

(15) 透水性軟岩の水圧破碎に関する室内実験について

京都大学工学部 赤井 浩一
" ○大西 有三
京都大学大学院 八嶋 厚

1. 目的

過大な開けき水圧の存在によつて引き起こされる水圧破壊 (Hydraulic Fracturing) という現象は、次の2つの点で注目を浴びている。すなわち、ロックフィルダム等のコアの部分が水圧破壊により破壊され、ダム本体が危険な状態に陥ることがある (最近の例としては、Teton Dam, U.S.A. の決壊事故が挙げられる) ことと、岩盤内の深い部分で、ボーリング孔を利用して水圧破壊を起こすことにより、地山の初期応力の測定が簡易にできるということである。

本研究の目的は、軟岩を試料に用い、すべての応力条件が制御された室内実験という条件下で水圧破砕の実態を検討し、力学的な解釈を加え実際問題への応用を考えることである。

水圧破碎の現場実験は、すでに各国において行われ、堅い岩盤に対しては数々の適用例が報告されており (Haimson, 1976, 1979), 日本でも最近, 科学技術庁国立防災科学技術センターで地下深部の応力測定が試みられている。しかし, これらの成果は難透水性の硬岩あるいは岩盤に対してのもので, 透水性の軟岩に対するものは全くない。軟岩の場合, 破壊に及ぼす透水性の効果, 間げき水圧の影響などが考えられ, 基礎的な研究なしでは, 現場への適用は困難であると考えられる。

2. 水圧破砕の考え方

無限の拡がりを持つた岩盤中に、深い鉛直の円孔がある場合を考える。そして、地盤状態を次のように仮定する。

(i) 応力に対して実験井の周囲は、破壊まで線形に弾性変形すること、(ii) ゼロ性破壊であること、(iii) 地層の力学的性質が均質かつ等方的であること、(iv) 鉛直主応力が抗井の軸と一致し、残りの2つは地表面に平行な主応力であること、(v) 不透水性であること。円孔軸に垂直な応力成分のうち、最大、最小圧縮力をそれぞれ σ_{Hmax} , σ_{Hmin} とすると、円孔壁に既存割れ目がなければ、円孔壁の応力状態は2次元弾性論によつて算出することができる。これによれば、円孔内の流体圧 P_b (破壊水压; Breakdown Pressure) により円孔壁に鉛直の亀裂が生じれば、

$$P_b = 3 \sigma_{H \min} - \sigma_{H \max} + T - P_0 \quad (1)$$

が成り立つ。ここで P_0 は初期の閉きき水圧， T はこの岩盤を構成している岩石の引張強度である。一方，破壊後流体圧を下げ，亀裂面と垂直な方向の地盤応力 σ_{Hmin} と，亀裂内の水圧とが平衡したときの水圧を P_{16} とすると，

$$P_{Tg} = \sigma_{Hmin} \quad (2)$$

と仮定できる。そして(2)式の結果を(1)式に代入する事によつて σ_{Hmax} の値も推定される。また仮定(IV)より鉛直主応力は土かぶり圧として計算され、目標である三主応力は全て算出される事になる。しかし、地盤の応力状態によつては亀裂が水平方向に発生する事も予想される。この場合(4)式は成立せず、水平主応力の算出はできなくなる。いま地下水位を地下 h m と仮定すると、地盤内の応力状態による亀裂の発生のパターンは、図-1 に示すように A, B, C, D の4つの領域に分けられる。表-1 から明らかなように、三主応力が全て算出できるのは A, C の2領域であり、領域 B においては土かぶり圧から鉛直主応力が求まるに過ぎない。ここでは流体圧上昇にともなう円孔壁での σ_z , σ_θ の変化の割合を Kenle (1964) によるものとした。しかし、実際用いられているパツカーは彼のモデルのような固いものではなく、ゴム製であるからパツカーと円孔壁との接触面において多少の圧力も加わり、水平の亀裂が入る可能性は図-1 に示すよりも少なくなる。以上は、不透水性を仮定できる堅い岩盤に対しての理論であるが、本研究で取り扱うような透水性軟岩で構成される地盤では(1)式はこのままでは成り立たない。つまり、流体圧上昇にとも

