

応答変位法を用いたシールドトンネル横断方向耐震検討時のモデル化に関する検討

東日本旅客鉄道株式会社 正会員 ○小西 陽太, 小泉 秀之, 本田 諭

1. はじめに

地盤への追従性の高いシールドトンネルにおいても、周辺地盤の相対変位やひずみが顕著に大きくなる地盤条件では、地震の影響が無視できない。一方、既往のシールドトンネルの設計事例は許容応力度法によるものが多く、耐震検討で対象とするような変形領域に対するモデル化事例は多くない。そこで、シールドトンネルの横断方向耐震検討を対象とし、地盤およびリング間継手のモデル化手法について検討を行った。

2. 検討手法と考慮する地震作用

シールドトンネルの構造解析では、地盤をばね、セグメント継手を回転ばね、リング間継手をせん断ばねでそれぞれモデル化した、はり-ばねモデルが広く用いられる。耐震検討においても、一次元地震応答解析から得たトンネル位置の地震作用を、はり-ばねモデルに入力する分離型応答変位法を用いることが提案されている¹⁾。

今回、一次元地震応答解析より、トンネル上下端位置の地盤の相対変位が最大となる時の、地盤変位、地中せん断応力、慣性力を取得し地震作用とした。なお、地盤の構成則には GHE-S モデル²⁾を用い、鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）に示される L2 地震動スペクトル II²⁾を基盤面より入力した。GHE-S モデルのパラメータは、繰返し三軸圧縮試験結果より決定した。

3. 検討断面の設定

検討断面の設定に際しては、実際の設計対象を参考とし、東京礫層（洪積層）を耐震設計上の基盤面とし、その上部に東京粘性土層（洪積層）、有楽町粘性土層（沖積層）と続く地盤構成を想定した。比較検討のため、検討断面は洪積層-沖積層境界とトンネルとの位置関係から断面①～④の4断面設定し、各断面で土被りを 0.5D と 1.5D の2種を仮想的に設定した。検討断面と地震応答解析結果（土被り 0.5D）のうち地盤変位と地中せん断応

力を図1に示す。なお、トンネル覆工諸元は、覆工厚さ 300mm、リング幅 1200mm でトンネル外径 7.1m（図心直径 $R_c=6.8m$ ）の単線シールドトンネルである。

4. 地盤反力係数の設定と各地震作用の影響

地震時の地盤の剛性低下を考慮するために、地震応答解析結果より得られる i 番目の地盤のせん断応力 τ_{di} とせん断ひずみ γ_{di} を用いて動的弾性係数 E_{eqi} を取得し、地盤反力係数 k_{ri} を算出した。ここで、 ν_i は i 番目の地盤の動的ポアソン比である。地盤反力係数 k_{ri} の設定にあたっては、Muir Wood, A.M. の理論式³⁾を用いたもの（式(2)）と、開削トンネルの耐震検討に用いられる式を準用した⁴⁾もの（式(3)）などが提案されており、今回は、この2種類による試算を行った。

$$E_{eqi} = 2(1 + \nu_i) \tau_{di} / \gamma_{di} \quad (1)$$

$$k_{ri} = 3E_{eqi} / \{(1 + \nu_i)(5 - 6\nu_i)R_c\} \quad (2)$$

$$k_{ri} = 1.7E_{eqi} (\sqrt{2}R_c/2)^{-3/4} \quad (3)$$

式(2)によるものを「ばね A」、式(3)によるものを「ばね B」とする。ばね B の方が値は大きく、今回のトンネル外径では、ばね A の約 1.8 倍となる。上記地盤ばね A, B を用い、各断面における地震時の断面力を算定した。この際、トンネルは剛性一様を仮定しコンクリートの非線形性を考慮している。各断面に対する発生曲げモーメントの最大値を地震時(a)として表1に示す。なお、地盤ばね A を Case-1、地盤ばね B を Case-1' としている。また、地震作用のうち地盤変位起因(b)、周面摩擦力起因(c)と考えられる発生曲げモーメントを併せて示す。これらは、それぞれ地震作用から地盤変位および周面摩擦力を除いて算出した発生曲げモーメントと、地震時(a)との差分とした。Case-1 と Case-1' を比較すると、断面①～③で Case-1' の方が 20% 程度大きい。地盤ばねが大きい分、地盤変位起因の発生断面力が大きくなったと考えられる。一方、相対変位が小さく地中のせん断応力が支配的な断

