

学 位 論 文 題 名

地山応力測定に用いる応力解放法の高精度化に
関する基礎的研究

学位論文内容の要旨

大規模なエネルギーインフラストラクチャーや都市部の交通システムを構築するため、地下空間の活用が必要不可欠となっている。地下構造物の建設には、その合理的な設計と施工技術が必要であるが、そのためには立地点付近の詳細な地質や物性・応力状況を把握することが合理的な設計・施工の実施の前提となる。

地山応力を測定する方法として、今までに種々の方法が開発され実践されている。しかし、大プロジェクト以外は測定実績は多くはなく、十分普及しているとはいえない現状である。その理由としては、開発された応力測定法の多くが高価であること、適用できる地質が限られていること、また測定精度がやや信頼度に欠ける点などがあげられる。

本研究は、応力測定法のうち、現在最も多く採用されている応力解放法の中の埋設型測定法をとりあげ、その測定精度を高度化することにより信頼性を高め、かつより経済的な方法とすることを目的としている。この目的の達成のために、まず埋設型計測装置の様々な設置状況において残されていた問題点に対する厳密な適用理論を等方性岩盤ばかりでなく異方性岩盤や粘弾性岩盤にまで拡張して構築している。また測定の低廉化を図るため小型の測定装置を試作するとともにその性能実証のための室内実験を実施している。さらに、高価なオーバーコアリング作業を必要としない地山応力測定法としてダブルボアホール法に着目し、その基礎理論および実用化に必要な応力算定手法を確立している。

各章毎に取り上げる内容と構成を以下に示す。

第1章では、現在の日本における地下空間開発の位置づけを明確にし、地下構造物を構築する中で地山応力測定の重要性および応力測定が今まで普及しなかった理由について論述している。次に、現在までの地山応力測定に関する研究成果を測定法毎に概括し、各測定法の持つ特徴と問題点について言及している。また、応力解放法に焦点を絞り、実際のユーザー側から要求されている項目についてまとめるとともに、現時点における課題を抽出している。

第2章では、まず、円柱状埋設型計測装置によって地山応力を測定する際に、従来必ずしも明確にされていなかった測定値に及ぼすいくつかの問題点に対し、等方性弾性体の仮定のもとに総合的に厳密で定量的な取扱いが可能であることを理論的に提示している。

具体的には三つの問題設定、すなわち、

- [A] 地山と計測装置間の接着層厚および弾性特性の影響
- [B] 地山と計測装置間にはく離やすべりが発生する場合の影響

〔C〕 オーバーコアリング径が応力測定値に及ぼす影響

を行い、全ての場合について理論解析過程を示すとともに、多くの計算事例をとおして原位位置測定に利用できるように系統的に結果を整理している。

また、円柱状埋設型計測装置を円筒状埋設型計測装置に替え、三次元地山応力測定について現在までに多くの研究者らによって検討されてきた問題点に対し、完全な理論解を提示している。すなわち、Worotnicki and Walton, Pender, Amadeiらの検討した形状を用いて、応力解放法によるオーバーコアリング径の影響をWorotnicki and Waltonの提唱したK-factorという係数を導入して解析し、オーバーコアリング径、地山の弾性係数およびポアソン比が与えられれば、本論文で得られた解析過程を通じて高精度の地山応力が求められることを示している。さらに、三次元地山応力を面内・面外荷重に区分し、円筒・円柱状双方の埋設型計測装置を用て異方性弾性体地山を対象とする理論式と代表的な数値計算例を示している。

次に、上記の検討を踏まえ、高精度で経済的な応力解放法を確立するため、小型の埋設型計測装置を試作するとともに、その性能に関する室内実験を実施した。室内実験としては、まず、直径20mm、長さ100mmの円柱状埋設型計測装置「SIセル」をエポキシ樹脂で試作し、3種類（エポキシ樹脂、アルミニウム、モルタル）の立方体（一部は円柱体）の供試体の中央に埋設し、側面から圧縮試験機で載荷し、SIセルの載荷によるひずみの変化に対応する測定性能について検証した。また、側面を拘束載荷したモルタルの供試体（縦90cm、横90cm、高さ30cm）の中央にSIセルを埋設し、オーバーコアリングを行ってSIセル周辺の応力解放時のひずみ測定を実施し、原位置のオーバーコアリングと同様な測定が可能であることを実証するとともに、実測定における問題点を明らかにしている。

第3章では、埋設型計測装置を用いて軟岩盤の地山応力を測定する場合、より精度の高い測定値を得るため、対応原理を利用して地山を線形粘弾性体と仮定した地山応力測定の解析理論の提示を行っている。すなわち、まず、ボアホール内に埋設される弾性体の円柱状計測装置が同心円状に掘削され応力解放されたコアを用いて、時間経過に伴う応力、変位の変動量から三次元地山応力を測定するための理論的側面について、粘弾性モデル（Burgers Modelおよび Standard Modelの2種類）を採用して検討している。次に、いくつかの仮定の下ではあるが、ボアホール径に比較して十分遠方から作用する面内荷重および面外荷重を測定するための解析理論の基本式ならびにそれらを用いたいくつかの数値計算例を提示している。ここで示した理論は、とりあえず面内荷重と面外荷重を分離して解析するものとなっているが、これによりいわゆる三次元地山を線形粘弾性体と仮定する場合の地山応力測定実施のための理論を基本的な意味で完成させている。

