



土-水連成非線形解析の実務への適用における地盤パラメータの揺らぎと3次元効果

伊藤, 肇

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2021-09-03

(Date of Publication)

2022-09-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙第3406号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2003406>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式 3)

論文内容の要旨

氏 名 伊藤 肇

論文題目 土・水連成非線形解析の実務への適用における
地盤パラメータの揺らぎと3次元効果

山間部が国土の7割を占める我が国では、人々の生活の舞台は狭小な平野部に集中している。そのため、海沿いに開けた生活地域を結ぶ交通網の整備、空間的に多くの制限を受ける都市部の開発、さらには新たな用地確保を目的とした海上利用など、我が国のインフラ整備には、地盤に関する工事が不可欠なものである。このような背景において、地盤工学的な数値解析の代表格である有限要素法（FEM）による地盤解析は、建設関連産業における様々な設計、調査および研究に利用されている。また、近年は地震や豪雨による土砂災害が日本各地で発生し、防災、減災を目的とした検討に対しても FEM による地盤解析は多く使用されている。このように今日の設計の現場において、地盤解析の結果は重要な意思決定の根拠となることがある。しかしながら、様々な不確かさが複合的に影響する地盤解析の結果は、時に不合理で、また時に思わぬリスクを伴っていることがあり、これらを考慮した柔軟な意思決定ができるフレームワークの確立が望まれる。

本論文の内容は以下の通りである。第1章では、研究の背景として、今日までの地盤解析技術の発展と、地盤解析の不確かさの特色を述べ、本論文の目的と構成を示す。

第2章では、地盤解析技術の発展の歴史において重要な役割を担う土の構成モデルについて、地盤パラメータの揺らぎを考慮することの必要性を示す。土の構成モデルは、他の材料には見られない特殊な力学特性を表現するために、今日に至る半世紀にわたり発展し続けてきた。しかし、構成モデルの進化に伴い増加するパラメータの個数は時に設計者の頭を悩ませている。また、現場の挙動を再現するべく試行錯誤したパラメータによる地盤解析の結果は、ある事象を再現する最適解の候補の一つに過ぎず、現実起こりうるその他のリスクを見逃している可能性が考えられる。つまり、リスクヘッジの観点からは、地盤パラメータの揺らぎを考慮し、確率分布的に得られる将来予測値を意思決定

の根拠とするフレームワークの確立が必要と考えられ、本論文では、この新しいフレームワークを設計の現場に実装する上で考えられる3つの課題を挙げている。

第3章では、1つ目の課題として、「地盤パラメータの揺らぎの幅を、現実的な範囲で合理的に規定する方法の確立」について述べる。土の構成モデルには複数のパラメータがあり、それらの揺らぎを考慮する場合、個々のパラメータを取りうる値の範囲をどのように規定するかが課題となる。物理的な意味を有する地盤のパラメータには、現実的に取り得る値の範囲があり、本論文では、これらの範囲を“パラメータの生息域”と呼ぶ。しかし、パラメータの揺らぎを考慮する地盤解析で、この生息域の範囲でパラメータを変化させれば、それぞれの設計の現場における土の性質の個性は消滅し、意思決定の根拠を消失させることになる。すなわち、パラメータに揺らぎを考慮した解析を設計に実装するためには、ローカルな土の条件を取り込みつつ、地盤パラメータの生息域に制約をかける方法が不可欠である。本論文では、自然堆積した粘土の異方性を考慮することができる関口・太田モデルに関して、複数のパラメータの生息域に統一的思想をもって制約をかける方法を提案する。この方法を採用すれば、土質試験結果が不十分な状況においても、塑性指数と全パラメータで共通となる揺らぎの幅の2つの値から、統一的に不確かさを考慮した地盤解析を実施することが可能となる。なお、本論文では、商用の FEM 解析コードを使用して、地盤パラメータの揺らぎを考慮した多くの数値実験を実施するため、利用する解析コードが目的の事象を計算する上で必要な機能を有していることを第4章で確認している。

第5章では、2つ目の課題として、「地盤パラメータの揺らぎを考慮した解析を実施すべき問題の把握」について述べる。リソースが限られた設計の現場に対し段階的に新しいフレームワークを実装するためには、どのような条件の問題が地盤パラメータの不確かさにセンシティブであるかについて、定性的、定量的に把握することが重要になってくる。地盤パラメータの揺らぎを考慮することで変化する解析結果の幅は、意思決定における重要な情報となるからである。しかし、このような影響の度合いは、解析モデルの次元や形状、初期応力などの“土のふるまいに関係する条件”によって変化する。そして、このような傾向を把握するためには多くの数値実験が必要であり、本論文では軟弱地盤上の盛土工事を想定した2次元解析について、10,000 ケース以上の解析結果から、地盤パラメータの揺らぎの影響度を可視化した。

第6章では、3つ目の課題として、「現状のハードウェア、ソフトウェアの環境下で実施可能な方法の確立」について述べる。地盤工学的な問題は本質的に3次元問題であるが、多くの場合、1次元または2次元の解析によって近似される。

しかし、これらの簡略化を3次元効果が無視できない条件下において行くと、将来予測の精度が低下する。今日ではハードウェアとソフトウェアの技術の発展により、大規模で複雑な3次元モデルを用いた地盤解析の実行はもはや困難ではなく、費用もかからない。しかし、地盤パラメータの揺らぎを考慮した膨大なケース数の3次元解析を実施するとすると話は別であり、一般的な解析環境では、何百、何千というケースの3次元解析を行うことは容易ではない。そこで、本論文では、典型的な載荷問題と除荷問題を取り上げ、それぞれの3次元効果の特色を把握し、平面ひずみ解析の結果に3次元効果を考慮した補正を行う方法を提案する。

