

地盤強度の不均質性が盛土の耐震安定性指標に与える影響

田中博文¹・山下典彦²

¹神戸大学大学院自然科学研究科学生 (〒651-8501 神戸市灘区六甲台町1)

E-mail:034t128n@y03.kobe-u.ac.jp

²神戸市立工業高等専門学校都市工学科助教授 (〒651-2194 神戸市西区学園東町8-3)

E-mail:yamasita@kobe-kosen.ac.jp

盛土は、道路盛土や鉄道盛土として、現在の社会基盤を構成する上で必要不可欠な土構造物である。盛土の設計に関しては、近年大規模地震による土構造物の被災が相次ぐ中で、従来の安全率による設計手法から、地震後の残留変位量による性能設計への変更が検討されている。ここで盛土に限らず、土構造物の設計は、通常地盤の不均質性を無視して行われている。しかしながら、実際の地盤はある程度の不均質性を有していることから、その不均質性が盛土の耐震安定性に与える影響を検討する必要がある。そこで、本研究では、盛土の安全率および残留変位量の算定に関して、モンテカルロシミュレーションによる信頼性解析を行い、その影響を検討する。

Key Words : *embankment, heterogeneity of soil strength, safety factor, residual displacement, Newmark method*

1. はじめに

盛土構造物は、道路盛土や鉄道盛土として広く用いられている土構造物であり、現在の社会基盤を構成する上で必要不可欠な構造物である。しかしながら、これらの盛土構造物は、兵庫県南部地震以降、近年多発している大規模な地震において被災が相次ぎ、実際に社会基盤にも大きな影響を及ぼしている事例もある¹⁾。これら盛土構造物は、従来円弧すべり分割法による安全率を主な評価基準として設計が行われ²⁾、耐震設計が行われることはほとんどなかった。耐震設計が行われている場合においても、地震による外力を静的な慣性力として評価する震度法を円弧すべり分割法に適用した簡易なものであった³⁾。これは、盛土構造物に代表される土構造物は、例えば被災したとしても、容易に復旧ができることなどから、十分な耐震設計が行われてこなかったためである。

しかしながら、近年、土構造物が被災した場合の社会基盤に与える影響を考慮し、地震後の盛土天端の沈下量、すなわち、残留変位量による性能設計に対する検討がなされている。残留変位量を算定する手法としては、有限要素法やNewmark法があり、実際にL2地震動の性能照査用としてNewmark法が設計指針にも明示されている⁴⁾。

これは、既存の盛土でも、水平震度0.2で設計されていた場合、L2地震動クラスの地震入力に対して実際に地震中に盛土の安全率が瞬間的に1.0を下回ったとしても、盛土本体は瞬時に大規模な崩壊に至らないのが実状であり、これらの盛土を、地震時に安全率が1.0を下回らないように設計するのは、非常に不経済であるためである。そこで、残留変位量算定手法により、地震後の残留変位量が許容変位量以内に納まるように設計を行おうとするものである。

一方で、盛土のような土構造物を対象とする場合、その材料の特性上げらつきを有しているため、地盤の不均質性を考慮する必要がある。現在、土構造物の設計は、地盤を均質であると仮定して行われており、地盤の不均質性が土構造物に与える影響についての詳細な検討はされていない。しかし、実際に土構造物を施工する際、土を均質にすることはほぼ不可能であり、この仮定は計算を容易に行うためのものに過ぎない。地盤が本質的に不均質性を有していることは、従来より広く知られており、その不均質性の影響を評価しようとする試みがなされてきた^{5),6),7),8)}。これらは、地盤の不均質性を確率論的に評価するものであり、信頼性設計法の概念に基づいたものである。しかしながら、土構造物に適用されたこれらの

多くは、静的な安定解析にのみ行われており^{9),10),11)}、本研究で取り扱うような、地震時のような動的な問題に適用された例は少ない^{12),13),14)}。

そこで、本研究では、現行の設計指針に示されている安全率による設計法、ならびに、簡易に地震後の盛土の残留変位量を算定する手法として近年着目されているNewmark法⁴⁾に対し、地盤の不均質性を考慮した信頼性解析を行う。そして、安全率及び残留変位量のばらつきに着目し、これらを比較検討することにより、地盤の不均質性が地震時の盛土に与える影響を評価する。

2. 地盤の不均質性を考慮した残留変位量の算定

(1) 盛土の残留変位量の算定手法

残留変位量の算定には、鉄道構造物の耐震設計指針にも示されているNewmark法⁴⁾を用いる。Newmark法とは、すべり土塊を剛体と仮定し、地震動を入力し、運動方程式を積分することにより、盛土の変位量を算定する手法である¹⁵⁾。図-1に示すようなすべり土塊があるとき、すべり土塊の運動方程式は、式(1)で表される。

$$-J\ddot{\theta} + M_{DW} + k_h M_{DK} - M_{RW} + k_h M_{RK} - M_{RC} = 0 \quad (1)$$

ここで、 θ は回転角、 J は慣性モーメント、 k_h は水平震度、 M_{DW} は自重による滑動モーメント、 M_{DK} は地震慣性力の基準滑動モーメント、 M_{RW} は自重による抵抗モーメント、 M_{RK} は地震慣性力の基準抵抗モーメント、 M_{RC} は粘着力による抵抗モーメントである。

