



# 地盤の不均質性を考慮した盛土の信頼性解析に関する研究

沖村, 孝  
鳥居, 宣之  
田中, 博文

---

## (Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 8:13-21

## (Issue Date)

2004-03

## (Resource Type)

departmental bulletin paper

## (Version)

Version of Record

## (JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/00422456>

## (URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00422456>



# 地盤の不均質性を考慮した 盛土の信頼性解析に関する研究

Reliability Analysis of the Embankment considering the Heterogeneity of Soil Properties

沖村 孝<sup>1)</sup>

Takashi OKIMURA

鳥居 宣之<sup>2)</sup>

Nobuyuki TORII

田中 博文<sup>3)</sup>

Hirofumi TANAKA

**概要：**地盤は本来不均質性を有しているにも関わらず、その不均質性が検討される例は少ない。しかしながら、盛土のような土構造物を対象とした場合、地盤の不均質性がその安定性に及ぼす影響を検討する必要がある。特に、地盤の不均質性が地震時盛土の安定性に与える影響についての検討は行われていない。本研究では、堤体型盛土を対象として弾完全塑性有限要素法を用いて静的および動的な信頼性解析を行い、その基礎地盤および盛土本体の不均質性を考慮した際の安定性を検討した。その結果、地盤の不均質性が盛土の安定性に影響を及ぼすことがわかり、残留変位量による盛土の設計を行う場合、地盤の不均質性を考慮する必要があることを明らかにした。

**キーワード：**不均質性, 盛土, 信頼性解析, 基礎地盤, 残留変位量

## 1. はじめに

我が国は世界有数の地震大国であり、数々の大地震による被災を経験しながら、土木構造物の耐震設計法が構築されてきた。特に、兵庫県南部地震においては、予想を上回る規模の地震であったことを考慮しても、土木構造物が受けた被害は甚大なものであった。その中で、河川堤防や鉄道盛土等の盛土に代表される土構造物においても多くの被害が発生した。兵庫県南部地震以前、これらの盛土は一般的に円弧すべり分割法による安全率を用いた設計がなされており、安定・不安定という極限的な検討しか行われなかった。また、耐震設計そのものが行われていない場合もあり、耐震設計が行われている場合においても、円弧すべり分割法に震度法を適用した簡易的な検討が行われているに過ぎなかった。兵庫県南部地震以降、盛土の耐震設計法を改定しようとする研究が盛んに行われ、数々の実験的検討や解析的検討による成果が報告されている。その中でも、鉄道盛土においては、Newmark法を用いて地震後の盛土の残留変位量を算定することにより、従来の安定・不安定という概念とは異なり、地震後においても盛土がどの程度共用に耐えうるのかという性能設計の概念を設計指針に導入している<sup>1)</sup>。

しかしながら、これらの研究においては地盤は均質であると仮定され、地盤が本来材料特性として有している不均質性は考慮されていない。このような地盤の不均質性を確率論を用いて評価する手法が以前より幾つか行われてきたがそれらは静的な検討に留まり<sup>2), 3)</sup>、近年漸く動的解析に適用する試みが行われ始めている<sup>4), 5)</sup>。しかしながら、これらは表層地盤のみを取り扱っており、その上に存在する構造物を含めた検討は行われていない。そこで、本研究では、基礎地盤と盛土を対象とし、2次元弾完全塑性有限要素法を用いて双方の不均質性を考慮した静的および動的解析を行い、不均質性を考慮していない解析と比較検討し、地盤の不均質性が盛土の安定性に与える影響について評価を行う。

## 2. 土構造物の信頼性解析

信頼性設計<sup>6)</sup>とは、ある設計を行う際に想定される不確定要素を確率論を用いて処理できるとして、構造物の想定されるすべての破壊モードに対する合計の破壊確率を算出するものである。また、その安定解析を信頼性解析と称する。信頼性解析において考慮すべき不確定要素は大きく分けて、解析手法そのものが有している誤差、および様々な設計定数のばらつきの2つがある。前者は、実現象をモデル化して解析を行う際に、仮定を導入することにより生じる誤差である。例えば、盛土の安定解析を行う際に破壊形状は円弧で近似できると仮定していることがこれにあたる。後者は、部材形状や材料定数などの設計に用いる値と実際の値との誤差、さらにはそれらの実際の値の不均質性によるものである。その中でも、盛土のような土構造物を対象とした場合、その安定性に最も大きく影響を及ぼすのは、地盤の物性値の不均質性であると思われる。信頼性解析の手法は、数値積分によるものとモンテカルロシミュレーションによるものに大別され、種々の構造物に適用した研究が行われている。数値積分による手法の特徴としては、計算時間が短いが理論が非常に複雑であり、また複雑な構造モデルへの適用が困難である点である。それに対して、モンテカルロシミュレーションによる手法は、ある設計定数を不均質性を持ったパラメータであるとして乱数を発生させ多数の試行を行うので数値積分による手法と比較して計算時間は長い、通常の解析の延長に有るので複雑な構造モデルへの適用も可能である。したがって、本研究においてもモンテカルロシミュレーションによる手法を採用する。

