

# 部分モードの総合法による地盤-基礎-上部構造物系の 三次元地震応答解析†

MODAL SYNTHESIS METHOD FOR THREE-D SEISMIC  
SOIL-FOUNDATION-SUPERSTRUCTURE INTERACTION

竹宮宏和\*・魚谷広太郎\*\*・福井 智\*\*\*

By Hirokazu TAKEMIYA, Kohtaro UOTANI and Satoru FUKUI

In this paper the authors developed a new subsystem modes synthesis method as one of the dynamic substructure methods for the analysis of soil-foundation-superstructure for seismic motions. This method has an advantage over the impedance method in that each subsystem (namely, the soil-foundation system and the superstructure) is characterized by the respective vibration modes of appropriately fixed or free interface conditions and the release modes. The accuracy is investigated from the comparison with the impedance method analysis by taking a blast furnace structure on a grouped piles foundation as an example. A remarkable reduction of computing time is observed for the response analysis of the integrated soil-foundation-superstructure system.

*Keywords* : dynamic soil-foundation-superstructure interaction, component modes synthesis, earthquake response, blast furnace

## 1. ま え が き

地震時における構造物の挙動は、構造物自身の振動特性のみでなく、それが立地する周辺地盤内の地震波の伝播に伴う振動性状と密接な関係にある。特に、最近の構造物は長大化・大型化して、基礎構造がそれなりの規模を有してきており、いわゆる地盤と構造物の動的相互作用は、構造物の耐震設計に考慮しなければならない重要なファクターとなっている。

地盤と構造物の動的相互作用 (Soil-Structure Interaction, SSI) の解析法では、現在、地盤インピーダンス法 (Impedance Method) が主流をなしているが<sup>1)</sup>、同手法は、地盤の複素剛性 (インピーダンス) を評価して構造物の基礎に配置し、これと構造物との慣性連成振動解析を行うものである。その際、地盤インピーダンスが一般に振動数への強い依存性を示すことから、応答解析法にはフーリエ変換法を用いた時刻歴応答解析法が採用される。しかし、構造物の自由度が大きいと、振動数応答を求めるための複素マトリックスの逆マトリックス

演算にかなりの時間を費やすことになる。対処策として、著者らの開発した耐震解析システム SUBSSIP-2 D<sup>2)</sup>、SUBSSIP-A 3 D<sup>3)-11)</sup>では、上部構造物に部分モード法を導入した動的サブストラクチャ法を採っている。そして応答解析のための自由度の縮小を合理的に図っている。しかし、地盤と基礎のキネマチックな相互作用を経た基礎に関する地盤インピーダンスおよび有効地震入力動を評価する際に、地盤の有限要素領域に対して部分消去法を各振動数ごとに繰り返すため、この演算過程にかなりの計算時間が費やされることになる。本研究では、地盤と構造物の相互作用系に各部分系の固有モードの総合法<sup>12), 13)</sup> (以下、部分モード法、Component Mode Method CMM) の概念を適用して、上の欠点の克服を目指した。そのため全体系を地盤-基礎系と、上部構造物に一時的にサブストラクチャ化し、それらのインターフェイスにおいて、前者では自由境界に基づく固有モード展開を、一方、後者では拘束境界に基づく固有モード展開を採用している。そして上下部構造系の固有モードの総合により全体系の支配方程式を確立している。よって応答計算の自由度は、この場合、兩部分系の固有モード数の総和となる。なお、著者らは、以上の基本的概念を他の動的解析問題ですでに応用してきた<sup>14)</sup>。

今回は、上記の解析法を擬似三次元耐震解析システム SUBSSIP-A 3 D に追加導入して、その解析精度および

† 本内容は、部分的に文献5), 7) および土木学会全国大会年次学術講演会 (1984, 1985) で発表している。

\* 正会員 工博 岡山大学教授 工学部土木工学科  
(〒700 岡山市津島中3-1-1)

\*\* 正会員 工修 三井造船 (株) プラント事業本部

\*\*\* 正会員 工修 大成建設 (株)

び効率の検討をインピーダンス法との比較において調べたので、ここに報告する。

2. 地盤と基礎と上部構造物の連成振動

地盤と構造物の動的相互作用を有限要素法で定式化するにあたり、解析対象領域の各構成部分を明示する添字を、Fig.1のように付す。ここで、sは構造物の節点、fは基礎の節点、bは地盤と基礎のインターフェイス節点で、fの一部となっている。gは地盤内節点、ただし基礎面の節点rは除く。

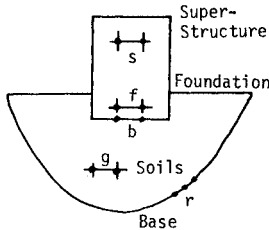


Fig.1 Soil-Structure Interaction System.

基礎面入力による表層地盤の運動方程式は、基礎部とのインターフェイスも含めて一般に

$$\begin{bmatrix} m_{bb} & m_{bg} \\ m_{gb} & m_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_b \\ \ddot{x}_g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{bb} & c_{bg} \\ c_{gb} & c_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{x}_g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{bb} & k_{bg} \\ k_{gb} & k_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_b \\ x_g \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} P_b \\ P_g \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} m_{br} \\ m_{gr} \end{bmatrix} \ddot{x}_r - \begin{bmatrix} c_{br} \\ c_{gr} \end{bmatrix} \dot{x}_r - \begin{bmatrix} k_{br} \\ k_{gr} \end{bmatrix} x_r \dots\dots(1)$$

そして、構造物のそれは

$$\begin{bmatrix} m_{ss} & m_{sf} \\ m_{fs} & m_{ff} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{ss} & c_{sf} \\ c_{fs} & c_{ff} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{ss} & k_{sf} \\ k_{fs} & k_{ff} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s \\ x_f \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ P_f \end{bmatrix} \dots\dots(2)$$

式(1)と式(2)を、インターフェイス節点での変位の適合性および力のつり合いを考慮して加えると、地盤-構造物系(全体系)の運動方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} m_{ss} & m_{sf} \\ m_{fs} & (m_{ff} + m_{bb}) & m_{bg} \\ & m_{gb} & m_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_f \\ \ddot{x}_g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{complete} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_f \\ \dot{x}_g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{complete} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s \\ x_f \\ x_g \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ P_g \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ m_{fr} \\ m_{gr} \end{bmatrix} \ddot{x}_r - \begin{bmatrix} 0 \\ c_{fr} \\ c_{gr} \end{bmatrix} \dot{x}_r - \begin{bmatrix} 0 \\ k_{fr} \\ k_{gr} \end{bmatrix} x_r \dots\dots(3)$$

