

応答変位法における地震荷重の作用方法に関する研究

立石 章*

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地中構造物を対象とした静的な耐震計算法としてのサブストラクチャー法を導いた。この静的サブストラクチャー法とフレーム-地盤ばねモデルの応答変位法について計算方法を比較したところ、応答変位法がサブストラクチャー法の一種であることがわかった。一方この比較より応答変位法における地震荷重が不十分なものであることが判明したため、新しい地震荷重の作用方法を提案した。

Keywords: underground structure, seismic design, seismic deformation method, sub-structure method, seismic load

1. はじめに

地中構造物の地震時振動特性は、桜井らによる埋設管の動みずみの測定¹⁾や田村らによる沈埋トンネルの地震観測²⁾を初めとして、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。

- ① 地中構造物は地震時に固有の振動を起こすことなく、周辺地盤に追従して振動する。
- ② 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。

応答変位法はこれらの研究成果に基づいて提案された地中構造物の耐震計算法で、基本的には地中構造物を地盤ばねに支持されたフレームに置き換え、地震時の地盤の相対変位やひずみを作用させるという方法である。応答変位法は当初埋設管、沈埋トンネル、共同溝などの地中線状構造物の軸方向の耐震計算に用いられ、その後浜田³⁾により地下タンクの耐震計算にもその適用性が示された。これに対し地中構造物の断面方向の耐震計算は、従来物部・岡部の地震時土圧を用いた震度法により行われてきたが、物部・岡部の地震時土圧は剛な擁壁を対象とした土圧式であり地盤の塑性釣り合い状態を仮定していることから、たわみ性を有し地盤との動的相互作用を伴う地中構造物の耐震設計には適切なものとはいえない。一方、近年原子力発電所の重要地中構造物の断面方向の耐震計算法として応答変位法が適用され、動的解析と遜色のない地震時増分断面力が算出できるということで震度法に代わる静的な耐震計算法として注目を集めている。しかしながら、この断面方向の応答変位法については地震荷重の作用方法に未解明点があるという指

摘⁴⁾もあり、論議を呼んでいる。

そこで、本論文では、主に地中構造物の断面方向を対象として、フレーム-地盤ばねモデルの応答変位法における地震荷重の作用方法について動的サブストラクチャー法に基づいて理論的な解明⁵⁾を試みる。

本論文の構成は、まず地中構造物の断面方向の応答変位法について既往の基準・指針類より紹介する。次に動的サブストラクチャー法の定式化を示した上で、地中構造物を対象とした静的な耐震計算法としての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応答変位法との比較を通して地震荷重の取扱いについて検討し、新しい地震荷重の作用方法を提案する。最後に地中ダクトを対象として本論文で提案した計算法について検証解析を行う。

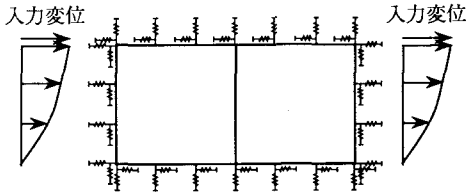
2. 地中構造物断面方向の応答変位法

地中構造物断面方向の応答変位法について、地震荷重の作用方法を示した既往の基準・指針類から代表的なものを次にあげる。

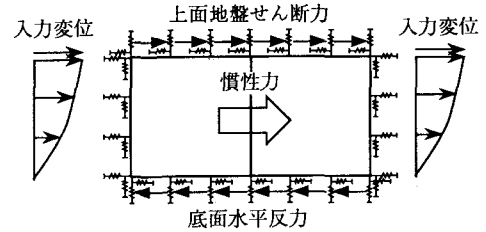
(1) 新耐震設計法(案)⁶⁾

新耐震設計法(案)は地中構造物断面方向の耐震計算法として初めて応答変位法を取り入れたもので、軸方向と同様に、地中構造物の存在を考えない地盤(以下自然地盤と呼ぶ)で求められた地震時の相対変位を地盤ばねを介して構造物の上面および側面に作用させるものである。この地震時の変位は均質な表層地盤の一次モードに着目して基盤震度と速度応答スペクトルより求めている。図-1に新耐震設計法(案)による地震荷重の作用方法を示し、以下これを応答変位法(新耐震)と呼ぶ。応答変位法(新耐震)は水道施設⁷⁾や沈埋トンネル⁸⁾の耐震検討に用いられている。

*正会員 工修 大成建設(株) エネルギー部
(〒163 新宿区西新宿 1-25-1 新宿センタービル)



図一 新耐震設計法（案）による応答変位法の地震荷重



図二 原子力土木構造物のための応答変位法の地震荷重

(2) 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⁹⁾

本書には原子力発電所非常用取水施設の断面方向の耐震計算法として応答変位法の適用性が示されており、地震荷重として自然地盤の相対変位の他に、上面地盤せん断力、躯体慣性力および底面水平反力を作用させる。これらの地震荷重はすべて一次元重複反射理論に基づく自然地盤の動的解析により求めている。図-2に本書による地震荷重の作用方法を示し、以下これを応答変位法(原子力)と呼ぶ。

応答変位法(新耐震)と応答変位法(原子力)の計算手順を比較して表-1に示す。

3. 動的サブストラクチャー法の定式化

地中構造物を対象とした静的な耐震計算法としてのサブストラクチャー法を導くため、ここでは土木学会がまとめた動的解析の方法¹⁰⁾より接触面法と呼ばれている動的サブストラクチャー法について計算法を示す。本章では振動数領域における定式化を示し、材料の物性は線形弾性とする。

