

## (論文内容の要旨)

エネルギー自給率の低い日本において、エネルギーの安定確保は重要な課題であり、また二酸化炭素を初めとする地球環境問題と相まって、原子力発電はますますその重要度を増してきている。

原子力発電所においては、その内蔵する放射能の潜在的危険性を考慮して、厳しい耐震性能が要求され、また国による厳しい審査・確認が行われる。この審査に当たっては、国の耐震設計審査指針などが用いられるが、主に建屋や発電設備に関する規程であり、指針上は間接支持構造物と位置づけられている基礎地盤についてはあまり詳細な記載はない。近年の被害地震の頻発を踏まえると、基礎地盤の耐震安定性評価を適切に行っていくことは、社会の理解や安心を得る上で重要なことである。また、今後の重要構造物の立地においては、堆積性軟岩での立地も想定されるが、特に堆積性軟岩では、弱層を含むことが多く、軟岩特有の特性を明らかにし、それを踏まえた上での弱層を含む地盤の安定性評価方法を確立することは、既存の原子力施設の安全性に関する理解を得る上でも、また、今後の原子力発電所や放射性廃棄物処分場の立地促進においても重要なことである。

上記のような背景を踏まえ、本研究では、弱層を含むような複雑な基礎地盤の安定性評価に必要な地盤物性、安定性解析手法に関わる諸条件について、多方面から検討を加え、合理的な安定性評価方法について標準的な方法を提言した。本論文の主な内容は以下の通りである。

本論文は、序論及び結論を含めて、7章から成り立っている。

第1章は、序論であり、原子力発電所の耐震安定性評価方法に関する現状をレビューした上で、本研究の目的及び本論文の構成、検討フローについて述べている。

第2章では、原子力発電所に関する国の審査における要求事項と、それに関連した基礎地盤の安定性に関する審査の対象事項を整理し、合理的に安定性評価を行うのに必要な重要な要素について抽出した結果を述べている。また、国の指針に基づく原子力発電所の地盤調査の実施例と地盤の安定性評価結果について示した。

第3章では、堆積性軟岩地点における地盤の調査試験結果を基に、解析用地盤モデルの作成に必要とされる重要な要因を抽出し、堆積性軟岩の特徴を踏まえた物性の空間分布の設定方法、含水状態に着目した試験方法、地盤特性のひずみ依存性の取り扱い方法、初期地圧の考え方及び動的強度などについて、実測データを基に検討し、適切な方法を提案した。地盤のモデル化に関しては、堆積性軟岩では、物理特性は主に堆積時の地層の条件つまり層準に依存した深度分布となり、力学特性については、むしろ現在の地形に応じた深度に依存した分布をしており、これらを適切に反映した地盤モデルが必要なことを明らかにした。

また、安定性評価に用いる軟岩の強度変形特性を得るための試験条件として、含水状態が重要であることを明らかにし、飽和度に着目した試験方法の採用を提案した。さらに、各試験方法で対象となるひずみ領域が異なることにより、試験方法によって変形特性の違いが生じることを明らかにして、安定性評価に用いる物性を取得するための試験方法について、想定されるひずみレベルに応じたものが望ましいことを示した。

安定性評価を行う時、地盤内の応力状態を再現する上で重要となるポアソン比と初期地圧について、試験及び実測データを基に合理的な設定方法を提案した。そして堆積性軟岩の動的試験結果を基に、動的強度における周波数の影響、規則波と不規則波の比較など波形の影響について検討し、実用的な範囲では、周波数には依存しないこと、規則波による試験によ

り実地震波形に対する強度が推定可能であること、動的強度が通常の静的な試験で得られる強度よりも大きいことを示し、動的強度を用いることがより合理的な安定性評価となることを提案した。

第4章では、地盤の地震時安定性を解析的に評価する上で重要となる各種の要因について、パラメーターの調査・検討を行い、その結果を基に、各種の条件における適切な方法を提案した。具体的には、地盤の非線形特性を考慮した等価線形解析と非線形解析の解析結果の比較を行い、軟弱な地盤では等価線形化解析では過大な応答結果となり、このような地盤の場合には非線形解析がより合理的な評価手法であることを示した。

モーダル解析の重ね合わせ次数の決定方法については、固有値解析から得られる重ね合わせ次数ごとの誤差率の収束状況から決定する方法を提案した。解析領域の大きさについては、パラメータスタディーを行い、着目する構造物中心から構造物幅の2.5倍程度あれば十分であることを示した。解析要素の大きさについては、応答加速度は要素の大きさの影響を受けやすく、変位やせん断応力は影響が小さいこと、安定性評価上必要となる最大波長の4分の1程度でよいことを明らかにした。

堆積性地盤では、深度と共に地盤物性が変化するが、モデル下端以下の地盤物性の変化が上部の応答解析結果に与える影響は小さく、剛性の変化が極端でない限り、判明している範囲の剛性の平均値などを用いても良いことを示した。さらにモデルの境界条件の合理的な選定方法、減衰機構の適切な考え方などについて、解析的検討結果をもとに、地盤の安定性評価を実施する上での各種の条件について適切な設定方法の提案を行った。

