

(8) 不連続性岩盤の解析

埼玉大学	正会員	浜島良吉
法政大学	正会員	山下清明
間組技術研究所	正会員	草深守人
埼玉大学	大学院	バレリオ・グティエレス

1. はじめに

岩盤内には通常多くの亀裂、および節理が含まれており、こうした不連続性を評価した解析が重要となる。本研究においては、こうした不連続性岩盤の解析におけるひずみ軟化の取り扱いについて考察をおこなう。まずこうした不連続性岩盤に生ずるひずみ軟化特性については、母材によって生ずるひずみ軟化特性と、ラフネスを有するジョイント面によるひずみ軟化特性に分けて考える必要がある。本研究ではラフネスを有するジョイント面によって生ずるソフトニングについては構成則のみについて考慮し、母材によって生ずるソフトニングについては、スムーズなジョイント面を有する岩盤モデルについて解析をおこない、母材の破壊によって生ずるソフトニングを考慮することにより、こうした不連続性岩盤のソフトニング特性を比較的良好に表現しうることを明らかにする。

2. 母材の破壊によるひずみ軟化

図-1は石膏供試体についての一軸試験結果であり、ピーク強度後著しいソフトニングを生じていることがわかる。これは供試体の縦割れによるものであり、破壊はほとんど瞬間的な状態で生ずる。

図-2は3本のスムーズなジョイント(供試体を糸ノコで切断し、その後弱い強度の石膏で接合したものである)を有する岩盤モデルの二軸試験結果である。実験により得られた破壊性状と解析より得られたクラックの発生状態は良い対応を示している(実験において中央ブロックに亀裂が入っているように見えるが表面のみで中まで貫通していない)

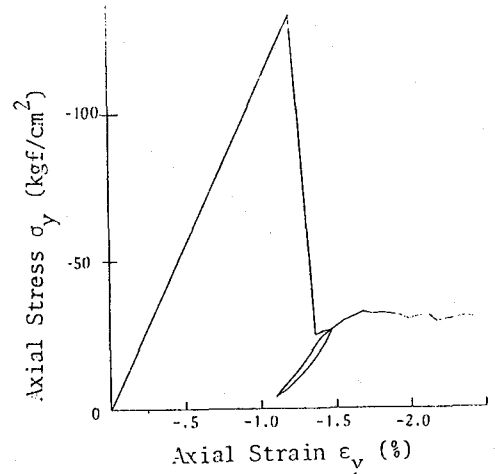
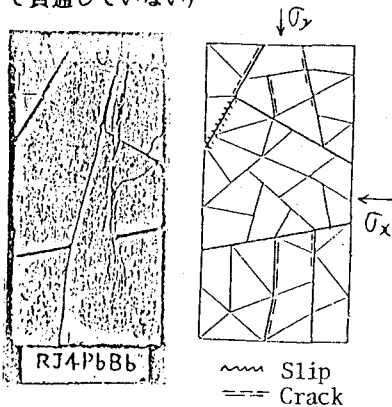


Fig.1 Uniaxial compression test result



(a) Fracture pattern

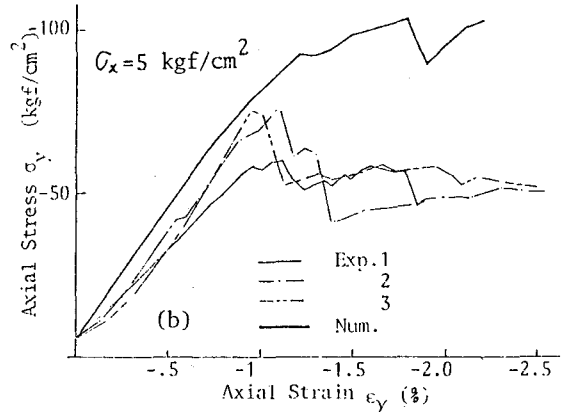


Fig.2 Numerical example without considering strain softening

しかし荷重変形曲線を見ると実験では母材の割れに伴って強度の低下(ソフトニング)現象が生じているにもかかわらず、計算ではこれに対応するソフトニング特性が得られていない。こうした母材の破壊によるソフトニング特性を評価するためには図-1に示されるような母材の破壊によるソフトニング特性を考慮に入れなければならない。

