

岡山大学大学院 学生員○福井 智

岡山大学工学部 正員 竹宮宏和

三井造船 正員 魚谷広太郎

1. まえがき

地盤と構造物の動的相互作用解析には、従来、地盤インピーダンス法が広範囲に採用されている。地盤インピーダンス（あるいは下部構造インピーダンス）は、一般に振動数に強く依存するため、応答解析法には振動数応答が採られる。ところで、構造物の自由度が大きいと、振動数応答を得るための動的剛性マトリックス（複素数）の逆演算にかなりの時間を費やすことになる。対処策として、著者らの開発している耐震解析システムSUBSSIP-A3D¹⁾では、動的サブストラクチャ法から上部構造物の自由度の縮小を固有振動モードにおいて図っている。本研究では、地盤-基礎-上部構造物系を、地盤-基礎系と上部構造物にサブストラクチャ化して、それぞれの部分系に固有モード展開を適用した部分モード法による解析法を提案している。

2. 定式化

地盤-基礎系：モデル化において、地盤の3次元の広がりを考慮するため、基礎およびその周辺地盤を軸対称体とし、応答の周方向に関してのフーリエ級数展開を仮定した。境界条件として、側方は応力伝達境界あるいは粘性境界とした。有限要素化された対称領域の運動方程式は、一般に、

$$\begin{bmatrix} M_{bb} & M_{bg} \\ M_{gb} & M_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_b \\ \ddot{x}_g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{bb} & C_{bg} \\ C_{gb} & C_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{x}_g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{bb} & K_{bg} \\ K_{gb} & K_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_b \\ x_g \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_b \\ P_g \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} M_{bb} \\ M_{gr} \end{Bmatrix} \ddot{x}_r - \begin{Bmatrix} C_{bb} \\ C_{gr} \end{Bmatrix} \dot{x}_r - \begin{Bmatrix} K_{bb} \\ K_{gr} \end{Bmatrix} x_r \quad (1)$$

但し、添字bは基礎の節点を、gは地盤の自由節点を、g'は地盤の側方境界上の節点を、そしてrは入力基盤面上の節点を指す。

上部構造物：これには一般の3次元質点系としての運動方程式を容易に求めることができ、

$$\begin{bmatrix} M_{ss} & M_{sf} \\ M_{fs} & M_{ff} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sf} \\ C_{fs} & C_{ff} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sf} \\ K_{fs} & K_{ff} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s \\ x_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ P_f \end{Bmatrix} \quad (2)$$

但し、添字sは上部構造物の節点を、そしてfは基礎とのインターフェイス節点を指し、fはbの一部に含まれている。

全体系：地盤-基礎-上部構造物の連成系としての運動方程式は、地盤-基礎系の式(1)と上部構造物の式(2)を加えて、両系のインターフェイス節点での断面力のつりあいと変位の適合性を考慮すれば、次式となる。

$$\begin{bmatrix} M_{ss} & M_{sf} \\ M_{fs} & (M_{ff}+M_{bb}) & M_{bg} \\ & M_{gb} & M_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_f \\ \ddot{x}_g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sf} \\ C_{fs} & (C_{ff}+C_{bb}) & C_{bg} \\ & C_{gb} & C_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_f \\ \dot{x}_g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sf} \\ K_{fs} & (K_{ff}+K_{bb}) & K_{bg} \\ & K_{gb} & K_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s \\ x_f \\ x_g \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ P_g \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 0 \\ M_{br} \\ M_{gr} \end{Bmatrix} \ddot{x}_r - \begin{Bmatrix} 0 \\ C_{br} \\ C_{gr} \end{Bmatrix} \dot{x}_r - \begin{Bmatrix} 0 \\ K_{br} \\ K_{gr} \end{Bmatrix} x_r \quad (3)$$

部分モード法：地盤-基礎系の式(1)の応答を線形重ね合せ則から、上部構造物からの外力 $P_b=0$ のときの基盤面入力による応答と、 P_b のみによる応答の和と考える。前者は、更に基盤面入力による準静的な応答と、解析領域内部の慣性力による応答に区別される。そして動的応答を固有モード（この場合、インターフェイス節点が自由境界となっていることより自由モードと呼ぶ）に展開する。但し、固有モードの直交性は質量および剛性マトリックスに関して成立するが、減衰マトリックスに関しては成立しない。一方、上部構造物は、固定支持系との対比を明らかにするため、下部構造系とのインターフェイスを固定拘束した状態での慣性力による応答と、固定拘束を静的に解除したときの応答の和と考える。そして前者に固有モード分解を仮定する（この場合は拘束モードと呼ぶ）。従って以上の変位変換として、

Φ^{sup} : 上部構造物の拘束モード

Φ^{sub} : 下部構造系の自由モード

$$\begin{Bmatrix} x_s \\ x_f \\ x_q \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi^{sup} & \beta_{sup} \Phi^{sub} \\ 0 & \Phi^{sub} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_{sup} \\ q_{sub} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_{sup} \Phi^{sub} \\ \beta_{sub} \end{bmatrix} x_r \quad (4)$$

