

性能設計における地盤の不均質性を考慮した盛土の地震時安定解析に関する研究

神戸大学都市安全研究センター 正会員 沖村 孝
 神戸大学都市安全研究センター 正会員 鳥居 宣之
 神戸大学大学院自然科学研究科 学生員 ○田中 博文

1. はじめに

近年，土木構造物の設計にも性能設計の概念を導入するための検討が行われており，その一例として盛土の耐震設計への適用がある．これは，地震後の盛土の残留変位量を規定しようとするものであり，その推定手法については多くの研究が行われている．しかしながら，盛土は土構造物であるにも関わらず，地盤の材料特性の一つである不均質性に対する検討は一般的に行われず，その大半が均質地盤として，すなわち確定的な解析（確定解析）として行われている．そこで本研究では，性能設計の観点から盛土の性能規定を行う場合に，地盤材料の不均質性が盛土の残留変位量等の地震時応答特性に与える影響について検討する．具体的には，盛土と基礎地盤の不均質性を確率的に考慮した解析（信頼性解析）を行い，従来の確定解析の結果と比較検討することにより評価を行う．

2. 解析条件

解析に用いたモデル盛土は，図-1 に示すように法面勾配 1:2.0，盛土高 10m の左右対称な堤体型盛土とし，その基礎地盤厚 H は 20m とした．地盤の入力物性値は表-1 に示すようなものであり，盛土は砂質土，基礎地盤についてはⅡ種地盤相当の砂礫層（Ⅱ種地盤），およびⅢ種地盤相当の軟弱層（Ⅲ種地盤）の 2 種類を仮定している．解析手法としては二次元弾完全塑性有限要素法である GA2D¹⁾（静的解析）および quake2d²⁾（動的解析）を用い，静的解析では安全率 F ，動的解析では盛土天端における水平最大応答加速度 $A_{X,max}$ および残留変位量 $D_{Y,res}$ を算定する．ここで，オリジナルのプログラムは，地盤のせん断波速度 V_s を与えることはできないが，式(1)による変換を用いることにより，本研究では地盤のせん断波速度 V_s を入力パラメータの一つとして用いている．モデルの境界条件は，底部は完全固定，側方は水平方向のみ拘束とした．モデル中心に位置する幅 86m の基礎地盤部および盛土部は物性値の不均質性を考慮する領域とするため，有限要素メッシュは 1m×1m とし，その両側に緩衝領域として 20m の均質領域を設けた．不均質性を考慮するパラメータは強度定数 c, ϕ およびせん断波速度 V_s とし，各パラメータは表-1 の値を平均値とする独立な正規分布に従うと仮定した．一般的に，盛土は人工物，基礎地盤は自然堆積物である

ので，基礎地盤の方が盛土と比較して不均質性の度合いが大きいと考えられるため，盛土および基礎地盤の変動係数はそれぞれ $V_{G,E} = 0.1$ ， $V_{G,F} = 0.2$ とした．信頼性解析は，不均質性を考慮した地盤モデルを用いて，モンテカルロ法によって行った．ここで，不均質モデルは，ケース 1 としてせん断強度に関する強度定数 c, ϕ のみを変動させた場合，ケース 2 としてせん断剛性に関するせん断波速度 V_s のみを変動させた場合の 2 ケースとし，試行回数は各 100 回とした．また，確定モデルに振幅 10gal の正弦波を 10 波入力し，盛土天端において水平最大応答加速度を示した周期を盛土－基礎地盤系の固有周期 T と考えるとⅡ種地盤では 0.4 秒，Ⅲ種地盤では 0.6 秒となり，これらは式(2)で示される簡易算定式より得られる基礎地盤の固有周期 T と良い一致を示している．これらの固有周期 T を持った振幅 200gal の正弦波 20 波を入力地震動としてモデル底面に作用させて動的解析を行った．また，減衰特性は Rayleigh 減衰を用い，質量比例定数 α は 0，剛性比例定数 β は 0.02 とした．なお，比較のため，地盤の不均質性を考慮していない確定解析も行った．

