

大成建設 正員 立石 章 吉田 健治
同上 正員 佐藤 誠一

1. はじめに

地中構造物の断面方向の耐震計算法として、震度法とともに応答変位法が広く用いられている。応答変位法は地震時の応答が主に周辺地盤の変形に支配される構造物に適した手法で、従来管路等の地中線状構造物の軸方向の耐震計算に用いられてきた。断面方向の耐震計算に対しても、土木学会原子力土木委員会による研究¹⁾によって小断面のダクトから比較のマッシブなピットまで幅広くその適用性が示されている。応答変位法は、簡便で部材厚等の設計的なパラメータスタディに適した手法であるが、地盤バネの設定法や地震荷重の与え方に不明確な点もある。そこでこれらの問題点解決の一助として、土木学会原子力土木委員会による研究¹⁾を参考に、動的サブストラクチャー法の運動方程式より静的なサブストラクチャー法を導き、応答変位法との比較を行った。さらにRC地中ダクトを対象として、各種耐震計算法を比較した。

2. 静的サブストラクチャー法

地盤-構造物全体系(図-1a)の運動方程式に動的縮合の操作を施すと、地盤-構造物全体系と等価な動的サブストラクチャー法の運動方程式(1)式が得られる²⁾。

$$\left(-\omega^2 \begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{si}] \\ [M_{is}] & [M_{ii}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{ss}] & [K_{si}] \\ [K_{is}] & [K_{ii}] + [K_i^E] \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \{u_s\} \\ \{u_i\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [K_i^E] \cdot \{u_i^E\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 $[M]$, $[K]$; 構造物の質量マトリックス, 複素剛性マトリックス, $[K_i^E]$, $\{u_i^E\}$; 構造物のない掘削地盤で求められた地盤インピーダンス, 地盤変位, 添字 S; 地盤と接触していない構造物の内点, 添字 I; 地盤と構造物の接触点。(図-1b)

掘削されていない自然地盤で求められた地盤変位を用いて動的サブストラクチャー法を行うときは、地盤変位と同時に、自然地盤における地盤-構造物接触面位置での動的な地盤応力に等しい力を解放力として構造物に作用させなければならない。これより自然地盤の応答を用いるときの運動方程式は(2)式となる。

$$\left(-\omega^2 \begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{si}] \\ [M_{is}] & [M_{ii}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{ss}] & [K_{si}] \\ [K_{is}] & [K_{ii}] + [K_i^E] \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \{u_s\} \\ \{u_i\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [K_i^E] \cdot \{u_i^N\} + \{p_i^N\} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここに、 $\{u_i^N\}$, $\{p_i^N\}$; 自然地盤で求められた地盤変位, 地盤-構造物接触面位置での解放力。(図-1c)

地中構造物を対象とした地震観測や室内試験の結果より、地震時に地中構造物自身が周辺地盤を押しつけて独自の振動を励起されるようなことは起こりにくいと指摘されている。そこで、

仮定 1 地中構造物自身および地盤との相互作用による減衰効果は小さいものとして無視

仮定 2 地中構造物に生ずる加速度は自然地盤と同じ

の2つの仮定をおくと、地中構造物に対する運動方程式は時間領域では(3)式のように表される。

$$\begin{bmatrix} [\bar{K}_{ss}] & [\bar{K}_{si}] \\ [\bar{K}_{is}] & [\bar{K}_{ii}] + [\bar{K}_i^E] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{r_s\} \\ \{r_i\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [\bar{K}_i^E] \cdot \{r_i^N\} + \{q_i^N\} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{si}] \\ [M_{is}] & [M_{ii}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{r}_s^N\} \\ \{\ddot{r}_i^N\} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここに、 $[\bar{K}]$, $[\bar{K}_i^E]$; 構造物の静的剛性, 静的地盤インピーダンス, $\{r_i^N\}$, $\{\ddot{r}_i^N\}$, $\{q_i^N\}$; 時間領域における自然地盤で求められた地盤変位, 加速度, 地盤-構造物接触面位置での解放力。

(3)式は自然地盤の応答のみを用いた静的解析を表し、ここでは(3)式による地中構造物の耐震計算法を静的サブストラクチャー法と呼ぶ。静的サブストラクチャー法による耐震計算の手順を表-1に示す。同表には、土木学会による応答変位法も合わせて示した。表-1より両手法を比較すると、地盤剛性の与え方、地盤応力の作用方法に違いはあるものの両手法は酷似しており、応答変位法はサブストラクチャー法の一