信頼性設計に対するものとしては、従来行われている安全率による設計がある。安全率による設計では、便宜上、不確定要素は無いものと仮定して解析が行われているが、実際には不確定要素が存在するために構造物の最も破壊する確率の高いモードに対して安全率に余裕を持たして設計を行っている。本研究では、その安定解析を確定解析と称する。言い換えれば、信頼性解析では構造物は如何にして破壊に至るかに主眼をおき、確定解析では構造物は如何にすれば破壊に至らないかに主眼をおいて解析が行われている。

盛土のような土構造物の設計を行う場合、先に述べたように地盤の不均質性を無視することはできず、その不均質性を考慮した盛土の信頼性解析についてもすでに一連の研究が行われている<sup>7)</sup>。しかしながら、その検討は静的な範囲内であった。静的な検討の場合、地盤の不均質性をあらわすパラメータとして、最も一般的に扱われるのは、地盤のせん断強度に影響を及ぼす強度定数である。本研究では、強度定数に加えて地震時の検討を行う場合、すなわち地盤の動的性質、中でも地盤のせん断剛性に影響を及ぼすせん断波速度についても不均質性を検討するパラメータとして用いることとする。

## 3. 解析手法および条件

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、その下の基礎地盤層厚  $H$  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（以下、Ⅱ種地盤）、およびⅢ種地盤相当の軟弱層（以下、Ⅲ種地盤）の2種類を仮定している。解析手法としては2次元弾完全塑性有限要素法である GA2D<sup>8)</sup>（静的解析）および quake2d<sup>9)</sup>（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  $D_{Y,res}$  を評価パラメータとして算定する。ここで、オリジナルのプログラムは、地盤の変形に関わるパラメータとして地盤の弾性係数  $E$  を与えるようになっていた。しかしながら、本研究では実際の地盤での測定が可能、かつより工学的なパラメータとして用いられている地盤のせん断波速度  $V_s$  を入力パラメータとするため式(1)による変換を用い、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。

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

ここで、 $g$  は重力加速度、 $G$  はせん断剛性、 $\gamma$  は地盤の単位体積重量である。モデルの境界条件は、底部は鉛直、水平方向ともに完全固定、側方は鉛直方向は自由、水平方向は固定した。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  $1\text{m} \times 1\text{m}$  とし、その両側に緩衝領域として 20m の均質領域を設けた。

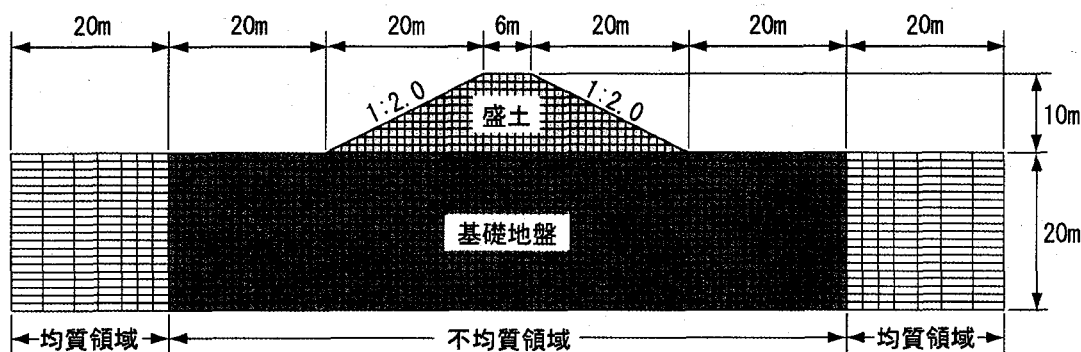


図-1 解析モデル

表-1 入力物性値

|      | $\gamma_t(\text{kN/m}^3)$ | $c(\text{kN/m}^2)$ | $\phi(^{\circ})$ | $\psi(^{\circ})$ | $\nu$ | $V_s(\text{m/sec})$ | $G(\text{kN/m}^2)$ |
|------|---------------------------|--------------------|------------------|------------------|-------|---------------------|--------------------|
| 盛土   | 18                        | 5                  | 22               | 12               | 0.33  | 120                 | 26,500             |
| Ⅱ種地盤 | 22                        | 0                  | 35               | 15               | 0.23  | 200                 | 90,000             |
| Ⅲ種地盤 | 17                        | 10                 | 20               | 10               | 0.36  | 133                 | 30,500             |

信頼性解析を行う際に、不均質性を考慮するパラメーターは強度定数  $c, \phi$  およびせん断波速度  $V_s$  とし、各パラメーターは表-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、盛土の変動係数  $V_{G,E}$  は 0.1、基礎地盤の変動係数  $V_{G,F}$  は 0.2 とした。信頼性解析の手法は、不均質性を考慮した地盤モデルを用いてモンテカルロシミュレーションによる手法を採用した。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  $c, \phi$  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 ケースについて検討を行った。変動係数及び平均値より算定される各検討ケースの標準偏差を表-2 に示す。モンテカルロシミュレーションの試行回数は、試行回数による影響が少なくなる各ケース 100 回とした。

