

岩盤の複合破壊を考慮した応力解析

名古屋大学 正員 ○斎藤 敏明

名古屋大学 正員 川本 勝万

1. 緒言

岩盤などのせい性材料の破壊あるいは降伏後の挙動はまだ充分には解明されてはいないが、非破壊の状態での挙動とは大きく異なり、また、引張応力が作用する場合と圧縮応力が作用する場合でも明らかに異なる。そのため、地下構造物の安定性や破壊域の進展などの解析を行なう場合には、引張領域での破壊、圧縮領域での破壊あるいはそれらの組合せによる破壊のおののについて、破壊後の挙動を充分考慮に入れる必要がある。

一方、Zienkiewiczらによって提案された、有限要素法の手法の一つである Notension 法や Initial Stress 法(初期応力法)は、いづれも与えられた条件に合うように応力を再配分するいわゆる Stress Transfer 法(応力分配法)の一種と考えることができる。ここでは、この応力分配法の手法を用いて、岩盤などの破壊あるいは降伏後の挙動の表現を試み、地下構造物周辺の破壊域の進展や構造物としての安定性を検討しようとするものである。

2. 材料の破壊条件と破壊後の挙動

二次元的な応力状態について考え、材料の破壊条件として次式で与えられるようなモールの破壊包絡線を用いた。(ただし、圧縮をマイナスとする。以下も同様である。)

$$\tau^2 = (\sqrt{n+1} - 1)^2 S_t (S_c - \sigma) \quad (1)$$

ここで、 S_t は 1 軸引張強度、 n は脆性度で 1 軸圧縮強度を S_c とすれば S_c/S_t で表わされる。

いま、主応力を σ_1, σ_2 ($\sigma_1 \geq \sigma_2$) とすれば、モールの中心 σ_m と半径 σ_d は次のようになる。

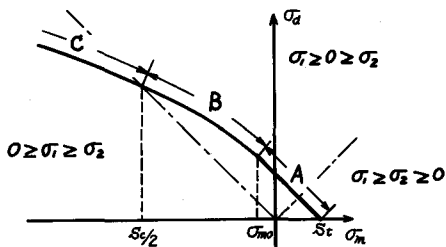
$$\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2)/2, \quad \sigma_d = (\sigma_1 - \sigma_2)/2 \quad (2)$$

式(1)で示された破壊条件を σ_m, σ_d で示せば次の様になる。

$$\left. \begin{array}{ll} S_t > \sigma_m \geq \sigma_{m0} \text{ のとき} & \sigma_d = S_t - \sigma_m \\ \sigma_m < \sigma_{m0} \text{ のとき} & \sigma_d = T_0 \sqrt{1 - \sigma_m/S_t - (T_0/2S_t)^2} \end{array} \right\} \quad (3)$$

ただし、 $\sigma_{m0} = S_t - T_0^2/2S_t$, $T_0 = (\sqrt{n+1} - 1)S_t$

第1図は、式(3)に示された破壊条件を図示したものである。この図でA領域は1つの主応力が引張強度に達した場合で引張破壊となる、B領域は1つの主応力が S_t 以下の引張応力で他の1つが圧縮応力となっている場合の破壊でこれを複合破壊とする。また、C領域は2つの主応力がともに圧縮応力の場合でこれを圧縮破壊と呼ぶことにする。



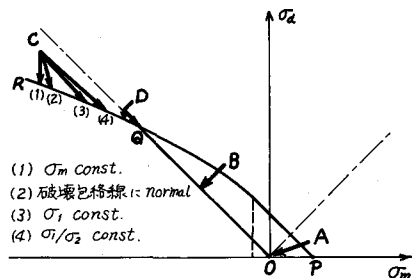
第 1 図

つぎに、有限要素法を用いて、破壊後の挙動を表現するために、各要素について次の様な仮定を設けた。(i) 一旦破壊あるいは降伏した要素は、その後引張り力に抵抗できない。(ii) 圧縮破壊の場合

に再配分されるべき応力は、破壊面(破壊条件)を越えた応力状態によって決まり、その結果破壊面上に保たれる。(iii)複合破壊などの場合、まず引張応力を(i)の条件に従って再配分し、それでもなお破壊状態にある場合(ii)の条件に従って再配分される。

