

### SENS の一次覆工挙動に関する研究

長岡技術科学大学 学生会員 ○NGUYEN DUC TAM, 黒橋群, CHAIYAPUT SALISA  
正会員 杉本光隆, 玉井達毅

#### 1. はじめに

SENS で施工されたトンネルでは, 未固結な一次覆工コンクリート(以下, 一次覆工)中の内型枠がシールド機から離れるに従って浮き上がる現象が確認されている。これは, 内型枠が未固結な一次覆工による浮力によって, 上方に剛体変位したためと考えられる<sup>1)</sup>。さらに, 一次覆工は内型枠が浮き上がった状態で打設圧力を受けながら硬化した後に, 地山からの有効土圧を受ける。この有効土圧は, 切羽前方変位やトンネル掘削面と内型枠や一次覆工との相対変位により減少したり, 地山が自立し 0 となっていることも考えられるが, 現行の解析法ではこうした現象を表現できない。

そこで本研究では, 一次覆工の挙動に着目し, 覆工の剛体変位, 内型枠の脱型後も含めた一次覆工の硬化過程, 主働側の土圧や地山の自立が表現可能な, SENS の荷重条件と施工過程を考慮した三次元解析モデルを開発し, SENS で 2 例目の施工となった北海道新幹線津軽蓬田トンネルの現場計測データを用いて同手法の妥当性を検証した。

#### 2. 解析モデル

##### 2. 2 解析モデル概要

本研究の 3 次元解析モデルの概要を図 1 に示す。本解析モデルでは, 地盤を覆工全周に配置させた法線方向地盤ばね, 内型枠と一次覆工を一体としたシェル要素, 覆工のリング間継手を軸方向ばねとせん断ばね, 覆工間継手を回転ばねで表現した。また, シールドマシンテール部と覆工の競りを表現するためにテールばねを, 内型枠と一次覆工との周面摩擦を表現するために, 一次覆工が固体状態の区間には, 覆工と地盤ばねの間にジョイント

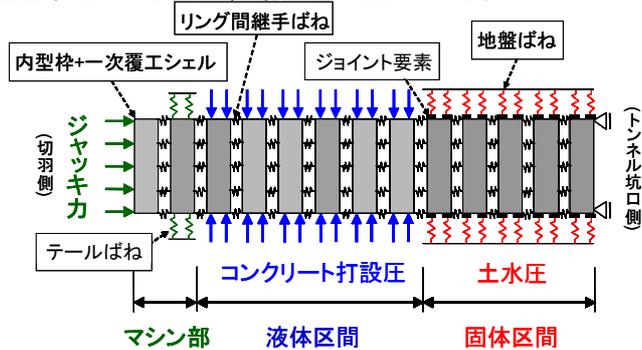


図 1 解析モデル

要素を設定した。覆工に作用させる荷重は, 先端のシェルヘジャッキ力, コンクリート液体区間でコンクリート打設圧, 固体区間で土水圧である。地盤ばねの性状には, 周辺地盤が比較的硬質な地山であることから, 切羽前方変位やトンネル掘削面と覆工の相対変位による土圧減少, 地山の自立を評価できる地盤反力曲線<sup>2)</sup>を適用した。

#### 2. 2 逐次解析

##### (1) 一次覆工コンクリートの硬化過程

一次覆工が固体状態の場合, 一次覆工と内型枠が一体となって土水圧に抵抗する。そこで, 覆工を, 一次覆工と内型枠を一体とした合成シェル要素でモデル化し, ヤング率を経時的に変化させ, 一次覆工コンクリートの硬化過程と内型枠の脱型を表現した。なお, コンクリートのヤング率は, コンクリート打設後経過時間に応じたヤング係数(実験式)を用いて算定した。

##### (2) 逐次解析

図 2 は逐次解析のイメージを示したものである。内型枠 1 リング分の掘進・組立時間を 1 ステップとして, 施工ステップ毎に新たな内型枠を先端に設置し, コンクリート打設圧とテールばね, 地盤ばねを前方に 1 リング分移動させ, 各々のシェル要素に, その施工状態に応じた剛性を与えた。

