

氏 名	シリシン ジャンルンウタイ Sirisin Janrungautai
学位の種類	博士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2325 号
学位授与の日付	平成 15 年 11 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工学研究科土木システム工学専攻
学位論文題目	The Study on Uncertainty Modeling and Risk Analysis Geotechnical Problems (地盤工学問題における不確実性要因のモデル化とそのリスク解析に関する研究)
論文調査委員	(主 査) 教授 大 西 有 三 教授 青 木 謙 治 教授 大 津 宏 康

論 文 内 容 の 要 旨

土木構造物を対象とした解析においては、さまざまな形で不確実性というものが存在する。従来より確率論によってこの不確実性を取り扱う試みもなされてきたが、様々な事象がもつ不確実性に対しては、まず各事象がもつ不確実性を抽出し、それを適切に評価し、管理していくことが求められている。近年、これらを統合するものとしてリスク解析と称される手法が、品質管理や保全の分野において用いられつつある。これは、考察対象である事象の持つ不確実性をモデル化し、定量的に取り扱うために開発された手法であり、方法の限界を認識した上で有用なデータを抽出し、あるいは現象を最も良く説明できるモデルを選択する際の手法として適用されている。本研究は、このリスク解析を地盤工学の各現象に適用することで、本来地盤工学が持っている不確実性を定量的に捉え、さらに不確実性を反映した解析結果に基づく意思決定論にまで発展させた管理手法を提案するものである。具体的には、降雨に対する斜面ハザードおよび地下水の揚水に伴う都市部の地盤沈下を例として取り上げ、それらの現象に影響を及ぼす不確実性を考慮したリスク解析手法について論述するもので、論文は序論と結論を含め 5 章から成り立っている。

第 1 章は序論であり本論文の研究の背景と目的について論じている。地盤工学が対象とする現象、例えば斜面などの土木構造物の設計や維持管理における不確実性の定量的な取り扱いの重要性を述べ、その不確実性の評価（アセスメント）と管理（マネジメント）に関する手法について考察する。すなわち、評価手法に関連しては、ハザードの同定化とモデル化を行い、さらに管理手法における損失の評価と低減策などを通してのマネジメント手法を記述し、本論文はそれら解析手法を地盤工学の分野に適用することを提案するものであることを述べる。これにより、これまで扱われることのなかった不確実性を定量化し、費用便益解析という意思決定法にまで発展させる試みが可能であることを示している。

第 2 章は、リスク解析手法において用いられる統計学および確率論について考察し、不確実性をモデル化するための数学的手法と、地盤調査や土木構造物の設計への本手法の適用方法について記述している。さらに本章においては、不確実性を定量的に取り扱うことで、地盤工学が対象とする現象の将来を予測する手法も可能になることを示す。また、リスク解析手法を適用した場合の評価システムの信頼性を評価する方法についても言及することで、リスク解析法というものの基礎的原理と適用全般についてまとめている。

第 3 章以降では、具体的事例を挙げ、それらに本手法を適用する方法について詳細に記述し、本研究成果の有用性について述べる。まず、降雨に対する斜面ハザードにおけるリスク解析法についての研究成果を示す。最初に、降雨に伴う斜面の安定性評価の手法について考察し、個々の斜面の水収支に着目した降雨浸透を正確に表現する手法として従来のタンクモデルを改良する。斜面においては、飽和度の上昇あるいはそれに伴う間隙水圧の作用によって地盤のせん断強度が低下し、斜面ハザードにつながることは周知の事実であった。しかしながら、降雨浸透を水収支の観点から精度良く解析する試みは少なく、本研究では 3 連 1 元タンクモデルと、当モデルのパラメータを観測データからカルマンフィルターを用いて最適化を図る手法を提案する。これまでの採点法や数量化Ⅱ類のような判別法による斜面管理では、個々の斜面に対するハザードの

誘因が考慮されておらず、例えば、ある降雨に対する的確なハザード予知が行えない状態である。本研究により、表層流だけでなく斜面後背地からの地下水涵養、および法尻からの復帰流などを考慮した新たな水文学的な知見に基づいたリスク解析のためのツールが提供され、斜面の不安定性をもたらす地下水位の上昇を的確に評価することが可能になる。

次に、降雨現象を確率過程として捉えた降雨ハザードのモデル化手法について述べる。すなわち、降雨に伴う斜面の安定性を貨幣価値として計量化するリスク評価モデルの構築を試みる。また地盤情報を統計学的な変数として取り扱うことにより、斜面ハザードによる損失の評価手法を確立することも試みる。本研究は個々の斜面の力学的特性などを考慮したリスク評価手法であり、現状の斜面の崩壊確率評価だけでなく斜面を補強する優先順位付けも可能となる。これによって、年間破壊確率と損失額によって年間リスクが算出され、対策実施の優先順位を決定する根拠が明示される。本章で示すこれら一連の手法により、降雨に対する投資対効果を考慮した戦略的斜面補強の立案を行うことが可能になると言及している。

さらに、ここでは実際の国道に隣接する32ヶ所の斜面に対して本手法の応用を試みた結果について考察する。具体的には、斜面ハザードに対する補強に対して、費用対効果を考慮するアセットマネジメントを適用し、斜面補強の優先順位付けを行う意思決定の手法を構築し、本手法によるリスク解析手法の有効性を実証している。