式(1)を、角加速度 $\ddot{\theta}$ について整理すると、式(2)が得られる。

$$\ddot{\theta} = (k_h - k_y)(M_{DK} + M_{RK})/J \quad (2)$$

ここで、 k_y は降伏震度であり、式(3)によって算定される。また、安全率は式(4)により算定される。

$$k_y = \frac{M_{RW} + M_{RC} - M_{DW}}{M_{DK} + M_{RK}} \quad (3)$$

$$F_s = \frac{M_{RW} + M_{RC}}{M_{DW}} \quad (4)$$

残留変位量の算定手順については、まず、式(4)を用いて最小安全率を与える臨界円、および式(3)により降伏震度を求める。ついで、入力地震動に対して、式(2)を線形加速度法により、角速度 $\dot{\theta}$ 、回転角 θ を逐次計算し、最終的に式(5)を用いて、臨界円半径 R と回転角 θ より残留変位量 δ を算定する。

$$\delta = R\theta \quad (5)$$

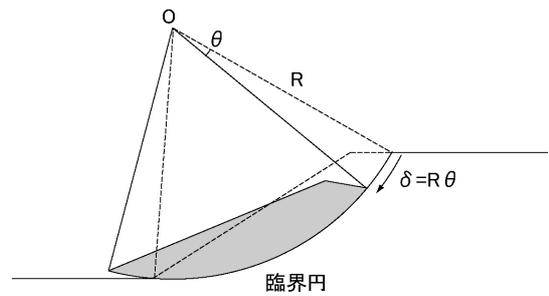


図-1 Newmark法による残留変位量の算定モデル

(2) 盛土の信頼性解析

盛土の信頼性解析については、既往の研究^{9),10),11)}によって詳細な検討が行われている。これらは静的な盛土の安定問題に適用されたものである。本研究では、この理論を動的問題にも適用することを試みた。具体的には、図-2に示す解析フローに従い、盛土の信頼性解析を実施した。まず、通常の解析でも必要となる解析モデルおよび入力地震動を設定する。次に、信頼性解析を行う際に必要となる不均質地盤モデルを発生させるためのパラメーターを設定する。パラメーターとしては、地盤の不均質性の度合を規定する変動係数、不均質パラメーター間の相関関係を規定する相関係数、ならびにモンテカルロシミュレーションの試行回数である。そして、最後にモンテカルロシミュレーションを行う。モンテカルロシミュレーションでは、まず各試行で不均質地盤モデルを発生させ、その地盤モデルに対して安定解析を行い、臨界円の探査を行い、最小安全率および降伏震度を算定する。次に、その臨界円に対してNewmark法による時刻歴計算を行い、地震時の残留変位量を算定する。最終的に、モンテカルロシミュレーションの結果得られた、安全率、降伏震度および残留変位量を統計的に分析することにより地盤の不均質性が地震時の盛土に与える影響を評価する。

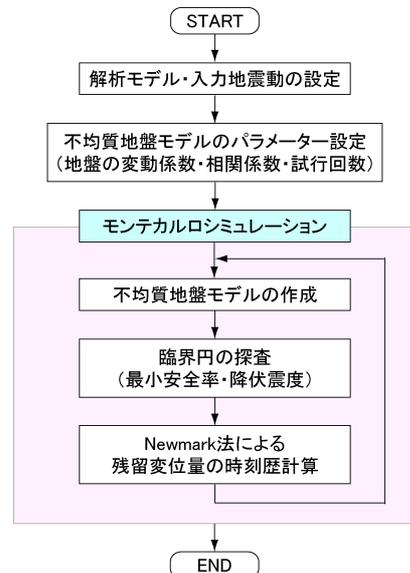


図-2 信頼性解析のフロー

(3) 不均質地盤モデル

地盤の信頼性解析を行う際には、地盤の不均質性のモデル化が解析結果に大きな影響を及ぼすと考えられる。本研究では、次のような不均質地盤モデルを用いた。

地盤の不均質性については、既往の研究により水平方向には非常に相関性の高い地盤が連続するのに対し、鉛直方向の相関性は非常に低いとされている⁹⁾。これらは、地盤の堆積作用によるものであり、盛土についても、築造過程を考慮すると水平方向には比較相関性の高い物性が連続すると考えられる。そこで、本研究では、図-3に示すような水平互層構造を有した不均質地盤モデルを用いる。このモデルは、水平方向には地盤は均質であるが、鉛直方向に一定の層厚ごとに物性を変化させることができるものであり、これにより実地盤の不均質性をモデル化した不均質地盤モデルを作成した。

不均質性を考慮するパラメーターとしては、強度定数、すなわち、粘着力 c および内部摩擦角 ϕ とした。ここで、強度定数 c, ϕ の個々の分布傾向は正規分布で近似できることが広く知られている⁵⁸⁾。さらに、本研究では、強度定数 c, ϕ の間には、同一物性を想定した場合、正の相関関係があると仮定し、2次元正規分布^{16), 17)}により関連付けた値を用いた。2次元正規分布とは、第1変数 x が式(5)に示すような正規分布 $f_x(x)$ で与えられるとき、第2変数 y については式(6)に示すような条件付き正規分布 $f_{y|x}(y|x)$ で与えられるものである。条件付き正規分布は、式(7)の条件付き標準偏差 $\sigma_{y|x}$ 、ならびに式(8)の条件付き平均値 $\mu_{y|x}$ により規定される。ここで、 ρ は相関係数である。

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)^2\right] \quad (5)$$

$$f_{y|x}(y|x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{y|x}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y-\mu_{y|x}}{\sigma_{y|x}}\right)^2\right] \quad (6)$$

$$\sigma_{y|x} = \sigma_y \sqrt{1-\rho^2} \quad (7)$$

$$\mu_{y|x} = \mu_y + \rho \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (x - \mu_x) \quad (8)$$

