

1. まえがき

地震時における地動のうち支配的なものとしてS波がある。そこで地盤の振動性状を解析するにあたり筆者はセン断変形のみを考慮した連続体解法を解析的に導いてきた。この連続体モデルに置換する方法は *Driss* と *Seed*⁽¹⁾ によるものであるが、深さ方向への振動特性の変化は層構造を考慮することを解決できなかった。本報告は青森県津軽大橋架設地点、北海道札幌市郊外樽川地点および北海道岩内町美和村地点といふ3枚弱層或いは岩層を例にとって連続体解法により解析を行ったものである。

2. 多層地盤のセン断振動 mode 解⁽²⁾

多層地盤 m 層目層のセン断振動方程式は

$$\rho_m \ddot{u}_m + C_m \dot{u}_m = G_m u_m \quad (m=1, 2, \dots, k) \quad (1)$$

で、 ρ_m , C_m , G_m , および u_m は密度、粘性減衰係数、セン断弾性係数および水平方向相対変位である。これは変数分離法で mode 型と固有振動数も導くことにより解ける。

$$u_m(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} Z_{mn}(z) \cdot T_{mn}(t) \quad (2)$$

mode 型 Z_{mn} は境界条件

$$\left. \begin{aligned} u_m(H_m, t) &= u_{m+1}(H_m, t) \\ G_m u_m'(H_m, t) &= G_{m+1} u_{m+1}'(H_m, t) \end{aligned} \right\} \quad \text{ただし } G_1 u_1'(0, t) = 0, u_k(H_k, t) = 0 \quad (3)$$

$$\text{より, } Z_{mn}(z) = A \left\{ I_m \cos \beta_m (z - H_{m-1}) - \lambda_{m-1} J_m \sin \beta_m (z - H_{m-1}) \right\} \quad (H_{m-1} \leq z \leq H_m) \quad (4)$$

ただし、 $\lambda_m = \sqrt{\rho_m / G_m}$, H_m は m 層下端までの深さ、 λ_m は m 層の厚さ、 ρ_m は固有振動数、 $\beta_m = \alpha_m \rho_m$, $\gamma_m = \beta_m \lambda_m$, $\lambda_{m-1} = \sqrt{\rho_{m-1} G_{m-1} / \rho_m G_m}$ は振動インピーダンス、 $S_m = \sin \gamma_m$, $C_m = \cos \gamma_m$, $I_m = I_{m-1} C_{m-1} - \lambda_{m-2} J_{m-1} S_{m-1}$, $J_m = I_{m-1} S_{m-1} + \lambda_{m-2} J_{m-1} C_{m-1}$, $I_0 = J_0 = J_1 = 0$, $I_1 = 1$, $I_2 = C_1$, $J_2 = S_1$, $\lambda_1 = \lambda_0 = 0$, $(m=1, 2, \dots, k)$ である。ここで ρ_m は次の固有振動数方程式より求まる。

$$I_{k+1}(\rho_k) = 0 \quad (5)$$

T_{mn} は強制外力 $\{-\rho_m \ddot{g}(t)\}$ の加わる場合

$$\ddot{T}_{mn} + 2\lambda_m \rho_m \dot{T}_{mn} + \rho_m^2 T_{mn} = -R_{mn} \ddot{g} \quad (6)$$

を解いて決まる。ここに $\lambda_m = C_m / 2\rho_m \rho_m$, $\lambda_n = \lambda_m \rho_m$, $\rho_m = \rho_m \sqrt{1 - \lambda_n^2}$ で $C_m / \rho_m = C_{m+1} / \rho_{m+1}$ は連続条件に用いた。また強制項の展開係数 R_{mn} は

$$\begin{aligned} R_{mn} &= \int_0^1 Z_{mn}(\xi) d\xi / \int_0^1 Z_{mn}^2(\xi) d\xi \\ &= 2(I_{m+1} - \lambda_{m-1} J_m) / \{ \gamma_m (I_m^2 + \lambda_{m-1}^2 J_m^2) + S_m (I_m I_{m+1} - \lambda_{m-1} J_m J_{m+1}) \} \\ \text{ただし, } R_{kn} &= 2S_k (1 - C_k) / I_k (I_k - S_k C_k) \quad (m=1, 2, \dots, k) \quad (7) \end{aligned}$$

