

SENS における切羽周辺の一次覆工挙動に関する数値解析

長岡技術科学大学 地盤工学研究室 岩田諒介

指導教員 杉本光隆

1. はじめに

新しいトンネル構築工法である SENS は東北新幹線(八戸～新青森間)の三本木原トンネルで世界で初めて採用され、シールド機を用いて高速掘進を行いつつも、全体的に大きなトラブルはなく、工事費を NATM と同程度に抑えられたことから、安全性、施工性、経済性に優れた工法であることが実証された。¹⁾しかし、三本木原トンネルでは、ライニング縦断方向に斜めひび割れが内型枠脱型時からすでに発生しており、さらに、ひび割れからの地下水が漏水が確認された。²⁾ひび割れ発生の原因は、未固結の一次覆工コンクリート中にある内型枠が、シールド機から離れるに従って浮上することと考えられている。

ひび割れの発生を極力抑え、より健全な覆工を構築するためには、内型枠とライニングの挙動メカニズムおよびひび割れ発生メカニズムを解明する必要がある。そこで、本研究では、SENS における内型枠とライニングの挙動メカニズムの解明を目的として、上記の特徴を有した三次元解析モデルを開発する。そして、津軽蓬田トンネルの施工条件をもとに三次元解析を行い、現場計測結果と比較検討を行うことによって、その妥当性を検討する。

2. 解析モデル

2.1 解析モデル概要

本解析モデルでの内型枠および内型枠間継手の要素構成は、内型枠を地盤ばねによって支えられるシェル、内型枠のリング間継手を軸方向ばねとせん断ばね、内型枠間継手を回転ばね、シールドマシンと内型枠間のテールシールを圧縮ばね、また、内型枠の周面摩擦を表現するために、一次覆工コンクリートが固体状態の区間には、内型枠と

地盤の間にインターフェイス要素を設定した。解析モデルを図 1 に示す。ここで、 L_S はシールドマシンの長さ、 L_{GROUT} は一次覆工コンクリート未固結区間の長さ、 L_{GROUND} は一次覆工コンクリート硬化区間である。

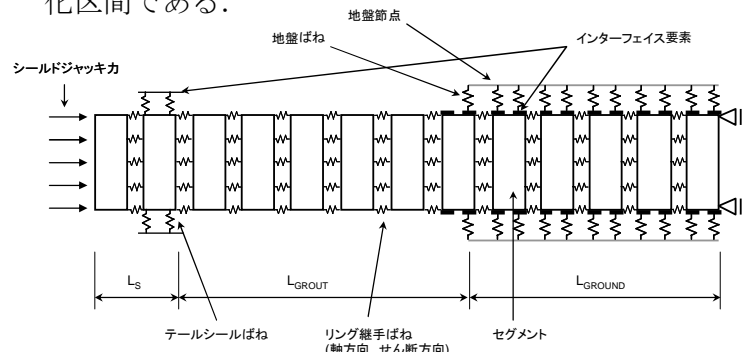


図 1 逐次解析用モデル概要図

2.2 SENS の施工過程

(1) 全周地盤ばねモデル

覆工をばねでモデル化し、覆工は全周に配置された法線方向地盤ばねで支えられるようにモデル化を行う。したがって、内型枠の上方への剛体変位を表現できる。

(2) 地盤反力曲線による主働側の土圧の評価

周辺地盤は軟岩であることから、トンネル掘削面の初期変位やトンネル掘削面と覆工の相対変位により土圧が減少したり、地山が自立し、土圧が 0 となることもある。そこで、地盤変位と土圧係数を 2 本の双曲線関数により表すことで主働側の土圧を評価する。

(3) 一次覆工コンクリートの硬化過程

SENS はシールド工法と異なり、場所打ちコンクリートを打設することで覆工を構築する。打設直後の一次覆工コンクリートは液体とみなせるが、時間経過とともに硬化が始まる。このような一次覆工の硬化過程を逐次解析で表現するために、コンクリートが打設されてからの経過時間に応じた

ヤング係数を設定できるモデルを構築する。

(4)コンクリート打設圧

内型枠の浮き上がりの要因は、覆工コンクリート打設後から硬化までの間に、コンクリート比重による内型枠上下端での圧力差が生じ、この圧力差が上向き荷重として内型枠に作用すると考えられている。そこで、未固結の一次覆工コンクリート中の内型枠に打設圧を作用させることができるモデルとする。

