

地下空洞における山はねの予測に関する計測および数値解析手法の開発とその適用

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF MONITORING AND NUMERICAL ANALYSIS METHODS FOR THE PREDICTION OF ROCK BURSTS IN UNDERGROUND EXCAVATIONS

アイダン・オメル*・大洞 光央**・渡嘉敷直彦***・川本朧万****
Ömer AYDAN, Mitsuo DAIDO, Naohiko TOKASHIKI and Toshikazu KAWAMOTO

In recent years, the potential of rock bursts during underground excavations has been increasing, as the structures become deeper. Therefore, some effective monitoring and analysis methods for predicting rockburst must be developed. It is experimentally demonstrated that the combined utilization of AE, rock temperature and electric potential may be a quite effective in-situ monitoring tool for predicting rockburst. Various finite element methods based on conventional elasto-plasticity, energy methods and extension strain method have been developed for predicting rockburst. Among them, The finite element method based on classical elasticity-plasticity theory was found to be appropriate if the failure zones obtained in analyses are properly interpreted.

Key Words: rock burst, underground opening, finite element method, elasticity-plasticity analysis

1. はじめに

近年、地下空洞の建設する際に土被りの増加に伴い山はね現象の起こり得る可能性は大きくなり、それに対する対策が必要となる。本論文では山はね現象の予測に対して、新たな現場計測手法と数値解析手法を提案する。計測項目として、AE・変位・電位・温度変化などを選定し、計測手法としての可能性を室内模型実験において検討する。数値解析手法として既存の数値解析予測手法の拡張し、その適用性を検証する。

2. 山はね現象

トンネルや地下空洞を大深度で開削する場合に、空洞周辺が破壊して岩の破片が内部に向かって飛び散る現象がある。これは山はね現象と呼ばれ、主に火成岩や石英質砂岩などの硬岩で見られる脆性的破壊現象である。一般に山はね現象は空洞周辺に圧縮偏差応力が最大になる個所で現れる。岩盤が破壊する際に発生する破片はかなり遠くに飛ぶことも良く知られている (Jaeger and Cook 1979, Panet 1969)。図 2-1 はカナダの URL 地下 420m 水平空洞で見られた破壊の様子を示している (Martin 1992)。低レベルの山はね現象としては剥離現象があり、図 2-2 はモンブラントンネルで 2000m 級の土被り下で見られた破壊の様子をあらわしている (Panet 1969)。一方、軟岩ではスキージングと呼ばれる破壊が発生する (Aydan et al. 1993, 図 2-3)。

* 正会員 工学博士 東海大学 海洋学部 海洋土木工学科

** 学生会員 博士課程前期 東海大学大学院 海洋工学専攻

*** 正会員 琉球大学 環境建設工学科 環境防災工学

**** 正会員 工学博士 名古屋大学 工学部 名誉教授

3. 山はね現象に対する室内模型実験

実験装置の全景は図 3-1 に示した通りで、荷載容量 2000 kN の圧縮実験装置を利用した。また、変形に伴う自然電位の変化も測定した。破壊後の供試体の様子を図 3-2、図 3-3 に示す。計測結果は琉球石灰岩のみを示した。