また、確定モデルの底面に振幅 10gal のスイープ波を入力し、盛土天端における水平最大応答加速度のフーリエスペクトル解析を行うことによりモデルの固有周期  $T$  を算定した。その結果、図-2 に示すようにⅡ種地盤上の盛土では 0.44sec、Ⅲ種地盤上の盛土では 0.64sec となった。また、盛土天端の最大応答に大きな影響を及ぼすと考えられる基礎地盤そのものの固有周期  $T$  も算定した。基礎地盤のみのモデルを用いてモデル中央地表面における水平最大応答加速度のフーリエスペクトル解析より固有周期  $T$  を算定したところ、図-2 に示すようにⅡ種地盤で 0.36sec、Ⅲ種地盤では 0.53sec となった。これは、式(2)によって算定される地盤の固有周期  $T$  の簡易算定式による結果と比較的良好な一致を示している。したがって、共振による最大応答を与えられられるⅡ種地盤では 0.4sec、Ⅲ種地盤では 0.6sec の周期を持った振幅 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  $\alpha$  は 0、剛性比例定数  $\beta$  は 0.02 とした。

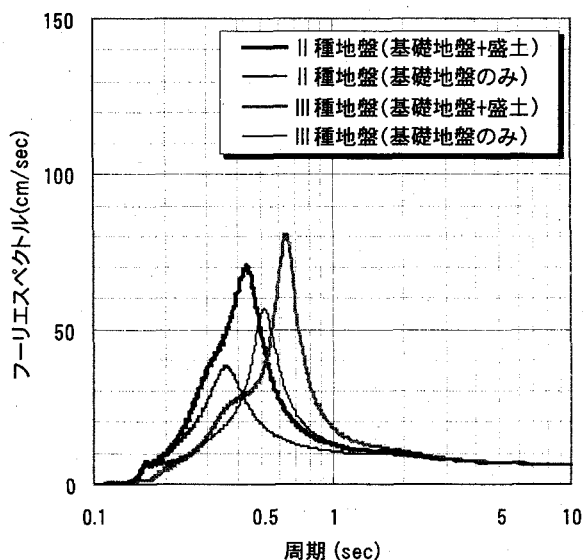


図-2 モデルの固有周期

表-2 解析ケース

| 解析ケース | 地盤種別 | c(kN/m <sup>2</sup> ) |      | φ(°) |      | V <sub>s</sub> (m/sec) |      |
|-------|------|-----------------------|------|------|------|------------------------|------|
|       |      | 平均                    | 標準偏差 | 平均   | 標準偏差 | 平均                     | 標準偏差 |
| 確定解析  | 盛土   | 5                     | -    | 22   | -    | 120                    | -    |
|       | Ⅱ種地盤 | 0                     | -    | 35   | -    | 200                    | -    |
|       | Ⅲ種地盤 | 10                    | -    | 20   | -    | 133                    | -    |
| 信頼性解析 | ケース1 | 盛土                    | 5    | 0.5  | 22   | 2.2                    | 120  |
|       |      | Ⅱ種地盤                  | 0    | 0.0  | 35   | 7.0                    | 200  |
|       |      | Ⅲ種地盤                  | 10   | 2.0  | 20   | 4.0                    | 133  |
|       | ケース2 | 盛土                    | 5    | 0.5  | 22   | -                      | 120  |
|       |      | Ⅱ種地盤                  | 0    | 0.0  | 35   | -                      | 200  |
|       |      | Ⅲ種地盤                  | 10   | 2.0  | 20   | -                      | 133  |

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

#### 4. 解析結果

##### 4.1 確定解析結果

静的確定解析を行った結果、安全率  $F$  はⅡ種地盤、Ⅲ種地盤上の盛土ともに 1.25 と得られ、基礎地盤の違いによる差異は見られなかった。最大せん断ひずみについても、Ⅱ種地盤、Ⅲ種地盤上の盛土ともに左右対称かつ法先から法肩に至る円弧状に分布し、基礎地盤まで至るようなせん断帯は形成されず、基礎地盤の違いによる大きな差異は見られなかった。一例として、図-3 にⅡ種地盤上の盛土における最大せん断ひずみの分布図を示す。静的確定解析においては、そのせん断領域が基礎地盤部まで達していないため、盛土の強度のみで安全率  $F$  が決定されていることがわかる。

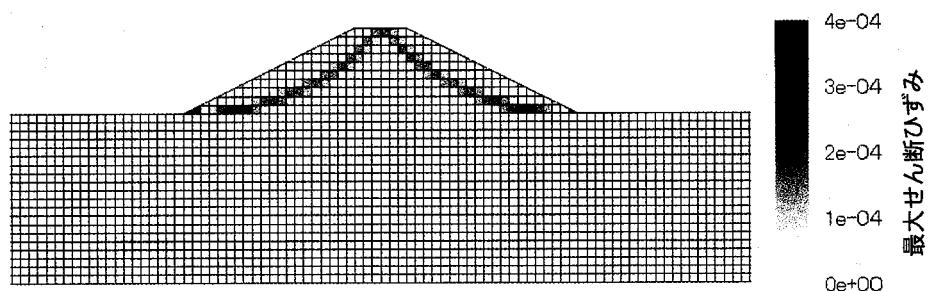


図-3 最大せん断ひずみ分布 (Ⅱ種地盤)

