

## (122) 静的FEMによる地下構造物の耐震計算法に関する一考察

大成建設(株) 立石 章  
大成建設(株) 坂下克之

### 1. はじめに

地中埋設管、沈埋トンネル等の地震観測や模型振動実験による多くの研究結果から、地下構造物は地震時にそれ自身の固有の振動を起こすことなく周辺地盤に追従して振動し、地下構造物の変形は周辺地盤の相対変位すなわちひずみによって支配されることが明らかにされている。これらの知見を基に応答変位法が提案され、地下構造物を対象とした実用的な耐震計算法として設計実務に広く用いられている。

応答変位法については、地盤のモデル化の方法によって二種類に分類される。

一つは地盤をばねで表す方法で、地中埋設管等の地中線状構造物縦断面方向の耐震計算に一般的に用いられ、横断面方向の耐震計算にも原子力土木構造物やシールドトンネルに用いられており、モデル化の労力が少なく済む上に構造物の応力を簡便な計算式で表せるという利点があり、広く採用されている。

もう一つは地盤をFEM要素で表す方法で、浜田らにより地下空洞横断面の耐震計算法として提案されている<sup>1), 2)</sup>。これは、地下空洞の耐震安定性を調べるには支保工だけでなく空洞周辺岩盤の地震時応力を広範囲に評価する必要があることから、地盤をモデル化したものである。ここでは地盤FEM型の応答変位法をFEM応答変位法と呼ぶことにする。FEM応答変位法における地震力の作用方法を図1に示す。FEM応答変位法では、構造物の存在を考えない自然地盤において求められた地震時変位を構造物を囲む地盤FEMの外周境界に静的に作用させる。

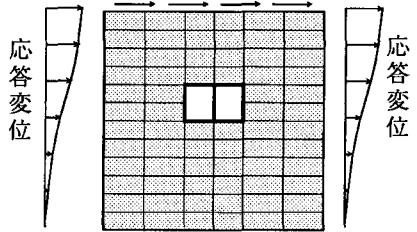


図1 FEM応答変位法の地震力

この他に、地下構造物の耐震計算法として片山によって提案された応答震度法がある<sup>3)</sup>。これは、基本的には先に述べた地下構造物の地震時動特性に基づいており、自然地盤において求められた応答加速度を用いて地盤および構造物に慣性力を静的に作用させて地下構造物の地震時増分断面力を求める方法で、地盤をFEM要素で表すタイプの耐震計算法である。図2に応答震度法における地震力の作用方法を示す。

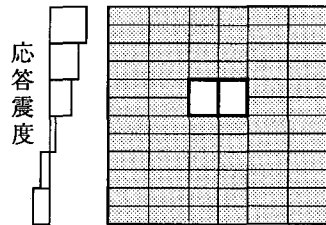


図2 応答震度法の地震力

以上のように地下構造物に対しては各種の静的耐震計算法が動的FEMに代わるものとして提案されているが、地盤ばね型の応答変位法については問題点の提起とその改良についてすでに研究されている<sup>4), 5)</sup>。そこで、本論文では、地盤FEM型の静的耐震計算法である応答震度法およびFEM応答変位法について動的解析と比較検討して問題点を抽出し、その改良を試みるものである。

### 2. 数値解析による比較検討

地中ダクトを対象として、応答震度法およびFEM応答変位法を動的解析と比較検討する。

#### (1) 解析条件

解析対象構造物は砂層中に埋設された二連のRCダクトである。地盤は砂層と岩盤の二層構成とし、ダクトは非岩着ダクト(砂層厚30m)と岩着ダクト(砂層厚15m)の二種類とする。ダクトの構造図を図3に、地盤とダクトのモデル図を図4に、それぞれ示す。入力地震動は、EL Centro NS波を

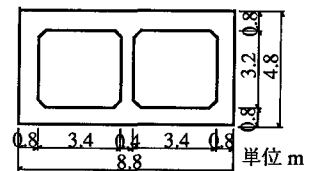


図3 ダクトの構造図

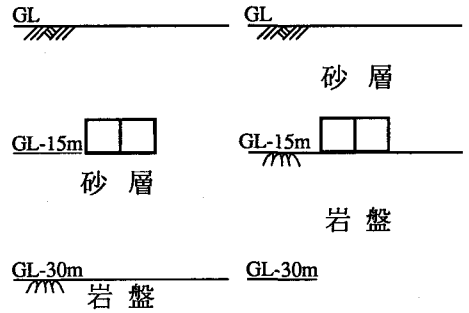
最大加速度300Galに基準化してGL-30mにせん断波として鉛直に入射した。

解析方法としては、まず等価線形化法を用いた地盤の重複反射解析を行い、自然地盤における応答変位および応答加速度を求めるとともに、地震時の地盤の等価剛性および等価減衰を求めた。二次元動的FEMは、図5に示した解析モデルを用いて複素応答解析コード(FLUSH)により地盤の等価剛性および等価減衰を用いて線形解析した。応答震度法およびFEM応答変位法は、二次元動的FEMと同じ解析領域を有するFEMモデルにより地盤の等価剛性を用いて解析した。

