

I-646 サブストラクチャー法に基づく静的FEMによる地下構造物の耐震計算法

大成建設(株) 正会員 立石 章 坂下克之

1. はじめに

多くの地震観測や模型振動実験による研究から、地下構造物は地震時にそれ自身固有の振動を起こすことはなく周辺地盤に追従して振動することが明らかにされており、これらの知見を基に地下構造物の静的な耐震計算法が提案されている。地下構造物の静的耐震計算法としては、構造物周辺地盤をばねで表す地盤ばね型とFEMで表す地盤FEM型に大別され、地盤ばね型としては応答変位法が、地盤FEM型としては片山による応答震度法<sup>1)</sup>や浜田らによる応答変位法<sup>2)</sup>がある。一方、構造物と地盤の動的相互作用問題を有限領域をモデル化して解析する場合に動的サブストラクチャー法は有効な解析手法であり、地盤ばね型の応答変位法については著者の一人が動的サブストラクチャー法に基づいて問題点の提起とその改良を提案した<sup>3)</sup>。ここでは、地盤FEM型の静的耐震計算法について、地下構造物を対象とした静的なサブストラクチャー法の定式化を試み、その妥当性を検証したので報告する。

2. 地盤FEM型の静的サブストラクチャー法

図1のような構造物-近傍地盤系をサブストラクチャーと考えた場合、遠方地盤との間の動的相互作用問題に対する動的サブストラクチャー法の運動方程式は、振動数領域では(1)式のように表される<sup>4)</sup>。

$$\begin{bmatrix} [S_{SS}] & [S_{SC}] \\ [S_{CS}] & [S_{CC}] & [S_{CR}] \\ & [S_{BC}] & [S_{BB}] + [S_B^E] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_S\} \\ \{u_C\} \\ \{u_B\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{0\} \\ [S_B^E] \{u_B^F\} + \{p_B^F\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$[S] = -\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K] \quad (2)$$

ここに、[S] は動的剛性行列、[M]、[C]、[K] は質量、減衰、剛性の各行列、 $\omega$  は円振動数、 $[S_B^E]$  はサブストラクチャーを取り除いた遠方地盤の地盤インピーダンス、 $\{u_B^F\}$  と  $\{p_B^F\}$  はサブストラクチャーの存在を考えない自然地盤において境界位置で生じている変位と応力に等しい節点力、をそれぞれ表す。(添字は図1参照)

次に、地下構造物を対象とした静的耐震計算法に変換するため、以下の仮定をおく。

仮定1：遠方地盤との境界は構造物の影響が十分小さくなる位置に設定

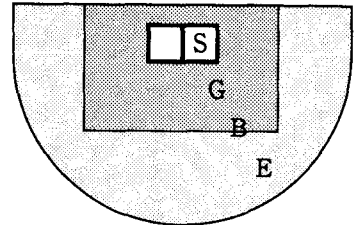
仮定2：減衰による復元力は無視

仮定3：構造物および近傍地盤の加速度は自然地盤における同じ位置での加速度と同じ

仮定1は、境界処理を簡単にするための仮定であり、これにより境界での変位  $\{u_B\}$  は自然地盤における境界での変位  $\{u_B^F\}$  にほぼ等しくなり、(1)式において地盤インピーダンス  $[S_B^E]$  は不要となる。仮定2は、地下構造物の地震時最大応力を求めることを前提とした場合、最大応力が発生すると予想されるせん断一次モードの生じる時刻では速度は小さく、さらに減衰が一般に小さいことから妥当と考えられる。また、仮定3もはじめに述べた地下構造物の地震時振動特性より妥当と考えられる。

以上より、(1)式を時間領域の運動方程式に変換し、上述の三つの仮定を適用すると(3)式が求められる。

$$\begin{bmatrix} [K_{SS}] & [K_{SC}] \\ [K_{CS}] & [K_{CC}] & [K_{CB}] \\ & [K_{BC}] & [K_{BB}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{r_S\} \\ \{r_C\} \\ \{r_B\} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} [M_{SS}] & [M_{SC}] \\ [M_{CS}] & [M_{CC}] & [M_{CB}] \\ & [M_{BC}] & [M_{BB}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{r}_B^F\} \\ \{\dot{r}_C^F\} \\ \{\dot{r}_B^F\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{0\} \\ \{R_B^F\} \end{Bmatrix} \quad (3)$$



S：構造物  
G：近傍地盤  
E：遠方地盤  
B：近傍地盤と遠方地盤の境界

図1 地下構造物-地盤系の概念図

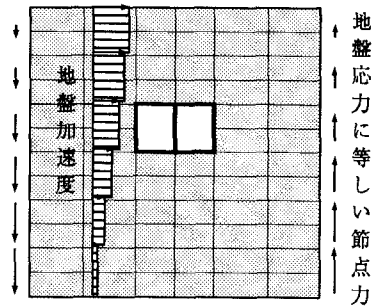


図2 地盤応答法の地震力

ここに、 $\{r\}$ 、 $\{R\}$  は時間領域における変位、節点力。

(3)式は地盤 FEM型の地下構造物の静的耐震計算法を表しており、地震力としては、図2に示したように、自然地盤で求められた地盤加速度による慣性力を近傍地盤および構造物に作用させると同時に、近傍地盤の外周境界に自然地盤で求められた地盤応力に等しい節点力を作用させることとなる。ここでは、この静的サブストラクチャー法による耐震計算法を簡単のため「地盤応答法」と呼ぶことにする。

