

京都大学防災研究所 正会員 砂坂善雄

同上

正会員 佐藤忠信

同上

正会員 柴田 徹

1. まえがき 沖積平野などのように水平に堆積した地盤上に築造された盛土や堤防などの土構造物においては、土構造物の寸法に比較して地盤は半無限に近した連続体とみなされる。地震時に地盤を伝播する波動のエネルギーは系に保存されず、無限遠方に消散してゆく。したがって解析においては、地盤は波動方程式で表現する方が合理的であると考えられる。他方、土構造物は複雑な境界を有しているから離散系にモデル化の方が解析上都合がよい。このような観点から本論文では土構造物-地盤系を仮想的に土構造物と地盤に分離し、土構造物には有限要素法を、地盤には弾性波理論を用いたいわゆるハイブリッド解析を行い、土構造物-地盤系の地震応答特性について考察する。

2. 解析手法 対象とする系を図-1のように断面A-A'で仮想的に切断し、土を連続な線形弾性体と仮定し密度 ρ およびラメの定数 λ, μ を土構造物および地盤の各層ごとに与える。土構造物に有限要素法を適用すれば、周波数領域で表わした土構造物の運動方程式は次のようになる。

$$\begin{Bmatrix} Q_{BB} & Q_{BS} \\ Q_{SB} & Q_{SS} \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \delta_B(\omega) \\ \delta_S(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_B(\omega) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに、添字Bは切断面A-A'上の節点に関するもの、添字Sはその他の節点に関するものを表わし、 $\{\delta(\omega)\}$ は節点変位ベクトル、 $\{f(\omega)\}$ は相互作用力である。また $[Q]$ は質量マトリクス $[M]$ 、減衰マトリクス $[C]$ 、剛性マトリクス $[K]$ によって次式で表わされる。

$$[Q] = [-\omega^2 M + i\omega C + K] \quad (2)$$

他方、重複反射理論によると波数領域において成層地盤の地表面の変位と応力は、基礎面への入力による関連づけられている。この関係式に切断面A-A'における変位と応力の連続条件を考慮して次式を得る。

$$\{\delta_B(\omega)\} = \{\mathcal{U}^*(\omega)\} - [\Gamma^*] \{f_B(\omega)\} \quad (3)$$

$\{\mathcal{U}^*(\omega)\}$ は土構造物がない場合の自由表面の変位に等しい。上式は土構造物底面の変位 $\{\delta_B(\omega)\}$ が土構造物と地盤の相互作用力 $\{f_B(\omega)\}$ によつて、 $\{\mathcal{U}^*(\omega)\}$ よりも小さくなることを示している。 $[\Gamma^*]$ はコンプライアンスの次元をもつ、土構造物と地盤の動的相互作用を表現する係数である。式(3)を式(1)に代入して次式を得る。

$$\begin{Bmatrix} (Q_{BB}[\Gamma^*] + I) & -Q_{BS} \\ Q_{SB}[\Gamma^*] & -Q_{SS} \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} f_B(\omega) \\ \delta_S(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_{BB} \\ Q_{SB} \end{Bmatrix} \cdot \{\mathcal{U}^*(\omega)\} \quad (4)$$

ここに $[I]$ は単位行列である。この連立方程式を解き、さらに式(3)を用いることにより、土構造物のすべての節点変位 $\{\delta(\omega)\}$ が求まる。また $\{\delta(\omega)\}$ を時間について逆フーリエ変換することにより、応答の時刻歴が求まる。

土構造物と地盤の動的相互作用を、土構造物のない場合の自由表面の変位に対する土構造物底面の変位の比と定義し、この比を相互作用関数 $\Phi(\omega)$ とすれば、 $\Phi(\omega)$ は周波数に対して0から1の間で変化する関数である。このようにすると土構造物-地盤系の動特性を3つの相に分けて評価することができる。すなわち、地盤の動特性は自由表面を有する地盤の周波数伝達関数 $\mathcal{U}^*(\omega)$ で、土構造物の動特性は剛な底面を仮定した場合の応答倍率 $H(\omega)$ で、土構造物と地盤の動的相互作用は相互作用関数 $\Phi(\omega)$ で評価する。土構造物を三角形の弾性せん断ばりと仮定

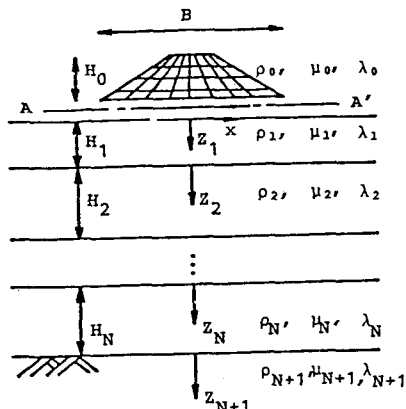


図-1. 系のモデル化

すると相互作用関数 $\phi(\omega)$ を定式化することができ、同時に土構造物に対する入力損失 $\theta(\omega)$ を考慮すれば、非常に簡便に地盤応答解析を行うことができる。すなわち、この簡易法では土構造物天端の周波数伝達関数 $F(\omega)$ は次式で表される。

$$F(\omega) = U^*(\omega) \cdot \theta(\omega) \cdot \phi(\omega) \cdot H(\omega) \tag{5}$$

