

静的 FEM を用いた地中構造物横断面方向の耐震計算法における地震荷重の作用方法の研究

立石 章

正会員 工修 大成建設(株) 土木設計計画部 (〒163-06 新宿区西新宿 1-25-1 新宿センタービル)

地中構造物の地震時振動特性に基づき、動的サブストラクチャー法の運動方程式より周辺地盤を FEM で表した静的耐震計算法(地盤応答法)を導いた。地盤応答法と既往の静的耐震計算法を比較したところ、応答震度法は主に自然地盤の加速度による慣性力を作用させるという点で地盤応答法と似通った計算法であるが、地盤 FEM 型の応答変位法は自然地盤の地震時変位を近傍地盤外周に作用させるという点で地盤応答法とは異なる計算法であることが判明した。

Key Words : *underground structure, seismic design, substructure method, static finite element method, seismic load*

1. はじめに

地中構造物の地震時振動特性は、数多くの地震観測や模型振動実験などの実証的な研究により明らかにされてきた。これらの研究成果によると、地中構造物の地震時振動特性として、次のことがあげられる。

- a) 地中構造物は地震時に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。
- b) 地中構造物の変形は周辺地盤の相対変位またはひずみにより支配される。

これらの知見をもとに、地中構造物の静的耐震計算法がいくつか提案されてきたが、周辺地盤のモデル化の方法によって次の二種類に大別される。一つは周辺地盤をばねで表す地盤ばね型で、代表的な計算法として応答変位法がある。応答変位法は、新耐震設計法(案)¹⁾により主に埋設管などの地中線状構造物軸方向の耐震計算に取り入れられ、その後改良されて原子力土木構造物横断面方向の耐震計算²⁾にもその適用性が示されている。地盤ばね型の計算法の特徴としては、モデル化の労力が少なくすむうえに、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、地中構造物の耐震計算法として広く採用されている。もう一つは、周辺地盤を FEM 要素で表す地盤 FEM 型で、代表的な計算法として浜田らにより地下空洞横断面方向の耐震計算法として提案されている応答変位法^{3),4)}、片山によって提案された応答震度法^{5),6)}(GRAMBS: Ground Response Acceleration Method for Buried Structures)がある。本論文では、地盤 FEM 型の応答変位法を地盤ばね型の応答変位法

と区別して FEM 応答変位法(FEM Seismic Deformation Method)と呼ぶ。地盤 FEM 型の計算法の特徴としては、地盤ばねを求める必要がないこと、地中構造物だけでなく周辺地盤の地震時安定性が FEM 要素の応力から照査できること、があげられる。

一般に構造物または構造物-周辺地盤といった有限領域をモデル化して動的相互作用問題を解析するうえで有効な手法として動的サブストラクチャー法⁷⁾がある。地盤ばね型の耐震計算法については、著者が動的サブストラクチャー法に基づいて応答変位法の地震荷重の作用方法を調べたところ、応答変位だけでなく周辺地盤からの地震時応力も同時に作用させる必要のあることが明らかとなり、その改良を提案した⁸⁾。

一方、地盤 FEM 型の耐震計算法については、日比野らが大規模地下空洞を対象として動的解析、FEM 応答変位法、応答震度法により比較解析したところ、動的解析と応答震度法とは覆工コンクリートの最大せん断応力がよく一致したが、FEM 応答変位法は異なる結果となった⁹⁾。FEM 応答変位法と応答震度法では地震荷重が前者が地盤の変位、後者が地盤の慣性力と大きく異なり、日比野らの解析結果と合わせて地盤 FEM 型の地震荷重の作用方法には未解明な点がある。そこで、本論文では、地盤 FEM 型の地中構造物横断面方向の耐震計算法について、動的サブストラクチャー法に基づいて地震荷重の作用方法の理論的な解明を試みる。

本論文の構成は、まず既往の地盤 FEM 型の静的耐震計算法の概要を紹介し、地中ダクト横断面方向を対象として比較解析を実施して問題点を抽出する。次に動的

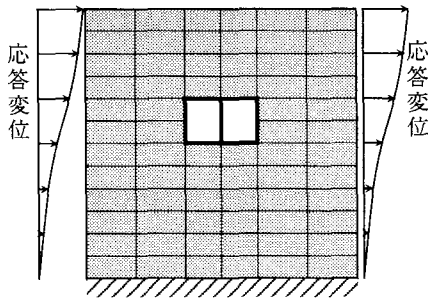


図-1 FEM 応答変位法における地震荷重

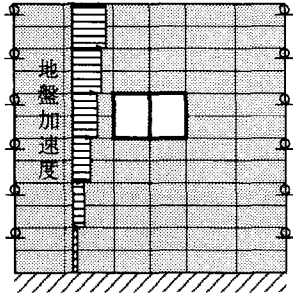


図-2 応答震度法における地震荷重

サブストラクチャー法の運動方程式より地中構造物を対象とした地盤FEM型の静的なサブストラクチャー法を導く。そしてサブストラクチャー法と既往の耐震計算法との比較を通して新しい地震荷重の作用方法を提案し、地中ダクトの例でその妥当性を検証する。最後に、既往の耐震計算法および本論文で提案した新しい耐震計算法について特徴比較を行う。

2. 地盤 FEM 型の静的耐震計算法

(1) FEM 応答変位法

浜田ら³⁴⁾は、地中線状構造物軸方向と同様に、地下空洞についても周辺地盤のひずみが空洞に静的に伝達されることを山岳トンネルの地震観測結果より明らかにした。この知見を基に、地中構造物の存在を考えない地盤（以下自然地盤と呼ぶ）であらかじめ求めておいた地中構造物位置での地震時最大ひずみを、空洞周辺地盤を表すFEMモデル外周境界に相対変位として作用させるというFEM応答変位法を提案した。ここに、空洞周辺地盤をFEMで表したのは、周辺地盤および支保工の地震時安全性を検討する必要性からである。図-1にFEM応答変位法における地震荷重の作用方法の一例を示す。