$$V_s = \sqrt{\frac{gG}{\gamma}} = \sqrt{\frac{g}{\gamma} \cdot \frac{E}{2(1+\nu)}} \quad (1)$$

$$T = \frac{4H}{V_s} \quad (2)$$

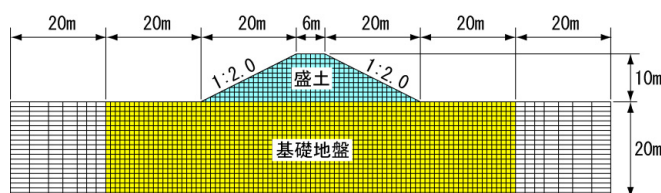


図-1 解析モデル

表-1 モデルの物性値

	$\gamma_t(\text{kN/m}^3)$	$c(\text{kN/m}^2)$	$\phi(^{\circ})$	ν	$V_s(\text{m/sec})$
盛土	18	5	22	0.33	120
Ⅱ種地盤	22	0	35	0.23	200
Ⅲ種地盤	17	10	20	0.36	133

キーワード 信頼性解析，性能設計，不均質性，盛土，地震応答

連絡先 〒657-8501 神戸市灘区六甲台 1-1 神戸大学都市安全研究センター TEL 078-803-6431

3. 解析結果

3. 1 静的解析

静的確定解析を行った結果、Ⅱ種地盤、Ⅲ種地盤共に安全率 F は 1.25 と得られ、最大せん断ひずみも左右対称かつ法肩から法先に至る円弧状に分布し、基礎地盤の違いによる大きな差異は見受けられなかった。次に、不均質モデルを用いて静的信頼性解析を行った結果得られた安全率 F の統計分析値を表-2 に示す。ここで、信頼性解析より得られた平均値を確定解析より得られた値で除することにより得られる比率を変化率として定義する。変動係数より地盤の不均質性が安全率 F に与える影響は、Ⅱ種地盤、Ⅲ種地盤共にせん断波速度 V_s を変動させたケース 2 よりも、せん断強度 c, ϕ を変動させたケース 1 の方が大きいことがわかる。また、Ⅱ種地盤においては不均質性を考慮することにより、安全率 F の低下が生じるという結果になった。これは、 ϕ 材料であるために強度の不均質性が大きく影響するためと考えられる。

3. 2 動的解析

動的確定解析では盛土天端における応答の最大値は、Ⅱ種地盤で水平最大応答加速度 $A_{X, \max}$ は 824gal、残留変位量 $D_{Y, \text{res}}$ は 6.5cm、Ⅲ種地盤で水平最大応答加速度 $A_{X, \max}$ は 634gal、残留変位量 $D_{Y, \text{res}}$ は 34.2cm となった。入力地震動が異なるため直接的な比較はできないが、最大振幅が同じ、かつ系の固有周期と一致させた正弦波をそれぞれ入力した場合、Ⅲ種地盤上の盛土の方が水平最大応答加速度 $A_{X, \max}$ は小さいが、残留変位量 $D_{Y, \text{res}}$ が大きくなるという結果になった。次に、動的信頼性解析を行った結果得られた水平最大応答加速度 $A_{X, \max}$ の統計分析値を表-3 に、残留変位量 $D_{Y, \text{res}}$ の統計分析値を表-4 に示す。変動係数より静的解析同様に、Ⅱ種地盤、Ⅲ種地盤共にケース 2 よりもケース 1 の方が応答値の変動が大きくなる傾向にあり、さらにケース 2 において、静的解析よりもせん断波速度 V_s の不均質性の影響が大きくなっている。また、地盤の不均質性を考慮することにより確定解析と比較して、Ⅱ種地盤では両ケース共に水平最大応答加速度 $A_{X, \max}$ の平均値は約 10%低下し、残留変位量 $D_{Y, \text{res}}$ の平均値は約 70%増大した。一方、Ⅲ種地盤では水平最大応答加速度 $A_{X, \max}$ の平均値は殆んど変化しなかったが、残留変位量 $D_{Y, \text{res}}$ の平均値はケース 1 で 20%、ケース 2 で 27%減少した。しかしながら、残留変位量 $D_{Y, \text{res}}$ の最大値に着目すると、確定解析と比較して全てのケースで増大しており、特にケース 1 において、Ⅱ種地盤では 2.2 倍、Ⅲ種地盤でも 1.5 倍となっている。また、静的確定解析では安全率は同じであると算定されたが、動的確定解析においては基礎地盤の違いにより得られる結果が異なっており、特に動的信頼性解析において基礎地盤の物性値の不均質性が大きく影響する結果となった。このことから、盛土の地震時応答特性を評価するためには、地盤の不均質性を考慮する必要があると思われる。

