

# 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

岡山大学工学部 正員 竹宮宏和  
(株)前田建設 正員 正木克彦

## 1. まえがき

本研究は、地盤-基礎-上部構造物系の擬似3次元耐震解析システム「SUBSSIP-A」の開発、バージョン・アップを試みたものである<sup>1)</sup>。その特徴は、(i)解析対象系を地盤-基礎系(下部構造系)と上部構造系に一時切断して、前者の基礎面入力に対する解析から両系のインターフェイスにおける下部構造インピーダンスおよび有効地震入力を評価し、これらを後者の解析へ導入する。(ii)3次元の地盤-基礎系を軸対称モデル化し、その応答解析には周方向についてフーリエ級数展開している。(iii)地盤-基礎系の定式化で接触体モデルを採用していることから、複雑な根入れ弾性基礎に対応できる。(iv)入力基礎面を想定し、これに任意の角度での入射波を近似的に扱える。(v)側方無限遠地盤に対する仮想境界には応力伝達境界を導入している。今回の報告は、群杭基礎を有する大型高炉(図1参照)の解析例についてである。

## 2. 定式化

〔地盤-群杭基礎系〕 基礎面入力に対する地盤-基礎系の波動の場は、基礎入力に対する自然地盤内の波動( $U^*$ )と基礎からの放射波( $U^r$ )の線形重ね合せたベクトル量であるから、有限要素化された対象領域の運動方程式は、絶対変位( $U$ )= $(U^*) + (U^r)$ として一般に $(-\omega^2[M] + [K] + [R])\{U\} = (-[D_{\ell\ell}] + [R])\{U_{\ell}^*\} - [D_{\ell b}]\{U_b^*\} + \{P\}$ (1)と表わされる。ただし、 $[M]$ 、 $[K]$ はそれぞれ質量、剛性マトリックス、 $[R]$ は応力伝達境界マトリックス、 $[D]$ は、自然地盤の2次元剛性マトリックスで、添字bは基礎面、 $\ell$ はそれより上の表層部の節点を指す。 $\{P\}$ は作用外力ベクトルである。

地盤-群杭基礎系を軸対称モデルとして、動的サブストラクチャ法から定式化する。その際、接触体モデル法を適用する<sup>3)</sup>。まず、自然地盤について、変位のフーリエ級数展開を行ない、アインパラメトリック要素から質量および剛性マトリックスを作成するが、応答性状からフーリエ級数展開の対称1次項のみを採る。従って、基礎面入力に対するフーリエ級数振幅についての動的平衡式が得られる。一方、群杭については、各杭を梁要素とし、その中心軸は地盤の応答に追従して動くものと仮定する。つまり、並進3成分に関してはフーリエ級数展開の対称1次項を、そして回転成分に関しては逆対称1次項を採る(杭はねじれを生じないものとする)。よって変位のフーリエ級数展開は次式で与えられる。

$$\{U \ V \ W \ \Phi \ \Psi\}^T = \text{diag.}[\cos\theta \ -\sin\theta \ \cos\theta \ \sin\theta \ \cos\theta] \{\bar{U}_s \ \bar{V}_s \ \bar{W}_s \ \bar{\Phi} \ \bar{\Psi}\}^T \quad (2)$$

このとき、単杭の剛性マトリックス $[K_p]$ はフーリエ級数振幅 $\{U\}$ に関して評価されることになるので、同径上の群杭については、それぞれの位置を考慮して

$$\sum_{i=1}^N [H(\theta_i)]^T [K_p] [H(\theta_i)] \{U\} = \sum_{i=1}^N [H(\theta_i)]^T \{P_{soil}\} \quad N: \text{同径上の杭総数} \quad (3)$$

と求まる。ただし、 $[H(\theta_i)]$ は式(2)から得られる変換マトリックス、 $\{P_{soil}\}$ は地盤反力を表わす。本研究では、地盤と杭の共有節点は並進3成分のみの境界条件を満たすものとしている。よって自然地盤に対する式(1)に杭との共有節点についての縮合操作を施し、当該節点における地盤インピーダンス $[K_s]$ および有効地震入力 $\{P_s\}$ を計算する。そして地盤と杭の間の平衡条件から同径上の群杭の式が得られる。

$$([K_s] + \sum_{i=1}^N [H(\theta_i)]^T [K_p] [H(\theta_i)]) \{U\} = \{P_s\} + \{P\} \quad (4)$$

これを杭頭に縮合し、杭頭インピーダンスおよび杭頭有効地震入力を評価する。xy座標への変換は、式(2)を介してなされる。さらに杭頂版(フーチング)を剛体とすると、その重心における運動自由度についての表現が得られる。

〔上下部構造系の連成〕 この現象は、上部構造系の慣性力と下部構造インピーダンスの間で生じる。本解析システムでは、前者に対して固有振動モード分解を仮定している。従って、連成系の応答は、これと基礎の運動自由度に応じた解徐モードの和として評価される。

## 3. 解析例

本研究では、図1の群杭基礎の解析に際して、図2の有限要素モデルとした。図3は上部構造物のモデルを示す。図4は上下部構造の連成系としての振動数応答で、同図には完全固定支持状態の時の応答および自然地盤の地表面応答も併せて描いてある。これらの比較から、連成系としての効果は1.5~2 Hzの振動数領域に顕著に現われている。地盤の1次振動の影響も1 Hz付近にかなりの程度出ている。今回は、上部構造物に一律の2%減衰を仮定したが、今後、地震観測結果との対比から、対象系のより適切な振動特性の評価・応答性状の把握をしていく。

