

地表での強震記録から粘弾性モデルにより 推測した基盤の震動特性

CHARACTERISTICS OF BASE-ROCK MOTIONS CALCULATED
BY THE USE OF STRONG-MOTION ACCELEROGRAMS AT
GROUND SURFACE APPLYING VISCO-ELASTIC ANALYSIS

井 藤 昭 夫*
By Akio ITOH

1. はじめに

地震動特性は、基盤を含め、表層地盤を構成する媒質に左右されることから、土の剛性と振動減衰定数のひずみ依存性についての研究^{1)~7)}などや、地盤の地震応答解析に関する研究^{8)~20)}などが数多く発表されてきている。

しかし、入力地震波は、その応答解析を行う地盤で得られた地震記録がないのが普通であり、類似地盤構成をもつ他で得られたものを用いるのが一般的である。

ところが、この類似地盤で得られた地震記録は、大部分が地表部で観測されたものであり、地盤の応答解析に用いるため、波動理論によりいったん基盤まで戻す方法がとられる¹⁹⁾など。ただ地盤での震動によるひずみが大きくなると地盤の応力-ひずみの関係は非線形性が強くなり、震動を非線形の波動として扱わなければならない。

土の非線形波動に関する既往の研究は、土の粘弾性的挙動をばねとダッシュポットの組合せで表示する力学モデル^{21), 22)}など、あるいは応力-ひずみの履歴曲線を既知の関数で表示する数学モデルによる研究^{4), 5)}などと、もう一つは応力-ひずみ関係を等価な剛性と減衰定数をもつ線形モデルに置換する等価線形化手法による研究とに大別される。

本論での解析は、力学モデルの一つである 3 要素モデルと等価線形化手法との 2 つの方法により行った。

ここで図-1 に力学モデルの代表的なものを示し、そのおもな特性を述べると次のようになる。すなわち図-1 の Voigt, Maxwell, 3 要素モデルともこれらモデルによる剛性と減衰定数は、周波数に依存し、特に前二者のモデルの減衰特性は周波数に大きく依存する^{16), 22)}。この周波数依存性のある程度解消し得るものが 3 要素モデルである。

ただこの 3 要素モデルによる解析例は、現在のところあまり多くなく、しかも解析に用いられている震動の最大加速度は地表部で 40 gal 程度のものである^{13), 15), 16)}など。

そこで本論は、3 要素モデルと等価線形化手法を用いて、地表部での最大加速度が 10 gal 以上 125.0 gal までの数種の強震記録からそれぞれの基盤での震動を推測し、その結果と実際に基盤で観測された震動との比較を行い若干の考察を加えたものである。

なお等価線形化手法によるひずみと剛性、履歴減衰定数との関係は Hardin-Drnevich の曲線を用いることにした。

また解析に用いた強震記録は、北海道内の道路橋に設置している地中地震計で得られた記録のうち、地表部での最大加速度が 10 gal 以上の水平動成分で、計 14 成分である。

2. 粘弾性モデルによる波動理論

(1) 3 要素モデル

このモデルによる応力とひずみの関係は次式となる。

$$\sigma = G_2 \cdot \varepsilon_2 + \eta \cdot \frac{\partial \varepsilon_2}{\partial t} \dots \dots \dots (1)$$

$$\sigma = G_1 \cdot \varepsilon_1 \dots \dots \dots (2)$$

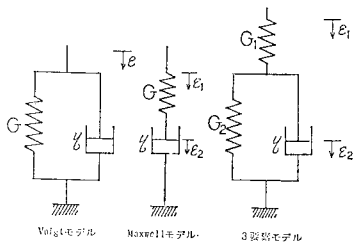


図-1 各種の粘弾性モデル (力学モデル)

* 正会員 北海道開発局土木試験所第 2 研究部構造研究室室長

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 G ：剛性、 η ：粘性係数、 σ ：応力、 ε ：ひずみ、 t ：時間を表わす。

いま、 $\frac{\partial}{\partial t} = A$ とすれば、式 (1)、(2) から式 (3) は

$$\varepsilon = \sigma / (G_2 + \eta \cdot A) + \sigma / G_1 \dots \dots \dots (4)$$

となる。

結局式 (4) から σ と ε との関係は次式となる。

$$\sigma + \frac{r}{1+n} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial t} = G_0 \left(\varepsilon + r \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right) \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 r ： η / G_2 (遅延時間)、 n ： G_1 / G_2 (剛性比)、 G_0 ： $G_2 \cdot n / (1+n)$ を表わす。

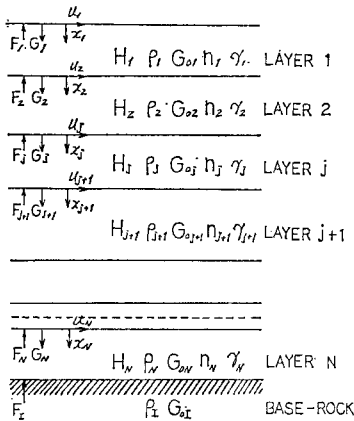


図-2 多層地盤モデル

したがって式 (5) から 図-2 の多層地盤の波動方程式は、 j 層での密度を ρ_j 、変位を $u_j(x, t)$ とし次式となる。

$$\rho_j \left(1 + \frac{r_j}{1+n_j} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial^2 u_j(x, t)}{\partial t^2} = G_{0j} \left(1 + r_j \cdot \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial^2 u_j(x, t)}{\partial x^2} \dots \dots \dots (6)$$