(2) 応答震度法

片山^{5),6)}は、地盤ばね型の静的耐震計算法である応答

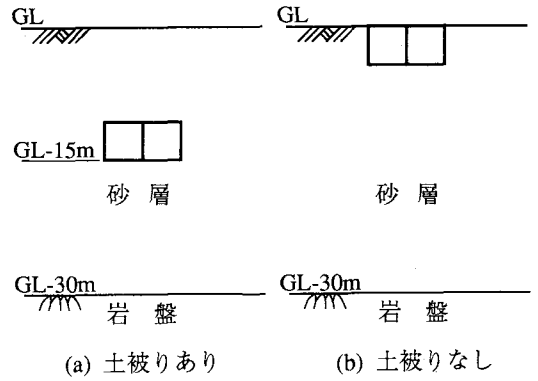


図-3 地盤とダクトのモデル図

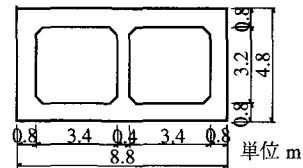


図-4 ダクトの構造図

変位法の欠点として地盤ばね定数の計算法に一般性がないことをあげ、これに代わる静的耐震計算法として応答震度法を提案した。これは、はじめに述べた地中構造物の地震時振動特性に基づいており、周辺地盤をFEMで表し、自然地盤であらかじめ求めておいた加速度を周辺地盤および地中構造物に作用させるというもので、水平地震動を対象とする場合は側方境界を水平ローラで規定する。図-2に応答震度法における地震荷重の作用方法を示す。応答震度法は、地中ダクト、立坑、地下空洞の耐震計算に適用されている。

3. 数値解析による比較検討

既往の地盤FEM型の静的耐震計算法の問題点を抽出するため、地中ダクト横断面方向を対象として、二次元動的FEM、FEM応答変位法、応答震度法を適用し、ダクトの地震時増分最大断面力を比較する。

(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、ダクトは土被りのあるモデルと土被りのないモデルの二種類とした。地盤とダクトのモデル図を図-3に、ダクトの構造図を図-4に示す。

ダクトはフレームにモデル化して線形弾性体として解析した。ダクトの材料物性値を表-1に示す。地盤のうち砂層については、せん断剛性に拘束圧依存性を考慮し、せん断剛性および減衰定数にひずみ依存性を考慮した。

表-1 ダクトの材料物性値

材 料	コンクリート
密 度	2.4 t/m ³
ヤング係数	2.7 × 10 ⁶ tf/m ² = 2.65 × 10 ⁷ kN/m ²
ポアソン比	0.20
減衰定数	0.05

表-2 地盤の物性値

材 料	砂 層	岩 盤
S波速度 (m/s)	GL-15mで300*	700
密 度 (t/m ³)	1.8	2.0
動的ポアソン比	0.40	0.20
内部摩擦角 (度)	38	——
動的変形特性	せん断剛性、減衰のひずみ依存性をH-Dモデルで考慮** 最大減衰 0.20	線形材料 減衰定数 0.02

* 砂層のS波速度は、有効上載圧 σ_v の1/4乗に比例するとして拘束圧依存性を考慮。

** 砂層の基準ひずみは、 $\gamma_c = \sigma_v \tan \phi / G_0$ により拘束圧依存性を考慮。

岩盤は線形弾性体とした。地盤の物性値を表-2に示す。

入力地震動は、EL CENTRO NS波を最大加速度300 Galに規準化してGL-30mの位置にせん断波として鉛直に入射させた。

(2) 解析方法

まず、耐震計算に先立って等価線形化法を用いた一次元成層地盤の重複反射解析を行い、自然地盤としての応答を求めるとともに、地震時における地盤の等価剛性および等価減衰を求めた。この等価剛性は各耐震計算法において地震時の地盤の剛性として共通に用いた。

二次元動的FEMは、複素応答解析法による動的解析プログラムにより実施した。境界条件としては側方をエネルギー伝達境界、下方を剛基盤とし、重複反射解析で得られたGL-30m位置での応答加速度を剛基盤に入力地震動として作用させ、線形解析した。図-5に土被りのあるモデルの解析モデルを示す。

FEM応答変位法は、地震荷重として重複反射解析で求められたGL-30mからの地震時相対変位を側方境界に強制変位として作用させた。

応答震度法は、地震荷重として重複反射解析で求められた加速度を地盤FEMおよびダクトのフレームに作用させた。

以上の三種類の耐震計算法の結果は、本論文が静的耐

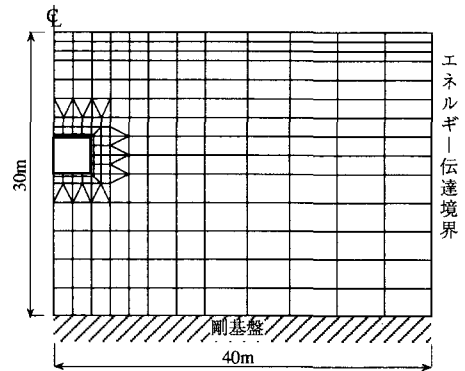


図-5 二次元動的FEM解析モデル(土被りあり)

震計算法における地震荷重の理論的解明を目的としていることから、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、FEM応答変位法および応答震度法の地震荷重はすべて二次元動的FEMにおけるダクト最大曲げモーメント発生時刻での重複反射解析の結果を用いた。

(3) 解析結果

土被りありと土被りなしのモデルについて、曲げモーメントおよび軸力の解析結果を図-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。図より以下のことがわかる。

- 応答震度法は、土被りあり、土被りなしのいずれのモデルも、曲げモーメントおよび軸力は二次元動的FEMの結果とほぼ一致している。
- FEM応答変位法は、土被りあり、土被りなしのいずれのモデルも、曲げモーメントは二次元動的FEMの結果の20~30%と非常に小さい。軸力は二次元動的FEMの結果に比べて小さいだけでなく、分布も異なっている。