動的サブストラクチャー法による耐震計算は図-3に示したように3ステップで行う。以下に概説する。

a) ステップ1 入力動の解析

ここでいう入力動とは構造物の質量や剛性の影響のない地盤において求められた構造物と地盤の接触面位置での応答のことである。入力動の解析は、構造物を空洞に置き換えた地盤(以下切欠き地盤と呼ぶ)において行う場合と自然地盤において行う場合がある。切欠き地盤の解析では入力動は構造物と地盤の接触面での変位となり、自然地盤の解析では入力動は接触面での変位と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。

ここで、切欠き地盤における入力動と自然地盤における入力動とは一見異なっているかのように見える。しかし、自然地盤が地震動を受けて変形している状態で、構造物に相当する地盤を取り除き切欠き力を解放力として作用させると、得られた自然地盤の変形は切欠き地盤における地震時の変形と等しくなる。つまり、両地盤によ

表-1 応答変位法の計算手順

	新耐震設計法(案)	原子力土木構造物
地震荷重	構造物を考えない表層地盤(自然地盤)において、基盤震度と速度応答スペクトルにより変位を算定	自然地盤において、一次元重複反射解析により変位、せん断力、加速度を算定
地盤ばね	実験結果等に基づき、地盤の剛性より設定	切欠き地盤において、二次元静的FEM解析により接地面ごとに等分布荷重を作用させ得られた変位より算定
構造物の解析	構造物に地盤ばねを介して相対変位を作用	構造物に地盤ばねを介して相対変位を作用
	—	構造物の上面に地盤のせん断力、底面に上面せん断力と慣性力に釣り合う水平反力を作用 構造物、機器、内容水に対し加速度による慣性力を作用

る入力動は地震荷重としては実は等価なものなのである。

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構造物と地盤の接触面位置において単位の変位を生じさせるために必要な力と定義され、構造物と地盤の動的相互作用の効果を表すものである。地盤インピーダンスでは構造物と地盤の接触面の全自由度がたがいに連成しており、通常フルマトリックスとなる。地盤インピーダンスは、切欠き地盤において構造物と地盤の接触面で点加振を行って求めたり、切欠き地盤を有限要素等で離散化した場合には接触面の自由度に切欠き地盤の質量、減衰、剛性を縮合して求めたりする。

c) ステップ3 構造物の解析

構造物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地震時応答を求める。

構造物の解析における動的サブストラクチャー法の運動方程式を、入力動を切欠き地盤より求める場合と自然地盤より求める場合を合わせて式(1)に示す。

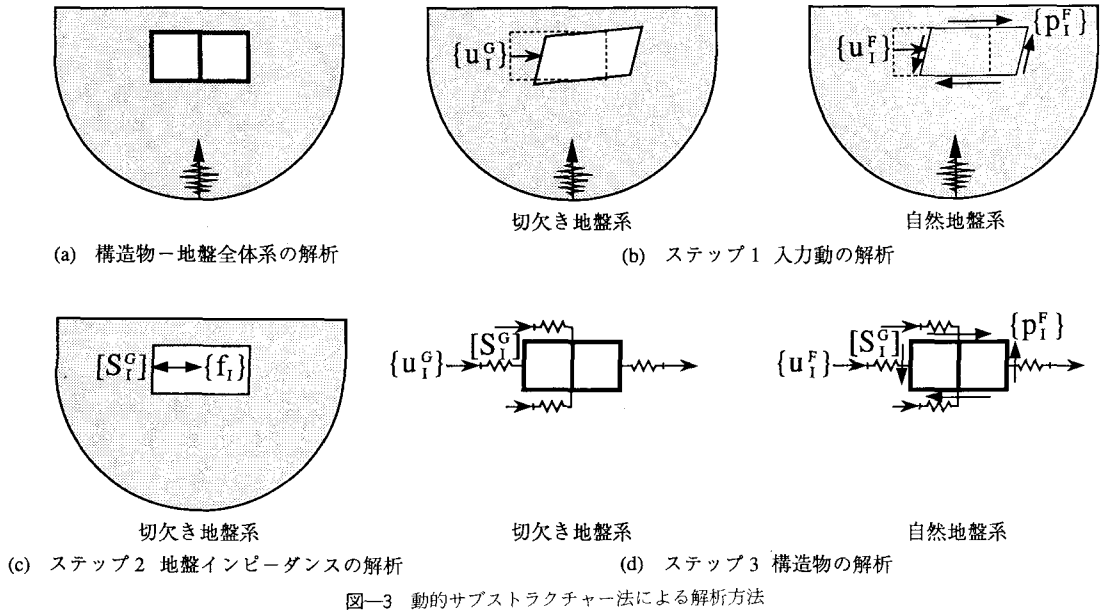


図-3 動的サブストラクチャー法による解析方法

$$\begin{bmatrix} [S_{ss}] & [S_{sr}] \\ [S_{is}] & [S_{ir}] + [S_f^G] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_s\} \\ \{u_i\} \end{Bmatrix} = \begin{cases} \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [S_f^G] \{u_f\} \end{Bmatrix} & \text{切欠き地盤系} \\ \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [S_f^G] \{u_f\} + \{p_f^F\} \end{Bmatrix} & \text{自然地盤系} \end{cases} \quad \dots\dots (1)$$