式 (6) の解は、外乱の振動数を ω とすれば

$$u_j(x, t) = U_j(x) e^{i\omega t}, \quad i = \sqrt{-1} \dots \dots \dots (7)$$

となり、次の x に関する常微分方程式を得る。

$$\frac{d^2 U_j(x)}{dx^2} + k_j^2 U_j(x) = 0 \dots \dots \dots (8)$$

ここに k_j は

$$k_j^2 = \rho_j \omega^2 / G_j^* \dots \dots \dots (9)$$

であり、 G^* は複素剛性で、次式のようになる。

$$G^* = G_{0j} \{ (1+n_j)(1+n_j+r_j^2\omega^2) + in_j(1+n_j)r_j\omega \} / \{ (1+n_j)^2 + r_j^2\omega^2 \} \dots \dots \dots (10)$$

k_j は式 (9) から次のようになる。

$$k_j = \tilde{\alpha}_j \omega (\pm 1 \mp ih_j) / V_{sj} \dots \dots \dots (11)$$

ここに h_j は j 層での減衰定数である。また V_{sj} は j 層での S 波速度であり次式で表わされる。

$$V_{sj} = G_{0j} / \rho_j \dots \dots \dots (12)$$

さらに式 (11) の $\tilde{\alpha}_j$ と h_j は次式により表わされる。

$$\tilde{\alpha}_j = \sqrt{\left(1 + \frac{r_j^2 \omega^2}{1+n_j} \right) / (1+r_j^2 \omega^2)} \dots \dots \dots (13)$$

$$h_j = \frac{n_j r_j \omega}{2(1+n_j+r_j^2 \omega^2)} \dots \dots \dots (14)$$

そこで式 (8) を x について解き、式 (7) に代入すると、 j 層での変位が求まり、次式となる。

$$u_j(x, t) = (P_j e^{ik_j x} + Q_j e^{-ik_j x}) e^{i\omega t} \dots \dots \dots (15)$$

またせん断応力は次式となる。

$$\sigma_j(x, t) = G_j^* \cdot \frac{\partial u_j(x, t)}{\partial x} \dots \dots \dots (16)$$

式 (15)、(16) より波動の重複反射理論を適用して、 $j, j+1$ 層の変位とせん断応力の連続条件から P_j, Q_j に関する次の漸化式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} P_{j+1} - Q_{j+1} &= \alpha_j (P_j e^{ik_j H_j} - Q_j e^{-ik_j H_j}) \\ P_{j+1} + Q_{j+1} &= P_j e^{ik_j H_j} + Q_j e^{-ik_j H_j} \end{aligned} \right\} \dots \dots (17)$$

ここに、 H_j は j 層の層厚、 α_j は複素インピーダンス比といわれるもので、次式で表わされる。

$$\alpha_j = \sqrt{\rho_j \cdot G_j^* / \rho_{j+1} \cdot G_{j+1}^*} \dots \dots \dots (18)$$

式 (17) から P_{j+1}, Q_{j+1} は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} P_{j+1} &= \frac{1}{2} \{ P_j (1 + \alpha_j) e^{ik_j H_j} + Q_j (1 - \alpha_j) e^{-ik_j H_j} \} \\ Q_{j+1} &= \frac{1}{2} \{ P_j (1 - \alpha_j) e^{ik_j H_j} + Q_j (1 + \alpha_j) e^{-ik_j H_j} \} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (19)$$

地表面ではせん断応力が 0 であるから $P_1 = Q_1$ となり、式 (19) で $P_1 = Q_1 = 1$ とし順次 P_j, Q_j が求まる。

ところで、非減衰の波動方程式の一般解は周知のとおり、S 波の速度を V_s とし次式となる。

$$u_j(x, t) = F(t - x/V_s) + G(t + x/V_s) \dots \dots (20)$$

ここに、関数 F, G はそれぞれ進行波および逆行波による変位を表わす。ここでは k_j が式 (11) のとおり、複素数であり、式 (20) のような時間領域での一般解を厳密に求めることは困難である。

そこで粘弾性体の波動問題を解く方法には、一般的に周波数領域で計算する方法^{(11), (12)}などとか、等価な伝達関数を有するせん断質点系を定め、この質点系の応答として時間領域で計算する方法^{(9), (10)}などがある。

それで、本論では以下、前者のフーリエ変換による周波数領域で計算する方法を用いる。

計算の手順は次のようになる。

まず、地中での加速度波形のフーリエ変換形を $G(\omega)$ とすれば、

$$G(\omega) = Z(\omega) \cdot F(\omega) \dots \dots \dots (21)$$

ここに、 $Z(\omega)$ は入力波である地表部で得られた加速度波形に対する地中での倍率を表わす周波数伝達関数であり、 $F(\omega)$ は入力波の周波数領域でのフーリエ変換形

である。地層の j 層での $Z(\omega)$ は次式により求まる。

$$Z(\omega) = (P_j + Q_j) / (P_1 + Q_1) \dots\dots\dots (22)$$

基盤での $Z(\omega)$ は、入射波、反射波の振幅をそれぞれ P_N, Q_N とし、式 (19) を用いて次式となる。

$$Z(\omega)_N = (P_N + Q_N) / 2 \dots\dots\dots (23)$$

したがって基盤での時系列波形を $g(t)$ とすれば、次式のように、入力波のフーリエ変換形に周波数伝達関数に乗じたものをフーリエ逆変換して得られる。

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Z(\omega) \cdot F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \dots\dots\dots (24)$$

(2) 等価線形化手法

この手法を以下等価線形モデルとよぶ。

このモデルの応力とひずみの関係は、剛性を G 、粘性係数を η とし、次式で表わされる。

$$\sigma = G \cdot \varepsilon + \eta \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \dots\dots\dots (25)$$

また、 j 層での波動方程式は β_j を減衰定数とし、他の定数を式 (6) の場合と同じように表わせば次式となる。

$$\rho_j \frac{\partial^2 u_j(x, t)}{\partial t^2} = G_{0j} \left(1 + \frac{2\beta_j}{\omega} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial^2 u_j(x, t)}{\partial x^2} \dots\dots\dots (26)$$

