

凍結工法に適用する凍上・解凍沈下予測手法の検討 —熱・力学・浸透流連成 FEM 解析—

鹿島建設(株) 正会員 ○大野 進太郎, 森川 誠司
正会員 吉田 輝, 川野 健一, 小原 隆志

1. はじめに

本論文では, シールド工事などに適用する凍結工法の際, 主に粘性土地盤において懸念される, 凍結膨張圧・凍上・解凍沈下を予測する目的で開発した, 熱・力学・浸透流連成弾塑性 FEM 解析手法について, 解析手法の概要と適用性検討結果(対象: 一次元凍上試験及び遠心模型凍上試験¹⁾)を報告する。

2. 解析手法の概要

(1) 熱・力学・浸透流連成 FEM 解析

本研究における連成解析は, 相変化に伴う潜熱を考慮できる熱・浸透流連成解析プログラムと力学・浸透流連成弾塑性解析プログラムを組み合わせ実施した(弱連成解析)。解析のフローは凍結(熱伝導)解析過程と凍上・解凍沈下解析過程の2段階に分けられる(図1参照)。

(2) 凍上・解凍沈下を考慮した粘土の弾塑性構成モデル

粘土の膨張・解凍収縮を考慮するために, 修正カムクレイモデルに a) 凍結膨張ひずみ $\dot{\epsilon}^T$ と b) 解凍収縮に伴う粘土の骨格構造劣化という2つの概念を導入した。

a) 凍結膨張ひずみ: 通常の弾塑性モデルではひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ を弾性部分 $\dot{\epsilon}^e$ と塑性部分 $\dot{\epsilon}^p$ に分解するが, 今回は式(1)のように凍結膨張部分 $\dot{\epsilon}^T$ を追加する。さらに $\dot{\epsilon}^T$ は, 温度変化により式(2)のように増減するとした。

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^e + \dot{\epsilon}^p + \dot{\epsilon}^T \quad (1) \quad \dot{\epsilon}^T = \beta \dot{T} \mathbf{1} / 3p'_i \quad (2)$$

ただし, β : 凍結膨張係数(単位: 応力の逆数), p'_i : 初期平均有効主応力, $\dot{T}$: 温度変化速度, $\mathbf{1}$: 単位テンソルである。なお, 図2のように凍結膨張が発生する範囲($T_1 \sim T_2$)を指定することができる。

b) 解凍収縮に伴う粘土の骨格構造劣化: 凍結工法に伴う解凍沈下は, 凍上量の3倍程度になるという経験的な知見がある。著者らは, 凍上量よりも解凍沈下の方が大幅に大きくなる原因が, 解凍に伴う粘土の骨格構造の劣化にあると考えた。粘土の骨格構造の劣化の力学モデル化には上負荷面モデル²⁾の概念を応用した(図3参照)。式(3)にその降伏関数, 式(4)に構造劣化指標 χ (初期値: 1.0, 下限値: a)の発展則を示す。

$$f = MD \ln(p' / \chi p'_c) + MD \ln(1 + \eta^* / M^2) = 0 \quad (3) \quad \dot{\chi} = b \dot{T} \quad (4)$$

ただし, M : 限界応力比, D : ダイレイタンスー係数, p' : 平均有効主応力, p'_c : 先行時の平均有効主応力, η^* : 関口・太田の応力パラメータ, b : 構造劣化速度パラメータである。

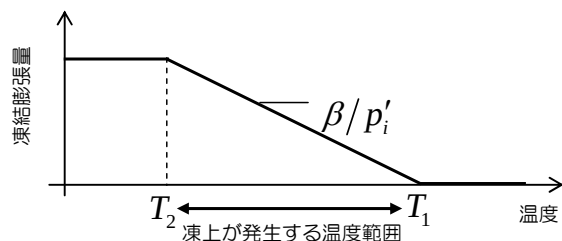


図2 凍結膨張ひずみの概念図

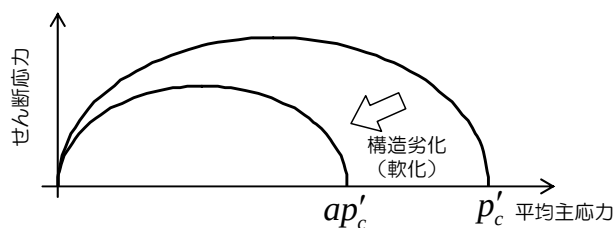


図3 解凍収縮に伴う構造劣化の概念図

キーワード 凍結工法, 凍上, 解凍沈下, 熱・力学・浸透流連成 FEM 解析, 弾塑性構成モデル

連絡先 〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30 鹿島建設(株) 土木設計本部 TEL 03-6229-6684

3. 一次元凍上試験を対象とした適用性検討

藤森粘土の一次元凍上試験を対象に、凍上解析手法の精度確認とパラメータ同定（表 1、2 参照）を目的として適用検討を実施した（解凍沈下は遠心模型凍上試験において検討）。図 4 に解析モデルを示す。試験における初期拘束圧（100、200、300kPa）により 3 ケースの解析を実施した。図 5 に供試体上面の鉛直変位の経時変化の比較を示す。各初期拘束圧において、試験と解析は良く一致している。