2.3 逐次解析

SENS のトンネル覆工は、セグメントを用いる代わりに、一次覆工コンクリートを内型枠と地山との間に打設し構築する。一次覆工コンクリートは打設されると、水和反応により凝結が始まり、液体状態から固体状態に移行し、硬化に伴い強度が増加していく。本解析モデルでは、シールド機の掘進に伴う一次覆工コンクリートの硬化過程を表現するために逐次解析を行った。

逐次解析モデルのモデル概要図を図2に示す。図中の経過時間はコンクリートが打設されてからの時間を、数字は覆工のリングナンバーを示している。本解析では、未固結のコンクリートおよび硬化が始まったコンクリート中にある内型枠の挙動を表現するために、図中に示すように、一次覆工コンクリートの性状を固体状態と液体状態の2つに分けてモデル化を行い、解析を行った。

(2)打設圧作用区間

一次覆工コンクリートが液体状態の内型枠には、周辺地盤からの有効土圧が作用せずコンクリート打設圧のみが作用するため、地盤ばね要素は設置していない。液体区間の内型枠要素には、トンネル半径方向にコンクリート打設圧を作用させた。

本解析モデルでは、シールド機が連続掘進している状態でのモデルを表現している。そこで、施工ステップが進むごとに一次覆工コンクリートが液体状態の区間を切羽側に進めている。一次覆工コンクリートの硬化が始まるまでの時間である12時間であるため、打設圧が作用する液体区間は内型枠6リング分とした。この打設圧作用区間6リング分より切羽側の内型枠は、組立て前であるため自重を0とした。

(3)土水圧作用区間

一次覆工コンクリートが硬化を始めると、内型枠に土圧が作用する。土水分離方式(砂質土)の場合は、地盤ばね要素に有効土圧をプレストレスとして作用させ、別途、内型枠要素に水圧を荷重として作用させる。土水一体方式(粘性土)の場合は、地盤ばね要素に全土圧をプレストレスとして作用させる。

一次覆工コンクリートが固体状態の場合の内型枠には、一次覆工コンクリートを介して周辺地盤からの土水圧が作用する。そこで、内型枠要素の外側に設置した地盤ばねには、一次覆工コンクリートの打設からの経過時間に応じたヤング係数を考慮しなくてはならない。そこで、打設からの経過時間に応じた一次覆工コンクリートばねと地盤ばねを直列に配置したと仮定して、両者のばね値を足し合わせることで、一次覆工コンクリートの硬化過程を考慮した。そして、施工ステップが進むごとに、それぞれの一次覆工コンクリートのヤング係数を更新することで逐次解析を行った。なお、津軽蓬田トンネルの施工データより、覆工1リングの掘進・組立時間が2時間であることより1ステップごとの経過時間は2時間と設定した。

一次覆工コンクリートのヤング係数の経時変化は、コンクリート試験の結果より求めた近似式(ヤング係数-材齢関係)より設定することとした。この近似式より求まるコンクリートのヤング係数をばね値に換算し、内型枠全周に配置した地盤ばねのばね値に足し合わせる。

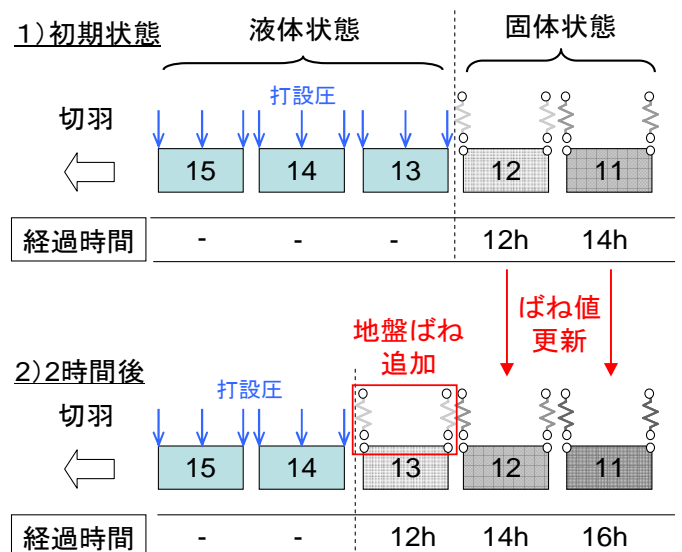


図2 逐次解析モデル概要図

3.現場への適用

本研究で開発した SENS の施工過程を考慮した三次元解析モデルに、津軽蓬田トンネルの現場データを用いて解析を行った。津軽蓬田トンネル施工条件の諸元は以下のとおりである。

