

写像解析に基づく岩盤空洞周辺の塑性領域の簡易推定法

蔣 宇静¹・江崎哲郎²

¹正会員 工博 九州大学助教授 工学部環境システム工学研究センター (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)

²正会員 工博 九州大学教授 工学部環境システム工学研究センター

著者らは、破壊後にひずみ軟化およびダイレタンシー挙動を呈する岩盤内に掘削した円形空洞の弾塑性挙動の理論解析法を提案してきている^{1)~3)}。本論文は、さらにそれを非円形断面の岩盤空洞に適用するための一簡易手法(写像解析推定法)を提案する。この方法は、複素関数論の等角写像展開原理に基づき、先に提案した円形空洞の理論解から、非円形空洞の周辺岩盤内の塑性領域の発生やその広がりを直接に推定することができ、また、複雑な弾塑性応力の解析過程が要らず、パソコン上でも迅速に解析できる特徴を有する。

Key Words : *non-circular underground openings, plastic zone, mapping method, strain-softening behavior*

1. はじめに

近年、産業社会の発展、都市化の促進などによって、地殻の開発、特にエネルギー施設、大断面トンネル、さらに地上空間の延長とした都市深部地下の開発利用が注目を集めている。その中で、空洞の深度、断面は大きくなり、岩盤条件の良好でない位置での建設の機会も増加の一途である。このような状況の中で、適切かつ安全な岩盤内構造物の建設を進めるためには、開削による地下空間の周辺岩盤の安定性を適切に評価できる解析方法の確立が重要な課題の一つとなっている。岩盤中に空洞が構築されると、その周辺には、集中応力が誘起されるため、地山の強度が比較的に小さい場合、周辺岩盤が塑性破壊を生じる。塑性領域の広がりを予め判断することは、支保工を事前設計評価する上で不可欠である。

岩盤空洞の塑性領域の評価に関する理論的研究としては、円形空洞を対象としたものが多く、弾性論や塑性論に基づいたいくつかの手法が提案されている^{4)~8)}。一方、非円形空洞に関しては、ひずみエネルギー論に基づいた楕円形空洞の安定解析⁹⁾や、境界要素-特性曲線結合法のような準解析的手法を用いた矩形空洞の解析¹⁰⁾などがあるが比較的に少ない。これは、幾何学的小および力学的境界条件のインプット面から言えば、円形に比べて空洞の断面形状が複雑なほど、解析過程が複雑となり、理論上完全に解けないこともあるためであろう。この場合、有限要素法等による数値解析を行えば、塑性領域などは容易に求めることができるが、解析には、岩盤挙動を正確に表現できる力学的モデルの定式化の困難さや、安定に影

響する各種要素の影響度を解明するのに相当に手間や費用がかかったり、計算機の容量などの面で制約を受けたりすることが指摘されている。

一方、現場の計測変位から、岩盤空洞の周辺に発生した塑性領域の大きさを逆に推定する方法も試みられている^{11)~13)}。それらは、計測変位から地山中の引張りひずみ分布^{11),12)}、または最大せん断ひずみ分布¹³⁾を逆解析し、それらを岩の限界ひずみと比較することによって、塑性領域を推定する。これらの方法は、工事中の空洞の安定状態を評価するには有用な知見を与えられるが、空洞掘削による塑性領域の事前推定は非常に困難であり、また、岩の限界ひずみの評価や、現場測定の配置と数の決定など、十分な配慮が必要であると思われる。

著者らは深部地下空洞の安定性評価と適切な支保設計を行うために、ピーク強度以降のひずみ軟化特性およびダイレタンシー特性を考慮した力学的モデルを提案し、円形空洞の弾塑性挙動の理論的解明を行ってきている^{1)~3)}。本論文はさらに、著者らが提案した円形空洞の理論解を非円形空洞の周辺岩盤に生じる塑性領域の事前推定に適用するアプローチを示すものである。この手法では、まず初期応力および岩盤材料の強度特性が同じ状態での単位円孔(半径が1である円形空洞を指す)の周りに生じる塑性領域を、先に提案した理論解析法によって求める。次に、それらを非円形空洞の孔縁形状を表す写像関数を用いて逆写像させることによって、非円形空洞の周辺岩盤に発生する塑性領域の規模を直接で近似に評価する。このように得られた塑性領域の規模は、近似的なものでありながら、有限要素法による数値解析結果

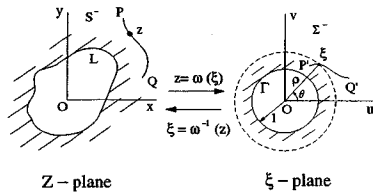


Fig.1 Mapping principle.