ただし、上式では基礎面での諸量を右辺の外力項に含め

た。しかし、同入力面上での既知量は、一般に加速度成分のみという場合が多いので、式(1)を加速度入力による運動方程式に書き改める。そのため、対象系の運動方程式の解を、基礎面の強制変位による準静的な応答と、慣性力による動的な応答の和ととらえる。つまり、

$$\begin{Bmatrix} x_s \\ x_f \\ x_g \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_s \\ x_f \\ x_g \end{Bmatrix}^s + \begin{Bmatrix} x_s \\ x_f \\ x_g \end{Bmatrix}^d \dots\dots(4)$$

前者は、式(3)の静的縮合から

$$\begin{Bmatrix} x_s \\ x_f \\ x_g \end{Bmatrix}^s = - \begin{bmatrix} k_{ss} & k_{sf} \\ k_{fs} & (k_{ff} + k_{bb}) & k_{bg} \\ & k_{gb} & k_{gg} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ k_{fr} \\ k_{gr} \end{bmatrix} x_r = \beta_{complete} x_r \dots\dots(5)$$

と求められ、式(4)を式(3)に代入すると動的応答は次式の解となる。

$$\begin{bmatrix} M_{complete} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_f \\ \ddot{x}_g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{complete} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_f \\ \dot{x}_g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{complete} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s \\ x_f \\ x_g \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} M_{complete} \\ C_{complete} \end{bmatrix} \left( \beta_{complete} + \begin{bmatrix} 0 \\ m_{fr} \\ m_{gr} \end{bmatrix} \right) \ddot{x}_r - \begin{bmatrix} C_{complete} \\ \beta_{complete} + \begin{bmatrix} 0 \\ c_{fr} \\ c_{gr} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \dot{x}_r \dots\dots(6)$$

ここで、質量、減衰、および剛性マトリックスの内容は式(3)のもので、全体解析法は、式(6)を直接に解くことである。しかし、地盤部分の自由度は相当の数のうへ、構造物の自由度がさらに加わるため、全体解析法は得策とはいえない。そして長大・大型構造物を対象とすると、もはや現在の大型コンピュータをもってしても演算時間、コスト面から大きな制約がかかる。

このような状況下に対処すべく開発された手法が動的サブストラクチャ法である。動的サブストラクチャ法の内にも、大別して、2種のアプローチがある。1つは、下部構造系(地盤あるいは地盤-基礎系)のインピーダンス関数を、上部構造物とのインターフェイスに関してまず評価し、有効地震入力動のもとで同インピーダンスと上部構造物の慣性連成振動を解く。この場合にも、地盤と基礎の一体系あるいはそれらのサブストラクチャ化で接触面モデル法あるいは接触体モデル法のバリエーションが採れる<sup>1)</sup>。

いま、1つの解析手法として、式(6)の解法に各部分系モードの総合法<sup>2),13)</sup>を適用することが考えられる。

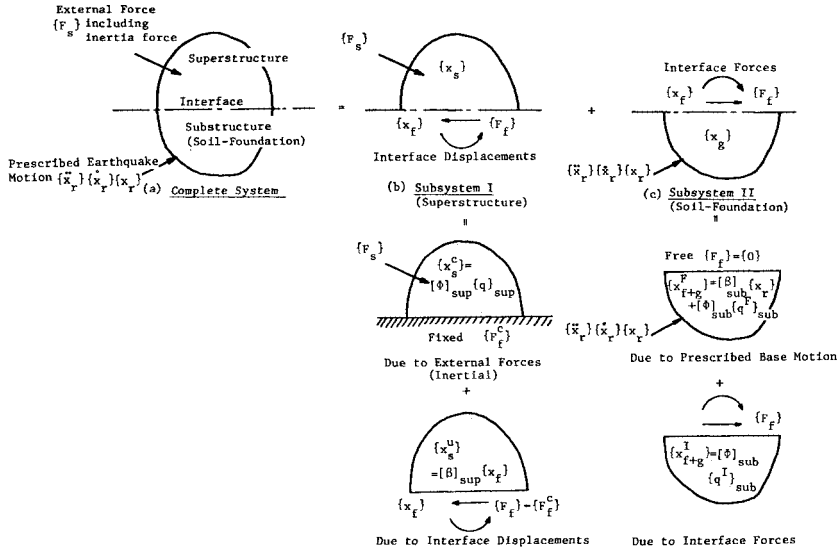


Fig. 2 Substructuring for Soil-Structure Interaction System.

つまり、全体系を地盤-基礎系と上部構造物系とにサブストラクチャ化し、前者のインターフェイスを自由境界とした固有モード法と後者のそれを拘束境界とした固有モード法を採って、それぞれの動的自由度の縮小化をモード座標系で行い、選出された両系の固有モード間の連成振動解析を実施するのである。したがって、後者の解析法は、Ritz法の一つとみなすことができる。その定式化の概念を地盤インピーダンス法<sup>1)</sup>との対比でFig. 2に示しておく。

### 3. 部分系モードの総合法による解析 (部分モード法)

#### [地盤-基礎系]

式(1)の解を、上部構造物が無い、つまり外力  $P_f = 0$  のときの基盤面入力による応答と、上部構造物との連成振動で生じる応答に分解して考える。前者においては、準静的な応答と慣性力による動的応答がある。よって

$$\begin{Bmatrix} x_{f,sub} \\ x_g \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_f^s \\ x_g^s \end{Bmatrix} + \left( \begin{Bmatrix} x_f^d \\ x_g^d \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} x_f^i \\ x_g^i \end{Bmatrix} \right) \dots\dots\dots (7)$$

準静的な応答は、多点入力系としての定式化から、

$$\begin{Bmatrix} x_f^s \\ x_g^s \end{Bmatrix} = \beta_{sub} x_r \dots\dots\dots (8)$$

ただし  $\beta_{sub}$  は下部構造系の変位影響マトリックスで

$$\beta_{sub} = - \begin{bmatrix} k_{ff} & k_{fg} \\ k_{gb} & k_{gg} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} k_{fr} \\ k_{gr} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (9)$$

動的応答は、次式の解で与えられる。

$$\begin{bmatrix} M_{sub} \\ C_{sub} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_f^d \\ \dot{x}_g^d \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{sub} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_f^d \\ x_g^d \end{Bmatrix} = \dots\dots\dots$$

$$= \begin{Bmatrix} 0 \\ P_g \end{Bmatrix} - \left( \begin{bmatrix} M_{sub} \end{bmatrix} \beta_{sub} + \begin{Bmatrix} m_{fr} \\ m_{gr} \end{Bmatrix} \right) \dot{x}_r - \left( \begin{bmatrix} C_{sub} \end{bmatrix} \beta_{sub} + \begin{Bmatrix} c_{fr} \\ c_{gr} \end{Bmatrix} \right) \dot{x}_r \dots\dots\dots (10)$$