- 1)トンネル外径 : $\phi 11,300\text{mm}$
- 2)シールド機外径 : $\phi 11,300\text{mm}$
- 3)施工延長 : $L=6,190\text{m}$
- 4)平面線形 : 直線
- 5)縦断線形 : 最大勾配 20.8%
- 6)土被り : 約 90m
- 7)地下水位 : 土被りとほぼ同じ

4.解析結果

4.1 内型枠法線方向変位

図3(天端)および図4(スプリングライン)に施工ステップごとの内型枠法線方向変位を示す。横軸は内型枠最後尾からのトンネル軸方向距離である。なお、施工ステップは、1ステップ2時間とし、一次覆工コンクリート打設直後から打設12時間後の6ステップ分を示している。また、内型枠外側への変位を+としている。

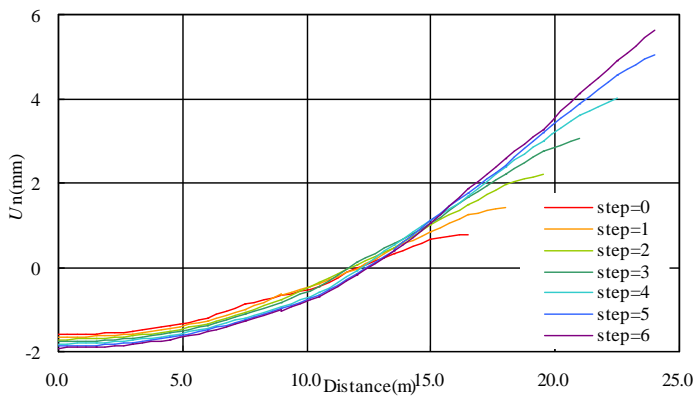


図3 法線方向変位(天端)

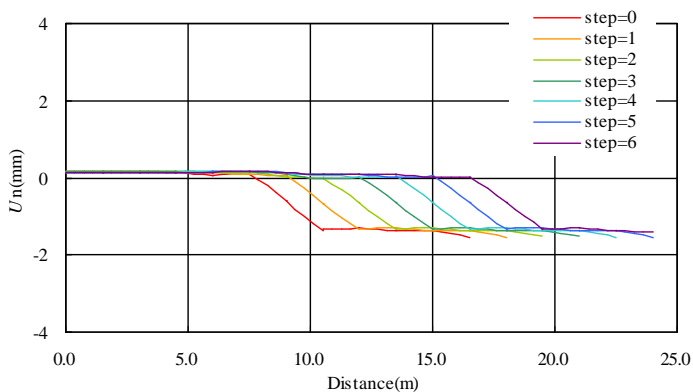


図4 法線方向変位(スプリングライン)

図3、図4より以下のことがわかる。

- ①最後尾の内型枠リング(トンネル軸方向距離 0m地点)では、天端および底部に 1.5mm 内側の変位が生じた。
- ②内型枠が切羽側に進むにつれて、上方に剛体変位し、施工ステップが進むごとにその傾向は大きくなる。
- ③一次覆工コンクリートが固体区間において、内型枠天端および底部では、トンネル切羽に近づくにつれて緩やかに上方に変位する。
- ④また、固体区間では内型枠天端および底部で内側に変位し、スプリングラインではほとんど変位はみられない。
- ⑤スプリングラインでは、液体区間で内側に 1.5mm 変位する。

