

地盤高が左右で異なる地下構造物の 耐震設計に適用する静的解析法

鈴木猛康¹, 勝川藤太¹, 茂木洋², 渡邊仁夫²

¹中央復建コンサルタンツ 東京本社総合設計室
(〒103-0011 東京都中央区日本橋大伝馬町2-11 イワサキ第二ビル)

²日本道路公団 東京建設局 千葉工事事務所
(〒261-0014 千葉県千葉市美浜区若葉二丁目9番3号)

水平成層地盤中の地下構造物横断面の耐震解析に適用されている地盤応答震度法を、片側のみ堤防盛土が存在して左右で地盤高が異なる場合に適用できるよう修正し、地盤高が左右で異なる地下構造物の耐震設計に用いる静的解析法を開発した。静的外力の作用法を3種類抽出し、2次元FEMモデルを用いて地盤と構造物をモデル化して、これら3種類の静的解析と動的解析との比較を行った。その結果、盛土のない地盤と地下構造物の2次元FEMモデルに地盤応答震度と盛土下面のせん断力を静的に作用させるサブストラクチャー法を選定した。本静的解析法では、まず盛土を無視して2次元FEMモデルを作成する。次に、盛土のない水平成層地盤と盛土を有する水平成層地盤の1次元地震応答解析を実施し、前者より地盤応答震度を、後者より盛土下面のせん断力を算定する。そして、2次元FEMモデルに盛土のない水平成層地盤の地盤応答震度を作用させるとともに、盛土下面位置に前記せん断力を作用させるものである。

Key Words : Finite element analyses, seismic design, underground structures, horizontally non-symmetric overburden, pseudo-dynamic procedure

1. はじめに

大地震時に構造物の非線形化が顕著となり、構造物のせん断剛性が周辺地盤のそれより小さくなると、構造物のせん断変位が地盤のせん断変位を上回るようになって、地盤ばねを介して地盤変位を強制的に梁に伝達させる応答変位法では、現象を再現できないことがわかっている¹⁾。このような場合には、周辺地盤をFEMでモデル化して地盤慣性力を地盤節点に作用させる地盤応答震度法²⁾の適用が望ましい。しかし、地盤応答震度法は水平成層地盤を対象とした手法であり、例えば片側のみ堤防盛土が存在するように構造物上の左右で地盤高が異なる場合には適用できない。

このように左右で地盤高が異なる区間では、地下構造物の耐震設計に動的解析を適用することとなるが、レベル2地震動に対する耐震設計は非線形解析であるので、すべて動的解析に基づいた耐震設計を実施すると、非経済的かつ非効率である。そこで、地盤高が左右で異なる条件下の地下構造物を対象として、横断面の耐震設計に適用できる静的解析法について検討することとした。

本論文では、パラメトリックスタディーによる静的解析法の適用範囲の検討から、静的解析法の選定、ならびに選定した静的解析法の実構造物への適用までをまとめた。

2. 静的解析の適用範囲に関する検討

(1) 検討概要と検討条件

静的解析による耐震設計が可能な地盤条件を絞り込むとともに、静的解析において地盤に作用させるべき荷重の載荷方法、すなわち静的解析法について検討する。そのため、表層地盤を図-1のように単一層で、片側にのみ表層地盤上に盛土のある単純な地盤モデルを作成し、この地盤モデルを用いて入力地震動および盛土高をパラメータとした解析の検討を実施することとした。本検討では、まず盛土ありなしのケースの水平成層地盤の1次元動的解析による基本検討を行い、次いで図-1のモデルを用いた2次元FEM動的解析による検討を行う。

表層地盤ならびに盛土の単位体積重量は、それぞれ18, 19kN/m³とした。表-1には地盤モデルの表

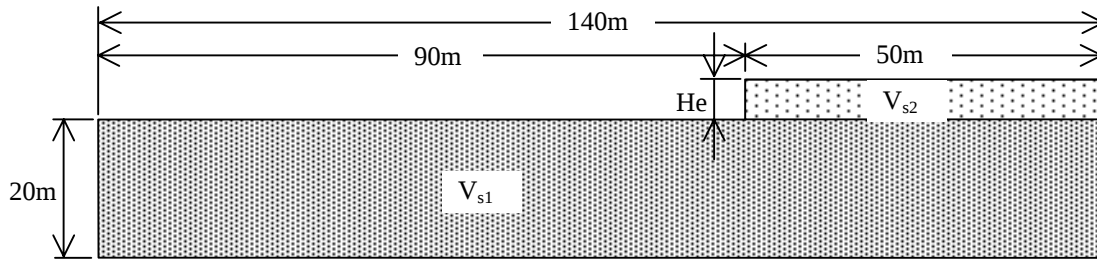
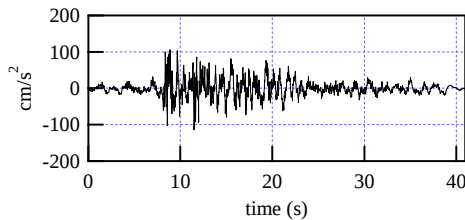


