

接続防護凍土壁のFEM解析による 設計法の検討

Study of Design Method by Finite Element Analysis of Protective Frozen Soil Wall
for Jointing Underground Structures

吉田聡志¹・野口淳平²・伊豆田久雄³

Satoshi Yoshida, Jyunpei Noguchi and Hisao Izuta

¹ (株) 精研 凍結本部 (〒542-0066 大阪市中央区瓦屋町2-11-16)

E-mail:yosida.sato@seikenn.co.jp

² (株) 精研 東京支店 凍結本部 (〒112-0002 東京都文京区小石川1-12-14)

³ 正会員 工博 (株) 精研 凍結本部 (〒542-0066 大阪市中央区瓦屋町2-11-16)

In the protecting ground freezing construction work for jointing underground structures, the application of the existing design method may need thick frozen soil walls. These bring large cost and period for construction. Solving the problem demands investigation of the new design method to enable safe and thinner frozen soil wall.

This paper showed the results of study for the design method using 3D finite element analysis on the fixed cylinder model, simulating in situ protective frozen soil wall on the shape. In conclusion the fixed cylinder model is located between fixed beam and unfixed cylinder model.

Key Words : frozen soil wall , fixed cylinder , finite element analysis, design method

1. はじめに

シールドトンネルと立坑等との接続工事における安全確実な補助工法として、接続部の周囲に円筒形状の凍土壁を造成する地盤凍結工法が採用される場合がある(図-1, 2)。大深度あるいは塩分による強度低下を含む地盤での接続工事において、現行の設計法をそのまま適用すると大きな壁厚の

凍土が必要となる場合があり、工期増大やコスト高および凍結膨張圧の増加をまねくことがある。

これらの解決のためには、安全性を確認した上で凍土厚みを減少させる事が必要である。現行設計における凍土壁の力学モデルとしては、トンネルと立坑等との離隔が小さい場合には両端固定梁モデルを、離隔が大きい場合には薄肉リングモデル(端部が自由に変位できる薄肉の円筒モデル)を採用している。一方、現場の円筒凍土壁はトンネ

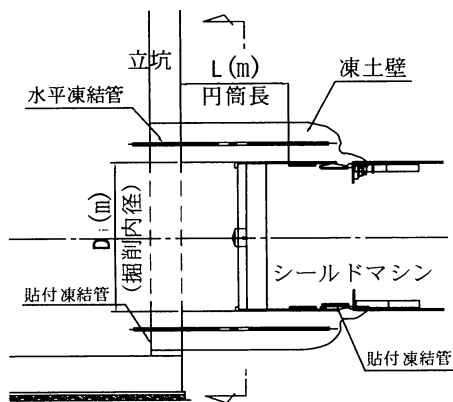


図-1 接続防護凍結工事の施工図の一例

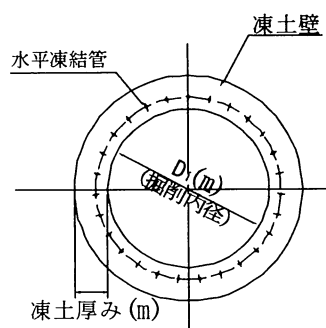


図-2 接続防護凍結工事の円筒凍土壁断面図

ルや立坑等の構造物との取付け部で固定された厚肉の円筒モデルに近いと考えられる。そこで、両端固定厚肉円筒モデルにおいて三次元FEM解析^{1),2)}を用いた設計法を検討した。

2. 凍土壁の応力計算手法と現行設計法

現行の設計法で採用されている両端固定梁モデル(以下、固定梁と呼ぶ)および薄肉リングモデル³⁾と、次章で応力比較を行う厚肉リングモデル⁴⁾、検討している新たな設計法で採用する両端固定厚肉円筒モデル(以下、固定厚肉円筒と呼ぶ)を表-1に比較した。ここでリングと呼んでいるのは、固定厚肉円筒に対して端部が自由に変位できる円筒のことである。なお、現行設計の薄肉リングモデルによる設計法は、セグメントの設計等で用いられている慣用計算法⁵⁾を採用している。

