

凍結工法による止水対策の設計・維持管理のための熱水連成FEM解析技術

森川 誠司・並川 正・田部井 和人・大野 進太郎・江崎 太一・吉田 輝（鹿島建設株式会社）

●技術開発背景

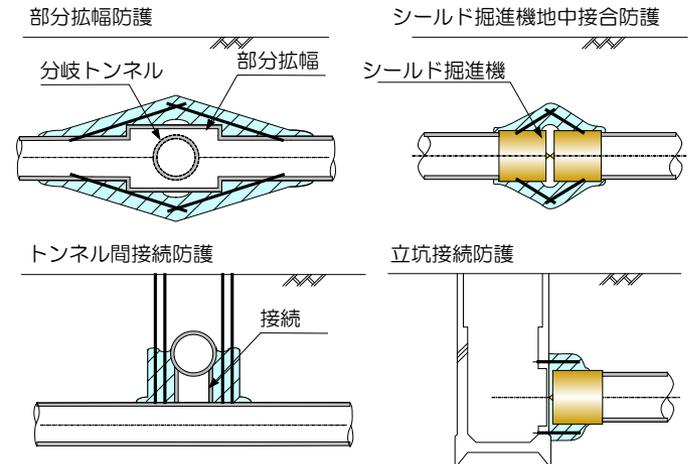
地盤凍結工法

各種地中工事において仮設の土留め・止水工法として広く用いられている。特に、地下水や土砂の流入リスクの大きい砂質土層に対して、**確実な止水工法**として有効である。

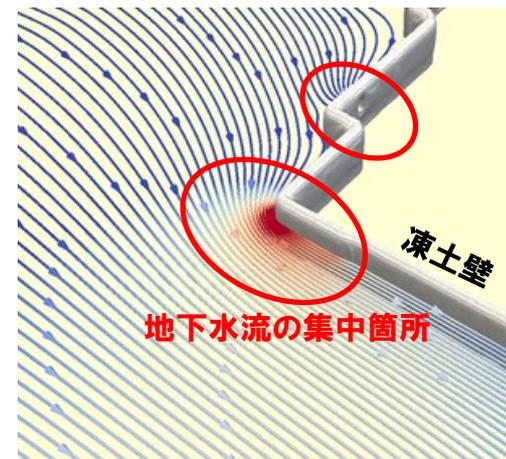
凍結阻害の問題と評価法

工法適用にあたっては地下水流が未凍結部に集中し流速が増大することによる**凍結阻害**に留意する必要がある。従来は、地下水流速**2m/day**を凍結可否の閾値とし、薬液注入などの対策工の実施を判断していた。凍結管や地中構造物が錯綜した実際の工事において、凍結阻害の予測と最適な対策工選定は困難であり、**数値解析による評価法**の確立が求められていた。

特に**東京電力福島第一原子力発電所凍土方式遮水壁**（以降、1F陸側遮水壁）は地下水流を幅**500m**にわたって遮断する大規模工事であり過去の知見が参考とならないため、数値解析による評価法が必要とされた。



