

# シールドトンネルにおける 施工技術の変遷と変状現象の整理

中島 陽<sup>1\*</sup>・葛城 真治<sup>2</sup>・亀村 勝美<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 東京電力株式会社 建設部（〒100-8560 東京都千代田区内幸町一丁目1-3）

\*E-mail:nakajima.yo@tepcoco.jp

<sup>2</sup>正会員 東京電力株式会社 工務部（〒100-8560 東京都千代田区内幸町一丁目1-3）

<sup>3</sup>フェロー会員 財団法人深田地質研究所（〒113-0021 東京都文京区本駒込二丁目13-12）

鉄道や道路などの交通網や上下水道，電力，通信などのインフラの整備において，1960年頃からシールドトンネルが数多く建設されてきた。経年とともにトンネル構造物に材料劣化や変形などの変状が散見されており，シールドトンネルの維持管理において，各事業者の共通課題となっている。

土木学会地下空間研究委員会維持管理小委員会においては，シールドトンネルの設計，施工技術の変遷と特徴的な変状現象との関係を把握することにより，維持管理における点検や補修・補強の効率化に寄与することができると考え，各事業者のシールドトンネルの施工実績および変状現象の整理を行っている。

本稿は，これまでの整理結果について報告するものである。

**Key Words :** shield tunnel, tunnel maintenance, tunnel deformation

## 1. はじめに

東京電力における地中送電用シールドトンネルは，1963年以降，電力ケーブルを収容する構造物として数多く建設され，現在の設備延長は218kmとなっている。これらの多くは健全な状態にあるが，経年が進んだもの，あるいは環境の厳しいところに位置するものなどには，トンネル構造物に材料劣化や変形などの変状が現れている。このような変状現象は，鉄道，下水道，通信，電力などのシールドトンネルの維持管理を行う各事業者において，共通の検討課題となっている。

シールドトンネルにおける変状現象については，土木学会トンネル・ライブラリー<sup>1)</sup>などにおいて事例の整理が行われている。今回，土木学会地下空間研究委員会維持管理小委員会では，変状現象が建設当時の使用材料などに応じた特徴を有することに着目し，シールドトンネルの設計・施工技術の変遷と特徴的な変状現象との関係を把握することにより，維持管理における点検や補修・補強の効率化に寄与することができると考え，各事業者のシールドトンネルの施工実績，変状現象および対策工の整理を行っている。

本稿は，これまでの整理結果について，東京電力における変状現象と対策例を主に報告する。

## 2. 施工技術の変遷

シールドトンネルの施工実績と変状現象の整理にあたっては，経年設備量が比較的多い，東京地下鉄，JR，東京都下水道局，NTT，東京電力の各事業者を調査対象とした。

シールドトンネルにおける施工技術の変遷について，シールド工法，覆工種類および止水対策の整理結果を以下に示す。

### (1) シールド工法

シールド工法とは，筒状の鋼製シールドにより土圧と水圧に対抗しつつ，その先端部で地盤を掘削して，後方でセグメントと呼ばれるプレキャスト製のピースを組

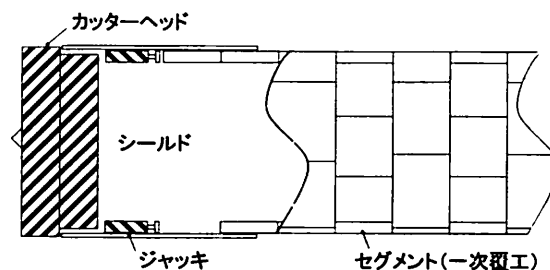


図-1 シールド工法（密閉型）

み立て、セグメントを反力にジャッキにより掘進してトンネルを構築するものである。シールドトンネルの構造は、一次覆工であるセグメントとその内部に現場打ちコンクリートなどを巻き立てて築造される二次覆工から構成されている。

