



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	プレロード改良地盤の長期圧密挙動における アイソタック則の適用性に関する研究
Author(s)	新名, 大輔
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16848号
Issue Date	2026-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16848
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99693
Type	doctoral thesis
File Information	Daisuke_Niina_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



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 新名 大輔

学 位 論 文 題 名

プレロード改良地盤の長期圧密挙動における アイソタック則の適用性に関する研究
(Study on applicability of isotache law on long-term consolidation behavior of preload-improved soft clay deposits)

プレロード工法は、港湾沿岸域や埋立地に分布する軟弱粘土地盤に対し、一時的に盛土荷重を付与して過圧密状態を与えることで、供用期における残留沈下の低減と地盤強度の増加を図る代表的な地盤改良工法である。特にコンテナターミナルのような大規模港湾施設や埋立造成地では、供用後も長期間にわたり沈下が問題となる場合が多く、プレロード撤去後の長期沈下挙動を合理的に評価することが現在においても重要な設計課題である。しかし、プレロード載荷から除荷、さらに供用荷重による再載荷に至る複雑な荷重履歴の下では、一次圧密に伴う過剰間隙水圧の消散と、粘塑性的な時間依存変形（いわゆる二次圧密・クリープ）が重なって進行するため、長期沈下挙動を一貫した枠組みで評価することは容易ではない。国内の技術基準では、道路・鉄道・建築分野を中心に、一次圧密終了後に二次圧密が発現すると仮定する C_α 法による二次圧密の評価法が採用されている。一方、港湾分野では、一次圧密と粘性変形が同時に進行するという前提に立脚したアイソタック則が導入されており、圧密と粘性変形の取り扱いに関する理論的前提や荷重履歴の扱いは、分野によって必ずしも統一されていない。加えて、プレロード撤去後または再載荷後の応力状態が時間の経過とともにどのように粘性沈下へ反映されるかについては、体系的に整理された検討例は多いとは言えず、設計上の判断に経験的要素が残されているのが現状である。

本研究は、ひずみ速度に応じて圧密降伏応力が一意に定まるというアイソタック則の概念に基づき、プレロード改良地盤の長期圧密挙動に対するアイソタック則の適用性と適用範囲を明らかにすることを目的とする。そのために、理論解析に基づく解析手法の構築、プレロード工法を模擬した遠心模型実験とその再現解析、および理想化したモデル地盤解析の観点から検討を行った。

まず、Watabe and Leroueil により提案された既往のアイソタックモデルを基盤として、載荷過程を対象として構築された構成式を、除荷および再載荷過程へ拡張した。圧密降伏曲線と限界圧縮曲線との関係に着目し、プレロード撤去直後に生じる弾性膨張、負の過剰間隙水圧が消散した後に顕在化する粘塑性再圧縮、ならびに再載荷後に進行する粘性変形を、同一のアイソタック則の枠組みで連続的に整理できるよう定式化した。一方、除荷量が大きく、応力状態が限界圧縮曲線より大きく左側へ移動する条件では、粘性膨張の表現が困難であることから、本研究ではそのような条件を適用対象外とし、適用範囲を概ね過圧密比 OCR が 1.4 程度より小さい除荷域と位置づけた。さらに、鉛直一次元変形と放射状排水を同時に扱う中空円筒型圧密方程式とアイソタックモデルを連成し、バーチカルドレーン改良地盤を対象とする数値解析スキームを構築した。ADI 法による圧密計算については、既往の理論解・近似解との比較を通じて、数値解としての妥当性を確認した。また、Fan and Watabe による除荷に関する長期圧密試験の結果に基づき、提案法が除荷後の再圧縮を適用可能な範囲において定性的に再現できることを確認した。

次に、プレロード工法を模擬した遠心模型実験を実施し、プレロード撤去後の沈下挙動と過剰間

隙水圧挙動を把握した。実験では、粘土の種類、バーチカルドレーンの有無、プレロード撤去時の圧密度、遠心加速度（自重の影響）の各項目を組み合わせた条件を設定し、層別沈下および過剰間隙水圧の時刻歴を計測した。その結果、圧密改良が進んでおらず撤去時の圧密度が低い条件（圧密度 $U = 60\%$ ）では、除荷直後の弾性膨張に続き、負の過剰間隙水圧の消散後に再圧縮沈下が発現する挙動が確認された。一方、十分に圧密が進行した条件（圧密度 $U = 90\%$ ）では、除荷後の膨張が長期にわたり継続し、再圧縮量は相対的に小さい傾向を示した。

これらの遠心模型実験に対して再現解析を行い、提案した解析手法の評価と限界について検討した。解析では、一次圧密と粘性変形で時間の相似則が異なる点を考慮し、実験から同定した圧密特性と Watabe and Leroueil による標準的なアイソタックパラメータを用いた。その結果、除荷直後の弾性膨張後の過剰間隙水圧の消散過程で進行する再圧縮の傾向を定性的に説明できることが確認された。一方、モデルの前提上、除荷に伴う粘性膨張を直接表現できないことも確認し、適用範囲を意識した運用の必要性が示された。

さらに、理想化した一次元粘土地盤を対象とするモデル地盤解析を通じて、プレロード載荷厚、載荷期間、ドレーン条件、自重応力レベルなどが長期沈下に与える影響を整理した。その結果、プレロードにより一次圧密による圧密改良を圧密度 90% まで十分に進行させても、除荷後に長期的に作用する有効応力が限界圧縮曲線近傍にとどまる場合には、供用荷重の増加に伴い粘性変形が再び顕在化し得ることが示唆された。また、粘塑性ひずみ速度は応力経路と限界圧縮曲線との相対位置によって概ね定まり、層厚には依存しない一方、沈下量はその積分結果として層厚に比例して増加することを整理した。

以上より、本研究は、プレロード改良地盤に対するアイソタック則の適用性について、荷重履歴を考慮した長期圧密挙動を整理する枠組みとしての有効性と、適用に際して留意すべき限界の双方を示した。提案法は、汎用的な設計定数のみで構成できる。また、アイソタックモデルの標準値を使用することで、追加試験や高度な解析技術を要さず、一定の条件下では実務設計に容易に適用できる簡便性を有する。提案した解析の枠組みは、プレロード撤去時期や残留盛土厚の検討において、長期沈下挙動をより体系的に整理するための基礎的知見を与えるものである。