$U^*(\omega)$ は重複反射理論より求まり、 $H(\omega)$ はせん断ばり法あるいは有限要素法より求まる。

3. 解析結果 解析にあたり、鉛直変位をゼロとし、水平変位のみを考慮した。対象とした系は図-2に示されている。土質定数としてせん断波速度 V を各層ごとに与え、密度 ρ およびポアソン比 ν をそれぞれ1.8 t/m³および0.3とした。また土構造物の減衰定数は10%とした。入力としては図-3に示されるエルセントロ、1940の加速度成分を鉛直下方から入射させた。図-5は第5層を基盤層としたときの土構造物天端の地震応答である。図-4は、このときの相互作用関数 ϕ 、すなわち土構造物がない場合の自由表面の変位 U_0 に対する土構造物底面の変位 U_b の比であり、(a)図は法尻付近の U_b に対するもの、(b)図は土構造物の中央の U_b に対するものである。構造物の中央の方が動的相互作用が大きいことがわかる。図-6は第3層を基盤層にしたときの土構造物天端の地震応答である。図-5の第5層を基盤層にしたときに比べて、応答は小さくなり、という。図-7は第1層と第4層を入れ替えて地盤の構成を変えたときの地震応答である。地盤の構成が応答特性に影響することがわかる。図-8は、図-5と同じ条件の系の地震応答を、簡易法すなわち式(5)で求めたものである。ただし土構造物の応答倍率はせん断ばり法で求め、減衰は考慮していない。図-5の厳密解の結果と比較的よく一致している。したがってこの簡易法は非常に有効であると考えられる。

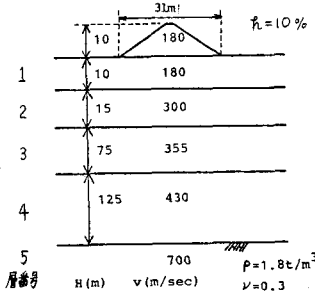


図-2 系の構成と土質定数

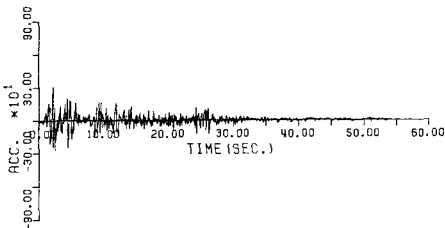


図-3 エルセントロ1940 (A001SQ0E)

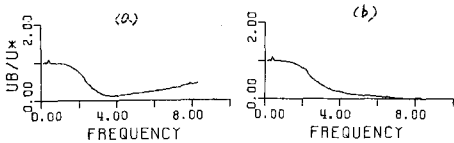


図-4 相互作用関数(4層系)

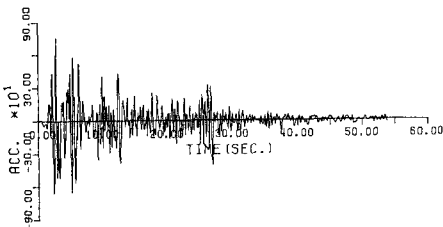


図-5 土構造物天端の地震応答(4層系)

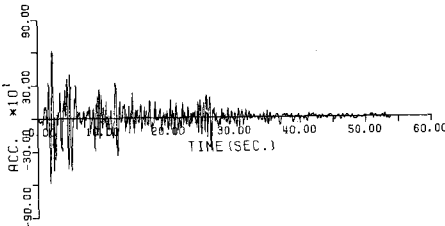


図-6 土構造物天端の地震応答(2層系)

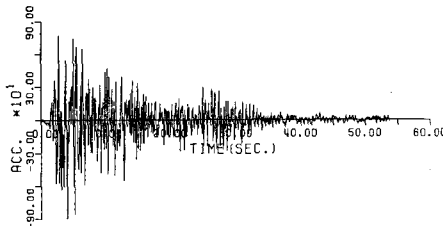


図-7 土構造物天端の地震応答(1層⇄4層)

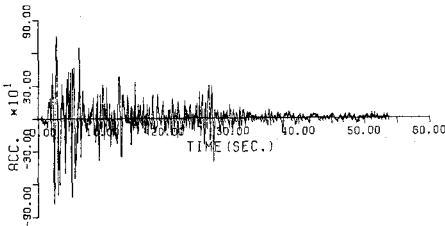


図-8 簡易法による地震応答(4層系)