

# 都市トンネル工法の新しい風 『SJ ライナートンネル工法の考案』

## SJ LINER TUNNELING METHOD – A NEW TREND IN URBAN TUNNELING

田家 学\*・藤野 豊\*\*・杉山雅彦\*\*\*  
Manabu TAYA, Yutaka FUJINO and Masahiko SUGIYAMA

The SJ liner tunneling method has been developed for improved environmental safety and to reduce the cost and time of urban tunnel construction. This method is most applicable in urban areas where the face of the tunnel is self-supporting. The SJ liner method combines the best features of NATM and shield tunneling methods and incorporates new ideas relating to the lining and excavation method. This report presents the background to development and concept of this tunneling method..

**Keywords :** Road tunnel, diluvium ground, urban NATM, shield method, rationalization, SJ (straight joint) liner, environmental protection, cost reduction

### 1. 本工法の考案の背景

都市部における自立性地山に道路トンネルを構築する場合、設計段階の工法選定としては、一般的に工事費が安く、特殊な断面変化への対応が容易に可能な NATM を選択する人が多い。その一方で、計画路線内の表層部に沖積低地があり住宅地等が点在するなど、地盤沈下や地下水低下の環境保全に対して制約が厳しい場合も多い。この場合、実工事では補助工法の増加等により、工事費の増加や施工工程の遅延を招いている事例(表-1)もある。

NATM の代替の施工法として、泥水式と泥土圧に代表される密閉型のシールド工法は、安全性の高い確実な施工法であり、地盤沈下や地下水低下の抑制など、周辺環境に優しい工法であるが、上述のような自立性地山へ適用するには工事費が高くなる。

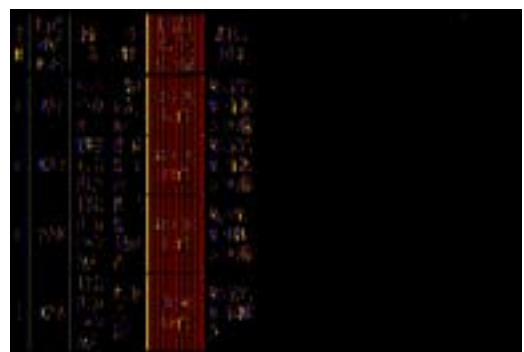
これらの状況を踏まえ、都市部の自立性地山に道路トンネルを構築するには、周辺の環境条件ならびにトンネル条件、地盤条件等を勘案しつつ、環境保全、建設トータルコストの縮減ならびに事業期間の短縮に資する合理的な施工法が最大のテーマと考え、SJ ライナートンネル工法を考案した。

本工法の検討に当たっては、2005 年 4 月に STM(Shield Tunnel Marketing) 研究会を設立し、企画・設計(日本シビック担当)、ライナー(ジオスター担当)、マシン(三菱重工担当)を中心に、同研究会で検討を重ねてきた。本工法は、NATM とシールド工法<sup>1)</sup>の優れた面を取り入れ、トンネ

ルの本体覆工やマシンの掘削方式に新しい発想や考え方を盛り込んでいる。本工法の技術的な特徴等を以下に示す。

- ・ 適用地山：自立性地山
- ・ 主な特徴：周辺環境条件、地山条件に応じた掘削方式と SJ(Straight Joint：いも継ぎ)ライナーの採用
- ・ 環境保全：地盤沈下、地下水低下等の抑制
- ・ 覆工の製作：現地製作にも適用可能
- ・ コスト：都市 NATM トンネルと同水準

表-1 都市 NATM の増額設計変更事例



### 2. SJ ライナートンネル工法

SJ ライナートンネル工法(図-1)の大きな2つの要素となる掘削マシン、SJ ライナー覆工のコンセプト等について以下に示す。

#### 2.1 掘削マシン

掘削マシン(図-2)は、長距離・高速施工への対応やコ

\* 日本シビックコンサルタント(株) 事業統括本部 地下空間技術部  
\*\* ジオスター(株) セグメント事業部  
\*\*\* 三菱重工地中建設機(株) 設計部