あるいは

$$M_{sub} \ddot{x}_{sub} + C_{sub} \dot{x}_{sub} + K_{sub} x_{sub} = -F_{sub} \ddot{x}_r - G_{sub} \dot{x}_r + \tilde{P}_g \dots\dots\dots (10)'$$

ここに、質量、減衰、および剛性マトリックス  $M_{sub}$ ,  $C_{sub}$ ,  $K_{sub}$  は、式(1)より明らかである。外力  $P_g$  は、側方仮想境界上にエネルギー伝達境界<sup>15)</sup>あるいは粘性境界要素<sup>16)</sup>を配置することによって現われる地盤振動による作用力である。

一方、上部構造物との慣性力による応答は、次式で支配される。

$$\begin{bmatrix} M_{sub} \\ C_{sub} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_f^i \\ \dot{x}_g^i \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{sub} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_f^i \\ x_g^i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_{f,sub} \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ P_r \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (11)$$

ここで外力項の第2項は、基礎からの放射波による作用力であり、側方境界要素マトリックス  $R$  より地盤節点  $g$  に対応するように拡大して

$$P_r = -\tilde{R} x_g^i \dots\dots\dots (12)$$

と表わされる。

さて、運動方程式(10)および(11)を解くにあたって、対象領域の固有モード分解を実施する。そのときの変位の固有モード展開は、式(10)の応答に対しては

$$\begin{Bmatrix} x_f^d \\ x_g^d \end{Bmatrix} = \Phi_{sub} q_{sub}^d = \begin{Bmatrix} \Phi^f \\ \Phi^g \end{Bmatrix}_{sub} q_{sub}^d \dots\dots\dots (13)$$

また、式(11)の応答に対しては

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{x}_f \\ \mathbf{x}_g \end{Bmatrix} = \Phi_{sub} \mathbf{q}'_{sub} \dots\dots\dots (14)$$

となる。ここで固有モードマトリックス  $\Phi_{sub}$  は、モード座標上で

$$\Phi_{sub}^T M_{sub} \Phi_{sub} = I_{sub} \dots\dots\dots (15 \cdot a)$$

$$\Phi_{sub}^T C_{sub} \Phi_{sub} = \tilde{C}_{sub} \dots\dots\dots (15 \cdot b)$$

$$\Phi_{sub}^T K_{sub} \Phi_{sub} = [\omega_i^2]_{sub} \dots\dots\dots (15 \cdot c)$$

ただし、減衰マトリックス  $\tilde{C}_{sub}$  は、一般には対角マトリックスにならない。式 (13), (14) をそれぞれ運動方程式 (10), (11) に代入し、さらに前から  $\Phi_{sub}$  の転置を乗じて、式 (15) を考慮すると

$$I_{sub} \ddot{\mathbf{q}}'_{sub} + \tilde{C}_{sub} \dot{\mathbf{q}}'_{sub} + [\omega_i^2]_{sub} \mathbf{q}'_{sub} = -\Phi_{sub}^T \mathbf{F}_{sub} \ddot{\mathbf{x}}_r - \Phi_{sub}^T \mathbf{G}_{sub} \dot{\mathbf{x}}_r + \Phi_{sub}^T \tilde{\mathbf{P}}_g \dots\dots\dots (16)$$

および

$$I_{sub} \ddot{\mathbf{q}}'_{sub} + \tilde{C}_{sub} \dot{\mathbf{q}}'_{sub} + [\omega_i^2]_{sub} \mathbf{q}'_{sub} = \Phi_{sub}^{0T} \mathbf{b} + \Phi_{sub}^{gT} \mathbf{P}_g \dots\dots\dots (17)$$

が得られる。ここで  $\Phi_{sub}^b$ ,  $\Phi_{sub}^g$  はそれぞれ  $b$ ,  $g$  節点に対応した  $\Phi_{sub}$  の成分を意味する。

[上部構造物]

つぎに、上部構造物の運動方程式は、下部構造系とのインターフェイス節点も含めて式 (2) で与えられる。上部構造物は、通常、軽減衰系であることが多く、その応答性状には完全固定支持状態での固有モードが保存される傾向が強い。これを考慮して、上部構造系の応答を、上記の拘束モード応答と基礎の応答自由度に伴う準静的応答の和としてとらえる。よって、式 (2) の変位応答は

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{x}_s \\ \mathbf{x}_{f,sup} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{sup} & \beta'_{sup} \\ \mathbf{0} & I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_{sup} \\ \mathbf{x}_{f,sup} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (18)$$

と表わされる。ここに、 $\Phi_{sup}$  は固有モードを定義しており、式 (2) の質量、減衰、および剛性マトリックス  $M_{sup}$ ,  $C_{sup}$ ,  $K_{sup}$  に関しての正規直交性

$$\Phi_{sup}^T m_{ss} \Phi_{sup} = I_{sup} \dots\dots\dots (19 \cdot a)$$

$$\Phi_{sup}^T c_{ss} \Phi_{sup} = [2\xi_l \omega_l]_{sup} \dots\dots\dots (19 \cdot b)$$

$$\Phi_{sup}^T k_{ss} \Phi_{sup} = [\omega_l^2]_{sup} \dots\dots\dots (19 \cdot c)$$

を満たすものとする。ただし  $\omega_l$  は  $l$  次の固有振動数、 $\xi_l$  は同モード減衰定数である。一方、 $\beta_{sup}$  は変位影響マトリックスを定義し、式 (2) の静的縮合から

$$\beta_{sup} = -k_{ss}^{-1} k_{sf} \dots\dots\dots (20)$$

[上下部構造連成系]

上部構造物と下部構造系との連成振動を図るに際して、両部分系のインターフェイス節点における変位の適合性ならびに断面力のつり合いを採る。これらは、それぞれ次式で与えられる。

$$\mathbf{x}_{f,sup} = \mathbf{x}_{f,sub} = \mathbf{x}_f \dots\dots\dots (21)$$

$$\mathbf{P}_{f,sup} + \mathbf{P}_{f,sub} = \mathbf{0} \dots\dots\dots (22)$$

式 (21) は、式 (7), (13), (14) を考慮すると

$$\Phi_{sub}^f (\mathbf{q}^f_{sub} + \mathbf{q}^i_{sub}) + \beta_{sub} \mathbf{x}_r = \mathbf{x}_f \dots\dots\dots (23)$$

