

# 大規模地震に対する地中構造物の耐震設計に関する考察

大塚久哲<sup>1</sup>・久納淳司<sup>2</sup>・田中努<sup>3</sup>・橋義規<sup>4</sup>

<sup>1</sup>フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究科建設システム工学専攻 (〒810-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

<sup>2</sup>正会員 工修 九州大学大学院工学研究科建設システム工学専攻 (〒810-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

<sup>3</sup>フェロー 工修 (株)オリエンタルコンサルタンツ 品質管理室 (〒150-0002 渋谷区渋谷1-16-14)

<sup>4</sup>正会員 工修 (株)オリエンタルコンサルタンツ 東京事業本部 (〒213-0011川崎市高津区久本3-5-7)

1995年兵庫県南部地震では、地中構造物にも崩壊に至るような重大な被害が生じ、また強い地震動が各地で観測されたことから、大規模地震を想定した地中構造物の耐震設計法の確立が望まれている。

本研究は地盤及び構造物の非線形性を考慮した、2次元FEMによる非線形動的解析と、設計実務で使用されている地盤慣性力に基づく応答変位法による結果を比較して、同法の適用性を検証したものである。数値解析結果によれば、同法が等価線形化法により地盤定数等を決定することから、等価線形化法が適用可能な地盤ひずみを生ずる地震動の大きさであれば、非線形動的解析との差は小さく、同法は十分に実用に供することが判明した。

**Key Words :** Underground Structures, Response displacement Method, 2-D FEM, Static and dynamic Analysis

## 1. はじめに

地中構造物の横断方向の耐震設計法としては、従来梁ばねモデルによる応答変位法が一般的であった。しかし、2次元FEMモデルを用いた種々の手法が提案され、FEM解析が比較的手頃に行える環境になってきたことを受けて、設計実務においてもFEMモデルによる応答変位法が使用されるようになってきている。

一方、1995年兵庫県南部地震では、地中構造物にも崩壊に至るような重大な被害が生じ、また強い地震動が各地で観測されたことから、大規模地震を想定した地中構造物の耐震設計法の確立が望まれている。

本研究は地盤及び構造物の非線形性を考慮した2次元FEMによる非線形動的解析と、筆者らが提案するFEMモデルを用いた応答変位法<sup>1)</sup>による結果を比較し、同法の適用性を検証するとともに、大規模地震による強い地震動が作用したときの地中構造物の動的挙動を明らかにすることを目的としている。

## 2. 地盤慣性力に基づく応答変位法の概要

地盤慣性力に基づく応答変位法（以下慣性力変位法と略称する）は、FEMモデルにより静的解

析を行うもので、図1に示す順序で行う。この手法では、1次振動による加速度分布から求めた慣性力をモデル全体に与えることで、地盤の1次振動による変位分布を再現する。地盤は線形モデルで、地震時の物性値は、FEM解析に先だってSHAKEによる地震応答解析等で設定しておく。