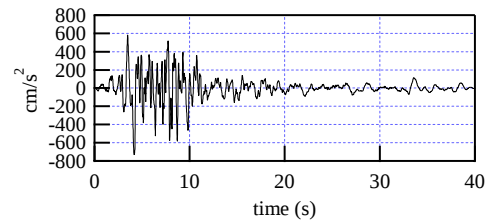
図 - 1 パラメトリックスタディーに用いる地盤モデル

表 - 1 解析ケース

解析ケース	入力地震動	V_{s1} (m/s)	V_{s2} (m/s)	減衰定数	盛土高 He(m)	T_2/T_1
1	レベル 1 L1-b-1	70	120	0.10	3	1.087
2		70	120		5	1.146
3		70	120		7	1.204
4		70	120		10	1.430
5	レベル 2 L2-T2-2	50	100	0.15	3	1.050
6		50	100		5	1.125
7		50	100		7	1.175
8		50	100		10	1.250



(a) レベル 1 地震動 (L1-b-1)



(b) レベル 2 地震動 (L2-T2-2)

図 - 2 入力地震動

層地盤ならびに堤防盛土のせん断波速度，また盛土の有無による固有周期の相違についてまとめた．表層地盤の層厚は 20m とし，表層地盤のせん断波速度 V_s は，地盤の初期せん断波速度を 100m/s 程度と設定した上で，レベル 1 地震動，レベル 2 地震動では剛性低下によってそれぞれ 70m/s，50m/s までせん断波速度 V_s が低減することを考えた．一方，盛土は，高さを 3，5，7，10m の 4 種類パラメトリックに変更することとし，せん断波速度は，初期値を 150m/s と仮定した上で，レベル 1 地震動，レベル 2 地震動では剛性低下によってそれぞれ 120m/s，100m/s まで V_s が低減したと仮定した．その結果，表層地盤のみの地盤の特性値 T_1 に対する盛土有りの地盤の特性値 T_2 の比は，表のように 1.05～1.43 の範囲となった．

後述する入力条件を 1 次元動的解析，2 次元静的，動的解析で一致させるため，地盤は剛な基盤上にあるものと考えた．また，地盤の減衰定数は簡単のため，レベル 1 地震動で地盤，盛土ともに一律 0.1，レベル 2 地震動で一律 0.15 とした．

パラメトリックスタディーに用いる入力地震動は，図 - 2 に示すレベル 1 地震動ならびにレベル 2 地震動である（それぞれ L1-b-1 波，L2-T2-2 波）．本検討では，最終的に基盤固定の条件下で 2 次元 FEM

モデルに水平荷重を静的に与える静的解析法の開発を目指しているため，入力条件を統一するために，1 次元地震応答解析でも上記入力地震動を E+F の入力条件にて入力することとした．2 次元地盤モデルは剛基盤の条件であるので，静的解析，動的解析とも基盤条件は統一されている．

(2)地盤の1次元地震応答解析

前述した盛土のある 8 ケースと，盛土のない表層地盤のみの 2 ケース（レベル 1 地震動，レベル 2 地震動の各モデル）について，SHAKE による 1 次元線形地震応答解析を実施し，地表面における応答加速度波形を算出した．図 - 3 にレベル 1 地震動のケース（解析ケース 1～4）について，盛土による地震応答の相違を示すため，地表面の加速度波形の比較を行った結果をまとめた．図のように，盛土高さ 3m では地震動の主要動に関しては，盛土あり，なしで位相のずれはあまり顕著ではないが，盛土高が 5m になると両者の位相は明らかにずれ始め，盛土高 7m では位相のずれとともに，振幅の相違も顕著であることがわかる．

図 - 4 は同様に，レベル 2 地震動のケース（解析ケース 5～8）について，盛土の有無による地表面の加速度波形の比較を行った結果をまとめたもので

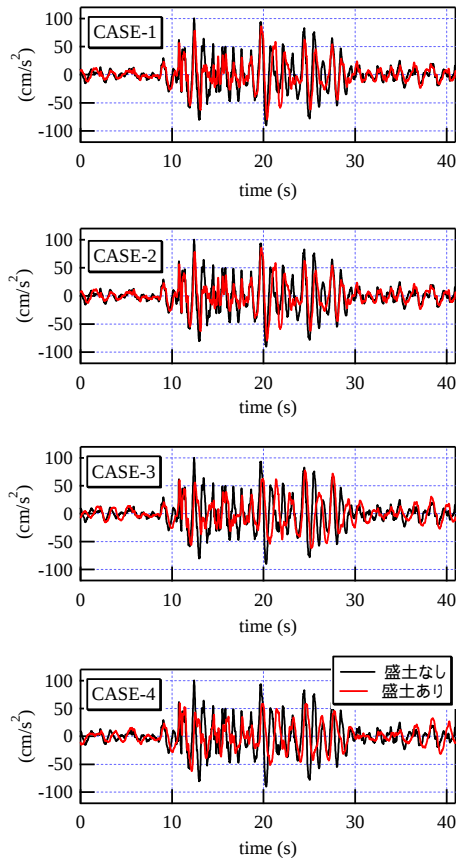


図 - 3 盛土の有無による地表面加速度波形の比較
(解析ケース 1 ~ 4)