となる。よって、式 (7), (18) を併せて

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{x}_s \\ \mathbf{x}_f \\ \mathbf{x}_g \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{sup} & \beta_{sup} \Phi_{sub}^f \\ \mathbf{0} & \Phi_{sub} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_{sup} \\ \mathbf{q}^f_{sub} + \mathbf{q}^i_{sub} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_{sup} \beta_{sub}^f \\ \beta_{sub} \end{bmatrix} \mathbf{x}_r \dots\dots\dots (24)$$

と得られる。これは地盤-構造物系の運動方程式が、地盤-基礎系の固有モード応答と上部構造物の固有モード応答およびそれぞれの境界節点の強制変位に対する変位影響関数でもって表わされたことを意味している。式 (24) の変位変換式を全体系の運動方程式 (3) に代入し、前から同式の第 1 変換マトリックスの転置を乗じると、その結果

$$\begin{bmatrix} M_{PP} & M_{PB} \\ M_{BP} & M_{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_{sup} \\ \dot{\mathbf{q}}'_{sub} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{PP} & C_{PB} \\ C_{BP} & C_{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_{sup} \\ \dot{\mathbf{q}}'_{sub} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{PP} & K_{PB} \\ K_{BP} & K_{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_{sup} \\ \mathbf{q}'_{sub} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} F_{MP} \\ F_{MB} \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_{f,sub} - \begin{bmatrix} F_{CP} \\ F_{CB} \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_{f,sub} - \begin{bmatrix} F_{KP} \\ F_{KB} \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_{f,sub} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \Phi_{sub}^{gT} \mathbf{P}_g \end{bmatrix} \dots\dots\dots (25)$$

ここに

$$M_{PP} = I_{sup}$$

$$M_{PB} = M_{BP}^T = \Phi_{sup}^T (m_{ss} \beta_{sup} + m_{sf}) \Phi_{sub}^f$$

$$M_{BB} = \Phi_{sub}^T (\Phi_{sup}^T m_{ss} \beta_{sup} + m_{fs} \beta_{sup} + \beta_{sup}^T m_{sf} + m_{ff}) \Phi_{sub}^f + I_{sub}$$

$$C_{PP} = [2\xi_l \omega_l]_{sup}$$

$$C_{PB} = C_{BP}^T = \Phi_{sup}^T c_{ss} \beta_{sup} \Phi_{sub}^f$$

$$C_{BB} = \Phi_{sub}^T \beta_{sup}^T c_{ss} \beta_{sup} \Phi_{sub}^f + \Phi_{sub}^T \begin{bmatrix} c_{ff} & c_{fg} \\ c_{gf} & c_{gg} \end{bmatrix} \Phi_{sub}$$

$$K_{PP} = [\omega_l^2]_{sup}$$

$$K_{PB} = K_{BP}^T = \mathbf{0}$$

$$K_{BB} = \Phi_{sub}^T (k_{fs} \beta_{sup} + k_{ff}) \Phi_{sub}^f + [\omega_l^2]_{sub}$$

$$F_{MP} = \Phi_{sup}^T (m_{sf} + m_{ss} \beta_{sup})$$

$$F_{MB} = \Phi_{sub}^T (\beta_{sup}^T m_{sf} + \beta_{sup}^T m_{ss} \beta_{sup} + m_{fs} \beta_{sup} + m_{ff})$$

$$F_{CP} = F_{PC}^T = \Phi_{sup}^T c_{ss} \beta_{sup}$$

$$F_{CB} = \Phi_{sub}^T \beta_{sup} c_{ss} \beta_{sup}$$

$$F_{KP} = \mathbf{0}$$

$$F_{KB} = \Phi_{sub}^T (k_{ff} + k_{fs} \beta_{sup})$$

#### 4. SUBSSIP-A3D へのインプリメンテーション

前節で述べた部分モード法による定式化を、第 1 著者らの開発による地盤-構造物系の耐震解析システム SUBSSIP-A3D にバージョン・アップの形でインプ

リメントした、SUBSSIP-A 3Dは、動的サブストラクチャ法を根幹とした擬似三次元有限要素解析プログラムである。その定式化についての詳細は、文献(3),5),7),10),11)に譲り、ここでは、その概略を述べるにとどめる。

まず、基礎とその周辺の地盤を軸対称モデル化して、応答を周方向にフーリエ級数展開している。この下部構造領域を有限要素法から解析するに際して、仮想有限境界として、地盤の側方半無限遠への広がりを考慮できるためのエネルギー伝達境界要素<sup>15)</sup>あるいはその近似解を与える粘性境界要素<sup>16)</sup>を導入している。下方境界は、剛基礎面あるいは近似的に半無限基礎面を仮定することができる。そして、同プログラムが扱える基礎形式は剛体基礎、弾性基礎、および群杭基礎等と多彩である。上部構造物の解析は、一般の三次元マトリクス解析から実施する。なお上下部構造系の連成振動を直交座標系で図るため、下部構造系の運動方程式を円筒座標系からこれに変換して合せている。

地震波は、本質的には、三次元地盤の媒体内の伝播仮定のうへに定義されるものであるが、本研究では、入力基礎面上で任意方向からの入射する地震波を直交3成分に分解し、それぞれに対する応答を評価して線形重ね合わせ則を適用している。つまり、まず直交3方向の入力に対する伝達関数

$$H(\omega) = \begin{bmatrix} H_{xx}(\omega) & H_{xy}(\omega) & H_{xz}(\omega) \\ H_{yx}(\omega) & H_{yy}(\omega) & H_{yz}(\omega) \\ H_{zx}(\omega) & H_{zy}(\omega) & H_{zz}(\omega) \end{bmatrix} \dots\dots\dots(26)$$

を求め、これに選定した地震波のフーリエ変換  $F(\omega)$  を乗じて振動数応答を求める。

$$\begin{bmatrix} X_x(\omega) \\ X_y(\omega) \\ X_z(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{xx}(\omega) & H_{xy}(\omega) & H_{xz}(\omega) \\ H_{yx}(\omega) & H_{yy}(\omega) & H_{yz}(\omega) \\ H_{zx}(\omega) & H_{zy}(\omega) & H_{zz}(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x(\omega) \\ F_y(\omega) \\ F_z(\omega) \end{bmatrix} \dots\dots(27)$$

この振動数応答を、さらに逆フーリエ変換して時刻歴応答とする。

5. 例題解析

解析対象構造物として、Fig. 3に示す群杭基礎上の大型高炉<sup>2),3)</sup>を取り上げた。その立地地盤の物性ならびに杭の諸元を Tables 1, 2にそれぞれ載せておく。地盤-基礎系の解析モデル、また上部構造物のそれを Fig. 4に示す。