ここでは解析でソフトニングの特性が得られるかどうかをチェックするために図-3に示されるモデル化をおこなう。曲線C-D-Eは平面ひずみでの一面せん断試験結果であり、曲線A-B-D-Oは一軸圧縮強度 $\sigma = 140 \text{ kgf/cm}^2$ に対するモール円である。これはD点において曲線C-D-Eにほぼ接している。これらのことから平面応力状態に対する降伏曲面として曲線A-D-E-F-Gを用いる。G点は引張強度 $\sigma = 24.7 \text{ kgf/cm}^2$ における点である。今一軸試験における荷重変形曲線としてO-A-Hが与えられており、これに対応して降伏曲面はO-A-Hの経路を有するとする。又応力が外側の降伏曲面に達した場合B→Iのように内側の降伏曲面に落ちるものとする。こうした仮定で解析を行った結果、図4に示されるような荷重変形曲線及びStress-Pathが得られた。

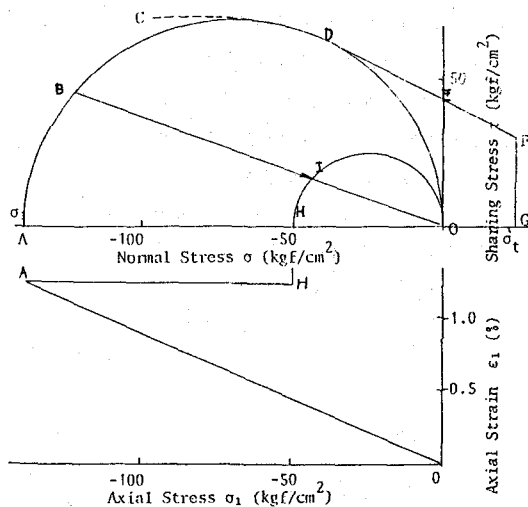


Fig.3 Numerical model for strain softening

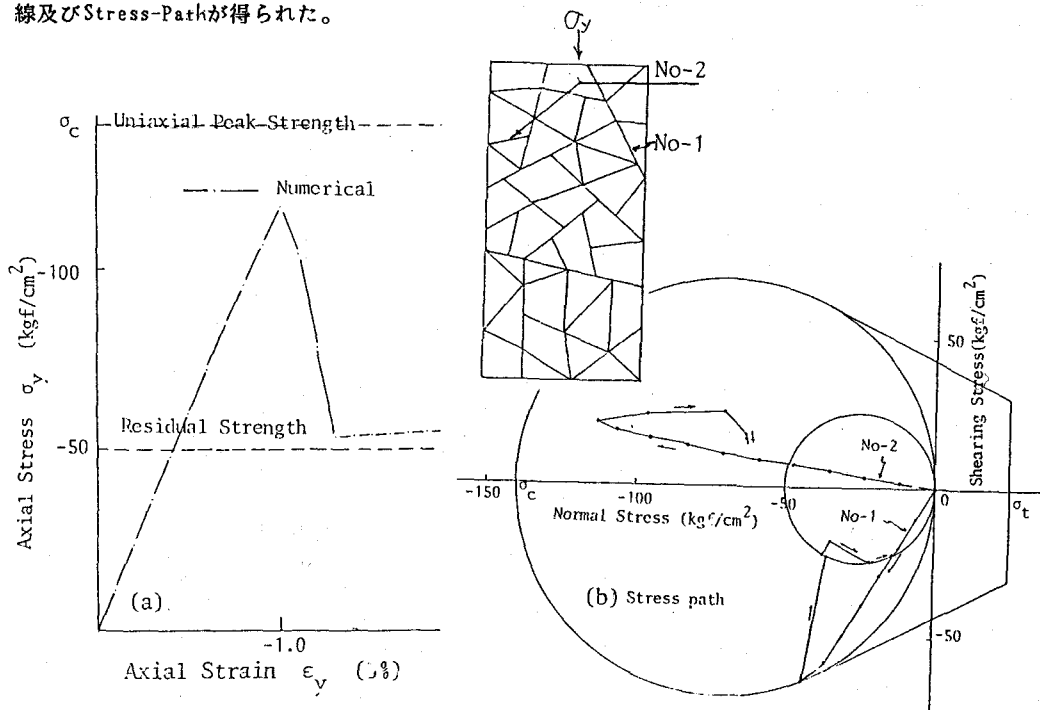


Fig.4 Numerical example for uniaxial compression

ピーク強度から残留強度にほぼ実験結果に対応する落ちかたをしているのがわかる(ただしピーク荷重については解析結果の方が17%程小さめに出ている。) 又、Stress-Pathについても例えばNo.1のパネは外側の降伏曲面に達し、その後、内側の降伏曲面の所定の位置に落ちついている。次に図-5は図-2に示されたと同じ四要素岩盤モデルに関する解析結果である。ピーク後母材による破壊によりソフトニングが生じているが、解析結果と実験結果で良い対応を示している。このように図-4で示されるような母材によるソフトニングを考慮することが妥当であるといえよう。