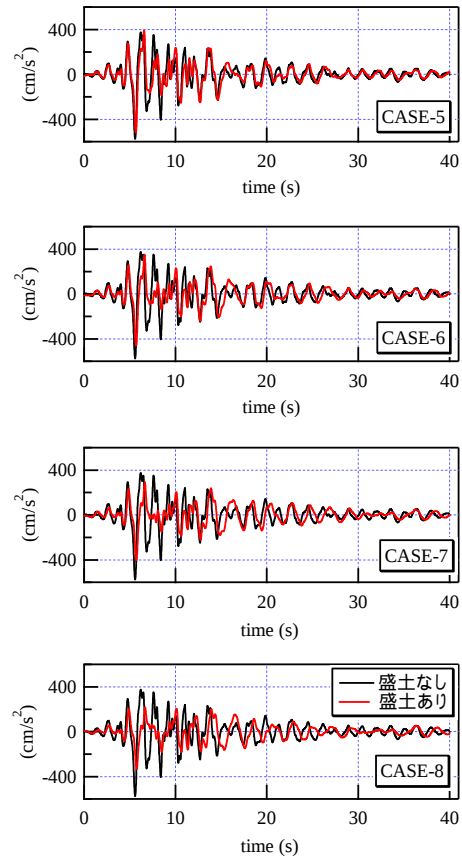


図 - 4 盛土の有無による地表面加速度波形の比較
(解析ケース 5 ~ 8)

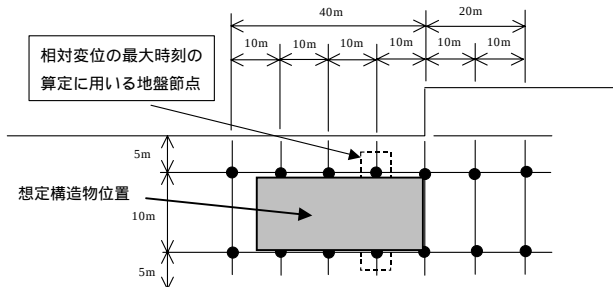


図 - 5 着目する水平範囲と相対変位算定位置

ある．これらの解析ケースでも，盛土高さ 3m では地震動の主要動において，盛土あり，なしで位相のずれはあまり顕著ではないが，盛土高が 5m になると，両者の位相はずれ始め，盛土高 7m では位相，振幅ともに大きく異なることがわかる．

以上のように、盛土がある場合には、盛土がない場合と比較して、明らかに地盤の震動特性が異なるため、盛土を考慮した地下構造物の静的解析法においては、盛土の影響を考慮した地震荷重載荷法でなくてはならない。

1 次元地震応答解析では、盛土のメッシュ分割において、盛土最下部の分割を 20cm とし、この層に発生する最大せん断応力を算出した。表 - 2 に得られた最大せん断応力をまとめた。この最大せん断応力は、盛土がある場合に盛土の最下面に作用するせ

表 - 2 盛土下面の最大せん断応力, $\tau_{\max}$

解析ケース	入力地震動	$\tau_{\max}(\text{kN/m}^2)$
1	レベル 1 L1-b-1	2.91
2		4.52
3		11.09
4		14.41
5	レベル 2 L2-T2-2	31.76
6		43.94
7		51.78
8		60.84

ん断応力に近似できると考えられ、以降の静的解析法で使用する目的で算出したものである。

(3) 2次元 FEM 解析

表 - 1 の 8 ケースについて、2 次元 FEM による地震応答解析を実施した。地震応答解析結果の中で、構造物の応答にもっとも大きく影響する構造物構築位置（深さ 5 ～ 15m）における相対変位をまとめた。構造物は図 - 5 に示すように概ね盛土端部より 30 ～ 40m の範囲に位置するため、盛土端部より 40m の区間、さらに盛土内の 20m の区間、合計 60m の範囲に亘って、図 - 5 に示すように、深さ 5、15m に応答変位波形を用いて、深さ 15m 位置に対する深さ 5m 位置の相対変位を求めることとした。

