

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360190

研究課題名(和文)地盤構造物の実用的な信頼性設計法の開発と地盤調査の最適化

研究課題名(英文)Development of a geotechnical reliability analysis by a simplified procedure and optimization of soil investigations

研究代表者

本城 勇介 (HONJO, Yusuke)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：10251852

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：信頼性設計法は、過去15年ほどの間に、設計コードの開発という分野で急速に普及した。しかし構造工学分野で発展してきた信頼性解析法には、地盤構造物の信頼性解析を考えたとき解決されなければならない多くの問題が顕在化した。本研究は、これらの問題を解決した研究であり、統計学の概念に基づき、サイトごとの地盤パラメータの調査に基づく設定方法、地盤パラメータの空間的バラツキが、構造物の性能に与える影響の定量的官位評価方法、複雑化する地盤解析ツールと信頼性解析の有効な結合方法等について、開発した。さらにこれらを体系的に取り込んだ、地盤構造物設計のための簡易な信頼性解析法を提案した。

研究成果の概要(英文)：The reliability analyses (RA) have been popularized through development of design codes throughout the world in the past several decades. However, issues related to the geotechnical reliability analyses have been identified in the same period because RA had been developed mainly in the structural engineering.

This study is solving these issues, namely by developing methods (1) to determine the characteristic values of soil parameters based on the soil investigation at a site by statistically sound foundation, (2) to evaluate the impact of soil spatial variability on performances of a geotechnical structure, and (3) to propose a method to combine complex geotechnical calculation tools and RA tools etc. Finally, these parts are systematically synthesized to make a geotechnical reliability analysis by a simplified procedure (GRASP).

研究分野：地盤工学

キーワード：信頼性設計 地盤構造物 統計解析 設計基準 リスク評価 基礎構造物 不確実性

## 1. 研究開始当初の背景

1996年に発効したWTO/TBT協定の「仕様に基づく規定ではなく、性能に基づく規定」という規定は、我が国の土木分野の設計基準の性能規定化を促した。今後わが国の主要な設計コードは、要求性能を性能により規定し、性能照査を信頼性設計法によるものとなって行くと考えられる。

1996年に発効したWTO/TBT協定に伴う、政府の規制緩和政策の一環として、2002年度から、技術基準認証等について抜本的な見直しが行われ、その中で国交省では、港湾基準の性能規定化、道路橋示方書の検討が目標の一部となった。

一方学会も、設計コードの性能規定化の動きを早期に捉え、地盤工学会では1997年度から関連した諸委員会活動を開始し、地盤コード21や、Code PLATFORM ver1(土木学会)などの成果を用意し、諸基準の作成に資する基本文書を供給した。申請者も科研費による研究(本研究計画調査10頁参照)を通じ、これらの研究活動を中心的に推進したと自負している。詳細は、Soils and Foundations 50周年記念号の、Honjo, Kikuchi and Shirato (2010)を参照されたい。

我が国の土木構造物の中心的な設計基準である道路橋示方書は、現在改定の最終段階で、徹底した性能規定化と、部分係数法の導入がその中心である。提案者はこの改定で、橋梁委員会、橋梁総括小委員会、性能規定化WG、下部構造小委員会など多くの局面関わっている。

上述の動きは、特に2007年4月に発効した、「港湾の施設の技術上の基準」(以下「港湾基準」と呼ぶ)の改訂版の出現により、新しい時代に入った。この基準は、港湾法に基づく明確な階層的な性能規定化と、全面的な信頼性設計法による照査式の部分係数の決定を導入した画期的な設計コードである。わが国の土木構造物でもっとも幅広く用いられている道路橋示方書も、性能規定化と信頼性設計法の導入を柱として、改訂作業が進められている。

一方海外の動向については、申請者は国際地盤工学会のTC23「地盤構造物の限界状態設計法」の主査を2001年より2009年まで務め、この分野の海外の研究者やコードライター達との強力なネットワーク構築し、信頼性設計、EurocodesやAASHTOなどの設計コード開発に関する詳細な情報が、以前よりはるかに容易に入手できる。

