

(5) 岩盤の安定性に及ぼす流れの影響 —— 円形坑道の場合 ——

日鉄鉱業 (株)	正会員	○ 野口 義文
東京大学 工学部	正会員	大久保誠介
東京大学 工学部	正会員	西松 裕一

The Effects of Groundwater Seepage on the Stability of Rock Cavern
— In a Case of Drift with Circular Section —

Yoshifumi NOGUCHI,	Nittetsu Mining Co., Ltd.
Seisuke OKUBO,	The University of Tokyo
Yuichi NISHIMATSU,	The University of Tokyo

Abstract

The authors investigated the stability of rock cavern considering the potential gradient calculated from the two-dimensional groundwater analysis.

The stability around the circular-drift was evaluated with the stress severity.

The main results of this study can be summarized as follows,

- 1) The stress severity is increased by the groundwater-seepage.
- 2) If there is the fractured zone around the drift, the stress severity in the fractured zone and its neighboring area increases remarkably. These results are related to the low Young's Modulus and the low permeability in the fractured zone.
- 3) In case of unsteady flow, the stress severity reaches the value in case of steady flow after a certain time which depends on the storage coefficient.

1. はじめに

ほとんどの岩盤が、亀裂などのような空隙部を有し、そこは外部からの水などが浸透したり、あるいは貯留される場となっている。また、そのような岩盤に空洞を開削すると水は空洞に向かって移動する。このような水の移動に関する研究¹⁾や、水の移動が変形や応力といった岩盤の力学的挙動に及ぼす影響について種々の研究²⁾が行われ、多くの興味ある知見が発表されている。

ところで、地表からそれほど深くない坑内採掘の採掘跡空洞周辺で、大量の降雨からしばらく経過した後、局部的に岩盤が崩落し始めることが多々経験される。このことの原因を、直ちに浸透流だけに求めるわけにいかないと考えられるが、既に発表されている知見³⁾からも、浸透流が不安定側に作用するであろうことは予想される。

そこで、有限要素法を用い、二次元ポテンシャル流れの解析から得られるポテンシャルの分布を考慮にいたれた弾性解析を行い、空洞周辺の安定性に及ぼす浸透流の影響を、破壊限接近度 (Stress Severity) の変化を用いて検討した結果を示す。

2. 基礎理論と計算方法

二次元の帯水層を考える。この時、定常流の基礎方程式⁴⁾は(1)式で与えられる。

$$k_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + Q = 0 \quad (1)$$

ここに、 k_x k_y ; それぞれ x および y 方向の透水係数 (m/day)
 ϕ ; ピエゾ水頭 (m)
 Q ; 湧水率 (1/day)

である。

また、非定常流の場合には、(2)式のように表わされる⁴⁾。

$$k_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + Q - \lambda \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

ここに、 λ は貯留係数(1/m)である。

(1)、(2)式を三角形要素を用いた有限要素法で解くが、非定常流の場合、時間に関わる項は中央差分法によった⁴⁾。ピエゾ水頭 ϕ は、水の密度 ρ を一定として ρg を乗じた値(以下、ポテンシャルという)を使用する。ここで、Fig.1に示すように岩盤を弾性体部分と、流路を含む水で飽和した空隙部分とに分け、これらが一様に分布した多孔質物質と考える。

Fig.1において、奥行き方向を単位厚さとし、考えている岩盤の全面積 A のうち弾性体部分を A_s 、空隙部分を A_p とする。 A_s に作用する応力を σ_s (CASE.A)、 A_p に作用する圧力を p とする。CASE.Cは弾性体部分の体積が圧力 p によって一様に縮小するために生じる応力である。CASE.AとCASE.Bを合わせると、全面積 A に $(\sigma_t + p)$ が作用していることと等価となる。これらを、節点変位と節点力の関係で示すと(3)式のようにあり、これを平面ひずみ状態で解析した。

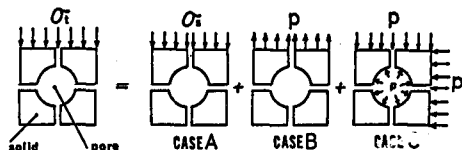


Fig.1 岩盤のモデル

$$[K] \{ \delta \} = \{ F \} + \{ F \} p + \{ F \} v + \{ F \} b \quad (3)$$

ここに、 $[K]$; 剛性マトリックス
 $\{ \delta \}$; 節点変位
 $\{ F \}$; $(\sigma_t + p)$ に基づく節点力
 $\{ F \} p$; ポテンシャル勾配に基づく節点力
 $\{ F \} v$; p による体積縮小に基づく節点力
 $\{ F \} b$; 物体力に基づく節点力