ところで等価線形モデルによる考え方は、土のひずみとせん断応力の履歴曲線から剛性と履歴減衰定数を等価な量に置換して線形系として扱うものである。

したがって減衰定数は、この履歴減衰定数のほかに依然として土の粘性減衰定数が存在しているので、この両減衰定数の和となる。

そこで、剛性を G 、等価減衰定数を h_{eq} とすれば、

$$\left. \begin{aligned} G &= G_{eq} \\ h_{eq} &= h_{eqh} + h_v \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (27)$$

となる。ここに G_{eq} は等価剛性、 h_{eqh} は等価履歴減衰定数、 h_v は粘性減衰定数を表わす。

ひずみと剛性、減衰定数との関係を Hardin-Drnevich によれば、 h_{eqh} は

$$h_{eqh} = h_0 (1 - G_{eq} / G_0) \dots\dots\dots (28)$$

となる。ここに h_0 はひずみが無限大のときの減衰定数で、 G_0 はひずみが無限小のときの剛性を表わす。

したがって地層 j 層での剛性、減衰定数をそれぞれ G_{eqj}, h_{eqj} とすれば、

$$\left. \begin{aligned} G_{0j} &= G_{eqj} \\ \beta_j &= h_{eqj} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (29)$$

となる。

結局式 (26) の解は式 (15) と同様になるが、このモデルでの k_j は次式となる。

$$k_j = \sqrt{\rho_j \omega^2 / G_j^*} = \omega (1 - i\beta_j) / V_{sj} \dots\dots\dots (30)$$

なお、 β_j は 3 要素モデルでの減衰定数と異なり周波

数 ω に依存しない値である。

また α_j, P_j, Q_j は式 (18) と式 (30) を式 (19) に代入して得られる。以下の計算方法については、3 要素モデルと同様であるので省略する。

3. 地盤のひずみの計算

地盤の剛性と減衰定数は、震動によるひずみに依存するのは前述したとおりであり、各層のひずみをまず求める。本論では地表部で得られた加速度記録を用いて地中のひずみを計算するが、計算方法は文献²⁰⁾の方法と同様であるので簡単に述べる。

地層 j 層でのひずみを $\varepsilon_j(x, t)$ とすれば式 (15) から

$$\begin{aligned} \varepsilon_j(x, t) &= \frac{\partial u_j(x, t)}{\partial x} \\ &= ik_j (P_j e^{ik_j x} - Q_j e^{-ik_j x}) e^{i\omega t} \dots\dots (31) \end{aligned}$$

となる。

地表面ではせん断応力が 0 であるから

$$P_1 = Q_1 = 1/2 \cdot A(t) \dots\dots\dots (32)$$

ここに $A(t)$: 地表面での変位を表わす。

$A(t)$ は、入力加速度を $f(t)$ とし、そのフーリエ変換を $F(\omega)$ とすれば結局次式により求まる。

$$A(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{F(\omega)}{-\omega^2} e^{i\omega t} d\omega \dots\dots\dots (33)$$

式 (33) および以降のフーリエ変換の計算は、高速フーリエ変換法によったが、電算プログラムは文献²¹⁾に示されているものを借用させていただいた。

式 (31) より j 層でのひずみが求まるが、 k_j の値は 3 要素および等価線形モデルでの値を用いて行うことになる。

それぞれのモデルにより求まる j 層での最大ひずみの 0.65 倍を有効ひずみとした²⁰⁾。

なお、実際の演算では、Nyquist 振動数が、入力波の時間間隔を 0.01 秒としたため、50 Hz となるが、入力波に含まれていると思われる長周期の波動を除くため 0.5 Hz 以下を、また粘弾性体中では短周期を有する波動の減衰が大きいため 10 Hz 以上の波動をそれぞれ除いて行うことにした。

