすべてについて重回帰式もとのデータ分布との関連を示し得ないので、その代表例として式(19)の p 継続時間の場合について Fig. 11 に示す。

式(18)~式(21)から、次のようなことが指摘できる。4 つのパラメーターのうち、マグニチュード M_j に対する依存性は全パワーが最も大きく、 b 継続時間、 p 継続時間、 rms 振幅値の順になっている。震央距離 Δ に対しては全パワー、 rms 振幅値ともかなりの依存性がみられるが、 t_b , t_p の両種の継続時間の依存性は小さい。継続時間の震央距離に対する依存性の小さいこと

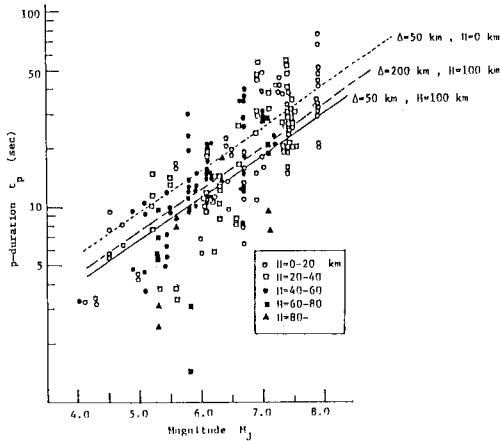


Fig. 11 Multiple regression curves and original date scatter for p -duration t_p .

は Dobry ら⁹⁾によってすでに指摘されているが、ここでも同様な傾向がみられる。一方、震源深さ H の影響は p 継続時間の場合を除き、全般に小さい。ところが、 p 継続時間の震源深さに対する依存性は他パラメーターに比較して大きい。しかも、震源深さの浅いほど継続時間が長くなる効果もたらされている。この理由は明瞭でないが、一つの解決として、震源の浅いほど表面波が生成されやすいので、その結果、波動エネルギーの継続時間長を測定する p 継続時間が長くなるという説明も成り立つ。いずれにしても、震動性状を示す一つの指標に震源深さの影響が検出されたことは注目される。なお、式(18)～式(21)の重回帰式は重相関係数が0.76～0.507であり、データとの適合度は満足すべきものでなく、さらに重回帰モデルを改良すべきことを示唆している。

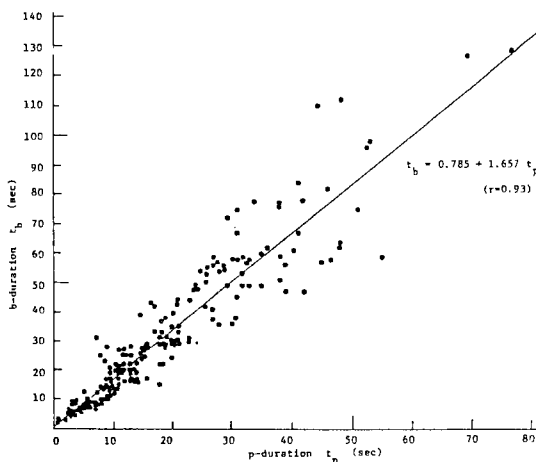


Fig. 12 Correlation between t_b and t_p .

次に、4つのパラメーターのうち b 継続時間 t_b と p 継続時間 t_p の相関を示したものが Fig. 12 である。両者に線形回帰モデルを仮定すると次式を得る。

$$t_b = 0.785 + 1.66 t_p \dots\dots\dots(22)$$

(相関係数 $r=0.93$)

式(22)から b 継続時間は p 継続時間より平均して約1.7倍ほど長く継続時間を見積っていることがわかる。

(4) 震動継続時間などの重回帰分析—その2
(観測点の影響を考えた場合)

前節では重回帰分析を各観測点の影響を無視して行った。しかし、先に述べたように震動性状には各観測点近傍の地盤構造が大きな影響を及ぼすので、これを無視した前節の解析は不十分であるのは明らかである。本節では、各観測点の地盤条件の影響を陰に組み込んだ重回帰分析について述べる。

いま、目的変数となるデータ y が N 個の異なった観測点から得られたとする。このように異なった水準から得られたデータをまとめて重回帰分析する方法は種々考えられようが、ここではダミー変数¹⁰⁾を利用して、次のようなブロック分けした重回帰モデルを仮定する。

$$y = a \cdot 10^{bM_j} \cdot \Delta^c \cdot 10^{dH} \cdot 10^{\sum_{i=1}^{N-1} A_i S_i} \dots\dots\dots(23)$$

