

III-199

軟岩の室内水圧破碎実験とAE特性

竹中技術研究所 正員 〇上田貴夫 高橋三津彦
中崎英彦

1. はじめに

近年ダム建設の需要は依然として高いにもかかわらず、ダム適地が減少してきている。これに伴って基礎岩盤が、最適とは言えない地点へのダム建設も余儀なくされており、グラウト工事の重要性が高くなってきた。特に、最近ではダム基礎として軟岩が採用されることが増加しているが、グラウトの効率を上げるために注入圧を上げすぎると岩盤破壊につながることもあり、注入限界圧の決定には苦慮している現状である。

現在、注入限界圧の決定法としてはグラウト注入前に水押しを実施し、その結果と注入箇所の岩盤のかぶり等を考慮して限界圧を決め、グラウト注入時に注入圧～注入量の関係を見て適宜変更していくという方法をとっている。しかし、この方法では経験に頼るところが大きく、岩盤の持ち上げ等、有害な変形を起こしてしまう例もあった。筆者らは、今まで注入管理へのAE(アコースティック・エミッション)の適用性を検討してきたが¹⁾、その一環として、今回、合理的な限界圧の決定法を検討するため、人工軟岩を用いた室内水圧破碎実験を実施し、AE計測を同時に行った。そして、注入限界圧破壊形態によるAE発生状況等について検討を加えたのでここで報告する。

2. 岩盤の水圧破碎時における挙動について

均質かつ等方的な充分な大きさの岩盤に、鉛直の深い注入孔がある場合を考え、以下の仮定を設定する。

1) 注入孔の周囲は応力に対し破壊まで線形に弾性変形する。2) ぜい性破壊をする。3) 鉛直主応力は注入孔の軸に一致し、残りの2つの主応力は地表面に平行である。4) 不透水性である。5) 注入孔壁には先行亀裂がない。以上の仮定により、注入孔壁の応力状態は二次元弾性論によって次のように表現される。

$$P_b = 3\sigma_3 - \sigma_2 + T \quad (1)$$

ここで、 P_b は注入孔壁の破壊水圧、 σ_3 、 σ_2 はそれぞれ円孔軸に垂直な応力成分のうち最少、最大圧縮力、 T は岩盤の引張強度である。また、 $\sigma_3 = \sigma_2$ のとき、

$$P_b = 2\sigma_3 + T \quad (2)$$

これに対して透水性岩盤であることを考慮すると、

$$P_b = \left(\frac{1-\nu}{1-N\nu} \right) (2\sigma_3 + T) \quad (3)$$

ここで、 ν は岩盤のポアソン比、 N は注入孔を拡張するのに使われる流体圧の比率である²⁾。

一方、長さ a の二次元先行亀裂が注入孔壁に存在する場合を考えると、破壊力学においては先行亀裂が進展する条件は次式で表される³⁾。

$$[(P_b - \sigma_2)f_2 + (\sigma_2 - \sigma_3)f_1]\sqrt{\pi a} = K_{IC} \quad (4)$$

ここで、 K_{IC} は岩の開口型破壊靱性であり、 f_1 、 f_2 は注入孔の半径を b としたとき a/b によって変化する係数である。これも、 $\sigma_3 = \sigma_2$ のとき、

$$(P_b - \sigma_3)f_2\sqrt{\pi a} = K_{IC} \quad (5)$$

上式を変形すると、

$$P_b = \frac{K_{IC}}{f_2\sqrt{\pi a}} + \sigma_3 \quad (6)$$

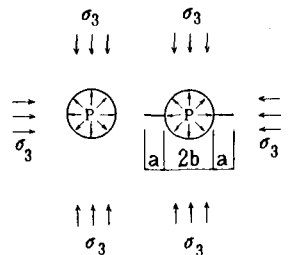


図-1 注入孔周辺の作用応力の概念図

以上により、試料を水圧破碎した場合には式(3)、式(6)で注入破壊水圧が求められる。以下に実験でこの式の妥当性を検証する。

3. 実験の手法

本実験に使用した試料は豊浦標準砂、石膏および水を混合して硬化させたもので、強度を変えた次の2種類の混合比の供試体を用意した。すなわち、シリーズ1（砂：石膏：水＝3：1：1）と、シリーズ2（砂：石膏：水＝4：1：1）である。これを直径5cm、高さ10cmの円筒形に整形し、中心に外径0.94cmの有孔ビニールパイプを挿入して注入孔とした。それぞれのシリーズについて、先行亀裂が0mm、5mm、10mmの3種類を作成した。この試料を図-2に見られるような三軸圧縮試験装置を改良したものの中に設置し、上部ベDESTALより注水して水圧破碎させた。水圧の上昇速度は0.6Kg/cm²・minである。また、側圧は表-1に見られるようにそれぞれについて3種類とした。AEセンサーは上部ベDESTAL内に設置し、注水開始と同時に計測を開始して破壊するまで継続した。また、すべての試料について再注入を試み、亀裂再開口圧を求めた。また、(4)式における破壊靱性 K_{IC} を求めるために、同一試料について三点曲げ試験を実施した。