レベル1地震動の4ケースならびにレベル2地震

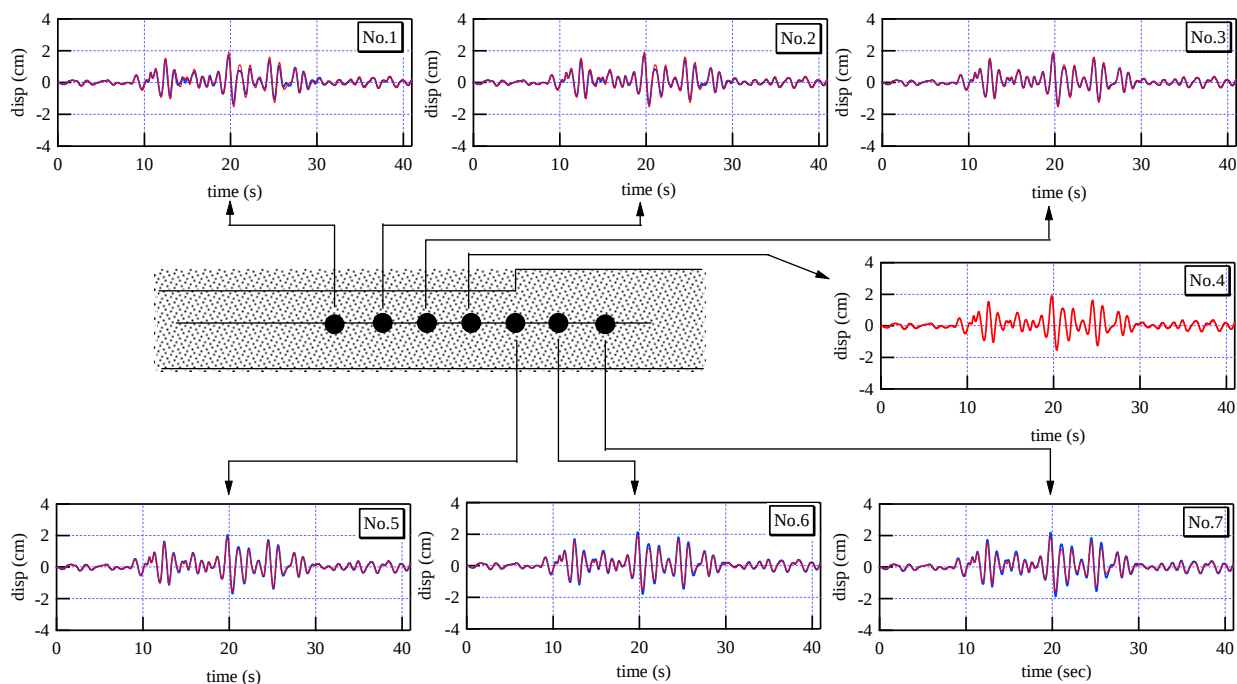


図 - 6 相対変位の時刻歴応答（解析ケース 1）

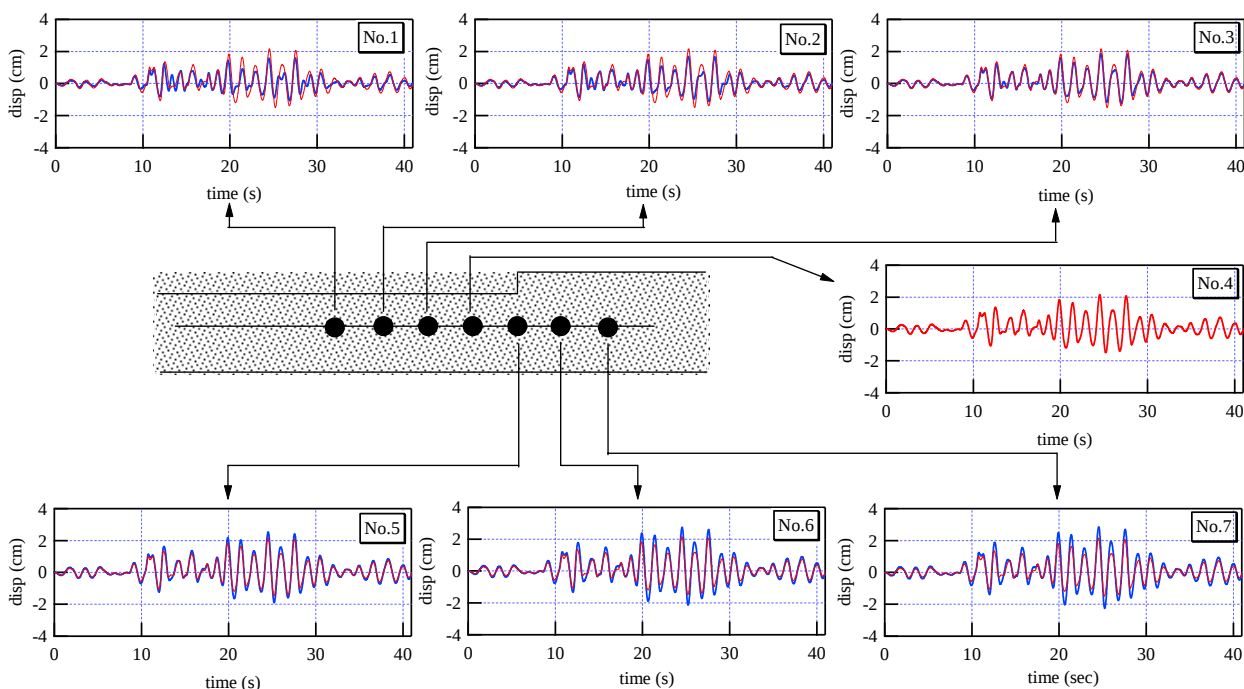


図 - 7 相対変位の時刻歴応答（解析ケース 4）

動の 4 ケースについて、これらの位置における相対変位の時刻歴波形をまとめて整理した。図 - 6 はレベル 1 地震動、盛土高 3m のケース（解析ケース 1）、図 - 7 はレベル 1 地震動、盛土高 10m のケース（解析ケース 4）について、相対変位の時刻歴波形を整理した結果である。これらの図では、凡例に示す各地点の変位波形を青線で示すと共に、No.4 地点の変位波形を赤線で重ね描きすることにより、各地点の波形の相違が確認できるようになっている。図 - 6 に示すとおり、盛土高が 3m のケースでは、相対変位波形の位相特性や包絡形状は場所によって変化することなく、盛土に近づくほど振幅が大きくなる

傾向となっている。図には示さないが、盛土高 5m, 7m のケースでは振幅の場所毎の変化が拡大し、図 - 7 に示す盛土高 10m のケースでは、No.7 地点では相対変位振幅が No.1 地点のほぼ倍となった。この傾向は、レベル 2 地震動を対象としたケース 5～8 でも同様であった。このように、構造物設置位置の地盤相対変位波形に顕著な位相のずれはなく、場所毎に相対変位振幅のみが変化する振動を呈することから、構造物設置位置で相対変位が最大となる時刻における地震慣性力を FEM の節点荷重として作用させる地盤応答震度法を基本とした静的解析法は、このような地盤変形の解析に適用可能と考えられる。

なお，No.4地点は盛土あり，なし地盤の中間的挙動を呈するので，本検討と同様に以後の検討においても，想定する地下構造物中心位置と盛土境界との中央であるNo.4地点を基準地点と考えることとする．

3．静的解析法の選定

(1) 静的解析法の抽出³⁾

