

地盤工学における信頼性設計法に関する研究の展開と課題

An Overview of the Research Development and Issues in Geotechnical Reliability based Design

本 城 勇 介 (ほんじょう ゆうすけ)

岐阜大学 名誉教授・特任教授

1. はじめに

学会誌編集委員会から、この「信頼性設計」特集号の総説執筆の依頼を受け、論説を執筆される鈴木誠先生と相談し、鈴木先生に性能設計と信頼性設計の関係、信頼性設計の一般事項や最近の動向に関する解説はお任せして、筆者は地盤工学における信頼性設計法研究の展開と課題について書かせていただくこととした。とはいっても、文献を綿密に精査した学説発展史を書こうとしているわけでも、書けるわけでもない。筆者のこの分野の研究を通じて感じた主観的な研究発展の経緯や、重要と考える課題を読者に伝え、この分野の研究のますますの発展の一助となればと考えて、記録する程度のことである。

1985年にマサチューセッツ工科大学 (MIT) での留学を終えて帰国してしばらくして、ある信頼性設計法の解説文の執筆をめぐって、恩師松尾稔先生に、「地盤と構造では、信頼性設計の考え方が根本的に違う」と、厳しく叱責されたことがある。「確率論という数学を使って不確実性を記述するのだから、地盤であれ構造であれ同じ」と考えていた当時の筆者には、目の覚める思いであった。その後研究を続けてきて、松尾先生のおっしゃったことが真実であると思知らされている。この事実を、すなわち、地盤工学における信頼性設計の展開（そして課題）は、構造工学のそれとは異なることを、読者がこの論説を読まれることで感じて頂ければ、この総説の目的の大半は達せられる。

本総説は、2つの章より構成される。2章では、信頼性設計に必要な要素技術の研究の展開を扱う。信頼性設計では、設計に関係する要素の不確実性を定量的に取り扱う必要がある。ここでは、取り扱う対象として、次の5つの要素を考えることにする。

- ① 地盤パラメータの空間的バラツキのモデル化
- ② 空間的バラツキが構造物性能に与える影響評価
- ③ 地盤パラメータの統計的推定誤差
- ④ 地盤パラメータの変換誤差
- ⑤ 設計法のモデル化誤差

地盤パラメータは、空間的に大きなバラツキを持ち、そのモデル化 (①) に加えて、バラツキにより構造物の性能が受ける影響を評価する方法 (②) が重要である。また、地盤構造物は、鋼やコンクリートと異なり、そのサイトに存在する材料をそのまま用いる。少ない調査結果から必要な地盤パラメータ値を推定するとき生じる

統計的推定誤差 (③) は、特に地盤構造物設計に独特である。さらに、地盤調査で得られた結果 (例えば N 値) から、設計計算に直接必要なパラメータ (例えば、内部摩擦角) への変換の際の誤差 (④)、設計計算結果が実現象をどの程度正確に予測しているかを示すモデル化誤差 (⑤) などが、信頼性設計の要素を構成する。

3章では、2章で述べた要素技術を総合した、信頼性設計法の適用と応用と課題について見る。具体的には、次の2つのテーマについて述べる。

- ① 設計コードへの適用
- ② 信頼性設計法の地盤工学への貢献

なお、地盤工学で信頼性設計の研究が盛んになったのは1960年代後半からで、1970~80年代に1つのピークがあった。その後停滞期を経て、1990年代後半から再び活発化した。本総論で対象とする研究は、概ね2000年頃までの研究に限るものとする。

2. 要素技術の研究の展開

2.1 地盤パラメータの空間的バラツキのモデル化

地盤パラメータの空間的バラツキを、確率過程を用いて記述しようとして最初に試みたのは、香港大学の P. Lumb である (Lumb, 1966, 1974)^{1),2)}。彼はもともと水文学の研究者であったが、降雨に伴う香港の斜面崩壊の問題を扱う中で、確率統計的手法を地盤の問題に応用するようになったと聞いている。確率過程として地盤パラメータの空間的バラツキをモデル化するという事は、単に平均や分散、さらにバラツキの種々の確率分布への当てはめを検討するに留まらず、自己相関構造をモデル化に持ち込むところに大きな進歩がある^{注1)}。