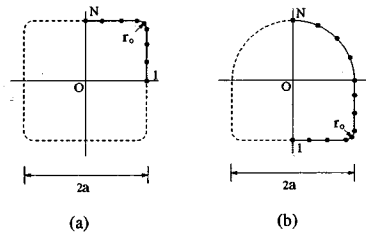


Fig.2 Cross-section boundary of opening.

との比較によって、よい一致性が検証された。

2. 等角写像展開法

(1) 基本原理

非円形孔のある平板内の弾性応力を求めるには、従来より、複素関数論における等角写像展開法が利用されてきた。また、破壊力学の分野においては、任意形状孔の近傍のき裂の応力拡大係数やき裂の干渉のような非線形問題を研究するにも、同法がよく取り上げられ、多数の研究結果が発表されている¹⁴⁾。

等角写像展開法¹⁵⁾は Fig.1 のように、次式に示す正則関数

$$z = \omega(\xi) \quad (1)$$

によって、 z -平面上の非円形孔境界 L を ξ -平面上の単位円 Γ に、また孔の外部領域 S^- を ξ -平面上の単位円の外部領域 Σ^- に写像する方法であり、それによって z -平面上の S^- 域における任意点 z が ξ -平面上の Σ^- 域における点 ξ に、また滑らかな曲線 PQ が別の滑らかな曲線 $P'Q'$ に完全に対応する。式 (1) 中の関数 $\omega(\xi)$ が S^- 域から Σ^- 域への単値等角写像を決定するため、等角写像関数とも呼ばれ、その逆写像関数 $\omega^{-1}(\xi)$ が存在する。

この方法を適用するに際して、孔の断面境界の形状を正しく表せる写像関数が重要であり、写像関数 $\omega(\xi)$ は、単位円の外側または円周上で点 ξ が、ただ1つの点 z を写像するように選ばなくてはならない。そのために、Schwarz-Christoffel 変換¹⁵⁾を用いる必要がある。

(2) 空洞境界の写像関数

地下岩盤空洞の断面形状は、特例を除いて、Fig.2 に示すように、楕円形や矩形のような2軸対称と馬蹄形のような1軸対称に分けられる。Schwarz-Christoffel の変換公式によれば、隅半径で直角部を丸めた矩形空洞をはじめ、2軸対称となる空洞の孔縁境界の写像関数 $\omega(\xi)$ は、級数展開形で表すと、次のようになる¹⁶⁾。

$$z = A_0(\alpha_0 \xi + \sum_{m=2}^M \alpha_{2m-3} \xi^{3-2m}) \quad (2)$$

また、 Y 軸に関する1軸対称の場合は、

$$z = A_0(\alpha_0 \xi + \sum_{m=1}^M \alpha_m \xi^{-m}) \quad (3)$$

ここに、 $z = x + iy$ 、 $\xi = \rho e^{i\theta}$ ($\rho \geq 1$)； (x, y) はデカルト直角座標系； (ρ, θ) は直角曲線座標系である。 $\rho = 1$ は z -平面上の孔縁境界、 $\rho > 0$ はその外部領域に対応することになる。また、 $A_0 = 2a$ (空洞の幅)； α_m ($m = 1, 2, \dots, M$) は空洞の孔縁形状によって決まる実定数； M は級数の打ち切り項数を表す。空洞の断面が円形の場合は、 $\alpha_m = 0$ ($m = 1, 2, \dots, M$) となり、楕円形の場合は、 $\alpha_m = 0$ ($m = 2, 3, \dots, M$) となる。

