

開削トンネルの耐震設計における応答変位法の適用性に関する一考察

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○川西 智浩
 (公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 井澤 淳
 (公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 室野 剛隆

1. はじめに

鉄道開削トンネルの耐震設計における応答値算定法としては、一般的に応答変位法が用いられている。応答変位法の問題点の一つとして地盤ばねの設定方法に起因する計算精度の問題が挙げられ、特に地盤と開削トンネルの剛性が大きく異なる場合に応答変位法の計算精度が悪くなることがわかっている¹⁾²⁾などが、応答変位法でも応答値が精度良く算定できる条件は明確になっておらず、実務上は鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)³⁾以下、耐震標準>に示されている地盤ばねの算定式に基づき、剛性比の影響を考慮せずに開削トンネルの応答値が算定されている。そこで本検討では、設計実務における応答変位法の適用性について検討するため、地盤と開削トンネルの剛性比を細かく変化させたパラメータスタディを実施し、開削トンネルにおける応答変位法と動的解析の応答値を比較するとともに、実事例における地盤とトンネルの剛性比の整理を行う。

2. 検討条件

検討に用いる地盤－開削トンネルモデルの概要を図1に示す。本検討では地盤および開削トンネルは弾性体とした。まず、開削トンネルは梁でモデル化し、図2に示すようにトンネル左上部に一方向に載荷して、開削トンネルのせん断剛性 G_s を求める。次に、地盤と開削トンネルの剛性比 G_s/G_g が1/10, 1/3, 1/2, 1, 2, 5となるように、地盤のせん断剛性 G_g を6通りに変化させたモデルを作成する。そして、耐震標準におけるL2地震動スペクトルⅡ(G1地盤用)を図1のモデルに入力して動的解析を実施し、トンネル上下床版深さ位置における自然地盤(トンネルから十分離れた位置の地盤)の相対変位が最大となる時刻のトンネルの応答を抽出する。次に、その時刻の自然地盤の応答値から、応答変位法に必要な地震作用や地盤ばねを耐震標準にしたがって算出し、応答変位法によりトンネルの応答を算定して、動的解析の結果と比較する。

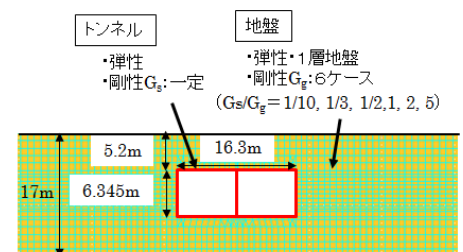


図1 地盤－開削トンネルモデルの概要

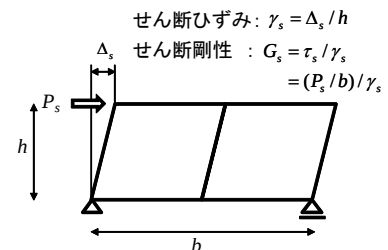


図2 開削トンネルのせん断剛性の算定

3. 応答値の算定結果

各ケースにおいて、動的解析と応答変位法の応答値を比較した結果を図3および図4に示す。図3はトンネルの変形、図4は左側壁のモーメントを示しており、トンネルの変形については各ケースの変形モードの違いが明確になるよう、地震時増分変位を拡大表示している。地盤と開削トンネルの剛性比が同程度($G_s/G_g=1$)の場合にはせん断変形が卓越し、応答変位法でも動的解析の変形や断面力を精度良く再現することができる。地盤と開削トンネルのせん断剛性が同程度だと、地盤とトンネルが同じ変形量で一体となって挙動し、相互作用を表す地盤ばねの影響が小さいためである。次に、地盤に比べて開削トンネルの剛性が小さい($G_s/G_g<1$)場合、既往の研究¹⁾でも指摘されている通り、水平方向のせん断変形に加えて鉛直方向のせん断変形も励起され、トンネル全体として斜め方向に伸ばされるような変形モードとなる。このうち、地盤と開削トンネルの剛性にそれほど差がない場合(本検討における $G_s/G_g=1/2$)には、鉛直方向のせん断変形の影響が大きいいため、応答変位法でも動的解析による変形や断面力をある程度再現することができるが、剛性比がさらに小さくなると、鉛直方向のせん断変形の影響が次第に大きくなり、隅角部のモーメント形状も G_s/G_g が1に近い場

