

学 位 論 文 の 要 旨

氏 名 佐竹 亮一郎 印

近年、土木工学分野における多くの設計基準・指針が信頼性理論に基づく性能照査型の設計法へと移行しつつあり、地盤工学分野においても信頼性設計法の導入が急がれる。一方で、地盤工学においては、他の工学分野と異なり材料物性の空間的なばらつき（不均質性）が他の工学分野で扱われる材料と比較して極めて大きいという課題がある。地盤工学分野における信頼性設計法の導入、普及には上記課題を前提とした地盤工学独自の信頼性手法の構築が必要であり、上記の各要因が、構造物の性能の不確実性へどのように寄与しているのかを、統計、力学の両面から定量的に把握することが必須である。

上記の背景のもと、本検討では特に、不確実性の中で材料の不均質性を中心課題として掲げ、盛土斜面の信頼性評価を問題として取り上げた。盛土は人工構造物であることが多く、その材料は一般には一様であると考えられている。加えて盛土は斜面を有する構造物であり、斜面の安定性は局所的な弱部に強く支配されるという性質を有する。材料の不均質性を考慮するということは地盤内の局所的な力学的弱部の存在を仮定することと同義であり、斜面構造物においては材料の不均質性がもたらす弱部の存在がその性能を左右する可能性は高いと考え、上記のような問題を対象とした。本検討では乱数解析手法のひとつであるモンテカルロ・シミュレーション（MCS）に基づき有限要素法（FEM）による数値解析を繰り返し行うことで、構造物の性能を示す指標（安全率、変位量など）の確率分布を求め、統計、力学の両面から不確実性要因の影響を検討した。

以下に本論文の内容をまとめる。

1 章では、現在の地盤工学分野について、他分野を含む周囲の状況、地盤工学における課題などの背景を述べ、本論文の目的、概要を示した。

2 章では、現在の主要な設計コードの紹介、本論文で対象とした斜面の設計照査法など、設計法について取りまとめた。また、先行研究について、地盤工学分野における信頼性設計手法への取り組み、今後の展開について述べ、本論文の着目課題を示した。

3 章では、本論文で用いた数値解析手法についてここでとりまとめた。4 章、5 章で示した検討では、この章で示した手法に基づき検討が行われている。

4 章では、常時の安定性について、著者の既往の研究¹⁾から、せん断強度低減法を適用した FEM を各試行とした MCS により安全率 F_s の確率分布を求め、材料の相関、変動係数、自己相関距離、斜面傾斜、推定誤差などの不確実性要因が解析値の不確実性に与える影響を検討した事例を示した。また、これまで設計上安全を担保するために用いられてきた割増係数（安全係数）について、その妥当性を検証すべ

く、破壊確率に基づき割増係数を設定することを考え、 F_s の変動係数と割増係数の関係から整理した。不均質性を考慮する物性値はせん断強度を規定する粘着力 c 、内部摩擦角 $\tan\phi$ の二種とした。

その結果、材料の不均質性を反映させたケースでは、安全率 F_s の分布の平均値は均質を仮定した解析（均質ケース）の結果を常に下回っていることを示した。また、解析結果の変動係数の増加に伴い、均質ケースの解析値に対する超過確率が減少する傾向が見受けられた。加えて、材料の軟弱さを強調するような解析条件では、解析値の不確実性が非常に大きくなることを示した。従来の設計法のように、均質材料を仮定することは、設計照査上危険側の評価となり、発生しうる被害を精度よく評価できない可能性が高いことを示した。また、割増係数の妥当性について検討したところ、ケースによらず、割増係数は解析結果の変動係数の増加に伴い指数的に増加する傾向が得られた。このことから、割増係数は変動係数に依存する値であり、設計安全率を基準に斜面を設計することの妥当性は乏しいという事実を示した。

5章では、地震動を受ける斜面の残留変位量について、2次元動的弾塑性 FEM に基づく時刻歴応答解析を各試行とした MCS により、材料物性値の不均質性が解析値の不確実性に与える影響を検討した。4章の結果より、解析値の不確実性に与える影響の程度は物性値の変動係数が特に大きかったことから、5章では物性値の変動係数の変化が与える影響について検討を実施した。まず物性値の変動係数を固定した上で、地震波形の加速度振幅が変化した場合について検討を行い、次に地震波形を固定した上で物性値の変動係数を変化させ、不確実性への影響を検討した。最後に、震度法に基づく円弧すべり解析による安全率 F_s と残留沈下量 δ の相関関係を利用し、 F_s から δ を推定することを考え、両者が不確実性を伴う場合に関して検討し、推定式について意見を述べた。

検討の結果、地震波の加速度振幅 A の増加は残留沈下量 δ の平均値と標準偏差の増加をもたらすが、変動係数の変化は乏しく、解析値の不確実性自体は増加しないという結果を得た。また、物性値の変動係数 V の増加に応じて残留沈下量 δ の変動係数も増加するという結果を得た。この傾向は全ての物性値で共通であった。また、本検討では対象地盤の土質は $\tan\phi$ が大きく c が小さい砂質土系材料を想定しているため、確率変数とした物性値の中では $\tan\phi$ が与える影響が最も大きいという結果を得た。対象土質によって支配的なパラメータは異なってくると考えられ、事前調査から影響程度の大きいパラメータを検討しておくことは設計の合理性、経済性という観点からも重要と考えられる。最後に F_s と δ の相関性について、 F_s のレベルに応じ δ の統計的性質がどのように変化するかを整理した結果、 F_s の低下に伴い δ の平均値、標準偏差はともに増加することが明らかとなった。この結果から、任意の F_s の値において発生しうる残留沈下量を推定する際、推定値を一意に定めることは困難であり、現状の推定式の妥当性は低いものと考えられる。そこで F_s の値に従う平均値成分とばらつきを示すランダム成分の和として表現することを提案した。

