軟岩地山における大深度地下トンネル設計についての提案

С	東京電力	ΤĒ	員	金子:	岳夫
	東京大学	正	員	堀井	秀之
	東京大学	学生	E員	福井	聡

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.そのため,実現象に則した設計手法を考える場合,連続体 として取り扱える範囲と破壊面の進展に伴い不連続面の影響を大きく受ける範囲を区別して取り扱う必要がある.そこ で,人工軟岩を用いてトンネル模型実験を実施し,トンネル周辺で生じた変状を観察し,トンネルの限界状態を設定す る.本研究では,トンネルの限界状態を設定し,不連続面を考慮した解析を実施することで,トンネル壁面岩盤のせん 断破壊を許容できる設計を行い,より深い深度に対するトンネルの設計を行うことを目的とする.

2. 人工軟岩を用いたトンネル模型実験概要

人工軟岩を作成には,豊浦標準砂(69.6%),石膏(11.6%),水(18.8%)を使用した.配合比については,強度が低強度 軟岩(c=0.25MPa, $\phi=40$)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¹⁾にならって決定した.供試体 サイズは $40 \times 25 \times 10$ cm で,空洞直径は 5cm,その位置関係は図-1に示す通りである.空洞は供試体打設時に円柱状の 型枠を設置することで設けられる.供試体は,図-1の通り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)で載荷を実施する.

図-2 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 向平均ひずみで 1.25%程度,平均応力で 0.8MPa 程度の時点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続ける結果となった.

実験終了時のトンネル右側方箇所は,図−3に示すように,くさび状の崩壊が認められた.このくさび型の崩落は奥行 き方向 10cm にわたって連続して観察されている.

図-4 に,マッチング法を用いて計測した最大せん断ひずみ分布を示す.5 ステップでは変形の局所化が認められないが,応力ひずみ曲線(図-2)の変曲点(7,8 ステップ)以降ではトンネル側壁部分に変形の局所化が生じており,載荷が進むに従ってひずみの大きな領域が広がっていくことがわかる.ここで得られたひずみ分布のうち,大きなひずみが得られた箇所は図-3 で観察されたくさび型の岩塊崩落と一致している.

不連続面を考慮した解析

表─1 解析使用物性值 ³⁾					
岩盤物性値	弹性係数 E_R	3500 MPa			
	ポアソン比 $ u_R$	0.3			
	粘着力 ϕ	3.0 MPa			
	摩擦角度 c	28			
	単位体積重量 γ	2.2 gf/cm^3			
初期地圧	設定深度×単位体積重量				
コンクリート	弹性係数 E_L	$32000 \mathrm{MPa}$			
物性値	ポアソン比 $ u_L$	0.2			
	強度 σ_c	$400 \mathrm{MPa}$			

不連続面を考慮した解析に使用したメッシュを図–5 に示す.トンネル 直径は 5.0m,100m×100m の領域をモデル化している.くさび形を想定 した不連続面は,インターフェイス要素を用いてモデル化している.解析 では表–1 の物性値を使用するが,インターフェイス要素の破壊基準(粘 着力,摩擦角度)は岩盤の残留強度を想定して粘着力を低減し 0.75MPa とした.また,岩盤の構成則は非線形 $E_t/E_0 = 1 - (R/D)^{0.2}$ とし,基岩 部の破壊基準は拘束圧依存を考慮する形 $\tau = c(1 + \sigma \tan\phi/c)^{1/1.2}$ とした. これらの物性値は仮定であり,実際に設計を行う際は室内試験等で物性値 を設定する必要がある.

4. 解析結果

今回の設計では,2つの状態について限界深度を計算した.まず,トンネル周辺岩盤が破壊基準に達する状態.次に, 図-5に示す不連続面が全て破壊基準に達した段階で,くさび状岩塊の崩落が生じると考え,岩塊が形成される状態を考





40

50



20

20 30 Concrete thickness (cm)

10

えた.それぞれの状態について,トンネル深度,支保厚をパラメータとした 計算を行った結果を図-6 に示す.図中の は,壁面近傍岩盤にせん断破壊 が生じる深度, はくさび型の岩塊が形成される深度を表す.また,点線は 岩盤のみに着目した結果であり,実線はコンクリート支保に発生する応力が 設計強度以下となるように設計した結果である.

壁面近傍岩盤ではせん断破壊が生じるが、トンネルの安定性を損なうよう なくさび型岩塊の形成をさせないという考え方で設計を行えば,図-6のよ うに,掘削可能な深度は 550m から 650m へと深くなり, 100m 程度深い場 所にトンネルを施工できることがわかった.また,支保厚を増しても,掘削 可能な深度が大きくすることは難しいことがわかる.

|設計を行うにあたっては,壁面のせん断破壊を許容することなく設計を行うことが望ましいが,この設計手法を用い ることで,更に深い位置に対する設計を行うことが可能となる.

5. まとめ

0

CS10-014

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、トンネル側壁部分にくさび型の岩塊崩落を観察 できたことで,軟岩におけるトンネル設計時の限界状態として,掘削に伴う応力解放によりトンネル壁面近傍岩盤がせ ん断破壊に至り,破壊面が進行することでやがてくさび型の岩塊を形成,崩落に至る」という状態を想定した.この結 果を用いて,不連続面を考慮した解析手法として,くさび型の岩塊を想定したモデルを考えた.不連続面を考慮した解 析結果から,トンネル周辺岩盤においてせん断破壊を許容する設計を実施し,トンネルの限界掘削深度を深くすること を可能とした.

参考文献

- 1) 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 **€**. 1993
- 2)F. Tatsuoka, Molenkamp F, Torii T, Hino T: Behavior of lubrication layers of platens in element tests, Soils and Foundations, 24(1)pp.113-128, 1984,
- 核燃料サイクル機構:わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-分冊 3)地層処分の工学技術,1999.11
- 4) 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