# 性能照査型設計法におけるセグメント継手の モデル化に関する試算例

津野 究1・滝川 遼2・牛田 貴士3

<sup>1</sup>正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38) E-mail: tsuno.kiwamu.00@rtri.or.jp (Corresponding Author)

<sup>2</sup>正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38) E-mail: takigawa.ryo.25@rtri.or.jp

<sup>3</sup>正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38) E-mail: ushida.takashi.33@rtri.or.jp

鉄道シールドトンネルの設計に性能照査型設計法を用いる場合,許容応力度を超える領域で照査を行う 可能性があるが,従来のセグメント継手のモデル化法で対応できるか十分検討されていない.そこで,継 手部材の降伏を考慮したセグメント継手のモデル化法を提案した.鉄道単線シールドトンネルを対象に, 従来のモデル化法と提案したモデル化法を用いて性能照査型設計法による常時の試設計を行い,継手のモ デル化法の差異が断面力や照査値に及ぼす影響は小さいことを確認した.以上より,常時の設計では,従 来のセグメント継手のモデル化法を用いても問題ないことが確認できた.

Key Words : shield tunnel, performance-based design method, segmental lining, radial joint

#### 1. はじめに

鉄道トンネルの設計においては、「鉄道に関する技術 上の基準を定める省令」の性能規定化に対応できる性能 照査型設計法が導入され<sup>1)</sup>、シールドトンネルにおいて も具体的な照査方法が示される予定である.これまでの 鉄道シールドトンネルの設計は、許容応力度設計法で行 われており<sup>2)</sup>、セグメント継手のモデル化についても、 コンクリートの圧縮縁の応力が許容応力度に達する時を もとに設定している<sup>3)</sup>.一方、性能照査型設計法を導入 した場合、許容応力度を超える領域で照査を行う可能性 があるが、従来のモデル化法で対応できるか十分検討さ れていない.そこで、継手部材の降伏を考慮した継手の モデル化法<sup>4</sup>と従来のモデル化法を用いて、鉄道単線シ ールドトンネルを対象に性能照査型設計法による試算を 行い、継手のモデル化法の影響について検討した.

## 2. セグメント継手のモデル化法

シールドトンネルの構造解析においては、はりーばね モデルと呼ばれる骨組構造解析手法が用いられ、セグメ ント継手は回転ばねでモデル化するのが一般的である.

従来の鉄道シールドトンネルのセグメント継手のモデ ル化では、図-1(a)のように中立軸がセグメント下縁に位





置する時,中立軸が継手のボルト位置にある時およびコ ンクリートの圧縮縁の応力が許容応力度に達した時につ いて,回転角6と曲げモーメント M を算出し,これをも とにセグメントの回転ばね特性を設定する.これに対し て,性能照査型設計法を用いる場合,許容応力度を超え る領域の挙動を検討する可能性が考えられる.そこで, 図-1 (b)に示すように,継手部材が降伏に達する時の回 転角6と曲げモーメント M を算出し,これを考慮して回 転ばね特性を設定する方法を提案した<sup>4)</sup>.なお,性能照 査型設計法については,コンクリート圧縮応力度の制限 に達する時の回転角を6a,曲げモーメントを Ma とする ことにした.

また,鉄道シールドトンネルの設計標準では,以下の 式(1)~式(5)を用いてコンクリートの圧縮縁の応力が許 容応力度に達する時の回転角 θと曲げモーメント M を 算出する方法が示されている<sup>2,3</sup>.

$$T = (d - x)\theta k_i \tag{1}$$

$$C = \frac{1}{2}b \cdot x \cdot \sigma_0 \tag{2}$$

$$x \cdot \theta = \frac{\sigma_0 \cdot l}{E_c} \tag{3}$$

$$C - T = N \tag{4}$$

$$C\left(\frac{h}{2} - \frac{x}{3}\right) + T\left(d - \frac{h}{2}\right) = M$$
(5)

ここに、M: 継手部の曲げモーメント
N: 継手部の引張力
T: 継手部の引張力
C: 継手部の圧縮力
d: 引張部材の有効高さ
x: 圧縮外縁から中立軸までの距離
b: セグメント幅
h: セグメント高さ
l: 圧縮ひずみの影響深さ (*l=2x*) *E*<sub>c</sub>: コンクリートのヤング係数
k<sub>j</sub>: 継手部の引張ばね定数
θ: 継手面の回転角

ここでは、まず、式(3)を用いて回転角 θを算出する. そ のうえで、式(1)および式(2)を式(4)に代入した式を用い て、圧縮外縁から中立軸までの距離 x を求める. さいご に、式(1)より算出した継手部の引張力 T と式(2)より算 出した継手部の圧縮力 C を式(5)に代入し、曲げモーメ ントMを算出する.

