ＦＥＭ解析による曲線形凍土と直線形凍土の内部応力の比較

（株）精研　　○正会員　隅谷大作
（株）精研　　正会員　上田保司
（株）精研　　正会員　松岡啓次

１．はじめに

シールドトンネル間の拡幅を，曲線形凍土による凍結工法（以下，曲線凍結）で施工することが考えられる．曲線凍結の場合，従来の凍結工法（以下，直線凍結）より，必要凍土厚や凍結土量の削減等のメリットが期待できる．反面，曲線形凍土内部に過大な応力が発生するデメリットの可能性も考えられる．そこで本報では，２次元弾性ＦＥＭによって曲線凍結と直線凍結のモデル解析を行い，両者を比較した．

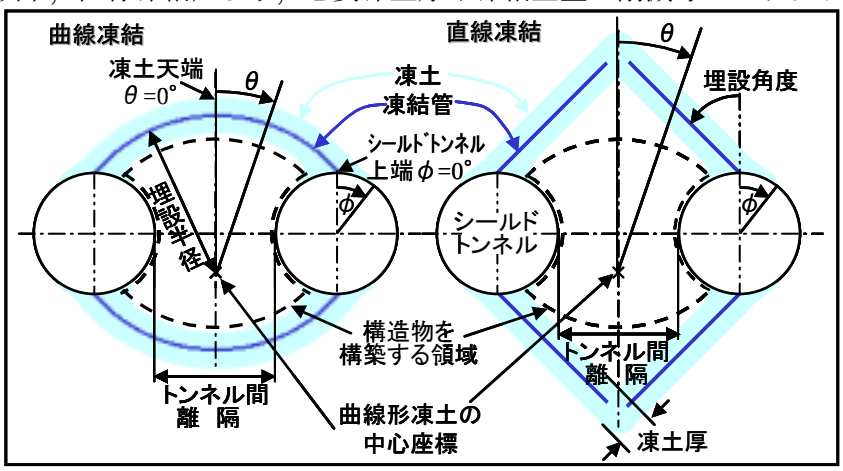

図１　シールドトンネル間の拡幅モデル

２．解析モデル及び条件

図１に示すシールドトンネル間を拡幅するモデル解析を行った．曲線凍結と直線凍結の凍結管埋設はシールドトンネルの上下端からとし，シールドトンネルの外径及びトンネル間の離隔は両者とも同一とした．また，拡幅後に構築する構造物の高さをシールドトンネル外径の 1.3 倍とし，凍土を掘削しない条件で曲線凍結の埋設半径と直線凍結の埋設角度を決めた．解析は，曲線凍結と直線凍結それぞれについて，凍土厚が 1.0m と 2.0m の計４ケースとした．シールドセンターが GL-25m に相当する荷重が凍土に作用した状態から，掘削完了時点を想定して，凍土とシールドトンネルによって囲まれた未凍土の領域を瞬時に取り除いたときに発生する凍土内の応力を調べた．なお，解析モデルが左右対称のため，図２に示すＦＥＭのメッシュは片側半分とした．解析に用いた諸数値を表１に示す．