シールド工法は、1957年の地下鉄トンネルを始め、1960年代前半から各事業者において本格的に採用された。

当初は、開放型で掘削方式が人力掘削であったが、機械式に変わり、セグメント組立ての機械化により大断面化が可能となった。また、圧気工法の併用により、地下水が存在する地盤への適用が拡大した。1970年代半ばになると、密閉型シールド工法の採用により掘削効率や周辺地盤への影響度などの性能が向上し、地盤条件や施工延長などの適用範囲が拡大した。各事業者ともに密閉型が現在の主流である。一方で、開放型は1990年代に入ってから施工実績はほとんど無くなっている。

## (2) 覆工種類

シールドトンネルの覆工は、一次覆工と二次覆工とで構成され、力学的な機能を一次覆工に、耐久的な機能を二次覆工に受けもたせることが一般的であった。東京地下鉄、JR、東京電力においては、防水や防食などの機能を一次覆工に受けもたせることにより、二次覆工を省略した覆工構造を採用する事例がみられる。

一次覆工であるセグメントの種類は、材質ではコンクリート、鋼、鋳鉄など多岐にわたっている。セグメントの継手構造は、従来のボルト継手に加えて、ピン式継手、くさび式継手、突合せ継手なども用いられている。これらは、従来のボルト締め作業を省力化することで施工性に優れており、東京地下鉄、JR、東京都下水道局、東京電力において採用されている。

以上の覆工構造は、トンネル用途などに応じて、経済性、施工性、耐久性などを考慮して選定されることから、各事業者により採用実績には違いが見られる。

また、覆工の設計は、各事業者ともに許容応力度設計法によって実施されてきた。東京電力においては、2004年から鉄筋コンクリート製セグメントの設計に性能照査型設計法が導入されている。

## (3) 止水対策

シールドトンネルにおいては、一次覆工が止水の主体となっている。一次覆工はセグメントの継手目地が多い構造であり、継手部の止水対策は、継手面にシール材を貼付することで行っている。

シール材は、1960年代後半から瀝青系、発泡体系、未加硫ブチルゴム、加硫ゴムなどが順次開発されてきた。1970年代後半に開発された水膨張性シール材は、従来のシール材に比べて取り扱いやすく、漏水量が格段に少な

いことから、1980年代から各事業者において主流となっている。

## 3. 変状現象の整理

シールドトンネルにおいて発生する変状現象としては、コンクリートの劣化、鋼材の腐食、漏水、ひび割れ、変形などが挙げられる。調査結果より、これらの変状現象は、トンネルの使用材料などに応じた特徴が見られ、各事業者に共通点があることが確認された。ここでは、東京電力における主な変状現象について以下に示す。

### (1) ダクタイルセグメントの鋼材腐食

#### a) トンネル概要

1967年に開放型シールド工法により構築された内径2.5m～2.7mの円形トンネルである。二次覆工を省略した構造であり、セグメントは球状黒鉛鋳鉄製の箱形、セグメント継手面の止水には鉛コーキングが用いられている。

#### b) 変状の発生状況

継手部からの漏水および構造部材の腐食が発生した。1982年の調査結果より、劣化した継手部の鉛コーキング箇所から地下水が流入し鋳鉄を腐食させたものであり、漏水に含まれる塩化物イオン濃度が高いことや洞道内の温湿度の変化が大きいことが腐食を促進させた要因であると判断された。セグメントの主桁および縦リブの腐食状況を写真-1に示す。

#### c) 対策

腐食を抑制するために継手部への止水材注入およびセグメントの防錆処理を実施した。近年の点検結果より、対策箇所の再劣化による継続的な腐食進行が確認されたことから、腐食状況下におけるトンネルの耐荷性能の評価および追加対策を検討中である。



写真-1 ダクタイルセグメントの腐食状況

## (2) 中子形セグメントの鋼材腐食

### a) トンネル概要

1971年に開放型シールド工法により構築された内径3.0mの円形トンネルである。二次覆工を省略した構造であり、セグメントは鉄筋コンクリート製の中子形、継手面の止水にはシール材ではなくモルタルコーキングが用いられている。