実際「自己相関構造」は、地盤パラメータの空間的バラツキをモデル化するに当たり、その鍵である。後述する、空間的バラツキの構造物の性能に与える影響評価や統計的推定誤差評価で、自己相関構造は本質の支配要因である。地震波のフーリエ変換結果であるスペクトル密度関数が広く用いられるが、それと同程度に地盤工学者が自己相関関数の考え方に慣れれば、空間的バラツキについての見方が一変する、と筆者は常常考えている。実際スペクトル密度関数と自己相関関数は、数学的には全く等価で、前者は周波数領域での、後者は時間領域でのバラツキの同じ特性の別の表現に過ぎない。

注1) 確率過程の自己相関構造の解説については、例えば本城・大竹 (2012)³⁾及びその参考文献を参照されたい。

総 説

Lumb の考えを拡張し、地盤工学分野で確率場として空間的バラツキをモデル化することに大きく貢献したのは、当時 MIT にいた Vanmarcke (1977)⁴⁾ である。この論文は、その「probabilistic modeling of soil profiles」という魅力的なタイトルとあいまって、今日に至るまで、この分野でもっとも多く引用される論文の一つである。しかしこの論文で示された、地盤パラメータの局所平均の重要性、局所平均の分散の近似的表現法（分散関数）の提案や、その三次元空間への簡易な拡張等、確率場の自己相関構造にもとづくアイデアが、どの程度理解され、応用されたかは心もとない。

1970年代には、確率場を用いた空間的バラツキのモデル化を扱った、多くの研究がなされた。Matsuo と Asaoka (1977)⁵⁾ は、日本の海成粘土の一軸圧縮強度のモデル化を行った論文で、赤池の情報量基準を用いたモデル選択を行っており、統計解析としても先駆的であった。

確率場を用いて地盤パラメータの空間的バラツキをモデル化した場合、平均値や変動係数、自己相関距離等が、種々の地盤パラメータについて種々の地盤でどの程度の値を取るかを、文献調査から集約した Phoon と Kulhawy (1998a, b)^{6),7)} の論文がよく知られており、参考になる。

2.2 空間的バラツキが構造物性能に与える影響評価

空間的バラツキを確率場の理論を基本として、統計的に解析、モデル化しただけでは、基礎や斜面の信頼性を評価したことにはならない。

空間的バラツキが、最終的な構造物の信頼性に及ぼす影響が最初に研究されたのは、斜面安定、特に円弧滑り解析の問題であったと言ってよい。1970年代には、相当数の円弧滑り解析による斜面の信頼性解析の論文が出現した。しかしそのうちの少なからぬ論文が、地盤の自己相関構造を適切に考慮せず、例えば「分割法で、異なるスライス数を使うと、(それぞれのスライスに独立の確率変数を割り当てているので)、異なる破壊確率が計算される」といった事実が無頓着であった。

そのような中で Wu と Kraft (1970)⁸⁾ の斜面安定解析の論文は、優れた論文である。この論文は、軟弱地盤上盛土の非排水強度を用いた $\phi=0$ 安定解析における種々の要因（強度の空間的バラツキ、サンプルの乱れ、異方性、歪速度効果等）の効果を定量的に評価し、その結果として得られる安全率と破壊確率の関係を導出した。自己相関構造は、滑り線に沿った地盤強度の平均値を計算する中で、適切に処理された。そして、この論文の焦点は、この関係を1960年の Bishop と Bjerrum (1960)⁹⁾ の論文で示された、破壊例の安全率の頻度分布と比較し、この論文の解析結果を正当化したことである。

斜面安定解析以外の分野では、有限要素法を利用した空間的バラツキの影響評価が主流となった。誤差伝播の近似解法である一次近似二次モーメント (FOSM) 法の考え方が有限要素法に展開可能であることは、1970年代初頭に Cornell (1971)¹⁰⁾ により指摘されていた。この

ような背景のもとに、Cambou (1975)¹¹⁾、Baecher and Ingra (1981)¹²⁾ 等の研究が行われた。日本では、桜井と土居 (1983)¹³⁾、鈴木と石井 (1985, 1988)^{14),15)} 等の研究がある。