動的確定解析では盛土天端における応答の最大値は、Ⅱ種地盤上の盛土で水平最大応答加速度  $A_{X,max}$  は 825gal、残留変位量  $D_{Y,res}$  は 6.5cm、Ⅲ種地盤上の盛土で水平最大応答加速度  $A_{X,max}$  は 644gal、残留変位量  $D_{Y,res}$  は 34.2cm となった。ここで、Ⅲ種地盤上の盛土の残留変位量  $D_{Y,res}$  がⅡ種地盤上の盛土と比較して大きいのは、軟弱地盤であるために基礎地盤部の沈下量が大きかったためである。動的確定解析においては、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  $D_{Y,res}$  が大きくなるという結果になった。

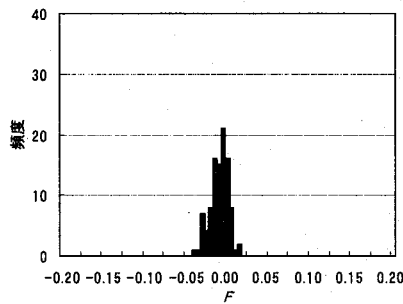
## 4.2 信頼性解析結果

### (1) セン断強度の不均質性の影響 (ケース 1)

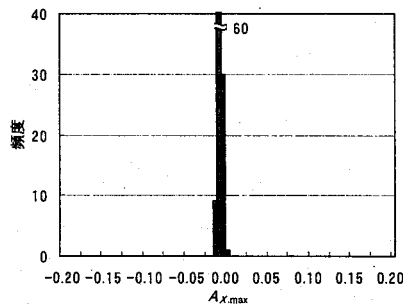
せん断強度に影響を及ぼす強度定数  $c, \phi$  の不均質性をパラメーターとした信頼性解析を行った。静的信頼性解析により得られた安全率  $F$  のヒストグラムを図-4 に、動的信頼性解析を行った結果得られた水平最大応答加速度  $A_{X,max}$  および残留変位量  $D_{Y,res}$  のヒストグラムを図-5 に示す。ヒストグラムは、信頼性解析値を確定解析値で除することにより正規化して表示してある。表-3 には確定解析値と比較して、信頼性解析値の平均値、最大値および最小値、加えて変動係数および変化率を示している。変化率とは、信頼性解析により得られた平均値を確定解析により得られた値で除することにより得られる比率である。

静的信頼性解析を行った結果、表-3 よりⅡ種地盤上の盛土においては、安全率  $F$  の変化率は 0.99 となっており確定解析と比較して安全率  $F$  は若干低下傾向にあるものの平均値では大きな変化は見られなかった。しかしながら、図-4 (a) に示すように約 70%が確定解析値よりも小さな安全率  $F$  を示していた。Ⅲ種地盤上の盛土においても、安全率  $F$  の変化率は 0.99 となっており平均値では確定解析と比較して安全率  $F$  は若干低下傾向にあるものの大きな変化は見られなかったが、Ⅱ種地盤同様、図-4 (b) に示すように約 75%が確定解析値を下回っていた。

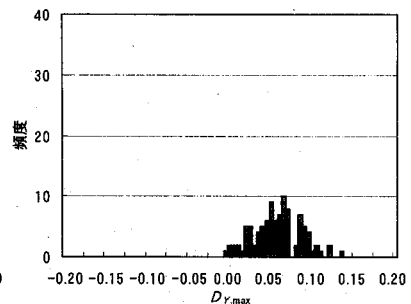
動的信頼性解析を行った結果、表-3 よりⅡ種地盤上の盛土においては、水平最大応答加速度  $A_{X,max}$  で変化率は 0.99 と若干低下傾向にあるものの大きな変化は見られず、図-5 (a) に示すように個々の値に着目しても確定解析値を上回るものは無く、ばらつきも小さかった。一方、残留変位量  $D_{Y,res}$  では変化率は 1.05 と平均値では増加傾向にあり、図-5 (b) に示すようにほぼ全ての試行において確定解析値を上回り、最大値においては確定解析値の 1.13 倍であった。Ⅲ種地盤上の盛土においては、水平最大応答加速度  $A_{X,max}$  の変化率は 0.97 となり、Ⅱ種地盤よりは低下傾向が大きくなり、最大値でも確定解析値を上回るものは無く、図-5 (c) に示すようにばらつきも小さかった。一方、残留変位量  $D_{Y,res}$  の変化率は 0.98 とⅡ種地盤とは異なり低下傾向にあった。しかしながら、図-5 (d) に示すように約 20%が確定解析値を上回っており、最大値においては確定解析の値の 1.04 倍であった。また、水平最大応答加速度  $A_{X,max}$  のばらつきに対して、残留変位量  $D_{Y,res}$  のばらつきの方が、変動係数で比較するとⅡ種地盤では約 9 倍、Ⅲ種地盤でも約 4 倍と大きく得られた。これより、静的解析、動的解析ともに、せん断強度の不均質性が盛土の安定性、特に残留変位量  $D_{Y,res}$  に影響を及ぼすことがわかった。



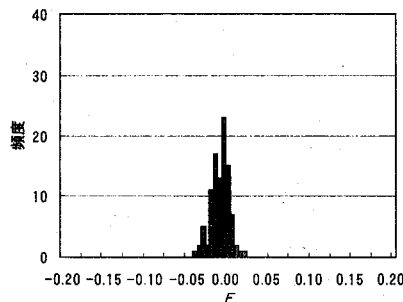
(a) 安全率 (Ⅱ種地盤)