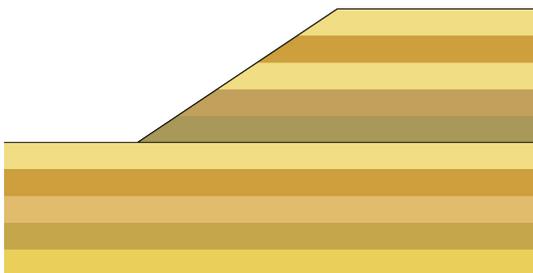


図-3 不均質地盤モデル

3. 数値解析

(1) 解析条件

解析対象には、図-4に示すような盛土高6m、斜面勾配1:1.5の単純盛土を想定した。盛土材は砂質土、基礎地盤は十分な支持力を有した良好な地盤を想定している。

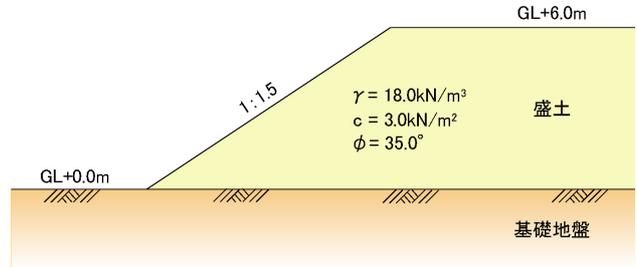
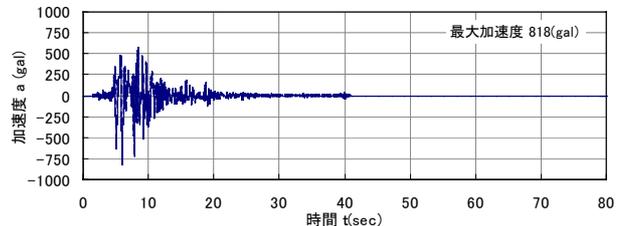
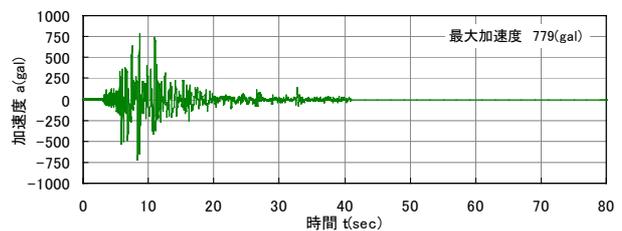


図-4 解析モデル

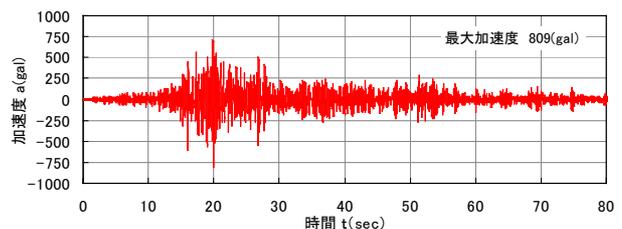
入力地震動としてはL2地震動クラスの地震を想定し、図-5に示すような3種類の地震観測記録を用いた。図-5(a)は1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台のNS成分¹⁸⁾、図-5(b)は2004年新潟県中越地震の小千谷のNS成分¹⁸⁾、図-5(c)は2003年十勝沖地震の広尾のNS成分¹⁹⁾であり、それぞれ最大加速度は818gal, 779gal, 809galである。図-6には、各入力地震動のフーリエスペクトルを示している。これらより、入力地震動の最大加速度は、800gal程度であるが、兵庫県南部地震ならびに新潟県中越地震に



(a) 神戸海洋気象台・NS成分



(b) 小千谷・NS成分



(c) 広尾・NS成分

図-5 入力地震動の時刻歴

関しては直下型地震であるので主要動の継続時間が短く、十勝沖地震に関しては海洋型地震であるので主要動の継続時間が非常に長くなっている。卓越周期に関しては、直下型の神戸海洋気象台および小千谷ではともに0.7sec付近に明瞭な卓越周期を有しており、広尾では0.3sec程度のところに卓越周期が認められる。ここで、数値積分の時間間隔は $\Delta t = 0.01\text{sec}$ として解析を行った。

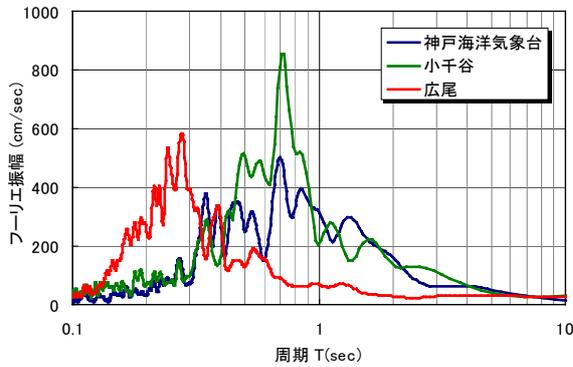


図-6 入力地震動のフーリエスペクトル

信頼性解析におけるモンテカルロシミュレーションの試行回数は1000回とした。地盤の不均質性を考慮するための変動係数については、 $V_G = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3$ の4ケースとした。また、相関係数については、 $\rho = 0.5$ とした。ここで、地盤の変動係数 $V_G = 0.0$ とは、地盤の不均質性が無い、すなわち均質な地盤を想定して確定的な解析を行っていることと等価である。