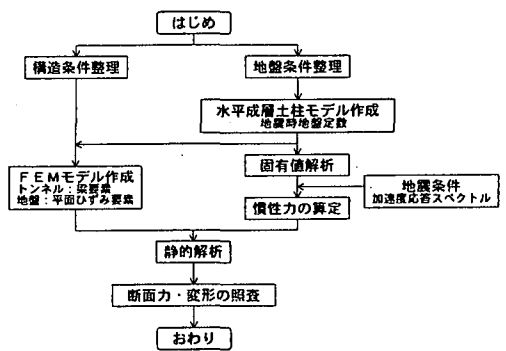


図1 地盤慣性力に基づく応答変位法の流れ

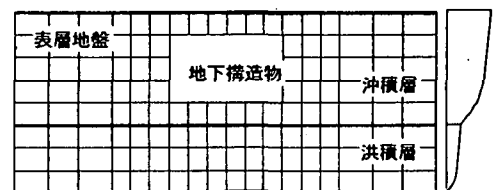


図2 FEMモデルと荷重作用概念

### 3. 解析条件

#### (1) 検討手順

検討は表1に示すステップ1～5の順に行った。各ステップの目的は検討結果に併せて示す。

表1 検討条件の一覧表

| ステップ | 解析手法       | 地盤   | 構造物 |
|------|------------|------|-----|
| 1    | 自由地盤の動的解析  | 等価線形 | なし  |
|      |            | 非線形  |     |
| 2    | 慣性力変位法動的解析 | 線形   | 線形  |
|      |            |      |     |
| 3    | 動的解析       | 線形   | 線形  |
|      |            | 非線形  |     |
| 4    | 動的解析       | 線形   | 線形  |
|      |            |      | 非線形 |
| 5    | 慣性力変位法動的解析 | 線形   | 線形  |
|      |            | 非線形  | 非線形 |

注：地盤の線形モデルでは収束物性値，非線形モデルではR-Oモデルを用いる。構造物の線形モデルでは降伏剛性，非線形モデルでは武田型の履歴モデルを用いる。

#### (2) 構造及び地盤の諸元

図3に示すようなRC製の2連ボックスカルバートが，図4に示すような地層条件を有する層厚25.2mの水平成層地盤に建設された場合を検討対象とした。解析に用いた微小ひずみ時のせん断弾性波速度は，N値より設定した。

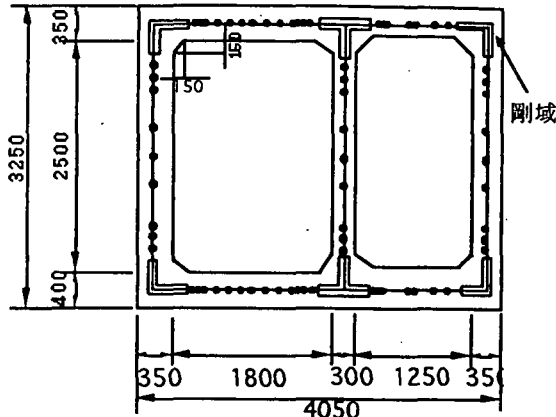


図3 検討対象構造物

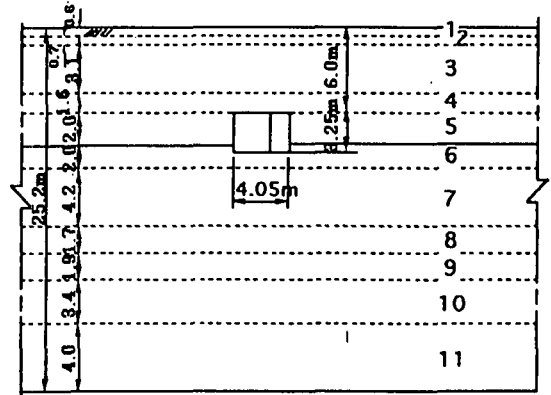
#### (3) 解析モデル

図5に示すように検討対象地盤を平面ひずみ要素で，構造物を梁要素でモデル化した。側方境界は水平ローラ，下方境界は固定とした。

地盤の非線形性は，等価線形化手法により算出した収束物性値を用いたモデルと履歴モデルの2ケースを考慮した。等価線形化手法では図6に示すひずみ依存曲線を考慮した<sup>2)</sup>。履歴モデルのせん断応力-せん断ひずみ関係は，Ramberg-Osgood

モデルを用い，図6のひずみ依存特性からパラメータを決定した。

構造物の非線形履歴モデルには，骨格曲線がトリリニアである武田モデルを用いた。壁構造における横拘束筋の効果に関しては十分な研究の蓄積がないので，M-φ関係はH2道示の応力-ひずみ関係を用いた。



| 層番号 | 単位体積重量 (tf/m <sup>3</sup> ) | N値 | 土質特性 | せん断波速度 (m/s) |
|-----|-----------------------------|----|------|--------------|
| 1   | 1.70                        | 4  | S    | 127          |
| 2   | 1.40                        | 4  | C    | 159          |
| 3   | 2.00                        | 30 | S    | 249          |
| 4   | 1.80                        | 8  | C    | 200          |
| 5   | 2.00                        | 32 | S    | 254          |
| 6   | 2.00                        | 35 | S    | 262          |
| 7   | 2.00                        | 50 | S    | 295          |
| 8   | 2.00                        | 19 | C    | 267          |
| 9   | 2.00                        | 50 | S    | 295          |
| 10  | 2.00                        | 19 | C    | 267          |
| 11  | 2.00                        | 23 | C    | 284          |

