

トンネルと硬岩を模擬した異種コンクリート境界面の強度特性

(一財) 電力中央研究所 正会員 ○山野井 悠翔
(一財) 電力中央研究所 正会員 宮川 義範
株式会社セレス 関口 陽

1. はじめに

岩盤内を通るトンネルの地震時挙動は、周辺岩盤からの拘束力に大きな影響を受けると考えられる。トンネルと周辺岩盤間の境界面の強度特性を調べるために、破碎帯に埋設された RC トンネル模型の載荷実験¹⁾ (以下、本実験) を対象として、トンネル試験体と岩盤を模したコンクリート境界面の単調・繰り返しせん断試験及び繰り返し垂直載荷試験を実施した。

2. 一面せん断試験機を用いた試験概要

試験に用いた一面せん断試験装置を図 1 (a) に示す。同図 (b), (c) には各試験体を示すが、試験体は中央に予め仕切り版を設けた型枠内に高流動モルタルを打設し、仕切り版を取り除いた後に軽量コンクリートを打設することで作成した。表 1 に界面試験体を構成する材料物性を示す。岩盤を模擬した軽量コンクリートの剛性は硬岩の中でも硬い分類のものに相当する²⁾。両材料の打継面は高流動モルタル打設時の型枠面となっており、打継時に散水は行われたが、目粗しなどの処理は施されなかった。本実験の施工上の制約に従った界面処理であり、岩盤のはつり等を行う実際のトンネルと岩盤間の境界面よりは強度が低い境界面となる。せん断箱との接着面が一樣となるように、全試験体の上下端面は研磨され表面に石膏が施された。また、せん断試験体の側面は、プレートを用いてボルトによって押さえつけ固定した。本試験装置は、垂直応力を一定の条件でせん断応力を動的に正負交番載荷することが可能であり、これまでに軟岩とコンクリート境界面の強度試験に用いられた実績を有する³⁾。垂直荷重、載荷方法をパラメータとして、19 ケースの試験を実施した。

表 1 界面試験体の構成材料物性

$f'_{c,LC}$ [MPa]	$f'_{c,M}$ [MPa]	$E_{c,LC}$ [GPa]	$E_{c,M}$ [GPa]
38.6	25.3	20.6	15.9
* f'_c , E_c : 圧縮強度, ヤング係数 下付き文字 LC, M: 軽量コンクリート, モルタル			

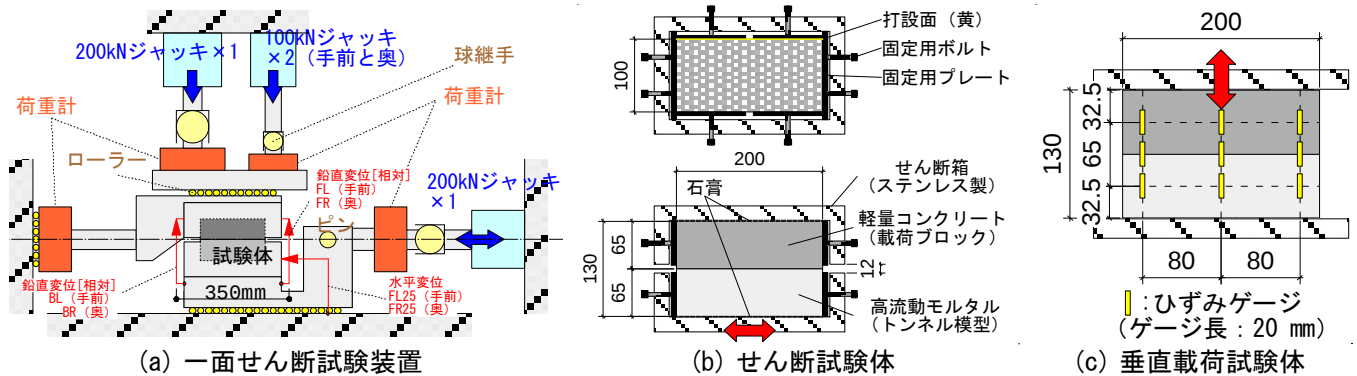


図 1 試験概要

3. 試験結果と FEM 解析への反映

繰り返し一面せん断試験で得られたずれ変位—せん断応力関係を図 2 (a) に示す。ここで、せん断変位は図 1 (a) 中の“水平変位 (FL)”と“水平変位 (FR)”の平均値であり、せん断応力は反力側 (左側) で計測された水平荷重より算出した値である。全ケースで最大荷重前より若干の非線形性が見られた一方で、巨視的には概ね弾性挙動を示し、最大荷重以後は正負で対称な曲線となった。除荷剛性と初期剛性は概ね一致しており、弾完全塑性に近い挙動を示すことが明らかとなった。図 2 (b) に単調及び繰り返し一面せん断試験で得られた垂直応力とせん断耐力の関係

キーワード 境界面, トンネル, 岩盤, 一面せん断試験, 摩擦係数, 施工目地

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 (一財) 電力中央研究所 TEL 070-6574-2818 (直通)

を示す。同図には最大荷重時に相当するせん断耐力と、試験での最大変位時の残存荷重より算出した残留強度がそれぞれ記されている。両耐荷力で摩擦則に従う拘束圧依存性が確認された。試験結果をクーロンの破壊基準に照らし合わせたところ、摩擦係数はせん断強度と残留強度でそれぞれ 0.79 と 0.84 であった。ここで、繰り返し作用の影響を排除するため、摩擦係数の算出には単調載荷試験結果のみを用いた。せん断耐力から求まる見かけの粘着力は 1.42 MPa であり、引張強度（垂直応力—せん断耐力関係が垂直応力軸と交差する点）は 1.79 MPa であった。後者は別途試験で得られた曲げ引張強度と整合した。