### b) 変状の発生状況

継手部のボルトおよびセグメントの鉄筋に、写真-2に示すような腐食が発生した。特に、露出しているボルト頭部およびナットに激しい腐食が確認された。

近年の調査結果より、腐食している鉄筋は、かぶり数mmの組立筋や配力筋であり、主要構造である主鉄筋の腐食はないものと判断された。また、腐食発生の要因はトンネル内への漏水であり、洞道内の温湿度の変化が大きいことが腐食促進の要因であると判断された。

### c) 対策

以前から実施している継手部への止水注入とともに、ボルトの交換、ボルト頭部やナット部および露出した鉄

筋の防錆処理を実施することとした。

### (3) セグメントの軸方向ひび割れとトンネル変形

#### a) トンネル概要

1981年に密閉型シールド工法により構築された内径3.5mの円形トンネルである。セグメントは鉄筋コンクリート製の平板形、継手面の止水には非膨張性シール材が用いられている。

また、トンネルの変状発生区間の土被りは8～12m程度で、周辺地盤は軟弱粘性土層である。

#### b) 変状の発生状況

写真-3に示すように上方部のセグメントに幅0.1～0.4mm程度のトンネル軸方向ひび割れが発生した。また、建設時からのトンネル内空変位量は不明であるが、真円に対して約12mmの鉛直方向つぶれが発生した。写真-4に示すような多量漏水による水溜まりも数回確認された。