である。

$\{ F \} p$ は、物体力と同じ扱いとし、圧縮を正として3節点に等分した。また、弾性体部分の体積弾性率と3節点の平均圧力とから体積ひずみを求めて、これより $\{ F \} v$ を計算した。

こうして得られた応力状態から、各要素のStress Severityを計算する⁵⁾。ここでは、Mohrの破壊規準を用いて(4)式で定義される値を採用した。

$$S = T / T_0 \quad (4)$$

ここに、 S は破壊限接近度 (Stress Severity)、 T は引張強度である。また T_0 は、ある応力状態におけるMohrの応力円の包絡線を、放物線 $\tau^2 = mT(T - \sigma)$ として次式から求めた。すなわち、 C_0 を一軸圧縮強度、 σ_1 、 σ_2 ($\sigma_1 > \sigma_2$) を主応力として、 $m = (C_0 / T_0) + 2\sqrt{(C_0 / T_0) + 1}$ を計算し、

$(m-1)\sigma_1 + \sigma_2 \leq 0$ の時

$$T = - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{m-4} \frac{\sqrt{(\sigma_1 + \sigma_2)^2 - (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 4(\sigma_1 - \sigma_2)^2 / m}}{m-4} \quad (5)$$

$(m-1)\sigma_1 + \sigma_2 > 0$ の時

$$T = \sigma_1 \quad (6)$$

とした。

以上をまとめると、計算手順はFig.2のようになる。

3. 坑道周辺の安定性

(円形坑道の場合のStress Severityの変化)

Fig.3に示すように、厚さ方向に一樣な300mの帯水層を考え、その下端に不透水層があるものとする。そこに開削した直径4mの円形坑道の周辺を、Fig.4に示すような節点数114、要素数187のメッシュに分割した。

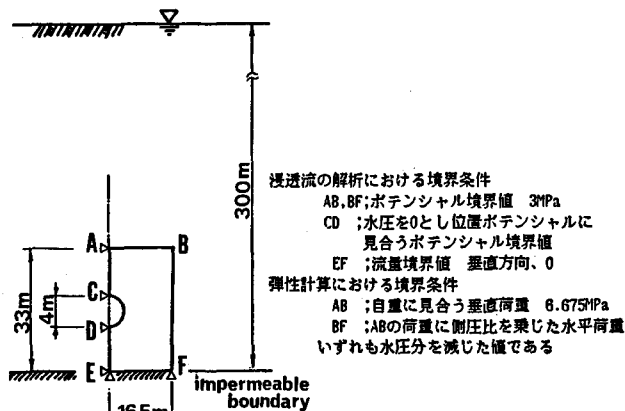


Fig.3 解析した状態

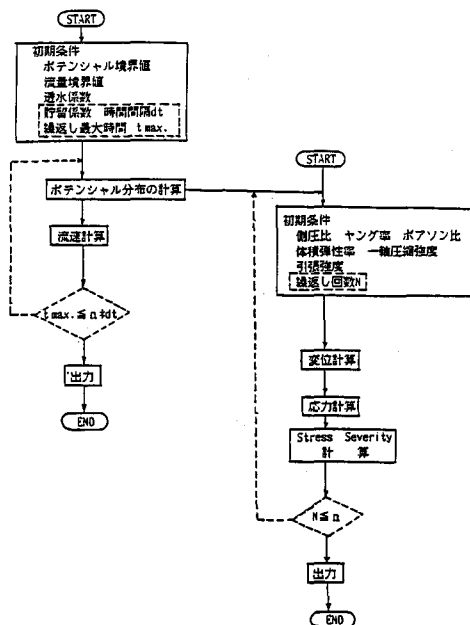


Fig.2 計算の流れ
破線は非定常流の場合

1). 定常流の場合

岩盤に関するパラメータとしては、側圧比、ヤング率、ポアソン比、一軸圧縮強度、引張強度、そして空隙部の圧力に関する体積弾性率³⁾が考えられる。一方、浸透流については、透水係数の方向性や局所的な変化が考えられる。両者の相互作用に関する研究成果も発表されている¹⁾²⁾が、ここでは個々に与えるものとし、表-1に示す例について解析した。

Fig.5は、表-1に示すCASE.1,5,9のStress Severity S の分布を、坑道壁面から水平に分布する要素で調べたものである。ここで、坑道の直径を D_0 、坑道中心から水平の方向で、壁面からの距離を r とする。浸透流がない場合の値を S_0 として、 S および S/S_0 を要素の位置についてプロットした。側圧比1.0と0.5の場合には坑道から離れるにしたがって単調に大きくなっている。一方、側圧比2.0では $r/D_0=1$ の辺りに影響が少ないところがある。これは、浸透流の