まず、下部構造系のみを固有振動モード分解したときの結果、低次の固有振動数については Table 3に、また基礎面入力の際の寄与率の高いモード形状については Fig. 5に示す。後者より、 $n=0$ の並進に関して対称、回転に関して逆対称のフーリエ展開項の採用により2次モードに鉛直並進、5, 6次モードに半径方向への膨張

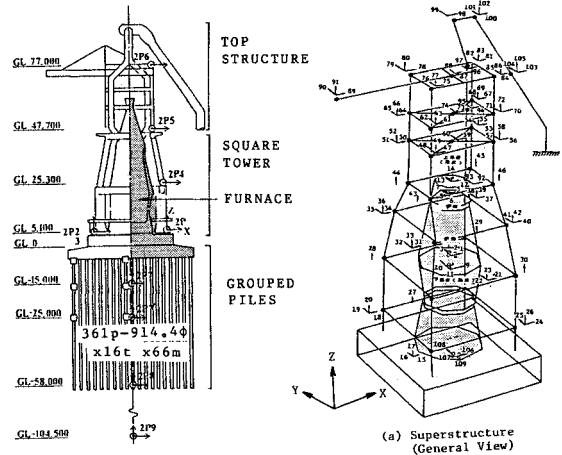


Fig. 3 Blast Furnace Structure on Grouped Pile Foundation.

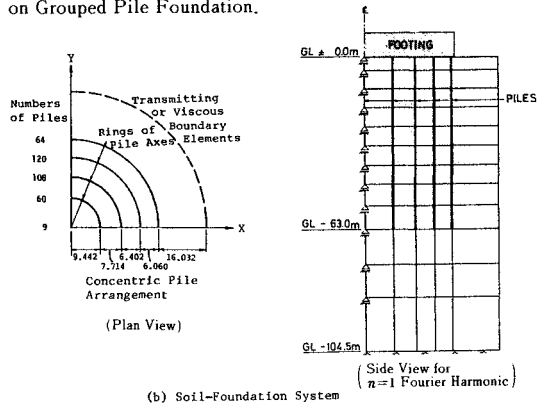


Fig. 4 FEM Model for Analysis.

Table 1 Soil Properties.

LAYERS	VELOCITY (m/sec)	DAMPING	WEIGHT (t/m <sup>3</sup> )	POISSON RATIO	DEPTH (m)
1	150.0	0.20	1.800	0.400	4.500
2	185.0	0.20	1.750	0.400	6.000
3	185.0	0.20	1.750	0.400	6.500
4	150.0	0.20	1.700	0.400	6.500
5	150.0	0.20	1.700	0.400	6.500
6	175.0	0.10	1.790	0.400	6.500
7	175.0	0.10	1.790	0.400	6.500
8	175.0	0.10	1.700	0.400	7.500
9	175.0	0.10	1.700	0.400	8.000
10	560.0	0.10	2.000	0.400	12.000
11	260.0	0.10	1.800	0.400	11.000
12	440.0	0.10	2.100	0.400	18.500

Table 2 Pile Dimensions.

LAYERS	WEIGHT (t/m <sup>3</sup> )	DAMPING FACTOR	SHEARING MODULUS (t/m <sup>2</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )	MOMENT OF INERTIA (m <sup>4</sup> )	POISSON RATIO
1 ~ 4	0.354	0.03	8.1×10 <sup>6</sup>	0.04516	0.234×10 <sup>-2</sup>	0.30
5 ~ 9	0.311	0.03	8.1×10 <sup>6</sup>	0.03960	0.234×10 <sup>-2</sup>	0.30

収縮が現われている (Fig. 5 (a)).  $n=0$ の並進に関して逆対称、回転に関して対称のフーリエ展開項の採用では1, 2次にねじれが現われている (Fig.5 (b)). そし

Table 3 Natural Frequencies (Hz).

MODE No.	SUPER STRUCTURE			SUB STRUCTURE					
	N.F.	X-DIR.	Y-DIR.	n=0 (SYM.)		n=0 (ASYM.)		n=1	
		C.R.		N.F.	C.R.	N.F.	C.R.	N.F.	C.R.
1	*0.80	1.4	13.8	*1.01	0.0	*0.63	11.9	*0.45	28.0
2	*1.12	32.4	0.5	*1.56	51.2	*1.71	9.6	*1.31	15.7
3	*1.18	0.2	17.8	*1.89	0.0	*1.98	0.0	*1.88	7.4
4	*1.32	0.2	11.0	*2.76	0.0	*2.67	7.5	*2.07	0.1
5	*1.42	0.1	9.1	*3.18	4.1	*2.90	0.0	*2.51	9.8
6	*1.53	3.6	2.3	*3.27	13.9	*3.04	0.0	*2.81	3.9
7	*1.68	2.2	2.2	*3.42	0.0	*3.24	1.0	*3.56	2.3
8	*2.02	8.1	2.5	*3.89	1.5	*3.70	1.5	*3.77	2.5
9	*2.89	0.8	3.5	*4.03	0.0	*3.74	0.0	*4.06	0.7
10	*3.31	1.1	0.5	*4.13	11.6	*4.05	9.8	*4.11	2.7
11	*4.05	0.3	0.3	4.37	0.0	4.14	0.0	4.38	1.4
12	*4.38	2.4	0.2	4.93	4.1	4.48	0.0	4.77	2.0
13	*4.45	0.5	1.2	5.26	0.0	4.71	3.9	4.98	0.3
14	*4.68	5.0	0.2	5.37	0.0	5.09	0.0	5.22	2.1
15	*5.25	0.3	0.7	5.58	11.0	5.32	1.4	5.36	0.8
16	*5.55	7.5	1.1	5.67	0.0	5.41	8.7	5.49	0.7
17	*5.70	4.2	13.0	6.12	0.0	5.64	0.0	5.89	1.4
18	*5.90	9.6	1.9	6.15	2.0	5.76	0.0	6.05	1.1
19	*5.96	15.4	8.9	6.61	0.0	5.92	6.2	6.31	0.8
20	*6.22	5.0	9.4	6.95	0.0	6.09	0.1	6.42	0.5

\*1: Pick-up Modes N.F.: Natural Frequency(Hz)  
C.R.: Contribution Ratio(%) for Mass Input