表-2 静的信頼性解析による安全率 F

		Ⅱ種地盤		Ⅲ種地盤	
		ケース1	ケース2	ケース1	ケース2
信頼性解析	確定解析	1.25	1.25	1.25	1.25
	平均値	1.14	1.17	1.24	1.25
	最大値	1.22	1.17	1.27	1.25
	最小値	1.06	1.16	1.20	1.25
	変動係数	0.035	0.001	0.011	0.000
	変化率	0.91	0.93	0.99	1.00

表-3 動的信頼性解析による水平最大応答加速度 $A_{X, \max}$

	(gal)	Ⅱ種地盤		Ⅲ種地盤	
		ケース1	ケース2	ケース1	ケース2
信頼性解析	確定解析	824.5	824.5	643.8	643.8
	平均値	732.0	731.9	652.3	645.9
	最大値	776.9	746.8	718.8	663.5
	最小値	687.5	718.1	568.7	624.4
	変動係数	0.028	0.008	0.044	0.011
	変化率	0.89	0.89	1.01	1.00

表-4 動的信頼性解析による残留変位量 $D_{Y, \text{res}}$

	(cm)	Ⅱ種地盤		Ⅲ種地盤	
		ケース1	ケース2	ケース1	ケース2
信頼性解析	確定解析	6.5	6.5	34.2	34.2
	平均値	11.2	11.1	27.3	24.8
	最大値	14.3	12.0	50.2	30.7
	最小値	8.4	10.4	15.6	22.6
	変動係数	0.115	0.026	0.225	0.036
	変化率	1.72	1.71	0.80	0.73

4. まとめ

盛土の地震時における性能設計を行うにあたり、地盤の不均質性が地震時応答特性、特に残留変位量に与える影響について検討するため、弾完全塑性有限要素法を用いて盛土と基礎地盤の不均質性を考慮した信頼性解析を行い、確定解析との比較検討を行った。その結果、静的信頼性解析においてはせん断強度の不均質性が盛土の安定性に大きく寄与し、安全率が低下する傾向にあることがわかった。また、動的信頼性解析においてはせん断強度に加え、せん断波速度も盛土の応答特性に大きく寄与し、地盤特性や入力地震動の周期特性によりその傾向は変化するが、場合によっては残留変位量の最大値が確定解析の 2 倍以上となることもあり、地盤の不均質性が盛土の地震時安定性に大きな影響を及ぼすことがわかった。今後は、地盤の不均質性に空間相関を考慮すること、および様々な周期特性を持った地震動を入力し、より詳細な検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 鶴飼恵三：静的弾塑性 FEM の基礎理論とプログラム，地盤工学会，実務で役立つ FEM 講習会テキスト①，78p.，1998.
- 2) 若井明彦：地盤振動の基礎理論と動的弾塑性 FEM，地盤工学会，実務で役立つ FEM 講習会テキスト②，63p.，1998.