現行設計法における必要凍土厚み t の決定手順を図-3に示す。図中のSF(全体安全率)には、凍土の物性値等の材料の安全率、凍土壁に作用する外

力等の条件上の安全率に、大きな計算上の安全率を加えて設定しており、通常はSF=2.0で、特殊な条件ではSF=2.5としている場合もある。

構造物間の離隔が大きい場合に現行設計法で採用される薄肉リングモデルは、セグメント設計で用いられており、円筒の半径に対してその厚みが非常に小さい場合に適用されるものである。しかし、凍土壁のように厚みが大きい場合に薄肉リングモデルを適用すると、厚肉リングモデルに比べて小さめの応力値が算定される(後述する図-6~8参照)。薄肉リングで小さめの応力値となるのは、厚みの影響が考慮されないためであり、図-4に示したように外力の作用範囲が過少になること等で生じる。そのため、現行設計で薄肉リングモデルの慣用計算法を用いて必要凍土厚みを決める場合には、大きな計算上の安全率が必要であり、SF=2.0(2.5)となっている。

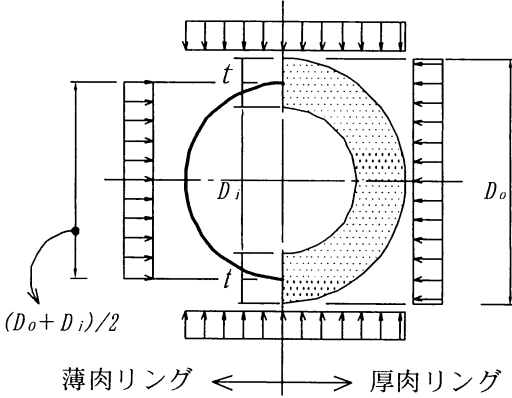


図-4 外力の作用範囲の比較

表-1 検討モデルの種類

検討モデル	解析方法	備考
固定梁	理論解析	} 現行設計 (慣用計算法)
薄肉リング	理論解析	
厚肉リング	理論解析	
固定厚肉円筒	FEM解析	新たな設計法

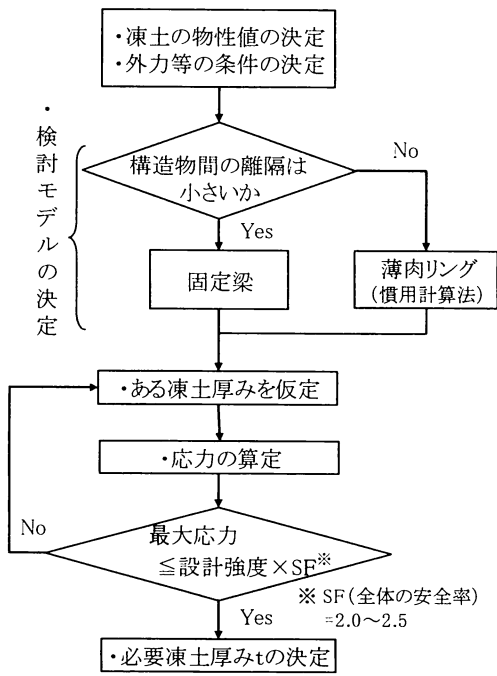
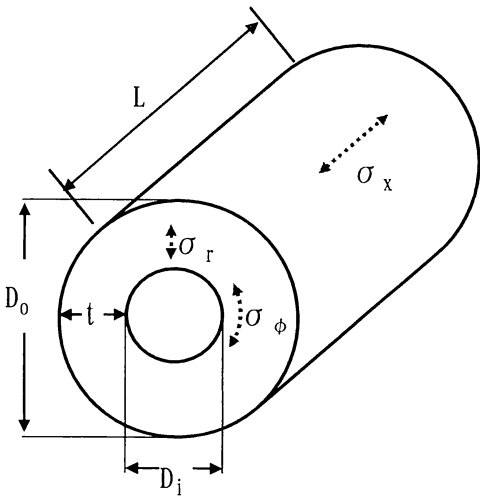


図-3 現行設計法における必要凍土厚みの決定手順



D_i:内直径, D_o:外直径, L:円筒長, t:凍土厚み
σ_φ:円周方向応力, σ_x:円筒軸方向応力
σ_r:半径方向応力, 応力値符号: -は圧縮

図-5 固定厚肉円筒の寸法および応力種類と名称

3. 固定厚肉円筒モデルによる応力分布の検討

(1) 計算条件

等分布荷重が作用する固定厚肉円筒のFEM解の応力を、薄肉リング、厚肉リングおよび固定梁の解と比較した。検討する円筒の寸法は $D_i=4.0\text{m}$, $t=1.0\text{m}$ で、 $L=1.0\text{m}$, 2.5m , 4.0m , 6.0m , 10m の5種類とし、 -12°C の粘性土凍土を想定した変形係数 $E=4.83\times 10^5\text{kN/m}^2$, ポアソン比 $\nu=0.35$, 等分布荷重は $P=500\text{kN/m}^2$ とした。