3. 解析方法

第2図に示すように、破壊限界 $\overline{PQR}$ 上あるいはそれを超えて破壊状態となっている、点A, B, C, Dで示されるような応力状態に対して、先に述べた仮定に従って次のように再配分されるべき応力を決定した。点Aの場合は仮定(i)に従って点Oの応力状態になるようにすべての引張応力が再配分された。点Bの場合は、仮定(iii)に従って引張応力が再配分され直線 $\overline{OQ}$ 上の応力状態へと移る。



第 2 図

点Cの応力状態での破壊は仮定(ii)に従って再配分すべき応力が決定されるが、この場合にはさらに種々な方法が考えられる。図に示したように(1) σ_m は破壊後も変化しないとする方法、(2)式(1)で示された包絡線に最も接近した点で接するようなモール円で示される応力状態に保たれるとする方法、(3)絶対値が小さい方の主応力 σ_1 が変化しないとする方法、(4)応力比 σ_1/σ_2 が変化しないとする方法について検討してみた。点Dの場合は、まず引張応力を再配分し、次に点Cの場合と同様の方法で応力を再配分されることを示している。これらの再配分の結果、破壊後の応力状態は、ほぼ $\overline{OQR}$ 曲線上に収束することになる。

つぎに、応力分配法によって応力の再配分の計算を行なうためには、各要素について計算された応力状態から再配分されるべき応力 $\{\Delta\sigma\}^e$ が決定されれば、次式により節点外力 $\{AF\}^e$ を計算し、これらについて剛性マトリックスを変化させることなく、構造全体に関し解けばよい。

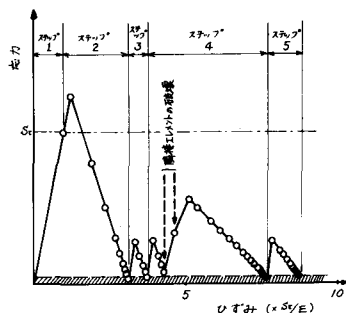
$$\{AF\}^e = \int_V [B]^T \{\Delta\sigma\}^e dvol \quad (4)$$

さらに、この過程をくり返すことによって、全要素にわたって応力状態を所定の値に収束させることができる。また、荷重に関しては増分形式で行なった。増分量は細かい方が望ましいが、破壊領域が荷重増分によって一度に大きく出ることを避けるようにしてやれば、解析結果には増分量はそれほど影響しないことがわかった。

4. 応力-ひずみの関係

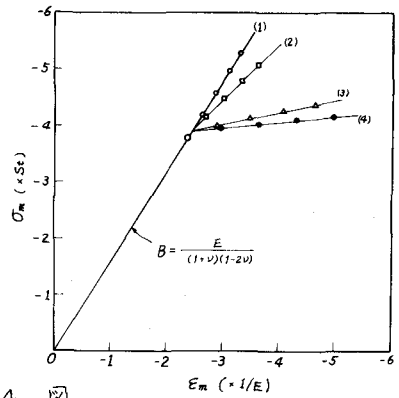
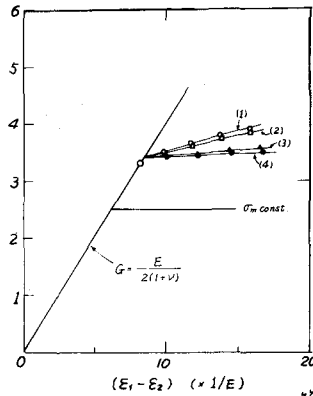
この解析法においては、ひずみは応力の再配分によって発生する弾性ひずみも逐次加えられるため、応力は所定の値に収束しても、単調に増加することとなり、応力-ひずみの関係は一般に bi-linear なものとなる。

第3図は、引張破壊の場合の収束の様子と応力-ひずみの関係を示したものである。一旦破壊するとそれ以降は引張力に抵抗できないため破壊後のひずみはすべて塑性ひずみとなる。また、荷重増分はステップ2以後同じであるが、収束の様子は周囲の状況に大きく影響されていることがわかる。



第 3 図

第4図に示したものは、
圧縮破壊の場合の4つの応力再分配の方法に対応した
応力-ひずみ関係を σ_m と ε_d 、
 σ_m と ε_m の関係で示したも
のである。この図より明ら
かなように破壊とともに再
分配が始まり、再分配応力
に応じて塑性ひずみが増加
するため、各方法によって

