

(14) 空洞掘削に伴う周辺岩盤の透水特性変化の予測

原子力環境整備センター 原田芳金, 藤原 愛
清水建設㈱ ○木下直人, 石井 卓
清水建設㈱ 黒田英高, 多田浩幸

Prediction of Permeability Changes in Excavation Response Zone

Yoshikane HARADA, Ai FUJIWARA, Radioactive Waste Management Center
Naoto KINOSHITA, Takashi ISHII, Shimizu Corporation
Hidetaka KURODA, Hiroyuki TADA, Shimizu Corporation

Abstract

Stress changes due to cavern excavation in hard crystalline rock may expand the existing fractures and increase the rock mass permeability. This paper proposes a simple method for predicting permeability changes in the excavation response zones. Numerical analyses using this method predict that the response zones created by cavern excavation would differ greatly in thickness and permeability depending on the depth of the cavern site and the initial in-situ stress, that when the cavern site is deeper, response zones would expand more and permeability would increase more, and that if the ratio of horizontal to vertical in-situ stress is small, extensive permeable zones at the crown and the bottom would occur, whereas if the ratio is large, extensive permeable zones would occur in the side walls.

1. はじめに

岩盤内地下に安全に空洞を掘削し、様々な目的でそれを利用する上で、掘削時の周辺岩盤の劣化とそれに伴う透水性の変化現象を解明することは非常に重要である。わが国における、空洞周囲の劣化域に関する既存の計測結果によれば、劣化域における透水性は、掘削前と比較してほとんど変化しない場合もあれば、数百倍に増加する場合もある。劣化域の広がりに関しても様々である。したがって、既存のデータだけに基づいて空洞掘削時の劣化域の広がりや劣化の程度を予測することは非常に困難である。

一般に、空洞の掘削に伴う周辺岩盤の劣化の原因としては、①発破による岩盤の直接損傷 ②次地山応力下での岩盤の破壊 ③空洞の半径方向応力の減少に伴う既存割れ目の開口 の三つが重要であると考えられている。①、②の原因に対しては、施工技術上で対処したり、良好な岩盤を選ぶことによって対処することが可能であるのに対して、③の原因に対しては、このような対処は不可能であることもあって、花崗岩や片麻岩のような結晶質岩盤では、空洞の掘削に伴う周辺岩盤の劣化の原因としては、③の原因が最も重要である。そこで、本論文では、空洞掘削時の応力変化に伴う透水特性の変化の比較的簡単な予測手法を提案するとともに、それを用いた数値解析を実施することにより、空洞掘削時の透水性変化に対する空洞の設置深度および初期地圧条件の影響について検討を行った。

2. 岩盤の透水特性の応力依存性に関する検討

空洞掘削時の周辺岩盤の劣化の原因として、既存割れ目の開口現象が重要であることを考慮すると、空洞

掘削時の応力変化に伴う透水特性の変化に関する検討を行う際には、割れ目の透水係数の応力依存性を調べることが重要である。しかし、わが国では、割れ目の透水係数の応力依存性について実測データに基づいて検討した例は少ない。そこで、縦方向に天然の割れ目を有する円柱状の岩石供試体に対して、三軸圧縮型透水試験装置を用いて、封圧を作用させた状態で軸方向に水を流し、割れ目の透水係数と有効応力（垂直応力－間隙水圧）の関係を求めるための試験を行った。その結果を図－１に示す。測定に用いた試料は片麻岩であるが、試料A、Dの割れ目は開口しており、充填物を含んでいないのに対して、B、C、Eの割れ目は充填物を含んでおり、密着している。同図には、小島ら¹⁾によって得られた試験結果も同時に示してある（試料F、G）。

