

# 開削トンネル模型のせん断土槽実験（函体着底条件）の応答変位法による再現解析

中央大学 学生会員 ○山門 風音      中央大学大学院 学生会員 西野 風雅  
 中央大学 正会員                      西岡 英俊      HRC 研究所                      正会員 島田 貴文

## 1. はじめに

地中構造物の地震時挙動は、主に周辺地盤のせん断変形が外力となり函体に変形が生じることとなる。そのため、これらの耐震設計においては、函体と地盤の相互作用を適切に考慮して設計する必要がある。地震時作用は慣性力に起因するものと周辺地盤のせん断変形に起因するものがあるが、多くの地中構造物は大きな内空を有することより、地盤変位の影響が支配的になる。函体と周辺地盤の相互作用の程度は主に函体と地盤のせん断剛性の比率（以下、せん断剛性比  $G_s/G_g$ ）に支配されることが判明している<sup>1)</sup>。

せん断剛性比  $G_s/G_g$  に着目した既往の解析的検討<sup>1)</sup>では地盤の非線形挙動は考慮されていない。函体と地盤の相互作用に及ぼす地盤の非線形性の影響を検討するには、実験的検討が不可欠であるが、特にせん断剛性比に着目した実験的検討は事例が少ない現状がある。著者らの研究グループではアルミ棒積層体の模型地盤中に剛性を任意に設定可能な函体模型を埋設して模型地盤全体に強制せん断変形を与えるせん断土槽実験に取り組んでおり、先行して函体が支持層に着底した状態を模擬したせん断土槽実験（以降着底実験）を実施している<sup>2)3)</sup>。本稿では、開削トンネルの現行設計手法である応答変位法を用いた場合を対象に、せん断剛性比  $G_s/G_g$  とひずみ伝達率  $\gamma_s/\gamma_g$  の関係の実験結果の再現性について検討した結果について報告する。

## 2. 地盤ばねのモデル化

地盤は函体各面に垂直方向の等価線形地盤ばねを分割設置してモデル化する。着底条件実験の再現を対象とするため、下床版の地盤ばね定数は十分に剛な値とした。上床版・左右側壁の地盤ばね定数は、同一の模型地盤内に埋設した着底状態の函体模型に内部から強制的に純粋せん断変形を生じさせる強制せん断実験（図1）を実施して逆算した。函体各面の変形量（回転角  $\theta$ ）と表面力（偶力モーメント  $M_{cr}$ ）の関係（図2に上床版の例を示す）に基づき、関係の勾配より地盤の回転ばね定

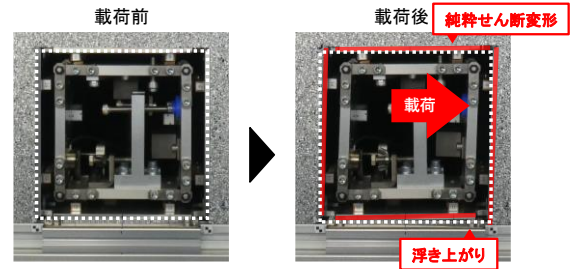


図1 函体の強制せん断実験での荷重前後の様子

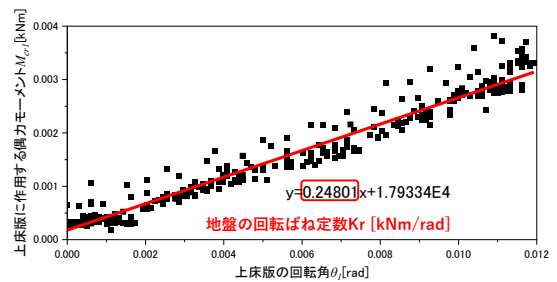


図2 上床版における函体偶力モーメントと回転角の関係

表1 各面の垂直方向の地盤反力係数

地盤反力係数	上床版	右側壁	左側壁
垂直方向 [kN/m <sup>3</sup> ]	2480	18344	18490

数  $K_r$  を求めた。それを各面の断面 2 次モーメント  $I_p = LB^3/12$  ( $L$ : 奥行き,  $B$ : 幅) で除した値を垂直方向の地盤反力係数(単位面積当たりの地盤ばね定数)  $k_v$  とした。(表1)

一方、せん断地盤ばねについては、本稿では実験で函体各面の滑動が生じてせん断力が上限に達していると確認されている土槽外枠のせん断ひずみ  $\gamma_{sf} = 1.0\%$  の状態を検討対象とし、せん断地盤ばねは完全降伏したとして、せん断力は荷重としてモデル化し、せん断地盤ばね自体はモデル化していない。

## 3. 函体模型および荷重のモデル化

実験に用いた函体模型は外寸法が 200mm 角、内枠隅角部のヒンジで（ヒンジ間距離 146mm）せん断変形を生じる機構であり、各面に 2 つずつ 2 方向ロードセルを受圧版を介して設置している。この内枠・ロードセル・受圧版を剛な梁要素でモデル化し、内枠ヒンジ部に

キーワード 開削トンネル, 応答変位法, 骨組み解析, せん断剛性比, ひずみ伝達率

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

回転ばねを設定した (図3に併記). その回転ばね剛性は着底実験での6種のせん断剛性比  $G_s/G_g$  の範囲を包含できるようにパラメトリックに設定した.