ここに、 $S_i (i=1, 2, \dots, N-1)$ はダミー変数であり、 N 個の全観測点のうち代表的観測点 (以下、基盤点とよぶ) を除く $N-1$ 個の観測点に応じて与えられる一種の説明変数である。ダミー変数 S_i の値は目的変数 y のデータが観測点 n から得られたとき、 $S_i = \delta_{in} (i=1, 2, \dots, N-1)$ のように与えられ、目的変数の発生地点に応じて1か0かがとられる。ここで δ_{in} はデラックス数。ただし、目的変数が基盤点から得られたとき $S_1 = S_2 = \dots = S_{N-1} = 0$ ととられる。また、 A_i はダミー変数 S_i に対する回帰係数である。

ここで、式(23)の物理的意味を明らかにするため、基盤点の場合と他の任意の観測点 n の場合に分けて表わしてみる。

基盤点 $y = a \cdot 10^{bM_j} \cdot \Delta^c \cdot 10^{dH} \dots\dots\dots(24)$

n 観測点 $y = a \cdot 10^{bM_j} \cdot \Delta^c \cdot 10^{dH} \cdot 10^{A_n} \dots\dots\dots(25)$

式(24)、(25)から、 10^{A_n} は n 観測点における目的変数の基盤点のそれに対する増幅率に相当することがわかる。一方、基盤点での重回帰式はそのまま全観測点に共通するアテニュエーション式となっている。したがって、基盤点となる観測点を文字通り基盤にふさわしい堅固な岩盤が露出している点に求めれば、式(23)の重回帰モデルから、いわゆる地震基盤でのアテニュエーション式とそれに対する他観測点の増幅率が同時に求まることになる。そこで、以下、式(24)を「基盤での重回帰式」、 10^{A_n} を「統計的増幅率」と略称する。

以上述べた重回帰モデルを4つのパラメーター t_b , t_p , P_r , V_{rms} に適用した。ここで問題となるのは基盤点の選定であるが、本論文では Fig. 9 に示す観測点のうち大船渡 (OHFUNATO) でS波速度が1000 m/s 程度と推定される堅固な岩盤が露出しているため、これを基盤点として選定した。したがって、以下でいう基盤とは大船渡で露出している岩盤に対応する層を意味する。

以上の方法から求められた基盤での b 継続時間 t'_b , p 継続時間 t'_p , 全パワー P'_r , rms 振幅値 V'_{rms} の重回帰式および各観測点での基盤に対する統計的増幅率を示すと式(26)~式(29)および Table 1 のようになる。

- 基盤での b 継続時間 t'_b (s)
 $t'_b = 0.738 \cdot 10^{0.23M_j} \cdot \Delta^{-0.084} \cdot 10^{-0.00035H}$
 $(R=0.88)$(26)
- 基盤での p 継続時間 t'_p (s)
 $t'_p = 0.444 \cdot 10^{0.21M_j} \cdot \Delta^{0.048} \cdot 10^{-0.0019H}$
 $(R=0.86)$(27)
- 基盤での全パワー P'_r (cm²/s³)
 $P'_r = 0.614 \cdot 10^{0.71M_j} \cdot \Delta^{-0.685} \cdot 10^{0.00069H}$
 $(R=0.85)$(28)
- 基盤での rms 振幅値 V'_{rms} (cm/s²)
 $V'_{rms} = 0.861 \cdot 10^{0.23M_j} \cdot \Delta^{-0.34} \cdot 10^{0.0008H}$
 $(R=0.79)$(29)

式(26)~式(27)を先に求めた式(18)~式(21)と比較すると、観測点の影響を考慮したことにより、いずれのパラメーターとも重相関係数 R が大きくなっており、重回帰式とデータとの適合度が向上していることがわかる。

また、各パラメーターの M_j , Δ , H に対する依存性すなわち、それらの回帰係数は式(26)~式(29)と式(18)~式(21)を比較すると、その値に若干の変動がみられるものの、本質的には差異はなく、前節で述べた M_j , Δ , H に対する依存性の特徴が観測点の影響を考慮した場

Table 1 Statistical amplification factors for each observation site.

