

## 弾性 FEM 解析による開削トンネルの地震時挙動におけるせん断変形に関するひずみ伝達率近似式の適用性の検討

中央大学 学生会員〇七里 蒼 中央大学大学院 学生会員 西野 風雅  
HRC 研究所 正会員 島田 貴文 中央大学 正会員 西岡 英俊

### 1. はじめに

開削トンネル等の地中構造物の耐震設計では、主に地盤変位の影響を考慮する必要がある。また、その影響は函体の剛性 ( $G_s$ ) と地盤の剛性 ( $G_g$ ) の比 ( $G_s/G_g$ ) に依存すると考えられ、西岡・運上<sup>1)</sup>は、ひずみ伝達率 ( $\gamma_s/\gamma_g$ ) と剛性比  $G_s/G_g$  の関係が次式で近似できることを示している。

$$\frac{\gamma_s}{\gamma_g} = \frac{2(G_g/G_s)}{(G_g/G_s)+1} = \frac{2}{(1+G_s/G_g)} \quad (1)$$

しかしながら、式(1)の導出では、函体表面での滑動や剥離が検討されていない。さらに、函体が一様地盤に囲まれた状態を想定しており、支持地盤に着底している場合も検討されていない。そこで本稿では、函体と地盤は弾性でモデル化し、函体と地盤の間に滑動・剥離等を再現できるジョイント要素を配置した弾性 FEM 解析により、式(1)の適用性を検討する。

### 2. 解析概要

解析対象は、本研究グループで別途実施している横幅 1000mm のアルミ棒積層体でのせん断土槽実験とし、函体底面が支持層 (土槽下面) に接地していない条件 (以下、非着底条件) での実験<sup>2)</sup>と接地している条件 (以下、着底条件) での実験<sup>3,4)</sup>の 2 ケースを平面ひずみ条件でモデル化し、土槽両側壁に直線状の強制変位を与え、この側壁傾斜角を地盤のせん断ひずみ  $\gamma_g$  とした。非着底条件 (図-1) では地盤高さ 800mm、着底条件 (図-2) では地盤高さ 500mm で、いずれも函体上面の土被りは 300mm である。

函体は、外寸法が高さ 200mm×幅 200mm で、各面を剛な梁要素でモデル化し、左右側壁の隅角部に隣接する要素 (すなわち上下端の要素) のみ曲げ剛性を弱く設定することで函体のせん断変形を模擬した。その曲げ剛性は、剛性比  $G_s/G_g$  が 0~7 の範囲となるようにパラメトリックに全 6 ケース設定した。具体的な函体剛性  $G_s$  の値は、文献<sup>4)</sup>に示す方法に準じて、

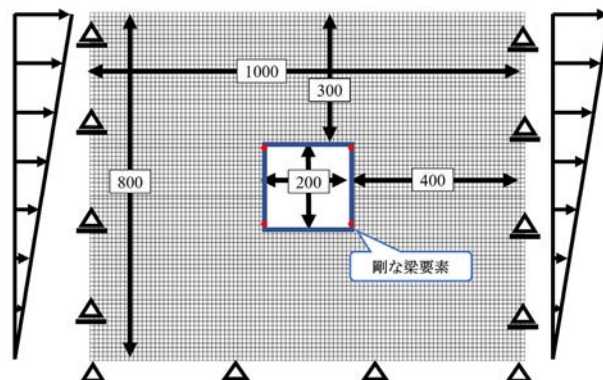


図-1 非着底条件の解析モデル

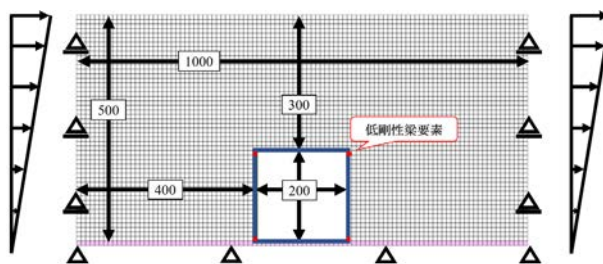


図-2 着底条件の解析モデル

表-1 解析ケースの組合せ

解析モデル	ジョイント要素の条件	函体剛性 $G_s$
非着底条件	滑り無 (固定)	各 6 ケース ( $0 \leq G_s/G_g \leq 7$ )
	滑り有	
着底条件	滑り無 (固定)	
	底面のみ滑り無 (固定) 他 3 面滑り有	
	滑り有	

表-2 主な解析パラメータ

地盤	せん断剛性 $G_g$	240 kN/m <sup>2</sup>
		ポアソン比
ジョイント要素 (滑り有のケース)	摩擦係数	上面 : 0.18 下面 : 0.35 左側壁 : 0.15 右側壁 : 0.19

ジョイント要素での表面力と函体のせん断ひずみの関係から求めた。

ジョイント要素の条件は、解析モデルに応じて滑りの有無を変化させた表-1 に示す全 5 ケースとした。鉛直剛性率  $K_n$ ・せん断剛性率  $K_s$  は、要素同士が重なる

キーワード FEM, ひずみ伝達率, 開削トンネル

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部都市環境学科 基礎・地下構造研究室 TEL : 03-3817-1804

らない状態を維持できる十分に大きい値を採用し、滑り有の函体表面の摩擦係数は、実験<sup>4)</sup>で実測された函体表面力の垂直力と水平力の合力比より設定した。主な解析パラメータを表-2にまとめて示す。

