

氏 名	上 田 保 司
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	論 工 博 第 3965 号
学位授与の日付	平 成 19 年 7 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	土の凍結膨張による地盤変形および発生応力の予測と対策に関する研究

論文調査委員	(主 査) 教 授 田 村 武 教 授 岡 二三生 教 授 木 村 亮
--------	--

論 文 内 容 の 要 旨

凍結工法は、地盤内に埋設した凍結管に冷媒を流して人工的に凍土壁を造成し、その優れた遮水性や高強度あるいは改良土の均質性などの長所を利用しながら地中工事を安全に行うための補助工法である。我が国でも、シールド機械の発進および到達や既設地中構造物間の接続など、主に都市部を中心として幅広く採用され、大深度地下工事への適用など、今後の応用展開も期待されている。本論文は、凍結工法の効果をさらに高めることを目指して、凍結によって生じる地盤変形量や圧力増加量の予測手法の精度を向上させるために、新たな凍結膨張モデルを作成するとともに、それを用いて、より合理的な凍結膨張対策方法を提案したものであり、計6章からなる。

第1章は序論であり、論文全体の構成を示している。凍結工法の特長と土木工事における役割を述べ、その設計施工に関わる主な技術を概説するとともに、克服すべき残された課題として土の凍結膨張現象があることを示した。また、凍結工法では地盤内の有限な領域を凍結させることから、本研究の目的として、凍結膨張変位の発現方向特性を解明し、その結果に基づいて凍結工法における凍結膨張予測法および対策法を改善することを説明した。

第2章では、土の凍結膨張現象を説明するとともに、国内外における既往の研究結果を踏まえて、凍結膨張量の大きさを支配する影響因子を整理した。特に、土の内的性質によるものと地盤凍結時の外的条件によるものとに分類し、それぞれについて既往の研究成果を述べるとともに、凍結膨張量を定量的に予測する上での課題を摘出した。また、凍結工法における現状の凍結膨張予測法および対策法を説明し、これらについてはまだ多く改善の余地があることを指摘した。

第3章では、飽和粘土について熱流方向およびその直角方向への拘束応力をそれぞれ任意に与えることのできる三軸凍上実験を行い、凍結膨張変位は、既往の研究で主に扱われてきた熱流方向だけではなく、その直角方向にも生じることを明らかにした。凍結膨張変位の発現方向特性に及ぼす影響因子として、拘束応力、凍結速度、土の硬軟、間隙水の塩分濃度を取り上げ、これらの因子が熱流および直角方向の凍結線膨張率に及ぼす影響を明らかにした。

また、凍結線膨張変位の発現方向特性を定量的に扱う国内外を通じて初めての実験式として、熱流および直角方向の凍結線膨張率を応力の関数で表す三軸凍上実験式を導いた。直角方向の凍結膨張変位を拘束する既往の凍上実験結果についても、三軸凍上実験式で説明できることを証明した。さらに、この実験式では応力を一定としているが、現地盤では凍結中、凍結面への水分移動に伴う間隙水圧の低下、凍結膨張による凍土周辺地盤の圧縮に伴う凍結膨張圧の発生による有効応力の増加が生じる。有効応力の増加に伴って、凍土周辺地盤の圧密も生じる。そこで、これらの現象を取り込んで三軸凍上実験式を改善することによって、現地盤の変形予測への応用を可能とした。現地盤における冷却面形状を想定して、平板冷却面および円筒状冷却面に対応する実験式への拡張も行った。

第4章では、前章の成果を応用して、凍結工法における凍結膨張予測法および対策法の改善提案を行った。まず、上述した土の凍結線膨張率を3次元弾性FEMに取り込んだ地盤変形予測法を提案し、凍結2現場における地盤変位解析値と計測値との比較から、提案した地盤変形予測法の妥当性を示した。また、熱流方向にのみ凍結膨張するとした解析、等方向に凍

結膨張するとした解析との比較から、凍結膨張変位の発現方向特性を取り込むことによって地盤変形予測の精度は向上することを明らかにした。次に、凍土周辺構造物への凍結膨張の影響を極力軽減するためには、構造物方向への凍土成長を避けるように凍結管の設置方向を定めるべきであるが、硬質地盤を対象として浅い深度で施工する場合には、凍結管の設置方向を詳細に検討する必要があることを指摘した。

第5章では、抜本的な凍結膨張対策として、鋼管補強による造成凍土減量法を提案した。鋼管補強凍土の力学特性を支配する基本因子として、凍土と鋼管との凍着特性、凍土の変形特性を調べる実験を行い、鋼管表面に溝を設けることで凍着強度を高められること、凍着面に作用する垂直応力によって凍着強度は増加することを明らかにした。また、砂および粘土凍土の一軸圧縮実験および曲げ実験から、凍土の変形係数の採り方に関する現状の問題点を指摘するとともに、これらを改善した合理的な採り方を提示した。これら力学実験結果に基づいて、凍結工法における実用条件の範囲内で広く利用できる凍土の応力-ひずみ関係の構成式を提示した。また、この構成式を取り込んだ鋼管補強凍土の弾塑性解析法を開発した。鋼管補強凍土ばりの曲げ実験結果との比較から、開発した弾塑性解析法の妥当性を示した。

第6章では、論文をとおして得られた知見を整理し、今後の研究課題をまとめている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、地盤の凍結工法において生じる地盤変形量や圧力増加量の予測手法の精度を向上させることを目的に、新たな凍結膨張モデルを作成するとともに、それを用いて、より合理的な凍結膨張対策方法を提案したものであり、得られた成果の主たるものは以下の通りである。

1. 凍結膨張変位は、従来の研究で主に扱われてきた熱流方向だけでなく、その直角方向にも生じることを実験的に明らかにした。また、その影響因子として、拘束応力、凍結速度、試料の硬さ、間隙水の塩分濃度を取り上げ、これらの因子が熱流方向およびその直角方向の凍結線膨張率に及ぼす影響を明らかにした。
2. 熱流およびその直角方向の凍結線膨張率をそれら2つの方向の拘束応力の関数とする三軸凍上実験式を導いた。この式を用いて種々の実験結果、特に、熱流直角方向のひずみを生じさせない従来の凍上実験結果が精度よく説明できることを示した。
3. 現地盤では、凍結面への水分移動による間隙水圧の低下、凍結膨張による有効応力の増加およびそれに伴う圧密現象の発生などによって、応力状態は時間とともに変化する。そこでこれらを取り込みながら、現地盤にも適用できるように上記の三軸凍上実験式を拡張した。
4. 拡張した三軸凍上実験式を3次元有限要素法に組み込み、2つの実凍結地盤に適用した結果、計測値をほぼ再現することができた。また、熱流直角方向の膨張を考慮した場合の方が明らかに精度が向上することがわかった。
5. 地盤を凍結すると圧力増加により近接構造物へ影響を与える。ここでは上記の数値解析を実施することにより、この影響を軽減するため有効な防護工である圧抜き管の合理的な設計方法を提案した。
6. 凍結の影響を軽減することと経済性を向上させるために、凍土の体積を小さくすることが重要である。ここでは鋼管による凍土の補強方法について基本的な室内実験を行い、この最適な施工方法を提案した。

以上のとおり、本論文は地盤の凍結工法についてその現象論的な把握から、それを用いた実用的な地盤の変形予測法と凍結工法の設計技術を提案したもので、学術上、實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19年6月27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、合格と認めた。