1996年からの調査結果より、ひび割れや変形の長期的な進行が確認された。変状の要因としては、地下水位変動やトンネル内への地下水流入による軟弱粘性土地盤の

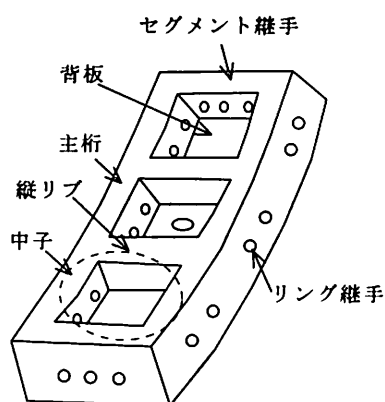


図2 中子形セグメント



写真2 中子形セグメントにおける鋼材の腐食状況

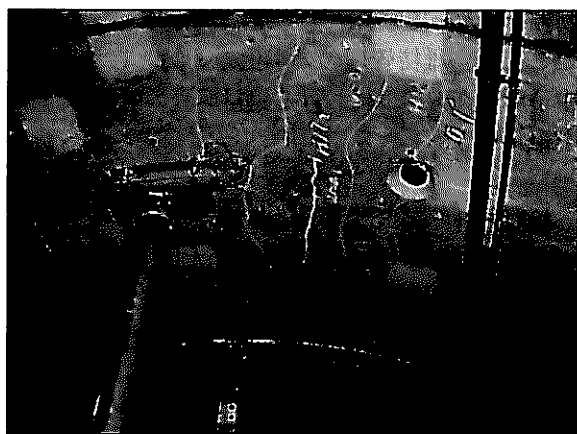


写真3 セグメントのひび割れ発生状況

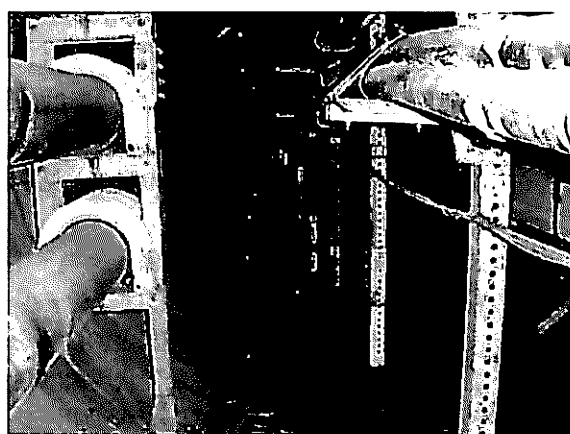


写真4 トンネル内への多量漏水状況

表-1 地中送電用シールドトンネルにおける施工技術の変遷と変状現象

| 竣工年度  |                |                   | 1960               | 1970   | 1980 | 1990 | 2000 |          |
|-------|----------------|-------------------|--------------------|--------|------|------|------|----------|
| 施工実績  | シールド工法         | 開放型               | 圧気工法あり・なし          |        |      |      |      |          |
|       |                | 密閉型               | 土圧式・泥水式            |        |      |      |      |          |
|       | 覆工種類           | 箱形セグメント           | 鉄筋コンクリート製<br>(中子形) | 二次覆工あり |      |      |      |          |
|       |                |                   |                    | 二次覆工なし |      |      |      |          |
|       |                |                   | 鋼製                 | 二次覆工あり |      |      |      |          |
|       |                |                   |                    | 二次覆工なし |      |      |      | 国 指定 4 路 |
|       |                | ダクタイル<br>(球状黒鉛鑄鉄) | 二次覆工あり             |        |      |      |      |          |
|       |                |                   | 二次覆工なし             |        |      |      |      |          |
|       |                | 平板形セグメント          | 鉄筋コンクリート製          | 二次覆工あり |      |      |      |          |
|       |                |                   |                    | 二次覆工なし |      |      |      |          |
|       | 継手             | ボルト結合式・鋼製ボックス     |                    |        |      |      |      |          |
|       |                | 新型継手(ボルト締結を伴わない)  |                    |        |      |      |      |          |
|       | セグメント<br>シールド材 | 非膨張               | 未加硫ブチルゴム、合成ゴム等     |        |      |      |      |          |
|       |                | 水膨張               | 水膨張単体シールド材等        |        |      |      |      |          |
| 構造設計法 | 設計法            | 許容応力度設計法          |                    |        |      |      |      |          |
|       |                | 性能照査型設計法          |                    |        |      |      |      |          |
|       | セグメント<br>リング   | 慣用設計法・修正慣用設計法     |                    |        |      |      |      |          |
|       |                | はりーばねモデル          |                    |        |      |      |      |          |
| 変状現象  | 漏水             |                   |                    |        |      |      |      |          |
|       | 材料腐食           |                   |                    |        |      |      |      |          |
|       | コンクリートのひび割れ    |                   |                    |        |      |      |      |          |
|       | トンネル変形         |                   |                    |        |      |      |      |          |
|       | その他            |                   |                    |        |      |      |      |          |

圧密による鉛直付加荷重の発生と判断された。鉛直荷重の増加によりトンネル横断面における鉛直方向のつぶれが進み、トンネル上部部のセグメントの曲げ応力が増加して軸方向ひび割れが発生し、ひび割れ本数が増加したものと考えられた。

#### c) 対策

以前から実施している継手部への止水注入とともに、付加荷重に対してトンネルの耐力性能を満足するために、トンネルの耐荷力向上を目的として鋼製円柱をトンネル中央に設置した。

#### (4) その他の変状

二次覆工省略の平板形セグメントにおいては、防錆のために継手部の閉塞を実施している。経年劣化によりトンネル上部部の閉塞に用いた充填材の脱落が見られる。

#### (5) 施工技術の変遷と変状現象との関係

上記の整理結果より、東京電力におけるシールドトンネルの設計施工技術の変遷と変状現象との関係を表-1に示す。この表からは、例えば、主な変状現象は漏水とともに発生しており、二次覆工省略型で非膨張性シールド材を使用していた時期のトンネルに漏水発生の可能性が高いことが分かる。設備管理者や点検実施者が、このよ

うな関係を事前に把握することで、対象構造物の選定や調査項目の絞り込みなど、変状現象に応じた効率的な調査の実施が可能になると考えられる。

#### 4. 変状現象の対策検討例

近年、各事業者は、高経年設備の増加に伴い維持管理の重要性が高まる一方で、社会情勢などから維持管理費を抑制する必要があることから、効率的な維持管理の在り方を模索している。

ここでは、維持管理の効率化の一例として、前述した中子形セグメントにおける鋼材腐食の対策検討<sup>3)</sup>の概要を紹介する。

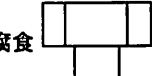
##### (1) 検討方針

継手ボルトの本数が多い（20,000本以上）ことから、劣化調査によりボルトの腐食状況を分類し、将来におけるシールドトンネルの耐荷性能の評価を行い、ボルトの腐食状況に応じた対策工を選定する。