4. 地質柱状図および地震記録と地震計性能の概要

地震計設置場所のボーリング柱状図を図-3 に示す。

図-3 での S 波速度は N 値から推定し²³⁾、また各地層の密度は既存の資料から類推したものである。

また、地震記録および地震計性能に関する概要を表-1 に示す。

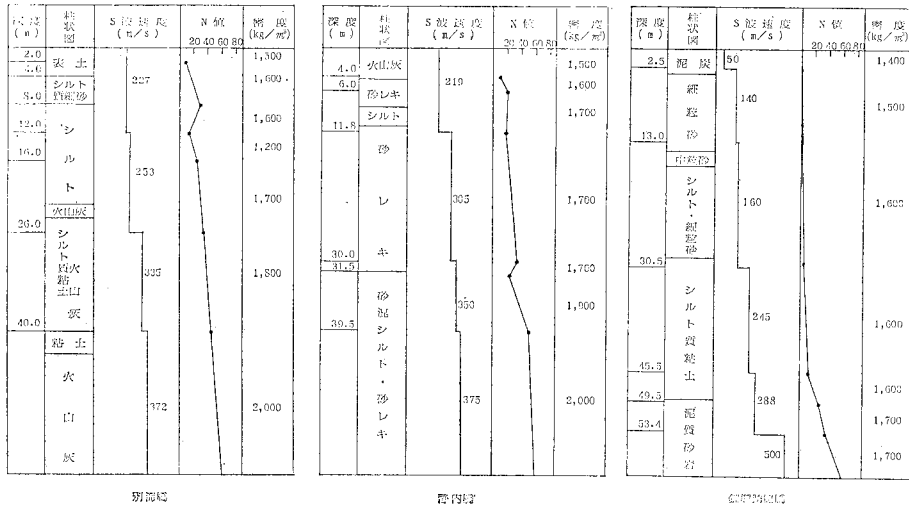


図-3 ボーリング柱状図と地盤条件

表-1 地震記録, 地震計性能概要

	別海橋	静内橋	釧路跨線橋	
観測位置	N 43°23'00" E 145°17'30"	N 42°19'10" E 142°22'30"	N 42°59'50" E 144°25'39"	
地震計位置	GL -2.0 m GL -40.0	GL -1.5 m GL -39.5	GL -0.5 m GL -53.4	
最大加速度 gal (上段地表部) (下段地中)	38.7~169.6 17.2~85.0	31.7~64.2 17.3~37.5	17.7~30.4 2.4~5.2	
解析記録数 (上段地表部) (下段地中)	6 6	4 4	4 4	
おもな地震計性能	固有振動数	約 7.5 Hz	同 左	地盤 5 Hz 地中 3 Hz
	成分数	上下 1 水平 2	同 左	同 左
	感度	0.3 v/cm/s	同 左	地盤 15 μA/gal 地中 10 μA/gal
	減衰定数	h=20	同 左	h=11
	振動数範囲	0.5~30 Hz	同 左	地盤 0.3~30 Hz 地中 0.5~40 Hz
	測定範囲	200 gal	同 左	600 gal
	起動レベル	2 gal	同 左	10 gal
	記録方式	スクラッチ記録	同 左	電磁オシログラフ

5. 解析方法

3要素モデルと等価線形モデルに関する各定数は次のように定めた。

まず, 3要素モデルの n は文献¹³⁾に示されている次の剛性を G とする関係式を用いることにした。

$$n = 1.22 G^{0.286} \quad G : t/cm^2 \dots\dots\dots (34)$$

また, r の値は次のような方法で設定した。

このモデルによる減衰定数 h は 図-4 のように n, r, ω により変化する。この図のうち, 曲線の平坦になる領域, すなわち $r\omega$ の 1.0 付近が3要素モデルの適用領域

である。また図中の曲線で勾配が正で直線の領域が, Voigt モデルで, 曲線のピークを過ぎた領域が Maxwell モデルの領域である。

したがっていま $r\omega$ を 1.0 とすれば r は近似的に次式となる。

$$r \approx 1/\omega \dots\dots\dots (35)$$

そこで ω を対象とする地層の卓越周期とし, しかも ω がおおむね 1~5 Hz とすれば, r は 0.03~0.15 となる。

一方, 等価線形モデルでは, 土のひずみと剛性との関係を 図-5 により, また h_{eqh} は式 (28) から h_0 を 0.3 として求めた。一方 h_v は文献²⁴⁾を参照して 0.02~0.10 の範囲であると仮定した。

なお, 各地震計設置場所の土質をボーリング柱状図からみると, おおむね砂層でシルトや粘土も粘性が小さく

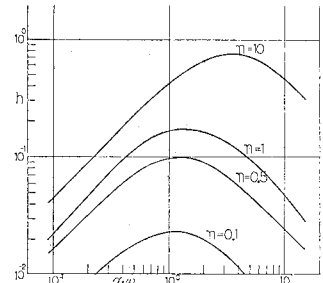


図-4 3要素モデルの $r\omega, n$ と h との関係

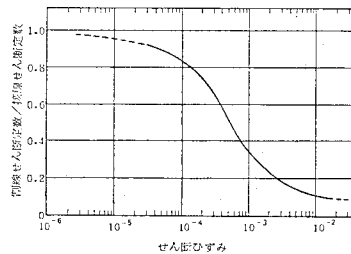


図-5 Hardin-Drnevich のせん断定数とひずみとの関係 (砂)

砂分が多く観察されたことから、ひずみと剛性との関係は、すべて砂の場合の Hardin-Drnevich の曲線に従うものとした。

また、基盤では剛性の変化と震動の減衰作用はないものとした。

解析はこのような仮定のもとに、 r を 0.03~0.15, h_v を 0.02~0.10 として、この範囲内の数値を組み合わせて行った。なお地震計設置場所の各地層での r は一定とした。

それから表層を S 波速度に応じて成層に分割した。

分割は、各地層の N 値の変化や土質名の変わるところを成層の境とみなしたこと、また文献⁸⁾の方法を参考にした。

文献⁸⁾による分割数は、各地層の第 1 次固有周期に及ぼす誤差を 2% 以内とした場合、3 か所の表層地盤の固有周期を 0.2~1.0 秒と仮定すると、3~5 となる。

それで別海橋と静内橋は 3 層で、それぞれの S 波速度が 335, 350 m/s 以下、また釧網跨線橋については 5 層で S 波速度が 288 m/s 以下を表層とした。

以上の計算上の仮定を設定したうえで、まず地表部での波動の増幅率の概要を把握するため 3 要素および等価線形モデルによる周波数伝達関数を求めた。

ところで、地表部から基盤に戻した震動は、実際に基盤で観測された震動とどの程度近似しているかを比較し検討されなければならない。

本論では、ボーリング柱状図や既往の研究からの資料をもとに基盤での震動の概要を推測する一方法であるため、基盤での震動の最大加速度と加速度応答スペクトル

に比較の対象を限定した。

検討の方法は、地表部での最大加速度の大きさごとに行うものとし、強震記録の 0~50 gal を I, 50~100 gal を II, 100~200 gal を III とするグループに別けて行うことにした。

一般に、異なる観測地で得られた地震記録について増幅率を考察する場合は、地盤種別(文献²⁵⁾による表層地盤の特性値 T_G は、別海、静内、釧網跨線橋でそれぞれ 0.565, 0.529, 1.316 で前二者が第 3 種、釧網跨線橋で第 4 種となる) ごとに行うが、ここでは 3 橋の架橋位置とも比較的軟弱な地盤であり、加速度の大きさのみに注目してグループ別にした。