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，1-265，昭5710月
2. Kausel, E., "Forced Vibrations of Circular Foundations on Layered Media", MIT Research Report 74-11, MIT, January 1974
3. 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法の適用-，土と基礎，29-9，pp. 27-34

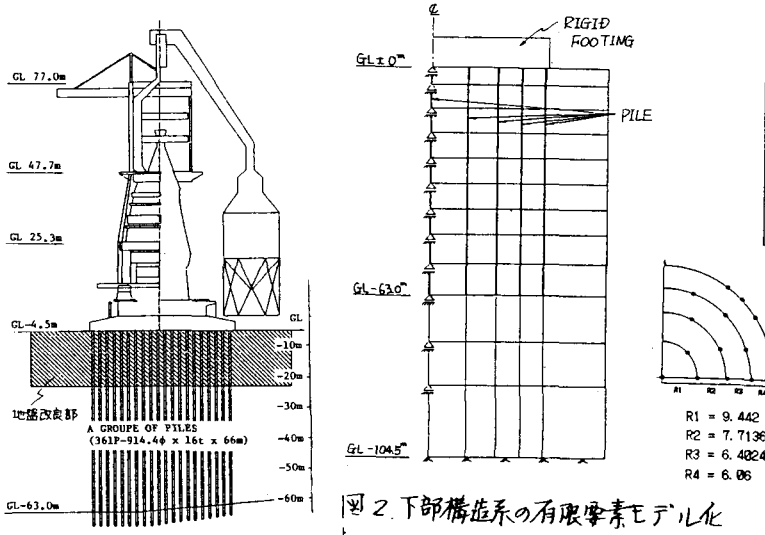


表1. 地盤物性定数

NO.	VELOCITY (m/sec) 速度層/地盤層	DAMPING 減衰率/地盤層	WEIGHT (t/m <sup>3</sup> ) 重量層/地盤層	POISSON RATIO ポアソン比	DEPTH (m) 深さ
1	135.0   200.0	0.20	1.75   2.00	0.400	4.500
2	185.0   200.0	0.20	1.75   2.00	0.400	6.000
3	185.0   200.0	0.20	1.75   2.00	0.400	6.500
4	120.0	0.20	1.520	0.400	6.500
5	120.0	0.20	1.520	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	1.640	0.400	7.500
9	175.0	0.10	1.640	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

表2. 杭の諸元

NO.	VELOCITY (t/m)	DAMPING	SHEARING MODULUS (t/m <sup>2</sup> )	AREA (m <sup>2</sup> )	MOMENT OF INERTIA (m <sup>4</sup> )	POISSON RATIO
1	0.326	0.03	8.1x10 <sup>4</sup>	0.023	0.234x10 <sup>-7</sup>	0.30
2	0.326	0.03	8.1x10 <sup>4</sup>	0.023	0.234x10 <sup>-7</sup>	0.30

図2. 下部構造系の有限要素モデル化

図1. 解析対象構造物

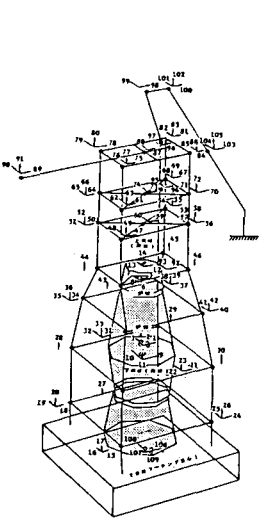
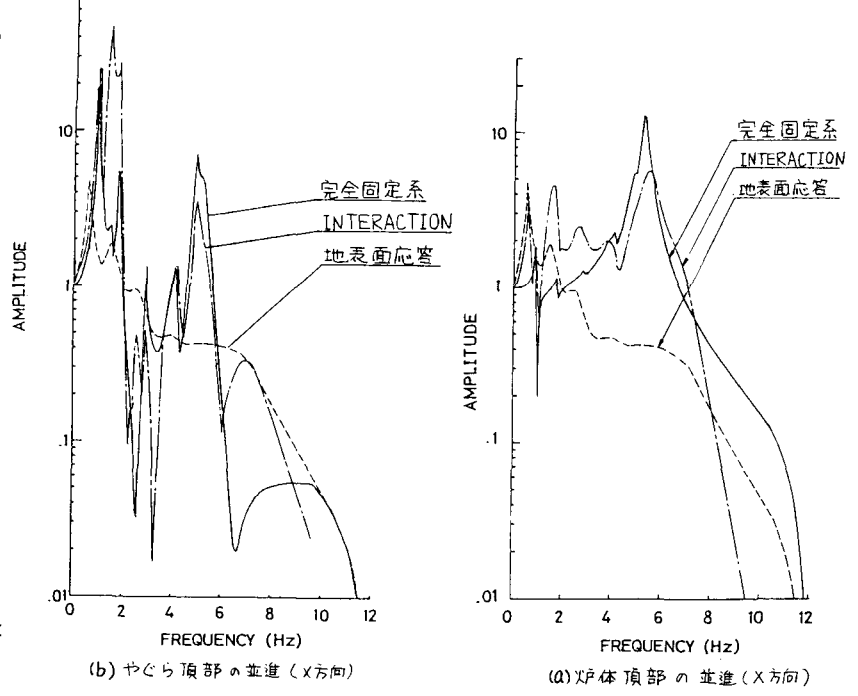


図3. 上部構造物のモデル化



(b) やぐら頂部の並進 (X方向)

(a) 炉体頂部の並進 (X方向)

図4. 振動数応答