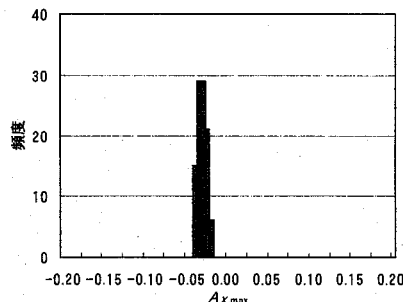
(a) 水平最大応答加速度 (Ⅱ種地盤)



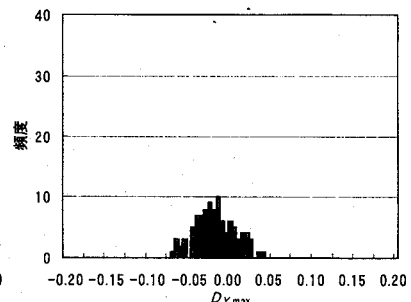
(b) 残留変位量 (Ⅱ種地盤)



(b) 安全率 (Ⅲ種地盤)



(c) 水平最大応答加速度 (Ⅲ種地盤)



(d) 残留変位量 (Ⅲ種地盤)

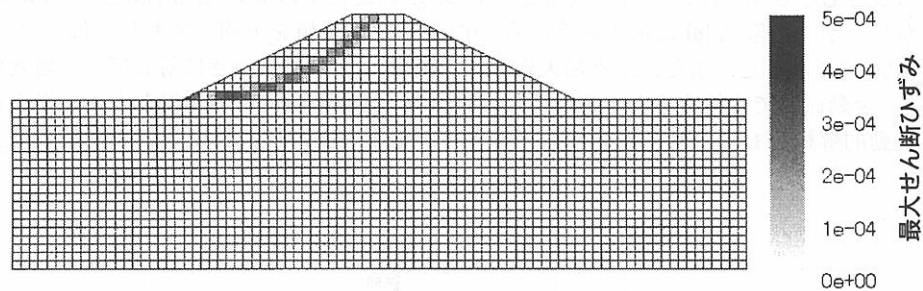
図-4 静的信頼性解析結果 (ケース 1)

図-5 動的信頼性解析結果 (ケース 1)

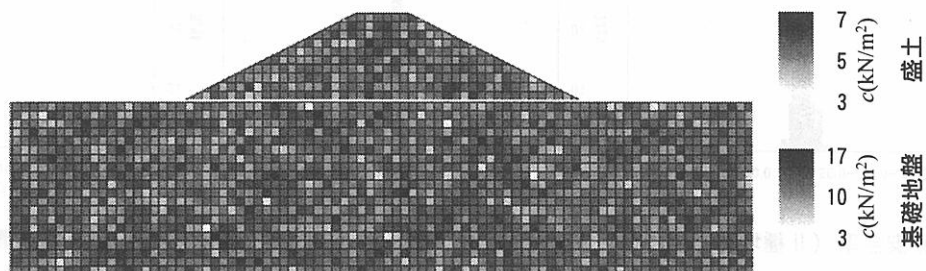
表-3 信頼性解析の結果（ケース1）

|       |      | 静的解析  |       | 動的解析              |       |                  |       |
|-------|------|-------|-------|-------------------|-------|------------------|-------|
|       |      | $F$   |       | $A_{X,max}$ (gal) |       | $D_{Y,max}$ (cm) |       |
|       |      | Ⅱ種地盤  | Ⅲ種地盤  | Ⅱ種地盤              | Ⅲ種地盤  | Ⅱ種地盤             | Ⅲ種地盤  |
| 確定解析  |      | 1.25  | 1.25  | 824.5             | 643.8 | 6.5              | 34.2  |
| 信頼性解析 | 平均値  | 1.234 | 1.236 | 815.4             | 622.1 | 6.8              | 33.5  |
|       | 最大値  | 1.267 | 1.274 | 820.9             | 629.5 | 7.3              | 35.4  |
|       | 最小値  | 1.195 | 1.198 | 809.8             | 615.2 | 6.4              | 31.6  |
|       | 変動係数 | 0.011 | 0.011 | 0.003             | 0.006 | 0.027            | 0.025 |
|       | 変化率  | 0.99  | 0.99  | 0.99              | 0.97  | 1.05             | 0.98  |