#### 3. パラメータスタディ

##### 3. 1 解析ケース

地盤ばね特性の違いが一次覆工に与える影響は大きい。そこで, 表 1 に示すパラメータを変化させて解析を実施した。ここで, 初期変位とは, 初期トンネル掘削面と一次覆工・内型枠設置時の一次覆工外周面との距離である。

解析対象は, 津軽蓬田トンネルで実施した大土被り区間での計測断面(土被り約 90m)とした。

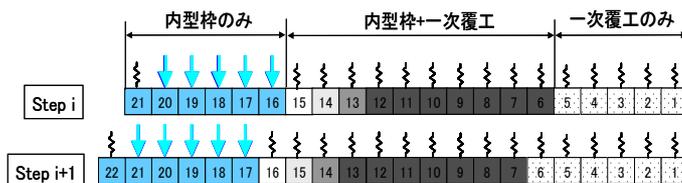


図 2 逐次解析

キーワード SENS, 3次元FEM解析, 逐次解析, 地盤反力曲線, 一次覆工コンクリート, 内型枠

連絡先 〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1 長岡技術科学大学 TEL 0258-47-6309

3. 2 解析結果

図3に、一次覆工の脱型前後における鉛直剛体変位(+:上向き)、軸力(+:圧縮)、曲げモーメント(+:負曲げ)、を示す。なお、用いたパラメータの値は、表1中の赤字の値である。これらより、以下のことがわかる。

(1) 一次覆工の変位

内型枠の脱型後は、脱型前と比較し法線方向内側への変形が進行する。これは、内型枠の脱型に伴って覆工の剛性が低下するためである。計測値も同様の傾向が見られ、解析値は計測値の傾向を表現できているといえる。

(2) 軸力

内型枠の脱型後は、軸力は減少傾向を示す。これは、覆工の法線方向内側への変形が進行することによる有効土圧の低下と、一次覆工の軸剛性の低下によるものと考えられる。

(3) 曲げモーメント

内型枠の脱型後は、曲げモーメントも減少傾向を示す。これは、覆工の曲げ剛性が低下するためである。計測値も同様の傾向となり、解析値と計測値の傾向はよく一致している。

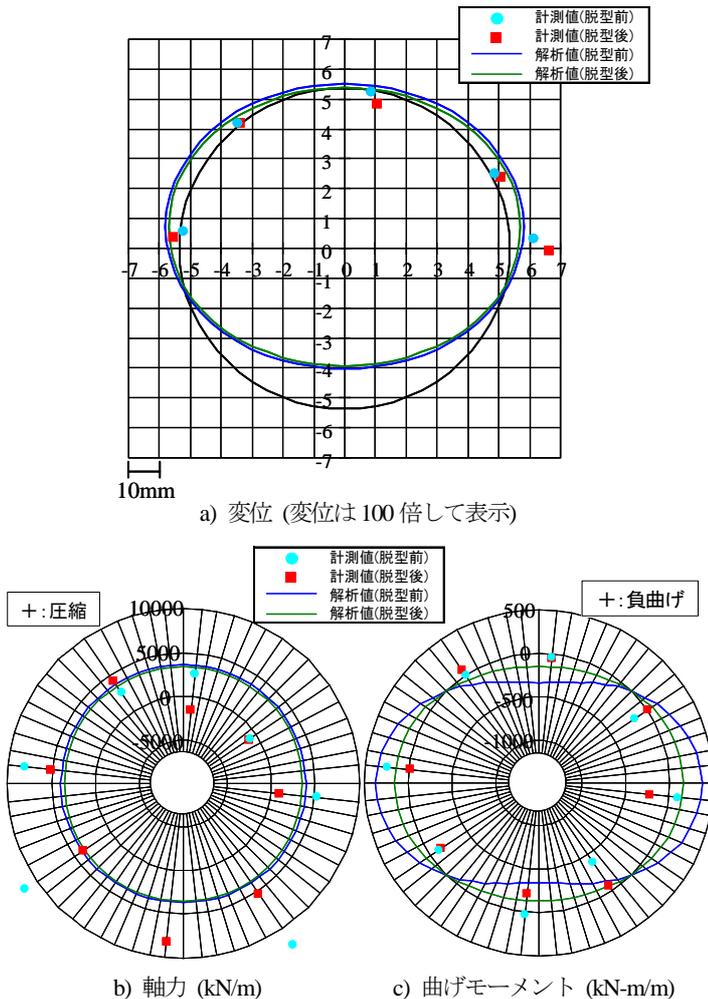


図3 一次覆工の変位・断面力(脱型前後)

