

| | |
|-------------|--|
| 氏 名 | 境 友 昭 |
| 授 与 学 位 | 工 学 博 士 |
| 学位授与年月日 | 平成 2 年 3 月 14 日 |
| 学位授与の根拠法規 | 学位規則第 5 条第 2 項 |
| 最 終 学 歴 | 昭 和 45 年 3 月 有明工業高等専門学校機械工学科中退 |
| 学 位 論 文 題 目 | 波動方程式の杭打ち問題への応用に関する研究 |
| 論 文 審 査 委 員 | 東北大学教授 杉村 義広 東北大学教授 長友 宗重 東北大学教授 柳澤 栄司 東北大学教授 城戸 健一 |

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

1 研究の対象と目的

本研究は、動的な杭の支持力の測定方法を対象とする。特に、一次元波動方程式を基礎とした運動方程式によって杭打ち現象が解析できることを前提に、波動理論の杭打ち問題への応用について研究する。

今日、杭の支持力試験は静的な載荷試験によって行われているが、費用と時間を要し、現場で施工されるすべての杭を対象とした試験が行われることはほとんどない。これに対し、動的な支持力の測定方法は、短時間でしかも安価で実施できることから、現場のすべての杭を対象とした、いわゆる全数検査も可能である。このデータを用いることによって、杭基礎の信頼性を統計的に推定できるだけでなく、支持力不足の杭があるような場合には、これを特定することも可能であり、杭基礎の信頼性向上に資するところは大きいものと思われる。本研究は、このために、打撃された杭の運動方程式の解法および杭の支持力の動的測定方法の開発を目的とする。

2 研究の背景

杭の支持力の動的測定方法として、杭の動的支持力算定式（以下「支持力式」という。）による方法と波動理論に基づいた動的支持力測定方法がある。支持力式は、杭の一打撃当りの貫入量や杭のリバウンド量から杭の支持力を推定する方法である。今日、用いられている支持力式のほとんどは、質点系での衝突理論に基づいた方法であり、波動理論に基づいたものは少ない。波動理論が杭の動的挙動をよく説明するとしたら、波動理論に基づいた支持力式を導出することによって、支持

方式の簡便さと波動理論による理論的根拠を具備した杭の打止め管理方法が確立されるものと考えられる。

杭の支持力の動的測定方法には、杭頭での応力と粒子速度から、杭の貫入抵抗（杭の支持力）を推定する方法（CASE法）がある。この方法は、波動理論に基づいた方法とされているが、式の導出過程では杭を質点として取り扱うなど、原理的な疑問点がある。また、波動方程式の数値解法を基礎とする解析方法にCAPWAP法があるが、この基礎となる波動方程式の数値解法（Smithの波動方程式）には、様々な問題点が指摘されている。

3 研究の概要

本研究では、まず杭打ち現象を記述する運動方程式を求め、ついで運動方程式の差分法による数値計算方法を提案する。これは、本研究が対象とする杭の支持力の動的測定方法を、理論的に検討するための手段（杭打ちシミュレーション）として用いる。

杭の動的支持力の測定方法として、波動理論に基づいた支持力式及び動的支持力測定方法を新たに提案する。前者は、杭の打止め管理式として用いられてきた質点系の式に代わるもの、後者はCASE法に代わるものである。また、これらの方法については適用範囲、適用方法についても理論的な検討を行う。

第2章 一次元波動方程式

第2章では、波動理論の基礎的な事項について、これまでの知見を整理する。また、波動方程式の理論解を示すとともに、波動理論を杭打ち問題へ応用する上で必要な進行波と後退波の分離計測方法について検討する。本章では、杭の任意の点での波動を、力と粒子速度によって構成される直交空間上の点として表現し、幾何学的解析によって、進行波と後退波を分離する方法について論じる。

実際の杭打ちではクッションを介しての打撃となる場合が多いが、本章では、クッションを理想的なバネとみなした場合の杭の応力と運動について解く。この解を用いて、杭頭の最大打撃力がハンマの質量の関数となること、クッションが軟らかい場合はハンマのエネルギーのすべてが杭に伝達されるわけではないことを示す。

第3章 差分法による波動方程式の解法

第3章では、一次元波動方程式を両側差分を用いた有限差分法によって解く方法について示す。境界での波動方程式の導出では、波動方程式と境界条件の差分式を連立方程式として解く方法を提案している。これまで用いられてきたSmithの波動方程式の解法では、境界での波動方程式の取り扱い方、時間差分と距離差分の関係の設定などに問題があり、正確な波動を求めることは著しく困難であった。本章では、それらの問題点を理論的に明らかにし、その解決方法を示す、すなわち、杭打ち現象を数値計算によってシミュレートするために必要な漸化式及び初期条件を示し、計算例及び簡単な計算プログラムを提示する。また、数値計算の結果と理論解の結果を比較し、本論文で示す方法が、理論解と同等な応力波形の計算値を与えることを検証している。

本章で取り扱っている境界条件は、インピーダンス不連続面、任意駆動力が作用する杭頭、弾塑性的挙動を示す杭先端であり、波動方程式は杭周面に弾塑性的摩擦抵抗が作用する場合についても解いている。

第4章 杭の動的支持力式の理論的解析

杭の支持力の簡便な測定方法に、支持力式 (Pile Driving Formula) があるが、本章では、これまでの質点系の衝突理論ではなく、波動理論に基づいた支持力式を導出する。導出条件として、ハンマ2種 (剛ハンマ、杭と機械インピーダンスが等しい弾性ハンマ)、杭先端の地盤特性2種 (剛塑性、弾塑性) を用い、また杭周面に剛塑性的特性を持つ摩擦抵抗が作用する場合についても解いている。