前述のように，盛土に近い地盤の構造物深さにおける最大相対変位を，静的解析によって近似的に再現することは可能との結論が得られた．静的解析は開削トンネルや掘割構造等の地下構造物の耐震設計を目的とするため，荷重パターンとしては，設計で通常使用されている汎用 FEM 解析ソフトを用いて，容易に設定可能であることが必要と考えた．具体的には，地盤の加速度は深さ方向には変化させるが水平方向には変化させないことを，静的解析法における荷重条件の条件として設定した．この条件下で考えられる節点荷重条件方法として，図 - 8 に示す 3 つの手法を考えた．

盛土あり地盤の応答震度を載荷する方法

盛土あり地盤の応答震度 + 盛土下面のせん断力を載荷する方法

盛土なし地盤の応答震度 + 盛土下面のせん断力を載荷する方法

の載荷方法は，盛土があるために盛土境界における地盤が，盛土がない場合の水平成層地盤と大きく異なる振動モードを有する場合には比較的効果的と思われる．また の載荷方法と の載荷方法は，加速度分布を求める 1 次元地盤モデルが異なるだけでほとんど同じように思えるが，構造物位置の地盤の震動特性が，主に盛土有りの水平成層地盤の震動に起因するのか，それとも盛土なしの水平成層地盤の震動に起因するのかによって，解析によって生成される地盤変形が異なるため，どちらの地盤の震動特性に主に左右されるかを確認することが重要である．また， の手法において，盛土下の地表面地盤節点にせん断力として作用させる盛土最下面のせん断応力を，1 次元地震応答解析の最大せん断応力とし，構造物深さにおける最大相対変位発生時刻のせん断応力としなかったのは，盛土下における地盤変位を大きくし，その結果安全側の解析結果を導くことを意図したためである．なお，以降の解析においては，この最大せん断応力として表 - 2 の数値を用いることとする．

(2) パラメトリックスタディーによる静的解析法の適用性確認と静的解析法の選定

前述した 8 解析ケースの地盤ならびに入力条件下で動的解析を実施して，盛土より盛土より 10m 地点（No.4 地点）の深さ 15m 位置に対する深さ 5m 位置の最大相対変位発生時刻の地盤変位を求め，こ