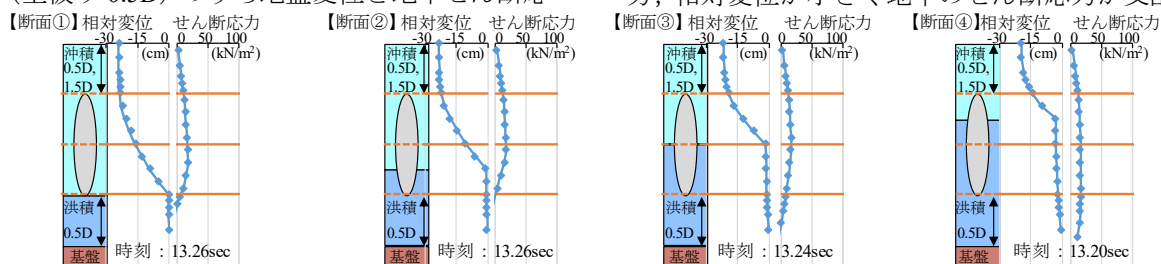


図1 設定断面と地震応答解析結果（土被り 0.5D、相対変位と地中せん断応力のみ抜粋）

キーワード シールドトンネル, 耐震検討, 応答変位法

連絡先 〒141-0031 東京都品川区西五反田三丁目 5-8 JR 目黒 MARC ビル 4 階 TEL03-6878-0017

面④では、Case-1'はCase-1と同程度かやや小さく、地盤ばねによる支持効果の増加が推定される。また、洪積層-沖積層境界をトンネル下半分に有する断面②、③では、地盤変位起因の発生曲げモーメントが占める割合が大きい。層境での地盤ばねの変化が大きいことで局所的に曲げが集中することが一因であると考えられる。

5. リング間継手のモデル化手法とその影響

セグメント継手を有するリングは、千鳥に組まれた隣接するリングをリング間継手で接続することで添接効果を発揮する。リング間継手のせん断ばねは、リング間の摩擦力により添接効果が発揮されるとしてモデル化することが多い。一方、地震時には、リング間の摩擦力の限界値を超え、遊間分滑ったのち継手鋼材により添接効果が発揮される変形領域に至ることが考えられる。添接効果が継手面の摩擦にのみ依存する段階を「段階①」、これ以降を「段階②」とする。概略図を図2に示す。

今回、摩擦力の限界値が大きくリング間の添接効果が段階①のみにより発揮される場合(Case-2, 2')と、摩擦力の限界値が小さく段階②に移行する場合(Case-3, 3')について、それぞれ地震時の発生曲げモーメントを求め比較を行った。なお、リングは6分割としセグメント継手の回転ばねを考慮している。また、摩擦力の限界値はトンネル軸方向の軸力に依存するが、Case-3, 3'では、ジャッキ推力の最大値の5%が軸力として残存すると仮定し設定した。表2に各断面の発生曲げモーメントの最大値を示す。Case-1, 1'と比較して、Case2, 2'のセグメント本体の曲げモーメントは20~30%程度増加した。セグメント継手部の剛性が小さく、本体に曲げモーメントが集中したためと考えられる。また、Case-2, 2'と比較して、