図－１に示した試験データと既存の海外での試験データ^{2)～4)}とを総合して、割れ目の透水特性の応力依存性に関する特徴を整理して記すと以下のようになる。

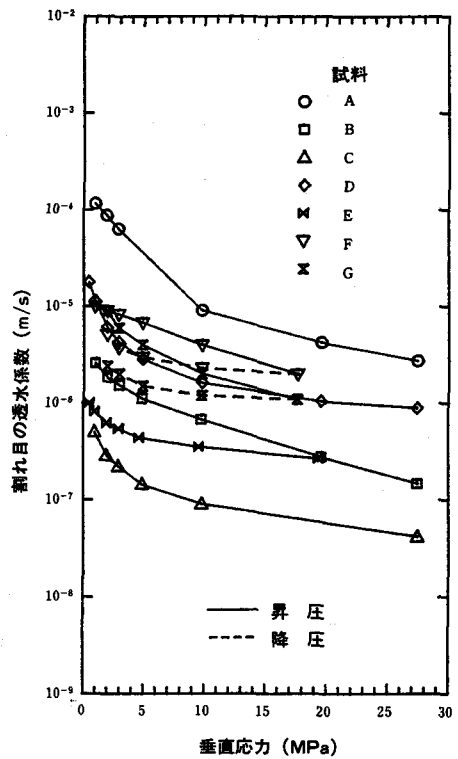
- ①どの岩石も、垂直応力が増加するにしたがって割れ目の透水係数は減少している。この傾向は、充填物の種類や割れ目の開口幅の大きさによらない。そして、垂直応力の低いレベルでの割れ目の透水係数の変化は大きく、垂直応力が大きくなるにしたがってその変化は小さくなる。
- ②充填物を含む割れ目の透水係数は、充填物を含まない割れ目の透水係数より小さい。また、前者の方が透水係数の応力依存性も小さい。充填物を含まない割れ目では、有効応力が0から20 MPaまで増加すると、割れ目の透水係数は最大2桁程度低下している場合もあるのに対して、充填物を含む割れ目では、1桁以下の低下しか示さない場合もある。
- ③昇圧時と降圧時の透水係数を比較すると、降圧時の割れ目の透水係数は昇圧時のそれよりもはるかに小さく、応力履歴の影響を受けている。降圧時の透水係数の変化は昇圧時の1/10以下である場合が多い。
- ④わが国で採取された試料を用いた試験データによれば、全体的に海外のそれより透水係数が小さく、また応力依存性も小さい。

インタクトロックの透水係数は、図には示していないが、割れ目を含む岩石のそれよりもかなり小さい。例えば、筆者らが試験を行った岩石の場合、垂直応力が10 MPa以上では、 10^{-14} m/sのオーダーの透水係数を示している。そして垂直応力が1 MPaから27 MPaまで変化しても、透水係数の低下は1桁以下であり、透水係数の応力依存性も割れ目を含む岩石のそれよりもかなり小さい。

3. 空洞掘削に伴う周辺岩盤の透水性の変化予測方法

空洞周辺岩盤の透水特性が掘削時の応力変化の影響によってどのように変化するかを予測するための数値モデルを開発し、その適用性について検討を行った。空洞掘削時の応力変化に伴う既存割れ目の開口の影響による透水特性の変化の予測に関しては、既にKelsall et al.⁵⁾によって、円形空洞を対象にして提案されている方法がある。今回提案する方法は、その基本的考え方は彼らのそれと同じであるが、具体的な解析方法は異なっている。

今回提案する方法では、まず2次元有限要素法によって、掘削に伴う空洞周辺の応力変化を計算する。次に、応力－割れ目の透水係数の関係式および割れ目の密度の



図－１ 天然の割れ目の透水係数と垂直応力の関係（試料F、Gは小島ら¹⁾による）

調査結果に基づき、岩石基質部分は不透水であるとして、応力-岩盤の透水係数の関係式から空洞周辺の透水係数の分布を求めるというものである。透水係数の初期値に関しても同様に考え、掘削前の初期地山応力分布と応力-岩盤の透水係数の関係式とから求めることができる。

応力-割れ目の透水係数の関係式としては、わが国の岩石についての試験結果に基づいたものを用いるべきであるが、前に述べたように、現状では試験例が少なく、わが国に適用できる関係式がまだ求められていない。そこで、今回は、Bartonら⁹⁾が提案している、JRC/JCS特性指標（JRCは粗さ係数、JCSは壁面強度）に基づいた応力-割れ目の透水係数の関係式を基本にして、それに以下のような修正を加えたものを用いた。