荷重条件の概要を図4に示す. 土槽のせん断変形前の常時荷重は, 着底実験で実測された側壁土圧と上載荷重を各受圧板に, 函体自重を各内枠に作用させた. それに地震時荷重として, 土槽をせん断変形させた状態で実測された各周面せん断力を受圧板に作用させた. また, 自然地盤水平変位の影響を左右側壁の水平地盤ばね定数に自然地盤の水平変位を乗じて荷重に換算し, これを左右側壁に作用させる荷重分布法によりモデル化した. なお, 自然地盤の変位はアルミ棒積層体地盤単独のせん断変形実験<sup>2)</sup>より, 土槽外枠のせん断ひずみ  $\gamma_{gf} = 1.0\%$  時の函体埋設相当位置での変位を画像解析にて実測した. 慣性力は, 静的な実験の再現であることから考慮していない.

5. 解析結果

応答変位法により得たひずみ伝達率  $\gamma_s/\gamma_g$  とせん断剛性比  $G_s/G_g$  の関係を図3に示す. 函体のせん断ひずみ  $\gamma_s$  は左右側壁および上下床版の回転角の差分から求め, 函体のせん断剛性  $G_s$  は文献4)に準じて算定した. 地盤のせん断ひずみ  $\gamma_g$  は, 土槽外枠のせん断ひずみ  $\gamma_{gf} \approx \gamma_g = 1.0\%$  とし, 地盤のせん断剛性  $G_g$  は, 深度に依存して線形増加する拘束圧依存性を有するとして求めた函体中心深さでの等価線形剛性 ( $G_g = 1.0 \text{ kN/m}^2$ ) を用いた.

図3より, 再現解析結果と実験値を比較すると,  $G_s/G_g$  の大きさに関わらず実験値と類似した傾向を示していることがわかる. よって, せん断剛性比  $G_s/G_g$  が 0.5~3 程度の範囲であれば, 地盤ばねおよび周面せん断力を適切に設定した骨組み解析モデルを用いた応答変位法によって, 着底実験のひずみ伝達率  $\gamma_s/\gamma_g$  を概ね再現可能であることがわかった.

また, 図3には, 西岡・運上によるひずみ伝達率の近似式<sup>1)</sup>を併記している. 着底条件では実験値および応答変位法での解析結果とも近似式とは乖離した. この乖離の要因としては, 一つにはせん断力自体が着底実験の実測値をそのまま用いていることが考えられる. また, 近似式では, 函体剛性  $G_s/G_g = 1.0$  (地盤と函体の剛性が同一) の場合にひずみ伝達率  $\gamma_s/\gamma_g$  も 1.0 (せん断変形が同一) となっているが, 実験再現モデルを用いた応答変位法では,  $G_s/G_g = 1.0$  でもひずみ伝達率  $\gamma_s/\gamma_g$  が 0.6 程度と, 函体に変形しにくい結果となっている. 近似式

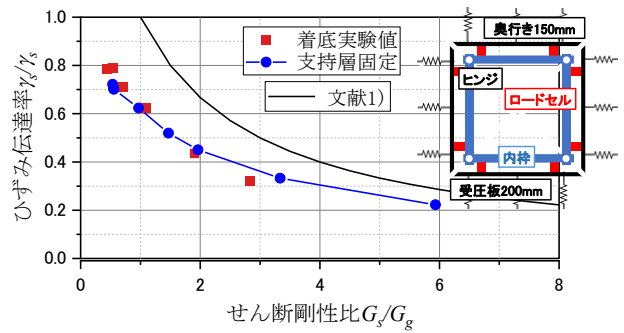


図3 ひずみ伝達率  $\gamma_s/\gamma_g$  とせん断剛性比  $G_s/G_g$  の関係 ( $\gamma_{gf} = 1.0\%$  時)

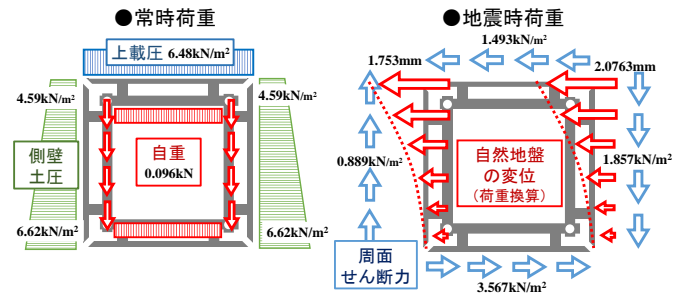


図4 荷重条件

の検証解析では, 隅角部を剛域として上下床版・左右側壁を梁要素として曲げ変形を考慮した函体モデルとしているが, 本実験・解析では, ヒンジ部での変形で上下床版・左右側壁を剛域としているほか, そのヒンジ部を有する内枠が比較的内側にある函体モデルを用いているため, せん断変形を生じにくくさせている可能性が考えられる.

6. おわりに

本研究ではせん断地盤ばねの完全降伏を考慮した応答変位法を用いて着底実験の再現解析を実施した.  $\gamma_g = 1.0\%$  時のひずみ伝達率  $\gamma_s/\gamma_g$  とせん断剛性比  $G_s/G_g$  の関係は解析値と実験値でおおむね同様の傾向を示した. しかし, 実験・解析は文献1)の近似式と乖離しており, 今後はこの乖離要因の解明を進めていく予定である.

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/I-60, pp. 273-282, 2002.
- 2) 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相互作用に関するせん断土槽実験-函体・地盤剛性比が函体表面力に及ぼす影響-, 地震工学論文集, Vol.42, 2022.
- 3) 西野風雅, 伊野将矢, 島田貴文, 西岡英俊: 地震時開削トンネルと周辺地盤の剛性比に着目したせん断土槽実験~回転拘束した函体着底条件での実験的検討~, 日本地震工学会・大会-2022, 2022.
- 4) 西野風雅, 伊野将矢, 島田貴文, 西岡英俊: 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)