て  $n=1$  の並進に関して対称、回転に関して逆対称のフーリエ展開項の採用では、1、2次に並進モードが現われている (Fig. 5 (c)). これらの下部構造系の固有モードと上部構造物の三次元固有モードを総合して全体系の動特性、応答特性を把握する。その際、使用する各部分系の固有モードの選択は、以前の下部構造系のインピーダンス法から得られた対象系の振動数応答関数<sup>3),7)</sup>を参考にして、下部構造系についてはそれぞれのフーリエ展開項において最初の10モードを、上部構造物においては最初の20モードを採用した。よって動的解析のための自由度数は都合60となる。前者のモード採用次数から、応答に支配的な4 Hz以下の振動数領域はカバーさ

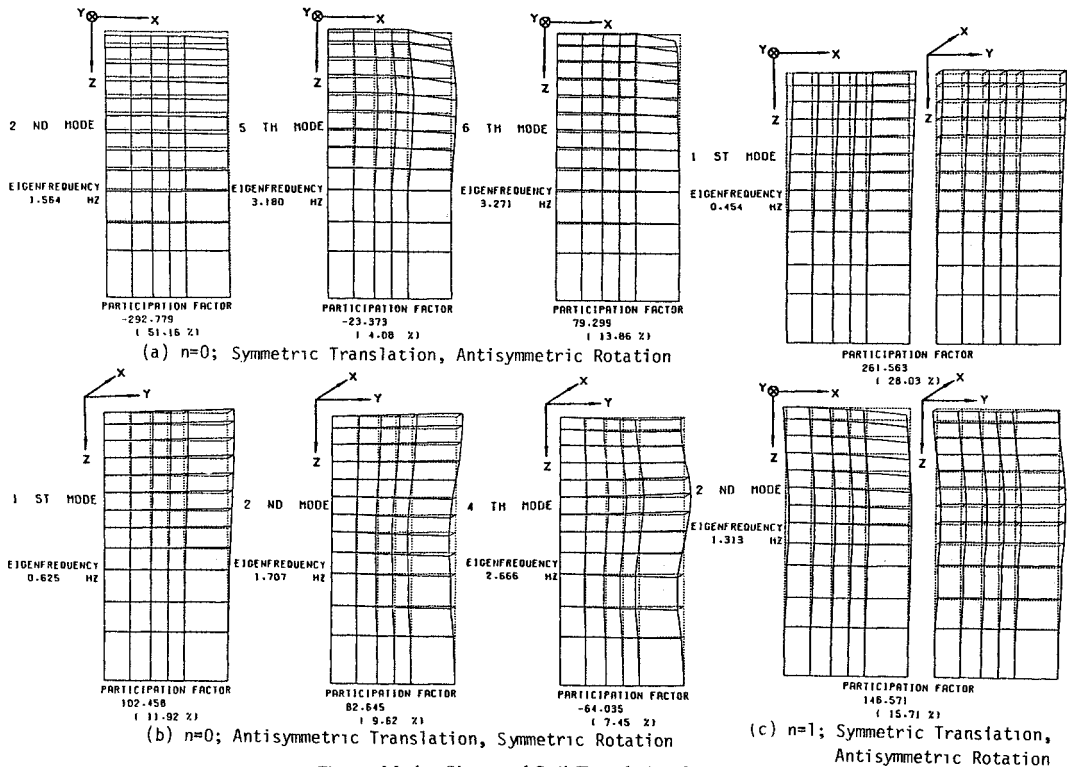


Fig. 5 Modes Shapes of Soil-Foundation System.

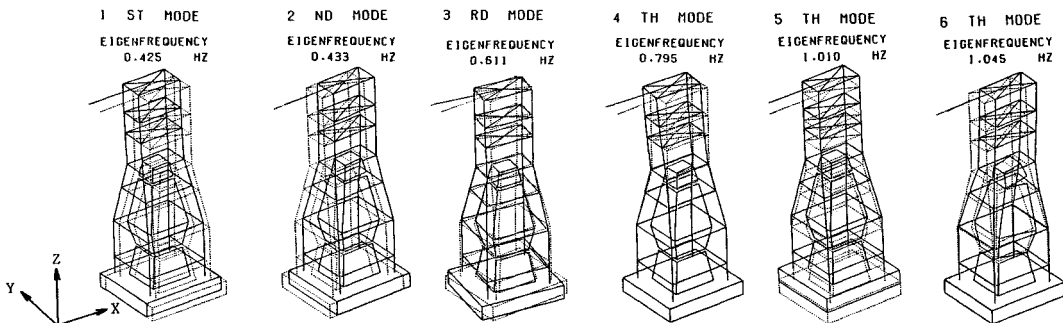


Fig. 6 Modes Shapes of Superstructure Affected by SSI.