本比較解析の結果は、日比野ら⁹⁾が大規模地下空洞を対象として動的解析、FEM応答変位法、応答震度法により比較解析した結果と同様な傾向を示している。すなわち、応答震度法は動的解析とほぼ一致した応答値を与え、動的解析に代わる地中構造物の耐震計算法として有用であるが、FEM応答変位法は動的解析に比べ小さな応答値を与え、危険側の結果となる可能性のあることが明らかになった。

しかしながら、応答震度法もFEM応答変位法も基本的には地中構造物の地震時振動特性に基づいた計算法であることに変わりはない。そこで、地中構造物を対象とした地盤FEM型の静的耐震計算法としてどのような地震荷重が必要なのか、次に調べることにする。

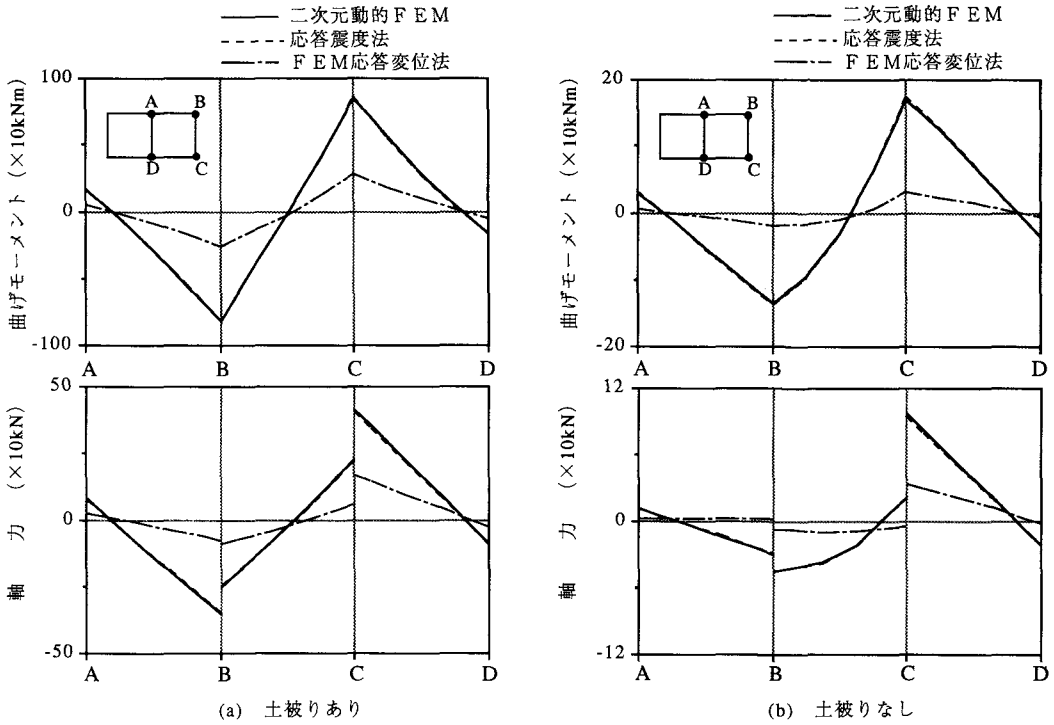


図-6 二次元動的 FEM と既往の静的耐震計算法による地震時増分最大断面力の比較

4. サブストラクチャー法に基づく地中構造物の静的耐震計算法

構造物-周辺地盤の動的相互作用問題を解析するうえで有効な手法である動的サブストラクチャー法に基づき、地中構造物を対象とした地盤 FEM 型の静的耐震計算法を新たに導き、地震荷重について検討する。

(1) 動的サブストラクチャー法の定式化

動的サブストラクチャー法にも各種あるが、ここでは土木学会がまとめた動的解析の方法⁷⁾より接触面法を用いる。詳細は文献^{7), 8)}に譲ることとし、以下に動的サブストラクチャー法について概説する。

動的サブストラクチャー法は基本的には次の 3 ステップから成る。

a) ステップ 1 入力動の解析

入力動とは一般の耐震計算における地震荷重に相当し、自然地盤または構造物を空洞に置き換えた地盤（以下切欠き地盤と呼ぶ）で求める。通常切欠き地盤で求める場合は二次元動的 FEM 等によらなければならないが、自然地盤で求める場合は重複反射解析等により比較的簡便に求めることができる。そこで、本論文では入力動の解析は自然地盤で求めるものとする。自然地盤における入力動は、構造物と地盤の接触面での地震時変位お

よび接触面での地震時増分応力に釣り合う力（切欠き力と呼ばれる）となる。

b) ステップ 2 地盤インピーダンスの解析

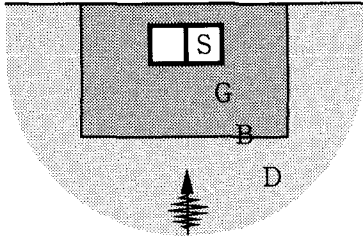
地盤インピーダンスとは一般の耐震計算における地盤ばねに相当し、接触面法では切欠き地盤で求める。

c) ステップ 3 構造物の解析

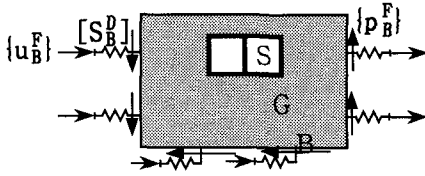
接触面法ではサブストラクチャーの周面に地盤インピーダンスを取り付け入力動を作用させて構造物の解析を行い、地震時応答を求める。