しかしこの方法を広範に適用・発展させたのは Fenton と Griffiths (2008)¹⁶⁾ である。彼らは、モンテカルロシミュレーション (MCS) と FEM を組み合わせ、1990年代から地盤構造物の種々の問題で、空間的バラツキが構造物の性能に与える影響について研究した^{注2)}。彼らの開発したプログラムはウェブ上でアクセス可能であり、典型的な種々の問題を自分で解くことができる。

Fenton と Griffiths (2008)¹⁶⁾ の研究を始めとする、地盤パラメータの空間的バラツキが構造物の性能への影響評価の研究の結果明らかになったことは、皮肉にも多くの地盤構造物では、空間的バラツキは、必ずしも支配的な要因ではないということである、と筆者は見ている。むしろ多くの問題で次節以下に示す、統計的推定誤差、変換誤差やモデル化誤差が支配的な要因である。

空間的バラツキの影響評価を簡易 (近似的) に実施する方法も、したがって重要である。Vanmarcke (1977)⁴⁾ の局所平均の考え方は、この観点から魅力的である。それは、構造物に影響を与える地盤の範囲 (体積や面積) を特定でき、さらにその地盤特性の局所平均値が地盤の空間的バラツキの程度を代表していると仮定できれば、局所平均のバラツキにより、構造物の性能への空間的バラツキの影響評価ができると考えられるからである^{注3)}。

Vanmarcke (1977)¹⁸⁾ 自身、河川堤防のような線状構造物の安定解析で、対象土塊の起動及び抵抗モーメントを、地盤重量や強度の局所平均と捕え、その破壊確率を確率過程の初期通過問題として解くという提案をしている。

Asaoka と Matsuo (1983)¹⁹⁾ は、 $\phi=0$ 円弧すべり法による破壊確率計算法の提案の中で、大変ユニークな確率場の積分値の近似計算法を提案している。これは、多項式 (どのような関数でもテイラー展開により多項式で近似できる) により表現される確率場の重み付積分を近似的に計算する方法であり、この多項式が定数項のみの場合は、ある範囲についての局所平均と完全に一致する。したがって、局所平均による確率場の近似は、この方法のもっとも単純な場合であると解釈できる。

2.3 地盤パラメータの統計的推定誤差

地盤パラメータの特性を、少ない地盤調査結果から決定する問題は、確率場からの標本により、この確率場の特性を推定する問題となる。一般の統計学が、母集団からの標本は、独立に同一の確率分布に従うと仮定して、理論が構成されているのに対し、確率場の自己相関構造

注2) 確率場の生成については、大竹・本城 (2012) に、種々の方法の概要がまとめられている。

注3) 大竹・本城 (2012)¹⁷⁾ は、Fenton ほか (2008)¹⁶⁾ のプログラムを用いて、いくつかの典型的な地盤工学の問題で、このことが成り立つことを示している。

を考慮した統計的推定理論を組み立てる必要がある。

この問題を考えるとき1つの示唆を与えてくれるのが、Kriging (クリギング) である。これは、確率場の任意の位置の値を、その周辺のいろいろな位置で測定された測定値から推定 (内挿) する方法である。Kriging という名前は、この方法を岩石の金含有率の推定に用いた D. G. Krige の名前に由来しているが、その理論的展開を行ったのは、フランスの G. Matheron (1973)²⁰⁾ であった。この方法により、内挿値の平均及び推定分散を推定することができ、確率場の統計的推定誤差評価では、欠かせない理論である。Kriging の地盤工学への初期の適用例としては、Soulie and Favre (1983)²¹⁾, Soulie et al. (1990)²²⁾, 上田ほか (1986)²³⁾, Honjo and Kuroda (1991)²⁴⁾ 等がある。

筆者は、統計的推定誤差評価の問題は、地盤構造物の信頼性解析の中で、他の問題に比較して未発達であるという印象をもっている。Kriging 以外に、際立った研究が少ないと思う。