Case-3, 3'の発生曲げモーメントは、セグメント本体では減少傾向にあり、セグメント継手部では20%程度増加する結果となった。これは、リング間の添接効果が小さくなることで、各リングにおいて、剛性の小さいセグメント継手部での変形が大きくなったためと考えられる。

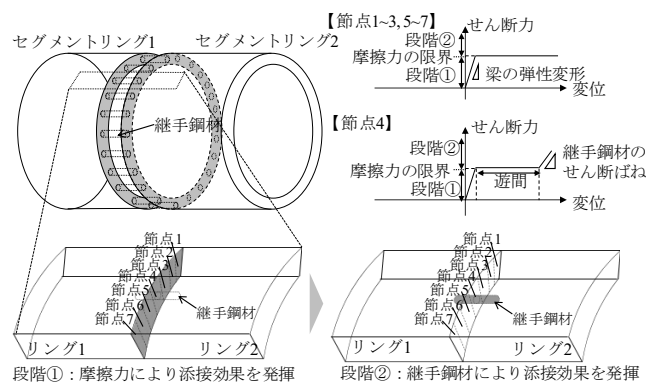


図2 リング間継手面の添接効果とモデル化の概略図

6. まとめ

応答変位法を用いたシールドトンネルの横断方向耐震検討を目的とし、地盤ばねおよびリング間継手のモデル化手法と応答値に与える影響について検討した。

地盤ばねの値については、応答値への影響は著しく大きいものではないが、地盤条件によりその相関が逆転することが示唆された。リング間の添接効果の評価は、その小さいずれかが、トンネル全体の安全側の評価とはならず、計測データの蓄積による適切な評価が必要である。

参考文献

1) (公財)鉄道総合技術研究所, 鉄道構造物等設計標準・同解説(トンネル・シールド編), 2022. 2) (公財)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. 3) Wood, M., The circular tunnel in elastic ground, Geotechnique 25, 1975. 4) 船越ら, 鉄道シールドトンネルを対象とした横断方向の耐震検討例, トンネル工学報告集, 2018.

表1 剛性一様リングの地震時発生曲げモーメント (2種類の地盤ばねの比較)

断面(土被り-断面番号)			0.5D-①	0.5D-②	0.5D-③	0.5D-④	1.5D-①	1.5D-②	1.5D-③	1.5D-④
着目点(曲げ方向)			正	負	正	負	正	負	正	負
Case-1 ばねA	地震時(a)	kN・m	155	-156	207	-195	158	-188	97	-111
	地盤変位起因(b)	kN・m	30	-40	121	-104	67	-93	10	-21
	周面摩擦力起因(c)	kN・m	84	-82	68	-62	36	-68	48	-69
	比率									
	b/(b+c)		0.26	0.33	0.64	0.63	0.65	0.58	0.17	0.23
Case-1' ばねB	地震時(a')	kN・m	177	-184	261	-245	196	-236	95	-117
	地盤変位起因(b')	kN・m	57	-75	179	-161	110	-147	16	-34
	周面摩擦力起因(c')	kN・m	81	-75	59	-51	15	-56	29	-55
	比率									
	b'/(b'+c')		0.42	0.50	0.75	0.76	0.88	0.72	0.36	0.38
比較										
a/a'			1.14	1.18	1.26	1.26	1.24	1.26	0.98	1.05

表2 シールドトンネルの地震時発生曲げモーメントの最大値

断面			0.5D-①	0.5D-②	0.5D-③	0.5D-④
地盤ばね種別			ばねA	ばねB	ばねA	ばねB
部材			本体	継手	本体	継手
Case-1, 1'	剛性一様リング	kN・m	156	184	207	261
Case-2, 2'	セグメント継手ありA	kN・m	204	75	237	80
Case-3, 3'	セグメント継手ありB	kN・m	196	87	224	97
比較1	Case-2, 2'/Case-1, 1'		1.31	1.29	1.23	1.20
比較2	Case-3, 3'/Case-2, 2'		0.96	1.16	0.94	1.22