キーワード 開削トンネル、応答変位法、剛性比

連絡先 〒185-0034 東京都国分寺市光町 2-8-38 TEL 042-573-7336 FAX 042-537-5326

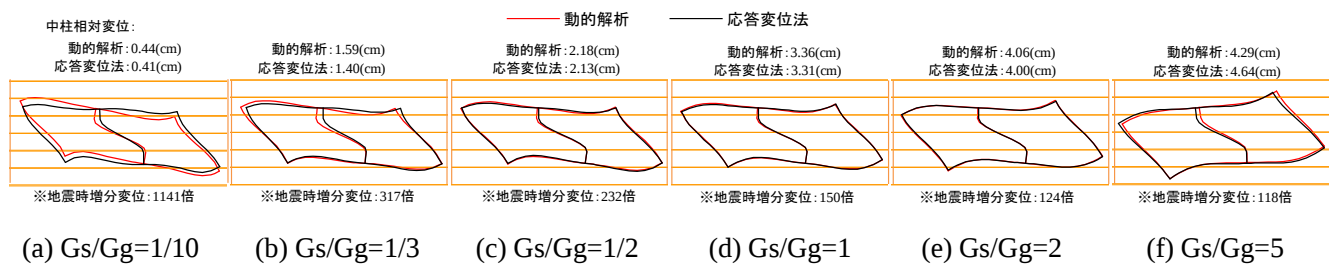


図3 開削トンネルの変形の比較

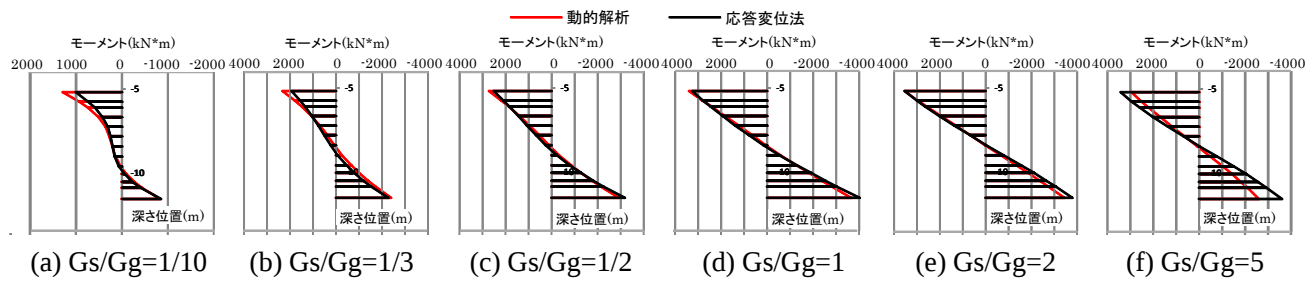


図4 開削トンネルのモーメントの比較<左側壁>

合に比べて変化する一方、応答変位法では変形や隅角部付近の断面力を過小評価する結果となる。このような場合には、モデル化手法の改良や安全係数の導入など、設計において過小評価とならないような工夫が必要であると考えられる。また、地盤に比べて開削トンネルの剛性が大きい場合 ($G_s/G_g > 1$) には、回転変形が励起される。このうち、地盤と開削トンネルの剛性にそれほど差がない(本検討における $G_s/G_g=2$) 場合には回転変形の程度も低く、応答変位法と動的解析の変形・断面力は概ね同程度であるが、剛性比がさらに大きくなる(本検討における $G_s/G_g=5$) と回転変形の影響が無視できなくなり、応答変位法ではその変形量や断面力を過大評価する結果となる。以上より、応答変位法でも応答値を精度良く算定するためには、地盤と開削トンネルの剛性比がある程度の範囲内に収まっている(つまり、地盤と開削トンネルの相互作用の影響がそれほど大きくない)ことが条件の一つになっていると考えることができる。

4. 実際の事例における剛性比の検討

実際の事例に対する応答変位法の適用性について検討するため、計4ケースの開削トンネル断面をモデル化して図2に示す要領でせん断剛性を算定し、地盤と開削トンネルの剛性比を求めた。ここでは構造物の非線形性を考慮してモデル化しているが、3.の検討結果との比較のために初期の剛性比を算定し、地盤のせん断剛性については、トンネル深さ位置の平均的な初期剛性を示した。また、 G_s につ

表1 実構造物・設計事例における剛性比

構造物モデル	初期剛性(kN/m ²)			(参考)損傷時 G_s	
	G_s	G_g	G_s/G_g	降伏点	最大耐力点
1層2径間 (耐震設計未実施の実断面)	33087	55631	0.595	9164	4504
1層2径間 (H24耐震標準準拠の設計断面)	31289	32321	0.968	6737	1725
3層2径間 (H11耐震標準準拠の実断面)	34983	45072	0.776	10101	4650
3層3径間 (H24耐震標準準拠の設計断面)	27472	56294	0.488	6593	2423

いては損傷時の G_s の値を参考までに算定した。算定結果を表1に示す。今回の4断面については初期の剛性比が 0.488~0.968 となっており、いずれも $G_s/G_g < 1$ であることから、実事例では水平方向のせん断変形に加えて鉛直方向のせん断変形も励起されるパターンの断面が多いものと推察される。また、3.で検討した G_s/G_g と応答変位法の適用性の関係に照らし合わせると、応答変位法でも概ね応答値が評価可能な範囲であると思われる。しかし、実際には剛性比以外のパラメータも断面ごとに変化し、また地盤・構造物とも非線形性を有するため、地震時には G_s や G_g の値も逐次変化する。応答変位法の計算精度はこれらの影響も受けられることから、今後は地盤・構造物の非線形化や多層地盤の影響等についても検討を行い、実構造物の耐震設計を念頭に置いた場合の、応答変位法の適用範囲について検討したいと考えている。

参考文献 1) 村井ら：地震時外力に着目した地下構造物横断方向に適用する応答変位法の計算精度と地盤バネに関する考察，トンネル工学研究論文・報告集，第10巻，pp.79-86，2000. 2) 西山ら：矩形地下構造物の応答変位法の相互作用ばね算定式と地盤ばねの観点からみた応答変位法の適用限界，第11回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.1173-1178，2002. 3) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)，平成24年9月。