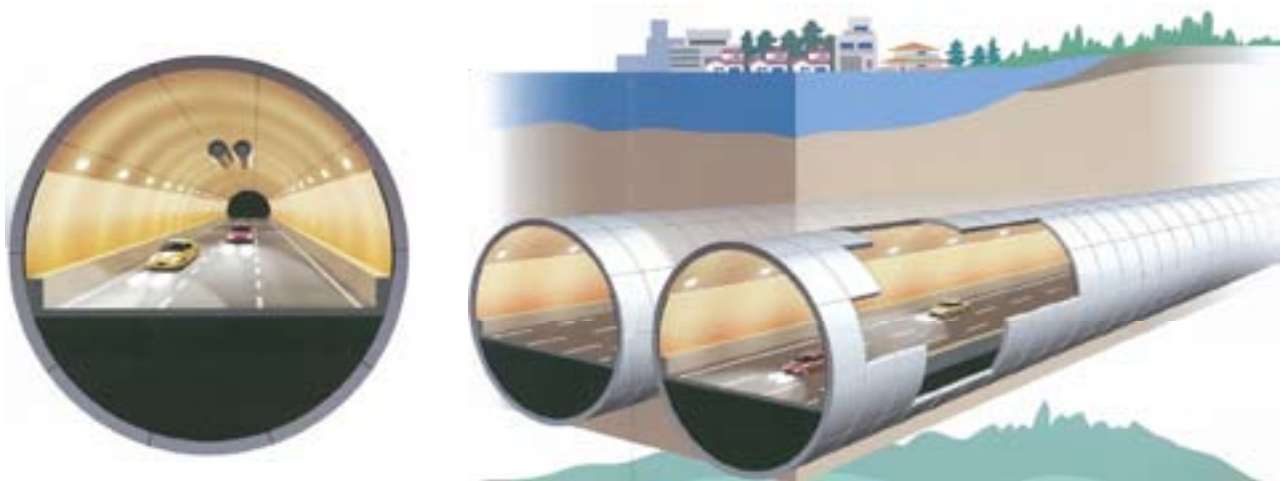


図-1 SJ ライナートンネル工法による道路トンネル(3車線) のイメージ

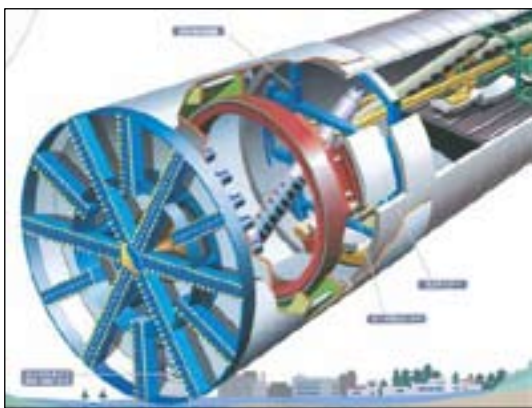


図-2 掘削マシン



図-3 ミックスタイプ(開放型、密閉型)



写真-1 スクリュー排土実験

スト縮減等を踏まえ、主に以下の点に着目し検討した。

- ・ 多様な地山条件等に応じた合理的な掘削方式
- ・ ライナー覆工の組立ての省力化・時間短縮
- ・ 坑内での効率的な掘削土砂搬出

(1) 掘削方式

掘削方式は、周辺環境条件や地山条件等に応じて可変できるミックスタイプの採用を考えた。すなわち、施工時に排水が可能な施工区間では開放型を、沖積低地部の点在など地下水低下の抑制が求められる施工区間では密閉型をそれぞれ採用できるようにした。ここで、開放型による施工には、次のようなメリットがあり、コスト縮減ならびに施工性や施工時における覆工品質の向上が期待できる。

- ・ 掘削土処分費のコスト縮減および掘削土の有効利用の促進
- ・ ジャッキ推力等の施工時荷重の低減
- ・ 施工スピードの増加

ミックスタイプは、施工中において開放型から密閉型、密閉型から開放型の円滑な切り替えが課題となる。たとえば、密閉型から開放型へ変更する場合、チャンバーを改造しバケットタイプで開放型とする方法等も考えられたが、マシ

ンの改造に1週間程度の期間を要し施工性に劣る。このため、次のような創意・工夫を行った。

シールド形式に泥土圧タイプを採用し、掘削土の搬出はスクリーコンベアにより行う。

開放型と密閉型の切り替えは、図-3に示すように、ワンタッチ操作で行う。開放型の場合、スクリーコンベアをチャンバーへ押し出すとともに、スクリーコンベアを水平方向にスイングさせることで、排土を行う。写真-1に示すスクリー排土実験により、開放型での排土の性能を確認している。

