

(48) 大谷石採掘地下空洞における亀裂進展と解析

埼玉大学 工学部

正会員 吉 中 龍之進

サンコーコンサルタント(株)

正会員 道家 太郎

埼玉大学 工学部

野呂瀬 貞 隆

埼玉大学 工学部

○腰塚 憲 一

1. はじめに

近年、FEMを代表とする多くの解析手法が種々の問題に対して多くの成果を上げているが、岩盤の破壊機構の研究に適用する場合、岩のぜい性的性質、潜在的な割れ目などの影響が解析結果の妥当性を評価することを非常に困難なものにしている。本研究は以上のことをふまえ、岩盤条件が比較的単純な大規模地下空洞の現地調査結果と川井モデル（剛体バネモデル：RBSM）による解析結果を比較しようとするものである。

なお、地質条件、調査結果の詳細及び、FEMによる解析結果に関しては、文献2)~4)を参照されたい。

2. 大谷採掘空洞の岩盤破損調査の概要

2.1 地質及び岩盤条件： 対象とする大谷石採掘空洞は、新第三紀層に属する大谷層中に存在し、約20km²の広さに分布している（図1）。大谷石は溶結凝灰岩で、直径数mm～数cmのやや扁平な形をした粘土塊を含むことが多い。大谷層は走向NE-SW、傾斜10°~20°SE、初生的亀裂としてほぼ鉛直で間隔10~30m程度の不連続面系が発達するところもあるが、節理のような割れ目系は存在しない。従って、岩盤は連続体と仮定してもよいと考えられる。

2.2 空洞の掘削方法： 大谷石の採掘方法は、room and pillar 工法が一般に用いられている。約10×10m断面の立坑が深さ約60~90mに達すると水平に高さ約2mのスリットを掘る。その後、ピラーを残して下方への採掘を行う。ピラー及び掘削部断面は約10×10mであり、掘削の深さは40~50m（最高112m）である。なお、チェーンソーを用いた掘削が行われるため、掘削による岩盤への損傷はほとんどない。

2.3 破損調査結果： 図1に示す地区の東半分の空洞で破損を生じている部分の調査を行った。その結果は以下のとおりである。（a）ピラーには傾斜80°~90°の割れ目系が卓越し、そのほとんどは開口している。

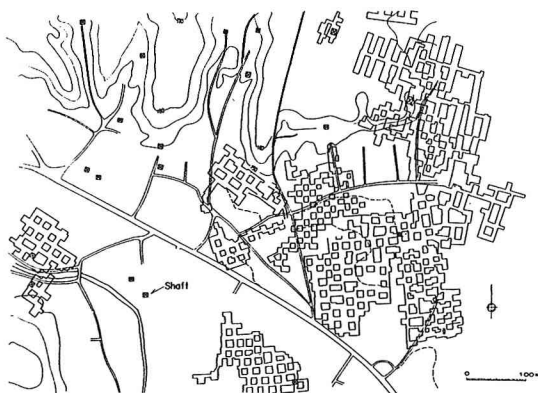


図1. 地下空洞の平面分布図

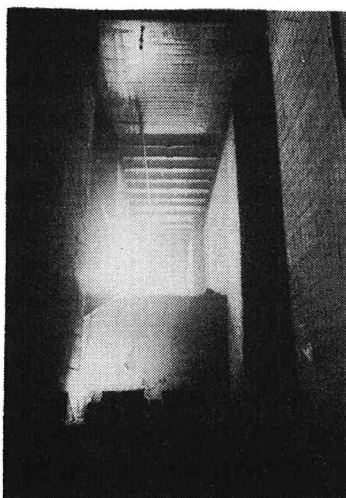


写真1. 代表的地下空洞の内部



写真2. ピラーの縦割れ

(b) 割れ目の傾斜方向の変位は一般に小さいが、70°~80°の割れ目では比較的大きい。(c) 側壁、ピラーの剝離は比較的上部、壁面隅角部では中央部に発生している。(d) 天盤の崩落は数か所の空洞で観察され、初生的亀裂の分布や発生した亀裂の進展に関係あると見られる。