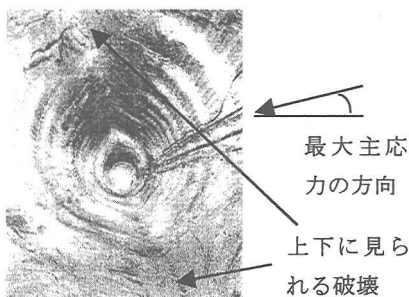


図 2-1 花崗岩層に見られた山はね

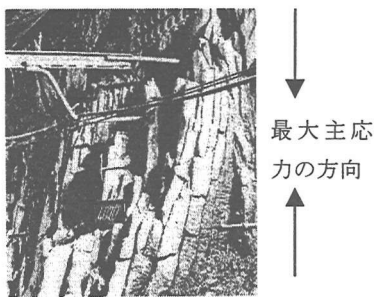


図 2-2 側壁に見られた剥離現象



図 2-3 泥岩(軟岩)層での破壊

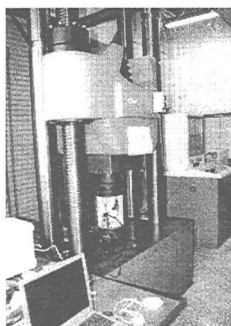


図 3-1 実験装置全景

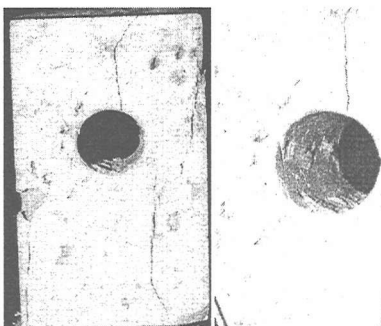


図 3-2 琉球石灰岩での破壊

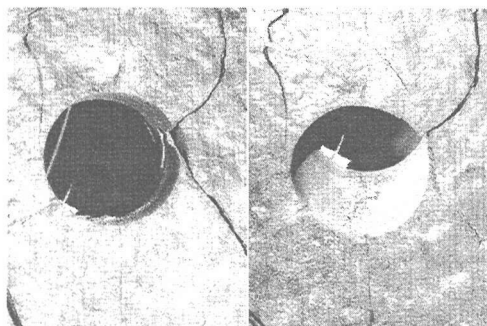


図 3-3 砂岩・頁岩の互層での破壊

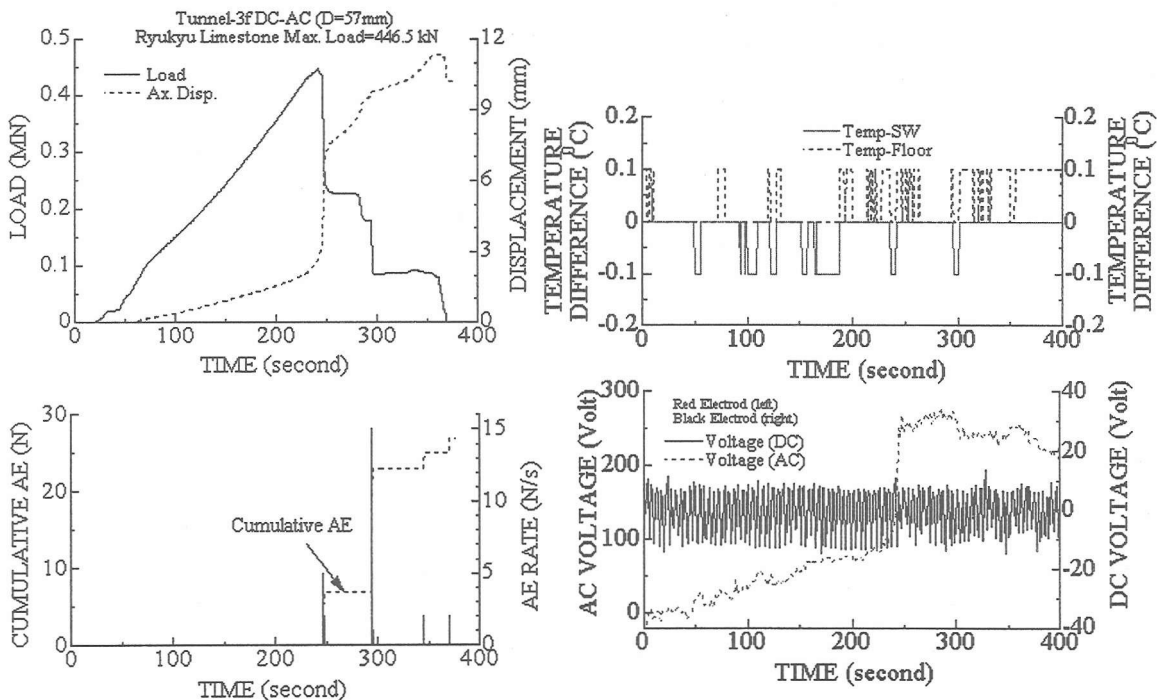


図 3-4 軸応力・軸ひずみ AE・変位・自然電位・温度と時間変化 (琉球石灰岩)