固定厚肉円筒の寸法および応力の種類と名称を図-5に示す。

以下で、比較的円筒長が小さい $L=2.5\text{m}$ と、円筒長の大きい $L=6.0\text{m}$ の2種類について、円周方向と円筒軸方向の応力分布を示す。

(2) 円周方向の応力分布の比較

円周方向応力は、固定厚肉円筒と厚肉リングでは内縁に最大の圧縮応力が発生するため、内縁の円周方向応力 $\sigma_{\phi i}$ について従来の計算手法(薄肉リング)との関係を調べた。

図-6, 7は $L=2.5\text{m}$, 6.0m の場合の応力分布を薄肉および厚肉リングと比較したものであり、円周方向応力がゼロとなる固定梁の応力は比較対象から省いた。

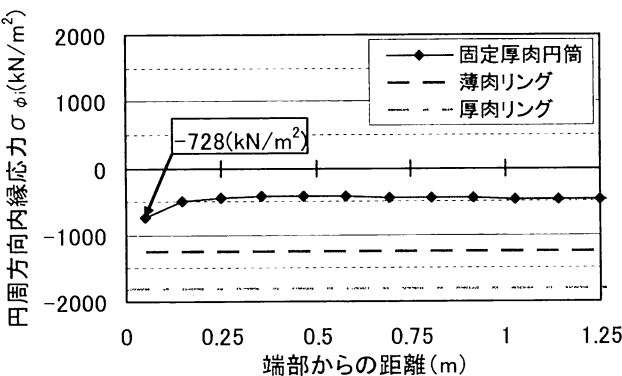


図-6 $L=2.5\text{m}$ での円周方向の内縁応力分布

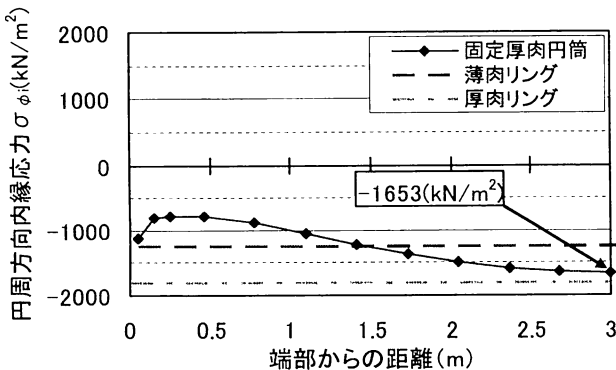


図-7 $L=6.0\text{m}$ での円周方向の内縁応力分布

ら省いた。

端部が自由に変位できる薄肉、厚肉リングの円周方向応力は、円筒長と端部からの距離に関係なく一定の応力であり、薄肉、厚肉の順にそれぞれ -1250kN/m^2 , -1800kN/m^2 であった。

固定厚肉円筒の円周方向の最大圧縮応力は、 $L=2.5\text{m}$ では端部で、 $L=6.0\text{m}$ では中央(端部から 3.0m)付近で発生し、円筒長が大きい $L=6.0\text{m}$ の応力値のほうが大きな値となっている。また、 $L=6.0\text{m}$ の最大圧縮応力は薄肉リングよりは大きく(薄肉リング $\times 1.32$)、固定厚肉円筒と同様の厚肉モデルである厚肉リングよりは少し小さい程度(厚肉リング $\times 0.92$)である。これより、 $L=6\text{m}$ の中央付近の応力には、端部の固定の影響がほとんどなく、厚肉リングとして検討しても大差はないことがわかった。

図-8に示した円筒長 L と最大圧縮応力との関係より、固定厚肉円筒の円周方向の内縁の最大圧縮応力は、 $L<6.0\text{m}$ までは直線的に増加するが、 $L\geq 6\text{m}$ ではほとんど変化しないことも確認された。

