

# 「地下空洞における山はね現象を予測する数値解析手法の開発とその適用」

東海大学 海洋学部 大洞 光央

東海大学 海洋学部 宇山 旭

東海大学 海洋学部 正会員 アイダン・オメル

## 1. 研究目的と概要

本研究の目的は、トンネル施工時における山はね現象を予測するため、数値解析の新たな手法を開発し妥当性を検証することである。従来の山はね予測手法はほとんどが弾性解析に基づいている。最初に従来からある各種の解析手法を用いて弾性解析を行い、その結果を受けて非線形を考慮した横伸びひずみ法による解析を開発した。これと従来の弾塑性解析とノー・テンション解析とをカナダの URL 地下実験所における円形空洞の掘削に適用し、解析結果と実際のデータを比較し、検討する。

## 2. 解析手法

地下空洞における山はね現象を予測するには次に示す3つの手法がある。

①エネルギー法（ひずみエネルギー法、せん断ひずみエネルギー法）②横伸びひずみ法③弾脆性塑性法

これらの手法は弾性解析に基づいて行われる。カナダの URL 地下実験所における地下420mに掘られた円形空洞に①と②の手法を適用し、観察結果と比較する。空洞周辺に作用する最大初期応力は水平から約11度上に傾いて作用し、その値は約60MPaである。掘削断面に作用する最小初期応力の値は11MPaである。この初期応力状態下での弾性解析より空洞の天端と床に大きな圧縮応力と側壁に引張り応力が接線方向に作用すると推定される。

図-1に見られるように空洞の天端と床にくさびのような破壊領域が発生しているが、側壁に引張り亀裂の発生が確認されていない。図-2と図-3は我々が弾性範囲内での予備解析を行った結果のひずみエネルギーとせん断ひずみエネルギーのコンター図を示している。また図-4は計算された横伸びひずみコンター図を示す。これらの手法のなかで URL において観察された破壊領域に最も近い結果は、せん断ひずみエネルギー法で得られているがひずみエネルギー法と横伸びひずみ法でも同様な結

果が得られていると言えよう。

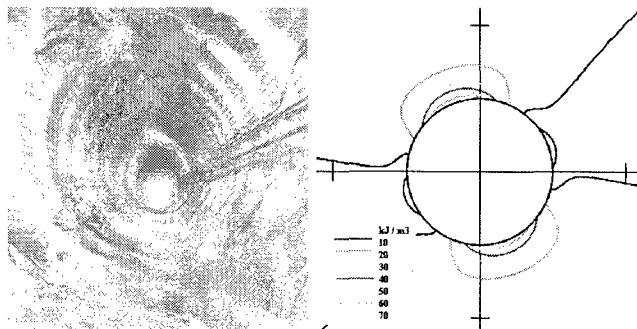


図-1

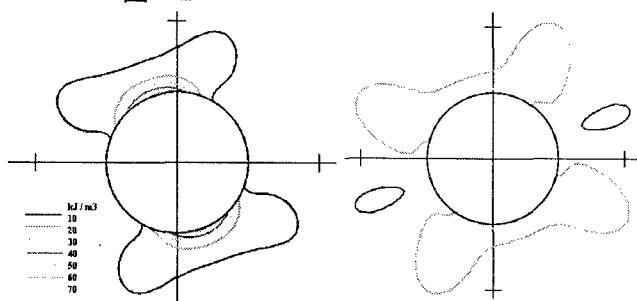


図-3

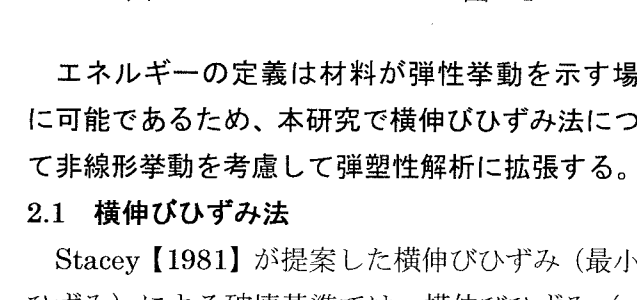


図-4

エネルギーの定義は材料が弾性挙動を示す場合に可能であるため、本研究で横伸びひずみ法について非線形挙動を考慮して弾塑性解析に拡張する。

### 2.1 横伸びひずみ法

Stacey【1981】が提案した横伸びひずみ（最小主ひずみ）による破壊基準では、横伸びひずみ（ $\epsilon_1$ ）の値が伸びひずみ（ $\epsilon_a$ ：最大圧縮主ひずみ）の値に対して線形的変化を超えたところで、縦方向に亀裂が発生すると考えられている。このことは地下空洞において薄利現象として現れる。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。

