

鉄道シールドトンネルの耐震検討における継手モデル化手法に関する一考察

中央復建コンサルタンツ (株) 正会員 ○中里 大樹 坂田 智基 室谷 耕輔
 (公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 津野 究 藤田 輝一 木下 果穂

1. はじめに

鉄道シールドトンネルの横断方向について、はりばねモデルを用いた応答変位法により地震時応答を算出する場合、セグメント継手は常時と同様の非線形領域を考慮しない回転ばね特性を用いることが多い。しかし、大規模地震かつ大断面の場合、トンネル応答が非線形領域まで至る可能性があり、非線形領域を考慮しない継手モデルでは地震時応答を適切に評価できていないことが考えられる。さらに、継手構造も様々な種類があり、その力学的特性も異なることから、設計時における継手のモデル化は大きな課題となっている。本研究では、複線シールドトンネルモデルを対象として、セグメント継手のモデル化及び継手構造の違いに着目した試算を行い、地震時応答の比較検討を行う。

2. 試算モデル

図-1 に示す通り、解析モデルは土被り 15m (砂質土, N 値 25) の一様地盤中にある複線シールドトンネル (内径 $\phi 8.8\text{m}$) とし、はりばねモデルを用いた応答変位法により地震時応答を算出する。荷重条件は、常時断面力に鉄道耐震標準¹⁾の L2 地震動スペクトル II を用いて次元地盤応答解析 (GHE-S モデル) で算出したトンネル相対変位、周面せん断力及び慣性力を考慮する。なお、トンネル上下端の相対変位は 9.5cm (相対変形角: 約 1/90) である。地盤ばねは、鉄道開削標準²⁾に準拠して設定する。部材モデルは、セグメント本体をテトラリニアモデル、リング継手を線形とする。セグメント継手については 3 章で詳述する。

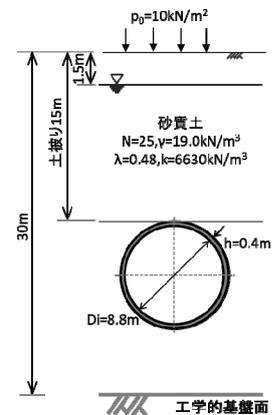


図-1 解析モデル

表-1 検討ケース

| | 継手構造 | 継手モデル |
|-------|---------|---------|
| ケース 1 | ボルト継手方式 | 現行標準モデル |
| ケース 2 | | 仮想RCモデル |
| ケース 3 | くさび締結方式 | 現行標準モデル |
| ケース 4 | | 仮想RCモデル |

3. 検討ケース

表-1 に検討ケースを示す。検討は継手構造とそのモデル化の違いの各 2 ケースを考慮した 4 ケースとする。

継手構造は、「ボルト継手方式」と「くさび締結方式」について検討する (図-2)。また、継手モデルは、鉄道シールド標準に基づき、継手面に作用する曲げモーメントと軸力の関係で設定するバイリニアモデル (以下「現行標準モデル」とする) と、継手と接合しているアンカー筋を引張鉄筋とした仮想 RC 断面とするテトラリニアモデル (以下「仮想 RC モデル」とする) について検討する (図-3, 4)。なお、各継手モデルの回転ばね定数は、表-2, 3 に示す通りである。

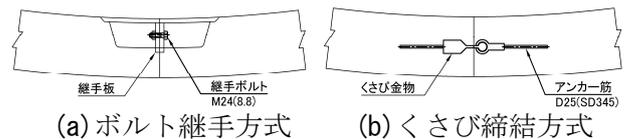


図-2 セグメント継手構造図

表-2 現行標準モデル回転ばね定数

| | | ケース 1 | | ケース 3 | |
|-----|-------------------|---------|----------------------|---------|----------------------|
| | | M(kN·m) | $\theta(\text{rad})$ | M(kN·m) | $\theta(\text{rad})$ |
| 正曲げ | θ_1, M_1 | 148.5 | 0.00000 | 203.6 | 0.00000 |
| | θ_2, M_2 | 305.7 | 0.00075 | 298.1 | 0.00075 |
| 負曲げ | θ'_1, M'_1 | -163.8 | 0.00000 | -203.6 | 0.00000 |
| | θ'_2, M'_2 | -272.1 | -0.00063 | -298.1 | -0.00075 |