この理由は、確率場からの自己相関構造を考慮した統計理論の構築が難しいという事情もあるかもしれないが、むしろこの問題の定式化において、推定のターゲットが明確でないことが、大きな発展の妨げになっていると考える。つまり、確率場の特性 (平均, 分散, 相関構造) の推定の精度を求めても、それが直接構造物の信頼性評価につながるわけではなく、「統計的推定誤差の構造物の信頼性に与える影響はどの程度か?」、「必要なサンプル数は?」といった問いに、うまく答えることができない。

別の面から説明すると、もし「地盤の特定の位置の、特定の範囲についての、地盤強度の局所平均を推定せよ」といった形で問題が定式化されると、その推定精度は、構造物の性能評価に (近似的ではあるが) 直接結びつくので、統計的推定誤差評価の問題が、設計の問題と直接に結びつき、いろいろな設計の観点から出される問いに答えやすくなると考えられる^{注4)}。

確率場からの標本により、自己相関構造を考慮した統計的推定誤差評価法を開発する問題は、その推定のターゲットが決まれば、興味深く、応用性が高く、やりがいのある研究課題となると思われる。

2.4 地盤パラメータの変換誤差

地盤構造物の設計では、地盤調査で得られた地盤の特性から、設計に必要なパラメータへの変換式がしばしば登場する。(例えば道路橋示方書の、 $E = 700 \text{ N (kN/m}^2\text{)}$ 。) このような変換は、設計基準にもとづいて地盤構造物を設計する場合、日常的に現れるのであるが、その変換誤差は一般にかなり大きく、地盤構造物の信頼性設計を考えると、無視できない問題である。

変換誤差評価は、一般的には回帰分析の問題として分析される。変換誤差評価の決定版とも言える文献は、Kulhawy と Mayne (1990)²⁶⁾ である。この文献には、

注4) 本城・大竹・加藤 (2012)²⁵⁾ は、確率場からの標本による局所平均値推定の統計的推定誤差評価法を提案している。

この当時までに知られていた多くの変換式が、その統計的推定誤差も含めて網羅的に整理されており、大変参考になる。その他、設計基準の改定等をめぐってこの問題には多くの研究成果がある。大竹と本城 (2014a)²⁷⁾ には、我が国における地盤構造物設計で有用と考えられる変換誤差評価結果がまとめられている。

2.5 地盤構造物設計のモデル化誤差

設計計算で用いる計算モデルは、現実の現象を単純化、理想化したものであるから、たとえ支配地盤パラメータの空間分布や作用外力等の情報が完全に分かっていたとしても、構造物の性能を完全に予測できるわけではない。このモデルと実現象との間のギャップをモデル化誤差と言い、例えば (観測された性能) / (計算で予測された性能) の、偏差やバラツキで定量化する。

Matsuo と Asaoka (1976)²⁸⁾ は、モデル化誤差定量化の模範例を示す論文である。この論文では、軟弱粘性土地盤上の盛土の安定性を、粘性土地盤の非排水せん断強度と $\phi = 0$ 円弧滑り解析により評価する問題が取り上げられた。内外40以上の実際の破壊例が収集され、慎重な地盤調査結果 (強度に関する不確実性はないと仮定できる) にもとづき安定解析が行われ、破壊時の安全率が計算された。破壊時の真の安全率は必ず1.0となるので、計算された安全率から1.0を差し引いた安全率偏差は、この設計法のモデル化誤差を表すと解釈される。解析の結果、安全率の偏差は-0.1から0.1の間に一様に分布し、これがこの解析法の精度を表すことになる。

地盤構造物は、杭の載荷試験に代表される、実大か、実大規模に近い試験が比較的頻繁に行われる。これらの結果を系統的にデータベース化し、適切に解析すれば、モデル化誤差をかなり精度良く推定できると考えられる。例えば道路橋示方書の杭の支持力公式の不確実性定量化のために行われた岡原ほか (1991)²⁹⁾ の研究は、このような研究の初期の典型事例である。

このデータベースにもとづく、設計計算式のモデル化誤差の定量化を精力的に行っているのが、AASHTO の道路橋基準改定のための一連のプロジェクトである。その最初の研究は、杭の支持力に関する Paikowsky (2004)³⁰⁾ の研究であり、その後の研究の規範となっている。