相対変位応答は式(2)で決まり、相対速度、絶対加速度は式(2)と適当に時間微分して求まる。

3. 多層地盤の地震応答解析結果

青森県津軽大橋架設地点(A地点)、北海道札幌市郊外樽川地点(B地点)および北海道岩内町美和村地点(C-a, C-b, C-c の3地点)における表層地盤とみよす水平地層の弾性特性は表-1に示すこ

とくなる。表中 V_s , P はセン断波速度, poisson 比である。軟弱地盤 A 地点に比して C 地点は岩層露出部のあるため固い層からなる。また C-a 地点ではサニ層がその下層のサニ, 四層より固い弾性特性を示している。

Table — 1

V_s $\frac{cm}{sec}$	ρ $\frac{kg}{cm^3}$	G $\frac{kg}{cm^2 sec}$	ν
10^4	10^{-3}	10^5	10^0
0.45	1.4	0.28	0.49
1.40	1.8	3.53	0.49
2.00	2.0	8.00	0.48
3.00	2.2	19.8	0.47

A

V_s $\times 10^4$	ρ $\times 10^{-3}$	G $\times 10^5$	ν $\times 10^0$
1.25	1.6	0.78	0.49
1.60	1.9	5.05	0.49
1.90	2.0	7.22	0.48
2.75	2.2	1.66	0.47
3.45	2.3	2.74	0.47

B

V_s $\times 10^4$	ρ $\times 10^{-3}$	G $\times 10^5$	ν $\times 10^0$
4.50	1.9	3.85	0.40
11.5	2.3	30.4	0.29
6.80	2.2	10.2	0.39
9.30	2.2	19.0	0.32
14.0	2.3	45.1	0.29

C-a

V_s $\times 10^4$	ρ $\times 10^{-3}$	G $\times 10^5$	ν $\times 10^0$
2.90	1.8	1.51	0.45
3.70	1.9	2.60	0.42
6.30	2.1	8.34	0.40
8.30	2.2	15.2	0.35

C-b

V_s $\times 10^4$	ρ $\times 10^{-3}$	G $\times 10^5$	ν $\times 10^0$
2.30	1.8	0.85	0.44
3.50	1.9	2.08	0.40
4.80	1.9	4.15	0.40
10.0	2.3	23.0	0.32

C-c

次に各地点での固有周期 (T_n sec), 減衰定数 (λ_n) のための強制項展開係数 (R_{mn}) を表-2 に示す。これに関しては経験的に $C_{mn}/P_{mn} \approx 2.5$ より計算した。 R_{mn} は 10 次まで示したが実際の計算には収斂の状態により 50 次までくみ込んだ。しかし最下端層厚が薄い A, C-a 地点では R_{5n} の収斂度が悪いため、換算係数