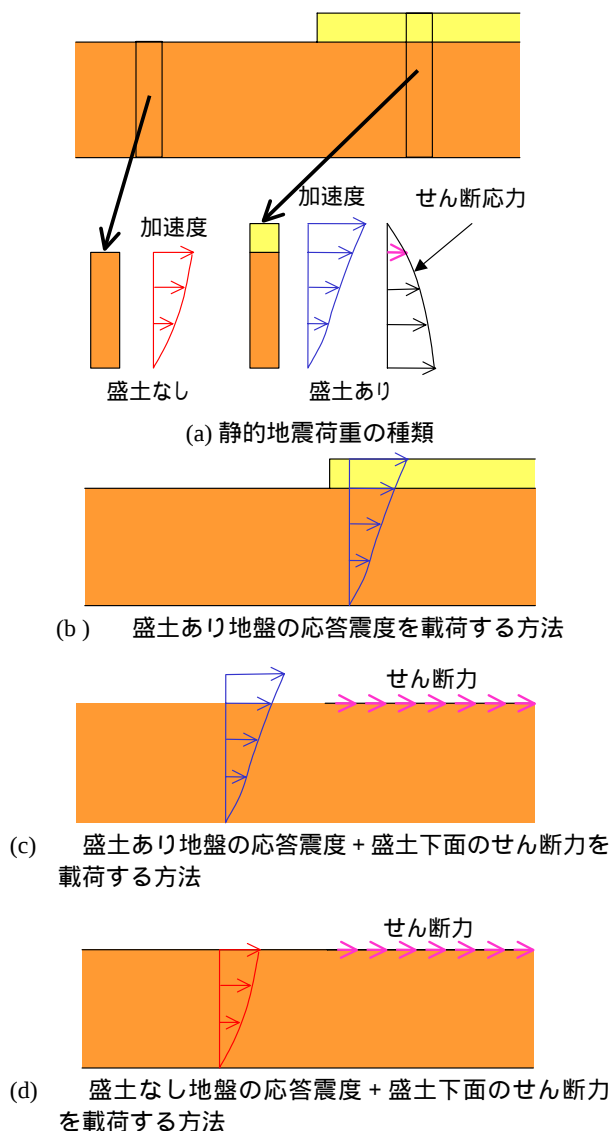


図 - 8 解析手法の種類

れと同じ条件下で 3 つの静的解析法によって静的解析を実施して求めた地盤変位を，全地盤節点で比較することによって，抽出した 3 つの静的解析法の適用性について考察する．地盤変位の比較は，動的解析の変位と， の静的解析の変位を，両解析で得られた全節点変位の最大値で正規化した上で，変位図を重ね書きすることによって行った．表 - 2 はこのような比較を，解析ケース 3, 4, 7, 8 の 4 ケースについて行ったものである．表より， の方法はレベル 1 地震動では 4 つの盛土高にかかわらず動的解析とほぼ重なるほど一致した応答変位を与え，レベル 2 地震動では盛土高が増えるに従って動的解析の差は拡大する傾向にあるが，他の 2 手法と比較して動的解析結果との整合がもっともよく，また解析結果は動的解析結果よりも大きな応答変位を与えることから，静的耐震解析法として妥当と判断し，以降の実構造物の耐震設計に用いる静的解析法として選定した．

表 - 3 地盤変位に関する3種類の静的解析と動的解析の比較

	盛土あり地盤の応答震度載荷法	盛土あり地盤の応答震度 + 盛土下のせん断力載荷法	盛土なし地盤の応答震度 + 盛土下のせん断力載荷法
3			
4			
7			
8	実線：静的解析 破線：動的解析 	実線：静的解析 破線：動的解析 	実線：静的解析 破線：動的解析

本解析法は、盛土のない2次元 FEM モデルの解析条件として、盛土位置に別途解析しておいたせん断力を作用させることで、盛土を有する全体系の釣り合いを静的に満足させる方法であるので、サブストラクチャー法の1つと言える。

面積)のせん断力を節点荷重として作用させる。ここで、A は節点の有効幅×奥行き(通常は1m)であり、有効幅は節点の左右の要素幅の和×1/2 とする。

(3) 静的解析法のまとめ

選定した静的解析法(以下、サブストラクチャー法)の解析ステップをまとめる。サブストラクチャー法による静的解析は、以下の手順で行う。

盛土のない地盤の1次元地震応答解析を実施し、地盤の収束物性値を求めると共に、構造物上下層間の相対変位、あるいはひずみエネルギー最大の時刻の地盤加速度分布を算定する。