(3) 円筒軸方向の応力分布の比較

円筒軸方向の内縁応力 σ_{xi} と外縁応力 σ_{xo} について固定梁の応力分布と比較した。薄肉および厚肉リングの円筒軸方向の応力はゼロと考えるため、比較対象から省いた。

$L=2.5\text{m}$ の場合(図-9, 10)は、固定厚肉円筒と固定梁の応力は σ_{xi} , σ_{xo} ともにその分布形状が良く似ており、 σ_{xi} の端部に発生する最大の圧縮応力の値もほぼ同じである。しかし、 σ_{xo} の端部に発生する最大の引張応力の値は固定梁に比べてかなり小さい(固定梁 $\times 0.51$)。これは、厚みが考慮されない両端固定梁ではゼロになる圧縮軸力が、固定厚肉

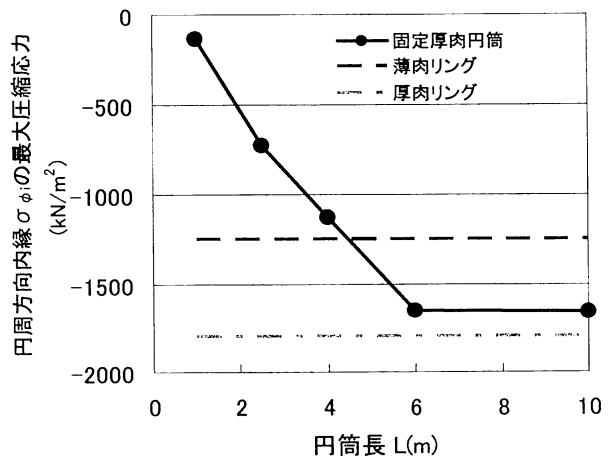


図-8 円筒長と最大圧縮応力の関係

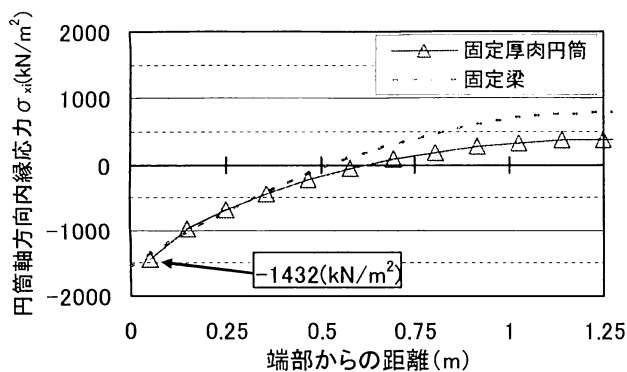


図-9 L=2.5m での円筒軸方向の内縁応力分布

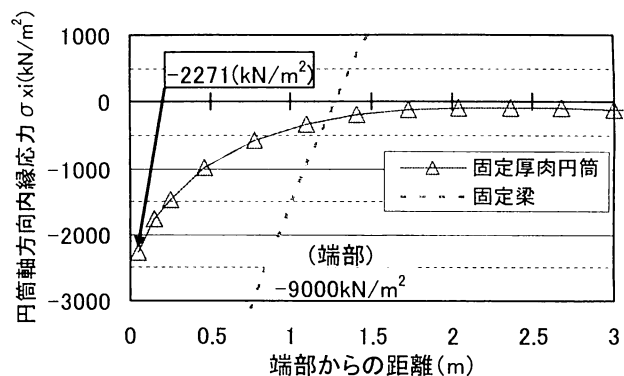


図-11 L=6.0m での円筒軸方向の内縁応力分布

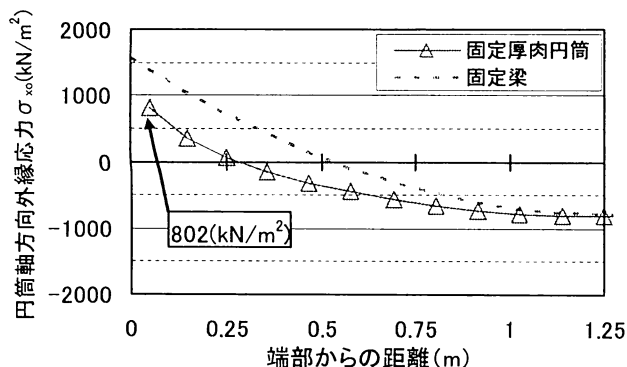


図-10 L=2.5m での円筒軸方向の外縁応力分布

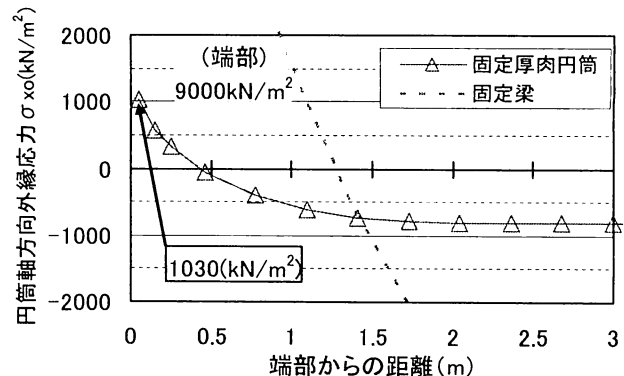


図-12 L=6.0m での円筒軸方向の外縁応力分布

円筒では発生するためである。

一方、 $L=6.0\text{m}$ (図-11, 12)でも、 σ_{xo} の端部で最大の引張応力が、 σ_{xi} の端部で最大の圧縮応力が発生し、固定梁の応力分布と同様の傾向は示しているが、その大きさは固定梁に比べて極端に小さい。これは、 $L=2.5\text{m}$ の場合に比べて円筒長が大きいためにリングとしての特性が強くなり、相対的に円筒端部の固定の影響が小さくなっているためと考えられる。