掘削方式の変換にともなう施工手順の概要を、以下に示す(図-4)。

1) 開放型から密閉型

- ・ 作泥材を添加しながら地山を掘削し、チャンバー内

を泥土で充填させる。

- ・ スクリューコンベアを引込む。
- ・ 密閉型の状態で掘進する。

2) 密閉型から開放型

- ・ カッターを回しながら、チャンバー内の掘削土をスクリューから排出する。
  - ・ スクリューコンベアを押し出す。
  - ・ 開放型の状態で掘進する。(チャンバー内の掘削土量:カッターの負荷を考慮し、1/3 程度ためる状態)
- これらの変換時の地山の条件等を以下に示す。

- ・ 切羽地山が自立すること(切羽地山圧の管理は切羽土圧計で管理、面板による切羽保持効果も期待)。
- ・ 地山には極力水のない状態。

ここで、ミックスタイプの施工は国内に実績はないが、スイスのグラウホルツトンネル<sup>2)</sup>(φ 11.4m、延長約 5.5km のシールドトンネル)など海外ではすでに採用されている。

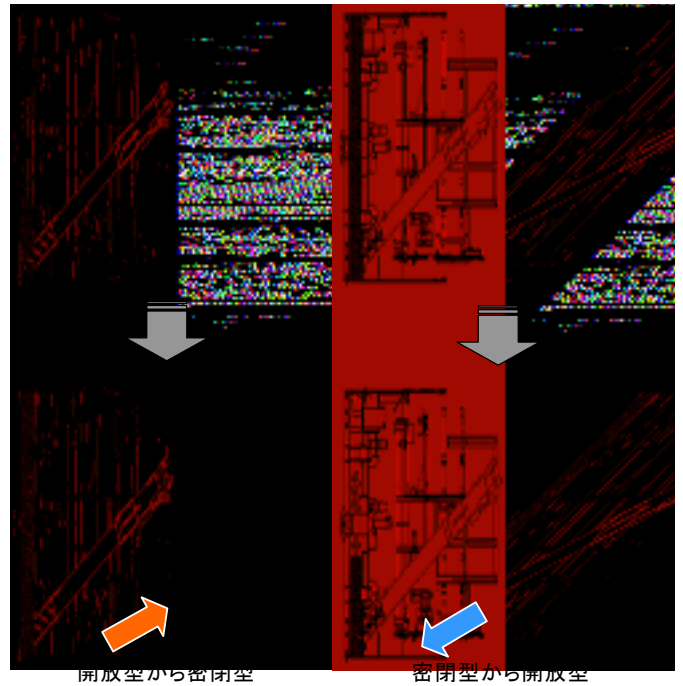


図-4 掘削方式の変更

(2) SJ ライナーの組立て装置

SJ ライナーの組立てには、吸着の真空パッドによりライナーを把持するバキュームの把持方式(図-5)を採用する。ライナーの脱落防止の安全対策として、せん断力用支持ピンを配置する。この方式により、組立て時間の短縮、把持金具の省略によるライナーのコスト縮減や長距離・高速施工への対応も可能となる。バキュームの把持方式は海外では一般的に採用されているが、これまで国内での採用は1事例である。

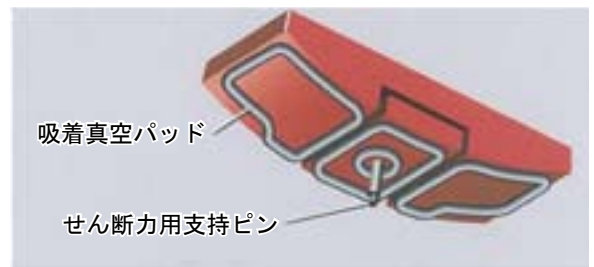


図-5 バキュームの把持方式

また、ライナーの組立て精度の向上ならびに組立て作業の省力化・時間短縮を目的として、ライナーの精位置決め制御までを行うサーボ型エレクタ(図-6)を採用する。サーボ型エレクタによる組立てでは、図-7に示す6方向の制御が可能となる。



