

京都大学防災研究所 正会員 佐藤忠信

京都大学防災研究所 正会員 土岐恵三

京都大学 大学院 打田剛生

1. まえがき

地盤-構造物系の震動解析を行う場合、有限要素法などにより、系を有限な振動系へ置き換えることが多い。従来の解析では、仮想境界を通じて逸散する波動のエネルギーを完全に評価することができなかった。著者らはこの点に関して若干の考察を加え、仮想境界上で成立する積分方程式を離散系の方程式に置換することによって境界上の剛性マトリクス、ならびに入射波動による仮想境界上の節点力を算出できることを示し、任意の形状を有する地盤-構造物系の振動解析を行える手法を開発してきた。本報告では、この解析手法を用いて、ラブ波や、入射角を有するSH波が入射する場合の、地表面に設けられた盛土や、表層地盤内に設置されたケーソン基礎などの震動性状を調べる。入射波動がSH波とラブ波だけであるから、数値解析例における変位は紙面垂直方向の成分のみしか取り扱わない。

2. 解析手法の概略

図-1に示すように、水平成層地盤Bに構造物を含む不規則な形状を有する領域Aが載っている場合も考えると、Aの部分と有限要素化した場合の運動方程式は次式のようにになる。

$$\left(-\omega^2 \begin{bmatrix} M_s & M_c \\ M_c^T & M_b \end{bmatrix} + i\omega \begin{bmatrix} C_s + C_c^* & C_c \\ C_c^T & C_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s + K_c^* & K_c \\ K_c^T & K_b \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \delta_s \\ \delta_A \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_s \\ F_A \end{Bmatrix} \quad (1)$$

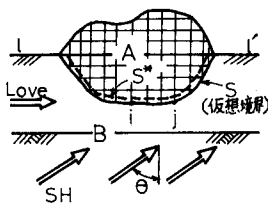


図-1 地盤-構造物系の概念図

ここに、Sの添字の付いた変数は仮想境界上の節点に関するものであり、Aの添字は不規則性を有する領域内の節点に関するものである。また*印の付いた変数は仮想境界上の境界条件から導入されるもので、これは仮想境界を固定した場合の運動方程式ではゼロとなる。いま ξ - η を地表面とする仮想の成層地盤を考え、この地盤の第1、第2基本特異解をとれぞれ $U(x_i, y_i, \xi, \eta)$, $P(x_i, y_i, \xi, \eta)$ とし、また仮想地盤内のS面上の節点に相当する点での変位ならびに力のベクトルを $\{d\}$, $\{f\}$ とすれば、 K_s^* , C_s^* , F_s^* は次式のようにになる。

$$\left. \begin{aligned} \{K_s^* + i\omega C_s^*\} &= [P(x_i, y_i, \xi_j, \eta_j) \Delta \xi_i \Delta \eta_j] [U(x_i, y_i, \xi_j, \eta_j) \Delta \xi_j]^{-1} \\ \{F_s^*\} &= -\{f\} + \{K_s^* + i\omega C_s^*\} \{d\} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、 (x_i, y_i) はS上の節点座標を、 (ξ_j, η_j) はSの近傍に設けられた補助境界 S^* 上の節点座標を、 $\Delta \xi_i, \Delta \eta_j$ は各々Sならびに S^* 上の節点を受け持つ長さである。

3. 地表面内に設置されたコンクリート構造物の解析例

図-2に示すような地盤-構造物系のモデルを考え、コンクリート構造物の根入れ深さDを10m、40mとした場合の点Pの応答倍率を求める。図-3、4は一樣なSH波が入射角 θ ($0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$)で表層へ入射する場合のものである。

図-3は根入れ深さ10mの場合を、図-4は40mの場合を示している。両図とも $\diamond$ 印で示される振動数は表層地盤の卓越振動数であるが、根入れ深さが10mの場合には1次の共振振動数(I)が地盤の卓越振動数と完全に一致している。一方、

根入れ深さが40mの場合には、1次の共振振動数は $\theta=0^\circ$ の時1.4Hzであり、入射角が大きくなるとともに減少している。また、共振点における振幅も根入れ深さが10mの場合に比べるとかなり小さい。また図中(II)で示してある振動数は構造物の共振によるものであるが、これは根入れ深さが10mの場合よりも40mの場合の

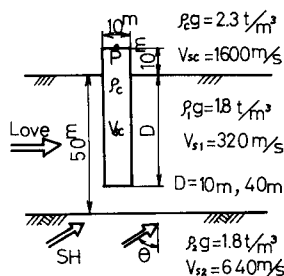


図-2 解析モデル1

方が大きくなっている。また、この点における応答倍率は入射角が小さい程大きくなる。図-5 は地表面における振幅が 2.0 となるように正規化したラズ波の基本モードの波も左から入射した場合の点 P における応答倍率を示したものである。根入れ深さが 10 m の場合の応答倍率は図-3 の入射角が 90° の場合のものといふ一致を示すが、根入れ深さが 40 m になると、構造物は波動の遮断壁のような特性を示し、その倍率は、対象とする周波数領域で、ほぼ 2 以下となっている。表面波が入射する場合には、根入れ深さによって系の応答特性が極端に異なることが特徴である。