(3) 写像関数の係数の決定

式 (2) と (3) を展開し、両辺の実数部と虚数部をそれぞれ等置し、しかも $\rho = 1$ とすれば、デカルト座標系における空洞の孔縁境界の座標値 (x_i, y_i) を定義する以下に示す方程式組が得られる。

$$\left. \begin{aligned} x_i &= A_0 [\alpha_0 \cos \theta_i + \sum_{m=1}^M \alpha_m \cos(m\theta_i)] \\ y_i &= A_0 [\alpha_0 \sin \theta_i - \sum_{m=1}^M \alpha_m \sin(m\theta_i)] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$(i = 1, 2, \dots, N)$

ただし、係数 α_m は2軸対称の場合において、 m が偶数であればゼロとなる。係数 α_m は、実際の空洞の孔縁境界に若干の点 i ($i = 1, 2, \dots, N$) を選び、式 (4) で定義される曲線がこれら一連の点を通過するように決定される。式 (4) において、 N 個の選点に対し N 対の方程式組 (4) が得られるが、Fig.2 に示すように、図形の対称性から、2軸対称の場合は空洞境界の1/4範囲内で $\theta_1 = 0$ 、 $\theta_N = \pi/2$ 、また1軸対称の場合は、空洞境界の1/2範囲内に $\theta_1 = -\pi/2$ 、 $\theta_N = \pi/2$ であることが分かる。従って、方程式組 (4) は $\alpha_1 \sim \alpha_M$ および $\theta_2 \sim \theta_{N-1}$ を未知数とする連立方程式組であり、それを解くに際しては、 $N > M$ となるように選点すれば、最小二乗法によって、実際の空洞形状を精度よく表せる係数が決定できる。

3. 円形空洞の弾塑性解

ここに、先に提案した円形空洞に関する弾塑性理論解

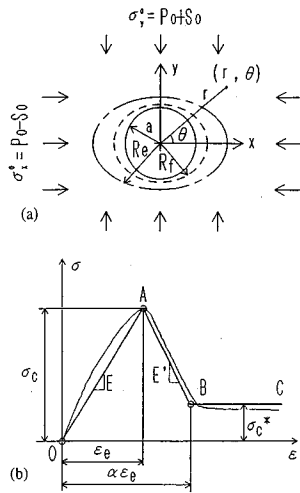


Fig.3 The problem of a circular opening under non-hydrostatic condition.

の概要を述べておく。

Fig.3 に示すような 2 軸応力状態における円形空洞の弾塑性問題については、従来より多数検討されてきたが、その主要成果である塑性領域の規模を表わす塑性半径は、高次式であり、数値的にしか解けないため、それらを直接写像変換させることは不可能である。著者らは同じ問題に対し、塑性論と複素関数論に基づいた一般的な解析解を導いている³⁾。

周辺岩盤が、ピーク強度以降にひずみ軟化およびダイレタンシー挙動を呈するとし、応力-ひずみ関係としては、ひずみ軟化挙動を、ピーク強度 σ_c 、残留強度 σ_c^* とぜい性率 α によって評価する。そして、ピーク強度 σ_c から残留強度 σ_c^* まで、ひずみとともに強度が線形的に減少していくと仮定する。ぜい性率 α は、塑性流動状態に入る直前の軸ひずみとピーク強度に対する軸ひずみの比によって表されるが、 $\alpha=0$ は完全弾ぜい性モデルを、また、 $\alpha \rightarrow \infty$ は完全弾塑性モデルを意味する。岩盤材料の強度特性は、Mohr-Coulomb の破壊規準に従うものとする。ただし、残留強度は、その場の応力状態における内部粘着力と内部摩擦角で定められるものとする。また、岩盤が破壊後体積膨張(ダイレーション)を起こすとする。塑性ポアソン比(最小主ひずみの塑性成分と最大主ひずみの塑性成分との比と定義される)は、Mohr-Coulomb の降伏関数を塑性ポテンシャル関数として塑性流れ則に従えば、ダイレタンシー角 ϕ^* との関係を求めることができる。