琉球石灰岩を使用した実験では、最大主応力の方向に引張り亀裂が空洞上下に確認され、側壁に圧縮による破壊が発生した。図 3-4 は実験中に計測された軸応力・軸ひずみ・AE・電位・温度の時間変化を示す。電位の変化が破壊の前に信号(SES)を発生し、続いて大きな変化を示している。これに対して AE の発生は破壊と同時に破壊後に大きな変化として現れている。温度変化に関して、変形や破壊との関係が明確ではないが、図 3-4 に見られるように温度の変化が発生すると電位や AE にも大きな変化の発生が見受けられる。この結果から、山はね現象の現場での予測方法は電位の変化を計測する事が重要性を増してくるものと考えられる。

図 3-2 に示した破壊後の供試体の様子に関して考察をする。今回の実験やその他様々な実験から、円形空洞の周辺に発生する破壊は、模式的に図 3-5 のように現れる。引張り亀裂は最大初期応力方向に発生するが空洞周辺から破片がはねる事はない。一方、圧縮偏差応力の最大になる位置で破壊が発生し、岩盤が脆性挙動示す場合には破片がはねる。従来岩盤構造物における山はね現象は圧縮破壊をする領域である。この圧縮破壊によって空洞形状が変化して応力が増幅し、破壊が進展する。空洞周辺の岩盤は初期応力状態に最も適した幾何学形状になるように破壊領域が成長する。その破壊成長過程に図 3-5 に示されたように空洞から離れた位置にも斜めの亀裂が発生する。一般的に圧縮破壊によって現れる破壊領域に比べ、引張りによって発生する亀裂は肉眼で確かめることが困難であることが多い。発生する斜めの亀裂は圧縮破壊がある程度進展した後に現れる。しかし、室内実験でこれらの破壊が発生の直後に供試体が全体破壊に至るため、その破壊過程を観察することが困難である。

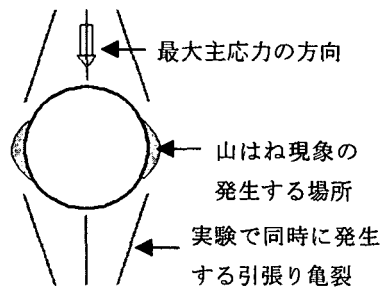


図 3-5 各種実験に見られた破壊の傾向

図 2.1 に示すようにカナダの URL や円形空洞周辺の破壊について圧縮偏差応力による破壊のみ強調されることが多く、引張りによる亀裂について報告がほとんどない。岩盤の空洞に破壊を論じる際にカナダの URL で円形空洞周辺に発生しているはずの引張り亀裂を確かめることが出来なかった事はかなり誤った解釈になってしまっていると思われる。このことについて、解析結果を論じる際にまた触れることにする。

4. 各種解析手法

山はね現象を予測する手法として考えられる手法は大きく分けて次の 3 通りである (Jaeger and Cook, 1979; Stacey, 1981)。①エネルギー法 (ひずみエネルギー法、偏差ひずみエネルギー法)、②横伸びひずみ法、③弾脆性塑性法。これらの山はね予測手法はほとんどが弾性解析に基づいて行われてきた。今回開発した解析手法は、ひずみエネルギー法、横伸びひずみ法と従来の弾塑性解析による物で、先の 2 つは弾塑性解析に拡張した。開発したプログラムは全て、塑性域において初期剛性法を用いて繰り返し解析を行い、非線型性が考慮されている。

4.1 従来の弾塑性解析

従来の弾塑性解析でとして、図 4-1 に示す応力・ひずみ関係を用いた。塑性領域において降伏関数として Drucker-Prager の降伏関数を利用する。しかし、降伏関数のパラメータを Mohr-Coulomb 降伏関数のパラメータから算定した (Owen-Hinton(1980)を参照)。塑性域における岩盤の挙動は、図 4-1 の様に完全塑性域と脆塑性域に分けることにした。