- ①割れ目に作用する垂直応力が無限大になり、割れ目が最も閉じたときの岩盤の透水係数 k_{min} はインタクトロックの透水係数に等しいとした。
- ②割れ目に引張応力が作用する場合の透水係数は、応力に依存せず一定であるとした。
- ③載荷時と除荷時では透水係数と応力の関係が全く異なることを考慮して、掘削によって応力が低下したところでの透水係数の増大量は、ここで提案した方法を用いて計算された値の1/10とした。

4. 透水性の変化に及ぼす空洞の設置深度、初期地圧条件の影響

今回提案した方法の適用性について検討を行うこと、および空洞周辺岩盤の透水性の変化に及ぼす空洞の設置深度、初期地圧条件の影響を検討することを目的として、前に示した予測方法を用いて、以下に示す仮定に基づいて、2次元有限要素法解析を実施した。解析用の空洞としては、断面積約60m²の馬蹄形空洞を用いた。掘削後の応力分布は、弾性解析によって求めたが、入力物性値としては、わが国において良好な結晶質岩盤に相当する値を用いた。また、割れ目の透水係数と応力の関係としては、上に示した提案式において、JRC=4とした場合を用いた。また、割れ目が最も閉じた時の岩盤の透水係数 k_{min} は、筆者らが実施した割れ目のない片麻岩の透水試験結果に基づいて、 1.0×10^{-14} m/sとした。割れ目の透水係数 k_f から岩盤の透水係数 k を求めるには次式を用いた。

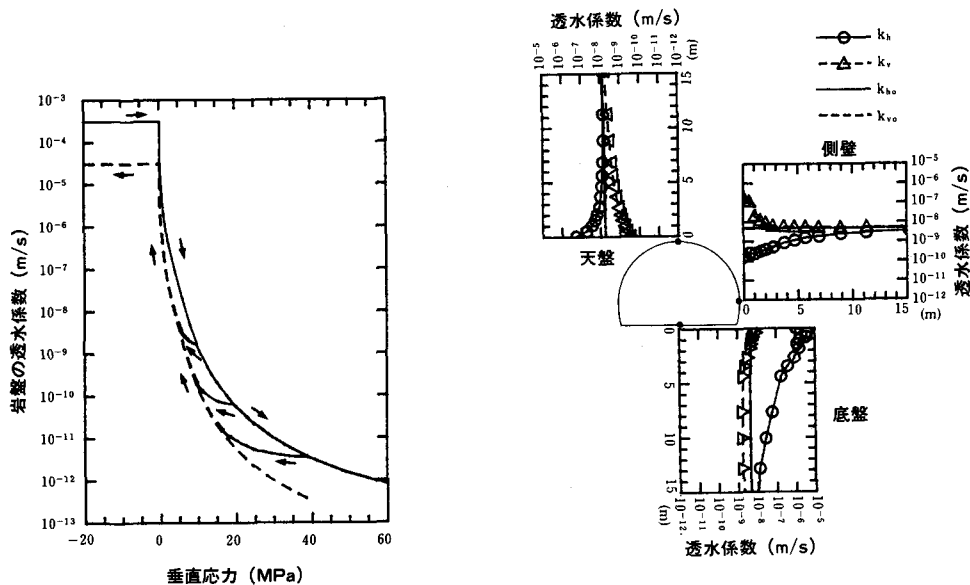


図-2 解析に用いた透水係数と応力の関係

図-3 空洞掘削後の周辺岩盤の透水係数分布解析結果例(深度300m, 側圧比1.0の場合)

表-1 劣化域の広がりに関する解析結果一覧表

(a) 水平方向の透水性の変化で評価した場合

No.	深度 (m)	$\frac{\sigma_h}{\sigma_v}$	劣化域の広がり (m)		
			天盤	側壁	底盤
1	100	0.5	0.82	—	2.40
2	100	1.0	—	—	2.24
3	100	2.0	—	—	1.93
4	200	1.0	0.48	—	2.71
5	300	0.5	2.31	—	4.14
6	300	1.0	1.09	—	3.79
7	300	2.0	0.11	—	3.18
8	1000	1.0	1.74	—	4.34