第4章では、都市部における大規模な地下水の揚水がもたらす地盤沈下問題における本手法の適用について述べる。まず本現象が、日本だけでなくギリシャ、タイあるいはベトナム等、全世界的な問題であり、都市部における地下水の環境保全および洪水対策の観点から重大な課題であることを明示している。さらに、本研究ではタイのバンコクを対象としてリスク解析を試みる。まず、地盤沈下をシミュレーションするための3次元地下水解析法を試み、解析結果を通して本問題が内在する不確実性要因の同定と分類を行う。その結果、将来的な地盤沈下を予測するための支配的要因は、地盤物性の不確実性だけでなく、揚水量の不確実性も影響を及ぼすことを明らかにしている。さらに、地盤物性の不確実性を定量的に取り扱うため、当パラメータをカルマンフィルター法により最適推定を行う方法を再度検討している。その一方、揚水量の不確実性については、揚水量が非定常確率過程に従うと仮定したモデル化の手法を開発し、確率論的な取り扱いを基本にしたモンテカルロシミュレーションを用い、将来的な揚水量の変動に対するばらつきを考慮した地盤沈下の変動リスクを評価する。これにより、地下水の揚水量に関連するピエゾ水頭の減少量から地盤沈下量を評価する方法を考察し、バンコクにおける地盤沈下に対するリスク評価法を確立させ、揚水量をコントロールするための地盤沈下の低減を図る効果の定量化を行うマネジメント手法を構築している。

また、本章では実際に設定されているバンコクでの許容沈下量の基準に対して、本研究による地盤沈下のリスクについて検討を行う。本研究では、解析結果やそれに至る確率を具体的に明示し、不確実性のもつ物理的意味が理解できる形で結論を導いていくために、最終的な費用便益解析を用いる意思決定法においても、優れた判断を行うことができる。これら実際の現場データを用いた本研究の解析結果を通じて、前章と同じく本研究成果の有用性を実証する。

第5章は、これまでの研究の成果についてまとめ、さらに今後の課題と提言について記述するものであり、本研究によるリスク解析法を様々な地盤工学の問題に適用できる可能性について述べている。

論文審査の結果の要旨

土木工学分野の諸問題に対して解析あるいは設計を行う上では、様々な不確実性要因が含まれており、またそれらが結果の信頼性に重大な影響を与えることが知られている。近年、地盤工学分野での不確実性要因に対処する方法論として、確率論あるいはその発展形としてのリスク評価手法が注目されつつある。本論文は、地盤工学に加えて、水文学知見を要する学際的課題に対して、不確実性要因のモデル化とそのリスク解析への適用性について検討を行うものである。具体的には、降雨時の地下水挙動変化に付随した斜面の安定性問題および都市部における大規模な地下水揚水に伴う地盤沈下問題の二つの事例に対するリスク評価手法について提案するものである。

本論文の主な内容は以下の通りである。

- 1) 降雨に伴う斜面の安定性評価においては、降雨浸透に従う地下水位変動を適切に評価することが不可欠である。この際には、斜面後背地からの地下水涵養、斜面表面での表層流および法尻からの復帰流等の水文学的知見に基づく検討が必要となる。本研究では、この地下水挙動を適切に評価する手法として新たな連続タンクモデル（3連1次元タンクモデ

ル)を開発し、さらにタンクモデルのパラメータを観測データに基づきカルマンフィルター法により最適推定を行う方法論を開発した。

- 2) 1)に加えて、降雨現象を確率過程と仮定する降雨ハザードのモデル化手法を用いて、降雨に伴う斜面の安定性について、貨幣価値として計量化したリスク評価モデルを開発した。さらに、同手法を実際の国道に隣接する32ヶ所の斜面に対して適用した結果として、同手法はアセットマネジメントの観点から、費用対策効果を考慮し斜面補強の優先順位付けを行う方法としての有効性が高いことを示した。
- 3) 都市部における大規模な地下水揚水に伴う地盤沈下問題としては、日本に加えてギリシャ・タイ・ベトナム等において、この課題が都市地下水環境保全および、洪水対策の観点から重大な課題となっていることを明らかにした。さらに、これらの地域の中で、バンコク(タイ)を対象として、この課題に内在する不確実性要因を同定・分類し、その支配的要因を評価すると共に、現状で設定されている許容沈下量の規準に対する地盤沈下のリスクは、地盤物性の不確実性に加えて、揚水量の不確実性であることを明らかにした。
- 4) 3)での知見に基づき、地盤物性の不確実性に関する検討としては、そのパラメータをカルマンフィルター法により最適推定を行う方法論を開発した。また、揚水量の不確実性については、揚水量が非定常確率過程に従うと仮定したモデル化手法を開発し、モンテカルロシミュレーションにより将来的な揚水量の変動に関するばらつきによる地盤沈下の変動リスクについて、検討を加えた。この結果として、将来的な地盤沈下を予測する上での支配的要因についても検討を加えた。これにより地下水の揚水量に関連するピエゾ水頭の減少量から地盤沈下量を評価する方法を考察し、バンコクにおける地盤沈下に対するリスク評価法を確立させ、揚水量をコントロールするための地盤沈下の低減を図る効果の定量化を行うマネジメント手法を構築している。

以上、要約するに本論文は、地盤工学に加えて水文学的知見を要する学際的課題に対して、その不確実性を考慮したリスク評価手法を開発し、その有効性を検証したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成15年10月28日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。