## 2. 研究の目的

以上のように信頼性設計法は、過去15年ほどの間に、設計コードの開発という分野で急速に普及が、そのためになお解決の必要な問題も顕在化した。今後の地盤構造物の信頼性設計において、次のような問題が愁眉の急

であると考えている。

- (1) 地盤構造物の特性を踏まえた、簡易で実務的な信頼性解析法の開発と不確実性要因の特定
- (2) 地盤構造物の信頼性と地盤調査の位置と数の関係の定量的把握と、最適化スキームの提案。

現時点では設計コードは信頼性設計法レベルI(部分係数法)で書かれている。しかし、港湾基準や道路橋示方書のような設計コードが実際に発効すると、大規模構造物や特殊構造物では、設計者が直に信頼性設計(レベル:確率計算)を実施して、より経済的な構造物の設計を行うことが許されているし、実際実施されようとしている。設計コード開発のために整えられた、荷重や材料に関する統計資料は公開されており、設計者にとって信頼性設計(レベル)を実施することは、以前に比べはるかに容易になっている。地盤構造物の信頼性解析を、必ずしも信頼性解析に精通していない実務家が、容易かつ間違いなく実施できる手順と方法が求められている。現在までに開発されている信頼性設計法は、主に構造工学分野で開発された手法の借用であり、地盤構造物の設計の特性を反映していない。研究計画で詳述するが、その相違はサイトごとの地盤パラメータの調査に基づく設定、地盤パラメータの空間的バラツキが構造物の性能に与える影響評価法、複雑化する地盤解析ツールと信頼性解析の有効な結合等である。さらに本研究では、地盤構造物設計の大きな課題である、設計結果の信頼性と地盤調査の位置や数の関係を定量的に把握し、最終的に地盤調査の最適化を図る。本研究の特徴は、次の諸点にある。

- (1) 地盤設計で遭遇する独特の不確実性要因の分類と、その信頼性解析における取り扱い手順の明確化。これには、サンプルの場所と数に依存する統計的推定誤差と、局所平均値の確率場に基づく整合性のある理論による一般 vs. 局所信頼性設計など独創性の高い提案を含む。
- (2) 上記より、設計における地盤調査の位置と数が設計結果の信頼性に与える影響を定量化し、この最適化を図るスキームを提案する。
- (3) 各不確実性要因が、最終的な設計結果に与える影響を定量的に評価できる。このことにより、現在の地盤構造物設計の直面している問題点が明確となり、設計改善の課題も明確化される。

## 3. 研究の方法

ここに提案する信頼性解析手順では、設計の手順を、地盤解析、基本変数の不確実性解析、信頼性解析の3つの部分に分ける。地盤解析は、通常行われている地盤構造物設計の手順とほとんど同じである。基本変数  $x$  より、設計計算(例:支持力公式, FEM

等)により構造物の応答  $y$  を求める。通常の設計手順との違いは、基本変数の範囲を動かし、特に構造物の限界状態付近の挙動を調べる点にある。 $x$  と  $y$  は、所与の関数関係がある場合、あるいは計算結果から、 $x$  と  $y$  の応答関係を回帰分析により近似す。これを応答曲面と呼ぶ。

次にの不確実性解析は、基本変数  $x$  の不確実性を、統計学的手法により、定量化する作業である。最後にの信頼性解析は、で得られた応答曲面と、で得られた不確実性情報に基づき、モンテカルロシミュレーション(MCS)により、構造物が限界状態に達する確率(=破壊確率)を求める。以上の利点は、

- (1) 近年開発されている複雑な地盤解析ツールと、信頼性解析ツール(これも複雑化している)とを分離し、両者を個別に実施することにより、新しく開発されてくる地盤解析ツールを生かしつつ、信頼性解析ツールに不慣れな技術者が、信頼性解析を行うことを容易にする。
- (2) 設計者は、地盤解析では、限界状態付近の応答値と基本変数の関係を把握し、応答曲面を求める。実際これを実施すると、求める応答曲面自身が、設計者に多大な設計に関する情報を与えることが分かる。これは、純粋に地盤解析のスキルを要求される作業である。
- (3) 信頼性解析は、MCS で行うので、設計者の理解は、直感的で容易である。

