

応答変位法を用いた地下構造物の耐震検討について

大阪市交通局
(財)大阪市交通事業振興公社
中央復建コンサルタンツ(株)
京都大学防災研究所

太田 擴*
西田 允俊**
北嶋 武彦***
佐藤 忠信****

従来地下構造物は地上の構造物に比較して耐震安全性が高いと考えられてきた。しかし、兵庫県南部地震では地下構造物の一部に大きな被害が見られたことから、耐震設計の見直しの必要性が指摘されている。地下構造物の耐震設計は、地震時の地盤変位を考慮した応答変位法により行われることが多いが、応答変位法に用いる地震時の地盤変位、地盤ばね、周面せん断力等についてはいろいろな考え方があつた。本論文では、応答変位法に用いる地盤変位の考え方や地盤ばねの値が解析結果に与える影響を、2次元動的FEM解析と比較することによって検討し、地盤ばねの設定が解析結果に大きく影響することを示すとともに、地盤ばねを直接算出しない手法として、静的FEMモデルを用いた応答変位法の提案を行い、同手法を用いて地盤～構造物間のすべり・剥離を考慮した耐震検討結果を報告する。

1. はじめに

地下構造物は地上の構造物に比較して耐震安全性が高いと考えられており、部材断面も常時の設計で決定される場合がほとんどであった。しかし、兵庫県南部地震で一部の地下構造物に大きな被害が発生したのを契機に、種々の新設および既設の地下構造物について地震に対する検討が行われている。地下構造物の耐震検討は、動的解析あるいは静的解析と様々な方法で行われるが、地下構造物の振動特性からいずれも地震時の地盤の挙動を考慮した耐震解析手法である。そのうち、地下構造物の耐震検討手法として最も多く採用されている手法は応答変位法であると考えられる。応答変位法は、地震時の構造物の挙動は地盤の挙動に支配されると考え、地震時の地盤変位を構造物に静的に作用させる耐震検討手法である。応答変位法を用いて地下構造物の耐震検討が盛んに行われているが、その際考慮する地震時の地盤変位、地盤

ばね、地盤～構造物に作用するせん断力等について検討されたものは少ない。本論文は、応答変位法の解析結果と2次元FEM動的応答解析結果とを比較することによって、応答変位法に用いるこれらの定数等について検討を行い、応答変位法の合理的な解析手法の提案を行うものである。

2. 検討条件

(1) 検討に用いた地盤条件

本検討では、図-1. に示す3つの異なる地盤条件について2次元FEM動的応答解析と応答変位法による解析を行い、両者を比較することによって応答変位法に用いる諸定数の検討を行った。

なお、地盤の非線形性は等価線形化法により考慮した(N値30の一様地盤は弾性体とした)。

(2) 検討に用いた入力地震波

比較解析に用いた入力地震波は、大阪市民局で検討された大阪市暫定地震波1)とした。これは大阪市中心部に伏在する上町断層、北部の仏念寺山断層および南部の長居断層が連動して動く場合の地震波を想定して作成されたものであり、兵庫県南部地震で観測されたポートアイランドGL-83m(N/S)強震記録をもとに、地域別に洪積層上面(設計基盤

