

(43) 埋設構造物の線形・非線形地震応答解析

岡山大学工学部 竹宮 宏和
 岡山大学大学院 ○坂元 和也
 清水建設 榑 横山 勝彦
 日本鋼管 榑 大石 博

1. まえがき

筆者らは、地盤-構造物系の地震応答解析に、定式化の上で地盤と構造物に一時的に分離して解析を行う動的サブストラクチャ法を適用した合理的な耐震解析法を提唱して来ている¹⁾。この場合、これまで構造物と地盤のインターフェイスは、完全固着状態を仮定した線形解析に限定されていたが、実際には、構造物の周辺地盤は、強震時には、地盤と構造物の間で剝離、滑動等の局所的非線形性を大きく示すことが考えられる²⁾。そこで本研究では、動的サブストラクチャ法によって、この構造非線形性をも考慮できる解析手法の開発に主眼点を置いた。以下、そのための定式化、数値解析例を示す。なお、例題解析には、深い根入れを有する埋設管路-立坑系を対象にした。

2. 定式化

〔線形解析〕 解析対象構造物およ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を用いて表現する。側方境界は、厳密には、半無限遠への広がりや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。後者を用いる場合には、構造物と側方境界との距離を十分とる必要がある。その結果、基盤の加速度入力に対する全体系（図1参照）運動方程式

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

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。[β]は変位影響マトリックスを定義する。なお、外力項における減衰力の影響は、慣性項に比べて非常小さいので無視している。減衰マトリックスについては、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、複素数で与えられ振動数に依存する。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、振動数に依存しない定数とする必要がある。そのため、ここでは、地盤-構造物系の固有モード解析を通して

$$C = \sum_{\ell=1}^N \frac{\alpha_{\ell}}{\omega_{\ell}} \text{Im}g K^*(\omega_{\ell}) \quad (2)$$

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、 K^* は複素剛性マトリックスである。

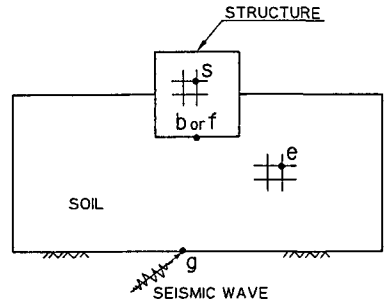


図1 地盤-構造物系（線形解析）

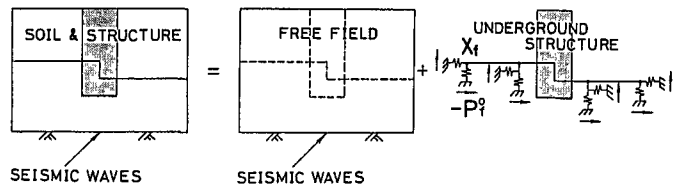


図2 地盤インピーダンス法

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。前者は、地盤-構造物全体系の支配方程式を一挙に解くものに対して、後者は、地盤-構造物系を各部分系に分割し自由度を縮小した上で連成系の方程式を解くものである。後者の場合、地盤インピーダンス法と部分モードの総合法があり、地盤インピーダンス法は、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 、およびこれへの有効入力 P_f^0 をまず求める（図2参照）。その結果、地盤と構造物の連成系の支配方程式は、

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

と表わされる。この手法は、振動数領域の応答解析法となる。一方、部分モード法は、地盤系および構造物系の固有モード解析を行い、それぞれの固有モード応答を接触面での適合条件を考慮して総合するため直接積分法による時刻歴解析が可能となる。この場合、変位変換式