地盤応答法は、応答震度法とは結果的に似通った計算法となっていて、地震力として自然地盤の加速度による慣性力を作用させる点では同じであるが、応答震度法では近傍地盤の側方境界をせん断波を対象とする場合水平ローラとしている点に違いがある。地盤 FEM型の応答変位法とは、地下構造物-近傍地盤系の地震時変形を応答変位法では慣性力ではなく近傍地盤外周の地震時変形により規定している点に大きな違いがある。地盤応答法の特徴は慣性力とほぼこれに釣り合う応力を近傍地盤外周に作用させて地震時変形を与えるところにあり、地盤応答法は、地表までのモデル化が困難な大深度地下構造物や、斜め入射実体波や表面波などの様々な地震動に対する地下構造物の静的耐震計算に対しても適用できるものと考えられる。

### 3. 数値解析による検証

地盤応答法の妥当性を二次元動的 FEMとの比較解析を行い検証する。検証用モデルは、図3に示したように、砂層に埋設された RCダクトとし、非岩着タイプと岩着タイプの二種類とする。入力地震動は El Centro NS波を最大加速度300Galに基準化して GL-30m にせん断波として鉛直に入射する。解析手順としては、まず等価線形化法による重複反射解析を行い自然地盤の加速度および応力を求めるとともに地盤の地震時等価剛性を求める。次に重複反射解析結果を用いて二次元動的 FEM、地盤応答法を実施する。

解析結果としてダクトの地震時増分曲げモーメントを図4に示す。解析結果は二次元動的 FEMにおいてダクトに最大曲げモーメントが発生した時刻で比較することとし、地盤応答法の地震力はすべてその時刻での自然地盤の応答を用いた。図4より、非岩着タイプ、岩着タイプとも両計算法による結果はほぼ一致しており、地盤応答法の妥当性が検証された。

### 4. まとめ

動的サブストラクチャー法の運動方程式より、地下構造物の地震時振動特性に基づいて地盤 FEM型の地下構造物の静的耐震計算法である地盤応答法を導き、埋設 RCダクトを対象として二次元動的 FEMとの比較解析を行ってその妥当性を検証した。今後は、地盤応答法の特徴を生かせる種々の問題に対し適用性および有用性を調べていきたい。

#### 参考文献

- 1) Katayama : Studies on fundamental problems in seismic design analysis of critical structures and facilities, 京都大学博士論文, 1990.
- 2) 浜田, 泉, 岩野, 志波 : 岩盤空洞の地震時ひずみの解析と耐震設計, 土木学会論文集, No. 341, pp. 197-205, 1984.
- 3) 立石 : 応答変位法における地震荷重の作用方法に関する研究, 土木学会論文集, No. 441, pp. 157-166, 1992.
- 4) 土木学会 : 動的解析と耐震設計 第2巻動的解析の方法, 技報堂出版, 1989.

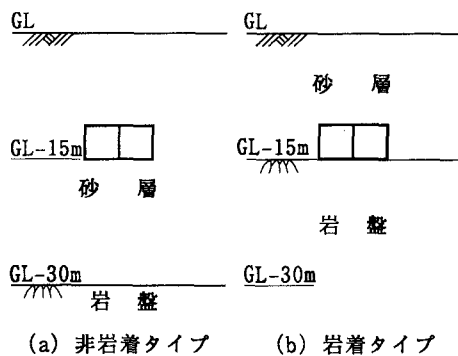


図3 検証用モデル

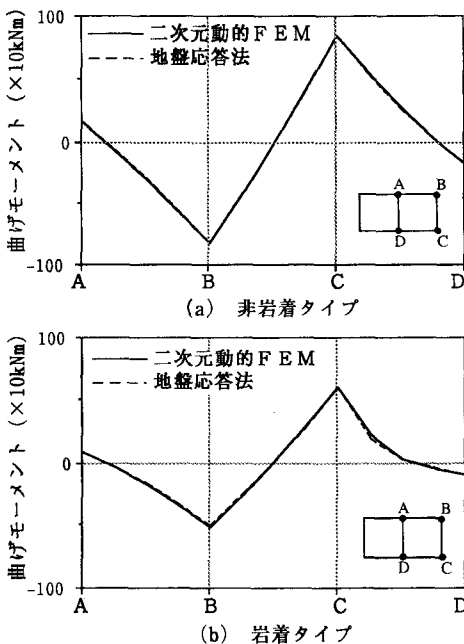


図4 地震時増分曲げモーメントの比較