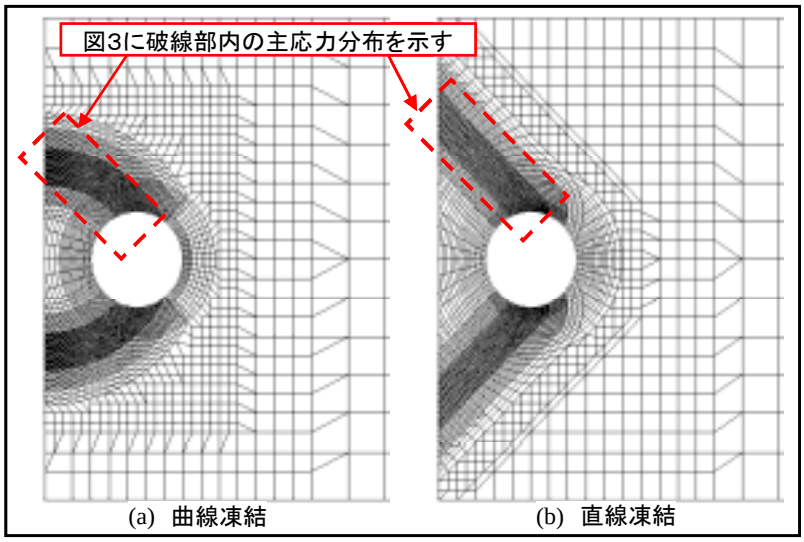

図2　FEMメッシュ図

表１　FEM解析に用いた諸数値

曲線凍結	直線凍結
・凍結管　埋設半径　13.0m	・凍結管　埋設角度　45°
・シールドトンネル上下端より埋設	・シールドトンネル上下端より埋設
・凍土厚　1.0m or 2.0m	・凍土厚　1.0m or 2.0m
未凍土	凍土
・湿潤密度　1.6t/m^3	・湿潤密度　1.6t/m^3
・弾性係数　4.0MN/m^2	・弾性係数　1.0×10^{3}MN/m^2
・ポアソン比　0.4	・ポアソン比　0.3
シールドトンネル	
・外径　10.0m　・離隔　10.0m	・中心の深度　GL-25.0m
・弾性係数　2.1×10^{5}MN/m^2	・断面２次モーメント　8.9×10^{-4}m^4/m

３．解析結果

図２の破線領域内の凍土の主応力分布を，図３に示す．曲線凍結及び直線凍結ともに，シールドトンネルと接する付け根部分では圧縮応力が発生している．その他の部分では，外縁側に圧縮応力，内縁側に引張応力が発生している．た

凍結，有限要素法，曲線，凍土
〒542-0066 大阪市中央区瓦屋町２丁目 11 番 16 号（株)精研　TEL:06-6768-5031　FAX:06-6768-1508

だし，直線凍結の場合，凍土天端付近では外縁側が引張，内縁側が圧縮となっている．また，いずれのケースでも凍土に発生する主応力は外縁及び内縁で大きく，凍土の内部ほど小さい．

図４に示すように，曲線凍結と直線凍結の主応力分布を外縁及び内縁で比較した．ここで，角度θは，図１に示すように，凍土天端を 0 ℃とする角度である．図４左の凍土厚が 1.0m の場合，曲線凍結では，外縁の 0 ℃で圧縮応力が最大，内縁の 0 ℃で引張応力が最大となる．一方，直線凍結では，曲線凍結とは逆に，外縁の 0 ℃で引張応力が最大，内縁の 0 ℃で圧縮応力が最大となる．ただし，直線凍結の 30 ℃付近では，外縁と内縁の応力が 0 ℃とは逆になる．凍土厚が 2.0m の場合（図４右）も，外縁と内縁に作用する主応力分布の傾向は，凍土厚 1.0m の場合とほぼ同じである．つまり，曲線凍結及び直線凍結とも，最大圧縮応力及び最大引張応力は 0 ℃すなわち凍土の天端で発生する．最大引張応力は曲線凍結と直線凍結に大きな差は見られないが，最大圧縮応力は曲線凍結の方が直線凍結より小さく，安全側であると思われる．また，曲線凍結と直線凍結ともに凍土厚 2.0m の方が 1.0m よりも圧縮応力及び引張応力とも小さくなる傾向から，凍土が厚いほど安全側であるといえる．

図５にシールドトンネルと凍土との接合面（凍着面）に作用する剪断応力と垂直応力の分布を示す．ここで，角度φは，図１に示すように，シールドトンネル上端を 0 ℃とする角度である．図５左の凍土厚が 1.0m の場合，剪断応力は曲線凍結の方が直線凍結よりも小さく，垂直応力は曲線凍結の方が直線凍結よりも大きい．これは凍土厚が 2.0m の場合（図５右）も同様である．剪断応力の小さい曲線凍結の方が，直線凍結よりも凍着確保のためには有利であると考えられる．また，垂直応力が大きいほど凍着強度が大きくなる[1]ことがわかっているので，垂直応力の大きい曲線凍結の方が，直線凍結よりも凍着強度が増加すると考えられる．