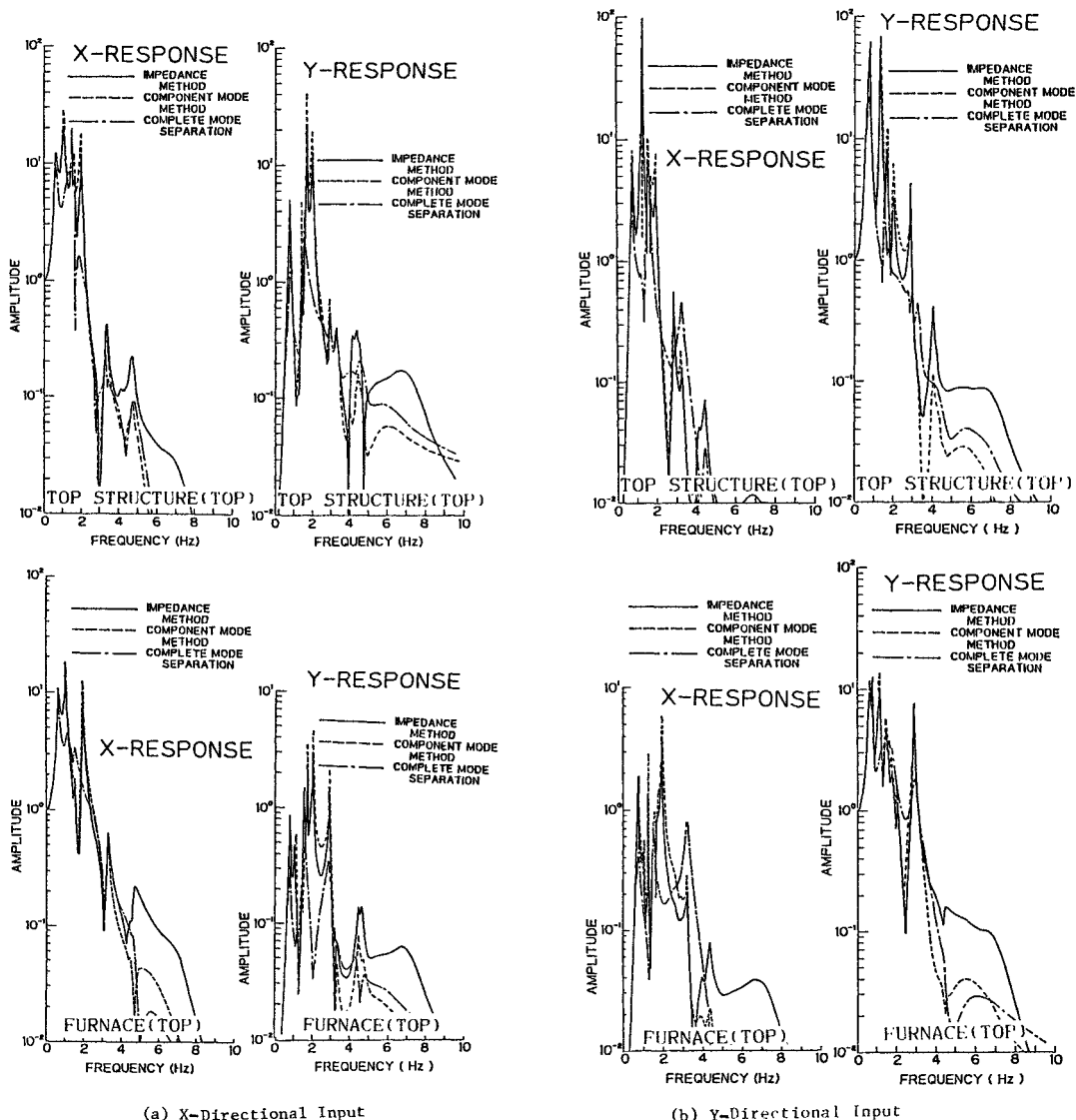


Fig. 7 Frequency Transmitting Functions (Transmitting Side Soil Boundary).

れる。

以上のようにして総合された全体系は、古典的な意味では固有モード分解できないが、地盤との連成における上部構造物の動特性を視覚的に把握するということから、固有モード間の連成効果を見逃して求めた全体系の固有モード形状を Fig. 6 に示す。同図より、全体系の1次、2次モードにそれぞれ  $y$  方向、 $x$  方向の並進が現われ、これは地盤並進モードに大きく支配されて上部構造物は剛体的に変位しているのみである。そして全体系の3次モードに上部構造物のねじれモードが、4次モードに  $y$  方向の曲げの1次モードが、5次モードに下部構造系の鉛直1次モードが、そして6次モードに上部構造物

の  $x$  方向の曲げ1次モードが現われている。

次に、地盤との連成を厳密にとらえるため、基盤入力に対する振動数応答 (伝達関数) を式 (25) から求めた。Fig. 7 は、対象構造物の代表的な箇所についての伝達関数である。これらの応答性状から、対象構造物は  $x$  方向と  $y$  方向の特性がかなり異なり、また入力方向に対して、それに直角の方向の応答が少なからず引き起こされるということは、前図 Fig. 6 の固有モード図とも併せて、当該構造物の三次元地震応答解析が重要であることを意味している。Fig. 7 には、全体系を固有モード解析した結果 (Complete Mode Separation (CMS)) も併せて描いてあるが、各固有モード間の連成効果が強いと

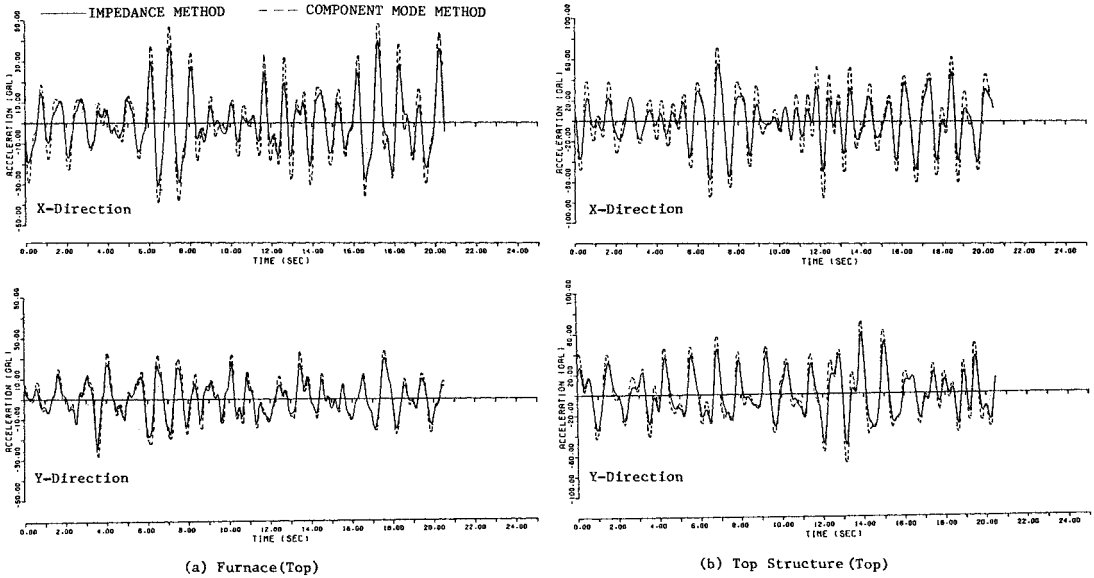


Fig. 8 Acceleration Response Time Histories (Transmitting Side Soil Boundary).

Table 4 CPU TIME Comparison.