盛土がある地盤の1次元地震応答解析を実施し、盛土下面における最大せん断応力 τ_{max} を求める。

2次元FEMを用いて、盛土のない地盤～地下構造物系をモデル化する。

のモデルに対して、の加速度を震度として与えるとともに、盛土下面位置の地表面節点に、の最大せん断応力 τ_{max} を用いて、 $S = \tau_{max} \times A$ (A は

4. 実地盤、実構造物への適用

東京低地のAならびにBの2種類の実土層断面を、上記静的解析法の適用断面として選定し、前述の1次元地震応答解析をSHAKEによって実施した。図-9に示すのは、前述のレベル1地震動ならびにレベル2地震動を対象としたそれぞれA、B断面の1次元地震応答解析で得られた地盤のせん断波速度 V_s の収束値である。これらの V_s を用いて動的解析ならびに静的解析を実施し、両者の解析結果を比較することとした。図-10には静的解析に用いる構造物深さにおける相対変位最大時刻における加速度分布を示す。なお、A断面では盛土高2.7m、B断面では盛土高3.0mである。

盛土境界より10mの地点において、動的解析で得

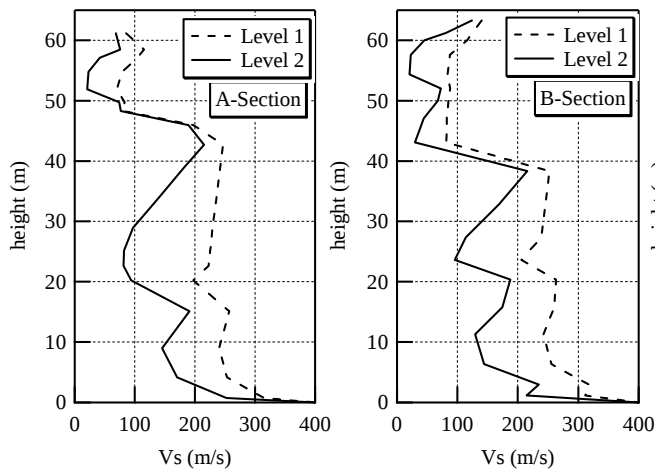


図 - 9 実地盤の Vs の鉛直分布

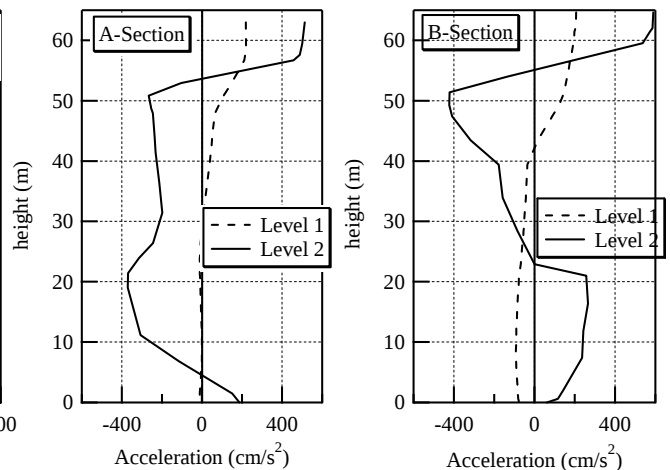


図 - 10 せん断変位最大時刻の加速度分布

表 - 4 実地盤に対するサブストラクチャー法に基づく静的解析の適用性検討結果

断面	レベル 1 地震動 (L1-b-1)	レベル 2 地震動 (L2-T2-2)
A		
B	実線：静的解析 破線：動的解析	実線：静的解析 破線：動的解析

られた地下構造物上下床版深さの地盤の水平相対変位が最大となる時刻の地盤変位と、静的解析で得られた地盤変形を比較することによって、A ならびに B の断面に、ここで提案したサブストラクチャー法による静的解析法を適用した。表 - 4 上段に、A 断面において、それぞれレベル 1 地震動ならびにレベル 2 地震動を入力した際の動的解析と静的解析による地盤変形の解析結果を重ねて示した。図の地盤変位のスケールは、動的解析と静的解析で同一にしてある。静的解析と動的解析の地盤応答変位は、動的解析では側方境界における反射波の影響が無視できず、また静的解析では減衰項が省略されており、両解析結果に多少ずれは認められるが、検討の対象とする構造物位置ではほとんど両解析結果が一致していることがわかる。

同様に表の下段に、B 断面において、それぞれレベル 1 地震動ならびにレベル 2 地震動を入力した際の動的解析と静的解析による地盤応答変位の解析結果の比較を示した。この断面では、レベル 1 地震動を入力とした場合には、両解析結果はほとんど重なっており、一方でレベル 2 地震動を入力とした場合には、両解析結果の振動モード形状が多少異なる結果となった。しかしながら、両解析結果の整合性は極めて高いと言える。