地盤解析と 信頼性解析は以上の説明の通りであり、の不確実性解析の方法と手順が、本研究の中心課題となる。その特徴は、次の通りである。

- (1) 一般 vs.局所信頼性解析： 地盤設計では、サイトごとに材料特性を調査・決定しなければならない。設計は本来調査の質や量、構造物の建設位置と調査位置の相対的關係等を反映すべきである。本研究では信頼性解析を「一般」と「局所」に区別し、前者を調査位置と建設位置関係を考慮しない場合、後者を考慮する場合として、定式化を行う。
- (2) 局所平均値による地盤パラメータの空間的バラツキが構造物の性能に与える影響の評価： 構造物の挙動は、地盤パラメータのある面積や体積についてのある平均値より決定される。つまりある関数の積分値を評価する(例えば、円弧に沿った強度の積分値)。この局所平均を取る体積や面積を適切に決定する方法を示す。
- (3) 不確実性解析の R 言語によるプログラム化： R 言語は、統計解析用オープンソースのフリーソフトウェアであり、2005 年頃より世界的に爆発的に利用が進んでいる。本研究では、不確実性解析及び信頼性解析部分をすべて R 言語で作成する。

- (4) 構造物の信頼性と地盤調査の位置と数の関係の定量的把握： 上記の道具を用いていくつもの典型的な線上の地盤構造物の信頼性解析を実施し、これにより信頼性に影響を与える各因子の影響を定量的に把握し、最終的に地盤調査の位置と数が与える影響をとらえる。

#### 4. 研究成果

本研究の成果は現時点で、10 編の雑誌論文、11 編の国際会議論文として公表されている。

論文(1),(4),(5),(8),(9),(10)は、土木学会論文集に発表された一連の本研究の研究成果である。基本理論を(1)で述べ、(4)と(5)はそれぞれ、局所平均による地盤パラメータの空間的バラツキが構造物の性能に与える影響評価法と、提案する統計的推定誤差の評価理論の検証を行った論文である。また、(8)は変換誤差、(9)は設計計算モデルのモデル化誤差の文献調査等による定量化のサマリーである。また(10)は、これらを総合的にまとめた論文であり、提案する簡易信頼性評価手順の全体像を示している。なお、論文(1)は、2013 年度土木学会論文賞を受賞した。

論文(6),(12),(13),(14),(18),(19),(20)は、上記の理論を国際会議等で英文で発表したものである。

以上の理論の応用を示しているのが、その他の論文である。論文(2),(3),(11)は、12km の長さを持つ用水路の液状化危険度解析であり、論文(7),(16),(17)は東日本大震災で実際に被害を受けた河川堤防の液状化危険度解析である。(15),(21)は、650m 長さの高速道路土留め壁の信頼性解析結果である。これらの解析では、いずれも地盤調査位置と信頼性の関係、各不確実性要因の寄与度等が定量的に示されている。なお、論文(3)は 2012 年度地盤工学会論文賞を、論文(7)は 2014 年度地盤工学会論文章を受賞した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 10 件)

1. 本城勇介・大竹雄・加藤栄和 (2012): 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. (2013 年度 **土木学会論文賞**)(査読有り)
2. 大竹雄・本城勇介: (2012): 応答曲面を用いた実用的な地盤構造物の信頼性設計法-液状化地盤上水路の耐震設計への適用-, 土木学会論文集 C, Vol.68, NO.1, pp.68-83, 2012. (査読有り)
3. 大竹雄, 本城勇介, 小池健介(2012): 調査地点を考慮した線状地盤構造物の液状化危険度解析, 地盤工学ジャーナル,