4. 実験の結果および考察

$P_b \sim \sigma_3$ について、それぞれプロットしてみると図-3、図-4のようになる。これらの図より、先行亀裂長を0mmから10mmまで変化させると亀裂長が長い方が当然破壊強度は低くなるが、 $dP_b / d\sigma_3$ は0.7～1.1でほぼ1であることがわかる。亀裂長が5mmと10mmのものについては(6)式よりそれが予想されるものの、先行亀裂のない条件については $\nu=0.3$, $N=0.0015$ （文献²⁾による推定値）とすると(3)式では $dP_b / d\sigma_3$ はほぼ1.4となり、実験結果をうまく説明することができない。これは注入孔周辺の材料のムラや微細な凹凸が先行亀裂として作用するためではないかと考えられる。

$P \sim Q \sim AE$ の関係を図-5および図-6に示す。図-5は試料中にとり込まれた気泡等の弱線を通してパイピングをおこし、破碎に至らなかった例である。破碎した試料について示した図-6に比較してAEのカウントが徐々に増加しており、発生傾向から両者は明確に区別できる。このことは、筆者らが提案している $P \sim Q \sim AE$ による注入管理手法の妥当性を裏付けるものと考えられる。

図-7および図-8は(6)式の理論曲線と実測値の対応を見たもので、これから(6)式が妥当であることがうかがえる。実際の注入対象地盤は、亀裂性岩盤がほとんどであるから、従来の弾性論的考え方による注入限界圧より、破壊力学を適用して注入限界圧を求めた方がより適応性がよいと判断される。

表-1 試験条件表

試験番号	先行亀裂長さ mm	側圧 σ_2 kg/cm ²	側圧 σ_3 kg/cm ²
シリーズ1			
1-1	0	0.5	4.5
1-2	0	1.0	4.5
1-3	0	2.0	4.5
1-4	5	0.5	4.5
1-5	5	1.0	4.5
1-6	5	2.0	4.5
1-7	10	0.5	4.5
1-8	10	1.0	4.5
1-9	10	2.0	4.5
シリーズ2			
2-1	0	1.0	3.0
2-2	0	2.0	3.0
2-3	0	3.0	3.0
2-4	5	1.0	3.0
2-5	5	2.0	3.0
2-6	5	3.0	3.0
2-7	10	1.0	3.0
2-8	10	2.0	3.0
2-9	10	3.0	3.0

図-2 試験装置

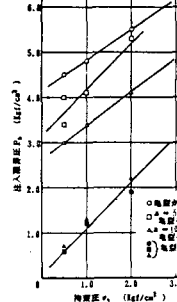


図-3 $P_b \sim \sigma_3$ 関係 (シリーズ1)

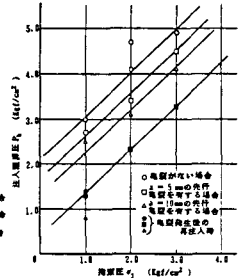


図-4 $P_b \sim \sigma_3$ 関係 (シリーズ2)

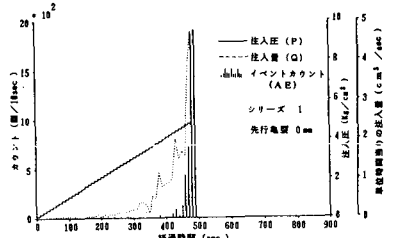


図-5 $P \sim Q \sim AE$ 関係

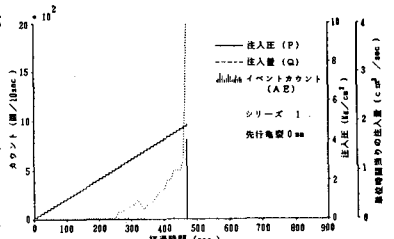


図-6 $P \sim Q \sim AE$ 関係

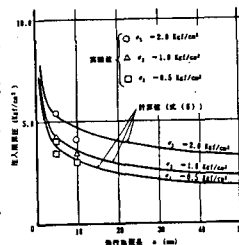


図-7 注入限界圧～亀裂長の関係 (シリーズ1)

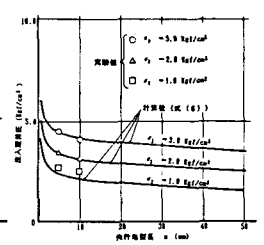


図-8 注入限界圧～亀裂長の関係 (シリーズ2)

- 参考文献 1) 上田 徳, 第20回土質工学研究発表会, 1985
2) H.Y.Wong et al., Rock Mechanics 5, 1973
3) 阿部 徳, エネルギー・資源, 4-6, 1983