

大成建設(株) ○伊藤文雄, 里 優, 奥村勝美

1. はじめに

岩質材料の重要な変形特性であるダイレイタンシーについては、これまでに実験的、あるいは解析的研究が多数なされている。この内、軟岩を対象とした実験結果では、ダイレイタンシー量が拘束圧によって変化するという興味深い事実が示されている。すなわち、拘束圧が低い場合は破壊後大きな体積膨張を示し、ある拘束圧以上では破壊後体積膨張は生じなくなる。この原因として、クラックの開口、進展が拘束圧により抑制されることが考えられ、クラックの内在する材料の特徴的な挙動とみる事ができる。本研究の目的は、クラックの開口、進展がダイレイタンシー現象に果たす役割を数値シミュレーションにより明らかにすることにある。

2. 解析モデル

クラックの開口に起因するダイレイタンシー特性を数値シミュレーションによって明らかにするため、微小エレメント中の1個のクラックを理想化し、図-1に示すモデルを製作した。モデルは端面の影響を無視しうる大きさとしてクラック長さに対してモデル長さ l とし、クラック幅に対して幅 h とした。ここで $h/l = 0.6$ である。またクラックの進展を表現するために、ジョイント要素を用いた。載荷条件は通常の三軸圧縮試験に相当する応力履歴を考慮し、まず側圧(σ_2)をかけ、軸圧(σ_1)をクラック先端に引張応力が生じる大きさまで載荷した後、等しい増分圧を加える。要素方程式や非線形計算の方法については文献(2)を参照されたい。

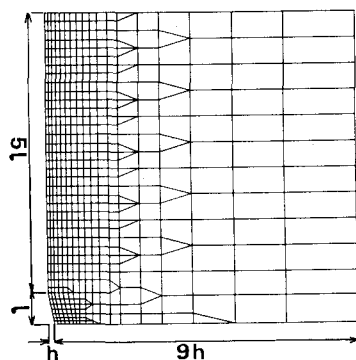


図-1 モデル図

3. 解析結果

図-2は各拘束圧下におけるクラックの進展量を示したものである。図中の $\Delta\sigma_1$ はクラック端に引張応力が生じた後の応力増分であり、 σ_c は引張強度である。この結果より、同じ軸差応力を加えたにもかかわらず拘束圧の増加に従いクラックの進展が抑制されていることが分かる。

次に、応力-ひずみ関係を軸ひずみ、側方ひずみに関してプロットしたのが図-4である。ここで言う軸ひずみ、側方ひずみは、図-3に示したようにモデル上の代表点としてひ点、L点の各々の変位をモデル長さで除した値であり、クラック端に引張応力が生じた後の応力増分についてのみ示した。本解析で用いたクラックモデルは、非常に微小なエレメントを理想化したものであるため、軸ひずみ、側方ひずみの非弾性成分はかなり小さな値を示す。従って、図-4、5については、非弾性成分についてのみひずみ量を1000倍してプロットした。図-4の応力-ひずみ関係をみると、拘束圧が低い値、すなわち $\sigma_2/\sigma_c = 0, 0.1266$ ではかなりの非線形性が見られ、特に、側方ひずみ(ε_2)は破壊後かなり生じていることがわかる。しかし、拘束圧が、 $\sigma_2/\sigma_c = 0.2532$ 以上では、それほど顕著な非線形性は見られない。

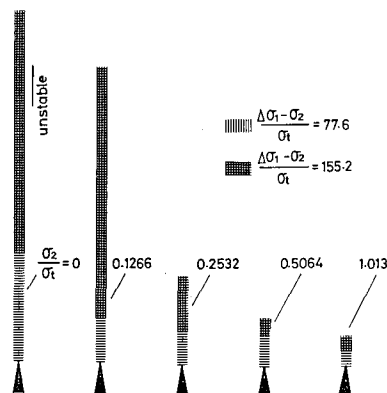


図-2 クラックの進展量

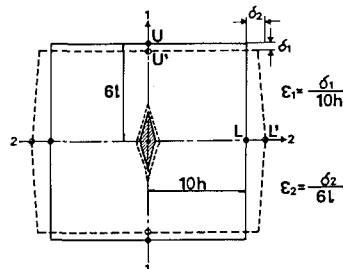


図-3 ひずみの定義

図-5は、軸ひずみ(ε_1)、側方ひずみ(ε_2)の各成分から体積ひずみを計算し、軸応力(σ_1)との関係で示したものである。ここで言う体積ひずみは、軸ひずみ(ε_1)、側方ひずみ(ε_2)を加えたものである。この図からも $\sigma_3/\sigma_1 = 0$ 、0.1266では、顕著な非線形性が見られ、しかも拘束圧の増加に従って、体積膨張、すなわちダイレイタンシー量が小さくなっていることがわかる。このような傾向は、図-6に示すような通常の軟岩に対する三軸圧縮試験結果においても認められる。すなわち、微小エレメント中の1個のクラックに着目したモデルと幾つかのクラックが内在していると考えられる供試体レベルのモデルの挙動は同様な傾向を示しており、ダイレイタンシーを伴った破壊メカニズムの支配因子として、クラックの開口、進展が重要な位置を占めていることが推定される。