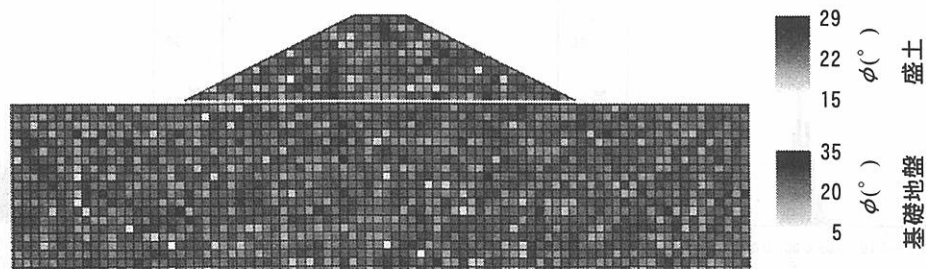
せん断強度の不均質性を考慮することにより盛土の安定性が低下するメカニズムとしては、盛土や盛土付近の地表面においてせん断強度の低い要素が集中している部分に応力が集中し、その結果としてひずみが蓄積され、そこを中心としてせん断領域が発生すると考えられる。その一例として、Ⅱ種地盤上の盛土における試行の中で最も安全率  $F$  が小さいケース（安全率  $F=1.195$ ）の解析結果を図-6 に示す。図-6 (a) は、最大せん断ひずみの分布を示したものである。この地盤モデルの場合、図-6 (b), (c) に示すように盛土の左側法面に比較的強度定数  $c, \phi$  の低い部分が集中していたため、左側法面だけにせん断領域が発達する結果となった。ここで、基礎地盤部にも強度の低い部分は存在するが、盛土部と比較して相対的に強度が高いため、せん断領域は基礎地盤部まで達しなかったと考えられる。



(a) 最大せん断ひずみ分布



(b) 粘着力の空間分布



(c) 内部摩擦角の空間分布

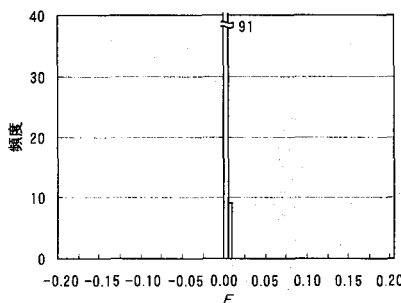
図-6 静的解析結果の一例（Ⅱ種地盤）

## (2) セン断剛性の不均質性の影響 (ケース 2)

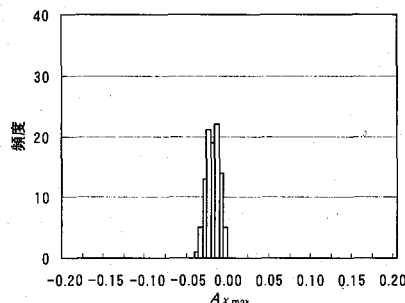
せん断剛性に影響を及ぼすせん断波速度  $V_s$  の不均質性をパラメーターとした信頼性解析を行った。静的信頼性解析により得られた安全率  $F$  のヒストグラムを図-7 に、動的信頼性解析を行った結果得られた水平最大応答加速度  $A_{X,max}$  および残留変位量  $D_{Y,res}$  のヒストグラムを図-8 に示す。ヒストグラムは、信頼性解析値を確定解析値で除することにより正規化して表示してある。表-4 には確定解析値と比較して、信頼性解析値の平均値、最大値および最小値、加えて変動係数および変化率を示している。

静的信頼性解析を行った結果、表-4 よりⅡ種地盤上の盛土においては、ケース 1 とは異なり安全率  $F$  の変化率は 1.00 となり確定解析と比較して平均値は低下せず、図-7 (a) に示すようにばらつきもほとんど無かった。Ⅲ種地盤上の盛土においても、Ⅱ種地盤上の盛土と同様に安全率  $F$  の変化率は 1.00 となり平均値は低下せず、図-7 (b) に示すようにばらつきもほとんど無かった。これより、せん断波速度  $V_s$  の不均質性は、盛土の静的安定性、すなわち安全率  $F$  には、ほとんど影響していないことがわかる。

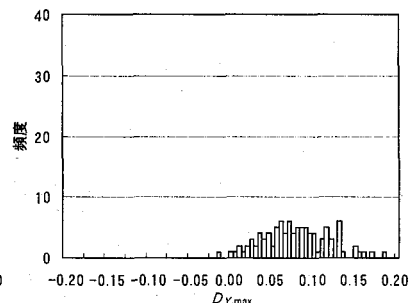
動的信頼性解析を行った結果、Ⅱ種地盤上の盛土においては、水平最大応答加速度  $A_{X,max}$  で変化率は 0.98 と若干低下傾向にあり、図-8 (a) に示すようにケース 1 と比較してばらつきは大きくなっているが、個々の値に着目しても確定解析値を上回るものは無かった。一方、残留変位量  $D_{Y,res}$  では変化率は 1.08 と増加傾向にあり、図-8 (b) に示すようにほぼ全ての試行において確定解析値を上回った。また、最大値においては確定解析値の 1.2 倍となり、変化率、最大値ともにケース 1 よりも大きな値を示した。Ⅲ種地盤上の盛土においては、水平最大応答加速度  $A_{X,max}$  は変化率 0.96 となり、Ⅱ種地盤よりは低下傾向が大きくなり、図-8 (c) に示すように最大値でも確定解析値を上回るものは無かった。一方、残留変位量  $D_{Y,res}$  は変化率 0.89 とケース 1 同様に低下傾向にあったが、低下傾向が大きく、図-8 (d) に示すようにケース 1 とは異なり確定解析値を上回るものは無かった。また、ケース 1 同様に、水平最大応答加速度  $A_{X,max}$  のばらつきに対して、残留変位量  $D_{Y,res}$  のばらつきの方が、変動係数で比較するとⅡ種地盤では約 5 倍、Ⅲ種地盤でも約 2 倍と大きく得られた。しかしながら、残留変位量  $D_{Y,res}$  そのものの変動係数に着目すると、ケース 2 の方が大きく得られる傾向にあった。これより、せん断波速度の不均質性は盛土の動的応答特性、特に残留変位量  $D_{Y,res}$  に影響を及ぼすことがわかった。



