

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：13101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18112

研究課題名(和文)統一評価理論に基づく洪水および地震ハザードを考慮した河川堤防の総合的な信頼性解析

研究課題名(英文)River dike reliability analysis considering natural hazards based on a unified evaluation theory

研究代表者

大竹 雄(Otake, Yu)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：90598822

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、ハザードを考慮した総合的な河川堤防の信頼性解析法の開発を統一的な理論に基づいて構築することを目指してきた。河川堤防の信頼性解析の開発が進むオランダ国の事例を調査し、我が国の河川堤防へ応用するための基礎理論の構築を行った。その上で、ある1級河川堤防35kmへ適用することで具体的なリスク計算を行うことで、有効性を検証した。

研究成果の概要(英文)：The authors has developed the reliability analysis method considering some kinds of natural hazard to evaluate the safety of river dike properly in Japan. The basic theory has been presented based on investigation that the researches in the Netherland where reliability analysis method has been progressed for river dike. Furthermore, the idea implemented to the data of an actual 35km stretch of a fairly large river running through one of the major cities in Japan.

研究分野：信頼性工学，設計論，地盤工学

キーワード：河川堤防 信頼性解析 パイピング リスク 意思決定

1. 研究開始当初の背景

国内外の主要な設計コードが性能設計概念に基づく信頼性設計照査体系に移行している。この動きは、米国の高速道路設計基準であるAASHTOのLRFD（荷重抵抗設計法）や建築・土木の構造物設計の国際標準ISO2394、欧州のEurocodesなどが開発された2000年頃に始まった。信頼性設計導入から20年程度が経過し、世界的には標準設計照査法として認識されている。我が国においても、2007年の港湾の施設の技術上の基準で採用され、鉄道構造物等設計基準においても一部信頼性設計概念が用いられている。さらに、2017年に道路橋示方書が信頼性設計法に基づく設計体系へ移行し、我が国の主要な設計基準は、信頼性設計概念に基づく設計体系に移行したことになる。

このように国内外で設計実務に導入されてきた信頼性設計の導入効果について、興味深い報告がある¹。この文献では、米国の橋梁設計基準AASHTOの開発で中心的役割を果たしたKulicki氏の下記の言葉を紹介している。

- ・橋梁全体に対して統一的な安全性に関する尺度を得たので、これを元に、橋梁全体の安全性の昇降を制御できるようになった。これは、橋梁の維持管理にも有効な情報である。
- ・橋梁建設全体に投じられる資源量は、LRFD（荷重抵抗係数法）の導入前後でそれほど変化していない。
- ・しかしそれらの資源は、異なる橋梁間でもより適切に配分されるようになった。

新設構造物を主として対象として開発されてきた信頼性設計の考え方は、近年、既設構造物の対策優先度の設定のためのレイティング方法（LRFR）へ拡張され、優れた成果を残している。このように、信頼性理論は、

¹ 本城勇介・七澤利明：米国道路橋設計基準における荷重抵抗係数設計法（LRFD）の策定経緯と評価、橋梁と基礎、Vol.48, No.12, pp.26-31, 2014

新設構造物のみならず、既設構造物の維持管理でも同様に活用できる概念であり、施設の計画・設計から維持管理のいずれの段階においても効果的に活用されるようになってきている。

このような設計コード改定の世界的な流れの中、本研究で対象とした河川堤防の質的整備（地盤工学的見地からの設計）は少し異なる側面にある。その特徴や課題を以下に列挙する。

(1) 「設計」の歴史が極めて浅い：河川堤防は、長い間、形状規定に基づいて計画・整備されてきた。設計という概念が導入されてから10年程度である。長い経験の中で構築されてきた橋梁や道路の設計方法と比較して、設計法それ自体に多くの課題が含まれている可能性が高い。

(2) 線状土構造物：地盤調査や堤防形状調査は数100m から数km に1箇所程度が一般的である。元来、設計に必要な情報が不足している可能性があり、地盤強度や地層構成などの空間分布、設計条件が適切に設定されているか疑問がある。

(3) 降雨特性、地震動特性（外力特性）の変化：降雨特性が近年急激に変化しており、地震の活動期に入ったとも言われている。土構造物は外力特性の影響を直接に受けることが考えられ、外力の不確実性を考慮した設計体系が求められる。

2. 研究の目的

先に示した研究の背景に基づいて、洪水および地震ハザードを考慮した河川堤防の信頼性解析法の開発を研究目的とした。

(1)の課題については、河川堤防の被災事例や模型実験等を収集整理し、現在の照査法の誤差（モデル化誤差）を定量化する作業を行う。これは、現在の設計法の力学的な意味を明確にするとともに、信頼性設計において、設計計算精度を考慮した意思決定が行える。

