

岡山大学大学院 学生員 ○坂元 和也

岡山大学工学部 正 員 竹宮 宏和

清水建設 欄 正 員 横山 勝彦

1. まえがき 筆者らは、地盤-構造物系の地震応答計算に動的サブストラクチャ法を適用して、より合理的に耐震解析を行うことを提唱して来た¹⁾。特に長大な埋設管路系に対しては、地盤との相互作用における立坑の挙動、また、地震波の伝播性の管路に与える影響を調べて来た。今回は、前者の現象に、地盤と立坑の間の剝離、滑動の局所的構造非線形性の効果を調べることに主眼点を置いた。以下、そのための定式化、数値解析例を示す。

2. 定式化 【線形解析】 解析対象構造物及びその周辺の地盤領域を、有限要素化して離散系としての定式化を行う。つまり地盤、構造物をその力学特性に応じて、ソリッド要素、あるいはビーム要素として表現する。側方境界は、厳密には、半無限遠への広がりを考慮できる伝達境界要素、あるいは近似的に単純境界とする。その結果、基盤入力に対する全体系(図1参照)運動方程式は、

$$\begin{bmatrix} M_{ss} & M_{sb} \\ M_{bs} & M_{bb} + M_{ff} & M_{fe} \\ & M_{ef} & M_{ee} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_s \\ \ddot{X}_f \\ \ddot{X}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sb} \\ C_{bs} & C_{bb} + C_{ff} & C_{fe} \\ & C_{ef} & C_{ee} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_s \\ \dot{X}_f \\ \dot{X}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sb} \\ K_{bs} & K_{bb} + K_{ff} & K_{fe} \\ & K_{ef} & K_{ee} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_s \\ X_f \\ X_e \end{Bmatrix} = - \left(\begin{bmatrix} M_{ss} & M_{sb} \\ M_{bs} & M_{bb} + M_{ff} & M_{fe} \\ & M_{ef} & M_{ee} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ M_{fg} \\ M_{eg} \end{bmatrix} \right) \ddot{X}_g \quad (1)$$

を得る。ここに、sは構造物の節点、b、fは構造物と地盤とのインターフェイス節点、eは地盤の内部節点、gは基盤面上の節点を指す。なお、外力項における減衰力は、慣性項に比べて非常に小さいので無視している。減衰マトリックスは、対象系の物性にフォークト型の履歴減衰を考慮すると、上式(1)の減衰マトリックスは、振動数に依存する。複素振動数応答法では、これは何ら解析上支障とはならないが、直接積分法による時刻歴解析では、定数とする必要がある。そのため、ここでは、地盤-基礎系の固有モード解析を通して

$$C = \sum_{\ell=1}^N \frac{\alpha_{\ell}}{\omega_{\ell}} \text{Im}g K^*(\omega_{\ell})$$

(2)

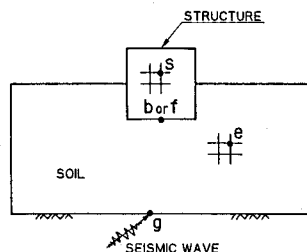


図1 地盤-構造物系(線形解析)

として評価した。ただし、 ω_{ℓ} は ℓ 次の固有振動数、 α_{ℓ} は同固有モードの寄与係数である。

複素振動数応答法においては、FLUSHプログラムのような全体解析法と、筆者らによるSUBSSIP-2Dの動的サブストラクチャ法がある。後者の場合、地盤と構造物のインターフェイス節点(接触面、接触体モデルいずれにおいても)に関する地盤インピーダンス X_f 、これへの有効入力 P_f^0 をまず求めて、地盤と構造物の連成系の支配方程式が

$$\begin{bmatrix} M_{ss} & M_{sf} \\ M_{fs} & M_{ff} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_s \\ \ddot{X}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sf} \\ C_{fs} & C_{ff} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_s \\ \dot{X}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sf} \\ K_{fs} & K_{ff} + K_b^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_s \\ X_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ P_f^0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

と表わされる。また、直接積分法においても、各部分系の固有モード応答を総合する部分モード法がある。この場合、変位変換式

$$\begin{Bmatrix} X_s \\ X_e \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{str} & \beta_{str} \phi_{str} \\ 0 & \beta_{soil} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_{str} \\ q_{soil} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \beta_{str} \phi_{soil}^b \\ \beta_{soil} \end{Bmatrix} X_g \quad (4)$$

を適用することになる。

【非線形解析】 地盤と構造物の接触面における剝離、滑動をジョイント要素を導入して表現する²⁾(図2参照)。この要素は、応力-歪関係において図3の特性を持つ。定式化において、地盤と構造物の相対変位 ΔX を導入する。そのとき、

$$\begin{Bmatrix} X_f \\ X_e \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_b \\ \Delta X \\ X_e \end{Bmatrix} \quad (5)$$

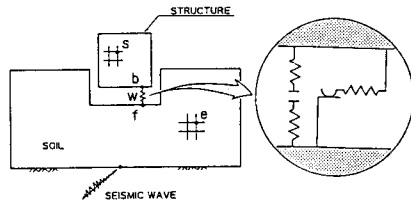


図2 地盤-構造物系(非線形解析)

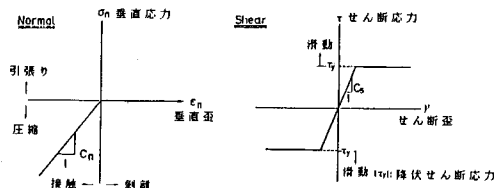


図3 ジョイント要素特性

また、接触面での復元力は、

$$F_f = W \Delta X \quad (6); \quad F_b + F_f = 0 \quad (7)$$

となる。ここで、 W はジョイント要素の特性マトリックスである。

式(5)を式(1)に代入して、

$$\begin{bmatrix} \text{MASS} \\ \text{DAMPING} \\ \text{STIFFNESS} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_s \\ \ddot{X}_b \\ \ddot{\Delta X} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{RELATED} \\ \text{COEFFICIENTS} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_s \\ X_b \\ \Delta X \\ X_e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \ddot{X}_e \end{Bmatrix} \quad (8)$$