図-6 サーボ型エレクタ

- ① 姿勢制御(ヨーイング、ピッチング、ローリング)
- ② 方向制御(旋回微調整、伸縮微調整)
- ③ 摺動方向制御

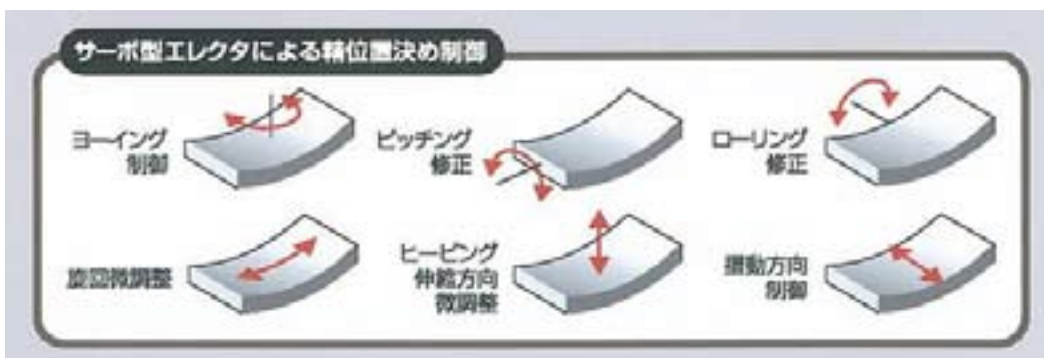


図-7 サーボ型エレクタによる精位置決め制御



(3) 形状保持装置

次節 2.2 に記述するように、自立性地山への適用を想定している SJ ライナーは、いも継ぎであるため、組立て初期段階の変形量が大きくなる可能性がある。ライナーの組立て時から裏込め注入完了までの間、真円を保持するための対応策として、**図-8** に示す新たな形状保持装置を設置する。



図-8 形状保持装置

(4) 坑内での掘削土の搬出

掘削土搬出の効率化や長距離・高速施工への対応等を考慮し、掘削土を**写真-2** に示すベルトコンベアにより搬出する。

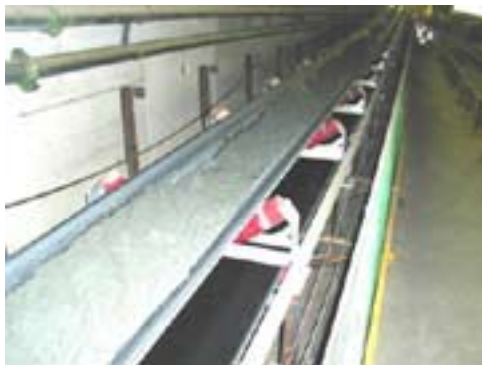


写真-2 ベルトコンベアによる掘削土砂の搬出

2.2 SJ ライナー

トンネルライニングのコンセプトを、『都市部における自立性地山に対する合理的な本体覆工』と、『高止水性を有した本体覆工』とし、主に以下に示す点を考慮して**図-9** に示す SJ ライナーを検討した。

① 円形の覆工形状

- ・ 円形の覆工形状は、馬蹄形や矩形等と比べ、覆工費などを含め工事コストが最も安価である。また、覆工の安定性も高い。
- ・ 床下空間の有効利用も可能となる(床下空間利用：共同溝、避難通路等)。

- ② ストレートジョイントライナー
  - ・ SJ (Straight Joint : いも継ぎ) ライナー
- ③ 継手構造の簡素化
- ④ 高止水性のガスケット

(1) SJ ライナーの特徴およびメリット

SJ ライナーの特徴およびメリットを、構造面、製作面ならびに施工面について、以下に整理して示す。

1) 構造面

- ・ 比較的自立性の高い地山を対象としているため、大きな地盤反力が期待できることから、ライナー本体の発生曲げモーメントが小さい(鉄筋量小：約  $60\text{kg/m}^3$ )。
- ・ 小さな継手剛性で対応可能である。
- ・ 鉄筋被りは、維持管理等を考慮し従来のセグメントに比べ多く設定する(鉄筋被り：50mm)。

2) 製作面

- ・ 鉄筋量の低減ならびに表面仕上げの簡素化、継手構造の簡素化、出来形寸法の緩和、脱型強度の低減等により、ライナー覆工費の大幅なコスト縮減が期待できる。
- ・ 製作管理が容易であり、現地製作にも適する(現地製作：製造費および運搬費等の縮減、運搬にとまなう  $\text{CO}_2$  等の排出削減)。