### 3. 解析結果および考察

#### (1) ひずみ伝達率

地盤のせん断ひずみ $\gamma_g=1\%$ 時での剛性比 $G_s/G_g$ とひずみ伝達率 $\gamma_s/\gamma_g$ の関係を図-3に示す。非着底条件では、西岡・運上式(式(1))とほぼ一致しており、滑りの有無による解析結果の差異もほとんど見られない。他方、着底条件の解析結果は、相対的に剛性比の影響を受けにくくなっており、両者は $G_s/G_g=1$ 付近で逆転している。また、滑りの有無によるひずみ伝達率の差異は、剛性比が大きくなるほど滑りが生じ

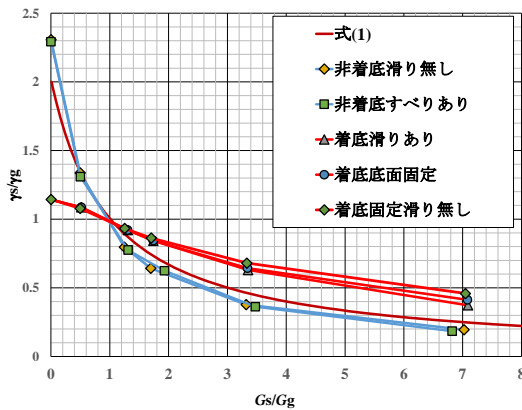


図-3 ひずみ伝達率とせん断剛性比

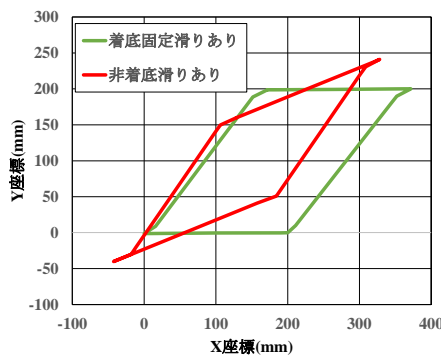


図-4  $G_s/G_g=0$ における変形図(50倍拡大)

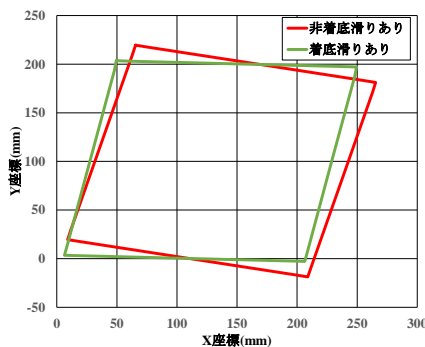


図-5  $G_s/G_g=7$ における変形図(50倍拡大)

ることひずみ伝達率がより減少しており、剛性比 $G_s/G_g=7$ の状態では3割程度の減少となった。

#### (2) 函体の変形状況

ここでは剛性比が $G_s/G_g=0$ と $G_s/G_g=7$ のケースを対象に、地盤のせん断ひずみ $\gamma_g=1\%$ 時の函体の変形状況について比較する。図-4、図-5に変位量を50倍に拡大した変形図を示す。

$G_s/G_g=0$ および $G_s/G_g=7$ のいずれも左側壁の角度はほぼ等しいが底面の回転角が異なる。また、非着底条件であっても $G_s/G_g=0$ は底面の回転がせん断変形に寄与しているのに対し、 $G_s/G_g=7$ はせん断変形に寄与しない方向へ回転している。

非着底条件での底面の回転方向は、 $G_s/G_g=0$ では左回りで函体のせん断ひずみ $\gamma_s$ が増加する動きとなっているのに対して、 $G_s/G_g=7$ では右回りで函体全体が剛体回転するような動きとなっており、函体自体のせん断ひずみ $\gamma_s$ が生じにくくなるような動きとなっている。底面が拘束される着底条件ではこれらの動きが抑制されることで相対的に剛性比の影響を受けにくくなる。これが要因で、着底・非着底条件でひずみ伝達率に差が生じ、大小関係の逆転が起きると考えられる。

#### 4. おわりに

本稿では、函体表面の滑り・剥離や函体底面の支持条件がひずみ伝達率に及ぼす影響について、弾性FEM解析により検討した。その結果、滑りや剥離の有無がひずみ伝達率へ及ぼす影響は比較的小さく、着底条件で $G_s/G_g$ が大きい場合に限定されることがわかった。一方、函体底面の支持条件はひずみ伝達率への影響が大きいことから、耐震設計に際してはこれを精度よくモデル化する必要があると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 西岡勉, 運上茂樹: ひずみ伝達特性を用いた地中構造物のせん断変形量の推定, 土木学会論文集 No. 710/1-60, 273-282, 2002.
- 2) 伊野将矢, 西野風雅, 西岡英俊, 島田貴文: 開削トンネルと地盤の剛性比に着目した地震時の函体変形特性に関する実験的研究, 第32回トンネル工学研究発表会, 土木学会, 2022.
- 3) 西野風雅, 西岡英俊, 島田貴文: 地震時開削トンネルと周辺地盤の剛性比とひずみ伝達率の関係に着目したせん断土槽実験, 土木学会第50回関東支部技術研究発表会, 2023.(投稿中)
- 4) 西野風雅, 伊野将矢, 島田貴文, 西岡英俊: 開削トンネルの地震時せん断挙動における函体表面力計測試験, 第41回地震工学研究発表会, 土木学会, 2022.