##### (2) 劣化調査方法

今回の調査は、トンネル内空寸法、鉄筋腐食状況、コ

表-2 ボルト頭部およびナットの変状程度の設定

| 変状の程度 | 腐食状況         | 外 観                           | ボルト頭部の状況のイメージ<br>(側部から見た図)                                                        | 耐荷性能         | 手引きの段階※ |
|-------|--------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------|
| D     | ほとんどなし       | 腐食はみられない                      |  | 健全な場合と同等     | (健全)    |
| C     | 軽微<br>(表面程度) | 表面は腐食しているがボルト頭部の角部の欠損はない      |  |              | C       |
| B     | 角部が欠損        | ボルト頭部の角部が欠損するような腐食(ボルト頭がドーム状) |  |              | B       |
| A     | 大きく欠損        | ボルト頭部の角部が完全になくなり、円錐形状となっている   |  | 健全な状態を下回っている | A       |
| A+    | 頭部が欠損        | ボルト頭部がほとんどなくなっている             |  | ボルトの機能が喪失    |         |

※洞道とマンホールの点検・管理に関する社内基準

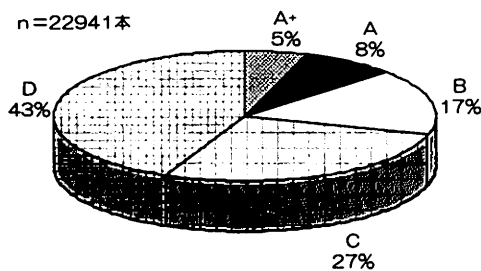


図3 ボルト腐食ランクの割合

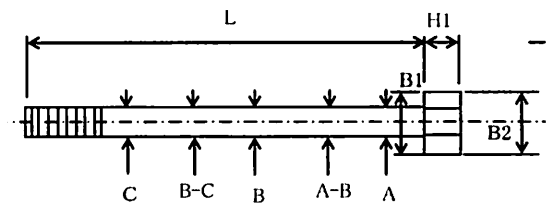


図4 ボルト軸部の計測断面 (A-A,B-B,B-C,C)

ンクリート中性化深さ、ひび割れ状況、漏水の水質、ボルト腐食状況、ボルト引張強度の各項目について実施した。ボルトの一部は、腐食が激しく、ボルト頭部またはナットが欠損しているものも確認された。ボルトに引張力が作用した場合に、ボルト頭部やナットがないと、ボルトが引き抜け、十分な機能を発揮しない。そこで、ボルトの腐食状況の調査にあたっては、ボルト頭部とナットの腐食による耐荷性能を事前に検討し、表-2に示す評価ランクを作成して、外観調査を実施した。

### (3) 劣化調査結果

セグメント本体の腐食については、全てが配力筋や組立筋であり、トンネルの耐荷性能には影響がないことを確認した。

ボルトの腐食について、外観調査による腐食ランクの割合を図-3に示す。調査結果より、健全な状態を下回る腐食ランク「A」、 「A+」のボルトは、全体の13%程度であった。腐食状況の調査で取り外したボルトについて、図-4に示す各部の寸法を計測した。ボルト軸部における直径の計測結果より、規格値(直径22mm)に対する腐

食量は、平均値は0.3mm、最大値は断面Cにおいて2.1mmであった。同じボルトを用いた引張試験結果より、引張強さは規格値以上であることを確認した。

### (4) シールドトンネルの耐荷性能の評価方法

#### a) 検討方針

荷重条件およびボルト腐食量を変動要素として、現状(経年38年)および将来の耐荷性能の評価を実施した。構造設計法は、「トンネル標準示方書 シールド工法・同解説 2006年」を参考にし、限界状態設計法により使用限界状態および終局限界状態について照査した。

