

学位論文題名

繰返し載荷を受ける砂質地盤

- 構造物系の剛性変化の評価と変形解析法に関する研究

学位論文内容の要旨

大地震による津波や台風時に発生する波浪の来襲によって、沿岸域の生活環境に被害が発生している。津波や波浪による被害を防止するために、防波堤を代表とする様々な形態の沿岸構造物が設置されている。このような沿岸構造物には、長期間にわたって波力が作用しており、厳しい外力条件下にある構造物としてみなされている。しかし、それらの構造物としての使用限界や長期安定性に対する評価法は未だ確立されていないのが現状である。

近年、土木構造物の設計に関しても経済的効率性を追及する動きがある。その要求に応じるために性能設計の概念が導入され始めている。海洋構造物に関しては、性能を規定した設計を進める上で、波浪を受ける構造物を支持する地盤に生じる長期的な安定性の評価、精度の高い変形挙動の推定、構造物・地盤系全体としてのメンテナンス時期の提案を含めたライフサイクルコストを考慮した検討が必要とされる。それゆえ、現地の海洋構造物の変位量を観測することや、数値解析による変形予測を行うことが重要となる。特に、数値解析による検討を行う際には、近年提案されている波の不規則性を考慮した波力の推定法や越波・砕波の影響等を考慮した解析法を用いることで、波-構造物間の相互作用問題に関する評価が可能であり、構造物に作用する波力の推定は高精度に行われていると思われる。

一方、海洋構造物は波浪を繰返し受けて常に振動しているため、構造物を支持する地盤内には強度および変形特性の変化が生じることが予想される。この状況下では設計時に想定していた地盤の安定性が保持されないことが考えられる。

このような背景から、本論文では繰返し荷重によって振動する構造物とその支持地盤の力学特性変化を考慮した変形評価法に関する研究を進めた。すなわち、種々の繰返し荷重を受ける構造物の基礎地盤内に発生する側方流動型の変形挙動を簡易に評価可能な手法を提案することを目指している。一連の試験と数値解析を行うことで、繰返し載荷を受ける砂地盤の剛性変化に着目して研究を進めた。まず、地盤・構造物系の変形挙動に関する基礎的データを得るために繰返し荷重を構造物に作用させる模型試験を行った。ここでは、外力を受けて発生する構造物の沈下量と地盤内の側方変形の相関について検討している。その結果、構造物の沈下量の増加と地盤内の側方変位量との間に密接な相関性があること、地盤の側方変形の発生メカニズムは、構造物の沈下量から定義される地盤全体の剛性の変化挙動に基づいて説明することが可能であることが示されている。

次いで、構造物・地盤間の動的相互作用によって誘発される地盤内の変形特性の変化を詳細に調べることを目的として、一連の室内要素試験を実施している。波浪のような外力を受けた構造物か

ら地盤内に伝わる応力状態は地盤の各要素点で異なる。したがって、地盤の進行的変形挙動を合理的に評価するためには、そのような応力状態の違いが地盤の変形特性に及ぼす影響を要素レベルで調べるのが重要になる。ここでは、地盤内に分布する繰返し応力の大きさや、応力の初期せん断応力成分と繰返し振幅成分との比率が砂地盤のせん断剛性率の変化に及ぼす影響について考察している。これらの結果に基づいて、地盤内に進行的に発生する側方流動変形の簡易的評価法を提案し、その妥当性を論じている。

本研究は全6章で構成され、各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、関連する既往の研究をレビューし、本研究の位置付けを行った。特に波力の推定に関する研究、波と海底地盤との相互応答作用に関する研究、繰返し荷重を受けて振動する基礎地盤の力学特性評価に関する研究について紹介している。

第2章では、地盤・構造物系の支持力と変形の実態を明らかにするために行なわれた2次元平面ひずみ模型土槽試験および地盤内の微視的な変形挙動を調べるための室内要素試験について述べている。模型試験装置に関しては、模型土槽の緒元、均一な砂地盤の作製法及び模型構造物に作用させる外力の制御法について詳細に説明している。一方室内要素試験装置に関しては、試験装置の機構と、供試体に与える繰返し応力の制御方法および供試体のせん断剛性率の測定に用いた装置を述べている。

第3章では、繰返し荷重を受ける構造物を支持している基礎地盤内にどのような変形が生じるのかを調べている。まず、構造物の沈下に伴う地盤の側方流動型の変形の発生メカニズムを明らかにしている。さらに、構造物の沈下量を基に地盤全体の剛性を定義し、この剛性が繰返し回数の増加に伴い変化する様子を示している。

次に、波浪場に設置された構造物の運動を模擬した場合の地盤・構造物系の変形挙動を調べるための試験結果について検討している。この試験では、上記のような基本的な荷重条件での変形挙動とは異なる挙動が観測された。つまり、繰返し荷重によって構造物がロッキングするような挙動を示す際には、構造物下部の地盤内の側方変形がほぼ左右対称に発生すること、繰返し回数が増加しても地盤の側方変位は収束せずに発生し続ける等の事実が示されている。さらに、このような変形の特色を合理的に評価するためには、構造物下部地盤に伝達される応力状態に基づいた詳細な地盤の変形特性の検討が必須となることが明らかにされている。

第4章では、砂地盤の剛性の変化挙動に及ぼす応力状態の違いの影響を詳細に調べている。まず、波浪を受ける構造物を支持する地盤内の応力状態を弾性理論により推定し、要素試験での荷重条件を決定している。具体的には、行われた試験では排水および非排水状態での繰返し荷重によるせん断剛性率の変化を調べている。一連の試験は、構造物の振動によって生じる地盤のダイレイタンス挙動を考慮した砂のせん断剛性率の変化挙動を定量的に明らかにしている。