(2) 数値解析結果

まず、地盤の変動係数 $V_G = 0.0$ の場合の解析結果について示す。このモデルの場合、静的な安定解析を行った結果、図-7に示すような臨界円となり、最小安全率は $F_S = 1.47$ 、降伏震度は $k_y = 0.21$ と得られ、震度法による耐震設計では、既往の設計指針を満足する安定性を有していると判断される。次に、図-8には残留変位量 δ の時刻歴を示している。地震後の最終的な残留変位量 δ は、図-8(a)より神戸海洋気象台では33.7cm、図-8(b)より

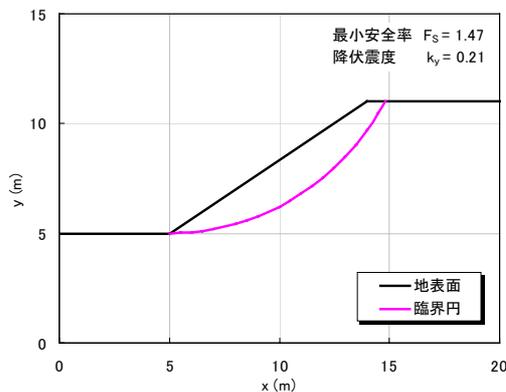
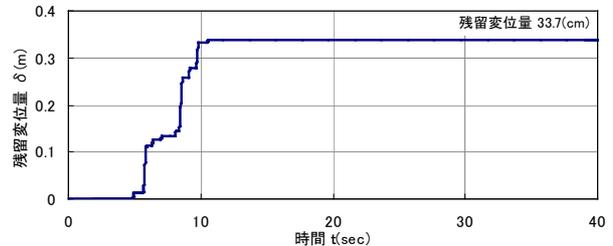
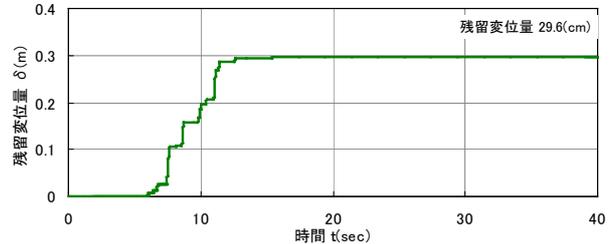


図-7 臨界円の形状

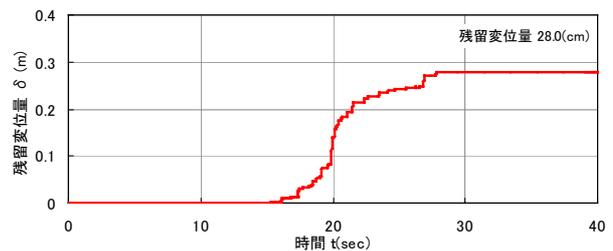
り小千谷では29.6cm、図-8(c)より広尾では28.0cmと得られた。最終的な残留変位量 δ は、入力地震動によらず30cm程度であるが、直下型の神戸海洋気象台ならびに小千谷では、変位の発生より5秒程度で最終的な残留変位量まで達しているのに対し、海洋型の広尾では変位の発生より10秒以上後に最終的な残留変位量まで達していることがわかる。



(a) 神戸海洋気象台



(b) 小千谷



(c) 広尾

図-8 残留変位量の時刻歴

次に、地盤の変動係数を $V_G = 0.1, 0.2, 0.3$ と変化させて行った信頼性解析結果について示す。図-9から図-13には、信頼性解析値のヒストグラムを、表-1および表-2には、信頼性解析値の最大値、最小値、および平均値 μ_R を示している。

図-9および図-10は、静的な安定解析を行った際の最小安全率 F_S ならびに降伏震度 k_y のヒストグラムを示している。最小安全率 F_S ならびに降伏震度 k_y は、地盤の変動係数 V_G が増大するにつれ、正規分布でばらつきながらも、その分布は次第に扁平になっている。また、表-1よりそれぞれの信頼性解析値の平均値 μ_{R,F_S} および μ_{R,k_y} も次第に低下していることがわかる。

図-11から図-13には、各入力地震動について、Newmrk法による時刻歴計算を行った際に得られた地震後の残留変位量 δ のヒストグラムを示している。残留変位量については、地盤の変動係数 V_G が増大するに従

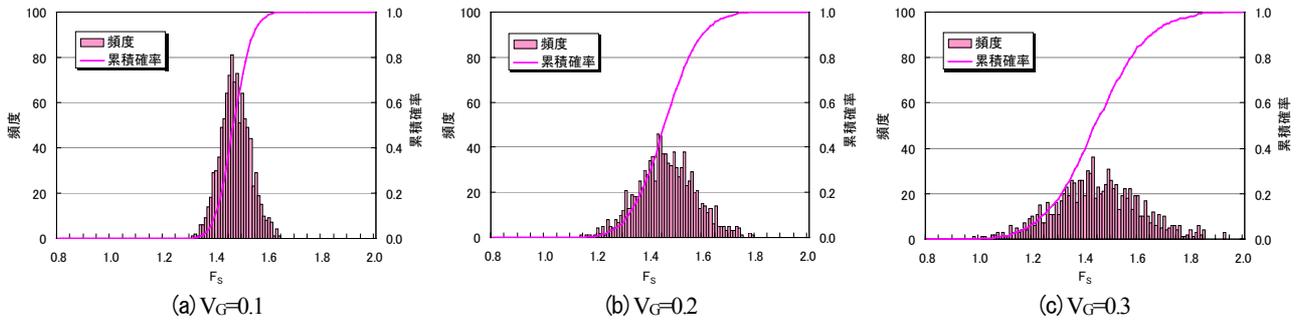


図-9 最小安全率のヒストグラム (静的解析)