第7章では、タイ王国のアユタヤ地区の郊外に17世紀に建立されたと考えられる仏塔の傾斜問題に着目し、本論文で提案する地盤パラメータの揺らぎと3次元効果を考慮した手法の適用性について示す。この仏塔は、現在、北側に概ね2°傾いており、その原因は基礎地盤の不等沈下によるものと推測できるが、その証拠はない。仏塔直下の基礎地盤の調査が難しく、土質試験結果がないこの問題に対し、3次元効果と地盤パラメータの揺らぎを考慮した500を超えるケースを評価し、仏塔に起こりうる傾斜の確率分布を計算した。シミュレーションの結果から、現在の仏塔の傾斜は、現実的な地盤特性の範囲内で基礎地盤の不等沈下によって発生する可能性があることが確認された。また、この検討によって、3次元効果が著しく、地層が傾斜した基礎地盤においても本論文で提案する手法の適用性があることが確認された。

第8章では、本論文の全体を通じての結論をまとめ、今後のコンピュータ性能の発展の動向を見据えた課題と展望について述べる。

氏名	伊藤 肇		
論文 題目	土・水連成非線形解析の実務への適用における地盤パラメータの揺らぎと3次元効果		
審査委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	飯塚 敦
	副 査	教授	澁谷 啓
	副 査	教授	芥川 真一
	副 査		
副 査			印
要 旨			
本論文は、土水連成の非線形有限要素解析手法を地盤変形予測の実務へ適用することを目的に、解析結果の信頼性に大きく影響する地盤の入力パラメータの不確実性と3次元効果に焦点を絞り、その影響度合いを定量的に検討した内容である。地盤を対象とした弾塑性や弾粘塑性有限要素解析の場合、数多くの入力パラメータが求められるが、一般の現場では、その要求を満たす地盤調査が行われていることなど極めて稀であって、得られている地盤調査結果から解析に必要な入力パラメータを推定せざるを得ない。また、地盤調査結果や入力パラメータの推定には不可避の不確実性を伴い、得られる入力パラメータには揺らぎの幅がある。よって、信頼できる地盤の入力パラメータの決定は常に解析者を悩ます課題となっている。本研究では、土質調査から推定される入力パラメータの揺らぎが解析結果にどのような影響を与えるか、多数のパラメトリックスタディによって定量的に検討している。また、3次元有限要素解析が普及してきたといえども、無限に広がる地盤を対象とする場合、境界条件の設定の影響を極力抑えるために十分な領域を取らざるを得ない。そのために、計算容量を抑えるために、実務においては、盛土のような長尺構造物は平面ひずみ条件のような2次元モデルとして取り扱う場合が多い。このようなモデル化が実際の3次元とどのような差異をもたらすか、定量的に検討するのみならず、3次元効果係数なる指標を提案し、2次元的なモデル化による計算結果を補正する方法も考案し、提示している。最後に、得られた成果を用いて、タイ国アユタヤにある歴史遺産の仏塔を対象に、仏塔の傾斜とその進行を検討している。 本論文は8章からなる。第1章は序論であって、地盤解析の歴史、地盤解析における不確かさの特色を論じ、本論文の目的を述べている。第2章は、入力パラメータの揺らぎ（入力パラメータの取り得る幅）を考慮した地盤解析を考察しており、第3章において、ハード面での計算能力が十分に向上した将来、入力パラメータの揺らぎを關に考慮することによって、予測結果は確率論的に評価されるのを見据えて、決定論的に算定される現状の予測結果に、入力パラメータの揺らぎが及ぼす影響の考慮を定量的に論じている。第4章では、本研究で用いる土水連成非線形有限要素解析コードの検証を行っている。この中で、非線形解析における増分ステップの粗さの解析結果に及ぼす影響をチェックしている。このようなチェックは、解析コードをブラックボックス化しないためにも、実務者にとっては最初に行うべき必須の要件と言えよう。その手順が要領よくまとめられている。第5章では、入力パラメータの揺らぎが予測結果に及ぼす影響を、モデル形状によって生じる差異、地盤の初期応力状態によって生じる差異に区別し、パラメトリックスタディを系統的に実施することによって論じている。第6章において、3次元の地盤構造物を平面ひずみ条件など、2次元的にモデル化する場合、実際の3次元との間に生じる差異（3次元効果）を載荷問題と除荷問題を区別して、系統的に調べている。最終的に、3次元効果係数を考案し、実際の3次元効果を考慮できるように、平面ひずみ条件での計算結果を補正する手法を提案している。第7章では、アユタヤの傾斜した仏塔の保全を目的に、以上の成果を実務的に適用した事例を述べている。仏塔の歴史的概要を紹介した後、地盤および仏塔のモデル化の妥当性を論じている。次いで、入力パラメータの揺らぎと3次元効果を考慮した予測を示し、その信頼性を論じている。第8章は結論であって、本論文の成果がまとめられている。なお、学位論文草稿の内見時に、審査員から指摘された事柄に対しても、本論文においては適切に加筆・修正されている。 本研究は土・水連成非線形解析の実務への適用において、地盤の入力パラメータの揺らぎと3次元効果について研究したものであり、地盤を対象とした土水連成の非線形有限要素解析について重要な知見を得たものとして価値ある集積である。提出された論文は工学研究科学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の伊藤肇は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。			
・特記事項 ・特許登録数 0件 ・発表論文数 7編（内、査読付き英文論文3編、学会発表論文4編）			