なつて浸透現象が顕著になり、岩盤内で間げき水圧が勾配を持ち(1)式に示されるような簡単な境界値問題の解と考えることができなくなる。ここでは間げき水圧の円孔半径方向の微係数が平衡方程式において物体力の項となり、相当複雑な式を解かねばならない。そこで、当然浸透現象を呈しない程度の大きなポンプの作動が考えられるが、これを採用すると今度は P_b が多少大きめにあらわれる可能性がある。したがつて、ポンプの吐水量の判断は非常に重要である。また間げき水圧の効果により、図-1の水平の亀裂の可能性はさらに大きくなることが考えられる。

3. 実験手法

本研究に用いた試料は、富岡層泥岩（粒度分析の結果、砂質シルト岩）でほぼ等方的な材料である。この試料を外径50mm、内径10mm、高さ90mmに成形し供試体を作る。実験に用いた装置は標準的な三軸圧縮装置を図-2に示すように改良したものである。セル上部のロードと接続しているペロフラムシリンダーにより、圧縮、伸長の両応力状態を作り出すことができる。このセルでは側圧の上限は10kg/cm²である。また、内孔の状態を実験井のそれと類似させるために、上下両ベDESTALの中央部分に内径と同じ径をもつた長さ2cmの突起部を設けている。これから、亀裂の生ずると思われる範囲は供試体の中央5cmとなる。流体圧供給装置としては、別の被圧セルからニードルバルブを通して下部ベDESTAL中央部へ水を供給する。測定は上部ベDESTAL中央部からシンプレックスチューブを伸ばし、ひずみゲージタイプの間げき水圧計を用いてX-Yレコーダーに記録してゆく。本研究で制御するものとしては、軸圧、側圧、Back Pressure、内圧上昇率である。これらの制御条件下で円孔壁において亀裂が発生し、X-Yレコーダーの流体圧-時間曲線が急激に降下し始めるまでニードルバルブのつまみを調節しながら流体圧上昇を図る。これと平行して排水量を記録し透水係数の変化の様子を見る。

4. 実験結果とその解釈

用いた供試体を弾性であると仮定し、中空円における軸対称問題として円孔壁での σ'_θ を解くと、不透水状態の場合には(1)式と同様に

$$\sigma'_\theta = \frac{1}{6} \cdot (12.5 \sigma_3 - 6.5 P_b) - \text{Back Pressure} \quad (3)$$

として求めることができる。この場合、供試体内の間げき水圧の分布は図-3(a)に示されるような一様分布をしている。しかし、これは内圧上昇率が非常に大きな場合にのみ妥当であり、このような時には Breakdown Pressure の過大評価の危険性が非常に高くなる。これを防ぐために、適切な内圧上昇率を選択するわけであるが、そのような時しばしば流体圧の増分に対して供試体内への浸透現象が生じ、間げき水圧の分布は図-3(b)のようになるものと想像される。特に透水性軟岩を対