図4 検討対象地盤の特性

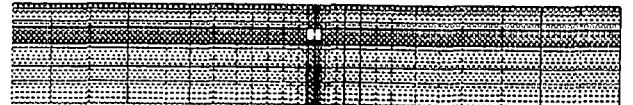


図5 解析モデル

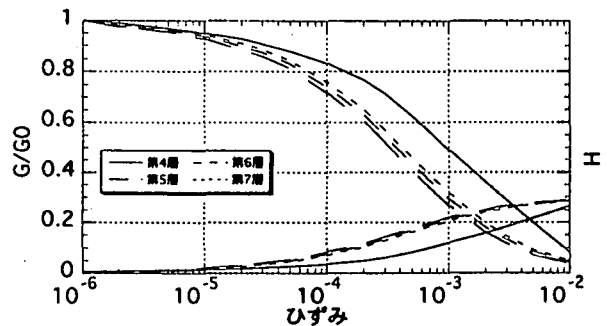


図6 地盤のひずみ依存曲線

#### (4) 入力地震動

入力地震動は図7，8に示すA，Bの2波を用いた。両地震波の加速度応答スペクトルは，相対的にA波は長周期側が優勢で，B波は短周期が優勢な特性となっている。

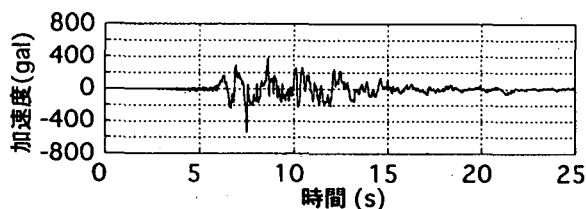


図7 入力地震動 (A波)

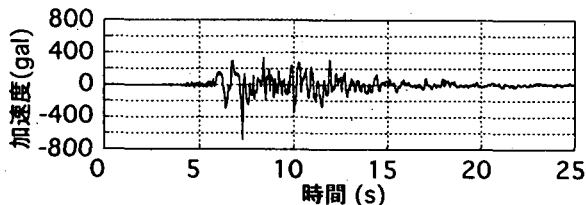


図8 入力地震動 (B波)

## 4. 結果の比較

### (1) ステップ1

地震時の地盤物性値は、等価線形化による解析で算定するのが一般的である。ステップ1では、構造物を含まない自由地盤モデルを用いて、等価線形化手法 (SHAKE) と非線形解析 (R-Oモデル) による地盤応答値の比較を行い、等価線形化法の適用性について検討を行った。

図9は両解法における最大ひずみの深さ方向分布を比較して示したものである。A波入力でのひずみは地表面近傍をのぞいてほぼ両解析法で同様であるが、B波入力ではGL-6～10mで両者に大きな差が生じ、等価線形化法では1%を超えるひずみが生じている。これに伴い、地盤変位もこの深さで急激に増大している。0.5%程度までのひずみに対しては、等価線形化と非線形解析では大差ないことから、今回の解析条件では、この程度のひずみレベルまでは、等価線形化法でも精度の良い評価ができていられるものと考えられる。

なお、等価線形化法で大きなひずみが生じている地層は、N値50の砂層の直上にあるN値32、35の砂層である。堅固な地層の直上にはひずみが集中しやすいことに加え、B波が比較的短周期にも卓越する成分を有していることから、中間の堅固な層より上で増幅されやすく、大きなひずみが発生したものと考えられる。

### (2) ステップ2

ステップ2は、荷重の作用形態の違い (動的、静的) や地盤の高次振動の影響を把握するために、地盤および構造物の同一モデルに対して、慣性力変位法と線形動的解析を行い、解析法の違いによる差を調べたものである。図11はA波入力の結果である。ここで、応答変位法の載荷方向は左から右の1ケースのみであるため、動的解析の断面力は同一符号のものを比較する。同図によれば、構造物の変位、断面力ともに顕著な差は現れておらず、静的荷重と動的荷重の違いや高次モードの影