3. 数値解析

RBSMは要素自身を剛体と見なし、要素境界辺上に分布する仮定の垂直・せん断バネによって隣接要素が結合されているとした解析手法で、線状に分布する材料の特性や亀裂の進展過程を表現し易いことが特長である。その基本理論については文献1)等を参照。

3.1 解析方法

歪軟化を考慮したRBSM解析の流れを図2に示す。基本的には山田式荷重増分法と呼ばれる方法を採用している。始めに掘削形状stageの初期値を設定し、荷重増分step iに入る。各境界辺上の応力を試験的に計算し、荷重増分比率 r (作用させる荷重に対して新しくバネを破壊させるのに必要な荷重の比)を計算する。その最小値によりバネの破壊を検証し、各繰返し計算を行う。

破壊したバネは、その境界に亀裂が発生したとみなし、バネ定数 k_n 、 k_s は亀裂の変形性を含む値に変更する。本解析では、破壊の様式、応力状態を考慮して、要素密実部と亀裂部のバネが直列に結合されたモデルを考える(図3)。破壊後、応力(σ_n , τ_{ns})にある亀裂部のバネ定数は、次の様に求められる。(文献4))

$$k_{nj} = m \cdot \exp(l \cdot dV / V_{mc}) \quad (1)$$

$$k_{sj} = k_{sjo} \cdot (1 - Rf \cdot \tau_{ns} / \tau_f)^2 \quad (2)$$

$$k_{sjo} = \alpha \cdot Pa \cdot (-\sigma_n / Pa)^\beta \quad (3)$$

ここで、 m 、 l 、 V_{mc} 、 Rf 、 α 、 β は材料定数であり、亀裂部の粗さや寸法に依存する。 dV はある応力レベルにおける閉塞量、 Pa は大気圧、 τ_f は σ_n に対する残留せん断強度である。