第5章では、堆積性軟岩地点においてしばしば見られる弱層を含む地盤の安定性評価について述べている。弱層を含む地盤の安定性評価においては、弱層の強度が重要となるが、室内試験あるいは原位置試験では、サンプリング時の乱れの影響により実際よりも小さい値となることが多い。また、弱層は一般に形状として“うねり(undulation)”を持つことが知られているが、弱層厚さがうねりの振幅よりかなり小さければ、うねりを考慮した強度を用いることが合理的である。

本研究では、解析における弱層のモデル化の方法、弱層が有するうねり効果を考慮した強度の推定方法、地震時に弱層が上部構造物の振動に与える影響について検討し、地盤に薄い弱層が挟在する場合の地盤の安定性評価における標準的な取り扱い手法を提案した。うねりを考慮できるシミュレーション手法を用いて、うねりを考慮した弱層の強度が推定可能であること、うねりを考慮した弱層の強度と、原位置試験による弱層の強度および母岩の強度との比較を行い、うねりを考慮した弱層強度が原位置試験による値よりも大きいことを示し、弱層のうねりを考慮することでより合理的な安定性評価が可能であることを示した。

第6章では、上記の各検討結果を元に、地盤の物性試験方法、地盤モデルの適切な設定方法、安定性解析手法に関わる各種条件の適切な設定方法、弱層を含む地盤の取り扱いについて取りまとめ、弱層を挟在する軟岩を基礎とする重要構造物の安定性評価方法を確立した。

第7章では、結論として本研究により得られた結果を取りまとめ、今後の課題を述べている。

## (論文審査の結果の要旨)

エネルギー自給率が極めて低い日本において、エネルギーの安定確保は重要な課題であり、また二酸化炭素を初めとする地球環境問題と相まって、エネルギーの安定供給が可能で、二酸化炭素の排出量が火力発電所に比べて極端に少ない原子力発電は、ますますその重要度を増している。

原子力発電所においては、その内蔵する放射能の潜在的危険性を考慮して、厳しい耐震性能が要求され、国による厳しい審査・確認が行われる。また、近年の直下型地震や被害地震の頻発を踏まえると、原子力発電所のような重要構造物の基礎地盤の耐震安定性評価を合理的かつ適切に行うことは、社会の理解や安心を得る上で重要である。また、今後こうした重要構造物は、堆積性軟岩での立地も想定される。特に堆積性軟岩では、弱層を含むことが多く、特有の特性を明らかにし、弱層を含む地盤の安定性評価の合理的な方法を確立することは、既存の原子力施設の安全性に関する理解を得る上でも、今後の原子力発電所や放射性廃棄物処分場の立地促進においても重要なことである。

上記のような背景を踏まえ、弱層を含むような複雑な基礎地盤の安定性評価において、安定性解析手法に関わる必要な地盤物性など諸条件について、合理的かつ標準的な方法を確立することは国民の安心を得る上で不可欠である。こうした背景から本論文は地盤の安定性評価に関わる調査・試験方法や重要な解析条件について明らかにし、合理的で体系的な安定性評価方法を確立したもので、本論文の主な内容は以下の通りである。

- 1) 国の耐震設計審査指針などに規定される原子力発電所の耐震基礎地盤の安定性評価に要求される事項について分析し、それに基づき実施した試験結果について提示した。
- 2) 基礎地盤の安定性評価に必要な物性について考察し、堆積軟岩地盤の特徴を分析して適切な調査・試験方法を提案すると共に、地盤をモデル化する際の適切な地盤物性の与え方や動的強度の採用などについて提案した。
- 3) 基礎地盤の安定性評価の方法に関わる各種条件（解析方法、解析領域の広さ、解析手法、境界条件など）の適切な設定方法を、ケーススタディー結果を踏まえて合理的な方法を提案した。
- 4) 弱層を含む地盤の安定性評価に関して、弱層の解析モデル化の方法、うねり(undulation) 効果を考慮した強度の推定方法、弱層が上部構造物に与える影響などについて検討し、標準的な評価手法を提案した。
- 5) 上記の各検討結果を総合して、弱層を挟在する複雑な堆積軟岩を基礎とする重要構造物の安定性評価の合理的な方法を確立した。

以上のように本論文は、弱層を挟在する堆積軟岩基礎地盤の地震時安定性を評価する際の、地盤の調査・試験方法、地盤モデルの作成方法、地盤物性の評価・設定方法、安定性解析手法に関わる諸々の解析条件について、パラメータスタディー等を行い、総合的に検討し、適切かつ合理的な方法を確立したもので、調査・試験方法、地盤の地震時挙動シミュレーションの技術を向上させている。これらの成果は、重要構造物の耐震性評価の信頼性向上のみならず、社会資本の整備の効率化に対して大きく貢献すると考えられ、地盤工学分野の発展に関し学術上および実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21年2月12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、合格と認められた。