凍結工法のシールド工事への適用形態の例



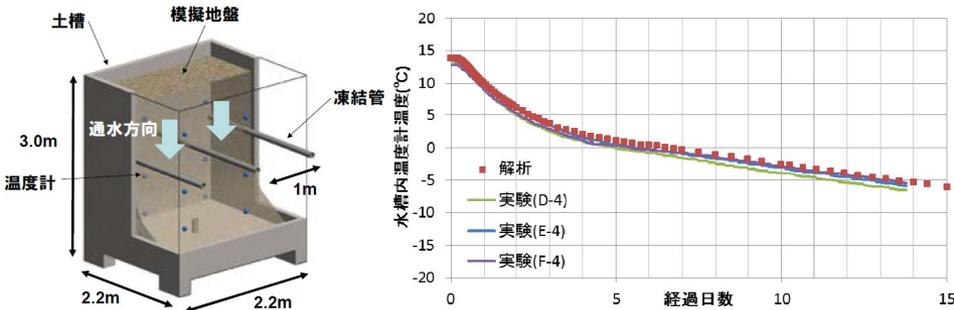
地下水流による凍結阻害の例

●技術開発内容

熱水連成FEM解析の開発

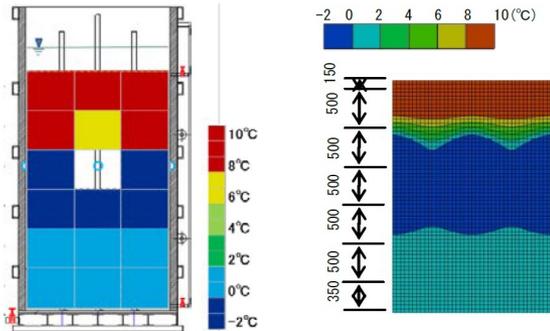
間隙水の相変化（水-氷）を等価潜熱法により考慮した熱解析と浸透流解析を連成させ、地下水流場での凍結の進行を理論に忠実に予測可能な**3次元熱水連成FEM解析プログラム**を開発した。

開発したプログラムについては、各種理論式との比較により**検証**するとともに、模型実験や実地盤凍結実験との比較を通じて**妥当性確認**を行った。



模型実験の概念図

実験と解析の比較（温度経時変化）



(a)実験結果

(b)解析結果

実験と解析の比較（温度分布、10日経過時）

熱水連成FEMを用いた設計・維持管理フロー

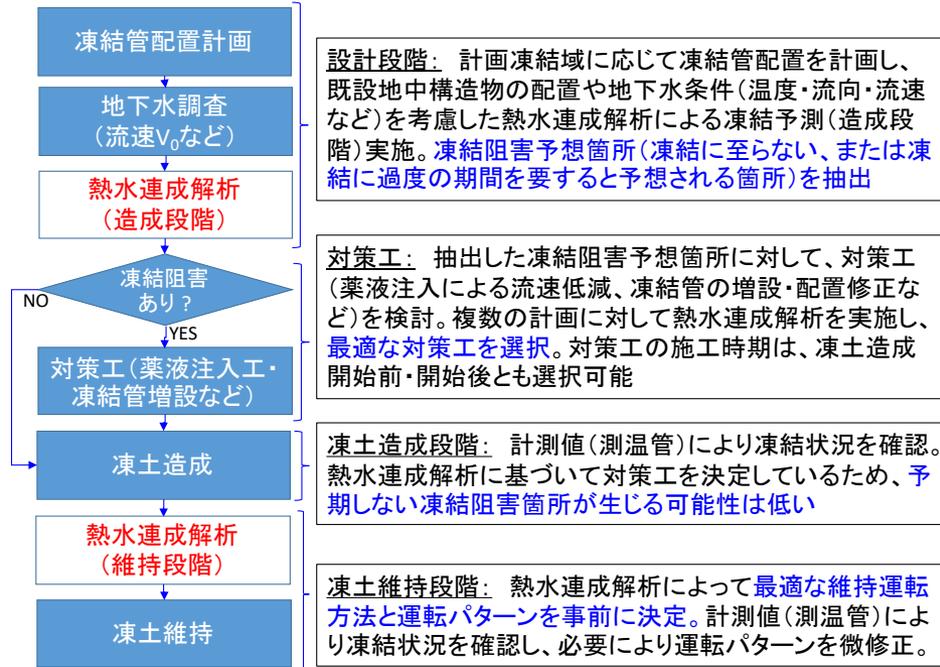
開発した熱水連成FEM解析を有効に活用するための**設計・維持管理フロー**を構築した。本フローを適用することで以下のメリットがある。