初期地山応力状態は、Fig.3 に示すように、 x 方向と y 方向の初期地山応力成分をそれぞれ P_0 と S_0 に分解する。ただし、 P_0 は静水圧に相当し、 S_0 は初期応力の偏差部分である。解析では、岩盤の自重が無視される。

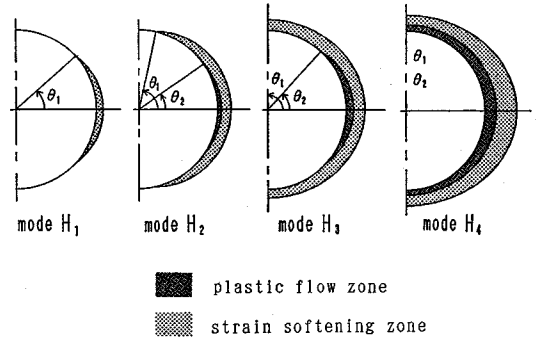


Fig.4 Classification of the failure modes around an unsupported opening.

Table 1 Classification of the failure modes.

モード	塑性半径 ($\theta = 0$ 上)	塑性角	塑性破壊モードの特徴
H_1	$R_e \geq a > R_f$	$0 \leq \theta_1 < 90^\circ$	内空壁面が部分的に塑性化され、周辺には、ひずみ軟化領域のみが、最小地山応力方向に進展する。
H_2	$R_e > R_f \geq a$	$\theta_2 < \theta_1 < 90^\circ$	内空壁面が部分的に塑性化されるが、最小地山応力方向に直交する壁面には塑性流動破壊が発生する。
H_3	$R_e > R_f > a$	$\theta_2 < \theta_1 = 90^\circ$	壁面全面が塑性化される。塑性流動域が、最小地山応力方向に部分的に深部に広がっていく。
H_4	$R_e > R_f > a$	$\theta_2 = \theta_1 = 90^\circ$	空洞が塑性流動とひずみ軟化域に囲まれる。最小主応力の方向に塑性域がより深いところに進展する。

先に述べた応力-ひずみの定式化に基づく、空洞の周辺岩盤には、塑性流動領域、ひずみ軟化領域と弾性領域が生じられる。また、空洞の内空壁面が完全に塑性化されるかまたは部分的に塑性化されることや塑性流動領域の有無を考慮すれば、Fig.4 に示すような4つの塑性破壊モード($H_1 \sim H_4$)が考えられる。各々の塑性破壊モードが塑性半径(R_e, R_f)と塑性角($\theta_1, \theta_2; 0 \leq \theta_2 \leq \theta_1 \leq 90^\circ$)によって定義される。Table 1 には、各塑性破壊モードの定義とその特徴を示してある。弾塑性境界の円周上の境界角 θ_1 と塑性流動領域の円周上の境界角 θ_2 の決定方法は文献3)に詳述している。2つの塑性半径の解析式をまとめて示すと以下のようなになる。

(1) $0 \leq \theta \leq \theta_2$ の範囲

この範囲では、空洞の内空壁面が塑性流動を生じるため、2つの塑性半径が次のようになる。

$$R_e = \left(\frac{D_1 + D_2 \xi^{1-K_2}}{\sigma_c^2 / (K_p - 1)} \right)^{\frac{1}{K_p - 1}} \quad (5)$$

