

(55) 弾性・塑性の領域接合によるゆるみ域解析

熊本大学 菅原 勝彦

青木 俊朗

○東電設計㈱ 鈴木 正康

1. 緒言

2次元BEMと特性曲線法を結合させた弾塑性解析方法を提案し、地下空洞問題への適用例を示す。空洞まわりの弾塑性応力場の解析には種々の方法がすでに提案されている。最も一般的な方法はFEMである。FEMでは全領域が一度に解析され、各要素が構成則に従った挙動をするように工夫されている。これを全領域型の解析法と呼ぶならば、ここに提案する方法は2領域型の解析法である。

本方法では、解析領域が弾性域と塑性域の2領域に分割され、各領域は互いに独立して解析され、両者の境界条件が満たされるように弾塑性境界形状が改良される。

2. 解析方法

岩盤を均一等方の弾塑性体とし、解析領域を空洞壁面に接して生じる(受働)塑性域とこれを囲む弾性域に分割する。塑性域では、等方塑性理論に従い、塑性ポテンシャルは応力空間の降伏曲面に等しく、塑性ひずみ増分に関する応力増分は降伏曲面に垂直なるもののみであり、応力と塑性ひずみ増分の主軸は一致すると仮定する。また、応力は平衡方程式と降伏条件式により規定される。塑性域の応力と変形は特性曲線法(文献2)を応用して差分形式で解かれる。一方、弾性域は2次元BEM(文献1)によって解析される。

弾塑性境界では、境界面の表面力が連続させられ、境界の応力状態が、丁度、降伏条件を満たし、境界を除く弾性域の応力状態が降伏条件を満たすことがないように、弾塑性境界形状が改良される。このための解析手順はつぎのようである。

第1ステップとして、全領域を弾性体とした解析が行なわれる。これより壁面の応力状態が求められ、応力状態が降伏条件を超える壁面区間が定められる。続いて、降伏条件を超える応力状態を示した壁面区間の壁面表面力を境界条件とした塑性応力解析が行なわれ、塑性域が生じた場合の塑性応力場が定められる。次に、第2ステップとして、この塑性域中に弾塑性境界面が仮定される。仮定された弾塑性境界面の表面力が塑性応力場から求められ、これを境界条件とした弾性域の応力解析が繰り返し行なわれる。つまり、境界面の弾性応力状態が、丁度、降伏条件を満たす弾塑性境界面が見出されるまで、境界面は改良修正される。ただし、弾塑性境界面は拡大修正される。すなわち、はじめに弾塑性境界面は壁面に近い方に仮定され、少しずつ壁面から遠ざかるように修正される。

3. 解析モデルの特徴

弾性域と塑性域の境界はBEM要素によって表現される。この境界面は上述した条件が満たされるように改良修正される訳であるが、この修正の便を考えて要素数は一定とする。また、要素は一定要素とし、その中心を節点、両端を測点と名付ける。このとき、弾塑性境界面は図1(a)に示すように測点を直線で結んで与えられる。さらに、境界線を修正するとき測点 j は空洞壁面に垂直な測線 j 上を移動することにする。言い換えると、各々の測線上には境界面の修正によって測点が1つずつ追加されていくことになる。本解析ではすべての測点が記憶され、正しい弾塑性境界が得られた後の変位場の解析に利用される。

4. 弾性域の解析

いま、弾塑性境界面の表面力を (p_i) (i は要素番号)とすると、弾性域の挙動は図1の(b)と(c)の解を重ね合わせて求められる。(b)は初期応力場にある無限弾性体であり、弾塑性境界には初期応力と同等の表面力 (p_0) が作用している。(c)は空洞開削による変化を表現し、無限遠では無応力であり、境界面には $(-p_0 + p_i)$ の表面力が作用している。両者を加えると、無限遠で初期応力状態、境界面で (p_i) の表面力となり、目的とする弾性解(a)を与える。したがって、弾塑性境界の形と表面力 (p_i) が与えられると、弾性域の変位場、応力場が求まり、境界面の弾性応力状態も完全に定まる。この弾性応力状態が降伏条件を超えていれば、境界面が拡大修正されて、新しい弾性域に対して弾性応力が再び解析される。そして、すべての境界面で弾性応力が降伏条件に相等しくなったとき、正しい弾塑性境界が定まったとする訳である。