$[S_{ss}]$, $[S_{sr}]$, $[S_{is}]$, $[S_{ir}]$ は構造物の動的剛性マトリックスで、次式で表される。

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

ここに、 $[M]$ は質量マトリックス、 $[C]$ は減衰マトリックス、 $[K]$ は剛性マトリックス、 ω は円振動数、下添字 S は構造物、下添字 I は構造物と地盤の接触面、上添字 G は切欠き地盤、上添字 F は自然地盤、 $[S_f^G]$ は地盤インピーダンス、 $\{u_f\}$, $\{u_i\}$ は入力動の変位、 $\{p_f^F\}$ は入力動の切欠き力、をそれぞれ表す。

4. 静的サブストラクチャー法の導出

前章で示した動的サブストラクチャー法の運動方程式に基づき、ここで新たに地中構造物を対象とした静的な耐震計算法としてのサブストラクチャー法を導く。

まず静的な耐震計算法への変換のために、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。

構造物の動的剛性は式(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ため、時間領域に変換するには地盤インピーダンスをフリーエ変換するか、または近似的な方法によって振動数に依存しないばねとダッシュポットに置換するのいずれかの方法⁽¹⁾が考えられる。ここでは後者の近似的な方法を採用し、

$\omega=0$ における静的な地盤インピーダンス $[K_f^0]$ と構造物-地盤全体系の地震時挙動を支配する振動数における減衰係数 $[C_f^0]$ を用いて式(3)のように表す。

$$[S_f^G(\omega)] = [K_f^0] + i\omega [C_f^0] \quad \dots\dots (3)$$

式(2)、(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近似的に式(4)のように表される。

$$\begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{is}] & [M_{ir}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{r}_s\} \\ \{\ddot{r}_i\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{ss}] & [C_{sr}] \\ [C_{is}] & [C_{ir}] + [C_f^0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{r}_s\} \\ \{\dot{r}_i\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{ss}] & [K_{sr}] \\ [K_{is}] & [K_{ir}] + [K_f^0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{r_s\} \\ \{r_i\} \end{Bmatrix} = \begin{cases} \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [C_f^0] \{\dot{r}_f\} + [K_f^0] \{r_f\} \end{Bmatrix} & \text{切欠き地盤系} \\ \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [C_f^0] \{\dot{r}_f\} + [K_f^0] \{r_f\} + \{q_f^F\} \end{Bmatrix} & \text{自然地盤系} \end{cases} \quad \dots\dots (4)$$

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、はじめに述べた地震観測や模型振動実験から得られた地中構造物の地震時振動特性に基づき、次の二つの仮定を置く。

仮定1: 構造物自身および構造物と地盤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: 構造物自身に生じる加速度は自然地盤における構造物設置位置の加速度と同じ。

時間領域の動的サブストラクチャー法の運動方程式に仮定1を適用して減衰項を消去し、さらに仮定2により慣性力項を外力として右辺に移項すると、式(4)は式(5)のようになる。

表-2 静的サブストラクチャー法の計算手順

	切欠き地盤系	自然地盤系
入力動	切欠き地盤において動的解析により変位を算定し、自然地盤において動的解析により加速度を算定	自然地盤において、動的解析により変位、応力、加速度を算定
地盤インピーダンス	切欠き地盤の二次元FEMモデルにおいて、剛性マトリックスを構造物接地面の自由度に縮合して静的な地盤インピーダンスを算定	
構造物の解析	構造物に地盤インピーダンスを介して切欠き地盤の変位を作用	構造物に地盤インピーダンスを介して自然地盤の変位を作用
	—	構造物の全接地面に自然地盤の応力に釣り合う力(切欠き力)を作用
	構造物、機器、内容水に対し自然地盤の加速度による慣性力を作用	

表-1, 表-2 より以下のことがわかる。

① 自然地盤系の静的サブストラクチャー法と応答変位法(原子力)は、地盤インピーダンスと地盤ばねの違いや地盤応力の作用方法に違いがあるものの、地盤変位と同時に地盤応力を作用させる点などほぼ等価な耐震計算法であると言える。

② 切欠き地盤系の静的サブストラクチャー法と応答変位法(新耐震)は、主に地盤変位によって地震荷重を与える点では同じであるが、切欠き地盤系の静的サブストラクチャー法では切欠き地盤において変位を算定し、応答変位法(新耐震)では自然地盤において変位を算定している点に大きな違いがある。

以上より、静的サブストラクチャー法と応答変位法とはその計算手順および地震荷重の作用方法が酷似しており、応答変位法がサブストラクチャー法の一種であるものと言える。そして、静的サブストラクチャー法との比較から、応答変位法における地震荷重については次のような作用方法が理論的に正しいものと考えられる。

方法1:地震荷重として地盤変位のみを考える場合は、構造物を空洞に置き換えた切欠き地盤において求めた地盤変位を地盤ばねを介して作用させる。

方法2:地震荷重として地盤変位と地盤応力を考える場合は、構造物の存在を考えない自然地盤において求めた地盤変位を地盤ばねを介して作用させると同時に、地盤応力に釣り合う切欠き力を構造物と地盤のすべての接触面に作用させる。

慣性力については、方法1,方法2とも自然地盤において求めた地盤加速度による慣性力を作用させる。

一般に切欠き地盤において地震荷重を求めるには、切欠き地盤を二次元動的FEM等により解析する必要があるが、この場合には静的な耐震計算法としての簡便さという長所が失われることになる。これに対し、自然地盤において地震荷重を求める場合には、新耐震設計法(案)のような均質な表層地盤を仮定し一次モードに着目することも可能であるし、原子力土木構造物のように設計入力地震動を用いて検討する必要があるときには成層地盤については一次元重複反射解析により比較的簡便に自然地盤の応答を求めることもできる。したがって、地震荷重算定における汎用性および簡便さの点からは、自然地盤において地震荷重を求める方法2の方が数段勝っているものと言える。