構造工学分野の信頼性設計では、モデル化誤差の定量化は、極めて困難と認識されている。梁や柱の部材としての載荷試験例は存在するが、それらから成る不静定次数の高い実構造物のモデル化誤差 (ジョイント部等が支配する) は、ほとんど定量化不可能である。一方地盤構造物は、実大規模の載荷試験や、施工中、災害時などの破壊例が比較的多数存在し、モデル化誤差の定量化ができる可能性が高い。筆者が若い頃、松尾稔先生が、「我々はラッキーや、盛土はよく破壊してくれるんや!」と折に触れて言われていたが、これは地盤構造物信頼性設計法の開発のためには、確かに有利な事情である。

なお、大竹・本城 (2014b)³¹⁾ には、モデル化誤差に関する種々の研究成果がまとめられている。

3. 研究の応用・総合化と課題

設計は総合化の技術であるから、前章で述べた要素技術がバランスよく組み合わせられなければ、信頼性設計法は成立しない。個々の要素技術では優れた研究は多いが、それらを総合して、真に地盤工学の発展に貢献できるような研究成果は意外と少ないというのが、筆者の偽らざる評価であり、反省である。

この章では、信頼性設計技術の1つの総合である設計コードへの適用について触れた後、信頼性設計法の地盤工学への貢献について考える。前章とは多少趣を異にして、個々の研究を追うというよりも、全般的方向性に付いて、思うところを述べたい。

3.1 設計コードへの適用

周知のように欧州の Eurocodes, 北米の AASHTO の道路橋設計基準等, 世界の主要な設計基準は、信頼性設計法レベル1と一般に呼ばれる、部分係数設計照査式の書式に移行している。レベル1の部分係数決定に当たり、コードライターはより高いレベル(2や3)の信頼性設計法により、部分係数を決定する。我が国においても港湾構造物の設計基準は既に完全にこの形式に移行しており、道路橋示方書も現在その方向で改定中である。このような設計基準の方向性は、世界標準である ISO2394 と合致し、今後長期に渡り変化しないと考える。

部分係数設計照査式に、多数の部分係数を導入したり、設計条件や構造物の規模に応じて部分係数を細かく場合分けして設定、適用する基準が存在する。しかし筆者は、基本的に荷重抵抗係数法(LRFD)といわれる、比較的少数の部分係数を、細かい場合分けをせず適用するのが良いと考える。その理由は、以下の通りである。

(1) 部分係数設計照査式は、「設計の経済」(標準的な構造物で一々複雑な信頼性解析を行う手間を省く)のための便宜的方法であり、この方法を究極の設計照査法として、すべての場合に対処しようとすることは、本質的に誤りである^{注5)}。

(2) 複雑な場合分けは、設計者のミスを誘いやすい。

(3) 複雑な部分係数の設定は、設計者の構造物設計における工学的判断を妨げる。

(4) 標準的でない構造物の設計や、新しい工法等の設計では、設計者が直接、信頼性解析を行えばよい。

2003年の Pan-American 地盤工学会議(ボストン)に続いて開催された、地盤構造物の設計に関するワークショップで、部分係数決定法の議論で会場が白熱していたとき、リスク解析を専門とする若い研究者が、「なぜそんな間接的で手間のかかる方法を議論するのか。信頼性解析を直接実施する方が、はるかに単純明快だ。」と発言し、一瞬会場が沈黙してしまったことを思い出す。筆者はこのときから、部分係数法は「設計の経済」のための必要悪であり、設計者はいつでも信頼性解析を自ら実施し、設計を行うべきであると考えようになった。

上記(4)が可能になるためには、それぞれの設計コー

ド作成の過程が、その背景となった資料とともに公開され、設計者がいつでも、部分係数設定過程をトレースできなければならない。これは、透明性、説明性を求める時代の風潮とも一致している。

なお、筆者は FORM に代表されるレベル2の信頼性設計法は、計算能力の大幅な向上により、その歴史的使命を終了したと考えている^{注6)}。今日では信頼性解析は、モンテカルロシミュレーション(MCS)が主流である。現在は、標準的な設計法でも、性能関数には複雑な非線形関数が多く、基本変数の確率分布も多種多様であり、これらに容易に対応できる MCS は、これらを近似的にしか処理できない FORM 等より優れている。さらに、直観的で、比較的少ない確率論に関する知識で実行可能な MCS は、実務者にも分かりやすく、信頼性設計法普及のためにも、好ましい方法である。

