

III-10

多孔隙質軟岩の強度特性に及ぼす間隙水の影響について

東北大学 学生員○平石 元宣
東北大学 正 員 京谷 孝史
東北大学 学生員 白 鍾

1. はじめに

岩石はある程度空隙を含んでおり、自然条件下ではその空隙に水が含まれることが多く、そのために岩石の強度が低下することが認められている。この強度の低下は、堅岩においてよりむしろ固結度の低い軟岩や風化の進んだ岩石において問題となっている。本研究では水を含むことによる岩石の強度特性の変化を、大谷石を用いた変形強度試験を行って実際の岩石の強度を測定するとともに、均質化法を用いた数値解析を行って定量的に予測評価する。得られた実験値と解析値との比較を行うことで、岩石が水を含むことによって強度が低下するメカニズムの分析を行うものである。

2. 大谷石に対する変形強度試験

2.1 大谷石の供試体の作成及び試験方法

直径5cm×高さ10cm³の供試体を作成し、完全に乾燥したものと完全に飽和したものの二通りの試料を準備した。乾燥試料は、110℃に保った恒温槽内に供試体を48時間放置することで乾燥状態にした。飽和試料は、水を満たしたデシケータ内に供試体を浸し、真空ポンプで脱気を行い飽和状態にした。

超音波パルス法による縦波弾性波速度V_pの測定を行い、その後一軸圧縮試験を実施して一軸圧縮強度と静的弾性係数を測定した。

同様にして乾湿繰り返し試験を行い、縦波弾性波速度V_pの測定と一軸圧縮試験より一軸圧縮強度と静的弾性係数を測定することで乾湿の繰り返しによる変形・強度強度の変化を調べた。

2.2 空隙率の測定

飽和時に測定した供試体重量と乾燥時の供試体重量、さらにノギスを用いて測定した各供試体の高さ、直径から算出した体積により、以下に示す式によって空隙率を算出した。

$$\begin{aligned} \text{空隙率} &= \frac{(\text{空気体積})}{(\text{供試体体積})} \\ &= \frac{(\text{飽和時重量}) - (\text{乾燥時重量})}{(\text{水の単位体積重量}) \times (\text{供試体体積})} \end{aligned}$$

2.3 一軸圧縮試験

油圧式の万能試験機（容量10t）を用いて荷重制御によって一軸圧縮試験を行った。このとき、加圧板と供試体との間に摩擦力が生じないように、上下端面にグリースを塗る。荷重速度は1（kgf/cm² sec）で一定とした。荷重、変位ともにデジタルの測定器を用いて一定時間ごとに測定を行った。

2.4 縦波弾性波速度V_pの測定方法

超音波パルス法を用いてV_pを測定した。用いる機器は、適当なパルスを発生し、供試体物質を伝達する時間を精密に測定できるものでなければならない。本実験ではPUNDITを用いた。また、ノギスを用いて供試体の高さを測定し、パルスが進行する距離とし、伝播時間で除することで伝播速度を算出した。

2.5 乾湿繰り返し試験

乾湿繰り返し試験を行い、乾燥と飽和を繰り返すことで岩石の強度特性にどのような変化があるのかを直径5cm、高さ10cmの供試体を用いて調べた。自然状態の供試体を、最初に乾燥させた状態をD0とし、つぎに飽和させた状態をW0とする。再び乾燥させた状態をD1としてD8まで作業を続け、Dの0, 2, 4, 6, 8, Wの0, 2, 4, 6について一軸圧縮試験を行い圧縮強度、弾性係数の変化を調べた。一軸圧縮試験を行う直前にV_pの測定も行った。継続的な岩石の状態変化を見るために、D8の供試体についてそれぞれの乾燥、飽和作業終了時に各供試体の形状の変化を調べ、V_pを測定することで強度特性の変化を調べた。

2.6 試験の結果と考察

試験から得られた空隙率と圧縮強度の関係を図-2.1に、乾湿繰り返し試験から得られた圧縮強度の変化を図-2.2に示す。

乾燥試料の強度が飽和試料よりも強いことが、図-2.1から見て取れる。一方、図-2.2に示す乾湿繰り返し試験からは一度飽和した岩石でも再び乾燥することで完全とまではいなくとも強度がある程度復元されることがわかった。