図-13は、 σ_{xo} 端部に発生する固定厚肉円筒と固定梁の最大の引張応力を、横軸に円筒長 L をとって整理したものである。固定梁では L の二乗に比例して最大引張応力が増加するのに対して、固定厚肉円筒の最大引張応力は $L<4\text{m}$ までは増加するが、 $L\geq 4\text{m}$ ではほとんど変化しなかった。また、固定厚肉円筒は、 L が小さくなるほど固定梁の最大引張応力に近づく傾向が確認された。 $L=1.0\text{m}$ の固定厚肉円筒の最大引張応力 82kN/m^2 が、固定梁の 250kN/m^2 の0.33倍と小さいのは、円筒長が非常に小さい場合でも、リングとして外力を受け持つために固定梁よりも強い構造になっているためと考えられる。

以上より、 $L\leq 4\text{m}(=Di)$ の範囲の固定厚肉円筒に発生する最大の圧縮、引張応力は、ともに現行設

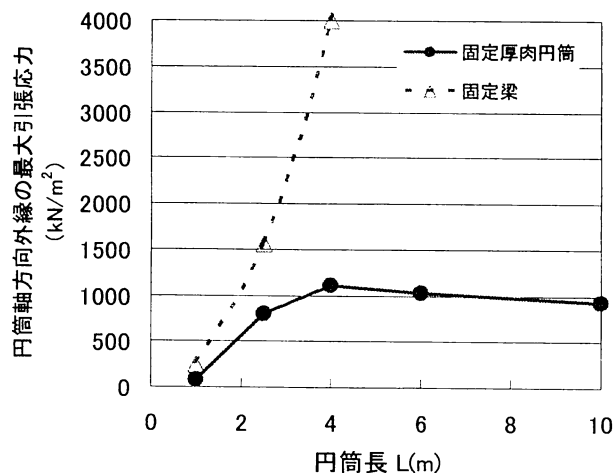


図-13 円筒長と最大引張応力の関係

計法のモデル(薄肉リング、固定梁)の応力値よりも小さくなることが確認された。固定厚肉円筒に発生する最大応力は、 L が大きい場合にはリング(薄肉および厚肉リング)に近く、 L が小さくなると固定梁に近づくことから、現行設計の薄肉リングモデルと固定梁モデルの中間のモデルとして固定厚肉円筒モデルを採用することが妥当であることが確認された。

別な見方をすると、現行設計法で円筒長が大きい場合に採用している薄肉リングモデルでの応力

値は、厚肉モデルに比べて小さめの値であるため、計算上の安全率を含む全体の安全率SFを2.0(2.5)としたことは妥当であったと考えられる。参考までに、 $L=6.0\text{m}$ の固定厚肉円筒と薄肉リングの最大圧縮応力を比較すると、固定厚肉円筒-2 271 kN/m^2 、($=\sigma_{xi}$ 端部 $>\sigma_{\phi i}$)は薄肉リング-1 250 $\text{kN/m}^2(=\sigma_{\phi i})$ の1.82倍であり、大きな計算上の安全率が必要であることがわかる。