以上のように、実地盤に対して静的解析法を適用した結果、ここで提案した静的解析法は、高い精度で動的解析の近似を与えることが示された。そこで、本解析法の適用性を確認した実地盤中の掘削構造物の耐震設計実務へ本解析法を適用した。図 - 12 は前述の B 断面中の図 - 11 に示す掘削構造物の耐震設計に本

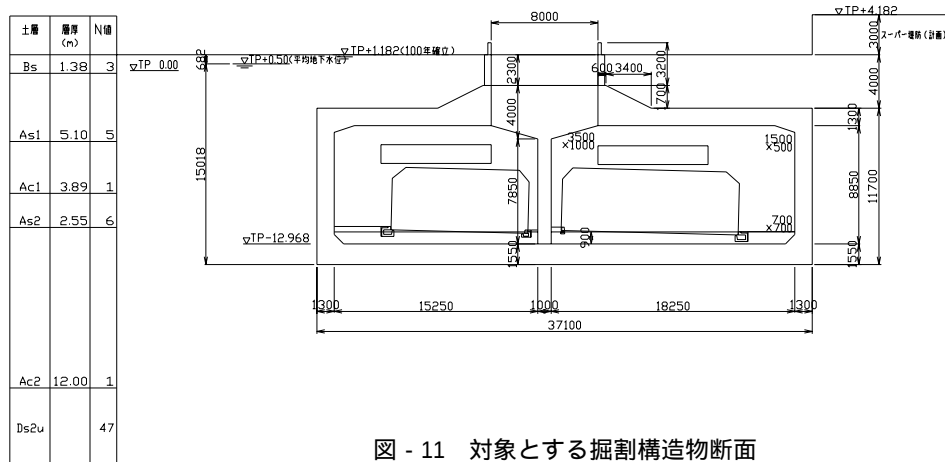


図 - 11 対象とする掘割構造物断面

解析を適用し，部材に発生する曲げモーメントの最大，最小値の分布を示した例である．

5．まとめ

本論文では，水平成層地盤中の地下構造物横断面の耐震解析に適用されている地盤応答震度法を，片側のみ盛土盛土が存在して左右で地盤高が異なる場合に適用できるよう修正し，地盤高が左右で異なる地下構造物の耐震設計に用いる静的解析法として，盛土のない地盤のと地下構造物の2次元FEMモデルに応答震度と盛土下面のせん断力を静的に作用させるサブストラクチャー法を開発した．本静的解析法では，まず盛土を無視して2次元FEMモデルを作成する．次に，盛土のない水平成層地盤と盛土を有する水平成層地盤の1次元地震応答解析を実施し，前者より応答震度を，後者より盛土下面のせん断力を算定する．そして，2次元FEMモデルに盛土のない水平成層地盤の応答震度を作用させるとともに，盛土下面位置に前記せん断力を算定するものである．

本検討で開発したサブストラクチャー法に基づいた静的解析法は，実地盤への適用性を確認した上で，実構造物へ適用された．

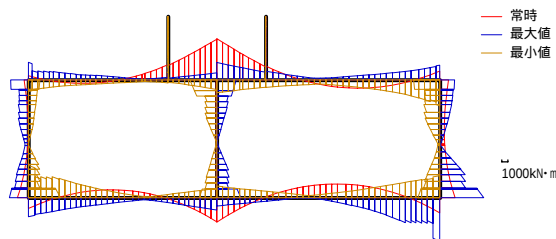


図 - 12 曲げモーメント分布

参考文献

- 1) 例えば，西山誠治，室谷耕輔，羽矢洋，小長井一男：矩形地下構造物の応答変位法の相互作用ばねの観点からみた応答変位法の適用限界：第11回日本地震工学シンポジウムアブストラクト集，pp.219, 2002.
- 2) 片山幾夫，他：地中埋設構造物の実用的な準動的解析法（応答震度法），第40回土木学会年次学術講演会，第1部，pp. 737-738, 1985.
- 3) 茂木洋，他：地盤高が左右で異なる地下構造物の耐震設計に適用する静的解析法，第58回土木学会年次学術講演会，2003.

(2003. 6. 27 受付)

STATIC ANALYSIS FOR CROSS-SECTIONAL SEISMIC DESIGN OF UNDERGROUOND STRUCTURES WITH UNSYMMETRICAL OVERBURDEN

Takeyasu SUZUKI, Touta KATSUKAWA, Hiroshi Moki and Hitoo WATANABE

In this paper, a new method of static analysis, applicable to the seismic design for cross-section of underground structures with unsymmetrical overburden, in a condition covered by an embankment at one side, has been developed. In this approach, seismic force of inertia and shear force are loaded to a two dimensional finite element model of underground structures embedded in soft ground. These forces can be given by 1-D earthquake response analyses of surface ground both with and without an embankment. The proposed method is verified by the comparison of the analyses obtained by this method and 2-D dynamic analyses. The method is applied to cross-sectional design of the actual underground structure.