6. 解析結果

解析の結果は、両モデルによる基盤での最大加速度な

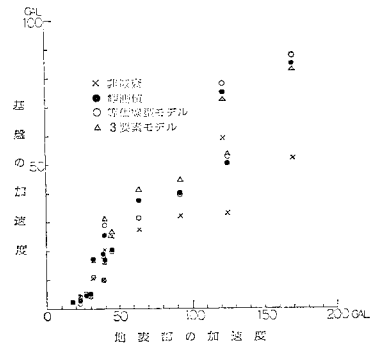


図-6 最大加速度の地表部と基盤との関係

表-2 地表部と基盤における最大加速度

記録番号	記録箇所、成分	地震諸元	地表部の絶対最大加速度		基盤での絶対最大加速度			
			加速度 (観測値)	観測値	計算値			
					非減衰	3要素モデル	等価線形モデル	
1	別海橋, TR	1972. 3.26 N 43°04', E 146°13' M=6.4, D=50 km, Δ=83 km	125.0 gal	50.3 gal	32.9 gal	53.0 gal (r=0.10)	52.5 gal (h _v =0.10)	
2	〃, LG		91.6	40.0	32.0	44.1 (r=0.10)	39.6 (h _v =0.05)	
3	〃, TR	1975.12. 3 N 43°05', E 145°56' M=5.2, D=50 km, Δ=62 km	38.7	19.0	9.0	17.5 (r=0.05)	10.1 (h _v =0.02)	
4	〃, LG		40.0	17.2	16.4	30.7 (r=0.05)	11.3 (h _v =0.02)	
5	〃, TR	1978.12. 6 N 44°44', E 146°58' M=7.7, D=100 km, Δ=203 km	169.6	85.0	52.2	82.5 (r=0.10)	87.7 (h _v =0.10)	
6	〃, LG		122.3	75.2	59.2	72.2 (r=0.10)	77.9 (h _v =0.10)	
7	静内橋, TR	1974.10.20 N 42°08', E 142°32' M=5.2, D=40 km, Δ=26 km	38.8	16.5	13.5	23.1 (r=0.07)	16.3 (h _v =0.02)	
8	〃, LG		31.7	17.3	13.5	16.3 (r=0.07)	11.0 (h _v =0.02)	
9	〃, TR	1974.11. 9 N 42°29', E 142°47' M=6.5, D=130 km, Δ=37 km	64.2	37.5	27.2	40.8 (r=0.10)	33.8 (h _v =0.05)	
10	〃, LG		45.0	20.6	26.4	25.8 (r=0.10)	19.5 (h _v =0.02)	
11	釧網跨線橋, TR	1979. 5.17 N 42°46', E 144°49' M=5.0, D=60 km, Δ=41 km	17.7	2.4	3.0	5.2 (r=0.05)	3.2 (h _v =0.02)	
12	〃, LG		23.2	3.0	3.6	5.5 (r=0.05)	3.9 (h _v =0.02)	
13	〃, TR	1979. 7. 4 N 43°46', E 146°39' M=5.9, D=50 km, Δ=201 km	26.9	4.4	4.1	6.3 (r=0.05)	4.4 (h _v =0.02)	
14	〃, LG		30.4	5.2	5.0	7.3 (r=0.05)	5.4 (h _v =0.02)	

D: 震源の深さ, Δ: 震央距離, r: 遅延時間, h_v: 粘性減衰定数

どを表-2に、最大加速度の地表部と基盤との関係を図-6に、また基盤-地表部の最大加速度の増幅率を各地震による単純平均値として図-7に示した。

図-8は各観測地での地表部の周波数伝達関数を3要素および等価線形モデルによって求めたものである。

図-9は基盤で実際に観測された記録から求めたフーリエスペクトルのうち、各観測地につき代表的なも

ののみを示した。

また、地表部から基盤に戻した震動の周波数特性が、基盤で実際に観測された震動の周波数特性とどの程度近似しているかを検討するため、それぞれの震動から加速度応答スペクトル値を求めた(図-10~12)。

図-10~12では各観測地につき代表的なもののみを示したが、鋼網跨線橋については非減衰により計算した基盤での震動と観測した震動とによるスペクトルにほとんど差がなかったため、3要素および等価線形モデルによるスペクトル値の図示を省略した。なおすべての加速度応答スペクトル値は、減衰定数が0.05の場合である。

