

【土木学会論文集 第376号／III-6（討議・回答） 1986年12月】

鈴木 誠 共著 “確率有限要素法による斜面安定解析”への討議
石井 清

（土木学会論文集 第364号／III-4 1985年12月掲載）

▶討議者 (Discussion)――

桜井 春輔・清水 則一（神戸大学）

By Shunsuke SAKURAI and Norikazu SHIMIZU

地盤の材料特性の空間的ばらつき（いわゆる地盤の不均質性）を確率論で取り扱う偶然（ランダム）性に置き換え、材料定数を確率変数として解析する”確率有限要素法”が注目され始めている。著者の論文はこのような背景において提出されたものと考えられる。しかし、討議者は、現在、地盤問題への確率有限要素法の適用には、いくつか問題点があると考えている。そこで、以下の基本的な事柄について著者の見解をお聞きしたい。

確率有限要素法を用いるには、解析に必要なインプットデータとして材料定数の確率分布、平均値および変動係数（あるいは分散）を求めなければならない。しかし、実際の不均質性地盤に対し、確率有限要素法のインプットデータとしての地盤の材料定数の確率分布を求める具体的方法は存在するのであろうか。著者が、もし、多数のボーリングコアの試験あるいは原位置試験結果から材料定数の度数分布を求め、これを直接インプットデータとしての確率分布とすることを考えているならば、数値計算例として著者の示している完全相関モデル（著者論文 pp. 205～207, 3.(2)）は全く無意味なものである。なぜならば、不均質性地盤を完全相関モデル（等価な均質地盤）によって解析する場合のインプットデータとしての確率分布は、上に述べた試験結果の度数分布から得られるものと異なることに注意しなければならない¹⁸⁾。

したがって、討議者には地盤問題における確率有限要素解析のインプットデータ、つまり、地盤の材料定数の確率分布、平均値および変動係数を求ることは、たとえそれが正規分布であると仮定しても、実際問題としてきわめて困難であると考える。

このようにインプットデータの決定方法がないにもかかわらず、著者は正規分布以外の分布形に従う確率変数（材料定数）に対して解析を試みているが、その工学的意味は何であろうか。著者はインプットデータの決め方については、著者論文の対象外としているようであるが（著者論文 p. 200 左 24～26 行）、これは解析結果（破壊確率）の解釈にも深く関連する重要な問題である。

以上のことから、提案手法に対するインプットデータとしての地盤の材料定数の確率分布、平均値および変動係数を求める方法とその方法の妥当性を示して頂きたい。また、もしそれらを求める方法がない場合、斜面安定問題において、著者が提案した確率変数が正規分布以外の分布形に対する解析法の工学的意味について、見解をお聞きしたい。

参考文献

- 18) 矢野佳史：非均質性岩盤の確率有限要素解析に関する研究、神戸大学卒業研究、1986年3月。
(1986.6.18・受付)

▶回答者 (Closure)――

鈴木 誠・石井 清（清水建設）

By Makoto SUZUKI and Kiyoshi ISHII

著者の考えを以下に述べます。

(1) について

著者は、確率有限要素法に入力する地盤の材料定数は、土層ごとに土質試験等から得られるデータから度数分布を求め、これより確率分布を求めればよいと考えています¹⁹⁾。これらの材料定数の不確定性には次のものが考えられます。

① 物理的な不確定性

- 指摘されている疑問点は、次の2項目であると理解しました。
- (1) 地盤の材料定数の確率分布の求め方とその妥当性について
 - (2) 正規分布以外の分布形に対する解析法の工学的意味について
 - (2) については(1)の妥当性がないならばという条件付きで質問されていますが、ここでは2つに分けて

② 測定誤差の不確定性

③ 統計検定の不確定性

このうち、ここで問題になるのは①の不確定性に対する考え方です。著者は、地盤は工学的に同一な土層と判断される数種の土層から構成されるものとして、各土層は確率的に均質（homogenous）であるとの前提に立っています。ここで、確率的に均質とは、等しい確率特性（分布、平均値、分散など）をもち、巨視的には一樣であるが局所的にはばらつきをもつことを意味するものです²⁾。また、空間的なばらつきは、材料定数の相関特性として共分散や自己相関係数で表現されます³⁾。

したがって、この前提から該当する土層の土質定数のもつ確率特性は、サンプルデータより推定することになるわけです。もちろん、土層が確率的に均質とは認められない場合、すなわち討議者がいわれているような不均質な土層（地盤）では、このような統計処理はできなくなります。

論文では、一次ガウス近似法を用いた確率有限要素法の手法の紹介とその検証に重点を置いたので、適用例には非常に簡単なモデルとして、空間的な相関特性を完全相関としたモデルを用いたものです。また、完全相関モデルを用いたことについても、現状では得られるサンプルデータの数に制限があるため、多くの研究^{2), 4)}においてもこのモデルが用いられており、導かれた考察が、討議者がいわれるようなく無意味であるとは考えていません。今後は、均質な土層の地盤を中心に、指摘があつた空間的な相関特性を考慮し、研究の発展をはかっていきたいと考えています⁵⁾。

(2) について

著者がいだいている地盤モデルや不確定性に対する考え方、さらにサンプルから確率特性を推定することについてご理解いただけたかと思います。そこで、たとえば土質定数などばらつきが大きい（たとえば、変動係数で30%程度）場合の確率分布を推定するとき、定数が負

になる可能性がないことから、対数正規分布や何らかの打ち切り分布を用いるのは自然といえましょう。特に、透水係数などはオーダーを越えてばらつくため、これを正規分布とすることは難しいと考えます。しかし、正規分布は計算上非常に取り扱いやすいので、負になる可能性がないからといって、むりに対数正規分布を用いる必要はないとも思います。どちらにしても、土質定数の確率特性は、個々の事例に則して、サンプルデータに対する統計検定から定めることが基本と考えます¹⁾。

また、討議者である桜井先生からの私信（文献の提供等）により、論文中の式(39)の表記に誤りがあるのでないかとの指摘を受けました。下記のように訂正します。

$$\alpha_{k,i} = \frac{\left(\frac{\partial Q_{s,i}}{\partial x_{k,i}}\right)_* (Var[x_{k,i}])^{1/2}}{\left(\sum_{k=1}^m \left(\frac{\partial Q_s}{\partial x_{k,i}}\right)_* Var[x_{k,i}]\right)^{1/2}} \quad (39)$$

最後に、著者の論文を熟読して、大変重要な点についてご討議いただけたこと、また、一般読者にその点を誤ることなく伝える機会が与えられたことに対して、深く感謝します。

参考文献

- 1) 星谷 勝・石井 清：構造物の信頼性設計法、鹿島出版会、1986.
- 2) 松尾 稔：地盤工学、信頼性設計の理念と実際、技報堂出版、1984.
- 3) Vanmarcke, E. H. : Probabilistic Modeling of Soil Profiles, Journal of the Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol. 103, No. GT 11, pp. 1227~1246, Nov. 1977.
- 4) 土質工学会編：土質基礎の信頼性設計、土質基礎工学ライブリー-28, 1985.
- 5) 鈴木 誠・石井 清：斜面安定対策工としての水平排水管設置の最適設計、土木学会論文集、第307号／III-5, pp. 209~216, 1986.

(1986.11.6・受付)