地震時の開削トンネルと周辺地盤の相互作用に関する実験的研究 ~函体と地盤の剛性比に着目した検討~

中央大学

学生会員 〇西野風雅 学生会員 松田敏輝 国際会員 西岡英俊

(株) HRC 研究所

1. はじめに

開削トンネルは,周囲を地盤で囲まれていることか ら,設計において構造物と地盤の関係性を適切に評価 する必要がある.開削トンネルの地震挙動は,地盤変位 の影響が支配的になることが知られており,これまで 種々の解析手法が提案され,トンネル自体に働く応力 や変形,地盤内における地震時作用が検討されている.

地震時の地盤変位が作用する開削トンネルの挙動に ついては、「地中構造物の剛性」と「周辺地盤の剛性」 の剛性比が主要なパラメータになると考えられ、例え ば立石・岡¹⁾は函体単独での単純せん断変形量から全体 的なせん断弾性係数*G*_sを求め、地盤のせん断弾性係数 *G*_gとの比(以下,剛性比*G*_s/*G*_g)に着目して、解析的な検 討を行っている.しかしながら、このような剛性比*G*_s/*G*_g に着目した実験的な検討事例は少ないのが現状である.

そこで本研究では、周辺地盤がせん断変形を生じた際の函体のせん断変形挙動について、特に両者の剛性 比*G*_s/G_gに着目した小型模型実験を実施した.

2. 実験概要²⁾

今回の試験に用いた模型地盤と実験装置を図-1 に示 す. 土槽スケールは,幅 200mm,高さ 200mm,奥行 150mm である.また,土被り厚さが函体高さの 5.3 倍 の場合の土被り圧となるように上載荷重を与えた.模 型地盤には,壁面摩擦が少なく地盤変状の可視化が容易 という利点を有するアルミ棒積層体を用いた.また,土槽 自体をジャッキで水平載荷することで,模型地盤に,地震 時の地盤変位を模擬した単純せん断変形を生じさせた. これらの詳細は参考文献 2)を参照されたい.

模型地盤単独の条件での単純せん断実験から求めたせん断弾性係数 G_g と土槽のせん断ひずみ γ_{gf} (=側壁フレームの傾斜角)の関係を図-2 に示す.図-2 より、模型地盤は微小ひずみレベルから明確な非線形性(ひずみレベル体存性)を示していることが確認できる.なお、図-2 中には近似した $G_{g\gamma g}$ 関係から γ_g =0.001, 0.005, 0.01 の 3 つの



図-1 実験装置の外観(水平載荷後)







図-3 本実験で用いた各函体模型の外観

表-1 各実験ケースと函体模型のせん断弾性係数G。

ケース名	Casel	Case2	Case3
材料	穴あきウレタン	低弾性ゴム	硬質ウレタン
G(kNm ²)	90	252	453

ひずみレベルでの地盤のせん断弾性係数 Ggの値を示した. 本実験で用いた各函体模型を図-3 に示す. 函体は,幅 40mm,高さ40mm,奥行き30mmの直方体を奥行き方向 に等間隔で3 つ並べて模型地盤中に埋設することで模擬 した.実験ケースは,函体模型に用いる材料および加工形 状を変化させた表-1 に示す3 ケースについてそれぞれ模

キーワード:開削トンネル,剛性比,せん断土槽,アルミ棒積層体,地震時挙動

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・地下構造物研究室 TEL 03-3817-1804

型地盤を再構築して2回ずつ実施した.

ここで Casel については、せん断剛性比が特に小さい 条件を模擬する目的で直径 20mm の中空加工を施した. また、表-1 中には、奥行き方向の函体模型の配置間隔や 中空加工条件も考慮した函体模型全体としての等価せん 断弾性係数 G_sの値も示した.なお、G_sの値は、各材料の 圧縮試験から求めたヤング率と各材料の一般的なポアソ ン比の値を用い、中空加工条件も考慮した弾性 FEM モデ ルに単純せん断変形を与えて求めた.

3. 実験結果および考察

各実験ケースにおいて, 函体隅角部4点(図-1赤色標 点)および周辺地盤4点(図-1黄色標点)の変位を画像 解析で求め,四辺形内のひずみが一定と仮定して算出し た周辺地盤の平均せん断ひずみ yg と函体のせん断ひずみ ys との関係を図-4に示す.地盤のせん断弾性係数 Gg 自体 は図-2 に示すように土槽のひずみが 1.0%以下でも明確 な非線形性を有しているにも関わらず,いずれのケース も函体のひずみ ys と周辺地盤のひずみ yg の関係は,線形 的な関係を示していることがわかる.

ここで両者の比率 (以下, せん断ひずみ比 γ_s / γ_g) 自体に 着目すると, 函体模型のせん断弾性係数 G_s が中間の Case2 では, $\gamma_s / \gamma_g \approx 1.0$ となっており, 地盤の変形に対して函体 の変形がほぼ追随していることが確認できる. 一方, G_s が 大きい Case3 は $\gamma_s / \gamma_g = 0.65 < 1.0$ となっているのに対して, G_s が小さい Case1 は $\gamma_s / \gamma_g = 1.61 > 1.0$ となっており, 剛性比 G_s / G_g の大小関係と逆の定性的な傾向が確認できる.

この傾向について詳細に検討するため、図-5 に剛性比 G_s/G_g に対するせん断ひずみ比 γ_s/γ_g の関係を示す.ただし、 剛性比 G_s/G_g 自体が地盤のひずみレベル依存性に応じて 変化するため、地盤のせん断ひずみレベルを $\gamma_g=0.1\%$, 0.5%,および1.0%の3段階で剛性比 G_s/G_g をプロットし、 この3段階毎に累乗近似曲線を示した.

函体・地盤とも弾性体であれば、剛性比が 1.0 の場合 には、函体は地盤と完全に同一の変形を生じ、せん断ひ ずみ比 γ_s / γ_g も 1.0 となるはずである.ただし、本実験で は、図-2 に示すような明確な非線形性を示す地盤につい ては、あるひずみレベルにおける等価線形剛性で剛性比 を評価することとなる.図-5 において γ_s / γ_g が 1.0 となっ たのは Case2 のみであり、その剛性比が 1.0 となる時の 地盤のせん断ひずみは $\gamma_g=0.5\%$ とある程度地盤が非線形







図-5 剛性比と平均せん断ひずみ比の関係

化した状態となっていることがわかる.このことは,開 削トンネルの耐震設計において地盤を線形ばねにモデル 化する場合には,地盤の初期剛性ではなく,ある程度非 線形化した時点の等価線形剛性を用いることの妥当性を 示唆している.

4. おわりに

本研究では、周辺地盤がせん断変形を生じた際の函体 のせん断変形挙動について、特に両者の剛性比 G_s/G_gに 着目した小型模型実験を実施した.

今後は、より大きなスケールのせん断土槽を用い、土槽 サイズにおける影響を確かめるほか、剛性、形状など函体 モデルのケースを増やし、剛性比における周辺地盤の相 互作用の関係性を明らかにすることを目指す.

参考文献

- 立石章,岡二三生:地中構造物横断方向のレベル2 地震動 に対する静的耐震設計法の適用性,土木学会論文集, No.752/I-66,pp170-192,2004
- 2) 西野風雅,島田貴文,西岡英俊:アルミ棒積層体を用いた 開削トンネルの地盤変位載荷実験,第56回地盤工学研究 発表会(投稿中),2020.7