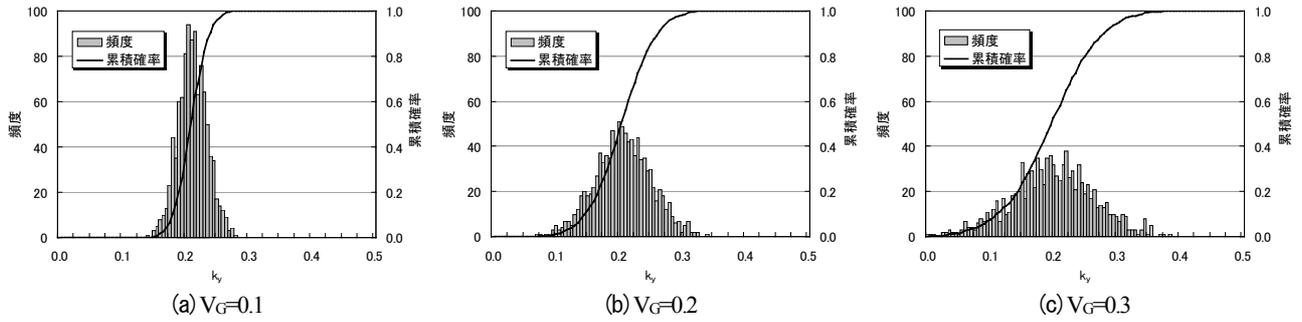


図-10 降伏震度のヒストグラム (静的解析)

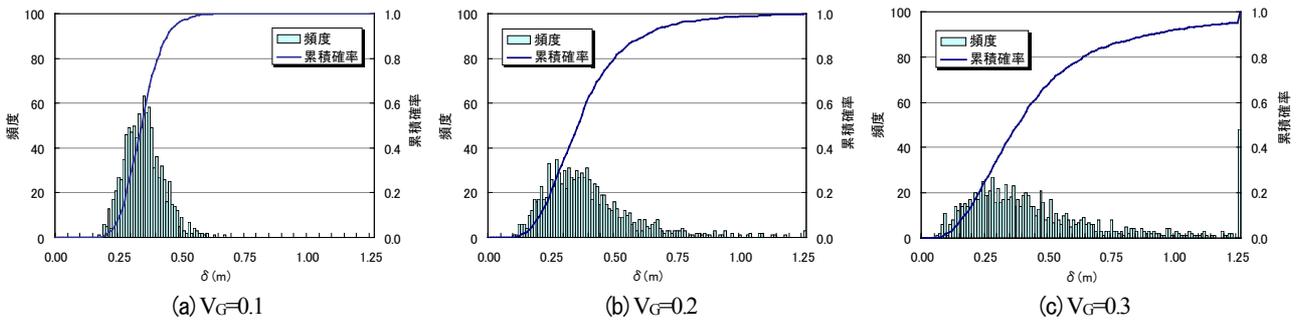


図-11 残留変位量のヒストグラム (神戸海洋気象台)

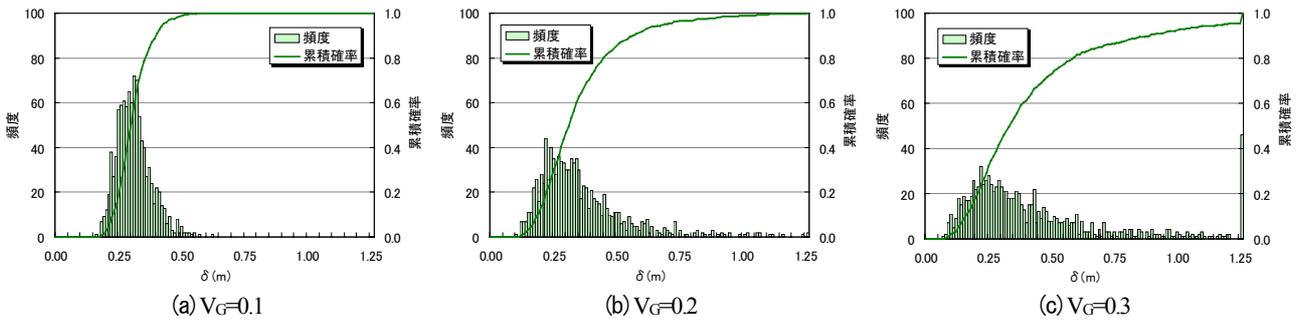


図-12 残留変位量のヒストグラム (小千谷)

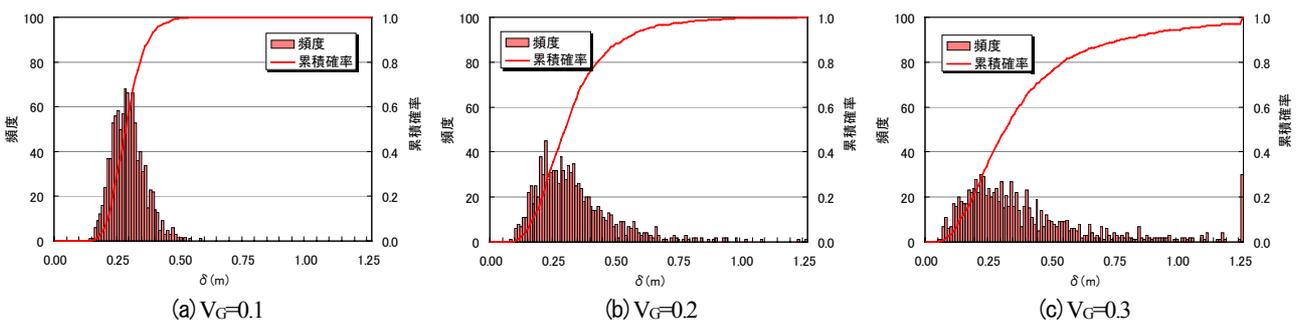


図-13 残留変位量のヒストグラム (広尾)