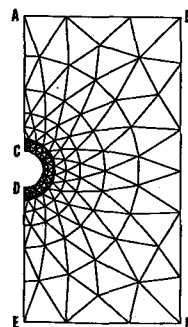


Fig.4 メッシュ図
陰影部は想定したゆるみ領域

表-1 解析例と用いた諸物性値

鉛直荷重 P_v (MPa)	6.675	CASE.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
岩盤のヤング率(MPa)	1000	側圧比 P_h/P_v	0.5				1.0				2.0			
ポアソン比	1/3	ゆるみ領域の ヤング率 (MPa)												
密度(kg/m ³)	2500													
一軸圧縮強度(MPa)	10	ヤング率 (MPa)	1000	10			1000	10			1000	10		
引張強度 (MPa)	1	ポアソン比	1/3			1/3			1/3			1/3		
体積弾性率 (MPa)	500	透水係数 (m/day)	1	0.01	1	10	1	0.01	1	10	1	0.01	1	10
透水係数 (m/day)	$k_x=k_y=1.0$													

影響度が、载荷条件による応力状態の差にも依っていることを意味している。さて、様子は様ではないが、浸透流はいずれの場合もS値を増大させた。もともとS値が低い、坑道から離れたところよりは、坑道近傍でのS値の増大に注目すべきであろう。そこで、それぞれの側圧比について坑道近傍にゆるみ領域を想定しパラメータの値を変えて解析した。ただし、ここでは岩盤のヤング率と透水係数のみを適当に変えて行った。Fig.6.a.b.c.はCASE.2,3,4、CASE.6,7,8、およびCASE.10,11,12のS値をプロットしたものである。同図には、それぞれ浸透流がない場合も示し、便宜上、引張状態にあるS値を負で表わしている。

浸透流がない場合の応力状態に対して、浸透流に基づく応力はMohrの応力円を引張方向に移動させ破壊包絡線に近付けるように作用する。この時、透水係数が小さいところではポテンシャル勾配が大きくなり、それにより応力が高くなる。また、ヤング率が小さいと相対的に浸透流に基づく応力の比重が増加する。Fig.6で明らかなどおり浸透流の影響はゆるみ領域とそこごく近傍に集中して現れ、その透水係数が低い時S値が非常に大きくなる傾向が、いずれの場合も見受けられる。そして、この例では引張側に变化しており、岩盤が不安定になることを意味している。一方、その透水係数が高ければ浸透流がない場合に比べて、若干S値が大きくなる程度である。