響は大きくないことがわかる。

### (3) ステップ3

ステップ3は、地盤の物性値としてSHAKEによる収束値を用いる場合と、逐次非線形モデルで評価する場合の差を動的解析により確認したものである。ステップ1の結果で、等価線形モデルと非線形モデルで地盤変位に差が生じていないA波入力に対する解析結果を図12に示した。ここで動的解析どうしの比較では、図が煩雑とならないよう絶対値が最大となるものをプロットしている。

同図によれば構造物の変位及び曲げモーメントの差はわずかであるが、せん断力に関しては、地盤を非線形モデルとした方が大きくなり、その差は隅角部で大きくなっている。

非線形モデルでは、構造物の変形の影響で周囲の地盤の応力とひずみが影響を受け、それが再度構造物の変形に影響を及ぼすことになる。特に、地盤ひずみが小さい場合や構造物が剛な場合等、地盤とトンネルの剛性が大きく異なる場合は相互作用の影響が大きく現れる可能性がある。しかし、図12を見る限りでは、一般的な地中構造物の大規模地震時の挙動においては、相互作用の影響は大きくない。

### (4) ステップ4

ステップ4は、構造物を線形モデル (降伏剛性) とした場合と、非線形モデル (武田型の履歴モデル) とした場合について動的解析を行い、構造物の非線形性の影響について検討したものである。構造物の変形が大きくなり非線形域に入ること、さらに変形が進むことが考えられるが、この計算例では構造物の塑性化は顕著ではなく、結果として断面力の差も大きくなかった。

### (5) ステップ5

ステップ5では、慣性力変位法と非線形動的解析結果を比較し、大規模地震時における慣性力変位法の適用性について検討した。図13に示すように、慣性力変位法は非線形動的解析に比べ断面力を小さめに評価している部位があるものの、両解析手法の差はそれほど大きくない。

ステップ2～4に示したように、個々の条件の違いが構造物の変形や断面力に与える影響は小さかった。その結果、ステップ2～4で比較した条件の違いがすべて含まれるステップ5でも、差がそれほど大きくない。

## 5. おわりに

慣性力変位法は、一般的には等価線形化法により地盤定数等を決定することから、これが適用可能な地盤ひずみを生ずる地震動の大きさであれば、非線形動的解析との差は小さく、同法は十分に実用に供することが判明した。