Observation site	Statistical amplification factors			
	a_{tb} (b-duration)	a_{tp} (p-duration)	a_p (total power)	a_{rms} (rms amplitude)
KUSHIRO	2.47	2.26	4.37	1.67
CHIYODA	2.74	2.46	4.67	1.82
BOROMAN	1.03	1.07	1.08	1.39
SHI-SHIKARI	2.18	1.88	13.45	3.51
MURORAN	2.29	1.54	2.54	1.83
AOMORI	2.97	2.73	3.53	1.57
HACHINOHE	2.86	2.50	2.64	1.26
MAZAKI	0.78	0.78	1.96	2.14
MIYAKO	1.86	1.47	3.69	2.02
OHFUNATO	1.00	1.00	1.00	1.00
SHIOGAMA	2.10	1.65	9.31	2.21
KASHIWA (PWRI)	1.82	2.03	3.42	1.55
ONIGAWA	1.51	1.87	8.21	3.03
CHIBA	1.39	2.01	1.73	1.34
TONEGAMA ESDAM	1.49	1.75	8.09	2.98
SHI-TONEGAMA	1.83	2.50	3.28	1.67
YAMASHITA-HEN	2.32	1.88	2.72	1.41
KANNONZAKI	1.25	1.30	1.07	1.19
OGHIAI-C	1.30	1.33	6.31	2.51
KINDOGAWA	1.36	2.15	1.32	1.17
ITAJIMA	1.02	0.87	8.08	3.28
HOSOSHIMA	2.14	1.84	3.41	1.53

合もほぼそのまま保持されていることがわかる。

一方、Table 1 の統計的増幅率をみると、各パラメーターとも各観測点の諸条件を反映して、観測点ごとに大幅に変動していることがわかる。特に、 b 継続時間、 p 継続時間、 rms 振幅値が約0.8~3.5の範囲で変動するのに対して、全パワーは1.0~13の範囲で変化しており、観測点の影響が強いことがわかる。

4. 震動継続時間およびその関連パラメーターの理論的係数と統計解析結果の関係

2. において地盤構造が知られた場合にそれが震動継続時間、全パワー、 rms 振幅値などのパラメーターに及ぼす影響を評価する方法を理論的に検討した。一方、3. においては、対応するパラメーターが観測点の条件(地盤条件その他を含む)によって、どう変化するかを強震記録を利用して統計的に求めた。ここでは、これらの理論的手法と統計的方法の両者の結果を比較し、理論と統計式を融合させた半経験式の誘導を検討する。

(1) 代表的観測点の地盤構造

上述の理論的手法と統計的方法の結果を比較するため

Table 2 Soil layer profiles for representative observation sites.

KUSHIRO					AOMORI				
t	Vs	ρ	Q		t	Vs	ρ	Q	
2.0	50.0	1.6	19.0		8.0	144.0	1.8	11.0	
5.0	70.0	1.7	17.0		6.0	173.0	1.7	10.0	
13.0	400.0	2.0	5.0		7.0	152.0	1.6	11.0	
22.0	150.0	1.8	11.0		6.0	205.0	1.6	9.0	
10.0	250.0	2.0	8.0		7.0	260.0	1.7	7.0	
33.0	590.0	2.0	100.0		6.0	320.0	1.9	6.0	
∞	1490.0	2.3	100.0		60.0	500.0	2.0	100.0	
					550.0	900.0	2.2	100.0	
					∞	1500.0	2.2	100.0	

HACHINOHE					MURORAN				
t	Vs	ρ	Q		t	Vs	ρ	Q	
2.0	100.0	1.8	14.0		3.0	180.0	1.8	7.0	
2.0	160.0	1.8	13.0		4.0	290.0	1.8	5.0	
6.0	195.0	1.9	12.0		2.5	240.0	1.8	6.0	
2.0	380.0	2.0	9.0		5.0	350.0	1.9	5.0	
1.0	200.0	2.0	7.0		300.0	700.0	2.0	100.0	
4.0	375.0	2.0	7.0		∞	1100.0	2.2	100.0	
1.0	200.0	1.6	7.0						
10.0	430.0	1.6	100.0						
8.0	270.0	1.7	7.0						
144.0	370.0	1.9	9.0						
180.0	650.0	2.0	100.0						
∞	1500.0	2.1	100.0						

SHIOGAMA					MIYAKO				
t	Vs	ρ	Q		t	Vs	ρ	Q	
3.5	95.0	1.6	20.0		2.2	164.0	1.7	10.0	
7.2	80.0	1.4	20.0		7.5	300.0	1.9	7.0	
3.1	145.0	1.7	20.0		1.9	164.0	1.7	10.0	
10.0	850.0	2.0	100.0		200.0	800.0	2.0	100.0	
∞	1500.0	2.2	100.0		∞	1500.0	2.2	100.0	