$$R_f = \zeta R_e$$

上式中、 R_e は弾塑性境界の半径、 R_f は塑性流動領域の半径、 ζ は2つの塑性半径の比(R_e/R_f)である。

(2) $\theta_2 \leq \theta \leq \theta_1$ の範囲

内空壁面が塑性流動を発生せず、ひずみ軟化状態にあ

るため、 $R_f < a$ となり、 R_e が次の方程式を満足するように求められる。

$$F(R_e) = F_1 - D_1 R_e^{1-K_p} = 0 \quad (6)$$

ただし、 K_p は内部摩擦角による強度係数で、パラメータ D_1 、 D_2 、 F_1 は力学的物性値による係数である^{1),2)}。

(3) $\theta_1 \leq \theta \leq 90^\circ$ の範囲

この範囲では、内空壁面が塑性破壊を発生せず、弾性状態にある。

4. 写像解析に基づく塑性領域の推定法

等角写像展開原理は、 z -平面上の非円形孔境界およびその外部領域を ξ -平面上の単位円およびその外部領域に写像するのに用いられる。ここに示す写像解析に基づく塑性領域の推定法は、空洞孔縁の写像関数 $\omega(\xi)$ と関係付ける逆写像関数 $\omega_1^{-1}(\xi)$ を用いることにより、 ξ -平面上の単位円孔周辺に生じる弾塑性境界 $\Gamma(R_e)$ を、同じ初期応力を受ける z -平面上の任意形空洞孔縁の外部に等角変換させる方法である。 $\omega_1^{-1}(\xi)$ は正則関数である。写像関数 $z = \omega(\xi)$ は正則関数であるため、その逆問題、すなわち、 ξ -平面上の領域を z -平面上に逆写像することももちろん可能である。さて、 z -平面上に、 ξ -平面上と同じ原点を持つように空洞孔縁と塑性領域の境界面を同時に写像するために、両写像関数の間には近似的に次式のような関係がある¹⁷⁾。

$$\omega_1(\xi) \doteq G_c R(\xi) \omega(\xi); R(\xi) = \{R_e, R_f\} \quad (7)$$

ここで、 G_c は地山の力学特性値による正の係数である。塑性領域の境界線の写像関数 $\omega_1(\xi)$ が $\omega(\xi)$ と同じ形を近似的に持つと考えられる。

さて、任意形空洞のまわりの塑性領域を写像解析的に推定する具体的な手順を以下に説明する (Fig.5 参照)。

1) 与えられた地山条件での単位円孔の弾塑性解析を行い、塑性領域が発生するかどうかを判定する。塑性領域が発生する場合、式 (5) と (6) により、各計算角 θ に対する塑性半径 R_e 、 R_f を計算する。

2) 非円形空洞の孔縁境界の写像関数を式 (2)~(4) によって求める。

3) 2つの塑性領域の境界を、写像関数 $\omega_1(\xi)$ を用いて、同平面上の非円形空洞周りに写像する。つまり塑性半径 R_e 、 R_f を式 (4) の A_0 に置き換えて座標値 (x_i, y_i) を計算する。なお、係数 $\alpha_m (m=0, 1, \dots, M)$ は非円形空洞の孔縁境界の写像関数の係数を用いる。

4) 計算角 θ に対して求めた座標値 (x_i, y_i) を順番につなげば、非円形空洞周りに生じる塑性領域の境界線となる。

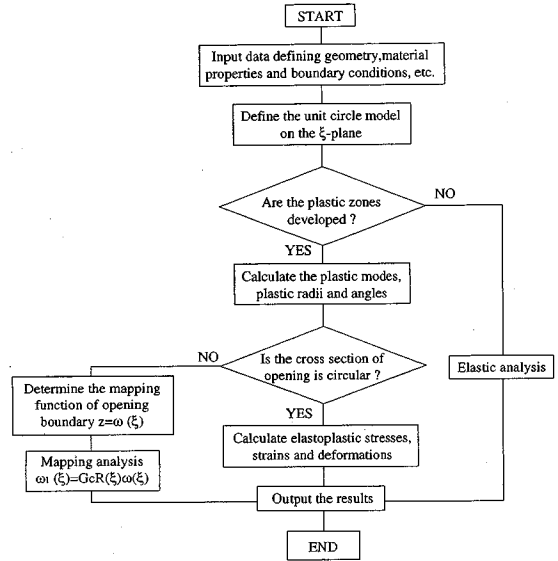


Fig.5 Flow chart for mapping analysis method.