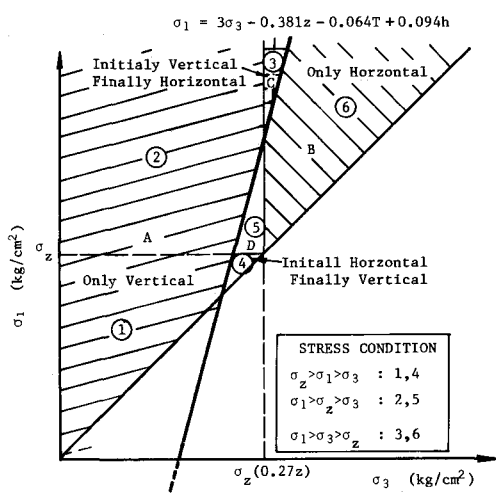


図 - 1

領域	測定される主応力		
	σ_z	σ_r	σ_θ
A	○	○	○
B	○	×	×
C	○	○	○
D	○	最小 最大 値制限	○

表 - 1

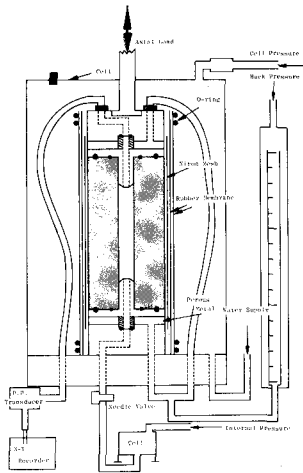


図 - 2

象とする時には、内圧上昇率がかなり高い場合においても浸透現象が起こり、供試体内の間げき水圧分布に勾配ができるものと考えられる。本研究では、透水性の度合の一つの目安として、円孔内の流体圧増分 ΔP_i に対する円孔壁内での間げき水圧の増分の比として、 α なるパラメータを導入し、これを「水の貫入係数」と呼んだ。このパラメータの導入により、図-3の(A)、(B)、(C)のあらゆる場合において、円孔壁での σ'_0 の値を解くことができるようになった。間げき水圧の勾配を平衡方程式における物体力の項に代入し次式を得た。

$$\sigma'_0 = 0.08 \left\{ 26.15 \sigma'_s - 13.00 \Delta P_i (1 + 0.61 \alpha) \right\} \quad (4)$$

($0 \leq \alpha \leq 1$)

$\alpha = 1$: 図-3 (A)に相当し、時間的遅れのない定常浸透状態を表わす。

$0 < \alpha < 1$: 図-3 (B)に相当し、時間的遅れをとらなかつた非定常浸透状態を表わす。

$\alpha = 0$: 図-3 (C)に相当し、不透水状態を表わし、結果は(3)式と同じになる。

今回、軸圧: 8 kg/cm^2 , 側圧: 2 kg/cm^2 , Back Pressure: 1 kg/cm^2 に固定して、内圧上昇率だけを $0.02 \sim 3.00 (\text{kg/cm}^2)/\text{min}$ の範囲で変化させて12通りの実験を行い Breakdown Pressure を観測した。その結果を表-2に示す。この実験においては亀裂は全て鉛直方向に発生しており、これは応力状態からも予想がつく通りである。今回、実験結果の整理方法として便宜的に内圧上昇率 $0.1 (\text{kg/cm}^2)/\text{min}$ における α の値を1.0と仮定して解析した。この仮定は実験の後半で内圧上昇率が $0.1 (\text{kg/cm}^2)/\text{min}$ 以下に下げた場合の Breakdown Pressure の読みが、 $0.1 (\text{kg/cm}^2)/\text{min}$ のものと大差なくほぼ同一と判断してもさしつかえない事から妥当であつたと言える。したがって内圧上昇率 $0.1 (\text{kg/cm}^2)/\text{min}$ 以下については全て $\alpha = 1$ と考えてよい。さて、不透水状態を目指して内圧上昇率を上げていくわけであるが、その目安として $\alpha = 0$ の状態を明確にせねばならない。そこで α を次のようにして求める。内圧上昇率 $0.1 (\text{kg/cm}^2)/\text{min}$ の時 Breakdown Pressure は 4.86 kg/cm^2 となり(4)式の ΔP_i に ΔP_b として 3.86 を代入すると、 $\sigma'_0 = -4.63 \text{ kg/cm}^2$ を得る。これを水圧破壊引張強度と考え、 σ'_0 がこの応力値に達すると亀裂が生ずるものと仮定する。するとそれぞれの内圧上昇率における ΔP_b により α の値は次のように定まる。

$$\alpha = (6.18/\Delta P_b - 1) / 0.61 \quad (5)$$

(5)式を用いてそれぞれの場合の α を求めた結果を表-2に示す。そして内圧上昇率と α の関係を、半対数紙上で図-4に示している。この図から、内圧上昇率の対数と α の関係は3本の直線で表現されると考えてよからう。つまり、内圧上昇率 $0.15 (\text{kg/cm}^2)/\text{min}$ 以下では常に $\alpha = 1$ 、内圧上昇率が $0.5 (\text{kg/cm}^2)/\text{min}$ から $1.0 (\text{kg/cm}^2)/\text{min}$ までの範囲では α は直線的に減少し、内圧上昇率 $1.0 (\text{kg/cm}^2)/\text{min}$ 以上では常に $\alpha = 0$ の状態と考えられる。したがって、硬い岩盤で