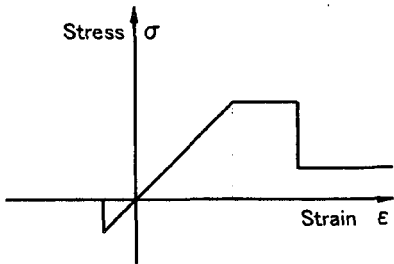


図 4-1 従来の弾塑性解析で破壊基準

4.2 エネルギー法

エネルギー法で利用した応力・ひずみ関係を図 4-2 に示す。エネルギー法は鉱山工学の分野でかなり前から利用されたものである (Jaeger & Cook 1979)。基本的にこの手法には、ひずみエネルギーと偏差ひずみエネルギー法がある。ひずみエネルギー法ではひずみエネルギーの値がある特定の値に達した所で破壊が発生すると考えられている。図 4-2 からわかるようにひずみエネルギー法は、岩盤が持つ引張りに弱い特徴を考慮しない欠点もある。

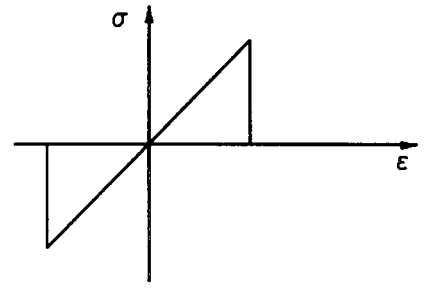


図 4-2 エネルギー法での破壊基準

4.3 横伸びひずみ法

横伸びひずみ法でも破壊基準として使用した応力とひずみの関係を図 4-3 に示す。横伸びひずみ法は、Stacey¹⁾ (1981)が硬岩で掘削される空洞の安定性を評価するために提案した基準である。図 4-3 に示すように、この横伸びひずみ法による破壊基準では、横伸びひずみ(ϵ_t : 最小主ひずみ)の値が伸びひずみ(ϵ_a : 最大圧縮主ひずみ)の値に対して線形的変化から離れたところで、最大圧縮方向に亀裂が発生すると考えられている。これは地下空洞において剥離現象として解釈される。したがって、この基準は古典的な塑性論で初期降伏基準に類似していると考えられる。横伸びひずみ法による解析手法はノー・テンションも考慮して開発した。

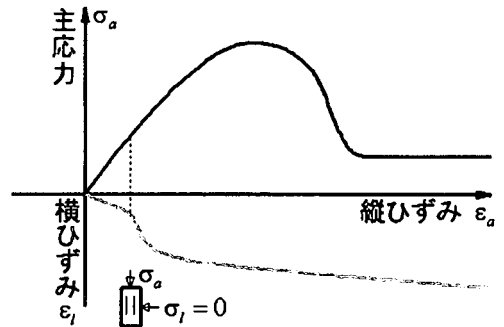


図 4-3 横伸びひずみ基準

4.4 有限要素法による定式化

有限要素法による定式化は運動量保存則、構成則および変位とひずみの関係に基づいて変分原理を適用し、空間的な離散化を導入して求められる。静定場の運動量保存則は応力 σ と物体力 b を使って以下のように表現できる。

$$\nabla \cdot \sigma + b = 0 \quad (4-1)$$

応力とひずみの関係はフックの法則より、

$$\sigma = D \epsilon \quad (4-2)$$

ひずみ ϵ は変位 u の関係は微小ひずみ理論にしたがって、下記のように与えられる。

$$\epsilon = \frac{1}{2} [(\nabla u) + (\nabla u)^T] \quad (4-3)$$

有限要素法において領域は要素に分割される。代表的な要素において得られる関係式を全領域での和を取ったものが次のようにあらわされる。

$$[K]\{U\} = \{F\} \quad (4-4)$$

ここに、

$$[K] = \int_V [B]^T [D] [B] dV$$

5. 解析結果と考察

5.1 カナダの地下実験施設 (URL) への適用例

2 節で紹介したカナダの地下実験施設 (URL) の地下 420m 水平空洞へ各予測手法を適用した。使用した各材料定数を表 5-1 に示す。空洞周辺の岩盤は花崗岩である (Martin 1992)。解析結果を以下に示す。

