

1. まえがき

著者らは、サブストラクチャ法を根幹とした地盤と構造物の3次元動的耐震解析システムSUBSSIP-A3D¹⁾の開発を進めて来ている。同解析システムでは、上部構造物には一般3次元マトリクス解析法を適用し、地盤-基礎の下部構造系には軸対称モデル化により、応答をフーリエ級数に展開している。そして、上下部構造の連成系を両系のインターフェイスにおける連続性より形成している。今回、同インターフェイス節点の自由度を、フーリエ級数展開項に $n=0, 1$ を採り、これまでの4自由度から6自由度に拡張し、下部構造系の上下振動、ねじれ振動をも考慮できるようにした。その結果、入力条件も基盤面において、直交3成分を同時入力できる。

2. 定式化

下部構造系と上部構造物の運動方程式は、質量、減衰、剛性マトリクス $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ を用い、一般に、

$$[M]_{\text{sub}} \{\ddot{x}\}_{\text{sub}} + [C]_{\text{sub}} \{\dot{x}\}_{\text{sub}} + [K]_{\text{sub}} \{x\}_{\text{sub}} = \{P\}_{\text{sub}} \quad (1); [M]_{\text{sup}} \{\ddot{x}\}_{\text{sup}} + [C]_{\text{sup}} \{\dot{x}\}_{\text{sup}} + [K]_{\text{sup}} \{x\}_{\text{sup}} = \{P\}_{\text{sup}} \quad (2)$$

と表される。下部構造系は軸対称モデルとし、フーリエ級数展開を用い、変位を次式で表す。

$$\{x\}_{\text{sub}} = \sum_{n=0}^1 ([H_n^s] \{x_n^s\} + [H_n^a] \{x_n^a\}) \quad (3)$$

ただし、 $\{x_n^{s,a}\}$ はフーリエ振幅で、肩字 s は対称、 a は逆対称モード、 n はフーリエモード次数を表し、また、 $[H_n^{s,a}]$ は周方向への展開を示し、

$$[H_n^s] = \text{diag.}(\cos n\theta, -\sin n\theta, \cos n\theta) \quad ; \quad [H_n^a] = \text{diag.}(\sin n\theta, \cos n\theta, \sin n\theta) \quad (4)$$

である。ここで、 $n=1$ の対称、逆対称フーリエ展開項は、それぞれ面内、面外の水平並進と回転の連成運動を、 $n=0$ の対称、逆対称フーリエ展開項は、それぞれ鉛直運動、ねじれ運動を表す。また、 $n=1$ では基盤面水平入力、 $n=0$ では基盤面鉛直入力できる。

地盤インピーダンス法²⁾：式(1)を振動数領域に直し、縮合操作を施すと、次式が得られる。

$$[K_f] \{x_f\} = \{P_f\} + \{P_f^0\}$$

$[K_f]$ は下部構造系インピーダンス、 $\{P_f^0\}$ は有効入力、 $\{P_f\}$ は上部構造からの断面力、添字 f は上下部の接触節点を示す。式(2)を固有モード分解し、モード座標で表した式と、式(5)のインピーダンス要素との連成系を同式の有効入力のもとで解く。

部分モード法³⁾：式(1)と式(2)を連成させ、接触節点での変位の適合条件、平衡条件より、

$$[M]_{\text{comp}} \{\ddot{x}\}_{\text{comp}} + [C]_{\text{comp}} \{\dot{x}\}_{\text{comp}} + [K]_{\text{comp}} \{x\}_{\text{comp}} = \{P\}_{\text{comp}} \quad (6)$$

が得られる。上式において、次の変位変換式を用いると、全体系の運動方程式(6)は上下部構造系のそれぞれの固有モード座標で表される。

$$\{x\}_{\text{comp}} = \begin{Bmatrix} x_s \\ x_f \\ x_g \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{\text{sup}} & \beta_{\text{sup}} \phi_{\text{sub}}^f \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_{\text{sup}} \\ q_{\text{sub}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_{\text{sup}} \phi_{\text{sub}}^f \\ \beta_{\text{sub}} \end{bmatrix} x_r \quad (7)$$

ただし、 ϕ_{sup} は上部構造物の拘束モード、 ϕ_{sub} は下部構造系の自由モード、 β_{sup} は接触節点による上部構造物の変位影響マトリクス、 β_{sub} は基盤面による下部構造系の変位影響マトリクス、 q_{sup} 、 q_{sub} はそれぞれ ϕ_{sup} 、 ϕ_{sub} に対応するモード座標を表す。また x_r は基盤面変位を示す。本研究では、式(7)中のモード座標を全体系で固有モード分解する総合モード法も考慮した。

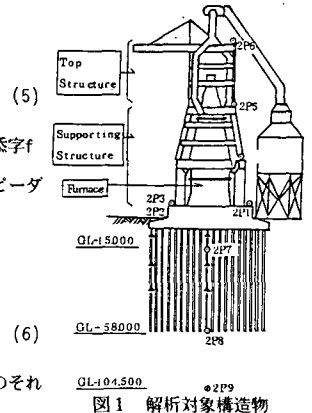


図1 解析対象構造物

添字 s : 上部構造物の節点
 f : 上下部の接触節点
 g : 下部構造系の節点

3. 数値解析例及び考察

解析対象構造物は大型高炉(図1)を採り、同構造物の地盤との連成を把握するため、基盤面入力による伝達関数を図2、3に示した。低振動数領域では、手法による違いは見られない。また、この構造物は、X方向よりY方向にフレキシビリティであることが判る。また、実際の入力地震波(1978.6、川奈崎沖地震)でシミュレーションを行った。観測記録と、部分モード法による計算値のフーリエスペクトルをそれぞれ図4、5に示した。両者に違いが見られるが、モデル化等における不確定要素が原因と考えられる。これらの影響を考えた上で、一応工学的な精度を得られたと思われる。