キーワード：耐震設計、応答変位法、FEM解析

* 大阪市交通局建設技術本部, 06-585-6641

** (財)大阪市交通事業振興公社, 06-581-9550

*** 中央復建コンサルタンツ(株), 06-393-1106

**** 京都大学防災研究所, 0774-32-3111

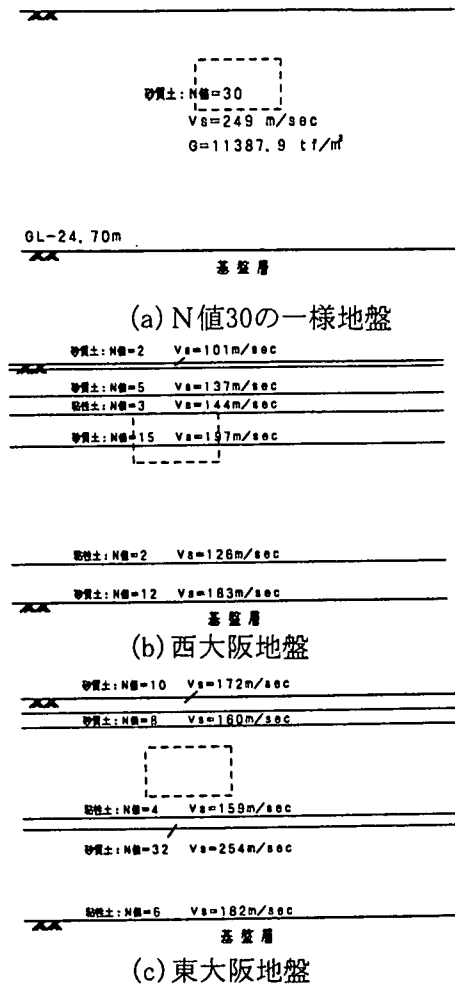


図-1. 検討に用いた地盤条件

面(上面)の地震波形として与えられたものである。計算に用いた暫定地震波の概要を図-2. に示す。

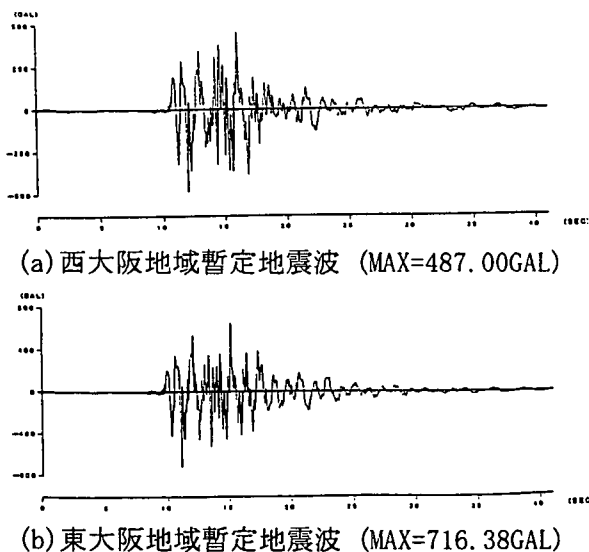


図-2. 解析に用いた入力地震動

(3) 検討構造物

検討構造物は、土被りが5mの一般的な地下鉄

開削トンネルとし、動的応答解析と応答変位法の比較解析では、部材はすべて線形弾性体として取り扱った。構造物部材の概要を図-3に示し、比較解析の解析条件を表-1に示す。

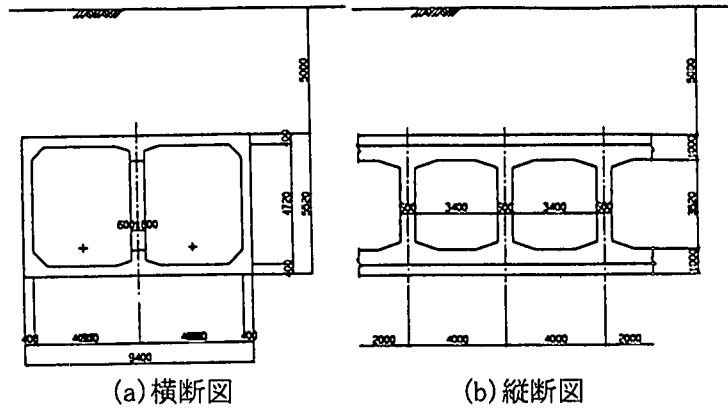


図-3. 検討構造物

表-1. 比較解析の条件

地盤条件	入力地震波	地盤非線形性	構造物非線形性
N値30一様地盤	西大阪地域暫定地震波	線形弾性体	線形弾性体
西大阪地盤	西大阪地域暫定地震波	等価線形化法により非線形性を考慮	
東大阪地盤	東大阪地域暫定地震波	等価線形化法により非線形性を考慮	

2. 応答変位法の基本的考え方

地下構造物の振動特性として、以下の2点が一般的に上げられる。

①地下構造物のみかけの単位体積重量は一般に周辺地盤の単位体積重量よりも小さいか同程度であることが多い。したがって、地下構造物に作用する慣性力は一般に小さい。

②地下構造物は周辺を地盤によって取り巻かれているため、逸散減衰が非常に大きい。したがって、地下構造物が周辺地盤に対して相対的な振動を起こしたとしても、すぐ小さくなってしまふ。

このように、一般の地下構造物では、もともと地盤に対して相対的な振動を起こしにくいというに、一度起こった振動もすぐ収まってしまふ。このため、地下構造物は、地震時に地盤に変位や変形が生じると、それに従うように、周りに引きずられて運動する。このことにより地下構造物の耐震検討は地盤の変位に着目した解析を行うことが必要であると一般に指摘されている。