破壊領域はそれぞれの解析手法で異なる結果となった。URL で観察された破壊領域の様子とよく似ているのが図 5-2 のエネルギー法による解析結果である。図 5-3 のノー・テンションを考慮した横伸びひずみ法による解析結果は引張りによる破壊の可能性しか示していない。3 節で紹介した実験の結果を考慮すると、圧縮破壊の可能性だけを示しているこのエネルギー法による結果には疑問が残る。図 5-4 と図 5-5 からわかるように特に空洞周辺の応力状態を見ると、空洞周辺の引張り応力が発生する領域は徐々に拡大し、幾何学的に不安定になっていく。岩盤は一般的に引張りに対して弱いと考えると、破壊領域の形を再現できていても、現実的ではないと考えられる。従って、図 5-1 の従来の弾塑性解析を山はね予測に適用した手法が優れていると考えても良い。この場合は破壊現象を物理的に解釈にする際には、引張りによって発生する領域では不連続面によって岩盤ブロックが形成されなければ空洞に落ちてくることが無いとして、圧縮破壊する領域は空洞に跳ねてくると解釈すべきである。この解釈が正しければ、URL における破壊領域の現われ方を説明することが可能となる。

表 5-1 URL での材料定数

弾性係数 E [GPa]	ポアソン比 ν	降伏関数のパラメータ	
		α	k [MPa]
3.00E+01	2.00E-01	2.71E-01	1.64E+01
密度 ρ [g/cm3]	内部摩擦角 ϕ [deg]	粘着力 c [MPa]	引張り強度 σ_t [MPa]
2.63E+00	4.50E+01	1.50E+01	3.00E+01

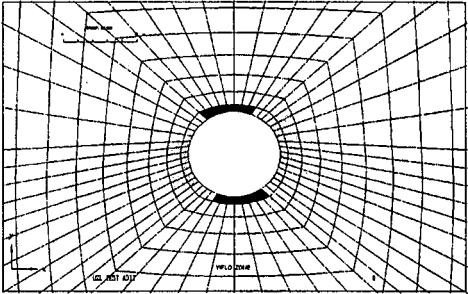


図 5-1 従来の弾塑性解析による結果

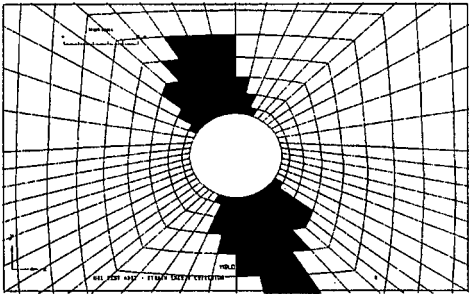


図 5-2 エネルギー法による結果

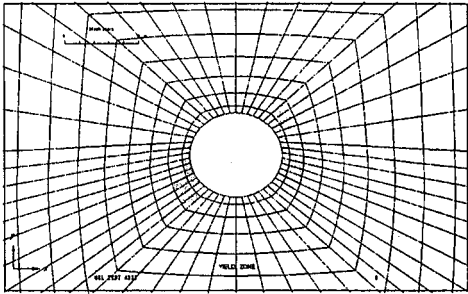


図 5-3 横伸びひずみ法による結果

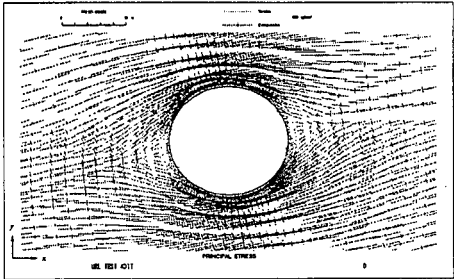


図 5-4 従来の弾塑性解析による主応力の分布

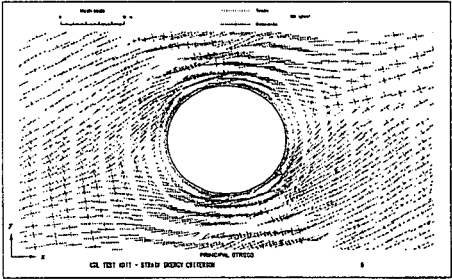


図 5-5 エネルギー法による主応力の分布

5.2 モンブラントンネルへの適用例

モンブラントンネルは、フランスとイタリアの間で建設された長さ 11.6km の道路トンネルである(Panet 1969)。トンネルの土かぶり は 5km にわたって 2000m 以上であり、主岩盤は花崗岩である。トンネルの寸法は高さ 10m、幅 7.6m である。初期応力測定結果より最大主応力の方向は鉛直方向である。使用した各材料定数を表 5-2 に示し、解析結果を以下に説明する。