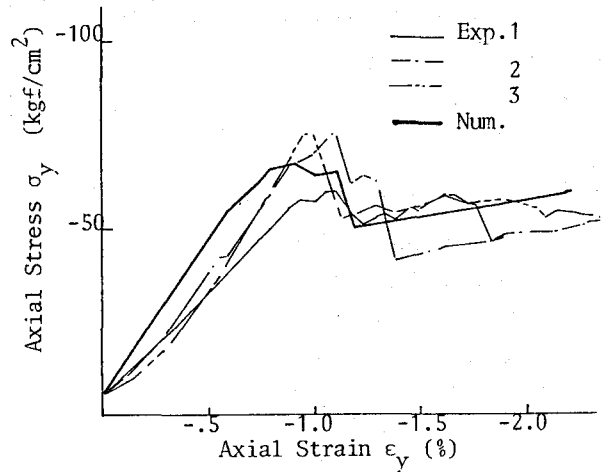


Fig.5 Numerical example including strain softening

3. ラフネスを有するジョイント面に関するひずみ軟化の取り扱い

ラフネスを有するジョイント面に対してLadanyi & Archambault¹⁾が提案している次式

$$\tau = \frac{\sigma_n (1 - a_s) (\dot{\nu} + \tan \theta_r) + a_s \gamma \sigma_c^{\frac{m-1}{n}} (1 + n \frac{\sigma_n}{\gamma \sigma_c})^{\frac{1}{2}}}{1 - (1 - a_s) \dot{\nu} \tan \phi_r} \quad (1)$$

は、ひずみ軟化特性を考慮するのに用いることができる。

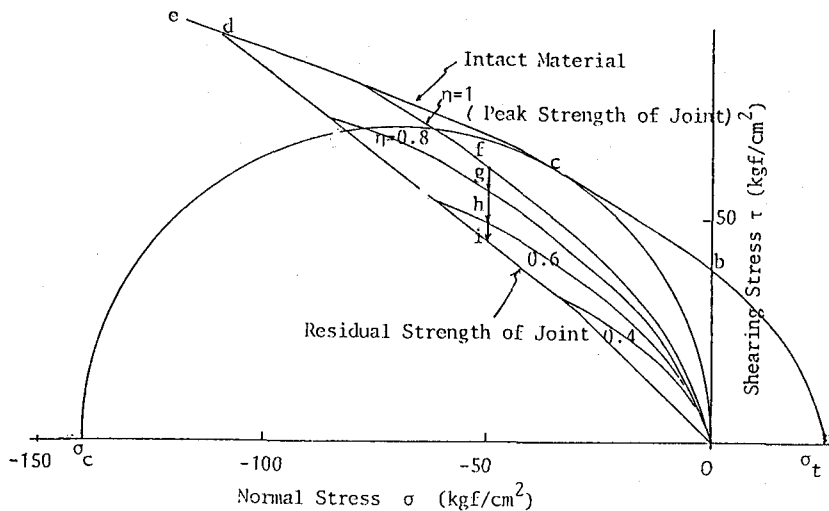


Fig.6 Shear strength for joint with roughness

ここで η は、式(1)において $\eta=1-\alpha x/L$ で与えられる量であり変形が進むにつれて変化しせん断強度が図6に示されるように低下する。たとえば一面せん断試験を考えた場合、ピーク強度fからg($\eta=0.8$), h($\eta=0.6$), i(残留強度)のように変化する。