5. FEM 数値解析による検証と考察

(1) はじめに

空洞壁面付近の応力の集中度や方向は、空洞の断面形状に大いに影響されるものである。また、式 (7) に現れた係数 G_c は、弾塑性境界面において必ずしも一定でないため、塑性領域の広がりや、空洞孔縁境界の写像関数と同じスケールで深部に延びていくわけではない。ここで簡便のために、係数 G_c を 1 とし、円形、正方形、長方形および馬蹄形、という 4 種類の典型的な断面形状について写像解析を行い、FEM (有限要素法) 弾塑性解析との比較により、その妥当性を確認する。解析プログラムは MARC/MENTAT を使用し、4 節点アイソパラメトリック要素でモデル化した。破壊規準としては線形モール・クーロンの破壊基準を用いた。

岩盤の物性値は、ヤング率 $E=1.5$ GPa、ポアソン比 $\mu=0.25$ 、圧縮強度 $\sigma=0.5$ MPa、内部摩擦角 $\phi=30^\circ$ 、ダイレタンシー角 $\phi^*=20^\circ$ とし、また、岩盤は弾性完全塑性体と仮定している。初期応力の荷重状態は、静水圧状態 ($P_0=1.0$ MPa, $S_0=0.0$ MPa) と非静水圧状態 (側圧係数 $k=0.5$, すなわち、 $P_0=0.75$ MPa, $S_0=0.25$ MPa) に分けた。塑性領域の範囲は等価塑性ひずみコンター分布によって定められた。

(2) 解析結果の考察

Fig.6 は、両解析手法による解析結果の対比図で、実線は写像解析による推定結果、点線は FEM による計算結果、また、対称軸の左に静水圧状態を、右に側圧係数が $k=0.5$ の場合の弾塑性境界線をそれぞれ示してある。

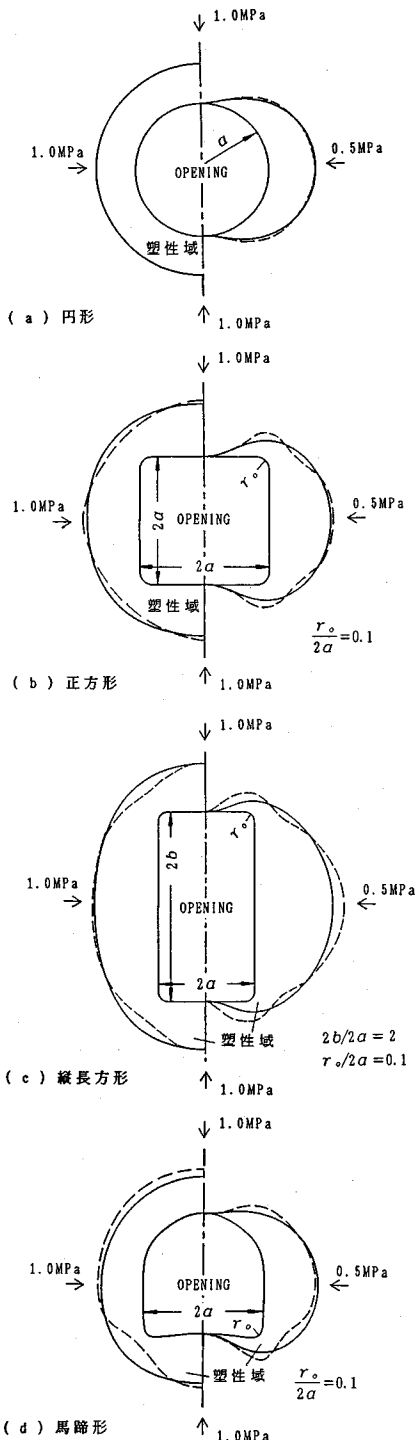


Fig.6 Comparisons of the plastic areas analyzed by the mapping analysis method(solid lines) and FEM(broken lines).

円形空洞を見てみると塑性境界に関する本手法の結果は、FEMの解析結果とよく一致していることが分かる。他方、空洞の断面形状が正方形の場合は、隅角半径比

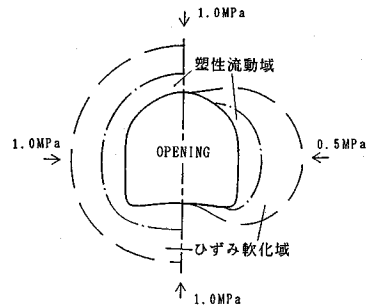


Fig.7 Application of the proposed method to the strain-softening model.