YAMASHITA-HEN					HOSOSHIMA				
t	Vs	ρ	Q		t	Vs	ρ	Q	
3.5	200.0	1.8	9.0		12.0	175.0	1.7	15.0	
6.5	145.0	1.7	11.0		7.5	127.0	1.6	20.0	
5.0	225.0	1.8	8.0		3.1	230.0	1.8	10.0	
20.0	280.0	1.9	7.0		5.4	164.0	1.6	20.0	
20.0	300.0	2.0	7.0		10.0	260.0	1.8	10.0	
200.0	600.0	2.0	100.0		8.0	164.0	1.7	20.0	
∞	1000.0	2.2	100.0		10.0	850.0	2.0	100.0	
					∞	1100.0	2.2	100.0	

には、統計的増幅率が OHFUNATO を基盤として求められているので、各観測点において、それに相当する層までの深さの地盤構造が知られている必要がある。しかし、Fig. 9 に示す全観測点のうち、このような層に達する程度まで深く地盤構造が知られている地点は少ない。ここでは、この条件に比較的合致して地盤構造が知られているか、もしくは推定可能な 8 地点を対象とする。

ボーリング柱状図、PS 検層、地質図など種々のデータを用いて構成された 8 観測点の地盤構造を Table 2 に示す。Table 2 に示す地盤構造はボーリング柱状図が知られている深さ程度までは比較的信頼性に富むが、数百

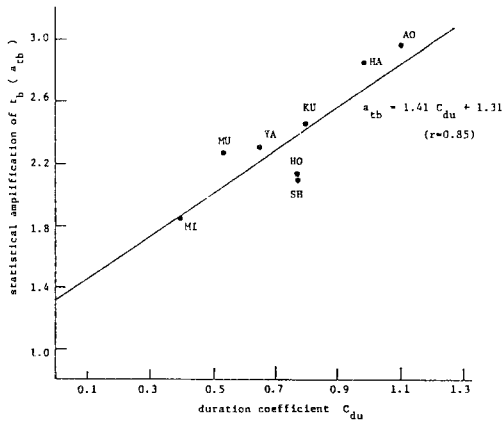


Fig. 13 Relation between duration coefficient C_{du} and amplification factor a_{ib} of b -duration.

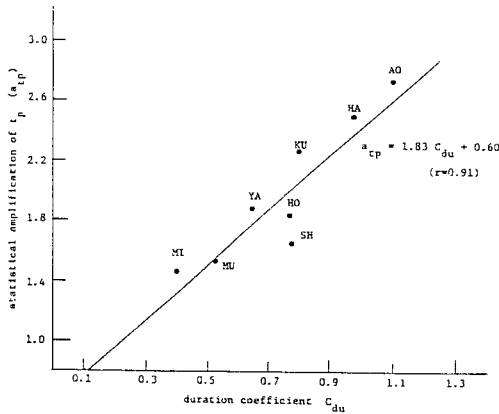


Fig. 14 Relation between duration coefficient C_{du} and amplification factor a_{ip} of p -duration.

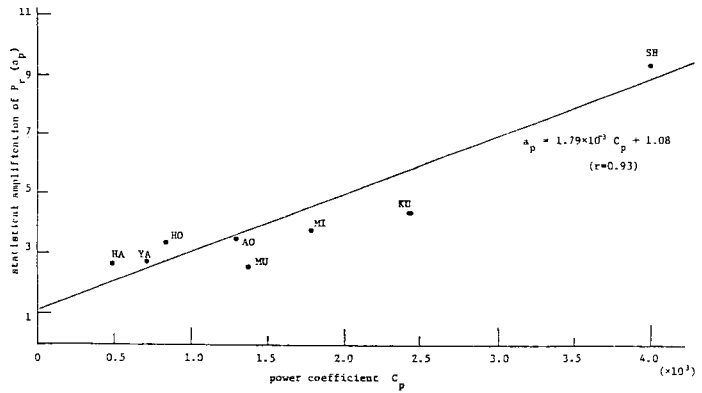


Fig. 15 Relation between power coefficient C_p and amplification factor a_{pr} of total power.

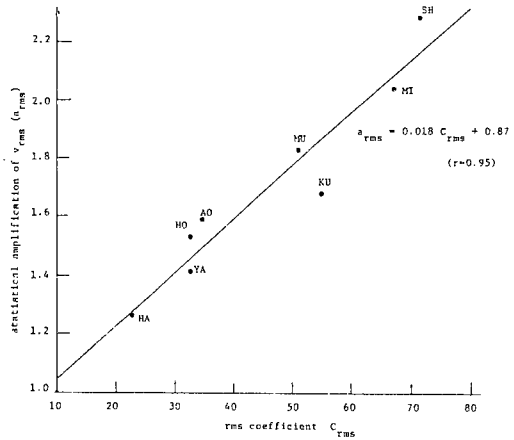


Fig. 16 Relation between rms coefficient C_{rms} and amplification factor a_{rms} of rms amplitude.