図-7はクラックが進展する際のクラック周辺の応力状態の変化を示したものである。この図は、 $\sigma_3/\sigma_1 = 0.1266$ 、0.2532、0.5064の三種類のケースについて示したものである。 $\sigma_3/\sigma_1 = 0.1266$ の場合は、クラック周辺の圧縮応力に比べてクラック端の引張応力が卓越しており、クラック進展の際の引張応力の減少はほとんど認められない。従って、クラックは次々と進展していく。これに対し $\sigma_3/\sigma_1 = 0.2532$ 、0.5064の場合には、拘束圧の増加に従ってクラック開口の原因である引張応力の減衰が顕著となり、そのためにクラックの進展は抑制される。

4. おわりに

本研究では、ダイレイタンシー特性に対するクラックの果す役割を数値シミュレーションにより検討したが、その結果以下のことが明らかになった。

- 1) 岩質材料に内在するクラックの開口、進展は、クラックを含む材料の非線形性、およびダイレイタンシー特性の重要な要因である。
- 2) ダイレイタンシー特性の拘束圧依存性は、クラック端の引張応力と開口しているクラックの圧縮応力の大小関係で決定される。すなわち、拘束圧の増加に従い、潜在クラックの圧縮応力が増加しクラックの進展が抑制されることによりダイレイタンシー量も減少する。

このように、潜在亀裂を多数有する岩石の非線形な応力-ひずみ関係は、クラックの開口、進展という構造の変化としてとらえることが可能であり、今後、ひずみ軟化現象を含めた岩体の挙動について検討を加えていきたい。

参考文献

- 1) Ichikawa et al. "Brittle-Ductile Fracture of A Tuffaceous Rock and Plasticity Theory.", Proc. of Int. Conf. on Constitutive Laws, 1983
- 2) 里, 豊村: "有限要素法による増殖亀裂の数値解析", 第3回土木学会年次学術講演会, 1983

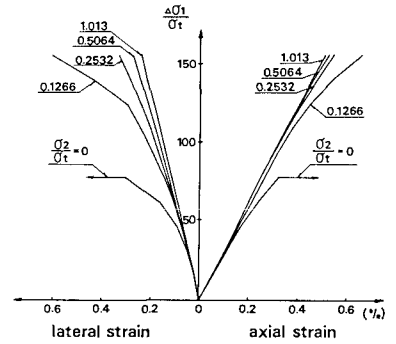


図-4 軸応力-軸ひずみ、側方ひずみの関係

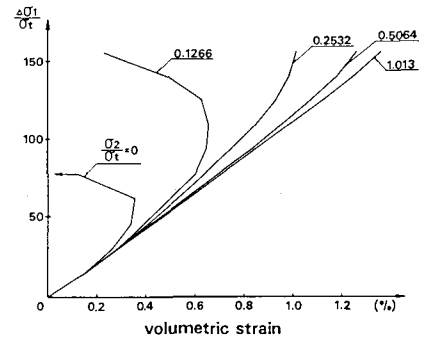


図-5 軸応力-体積ひずみの関係

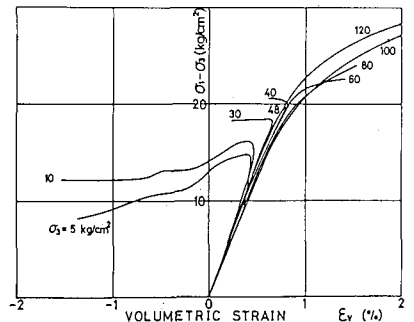


図-6 三軸圧縮試験結果(大谷石)

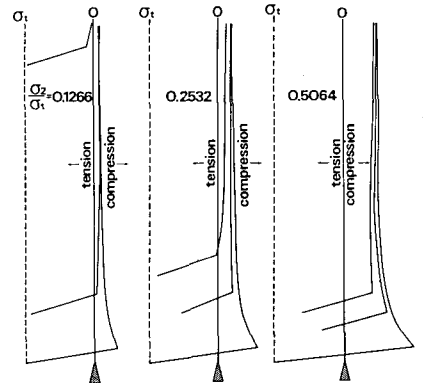


図-7 クラック周辺の応力変化