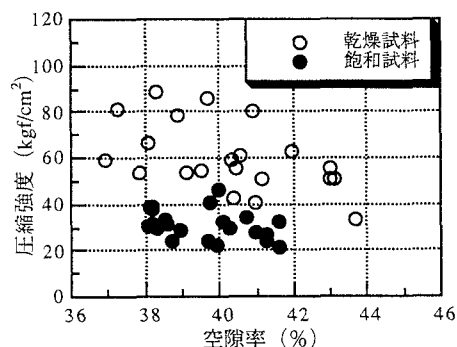


図-2.1 空隙率と圧縮強度の関係

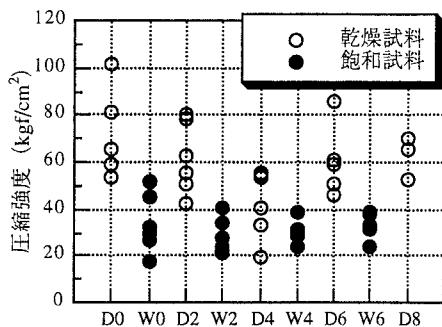


図 - 2.2 乾湿繰り返し試験による
圧縮強度の変化

これは、水の存在によりセメンテーションといった化学的な非可逆反応が起きているのではなく、水が粒子間に入り込み潤滑油の役割を果たしていると考えられる。一度飽和することである程度の強度の低下が見られるが、これは変質した鉱物が飽和過程で水に溶けだしたことによると考えられる。

3. 均質化法による非均質材料の 変形強度特性評価

3.1 均質化法²⁾

図1に示すような微視的周期構造を有する材料を考える。その単位格子をユニットセルと呼ぶ。

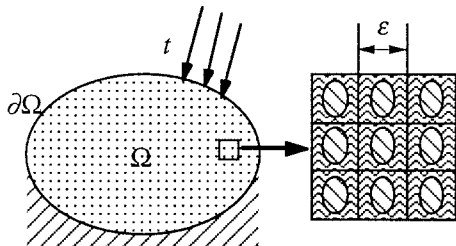


図 - 3.1 周期的微視構造を有する材料

このような材料の平均弾性係数および物体力は次式で与えられる。

$$E_{ijkl}^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left(E_{ijkl} - E_{ipq} \frac{\partial \chi_p^k}{\partial y_q} \right) dY \quad (1)$$

$$f_i^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y f_i dY$$

ただし、 $|Y|$ はユニットセルの体積であり、 χ^k は特性変位関数と呼ばれ、ユニットセル内で成立する次式を満足するものである。

$$\int_Y E_{ipq} \frac{\partial \chi_p^k}{\partial y_q} \frac{\partial v_l}{\partial y_j} dY = \int_Y E_{ijkl} \frac{\partial v_l}{\partial y_j} dY \quad (2)$$

(1)式で計算される均質化弾性係数 E_{ijkl}^H と均質化物体力 f_i^H を用いることで、微視的構造を持つ材料の平均変位場が評価できる。

3.2 極限支持力解析法

弾完全塑性材料からなる物体に荷重を作用させる限界まで増加させると物体は一定荷重のもとで変形が続く塑性崩壊を起こす。そのような荷重を極限荷重と定義する。極限支持力解析は、作用荷重を $\rho(X_i, T_i)$ (X_i : 物体力, T_i : 表面力, ρ : 荷重係数) として、物体が塑性崩壊を起こすときの極限荷重を与える荷重係数 ρ を求めるものである。

荷重系 $\rho(X_i, T_i)$ の作用のもとで物体が弾塑性挙動を生じているとき、物体内の応力 σ_{ij} は、単位荷重系 (X_i, T_i) とつり合う弾性応力成分を σ_{ij}^e として、 ρ 倍の弾性応力成分 $\rho\sigma_{ij}^e$ と残留応力成分 σ_{ij}^r によって、

$$\sigma_{ij} = \rho\sigma_{ij}^e + \sigma_{ij}^r \quad (3)$$

のように表すことができる。ここに、

$$\begin{cases} \sigma_{ij,j}^e + X_i = 0 & \text{in } V \\ \sigma_{ij}^e n_j = T_i & \text{on } S_T \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \sigma_{ij,j}^r = 0 & \text{in } V \\ \sigma_{ij}^r n_j = 0 & \text{on } S_T \end{cases} \quad (5)$$

すると、(3)式で与えられる応力は静的可容応力であることから、下界定理は次式を保証する。

$$f(\rho\sigma_{ij}^e + \sigma_{ij}^r) \leq 0 \quad (6)$$

3.3 線形計画問題としての定式化

複合的破壊条件面を区分線形近似し、(3)~(6)式に有限要素を適用することにより、次式の線形計画問題として定式化される。

$$s = \max \left\{ \rho \mid N^t (\rho \bar{\sigma}^e + \bar{\sigma}^r) \leq R, B^t \bar{\sigma}^r = 0 \right\} \quad (7)$$

ただし、 N は破壊条件面へ向かう単位法線ベクトルを並べたマトリックス、 R はそれぞれの破壊条件面の原点からの距離を並べたベクトル、 B は要素毎の変位ひずみ関係から構成される全体マトリックスである。また、 $\bar{\sigma}^e$ は、(1)式で与えられる均質化弾性係数を用いた線形解析により評価される。

これらによる解析の結果は、当日示す。

<参考文献>

- 1) 山口梅太郎, 西松裕一: 岩石力学入門, 東京大学出版会, pp125-132, 1991
- 2) T.Kyoya, T.Kawamoto: Quantitative evaluation of effect of pattern bolting by the homogenization method, A.A.BALKEMA, PP641-646, 1993