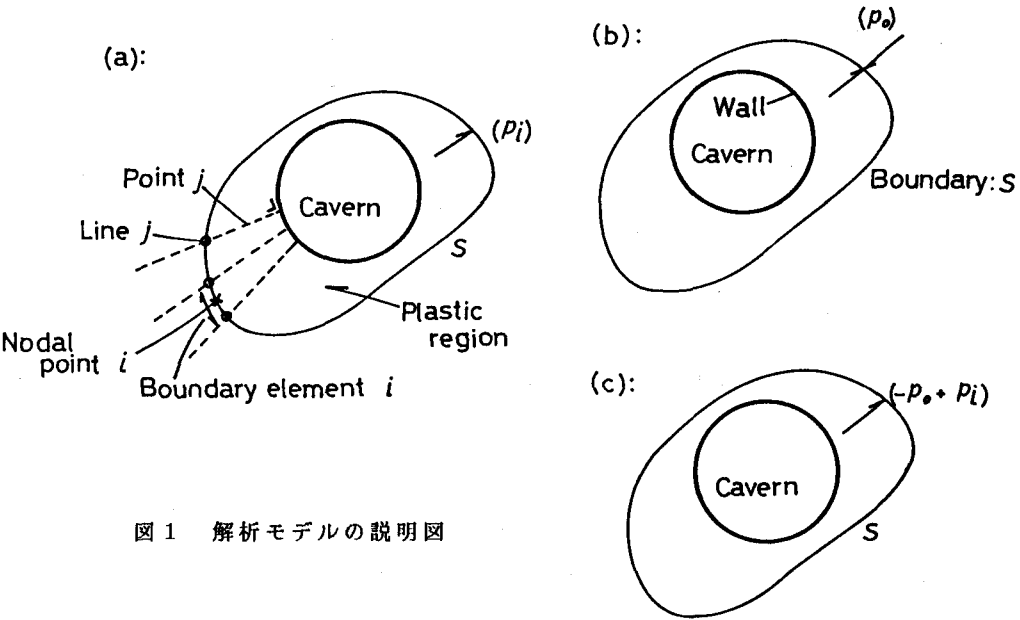


図1 解析モデルの説明図

5. 塑性域の解析

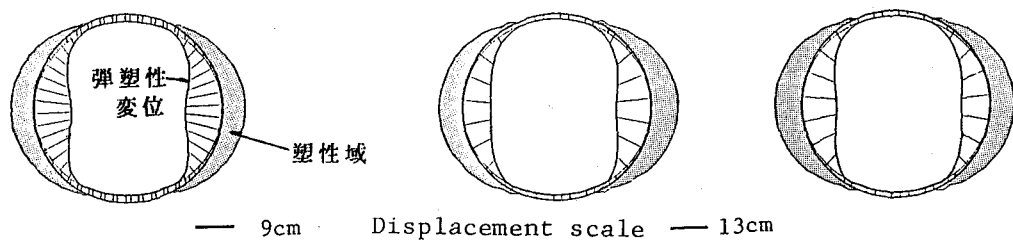
塑性域の解析は、壁面に作用する表面力を境界条件として実施される。無限遠から地圧が作用している場合の空洞塑性場は受働形式であり、壁面接線方向の直応力が最大圧縮応力となって塑性域が発生する。この解析の方法は文献2に詳しいが、塑性域岩盤の重量の効果、間隙水の効果、塑性変形に伴うひずみ硬化あるいは軟化の効果なども考慮に入れることができる。

6. 解析例と考察

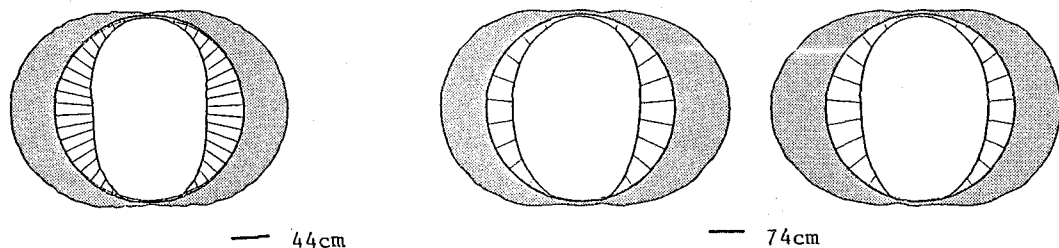
解析に用いた物性値は表1のようであり、解析例を図2および図3に示す。これらの図では塑性域は色塗られており、壁面の変形が太線で示されている。なお、比較のため細線で完全弾性解を示した。

表1 解析に用いた物性値

重量	: 単位体積重量	2.6 g/cm ³
弾性	: ヤング率	10×10 ⁴ kg/cm ²
	ポアソン比	0.20
降伏条件	: クーロンモールの式	
	粘着力	20 kg/cm ²
	内部摩擦角	40 度



(a) 地山強度比1.16の場合の弾塑性応答(左図: 単一空洞、右図: 双設空洞)