つとして位置づけられるものと考えられる。

3. 耐震計算法の比較

地中構造物の耐震計算法として、2次元動的FEM（「FLUSH」）、2次元静的FEM³⁾、静的サブストラクチャー法、土木学会による応答変位法¹⁾の4手法について、耐震計算結果を比較する。

- 対象構造物 2連のRC地中ダクト 非岩着タイプおよび岩着タイプ（図-2）
- 入力地震動 エルセントロ NS 最大加速度を300galに基準化してGL-30°に入射

解析結果として曲げモーメント分布を図-3に示す。ここに計算手法の比較のため、2次元動的FEMによる最大曲げモーメント発生時刻の自然地盤の応答を用いて、残る3手法の静的解析を行った。図より

- (1) 非岩着タイプ、岩着タイプとも、2次元動的FEM、2次元静的FEM、静的サブストラクチャー法の3手法による計算結果はほぼ一致している。
- (2) 応答変位法による計算結果は他の3手法に比べ少し小さいが、これは主に静的サブストラクチャー法と応答変位法の地盤せん断応力の作用方法の違いによるものと考えられる。

4. まとめ

動的サブストラクチャー法より地中構造物の応答特性を考慮した静的サブストラクチャー法を導き土木学会による応答変位法と比較したところ、両手法はほぼ等価な手法であり、応答変位法が地中構造物に対するサブストラクチャー法の一つとして位置づけられた。今後は、静的サブストラクチャー法と応答変位法の比較を通して、設計的な観点より地盤バネの設定法、地震荷重の与え方について検討していきたい。

参考文献 1) 土木学会；原力発電所地質・地盤の調査・試験法および地盤の耐震安定性の評価手法，S60.8

2) Wolf, J. P.; Dynamic Soil-Structure Interaction, Prentice-Hall, 1985

3) 片山 他；地下埋設構造物の実用的な準動的解析手法「応答震度法」の提案，土木学会第40回年報，S60.9

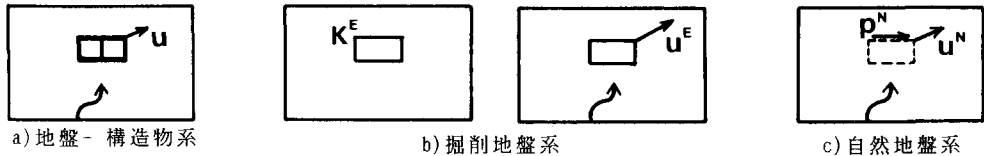


図-1 動的サブストラクチャー法による解析モデル

表-1 静的サブストラクチャー法と応答変位法

	静的サブストラクチャー法	応答変位法
ステップ1	自然地盤の動的解析より接触面での変位，応力，加速度を算定	自然地盤（1次元）の動的解析より相対変位，せん断応力，地中震度を算定
ステップ2	掘削地盤の静的FEMモデルに静的縮合を施し地盤インピーダンスを算定	掘削地盤の静的FEMモデルにより地盤バネを算定
ステップ3	構造物に地盤インピーダンスを介して地盤変位を作用	構造物に地盤バネを介して相対変位を作用
	構造物の全接地面に地盤応力を作用	構造物の上面に地盤のせん断応力，下面に水平反力を作用
	構造物に地盤加速度による躯体慣性力を作用	構造物に地中震度による躯体慣性力を作用

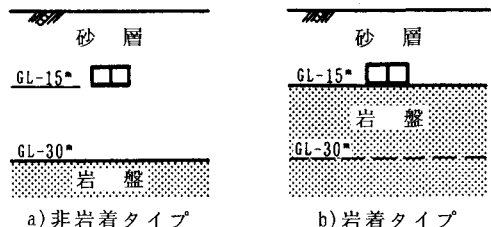


図-2 RC地中ダクトの検討モデル

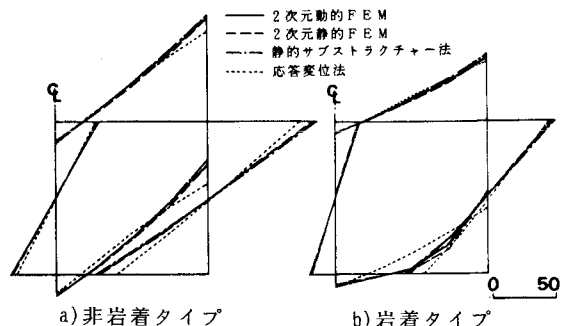


図-3 RC地中ダクトの曲げモーメント分布