さらには、現状の照査法の問題点も見出すことができるのではないかと、という視点を持っている。

(2) の課題については、河川堤防は、大規模な線状既設構造物とみなすことができる。さらには、堤防内部構造は縦断方向に変化しており、旧河道部など、基礎地盤が局所的に変化している場合もある。従って、河川堤防の縦断方向に構造が異なり、特性が異なる多数のセグメント（区間）の直列システムとしてみなすことができる。従って、セグメント毎に信頼性は異なることから、先の橋梁の事例のように、セグメント毎の信頼性のバラツキは大きく、局所的な危険箇所が存在している可能性がある。従って、先に示した橋梁施設と同様に、信頼性設計の考え方を導入することは、対策優先度の合理的な設定とともに、効率的な投資配分を可能にする有用な情報を得ることができる可能性がある。システムとしての破壊確率をいかに定義し、信頼性を記述する枠組みを開発するか、が大きなカギであると考えた。

(3) の課題については、信頼性解析からリスク解析、リスク評価へ発展させる必要性があると考えた。信頼性解析を発展させ、リスクを定量化することで、さらに合理的な意思決定を行う枠組みが提案されている。2015年に改定されたISO2394やオランダ国の治水計画の取り組みのように、欧州では、リスクア指標に基づく意思決定理論の実用化研究が進められている。リスクは様々な概念が存在するが、期待損失として下式に基づいて算定される場合が一般的である。

$$R = P \times C$$

ここで、 R はリスクで期待損失額（円）、 P は破壊確率で信頼性解析により計算される指標、 C は被害規模もしくは人命損失（円）である。リスクに基づく新しい安全性基準を提示するとともに、設計における目標信頼性水準の設定に活用される。さらには、視覚的

にわかりやすい報告書が国民に公開され、国民とのリスクコミュニケーションの材料となっている。すなわち、リスクに基づく対策優先度の設定だけでなく、下記の点で効果が得られている。

- ・ 要求性能や目標安全性水準の合理的な設定の実現（メリハリのある維持管理）
- ・ 構造物別、地域別、重要度別に応じた施設毎の目標信頼性レベルの設定（市民との合意）
- ・ 市民（ユーザー）とのコミュニケーション（説明性、透明性）の向上
- ・ リスク（期待損失額、人命損失）は、その概念を一般市民へ伝えやすい。

信頼性理論により、限界状態に対する信頼性が統一的な評価尺度で議論されたとしても、それぞれの構造物の重要性、破壊時の影響度が考慮されなければ、合理的な意思決定につなげることは困難である。また、リスク概念の導入は、費用対効果の分析に基づく投資計画と調和的である。特に、道路ネットワーク（異種構造物を含むシステム）や河川堤防などのシステム全体の性能、対策優先度を議論する際には、不可欠な議論になると考えられる。

以上に示すとおり、国内外の設計、リスク評価に関する最新の研究動向を踏まえて、本プロジェクトでは、河川堤防の信頼性設計法の開発を行った。開発してきた信頼性設計法の特徴は下記の通りである。

- ① 地盤調査の不足を補うため、中小規模の災害変状履歴に基づく信頼性更新により、危険箇所の絞り込みを行う方法を提案している。
- ② 不確実性が小さく真に危険な箇所、情報が不足しており不確実性の高さから危険性が把握しきれていない箇所、を抽出することができる。
- ③ これにより、対策優先度の設定、追加地盤調査地点の設定を検討する上で有

効な資料を提供することができる。

地盤調査の多寡に応じた設計の不確実性を評価することにより、地盤調査の最適化の議論を行うことができる。

3. 研究の方法

本研究は大きく 3 つの視点から研究を実施することとした。

(1) 開発してきた信頼性解析法のパイピング照査への拡張

本研究着手以前に開発してきた知見を踏まえて、特にパイピングの問題に対する信頼性解析法の構築が主たる課題であった。パイピングは、長大な河川堤防に対して、局所的な問題に破壊モードが支配されている可能性があり、適切に評価するためには詳細な地盤情報（高密度な地盤調査）が要求されると考えられる。また、その計算モデル（解析法）も十分な研究開発が行われているとは言い難い状況にあり、当該テーマは多くの課題を有している。

これに対して、オランダ (Deltares) の研究は、先進的かつ体系的な成果が報告されており、研究実績も蓄積されている。これらを学び、国内問題へ応用することを第一の課題として捉えている。

(2) ハザードの不確実性を考慮したリスク評価モデルへの拡張

地盤工学だけでなく、河川工学、河川計画グループとの連携が必要な挑戦的課題であると考えている。河川堤防管理者、コンサルタント実務（河川計画、河川工学グループ）等へのヒアリング、情報収集を行い、計算モデルを構築する。さらには、実河川堤防への適用により、有効性の検証を行う。