($r_o/2a$)を0.1とした。解析結果の比較は Fig.6 (b) に示すように、隅角部では、応力の方向や大きさが急に变化するため、写像解析法による推定結果と、FEMの解析結果の間には幾分差異が見られているが、全体的にはほぼ一致していることが分かる。

また、縦長長方形断面の場合は、縦方向と横方向の形状比(空洞の高さ $2b/$ 幅 $2a$)を2とし、隅角半径比を0.1と仮定した。正方形の場合と比較すれば、縦横の形状比が倍に拡大したため、空洞壁面の中央部では両者の差異がやや大きくなり、非静水圧状態において、両者の誤差が一部8%に達したが、他はほぼ5%以内に収まっている (Fig.6 (c))。

さらに、馬蹄形断面の場合は、静水圧状態においては、空洞の上半部に発生する塑性領域が若干小さく写像されている。これは、入力簡略化のため、FEM解析モデルでは空洞の上半部を半円形、下半部を横長方形と近似して、孔縁境界を入力したので、写像された実線の馬蹄形状と多少異なっているためと考える (Fig.6 (d))。

以上の比較により、写像解析推定法は、FEM解析結果とよい一致性を示し、岩盤空洞の周辺に発生する塑性領域の大きさを比較的精度よく、しかも簡便に評価できることが確認された。

(3) ひずみ軟化モデルへの適用

以上は、弾性完全塑性モデルについて、比較的解析を行って、よい一致性が分かったが、つぎにひずみ軟化モデルへの適用性を考察する。

Fig.7は、Fig.6 (d)と同じ初期応力条件で、ひずみ軟化モデル(残留強度比 $\sigma_s^*/\sigma_c=0.6$ 、ぜい性率 $\alpha=2$)を用いて写像解析した例である。破線は弾塑性境界を、一点鎖線は塑性流動領域の境界を表している。最小主応力に垂直な空洞の両側壁において塑性流動領域が発生した。Fig.6 (d)と比較してみると、空洞まわりの塑性領域の規模は、周辺地山が破壊後のひずみ軟化挙動に支配され、その結果、塑性領域が広がり、その中にひずみ軟化領域と塑性流動領域が含まれている。

6. おわりに

掘削による空洞周辺地山の塑性破壊の判断およびその広がり の 解明は、地下空洞の位置、支保工荷重と覆工厚さ、ロックボルトを事前設計する上で非常に重要である。本研究は非円形地下空洞の安定評価を行うための1つの簡易手法として、写像解析法を提案した。その特徴は、複素関数論における等角写像展開法に基づき、空洞孔縁境界の写像関数さえ求めれば、その周辺地山の塑性領域の広がりを単位円孔の理論解より直接に逆写像解析することにより評価することができるものである。

この手法を用いて解析した結果を、FEMによる数値シミュレーションと比較検証したところ、空洞孔縁の隅角のところで弾塑性解析法の結果とは幾分異なるが、全体は両者がよく一致しており、空洞安定性を精度よく評価できることが判明された。また、この手法は、完全弾塑性モデルにのみならず、ひずみ軟化弾塑性モデルにも適用することができた。

本手法は、煩雑な弾塑性解析が要らず、一般のパソコン上でも簡便に実行できる特徴を有するため、実用性が大きいと考える。本論文は、Fig.4に示した4つの塑性領域モードが発生する場合についてのみその結果を示したが、初期地山の応力状態によってはそれ以外の塑性モードの発生が考えられるので、そのような場合への適用や、種々の断面形状の空洞を取り巻く塑性領域境界の写像関数をより正しく求めることによって、塑性領域の写像精度を上げることは今後の課題としたい。