ここでは、地中構造物を対象とした地盤 FEM 型の静的耐震計算法の導出を目標とすることから、図-7 に示したように、周辺地盤を近傍地盤と遠方地盤に分け、サブストラクチャーとして地中構造物-近傍地盤を考え、遠方地盤との動的相互作用に対し動的サブストラクチャー法を適用する。このとき、動的サブストラクチャー法の運動方程式は、振動数領域では式 (1) のように表される。

$$\begin{bmatrix} [S_{SS}] & [S_{SG}] \\ [S_{GS}] & [S_{GG}] & [S_{GB}] \\ & [S_{BG}] & [S_{BB}] + [S_B^0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_S\} \\ \{u_G\} \\ \{u_B\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{0\} \\ [S_B^0] \{u_B^0\} + \{p_B^0\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$



(a) 地中構造物-近傍地盤-遠方地盤系



(b) 地中構造物-近傍地盤のサブストラクチャー法

図-7 地盤FEM型のサブストラクチャー法

[S] は地中構造物または近傍地盤の動的剛性マトリクスで、次式で表される。

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

ここに、[M]、[C]、[K] は質量、減衰、剛性の各マトリクス、 ω は円振動数、下添字 S は構造物、下添字 G は近傍地盤、下添字 B は近傍地盤と遠方地盤の境界、上添字 D は切欠き地盤、上添字 F は自然地盤、[S_B^D] は切欠き地盤で求められた地盤インピーダンス、{u_B^F}、{p_B^F} は自然地盤で求められた入力動の変位および切欠き力、をそれぞれ表す。

(2) 地盤 FEM 型の静的サブストラクチャー法¹⁰⁾

地盤 FEM 型の動的サブストラクチャー法の運動方程式より、地中構造物を対象とした地盤 FEM 型の静的耐震計算法を導く。

まず、動的サブストラクチャー法の運動方程式を振動数領域から時間領域へ変換する。地中構造物および近傍地盤の動的剛性は式 (2) に基づき変換する。地盤インピーダンスは、通常振動数の関数であるが、ここでは簡単のため振動数に依存しないばねとダッシュポットに置換するものとし、次式で表す。

$$[S_B^D(\omega)] = [K_{B0}^D] + i\omega[C_{B0}^D] \quad (3)$$

ここに、[K_{B0}^D]、[C_{B0}^D] はばね係数および減衰係数。

式 (2)、式 (3) より、時間領域での動的サブストラクチャー法の運動方程式は式 (4) のように表される。

$$\begin{bmatrix} [M_{SS}] & [M_{SG}] \\ [M_{GS}] & [M_{GG}] & [M_{GB}] \\ & [M_{BG}] & [M_{BB}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{r_S\} \\ \{r_G\} \\ \{r_B\} \end{Bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} [C_{SS}] & [C_{SG}] \\ [C_{GS}] & [C_{GG}] & [C_{GB}] \\ & [C_{BG}] & [C_{BB}] + [C_{B0}^D] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{r_S\} \\ \{r_G\} \\ \{r_B\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{SS}] & [K_{SG}] \\ [K_{GS}] & [K_{GG}] & [K_{GB}] \\ & [K_{BG}] & [K_{BB}] + [K_{B0}^D] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{r_S\} \\ \{r_G\} \\ \{r_B\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{0\} \\ [C_{B0}^D]\{r_B^F\} + [K_{B0}^D]\{r_B^F\} + \{q_B^F\} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ここに、 $\dot{\cdot}$ は時間微分を表し、 r および q は時間領域における変位および切欠き力を表す。

次に、地中構造物を対象とした静的耐震計算法に変換するため、以下の仮定を置く。

仮定 1：遠方地盤との境界は地中構造物の影響が小さくなる位置に設定

仮定 2：減衰力は無視

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に同じ

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速度および変位は自然地盤における境界位置での速度および変位にほぼ等しくなるため、式 (4) において地盤インピーダンスは不要となる。

仮定 2 は、静的耐震計算法が地中構造物の最大応力を求めるためのものとする、地震時最大応力が発生すると予想される近傍地盤にせん断一次モードの現れる時刻では速度は小さく、一般に減衰も小さいことから、妥当な仮定と考えられる。この仮定により式 (4) の減衰に関わる項が消去される。

仮定 3 は、地中構造物を対象とするとはじめに述べた地震時振動特性より妥当と考えられる。この仮定により式 (4) の慣性力項が外力となり、右辺に移行できる。

以上の三つの仮定より、時間領域の動的サブストラクチャー法の運動方程式 (4) は、次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} [K_{SS}] & [K_{SG}] \\ [K_{GS}] & [K_{GG}] & [K_{GB}] \\ & [K_{BG}] & [K_{BB}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{r_S\} \\ \{r_G\} \\ \{r_B\} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} [M_{SS}] & [M_{SG}] \\ [M_{GS}] & [M_{GG}] & [M_{GB}] \\ & [M_{BG}] & [M_{BB}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{r}_S\} \\ \{\ddot{r}_G\} \\ \{\ddot{r}_B\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{0\} \\ \{q_B^F\} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

式 (5) は、未知数として加速度および速度を含まない静的な解析を表しており、本論文ではこの新たに導かれた地中構造物を対象とした地盤 FEM 型の静的なサブストラクチャー法を「地盤応答法 (Ground Response Method)」と呼ぶことにする。

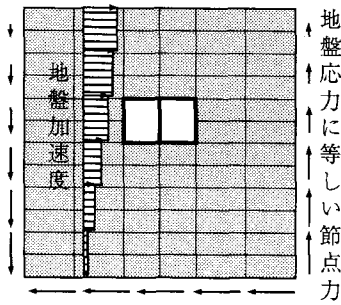


図-8 地盤応答法における地震荷重

地盤応答法では、地震荷重としては図-8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地中構造物に作用させると同時に、自然地盤で求められた地盤応力に等しい力を近傍地盤と遠方地盤の境界に作用させることとなる。