表-3 仮想 RC モデル回転ばね定数

| | | ケース 2 | | ケース 4 | |
|-----|-------------|---------|----------------------|---------|----------------------|
| | | M(kN·m) | $\theta(\text{rad})$ | M(kN·m) | $\theta(\text{rad})$ |
| 正曲げ | θ_c | 229.1 | 0.00032 | 221.4 | 0.00032 |
| | θ_y | 504.3 | 0.00435 | 456.7 | 0.00949 |
| | θ_m | 588.3 | 0.02016 | 475.9 | 0.02023 |
| | θ_n | 504.3 | 0.03439 | 456.7 | 0.02427 |
| 負曲げ | θ'_c | -227.6 | -0.00032 | -221.4 | -0.00032 |
| | θ'_y | -473.3 | -0.00546 | -456.7 | -0.00949 |
| | θ'_m | -508.9 | -0.02053 | -475.9 | -0.02023 |
| | θ'_n | -473.3 | -0.02755 | -456.7 | -0.02427 |

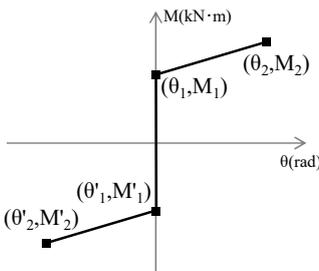


図-3 現行標準モデル

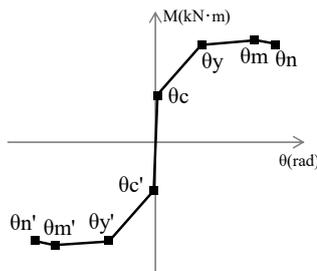


図-4 仮想 RC モデル

キーワード 鉄道シールドトンネル, セグメント継手, はりばねモデル, 耐震検討, 応答変位法

連絡先 〒102-0083 東京都千代田区麹町 2-10-13 中央復建コンサルタンツ (株) TEL: 03-3511-2006

4. 試計算結果

(1) セグメントの応答値の比較：図-5 に各ケースの断面力図を示す。断面力の発生モードは曲げモーメント、せん断力及び軸力ともに同じ傾向を示している。「ボルト継手方式」で比較すると、ケース1に対して、曲げモーメントと軸力はケース2のほうが大きく、それぞれ1.02倍、1.06倍となっている。しかし、せん断力はケース2の方が小さく、0.98倍となっている。また、「くさび締結方式」で同様の比較をすると、ケース3に対して、曲げモーメントと軸力はケース4の方が大きく、それぞれ1.03倍、1.10倍となっており、せん断力はケース4の方が小さく、0.85倍となっている。

(2) 継手部の応答値の比較：図-6 に継手部の応答結果を示す。「ボルト継手方式」、「くさび締結方式」ともに、ケース1と3ではセグメントが離間する第二勾配まで応答し、ケース2と4では継手ボルトもしくはアンカー筋の降伏モーメント付近まで応答している。また、ケース1と3では同程度の応答を示しているが、ケース2と4では、変形性能が大きい「くさび締結方式」のケース4の方が変形角 θ が大きくなっている。

(3) 継手構造の違いによる比較：図-7 に各部材の最大断面力を示す。曲げモーメントについて、「仮想 RC モデル」の場合、セグメント本体で1.02~1.03倍と増加するが、セグメント継手で0.80~0.92倍と減少し、合理的に継手部の断面力を評価することができる。また、せん断力については、セグメント本体で0.85~0.98倍、セグメント継手で0.86~0.98倍とともに減少するが、リング継手では1.37~2.77倍と大きく増加する結果となる。また、「ボルト継手方式」と「くさび締結方式」を比較すると、柔構造である「くさび締結方式」のほうがリング継手のせん断力の増加比率が大きくなっている。