図4の応力経路とバネ定数の対応は次の様に設定し、応力は設定値になるまで再配分計算を行う。

1) 応力(σ_n , τ_{ns})が破壊曲線の内部にある場合は、通常、仮定されている平面歪状態のバネ定数を用いる。

$$k_n = k_{ni} = (1 - \nu)E / l(1 + \nu)(1 - 2\nu)h \quad (4)$$

$$k_s = k_{si} = E / l(1 + \nu)h \quad (5)$$

h : 隣接2要素重心間の境界辺に対する垂直距離

2) 引張り破壊: σ_n / σ_c がTに達した場合、

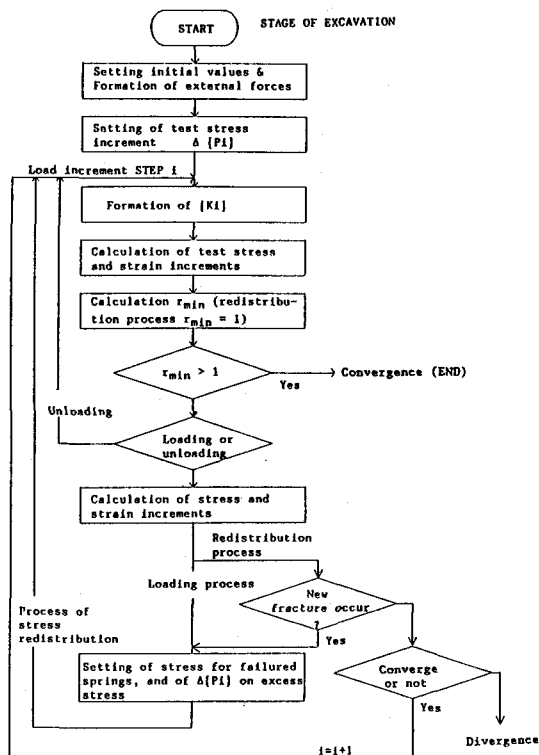


図2. RBSM解析の流れ

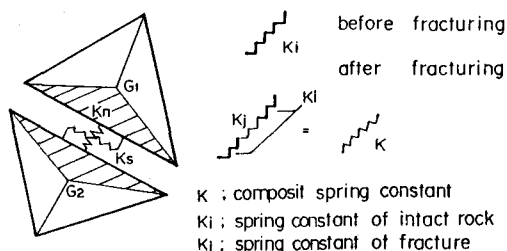


図3. 破壊後のバネ定数の概念

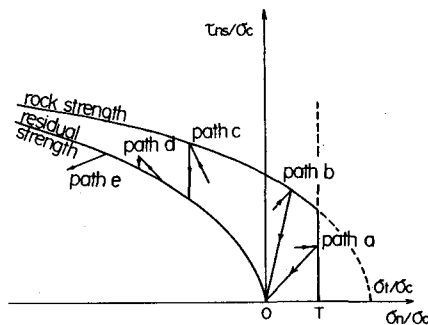


図4. バネ破壊後の応力経路

$$k_n = k_{ni} / 1000 \quad (\cong 0) \quad (6)$$

$$k_s = k_{si} / 1000 \quad (\cong 0) \quad (7)$$

とし、応力は $(0, 0)$ とする (path a)。

3) 応力が破壊曲線に達した場合、

混合破壊 : $\sigma_n \geq 0$ の時は 2) と同様 (path b)。

せん断破壊 : $\sigma_n < 0$ の時は、

$$k_n = k_{ni} \cdot k_{nj} / (k_{ni} + k_{nj}) \quad (8)$$

$$k_s = (k_{si} \cdot k_{sj} / (k_{si} + k_{sj})) / 1000 \quad (9)$$

とし、応力は (σ_n, τ_f) とする (path c)。

τ_f : σ_n に対する残留曲線上のせん断強度

4) 破壊後、応力成分は残留強度曲線上にあるようにし (path d) , 残留強度曲線内部に入った場合 (除荷) には、この step の計算を無効とし、

$$k_s = k_{si} \cdot k_{sj} / (k_{si} + k_{sj}) \quad (10)$$

として計算し直す (path e)。

3. 2 破壊基準及び安全率

解析に用いた破壊基準は、基本的には、HoekとBrownが提案した式と引張り破壊を考慮したものをを用いた。

$$\tau_{ns} / \sigma_c = A (-\sigma_n / \sigma_c + \sigma_t / \sigma_c)^B \quad (11)$$

$$\sigma_n / \sigma_c = T \quad (12)$$

せん断破壊に対する安全率は、次式で定義した。

$$F_s = \tau_f / \tau_{ns} \quad (13)$$

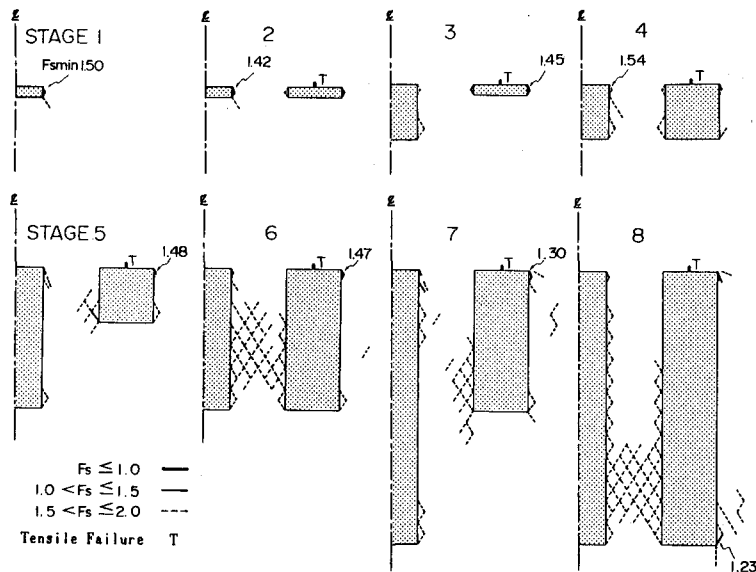


図5. 三連空洞モデルの安全率分布図
(土かぶり $D=100\text{m}$, 空洞高 50m , ピラー幅 10m)

