

両軸端が拘束される場合の円筒状凍結における凍結土圧解析

(株) 精研 正会員 上田保司
 (株) 精研 正会員 生頼孝博
 東京都立大学名誉教授 フェロ - 会員 山本 稔

1. 緒言 地盤凍結工法における凍結膨張予測手法の精度向上を目的として、接続工事等のように両軸端が構築で拘束される円筒状凍結での凍結土圧の解析手法を提案する。モデル計算によって軟弱及び硬質地盤での凍結土圧の相違を調べる。構築の変形が計測された凍結現場を解析し、手法の妥当性を検証する。

2. 解析手法 図1に示すように凍土は半径 R_0 上の円筒に配置された凍結管で造成され、両軸端を同一の構築で拘束されるとして軸長の $1/2$ の領域を扱う。地盤各方向への凍結膨張発現を以下の概念で表わす。

熱流方向発現率 $= 1/v$ (1) 但し v :凍結体積膨張率 1 :熱流(凍土成長)方向への凍結線膨張率

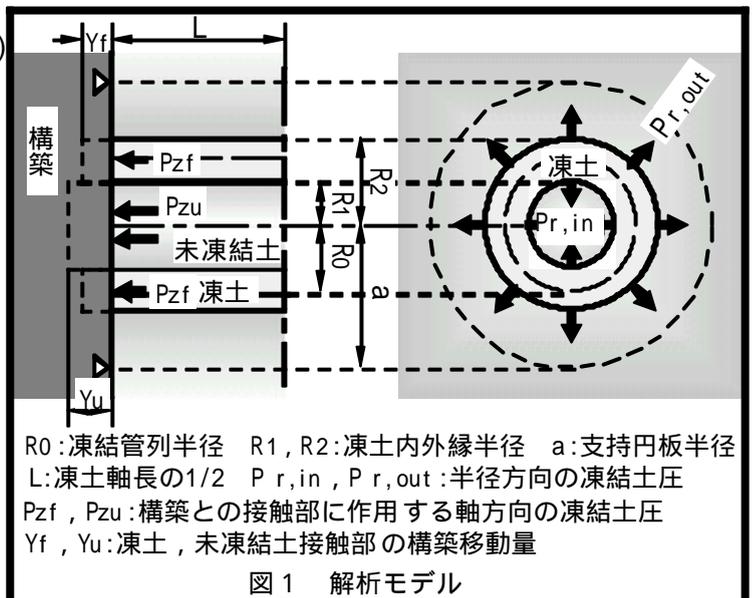
は三軸凍上特性などを考慮した円筒差分解析¹⁾で計算する。各凍結管周囲に凍土が出来る単管凍結時とその後の管列凍結時では成長方向が異なり、半径・円周・軸方向への凍結線膨張率 r , θ , z は各々、

$$\text{単管凍結 } r = \frac{1+v}{4} v \quad (2) \quad z = \frac{1-v}{2} v \quad (3)$$

$$\text{管列凍結 } r = v \quad (4) \quad z = \frac{1-v}{2} v \quad (5)$$

また r , θ は内側 (in) と外側 (out) で区別して示し、管列凍結時の円筒内側での v は吸排水の無い場合の凍結膨張率 ($v_0 + n_f$) とする。図2に示すように、軸歪及び軸応力は構築移動量に比例して軸変位が完全拘束される平面歪と無拘束の平面応力の間になるとする。

前述の差分解析は平面応力なので z は凍土の最大軸歪を与える。 P_{zf} は一次元の熱応力問題²⁾, P_{zu} は図2の関係から、それぞれ



$$P_{zf} = E_f \frac{zL - Y_f}{(1+z)L} \quad (6) \quad P_{zu} = P_{zu,max} \frac{z_{u,max}L - Y_u}{z_{u,max}L} \quad (7)$$

E_f は凍土の弾性係数である。半径方向では管列より外側の凍土に凍結土圧の円筒解析³⁾を、円筒内部未凍結土に厚肉円筒理論²⁾を適用して、それぞれ、

$$P_{r,out} = \frac{E}{1+\frac{1}{2}\nu} \frac{r_{,out} + \frac{R_2^2 - R_0^2}{R_2^2}}{R_2^2} \quad (8) \quad E: \text{地盤弾性係数} \\ \nu: \text{ポアソン比}$$

