

岡山大学 大学院 学生員 横山 勝彦
 岡山大学 工学部 正員 竹宮 宏和
 日本鋼管技術研究所 正員 大石 博

1. まえがき

本研究は、埋設管路 - 立坑系の地震応答解析を、周辺地盤との動的相互作用において実施したものである。地盤と構造物の相互作用解析システムとして、著者らは地盤インピーダンスを使用した動的サブストラクチャ法を根幹としたSUBSSIP-2D¹⁾を開発して来た。前回の報告²⁾では、同システムによる管路軸に沿った進行性の地震波による管路 - 立坑系の応答を調べた。しかし対象とする地盤領域が広いと、地盤インピーダンスおよび有効地震動入力を評価するのにかなりのCPUタイムを要する。そこで今回は、地盤応答が低次の固有振動モードに支配されることを考慮して、地盤および埋設構造物の解析に固有モード展開を施し、それぞれの自由度を縮小してから両系の連成振動を図る部分モード法による解析手法を採った。インピーダンス法では、地震応答解析に伝達関数を使用するフーリエ変換法を採ったが、部分モード法では、近似的に時間領域の解析法が可能となる。

2. 定式化

地盤 - 構造物系の地震入力の下での応答解析を、地盤と構造物をサブストラクチャ化して考える。
 地盤：解析対象構造物の周辺の地盤をソリッド要素による有限要素法から離散化すれば、多自由度系としての運動方程式を得る。しかし入力には、通常、加速度成分のみが利用できることが多いので、上式を多点入力系としての定式化を採って、加速度入力の形に書き改める。その結果、地盤の絶対応答は、基盤変位による準静的変位と、対象領域の慣性力による動的応答の和で、前者は

$$\begin{Bmatrix} X_b \\ X_g \end{Bmatrix}_{pst} = \begin{bmatrix} K_{bb} & K_{bg} \\ K_{gb} & K_{gg} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} K_{br} \\ K_{gr} \end{Bmatrix} X_r = \begin{Bmatrix} B_{soil}^b \\ B_{soil}^g \end{Bmatrix} X_r \quad (1)$$

後者は

$$\begin{bmatrix} M_{bb} & M_{bg} \\ M_{gb} & M_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_b \\ \ddot{X}_g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{bb} & C_{bg} \\ C_{gb} & C_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_b \\ \dot{X}_g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{bb} & K_{bg} \\ K_{gb} & K_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_b \\ X_g \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_b \\ 0 \end{Bmatrix} - \left(\begin{Bmatrix} M_{br} \\ M_{gr} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{bb} & M_{bg} \\ M_{gb} & M_{gg} \end{bmatrix} B_{soil} \right) \ddot{X}_r \quad (2)$$

で得られる。なお、添字 b は、埋設構造物との共有節点、g は地盤の自由節点、r は基盤面上の節点を指す。

式(2)の解を固有モード展開から求める。そのときの運動方程式は、

$$I_{soil} \ddot{q} + \Phi_{soil}^T C_{soil} \Phi_{soil} \dot{q} + [\omega_i^2]_{soil} q = -\Phi_{soil}^T (P_{st} + F_{soil} \ddot{X}_r) \quad F_{soil} \text{は式(2)の右辺第2項の外力マトリックス} \quad (3)$$

埋設構造物：構造物を梁あるいはソリッド要素で有限要素化すると次式の運動方程式を得る。

$$M_{ss} \ddot{X}_s + C_{ss} \dot{X}_s + K_{ss} X_s = P_s \quad (4)$$

ここで変位 X_s は地盤の共有節点のそれと適合性を示すと共に、外力 P_s は地盤に関する運動方程式(2)の P_b に釣り合う量である。つまり、

$$X_s = \Phi_{soil} q + B_{soil} X_r \quad (5) \quad P_b + P_s = 0 \quad (6)$$

式(5),(6)の条件の下で式(4)を書き改めると、

$$\begin{aligned} & (\Phi_{soil}^T M_{ss} \Phi_{soil} + I_{soil}) \ddot{q}_I + (\Phi_{soil}^T C_{ss} \Phi_{soil} + C_{soil}) \dot{q}_I + (\Phi_{soil}^T K_{ss} \Phi_{soil} + [\omega_i^2]_{soil}) q_I \\ & = -(\Phi_{soil}^T M_{ss} \Phi_{soil} \ddot{q}_F + \Phi_{soil}^T C_{ss} \Phi_{soil} \dot{q}_F + \Phi_{soil}^T K_{ss} \Phi_{soil} q_F) \end{aligned} \quad (7)$$