そして、信頼性解析の開発にあたり、単に解析法の開発にとどまらず、解析により得られる各不確実性の寄与度を整理することを試みる。このことは、河川堤防の管理上の問題点を炙り出すことができる可能性があり、

実務設計の改善に有用な情報が得られた場合には、積極的な成果の公開により設計実務へフィードバックできる可能性があると考えられる。

4. 研究成果

(1) 開発してきた信頼性解析法のパイピング照査への拡張

パイピングに代表される透水性基礎地盤上の河川堤防の性能評価の基本的な方法を提案した。まず、線状構造物を対象として連続的な解析を行う点、信頼性解析における繰返し計算への適用性の観点から、簡易かつ有効な方法を採用することが望まれていた。

国内外における設計や照査に用いられている評価方法、簡易な評価指標に関する情報を整理した。日本と米国は、透水性基礎地盤上の堤防の性能評価（実務）において、基本的に同様の考え方で照査が行われている。具体的には、被覆土（粘性土）の盤ぶくれ照査 (Uplift)、透水性基礎地盤の局所動水勾配照査 (Heave) の照査が用いられている。日本と米国の違いは、日本が非常常浸透流解析 (FEM) に基づいて照査するのに対して、米国は、Blanket Equation と呼称される定常浸透流をモデル化した微分方程式の解（閉形式の簡易式）で照査が行われる点にある。

一方、和蘭国では、透水性基礎地盤に起因する破壊のプロセスをいくつかの段階に分けて考え、上記指標に加えて透水性基礎地盤のパイピング進展の判定 (Piping) を行う照査式（閉形式）である Sellmeijer 式が導入されている点に特徴がある。さらに、近年、Schweckendiek.T が複雑な破壊プロセスを上記の簡易照査の並列システムとしてモデル化することで、Piping 進展可能性が高い区間を適切に評価できるとしている。ただし、和蘭国では、堤体の材料を粘性土と仮定されている点に留意する必要がある。

ここで、紙面の都合上、Sellmeijer 式について

でのみ示す。この式は、パイピング照査において国内外で広く活用されている経験式 Bligh 式や Lane 式を発展させた式である。紙面の都合上、式の詳細は割愛するが、欧州、米国等の設計基準に用いられ、実用化されている式である。また、この式の開発に関連して多くの模型実験、実物大規模のフィールド実験が実施され、推定精度が議論されている。Lopez de la Cruz¹ がオランダ国において実施された様々なスケールの実験データを用いて、Piping 限界水頭差 Hc と Sellmeijer 式によって推定した限界水頭差の Hc の比較をすることで、モデル化誤差の定量化を行っている。本研究では、Lopez de la Cruz による検討結果に日本国内で行われた実験の結果を追加して分析をおこなった。

その結果、オランダで用いられている計算手法のモデル化誤差は $\text{bias}=1.27$, $\text{COV}=0.34$ であることがわかった。これは、日本国内で用いられている設計計算式のモデル化誤差と同等の精度であり、信頼性解析に用いるのに合理的であると考えられた。

(2) ハザードの不確実性を考慮したリスク評価モデルへの拡張

外力側のモデル化は、できるだけシンプルに処理をすることとした。河川計画で用いられている降雨確率と不等流計算に基づいて、河川堤防の任意地点の水位の確率密度を計算し、それを外力とした。逆に、これらハザード側の影響と対象堤防の変状履歴（噴砂や漏水）を用いて、地盤調査の不足を補うことを工夫することとした。

河川堤防における地盤調査は、一般的には 400m～数km 程度の間隔で実施されるため、情報の不足により危険箇所を抽出することは困難である。そこで、中小規模の災害時に生じた堤防周辺における変状からパラメータを逆推定（信頼性更新）することにより、地盤調査の不足を補い、危険箇所

の抽出を行うこと方法を提案した。

過去に生じた中規模の洪水時の観測水位と周辺部における変状履歴から、モンテカルロフィルタ（粒子フィルタ）を用いて、土層構成を逆推定する方法である。これにより、地盤調査の不足を合理的に補うことができる。

これらの研究開発に基づいて、ある 1 河川堤防 35km に対して、信頼性解析を適用し、提案手法の有効性を検証した。提案モデルにより 35km に連続した危険度が計算されるとともに、それぞれの地点で何が不確実なのか、ボトルネックをピックアップできる結果が得られた。さらに、危険度が高いと判断された箇所は、旧河道部など、微地形分類、経験的に管理者が管理重点区間として抽出していた区間であった。これらの結果より、本研究で提案したモデルの有効性は大凡確認できた。さらに、地盤調査や過去の変状履歴など、データを一元的に整理をして、定量的に維持管理フィードバックする仕組みが構築できた。