そこで、本論文としては、応答変位法が設計実務のための簡便な地中構造物の耐震計算法であるという観点から、自然地盤より求めた地盤変位、地盤応力、地盤加速度に基づく方法2を応答変位法における新しい地震荷重

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} [K_{ss}] & [K_{sr}] \\ [K_{rs}] & [K_{rr}] + [K_{r0}^0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{r_s\} \\ \{r_r\} \end{Bmatrix} \\
 & = \begin{bmatrix} -[M_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [M_{rr}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{r}_s^f\} \\ \{\dot{r}_r^f\} \end{Bmatrix} \\
 & \quad + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [K_{r0}^0] \{r_f^f\} \end{Bmatrix} \quad \text{切欠き地盤系} \\
 & \quad + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [K_{r0}^0] \{r_f^f\} + \{q_f^f\} \end{Bmatrix} \quad \text{自然地盤系} \quad \dots\dots (5)
 \end{aligned}$$

式(5)は、未知数として加速度項および速度項のない静的な解析を表し、本論文ではこの運動方程式による地中構造物の耐震計算法を動的サブストラクチャー法と区別する意味で静的サブストラクチャー法と呼ぶことになる。

式(5)より、静的サブストラクチャー法においては、切欠き地盤系では静的な地盤インピーダンスを介して切欠き地盤の変位を作用させ、自然地盤系では静的な地盤インピーダンスを介して自然地盤系の変位を作用させると同時に構造物と地盤のすべての接触面に切欠き力を作用させ、さらに切欠き地盤系、自然地盤系とも自然地盤の加速度による慣性力を作用させることになる。

静的サブストラクチャー法の計算手順を表-2に示す。

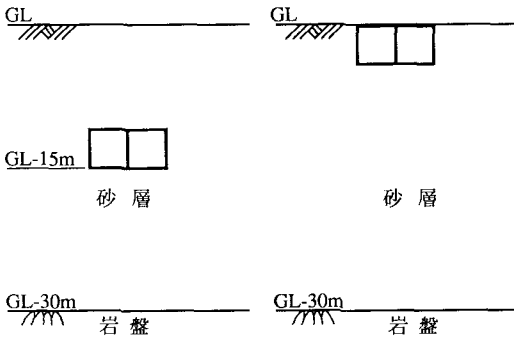
5. 応答変位法における地震荷重の作用方法の提案

前章において導いた静的サブストラクチャー法と既往の応答変位法の計算方法を比較して、応答変位法における地震荷重の作用方法について検討する。

表-4 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、 $\gamma_r = \sigma_v \tan \phi / G_0$ により拘束圧依存性を考慮



(a) モデル1 (土被りあり) (b) モデル2 (土被りなし)
図-4 地盤とダクトのモデル図

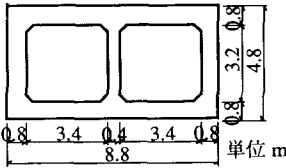


図-5 ダクトの構造図

表-3 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 $= 2.65 \times 10^7$ kN/m ²
ポアソン比	0.2
減 衰 定 数	0.05

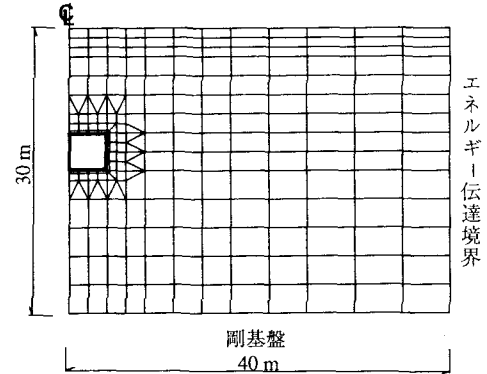


図-6 二次元的FEM解析モデル (土被りのあるモデル)

の作用方法として提案する。以下これを応答変位法(提案法)と呼ぶ。これにより、静的サブストラクチャー法と応答変位法(提案法)とは同じ地震荷重を作用させることとなり、両手法の違いは地盤インピーダンスと地盤ばねの違いのみとなる。

6. 数値解析による検証

前章までに検討した静的サブストラクチャー法および応答変位法の地震荷重の作用方法について数値解析により検証した。検証は、二次元動的FEM、静的サブストラクチャー法および応答変位法の三種類の耐震計算法により地中ダクトを解析し、地震時増分断面力を比較することにより行った。

(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(モデル1)と土被りのないモデル(モデル2)の二種類とした。地盤とダクトのモデル図を図-4に、ダクトの構造図を図-5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、剛域は考慮しなかった。ダクトの材料物性値を表-3に示す。

地盤については、砂層はせん断剛性の拘束圧依存性を考慮し、せん断剛性および減衰のひずみ依存性をH-Dモデル¹¹⁾により考慮した。岩盤は線形弾性体とした。地盤の物性値を表-4に示す。

入力地震動は、EL CENTRO NS波を最大加速度300 Galに基準化して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地盤の一次元重複反射解析を行い、自然地盤におけるダクト埋設位置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。以下に各耐震計算法について述べる。

a) 二次元動的FEM

二次元動的FEMはLysmerらにより開発された複素応答解析プログラム(FLUSH)¹²⁾を用いて行った。土被りのあるモデル(モデル1)の解析モデルを図-6に

表一5 解析ケース

耐震計算法		地震荷重
1	二次元動的 F E M	—
2	静的サブストラクチャー法	切欠き地盤系
3		自然地盤系
4		
5	応答変位法	新耐震
6		原子力
7		提案法

