

開削トンネルと周辺地盤の剛性比と地震時のひずみ伝達率の関係に着目したせん断土槽実験

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
 (株)HRC 研究所 正会員 島田 貴文

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が支配的になる。また、地盤変位が函体に及ぼす影響は、函体剛性 G_s と地盤剛性 G_g の比率（以下、剛性比 G_s/G_g ）に大きく依存すると考えられる。このような剛性比に着目した既往の研究の多くは地盤を弾性と仮定した解析的手法¹⁾であり、非線形性を有する地盤材料を用いた実験的な検討事例は少ない。そこで、本研究グループでは、中密な砂に似た非線形特性を示すアルミ棒積層体地盤でのせん断土槽実験^{2,3)}を実施し、西岡・運上¹⁾が示したひずみ伝達率と剛性比の関係における近似式と実験結果を比較した。函体模型をゴムで模擬した小型模型実験²⁾では地盤のひずみレベルの違いを等価線形剛性で評価することで西岡・運上式と概ね整合することが確認されたが、ヒンジ構造の函体模型を用いた実験³⁾では、両者が乖離する傾向が確認された。本稿ではこの傾向を精査するため、模型地盤の剛性評価に拘束圧依存性を考慮するとともに、函体剛性を表面力とせん断ひずみの関係から逆算し、改めて西岡・運上式と比較した。

2. 実験概要³⁾

本研究で用いた実験装置を図-1に示す。上端・下端にピンヒンジを有したせん断土槽で、単純せん断変形が可能である。土槽底面に函体模型（高さ、横幅 200mm、奥行 $D=150$ mm）を設置し、その周囲および上方に高さ $H_G=500$ mm までアルミ棒積層体による模型地盤を構築した。函体模型は4つの隅角部のピンヒンジ（ヒンジ間距離 146mm）によりせん断変形が可能で内蔵されたコイル型バネでせん断変形に抵抗する機構となっており、このバネを付け替えることで任意の函体剛性を設定することが出来る。また、各面に2つつ2方向ロードセルを有しており、各面に作用する表面力（垂直力 N 、せん断力 S 、偶力モーメント M_f ）を直接計測できる。

実験ケースは、内蔵したバネのバネ定数が異なる $G_{s000} \sim G_{s389}$ の計6ケースである。なお、ケース名の数値 G_s は、別途実施した函体模型単独載荷試験より算出した函体剛性の値（単位：kN/m²）である（ G_{s000} は

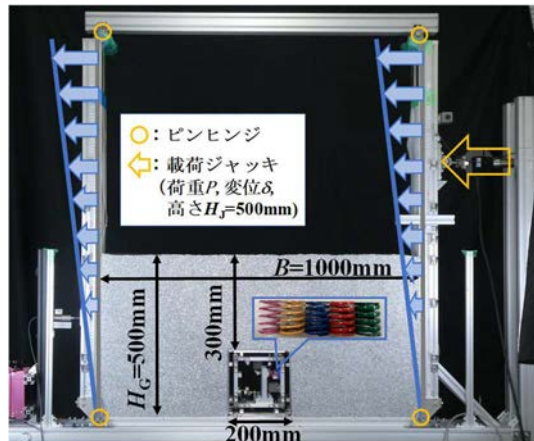


図-1 実験装置の外観

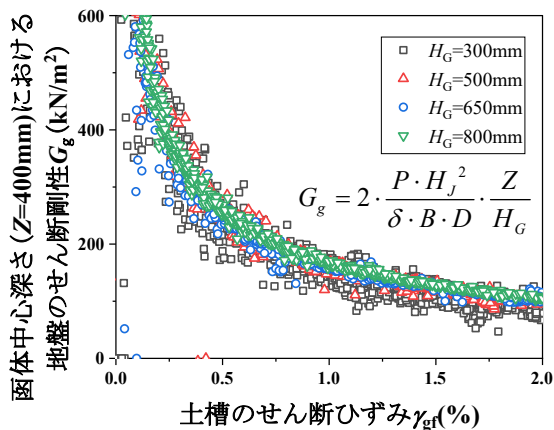


図-2 函体深さにおける地盤のせん断剛性 G_g と土槽のせん断ひずみ γ_{gf} の関係

バネ未設置)。土槽の側壁の他、函体上床版と右側壁の傾斜角を測定し、土槽のせん断ひずみ γ_{gf} (=地盤のせん断ひずみ γ_g) および函体のせん断ひずみ γ_s を求めた。本稿では、土槽のひずみレベルが $\gamma_{gf}=0.5\%$ 、 1% 、 2% の計3段階で結果を整理する。その他の実験装置および実験方法の詳細は文献³⁾を参照されたい。

次に、アルミ棒積層体の拘束圧依存性を考慮した地盤剛性の評価について述べる。模型地盤単独での単純せん断試験を模型地盤の高さを4段階 ($H_G=300, 500, 650, 800$ mm) で変化させて実施したところ、模型地盤全体でせん断剛性が一樣と仮定して求めたせん断剛性

キーワード 剛性比、ひずみ伝達率、せん断土槽実験、拘束圧依存性、単純せん断試験

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

表-1 着目する土槽ひずみレベル時点での剛性比とひずみ伝達率 (G_s, G_g の単位 : kN/m^2)