Table — 2

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	1.707	0.749	0.492	0.327	0.278	0.215	0.178	0.164	0.139	0.128
B	0.993	0.413	0.289	0.208	0.160	0.128	0.104	0.093	0.084	0.074
C-a	0.119	0.044	0.030	0.021	0.015	0.013	0.011	0.010	0.008	0.007
C-b	0.211	0.083	0.052	0.038	0.029	0.024	0.020	0.018	0.015	0.014
C-c	0.162	0.070	0.048	0.035	0.026	0.020	0.018	0.016	0.014	0.012
A	0.339	0.149	0.098	0.065	0.055	0.043	0.036	0.033	0.028	0.025
B	0.198	0.082	0.057	0.041	0.032	0.025	0.021	0.018	0.017	0.015
C-a	0.024	0.010	0.006	0.004	0.003	0.0027	0.0023	0.0020	0.0017	0.0016
C-b	0.054	0.048	0.021	0.014	0.009	0.006	0.0058	0.0051	0.0045	0.0042
C-c	0.034	0.015	0.010	0.008	0.005	0.0045	0.004	0.0035	0.0031	0.0026
B	R1	1.034	1.182	1.273	0.972	0.257	-0.191	-0.396	-0.422	-0.329
	R2	1.179	3.074	-3.835	-1.847	-0.902	0.116	1.834	1.551	-0.223
	R3	1.630	-2.781	-2.860	2.366	0.212	-0.404	0.016	-0.538	0.083
	R4	3.559	-2.418	4.040	-3.738	-0.939	1.747	-4.192	1.883	-0.021
	R5	8.641	-4.620	5.523	-3.646	1.613	-2.385	5.479	-3.544	1.416
C-a	R1	1.046	1.259	1.067	0.086	-0.378	-0.424	-0.248	0.088	0.240
	R2	1.189	8.910	-1.867	-1.194	-1.538	3.737	1.412	0.341	-1.763
	R3	1.355	-3.708	-2.538	0.893	1.310	0.688	-0.900	-0.880	1.650
	R4	2.172	-2.185	2.696	-0.071	-0.172	-0.263	0.066	0.354	-0.737
	R5	14.44	-8.410	6.573	-1.178	1.630	-3.932	1.245	-1.660	3.881

固有モード型 Zmn (Z)

