

九州大学工学部
同正員 小 坪 清 夏
学生員 山 登 武 志

1. 緒言

杭基礎、井筒基礎などの地中構造物の耐震設計を合理的に行うには、地震時における地盤変形を推定することが必要である。最近この問題については各方面で盛んに研究されているが、地盤の非線型の性質、地震波の複雑性などのため、実用に供しうる的確な計算法がまだ確立されていない。

地盤が破壊するような大地震の場合の地盤の動きは論外として、弾性限界内の微小振動に対しては十分な解析法があるとは思われな。従来、構造物が建設される地盤の地震時挙動推定のために用いられている方法は、地盤表面または地盤内における常時振動観測による地盤卓越周期の推定、ボーリング孔におけるN値やR値の測定によるものなどである。これらのデータを基にして、地盤の応力歪関係を求め、基礎から入射する地震波に対する地盤の挙動を解析し、構造物の合理的な設計を行っている。このような方法は地表面における挙動は推定できるからとされるが、地中における地盤の動きをを求めることは困難のように思われる。

本研究は地盤の卓越周期ばかりでなく、ボーリング孔における常時振動観測により地盤の剛性の深さ方向の分布を決定し、地盤の動きの深さ方向の分布を推定しようとするもので、特に地中構造物の耐震設計を合理的に行うのを目的としている。

2. 地盤の剛性の推定

図-1 多層地盤

図-1に示す多層地盤におかれ、基礎から入射する地震波によって地盤がせん断振動を行っているとすれば、各層のせん断振動の方程式は水平変位を u_i とし次式で表わされる。

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = C_i^2 \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i^2} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

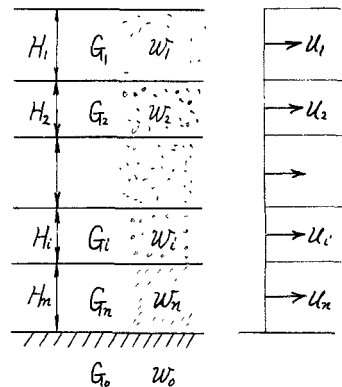
$$C_i^2 = \frac{g G_i}{\gamma_i}$$

ここに、 g は重力加速度、 G_i 、 γ_i はそれぞれ i 層の地盤の剛性率、単位体積重量である。 $u_i = X_i \sin \omega t$ とおけば X_i が次式で与えられる。

$$X_i = A_i \sin \frac{\omega}{C_i} x_i + B_i \cos \frac{\omega}{C_i} x_i \quad \dots \dots \quad (2)$$

今、各層でこの式を x_i の各層の境界における連続の条件より次の関係式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dX_1(0)}{dx} = 0, \quad G_1 \frac{dX_1(H_1)}{dx_1} = G_2 \frac{dX_2(0)}{dx_2}, \quad \dots, \quad G_{n-1} \frac{dX_{n-1}(H_{n-1})}{dx_{n-1}} = G_n \frac{dX_n(0)}{dx_n} \\ X_1(H_1) = X_2(0), \quad X_2(H_2) = X_3(0), \quad \dots, \quad X_{n-1}(H_{n-1}) = X_n(0), \quad X_n(H_n) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$



(3)式は2n個の A_i, B_i に関する2n元の同次方程式とびくから、この係数行列式より、この多層地盤の固有円振動数 ω を求めることができる。つぎに A_i, B_i の大きさの比、従って、地盤のせん断振動のmodeを決定することが出来る。逆に、他の方法(常時微動測定)によって ω および振動modeが分れば、地盤の弾性定数 G_i を求めることができる。具体的計算法は後述する。

3. パワースペクトルと振動型との関係

常時微動も基盤中からの入射波による上層地盤の重複反射の現象と考えれば、常時微動のパワースペクトル分布は地震時における各深さにおけるパワースペクトル分布に等しいとみよふであろう。

従って、ここで、常時微動のパワースペクトルの平方根の分布が地盤の振動型に相似であるかどうかを検討してみる。

図-2 はn層地盤における上昇波 R_i と下降波 F_i を示したものであるが次の関係が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} F_1(T) &= R_1(T-H_1/V_1) \\ R_1(T) &= \beta_1' R_2(T-H_2/V_2) + \beta_1' F_1(T-H_1/V_1) \\ F_2(T) &= \beta_1 R_2(T-H_2/V_2) + \beta_1' F_1(T-H_1/V_1) \\ R_2(T) &= \beta_2' R_3(T-H_3/V_3) + \beta_2' F_2(T-H_2/V_2) \\ &\vdots \\ F_n(T) &= \beta_{n-1} F_n(T-H_n/V_n) + \beta_{n-1}' F_{n-1}(T-H_{n-1}/V_{n-1}) \\ R_n(T) &= \beta_n R_0(T) + \beta_n' F_n(T-H_n/V_n) \end{aligned} \right\} (4)$$