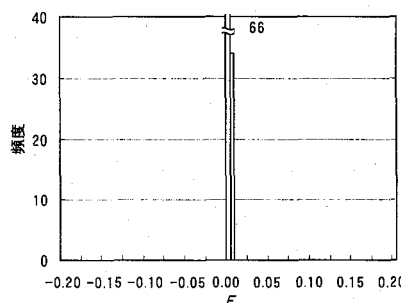
(a) 安全率 (Ⅱ種地盤)



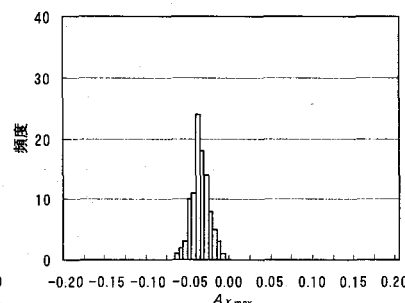
(a) 水平最大応答加速度 (Ⅱ種地盤)



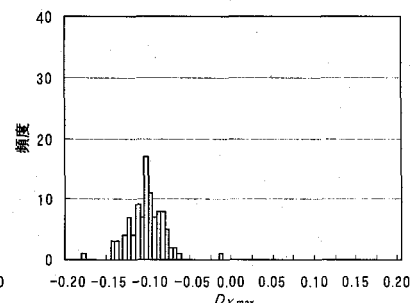
(b) 残留変位量 (Ⅱ種地盤)



(b) 安全率 (Ⅲ種地盤)



(c) 水平最大応答加速度 (Ⅲ種地盤)



(d) 残留変位量 (Ⅲ種地盤)

図-7 静的信頼性解析結果 (ケース 2)

図-8 動的信頼性解析結果 (ケース 2)

表-4 信頼性解析の結果（ケース2）

|       |      | 静的解析  |       | 動的解析              |       |                  |       |
|-------|------|-------|-------|-------------------|-------|------------------|-------|
|       |      | $F$   |       | $A_{X,max}$ (gal) |       | $D_{Y,max}$ (cm) |       |
|       |      | Ⅱ種地盤  | Ⅲ種地盤  | Ⅱ種地盤              | Ⅲ種地盤  | Ⅱ種地盤             | Ⅲ種地盤  |
| 確定解析  |      | 1.25  | 1.25  | 824.5             | 643.8 | 6.5              | 34.2  |
| 信頼性解析 | 平均値  | 1.249 | 1.251 | 806.3             | 618.4 | 7.0              | 30.5  |
|       | 最大値  | 1.250 | 1.252 | 820.1             | 635.6 | 7.8              | 33.5  |
|       | 最小値  | 1.249 | 1.250 | 790.5             | 599.1 | 6.4              | 27.9  |
|       | 変動係数 | 0.000 | 0.001 | 0.008             | 0.011 | 0.039            | 0.024 |
|       | 変化率  | 1.00  | 1.00  | 0.98              | 0.96  | 1.08             | 0.89  |

### (3) 地盤の不均質性の影響の考察

信頼性解析を行った結果得られた変動係数の比較を図-9に示す。静的信頼性解析による安全率 $F$ では、せん断強度の不均質性に着目したケース1の方が、ケース2と比較して約10倍の値が得られた。一方、動的信頼性解析では静的信頼性解析による結果と傾向が異なり、水平最大応答加速度 $A_{X,max}$ ではⅡ種地盤、Ⅲ種地盤ともに、せん断剛性の不均質性に着目したケース2の方がケース1と比較して約2倍の値が得られた。残留変位量 $D_{Y,res}$ においては、Ⅲ種地盤においてはほとんど同じであったが、Ⅱ種地盤においてはケース2の方が1.3倍と大きく得られた。また、変動係数の絶対値に着目すると、ケース1、ケース2の何れ場合においても残留変位量 $D_{Y,res}$ の変動係数が最も大きくなっていた。

これらより、せん断強度は破壊あるいは非破壊といった終局的な応力状態の検討に重要なパラメーターであり、せん断剛性は動的応答、特に微小ひずみ領域における応力状態の検討に支配的なパラメーターであることがわかる。また、地盤の不均質性を考慮した際に、最もその影響を受けるのは残留変位量 $D_{Y,res}$ であることもわかった。

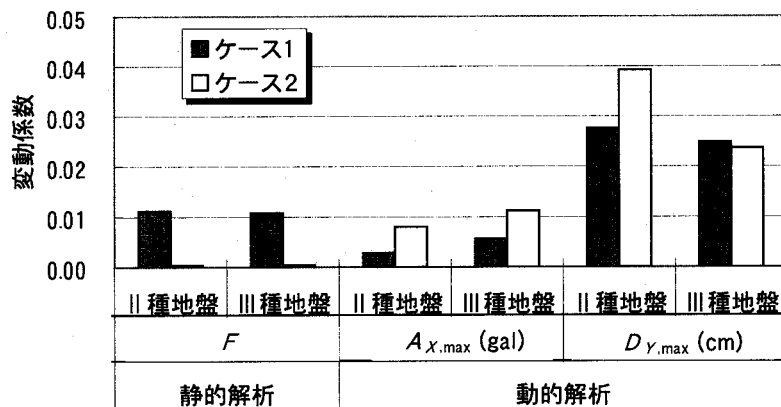


図-9 信頼性解析結果の変動係数

## 5. まとめ

本研究では、堤体型盛土を対象として盛土とその基礎地盤の物性値の不均質性が盛土の安定性与える影響を評価するため、せん断強度およびせん断波速度の不均質性に着目し、弾完全塑性有限要素法を用い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、以下の結果が得られた。