繰り返し垂直載荷試験より、境界面の垂直剛性を調べた。図 1(c) に示すよ

うに、境界面を跨ぐ位置と上下ブロックの三段を一段として、各側面に三列ずつで両面の垂直ひずみを計測した。各段の平均ひずみと垂直応力の関係の一例を図 3(a) に示す。上下ブロックのひずみ（青線と赤線）と比較して境界面を跨ぐ位置のひずみ（黒線）が大きくなる傾向があり、境界部の剛性が一体部よりも低いことが伺える。図 3(b) のように中央部を上下ブロックと境界面の直列ばねと見なすことで、計測されたひずみ値より境界面の垂直剛性を算出した。ここで、上下ブロックの剛性 ($K_{n,LC}$, $K_{n,M}$) は、円柱試験体から得られたヤング係数と、任意に設定したばね長 (L_{LC} , L_M) より算出した。実際には境界面は幅を有しているが、数値解析時に無限小の幅で境界面をモデル化することを想定して $L_J = 0$ とした。その結果、垂直剛性は 1.06E+06 MPa/m と同定された。以上で得られた物性を表 2 にまとめる。この他に繰り返しせん断試験によりせん断剛性は約 4000 MPa/m と同定されたが、ベディングエラーの影響が大きいことが判明しているため³⁾、下限値と解釈した。

4. まとめ

トンネルと硬岩をそれぞれ模擬した材料間の境界面の強度試験より、せん断及び垂直力に対する境界面の応答を明らかにした。FEM で境界面をモデル化する際に、一般的な摩擦則に基づくせん断強度特性と剥離を考慮できる接合要素を用いることの妥当性が示された。得られた物性を今後本実験のシミュレーションに反映していく。

謝辞

曲げ引張強度試験を実施して頂いた株式会社鹿倉企画の市川氏（前職：株式会社セレス）に感謝の意を表する。

参考文献

1) 坂下克之, 他: 破碎帯変位を受ける RC トンネル模型の構造実験—最大耐力について—, 土木学会大 78 回学術講演概要集, 2023. (投稿中)

2) 社団法人地盤工学会: JGS 岩盤の工学的分類と原位置岩盤物性に関する研究委員会研究報告書, 2008.

3) 岡田哲実, 山野井悠翔, 関口陽, 納谷朋広: 繰返し一面せん断試験装置の開発と軟岩とコンクリートの強界面の力学特性, 第 49 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 2023.

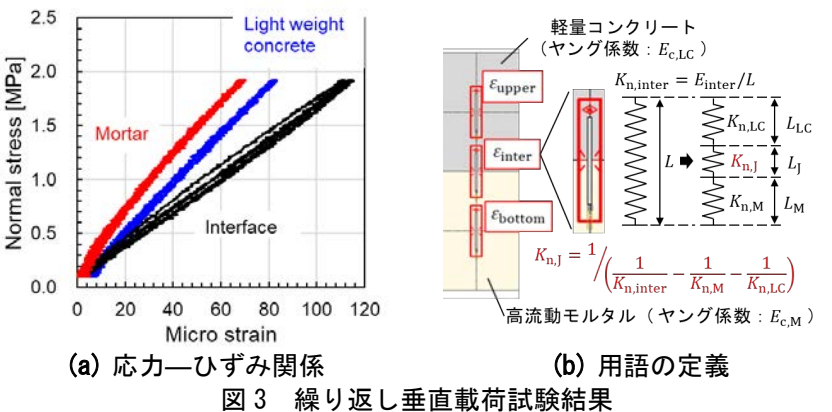
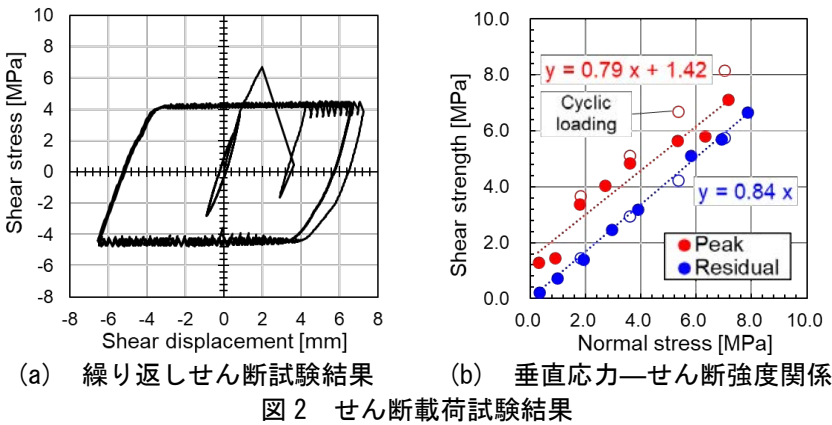


表 2 界面試験より得られた物性				
σ_b [MPa]	c [MPa]	μ [-]	μ_r [-]	K_n [MPa/m]
1.84	1.42	0.79	0.84	1.06E+06
* σ_b : 曲げ引張強度, c : 粘着力, μ : 摩擦係数, μ_r : 残留強度の摩擦係数, K_n : 垂直剛性				