

## Ⅲ-B 393 凍結面吸排水を考慮した凍結膨脹有限要素解析法による現場規模のシミュレーション

(株) 精研 正会員 ○松岡啓次  
 京都大学 正会員 田村 武  
 (株) 精研 正会員 生頼孝博

## 1. はじめに

地盤凍結工法で凍結膨脹による周辺への影響をより正確に把握するため、凍結進行及び凍結面の吸排水、地盤の圧密等の諸条件を同時に満たした2次元の連成系有限要素法を開発した<sup>1)</sup>。この解析法により、以下に示す2種類のモデル計算により、凍結パターン、初期土圧、透水係数の相違による凍結膨脹の特性を検討した。

## 2. 解析法の概要

凍結進行は、熱伝導差分法を、圧密と地盤の変位・応力は、過剰間隙水圧と変位を未知数とした連成系有限要素解析法<sup>2)</sup>を使用した。又、凍結面の吸排水速度は、次式<sup>3)</sup>を用いた。記号の意味を表1に示す。

$$V_w = \frac{U}{1 + \Gamma} \cdot \frac{\sigma_0}{\sigma_n - P_w} \cdot \left(1 + \sqrt{U_0/U}\right) - n_f \cdot \frac{\Gamma}{1 + \Gamma} \cdot U$$

## 3. 現場規模における計算例

一般に凍結現場の地盤は、凍結膨脹の生じる粘性土と殆ど生じない砂質土が互層になっている。吸排水による凍結膨脹率を比較するため、図1に示すモデル地盤で計算する。土質・凍結膨脹定数及び初期・境界条件を表2に示す。透水係数は、砂では一定とし、粘土では圧密による間隙比 $e$ に依存すると考える。尚、 $X=5\sim 10\text{m}$ は、地盤と同じ弾性係数を持つバネに置き換えた。図1のIに平面の冷却面のある場合をCASE1、I及びIIの位置の粘土層に2面の平面冷却面がある場合をCASE2として検討する。冷却面温度は $-20^\circ\text{C}$ 一定とする。

## 3-1 冷却面が1列の場合 (CASE1)

$Y=0\text{m}$ 断面の凍土厚、変位量 $\delta x$ 、間隙水圧の経時変化を各々図2～4に、凍結開始1000時間後の粘土内の含水比分布を図5に示す。図2で凍結1000時間後の凍土厚は約1m、この時点の凍結面位置( $X=1\text{m}$ )の変位は図3から約60mmとなり、見かけの平均凍結膨脹率(膨脹圧の増加による凍土の収縮量を含む)は約6%と言える。 $X=1.5\text{m}$ と $2\text{m}$ の変位差は図3から $52-44=8\text{mm}$ であり、図に表していないが、圧密がなく弾性変形のみの変位差は5mmであることから、圧密収縮が生じている。図4で凍結面の吸水により未凍土内の間隙水圧は、時間経過に伴い低下し、冷却面に近い程顕著である。図5の凍土内では、冷却面から遠い程又砂層に近い程吸水が大きい為、含水比が大きい。未凍土内では、凍結面に近い程又砂層から遠い程含水比は小さい。砂層から離れた位置では、未凍土から凍結面への吸水により未凍土の含水比が小さく、凍土の含水比は大きくなって顕著に現れている。

## 3-2 冷却面が2列の場合 (CASE2)

$Y=0\text{m}$ 断面の凍土厚、変位量 $\delta x$ 、間隙水圧の経時変化を各々図6～8に、凍結開始400時間後(冷却面間の凍土閉塞前)の粘土内の含水比分布を図9に示す。図6より400時間後の凍土厚は約2m、図7より $X=2\text{m}$ の変位は約48mm、この時点の見かけの平均凍結膨脹率は約2.4%となり、CASE1に比べ小さい。この理由を以下

表1 記号と意味

|                                          |
|------------------------------------------|
| $V_w$ : 吸排水速度、 $P_w$ : 過剰間隙水圧            |
| $U$ : 凍結速度、 $\sigma_n$ : 凍結面の全土圧         |
| $\sigma_0$ , $n_f$ , $U_0$ : 土の凍上特性を表す定数 |
| $\Gamma$ : 水の凍結膨脹率( $=0.09$ )            |