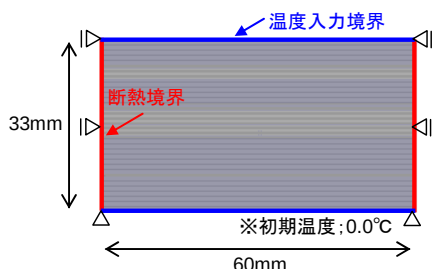


図 4 解析モデル

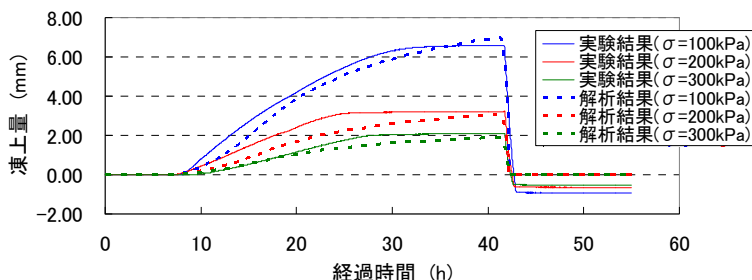


図 5 凍上量の経時変化（沈下；負）

4. 遠心模型凍上試験を対象とした適用性検討

遠心模型凍上試験（試験の詳細は小原ら¹⁾の報告を参照，ケース 2 を想定）を対象に、凍上・解凍沈下解析の精度確認と解凍沈下のパラメータ同定（表 1、2 参照）を目的として適用検討を実施した。図 6 に解析モデルを示す。解析では遠心実験の相似則を考慮した実スケールを想定した（距離；50 倍，時間；2500 倍）。図 7 に粘土地盤上部に設置された計測地点（A～C，図 6 参照）における鉛直変位の経時変化の比較を示す。解析の解凍沈下が速く終了する傾向はあるものの、凍上量・解凍沈下量ともに試験と解析は良く一致している。

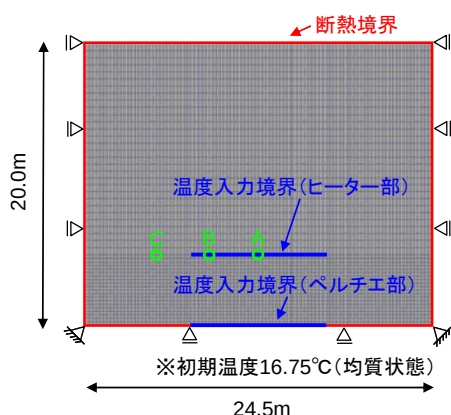


図 6 解析モデル

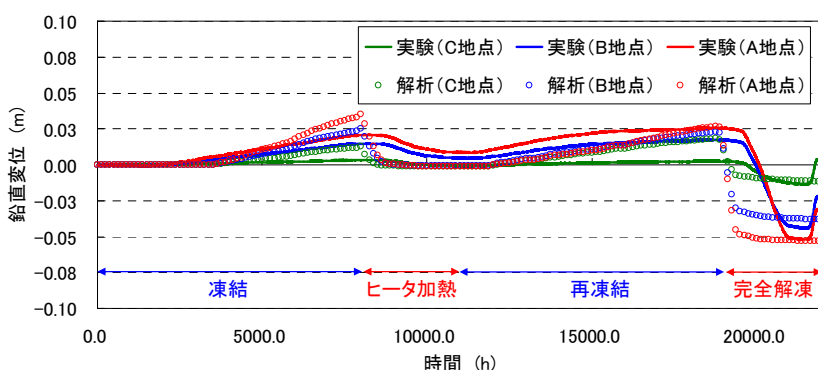


図 7 各計測地点における鉛直変位の経時変化（沈下；負）

表 1 熱伝導入力物性

	熱伝導率 (凍結前)	比熱 (凍結前)	熱伝導率 (凍結後)	比熱 (凍結後)	容積含水率	水の潜熱
粘土	1.64 (W/m・K)	1.78 (kJ/kg・K)	2.81 (W/m・K)	1.20 (kJ/kg・K)	50.0(%)	333.2 (J/g)
砂	1.89 (W/m・K)	1.55 (kJ/kg・K)	2.93 (W/m・K)	1.12 (kJ/kg・K)	40.0(%)	

表 2 弾塑性モデルの入力物性

限界応力比	ダイレイタ ンシー係数	非可逆比	ポアソン比	先行時土 圧係数	先行時平 均応力
1.00	0.07	0.80	0.30	1.0	300.0 (kPa)
劣化速度パ ラメータb	劣化限界 パラメータa	凍結膨張 係数	凍上開始温 度	凍上終了 温度	水中単体 重量
0.050	0.50	19.0 (1/kPa)	-2.0 (℃)	-5.0 (℃)	8.86 (kN/m3)

5. おわりに

一次元凍上試験および遠心模型凍上試験を対象とした適用性検討の結果、開発した解析手法は、粘性土地盤の凍上および解凍沈下をうまく再現できることがわかった。今後は凍結工法が適用された実現場データを対象に適用性検討を実施し、解析手法の精度確認とさらなるブラッシュアップを図りたい。

参考文献

1)小原ら：凍結工法に適用する凍上・解凍沈下予測手法の検討ー遠心模型凍上試験ー，土木学会第 66 回年次学術講演会，講演予定。 2) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T. : Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior, Soils and Foundations, 40(3), pp.99-110, 2000.