これらは、以下のためと考えられる。

- ①施工ステップの進捗に伴い、一次覆工コンクリートの性状が液体状態から固体状態に変化すると、天端と底部でトンネル内側に変形し、スプリングラインではほとんど変形しない傾向を示す。これは、液体区間と固体区間での内型枠に作用する荷重の分布形状の違いに起因する。液体区間では、静水圧と同様の分布形状を示すコンクリート打設圧が作用するため、内型枠は真円に近い形状を示す。固体区間では、周辺地盤からの土水圧が作用するが、今回の解析では、N 値から非常に密な砂質土として水平土圧係数を 0.45 と設定しており、鉛直方向の土圧に対し、水平方向の土圧の値が小さいため、内型枠は横長となり、内型枠は天端と底部でトンネル内側に変形し、スプリングラインではほとんど変形しなかった。したがって、施工過程の進捗に伴う、施工時の荷重の変化を三次元的に表現できるモデルである。

- ②天端および底部とスプリングラインで法線方向変位の挙動を比較すると、スプリングラインの液体区間では、打設圧による内側への変位が生じたあと一定となるのに対し、天端および底部では、上方への変位が連続的に生じている。さらに、この上方への変位はコンクリート打設圧が作用する区間から顕著となる。したがって、コンクリート打設圧の天端と底部の差圧による浮き上がりが表現できている。

③一次覆工コンクリートが固体の区間において、内型枠天端および底部で、トンネル切羽側に近づくにつれて緩やかに上に変位している。これは、一次覆工コンクリートが液体の区間において、一次覆工コンクリート打設圧の天端と底部の差圧により、内型枠が上方に剛体変位したままで、次のステップにおいて、周辺の一次覆工コンクリートが固化したことを表している。したがって、本解析では前のステップの変位等の影響を次のステップに取り込むことができている。

4.2 計測値との比較

津軽蓬田トンネルの現場現場計測値は、比較対象断面(1617リング)組立時を初期計測値¹⁰⁾とし、テール脱出6リング後の経時変化である。また、現場計測データの総推力とジャッキパターンから、ジャッキ推力を算出し、各施工ステップの先端にジャッキ推力を荷重として作用させた。さらに、テールシールばねは、非線形ばねで表すことにより、シールドマシンと内型枠の相対変位を考慮できるので、相互作用をより正確に評価できる。

比較対象断面の計測値と解析値を図5に示す。なお、変位は100倍して表示している。

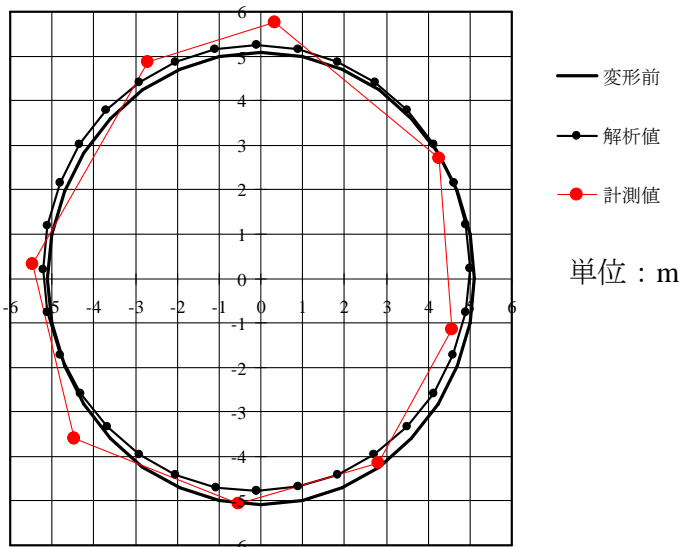


図5 計測値との比較

表1 計測値と解析値の比較

1617リング		解析値	計測値
天端変位量		+1.5mm	+7.0mm
剛体変位	鉛直方向	+2.2mm	+3.5mm
	水平方向	-1.0mm	-4.5mm

計測値と解析値の比較を表1に示す。これらは、以下のためと考えられる。

- ①内型枠に作用するコンクリート打設圧の天端と底部の差圧によって、内型枠の上方への剛体変位を表現できた。
- ②現場計測値から算出したジャッキ推力を考慮することによって、左側への剛体変位を表現できた。
- ③鉛直方向、水平方向ともに解析値が計測値より小さくなったことから、地盤ばねが実現場よりも大きく設定されていた可能性がある。

参考文献

- 1) 飯田廣臣：含水未固結地山におけるシールドを用いた場所打ち支保システムに関する研究，pp.89~90，2008。
- 2) 社団法人日本トンネル技術協会：北海道新幹線(本州方)トンネルの設計施工の研究 報告書，pp.3-40~41，2009。