示す。境界条件は側方境界をエネルギー伝達境界，下方境界を剛基盤とし，一次元重複反射解析で得られた GL-30 m 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。

b) 静的サブストラクチャー法

静的サブストラクチャー法は表一2に基づいて3ステップで解析を行った。

入力動は，切欠き地盤系については，切欠き地盤の二次元動的 FEM 解析を行って求めた変位と，一次元重複反射解析により求めた加速度とした。自然地盤系については，一次元重複反射解析により求めた変位，せん断応力，加速度とした。

地盤インピーダンスは，切欠き地盤の二次元 FEM モデルにおいて剛性マトリックスをダクトと地盤の接触面の自由度に縮合して静的な地盤インピーダンスを求めた。

構造解析は，線形解析とし，切欠き地盤系と自然地盤系について行った。自然地盤系の解析では，地震荷重としての慣性力の必要性を調べるため慣性力を作用させないケースについても解析を行った。

c) 応答変位法

応答変位法は表一1に基づいて3ステップで解析を行った。

地震荷重は，一次元重複反射解析により求めた変位，せん断応力，加速度とした。

地盤ばねは，原子力土木構造物の耐震設計のための手引き書⁹⁾にしたがい，切欠き地盤の二次元 FEM モデルを用いてダクト各面ごとに等分布荷重を作用させて得られた変位から，直ばねおよびせん断ばねを算定した。

構造解析は，線形解析とし，応答変位法（新耐震）として変位のみ作用させるケース，応答変位法（原子力）として変位，上面地盤せん断力，底面水平反力および慣性力を作用させるケース，応答変位法（提案法）として前章で提案した自然地盤による変位および慣性力と同時に全接触面に地盤せん断力を作用させるケース，の3

ケースを解析した。

以上の三種類の耐震計算法の結果は，本論文が応答変位法の地震荷重の作用方法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，静的サブストラクチャー法および応答変位法の地震荷重はすべてのその時刻での応答結果を用いた。

解析ケースをまとめて表一5に示す。

(3) 解析結果

解析結果として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を図一7～図一10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。以下に考察を述べる。

a) 静的サブストラクチャー法について

まず，二次元動的 FEM の結果と切欠き地盤系および自然地盤系の静的サブストラクチャー法の結果を比較する（図一7参照）。同図より，曲げモーメント，軸力とも，三手法による解析結果はほぼ一致しており，前章で導いた静的サブストラクチャー法が切欠き地盤系，自然地盤系とも妥当なものであったことを示している。

次に，自然地盤系の静的サブストラクチャー法により地震荷重としての慣性力の必要性を調べるため，慣性力を考慮した結果と考慮しなかった結果を比較する（図一8参照）。同図より，土被りのあるモデルでは曲げモーメント，軸力とも慣性力の影響はほとんどなく慣性力を無視できるが，土被りのないモデルでは曲げモーメントにおいて慣性力の影響が全体の40%から50%程度占めており，土被りのないようなダクトでは慣性力が地震荷重として必要であることがわかる。

b) 応答変位法について

既往の応答変位法の地震荷重の作用方法について検討するため，自然地盤系の静的サブストラクチャー法の結果と応答変位法（新耐震）および応答変位法（原子力）の結果を比較する（図一9参照）。同図より，応答変位法（原子力）はダクト側壁の軸力を除いて自然地盤系の

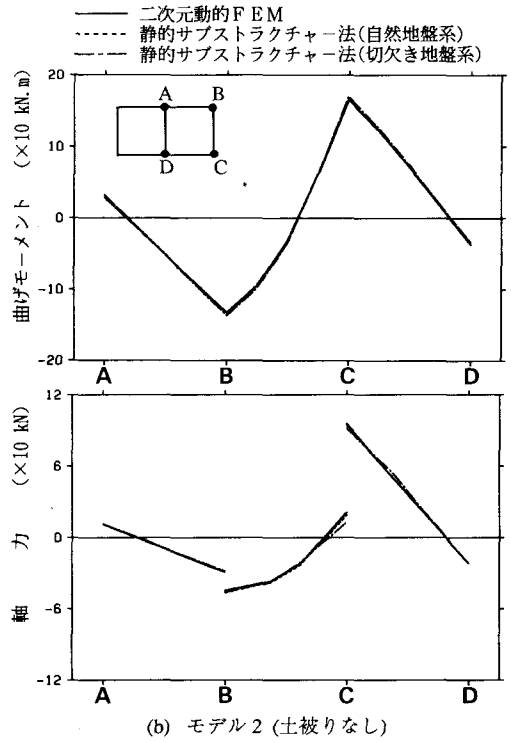
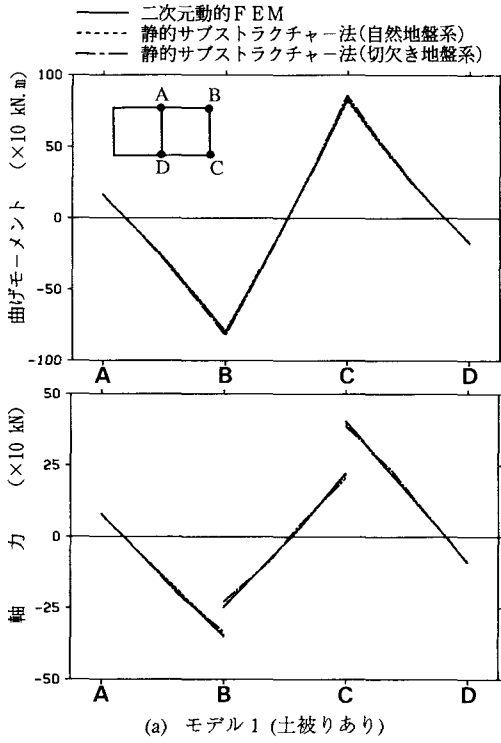