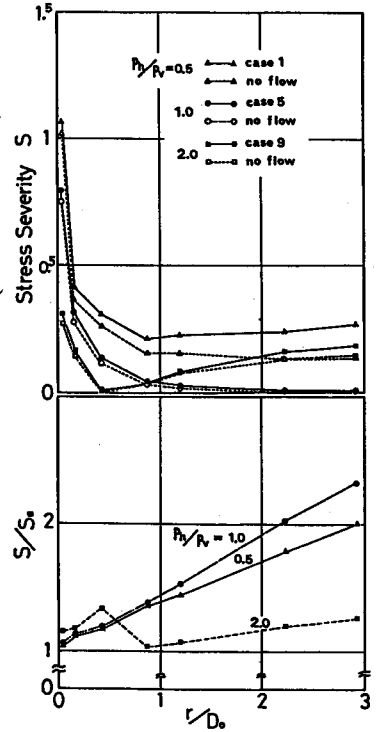


Fig.5 定常流におけるS値

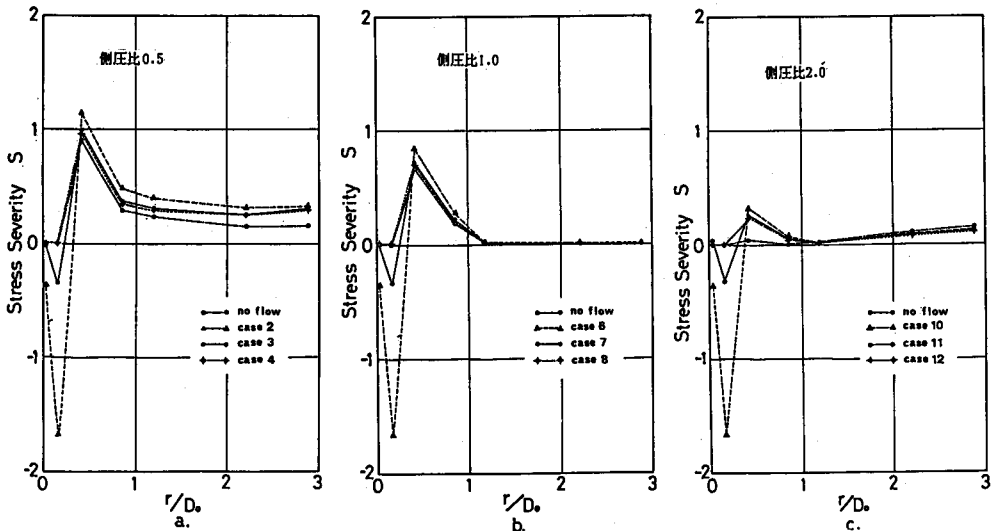


Fig.6 ゆるみ領域がある場合のS値

2). 非定常流の場合

貯留係数 λ を適当に仮定し、 S 値の経時変化を調べた。位置によって異なるが、 S 値は、ある時間経過すると定常流の値に収束する。例えば、Fig.7はCASE.6について $\lambda=0.1$ 、時間間隔0.1daysで計算した結果である。定常流の時の値を S_1 とし、 S/S_1 を示す。収束に要する時間は、坑道壁面付近($r/D_0=0.25$)では約50daysであるのに対し、 $r/D_0=1.2$ の要素で約38days、 $r/D_0=2.9$ では約22daysとなる。これは当然ながら非定常流のポテンシャルが定常流の値に収束していく過程と同じであり、 S 値も単調に増加する。Fig.7の例では、収束のタイプが2つに大別できる。ひとつは、もともと定常流の値に近いところから出発して緩やかに収束していくもので、ゆるみ領域より奥の部分である。もう一つは、坑道近傍のゆるみ領域で、非常に小さな値から始まり急速に変化している。ここでも、引張領域になった場合 S 値を負で表わした。図に示した例では、 $r/D_0=0.25$ の要素、次に $r/D_0=0.04$ の要素の順に引張に変わっている。

貯留係数 λ は、収束に要する時間に主として影響を与えるが、透水係数が同じなら λ が10倍になると、ある位置で同じ S 値になるまでの時間も10倍になる。

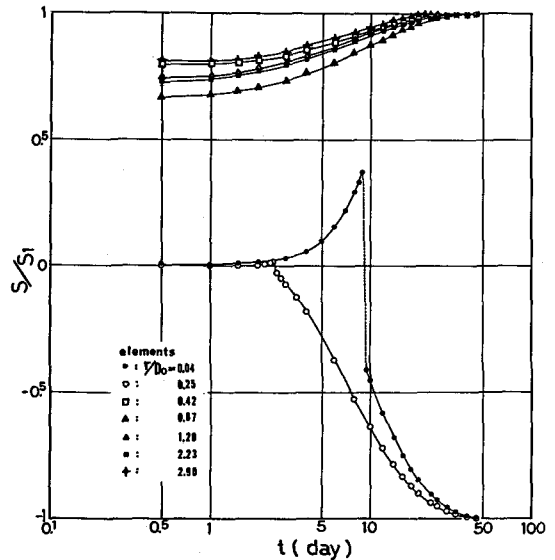


Fig.7 非定常流における S 値の変化

4. まとめ

二次元浸透流の解析から得られるポテンシャルを、岩盤の弾性解析に利用した。定常流と非定常流の数例で、円形坑道周辺の安定性についてStress Severityを用いて評価し、その結果次のことが明らかになった。

- (1) 浸透流は、Stress Severityを増大させる。
- (2) 坑道付近にゆるみ領域のようなヤング率が低い部分があると、ゆるみ領域とそのごく近傍で S 値の増大が著しい。
- (3) (2)は、そこの透水係数によっても大きく異なり、透水係数が低いと S 値を増大させる。
- (4) 非定常流の場合、ある時間経過して定常流に収束するが、その時間は貯留係数 λ によって定まる。例では、その過程で、引張領域に変わる位置と時刻が得られた。

個々のパラメータについて考慮すべき点が多い。例えば、透水係数や貯留係数は、応力状態の関数であり、時間とともに変化することが考えられる。また、岩盤の浸透流は、一様なポテンシャル流れとして近似できない場合もあり得る。しかし、非常に広い空間や長い時間で考える場合、本報告のような扱いも参考になると思われる。実験室での試験方法や現場でのそれを含めた、今後の検討の基礎にしたいと考えている。

参考文献

- 1) 例えば、佐藤邦明, 伊藤 洋, 土木学会論文集第369号/II-5, p.51-60(1986)
- 2) 例えば、小林 晃, 大西有三, 土木学会論文集第376号/III-6, p.101-110(1986)
- 3) E.Detournay, A.H-D.Cheng, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 25, p.171-182(1988)
- 4) 川井忠彦監訳, 応用有限要素解析, p.167-169, p.203-210(1982) 丸善
- 5) 例えば、西松裕一, 山口 勉, 大久保誠介, 日鉱誌, 96(1111), p.593-594(1980)
- 6) B.C.Haimson, Field testing and instrumentation of Rock, ASTM STP554, p.156-161(1973)
B.C.Haimson, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 15 p.167-178(1978)