4. 固定厚肉円筒モデルによる凍土厚みの設計法の検討

(1) 固定厚肉円筒モデルによる設計法

固定厚肉円筒モデルによる凍土厚みの設計では、接続防護部の凍土壁を内直径 $Di(\text{m})$ 、円筒長 $L(\text{m})$ の固定厚肉円筒にモデル化し、作用する外力は図-14の設計荷重を採用する。

FEM解析で得られた最大応力に対する設計強度 $\sigma_u(\text{kN/m}^2)$ の比である全体の安全率SFが適切な値になる凍土厚み t を、探り計算により求める(後述する図-17参照)。なおSFは、現場の凍土壁の状態に近い固定厚肉円筒モデルを採用したことで現行設計よりも小さくなる計算上の安全率に、材料や条件上の安全率を加えて設定する。

固定厚肉円筒凍土の応力照査は、圧縮せん断応力 $\sigma_{\tau \max}$ と固定端外縁付近に生じる最大引張応力 $\sigma_{b \max}$ との両方について行うものとする。

(2) 固定厚肉円筒モデルのケーススタディー

接続中心深度 $H_c=40\text{m}$ における接続防護部の凍土壁の円筒内直径を $Di=6.0\text{m}$ とし、円筒長 $L \leq 6.0\text{m}(=Di)$ の範囲で L を変化させて、凍土厚みごと

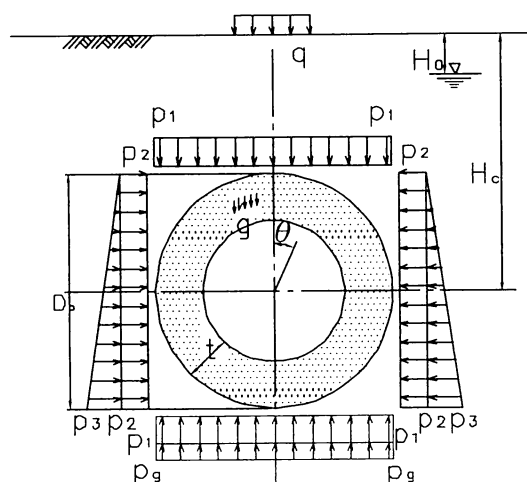


図-14 設計荷重

にSFを計算した。解析で入力する凍土の物性値は、 -12°C の粘性土凍土を想定した変形係数 $E=4.83 \times 10^5 \text{kN/m}^2$ 、内部摩擦角 $\phi=0$ 、ポアソン比 $\nu=0.35$ とし、圧縮せん断設計強度 $\sigma_{\tau u}=1\,700 \text{kN/m}^2$ 、曲げ引張設計強度 $\sigma_{bu}=2\,050 \text{kN/m}^2$ を用いた。

FEM解析結果の一例として、 $L=3.0\text{m}$ 、凍土厚みが 1.5m の固定厚肉円筒について、最大の曲げ引張応力および圧縮せん断応力が発生する位置の応力分布を図-15、16に示す。最大曲げ引張応力 $\sigma_{b \max}$ は、天端、端部外縁の円筒軸方向応力 $1\,134 \text{kN/m}^2$ であり、設計強度との比は1.8となる。最大の圧縮せん断応力 $\sigma_{\tau \max}$ は底、端部付近外縁で発生する -534kN/m^2 であり、同様に設計強度との比は3.2となる。よって円筒凍土壁のSF(全体の安全率)としては1.8が得られる。

同様の計算から凍土厚みが 0.6m 、 1.0m 、 1.2m の円筒凍土壁のSFは、0.60、1.14、1.41となり、SFと凍土厚みとの近似曲線(図-17)が得られる。これより、SF=1.0、1.1、1.2の場合の必要凍土厚み t は 0.90m (図中に表記)、 0.97m 、 1.04m と決めることができる。

円筒長 L を変えたいくつかの固定厚肉円筒のFEM解析結果にもとづき、前述した $L=3.0\text{m}$ の場合と同様の方法でSF=1.0、1.1および1.2の必要凍土厚み t を計算し、 L と t の関係を図-18に整理した。