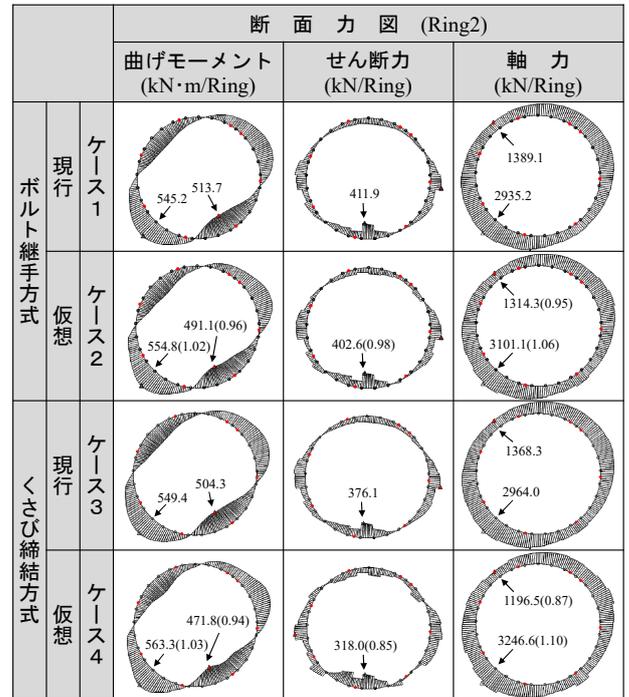
以上より、継手部の変形性能を考慮する「仮想 RC モデル」を用いることで、トンネル断面力を合理的に評価できるが、リング継手のせん断力は、「現行標準モデル」を用いる場合よりも大きくなる。さらに、柔構造の継手モデルを用いる場合、リング継手の断面力が大きく増加する傾向があることから留意が必要である。

5. おわりに

本研究では、鉄道シールドトンネル横断方向を対象として、セグメント継手の構造とモデル化に着目し、異なる2つの継手構造とモデルを用いて試計算を行い、継手のモデル化の手法について比較検討した。今後、様々な継手条件での試設計を実施し、シールドトンネルの耐震検討手法について検討を深度化していく。

参考文献：

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，2012.9
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 開削トンネル，2001.3
- 3) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 シールドトンネル，2002.12



※()内の数値は現行標準モデルに対する比率を示す。

図-5 断面力図

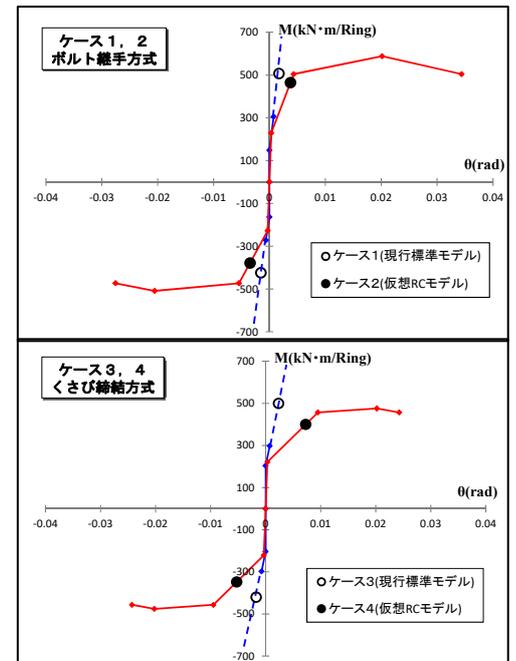


図-6 セグメント継手の応答結果

※グラフ内の数値は現行標準モデルに対する比率を示す。

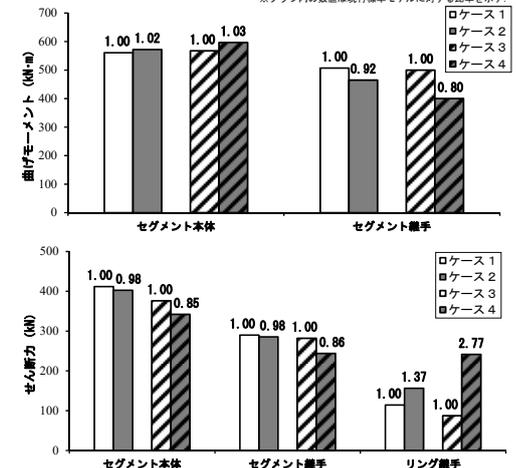


図-7 各部材の最大断面力