モンブラントンネルにおける実際の剥離現象はトンネルの側壁で発生している。解析結果を見ると、図 5-6 に示したエネルギー法も現象をよく表現しているように見える。しかし、実験の結果を考慮するとモンブラントンネルでも図 5-7 の従来の弾塑性解析による解析結果が、山はね現象の予測手法として適していると考えられる。横伸びひずみ法による破壊領域は図 5-8 に示されたようにインバータにのみ見られる。

表 5-2 モンブラントンネルでの材料定数

E [GPa]	ν	α	k [MPa]
4.50E+01	2.00E-01	2.35E-01	2.96E+00
ρ [g/cm ³]	ϕ [deg]	c [MPa]	σ_c [MPa]
2.60E+00	5.00E+01	1.20E+00	5.00E-01

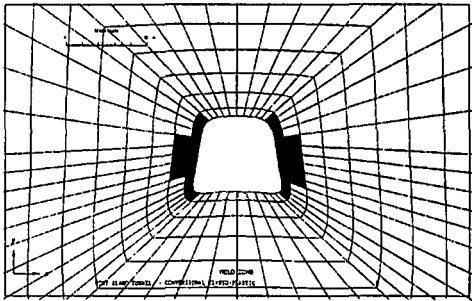


図 5-6 従来の弾塑性解析による結果

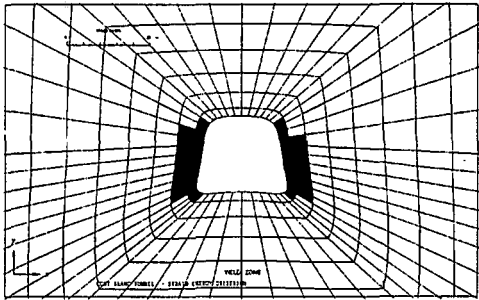


図 5-7 エネルギー法による結果

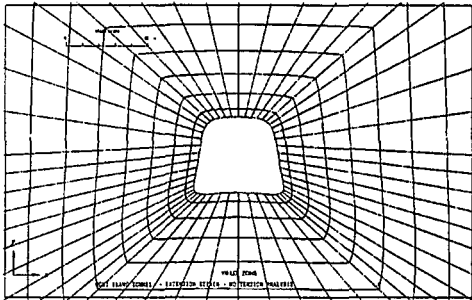


図 5-8 横伸びひずみ法による結果

6. まとめ

山はねの予測に関して、現場計測手法と数値解析手法を開発した。室内実験で岩石・岩盤は破壊する際に AE・電位・温度の変化が確認された。この中で電位による破壊予測の可能性がかなり高いと考えられ、実際の構造物の安定性を計測する際に実現性が高い新計測技術になり得ると思われる。また、山はねを解析的に予測するため各種解析手法を開発し、行った解析結果より、実際に観察される破壊領域の位置とその規模を従来の弾塑性解析とエネルギー法による解析手法で再現できることが可能になった。特に、応力場の性質を考慮に入れて破壊の発生を解釈すれば、従来の弾塑性解析手法が優れた山はね予測手法であることが明らかになった。

参考文献

Aydan, T. Akagi and T. Kawamoto (1993). Squeezing potential of rocks around tunnels; theory and prediction. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 26(2), 137-163

Jaeger J.G. and Cook N.G.W. (1979): Fundamentals of Rock Mechanics. 3rd Ed. *Chapman and Hall, London*.

Martin, C.D. (1992): The Underground Research Laboratory. *ISRM NEWS JOURNAL*. Vol. 1, No. 1, Page 4

Owen, D.R.J. & Hinton, E. (1980): Finite Elements in Plasticity: Theory and Practice. Pineridge Press Ltd, Swansea.

Panet, M. (1969): Quelques problèmes de mécanique des roches posés par le tunnel du Mont Blanc. *Bull. Liaison Labo. Routiers P. et Ch.* No. 42 – Déc. 1969 – Réf. 784

Stacey T.R. (1981): A simple extension strain criterion for fracture of brittle rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 18, 469-474