- 1) 静的解析においては、確定解析では基礎地盤の違いによる安全率の差異は見られなかった。信頼性解析においても、安全率は確定解析と比較して若干低下する傾向にあったが、基礎地盤の違いによる低下度合いに大きな差異は無かった。また、Ⅱ種地盤、Ⅲ種地盤上の盛土ともに、せん断波速度の不均質性よりも強度定数の不均質性の方が安全率のばらつきに与える影響が大きかった。

- 2) 動的解析においては、盛土の天端の水平最大応答加速度は、Ⅱ種地盤、Ⅲ種地盤上の盛土ともに低下傾向にあり、全ての試行において確定解析値を下回った。しかしながら、静的解析とは異なり、強度定数の不均質性よりもせん断波速度の不均質性の方が水平最大応答加速度のばらつきに与える影響が大きかった。
- 3) また、残留変位量においては、Ⅱ種地盤上の盛土では増加傾向、Ⅲ種地盤上の盛土では低下傾向にあった。しかしながら、最大値に着目すると、ケース2のⅢ種地盤以外のケースにおいては確定解析の値を上回っており、ケース1のⅡ種地盤に至っては確定解析値の1.2倍と大きな値を示した。ばらつきに関しても、水平最大応答加速度同様に、強度定数の不均質性よりもせん断波速度の不均質性の方が残留変位量のばらつきに与える影響が大きく、その傾向は顕著であった。

以上より、地盤種別や入力地震動の特性により傾向が変化する可能性がある結果となったが、地盤の不均質性が盛土の安定性、特に残留変位量に大きな影響を及ぼすことがわかった。残留変位量は確定解析値と比較すると、ほぼ全てのケースにおいて最大値が確定解析値を上回っていること、並びに不均質性を考慮した際に最もばらつきが大きくなった。これらのことから、盛土の安定性の検討を行う場合、特に残留変位量による盛土の設計を行う場合においては、地盤の不均質性を考慮する必要があることが明らかとなった。今後は、地盤の不均質性を考慮する際に、空間相関を考慮すること、並びに地盤や入力地震動の特性が応答に与える影響についても、詳細に検討していく予定である。

#### 参考文献

- 1) 鉄道総合研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説－耐震設計－，丸善，pp.317-329，1999。
- 2) 山下典彦，田中博文：地盤の不均質性を考慮した小段付き盛土の地震時破壊挙動に関する研究，土木学会地震工学論文集（CD-ROM），Vol.27，2003。
- 3) 土田孝，湯怡新：港湾構造物における最適な円弧すべりの安全率，土木学会論文集，No.596／Ⅲ-43，pp.295-306，1998。
- 4) 畠中仁，室野剛隆：地盤定数のばらつきを考慮した表層地盤の非線形応答特性，日本地震工学シンポジウム講演論文集，Vol.11，pp.769-774，2002。
- 5) 中村晋：地盤媒質の2次元不均質性が非線形地震応答に及ぼす影響とモデル化，構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム講演論文集，Vol.5，pp.665-670，2003。
- 6) 星谷勝，石井清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，208p.，1986。
- 7) 松尾稔：地盤工学－信頼性設計の理念と実際－，技報堂出版，407p.，1984。
- 8) 鵜飼恵三：実務で役立つFEM講習会テキスト① 静的弾塑性FEMの基礎理論とプログラム，78p.，1998。
- 9) 若井明彦：実務で役立つFEM講習会テキスト② 地盤震動の基礎理論と動的弾塑性FEM，41p.，1998。

著者：1) 沖村 孝，神戸大学都市安全研究センター，教授；2) 鳥居宣之，神戸大学都市安全研究センター，助手；3) 田中博文，神戸大学大学院自然科学研究科建設学専攻博士前期過程，学生

# Reliability Analysis of the Embankment considering the Heterogeneity of Soil Properties

Takashi OKIMURA  
Nobuyuki TORII  
Hirofumi TANAKA

## Abstract

In recent years, introduction of a performance design is advanced in designs of various structures. Also in the design of engineering-works structures, which are considered to shift to the performance designing method from the present designing method. Moreover, reexamination of the earthquake resistant designing method of structures are advanced after the Hyogo-ken Nanbu earthquake.

In this research, static and dynamic reliability analyses were performed using the elasto-perfect-plasticity finite element method for embankment. These analyses examined the stability at the case of taking into consideration the heterogeneity of the foundation ground and the embankment was examined. Consequently, it turns out that the heterogeneity of the ground affects the dynamic response characteristic of embankment. And in the case of the design of the embankment by residential displacement is performed, it is shown clearly that there is the necessity of taking the heterogeneity of the ground into consideration.