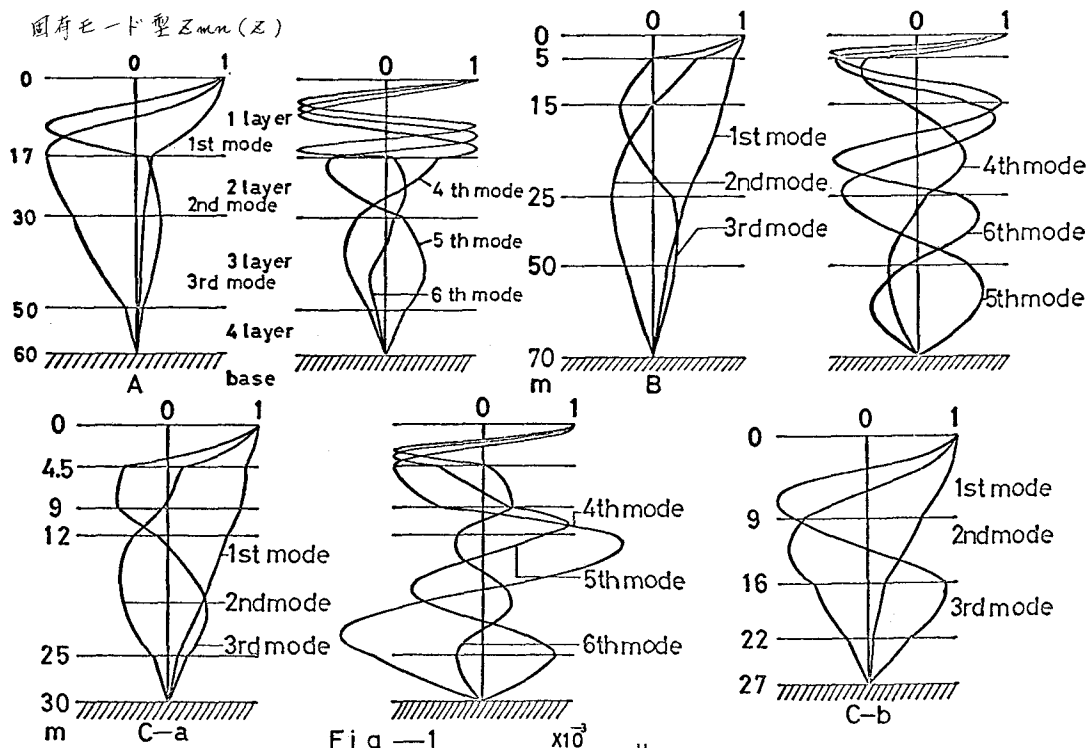


Fig-1

C-b 地点での常時微動波形 ($Z=28.6m$ 基盤・EW 加速度波) を選び、最大値を 100gal と相似に引伸ばしたものを強制外力として用い、地表での応答値を示したものが図-2である。表-2で判るように C-b での固有周期は $T_1=0.211\text{sec}$ であるが、 $0.1 \sim 0.2 \sim 0.6(\text{sec})$ なる Sin 波外力についても応答値を計算してみた。図-3は応答波の時刻 $0.7, 1.7, 3.2 \text{ sec}$ における応答値および応答最大値を示した分布図である。

また次の図-4は Sin 波外力によるものであるが、入力波と応答波の共振現象がはっきり表われている。図-5は常時微動波の power Spectrum であるが $0.2, 0.07 \text{ sec}$ に peak があるが選択度の低い。そのため図-3の応答値は小さく、振動型も1次～3次を多様であることが判る。それは図-6の地表 ($Z=0m$) での応答 Spectrum から判明する。しかるに最も選択度の高い Sin 波外力による応答は共振現象が表われ、振幅の増幅度の高いことが判る。

