

# 岩盤割れ目の垂直剛性を用いたトンネル周りの地下水圧分布の評価

(財)電力中央研究所 正 池川 洋二郎

## 1. はじめに

今後、エネルギー貯蔵、廃棄物隔離において岩盤深部の利用が想定されるため、掘削により生じる空洞周辺の力学的、水理学的な挙動メカニズムを解明することにより、合理的な岩盤深部の利用が望まれる。

飛騨片麻岩中に掘削したトンネル周りにおいて、トンネル壁の近傍で間隙水圧の急激な低下が一般に計測された。これは平均的な岩盤の透水性では説明できず、トンネル掘削による応力増加で岩盤の割れ目が閉合し、生じた低透水の領域が間隙圧を負担したためと考えられた。

## 2. トンネル周りの地下水圧分布の概要

図-1は、地下水面上約200mの箇所のトンネルが、63m程水没した時に計測された鉛直上向き方向の区間間隙水圧の分布結果<sup>1)</sup>を折れ線で示す。間隙水圧は鉛直ボーリング孔A2, C2, D2の計測値を圧力水頭で同図上に示す。この結果からトンネル中心から1.6mにあるトンネル壁面から数mの区間で、120m強の間隙水圧から約60mも下落していることが分かる。一方、A2孔の透水試験で得られた透水係数は、バラツキはあるものの対数平均で $10^{-8}$ m/secオーダーで、弾性波試験の結果より、トンネル近傍約0.5mはゆるみ域である。

この間隙水圧の実測値を理論解と比較するため、トンネルの鉛直断面内の放射流と考え、ダルシー則(1)と連続式(2)より、圧力水頭の分布を求めた。

$$v_r = k \frac{\partial h}{\partial r} \quad (1), \quad -Q = 2\pi r v_r \quad (2)$$

ここで、 $r$ :トンネル中心からの距離、 $v_r$ :流速、 $Q$ :流量、 $k$ :透水係数、 $b$ :層厚、またサフィックス0はトンネル壁面を示す。境界条件としてトンネル壁面( $r_0 = 1.6$ m)に水没深度( $h_0 = 63$ m)、 $r = 150$ mの遠方で $h = 169$ mの時、求まる透水係数は $k_0 = 1.4 \times 10^{-8}$ m/secとなり、圧力水頭分布は図中の曲線で示される。一方、図-2の領域分割で示すように、ゆるみ域の透水係数を $k_0$ の20%、割れ目の閉合によると考える低透水領域の透水係数を $k_0$ の5倍と仮定した場合の圧力水頭の分布を理論解の曲線で示す。各領域は同心円状に分布し、ゆるみ域の厚さを0.5m、低透水領域の厚さをトンネル半径(1.6m)とした。

以上の計測値と理論解を用いた検討結果から、トンネル近傍に低透水の領域が存在していると考えられる。

## 3. 割れ目の垂直剛性試験の概要

割れ目の開口幅の閉合量を検証するため、トンネル近傍のボーリングコアから、既存割れ目を含む円柱供試体を作成し、一軸圧縮試験で割れ目の鉛直剛性( $k_n$ )を求めた。表-1は用いた供試体の緒量を示す。壁面距離はトンネル壁面から割れ目までの距離である。またC2孔は鉛直上向き、D1, D3は水平孔である。いずれの供試体もコア軸を通る既存割れ目を1つ含み、割れ目角度はコアの平行端面となす角度である。また、これらの割れ目は節理で、噛合せが明確である。

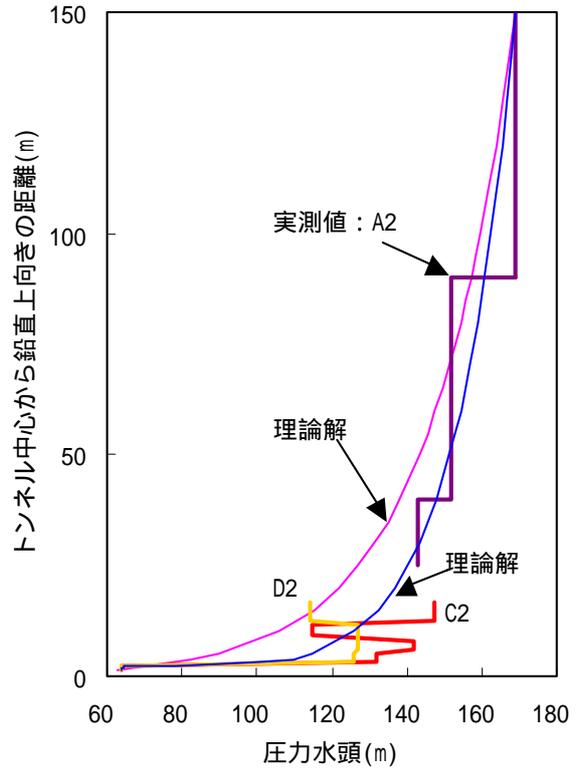


図-1 トンネル周辺の圧力水頭の分布

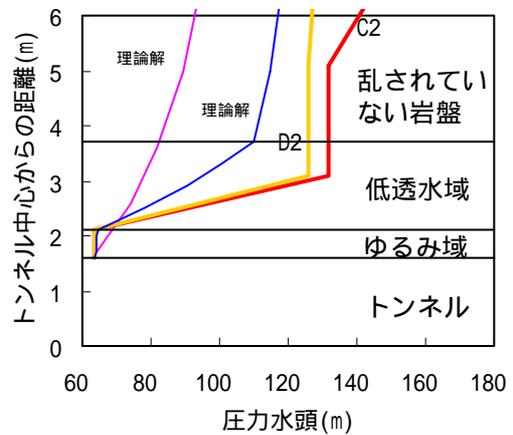


図-2 トンネル近傍の領域分割

岩盤、割れ目、剛性、間隙水圧、透水性

〒270-1194 我孫子市我孫子1646 Tel.04-74-82-1198, Fax.04-7183-8700

図-3は一軸圧縮試験時の写真を示す．計測項目は差動トランス式変位計によるコアの変形量と，クリップ型変位計による割れ目開口幅の変位量である．変位計はいずれも最小読み1μmである．载荷パターンは，载荷速度500N/secで，9, 18, 27MPaの多段载荷を行い，最大応力27MPaを3回繰り返した．また，ピーク時の荷重保持時間は60秒とした．