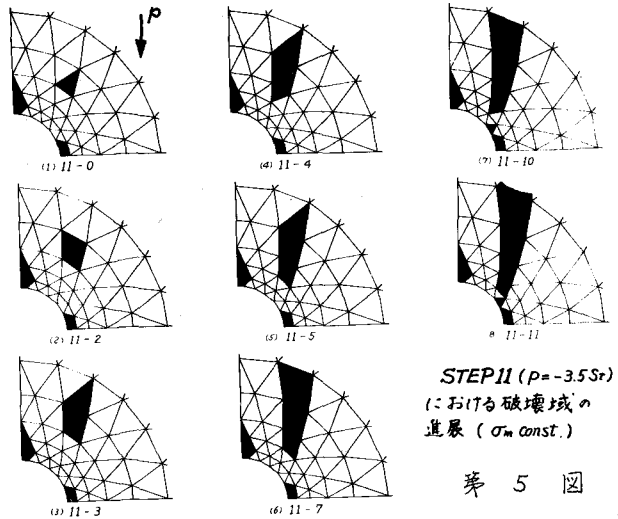


第 4 図

異なった応力-ひずみ関係が生じる。(1)の方法では σ_m に対する応力再分配は行なわれないため、 σ_m - ε_m の関係は破壊後も bi-linear とならない。これらの関係は、周囲の破壊状況や破壊応力値によ
って多少異なってくるが、(1)~(4)の方法に対する一般的傾向は変化しない。これらのことから、いづ
れの方法を選ぶべきかを決定することができると考えられるが、多くは材料特性とくに破壊後の挙動
の研究に待たねばならないだろう。以下では一般的と考えられる(1)の方法を用いて解析を行った。

5. 円形空洞まわりの応力

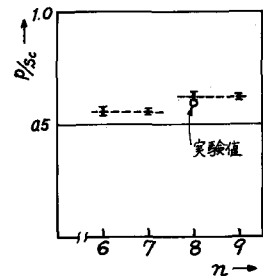
計算例として、2次元ひずみ状態の
円孔まわりの解析を行った。荷重は1
軸圧縮応力 p をうけるものとする。使
用したモデルは節点数72、要素数111
の有限要素モデルで、ポアソン比は
0.25 とした。第5図に示したものは
 $n=6$ の場合の破壊の進行状況である。
なお、荷重増分は Step 1 で $-5\sigma_c$ 、以後
は $-0.25\sigma_c$ とした。この解析での破壊
の様相はおおよそ次の様になった。まず、
弾性論から予想されるように引張破壊
が載荷方向の円孔周辺に現れ荷重の増
加とともに徐々に半径方向に進行する。



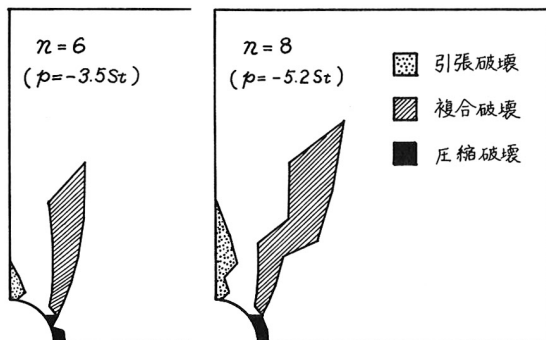
第 5 図

さらに、 $p = -2.5\sigma_c$ のステップでやはり円孔周辺に圧縮破壊を生じるが、
引張破壊は進展しない。つまり、第5図(1)の黒く塗られた箇所からわ
かるように、円孔周辺でない所に $p = -3.5\sigma_c$ で複合破壊を生じる。(2)
以降はこれに続く応力再分配の過程を示したものであるが、たちまち、
破壊ゾーンは両方に進展し、再分配をくり返しても、ついに解は収束し
なくなる。これは構造物の破壊とみなすことができるだろう。