式(1)を用いることにより解析としては完全弾塑性的の取扱いで計算を進めることが出来比較的簡便な解析をおこなうことができる。

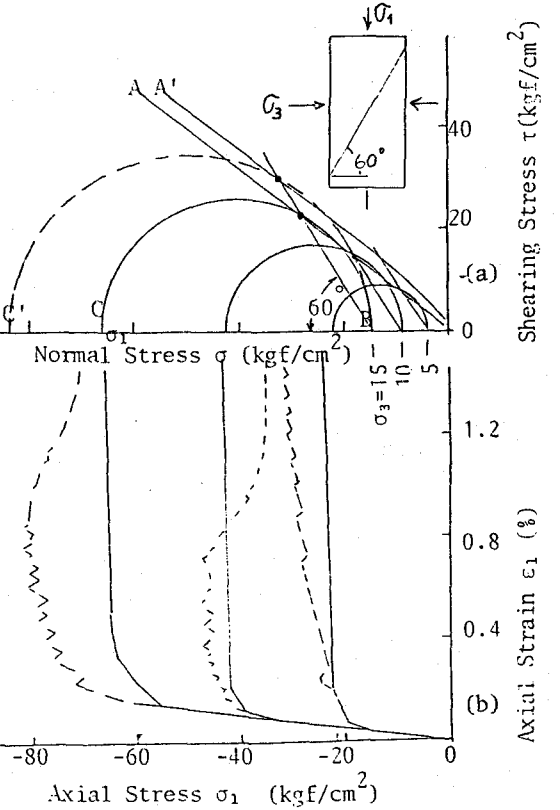
これに対する解析は現在行っているところであるが η の影響は図-7に示される解析例から推察することができよう。図-7aにおけるO-Aはスムーズな弱面に対する一面せん断試験(せん断方向長さ10cm)から得られた降伏(破壊)曲面であり、 $\sigma=5, 10, 15 \text{ kgf/cm}^2$ に対応するモール円が記入されている。

この $\sigma=5, 10, 15 \text{ kgf/cm}^2$ に対応する二軸試験に対する σ - ϵ 曲線は図-7bに示されているが、 $\sigma=15$ の場合についていえば実験結果の方が解析結果よりも大きくなっている。ここで供試体の弱面に対する一面せん断試験についてせん断方向長さ20cmの供試体についてさらに詳細な実験を行った結果、降伏曲線はO-A'のようになりこれに対するモール円はB-C'となり、 σ に対するピーク強度は実験結果と解析結果でほぼ一致する。図-6に示される η を考慮した降伏曲面は上で示したような降伏曲面の変化と同様の性質を示すものであり、これからソフトニング現象を説明することができる。

4. まとめ

不連続性岩盤の解析において、ひずみ軟化特性を母材の破壊によるものとラフネスを有するジョイント面によって生ずるものにわけて考え、次の結果を得た。

1. 母材の破壊によって生ずるソフトニング特性については平面応力場での石膏供試体の一軸圧縮試験に対する解析をおこない、ピーク荷重後の著しいソフトニングを示すことができることを示し、スムーズなジョイントを含む不連続性岩盤において、こうした母材の破壊によるソフトニングを考慮することにより実験結果と解析結果は良い一致を示す。



Eig. 7 Biaxial Strength of Rock Model with one Smooth Joint

参考文献

- 1) Ladanyi B. & Archambault G., Direct and Indirect Determination of shear Strength of Rock Mass. Preprint 80-25 AIME (February, 1980)

(8) ANALYSIS OF DISCONTINUOUS ROCK MASS

by Ryokichi HAMAJIMA*
Morito KUSABUKA**
Kiyoaki YAMASHITA***
Valerio GUTIERREZ*

*Saitama University
**Hazamagumi, Ltd.
***Hosei University

SUMMARY

Regarding the mechanical characteristics of a rock mass, especially in the case of studying its bearing capacity, a thoroughly study of the strength after the peak load is important. The case of quick dropping of the bearing capacity after peak load need sufficient study in consideration of the structures safety.

Analysing these strain softening characteristics of discontinuous rock masses having many joints, we must consider the strain softening produced owing to the fracture of intact material and that produced owing to slip on the joint surface.

In the case of rock masses having few joints the fracture of intact material has a large effect on its strength; moreover, a remarkably strain softening occur. With increasing of the number of joints, however, the mechanical characteristics of rock masses are governed by the slip of joints, showing no fracture of the intact material, and mechanical characteristics of loose sand are observed.

Although in the case of smooth joint surfaces the shearing strength-deformation characteristics has a perfect elasto-plastic behavior, in joint surfaces having roughness, it is produced strain softening after the peak. Considering this strain softening and using the constitutive equation of Ladanyi & Archambault, its numerical analysis can be performed. In this case, in accordance with the deformation of the shear plane, the numerical method should consider the condition of perfect-elasto-plasticity.

This work deal with the analysis of plane stress, however, it is thought this method could be modified to use in the case of plane strain.