表1. 解析に用いた物性値

CONSTANT OF ROCK		CONSTANT OF FRACTURE	
E	(MPa) 1.24×10^3	m	44.72
ν	0.232	l	486.
γ	(kN/m^3) 1.72×10^1	V_{mc}	(mm) 0.18
σ_c	(MPa) 7.6	Rf	0.8
σ_t / σ_c	0.24	α	562.
T	0.1	β	0.5
A	0.68	Pa	(kPa) 101.28
B	0.50		
(residual)			
σ_t / σ_c	0.0		
A	0.72		
B	0.50		

τ_f : 与えられた垂直応力に対するせん断強度

解析に用いた物性値は、表1にまとめて示した。

4. 数値解析結果

(1) 三連空洞モデル : 図5は天盤の深さ100mの場合の安全率分布を示す。側圧係数は 0.302を用いている。この解析から、(a) 引張り破壊は初期の掘削段階で天盤の中央に発生する、(b) せん断破壊に対する安全率は、全般に隅角部で低い、(c) ピラーの安全率は空洞高さが等しい時に全体的に低くなり、空洞高さが等しくない時には隅角部に集中する傾向があることなどがわかる。

図6は、天盤上の土かぶりが増加した時の stage 8における安全率分布を示す。分布傾向は亀裂の進展とともに図5とは異なってくる。この図では、掘削の途

中で隅角部から発生した亀裂が進展し、ピラーを貫通するに至っている。これにより、空洞の天盤及び地山側隅角部からの亀裂も進展している。

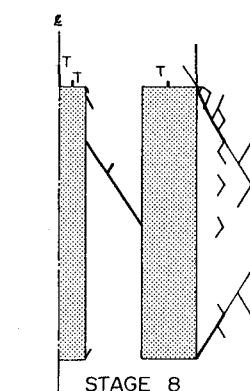


図6. 三連空洞モデルの安全率分布図 ($D=153.6\text{m}$)

(2) ピラーモデル：

図7は天盤上の土かぶり195mのリップピラーにおける破壊の進展を示す。この図は、ピラー両側の空洞を同時に掘削した時の最終段階を示し、この土かぶりでは、せん断亀裂はピラー底部から発生し始め、ピラー全体を破壊させる。

リップピラーにおける解析結果が荷重条件を1/2にすることでスクエアピラー

に近似的に適用できると仮定すると、実際の空洞の観察結果と解析結果を比較することができる。図8は計算されたクリティカルな土かぶりと岩の一軸圧縮強度との関係を示す。調査地区の平均残柱率は約33%で、一軸圧縮強度は平均6.68MPaであることから、クリティカルな土かぶりは108mとなる。実際にはおよそ84mであるので、解析に用いた条件と実際の条件との差（寸法効果など含む）が推定される。

また、前述したように実際の空洞ではピラーの破壊は縦方向の割れ目が支配的であり、解析で生じた縦割れとはタイプが異なる。これを説明するため、層理面に平行な弱面（例えば、2.で述べた層理面に平行に分布する粘土塊）を考えた解析を行った。層理面の傾斜を15°としてモデルに図9に示すような1~2コの弱面（ k_s が周囲の1/10、1/50）を入れ、一軸状態の荷重 P を作用させた。図から分かるように、ピラーにせん断亀裂が発生する荷重 P_{cr} よりも小さい荷重で縦方向の亀裂が発生した。この単純なモデルによる考え方から、このような弱面の存在は、縦割れの発生に重要な影響を与え得ると予想される。

5. 結び

調査結果から、空洞の破壊はぜい性的亀裂の進展に支配されると予想された。このため、解析には亀裂の表現に適したRBSMを採用した。非線形の破壊基準、歪軟化特性、応力に依存する破壊後のパネ定数を導入して解析を行った結果、実際の破壊状況を定性的に説明することができ、従って、本手法は有用な解析手法であると考えられる。