さらに、任意地点における破堤・浸水シミュレーションを実施し、信頼性解析結果を用いて簡単なリスク計算を行った。今後は、計算されたリスク値に基づいて、地盤調査の最適化の数理など、理論と実際を関連づけながら、合理的な信頼性解析と意思決定支援問題に取り組んでいきたいと考えている。

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 4 件）

- (1) 大竹雄, 七澤利明, 本城勇介, 河野哲也, 田辺晶規: 基礎の変位レベルと地盤のひずみレベルを考慮した設計用地盤反力係数の推定方法, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.73, No.4, pp.396-411, 2017. (査読あり)
- (2) 大竹雄, 七澤利明, 本城勇介, 河野哲也, 田辺晶規: 地盤調査法とひずみレ

ベルを考慮した設計用地盤変形係数の推定方法, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.73, No.4, pp.412-428, 2017. (査読あり)

- (3) 大竹雄, 本城勇介: 地盤構造物設計の不確実性寄与度分析と設計の観点からみた地盤工学の課題, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.72, No.4, pp.310-326, 2016. (査読あり)
- (4) 吉田郁政, 大竹雄, 本城勇介: 情報の価値 Value of Information に基づく最適な観測点位置および箇所数の評価法, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.71, No.1, pp.1-13, 2015. (査読あり)

[学会発表] (計 13 件)

- (1) Yusuke Honjo and Yu Otake, Evaluation of Statistical Estimation Error in an Embankment Stability Problem, ISGSR, GeoRisk, 2017. (査読あり)
- (2) Masahiro Takenobu, Masafumi Miyata, Yusuke Honjo, Yu Otake, Takehiko Sato and Satoshi Nishioka, Revision of “the technical standard for port harbor structures” based on LRFD, ISGSR, GeoRisk, 2017. (査読あり)
- (3) 矢沢大夢, 大竹雄, 佐藤周作, 小出央人, 河川堤防のリスクマネジメント手法への試み-対策優先度の合理化に向けて (平成29年度土木学会関東支部新潟会), 2017. (査読なし)
- (4) 小出央人, 大竹雄, Coupled Markov Chain 用いた河川堤防パイピング危険箇所の見落としリスク評価への試み (平成29年度土木学会関東支部新潟会), 2017. (査読なし)
- (5) 小出央人, 大竹雄, Coupled Markov Chain モデルを用いた地層構成の確率的内挿-地盤調査の多寡を考慮した河川堤防リスクマネジメントモデルへ向けて- (平成29年度土木学会全国大会), 2017. (査読なし)
- (6) 大竹雄, 佐藤周作, 本城勇介, 不完全情報を用いた河川堤防の安全管理に向けた基礎研究-その1- (平成28年度地盤工学会研究発表会), 2016. (査読なし)
- (7) 佐藤周作, 大竹雄, 本城勇介, 不完全情報を用いた河川堤防の安全管理に向けた基礎研究-その2- (平成28年度地盤工学会研究発表会), 2016. (査読なし)
- (8) 佐藤周作, 大竹雄, 本城勇介, 小出央人, 信頼性理論に基づく河川堤防の危険箇所抽出モデル (平成28年度土木学会関東支部新潟会), 2016. (査読なし)
- (9) 小出央人, 大竹雄, 本城勇介, 佐藤周作, ベイズ統計学を用いた河川堤防パイピング危険度評価 (平成28年度土木学会関東支部新潟会), 2016. (査読なし)
- (10) Y. Honjo, H. Mori, M. Ishihara and Yu Otake : On the Inspection of River Levee Safety in Japan by MLIT, Proc. of Geotechnical Safety and Risk V, T., Schweckendiek, A.F., van Tol, D. Pereboom, M.Th. van Staveren and P.M.C.B.M., Cools eds, pp.855-860, 2015. (査読あり)
- (11) Yu Otake, Y. Honjo, Y. Hiramatsu, K. Lee and T. Kodaka. : Continuous River Levee Safety Assessment Based on a Reliability Analysis, Proc. of Geotechnical Safety and Risk V, T., Schweckendiek, A.F., van Tol, D. Pereboom, M.Th. van Staveren and P.M.C.B.M., Cools eds, pp.563-568, 2015. (査読あり)
- (12) 佐藤周作, 大竹雄, 本城勇介, 信頼性解析理論に基づく河川堤防パイピング照査の感度分析 (平成27年度土木学会関東支部新潟会), 2015. (査読なし)
- (13) 丹野領太, 大竹雄, 本城勇介, 脊戸川 史也, 河川堤防の液状化危険度評価を対象とした“見落としリスク”の定量化と危険箇所の抽出 (平成27年度土木学会関東支部新潟会), 2015. (査読なし)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大竹雄 (Yu Otake)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号 : 90598822