3. 3 軸力・曲げモーメントの経時変化

図4に、トンネルのスプリングラインにおける軸力および曲げモーメントの解析値、現場計測値、等価軸剛性、等価曲げ剛性の経時変化を示す。用いたパラメータを図4の上に示す。この図より、軸力と曲げモーメントは、内型枠の脱型前にピーク値をとり、脱型後に低下する傾向を示すこと、解析値も同様の傾向を示すことがわかる。計測値を表す解析条件は  $k=100\text{MN/m}^3$ ,  $K_{h0}=0.75\sim 1.0$ ,  $u_{\text{init}}=5\text{mm}$  である。

4 まとめ、今後の展開

SENSの一次覆工の挙動について、内型枠の脱型後に至るまで把握・表現することができた。今後は、他の計測対象断面での本モデルの妥当性検証、地表面への影響も考慮したモデルへの改良などを行う予定である。

- 1) 玉井達毅, 阿部広明, 杉本光隆, 田中淳寛, 水原勝由, : シールドを用いた場所打ち支保システムの時系列三次元逐次解析手法による内型枠挙動の解明, 土木学会論文集 F1, Vol.70, No.3, I-17-I-28, 2014.
- 2) 岡崎麻里, 杉本光隆, Aphichat Sramoom : 地盤反力曲線を用いた骨組み構造解析によるトンネル覆工の解析法, 土木学会論文集 C, No.1/V-67, pp.61-77, 2011.

表1 解析ケース

Case	地盤反力係数 $k$ ( $\text{MN/m}^3$ )	水平土圧係数 $K_{h0}$	初期変位 $u_{\text{init}}$ (mm)
1	50	0.75	10
2	100		
3	200		
4	100	0.5	10
5		0.75	
6		1.0	
7	100	0.75	5
8			10
9			20

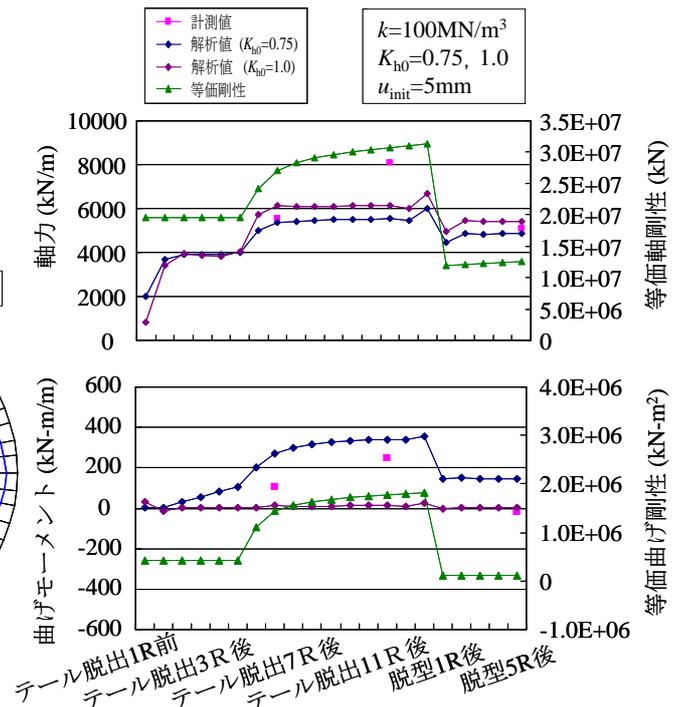


図4 軸力、曲げモーメントの経時変化