ここに、 V_i は各層の波動速度

β_i, β_i' は(i-1)層とi層間の透過係数と反射係数。

β_i, β_i' はi層と(i+1)層間の　　と　　

基盤からの入射波 $R_0(T)$ を用いて各層の波動の大きさを計算すること出来る。

本論では $R_0(T)$ として0.25%から0.25%おきに10%までの振動数成分を一様に含む入エラシム波を用いて、1層地盤および2層地盤に対して波動の重複反射を計算し、各深さの波動のパワースペクトルを求めた。図-3~6 は1層地盤の各深さにおける波動、そのパワースペクトル、スペクトルがピークを示す周振数におけるパワースペクトルの平方根の深さ方向の分布を示す。

図-7~9 は同じく2層地盤に対するものである。パワースペクトルのピークの位置はこの地盤の卓越振動数を表わす。

一方、§2に示した振動論により、この地盤の固有振動数を求めると、波動論による卓越振動数とよく一致する。すなわち、図-5, 8 の実線は振動論によって得られたこの地盤の振動型である。

これらの数値計算例から明らかになるように、基盤から入射する波動の重複反射によって生ずる地盤の卓越振動数は地盤のせん断振動論によって求められる固有振動数に一致し、すなわち、波動のパワースペクトルのピークの位置における値の平方根は、せん断振動論によって求められる振動型に相似であることが判った。従って、§3に述べた方法の妥当性が一定証明された。

図-2 上昇下降波

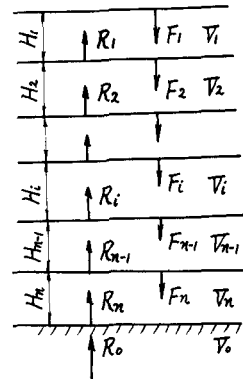
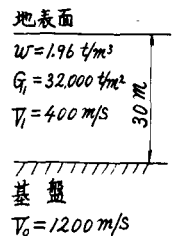


図-3 一層地盤



しかし、上記の計算は地盤の常時微動が地震波と同じように基盤からの入射波によって起ると仮定しているのど、常時微動測定においては、できるだけ表面波の影響を除くように努めなければならない。

4. 振動型の測定法

地盤の剛性率 G_s を決定するにはその地盤の卓越周期 $T=2\pi/\omega$ 及び振動型を測定しなければならない。このためには、地盤中に基盤に達するまでボーリングし、孔中の各深さで常時微動を測定し、そのパワースペクトルを求めればよい。

5. G_s の計算法

§.2 に G_s の計算が可能なることを述べたが、具体的には次のような計算法を用いるがよい。図-10 に示すように、

地盤を質点系に分解し、

質点の重量を $W_i (=l_i \omega_i)$

バネ定数を k_i とすると

各質点の振幅 a_i と卓越

振動数 ω_i とを用いて、

S 点の変位は次のよう

に表わされる。

$$a_s = \sum_{i=1}^n (a_i - a_i) \\ = \sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i} \sum_{j=1}^n \frac{W_j}{g} a_j \omega_j^2 \quad (5)$$

(5) 式を各点において 2 すると、未知数 $1/k_s$ に関する n 元の連立方程式が得られる。これより $1/k_s$ を求めると、S 点と (S+1) 点間の地盤の剛性率 G_s は次の方法で求められる。

S 点と (S+1) 点の間のせん断力を Q_s とすれば

$$\delta_s = \int \frac{Q_s}{G_s} dx \quad \frac{Q_s}{\delta_s} = \frac{G_s}{l_s} = k_s \quad G_s = k_s l_s \quad \dots \dots (6)$$

(6) 式により各深さにおける G_s の分布を決定することが出来る。

図-4 波動

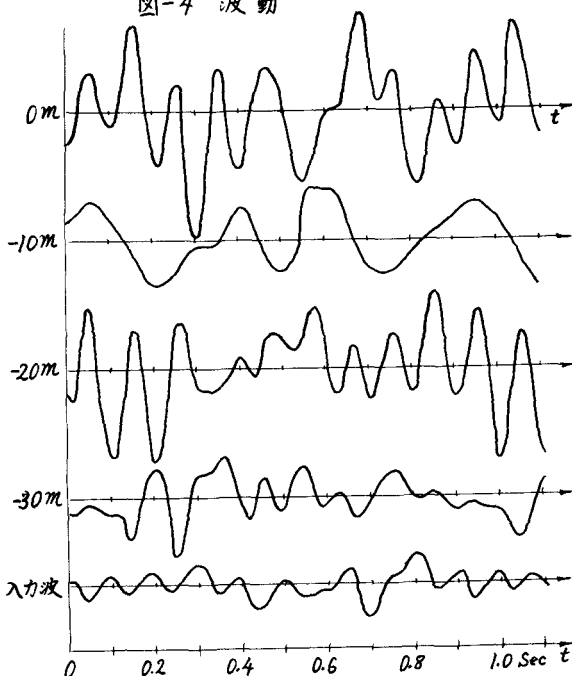


図-6 スペクトルの平方根と振動型 (一層地盤)