さて、新たに導いた地盤応答法と既往の静的耐震計算法を比較してみる。応答震度法と地盤応答法は、図-2と図-8を比較してもわかるように自然地盤の地盤加速度による慣性力が主たる地震荷重という点で両手法は非常に似かよった耐震計算法となっている。異なるのは境界処理で、応答震度法では水平地震動を対象とする場合は側方境界を水平ローラ、下方境界を固定としているのに対し、地盤応答法では側方境界、下方境界とも自然地盤の地盤応力に等しい節点力を作用させている。しかし、水平地震動を対象とする場合は、応答震度法において側方および下方境界に生じる反力は先の仮定1が満足されているならば自然地盤の地盤応力にほぼ等しくなると考えられるから、境界処理の点でも結果的に応答震度法と地盤応答法はほぼ等価な手法となっている。

FEM 応答変位法と地盤応答法は、図-1と図-8より主たる地震荷重が異なっていることがわかる。両手法とも地中構造物-近傍地盤系の地震時変形を自然地盤の応答を用いて求めようという点では同じであるが、地盤応答法が主に近傍地盤の慣性力を系の外力としているのに対し、FEM 応答変位法では近傍地盤外周の地震時相対変位を系の外力としている点に大きな違いがある。

地盤応答法は、動的サブストラクチャー法を基本としており、先に示した三つの仮定が成り立つ限り、地中構造物を対象とした地盤FEM型の静的耐震計算法としては理論的に正しいものと考えられる。そこで、さらにFEM 応答変位法の問題点を明らかにし、その改良を試みる。

(3) FEM 応答変位法の問題点とその改良¹¹⁾

FEM 応答変位法における地震荷重の作用方法の問題点を調べるため、構造物を考えない自然地盤の二次元

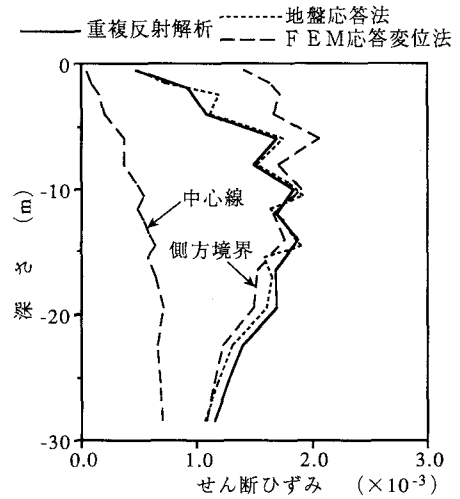


図-9 自然地盤の地震時せん断ひずみ分布の比較

FEM モデルを用いて地盤応答法とFEM 応答変位法を実施し、重複反射解析の結果と比較する。解析条件はすべて先に示したものと同じである。

解析結果として地盤の地震時せん断ひずみの深さ方向の分布を図-9に示す。FEM 応答変位法の結果は二次元FEM モデルの中心軸および側方境界で示し、地盤応答法の結果はモデル中心軸のみで示した。図より以下のことがわかる。

- 地盤応答法によるせん断ひずみは、重複反射解析の結果とはほぼ一致している。なお、地盤応答法では二次元FEM モデルの側方境界からの距離に関係なく同じせん断ひずみ分布を示していた。
- FEM 応答変位法によるせん断ひずみは、側方境界では地表付近を除いて重複反射解析の結果と比較的よく一致しているが、中心軸では重複反射解析の結果の20~50%と小さく、分布も異なっている。これは、側方境界に作用させた強制変位では地盤FEM モデル内に一樣なせん断変形を発生させることができないため、これに対し地盤応答法では地盤の慣性力と剛性により地盤FEM モデル内に一樣なせん断変形を発生させている。

以上より、地盤応答法では自然地盤のひずみが再現されているのに対し、FEM 応答変位法では自然地盤のひずみは再現されておらず、しかも地震時相対変位を作用させている側方境界からの距離によりせん断ひずみ分布が変化し、地中構造物が存在する場合地震時相対変位作用位置との距離により断面力が変わってくるのが明らかとなった。

浜田ら^{31,41)}は、山岳トンネルの地震時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うえで、地震時ひずみに等価な変位をモ

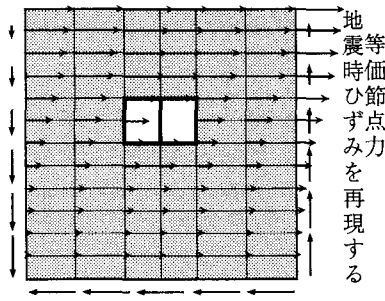


図-10 修正 FEM 応答変位法における地震荷重

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、この地震荷重の作用方法では意図したひずみが地盤内に再現されないことは明らかである。そこで、自然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、自然地盤で求められた地震時ひずみ ϵ^F から式 (6) により地震時応力 σ^F を求め、さらにその地震時応力 σ^F から式 (7) により等価節点 q^F を求める。

$$\{\sigma_e^F\} = [D_e] \{\epsilon_e^F\} \quad (6)$$

$$\{q^F\} = \sum_e \int_{V_e} [B_e]^T \{\sigma_e^F\} dv = \sum_e \int_{V_e} [B_e]^T [D_e] \{\epsilon_e^F\} dv \quad (7)$$

ここに、 $[D]$ は応力-ひずみマトリックス、 $[B]$ はひずみ-変位マトリックス、下添字 e は地盤の要素単位、をそれぞれ表す。

式 (7) は自然地盤の地震時ひずみを再現する等価節点力を表しており、この新たに導いた地震荷重による地盤 FEM 型の静的耐震計算法を本論文では「修正 FEM 応答変位法」と呼ぶことにする。図-10 に修正 FEM 応答変位法における地震荷重の作用方法を示す。なお、図では示していないが、この新たな地震荷重を自然地盤の二次元 FEM モデルに作用させたところ、側方境界からの距離に関係なく重複反射解析の結果とほぼ同じせん断ひずみ分布を示すことが確認された。