解析結果の比較は、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する時刻で比較することとし、応答震度法およびFEM応答変位法の地震力はすべてその時刻での応答結果を用いた。

(2) 解析結果

解析結果として、ダクトに生じた地震時増分断面力である曲げモーメントおよび軸力を図6に示す。ここに、各図とも横軸はダクト頂版、側壁、底版を展開して示したものである。同図より、応答震度法は、岩着ダクト、非岩着ダクトのいずれのケースも曲げモーメント、軸力とも二次元動的FEM



(a) 非岩着ダクト (b) 岩着ダクト  
図4 地盤とダクトのモデル図

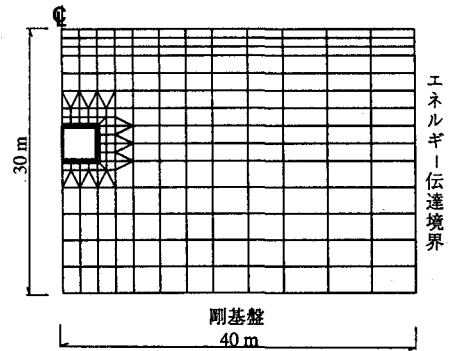
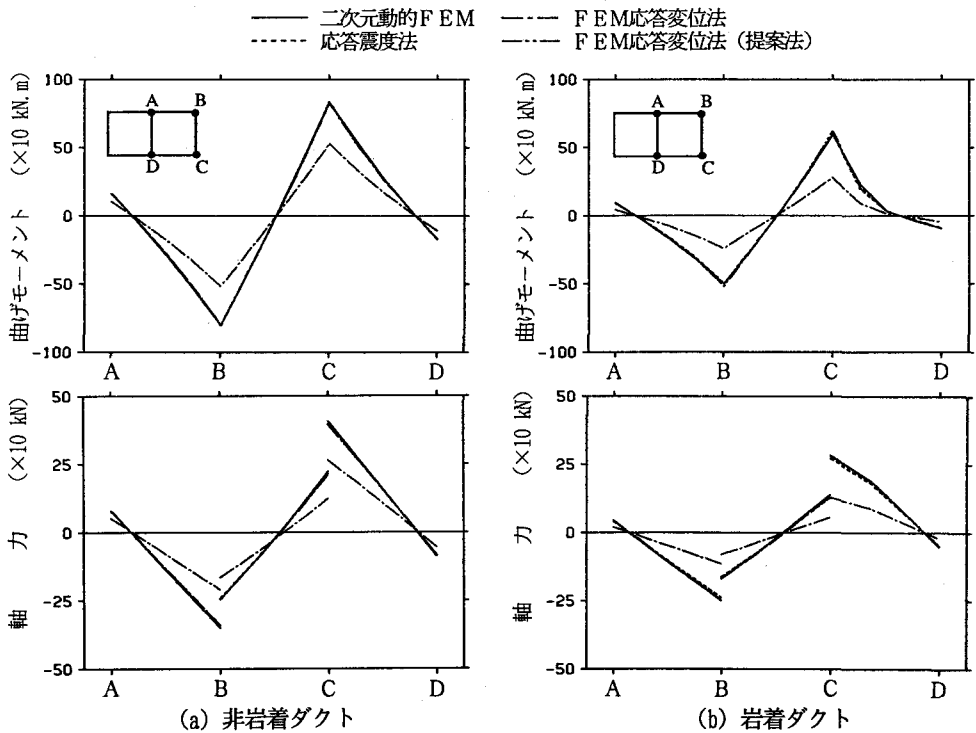


図5 二次元動的FEMの解析モデル



(a) 非岩着ダクト (b) 岩着ダクト  
図6 静的耐震計算法によるダクトの地震時増分断面力の比較

と良く一致しているのに対し、FEM応答変位法はいずれのケースも地震時増分断面力は二次元動的FEMの1/2程度にしかならず危険側の結果となっていることがわかる。

FEM応答変位法が二次元動的FEMに一致しない原因を調べるため、自然地盤を対象として応答震度法およびFEM応答変位法を行った。解析結果として、解析モデル中心軸における地盤のせん断ひずみの分布を重複反射解析結果と比較して図7に示す。同図より、応答震度法によるせん断ひずみ分布は重複反射解析にほぼ一致しているのに対し、FEM応答変位法によるせん断ひずみ分布は分布形状が重複反射解析と大きく異なっており、前章で示した外周境界から応答変位を作用させるという地震力の作用方法では意図した地盤のひずみが再現しえないことがわかる。また、応答変位を作用させる境界位置の取り方によっても構造物の変形および応力が違ってくることが予想される。