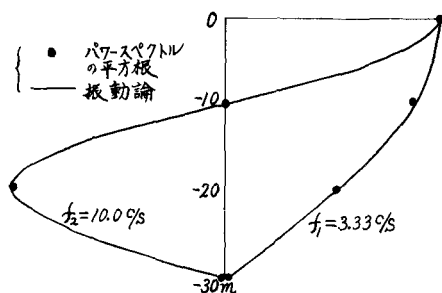
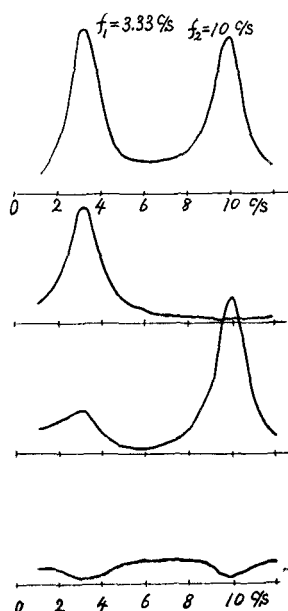


図-5 パワースペクトル (一層地盤)



実際の地盤層を多質点系に分解する場合、接点の位置の取り方が問題になる。各層の G を求める目的からは接点の位置を境界におくようにし、常時微動もこの点で測定しなすい。

この場合、著者の一人が先に発表した方法⁽¹⁾を採用すれば比較的誤差の少ない結果が得られる。図-11はこの場合の分割法を示したもので、ばね定数は各地盤層の G_i と一定関係にあり、容易に G_i を決定することができる。この分割法における振動方

程式の誘導および数値計算例については講演会当日に発表する。

文献

- (1) 小坪・川人「連続弾性体も多質点系へ置換する場合の精度向上について」

土木学会第24回年次学術講演会 昭44.10.

- (2) 金井清「地震工学」

図-7 二層地盤

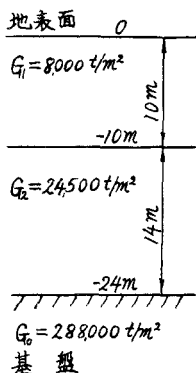


図-8 パワースペクトル (二層地盤)

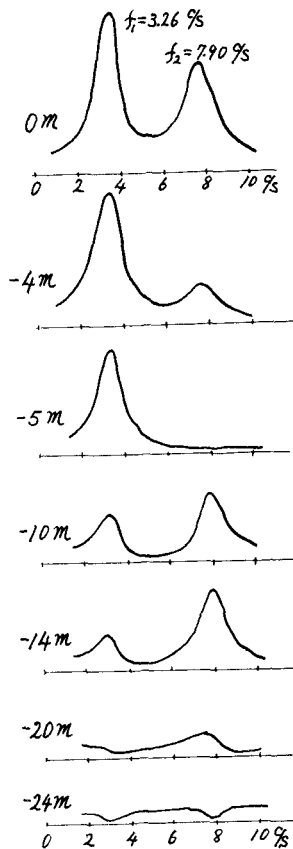


図-9 スペクトルの平方根と振動型 (二層地盤)

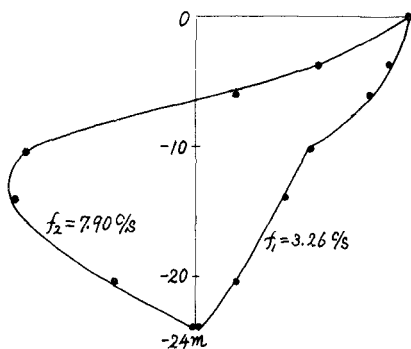


図-11 分割の方法

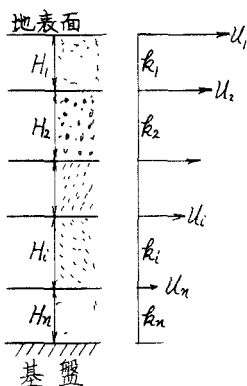


図-10 質点系