第6図は $n=6 \sim 9$ の材料についてこのような崩壊荷重を求めたもの



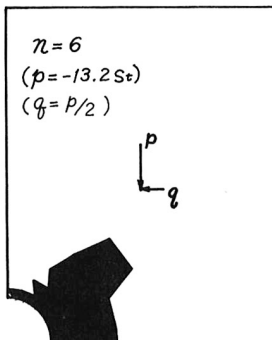
第 6 図



第 7 図

であるが、 $n=6, 7$ では $p = 0.56 S_c$ 、 $n=8, 9$ では $p = 0.63 S_c$ と若干の違いが計算された。これは破壊が発生する位置は同じであるが、第 7 図のように $n=8$ では引張域が $n=6$ にくらべ、さらに進展しており、崩壊を決める複合破壊が発生する領域に応力再分配の影響を及ぼすためと考えられる。また、第 8 図に示したものは、複合破壊が発生する位置の荷重増加に対応した応力状態の変化で、不連続になっている所は引張破壊が進展した所である。この結果、この要素が破壊に達する荷重も当然異なってくる。さらに第 7 図のように破壊域の進展の方向にも違いが生

じている。写真-1 は $14.5 \times 14.5 \text{ cm}$ 、厚さ 7.2 cm の凝灰岩の板の中央に 2.5 cm 径の円孔を持つ試料を用いて、平面ひずみ状態で 1 軸圧縮を行った場合の破壊写真である。本試料の凝灰岩は $S_c = 80 \text{ kg/cm}^2$ 、 $S_t = 650 \text{ kg/cm}^2$ で n は約 8 である。崩壊荷重は $0.60 S_c$ で第 6 図に示したとうり計算結果と良く一致した。また、破壊パターンも第 7 図と比較すれば、良く一致していると言える。また、崩壊を決める亀裂は実験でも複合破壊領域にあたるものと考えられる。しかしながら、写真-2 は、さらに側方から $q = p/2$ の載荷を受ける場合の $p = -6.3 S_t$ の時の破壊様相を示すが第 9 図の $n=6$ 、 $p=-13.2 S_t$ の場合の結果とくらべ、破壊パターンはかなり一致するが、載荷応力では大きく異なった。これは、圧縮破壊の場合の再分配の方法はさらに検討を要することを示している。



第 9 図

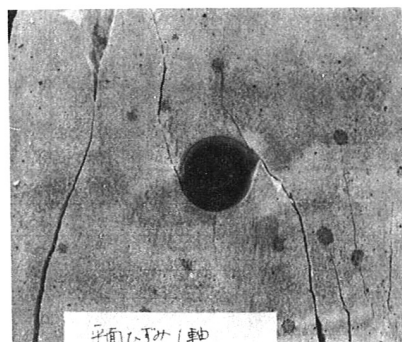
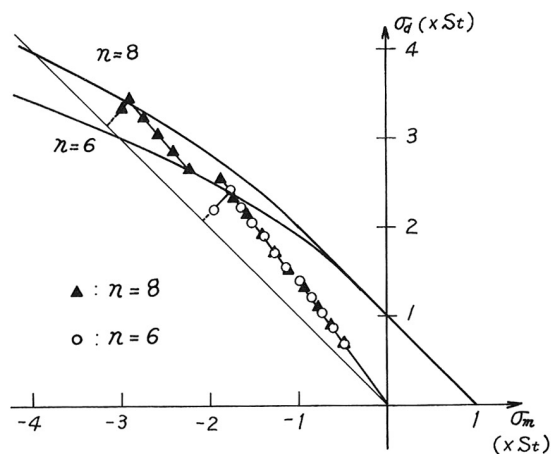


写真 1



第 8 図



写真 2

Stress Analysis of Underground Structures Based on Fracture Mechanics

Toshiaki Saito

Toshikazu Kawamoto

Depart. of Civil Engrg.

Nagoya University

In this study, the progress of a fracture zone and the stability of underground structures is discussed, by means of stress transfer method, one of the techniques of finite element method. By using this method, stress field after fracture is hold on fracture surface according to several assumed processes.

Rock fracture condition of Mohr's envelope is used, and the following conditions on the stress field after fracture are proposed; (1) the element which has been fractured or yielded, cannot bear tensile stress, (2) the stresses which should be redistributed after compressive fracture (under compressive principal stresses) are determined depending on the states of stress beyond the fracture surface, (3) for combined fracture (under both tensile and compressive principal stresses), firstly tensile stress is redistributed and then the compressive stresses over the fracture surface are redistributed according to condition (2).

This method is applied to the problem of fracture zone and stability around single circular opening and the results are compared with the experimental results for the plane strain conditioned plate with single circular hole. It was found that the computational results for uniaxial stress field coincides well with the experiment.