次に、修正 FEM 応答変位法の地震荷重と地盤応答法の地震荷重の関係を調べることにする。

まず、地震時ひずみ ϵ^F と等価地震時変位 r^F は式 (8) で表されることから、地震時ひずみを再現する等価節点力 q^F は式 (9)、式 (10) のように表される。

$$\{\epsilon_e^F\} = [B_e] \{r_e^F\} \quad (8)$$

$$\{q^F\} = [K] \{r^F\} \quad (9)$$

$$[K] = \sum_e \int_{V_e} [B_e]^T [D_e] [B_e] dv \quad (10)$$

ここに、 $[K]$ は剛性マトリックスを表す。

式 (9) より、自然地盤の地震時ひずみを再現する等価節点力は、地盤の剛性マトリックスと地盤の地震時相対変位を掛けあわせたものに他ならないことがわかる。

一方、地盤応答法も修正 FEM 応答変位法も自然地盤の地震時応答を基に地震荷重を設定することから、自然地盤を対象に地盤応答法の運動方程式を組み立ててみると式 (5) より下式のようなになる。

$$\begin{bmatrix} [K_{EE}] & [K_{EG}] \\ [K_{GE}] & [K_{GG}] & [K_{GB}] \\ & [K_{BG}] & [K_{BB}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{r_E^F\} \\ \{r_G^F\} \\ \{r_B^F\} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} [M_{EE}] & [M_{EG}] \\ [M_{GE}] & [M_{GG}] & [M_{GB}] \\ & [M_{BG}] & [M_{BB}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{r_E^F\} \\ \{r_G^F\} \\ \{r_B^F\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{0\} \\ \{q_B^F\} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

ここに、下添字 E は地中構造物を土に置き換えた排土地盤を表す。

式 (11) において、排土地盤の自由度に関する地震荷重は不要なので、剛性マトリックスおよび質量マトリックスの自由度 E に関する行を零と置き、自由度 E に関する列を整理すると、下式のように書き換えられる。

$$\begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [0] & [K_{GG}] & [K_{GB}] \\ & [K_{BG}] & [K_{BB}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{r_E^F\} \\ \{r_G^F\} \\ \{r_B^F\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{q_G^F\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [0] & [M_{GG}] & [M_{GB}] \\ & [M_{BG}] & [M_{BB}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{r_E^F\} \\ \{r_G^F\} \\ \{r_B^F\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{0\} \\ \{q_B^F\} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

$$\{q_G^F\} = [K_{GE}] \{r_E^F\} + [M_{GE}] \{\dot{r}_E^F\} \quad (13)$$

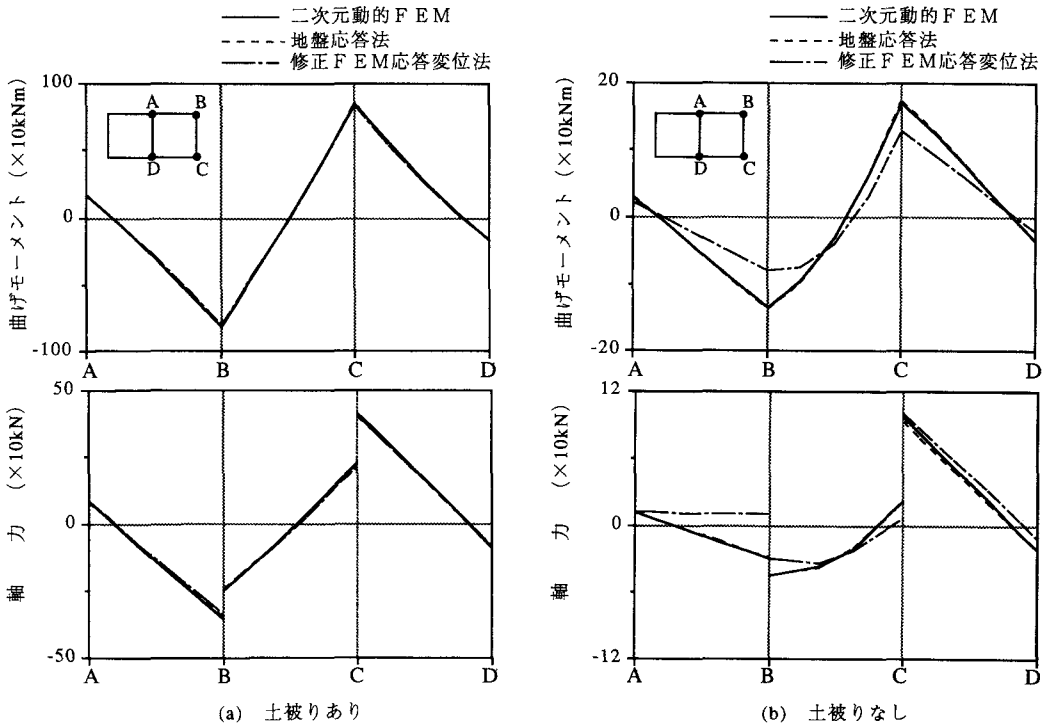
ここに、 $\{q_G^F\}$ は排土地盤から排土地盤と近傍地盤の接触面に作用する地震荷重を表しており、接触面での地震時増分応力に釣り合う力（切欠き力）に等しい。

式 (12) を見ると、左辺は、基本的には近傍地盤の剛性マトリックスと自然地盤の地震時相対変位を掛けあわせたものであり、式 (9) よりこれが修正 FEM 応答変位法の地震荷重であることがわかる。式 (12) の右辺は、式 (5) より構造物の慣性力を考慮しないときの地盤応答法の地震荷重と等しいことがわかる。これらより、修正 FEM 応答変位法の地震荷重は、構造物の慣性力を考慮しないときの地盤応答法の地震荷重と等価であることが明らかとなった。

(4) 地中ダクトを対象とした検証解析

本論文で新たに提案した地盤 FEM 型の静的耐震計算法を検証するため、地中ダクト横断面方向を対象として地盤応答法および修正 FEM 応答変位法を実施し、二次元動的 FEM の結果と比較した。

解析対象としたダクトおよび地盤のモデル、材料物性値、入力地震動および二次元動的 FEM の解析方法は、すべて先に示した「3. 数値解析による比較検討」と同じである。