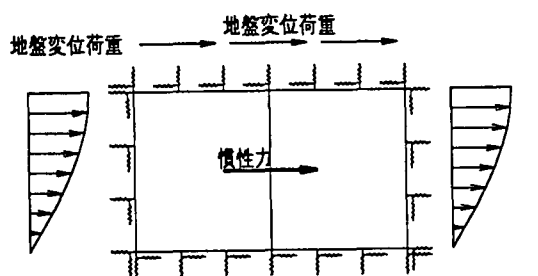
応答変位法とは、地下構造物の地震時挙動は地

盤の振動に追従すると考え、地盤変位をばねを介して構造物に載荷することによって地震時断面力を静的に解析しようとする耐震計算法である。

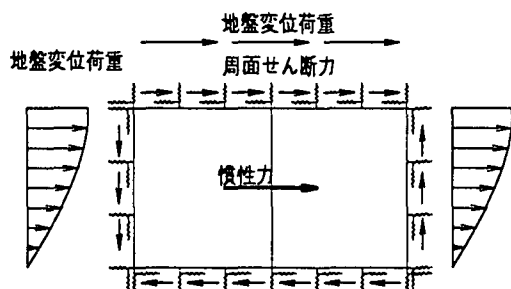
応答変位法で考慮する荷重は、一般に、

- ・地盤変位荷重：地震時の地盤変位を地盤ばねを介して構造物に載荷する
- ・周面せん断力：地盤～構造物間に作用するせん断力
- ・慣性力

の3種である。これらの荷重の取り方および骨組モデルは種々提案されているが、本論文では図-4に示す2種のモデルを応答変位法の基本モデルとした。



(a) 空洞地盤の変位を用いる場合



(b) 自然地盤の変位を用いる場合

図-4. 応答変位法の解析モデル

ここで、自然地盤とは構造物がない状態の地盤を言い、空洞地盤とは自然地盤から構造物を取り去った空洞状態の地盤を言うものとする。図-5のように考えると、空洞地盤の変位を作用させる荷重状態は、自然地盤の変位 δF を作用させると同時に、自然地盤に生じるせん断応力を作用させるのと同じ状態ということになる。2)

3. 応答変位法に用いる荷重

(1) 地盤変位荷重

地震時に生じる地盤の変位を構造物周りに設置

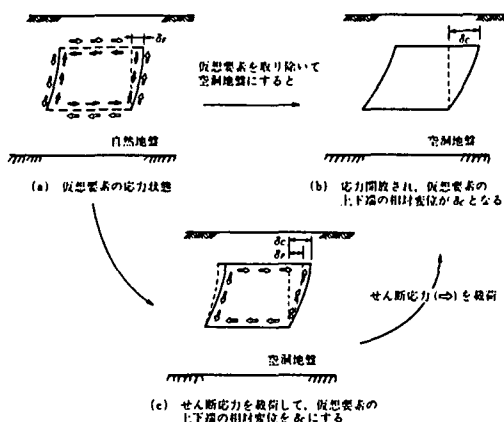
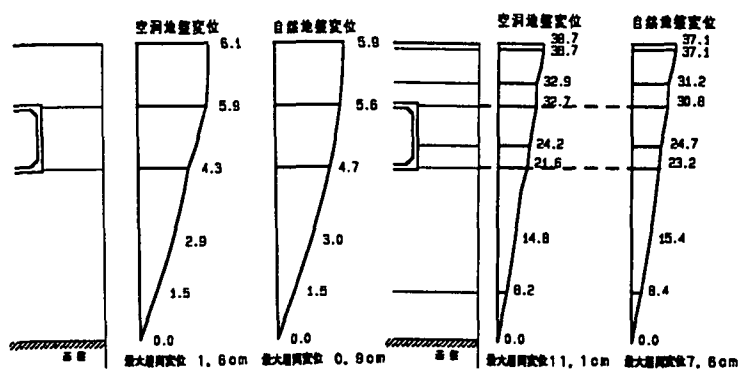


図-5. 応答変位法に用いる地盤変位荷重

した地盤ばねを介して載荷する。地震時の地盤変位は、地盤の応答解析により求め、構造物上下床版位置の最大相対変位を載荷する。本論文では、自然地盤の変位および空洞地盤の変位の2種の地盤変位を取り扱っており、

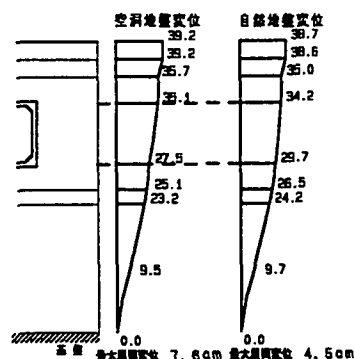
自然地盤の変位；1次元の地盤応答解析

空洞地盤の変位；2次元FEMモデル応答解析により求める。各地盤条件で得られた自然地盤および空洞地盤の最大相対変位が生じる時刻の変位分布図を図-6に示す。



(a) N値30一様地盤

(b) 西大阪地盤



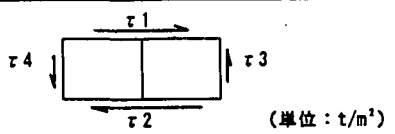
(c) 東大阪地盤

図-6. 地震時地盤変位

(2) 周面せん断力

自然地盤の変位を用いる場合に考慮する荷重であり、1次元の地盤応答解析により求める。構造物に載荷するせん断力は前項で求めた地盤変位が最大となる時刻のせん断力とした。なお、鉛直方向の周面せん断力 (τ_3, τ_4) は、構造物位置に生じる地盤の水平方向せん断力と同値とした。