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

を式(1)に適用することになる。ここで、 ϕ は固有モードマトリックス、 q はモード座標系の変位であり、添字strは構造物、soilは地盤を示す。

〔非線形解析〕 地盤と構造物のインターフェイスにおける剝離、滑動をジョイント要素³⁾を導入して表現する（図3参照）。この要素は、応力-歪関係において図4の力学特性を持つものと仮定する。降伏せん断応力については、モール・クーロンの破壊規準を用いる。すなわち、次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \tau_y &= C - \sigma_n \tan \phi & \sigma_n &\leq 0 \\ \tau_y &= 0 & \sigma_n &> 0 \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 C は粘着力、 ϕ は内部摩擦角である。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、地盤の接触面節点の変位は、構造物の接触面節点の変位と相対変位との和で表わされる。すなわち、

$$\begin{Bmatrix} X_f \\ X_e \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} I & I & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_b \\ \Delta X \\ X_e \end{Bmatrix} \quad (6)$$

また、接触面での復元力は、

$$F_f = W \Delta X \quad (7); \quad F_b + F_f = 0 \quad (8)$$

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(6)を式(1)に代入すると、

$$\begin{bmatrix} \text{MASS} \\ \text{DAMPING} \\ \text{STIFFNESS} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_s \\ \dot{X}_b \\ \dot{\Delta X} \\ \dot{X}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{RELATED} \\ \text{COEFFICIENTS} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_s \\ X_b \\ \Delta X \\ X_e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ P_f^0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

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。

$$\begin{Bmatrix} X_s \\ X_f \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{str} & \beta_{str} \phi_{soil} & \beta_{str} \\ 0 & \phi_{soil} & I_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_{str} \\ q_{soil} \\ \Delta X \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_{str} \\ I_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_f \\ X_f \end{Bmatrix} \quad (10)$$

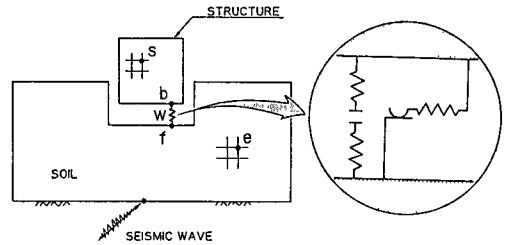


図3 地盤-構造物系（非線形解析）

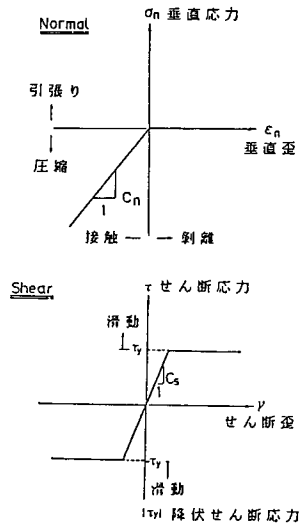


図4 ジョイント要素特性

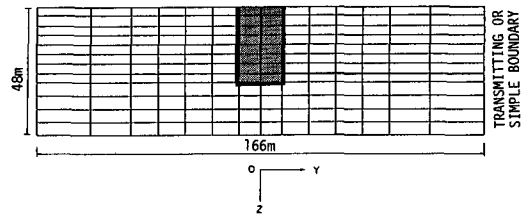
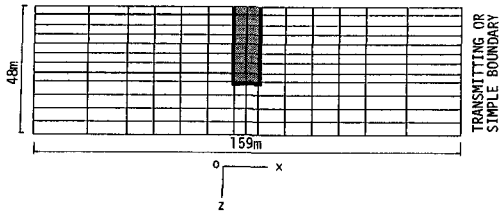


図5 FEMモデル

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5参照)、過去の1つの地震波形に対するシミュレーションを行なった。応答着目点は、非線形の効果を調べるために、立坑と地盤のインターフェイス、および立坑よりある距離の地盤断面である。

線形解析では、複素振動数応答法における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6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、側方有限境界およ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7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。地盤応答に対しても、全体解析における複素振動数応答計算法と時刻歴応答法の差は、あまり見られない。立坑の影響で表層部で地盤応答が大きくなっている。

線形系の応答結果から、土の内部減衰性が大きく波動の境界外への逸散が小さいことが判明したので、以下の非線形解析には、対象系に対しては単純境界とした。同モデルに対する全体系の時刻歴応答法による解を線形系との比較において、立坑については図8、立坑から離れた地盤応答については図9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、