支持力式を理論的に解析した結果、これまでの支持力式は、剛ハンマによる打撃を前提としてはいるものの、波動理論に基づいた解析によって得られた支持力式のうち、弾性ハンマによる打撃の場合と類似する式の形式を持つことが明らかになった。また、杭周面に摩擦抵抗が作用する場合、支持力式の値は、杭の全支持力 (周面支持力と杭先端支持力の和) となることを明らかにした。

また、本章では、杭の動的支持力式の適用性を理論的及び実際のデータを用いて検証している。理論的検討の結果、波動理論に基づいて導出した式は、打撃条件が同じであれば、ほぼ理論どおりの支持力を示すことが明らかになった。すなわち、剛ハンマによる直接打撃を前提として導出した支持力式は、同じ条件での杭打ちシミュレーションの結果とほぼ一致した杭の支持力を与えるが、別の条件での杭打ちシミュレーションの結果とは一致しない場合がある。また、これまで用いられてきた支持力式の波動理論に対する適用性は余り良くないことが分かった。実際のデータを用いた検討では、適用性の評価基準を、①静的載荷試験データと良い相関を示すこと、②静的載荷試験データと近い値を示すこと、の2点におき、前者の分析方法として、主成分分析法、後者の分析方法として、計量的多次元尺度構成法を用いた。いずれの分析でも、波動理論に基づいて導出した支持力式、なかでも弾性ハンマによる打撃の式の適用性が高いことが分かった。また、これまで用いられてきた支持力式の中では、Weisbachの式の適用性が高いことが明らかにされた。

第5章 杭の支持力の動的測定方法

杭頭での応力と粒子速度を測定し、これを用いて杭の動的支持力を求める方法について論じる。波動理論に基づいた杭の支持力の動的測定方法には、CASE法とCAPWAP解析法がある。今日では、主にCAPWAP解析法が用いられているが、変数の選択に関する自由度が多く、得られた支持力値の一意性には疑問がある。また、CAPWAP解析法が用いているSmith型の波動方程式の解法には問題がある。

本章では、波動理論に基づいて新たな杭の支持力の測定方法 (NCASE法) を提案し、この方法の適用性について理論的、及び実際の検討を行う。杭の周面に抵抗が作用する場合、動的支持力試験のための杭の打撃力は、杭の支持力より大きく、かつ、その継続時間は、波動が杭中を往復する時間よりも長くなければならないことを理論的に検証している。また、NCASE法によって、杭の

支持力を杭先端と杭周面に分けて推定する方法について述べている。さらに、いくつかの適用例を示し、NCASE法の適用性と適用上の問題点を实际的に検討している。

また、本章では、杭の支持力を動的に測定する場合の測定方法（2点での応力計測値から杭の粒子速度を求める方法及び2点ゲージ法）に関する誤差についても論議している。

第6章 結 論

第6章では、論文全体の結論を述べている。この論文は、波動方程式の杭打ち問題への応用について理論的に検討した結果をまとめ、波動理論に基づいた杭打ち運動方程式の差分法による数値計算方法、杭の動的支持力式及び杭の動的支持力の測定方法について、新たな提案を行うとともに、その妥当性を理論的、实际的に検証したものである。

審 査 結 果 の 要 旨

杭打ち時における杭の動的挙動を解明するために、最近、波動理論の応用が注目され、杭の打込み特性の推定や支持力の測定方法などの研究が活発化している。しかし、理論的解析や数値計算方法についての厳密な研究は十分になされていないのが現状である。本論文は、杭の支持力の動的測定方法を確立することを目的として、波動理論の杭への応用について論じたもので、全編6章よりなる。第1章は序論であり、本研究の目的と背景を述べている。

第2章は、一次元波動方程式の基本的な性質を吟味し、理論解による杭の打撃時の挙動について論じている。すなわち、杭頭や杭先端の境界条件の差異、剛ハンマと弾性ハンマの差異、クッションの硬軟、杭の周面抵抗の有無、材質や断面積が異なる境界を持つ杭の場合など、種々の条件に対して杭の応力・変位などに関する理論解を導出している。

第3章は、波動方程式を差分法により解く場合の数値解析法について論じている。本研究での解法では両側差分を用い、方程式と境界条件を差分化して連立させ、境界で成立する式を求めるという新しい方法を用いている。対象としたケースは、第2章と同様に杭打ち現象を解析する上で必要となるほとんどの場合であり、それぞれについて漸化式を求め、計算のアルゴリズムを示すとともに、計算結果が理論解とよく一致することも示している。これにより、杭打ち時の杭の挙動に関する極めて有用な数値計算方法が提供されたことになる。

第4章は、波動理論に基づく杭の動的支持力式について論じている。従来の杭の動的支持力式は、ハンマと杭を質点とみなした衝突理論から導出されていたが、本研究では、杭の貫入量や杭頭変位量を波動理論によって求め、これから杭の動的支持力式を導出している。とくに、従来の解析では考察されていなかった杭周面の摩擦力について論じ、杭の動的支持力として推定される全支持力は周面摩擦支持力と先端支持力の和からなることを明らかにしている。また、実際の杭の打込み記録を用いて、従来の杭の動的支持力式とともに静的載荷試験と比較を行った結果、本研究による提案支持力式、なかでも弾性ハンマによる打撃の式が最も適用性に優れていることを検証している。

第5章は、波動理論に基づく杭支持力の動的測定方法について論じ、従来のCASE法などに含まれる問題点を改良した新しい測定方法をNCASE法と命名して提案している。また、実際の測定例への応用を通じて、この方法の適用性と適用上の問題点を検討している。

第6章は、結論である。

以上要するに本論文は、杭の打込み特性について、波動理論に基づき厳密に解析するとともに、数値計算方法、杭の支持力推定式および測定方法を提案し、その応用を論じたもので、土質基礎工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。