参考文献

- 1) Esaki T. and Jiang Y.J. : Stability analysis of a deep tunnel with the elasto-plastic strain softening behavior, *Proc. 7th Int. Conf. on Computer Method and Advances in Geomechanics*, pp.1467-1472, 1991.
- 2) 蔣宇静, 江崎哲郎, 横田康行 : 軟岩トンネル周辺岩盤安定機構とその設計について, 土木学会トンネル工学研究発表会論文報告集, Vol. 3, pp.17-24, 1993.
- 3) 江崎哲郎, 蔣宇静 : ひずみ軟化およびダイレタンシー特性を考慮した非静水圧状態における空洞周りの岩盤挙動

の解析法, 土木学会論文集, 第481号/III-25, pp.41-48, 1993.

- 4) Kastner, H. : トンネルの力学, 森北出版, 1974.
- 5) Einstein, H. and Schwartz, W. : *Simplified analysis for tunnel supports*, ASCE, 1979.
- 6) Egger, P. : 海峡連絡鉄道の技術に関する文献資料調査報告書, 日本トンネル技術協会, 1979.
- 7) Brown, T. and Bray, J.W. : Ground curves for rock tunnels, *J. Geotech. Eng. Div.*, ASCE, Vol.109, No.1, pp.15-39, 1983.
- 8) Detournay, E. and Fairhurst, C. : Two-dimensional elasto-plastic analysis of a long, cylindrical cavity under non-hydrostatic loading, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol.24, No.4, pp.197-211, 1987.
- 9) 杉本三隆, 松本嘉司, 金沢芳信 : エネルギー論に基づく楕円トンネルの安定解析, 土木学会論文集, 第424号/III-14, pp.197-205, 1990.
- 10) 青木俊朗, 菅原勝彦 : 2軸応力下の接続円形空洞および単設矩形空洞の弾塑性解析, 資源, 素材学会誌, No. 7, pp.511-516, 1989.
- 11) Stacey, T.R. : A simple extension strain criterion for fracture of brittle rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.18, pp.469-474, 1981.
- 12) Waldeck, H.G. : The design and support of large underground chambers at depth in gold mines of the Gold Fields Group of South Africa, *Proc. 4th Int. Congr. ISRM, Montreux*, Vol.1, pp.565-571, 1979.
- 13) 桜井他 : 計測変位に基づく地下空洞周辺地山に発生する塑性領域の推定法, 土木学会論文集, 第394号/III-9, pp.89-96, 1988.
- 14) 例えば, 北川英夫, 結城良治 : 二次元応力状態における分岐き裂の応力拡大係数, 日本機械学会論文集, 41-346, pp.1641-1649, 1975.
- 15) Timoshenko S. and Goodier, J.N. : *Theory of Elasticity*, McGRAW Hill, New York, 1951.
- 16) S.R. Heller, Jr., et al. : The stresses around a rectangular opening with rounded corners in a uniformly loaded plate, *Proc. 3rd US. Natl. Cong. Appl. Mech.*, pp.357-368, 1958.
- 17) 蔣宇静 : 深部地下空洞の力学的安定に関する理論的および実験的研究, 九州大学学位論文, 1993.
- 18) Derski, W., et al. : *Rock and soil mechanics*, PWN, Warsaw, 1989.

(1994. 8. 1 受付)

A MAPPING METHOD FOR THE PREDICTION OF PLASTIC ZONE AROUND NON-CIRCULAR UNDERGROUND OPENINGS

Yujing JIANG and Tetsuro ESAKI

To predict the plastic zone around non-circular cross-section openings under biaxial stress field usually one has to use a numerical analysis method such as FEM (finite element method), etc. As a simple and convenient method, the mapping method used to evaluate the plastic zone around the non-circular openings is put forward in this paper, based on the principle of mapping function method and the theoretical solutions for the circular opening with the advantage of considering the strain softening and volume dilation after rock failure (Esaki, T., et al., 1993). Computer simulations of the plastic zones using the FEM are carried out in order to prove this proposed mapping method. The method can be applied to not only the perfectly elasto-plastic model but also the strain softening model. With the advantage of avoiding the complicated elasto-plastic analysis and being used on a personal computer, this method is very useful.