図一11 二次元動的FEMと新しい静的耐震計算法による地震時増分最大断面力の比較

地盤応答法は、地震荷重として重複反射解析で求められた加速度を地盤FEMおよびダクトのフレームに作用させると同時に、重複反射解析で求められたせん断応力に等しい力を側方境界に作用させた。

修正FEM応答変位法は、地震荷重として重複反射解析で求められたせん断ひずみに等価な節点力を地盤FEMに作用させると同時に、排土地盤からの調整外力である切欠き力をダクトと近傍地盤の接触面に作用させた。

以上の静的耐震計算法の地震荷重は、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の重複反射解析の結果を用いた。

土被りありと土被りなしのモデルについて、曲げモーメントおよび軸力の解析結果を図一11に示す。各図とも横軸はダクト頂版、側壁、底板を展開して示してある。図より以下のことがわかる。

- a) 地盤応答法は、土被りあり、土被りなしのいずれのモデルも、曲げモーメントおよび軸力は二次元動的FEMの結果とほぼ一致している。
- b) 修正FEM応答変位法は、土被りありのモデルでは、曲げモーメントおよび軸力は二次元動的FEMの結果とほぼ一致している。しかし、土被りなしのモデルでは、曲げモーメントは二次元動的FEMの結果の60~70%と小さく、軸力は二次元

動的FEMの結果とは異なった分布となっている。これは、修正FEM応答変位法には地震荷重として構造物の慣性力が考慮されていないために生じたものであり、図では示していないが、土被りのないモデルにおいて構造物の慣性力を考慮しない地盤応答法と修正FEM応答変位法の結果が一致することが確かめられている。

以上より、地盤応答法は、動的解析とほぼ一致した応答値を与え、動的解析に代わる地中構造物の耐震計算法として妥当なものであることが示された。一方、修正FEM応答変位法は、土被りのないダクトのように慣性力の影響が無視しえない地中構造物に対して注意を要するが、通常の慣性力の影響の小さい地中構造物に対しては動的解析とほぼ一致した応答値を与えることが確かめられた。

5. 地盤FEM型の静的耐震計算法の特徴

前章までに検討してきた地中構造物を対象とした地盤FEM型の静的耐震計算法についてその特徴を明らかにし、耐震計算法としての汎用性について考える。

表一3に既往の静的耐震計算法と本論文で新たに提案した静的耐震計算法の地震荷重をまとめて示す。

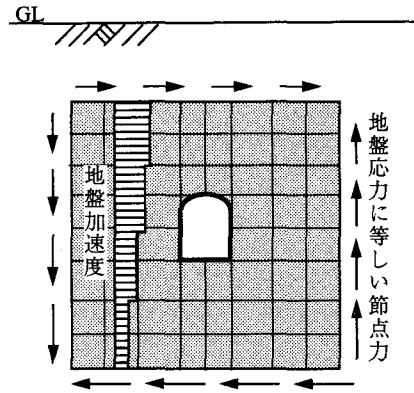
地盤応答法は、動的サブストラクチャーに基づき三つ

表一三 地盤 FEM 型の静的耐震計算法の地震荷重

従来の計算法		新しい計算法	
応答震度法	地中構造物および近傍地盤に自然地盤の加速度による慣性力を作用	地盤応答法	地中構造物および近傍地盤に自然地盤の加速度による慣性力を作用
	側方境界は、S波入射；水平ローラ P波入射；鉛直ローラ		近傍地盤外周境界に自然地盤の地震時応力と等価な節点力を作用
FEM変位法	近傍地盤外周境界に自然地盤の地震時変位を強制変位として作用	修正FEM変位法	近傍地盤に自然地盤の地震時ひずみ（地震時応力）を再現する等価節点力を作用
			地中構造物と近傍地盤の接触面に自然地盤の地震時応力と等価な節点力を作用

の仮定において導かれた計算法である。本来動的サブストラクチャー法には対象とするサブストラクチャーの形状や次元になら制限はなく、入力地震動の種類にも制約はないことから、先に示した三つの仮定が満足されるかぎり、定式化のうえではあらゆるタイプの地中構造物、あらゆる種類の地震波動に適用できるものと考えられる。本論文では地中ダクト横断面の S 波入射に対し検証解析を実施しその適用性を確認したが、地中構造物のタイプで言えば地下駐車場のような幅広地中構造物、地下タンクのような円筒型地中構造物、地震波動の種類で言えば S 波および P 波の斜め入射や表面波についても、地盤応答法の適用性があるものと考えられる。さらに特徴的な点は、サブストラクチャーとして地中構造物-近傍地盤を取り出す際に地表までのモデル化を必要としないことである。すなわち、近傍地盤として地中の一部を取り出した場合も、近傍地盤の外周境界に自然地盤で求められた地震時応力に等価な節点力を作用させればよいのである。このことは、図一12に示したような大深度地中構造物の耐震性の検討において威力を発揮し、外周境界を空洞より $2D$ (D は空洞の幅と高さの平均値) だけ離れた検討では、動的解析と地盤応答法による覆工コンクリートの地震時応力は良い一致を見た¹²⁾。

応答震度法は、先にも述べたように、主たる地震荷重が自然地盤の加速度に基づく慣性力であり、S波、P波の鉛直入射の場合は側方および下方境界における反力が地震時応力に等価な節点力とほぼ等しくなるものと予想されることから、地盤応答法と等価な耐震計算法であると言え、地盤応答法と同様に地中構造物の形状、次元に制限はない。ただし、側方および下方境界の変位拘束条



図一12 地盤応答法による大深度地下空洞の耐震計算

件より、S波、P波の斜め入射などの位相差のある地震動の取り扱いが難しく、また地表までのモデル化が前提となっている点で地盤応答法に比べて汎用性には劣る。しかしながら、これらの点は地中構造物の通常の耐震設計には特に必要ではなく、応答震度法が有力な静的耐震計算法の一つであることに変わりはない。