(b) 鉛直方向の透水性の変化で評価した場合

No.	深度 (m)	$\frac{\sigma_h}{\sigma_v}$	劣化域の広がり (m)		
			天盤	側壁	底盤
1	100	0.5	—	—	0.41
2	100	1.0	—	0.96	—
3	100	2.0	—	1.11	—
4	200	1.0	—	0.81	—
5	300	0.5	—	—	0.69
6	300	1.0	—	1.06	—
7	300	2.0	—	2.16	—
8	1000	1.0	—	1.35	—

$$k = n e k_f \quad (1)$$

ここで、 n は割れ目の密度、 e は割れ目の水理的開口幅であり、 $n=2$ (本/ｍ)とした。

数値解析に用いた岩盤の透水係数-垂直応力関係を図-2に示す。解析のパラメータは、空洞の設置深度(100m, 200m, 300m, 1000m)および側圧比($\sigma_h/\sigma_v=0.5, 1.0, 2.0$)とし、計8ケースについて解析を行った。

空洞掘削前後の周辺岩盤内の透水係数分布の解析例のうち、深度300m、側圧比1.0の場合の解析結果を図-3に示す。 k_{h0} 、 k_{v0} は、掘削前の水平方向および鉛直方向の透水係数を、 k_h 、 k_v は掘削後の透水係数を表している。また、空洞掘削後の透水係数が掘削前の透水係数の5倍以上になっている領域を劣化域とみなした場合の各ケースにおける劣化域の広がりを表-1に示す。総てのケースにおいて、空洞の壁面近傍では、壁面に平行な方向の透水係数と垂直な方向の透水係数は著しく異なっており、大きな異方性を示している。特に、半径方向応力の減少に伴う、空洞壁面に沿った方向の透水係数の増大が著しい。また、天盤や側壁では劣化域の広がりはほとんどの場合2m以下であるのに対し、底盤では2m以上であり、4mを越える場合も認められ、劣化域の広がりが大きいことがわかる。これは空洞の断面形状の影響によると考えられ、スムーズな円形に近づくほど劣化域の発生が抑えられる。したがって、劣化域の発生をできるだけ少なくしたい場合は空洞の形状をできるだけ円形に近づけることが望ましいといえる。

図-4は、側圧比が1.0の場合について、透水係数の変化比(掘削後の透水係数/掘削前の透水係数)に対する深度の影響を示したものである。全体的に、深度が大きくなると、劣化域がより大きく広がり、また透水係数の増大も著しくなっている。

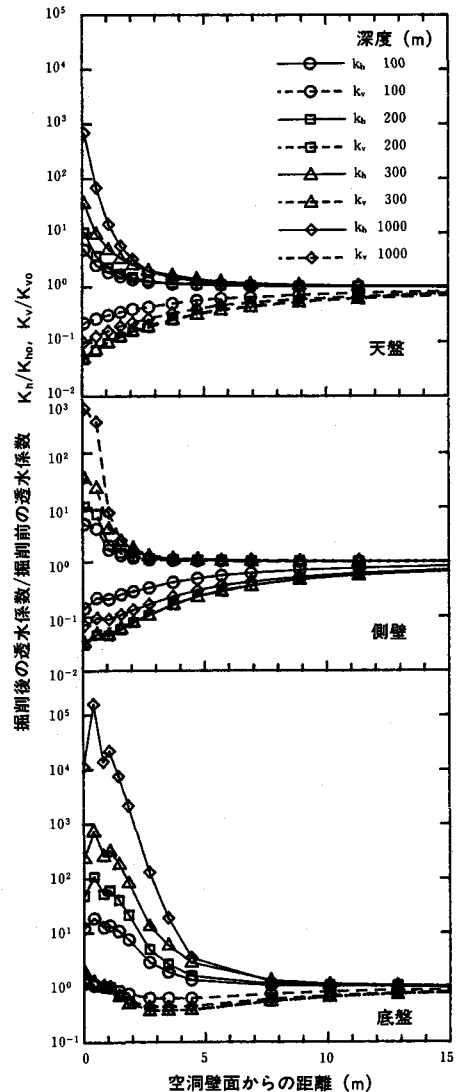


図-4 透水係数の変化比に対する深度の影響
(側圧比1.0の場合)