以上より、応答震度法は耐震計算法としての有効性が認められるのに対し、FEM応答変位法は地震力の作用方法に問題があることが明らかとなった。

### 3. FEM応答変位法の改良

浜田らは、地下空洞の地震時の変形挙動は周辺岩盤の地震時ひずみに支配されることを地震観測結果から明らかにした上で、地震時ひずみに等価な変位をモデル外周境界から強制変位として作用させることを耐震計算法として提案した。しかし、この方法では意図したひずみが地盤内に再現されないという問題がある。そこで、地盤の地震時ひずみを再現するような等価節点力を求めることを考えてみる。すなわち、(1)式により自然地盤で求められた地震時ひずみ  $\epsilon^F$  から地震時応力  $\sigma^F$  を求め、(2)式によりその地震時応力  $\sigma^F$  から等価節点力  $q^F$  を求める。

$$\sigma^F = D_e \epsilon^F \quad (1) \quad q^F = \sum_{\Omega} \int_{\Omega} B_e^T \sigma^F dv \quad (2)$$

ここに、Dは応力-ひずみ関係を表す行列、Bはひずみ-変位関係を表す行列で、添字Fは自然地盤で求められたことを、添字eは要素単位であることを表す。

一方、地震時ひずみ  $\epsilon^F$  と等価な地震時変位  $r^F$  の関係は(3)式で表されるため、等価節点力  $q^F$  は(4)式および(5)式のように表される。

$$\epsilon_e^F = B_e r^F \quad (3) \quad q^F = K r^F \quad (4) \quad K = \sum_{\Omega} \int_{\Omega} B_e^T D_e B_e dv \quad (5)$$

ここに、Kは剛性行列を表す。

結局、地盤の地震時ひずみを再現する等価節点力は、地盤の地震時変位と地盤の剛性行列を掛け合わせたものに他ならない。この新しい地震力による静的耐震計算法をFEM応答変位法（提案法）と呼ぶ。

次に、FEM応答変位法（提案法）の地震力と応答震度法との地震力を比較する。

まず、絶対変位系における自然地盤の運動方程式を(6)式に示す。

$$\begin{bmatrix} M_{EE} & M_{EI} & M_{EG} \\ M_{IE} & M_{II}^E + M_{II}^G & M_{IG} \\ & M_{GI} & M_{GG} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{r}_E^F \\ \ddot{r}_I^F \\ \ddot{r}_G^F \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{EE} & C_{EI} & C_{EG} \\ C_{IE} & C_{II}^E + C_{II}^G & C_{IG} \\ & C_{GI} & C_{GG} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{r}_E^F \\ \dot{r}_I^F \\ \dot{r}_G^F \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{EE} & K_{EI} & K_{EG} \\ K_{IE} & K_{II}^E + K_{II}^G & K_{IG} \\ & K_{GI} & K_{GG} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} r_E^F \\ r_I^F \\ r_G^F \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

ここに、M、C、Kは質量、減衰、剛性の各行列を表し、添字Gは構造物設置部分を除く周辺地盤、添字

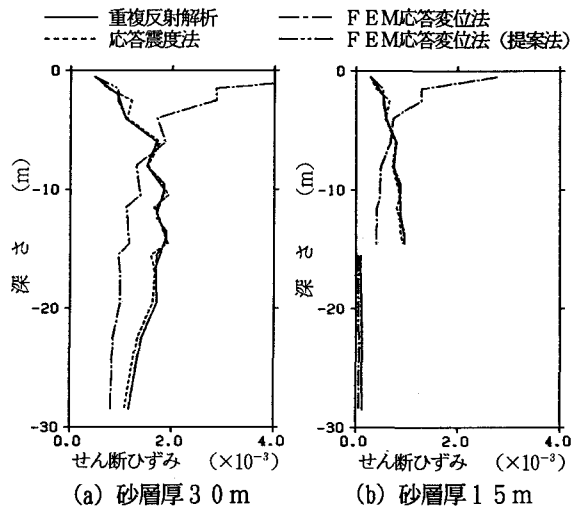


図7 静的耐震計算法による自然地盤の地震時せん断ひずみの比較

Iは構造物と地盤の接触面、添字Eは構造物設置部分の地盤、をそれぞれ表す。

ある時刻での力の釣り合いを考えると、地下構造物の地震時応力が最も厳しくなると想定されるせん断一次モードの生じる時刻では速度が小さく、また一般に減衰が小さいことから、減衰力を無視できるとすると(6)式は(7)式となる。