図-4に供試体a)の応力 - 変位関係を示す．開口幅の変位量はヒステリシスを示すものの，各载荷サイクルは良く一致しており，塑性は無い．一方，コア全体の変位量は载荷サイクル毎に数μm程度であるが増加し，最大応力の繰り返しではほぼ収束している．これは，割れ目が傾いているため，噛み合せのあそびに相当する分のせん断変形が生じたと考えられる．

次に，割れ目の角度から垂直応力を求め，(2)式より垂直剛性(normal stiffness)を求め，表-1に結果をしめす．

$$k_n = \frac{\Delta\sigma_n}{\Delta a} \quad (2)$$

ここで， $\Delta\sigma_n$ :垂直応力の変化量， $\Delta a$ :開口幅の変化量である．

4．考察

以上の水理学的と力学的な検討を比較するため，開口幅の変位量 $\Delta a$ に関して結果を整理する．まず，力学的な検討としては，トンネルの被厚を200m，片麻岩の密度を2.7g/cm<sup>3</sup>，また，掘削による応力増加を地山強度比から2倍と仮定し，割れ目の垂直剛性から割れ目開口幅の変位量 $\Delta a$ を求めた．

一方，水理学的検討は，トンネル軸を垂直に胴切る平行割れ目を仮定し，式(3)で表される平行平板(parallel plate)間の放射流とし，図-2の理論解で得られた低透水域と乱されない領域の境界条件等より，各領域での割れ目開口幅を求め，差 $\Delta a$ を計算した．ここで割れ目間隔は，壁面観察より20cmとした．

$$Q = 2\pi \frac{a^3}{12} \frac{\rho g}{\mu} \frac{h-h_0}{\ln(r_0/r)} \quad (3)$$

表-2に示すように，割れ目の垂直剛性と平行平板の放射流の検討から得られた結果はほぼ一致していると考えられる．

以上の検討より，岩盤深部のトンネル近傍では応力再配分により割れ目が閉合し，低透水の領域が生じている．また，この低透水域が間隙水圧を負担していると考えられる．

参考文献

1)池川,中川:水封式圧縮空気貯蔵実験 - 空気の残留条件 - ,土木学会第56回年次学術講演会 -B129,2001.

表-1 飛騨片麻岩の供試体

	孔名	距離 (m)	直径 (cm)	高さ (cm)	角度 (deg)	性状	kn (GPa/m)
a)	C2	1.15	5.98	11.7	22	節理	1,687
b)	D1	1.44	5.97	11.83	20	節理	821
c)	D3	1.87	5.99	11.6	25	節理	1,580

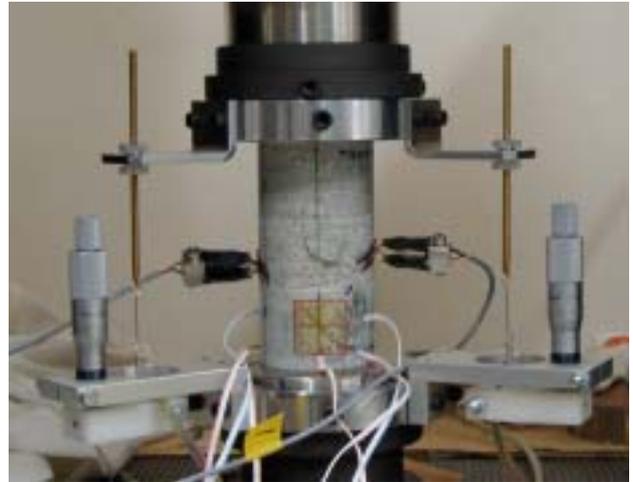


図-3 割れ目の垂直剛性を求める一軸圧縮試験

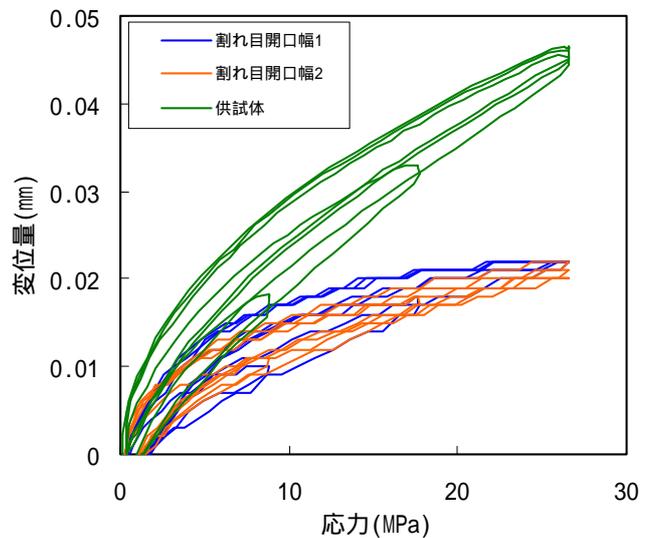


図-4 応力 - 変位曲線 a)C2 1.15m

表-2 開口変位量の結果

		a
水理学的		7.53
力学的	a)	3.2
	b)	6.58
	c)	3.41