(b) 地山強度比2.33の場合の弾塑性応答(左図: 単一空洞、右図: 双設空洞)

図2 円形空洞の弾塑性応答(空洞直径20m、双設時の間隔16m、側圧係数0.5)

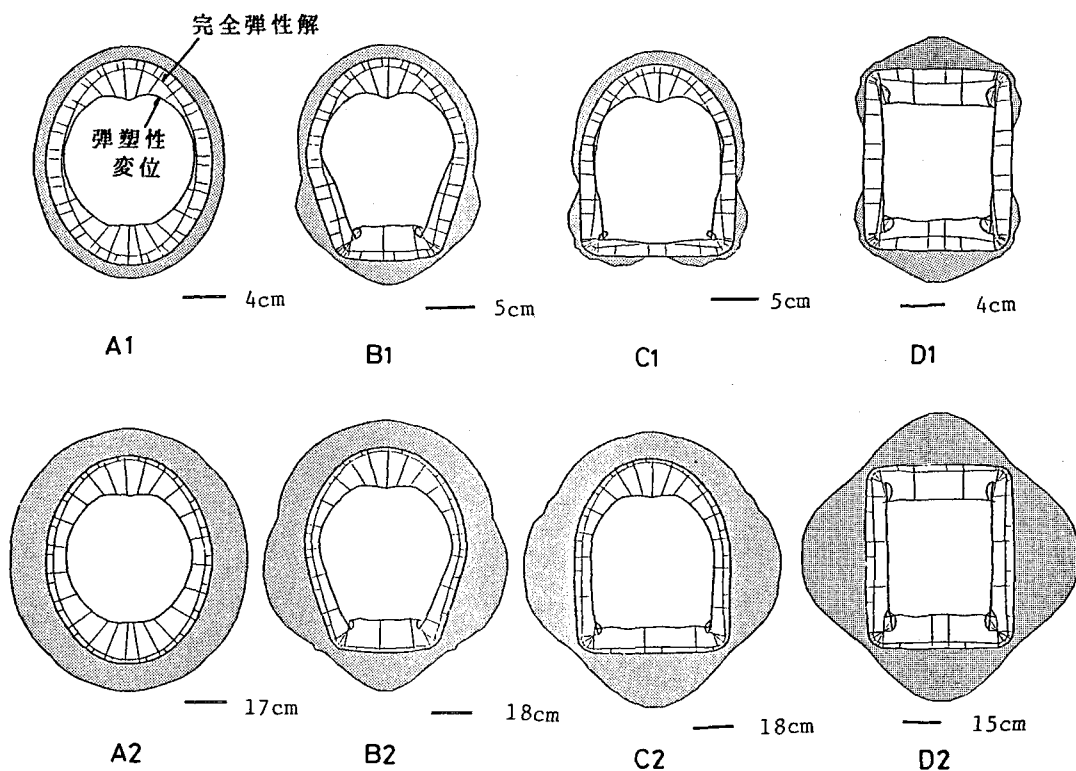


図3 空洞形状と塑性域の関係 (空洞断面積 393m^2 、縦横比0.8、側圧係数1.0、ケース記号の添字1は地山強度比1.0の場合を、添字2は地山強度比2.0の場合を示す。)

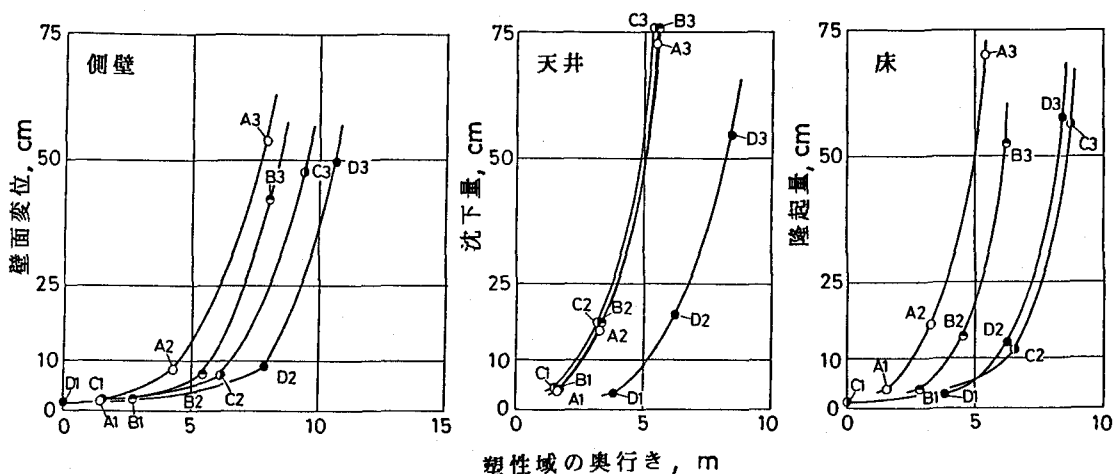


図4 塑性域の奥行きと壁面変位の関係(図中のA～Dは図3の解析ケースを示す。)