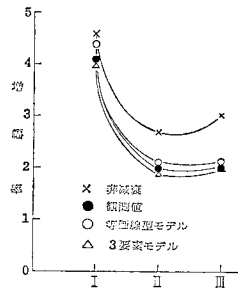


図-7 基盤～地表部の最大加速度増幅率

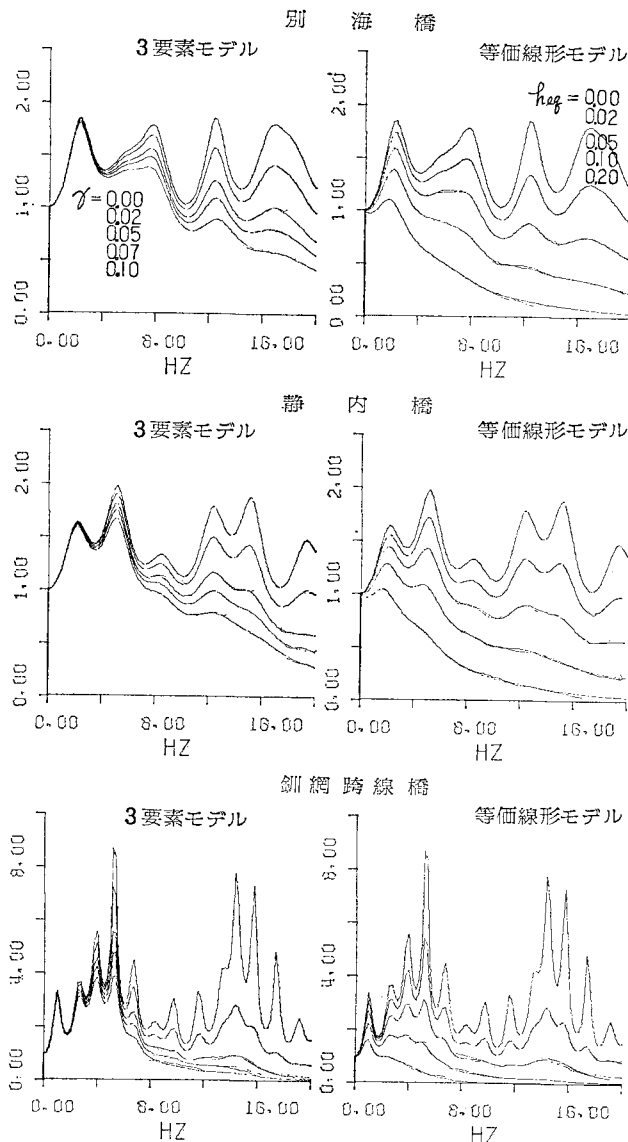


図-8 基盤～地表部の周波数伝達関数(計算値)

7. 結 論

本研究は、地表部で得られた強震記録から基盤の震動特性の推測を、ボーリング柱状図や既往の研究成果の数値を引用した土の粘弾性モデルを適用して試みたものである。本研究の成果の要約は以下ようになる。

(1) 観測値から基盤-地表部の最大加速度の増幅率は、表-2、図-6、7に示したように地表部での最大加速度が大きくなるに従い低下する。これらから求めた増幅率の平均値は加速度レベルの小さい方から4.1~2.0である。

(2) 基盤での最大加速度を3要素モデルまたは等価線形モデルで推測する場合は、減衰に関する定数を地表部での加速度レベルに応じて変化させる必要がある。

すなわち3要素モデルでの剛性比 n が式(34)に従うものとして、表-2に示したように、 r は地表部での最大加速度が50 gal以内で0.05~0.07、同じく50~100 galで0.07~0.10、100~200 galで0.10程度となる。また等価線形モデルでの h_v は、同じく50 gal以内で0.02、50~100 galで0.05、100~200 galで0.10程度となる。

(3) ただ地表部での最大加速度が50 gal程度未満の場合は、基盤での最大加速度を非減衰のS波の重複反射理論で求めてもよいと思われる。

(4) 一方図-8の周波数伝達関数による増幅率をみると、減衰に関する定数が採用する土の粘弾性モデルにより異なるので単純に比較できないが、 r と h_{eq} が図示した程度の値であれば、用いた2つのモデルによる増幅率にあまり差はないといえる。ただ等価線形モデルでの

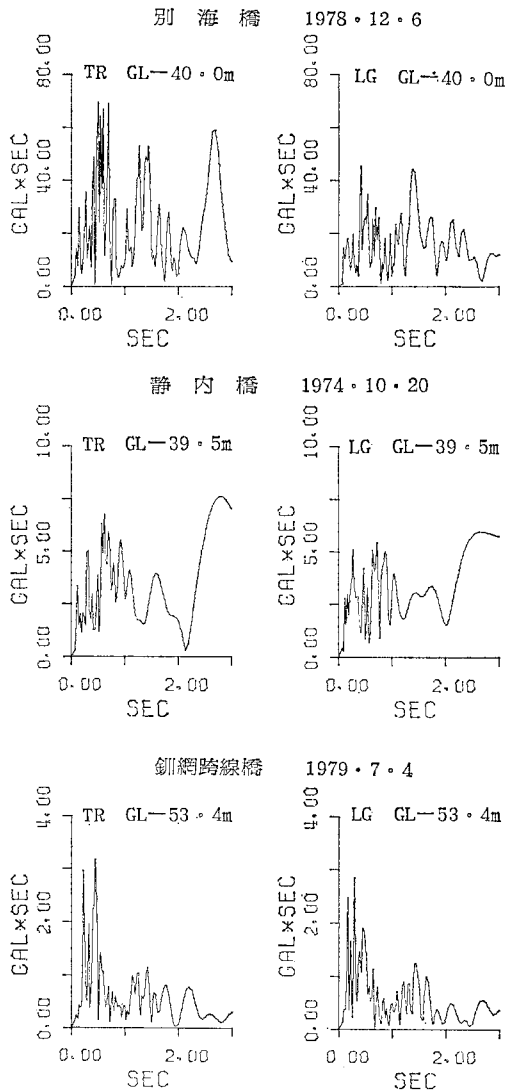


図-9 基盤におけるフーリエスペクトル (観測値)