<参考文献>

- 1) 竹宮、福井：部分モード法による地盤-基礎-上部構造物系の3次元地震応答解析，土木学会論文集
- 2) 竹宮、正木、魚谷：動的サブストラクチャ法による地盤-基礎-上部構造物系の擬似3次元地震応答解析，第38回年次学術講演会(Ⅰ)，1985年 9月
- 3) 竹宮、魚谷、福井：部分モード法による地盤-基礎-上部構造物の擬似3次元地震応答解析，第39回年次学術講演会(Ⅰ)，1984年10月

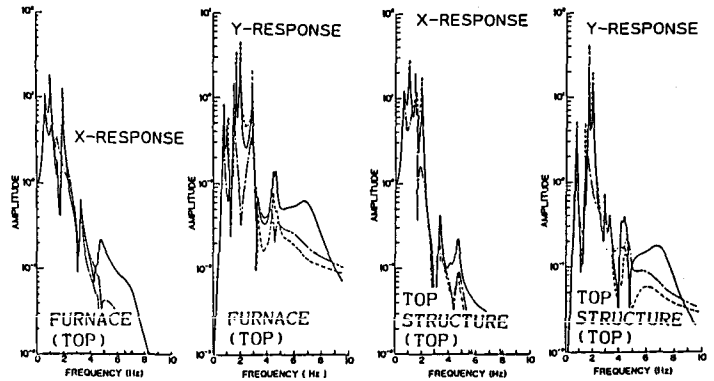


図2 X入力による伝達関数

—— IMPEDANCE METHOD
 ---- COMPONENT MODE METHOD
 - · - COMPLETE MODE SEPARATION

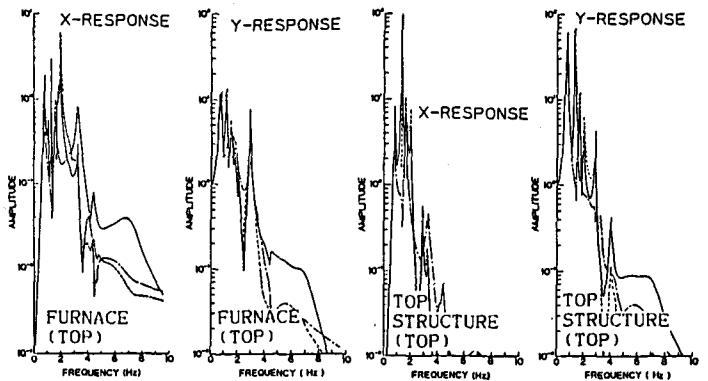


図3 Y入力による伝達関数

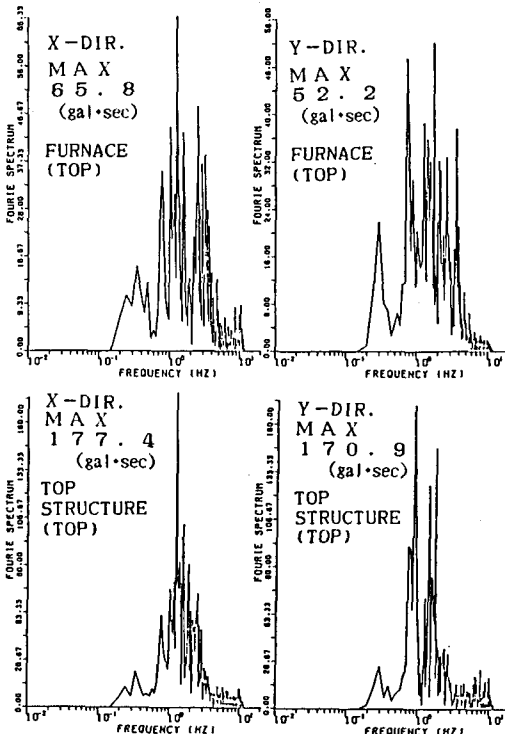


図4 観測記録

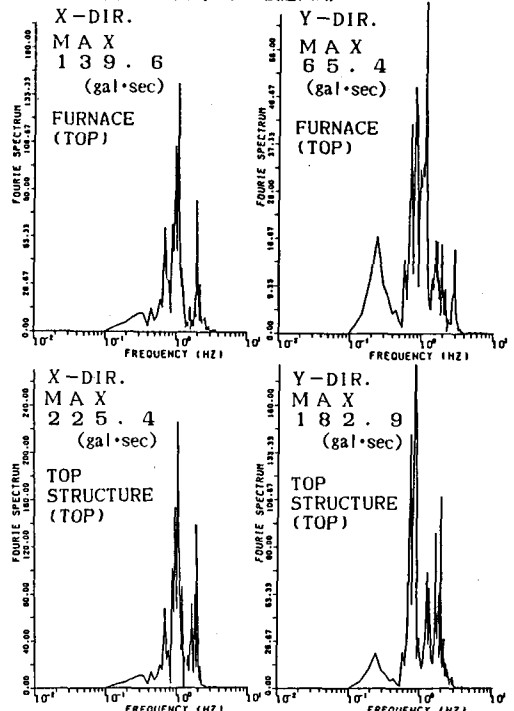


図5 計算結果(C. M. M.)