メートルのオーダーの構造は HACHINOHE を除き、推定の度合いが強い。ここでは、Table 2 が現在の情報の範囲内で最も妥当な地盤構造との前提で議論をすすめる。

(2) 理論的係数の算定と統計解析結果の比較

Table 2 に示す観測点の地盤構造を用いて 2. で述べたパワー係数 C_p 、継続時間係数 C_{du} 、rms 係数 C_{rms} を求めた。これらの理論係数を 3. で述べた b 継続時間、 p 継続時間、全パワー、rms 振幅値の統計的増幅率 a_{ib} 、 a_{ip} 、 a_{pr} 、 a_{rms} と対応させながらプロットしたのが Fig. 13 ~ Fig. 16 である。これらの図中で示す AO などは各観測点の頭文字をとった略号である。

Fig. 13 ~ Fig. 16 から、いずれのパラメーターとも統計的増幅率と理論係数がよく対応していて、良好な相関を有することがわかる。そこで、これらに直線回帰を仮定すると、各パラメーターにつき次のような回帰式が求まる。ここに、 r は相関係数である。

$$a_{ib} = 1.41 \cdot C_{du} + 1.31 \quad (r = 0.85) \dots \dots \dots (30)$$

$$\alpha_{ip} = 1.83 C_{du} + 0.60 \quad (r = 0.91) \dots \dots \dots (31)$$

$$\alpha_{pr} = 1.79 \times 10^{-3} \cdot C_p + 1.08 \quad (r = 0.93) \dots \dots \dots (32)$$

$$\alpha_{rms} = 0.018 \cdot C_{rms} + 0.87 \quad (r = 0.95) \dots \dots \dots (33)$$

式(30)～式(33)から各パラメーターの基盤に対する増幅率は地盤構造が知れると、理論的に評価することができることになる。一方、基盤での統計的アテニュエーション式はすでに式(26)～式(29)に与えられている。したがって、式(26)～式(29)と式(30)～式(33)を結びつけることにより、*b* 継続時間 t_b 、*p* 継続時間 t_p 、全パワー P_r 、*rms* 振幅率 V_{rms} の予測式が次のように半経験式として与えられる。

$$t_b = 0.74 \cdot 10^{0.23M_J} \cdot \Delta^{-0.084} \cdot 10^{-0.0004H} \cdot (1.41 C_{du} + 1.31) \dots \dots \dots (34)$$

$$t_p = 0.444 \cdot 10^{0.21M_J} \cdot \Delta^{0.048} \cdot 10^{-0.0019H} \cdot (1.83 C_{du} + 0.6) \dots \dots \dots (35)$$

$$P_r = 0.614 \cdot 10^{0.71M_J} \cdot \Delta^{-0.685} \cdot 10^{-0.0007H} \cdot (1.79 \times 10^{-3} C_p + 1.08) \dots \dots \dots (36)$$

$$V_{rms} = 0.861 \cdot 10^{0.23M_J} \cdot \Delta^{-0.34} \cdot 10^{-0.0008H} \cdot (0.018 C_{rms} + 0.87) \dots \dots \dots (37)$$

式(34)～式(37)は地震のマグニチュード M_J 、震央距離 Δ 、震源深さ H のみならず、観測点の地盤構造をも考慮して震動継続時間およびその関連パラメーターの予測式を与えるものであり、従来の研究が特に観測点の影響を考慮していないことを考えると、一歩前進した式と位置づけられよう。

式(34)～式(37)で予測される値と実測値とをすべてのパラメーターについて比較することは紙数の関係で困難なので、代表例として *p* 継続時間 t_p の場合について示すと Fig. 17 のようになる。Fig. 17 の例からも、ここで提案する半経験式が合理的な予測値を与えていることを確認できよう。

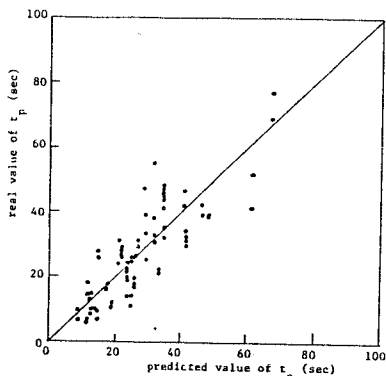


Fig. 17 Predicted values and real ones for t_p .

