

境界一有限要素を用いた凍結地盤の解析

信州大学 学生員 ○遠藤 典男

信州大学 正 員 三井 康司

1. まえがき

地盤の凍結現象は、建設工学の分野において重要な問題である。人工凍結技術を用いた軟弱地盤の一時的な強化対策、遮水を目的とした凍結工法も実施されつつある。またLNG, LPGのような極低温の地下貯蔵タンクの建設も、近年盛んになっており、タンク周辺の地盤凍結が問題になる。

地盤が凍結する際、未凍結領域からフリージング・フロントに向かって間隙水が移動して氷に変化し、体積膨張が生じる。その結果、種々の現象が複雑に作用して凍上現象あるいは凍結土圧等が生じ、これらが周辺の地盤、構造物に影響を及ぼすことになる。そのため、この有害な凍結膨張と密接に関連する凍結領域の経時的变化を高精度で算定する必要がある。特に、軟弱地盤における凍結膨張量は大きく、土の含水量の影響を無視できない。したがって、本解析では、凍結管近傍を有限要素で、他の均一地盤を境界要素で離散化するというFE-BE結合手法を用いて熱伝導解析を行い、フリージング・フロント近傍での水分移動及び、間隙水圧低下を考慮し、凍結膨張量及び凍上量を算出しようとするものである。

また、本解析では地盤凍結工法における凍結管が他の地盤と不連続であることを考慮し、これをGarting / Thomas により提案されたクラック要素により離散化し熱伝導解析を行っている[1][2]。

2. 解析手順
有効拘束圧を σ_1 とすると凍結膨張量 ξ 、及び吸排水率 ξ_w は式(1)、(2)で表せる。

$$\xi = \xi_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma} (1 + \sqrt{\frac{u_0}{u}}) \quad (1)$$

$$\xi_w = \frac{1}{1+\Gamma} \frac{\sigma_0}{\sigma} (1 + \sqrt{\frac{u_0}{u}}) - n_f \frac{\Gamma}{1+\Gamma} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{u}{1+\Gamma} \frac{\sigma_0}{\sigma_1 + P_w} (1 + \sqrt{\frac{u_0}{u}}) - n_f \frac{\Gamma}{1+\Gamma} u \\ & = \frac{k}{\gamma_w} \frac{P_w}{1-x} \end{aligned} \quad (3)$$

$$P_w = \frac{1}{2C} \times [-\{C\sigma_1 + B(1-x)\} + \sqrt{\{C\sigma_1 - B(1-x)\}^2 + 4AC(1-x)}] \quad (4)$$

ただし、
 $\frac{u \sigma_0}{1+\Gamma} (1 + \sqrt{\frac{u_0}{u}}) = A, n_f \frac{\Gamma u}{1+\Gamma} = B, \frac{k}{\gamma_w} = C$

$$W = \int_{x=0}^{x=1} \frac{dw}{dt} dt = \frac{C}{u} \int_{x=0}^1 \frac{P_w}{1-x} dx \quad (5)$$

$$\xi_w = \frac{W}{l} = \frac{C}{u l} \int_{x=0}^1 \frac{P_w}{1-x} dx \quad (6)$$

$$\xi = (1+\Gamma) \xi_w + \xi_0 + n_f \Gamma \quad (7)$$

$$\begin{aligned} 2u l \xi_w &= D - C\sigma_1 + B l \\ &+ \frac{CE}{B} \log \left[\frac{1}{2AC} \{D + B^2 l + C(2A - B\sigma_1)\} \right] \\ &- C\sigma_1 \log \left[\frac{1}{2C\sigma_1} \{D + \frac{E}{\sigma_1} l + C\sigma_1\} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

ただし、
 $D = \sqrt{(C\sigma_1 - B l)^2 + 4C l}, E = 2A - B\sigma_1$

$$\{\sigma_{re}\} = [D] \{\epsilon_{re}\} \quad (9)$$

しかしながら、軟弱地盤などにおいては式(1)から算出される凍結膨張量よりも実際は小さくなる。そこで、間隙水圧低下を考慮し、未凍結領域に作用している実際の有効拘束圧 σ_1 とフリージング・フロントに作用する真の有効拘束圧 σ を区別して考える。

凍結面の間隙水圧低下が、 $-P_w$ になったときの凍結面における有効応力 σ は $\sigma = \sigma_1 + P_w$ となる。これに対応する吸水速度及び誘起流水速度は等しく、間隙水圧方程式は式(3)となる。これを解くと間隙水圧低下 P_w は式(4)となる。また、吸排水率 ξ_w は凍結終了までの吸排水全量を凍結前の土の全容積で割ったものであり式(5)となる。吸排水率 ξ_w と凍結膨張率 ξ の間には式(6)という関係があり、また ξ と ξ_w は式(7)で関係付けられる。したがって、式(5)の右辺