図-7 静的サブストラクチャー法の妥当性の検証

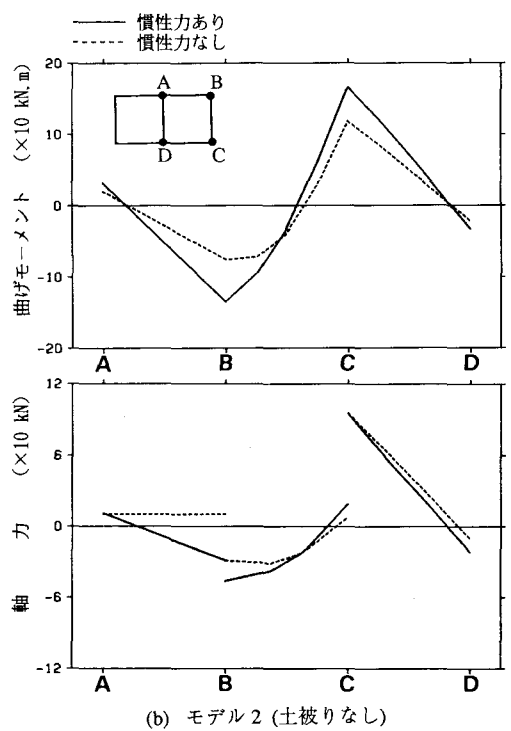
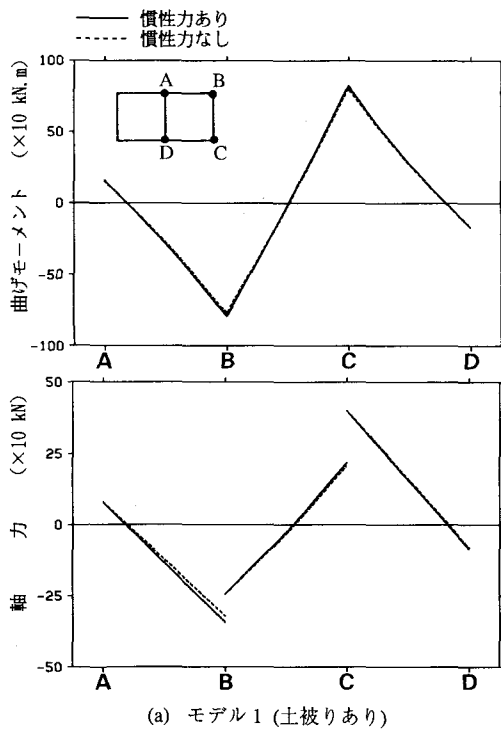