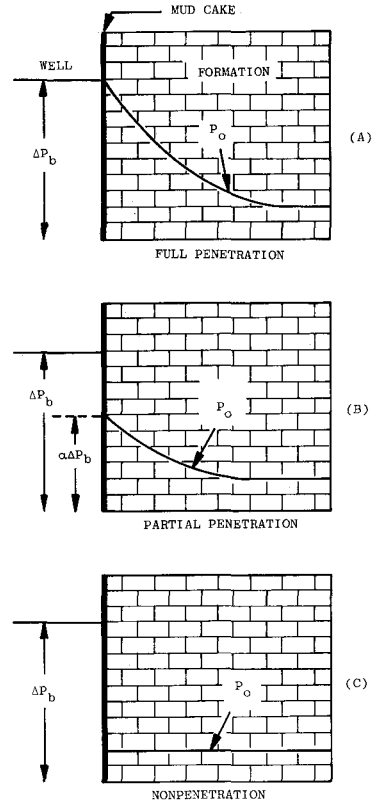


図-3

Sample No.	Pressurization rate (kg/cm ²)/min.	Breakdown Pressure kg/cm ²	Degree of Penetration
P-1	0.02	4.96	0.99
P-2	0.04	4.80	1.03
P-3	0.05	4.84	1.00
P-4	0.10	4.81	1.02
P-5	0.10	4.87	0.98
P-6	0.30	5.49	0.82
P-7	0.50	5.97	0.40
P-8	0.70	6.57	0.18
P-9	0.80	6.60	0.17
P-10	1.00	7.01	0.05
P-11	2.00	7.03	0.04
P-12	3.00	7.08	0.03

Result: Vertical Fracture

表-2

Sample No.	Pressurization rate (kg/cm ²)/min.	Breakdown Pressure kg/cm ²	Degree of Penetration
P-13	4.00	7.15	0.01
P-14	4.00	7.80	zero
P-15	5.00	8.31	zero
P-16	5.00	8.55	zero
P-17	10.00	13.70	zero

表-3

の調査の際の仮定としての不透水状態は、内圧上昇率が $1.0(kg/cm^2)/min$ の範囲で得ることができる。しかし、この範囲においてもなお考えなければならないことがある。つまり Breakdown Pressure の過大評価の起こる危険性の問題である。表-3 に内圧上昇率をさらに $4.0 \sim 10.0(kg/cm^2)/min$ まで上昇させた 5 通り実験の結果を示すが、この表から明らかなように Breakdown Pressure の過大評価の傾向は内圧上昇率の上昇ともなつて顕著となる。(5)式より、 ΔP_b が 6.18 以上、つまり $P_b = 7.18$ 以上では α が負と計算されるが、実際には α の負の値は存在しない。したがつて、表-3 においては計算の結果負となつた α を全て英文字 zero で表わした。表-2、表-3 より Breakdown Pressure の過大評価を生ずることなく、供試体内を常に不透水状態に保つておくためには、内圧上昇率を $1.0 \sim 3.0(kg/cm^2)/min$ という非常に限られた範囲で実験を行わなければならないことがわかる。

次に内圧上昇率の違い、つまりこれは供試体内での間げき水圧の分布の違いを意味するのだが、これによつて同じ応力状態（間げき水圧を除いた応力）でも、亀裂の入り方に違いができる可能性があるが、それについて検討した。実験は軸圧： $4kg/cm^2$ 、側圧： $4kg/cm^2$ 、Back Pressure： $1kg/cm^2$ で行つた。この時の Breakdown Pressure の値と、亀裂の入り方について表-4 に示した。これより、内圧上昇率 $1.0(kg/cm^2)/min$ 以下においては R-2 を除いて写真-1 に示すような水平方向の亀裂が発生した。また内圧上昇率 $2.0(kg/cm^2)/min$ の場合には写真-2 に示すような鉛直方向の亀裂が発生した。この亀裂形状の違いは、円孔壁での σ_θ と σ_z のどちらが早く岩の引張強度の値まで到達するかということに依存している。内圧上昇率が低く、間げき水圧の分布が大きくなるほど σ_z の減少の速度が速くなり、水平方向の亀裂が発生するものと考えられる。