第5章では、繰返し荷重によって進行的に生じる地盤の沈下・側方流動を評価するための数値解析手法を検討している。ここでは、繰返し荷重を受ける構造物・地盤系の変形挙動を有限要素法によって評価するための方法を提案している。提案法は、地盤の弾性係数が外力の繰返し回数の増加に伴って増減する挙動を考慮したものである。この解析法による推定結果は、第3章で示された模型試験での地盤内の側方流動変形挙動をうまく説明することができることを示している。このことから、本章で示している解析法を用いることで、波浪を繰返し受けて振動する構造物とその基礎地盤の変形を簡易に評価可能であるとしている。

第6章は結論である。併せて、各章で得られた知見を総括し今後の展望と課題を述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 三 浦 清 一

副 査 教 授 三 田 地 利 之

副 査 教 授 藤 井 義 明

学 位 論 文 題 名

繰返し載荷を受ける砂質地盤

-構造物系の剛性変化の評価と変形解析法に関する研究

津波や波浪による被害を防止するために、防波堤を代表とする様々な形態の沿岸構造物が設置されている。このような構造物は、供用直後からほぼ連続的に波力等が作用する厳しい条件に置かれている重要な土木施設であるが、近年は高いレベルの自然外力による強振動や高波によって壊滅的な被害が世界各地でもたらされている。それ故、これらの海洋構造物の長期安定性や供用限界に関する評価法を早急に確立することが極めて重要である。さらに、最近進展を見せている性能規定に基づく設計法を援用するためには、構造物のみならず支持地盤の変形挙動や耐震性を適切に考慮し、地盤・構造物系としての安定力学を構築する必要がある。

このような背景から、本研究では、海岸工学の情報を取り入れた地盤力学的視点を基本とする理論解析に基づいて開発された模型実験装置および種々の数値解析により、海洋波浪場で遭遇する応力条件下にある構造物・砂質地盤系の一般的な力学法則を見出すことを目指した。まず種々の繰返し荷重を受けて振動する構造物および砂地盤内で発生する変形を評価するために、一連の室内模型試験を実施している。この実験より、構造物・砂地盤系の進行性変形のメカニズムを地盤の剛性変化に基づいて解釈できることを明らかにしている。次いで、海洋構造物の下部地盤内に生じると予想される応力状態を模擬した室内要素試験を実施し、繰返し載荷に伴う変形特性の変化の特徴を把握している。さらに、砂地盤の側方変形を合理的に計算する数値解析の手法を提案し、その方法が一連の試験結果を説明できるとしている。

第1章では、関連する既往の研究をレビューし、本研究の位置付けを行っている。第2章では、海底地盤・構造物系の支持力と沈下・変形メカニズムの実態を明らかにするために実施した模型試験および室内要素試験の具体的な方法が詳細に述べられている。第3章では、種々の繰返し載荷を受ける砂地盤の剛性変化および地盤内に発生する側方流動型の変形のメカニズムが一連の模型試験結果に基づいて説明されている。第4章では、波浪を受ける構造物の下部地盤内における応力状態を再現した要素試験結果を論述している。ここでは特に、繰返し載荷によりもたらされる構造物のロッキングが砂地盤のせん断剛性率に及ぼす影響を定量的に示すとともに、側方流動変形との関係を詳細に調べている。第5章では、砂地盤の繰返し載荷によるせん断剛性率の変化挙動を組み込んだ数値解析手法を提案している。提案法による解析は一連の平面ひずみ室内模型試験で得た種々の繰返し載荷条件下における構造物の沈下や支持地盤の側方流動変形挙動を合理的かつ簡易に評価可能

であることが示されている。第6章では得られた知見を総括し、今後の展望と課題を述べている。
本研究の成果を要約すると以下のようである。

- (1) 波浪力のような繰返し载荷によって構造物の振動が誘発されると、構造物下部の地盤内の側方変形域はほぼ対称に拡大していく、また繰返し回数が増加しても地盤の側方変位量は収束することなく増加し続ける、等の事実が示されている。さらに、このような進行性破壊を導く変形は繰返し载荷に伴う下部地盤の剛性変化と密接な係りがあることを定量的に説明している。
- (2) 弾性理論を用いて推定した、波浪場における海洋構造物を支持する砂地盤内の繰返し応力状態を模擬した室内要素試験法が提示されている。これらの一連の試験結果より、構造物からの応力伝播による砂地盤のせん断剛性率の変化挙動を繰返し三軸試験のような要素試験からも推定可能であることを明らかにするとともに、支持地盤の剛性変化の把握が海洋構造物の安定性評価において必須であることを指摘している。
- (3) 支持地盤のせん断剛性率の変化を再現するアルゴリズムが提案されている。この手法を用いた種々の数値解析によって、波浪力のような繰返し载荷を受ける海洋構造物と地盤の変形および安定性能を推定できることが明らかにされている。

これを要するに、著者は、これまで未解明であった波浪力を受ける際に生じる砂地盤のダイレイタンシーを伴う変形とせん断剛性率の変化挙動の対応関係を見出すとともに、海洋構造物のような永久的な繰返し荷重を受ける構造物の安定性を支持地盤の力学的性質を考慮した上で評価する手法の構築について貴重な知見を得ており、地盤工学ならびに海岸工学の発展に貢献するところが大きい。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。