また、上述のようにボアホール径に比較して十分遠方から作用する三次元地山応力を解析上分離可能な面内および面外荷重問題に区分し、その中の面外荷重問題に限定し、その範囲でより一般的にオーバーコアリング径の大きさや測定装置と岩石コアの接合境界でのすべりなどを考慮した解析理論ならびにいくつかの数値計算例を提示している。さらに、Rampタイプの作用荷重を導入することによって、接着硬化時間を考慮した場合の解析の基本式も示している。

第4章では、近接するダブルボアホールの応力干渉を利用した地山応力の測定理論を確立することを目的として、複素関数論を用いてダブルボアホールの感度係数に関する高精度の弾性解を提示している。この解は、三次元地山応力下での等方性および異方性弾性地山の場合にも適用できるように拡張して示している。この手法では、一般的な三次元地山

応力の 6 成分のうち、ボアホール軸に直交した面内の 3 成分および面外の 2 成分を 1 回の測定で決定することが可能となっている。

第 5 章では、本論文の各章で得られた主な結論を要約してまとめている。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	土 岐 祥 介
副 査	教 授	三 田 地 利 之
副 査	教 授	三 上 隆
副 査	教 授	石 島 洋 二

学 位 論 文 題 名

地山応力測定に用いる応力解放法の高精度化に 関する基礎的研究

地下構造物の建設では、立地点付近の詳細な地質や物性と地山応力状態を把握することが合理的な設計・施工の前提となる。地山応力を測定するために、従来、種々の方法が開発されているが、適用できる地質が限られていたり、多額の経費を要するために、広く普及するには至っていない。応力解放法は使用実績の高い方法であるが、本研究は、この方法の中の埋設型測定法をとりあげ、測定精度の向上と低廉化および測定の適用条件の拡大を目的としたもので、その成果は以下の4点に要約できる。

第一の成果は、埋設型測定法の観測方程式の基礎を与える円柱状および円筒状の介在物を持つ、等方・等質な弾性体についての三次元解の導出に成功していることである。特に、円筒状の介在物に関する完全な形の解は、著者によって初めて導かれたものである。この解析結果を応用して、オーバーコアリング径が測定値に及ぼす影響を明らかにし、その上で、地山の所与の弾性係数とポアソン比に対してオーバーコアリング径と測定値から三次元地山応力を高い精度で求めるための具体的な手段を提示している。また、観測孔壁とセンサ間の接着層厚や部分的な剥離について解析し、多くの計算事例を系統的に整理することにより、これらの影響に関して具体的な評価を与えている。さらに、円柱状および円筒状の介在物を持つ直交異方性弾性体についての三次元解を面内・面外荷重に区分して導出し、異方性が測定結果に及ぼす影響を評価している。

第二の成果は、計測装置の小型化に関するものである。上記の成果を踏まえ小型のエポキシ樹脂製の埋設型センサ（直径20mm, 長さ100mm）を試作するとともに、その性能に関する室内実験を実施している。室内実験では、まず、3種類の材料を用いて小型センサを試作し、応力に対する感度について検証している。次に、側面を拘束載荷したモルタル供試体に対し、原位置と同様なオーバーコアリングを実施し、試作したセンサの実用性を実証するとともに、原位置測定に適用する場合の問題点を明らかにしている。

第三の成果は、軟岩での測定を想定し、適用範囲を線形粘弾性岩盤に対して拡大していることである。まず、線形粘弾性地山に対する三次元解を対応原理を利用して導出している。次に、解析結果を基に、地山岩盤に対して2種類の粘弾性モデルを仮定し、円柱状の弾性的なセンサを用いた場合に測定作業に伴う時間経過が測定結果に与える影響を綿密に検討している。さらに、面外荷重に限定してはいるが、オーバーコアリング径の大きさ、

センサと観測孔壁間での部分的なすべり、センサ挿入以後の接着剤の硬化時間の影響などに関して、解析の基本解を示すとともに定量的な評価を行っている。

第四の成果は、観測孔に近接して別の孔を掘削したときの応力擾乱を利用した応力測定法であるダブルボアホール法に関するものである。まず、本方法の理論となる近接2孔の感度係数に関する弾性解を複素関数論に立脚して導出するのに成功している。このとき、弾性岩盤として、最初は等方性を、次いで異方性を仮定し、適用岩盤の範囲の拡張に努めている。解析過程で、本方法を用いると1回の測定で三次元地山応力の6成分のうち孔軸に垂直な面内の3成分および面外の2成分が決定できることを見いだしたことは特筆に値する。次に、本方法の原位置での使用を念頭において、数値計算を行い、2孔の孔径比や離隔距離に関する最適の幾何学的条件を検討している。

これを要するに、著者は、円柱形および円筒形の埋設型センサを対象に応力解放法およびダブルボアホール法に対する観測方程式の基礎となる三次元解を導くとともに、これを地山応力の計測に応用するための室内試験を行い、多くの有益な知見を得ており、地盤工学の発展に貢献すること大である。

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あるものと認める。