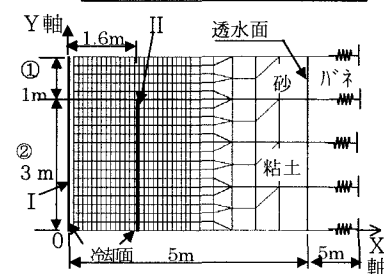


図1 計算領域とメッシュ

表2 土質の諸定数と初期・境界条件  
( )内: 凍土

| 土質定数                      | ①: 砂                                             | ②: 軟弱粘土                   |
|---------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------|
| 弾性係数                      | $1 \times 10^4$                                  | $1 \times 10^3$           |
| ( $\text{tf/m}^2$ )       | ( $2 \times 10^5$ )                              | ( $1 \times 10^5$ )       |
| ポアソン比                     | 0.33 (0.33)                                      | 0.4 (0.33)                |
| 透水係数                      | $3.6 \times 10^{-2}$                             | $\ln(K) = 11.192 \cdot e$ |
| ( $\text{m/h}$ )          | —                                                | $-23.2288$                |
| 容積含水率                     | 0.4                                              | 0.6                       |
| 初期含水比(%)                  | —                                                | 34.03                     |
| 凍結膨脹定数                    |                                                  |                           |
| $\xi_0$                   | 0                                                | 0.002                     |
| $n_f$                     | 0                                                | 0.255                     |
| $\sigma_0(\text{tf/m}^2)$ | —                                                | 0.274                     |
| $U_0(\text{m/h})$         | —                                                | 0.1765                    |
| 初期条件                      | 温度: $18^\circ\text{C}$ 、土圧: $28(\text{tf/m}^2)$  |                           |
| 境界条件                      | 温度: $X=5\text{m}$ 面 $18^\circ\text{C}$ 一定、他面: 断熱 |                           |
|                           | 間隙水: $X=5\text{m}$ 面 透水面、他面: 不透水面                |                           |
|                           | 変位: $X=10\text{m}$ 固定、他面: 支持                     |                           |

キーワード: シミュレーション、凍結膨脹、吸排水、圧密、有限要素法

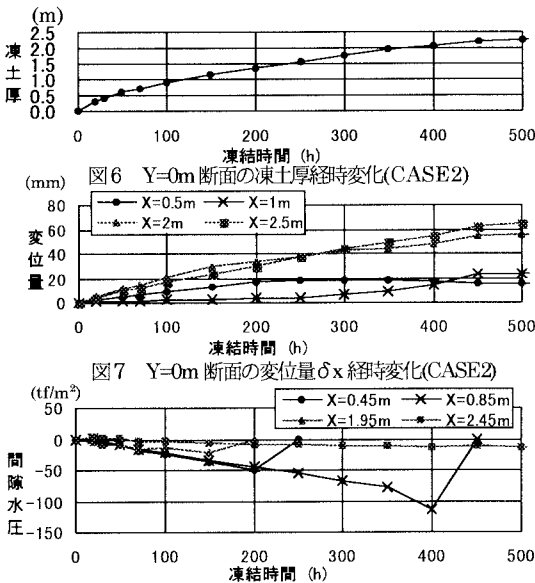
連絡先: 〒542-0066 大阪市中央区瓦屋町2-1-16 (株) 精研 Tel:06-6768-5031 Fax:06-6768-1508

に述べる。冷却面間の間隙水圧は、閉塞時(450時間後)直前まで大きく低下している(図8)。両側の凍土壁間に挟まれた粘土層の動水抵抗が大きく、その為間隙水圧の低下即ち有効応力の増加となり、凍結面の吸水が少なく、その結果膨脹率が小さくなる。図9の冷却面間の凍土内含水比は、両冷却面の中間点付近に近づく程前記の理由で小さくなっている。

CASE2で初期土圧を28、50、100(tf/m<sup>2</sup>)の3種類、粘土の透水係数を表2ののままの1倍と0.1倍の2種類とした場合、Y=0~1m(砂層から2~3m離れ)でのX座標の位置に於ける平均凍結膨脹率を図10に示す。CASE1の値も図10に示す。CASE1ではX座標が大きい程(X=0mの冷却面から離れる)膨脹率が大きい。CASE2ではX=0m、1.6mに冷却面があり、その付近では膨脹率が小さい。両冷却面の中間(X=0.8m)付近では前記の理由で小さくなっている。X=1.6mの冷却面の外側は内部に比べ吸水が容易な為大きくなる傾向となっている。又、初期土圧が大きい程、透水係数が小さい程膨脹率は小さい。

#### 4. おわりに

簡単なモデルであるが、今まで定性的に理解していた現象が明確になった。今後、間隙水圧、有効応力、凍結膨脹率、凍結面前方の圧密収縮等を定量的に予測し、実施工の計測結果の検証、膨脹を極力抑える凍結パターンの検討をする予定である。



#### (参考文献)

- 1) 松岡、田村:「凍結面吸排水を考慮した凍結膨脹及び圧密の有限要素解析法」、第34回地盤工学研究発表会、1999
- 2) 赤井、田村:「弾塑性構成式による多次元圧密の数値解析」、土木学会論文報告集、第269号、1978年1月
- 3) 高志、益田、山本:「土の凍結膨脹率に及ぼす凍結速度、有効応力の影響に関する研究」、日本雪氷学会誌、Vol.36, No.2, 1974