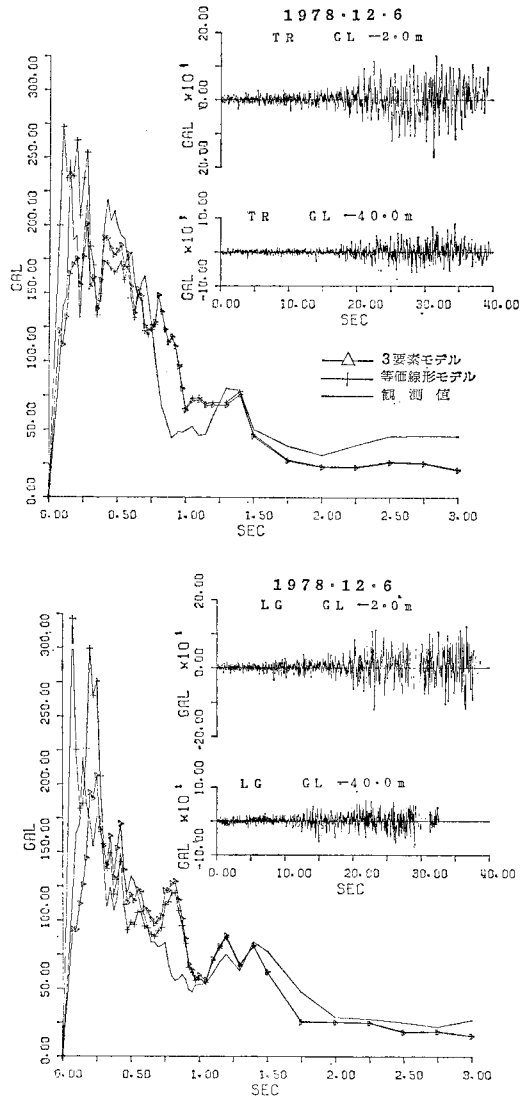


図-10 別海橋加速度応答スペクトル (基盤)

増幅率は h_{eq} の増加により全周波数領域で低下することから h_v の設定は、精確な資料から行うべきであると思われる。

(5) 3要素および等価線形モデルで基盤に戻した震動の周波数特性は、図-10, 11の加速度応答スペクトルから推定すると、式(34)による3要素モデルの剛性比や、(2)で述べた両モデルの減衰に関する定数の設定から比較的良好に表わすことができる。

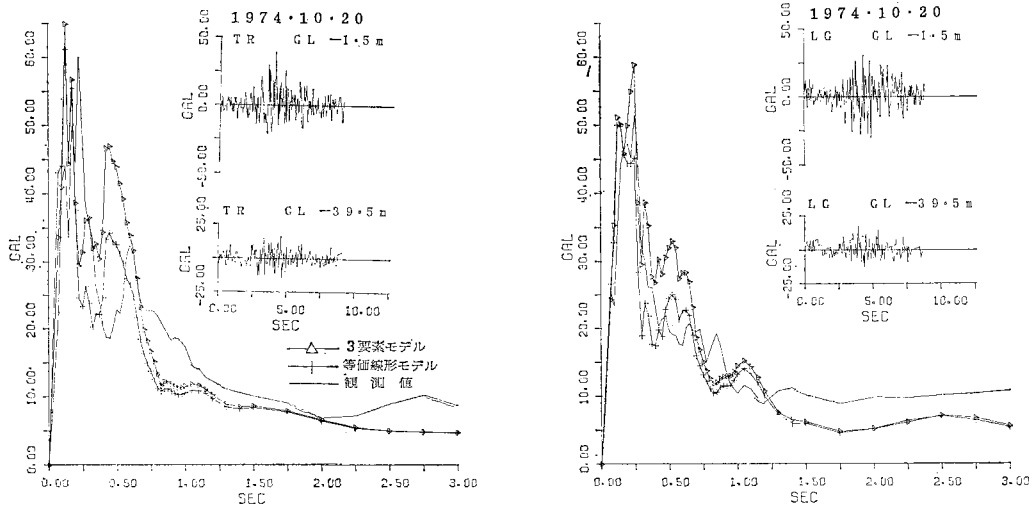
(6) 高周波数領域では、別海、静内橋の例から3要素および等価線形モデルで求めた基盤での震動の加速度応答スペクトル値と実際に基盤で観測された震動から求めたスペクトル値との間に振動周期のずれがみられる。この原因は土の剛性の周波数依存性によると考えられる。

(7) 高周波数領域での震動の減衰性は、図-10のように基盤での加速度が比較的大きい場合には、3要素モデルの方が等価線形モデルより良好であると思われる。

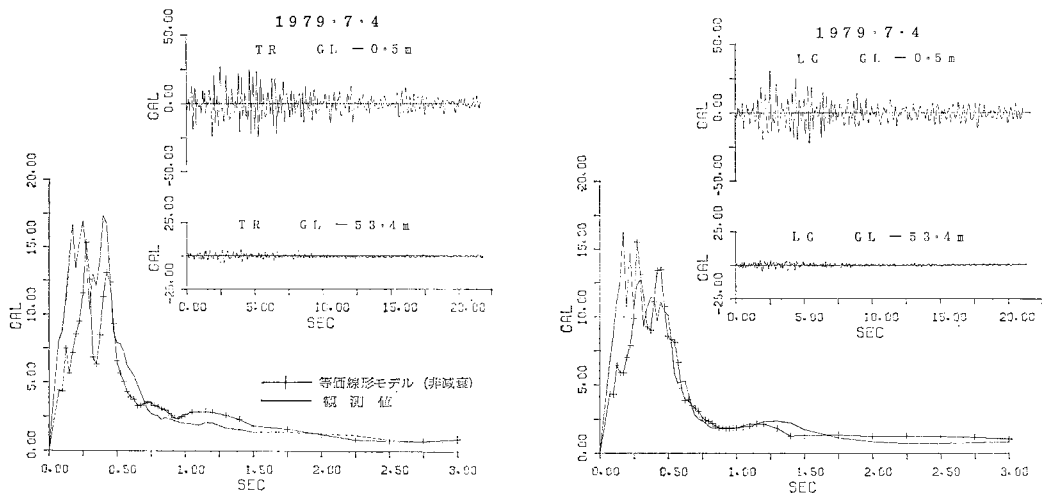
8. あとがき

本研究は、土の応力-ひずみ関係を3要素モデルと等価線形モデルとにより表示し、この2つのモデルを用いて、地表部での強震記録から基盤での震動特性を推測し実際に基盤で得られた震動の特性と比較したものである。