図2は、直径20mの円形空洞およびその双設ケース(間隔16m)の解析例である。側圧係数は1/2であり、地山強度比(被り重量圧/圧縮強度)が1.16と2.33の2例である。どの例も左右に塑性域が広がり、変形も左右に大きい。双設による塑性域の拡大と変形の増大がみとめられる。天井は地山強度比1.16のとき塑性せず、2.33のときわずかに塑性する。

図3は、断面積393m²に統一された4通りの空洞を示している。どの空洞も横幅/高さ=0.8である。側圧係数は1.0(静水圧)であり、地山強度比が1.0と2.0の2通りを比較して示した。ケースAの楕円空洞の塑性域はほぼ均一な奥行きで生じるが、変形は天井と床に大きい。ケースBとケースCの馬蹄型空洞の塑性域と壁面変位はそれぞれ大きさに差が少ない。ケースDの矩形空洞では、地山強度比1.0のとき天井と床に塑性域が生じるが、側壁は塑性化しない、しかし、地山強度比2.0では他のケースよりも塑性域が広い。

側壁の塑性域の最大奥行きと壁面変位の関係、天井の塑性域の奥行きと沈下量の関係、および、床の塑性域の奥行きと隆起量の関係を図4に示した。塑性域がある程度拡大すると変形が急増すること、また、塑性域の奥行きと変形の関係は壁面の曲率半径に強く依存することが読みとれる。ケースDの矩形空洞では塑性域が拡大しても相対的に変形が少ない。これは矩形空洞が有利であることを示しているのではない。変形がある限度を越えた場合に、ロックボルトなどの緊結工法の要処理領域が広すぎて、ケースAの楕円空洞に比べて不利であることを示している。

7. 結言

境界要素法と特性曲線法の結合による2領域型の弾塑性解析法を提案し、基本仮定、解析方法、解析手順、および解析モデルの概要を述べ、いくつかの解析例から、空洞まわりの塑性域形状の特徴、および塑性域の奥行きと壁面変位の関係を明らかにし、本解析法の有効性を論じた。なお、本解析法では塑性域の降伏条件と弾性境界の降伏判定条件を別々に与えることができるので、硬化弾塑性、軟化弾塑性の解析も安易である。

参考文献

- 1) たとえば、田中正隆、田中喜久昭著：境界要素法—基礎と応用、丸善、1982。
- 2) たとえば、最上武雄編著：土質力学、技報堂、1969。
あるいは、R. ヒル著、鷲津久一郎他共訳：塑性学、培風館、1950。

(55) A Coupled Boundary Element-Characteristics Method
for Elasto-plastic Analysis of Rock Cavern

by Katsuhiko SUGAWARA, Toshiro AOKI,
Kumamoto University, Kumamoto,
and Masayasu SUZUKI,
Tokyo Electric Power Services, Tokyo.

Abstract:

A new method is presented by jointing two existing methods, a boundary element method (BEM) for elasticity and a characteristics method for plasticity. An efficient scheme is presented and discussed, as well as its successful application to rock cavern having various types of shape. It is concluded that this coupling model is effective to analyze the details of the failure zone, which is of fundamental importance for the construction of rock cavern.

In the present method, the analytical region is divided into a plastic region on the wall and an infinite elastic region. As a matter of course, on the boundary between the two regions, the surface traction and the displacement should be continuous. In the elastic region, the stress must satisfy the yield condition only on the boundary. In order to obtain the elasto-plastic solution the following scheme is presented. The elastic stress state on the wall is firstly analyzed by the two-dimensional BEM of constant element, and the range where the stress state exceeds the yield condition is selected as the initial boundary for the successive plastic analysis with the characteristics method. Within the plastic region analyzed, the elastic-plastic boundary is evaluated from the iteration procedure where the surface traction on the virtual boundary for the BEM analysis is determined from the plastic solution. When the elastic boundary stress exceeds the yield condition, the boundary is corrected in the manner that it gradually goes away from the wall.

The present method is successfully applied to the single circular-cavern and the two adjacent circular-caverns under the condition of the bi-axial initial stress. Additionally, it is respectively applied to an egg-shaped cavern, two types of horseshoe-shaped cavern and a rectangular cavern, where the importance of the wall curvature is pointed out.