5. む す び

本論文では地盤の震動性状を表わす代表的パラメーターとして震動継続時間、全パワー、*rms* 振幅値などを取り上げ、これらのパラメーターが地盤構造、地震の諸元（マグニチュード、震央距離、震源深さ）によって、どのような影響を受けるかを波動理論と統計的手法を用いて検討した。この検討により得られた結論を要約すると次のようになる。

(1) 震動継続時間、パワー、*rms* 振幅値などの地盤の震動性状を表わすパラメーターは地盤構造により大きな影響を受ける。S波重複反射の理論的検討によれば、震動継続時間は地盤が軟弱になるほど、軟弱層が厚いほど、表面層と基盤との剛性差が著しいほど長くなる。また、震動継続時間とパワー、*rms* 振幅値などの振幅特性とは地盤構造により相反する影響を受ける。

(2) 上述のパラメーターは地盤構造のほかに地震の諸元の影響を受ける。本研究では地震の諸元を表わす説明変数としてマグニチュード、震央距離、震源深さを取り上げ、これらの変数が上述の震動継続時間、パワー、*rms* 振幅値などにどのような影響を及ぼすかを強震記録を用いて統計解析した。その結果、式(18)～式(21)の重回帰式を得た。

(3) 地震の諸元のみを説明変数とした重回帰分析に加え、さらに観測点の影響を考慮した統計解析として、ダミー変数を導入した重回帰分析を行った。この解析により、基盤における上述のパラメーターのアテニュエーション式を求めるとともに、各観測点での増幅率を明らかにした。この結果、震動継続時間、*rms* 振幅値は約0.8～3.5程度の増幅率をもって観測点により変動すること、全パワーは1.0～13.0程度の比較的大きな増幅率の変動があることが知れた。

(4) 震動継続時間、パワー、*rms* 振幅値などのパラメーターに関する理論係数と統計解析により求まる増幅率はよい相関を示す。これらの関係式を求めるとともに、統計解析結果と理論係数とを結びつけ、地震の諸元および観測点の地盤構造が与えられたときの各パラメーターの予測式が半経験式として求められた。これらは式(34)～式(37)に与えられている。

以上、本論文では地盤の震動性状を表わすパラメーターとして震動継続時間、パワー、*rms* 振幅値を取り上げたが、本論文で述べた手法は最大振幅値、スペクトルなどのほかパラメーターにも適用できる。これについては稿を改めて述べることにしたい。

最後に、貴重な強震記録を提供されている運輸省港湾技術研究所、建設省土木研究所の皆様へ感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Seed, H. B. : Landslides during earthquake due to soil liquefaction, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division ASCE, Vol. 94, No. SM5, pp. 1055 ~ 1122, 1968.
- 2) 金井・酒井：広尾沖における釧路の強震記録と構造物の被害について，第3回日本地震工学シンポジウム講演集，pp. 771 ~ 778, 1970.
- 3) Bolt, B. A. : Duration of strongmotion, Proceedings of 5th World Conference on Earthquake Engineering, pp. 1304 ~ 1313, 1973.
- 4) Trifunac, M. D. and Brady, A. G. : A study on the duration of strong earthquake ground motion, Bull. Seis. Soc. Am., Vol. 65, No. 3, pp. 581 ~ 626, 1975.
- 5) Dobry, R., Idriss, I. M. and Ng, E. : Duration characteristics of horizontal components of strongmotion earthquake records, Bull. Seis. Soc. Am., Vol. 68, No. 5, pp. 1487 ~ 1520, 1978.
- 6) 神山：地震時における地盤内の応力，ひずみの評価，土木学会論文報告集，第250号，pp. 9 ~ 23, 1976.
- 7) 嶋・工藤：軟弱な地層によるS波の減衰，第3回日本地震工学シンポジウム講演集，pp. 269 ~ 276, 1970.
- 8) 土田・倉田：港湾地域強震観測年報，港湾技研資料（1963 ~ 1982）.
- 9) 岩崎・若林・川島・高木：土木構造物における加速度強震記録（No. 1 ~ No. 8），土木研究所彙報，1978 ~ 1983.
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編.
- 11) Draper, N. R. and Smith, H. : Applied Regression Analysis, John Wiley Sons Inc., New York, 1966.

(1984. 1. 19・受付)