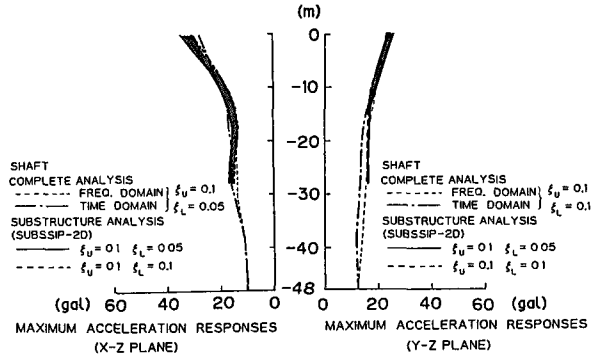


図6 線形最大加速度応答、立坑

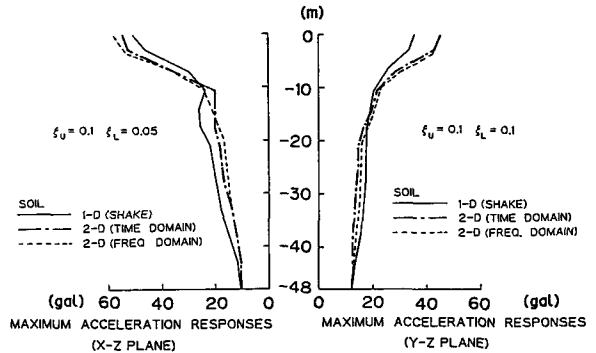


図7 線形最大加速度応答、地盤

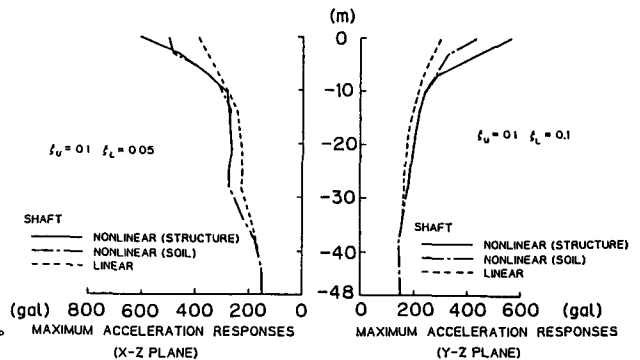


図8 非線形最大加速度応答、立坑

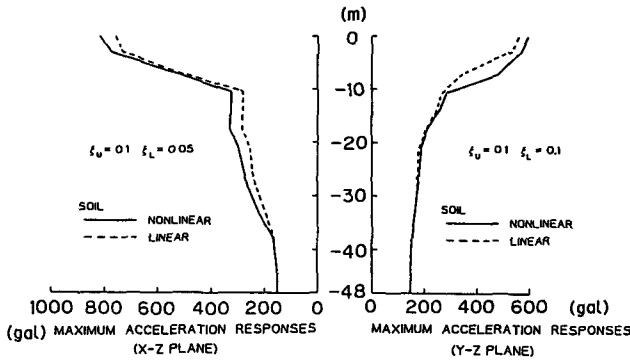


図9 非線形最大加速度応答、地盤

X-Z平面の波形とY-Z平面の波形特性が影響し、その上立坑は矩形断面であるためX-Z面内の応答がY-Z面内より大きく現われる。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。Y-Z平面モデルの解析結果より、剝離、滑動が表層部に集中していることが判明したので、同場所のジョイント要素の応力-歪関係を図10に示す。そこでは、滑動または剝離を生じた順に番号を付けてある。立坑左側の接触面では、まず剝離が起り、その後滑動が生じ、もっぱら滑動が卓越している様子が判る。