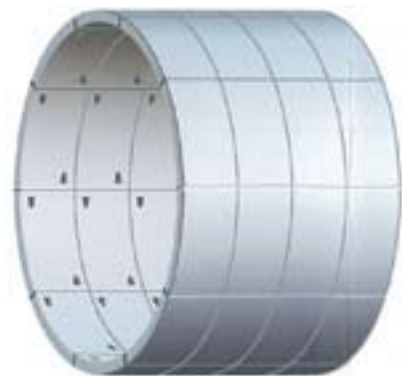


図-9 SJ (Straight Joint : いも継ぎ) ライナー



図-10 従来のセグメント (千鳥組)

3) 施工面

- ・ ライナーのいも継ぎにより、各リングが独立形の構造となるため、従来のセグメント（千鳥組）に比べ（図-10）、ジャッキ推力等の施工時荷重に対してひびわれ・欠けが生じにくい。
- ・ 組立作業の省力化、組立時間の短縮が期待できる。
- ・ 3車線のトンネルでは、ライナーを坑内にも一部ストックすることで、発進基地ヤードの縮小が可能となる。

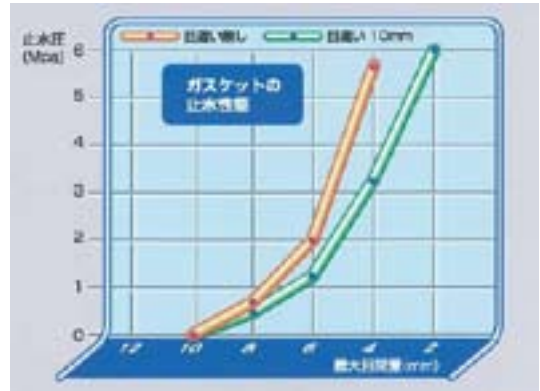


図-12 ガスケットの止水性能

(2) SJ ライナーの構造

1) 継ぎ手構造

SJ ライナーの構造を図-11 に示す。SJ ライナーでは、次のような簡素化した継手構造としている。なお、ピース間継手に用いる斜めボルトは、組立用のみに用いる。

- ・ ピース間継手：突き合わせ+斜めボルトの継手
- ・ リング間継手：部分ほぞ(組立て用ガイド)+挿入式のワンタッチ式継手

2) ひびわれ・欠け防止対策

SJ ライナートンネルの品質の確保を目的に、施工時におけるライナーのひびわれ・欠け防止として、ライナーに以下の対策を行う。

- ・ リング接合面へのジャッキ推力伝達面(厚さ 2mm のコンクリート面)の設置
- ・ 継手間のすきま余裕代の設置

3) 止水材(ガスケットによる高止水性)

ライナーの覆工構造に適し、かつ高水圧対応が可能な止水材として、図-12 に示す高止水性のガスケットを採用する。

また、ライナー覆工費のコスト削減を目的に、ガスケット一体型ライナー(ライナーの製作段階でガスケットを設置)とする。



写真-3 止水試験用の試験体(ガスケット)