4. 地表面に設置された土構造物の解析例

図-6 に示すように、地表面に三角形の堤頂が設けられているとき、堤頂 A における応答倍率を求める。入射波動は一律な SH 波とラズ波の場合も考えた。表層の厚さは 25 m と 50 m の 2 通りとした。図-7 は 25 m の場合を、図-8 は 50 m の場合を示している。いずれの場合にも明瞭な複数個の共振点があり、1 次の共振点付近では、入射角が小さいほど応答倍率が大きくなり、ラズ波が入射する場合の応答倍率が最小になることがわかる。さらに、応答倍率の形状は、いずれの場合も同様なものとなる。1 次の共振点は表層厚に関係なく 1.43 Hz になることから、堤頂の共振振動数であることが判明する。

図-9 は表層厚 50 m の場合の周波数伝達関数と、入射波動として、El Centro (1940) の NS 成分を用いた場合の堤頂の応答加速度の時間履歴を示したものである。入射波動によらず、ほぼ同じような応答波形を示している。SH 波入力の場合には入射角が小さくなるほど最大加速度が大きくなっている。また、ラズ波が入射する場合の応答が最小値と与えることが明らかになる。

本研究では、一律な SH 波ならびにラズ波が入射する場合の問題のみの取り扱いであったが、基本特異解が求まれば、任意の 2 次元問題ならびに 3 次元問題の解析が行えるので、今後この種の解析を行う。

参考文献

- 1) 土岐・佐藤; 土木学会第 31 回年次学術講演会講演概要集第 1 部, P.460, 1976
- 2) 土岐・佐藤; 第 6 回世界地震工学会議, P.P. 2-81-2-86, ニューゼー, 1977.1

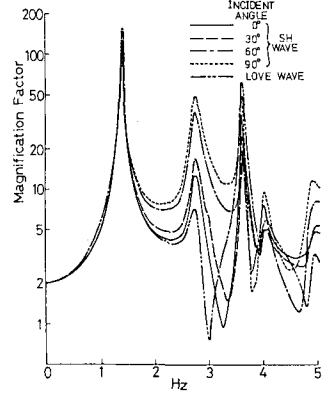


図-7 点 A の応答倍率 (H=25m)

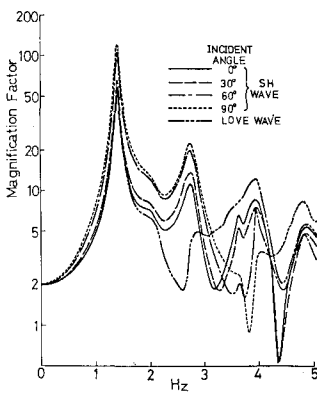


図-8 点 A の応答倍率 (H=50m)

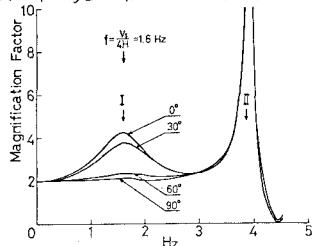


図-3 点 P の応答倍率 (SH 波, D=10m)

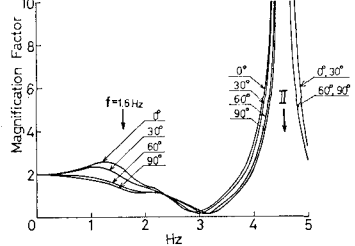


図-4 点 P の応答倍率 (SH 波, D=40m)

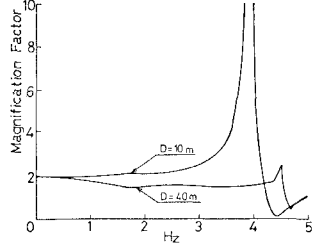


図-5 点 P の応答倍率 (Love 波)

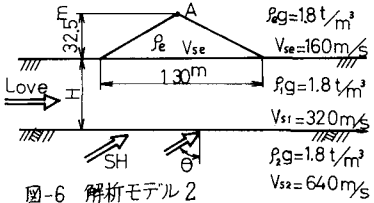


図-6 解析モデル 2

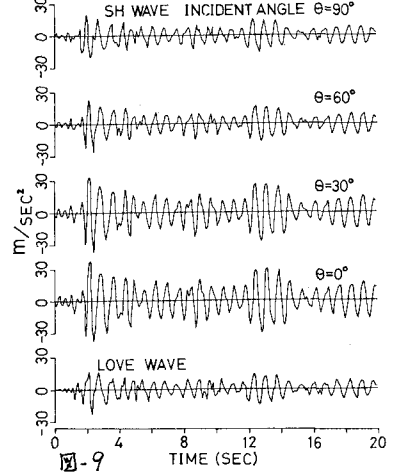


図-9