さらに、部分モード法を適用する場合には、次式の変位変換を導入してなされる。

$$\begin{Bmatrix} X_s \\ X_f \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{\text{str}} & \beta_{\text{str}} \phi_{\text{soil}} & \beta_{\text{str}} \\ 0 & \phi_{\text{soil}} & I_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_{\text{str}} \\ q_{\text{soil}} \\ \Delta X \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_{\text{str}} \\ I_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_f^F \end{Bmatrix} \quad (9)$$

3. 数値解析例およびその考察

解析対象物は地中埋設管路—立坑系を採り、その直交する2平面内の解析を平面歪仮定より有限要素化し(図4参照)、過去の1つの地震波形に対するシミュレーションを行った。応答着目点は、立坑と地盤のインタフェース、及び立坑よりある距離の地盤断面である。

線形解析では、全体解析法と動的サブストラクチャ法の比較から、応答計算法の差に着目した。立坑の応答を図5に示す。全体解析法における複素振動数応答計算法と時刻歴応答法は、側方有限境界及び内部減衰の採り方の差が応答結果に反映されているが、両者の差はそれほど大きくない。複素振動数応答計算法における全体解析法と動的サブストラクチャ法は、応答結果において良い一致を示している。つぎに立坑から30m離れた地盤応答を図6に示す。同図では、1次元波動解析結果と2次元解析結果の比較をし、立坑の存在の影響に着目した。

非線形解析は、線形系の応答結果から、対象系に対しては単純境界でも良いことが判明したので、同モデルに対する全体系の時刻歴応答法に依った。その結果を線形系との比較において図7、8に示す。立坑についてはジョイント要素の特性のため非線形応答は線形応答を上廻っているが、 $X-Z$ 平面の波形と $Y-Z$ 平面の波形の影響が良く現われて、立坑は矩形断面であるにも係らず、 $X-Z$ 面内の応答が $Y-Z$ 面内より大きい。立坑から離れた地盤応答は、線形時とあまり変化していない。

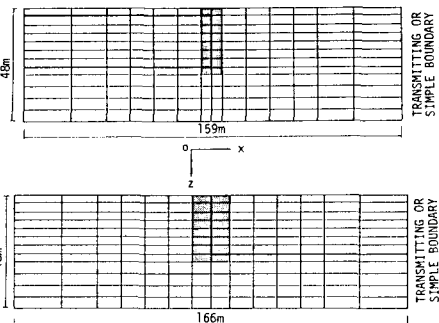


図4 FEMモデル

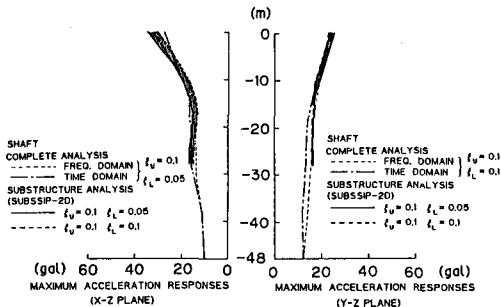


図5 線形最大加速度応答、立坑

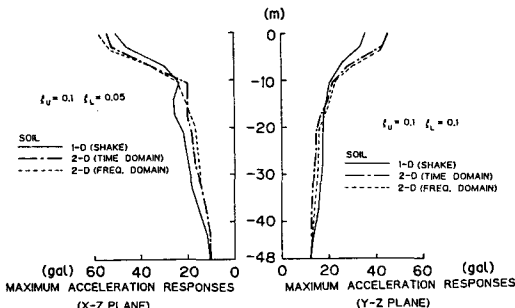


図6 線形最大加速度応答、地盤

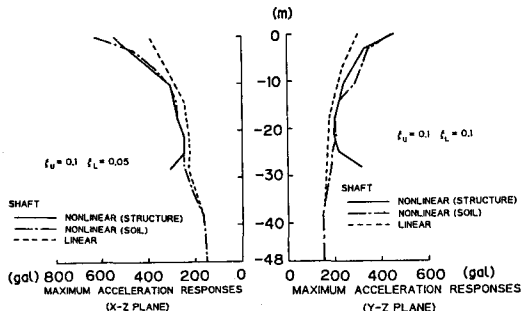


図7 非線形最大加速度応答、立坑

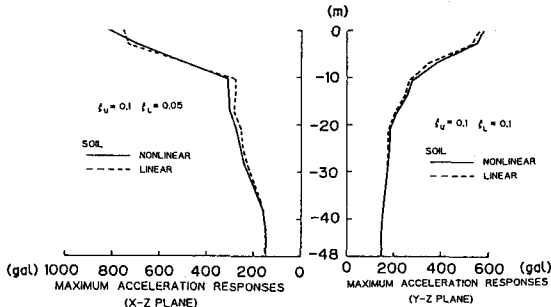


図8 非線形最大加速度応答、地盤

[参考文献]

- 1) H. TAKEHARA, K. YOKOYAMA, H. OISHI: "SEISMIC ANALYSIS OF AN UNDERGROUND STRUCTURE", Dyn. Soil Struct. Interaction Minnesota, Sep. 1984
- 2) J. Ghaboussi, E. L. Wilson, and J. Isenberg: "FINITE ELEMENT FOR ROCK JOINT AND INTERFACES" JOURNAL OF THE SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS DIVISION, Oct. 1973, pp833-PP. 847