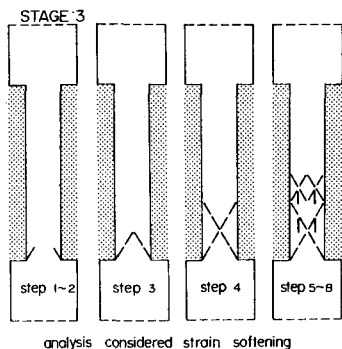


図7. ピラーモデルの破壊の進展
(D=195m, 空洞高 52.5m, ピラー幅10m)

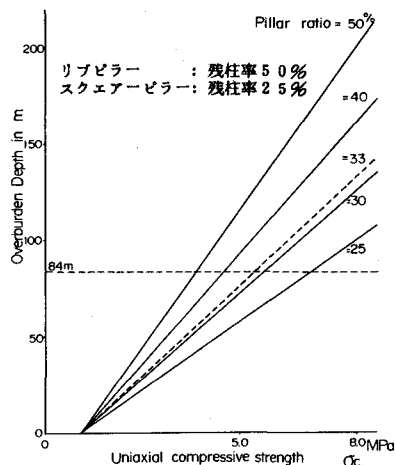


図8. クリティカルな土かぶりと一軸圧縮強度、残柱率の関係

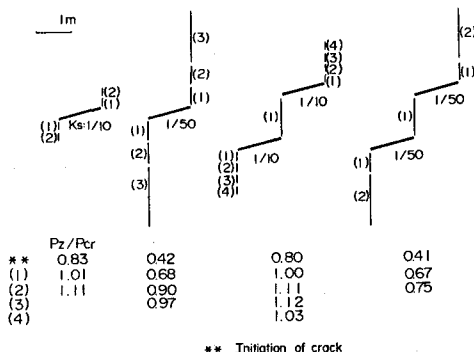


図9. 弱面モデルと引張り亀裂の進展

(参考文献)

- 1) 川井, 竹内, 他 (S. 56): 極限解析研究会 土質岩盤力学分科会 研究報告書: 東京大学生産技術研究所
- 2) 吉中, 藤枝, 大橋, 長谷川 (1984): 大谷石地下採掘空洞の岩盤破壊について, 第6回岩の力学国内シンポジウム
- 3) 菊地, 清水, 小野, 大西, 他 (1984): 軟岩地下空洞の安定性に関する基礎研究, 第6回岩の力学国内シンポジウム
- 4) Yoshinaka, Kikuchi, et al. (1984): Stability investigation of underground rectangular excavations in soft rock: Design and performance of underground excavations. ISRM/BGS, Cambridge
- 5) Yoshinaka and Yamabe (1986): Evaluation of deformation behaviour of discontinuous rock using joint stiffness: to be published. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. and Geomech. Abstr. Vol. 23, No. 1
- 6) Yoshinaka, et al. (1985): Fracture Development in Large Underground Quarry of Soft Rock and Some Consideration by Numerical Analysis. The Role of Rock Mech. in Excavations for Min. and Civil Works. ISRM Zacatecas Mexico
- 7) 山田嘉昭: 培風館: 塑性・粘弾性

(48) Numerical Analysis on Fractures Observed
in Ohya Underground Quarry Opening

R.Yoshinaka, Professor,Saitama Univ.

T.Michiie, Suncoo Consultants Co.,Ltd.

S.Norose, Saitama Univ.

K.Koshizuka, Saitama Univ.

SYNOPSIS

This paper presents a result of fundamental study on underground opening failure mechanism, adopting the large scale underground quarry as an example. These openings are excavated in Miocene pumiceous welded tuff of typical soft rock, and are of room/pillar type 30-50m height situated at the depth of 60-130m. According to the increase of excavation depth, a number of fractures has developed in rock surrounding opening. The result of site investigation on induced fractures is described and the characteristics of fracture development is considered. And the result of numerical analysis using the method of Rigid Body Spring Model (RBSM) developed by Kawai,T. (1977) is described. In the analysis, the peak and residual strengths, and the effect of deformability of induced fracture in reloading are considered. From the comparison of both results, it is shown that the fracture development observed in actual openings can approximately be simulated by numerical method, RBSM.