図-8 静的サブストラクチャー法(自然地盤系)による慣性力の影響の検討

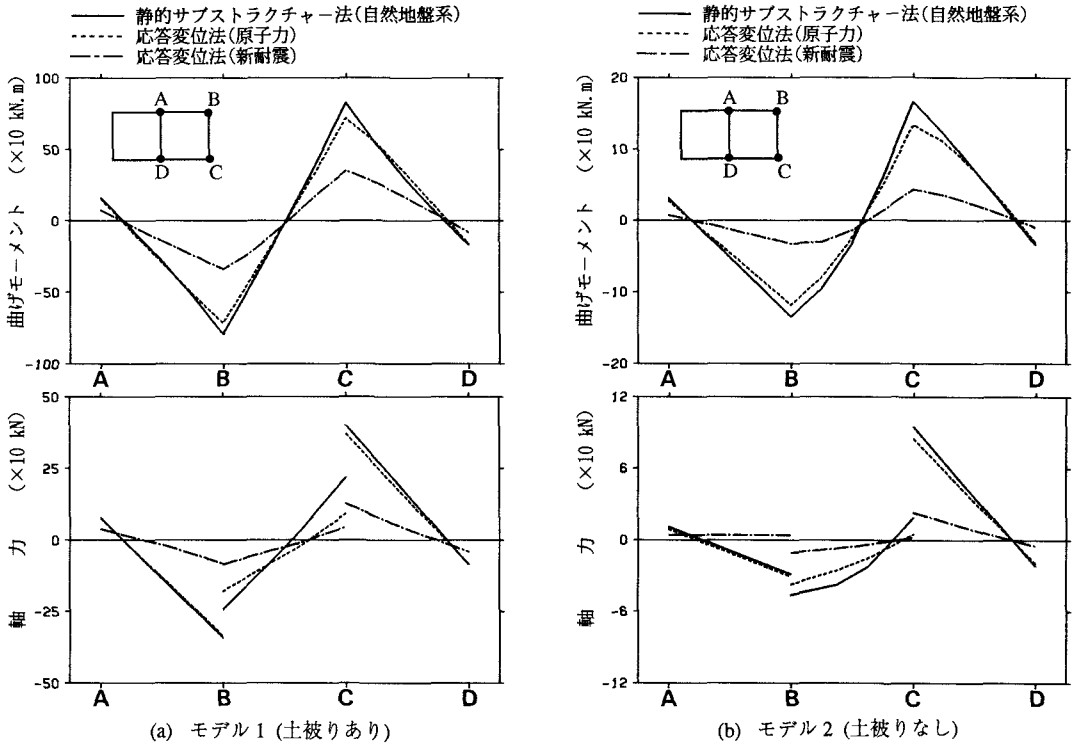


図-9 既往の応答変位法の検討

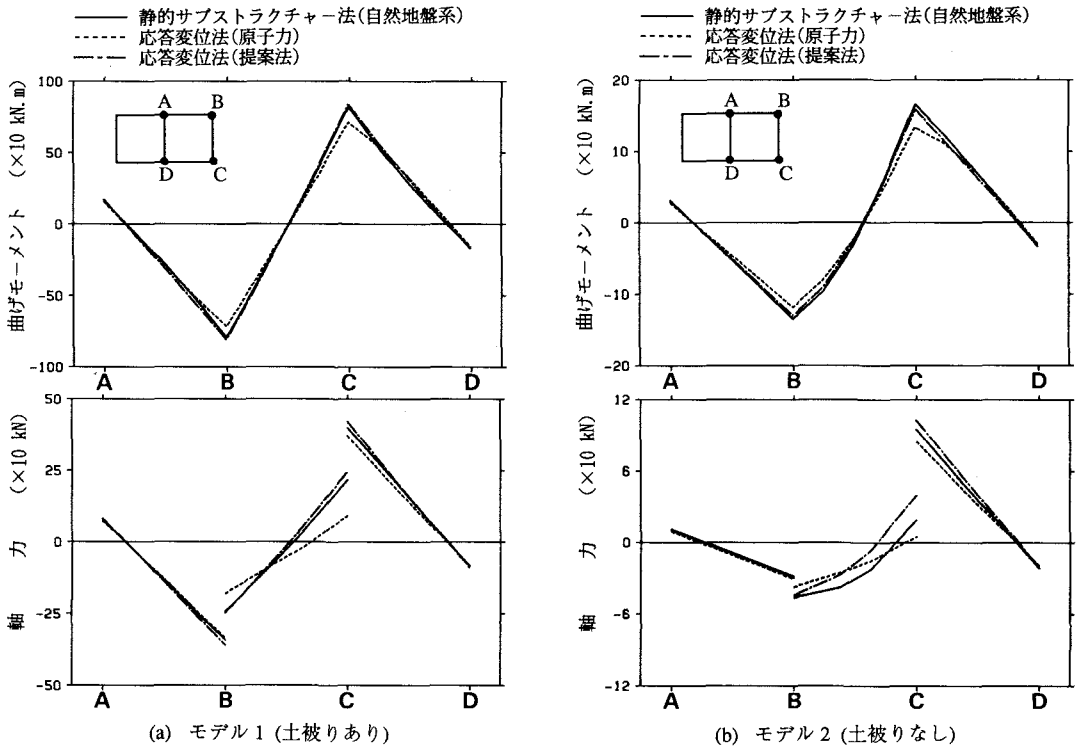


図-10 応答変位法における新しい地震荷重の作用方法の検証

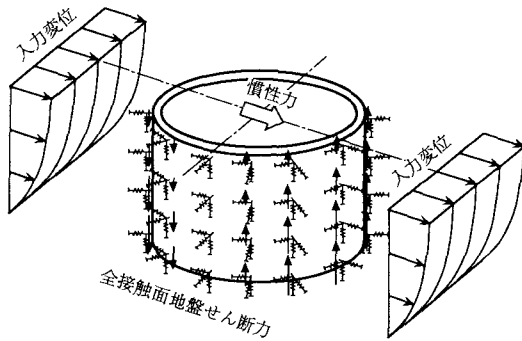


図-11 新しい地震荷重の作用方法による地下タンクの応変位法

静的サブストラクチャー法と曲げモーメント、軸力とも比較的良好一致している。これに対し、応変位法（新耐震）は自然地盤系の静的サブストラクチャー法に比べ曲げモーメント、軸力とも全般的に小さく、危険側となっていることがわかる。

次に、静的サブストラクチャー法の考え方を取り入れた応変位法（提案法）の妥当性を調べるため、自然地盤系の静的サブストラクチャー法の結果と応変位法（原子力）および応変位法（提案法）の結果を比較する（図-10参照）。同図より、応変位法（提案法）は、地盤インピーダンスと地盤ばねという違いがあるにもかかわらず、自然地盤系の静的サブストラクチャー法と曲げモーメント、軸力とも最大値および分布形状がよく一致していて、応変位法（原子力）より改善されている。これより、本論文で提案した応変位法の新しい地震荷重の作用方法が妥当なものであったことが示された。

7. 一般地中構造物の耐震計算法への拡張

最後に、本論文で提案した応変位法の新しい地震荷重の作用方法について、一般地中構造物への拡張を考える。

4章で示した静的サブストラクチャー法は地中構造物の断面方向を対象として導いた。しかし、その導出過程を振り返ると、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、したがって動的サブストラクチャー法より導いた静的サブストラクチャー法についても対象構造物がはじめに述べた地中構造物の地震時振動特性を満足するかぎり定式化のうえではあらゆる地中構造物の耐震計算に適用できることは明らかである。さらに、静的サブストラクチャー法との比較に基づいて5章で提案した応変位法（提案法）についてもまったく同様であり、断面方向にのみ限定されたものではない。