3.2 信頼性設計法の地盤工学への貢献

設計は知識を統合して構造物を創造する作業である。信頼性設計も当然、前章で述べた要素技術を総合しなければ、意味のある結果を出せない。ところが今日は、どの分野においても細分化が進み、統合は置き去りになりがちである。信頼性設計法の研究を見ていると、論文の出しやすい要素技術の研究が多く、地盤工学そのものに貢献できるような、体系的な信頼性設計法の適用により、地盤工学の発展自身に貢献するような研究は多くない。

信頼性設計法の地盤工学への貢献の道は、設計コード作成支援の他では、設計を構成する要素技術の中で、相対的にボトルネックになっている要素の抽出がある。前章であげた多くの不確実性要因の何が、最終的な構造物の信頼性で支配的であるかを知ることは、その部分の改良により設計が合理化されることを意味するからである。

例えば、浅い基礎の沈下や杭基礎の水平変位や沈下の予測問題を信頼性解析で解析し、予測の不確実性への各不確実要因の寄与を求めると、その大部分が N 値から E や地盤反力係数を推定する変換誤差に起因することが分かる。このような情報は、標準貫入試験一辺倒の地盤調査を、地盤変形を重視する場合は、他のより適切な調査に移行させる有力な根拠となりうると思う。

上記に類した問題は、地盤構造物の設計では多く存在し、信頼性解析法が、設計のプロセスで生じる不確実性の定量的計測ツールとして使われれば、地盤工学の種々の問題の中で、解決すべき問題の優先順位も明確となる。これも信頼性設計法が、地盤工学に貢献できる道の1つであると考えられる。

4. む す び

以上見てきたように、地盤工学に信頼性設計法の貢献できる余地は、非常に大きい。言及できなかったが、これに地盤構造物の観測設計・施工の問題を加えると、その適用可能性はさらに増大する。信頼性解析は、確立さ

注6) FORM を学び、その設計値法への適用を理解することは、依然有益である。しかしこれを実際の計算に適用する時代は、終焉しようとしている。

れた決定論的な設計法や解析法の近似の精度と不確実性を定量化する技術であり、この技術の利用により、地盤工学で解決すべき課題の優先順位を明らかにできるはずであり、そのような俯瞰的な視野を持って、信頼性設計法の研究を進めることが大切である、と筆者は信じている。この分野に若い研究者が多く参入して来られることを期待して、この拙論を閉じる。