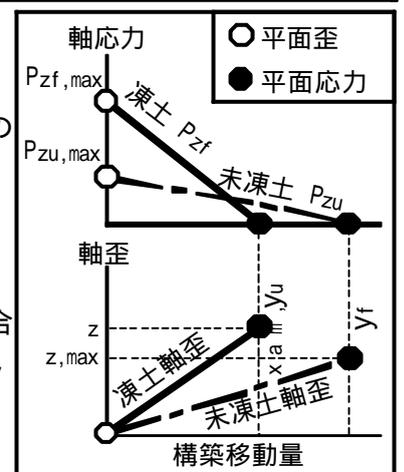
$$P_{r,in} = \frac{Y_u P_{r,in,min} + (z_{u,max}L - Y_u) P_{r,in,max}}{z_{u,max}L} \quad (9) \quad P_{r,in,max}: \text{平面歪の場合} \\ P_{r,in,min}: \text{平面応力の場合}$$

構築の移動量は半径 R_2 の範囲に荷重が載荷された支持円板²⁾とみなして、
 $Y_f = F_f (P_{zf} S_f + P_{zu} S_u) \quad (10) \quad Y_u = F_u (P_{zf} S_f + P_{zu} S_u) \quad (11)$

ここで S_f, S_u は凍土, 未凍結土と構築物との接触面積, F_f, F_u は円板の形状, 剛性で決まる定数である。(6)~(11)式を P_{zf}, P_{zu} について解き、

$$P_{zf} = E_f \frac{L}{(1+z)L} \frac{z_{u,max} z + S_u P_{zu,max} (F_u z - F_f z_{u,max})}{z_{u,max} L - F_u S_u P_{zu,max}} \quad (12) \quad P_{zu} = P_{zu,max} \frac{L z_{u,max} - F_u S_f P_{zf}}{L z_{u,max} - F_u S_u P_{zu,max}} \quad (13)$$

凍土, 凍結膨張, 凍結土圧, 圧密, 線形解析



前述の式中の平面歪での応力 $P_{zu,max}$, $P_{r,in,max}$ と、平面
 応力での軸歪 $z_{u,max}$, 半径応力 $P_{r,in,min}$ は、円筒内未凍結
 土の半径方向変位を U とすると厚肉円筒理論²⁾ から、

$$P_{zu,max} = \frac{2}{(1+\nu)} \frac{E}{(1-2\nu)} \frac{U}{R_1} \quad (14) \quad P_{r,in,max} = \frac{E}{(1+\nu)} \frac{U}{(1-2\nu)R_1} \quad (15)$$

$$z_{u,max} = \frac{2}{1-\nu} \frac{U}{R_1} \quad (16) \quad P_{r,in,min} = \frac{E}{1-\nu} \frac{U}{R_1} \quad (17)$$

$$U = r_{,in}(R_0 - R_1) - R_c \quad (18)$$

R_c は未凍結土の圧密収縮量で円筒圧密の理論⁴⁾ から求める。

3. 解析結果 (1) モデル解析

先行研究の沖積、洪積シルトの物性値¹⁾ を用いて、表1に示す軟弱及び硬質地盤を想定したモデル解析を行った。比較の為、上述の圧密を考慮しない解析も行った。軟弱地盤で軸端を拘束しない場合の円筒状凍結では、凍結膨張はほとんどが凍土成長方向である半径方向に発現する¹⁾。しかし図3に示すように軸方向に拘束を受ける場合は軸応力 P_{zf} が大きくなり、半径応力 $P_{r,out}$ を上回る。図3に示すように内部未凍結土に作用する P_{zu} , $P_{r,in}$ は圧密により大幅に軽減される。圧密収縮量は通常の凍結現場では円筒内部に設置される圧抜き管から排出されるが、設置が無い場合は収縮量の逃げ場が無いので、図3の破線になる。硬質地盤で拘束が無い場合は、凍土成長方向の凍結土圧 $P_{r,out}$ が大きくなるのでは軟弱地盤よりも小さくなる(表1)が、拘束を受ける場合は P_{zf} も大きくなり、図4に示すように $P_{r,out}$ を上回る。圧密は初期有効応力と $P_{r,in}$ との和が圧密降伏応力を超えるまで起きないので圧密降伏応力の大きい硬質地盤では P_{zu} , $P_{r,in}$ の圧密による緩和効果は軟弱地盤よりも小さい。図3, 4の P_{zf} , $P_{r,out}$ は圧密の有無による差はほとんど無い。また各方向の凍結土圧はいずれも硬質地盤の方が軟弱地盤よりも大きい。解析条件(表1)からこの相違は両者の地盤弾性係数 E の相違に起因すると考えられる。