手法	モデル化 STEP	自由度数	CPU TIME (SEC)			
			伝達境界		粘性境界	
インピーダンス法	地盤インピーダンス	140	564	467	308	1
	杭頭インピーダンス	6	699	699		
	連成系の伝達関数	26	78	78		
	時刻歴&フーリエスペクトル		1	1		
	計		1650	1246		
部分モード法	下部構造の固有モード分解	204	213	213		
	下部構造のみの伝達関数	40	34	11		
	連成系の伝達関数	60	C.M.M. 179	C.M.S. 349	C.M.M. 89	C.M.S. 14
	時刻歴&フーリエスペクトル		1	1	1	1
	計		745	915	325	260

注：岡山大学総合情報処理センターACOS1000を使用

Table 5 動的サブストラクチャ法の分類と比較

項目	解析法	部分モード法	インピーダンス法
下部構造系	動特性	固有モード展開	インピーダンス関数(バネおよびダッシュポット係数)
	計算法	固有値解析法	部分縮合法
全体系解析	自由度の縮小法	固有モードの質量比から採用次数を選択	基礎の自由度
	工学的特徴	上部・下部構造系の固有モードの総合 上部・下部構造系の振動性状の偏評、段階的に全体系の振動性状を把握、時間領域の近似応答解析も可	上部構造物の固有モードと下部構造系のインピーダンスの連成 上部構造物を主体としての下部構造系の構造要素化、上部構造物との慣性連成効果を把握し易い、振動数領域の応答解析

く、固有値解析、連立方程式解法のサブルーチンにもよるが、本論文で示した部分モード法は所要CPUタイムを短縮することがわかる。

### 6. むすび

本研究では、著者らは、地盤との動的相互作用による構造物の地震応答解析に対する新たな定式化を部分モードの縮合法から示すとともに、これまで開発してきている地盤-基礎-上部構造物系の耐震解析システムSUBSSIP-A 3Dにインプリメントした。今回、採用した解析法は、全体系を地盤-基礎系と上部構造物にサブストラクチャ化し、両者のインターフェイスにおいて前者では自由境界下の固有モード解析を、一方、後者では拘束境界下の固有モード解析を採っている。そして各部分の固有モードを工学的な判断のもとに選定して抽出し、連成系を形成するためにそれらを再び総合している。

前論文<sup>9)</sup>で提示したインピーダンス法は、全体系の内において下部構造系の効果を物理的に把握するのに適し

の応答評価の精度はよくない。

本論文で示した部分モードの縮合法と従来のインピーダンス法による地震応答解析結果の比較をする。使用した地盤面入力波は、解析対象構造物の近傍で観測した川奈崎沖地震(1978.6)記録で、最大加速度は、水平x方向に16gal、y方向に20gal、そして鉛直z方向に6galである。Fig.8は、そのときの時刻歴応答の計算値のうちから代表的な場所について示したものである。両応答を比較して、周期的には解析法の差はみられないが、各ピーク値においてわずかの差がみられる。しかし、おおむね良好な一致が得られている。計算値と観測値との比較については文献4),6),8),9)において示した。ここでは紙面の都合上省く。

最後に、側方仮想境界のモデル化、対象系の解析手法の観点から応答計算時間の比較をTable4に掲げてお



しており、一方、今回の部分系モードの総合法は、応答を下部構造系、連成系と段階的に評価できる利点がある。両者の解析手法の特徴を Table 5 にまとめておくと、いずれの手法を採用するかを決め手は、上記の内容と同時に CPU タイムの観点からも制約される。そしてインピーダンス法の場合の下部構造インピーダンスを評価するための縮小操作に要する時間と、部分モード法の下部構造系の固有モード解析に費やす時間との間のトレードオフになる。

なお、本研究の遂行に際して、日本鋼管(株)中央技術研究所 小島 修氏から資料提供等の協力を得たことに対して感謝の意を表す。

#### 参 考 文 献

- 1) 竹宮：地盤-基礎-上部構造物系の地震応答解析-動的サブ・ストラクチャー法の適用，土と基礎，29-9，pp.27~34，1981.9.
- 2) Takemiya, H. and Shimada, T. : Seismic Analysis of Multi-Span Continuous Girder Bridge with Emphasis on Soil-Foundation-Superstructure Interaction, Proc. of JSCE, Structural Eng./Earthq. Eng., Vol.1, No.2, pp.77~85, Oct., 1984.
- 3) 竹宮・正木・小島・二宮：動的サブストラクチャー法による地盤-基礎-上部構造物系の擬似3次元地震応答解析，日本鋼構造協会，第17回マトリックス解析法に関するシンポジウム論文集，pp.311~316，1983.7.
- 4) Takemiya, H., Kojima, O. and Ninomiya, A. : Seismic Analysis and Design of Huge Blast Furnaces, Procs. 8 WCEE, San Francisco, Vol.5, pp.311~318, 1984.
- 5) Takemiya, H. and Uotani, K. : Pseudo-three Dimensional Seismic Analysis of Soil-Foundation-Superstructure System, Procs. of 5th Eng. Mech. Div. Specialty Conf. ASCE, Larami, pp.352~355, 1984.8.
- 6) 竹宮・魚谷・福井：部分モード法による地盤-基礎-上部構造物系の擬似3次元地震応答解析，第39回土木学会年次学術講演会講演概要集 I-494, 1984.
- 7) Takemiya, H. and Uotani, K. : Pseudo-three dimensional Seismic Analysis of Soil-Foundation-Superstructure System, Procs. Int. Conf. Num. Meth. Geomechanics, Nagoya, April, 1985.
- 8) Takemiya, H., Kojima, O. and Ninomiya, A. : Seismic Analysis and Design of Huge Blast Furnaces, Procs. of the 4th Int. Conf. on Structural Safety and Reliability, pp.1321~329, Kobe, 1985.
- 9) 竹宮・福井：地盤-基礎-上部構造物系の3次元地震応答解析システム SUBSSIP-A 3D の拡張，第40回土木学会年次学術講演会講演概要集 I-389, 1985.
- 10) Takemiya, H. : Three-Dimensional Seismic Analysis for Soil-Foundation-Superstructure Based on Dynamic Substructure Method, Structural Eng./Earthq. Eng., Proc. of JSCE, Vol.2, No.1, pp.163~173, April, 1985.
- 11) Takemiya, H. : Ring-Pile Analysis for A Grouped Pile Foundation Subjected to Base Motion, Structural Eng./Earthq. Eng., Proc. of JSCE, Vol.3, No.1, pp.195s-202s, April, 1986.
- 12) Kukreti, A. R. and Feng, C. C. : Dynamic Substructuring for Alternative Subsystems, J. Eng. Mech. Div., ASCE, Vol.104, No.EM 5, pp.1113~1129, Oct., 1978.
- 13) Craig, R. R., Jr. : Structural Dynamics, An Introduction to Computer Methods, John Wiley & Sons, Chap. 19, 1981.
- 14) 竹宮・魚谷：局所的非線形性を有する多径間連続高架橋の地震応答解析，土木学会論文報告集，第338号，pp.29~38，1983.10.
- 15) Kausel, E., Roesset, J.M. and Waas, G. : Dynamic Analysis of Footings on Layered Media, J. Eng. Mech. Div., ASCE, Vol.101, No.EM 5, pp.679~693, 1975.
- 16) Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R.L. : Finite Dynamic Model for Infinite Media, J. Eng. Mech. Div., ASCE, Vol.95, No.EM 4, pp.859~877, 1969.

(1985.5.29・受付)