なお、本研究における慣性力変位法では、構造

物の剛性として降伏剛性を用いたが、構造物の変形が大きく、塑性率の算定等が必要な場合は、構造物の復元力特性を非線形モデルとして解析することが可能である。

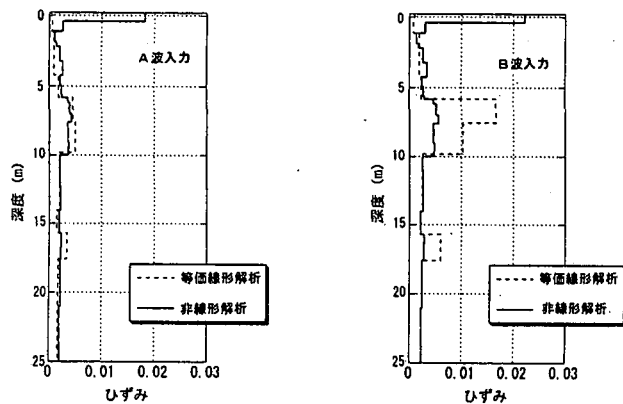


図9 最大ひずみの深さ方向分布

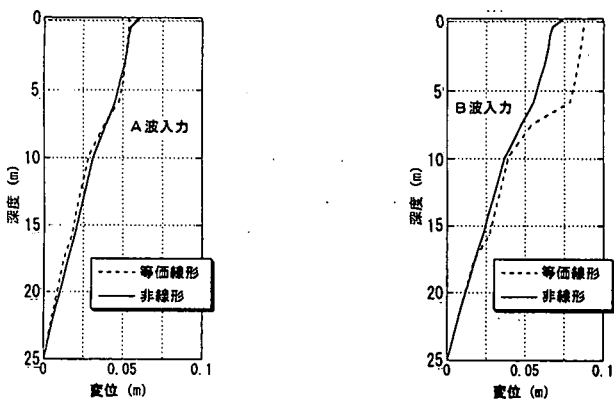


図10 変位の深さ方向分布

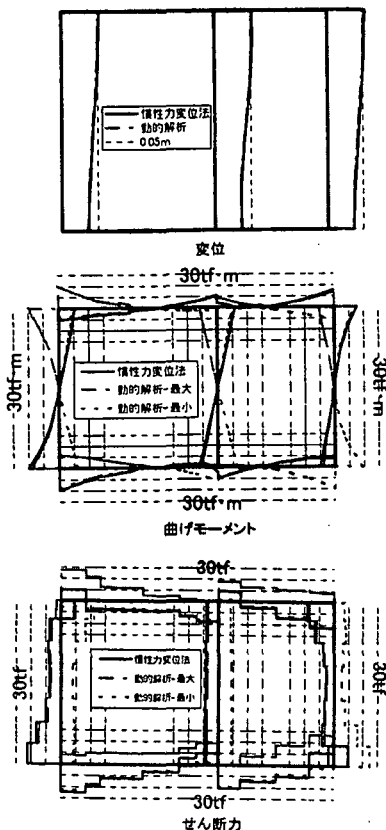


図11 ステップ2の解析結果 (A波入力)

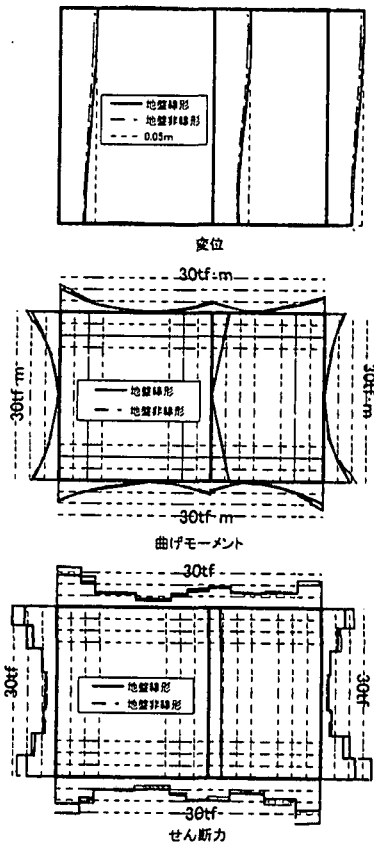


図12 ステップ3の解析結果 (A波入力)

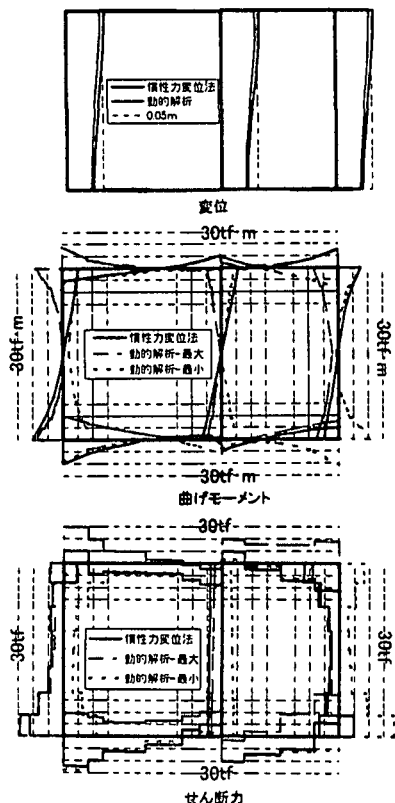


図13 ステップ5の解析結果 (A波入力)

参考文献

- 1) 大塚・星隈・村井・田中・橘：地盤慣性力に基づく応答変位法を用いた地下構造物横断方向の耐震設計法，土木学会第52回年次学術講演会，pp.906-907，1997.9.
- 2) 建設省土木研究所：地盤の地震時応答特性の数値解析法，第1778号，