ただし、図-2(a)に示すように、従来の方法を用いた場合、応力 $\sigma$ とひずみ $\epsilon$ の関係が線形( $\sigma = E_{c}\epsilon$ )となる.従

来の鉄道シールドトンネルの設計は、許容応力度設計法 で行われているため線形であると仮定してもよいと考え られるが、大変形時の挙動を検討するうえでは乖離が生 じるものと考えられる.そこで、筆者らは、コンクリー トの応力--ひずみ関係に、RC構造物の設計で使われて いる図-3の関係 <sup>9</sup>を用いる方法を提案した<sup>4</sup>.ここでは、 式(3)に代わって、次式を用いる.

$$x \cdot \theta = \varepsilon_c l \tag{6}$$

## ここに, ε<sub>c</sub>: 圧縮外縁のコンクリートひずみ *l*: 圧縮ひずみの影響深さ (*l=2x*)

ここでは、まず圧縮外縁から中立軸までの距離 x を仮定 する. そのうえで、式(1)に継手部材が降伏するときの 継手部の引張力 Tを入力して回転角 θを算出し、式(6)を 用いて圧縮外縁のコンクリートひずみε を算出する. そ のうえで、図-3 を用いてコンクリートの応力ブロック を求め、継手部の圧縮合力 C を求める. ここで、式(4) が成立するかを確認する. これを、x を変えながら繰返 し行い、式(4)が成立する x を求める. さいごに、モーメ ントの釣り合いを解いて曲げモーメント M を算出する. 以上のように設定した回転角 θと曲げモーメント Mの

関係をセグメント継手の回転ばね特性として入力し,構 造解析を行った.

本研究では、鉄道単線シールドトンネルを対象に、照 査が厳しい設計条件を設定し、従来のセグメント継手の モデル化法を用いた場合と提案するモデル化法を用いた 場合について構造解析を行い、結果を比較した.



図-2 継手部のひずみおよび応力の分布 4



図-3 コンクリートの応力-ひずみ関係5

### 3. 継手のモデル化に関する試算

#### (1) 検討概要

#### a) 検討対象

検討対象は、内径は 6.4m の鉄道単線シールドトンネ ルとし、セグメント幅を 1.0m、セグメント高さを 0.3m とした. セグメント継手については、ボルト継手とワン パス継手の 2 ケースについて検討した. セグメントの分 割を図-4 に、材料物性値を表-1 に示す.

ボルト継手のケースについては、ボルトを2段配置し、 引張部材の有効高さ *d* は、正曲げ 0.24m、負曲げ 0.13m とした.ワンパス継手のケースについては、継手引張部 材が図心にあるとし、引張部材の有効高さ *d* を 0.15m と した.なお、継手部の引張ばね定数 *k*や継手部材の引張 降伏強度については、既往の資料<sup>の</sup>をもとに設定した。

#### b) 構造解析

2 リングはりーばねモデルを用いて構造解析を行った. ここで、覆工と地盤の相互作用については、トンネル半 径方向の地盤ばねで考慮した.地盤反力係数は、Muir Woodの理論解を用いて算出し、N 値 4 程度の粘性土を 想定して 1990kN/m<sup>3</sup>とした.



| 圛-4 | セグメン | ト分割 |
|-----|------|-----|
|-----|------|-----|

|       |         |                                      |                                     | ボルト    | ワン      |
|-------|---------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------|---------|
|       |         |                                      |                                     | 継手     | パス      |
| セグメント | コンク     | 設計基準強度 $f_{d}$ [N                    | [/mm <sup>2</sup> ]                 | 48     |         |
| 本体    | リート     | ヤング係数 E <sub>c</sub> [kN/n           | nm²]                                | 32.6   |         |
|       | 鉄筋      | 引張降伏強度f <sub>*</sub> [N              | 引張降伏強度 f * [N/mm <sup>2</sup> ] 345 |        | 45      |
|       | (SD345) | ヤング係数E <sub>s</sub> [kN/n            | nm²]                                | 200    |         |
| セグメント | ボルト     | ボルト径                                 |                                     | M27    |         |
| 継手    |         | 強度区分                                 |                                     | 6.8    | —       |
|       |         | 引張降伏強度 $f_{*}[N/mm^2]$               |                                     | 480    |         |
|       | 継手板     | 板厚f <sub>*</sub> [mm]                |                                     | 19     | —       |
|       | (SS400) | 引張降伏強度 $f_{yk}$ [N/mm <sup>2</sup> ] |                                     | 235    | -       |
|       | アンカ     | アンカー筋径                               |                                     | D      | 19      |
|       | 一筋      | 引張降伏強度 $f_{jk}$ [N/mm <sup>2</sup> ] |                                     | 34     | 45      |
|       | 継手部の    | 正曲げ                                  |                                     | 502500 | 40,6000 |
|       | 引張ばね    | 定数 k <sub>j</sub> [kN/m]             | 負曲げ                                 | 836400 | 496000  |