6章では本論文の全体的な総括を行っている。

- 1) 佐竹亮一郎, 若井明彦: 材料の不均質性が斜面の安定性に及ぼす影響に関する解析的検討. 地盤工学ジャーナル, 第 14 巻 第 2 号 95 頁~109 頁 2019 年 6 月

学 位 論 文 の 要 旨

氏 名 佐竹 亮一郎 印

In recent years, many design standards and guidelines in the field of civil engineering are shifting to the performance-based design, which is based on the reliability theory, and now it is needed the introduction of reliability-based design in also geotechnical engineering. In geotechnical engineering, unlike other engineering fields, there is a problem that the spatial variation of the material properties, it is called “inhomogeneity”, is extremely large as compared with materials in other engineering fields. The introduction and popularization of reliability-based design in the field of geotechnical engineering requires the construction of an original method in geotechnical engineering considered the above-mentioned issue. For that purpose, it is indispensable to quantitatively investigate how inhomogeneity which may affect the uncertainty of the performance of the structure contributes from both statistical and dynamical aspects.

Therefore, in this study, material inhomogeneity was a central issue, and the reliability evaluation of the embankment slope was focused. Embankment is a kind of slope structure, and the stability of the slope is strongly affected by local weak areas. Considering material inhomogeneity is synonymous with assuming the presence of local mechanical weakness in the soil. In slope structures, the existence of weak area caused by material inhomogeneity is highly likely to influence the performance. Therefore the above issue was targeted. In this study, numerical analysis by the finite element method (FEM) based on Monte Carlo simulation (MCS), which is one of the random number analysis methods, is repeated, and the probability distributions of indices indicating the performance of the structure was obtained, and the influence of the uncertainty factor was examined from a statistical and dynamic perspective.

In Chapter 1, the background of the current issues in geotechnical engineering, and the purpose and outline of this paper were shown.

In Chapter 2, it was summarized the current main design codes and the design standard of the slopes covered in this paper. In addition, with regard to previous research, the approach to reliability design methods in the field of geotechnical engineering, future developments, and indicated the focus of this paper were described.

In Chapter 3, it was summarized the numerical analysis methods used in this paper. The studies shown in Chapters 4 and 5 are based on the method shown in this chapter.

In Chapter 4, some results on the reliability of the static stability of the slopes obtained from our previous studies (Satake & Wakai, 2019)¹⁾ were presented. The probability distribution of the safety factor F_s was obtained by MCS using FEM with the shear strength reduction method as each trial, and the influence of the inhomogeneity on the

uncertainty of the analysis value was examined. As a result, it was shown that the average value of the probability distribution of the safety factor F_s is always lower than the result of the analysis assuming the homogeneity of the material. In addition, as the coefficient of variation of the probability distribution increased, excess probability for the analysis value of the homogeneous case decreased. And it was shown that the uncertainty of the analysis value becomes very large under analysis conditions that emphasize the weakness of the material. Assumption that materials are homogeneous like the conventional design method leads a risky evaluation, and it is highly possible that damage cannot be evaluated accurately. Furthermore, the validity of the coefficient of safety was examined. It was found that regardless of the case, the coefficient of safety tended to increase exponentially as the coefficient of variation in the analysis results increased. This indicates that the coefficient of safety depends on the coefficient of variation, and that the design of the slope based on the fixed value of design coefficient of safety like conventional method is not appropriate.

In Chapter 5, the dynamic stability of the slope was investigated. MCS, with time history response analysis based on 2dimensional dynamic elasto-plastic FEM as each trial, was performed. At first, the effects of the acceleration amplitude of the seismic waveform and the coefficient of variation of the material properties on the uncertainty of the residual displacement. Next, the validity of estimating residual displacement δ from F_s was verified using the correlation between δ and F_s . As a result, it was found that an increase in the acceleration amplitude of the seismic wave resulted in an increase in the mean value and standard deviation of the residual displacement, but the coefficient of variation did not increase. This tendency was common to all physical property values. In this study, the target is sandy soil. Hence among material properties as random variables, the effect of $\tan\phi$ was the largest. It is considered that the dominant parameter varies depending on the target soil quality. Considering parameters that have a large influence from the preliminary survey is important from the viewpoint of design rationality and economy. Finally, regarding the correlation between δ and F_s , how the statistical properties of δ change according to the level of F_s was organized. It was found that both the mean and standard deviation of δ increased as F_s decreased. This result showed that it is difficult to determine the value uniquely when estimating the residual displacement from any F_s and the current approximation formula is not valid. From this fact, it was considered reasonable to express δ as a random variable.

Chapter 6 is a general overview of this paper.

- 1) Satake, R., Wakai. A.: Reliability analysis in uncertainty of slope stability influenced by spatial heterogeneity in geotechnical materials, *Japanese Geotechnical Journal*, 14(2), pp.95-109, 2019.