写真-4 いも継ぎの十字部を模擬した止水試験装置

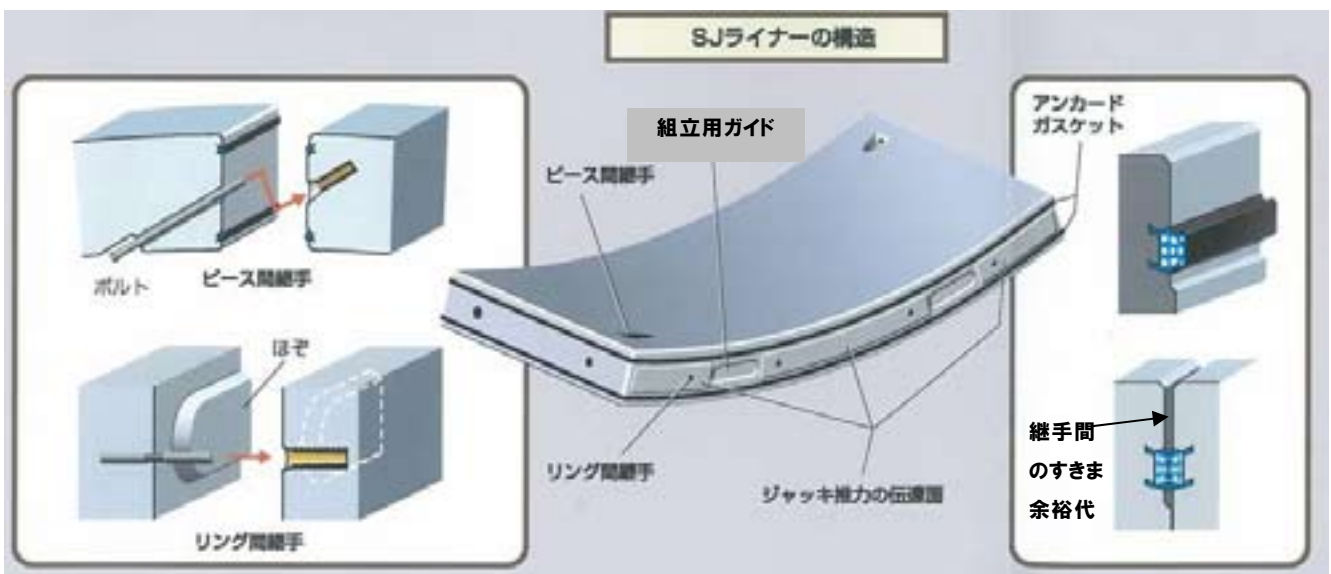


図-11 SJ ライナーの構造

(3) いも継ぎ十字部の止水性の確認

SJ ライナーは、先に紹介したとおり、いも継ぎの覆工構造である。いも継ぎでは、4 ピースのライナーのコーナー部で十字に接合されるため、従来のセグメントに比較して、止水の弱点となる可能性がある。

このため、写真-3 に示すようなガスケットの試験体を 4 ピース用い、いも継ぎの十字部を模擬した止水試験装置(写真-4)により、最大目開量 5mm、最大目違い量 5mm、最大水圧 2Mpa の条件で試験を実施し、十字部での止水性が確保できることを確認している。

2.3 SJ ライナーと従来セグメントの比較

図-13 の計算条件に示すような自立性の泥岩地山における 2 車線の道路トンネル(外径  $\phi$  12.1m、併設)を対象に、はりバネモデルにより試設計を実施し、SJ ライナーと従来セグメントの鉄筋量の比較を行った。荷重条件は、鉛直土圧は全土圧とし、水圧荷重を見込んでいる。



図-14 従来セグメントのピース間継手

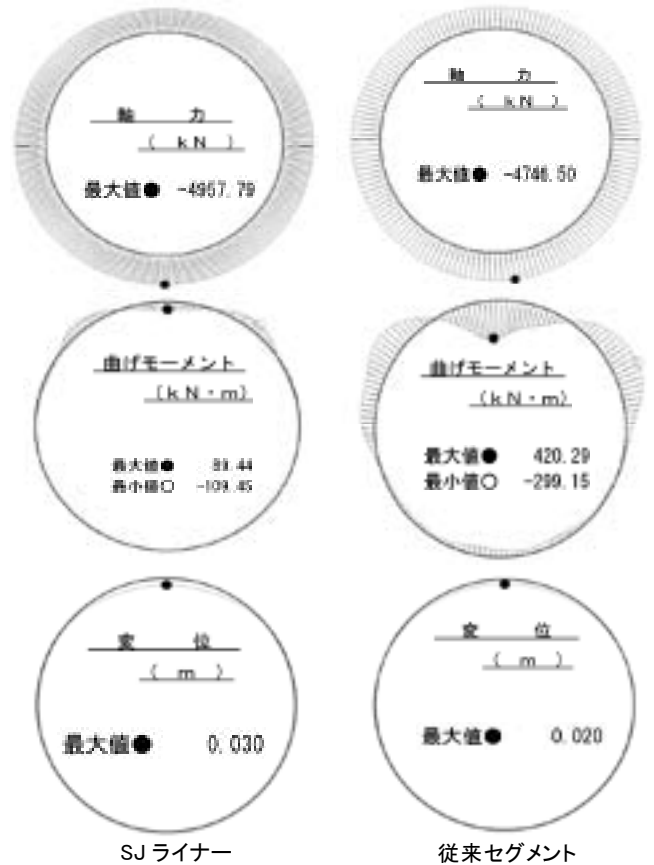


図-15 発生断面力、変位置 (計算結果)