5. 結論

今回の実験の結果より、透水性軟岩を対象にして水圧破砕法で初期地圧測定を行う場合には、堅い岩盤を対象とする場合と違つて、間げき水圧の挙動に留意しなければならない。このことは、ポンプの吐水量をどの程度のものにしたらよいかという問題に直接的に関わる。前節より Breakdown Pressure の過大評価を生ずることなく、岩盤内を常に不透水状態に保ち、さらに常に鉛直方向の亀裂を生じさせるためには、採用できるポンプの吐水量の範囲は非常に小さくなる。また場合によつては、そのような吐水量の決定が不可能になることもあり得る。そのような場合には、岩盤を構成する岩石を供

試体として本研究で行つた一連の基礎的実験を行い、その岩盤のもつ特性を適格に把握すれば、水圧破砕法での測定は十分に妥当であり、岩盤を構成している岩石が透水性軟岩であることが多い日本のような場合においても、トンネル、地下空洞内で手軽に行うことができる。最後に、本研究において実験面で多大の貢献をしてくれた上出厚君に感謝します。

参考文献

- 1) Haimson, B. C. (1976), Int. Soc. Rock Mech. Sympo. Sydney, pp. 23-30
- 2) Kehle, R. O. (1964), J. Geophys. Res. Vol. 69, pp. 259-273

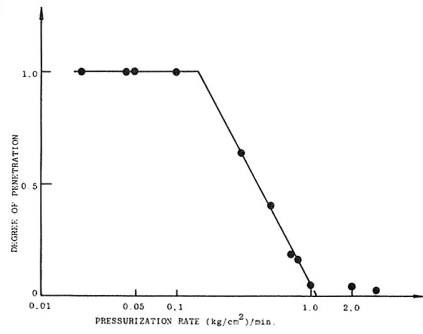


図 - 4

Sample No.	Pressurization rate (kg/cm ²)/min.	Breakdown Pressure kg/cm ²	Result
R - 1	0.1	7.75	Horizontal
R - 2	0.5	9.70	Both
R - 3	1.0	9.10	Horizontal
R - 4	1.0	6.50	Horizontal
R - 5	2.0	9.75	Vertical

表 - 4

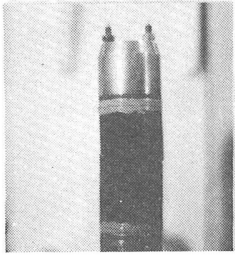


写真 - 1

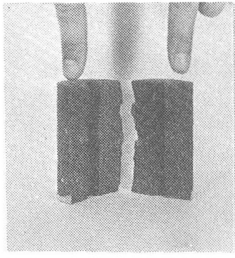


写真 - 2

LABORATORY EXPERIMENTS OF HYDRAULIC
FRACTURING ON PERMEABLE SOFT ROCK

Koichi AKAI
Yuzo OHNISHI
Atsushi YASHIMA
(Kyoto University)

Hydraulic fracturing technique has recently been used worldwidely to determine the in-situ stress in the earth's crust. Most of the works deals with the hard impermeable rock mass and therefore the theories are built to suit for such rock. However, in Japan, we often encounter the permeable soft rock mass which usually causes a lot of trouble in construction work. The in-situ stress determination in such soft rock mass has been hoped to ease the design and analysis of rock structures. Stress measurement in soft rock is not easy because it is often saturated and so is difficult to use strain gauges. Feasibility study that the hydraulic fracturing technique may be or may not be applied to soft rock (mudstone, for example) was done in a modified triaxial cell. The mechanical behavior of soft rock due to injection of pressurized water was also investigated. Vertical and also horizontal fractures were created in the cell under the various stress conditions. Flow rate and pressure increase rate in the drilled hole were found to be very influential to the generation of fracture and fracture orientation.