

九州大学 工学部 正員 小坪 清真
九州工業大学 正員 高西 照彦

1. まえがき

図-1 および図-2 に示すような地盤系および地盤-剛体系に対する振動解析を (i) 波動論による厳密な方法 (ii) Feed-back 理論を応用する方法 (著者の方法) (iii) 従来の多質点系置換法の 3 つの方法によって行い、各方法についてそれぞれ (i) 共振曲線 (ii) 位相曲線 (iii) 不規則入力に対する応答曲線を求めて、3 者の結果に対する比較検討を行った。多柱基礎、沈埋管等地盤変位による強制力を受ける系の地震応答を考える場合には、定常入力に対する地盤の変位応答特性のみでなく位相特性をも考慮することが必要である。本論は特に位相曲線の面からそれぞれ著者の方法 (Feed-back 理論) と従来の方法 (多質点系置換法) とによって得られた結果を波動論による厳密解と比べて、著者の方法の妥当性を示すことをその目的としている。著者の方法の基本的な考え方は「解析手法は振動型解析法を利用するが、ただその入力波に対して一定の補正值を加えることによって、地盤系における入力波の反射および屈折の現象を近似的に表現できるようにする」ということである。したがって、本方法における基本的な物理量として (i) 補正值として入力波に feed-back すべき量 (ii) そのときの feed-back 量の「時間おくれ」の 2 つが挙げられる。

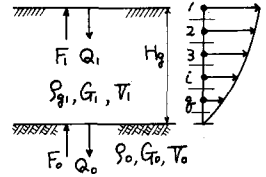


図-1

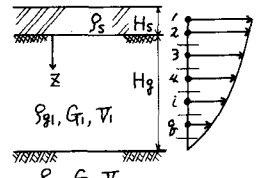


図-2

2. 時間おくれについて

いま、図-1 に示すような二層地盤系について考える。基礎からの入力波を $\phi_0(t)$ とすれば、 $\phi_0(t) = F_0(t) + Q_0(t)$ である。 $Q_0(t)$ は基礎での反射波と上層地盤からの透過波との和であるが、波動論に従えばこの透過波は上層地盤の下降波 $Q_1(t)$ と比べると $\delta^t = H_g/V_1$ で表わされる時間おくれを持つ。すなわちこれは、上層地盤内の下降波 $Q_1(t)$ の何割かが時間おくれ δ^t をもって入力波 $\phi_0(t)$ 中に feed-back されていると見ることができる。さて、著者の方法ではこの時間おくれを次のようにして定めた。図-1 に示す上層地盤において、横波の波長を L_1 、振動数を f_1 とすれば横波の速度は $V_1 = L_1 f_1$ と表わされる。 f_1 が上層地盤の n 次の固有振動数 f_n に一致した場合には波長 L_1 は $L_1 = 4H_g / (2n-1)$ となる。したがって上層地盤の時間おくれを δ^t とすれば δ^t は $\delta^t = H_g/V_1 = (2n-1)/4f_n$ と表わせる。ここで、地盤系あるいは地盤-剛体系においては、上式の f_n を同系の n 次の固有振動数 f_n^* で置き換えて $\delta_p^t = (2n-1)/4f_n^*$ とし、この δ_p^t の値を同系に対する見掛の時間おくれとして採用すればよいと考えられる。このようにして定められた δ_p^t は各振動次数 n について上層地盤の加速度に対して常に $\pi/2$ の位相差をもつことになり、入力波に対して適当な feed-back がなされることになる。

3. 解析理論・数値計算結果および考察

a. 地盤系について 前節に述べた考え方に従って著者の方法によって地盤系の振動解析を行うには、時間おくれ δ^t の代りに δ_p^t を用いることに注意するだけであつて前論⁽¹⁾での所論がそのまま適用できるので、本論では解析理論については一切省略する。

数値計算例として、図-1 において $H_g = 30\text{m}$ 、 $\rho_g = 1.8\text{t/m}^3$ 、 $G_1 = 1.1 \times 10^4\text{t/m}^2$ 、 $\rho_{g0} = 1.9\text{t/m}^3$ 、 $G_0 = 2.5 \times 10^5\text{t/m}^2$ とした場合について、質点数 n として 3, 5, 10, 15 の各通りを採用し、それぞれの n について定常入射波および不規則入射波に対する応答計算を行った。結果の一例を図-3, 4 に示す。図-3

は $\delta = 10$ の場合について地表面の相対変位に対する位相曲線を示したもので、横軸に無次元化円振動数を、縦軸に入射波に対する変位の位相差をとって3種の解をプロットしている。全体として著者の方法による解は波動法による厳密解をよく近似しているといえよう。変位の共振曲線についても同様な結果が得られた。また、地表面以外の位置例えば $z = H_2/2$ 点においては従来の多質点系法による解は位相曲線についてその近似が悪くなり、相対的に著者の方法による解の方がより近似が高くなっている。