①**安全性**：解析結果と実測を比較することにより、予期せぬ凍結阻害の早期検知や測温機器の無い箇所の凍結状況の推定が可能となり、凍結不良リスクを軽減できる。

②**経済性**：凍結阻害の懸念箇所を絞込み薬液注入等の対策工の範囲を縮小できる。複数の対策工を比較検討し、経済性や工期から最適な方策を選定できる。

③**環境負荷**：薬液注入等の施工範囲を最小限に抑えることができ、環境への影響低減に有効である。

熱水連成FEMを用いた止水対策の設計・維持管理フロー



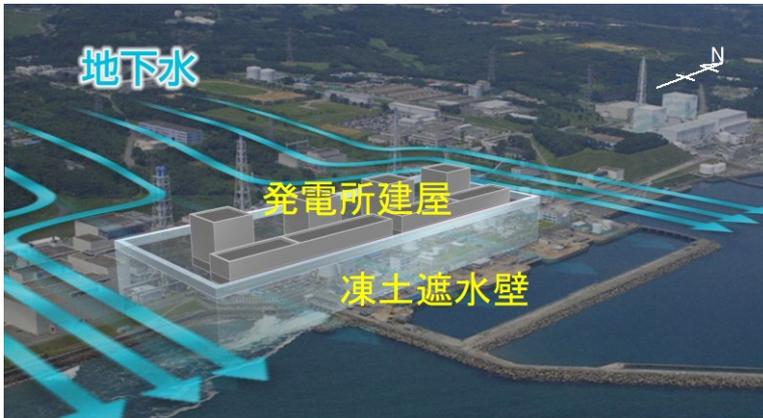
●適用実績

1 F 陸側遮水壁の設計・維持管理への適用

1 F 陸側遮水壁は、その規模や複雑な平面線形、多数の埋設物を避けた変則的な凍結管配置、原子力規制当局による凍結範囲の段階的拡大方針などから、多くの地点で凍結阻害の発生が懸念された。

設計段階においては、本技術を用いて凍結阻害懸念箇所を絞込むとともに、多くの対策パターンの効果を詳細に比較検討し、**確実な止水性を担保し、かつ最も経済的な対策**を選定した。その結果、先行凍結や薬液注入工などの対策を随時併用した複雑な工程の中、着実に凍土造成を進めることができた。

維持管理段階においては、凍土造成完了後の経済的な維持管理運転方法として、冷却と停止を繰り返す**間欠運転**の有効性を本技術で確認し、本工事に採用されている。

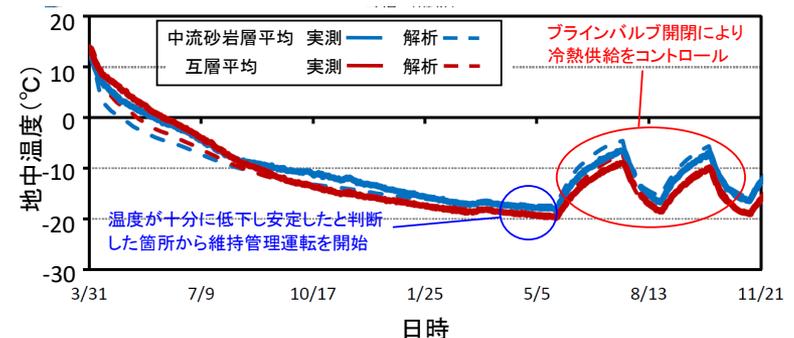
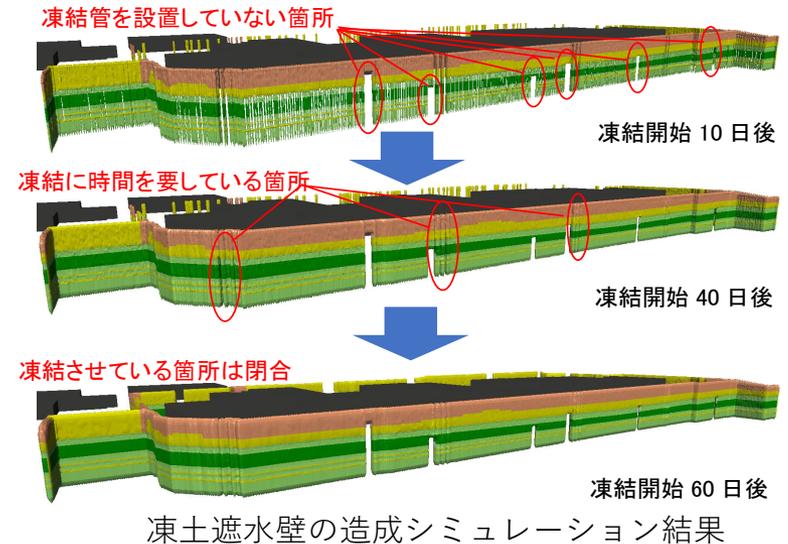


凍土遮水壁のイメージ

●今後の展開と有用性

本技術は、複雑な現場条件を反映した凍結シミュレーションが可能で、**対策工の必要性とその施工範囲を合理的に評価**できるため、一般の都市土木工事でも極めて有用であり、高い汎用性を有する。

また、凍結工法の実施に起因する様々な事象（周辺地下水位、地下水移動量、地下水流速など）を総合的に評価できるため、**多角的な分析に基づく現況再現や予測**が実施でき、将来の凍土運用の合理化につながる高い発展性を有する。



維持管理における間欠運転シミュレーション結果