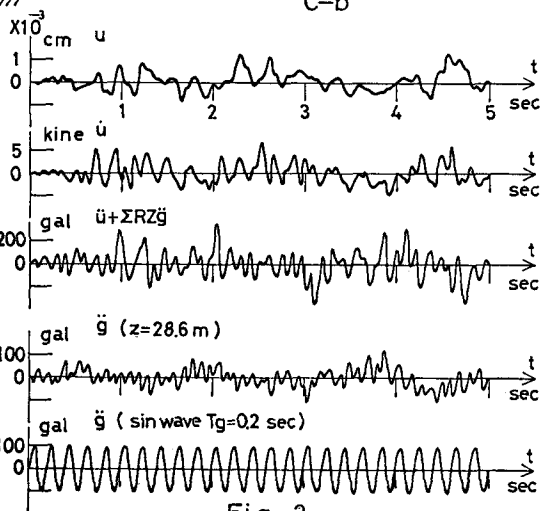


Fig-2

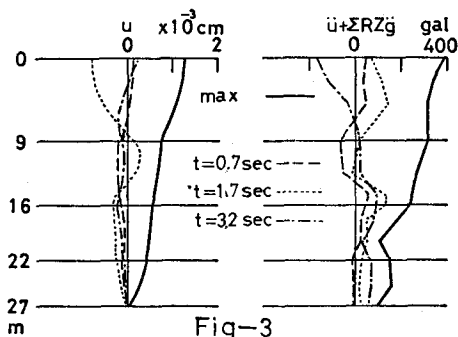


Fig-3

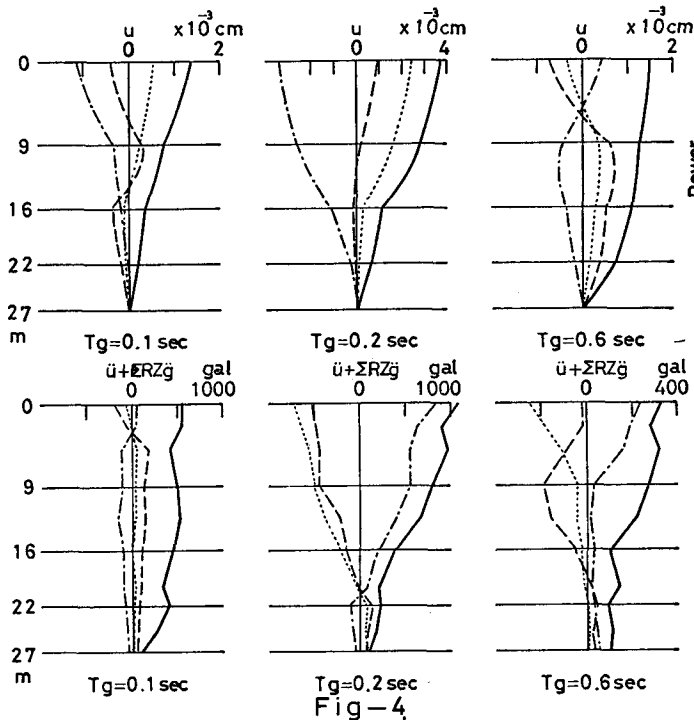


Fig-4

4. あとがき

地震時の基盤の卓越周期 (T_g) は震央距離あるいは magnitude によって変動することは経験的に金井⁽³⁾も指摘している。そこで基盤の周期の卓越部が地盤の固有値と一致する場合図-6で示したように極端に選択されて増幅する。しかし、中原⁽⁴⁾の使った周期選択度(増集度)に注目すれば、選択度の低い入力波に対する応答はそれほど増幅されないが、Spectrum で peak のはまりした選択度の高い入力波に対する応答の場合は入力波のもつ energy level が小さくても増幅度は大きい。このことは今回の連続体解法による計算結果からも容易に説明できた。

また入力波と応答波の power spectrum density から地盤全体の周府応答関数(共振曲線)を算出して地表のものだけを図-7に示したが、波動理論(この場合はSH波の多重反射理論)における N.A. Haskell 流の振動特性(増幅率)⁽⁵⁾とはよく一致した。最後に北沢渡辺教授の御指導に対し感謝致します。FACOM 230-60 使用

- 参考文献 1) I.M. Durriss & H.B. Seed, "Seismic Response Horizontal Soil Layeres", *proc. of A.S.C.E* 1968
 2) 金子孝吉, "多層地盤のせん断振動による振動応答および振幅分布", 第25回年次学術講演会
 3) K. Kanai, "Semi-empirical Formula for the Seismic Characteristics of the Ground", *Bull. Earth. Res. Inst.* 1957
 4) 中原 浩, "地盤の周波数特性と建物の地震被害", 昭44.11 建築学会論文報告集第165号, 他,
 5) N.A. Haskell, "Crustal Reflection of plane SH Waves", *Journal Geophysical Research* vol. 65 No. 12, 1960

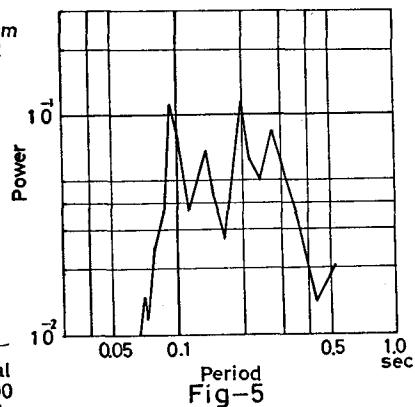


Fig-5

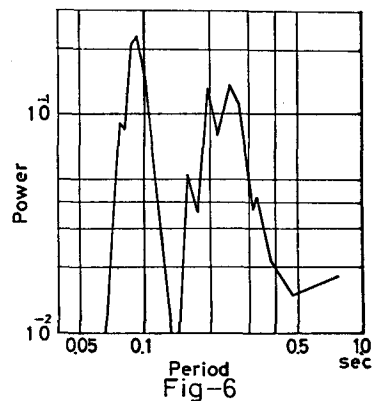


Fig-6

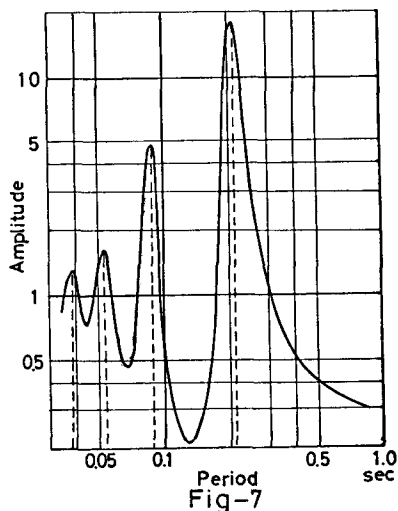


Fig-7