４．まとめ

曲線凍結と直線凍結の比較結果を列挙する．

- 最大引張応力は両者に差が見られないが，最大圧縮応力は曲線凍結の方が直線凍結よりも小さく，安全側である．
- 曲線凍結では，直線凍結に比べ接合面（凍着面）に作用する剪断応力が小さく，凍着確保の上で有利である．また，垂直応力の大きい曲線凍結の凍着強度は，直線凍結よりも増加すると考えられる．

文献　1）森内他：凍着剪断強度に及ぼす垂直方向応力の影響，雪氷全国大会講演予稿集，pp.195，2002.

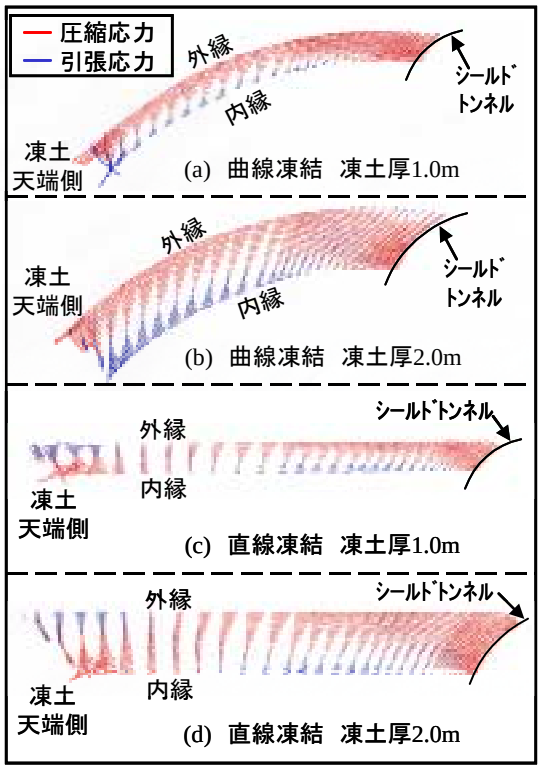

図3　凍土内の主応力分布

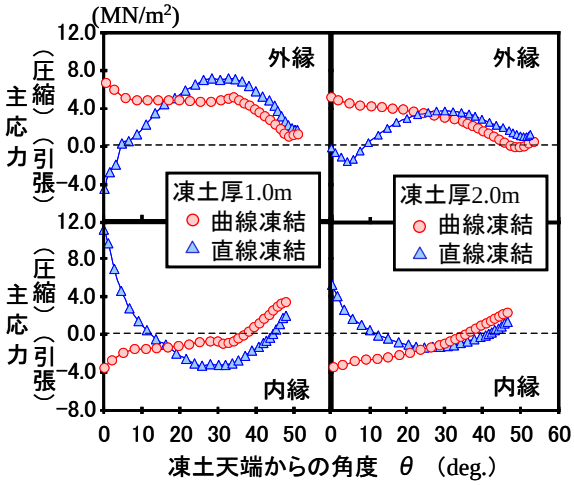

図4　外縁及び内縁の主応力分布

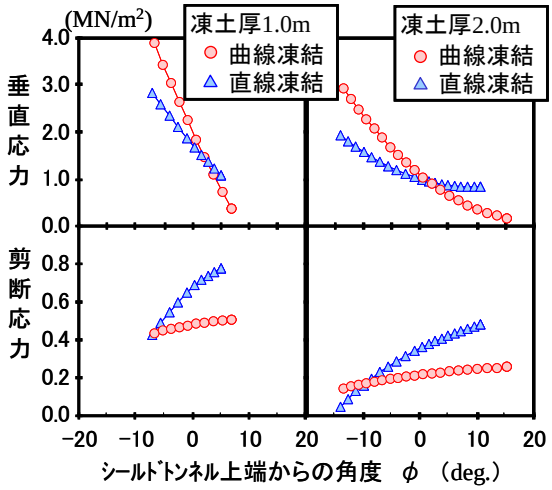

図5　シールドトンネルと凍土との接合面（凍着面）に作用する剪断応力と垂直応力分布