表-2. 周面せん断力



地盤条件	τ_1	τ_2	τ_3, τ_4
N値30一様地盤	11.16	27.76	19.67
西大阪地盤	2.68	5.87	4.46
東大阪地盤	5.66	11.11	8.53

(3) 慣性力

地盤の相対変位が最大となる時刻に構造物位置に生じる応答加速度に対する慣性力を考慮する。

慣性力による影響は後の計算結果に示すように一般に極小さい。したがって、本論文では構造物位置の地盤に作用する平均応答加速度から求めた。

表-3. 慣性力

地盤条件	構造物位置応答加速度
N値30一様地盤	1290gal
西大阪地盤	270gal
東大阪地盤	538gal

4. 空洞地盤の変位と自然地盤の変位の関係

図-7に示すように、空洞地盤の2次元FEMモデルの各要素節点に、自然地盤の変位を強制変位で与えるとともに、表-2に示した周面せん断力を外力として与える。

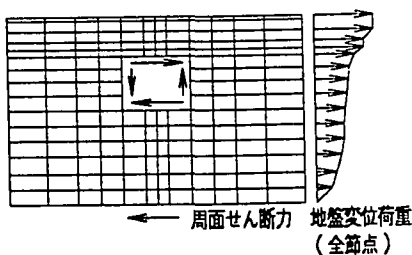


図-7. 空洞地盤の2次元FEMモデル

上記の解析結果と2次元FEMモデルで空洞地盤の応答解析を行って得られた空洞まわりの地盤変位の解析結果を図-8に示す。

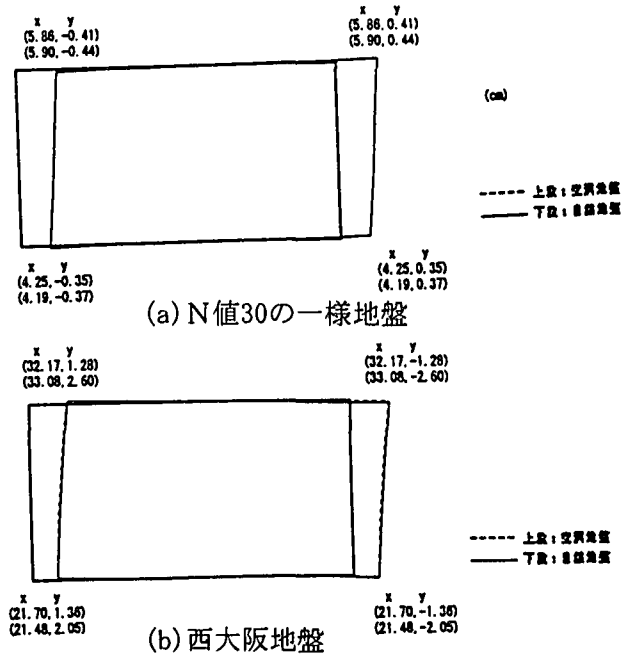


図-8. 空洞地盤と自然地盤の比較解析結果

図-8に示すように、空洞地盤の変位は自然地盤の変位と空洞周面位置に作用するせん断力の和にほぼ等しい。

5. 地盤ばね値の検討

地盤ばねの算定方法は種々提案されているが、ここでは以下の3種の地盤ばねの算定方法により得られた地盤ばねの比較を行う。

□手法1；静的FEMモデルに構造物(剛体)を設置し、剛体を強制変位させることによって各要素に生じる増加応力と変位量から地盤ばねを求める方法。解析に用いる地盤の変形係数は、地盤の応答解析で得られた、ひずみによる剛性低下を考慮したせん断剛性Gから求める。

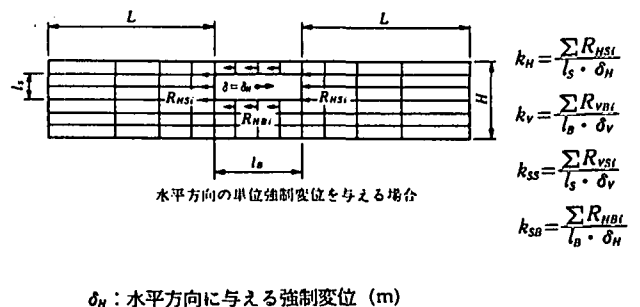


図-9. 地盤ばね算出手法1

□手法2；構造物を除いた2次元FEMモデルに、求めたい方向に単位荷重を作用させ、得られる荷重-変位量関係から地盤ばねを求める方法（地盤の変形係数は、手法1と同様）。