次に、側圧比の影響について調べてみると、深度100 m, 300 mのどちらの場合も、側圧比が小さいと天盤と底盤に大きな劣化域が発生し、側圧比が大きいと側壁に大きな劣化域が発生している。

このように、空洞掘削に伴って発生する劣化域は、空洞の設置深度や側圧比によって、その広がりや透水性の変化の程度が大きく異なることがわかる。また、ある特定の深度、初期地圧条件の空洞を対象にした場合でも、どの場所において、どの方向の透水性の変化を調べるかによって、得られる結果が大きく異なってしまう可能性があることがわかる。したがって、わが国における既存の計測結果が大きくばらついているのは当然であるといえる。なお、今回の解析では、全体的に、透水係数の増大の程度は、わが国における空洞周辺岩盤での既存の実測データを大きく上回っている傾向がみられる。これは、前に述べたように、今回用いた透水係数-応力関係式がわが国での実測データに基づいていなかったためであると考えられる。したがって、劣化域に関するより正確な予測を行うためには、今後、わが国において、割れ目の透水特性の応力依存性に関するデータをもっと追加取得し、それらのデータに基づいた割れ目の透水係数と応力の関係式を求める必要がある。

5. おわりに

空洞掘削に伴う周辺岩盤の劣化の原因として、応力分布の変化に伴う既存割れ目の開口現象が重要であるとの考えに基づき、岩盤の透水特性の応力依存性に関する検討を行った。また、空洞掘削時の応力変化に伴う透水特性の変化を予測するための比較的簡単な解析手法を提案するとともに、解析を実施し、その適用性について検討した。その結果以下のようなことが明らかになった。

(1) 割れ目の透水係数は非常に広範な範囲の値をとり、また、それに垂直に作用する応力の影響を大きく受けることがわかった。国内の試験データと海外のそれを比較すると、わが国で採取された試料では、全体的に海外のそれより割れ目の透水係数が小さく、また、応力依存性も小さいという傾向がみられる。

(2) 空洞掘削に伴って発生する劣化域は、空洞の設置深度や初期地圧条件によってその広がりや透水性の変化の程度が大きく異なること、そして、ある特定の深度、初期地圧条件の空洞を対象にした場合でも、劣化域の広がりや透水性の変化の程度は、場所と方向によって大きく異なることが予測された。

(3) 馬蹄形空洞の場合、全体的に天盤や側壁に比べて、底盤での劣化域の広がりが大きくなっている。これは空洞の断面形状の影響によると考えられ、劣化域の発生をできるだけ少なくしたい場合は、空洞の形状をできるだけ円形に近づけることが望ましい。

参 考 文 献

- 1) 小島圭二, 小池 豊: 岩石割れ目の透水性の応力・温度依存性 —— 充填物の影響, 第16回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, PP.81-85, 1984.
- 2) S. C. Bandis, A. Makurat and G. Vik: Predicted and Measured Hydraulic Conductivity of Rock Joints Proceeding of the International Symposium on Fundamentals of Rock Joints, pp.1-11, 1985.
- 3) K. G. Raven and J. E. Gale: Water Flow in a Natural Rock Fracture as a Function of Stress and Sample Size, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 22, No. 4, pp. 251-261, 1985.
- 4) J. E. Gale: Comparison of Coupled Fracture Deformation and Fluid Flow Models with Direct Measurements of Fracture Pore Structure and Stress-Flow Properties, 28th US Symposium on Rock Mechanics, pp. 1213-1222, 1987.
- 5) P. C. Kelsall, J. B. Case and C. R. Chabannes: Evaluation of Excavation-Induced Changes in Rock Permeability, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 21, No. 3, pp. 123-135, 1984.
- 6) N. Barton, S. Bandis and K. Bakhtar: Strength, Deformation and Conductivity Coupling of Rock Joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 22, No. 3, pp. 121-140, 1985.