したがって、応変位法（提案法）は、任意の断面形状を有する地中構造物の断面方向の耐震計算だけではな

く、地中線状構造物の軸方向の耐震計算や、立坑、地下タンク等のすべての地中構造物の耐震計算にも応用でき、これによれば応変位法の地震荷重としては自然地盤で求められた地盤変位を地盤ばねを介して作用させると同時に、地盤応力に釣り合う切欠き力を構造物と地盤の全接触面に作用させ、さらに地盤加速度による慣性力を作用させることになる。参考として、地下タンクについてせん断波の鉛直入射を想定した場合の応変位法（提案法）による地震荷重の概念図を図-11に示す。

なお、応変位法（提案法）は構造物と地盤を連続体と仮定して導いたものであるため、構造物と地盤の接触面における剥離や滑動の影響等については別途検討が必要である。

8. まとめ

地中構造物の耐震計算法の一つであるフレーム-地盤ばねモデルの応変位法の地震荷重の作用方法について、サブストラクチャー法に基づき理論的解明を試みた。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より、地中構造物の地震時振動特性に基づいて静的な耐震計算法である静的サブストラクチャー法を導いた。静的サブストラクチャー法には、構造物を空洞に置き換えた切欠き地盤において入力動である地盤変位を求める切欠き地盤系と、構造物の存在を考えない自然地盤において入力動である地盤変位および地盤応力を求める自然地盤系の二通りの方法があり、いずれの方法でも自然地盤において求めた地盤加速度による慣性力を考慮する。

(2) 切欠き地盤系の静的サブストラクチャー法と新耐震設計法（案）による応変位法との比較、および自然地盤系の静的サブストラクチャー法と原子力土木構造物のための応変位法との比較から、静的サブストラクチャー法と応変位法は計算手順および地震荷重の作用方法が酷似しており、応変位法がサブストラクチャー法の一種であることがわかった。

(3) 静的サブストラクチャー法との比較から、応変位法における地震荷重の作用方法については次の二通りの方法があることがわかった。すなわち、地震荷重として地盤変位のみを考える場合は切欠き地盤において求めた地盤変位を地盤ばねを介して作用させる。地震荷重として地盤変位と地盤応力を考える場合は自然地盤において求めた地盤変位を地盤ばねを介して作用させると同時に、地盤応力に釣り合う切欠き力を構造物と地盤の全接触面に作用させる。いずれの場合も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ようなときには自然地盤において求めた地盤加速度による慣性力を作用させる。

(4) 応変位法が設計実務のための簡便な地中構造

物の耐震計算法であるという観点から、自然地盤より求めた地盤変位、地盤応力、地盤加速度に基づく作用方法を応答変位法における新しい地震荷重の作用方法として提案した。

9. おわりに

地中構造物の地震観測や模型振動実験の結果から実用的な耐震計算法として生み出された応答変位法について理論的な解明を試みた。コンピューターの発展とともに動的解析による耐震計算の要請は増えつつあるが、地中構造物の耐震計算についてはより簡便でかつ動的解析と遜色ない結果の得られる応答変位法が今後も設計実務では用いられていくものと考えられる。そのためには、地盤ばねの算定法の問題や、応答変位法の適用限界の問題がまだ残されており、これらは今後の課題としたい。また、静的サブストラクチャー法の考え方にに基づき、地中線状構造物の軸方向や地下タンクなどの耐震計算法についても今後検討を加えていきたい。

参考文献

- 1) 桜井彰雄ほか：地震時土の歪より見た埋設パイプラインの耐震性，電力中央研究所報告，No. 69087，1970年4月。
- 2) Tamura, C. et al. : Dynamic behavior of a submerged

tunnel during earthquakes, Report of the Institute of Industrial Science, Vol.24, No.5, University of Tokyo, 1975.

- 3) 浜田政則：大型地下タンクの地震時挙動の観測と解析，土木学会論文集，第273号，pp.1~14，1978年5月。
- 4) 藍田正和ほか：原子力発電所土木構造物の耐震設計に関する一考察，電力土木，No.225，pp.89~95，1990年3月。
- 5) 立石章ほか：サブストラクチャー法にもとづく応答変位法に関する一考察，土木学会第41回年次学術講演会講演概要集第I部，pp.1119~1120，1986年11月。
- 6) 建設省：新耐震設計法（案），1977。
- 7) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，1979年版。
- 8) 首都高速道路技術センター：沈埋トンネルの設計施工に関する調査研究（その3）報告書，1987年。
- 9) 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，1985年8月。
- 10) 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。
- 11) Hardin, B.O. and Drnevich, P. : Shear modulus and damping in soils : design equation and curves, Proc. of ASCE, Vol.98, SM7, pp.667~692, 1972.
- 12) Lysmer, J. et al. : FLUSH - A computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problem, EERC75-30, University of California Berkeley, 1975.

(1991. 3. 29 受付)

A STUDY ON LOADING METHOD OF SEISMIC DEFORMATION METHOD

Akira TATEISHI

Based on the characteristics of dynamic behavior of underground structures, the author derives the substructure method for a static seismic design from the dynamic substructure method. It is found that seismic deformation method of a frame-spring model commonly used in seismic design for underground structures is a kind of the static substructure method. In comparison of both methods, it is theoretically verified that the loads in seismic deformation method are insufficient. Accordingly the author proposes the new loading method for seismic deformation method. In the proposed method, displacement, stress and acceleration are obtained in the free field motion during the earthquake, and then not only ground displacements are subjected through soil-springs, but ground stresses are subjected to every interface between structure and ground, moreover inertia force of structure by ground acceleration is taken into consideration. The validity of the proposed method is verified through dynamic FEM analyses.