#### b) 荷重条件の検討ケース

トンネル周辺地盤条件の変化を考慮し、設計荷重から鉛直荷重のみを設計荷重の1.0~1.5倍まで段階的に増加させた。

#### c) ボルトの腐食の検討ケース

ボルト頭部の欠損およびボルト軸の腐食量を変動要素とした。

ボルト軸の腐食量については、現状として、平均腐食量0.3mmおよび最大腐食量2.1mmの2ケースを設定した。

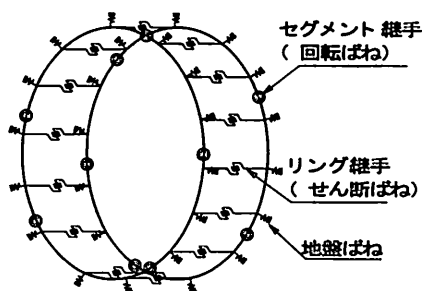


図5 構造計算モデル

また、将来として、腐食が経年数に比例すると仮定し、腐食量が2倍となる38年後において、平均腐食量0.6mmおよび最大腐食量4.2mmの2ケースを設定した。

#### d) 構造計算モデル

構造計算は、セグメントの継手構造や部材の非線形性を考慮するために、はりばねモデル計算法により実施した。構造計算モデルは、図-5に示すとおり、2リング千鳥組とした。

### (5) シールドトンネルの耐荷性能の評価結果

#### a) 現状の荷重状態

内空変位量とトンネル軸方向ひび割れの調査結果と解析結果が整合するように、変動荷重（設計荷重比）を推定した。結果として、現状では、建設時と比較して1.0～1.12倍の鉛直荷重が作用しているものと判断した。

#### b) セグメント本体の照査結果

全ての荷重条件において、耐荷性能を満足した。

#### c) セグメント継手の照査結果

ボルトの腐食の影響としては、頭部の欠損による耐力低下が大きいものの、変動荷重1.3以上と相当に進行しない限りは、耐荷性能を満足することを確認した。

#### d) リング継手の照査結果

変動荷重1.5、ボルト頭部欠損およびボルト腐食4.2mmと最も厳しいケースにおいても、耐荷性能を満足した。

### (6) 対策工の選定

シールドトンネルの耐荷性能の評価結果に基づき、対策工を以下のとおりを選定した。

#### a) セグメント本体の対策

セグメント本体の鉄筋腐食は耐荷性能に問題はないとの評価結果が得られたが、セグメント内部へ腐食が進行することも考えられるため、トンネル内面に頭在化して

いる腐食箇所について、防錆剤を塗布することとした。

#### b) セグメント継手ボルトの対策

ボルトの耐荷性能を満足しなくなる可能性のある腐食ランク「A」，「A<sup>+</sup>」のボルトは、ボルト頭部およびナット部の防錆処理を実施することとした。

さらに、腐食ランク「A」，「A<sup>+</sup>」のトンネル上方部のセグメント継手ボルトは、発生断面力も大きく、トンネルの耐荷性能に与える影響も大きいことから、健全なボルトに交換することとした。

#### c) リング継手ボルトの対策

トンネル横断面方向の耐荷性能に対しては、腐食による安全性の問題はない。しかし、地震時など軸方向の耐荷性能を考慮し、腐食ランク「A」，「A<sup>+</sup>」のものについては、ボルト頭部およびナット部の防錆処理を実施することとした。

## 5. おわりに

シールドトンネルの施工実績、変状現象および対策工について、東京電力における調査結果を中心に報告した。施工実績と変状現象との関係については、今回調査対象とした各事業者についても表-1と同様の整理を実施している。これまでに、シールドトンネルの施工方法や変状現象には共通点が多いが、覆工種類の選定には各事業者によって、差があることが確認されている。

また、各事業者における対策工を含めた最近の維持管理状況については、現在も調査を実施中である。

今後は、各調査結果の整理、維持管理状況の情報交換、さらには情報公開などを通じてシールドトンネルの維持管理の効率化への一助としたいと考えている。

謝辞：本調査検討にご協力いただいた土木学会地下空間研究委員会維持管理小委員会の関係者各位に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 土木学会：トンネル・ライブラリー第14号 トンネルの維持管理，pp.131-154，2005。
- 2) 和田好史，小椋明仁，石川利明：中子形セグメントを使用した経年シールド洞道の耐荷性能の評価と補修対策について，電力土木，No.350，pp.72-76，2010。