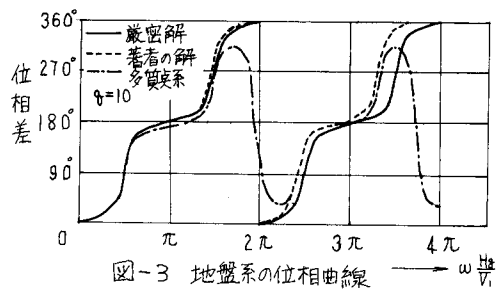


図-3 地盤系の位相曲線

図-4は $\delta = 10$ の場合について、不規則入力に対する地表面の変位応答を示したもので実線は厳密解を点線は著者の方法による解を表わす。同図から著者の解の近似は非常によいことが判る。当然のことながら $\delta = 5$ の場合についてはその近似度は $\delta = 10$ の場合より低い。変位応答と加速度応答を比べると後者の方が近似が悪くなっている。また、図-4から不規則入力波の場合にはその厳密解に対する位相差はほとんど無視してよいことが判る。

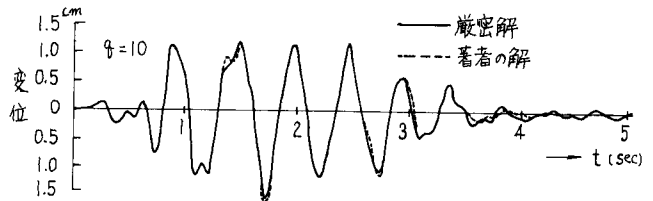


図-4 地盤系地表面変位

6. 地盤-剛体系について 波動論に従えば、図-2に示すような地盤-剛体系については地表面での剛体との境界面において、上昇波 $\tilde{F}_i(t)$ と下降波 $\tilde{F}_r(t)$ との関係は次のような式で表わされる。

$$\tilde{F}_r(t) = \tilde{F}_i(t - \delta'), \quad \delta' = 2\varepsilon/\omega,$$

$$\varepsilon = \tan^{-1} \left(\frac{\rho_s H_s}{\rho_g H_g} \frac{H_g}{V_1} \omega \right), \quad \text{ここに、}\omega \text{ は入射波の円振動数である。}$$

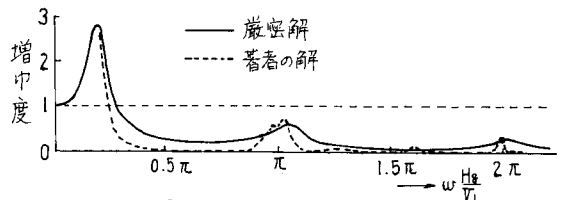


図-5 地盤-剛体系の共振曲線

上式は地盤-剛体系については上昇波と下降波との位相差は入射波の円振動数によってそれぞれ異なった値をもつことを示している。図-2に示す系についても著者の方法による同系に対する振動解析理論はオノ節で述べた基本的な考え方を適用すればこれを容易に構成することができる。本論では級数の関係で著者の方法による理論式を導くことは省略し、ただ (i) 時間おくれ δ_0^* についてはオノ節で述べた考え方に従い (ii) 入力波 $\dot{\phi}_0(t)$ については上述のようにその位相差が入射波の円振動数によって異なることに注意することが必要であることを述べるにとどめる。ここで入力波に対する表式のみをホセば次の通りである。

$$\dot{\phi}_0(t + \frac{\omega}{2}) = (1 + \beta) \left\{ \dot{\phi}_0(t + \frac{\omega}{2}) + \dot{\phi}_0(t - \frac{\omega}{2}) \right\} + \gamma \left\{ \dot{\phi}_0(t - \delta_0^* - \frac{\omega}{2}) + \ddot{u}_0(t - \delta_0^*) \right\} - \dot{\phi}_0(t - \frac{\omega}{2})$$

ここに、 $\dot{\phi}_0(t)$ は入射波、 $\ddot{u}_0(t)$ は地表面の相対加速度、 β は反射係数、 γ は透過係数である。

数値計算例として、図-2において $H_s = 50 \text{ m}$ 、 $\rho_s = 2.5 \text{ t/m}^3$ とし、地盤に関する諸元は前項aの計算例と同じ値を採用した場合について、定常入射波に対する応答計算を行った。結果の一例を図-5に示す。同図は $\delta = 11$ の場合について地表面の絶対変位に対する共振曲線を示したもので、横軸に無次元化円振動数を、縦軸に入射波の両振幅に対する地表面の絶対変位の比(増幅度)をとって厳密解と著者の解とをプロットしている。なお、位相曲線、多質点系置換法による計算結果等については講演時に発表する予定である。

(*)

小坪・高西「Feed-back理論を応用した地震時地盤振動の解析」九大工学集報 vol.45, NO.1, 昭47.1.