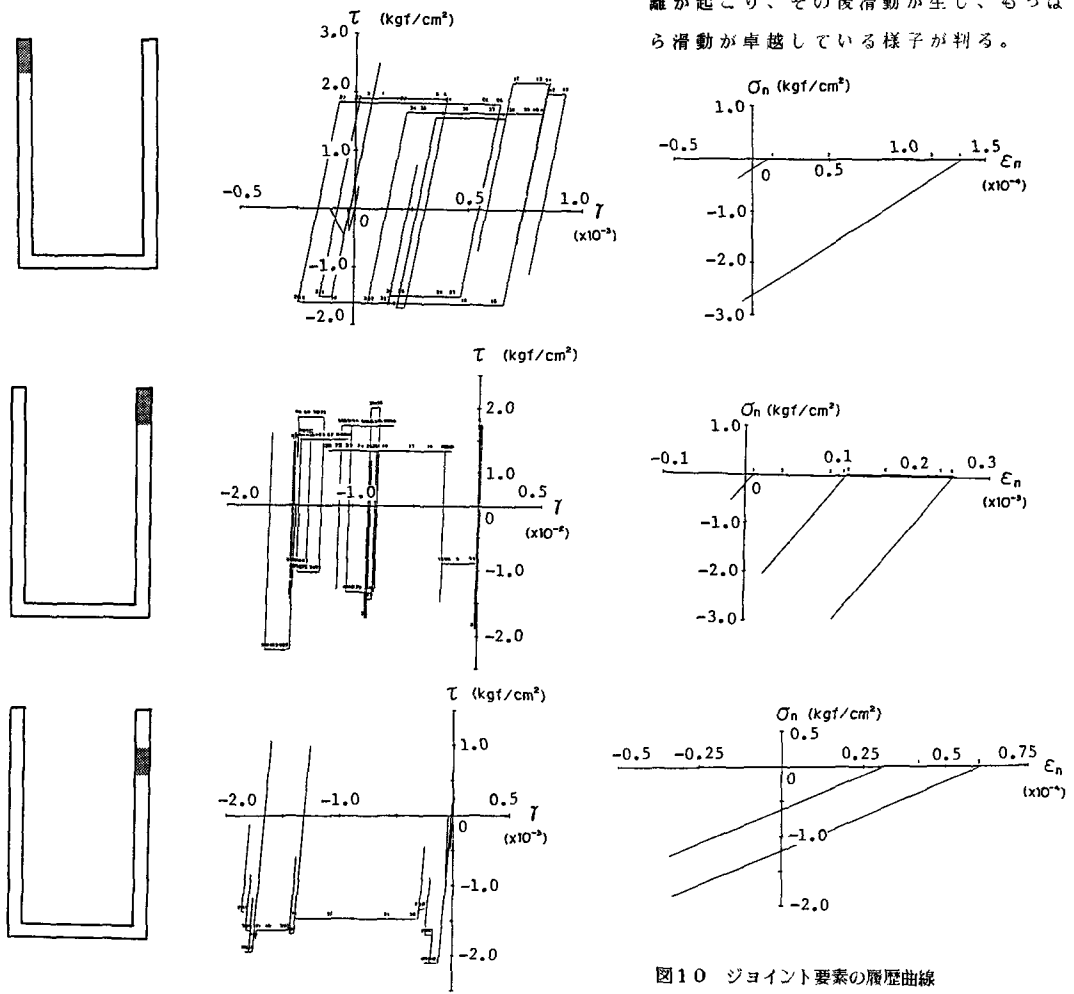


図10 ジョイント要素の履歴曲線

[参考文献]

1) H. TAKEMIYA, K. YOKOYAMA, H. OISHI: "SEISMIC ANALYSIS OF AN UNDERGROUND STRUCTURE", Dyn. Soil Struct. Interaction Minnesota, Sep. 1984
 2) 土岐、三浦: 地盤-構造物系の非線形地震応答解析、土木学会論文報告集 1982年1月, pp61-68
 3) 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, pp833-847