

軟岩の透水係数の応力依存性

京都大学工学部 正会員 赤井 浩一
 京都大学工学部 正会員 大西 有三
 京都大学大学院の学生員 八嶋 厚

1. まえがき

岩盤内を流れる浸透水の挙動は、現在に至ってもなお不明瞭な部分が多く、その影響による岩盤および構造物の破壊には予期しないものが多い¹⁾。今回の実験は、軟岩に作用している拘束圧を変化させる事によって、岩石内を流れる水の透水係数などのように変化していくかを測定し、Hydraulic Fracturing において、透水係数の変化が破壊にいかに関係しているかを示す。さらに、層理を有する岩石についても、拘束圧-透水係数関係を測定し、岩石構造による Hydraulic Fracturing の傾向について検討を加える。

2. 実験概要

今回の実験に用いた試料は、砂質シルト岩(いわゆる富岡層泥岩)で、ほぼ等方質の材料である。この試料を実験室において、外径: 5cm、内径: 1cm、長さ: 9cm に成形し供試体を作る。この供試体に改良した三軸圧縮装置で、軸圧、側圧、Back Pressure を作用させた後、供試体内孔にニードルバルブを通じて水を供給し、内圧を $0.1 \text{ (kg/cm}^2\text{)}/\text{min}$ の割合で上昇させていく。そして1分ごとの排水量をビュレットから読み取る。

3. 実験結果

粘土においては、間げき比 e と有効拘束圧 σ'_v の間には、 $e - \log \sigma'_v$ が表示で直線関係にあるという事が実験的に示されている。また、Gutter²⁾ は、実験データから透水係数 k と σ'_v の間には、次のような関係が成り立つ事を導き出した。

$$k = a / (\sigma'_v)^b \quad a, b: \text{定数} \quad (1)$$

岩石においても粘土同様に、実験データから、引張強度 σ_t とした場合、次のように透水係数と有効拘束圧の関係が求まる。

$$k = A / (\sigma'_v + T)^B \quad A, B: \text{定数} \quad (2)$$

(2)式は、 $\sigma'_v = -T$ という漸近線をもった曲線であり、 $\sigma'_v = -T$ の付近で、曲線は無限大勾配をもって上昇する。図-1には、サイクル1~3までの各サイクルごとの内孔壁面での σ'_v と透水係数 k の関係をプロットしている。サイクル2以後においては、岩石は引張強度をもたなくなり、(2)式で求めた漸近線は $\sigma'_v = 0$ に移行する。図-1において、 σ'_v 軸を縦軸、 k 軸を横軸にして見ると、これは、圧縮試験における応力-ひずみ関係と対比して考える事ができる。つまり、初期の直線と見られる部分は、圧縮試験における線形弾性部分に相当し、漸近線に近づき、大きな曲率を持つ始めてから以後は、降伏点に達してから破壊に至る部分と考えてよいだろう。またサイクル2以後は、残留強度を求める圧縮

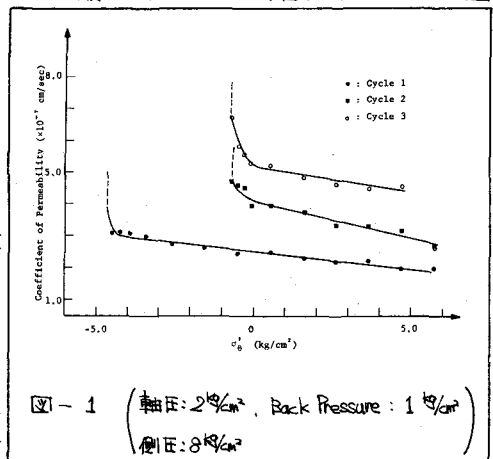


図-1 (軸圧: 2 kg/cm^2 , Back Pressure: 1 kg/cm^2
 側圧: 8 kg/cm^2)

試験の応力-ひずみ関係に対比させる事ができる。そして、岩石が脆性材料である事、また実験データにおいて、この曲率を持ち始めた位置から、ほぼ0.1~0.3 kg/cm²の拘束圧の減少で破壊が生じている事などから、岩の浸透を伴った引張破壊を論じる場合、たとえその岩の引張強度およびその他の物理的特性がわかっていなくても、透水係数のチェックをしていれば、応力-ひずみ関係のかわりに、ひ-ε関係を用いて、破壊の予測、さらには、いったん破壊した後での再加圧による状況まで一応の判断はできるのではないだろうか。

さて、本来岩石コア自体の透水性は非常に低く、浸透水の大部分は、不連続面をよって流れると言われている。従って、岩の透水性は、不連続面を流れる水で支配される。これは、実験室で行われる岩の透水係数が、現地の岩盤の透水係数に比べかなり低くなっている事からも判断できる。図-2には、前述の砂質ミルト岩、等方質の砂岩(神戸層砂岩)、層理を含んだ泥岩(椎谷層泥岩)の3種類の岩石について、拘束圧-ε関係をプロットしている。さて、図-2を見ると、拘束圧が大きい範囲では、砂岩、砂質ミルト岩に比べ、層理をもった泥岩の透水係数は極めて小さく、構造骨格自体は、このなかでは最も密であると判断され、層理などの不連続面が拘束圧が大きい範囲では完全に閉じており、岩の浸透は何

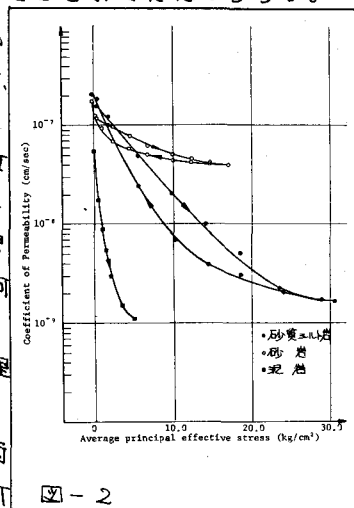


図-2

ら影響を与えていないと思われる。しかし、拘束圧の減少に伴い、3種類の岩の透水性は、その様相を逆転させる。つまり、拘束圧がゼロに近い範囲では、除荷による透水係数の勾配は、層理を持った泥岩が最も急である。これは、層理などの不連続面が岩自身の間げきよりも応力変化に対して緊密であり、透水性の応力依存度が極端である事を示している。

この結果より、Hydraulic Fracturingの破壊においては、層理をもった泥岩が最も危険であると判断できる。以上より、内部に断層、破碎帯などの不連続面を持った岩盤に、構造物もしくは基礎を築造する場合、築造前の無載荷状態における岩盤の透水係数は、拘束圧が非常に小さいために大きな値を示すが、築造後は、拘束圧が大きくなるため、岩盤の透水係数は、かなり小さな値を示す事が予想される。従って、特リガムのように浸透現象を考慮しなければならぬような構造物では、いったん透水現象の判断を誤れば、大惨事ともなりかねない。

4. まとめ

実験結果より、有効拘束圧がある値まで減少すると、透水係数が急激に上昇し、Hydraulic Fracturingによる引張破壊が起こる事がわかった。従って、透水係数の変化状況を調べておけば、ある程度までHydraulic Fracturingによる破壊は予想できる。次に、不連続面を持った岩石は構造骨格がどんなに密でも、有効拘束圧の減少、特に引張領域に至っては、透水係数が急激に上昇する。従って、このような地盤は、適切、有効に処理しなければならない。

＜参考文献＞ 1) Jaeger, C.: Engineering and Rock Mechanics, Water-Bower, 1970, May/June pp. 203-209
2) Guther, H.: Some Problems in Non-Homogeneous Seepage, M.Sc. Thesis, University of Alberta, 1972