

論文の内容の要旨

氏名：大 村 啓 介

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：地下ダム止水壁構築時における基盤層深度の推定手法に関する研究

地下ダムとは、地中の帯水層中に止水壁を構築し地下水や伏流水の流出を堰き止め、地盤の間隙に水を貯留させる施設である。主に水資源の確保が困難な地域において地下水を農業用水や飲用水として利活用する目的で設置される。日本国内においては、鹿児島（奄美諸島）、長崎、福井、岩手、沖縄などに施工例があり、特に沖縄県内の離島に施工中のダムも含め多くの事例がある。本研究のデータ収集の舞台とした沖縄県宮古島は、島全体が平坦な台地であり大きな河川や池もない。島の地質は、地表面から大野越粘土層、透水性の良い琉球石灰岩、不透水層である島尻層群泥岩からなっており、地表面に降った雨水は、透水性の良い琉球石灰岩の間隙を通過し、ほとんどは海へ流出していた。そのため、比較的多くの降水量があるにもかかわらず農業などに用いる水資源が不足していた。そこで宮古島では、農業用水確保を目的とした実験用ダムとして、1977年に皆福地下ダムの施工が開始された。宮古島での地下ダムの止水壁構築方法には、地中連続壁工法と地盤改良工法が用いられているが、ダム延長のうち大部分を占める不透水層深度が深い区間には地中連続壁工法が採用されている。地中連続壁工法による止水壁施工時において、地下ダムの貯留性能を確保するためには、帯水層に止水壁を隙間なく構築すること（止水壁の連続性確保）と、基盤層に確実に根入れを行うことにより、止水壁の遮水性能を確保することが重要である。止水壁の連続性確保の方策としては、掘削の鉛直精度を保ち、孔曲がりを抑えるためにさまざまな努力がなされてきた。一方、基盤層への根入れ長を確保するためには、基盤層上面深度の把握が重要である。基盤層上面深度は、設計時のボーリング調査もとづいて決めているが、ダム軸すべてにおいて正確に把握することは困難である。そこで、止水壁施工時に取得するデータから基盤層上面深度を推定する方法について、さまざまな既往の研究が行われているが、未だ実用化された事例は見あたらない。よって、本研究では、SMW工法による止水壁構築時に、施工中に得られるデータ（地盤改良機より得られるオーガー「吊荷重」と減速機の「負荷電流」のデータ、削孔液の「注入圧力」）より、リアルタイムで定量的かつ客観的に基盤層深度を推定する手法についての検討を実施した。

本論文は全6章から構成されており、各章の要旨を以下に述べる。

第1章は序論であり、研究の背景および目的、地下ダムの止水壁構築時に品質を確保するための課題および現状での標準的な対応策について明らかにした。現状では、施工時に単軸オーガーによる先行削孔完了後にオーガーを引き抜き、オーガー刃先に付着した島尻層群泥岩の土塊を目視確認することで、基盤層に到達したことの確認を行っている。しかしながらこの手法では、目視による確実性はあるが、施工中に基盤層へ到達したか否かを判断することはできず、到達していなかった場合は再施工となるため施工時間のロスとなる。また、基盤層上端の深度を把握できないため、根入れ長の管理が行えないという課題がある。

第2章では、地下ダム止水壁構築時に基盤層深度を把握する手法についての既往研究を整理し、研究課題を明確にした。SMW施工時に掘削音や振動に着目して、地層の変化を判断する手法についての研究や電流値、吊荷重から算出する独自の解析値を用いて判断する手法についての研究があるが、検証に用いたデータ数が少なく、判定精度の検証が不足している。また、リアルタイムでの判定についても、系統的に完成していない。そこで本研究の目的を、SMW工法による止水壁構築時に施工中に得られるデータより、定量的・客観的にリアルタイムで基盤層深度を推定する手法について検討し、調査ボーリングでの基盤層深度との比較検証を実施することとした。

第3章では、地下ダム止水壁を構築する実施工時に地盤改良機からデータを収集し、解析することにより基盤層深度を推定する手法についての検討を実施した。

仲原地下ダム（モリガホ中央部）工事で行った事前検討では、地盤改良機から深度ごとの「吊荷重」、「負荷電流」を収集し解析したところ、基盤層の上面深度で「吊荷重」と「負荷電流」の関係が変化する傾向を把握した。

次の仲原地下ダム（箕谷西部）工事では、「吊荷重」、「負荷電流」に加えて削孔液の「注入圧力」のデータを収集し、「注入圧力」が基盤層の上面深度付近で急激に上昇することを確認した。

そして、試験杭のボーリングデータと照らし合わせてキャリブレーションを行うことで、リアルタイムで定量的かつ客観的に基盤層深度を推定するシステムを構築し、実工事での適用を行った。システムによる基盤層推定深度とボーリングで確認された基盤層深度を比較し本手法の精度検証を行った結果、吊荷重と負荷電流の関係性から推定した基盤層深度および注入圧力の変化から推定した基盤層深度は、ボーリングで確認していた基盤層深度と相関が認められ、本手法が有効性であることを確認した。

第4章は、実施工での検討では、基盤層深度を正確に把握できている箇所がボーリング調査実施箇所のみであったため、有効性に疑問が残った。そこでSMW工法の先行削孔を模擬した小型オーガー掘削機により、施工状況を定性的に模擬した試験を実施することで、本手法の再現性の確認と精度検証を行った。

その結果、実施工で確認された傾向と同様に、荷重と負荷電流の関係が変化する現象が確認でき、荷重と負荷電流の関係性から推定した基盤層深度は、作製土槽の基盤層深度と非常に強い相関があることを確認した。また同様に、削孔液の注入圧力が上昇する傾向を確認し、注入圧力の変化から推定した基盤層深度は、作製土槽の基盤層深度と非常に強い相関があることを確認した。

以上のことから、本研究で提案している先行削孔中に取得できるデータであるオーガー「吊荷重」、減速機の「負荷電流」、削孔液の「注入圧」からリアルタイムで定量的かつ客観的に基盤層深度を推定する本手法の有効性を確認した。

第5章では、近年さまざまな分野で実用化が進んでいる機械学習による基盤層深度の検出を試みた。「削孔速度」、オーガー「吊荷重」、減速機の「負荷電流」、削孔液の「注入圧」を複合的に判断可能であり、将来的にデータを蓄積することにより判定精度の向上が期待できることから、機械学習を用いた基盤層深度の検出を試み、その適用可能性について検討した。ロジスティック回帰分析のアルゴリズムを用いた機械学習の解析モデルを構築し、第3章および第4章で収集したデータに対し基盤層の判定を行った。

その結果として、機械学習を用いて判定した基盤層深度は、模型試験での作製土槽の基盤層深度や実施工でのボーリングによる基盤層深度と強い相関が確認できた。

以上のことから、機械学習により基盤層深度を判定でき、基盤層深度推定システムに機械学習を取り入れることの可能性を確認した。同時に解析モデルの検討やパラメーターの設定に関する課題についてまとめた。

第6章は、各章から得られた成果と、推定精度や信頼性の向上に関する課題や、機械学習をシステムに取り入れるための課題についてまとめ、これらを本研究の結論とした。

以上の結果から、地下ダム止水壁構築時に地盤改良機から収集したデータ（オーガー「吊荷重」、減速機の「負荷電流」、削孔液の「注入圧」）を解析し、リアルタイムで定量的・客観的に基盤層深度を推定する本手法の有効性が示された。本手法を活用して施工サイクルに取り込むことにより、基盤層深度を連続的に把握することが可能となり、確実な根入れ長を確保することができ、止水壁の遮水性向上に寄与すると考える。