ってその分布は次第に扁平になりつつも、最小安全率 F_s ならびに降伏震度 k_y とは異なり、その分布傾向は正規分布とはならず、対数正規分布様の分布傾向を示している。これらの傾向は、入力地震動による明瞭な差異は見受けられなかった。また、表-2より残留変位量の平均値 $\mu_{R,\delta}$ は、地盤の変動係数 V_G が增大するに従い、安全率 F_s および降伏震度 k_y の場合とは異なり、入力地震動によらず次第に増大していることがわかる。

表-1 静的解析結果の最大値・最小値・平均値

(a) 安全率				(b) 降伏震度			
V_G	μ_{R,F_s}	max	min	V_G	μ_{R,k_y}	max	min
0.0	1.469	1.469	1.469	0.0	0.209	0.209	0.209
0.1	1.467	1.631	1.304	0.1	0.209	0.276	0.139
0.2	1.458	1.790	1.140	0.2	0.204	0.335	0.066
0.3	1.443	1.923	1.013	0.3	0.196	0.381	0.007

表-2 残留変位量の最大値・最小値・平均値

(a) 神戸海洋気象台				(b) 小千谷			
V_G	$\mu_{R,\delta}$	max	min	V_G	$\mu_{R,\delta}$	max	min
0.0	0.337	0.337	0.337	0.0	0.296	0.296	0.296
0.1	0.344	0.669	0.169	0.1	0.305	0.616	0.067
0.2	0.388	1.615	0.091	0.2	0.351	1.548	0.177
0.3	0.487	5.164	0.050	0.3	0.450	5.013	0.403

(c) 広尾

V_G	$\mu_{R,\delta}$	max	min
0.0	0.280	0.280	0.280
0.1	0.288	0.576	0.066
0.2	0.327	1.342	0.079
0.3	0.409	3.854	0.050

図-14には、各入力地震動について、地盤の変動係数 V_G ごとの残留変位量 δ の最大値および最小値の時刻歴を示している。これより、地盤の変動係数 V_G が增大するにつれ、残留変位量の最小値は減少傾向にあるものの大きな変化は見られないが、残留変位量 δ の最大値については急激に増大していることがわかる。

図-15は、安全率 F_s と降伏震度 k_y の関係を示している。これより、安全率 F_s と降伏震度 k_y は、概ね線形関係にあり、安全率 F_s が低下すると降伏震度 k_y も低下することがわかる。また、図-16は、安全率 F_s と残留変位量 δ の関係の一例として、神戸海洋気象台について示している。これより、地盤の不均質性を考慮することにより、安全率 F_s が低下すると残留変位量 δ が増大し、特に安全率 F_s が小さい領域において急激に残留変位量 δ が増大する傾向が見受けられる。これは、図-14からもわかるように、安全率 F_s が低い場合、降伏震度 k_y も小さくなるので、小さな加速度でも残留変位量 δ が発生することになり、残留変位量 δ は増大し、また、残留変位量 δ の生じる時間も長くなっているためである。

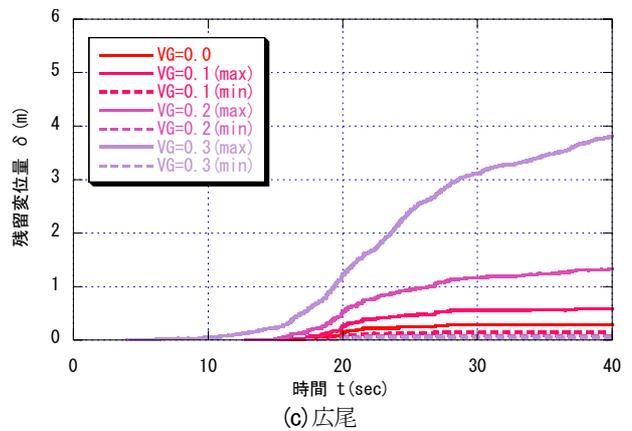
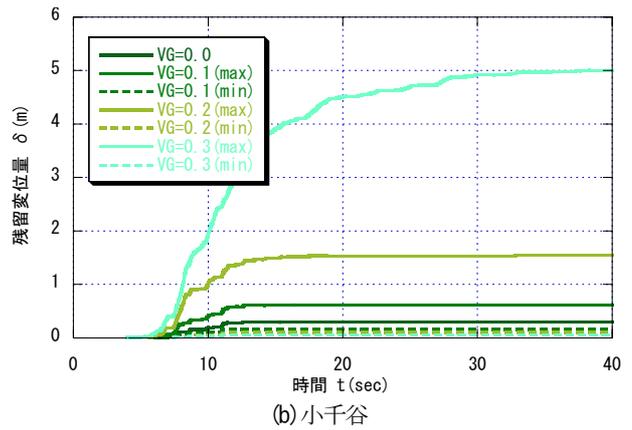
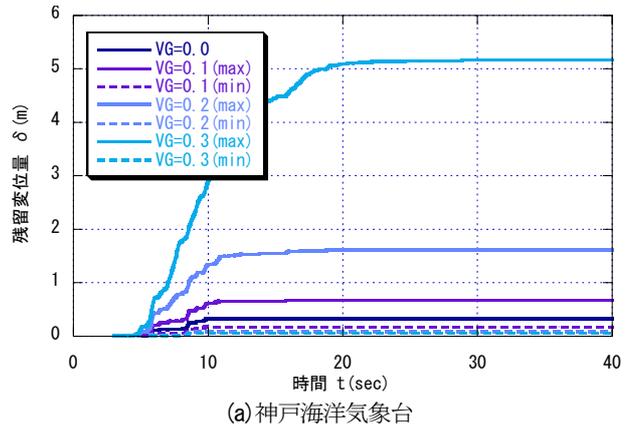