参 考 文 献

- 1) Lumb, P.: The variability of natural soils, Canadian Geotechnical J., Vol. 3, pp. 74-97, 1966.
- 2) Lumb, P.: Application of statistics in soil mechanics, Soil Mechanics—new horizons, pp. 44-111, Newness Butterworths, London, 1974.
- 3) 本城勇介・大竹 雄：地盤工学技術者のための確率統計入門 第5章 確率過程と確率場，地盤工学会誌，Vol. 61, No. 1, pp. 48~55, 2013.
- 4) Vanmarcke, E. H.: Probabilistic modeling of soil profiles, J. of Geotechnical Engineering (ASCE), Vol. 103, No. GT11, pp. 1227-1246., 1977.
- 5) Matsuo, M. and Asaoka, A.: Probability models of undrained strength of marine clay layer, Soils and Foundations, Vol. 17, No. 3, pp. 53-68, 1977.
- 6) Phoon, K. K. and Kulhawy, F. H.: Characterization of geotechnical variability, Can. Geotech. J., Vol. 36, pp. 612-624, 1999.
- 7) Phoon, K. K. and Kulhawy, F. H.: Evaluation of geotechnical property variability, Can. Geotech. J., Vol. 36, pp. 625-639, 1999.
- 8) Wu, T. H. and Kraft, L. M.: Safety analysis of slope, J. of soil mechanics and foundations division (ASCE), Vol. 96, No. SM2, pp. 609-630., 1970.
- 9) Bishop, A. W. and Bjerrum, L.: The relevance of the triaxial tests in the solution of the stability problems, Research conference on shear strength of cohesive soils, ASCE, Boulder, Colorado, June, 1960.
- 10) Cornell, C. A.: First-order uncertainty analysis of soil deformation and stability, Proc. 1st ICASP, Hong Kong, pp. 130-143, 1971.
- 11) Cambou, B.: Application of first-order uncertainty analysis in the finite element method in linear elasticity, Proc. 3rd ICASP, Aachen, pp. 67-87, 1975.
- 12) Baecher, G. B. and Ingra, T. S.: Stochastic FEM in settlement prediction, ASCE J. Geotech. Eng., Vol. 107, No. 4, pp. 449-464, 1981.
- 13) 桜井春輔・土居康成：有限要素法による斜面の信頼性解析，土木学会論文報告集，第330号，pp. 87~97, 1983.
- 14) 鈴木 誠・石井 清：確率有限要素法による斜面安定解析，土木学会論文集，No. 364/III-4, pp. 199~208, 1985.
- 15) 鈴木 誠・石井 清：土質定数の空間分布推定法を用いた確率有限要素法，土木学会論文集，No. 394/III-9, pp. 97~104, 1988.
- 16) Fenton, G. A. and Griffiths, D. V.: Risk Assessment in Geotechnical Engineering, John Wiley and Sons Inc., 2008.
- 17) 大竹 雄・本城勇介：地盤パラメータ局所平均を用いた空間的ばらつきの簡易信頼性評価法の検証，土木学会論文集 C, Vol. 68, No. 3, pp. 491~507, 2012.
- 18) Vanmarcke, E. H.: Reliability of earth slopes, J. of Geotechnical Engineering (ASCE), Vol. 103, No. GT11, pp. 1247-1265, 1977.
- 19) Asaoka, A. and Matsuo, M.: A simplified procedure for probability-based $\phi_u=0$ stability analysis, Soils and Foundations, Vol. 23, No. 1, pp. 8-18, 1983.
- 20) Matheron, G.: The intrinsic random functions and their applications, Adv. in Appl. Probability, Vol. 5, pp. 439-468, 1973.
- 21) Soulie, M. and Favre, M.: Analyse geostatistique d'un noyan de barrage tel que construit, Can. Geotech. J., Vol. 20, pp. 463-457, 1983.
- 22) Soulie, M., Montes, P. and Silvestri, V.: Modeling spatial variability of soil parameters, Can. Geotech. J., Vol. 27, pp. 617-630, 1990.
- 23) 上田貴夫・本城勇介・波多野敬・坂口修司：造成工事における残留沈下量の平面的予測及び誤差，土と基礎，Vol. 34, No. 5, pp. 51~58, 1986.
- 24) Honjo, Y. and Kuroda, K.: A new look at fluctuating geotechnical data for reliability design, Soils and Foundations, Vol. 31, No. 1, pp. 110-120, 1991.
- 25) 本城勇介・大竹 雄・加藤栄和：地盤パラメータ局所平均の空間的ばらつきと統計的推定誤差の簡易評価理論，土木学会論文報告集 C, Vol. 68, No. 1, pp. 41~55, 2012.
- 26) Kulhawy, F. H. and Mayne P. W.: Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design, EPRI EL-6800 Project 1493-6 Final Report, 1990.
- 27) 大竹 雄・本城勇介：地盤構造物設計における変換誤差の定量化，土木学会論文集 (C), Vol. 70, No. 2, pp. 186~198, 2014.
- 28) Matsuo, M. and Asaoka, A.: A statistical study on conventional "safety factor method", Soils and Foundations, Vol. 16, No. 1, pp. 75-90, 1976.
- 29) 岡原美知夫・高木章次・中谷昌一・木村嘉富：単杭の支持力と柱状体基礎の設計法に関する研究，土木研究所資料，第2919号，1991.
- 30) Paikowsky, S.: Load and resistance factor design (LRFD) for deep foundations, NCHRP report 507, 2004.
- 31) 大竹 雄・本城勇介：地盤構造物設計におけるモデル化誤差の定量化，土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 70, No. 2, pp. 170~185, 2014.

(原稿受理 2015.2.17)