の積分が計算できれば、 ξ , ξ_w 共に計算できる。これは、式(8)のようになる。

ここで、凍結膨張は熱流方向のみに進行し、また、フリージング・フロントの法線方向と熱流方向が一致すると仮定すると、凍結膨張率は法線方向のひずみと等しくなり、よって凍結土圧は式(9)と表せる。ここに[D]は地盤性状に関する応力マトリックスであり、凍結土圧 $\{\sigma_{re}\}$ をフリージング・フロントに作用させ応力解析すれば、凍結現象が数値解析できることになる[3]。

3. 数値計算例

図1は軟弱地盤に縦溝を掘削する場合を想定したモデルである。左右の凍結管の長さが異なり、4m間隔で、4mと7mの2本を配置し、これを -30°C として周囲を凍結させる。凍結管はクラック要素で評価しており、FE領域では要素数224、節点数153、BE領域では、要素数、節点数ともに114の線形要素で離散化している。また内部セルに関しては119のアイソパラメトリック要素を適用し、内点は429点指定している。境界条件は、地表面で 10°C 、地盤内の境界を 7°C と設定している。

図2は、各々凍結開始後20,50,70日経過後の凍結領域を示したものである。本モデルでは左右の凍結管の長さが異なり、凍結管周囲の軟弱地盤が凍結管の長さに応じて凍結する様相がよくわかる。このように非対称に凍結領域が拡大する場合、凍上量、反力が地表面で不均一に現れる。

図3は本モデルにおける凍上量を示したものである。50日経過後までは右側の凍結領域が大きいいため凍上量もこれに比例して拡大している。70日経過後、最大凍上量は約20cmに達しており、周辺地盤、構造物への影響も考慮すべきである。

4. まとめ

本文は、境界一有限要素の結合手法により地盤の凍結問題が効率よく評価できることを示したものである。本法においてフリージング・フロントの広がる領域では、地盤中の間隙水、物性値等が複雑に数値解析に影響を及ぼすため有限要素で、他の均一地盤は境界要素で離散化している。数値計算例は主として地盤凍結工法における凍結領域の広がり、さらにこれら凍結膨張に帰因する凍上現象等を取り扱い、所要の精度が得られたものと考えられる。

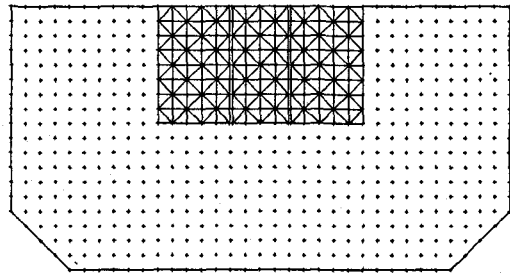


Fig.1 Mesh Division

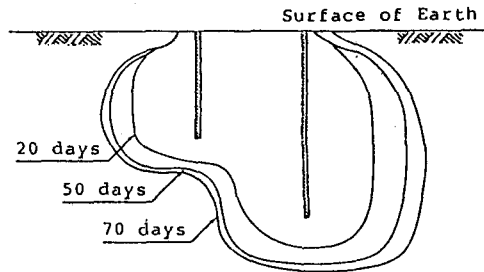


Fig.2 Freezing Fronts

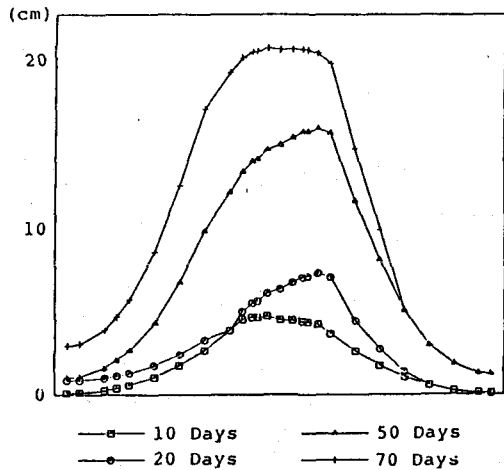


Fig.3 Heaving of Surface

[1] 遠藤, 三井 他: 境界要素法による地盤の応力解析, 境界要素法論文集第4巻, 1987.

[2] 遠藤, 三井 他: 境界一有限要素を用いた凍結地盤の解析, 境界要素法論文集第5巻, 1988.

[3] 高志, 益田 他: 拘束圧下における土の凍上量と間隙水移動について, 雪氷第33巻3号, 1971.