但し、上式では基盤面入力による自然地盤応答 q_F と構造物との相互作用による地盤(あるいは構造物)応答 q_I を区別している。

3. 解析結果および考察

図1に示される埋設管路一立坑系を平面歪仮定により有限要素モデル化し、面内および面外に分けて地震応答解析を行なった。応答解析は、Wilsonの θ 法による直接積分法が用いられている。側方境界は単純境界とし、入力基礎盤は剛基礎を仮定した。入力地震波は図2の伊豆東方沖地震(1980.6, 最大100gal)のように入力とした。自然地盤の固有モード展開の結果が、寄与率の高いものについて、図3, 4に示されている。応答計算では低次から最初の20次を採用した。応答計算の結果、図5のように埋設構造物の各点での最大応答加速度が示される。面内応答計算結果には、SUBSSIP-2Dのインピーダンス法による解析結果も併せて示した。それによると、かなり結果に差が見られるが、これは、減衰の考慮の仕方や境界条件の差などの影響と思われる。CPUタイムについては、部分モード法の計算の大部分を占める固有モード展開で約67秒要するのに対し、インピーダンス法では地盤インピーダンスの計算に約366秒、振動数応答の計算に約308秒を要した。

参考文献

- 1) 竹宮他: 動的サブストラクチャ法による地盤-基礎-上部構造物系の耐震解析システム、第37回土木学会年次学術講演会概要、I-265, 昭和57年10月
- 2) 竹宮他: 埋設構造物の耐震解析、第17回地震工学研究発表会概要(89), 昭和58年7月

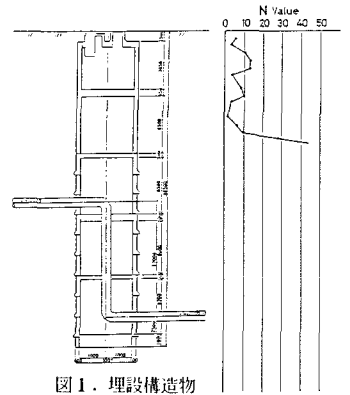


図1. 埋設構造物

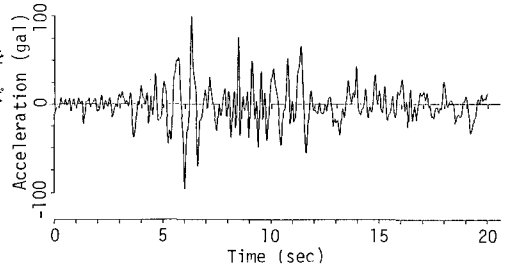
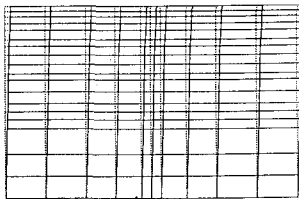
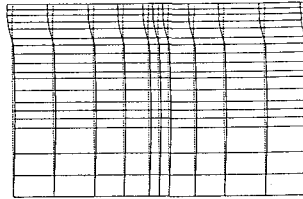


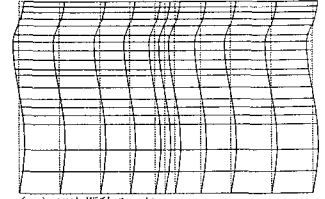
図2. 入力地震加速度波形 (伊豆東方沖地震・最大100 gal)



(a) 1次振動モード
(固有振動数: 1.386 Hz, 寄与率: 61.75 %)

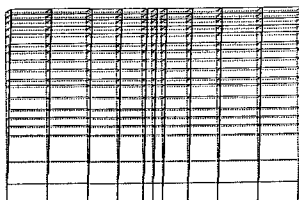


(b) 4次振動モード
(固有振動数: 2.993 Hz, 寄与率: 21.20 %)

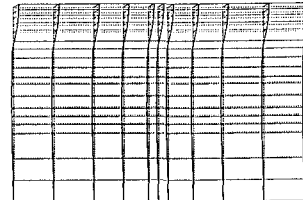


(c) 13次振動モード
(固有振動数: 5.373 Hz, 寄与率: 16.70 %)

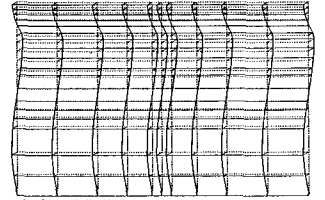
図3. 固有振動モード (面内)



(a) 1次振動モード
(固有振動数: 1.386 Hz, 寄与率: 61.86 %)



(b) 4次振動モード
(固有振動数: 2.993 Hz, 寄与率: 21.24 %)



(c) 13次振動モード
(固有振動数: 5.373 Hz, 寄与率: 16.82 %)

図4. 固有振動モード (面外)

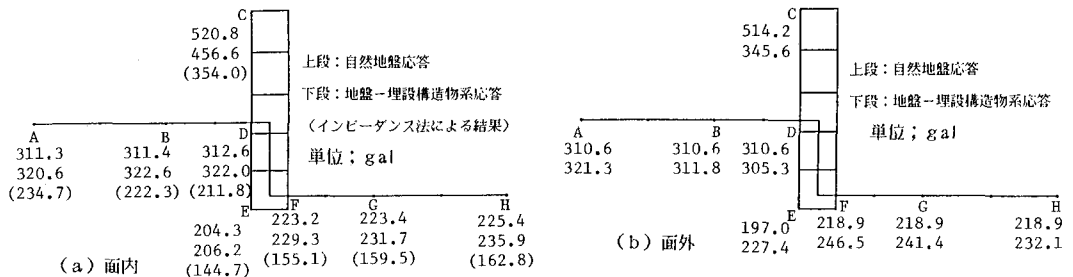


図5. 最大加速度応答