3次元粒状要素法による岩石の三軸圧縮試験の数値解析

1. はじめに 岩盤中に空洞を掘削すると,周辺岩盤 の力学特性,水理特性,地球化学的特性が変化すること が知られている¹⁾. このような領域は掘削影響領域と呼 ばれ,放射性廃棄物の地層処分の安全性に影響を与える ことが懸念されている.特に、軟岩サイトの周辺岩盤は 応力的に厳しい状況になることが予想され, 非弾性的な 変形に伴う透水性の増大が懸念されることから,筆者の 一人²⁾は堆積軟岩に対して三軸圧縮試験の途中で透水試 験を行うことによって, せん断破壊の進行が透水性の変 化に及ぼす影響について検討をおこなっている. そして, このようなせん断破壊の進行に伴う透水性の変化を予 測するモデルを構築しようと考えたときに、アプローチ の仕方として、 基質部内部で起きているメカニズムに着 目した場合, 微小な破壊がどの様に発生・進展するのか を予測できるかが重要になると考えられる.

そこで、本研究では、離散体解析法の一種である粒状 要素法³⁾に引張り抵抗や粘着力を導入し、それに基づい て岩石の三軸圧縮試験の数値解析を試みた.そして、供 試体内部の微小破壊の発生状況についても検討を行っ たので報告する.

2. 粒子間モデル 従来の粒状要素法の粒子間モデル に引張り抵抗と粘着力を付与することで,岩石のマクロ な力学特性を表現することを考えた.粒子間モデルの概 念を図-1に示す.

- 法線方向に関して、粒子間の接触力 P_nは圧縮、引張 りに関わらず法線方向の相対変位 u_nに比例し、最大 引張り力 T_n^{max}に達すると引張り破壊が生じる.
- 接線方向に関して,接触力 P_tは接線方向の相対変位 *u*_tに比例し,最大せん断力 P_t^{max}に達するとせん断破 壊が生じ,それ以降は Coulomb の摩擦則に従う. 最大引張り力 T_n^{max}は,粒子径を考慮して,

$$T_n^{\max} = a(r_a + r_b)k_n \tag{1}$$

とした.ここに、aは比例定数である.また、最大せん断力 P_t^{\max} は、

$$P_t^{\max} = (P_n - T_n^{\max}) \tan \phi \tag{2}$$

とした.ここに、 ϕ は粒子間の摩擦角である.

<u>3. 三軸圧縮試験の数値解析</u> 解析に用いたモデルを 図-2 に示す.供試体モデルは直径 50mm,高さ 100mm

キーワード:粒状要素法,軟岩,三軸圧縮試験,微小破壊 連絡先:〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目 4-17 清水建設株式会社 技術研究所 Tel.: 03-3820-8438



清水建設株式会社 正会員

摩擦要素

東北大学名誉教授 フェロー会員 岸野 佑次

○郷家 光男

図−2 解析モデル

の円筒形で,直径 2.2~9.1mm の球形の粒子の集合体 (1039 個)で形成されている.また,実際の三軸圧縮試 験における加圧板やメンブレンに相当する境界粒子を 供試体モデルの外周に配置し,それを制御することによ って,供試体モデルに軸ひずみや拘束圧を作用させた. 本研究では,間隙水の挙動を考慮していないことから, 乾燥した岩石,または排水条件下の三軸圧縮試験に相当 している.



粒子間モデルの物性値として,法線方向バネ定数 k_n =4400N/mm,接線方向バネ定数 k_r =3080N/mm,粒子間 の摩擦角 ϕ =30°,比例定数a=-0.0035とした.載荷条件 は拘束圧一定条件のひずみ制御とし,拘束圧は 0.3, 1.0N/mm²の2通りとした.

4. 解析結果 解析結果として,軸ひずみー軸差応力 関係を図-3 に示す.軸ひずみの増加に伴い応力は増加し てピーク強度に達するが,それ以降,応力は減少し,軸 ひずみ 1.5%程度で残留強度に至った.そして,拘束圧 が大きくなるとピーク強度と残留強度は増加する傾向 を示した.また,軸ひずみー体積ひずみ関係を図-4に示 す.載荷の初期段階では,体積ひずみは圧縮を示し,ピ ーク強度直前から膨張に転じた.そして,拘束圧が大き くなると体積膨張の程度は小さくなる傾向を示した.

これらの結果から,軟岩のマクロな力学特性を概ね表 現することができたと考えている.

5. 微小破壊面の方向分布の特性 図-1 に示されるように粒子 A, B は接触点 C を介して結合していて, 載荷 に伴い粒子間で引張り破壊, またはせん断破壊が生じた とき, 接触点 C を通る接平面上に微小破壊面が形成され ると考えた.そこで,供試体モデル内部の微小破壊面の 方向分布を検討するために, 次式で表されるテンソル量



図-5 テンソル量 №の推移

を定義した.

$$N_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{F} n_i n_j \tag{3}$$

ここに,Mは微小破壊面の総数, Σ_F は微小破壊面に関する和, n_i は微小破壊面の単位法線ベクトルを表す.

載荷に伴うテンソル量 N の変化を図-5 に示す.ここ に,指標1,2,3は,それぞれx,v,z軸方向を示して いる (図-2 参照). 図-5 より, 拘束圧による大きな違い は見られず、微小破壊が進行するにしたがって、N11, N_{22} が卓越し、ひずみ軟化過程に至ると、ほぼ、 $N_{11}=N_{22}$ となった.これは、微小破壊面は供試体軸方向に平行な ものが卓越していて、ひずみ軟化が進むと、法線ベクト ル n の供試体軸回りの方向に関する異方性は弱くなる ことを示している. さらに、ひずみ軟化過程では、テン ソル量Nの非対角成分はほぼ0になるために、Nの主軸 は座標軸(応力の主軸)にほぼ一致したことも分かった. 6. おわりに 本研究では,従来の粒状要素法を改良 して、岩石の三軸圧縮試験の数値解析に適用した. そし て,供試体内部で発生している微小破壊に関する検討を 行った. 今後, この解析方法を発展させて, 微小破壊の 発生・進行に伴う透水性変化モデルの構築を検討してい

参考文献

きたいと考えている.

- 核燃料サイクル開発機構:わが国における高レベル 放射性廃棄物の技術的信頼性,地層処分開発第2次 取りまとめ,総論レポート,JNC TN1400 99-020, pp.III-71, 1999.
- 郷家光男ほか: せん断変形下における軟岩基質部の 透水特性の変化,第32回岩盤力学に関するシンポジ ウム講演論文集, pp.167-172, 2003.
- 2) 岸野佑次:新しいシミュレーション法を用いた粒状体の準静的挙動の解析, 土木学会論文集, No.406/III-11, pp.97-106, 1989.