HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	地盤凍結工法における土の凍結膨張対策に関する研究［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	小椋, 浩
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15367号
Issue Date	2023-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/89386
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Hiroshi_Ogura_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称　博士（工学）　氏名　小椋　浩

学 位 論 文 題 名

地盤凍結工法における土の凍結膨張対策に関する研究
(Study on Measures against Freeze Expansion of Soil due to Ground Freezing Method)

地盤凍結工法は, トンネル工事等における掘削防護のための地盤改良工法の一つである. 近年シールド工事の大深度化や大口径化に伴い採用件数は増えているが, 凍結膨張問題が問題となっている. 砂地盤においては凍結膨張問題は起こらないが, 粘性土地盤を凍結させる場合には大きな凍結膨張圧の発生, または凍上により周辺構造物や地表面に多大な影響を及ぼす可能性が懸念される. 凍結膨張に起因する凍上問題, 凍結膨張圧問題が予想される場合には, 凍結膨張に対する対策が必要となる。凍結膨張対策は, 膨張変位を吸収する方法と, 凍土量を抑える方法の 2 つが, 過去に対症療法的に施工されてきた。本研究は, これらの凍結膨張対策の合理的な設計方法および管理方法の指標を得ることを目的とする.

第 1 章においては本研究の背景と目的, 本論文の構成について記述する.

第 2 章では地盤凍結工法とその課題ともなる地盤凍結工法の原理を説明する. 次に地盤凍結工法を適用する場合の適用目的, 国内外での適用の歴史, 施工事例 4 件の分析を行う. 地盤凍結工法の課題としては凍土壁の熱管理として, 地下水流の影響や解析手法の課題を挙げるとともに, 凍土壁の力学管理として設計強度の設定について記述している, また, 凍結膨張の影響管理として凍結膨張とその影響の予測, 凍結膨張対策の合理的設計について説明を行っている. 地盤凍結工法におけるこれらの課題を体系的に整理することにより, 本研究の主題である凍結膨張対策の合理的設計法確立の重要性に言及している.

第 3 章は凍結膨張圧対策の現状と課題と題して, まず土の凍結膨張メカニズムとその影響の予測方法について記述している. 地盤凍結工法において重要なことは, 適切な物性評価に基づく凍結膨張量の予測と, 周辺地盤での凍上変位や凍結膨張圧の評価である. このため, まず室内凍上試験と現場での凍結膨張予測としての凍上試験方法の概要説明, 試験結果の紹介と, 凍結膨張率の現場への適用方法を示している. 次に地表面及び地下埋設物への凍上の影響検討方法としての三次元凍上変位計算法や近接構造物への凍結膨張圧の影響検討方法としての高志の円筒理論を取り上げている. これらにより凍結膨張がもたらす事象の分析として凍上変位の影響, 凍結膨張圧の影響等について過去の事例, モデル計算を通して具体的に提示している. これらを踏まえ凍結膨張対策の設計における考え方を土質によるもの, 構造物の許容値によるもの, その他の与条件によるもののそれぞれの場合に分けて示すとともに, 合理的な対策の必要性を考えている, これにより, 本研究で着目している凍結膨張変位の吸収による対策と, 温度管理がもたらす凍土厚増加抑制による対策の位置づけを明確に定めている.

第 4 章では膨張変位吸収による凍結膨張圧低減効果とその合理的設計法について検証を行った. 膨張変位吸収による膨張対策には, 地山抜取方式, 膨張対策溝方式, 砂置換帯方式の 3 種類が過去において施工されており, これらの課題を示した上で, 膨張変位吸収の効果予測手法の提案を行った. 地山抜取方式での予測手法は, 過去に行われた抜取り孔の実験を元に抜取り孔の開孔率や抜取り孔

の配置形状による抜取り孔の崩壊開始圧力, 崩壊完了圧力を求め, この方式による膨張圧低減の予測手法を提示した. 次に膨張対策溝方式での予測手法に対しては, 対策溝が凍結前の土圧に対して崩壊をせず, 凍結膨張圧作用時に膨張対策溝が崩壊する残存率を導出する検討を行った. 一方, 砂置換帯方式での予測手法においては未凍結の周辺地盤の変形係数と砂置換帯の変形係数, ならびにその大きさから合成地盤としての変形係数を求め, 砂置換帯に求められる性能に合わせた合理的な設計方法を提案した. これらの研究成果を検証するために, 実際の凍結工事現場における予測・管理結果との比較を行なった. 地山抜取方式の検証は首都圏外郭放水路の建設工事におけるシールド発進防護凍結工事, 膨張対策溝方式の検証は東京湾横断道路川崎人工島におけるシールド発進防護凍結工事, 砂置換帯方式の検証は今井川調節池建設工事におけるシールド発進防護凍結工事である.3 ケースともそれぞれにおける発生事象を適切に説明できる結果となり, 提案した予測手法の有効性が検証された. 以上を踏まえ, 凍結膨張対策が求められる工事の地盤情報や期待される効果に基づいて, 適切な膨張対策を選定するための実務的フローを作成し, 膨張変位吸収による膨張圧対策を合理的に選択できるよう提案を行った.

第 5 章は温度管理がもたらす凍土厚増加抑制による対策として, 凍結範囲の外側に温水管を列状に配置し, 循環する温水により加熱をすることで, 凍土維持期間中の凍土の増加を抑える方法 (以下, ヒートフェンス方式) の合理的設計法について検討を行った. このヒートフェンス方式の凍土厚制御においては, 凍結を促進させる凍結管と, 凍結を抑制させる温水管の配置設定が重要な上, 凍結領域を的確に予測するための熱解析手法の適用が必要となる. 本研究では, 凍結管列と温水管列の配置を平行にした場合と円周方向にした場合の 2 ケースを対象に, その間に存在する平衡凍土面に着目した実用的熱解析手法である平衡凍土面法の適用範囲とその精度についての検証を行った. この検討成果を受けて, ヒートフェンス方式による凍結膨張対策が取られたトンネル拡幅防護の凍結工事を対象に, 凍土厚制御と凍上量抑制効果について比較検討を行った. この工事では地表面に発生する凍上量も厳格に管理する必要があり, 本方式による制御効果が注目されたが, 現地での温水温度と凍土厚の増減などの計測結果をもとに適宜, 平行凍土面法に基づく制御を行った結果, 凍土厚と凍上量の実測値と予測値の間に良い相関関係が認められ, ヒートフェンス方式による凍土厚と凍上量の制御効果が明らかとなった.

本研究により, 膨張変位吸収による凍結膨張対策とヒートフェンス方式による凍土厚制御による凍結膨張対策の対策効果と選定方法, 設計方法, 現場における管理方法が明らかとなった.