人工軟岩の平面ひずみトンネル模型試験

東京大学	学生員	福井	聡
東京大学	正員	堀井	秀之
東京電力	正員	金子	岳夫

1. はじめに

軟岩地山におけるトンネルが破壊に至る過程としては、掘削に伴う応力集中からトンネル壁面岩盤がせん断破 壊、やがて破壊面が進展し不安定状態に至る過程が知られている。実現象に則したトンネル設計手法を考える場 合、トンネル模型を用いて破壊試験を行い、考慮すべきトンネル破壊の限界状態を明らかにする必要がある。本 研究では、人工軟岩を使用した平面ひずみトンネル模型実験を行うことによって、連続体としての挙動から変形 局所化を生じ、すべり面進展を伴う破壊へと至る過程を観察する。

2. 実験方法

表 1 人工軟岩

配合比	重量(%)	強度特性	
豊浦標準砂	69.6	粘着力 c	0.25MPa
石膏	11.6	摩擦角度	40
水	18.8		

本実験の人工軟岩を作成するにあたり使用した試料は、豊浦 標準砂、石膏、水である。石膏はハイストーン K(吉野石膏 ㈱)を使用した。配合比については強度が低強度軟岩に近い 値であることと、材料の作業性に考慮した過去の研究になら い、表 1の通りとした。

供試体サイズは40×25×10cm で、空洞直径は5cm、その位置関係は図 1に示すとおりである。供試体は載荷 型枠内に設置され、紙面奥行き方向の変形を拘束して平面ひずみ状態とし、水平方向から水圧フラットジャッキ を用いて一定の側圧(0.15MPa)を載荷し、鉛直方向には油圧式のサーボパルサを用いて変位制御(3mm/hour)で載 荷を行う。供試体と載荷板との間には摩擦を抑えるためにシリコングリース(ダウコーニング社 FS 高真空用グリ ース)を60µm の厚みで塗布し、その上からメンプレンを貼り付ける処理を施す。メンプレンは供試体に追従して 動く。供試体の変形の様子は前面のガラス窓からメンプレンの変形の様子を観察することにより把握できる。実 験の状況を図 2に示す。

変位場計測にはマッチング法を使用した。これは画像解析の手法であるパターンマッチングを用いて、2次元変位 場を計測する手法である。この方法は西上、堀井ら¹⁾によって開発された手法であり、非接触で変位場を計測でき る。本実験では供試体に追従して動くメンブレンにランダムパターンを描き、載荷前後の変化を比較することで 変位場の計測を行う。実体顕微鏡を用いて直接画像の取り込みを行い、パターンの変化を比較した。今回は、鉛 直方向変位0.50mm 毎に実体顕微鏡を用いてトンネル壁面付近の画像(0.25mm~0.50mm ピッチ、625 点)を取り 込んだ。全画像の取得には約15分/ステップであり、その間は変位を固定することとした。

3. 実験結果

図 3 に鉛直方向平均ひずみと平均応力の関係を示す。図中の 印と数字は画像を取り込んだステップを表す。 鉛直方向平均ひずみが 1.25%程度で応力ひずみ曲線の勾配に変化が生じた。その後載荷を継続したが、平均応力 を見た場合には荷重の低下は認められず一様に荷重は増加しつづける結果となった。

今回の実験では、載荷条件が鉛直方向の荷重が卓越するものであるため、トンネル側方部に破壊が生じると予 測された。実験終了時のトンネル右側方箇所は、図に示すように、楔形の崩壊が認められた。

図 5 にマッチング法で得られた最大せん断ひずみ分布を示す。STEP を大きくするごとにひずみが大きくなっていることがわかる。大きなひずみが得られた箇所は図 4 で観察された楔形の岩塊崩落と一致している。

Key Words:キーワード:トンネル、軟岩、進行性破壊

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 TEL:03-5841-7455 FAX:03-5841-7496



4. 解析結果

弾塑性有限要素法により求まる応力場から、トンネル周辺に生じる破壊面を導く。モールクーロンの破壊基準 を用いて破壊開始点を決定し、主応力方向と破壊面方向に一定の関係があることを用いて積分により破壊面を算 出する。実験の境界条件の時、上載荷重を15kgf/cm²とした時の破壊面を示す(図 6)。楔形を形成することがわか る。ある状態での破壊面の長さを1(図 7)、楔形が形成される破壊面の長さをL(図 8)として危険度T = 1/Lとい う指標を導入する。上載荷重を横軸、Tを縦軸にとってグラフを書くと図 9 のようになる。よって、T=0.2まで は破壊を許容できると判断し、二次元弾性論を用いてトンネル設計を行う。設計はトンネルに必要な覆工厚を求 めることによる(図 10)。すると、T=0の限界深度よりもT=0.2の限界深度の方がより深くできることが示された。



5 まとめ

今回人工軟岩を用いて平面ひずみ条件下でのトンネル模型実験を実施し、トンネル周辺部の岩盤の挙動を把握 することができた。トンネル設計において想定するべきトンネル破壊の終局限界状態を把握し、またその挙動を 把握するような解析手法を構築することができた。そして壁面近傍のせん断破壊を安全な範囲で許容することに よってより深い岩盤内でのトンネル設計を可能にした。

参考文献

- 西上裕之,金子岳夫,堀井秀之:固結性砂質土の平面ひずみ圧縮試験と変形局所化の計測,第28回土質工学 研究発表会講演概説集,1993
- 2) F.Tatsuoka ,Morenkamp F ,Torii T ,Hino T : Behabior of lubrication layers of platens in element tests , Soils and Foundations , 24(1)pp.113-128 , 1984
- 3) 金子岳夫:大深度トンネルに対する支保設計手法の提案と試設計,東京大学博士論文,2002