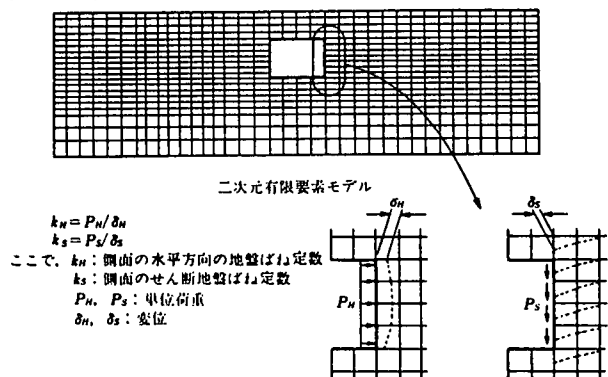


図-10. 地盤ばね算出手法2

□手法3；「国鉄建造物設計標準 基礎構造物および抗土圧構造物」により、次式から地盤ばねを算出する（地盤の変形係数は、手法1と同様）。

鉛直ばね $k = 0.5 \alpha s \alpha E_0 B h^{-3/4}$ (Bh : トンネル高さ)

水平ばね $k = 0.2 \alpha E_0 B v^{-1/2}$ [砂質土]

$k = 1.2 \alpha E_0 B v^{-1}$ [粘性土]

(Bv : トンネル幅)

図-11に各手法による地盤ばねの算出結果を比較する。比較結果を整理すると以下の傾向が見られた。

①算出方法によってばね値に大きな差が見られた。

②手法3のばね値が最も大きく算出される傾向

が見られた。

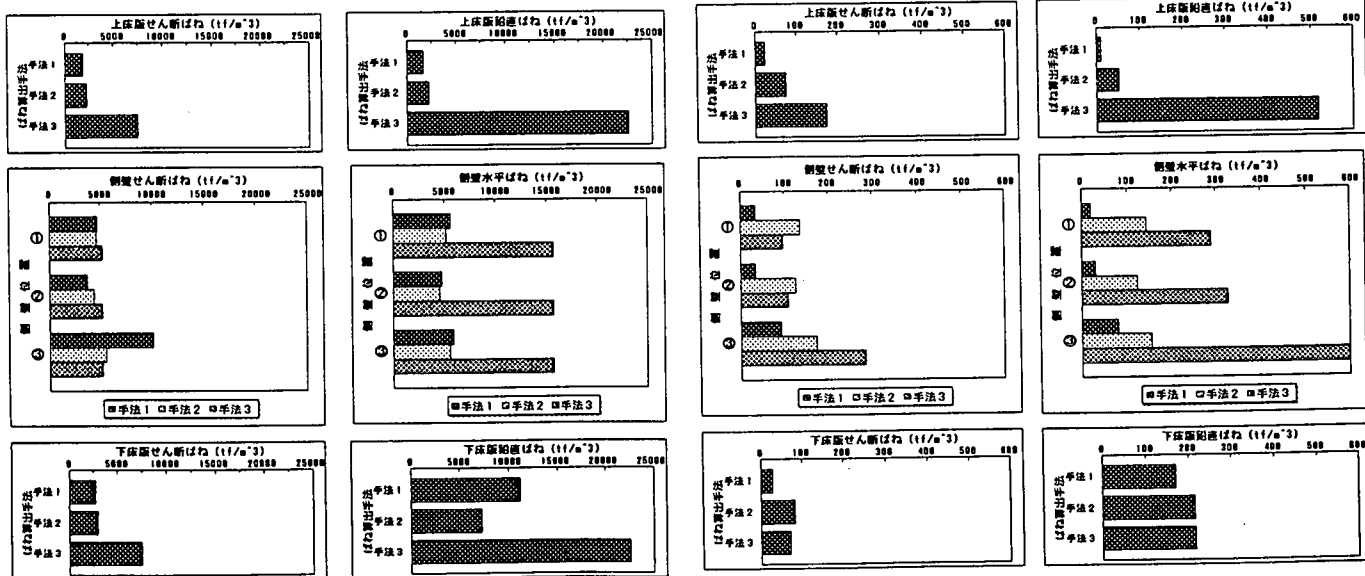
③手法1と手法2では地盤剛性が大きい場合（N値30の一樣地盤）ではほぼ同等の値が得られたが、地盤剛性が小さい場合（西大阪地盤）では、大きな差が見られた。このことから、大地震を対象とした解析等で地盤剛性の低下が著しい場合では、ばね値に大きな差が生じる場合がある。

6. 応答変位法と2次元FEM応答変位法の比較

表-1に示した3つの地盤条件について、地震時の地盤変位および地盤ばね値を表-4に示すように種々変化させて応答変位法の解析を行い、その結果と2次元FEM動的応答解析結果の比較を行った（図-12）。比較項目は地下構造物の地震時の影響度を良く表す項目として構造物の上下床版に生じる相対変位量とした。また、応答変位法の解析結果では、各荷重（地盤変位荷重，周面せん断力（自然地盤の変位を用いる場合のみ），慣性力）の影響度を同時に示した。