#### 表-1 材料物性值

#### c) 作用

本研究では、土水一体を適用し、土圧および自重を作 用の組合せで考慮した.鉄道シールドトンネルに性能照 査型設計法を用いる場合、直接照査が必要となり、かつ 決定ケースとなる可能性の高い性能項目として、安全性 (破壊)および復旧性(損傷)が挙げられる.また、耐 久性の検討および照査の前提を満足する必要があるが、 このうち曲げひび割れの検討やコンクリート応力度の制 限も決定ケースになる可能性がある<sup>ヵ</sup>.

安全性(破壊)の照査にあたっては,作用のバランス を崩して設計曲げモーメントが大きくなるように,鉛直 土圧,水圧および自重の作用係数を 1.0 とし,側方土圧 の作用係数を 0.9 としてまとめて考慮することにした. その他のケースについては,作用係数を 1.0 とした.

ここで、セグメント本体およびセグメント継手ともに、 コンクリート応力度の制限を満足することを確認するこ とから、作用係数を 1.0 とする作用の組合せを用いる場 合は、Ma以下で検討することになり、継手モデル化の 差異(図-2(a)および(b))による影響がほとんど無いもの と考えられる.そこで、作用のバランスを崩して設計曲 げモーメントが大きくなるように設定する安全性(破壊) の構造解析結果について比較した.

設計作用は、既往のパラメトリックスタディの結果<sup>®</sup>をもとに、照査が厳しくなる条件を設定した.設計作用を図-5に示す.

#### d) セグメント継手のモデル化

2章で示した従来の方法および提案する手法を用いて、 構造解析に用いるセグメント継手の回転ばね特性(回転 角θと曲げモーメントMの関係)を設定した(図-6). なお、算定に用いる平均軸力には、安全性(破壊)の作 用の組合せのときの値を用いた.



## (2) 検討結果

安全性(破壊)の作用の組合せについて,構造解析よ り得られた曲げモーメントを,表-2 および表-3 に示す. 今回の検討ケースについては,安全性(破壊)とは異な り作用係数を 1.0 とする作用の組合せを用いているが, コンクリート応力度の制限の照査を満足することを確認 している.本研究で提案するように継手部材が降伏を考 慮してセグメントの継手のモデル化を行うことにより, 従来の方法と比べて,セグメント本体の曲げモーメント が増加し,継手部の曲げモーメントが減少している.た だし,セグメント本体の曲げモーメントの増加量は,ボ ルト継手のケースでは3%程度,ワンパス継手の場合は

表-2 曲げモーメント (安全性(破壊)) (ボルト継手)

|       |     | 従来の継手    | 提案する継手   | 比     |
|-------|-----|----------|----------|-------|
|       |     | モデル化法(A) | モデル化法(B) | (B/A) |
| セグメント | 正曲げ | 204.61   | 205.87   | 1.01  |
| 本体    | 負曲げ | 223.79   | 229.90   | 1.03  |
| セグメント | 正曲げ | 114.46   | 112.80   | 0.99  |
| 継手    | 負曲げ | 116.89   | 109.00   | 0.93  |

| 表-3曲に | ドモーメ | ミント | (安全性 | (破壊) | ) | (ワンパス継手) |
|-------|------|-----|------|------|---|----------|
|-------|------|-----|------|------|---|----------|

|       |     | 従来の継手    | 提案する継手   | 比     |
|-------|-----|----------|----------|-------|
|       |     | モデル化法(A) | モデル化法(B) | (B/A) |
| セグメント | 正曲げ | 205.86   | 209.24   | 1.02  |
| 本体    | 負曲げ | 221.98   | 234.36   | 1.06  |
| セグメント | 正曲げ | 104.22   | 97.80    | 0.94  |
| 継手    | 負曲げ | 122.73   | 107.96   | 0.88  |

|          |      |          | 正曲げ              | 負曲げ              |
|----------|------|----------|------------------|------------------|
|          | 幅    | B mm     | 1000             | 1000             |
|          | 高さ   | Hmm      | 300              | 300              |
| 部材<br>諸元 | 引張鉄筋 | 鉄筋量      | D22-8本           | D19-6本<br>D22-2本 |
|          |      | $D_s$    | 45.0             | 45.0             |
|          | 圧縮鉄筋 | 鉄筋量      | D19-6本<br>D22-2本 | D22-8本           |
|          |      | $D_{sc}$ | 45.0             | 45.0             |