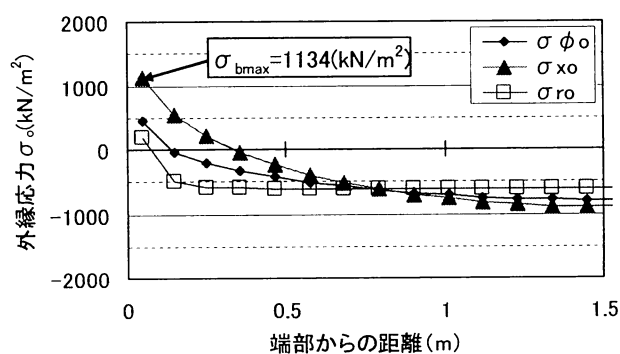


図-15 円筒天端部の外縁応力分布

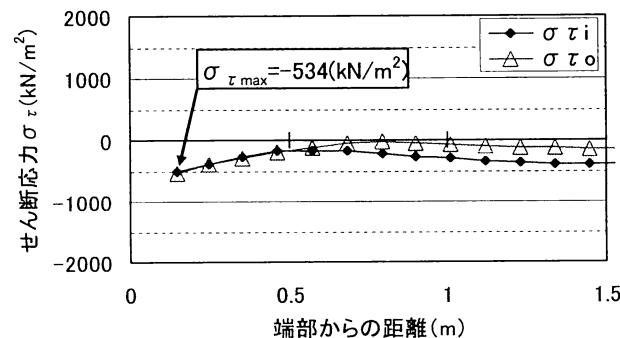


図-16 円筒底部の圧縮せん断応力分布

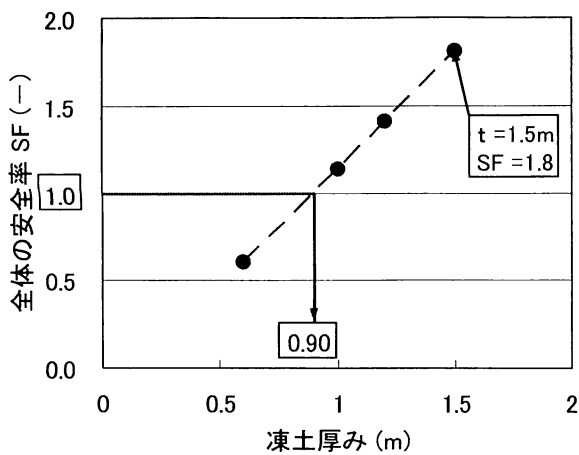


図-17 凍土厚みと全体の安全率 SF の関係

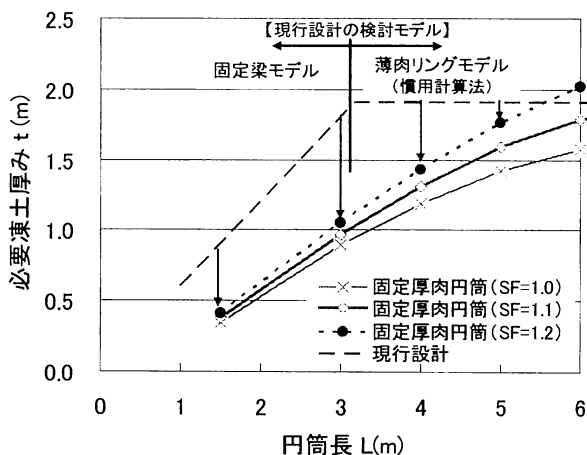


図-18 円筒長 L と必要凍土厚み t の関係
(固定厚肉円筒と現行設計との比較)

図中には、現行設計(固定梁または薄肉リングモデルの慣用計算法に、計算上の安全率を含む全体安全率 $SF=2$ を用いる)で決められる必要凍土厚みを併記した。

$L < 3.2\text{m}$ では現行設計においては固定梁モデルが採用されるため、必要凍土厚み t は L が大きくなるにつれて直線的に増加する。 $L \geq 3.2\text{m}$ では薄肉リングモデルの慣用計算法が採用されるために、 L によらず t は一定の値となる。