表-4. 比較解析の条件

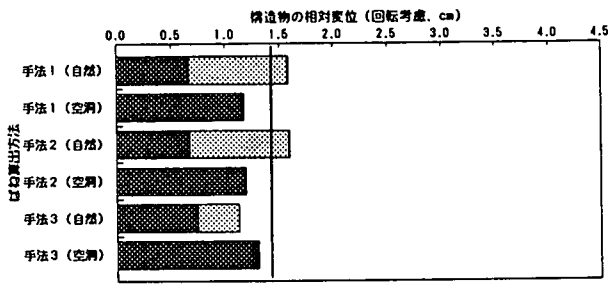
地盤条件	N値30-様地盤，西大阪，東大阪，3種の地盤条件
地盤ばね	手法1，手法2，手法3の3種の手法によって得られた地盤ばね
入力地盤	「空洞地盤の地盤変位」，「自然地盤の地盤変位+周面せん断力」の2ケース



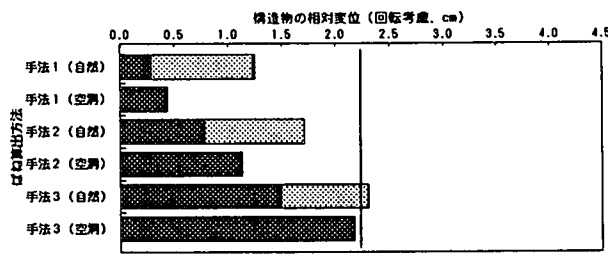
(a) N値30-様地盤

(b) 西大阪地盤

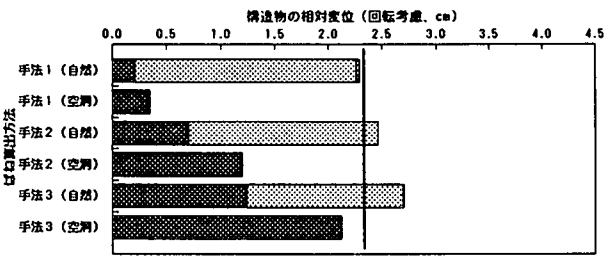
図-11. 各手法による地盤ばね算出結果



(a) N値30一様地盤



(b) 西大阪地盤



(c) 東大阪地盤

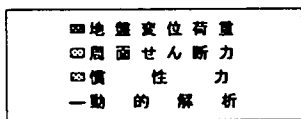


図-12. 応答変位法と2次元FEM動的応答解析の比較

比較結果から以下のことが言える。
 ① 応答変位法では、地盤ばねの値によって解析結果に大きな差が見られた。特に地盤剛性が小さい西大阪地盤、東大阪地盤でその差は顕著になった。
 ② 3種の地盤ばねを用いて応答変位法の解析を行ったが、「空洞地盤の変位を用いた応答変位法」と「自然地盤の変位を用いてさらに周面せん断力を外力として与えた応答変位法」は等しくならなかった。
 ③ 自然地盤の変位を用いた応答変位法では、地

震時荷重のうち周面せん断力の占める割合が非常に大きい。特に地盤ばねが小さいほどその割合は大きくなる傾向が見られた。

④ 動的解析との比較は、N値30一様地盤では両者はほぼ等しい結果が得られたが、その他の地盤条件では大きく異なるケースもみられた。今回の解析では手法3のばね値を用いた場合が比較的両者の解析結果が等しくなった。

7. FEMモデル応答変位法

(1) 解析手法

応答変位法に用いる地盤ばねの算定方法は種々提案されているが、算出方法によってばね値の値が大きく変わり、またその結果構造物に生じる相対変位にも相当量の差が生じる結果を得た。したがって、応答変位法の解析を行ううえで地盤ばねを適切に評価することが必要となる。