実験ケース	$\gamma_{gf}=0.5\%$				$\gamma_{gf}=1\%$				$\gamma_{gf}=2\%$			
	G_s	G_g	G_s/G_g	γ_s/γ_g	G_s	G_g	G_s/G_g	γ_s/γ_g	G_s	G_g	G_s/G_g	γ_s/γ_g
Gs000	137.99	293.68	0.47	0.79	79.33	181.40	0.44	0.79	41.16	112.73	0.37	0.81
Gs031	157.67	297.81	0.53	0.81	103.26	190.09	0.54	0.79	71.88	117.33	0.61	0.68
Gs073	206.08	329.73	0.62	0.74	136.28	193.40	0.70	0.71	110.25	124.16	0.89	0.57
Gs102	274.05	280.16	0.98	0.62	205.88	189.33	1.09	0.62	165.12	114.91	1.44	0.51
Gs187	449.28	293.03	1.53	0.46	346.96	182.24	1.90	0.44	290.22	112.22	2.59	0.32
Gs389	625.25	298.06	2.10	0.37	506.49	179.43	2.82	0.32	469.75	111.40	4.22	0.23

は高さに応じて増加した。そこで、各深度でのせん断剛性が深度に比例すると仮定して、設置予定の函体中心深さ ($Z=400\text{mm}$) における地盤のせん断剛性 G_g を推定した。これと土槽のせん断ひずみ γ_{gf} の関係を、変換式とともに図-2 に示す。推定した函体中心深さでの地盤のせん断剛性 G_g は模型地盤の高さの違いに関わらず概ね一致しており、仮定は概ね妥当と判断し、各ひずみレベルに応じた G_g を等価線形剛性として求めた (表-1)。

3. 実験結果および考察

全 6 ケースについて、各面の表面力による弾性ひずみエネルギーが等価となる純粋せん断状態でのせん断応力 (換算せん断応力 τ_c) と函体せん断ひずみ γ_s の関係を図-3 に示す。この関係の勾配が函体剛性 G_s に相当する。なお、理想的な模型であればこの関係は直線状となり、特にバネ未設置の Gs000 は勾配もゼロとなるはずであるが、本実験ではヒンジ部の摺動抵抗等の都合により、载荷初期に比較的高い剛性を発揮していた。そこで、函体のせん断剛性 G_s は、各ひずみレベルでの割線勾配 (図-3 中の点線) として評価することとした。 G_s の評価結果を表-1 に示す。

このようにして見直した剛性比 G_s/G_g とひずみ伝達率 γ_s/γ_g との関係を西岡・運上式と比較した結果を図-4 に示す。図-4 より、地盤および函体ともに等価線形剛性で評価することにより、剛性比とひずみ伝達率の関係はひずみレベルに依存せずほぼ同一の関係となることが確認できた。ただし、その関係は既往の西岡・運上式の同一剛性比でのひずみ伝達率は 6 割程度になった。この要因の一つとしては、西岡・運上式が非着底条件を想定した近似式であるのに対し、本稿が着底条件であることが影響していると考えられる。

4. おわりに

本研究では、アルミ棒積層体を用いた模型実験の剛性比を精査し、改めてひずみ伝達率と剛性比の関係について西岡・運上式と比較した。その結果、地盤を等価線形剛性で評価すれば、ひずみ伝達率と剛性比の関係

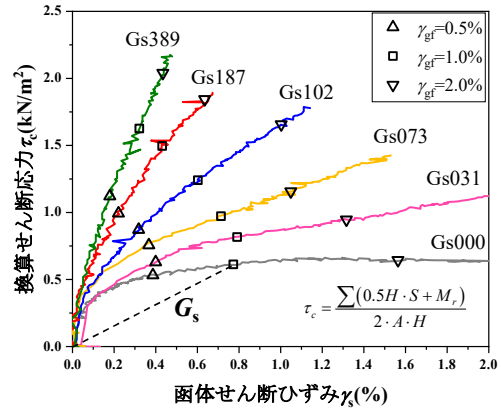


図-3 換算せん断応力 τ_c -函体せん断ひずみ γ_s 関係

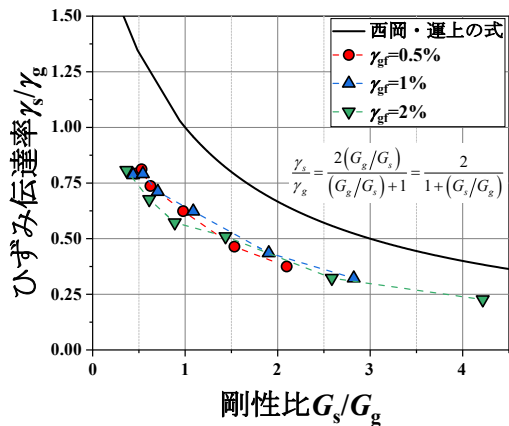


図-4 ひずみ伝達率 γ_s/γ_g と剛性比 G_s/G_g の関係 (実験結果と西岡・運上式¹⁾ との比較)

は、ある一つの式でモデル化できる可能性を示唆する結果となった。今後は函体底面の滑動を拘束した条件での実験を実施し、底面拘束が剛性比とひずみ伝達率の影響に及ぼす影響について確認したい。

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) 島田貴文, 西野風雅, 西岡英俊 : 地盤の非線形性が開削トンネルの地震時ひずみ伝達率に及ぼす影響に関する実験的検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.78, No.4, I_613-I_623, 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.