一方、固定厚肉円筒のFEM解析で決まる t は L が大きくなるにつれて連続的に増加する。しかし、図-18には示していないが、固定厚肉円筒モデルの適用範囲外と考えている $L=10\text{m}$ 、 15m での $SF=1.1$ における t を試算すると、 $L=10\text{m}$ 、 15m ともに $L=6.0\text{m}$ の1.1倍程度であることから、 $L > D_i$ の場合には必要凍土厚みがほとんど増加せず、現行設計の t とほぼ一致することがわかった。これより、薄肉リングの慣用計算法による現行の設計法により、

現場の凍土壁の状態に近い固定厚肉円筒モデルと矛盾のない結果が得ることができ、またその凍土厚みは安全であることが確認された。

固定厚肉円筒のFEM解析の計算上の安全率を本来は1.0としてもいいが、メッシュの大きさによる誤差等を考慮して1.1とし、これに今後検討する材料や条件上の安全率を加えて全体の安全率を決めるものとする。円筒長 $L=6.0\text{m}$ における $SF=1.1$ の必要凍土厚みは、現行設計とほぼ同じ大きさであることから、たとえば $SF=1.2$ として固定厚肉円筒のFEM解析で必要凍土厚みを決定することは、現行設計との整合性がある。

$SF=1.2$ として必要凍土厚み t を決めた場合には、 $L=5\text{m}$ 、 4m 、 3m 、 1.5m の順に現行設計法の92%、75%、58%、46%の凍土厚みにできる(図-18中の下向き矢印)。なお管列凍結⁶⁾で造成される凍土壁内の温度分布は、薄い凍土壁においては特に顕著になるため、凍土壁内の温度分布の均一性と所定温度(本検討では -12°C)の確保のためには、計算で得られる t よりも厚い凍土壁の造成が必要な場合がある。

5. まとめ

地盤凍結工法で造成する凍土壁をモデル化した固定厚肉円筒モデルにおいて、三次元FEM解析を用いた新たな設計法を検討した。等分布荷重および設計荷重が作用する固定厚肉円筒モデルにおけるFEM解析から得られた結果は、以下のとおりであった。

(1) 円筒長 $L \leq$ 円筒内直径 D_i の範囲では最大の圧縮応力と引張応力は、現行設計法(薄肉リングと固定梁モデル)の応力値よりも小さかった。

(2) 最大応力は、 L が大きい場合にはリング(薄肉および厚肉リングモデル)に近く、 L が小さくなると固定梁に近づくことから、現行設計法の薄肉リングモデルと固定梁モデルの中間のモデルとして固定厚肉円筒モデルを採用することは妥当であることが確認された。

(3) 接続中心深度 $H_c=40\text{m}$ 、 $D_i=6\text{m}$ の計算結果より、 $L > D_i$ では必要凍土厚み t がほとんど増加せず、計算上の安全率1.1を考慮した t が現行設計とほぼ同じ大きさであった。これより、固定厚肉円筒モデルを採用した設計法と現行設計(薄肉リングの慣用計算法)との整合性が認められ、計算上の安全率 $=1.1$ が適切であることが示された。

(4) 固定厚肉円筒モデルをFEM解析する場合の全体の安全率SFは、計算上の安全率1.1に材料や条件上の安全率を加えたものと考えた。(3)の条件でたとえばSF=1.2として必要凍土厚み t を決めた場合には、現行設計法の46%～92%の凍土厚みにできる可能性が示された。

今後は、設計、施工条件等を考慮して適切な全体の安全率を検討する。また、固定端付近の凍土厚みが他の部分よりも大きい場合などの詳細な凍土形状での検討を行い、本設計手法による安全で薄い凍土壁での施工を目指す予定である。

参考文献

- 1) Segerlind, L.J. 川井忠彦監訳：応用有限要素解析，丸善，p.418，1982.
- 2) 伊豆田久雄，山本英夫，生頼孝博：シールド発進で造成される円板凍土の強度特性に関する室内実験，土木学会論文集，No.454/Ⅲ-20,447～454，1992.
- 3) 湯浅亀一：改訂材料力学(上巻)，コロナ社，p.319，1961.
- 4) 湯浅亀一：改訂材料力学(中巻)，コロナ社，p.415，1964.
- 5) 土木学会：セグメントの設計，トンネルライブラリー第6号，pp.36-39，1994.
- 6) 戸部暢，秋元攻：凍土内温度分布計算式とその応用，冷凍，第54巻，第622号，pp.3-11，1979.