- Vol.7, No.1, pp.283-293. (2012 年度地盤工学会 論文賞) (査読有り)
4. 大竹雄・本城勇介(2012): 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. 475-490(査読有り)
  5. 本城勇介・大竹雄(2012): 地盤パラメータ局所平均の統計的推定誤差評価理論の検証, 土木学会論文集 C, Vol.68, No.3, pp. 491-507. (査読有り)
  6. Y. Honjo and Y. Otake: (2013): A Simple Method to Assess the Effects of Soil Spatial Variability on the Performance of a Shallow Foundation, *ASCE Geotechnical Special Publication No.229, Foundation Engineering in the Face of Uncertainty (honoring Fred H. Kulhawy)*, J.L. Whithiam, K.K. Phoon and M. H. Hussein eds., pp. 385-404. (査読有り)
  7. 大竹雄・本城勇介・平松佑一・佐古俊介・中山修一・長野拓朗 (2014): 震災前後の地盤情報を用いた河川堤防 20km の液状化危険度解析, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.2, pp.2, pp.203-217. (2014 年度 地盤工学会 論文賞) (査読有り)
  8. 大竹雄, 本城勇介 (2014): 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.2,170-185. (査読有り)
  9. 大竹雄・本城勇介 (2014): 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.2,186-198. (査読有り) (査読有り)
  10. 本城勇介・大竹雄(2014): 簡易な地盤構造物信頼性解析法の開発と浅い基礎の設計問題への適用, 土木学会論文集 C, Vol.70, No.4, 372-388. (査読有り)
- [学会発表](計 11 件)
11. Y. Otake and Y. Honjo: Reliability based design on long irrigation channel considering the soil investigation locations, *Proceedings of Geo Congres, SanDiego, (USA)*, pp.2836-2845, 2012.
  12. Y. Honjo and Y. Otake: General and local estimation of local average of geotechnical parameters in reliability analysis, *APSSRA, Phoon, K.K., Beer, M., Quek, S.T., Pang, S.D. editors, Singapore(Singapore)*, pp.236-241, 2012
  13. Honjo, Y. and Y. Otake: Statistical estimation error evaluation theory of local averages of geotechnical parameters, Proc. of The 11th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR2013), G. Deodatis, B.R. Ellingwood and D.M. Frangopol eds, New York (USA), pp.1987-1994, 2013
  14. Otake, Y. and Y. Honjo (2013): A simplified reliability of spatial variability employing local average of geotechnical parameters, Proc. of The 11th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR2013), G. Deodatis, B.R. Ellingwood and D.M. Frangopol eds, New York (USA), pp.1995-2002.
  15. Honjo, Y., Y. Otake, T. Kusano and T. Hara, Reliability analysis of 640 m long soil retaining wall, for an embedded highway construction, Proc. 4th ISGSR (Geotechnical Safety and Risk IV), pp.121-126, Zhang et al. (eds), Hong Kong (China), Taylor & Francis Group, 2013
  16. Otake, Y., Y. Honjo and Y. Hiramatsu, Reliability analysis of 20-km river dike against liquefaction failure, Proc. 4th ISGSR (Geotechnical Safety and Risk IV), pp.299-304, Zhang et al. (eds) Hong Kong (China), Taylor & Francis Group, 2013
  17. Otake, Y., Y. Honjo, Y. Hiramatsu, M. Mase and I. Yoshida (2014): Reliability Analysis of Long River Dike Against Liquefaction Failure, Proc. of Vulnerability, Uncertainty, and Risk M. Beer, S. K. Au, and J.W. Hall eds, Liverpool (UK), pp.2409-2418.
  18. Honjo, Y. and Y. Otake (2014): Consideration of Major Uncertainty Sources in Geotechnical Design, Proc. of Vulnerability, Uncertainty, and Risk M. Beer, S. K. Au, and J.W. Hall eds, Liverpool (UK), pp.2488-2497.
  19. Otake, Y. and Y. Honjo (2014): A simplified procedure to evaluate the effect of soil variability on geotechnical structures, Proc. of Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics, Oka, Murakami, Uzuoka and Kimoto eds, Kyoto (Japan), pp.1265-1270.
  20. Honjo, Y., and Y. Otake: Is soil spatial variability the most important source of uncertainty in geotechnical design?, Proc. of Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics, Oka, Murakami, Uzuoka and Kimoto eds, Kyoto (Japan), pp.1271-1276, 2014.
  21. Honjo, Y., and Y. Otake (2014): Reliability analysis of long soil retaining wall considering layer thickness uncertainty, Proc. of

Life-Cycle of Structural Systems (H. Furuta, D. Frangopol and M. Akiyama eds.), Tokyo (Japan), pp.1370-1377, 2014.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

本城 勇介(HONJO, Yusuke)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：10251852

### (2) 研究分担者

なし ( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

大竹 雄 (OTAKE, Yu)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：90598822