本論文では、図-13に示す2次元FEMモデルに地震時の地盤変位を与えることによって、地盤ばねを直接求めることなく応答変位法と同様の解析を行った。

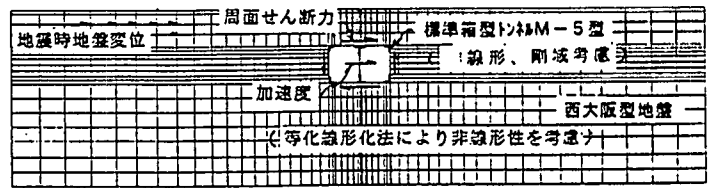


図-13. FEMモデル応答変位法

具体的な解析フローを図-14に示す。

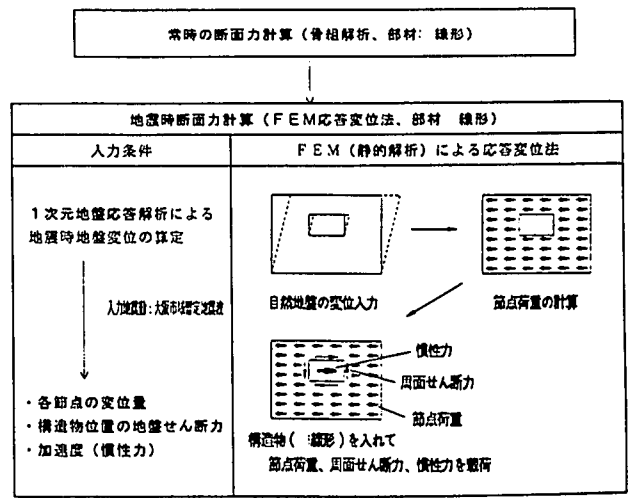
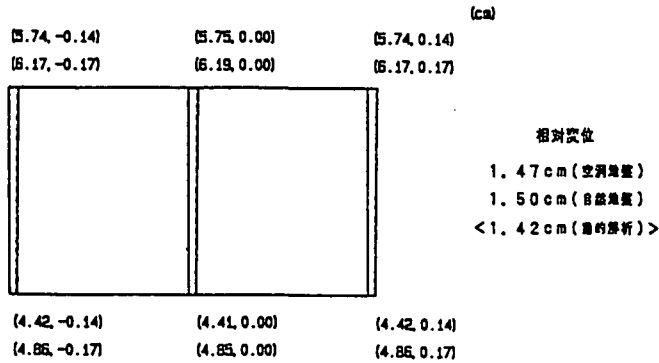


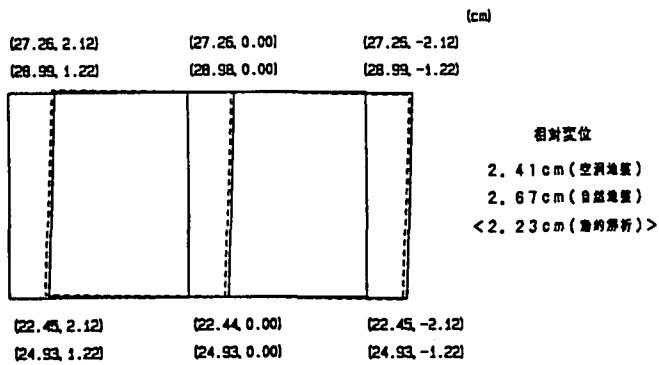
図-14. FEMモデル応答変位法の解析フロー

(2) 2次元FEM動的応答解析との比較

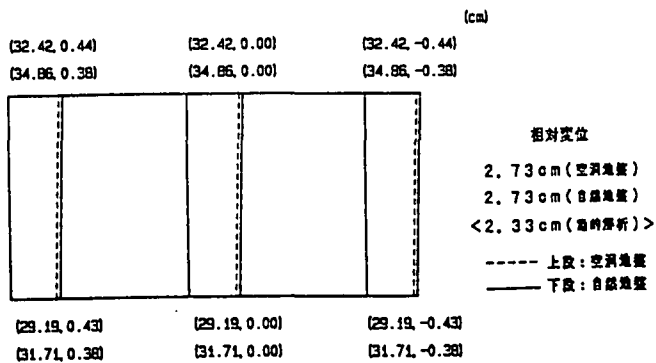
図-15に3種の地盤条件についてFEMモデル応答変位法と2次元FEM動的応答解析結果の比較を示す。



(a) N値30一様地盤



(b) 西大阪地盤



(c) 東大阪地盤

図-15. FEMモデル応答変位法と動的応答解析の比較

比較結果から以下のことがわかる。

①FEMモデル応答変位法では「空洞地盤の変位を用いた応答変位法」と「自然地盤の変位と周面せん断力を考慮した応答変位法」は等しくなる。

②FEMモデル応答変位法では、地盤条件に係わらず、動的応答解析とほぼ等しい結果が得られた。したがって、応答変位法で地盤ばねを適切に評価すると動的応答解析とほぼ等しい結果が得られることがわかる。

8. FEMモデル応答変位法を用いた試算例

(1) 設計条件

- (a) 地盤条件；西大阪地盤 (図-1 (b))
- (b) 検討対象構造物；土被り5mの地下鉄標準トンネル (図-3)