図-14 最大および最小残留変位量の時刻歴

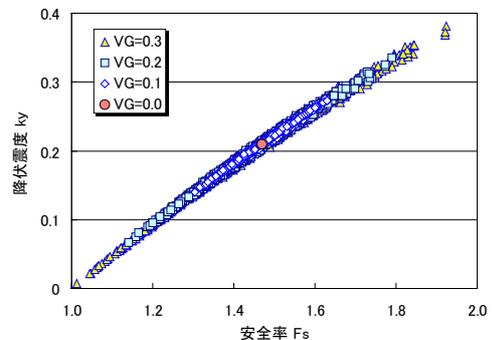


図-15 安全率と降伏震度の関係

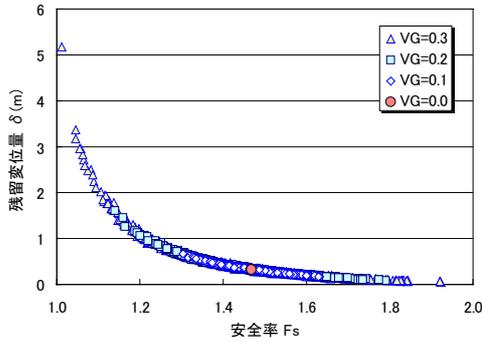


図-16 安全率と残留変位量の関係 (神戸海洋気象台)

さらに、これら信頼性解析の結果を、定量的に評価するために、それぞれの指標について、信頼性解析値の変動係数 V_R ¹⁴⁾ならびに変化率 R_C ¹⁴⁾を算定した。信頼性解析値の変動係数 V_R とは、信頼性解析値の標準偏差 σ_R を信頼性解析値の平均値 μ_R で除したものである。変化率 R_C とは、信頼性解析値の平均値 μ_R を確定解析値 μ_D で除したものである。ここで、確定解析値 μ_D とは、地盤の変動係数 V_G が0.0の場合の解析値のことである。

図-17より、各パラメーター共に、地盤の変動係数 V_G が増大するにつれて、信頼性解析値の変動係数 V_R も増大していることがわかる。安全率 F_s および降伏震度 k_y の変動係数 V_{R,F_s}, V_{R,k_y} は、地盤の変動係数 V_G に比例して増大している。増大の割合は、安全率の変動係数 V_{R,F_s} で地盤の変動係数 V_G の1/3程度、降伏震度の変動係数 V_{R,k_y} は地盤の変動係数 V_G と同程度であり、地盤の変動係数 $V_G = 0.3$ の場合において、安全率の変動係数 $V_{R,F_s} = 0.11$ 、降伏震度の変動係数 $V_{R,k_y} = 0.33$ であり、地盤の不均質性の影響は比較的小さいといえる。一方、残留変位量の変動係数 $V_{R,\delta}$ については、入力地震動による大きな差異は見受けられず、やや非線形的に増大する傾向にあり、その割合は地盤の変動係数 V_G の2倍以上である。そして、地盤の変動係数 $V_G = 0.3$ の場合において、残留変位量の変動係数 $V_{R,\delta}$ は、0.87程度ある。これより、地盤の不均質性が残留変位量 δ に与える影響は非常に大きいといえる。

図-18より、安全率 F_s および降伏震度 k_y の変化率 R_{C,F_s}, R_{C,k_y} は地盤の変動係数 V_G の増大に伴い、次第に低下していることがわかる。これは、地盤の不均質性が増大するに従い、盛土の安定性が低下することを示している。しかしながら、地盤の変動係数 $V_G = 0.3$ の場合においても、安全率の変化率は $R_{C,F_s} = 0.98$ 、降伏震度の変化率に関しても $R_{C,k_y} = 0.94$ と、その低下の割合は比較的小きな値となっている。一方、残留変位量の変化率 $R_{C,\delta}$ に関しては、入力地震動による明瞭な差異は見受けられず、地盤の変動係数 V_G の増大に伴い変化率 $R_{C,\delta}$ も増大し、地盤の変動係数 $V_G = 0.1$ の場合は $R_{C,\delta} = 1.03$ 程度であるが、 $V_G = 0.2$ で $R_{C,\delta} = 1.17$ 、 $V_G = 0.3$ の場合に至っては $R_{C,\delta} = 1.5$ となっている。す

なわち、地盤の不均質性が増大するに従い、残留変位量が急激に増大していることがわかる。このことは、地盤の不均質性が残留変位量に与える影響は非常に大きく、さらには残留変位量を増大させる傾向にあることを示している。