表-2 SJ ライナーと従来セグメントの比較

項目	①SJ ライナー (比率:①/②)	②従来のセグメント
最大軸力(KN)	4958(104%)	4747
最大正曲げ(KN・m)	89.4(21%)	420.3
最大負曲げ(KN・m)	109.5(36%)	299.2
最大変位(mm)	30(150%) 許容変形量 $\delta$ : 60~80mm 【 $\delta=(1/200\sim 1/150)$ 外径 $D_0$ 】	20
鉄筋量(kg/m <sup>3</sup> )	55(42%)	130
鉄筋配置の考え方	<ul style="list-style-type: none"> <li>●最小鉄筋比                             <ul style="list-style-type: none"> <li>軸力卓越型の構造</li> <li>軸方向の影響が支配的な鉄筋コンクリート部材の最小鉄筋比<sup>3)</sup>(0.2%)</li> <li>D13×11 本(内・外縁とも)</li> </ul> </li> <li>●配力筋                             <ul style="list-style-type: none"> <li>軸力卓越型構造により、従来のセグメントの比べ疎に配置(300mm 間隔)</li> <li>配力筋 D10</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●最小鉄筋比                             <ul style="list-style-type: none"> <li>曲げが生じる構造</li> <li>曲げが卓越する部材の軸圧縮破壊に対する安全性を考慮した考え方</li> <li><math>15/\sigma_{sy}^{4)}</math>(SD345 の降伏強度 <math>345\text{N/mm}^2</math>) = 0.43%</li> <li>D16×12 本、D13×4 本(内・外縁とも)</li> </ul> </li> <li>●配力筋                             <ul style="list-style-type: none"> <li>150mm 間隔に配置、配力筋 D13(従来の設計の配置間隔)</li> </ul> </li> </ul>



図-13 計算条件

SJ ライナーのピース間の継手は、図-11 に示した柔継手であり、計算上ピン構造と仮定している。一方、セグメントの継手は、SJ ライナーに比べ剛な継手(図-14)を想定している。

図-15、表-2 に示す試設計の結果を以下に整理して示す。

- ・ 両覆工構造の軸力の結果にはさほど相違が見られな  
いが、SJ ライナーの発生曲げモーメントは従来セ  
グメントの 20～35% と小さい。
- ・ SJ ライナーの最大変位量は、いも継ぎの影響に  
より、従来セグメントの変位量(20mm)を上回る  
30mm となるが、許容変形量(60～80mm)以下で  
あり問題ない。
- ・ SJ ライナーの鉄筋量は、 $55\text{kg/m}^3$  と、従来セグメ  
ントの鉄筋量( $130\text{kg/m}^3$ )比べ大幅に少ない。

### 3. 今後の取り組み

今後の取り組みとして、SJ ライナートンネル工法の実プロジェクトへの適用に向けて、現在自立性地山に計画されている道路トンネルを対象に試設計を行いながら、以下に示す項目を対象に、設計・製作・施工マニュアルの作成を考えている。

#### 1) 設計関連

- ・ 設計用土圧、および地盤ばね定数の設定方法
- ・ 併設トンネルの影響検討の方法
- ・ 止水材の設計
- ・ 掘削方式(開放型、密閉型)の適用範囲の検討方法
- ・ コスト縮減に向けた取組み

#### 2) 製作関連

- ・ ライナーの製作方法、品質管理方法等
- ・ マシン製作

#### 3) 施工関連

- ・ ライナーの組立て方法
- ・ 掘削方式(開放型、密閉型)変更の施工法
- ・ 開放型施工時の併設影響抑制対策

### 4. おわりに

日本シビックコンサルタント(株)考案の、環境保全や建設トータルコストで都市 NATM に優れた SJ ライナートンネル工法が、『都市トンネル工法の新しい風』となって吹くことを工法開発メンバー一同願っている次第である。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：都市 NATM とシールド工法の境界領域－設計法の現状と課題－、1996.
- 2) 日経 BP：最新シールドトンネル－ハイテク技術が地下を掘る－、1994.

- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書【構造性能照査編】、2002.
- 4) 土木学会：セグメント設計 トンネルライブラリー第 6 号、1994.