(2) 現場解析

この現場では既設トンネル間の接続に凍結工法が適用され、トンネル移動量の計測結果からFEM解析により、増加土圧の推定が行われた⁵⁾。表1に示す条件で解析し、計測値及びFEM解析値との比較を行った。図5に示すように、トンネル移動量は計測値とほぼ一致した。 P_{zf} , P_{zu} を接触面積 S_f , S_u で加重平均した平均膨張圧で整理すると、図5に示すようにFEMによる増加土圧推定値に近い値となった。なお、この現場では本解析と構築の形状が異なる(円筒と平板)が、構築形状の影響や、上記圧密収縮量の実測との比較などは、今後他の現場解析により行いたい。

5. 結言

両軸端が拘束された円筒状凍結での凍結土圧解析手法を開発し、軟弱地盤と硬質地盤での凍結土圧を検討した。また過去の凍結現場を解析して手法の妥当性を確認した。今後は他の現場解析等で残る課題を解決し、凍結膨張の予測精度向上を図りたい。

文献 1)上田他(1993):土木講演集, 300-301. 2)湯浅亀一:材料力学,コロナ社. 3)高志(1972):土木論文集 Vol.200,49-62. 4)最上武雄:土質力学,技報堂出版. 5)小島他(1996):土木講演集, 290-291.

	軟弱地盤	硬質地盤	現場解析
管列半径 R_0 (m)	2.50	2.50	3.30
凍土軸長 $2 \times L$ (m)	5.00	5.00	6.30
構築剛性 (MN·m)	350	350	420
構築ポアソン比	0.30	0.30	0.30
弾性係数 E (MPa)	5	25	23
弾性係数 E_f (MPa)	2000	2000	2000
ポアソン比	0.35	0.35	0.35
初期有効応力 (MPa)	0.20	0.20	0.27
圧密降伏応力 (MPa)	0.20	0.76	0.44
体積膨張率 ν (%)	5.00	5.00	1.78
$0 + n_f$ (%)	3.00	3.00	1.66
熱流方向発現率	0.80	0.60	0.53

表1 解析に用いた諸数値

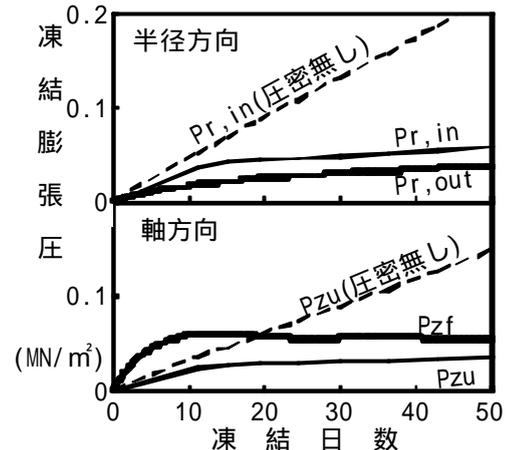


図3 膨張圧の経時変化(軟弱地盤)

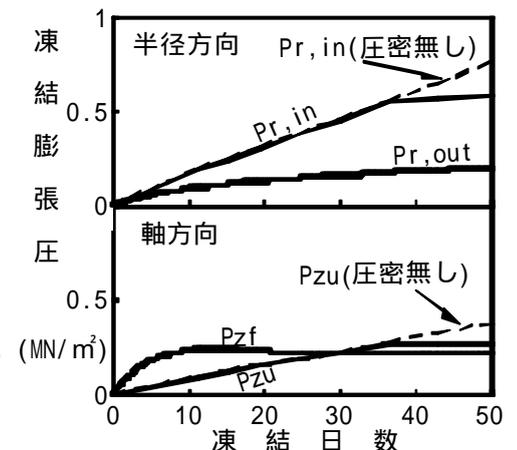


図4 膨張圧の経時変化(硬質地盤)

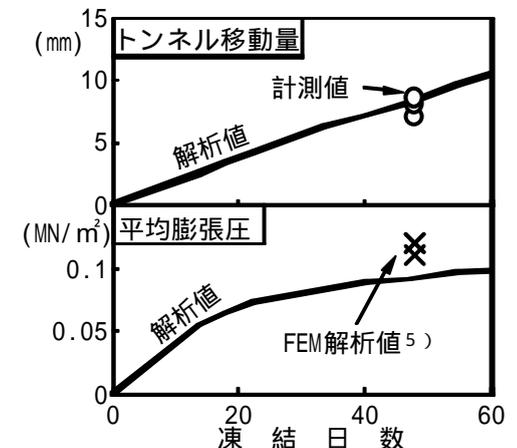


図5 凍結工現場解析結果