β_{sup} : 上部構造物のインターフェイス解除による変位影響マトリックス

β_{sub} : 下部構造系の基盤面変位による影響マトリックス

を式(3)に代入すると、全体系の運動方程式が上下部構造系の固有モードで表されることになる。

3. 例題解析

上記の部分モード法をSUBSSIP-A3Dにインプリメントして、その解析精度をインピーダンス法と比較した。対象構造物は、図1に示す群杭基礎上の大型高炉である。

本解析の主眼点は、地盤と構造物の動的相互作用効果の把握にあるので、まず、基礎面入力に対する対象系の各部の伝達関数を求めたのが図2、3である。今回の解析では、最高5 Hz までを考慮した各部分系のモードを抽出している。インピーダンス法と部分モード法は、非常によい一致を示している。実務的な観点から全体系を固有モード分解したときの結果も併せて描いた。解析対象とした高炉では、地震観測を実施しており、本解析結果を検証する意味で地震応答シミュレーションを実施した。図4、5はその観測値と計算値の比較である。これより本解析法の精度は工学的な範囲と言える。最後に側方境界のモデル化、対象系の

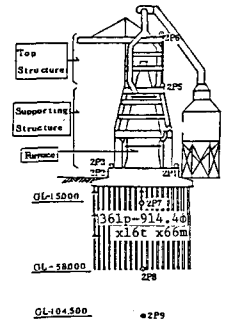


Fig.1 STRUCTURE FOR ANALYSIS

参考文献

- 1)竹宮：動的サブストラクチャ法による地盤－基礎－上部構造物系の類似3次元耐震解析システムSUBSSIP-A3D，土木学会論文報告集投稿中
- 2)竹宮，井上，山田：動的サブストラクチャ法による多スパン高橋脚橋の地震応答解析，第13回マトリックス解析法研究発表論文集，日本鋼構造協会，昭54.6，PP277 -278

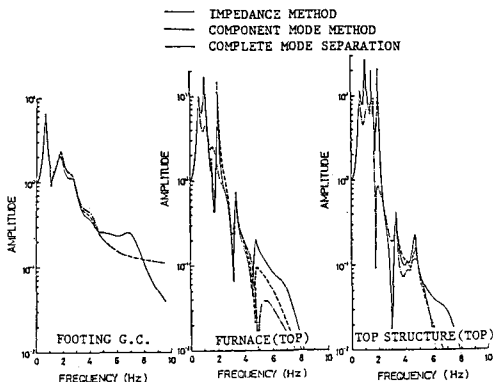


Fig.2 FREQUENCY FUNCTION (TRANSMITTING BOUNDARY)

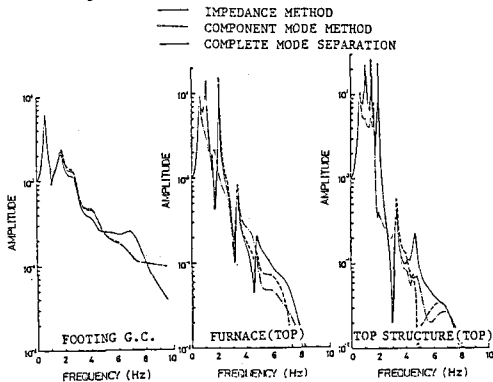
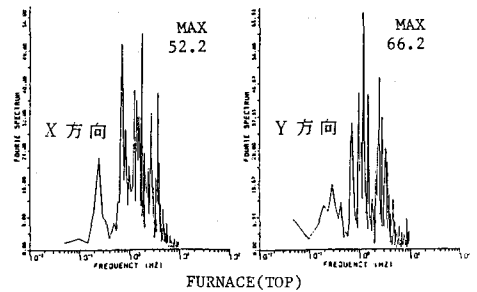


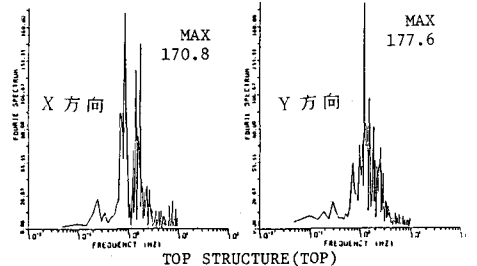
Fig.3 FREQUENCY FUNCTION (VISCOUS BOUNDARY)

表 1 各解析手法の演算時間

解析手法	側方境界	演算時間 (秒)
I. M	T. B.	1205
I. M	V. B.	914
C. M. M	T. B.	619
C. M. M	V. B.	188
C. M. S	T. B.	619
C. M. S	V. B.	188
I. M	インピーダンス法	
C. M. M	部分モード法	
C. M. S	部分系の総合モード法	
T. B.	伝達境界	
V. B.	粘性境界	

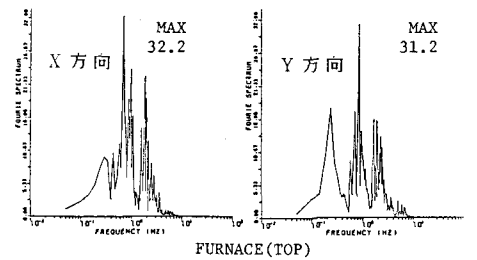


FURNACE (TOP)

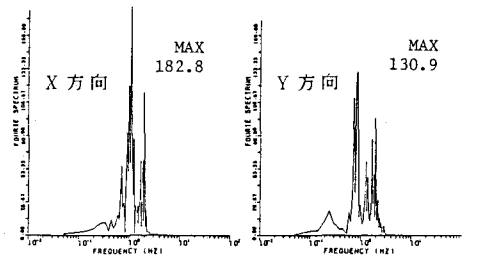


TOP STRUCTURE (TOP)

Fig.4 OBSERVED FOURIE SPECTRUM



FURNACE (TOP)



TOP STRUCTURE (TOP)

Fig.5 COMPUTED FOURIE SPECTRUM

(C.M.M. T.B.)