### 2.2 有限要素法による定式化

有限要素法による定式化は、静定場の運動量保存、変位・ひずみ関係および構成則に基づいて変分原理を適用し、有限要素法の空間的な離散化を導入して以下のように求められる

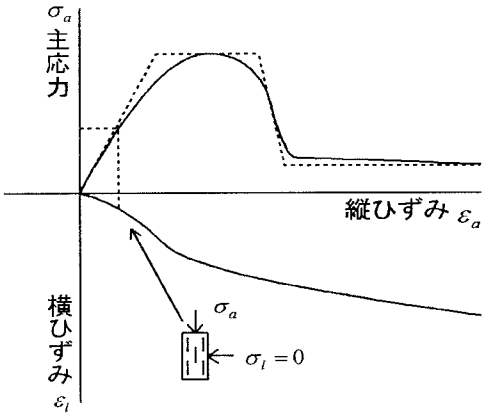


図-5 ひずみと応力の関係

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = \mathbf{0}$$
$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}$$
$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} \left( (\nabla \mathbf{u}) + (\nabla \mathbf{u})^T \right)$$
$$[\mathbf{K}] \{\mathbf{U}\} = \{\mathbf{F}\}$$
$$[\mathbf{K}] = \int_V [\mathbf{B}]^T [\mathbf{D}] [\mathbf{B}] d\mathbf{v}$$

ここに、

- σ：応力テンソル、b：物体力テンソル

D：ヤング率；ε：ひずみテンソル

u：変位 K：全体剛性行列

U：全体変位行列 F：全体荷重ベクトル

B：ひずみ節点変位行列
- 横伸びひずみ基準に基づく弾塑性有限要素法において次の4つの過程を設ける。
- 1) 主ひずみと主応力空間で降伏基準を導入する

2) 降伏の前後で主応力の方向が変化しない。

3) 横伸びひずみと平行な応力成分は降伏後に0とする。

4) 降伏前後応力テンソルの第一不変量は同じである。

弾塑性解析を実施する際に初期剛性法に基づいて反復解析を行う。

3. 解析結果と考察

この節で非線形を考慮した横伸びひずみ法による解析結果を紹介し、別に従来の弾塑性解析とノー・テンション解析による解析結果を比較・考察する。対象は同じくカナダの URL 地下実験所における円形空洞とする。解析に用いた材料定数を表-1に示す。従来の弾塑性解析より表-1に示した材料定数を利用する限り塑性域が発生しなかった。

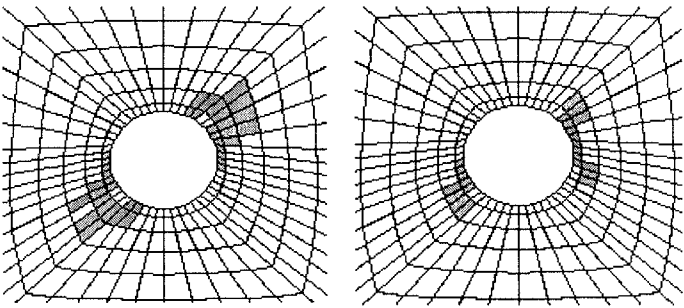


図-6 ノー・テンション解析による塑性域

図-7 横伸びひずみ解析による塑性域

| c<br>(MPa) | φ<br>(°) | σ <sub>t</sub><br>(MPa) | E<br>(GPa) | ν   | ε <sub>el</sub><br>(%) |
|------------|----------|-------------------------|------------|-----|------------------------|
| 22.3       | 48       | 11.8                    | 30         | 0.2 | 0.2                    |

岩盤の引張り強度がないとして行った弾塑性ノー・テンション解析の場合塑性域は最大初期応力方向に空洞の両側に現れた。一方、横伸びひずみ法による解析より得られた塑性域は図-4に示すような形状として得られた。この解析結果と図-1で示した実際に観察された破壊領域を比較した場合、解析結果は実際のものと一致していないことがわかる。したがって、今回開発した横伸びひずみ法についてまだ改良が必要であると思われる。また、図-3に示したせん断ひずみエネルギー法で得られた推定破壊領域は実測結果に良く似ているため、現在弾性挙動に基づいているこの手法で非線形性を考慮できるような工夫が必要である。どの解析手法にしても推定される引張り破壊が実際に発生していないかということについて現場で再検討する必要がある。著者らが行った模型実験で、同様な条件下で最大初期応力方向に引っ張り亀裂が発生することを実験的に確認している。

4. まとめ

現在のところ開発した解析手法より得られた結果を見る限り、得られた破壊領域は実際のものと異なっている。今後、横伸びひずみ法の改良すると共にせん断ひずみエネルギー法の非線形領域の拡張することが必要だと思われる。

参考文献

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