$$\begin{bmatrix} K_{EE} & K_{EI} & & \\ K_{IE} & K_{II}^E + K_{II}^G & K_{IG} & \\ & K_{GI} & K_{GG} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_E^F \\ r_I^F \\ r_G^F \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} M_{EE} & M_{EI} & & \\ M_{IE} & M_{II}^E + M_{II}^G & M_{IG} & \\ & M_{GI} & M_{GG} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{r}_E^F \\ \ddot{r}_I^F \\ \ddot{r}_G^F \end{bmatrix} \quad (7)$$

一方、地下構造物を対象とした地盤FEM型の静的耐震計算法の釣り合い式は(8)式で表される。

$$\begin{bmatrix} K_{SS} & K_{SI} & & \\ K_{IS} & K_{II}^S + K_{II}^G & K_{IG} & \\ & K_{GI} & K_{GG} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_S \\ r_I \\ r_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_S \\ q_I \\ q_G \end{bmatrix} \quad (8)$$

ここに、添字Sは構造物を表す。

FEM応答変位法(提案法)の地震力および応答震度法の地震力をそれぞれ(9)式、(10)式に示す。

$$\begin{bmatrix} q_S \\ q_I \\ q_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & & \\ K_{IE} & K_{II}^E + K_{II}^G & K_{IG} & \\ & K_{GI} & K_{GG} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_E^F \\ r_I^F \\ r_G^F \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} q_S \\ q_I \\ q_G \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} M_{SS} & M_{SI} & & \\ M_{IS} & M_{II}^S + M_{II}^G & M_{IG} & \\ & M_{GI} & M_{GG} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{r}_E^F \\ \ddot{r}_I^F \\ \ddot{r}_G^F \end{bmatrix} \quad (10)$$

FEM応答変位法(提案法)では自然地盤における地震時変位と地盤剛性を掛け合わせたものを地震力として周辺地盤および構造物と地盤の接触面に作用させ、応答震度法では自然地盤における応答加速度に基づいて構造物および周辺地盤に慣性力を作用させることとなる。

さて、(9)式と(10)式を比べると、応答震度法において構造物に地震力(慣性力)を作用させている点を除けば、FEM応答変位法(提案法)と応答震度法の地震力は等しいことが(7)式よりわかる。実際には土被りがあるような地下構造物の場合構造物の慣性力が地震時挙動に及ぼす影響が小さいことから、両耐震計算法の地震力はほぼ等価であり、地下構造物の最大地震時応力を求めることを目的とする限り両耐震計算法は実質的に等価な手法と言える。

最後に、FEM応答変位法(提案法)を検証するため、前章と同じ解析条件の基で数値解析を行った。自然地盤の解析結果として解析モデル中心軸における地盤のせん断ひずみ分布を図7に、地中ダクトの解析結果として地震時増分断面力を図6に示す。これらの図より、自然地盤のひずみは重複反射解析結果と完全に一致し、ダクトの地震時増分断面力も二次元動的FEMおよび応答震度法の結果と非常に良い一致が見られ、本論文で提案したFEM応答変位法(提案法)の妥当性が検証された。

#### 4. まとめ

地下構造物の静的耐震計算法のうち地盤をFEM要素で表した応答震度法およびFEM応答変位法を取り上げ数値解析を実施し比較検討したところ、FEM応答変位法の地震力の作用方法に問題があることがわかった。そこで地震時ひずみを再現するような等価節点力による新しいFEM応答変位法を提案し、新しい地震力が応答震度法による地震力とほぼ等価であることを示すとともに、数値解析によりその妥当性を検証した。

#### 参考文献

- 1) 浜田政則, 杉原豊, 志波由紀夫, 岩野政浩: 岩盤空洞の地震時挙動観測と考察, 土木学会論文報告集, 第341号, pp. 187~196, 1984年.
- 2) 浜田政則, 泉博充, 岩野政浩, 志波由紀夫: 岩盤空洞の地震時ひずみの解析と耐震設計, 土木学会論文報告集, 第341号, pp. 197~205, 1984年.
- 3) Katayama, I.: Studies on Fundamental Problems in Seismic Design Analyses of Critical Structures and Facilities, 京都大学博士論文, 1990年.
- 4) 立石章: 応答変位法における地震荷重の作用方法に関する研究, 土木学会論文報告集(投稿中).
- 5) 志波由紀夫: 線状地中構造物の耐震計算法としての応答変位法における問題点と改良案, 第21回地震工学研究発表会講演概要, 1991年.