震動特性についての比較には、最大加速度、基盤-地表部の加速度の増幅率、および加速度応答スペクトル値を用いて行った。



図—11 静内橋加速度応答スペクトル（基盤）



図—12 鋼網跨線橋加速度応答スペクトル（基盤）

その結果、当初の基盤での震動特性の推測という目的は、ある程度満足し得たと考えられる。

すなわち、地表部で得られた強震記録から基盤での震動を推測する場合、本論で扱ったような第3、第4種地盤では、表層地盤のひずみにより低下する剛性ととも減衰定数の増加が基盤での震動特性に大きく影響し、特に最大加速度が100 gal以上の記録を用いるときには基盤での加速度を過小に評価するおそれがある。

ただ、採用した強震記録が少ないことや土質試験を行わず、主として各種文献から諸定数を引用したことなど多くの問題がある。

なお今後の課題として、地盤に大きなひずみを生じさせる強震記録を収集し、土質試験の成果と対比しながら考察を深めることや、粘弾性モデルの改良やその物理定

数の計測と設定方法についての研究を進めることなどが考えられる。

参考文献

- 1) 畑野 正・渡辺啓行：粘土，砂，碎石の動的，静的粘弾性定数ならびにポアソン比について，土木学会論文報告集，No. 164，1964-4.
- 2) Jacobsen, L.S.: Damping in Composite Structures, Proc. 2nd WCEE, Tokyo, Japan, 1960.
- 3) Seed, H.B. and I.M. Idriss: Influence of Soil Conditions on Ground Motions during Earthquakes, Proc. ASCE, SMI, pp. 99~137, 1969.
- 4) Jennings, P.C.: Periodic Response of a General Yielding Structure, Proc. ASCE, EM 2, pp. 131~166, 1964.
- 5) Hardin, B.O. and V.P. Drnevich: Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves, Proc. ASCE, SM 7, pp. 667~692, 1972.

- 6) 栗林栄一・岩崎敏男・龍岡文夫・堀内俊一：土の動的変形特性—共振法土質試験による測定—, 建設省土木研究所振動研究室, 土木研究所資料, 第 912 号, 昭和 49 年 5 月.
- 7) 岩崎敏男・龍岡文夫：土の動的性質の現場測定と室内実験, 第 4 回日本地震工学シンポジウム講演集, pp. 391~398, 1975.
- 8) Idriss, I.M. and H.B. Seed: Seismic Response of Horizontal Soil Layers, Proc. ASCE, SM 4, pp. 1003~1031, 1968.
- 9) 山崎 裕: 地震入力波及び建物, 基礎, 地盤の相互作用—粘弾性地盤内を伝わる せん断波動の時間域における 計算法について, 昭和 45 年度建設省建築研究所年報, pp. 297~315.
- 10) 山崎 裕: 粘弾性地盤中の剪断波の伝達—時間領域の計算法—, 日本建築学会大会 学術講演 梗概集, pp. 683~684, 昭和 46 年 11 月.
- 11) 政尾 享・鈴木 哲・平沢光春・鈴木敏夫: 地盤の振動に関する波動法の応用, その 1, 1 次元多層粘弾性体としての 計算法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 687~688, 昭和 46 年 11 月.
- 12) Tsai, N.C. and G.W. Housner: Calculation of Surface Motions of a Layered Half-Space, Bull. of Seismological Society of America, Vol. 60 No. 5, 1970.
- 13) 太田外気晴: 地盤の動力学的性質とその応用, その 2, 表層地盤の弾塑性解析, 第 2 回地盤震動 シンポジウム資料集「ストレン・レベルによる地震動」, 日本建築学会振動分科会地盤震動小委員会, pp. 41~45, 1973-11.30.
- 14) 石原研而・根井基雄・上田 茂・竹原有二: 地震時における埋立軟弱地盤の応答解析, 第 4 回 日本地震工学シンポジウム講演集, pp. 423~430, 1975.
- 15) 太田外気晴・丹羽正徳・有子山直樹: 地震記録に基づく表層地盤の粘弾性的性質の検討, 鹿島建設技術研究所年報, 第 25 号, pp. 203~208, 1976.
- 16) 太田外気晴: 地震動と地盤の減衰特性, 第 6 回 地盤震動シンポジウム, 地盤震動研究の現状と展望, 日本建築学会構造標準委員会振動分科会 地盤震動小委員会, pp. 43~50, 1978-3.28.
- 17) 岩崎敏男・川島一彦・龍岡文夫: 地盤の地震応答に及ぼす土の非線形性の影響, 土木研究会 土木技術資料 22-12, pp. 27~32, 1980.
- 18) 原 昭夫・清田芳治: 土の非線形応力~ひずみのモデルと地盤の弾塑性地震応答解析, 鹿島建設技術研究所年報, 第 28 号, pp. 229~238, 1980.
- 19) 土田 肇・上部達生: 地表における強震記録より推定した基盤の地震動の特性, 運輸省港湾技術研究所年報, 第 11 卷, 第 4 号, 1972-12.
- 20) Schnabel, P.B., J. Lysmer and H.B. Seed: "SHAKE" A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontal Layered Sites, Report No. EERC 72-12, College of Engineering University of California Barkeley, California, Dec. 1972.
- 21) 大崎順彦: 地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会.
- 22) 石原研而: 土質動力学の基礎, 鹿島出版会.
- 23) 今井常雄・吉村正義: 軟弱地盤における弾性波速度と力学特性, 土と基礎, Vol. 18, No. 1, pp. 17~22, 1970-1.
- 24) 土質工学会: 土質基礎工学ライブラリー 9, 土と構造物の動的相互作用, pp. 24~42.
- 25) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 3.6 耐震設計上の地盤種別.

(1981.11.30・受付)