(c) 解析条件；

地盤；等価線形化法により地盤の非線形性を考慮

構造物；部材のM-φ関係をトリリニア曲線で与え荷重増分法により非線形性を考慮

(2) すべり、剥離の考慮

FEMモデル応答変位法の解析を行った場合、解析上以下のような不合理が生じる場合がある。

地盤～構造物の境界面で、

- ①地盤のせん断強度を越えた荷重の伝達が生じる場合がある。
- ②地盤が構造物を引張るような荷重が作用する場合がある。

このような解析上の不合理に対し、本論文では地盤と構造物の境界面にジョイント要素を配置した解析をあわせて実施した。ジョイント要素の概要を図-16に示す。

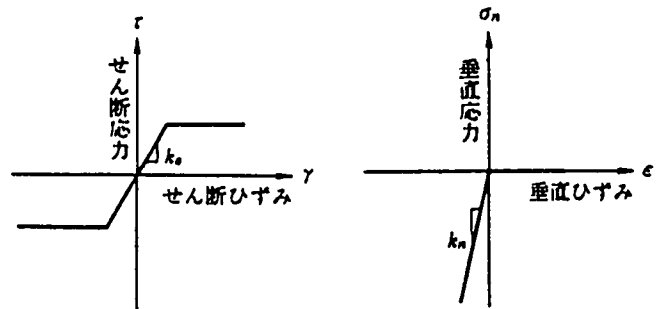
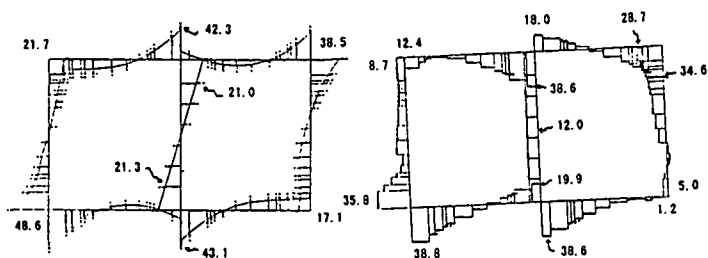


図-16. ジョイント要素の概要

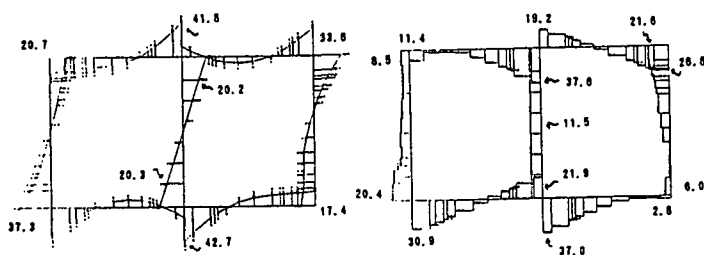
(3) 解析結果

FEMモデル応答変位法の解析結果を図-17, 18に示す。ジョイント要素を考慮することによって発生断面力は約1~2割程度小さくなる結果が得られた。



(a) 曲げモーメント図 (b) せん断力図

図-17. 試算結果 (ジョイント要素無し)



(a) 曲げモーメント図 (b) せん断力図

図-18. 試算結果 (ジョイント要素考慮)

9. まとめ

以上の検討結果をまとめると以下のように要約される。

- ① 応答変位法を行う際には地盤ばねを適切に評価する必要がある。地盤ばねを適切に評価する

と応答変位法の解析結果と動的解析の解析結果はほぼ等しくなる。

- ② 地盤ばねの算出手法は種々提案されているが手法によってばね値に相当量の差が生じる場合がある。

また、本論文では地盤ばねを直接算出しない方法としてFEMモデル応答変位法の提案を行った。応答変位法は一つの簡便法であり、できるだけ簡便なモデルで解析すべきであるという指摘もある。しかし、地盤ばねをFEM解析で算出する手間を考えればFEMモデル応答変位法も同程度の手間で解析を行うことができる。また、静的解析であるので構造物の非線形性も比較的入力容易であり、地盤~構造物の境界面にジョイント要素を考慮した解析も行えるというメリットもある。

今後、FEMモデル応答変位法を用いて、地震で被害を受けた地下構造物のシミュレーションを行い、解析手法の妥当性を確認するとともに、応答変位法に用いる適切なばね値の算出方法についても検討を行いたいと考えている。

【参考文献】

- 1) (財) 大阪土質試験所, 大阪市域地震動予測暫定地震波の検討, 大阪市地域防災計画資料, 1995
- 2) 川島一彦編著: 地下構造物の耐震設計, 鹿島出版会, 1994

SEISMIC DESIGN OF UNDERGROUND STRUCTURE WITH RESPONDED DISPLACEMENT METHOD

Hiromu Ohta, Masatoshi Nishida, Takehiko Kitajima, Tadanobu Sato

Underground structures are usually designed with responded displacement method. By comparing the result of responded displacement method with dynamic responded analysis, it is found that the value of soil spring has big influence on the result of the analyses. And if the value of spring is appreciated properly, the results obtained from both the methods will be almost same.