表-4 部材諸元

表-5 照査結果(安全性(破壊))(ボルト継手)

|       |     | 従来の継手    | 提案する継手   | 比     |
|-------|-----|----------|----------|-------|
|       |     | モデル化法(A) | モデル化法(B) | (B/A) |
| セグメント | 正曲げ | 0.85     | 0.86     | 1.01  |
| 本体    | 負曲げ | 0.94     | 0.96     | 1.02  |

表-6 照査結果(安全性(破壊)) (ワンパス継手)

|       |     | 従来の継手    | 提案する継手   | 比     |
|-------|-----|----------|----------|-------|
|       |     | モデル化法(A) | モデル化法(B) | (B/A) |
| セグメント | 正曲げ | 0.86     | 0.87     | 1.01  |
| 本体    | 負曲げ | 0.94     | 0.98     | 1.04  |

6%程度であり、継手モデル化の差異が及ぼす影響は小 さいことが確認できた.

つぎに,表-4 に示す部材諸元について,安全性(破壊)の照査結果を表-5 および表-6 に示す.ここでは, 安全性(破壊)以外については作用係数を 1.0 とする作 用の組合せを用いており,*M*a以下で検討することにな り,継手モデル化の差異の影響がほとんど無いことから, 安全性(破壊)の照査結果のみを示している.

これより、継手部材が降伏を考慮してセグメントの継 手のモデル化を行うことにより、安全性(破壊)の照査 値の増加量は最大でも4%であった.今回設定した条件 は、負曲げの照査値が0.95以上であり、照査が厳しく なるような条件であり、継手のモデル化の差異の影響が 出やすい条件であると考えられる.このことを踏まえる と、常時の設計では、継手モデル化の差異が及ぼす影響 は小さいといえる.

以上より、常時の設計では、従来のセグメント継手の モデル化法を用いても問題ないと考えられる.

#### 4. おわりに

本研究では、鉄道単線シールドトンネルを対象に、照 査が厳しい設計条件を設定し、継手部材の降伏を考慮し たセグメント継手のモデル化法 やと従来のモデル化法を 用いた場合について性能照査型設計法による常時の試設 計を行った.これより、継手モデル化の差異が断面力や 照査値に及ぼす影響は小さいことを把握し、常時の設計 では、従来のセグメント継手のモデル化法を用いても問 題ないことが確認できた.

#### 参考文献

- 1) 国土交通省監修,鉄道総合技術研究所編:鉄道構造物 等設計標準・同解説(トンネル・開削編),2021.
- 旧運輸省監修,鉄道総合技術研究所編:鉄道構造物 等設計標準・同解説,シールドトンネル,pp.157-158, 1997.
- 鉄道総合技術研究所:シールドトンネルの設計標準 に関する手引き,2001.
- 4) 津野究,木下果穂,川上義輝:シールドトンネルの セグメント覆工の変形挙動に関する実験的研究,土 木学会論文集 F1, Vol. 76, No. 1, pp. 112-126, 2020.
- 5) 国土交通省監修,鉄道総合技術研究所編:鉄道構造 物等設計標準・同解説,コンクリート構造物,pp. 76-77,2004.
- 6) 日本シールドセグメント技術協会 RC セグメント部 会:コーンコネクターセグメント ワンパス継手,パ ンフレット, 2014.
- 7) 津野究,滝川遼,木下果穂,坂田智基:性能照査型設 計法によるシールドトンネルの試設計例,地下空間シ

(2021.8.6 受付)

# TRIAL CALCULATION FOR INVESTIGATION OF MODELLING OF RADIAL JOINTS FOR PERFORMANCE BASED DESIGN METHOD

## Kiwamu TSUNO, Ryo TAKIGAWA and Takashi USHIDA

Modelling method of radial joints for performance based design method have not been fully investigated although check of performance may be carried out at the area exceeded to allowable stress. This research therefore proposed a modelling method in consideration of yield strength of joint material. The author carried out trial design with both existent and proposed modelling method by means of the performance based design method and grasped that the influence of modeling method on calculated sectional force and check values is small. It is considered that it is possible to apply the existent modelling method in case of ordinal design except for seismic design.

- 5 -