修正 FEM 応答変位法は、地震荷重が地中構造物の慣性力を除いて地盤応答法とまったく等価であり、構造物の慣性力の影響の小さい地中構造物に対しては実際上地盤応答法と等価な耐震計算法と言え、地盤応答法と同様に地中構造物の形状、次元に制限はない。さらに、自然地盤で発生する地震時ひずみ（地震時応力）を設定することさえできれば対称とする地震波動にも制限はなく、地表までのモデル化も必要としない。したがって、地中構造物の慣性力の影響度と使用する解析プログラムの機能によっては地盤応答法に代わる静的耐震計算法として位置付けられる。

FEM 応答変位法は、先に示したように、自然地盤の地震時ひずみを再現できず、さらに地中構造物と地震時相対変位作用位置との距離により地中構造物の断面力が変わってくることから、耐震計算法としては問題点が多く推奨できない。

6. ま と め

地中構造物の近傍地盤を FEM で表す地盤 FEM 型の静的耐震計算法について、地震荷重の作用方法をサブストラクチャー法に基づき理論的に解明し、地中構造物横断面方向を対象に数値解析により検証した。以下に本論文を要約する。

(1) 動的サブストラクチャー法の運動方程式に、地中構造物の地震時振動特性に基づいた仮定および境界処理を単純化するための仮定を置いて、地盤 FEM 型の静的なサブストラクチャー法である地盤応答法を導いた。

地盤応答法では、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地中構造物に作用させると同時に自然地盤で求められた地盤応力に等しい力を近傍地盤と遠方地盤の境界に作用させることとなる。

(2) 既往の地盤FEM型の静的耐震計算法である応答震度法は、自然地盤の加速度による慣性力を近傍地盤および地中構造物に作用させて近傍地盤の地震時変形を規定するという点で地盤応答法と非常に似通った計算法であり、通常の耐震設計では地盤応答法と等価な耐震計算法である。一方、FEM応答変位法は、自然地盤の地震時相対変位を近傍地盤外周に作用させて近傍地盤の地震時変形を規定しており、地盤応答法とは大きく異なる耐震計算法である。

(3) 数値解析結果よりFEM応答変位法が地盤の地震時ひずみを再現し得ないことが確かめられたため、新たに自然地盤の地震時ひずみと等価な節点力を近傍地盤に作用させるという修正FEM応答変位法を提案した。この修正FEM応答変位法による地震荷重は、構造物の慣性力を除き地盤応答法の地震荷重と等価であることが明らかとなった。

(4) 本論文で新たに提案した地盤応答法および修正FEM応答変位法は、サブストラクチャーとして地中構造物-近傍地盤のみを取り出せること、近傍地盤外周に変位拘束条件を課さないため任意の波動に対して適用可能なこと、などの特長があり、既往の地盤FEM型の静的耐震計算法に比較して汎用性がある。

7. おわりに

大型地下タンクや地下式原子力発電所など、高い耐震性の要求される大型地中構造物の建設が計画され、実施されつつある。地盤FEM型の静的耐震計算法は、動的解析に代わってこれらの重要地中構造物の耐震計算に適用でき、基本設計段階から実施設計段階まで数多くのパラメータスタディによる検討に威力を発揮するものと考えられる。

今後は、幅広地中構造物や円筒型地中構造物などの各種地中構造物への地盤応答法の適用性を検討するとともに、大型地中構造物への静的耐震計算法の適用限界について検討を加えていきたい。

参考文献

- 1) 建設省：新耐震設計法(案)，1977。
- 2) 土木学会原子力土木委員会：原子力発電所地質・地盤の調査・試験法および地盤の耐震安定性の評価手法 第6編屋外重要土木構造物の耐震安全性評価手法，1985。
- 3) 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，土木学会論文集，No.341，pp.187-196，1984。
- 4) 浜田政則，泉博允，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，土木学会論文集，No.341，pp.197-205，1984。
- 5) 片山幾夫，足立正信，嶋田穰，都築富雄，瀬下雄一：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，第40回土木学会年次学術講演会講演概要第1部，pp.737-738，1985。
- 6) Katayama, I.: Studies on fundamental problems in seismic design analyses of critical structures and facilities, Chap.4, pp.188-237, 京都大学博士論文，1990。
- 7) 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。
- 8) 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，土木学会論文集，No.441，pp.157-166，1992。
- 9) 日比野敏，駒田広也，本莊静光，藤原義一，本島睦，中川加明一郎，野崎隆司：原子力発電所地下立地方式のケーススタディによる成立性評価，電力中央研究所，総合報告U17，平成3年1月。
- 10) 立石章，坂下克之：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，第47回土木学会年次学術講演会講演概要第1部，pp.1466-1467，1992。
- 11) 立石章，坂下克之：静的FEMによる地下構造物の耐震計算法に関する一考察，第21回地震工学研究発表会講演概要，pp.469-472，1991。
- 12) 立石章，植田隆司，泉博允：大深度地下空洞の静的耐震計算法，第29回土質工学研究発表会講演概要，pp.1079-1080，1994。

(1994.4.27 受付)

A STUDY ON SEISMIC ANALYSIS METHOD IN THE CROSS SECTION OF UNDERGROUND STRUCTURES BY MEANS OF STATIC FINITE ELEMENT METHOD

Akira TATEISHI

Based on the dynamic substructure technique, the author proposes a static seismic analysis method, the Ground Response Method, for underground structures modeled by a structure and surrounding soil which is represented in finite elements. Through the comparative study of the Ground Response Method with existing static seismic analysis methods, it is verified that the GRAMBS provides the almost equivalent results to those obtained using the Ground Response Method, but the FEM Seismic Deformation Method gives uncertain results. The author proposes a new seismic load which is equivalent to seismic ground strains and modifies the FEM Seismic Deformation Method. Consequently, it is found that both of the proposed methods can be used more widely for various types of underground structures, especially for large-scaled structures and deeply constructed structures.