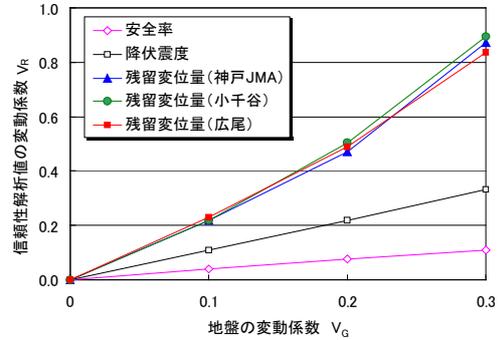


図-17 信頼性解析値の変動係数

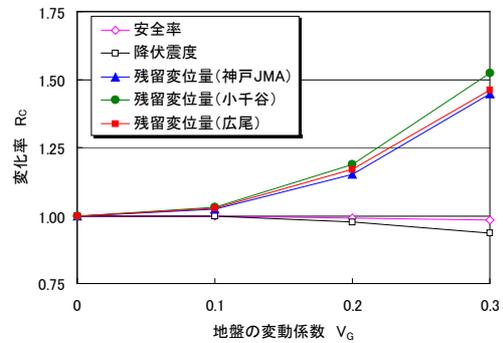


図-18 変化率

4. 結論

本研究では、地盤の不均質性が盛土の耐震性に与える影響を評価するため、静的解析における安全率および降伏震度、Newmark法による残留変位量の算定に対し、モンテカルロシミュレーションによる信頼性解析を行った。その際、地盤の不均質性は、強度定数間の相関関係を考慮した水平互層構造を有した地盤によりモデル化を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 安全率および降伏震度については、地盤の不均質性を考慮することにより、その変化率を算定したところ、地盤の変動係数0.3で安全率の変化率が0.98、降伏震度の変化率が0.94となっており、地盤の変動係数の増大に伴い、その平均値は低下する傾向にあった。また、安全率および降伏震度の変動係数を算定したところ、地盤の変動係数0.3で安全率の変動係数は0.11、降伏震度の変動係数は0.33となっていた。このことより、地盤の不均質性を考慮するとにより、安全率および降伏震度は低下し、盛土の安定性は低下するが、その低下

割合は比較的小さなものである。

- 2) 残留変位量については、入力地震動の違いによる大きな差異は見受けられず、地盤の不均質性を考慮することにより、地盤の変動係数0.3で変化率はおよそ1.48となっており、地盤の変動係数の増大に伴い、その平均値は増大する傾向にあった。また、地盤の変動係数0.3で、残留変位量の変動係数は0.87程度であった。このことより、地盤の不均質性を考慮するとにより、残留変位量は増大する傾向にあり、非常に大きな影響を受けることがわかった。

以上より、地盤の不均質性を考慮することにより、入力地震動の特性によらず、盛土の耐震性能を評価する指標としての安全率および降伏震度は低下傾向にあり、それと対応して残留変位量は増大傾向にあることがわかった。特に、盛土の性能設計を行う際に最も重要である残留変位量に地盤の不均質性が与える影響が最も大きくなった。このことは、盛土に限らず、土構造物の性能設計を行う際には、地盤の不均質性の影響を十分に考慮する必要性があることを示している。

謝辞：本論文の解析を行うに当たり、気象庁ならびに（独）防災科学技術研究所の強震ネットワーク（K-NET）の地震観測記録を使用させて頂きました。関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) たとえば、土木研究所：平成7年(1995年)兵庫県南部地震災害調査報告，Vol.196，493p.，1996.
- 2) たとえば、日本道路協会：道路土工のり面工・斜面安定工指針，pp.164-180，1999.
- 3) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説―耐震設計，丸善，pp.317-329，1999.
- 4) 土木学会，土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会：

土木構造物の耐震設計法に関する第3次提言と解説，8章，pp.29-34，2000.

- 5) 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.
- 6) 地盤工学会：土質基礎の信頼性設計，土質基礎工学ライブラリー 28，275p.，1985.
- 7) 星谷勝，石井清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，208p.，1986.
- 8) 地盤工学会：土質データのばらつきと設計，85p.，1988.
- 9) Matsuo, M. and Kuroda, K. : Probability approach to design of embankments, *Soils and Foundations*, Vol.14, No.2, pp.1-17, 1974.
- 10) 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.
- 11) 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，地震工学研究発表会講演論文集，Vol.27，CD-ROM，2003.
- 12) 高野令男，岡村未対，松尾修：弾塑性FEMの結果に及ぼす入力パラメーターのバラツキの影響と結果の信頼性，地震工学研究発表会講演論文集，Vol.26，pp.1213-1216，2001.
- 13) 山下典彦，竹内健造，秦吉弥：地盤強度の不均質性が地震時における盛土のすべり変位量に与える影響，地盤工学シンポジウム論文集，Vol.49，pp.415-422，2004.
- 14) 田中博文，沖村孝，鳥居宣之：地盤の不均質性が盛土の動的応答特性に与える影響に関する研究，地盤工学シンポジウム論文集，Vol.49，pp.423-430，2004.
- 15) Newmark, N.M. : Effects of earthquakes on dams and embankments, *Geotechnique*, Vol.15, No.2, pp.139-159, 1965.
- 16) 伊藤学，亀田弘行：土木・建築のための確率・統計の基礎，丸善，pp.80-167，1977.
- 17) 伊藤学，亀田弘行，黒田勝彦，藤野陽三：土木・建築のための確率・統計の応用，丸善，pp.297-467，1988.
- 18) 気象庁ホームページ：<http://www.jma.go.jp/>
- 19) 防災科学技術研究所ホームページ：<http://www.bosai.go.jp/>

(2005.3.15 受付)

Effect of the Heterogeneity of Soil Strength to the Earthquake-Proof Stability Index of Embankment

Hirofumi TANAKA, Norihiko YAMASHITA

The design of embankment, change to the performance design based on residual displacement from a design according to the safety factor is considered. Not only in the design of embankments but also in earth structure, the heterogeneity of the ground is usually disregarded. However, since the actual ground has heterogeneity, it needs to consider the influence that the heterogeneity has on the earthquake-proof stability of embankment. Therefore, it needs to consider the influence that it has on the earthquake-proof stability of embankment. This research performs reliability analysis in calculation of the safety factor and residual displacement of embankment.