

破壊力学による処分孔周辺岩盤の水圧破碎解析

京都大学 学生会員 ○塚田 泰博

京都大学 正会員 小林 晃 青山 咸康

GFZ 非会員 Ove Stephansson

核燃料サイクル機構 非会員 川上 進

1. 目的

処分孔掘削後の二次応力状態は、孔周方向の一軸応力状態となり、半径方向には拘束圧が非常に小さい状態となる。そこに埋め戻し後、水位回復による高水圧が作用する。そのような場合、処分孔周辺で水圧破碎が起こる危険性が高い。本研究はそのような水圧破碎の発生基準を策定することを目的とし、一軸応力下における水圧破碎実験を行い、その結果を破壊力学および弾塑性有限要素解析によりシミュレートした結果を報告する。

2. 水圧破碎実験結果

岩盤を模擬した 1x1x1m の水セメント比 50%、材齢 15 日のモルタル供試体を作成した。地下深部 300m 以深を想定して 15MPa で一軸圧縮されている供試体に、載荷速度 5.43kPa/sec. で、注入口より水圧を載荷した。水圧は図-1 の亀裂部分（深度 40~60cm の部分）にゴムスリーブを設置してその中に作用させた。そして注入圧の経時変化を水圧計で計測した。注入開始後 648 秒付近で注入圧が 3.48MPa を記録した後、注入圧は急激に減少し、破壊した。図-2 に底から高さ 45cm における供試体の切断面の状況写真を示す。同図右から載荷しており、3 つの亀裂先端からクラックが生じていることがわかる。

3. 破壊じん性試験

供試体に用いたモルタルの破壊じん性試験を行った。まず、モード I の修正応力拡大係数 K_{IC}^C を ISRM が提唱する 3 点載荷の方法で求めた。その結果を表-1 に示す。試験は 3 回行ったが、再現性の高い結果となった。そして亀裂の垂直剛性 K_N を亀裂のある供試体に行った一軸載荷の変位-応力関係から亀裂の無い供試体のそれを引くことにより求めた亀裂の変位-応力関係から計算した。そして、次式的双曲線モデルで近似した。

$$s = \frac{a\Delta COD}{1 - b\Delta COD} \quad (1)$$

ここで、 ΔCOD は亀裂を挟んでつけたクリップゲージによる変位の増分である。表-1 には初期垂直剛性および上式の係数の値も示す。

モード II の応力拡大係数 K_{IIC} をパンチせん断試験により求めた。この手法は図-3 に示すように円筒供試体を加工し、拘束圧をかけた状態で中央の円筒部分を載荷することにより上下のノッチに挟まれた健全部分にせん断破壊を起こす手法である。 K_{IIC} を拘束圧 P の関数として次式で近似した。その結果も表-1 に示す。

キーワード 放射性廃棄物処分、水圧破碎、破壊力学
連絡先 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町

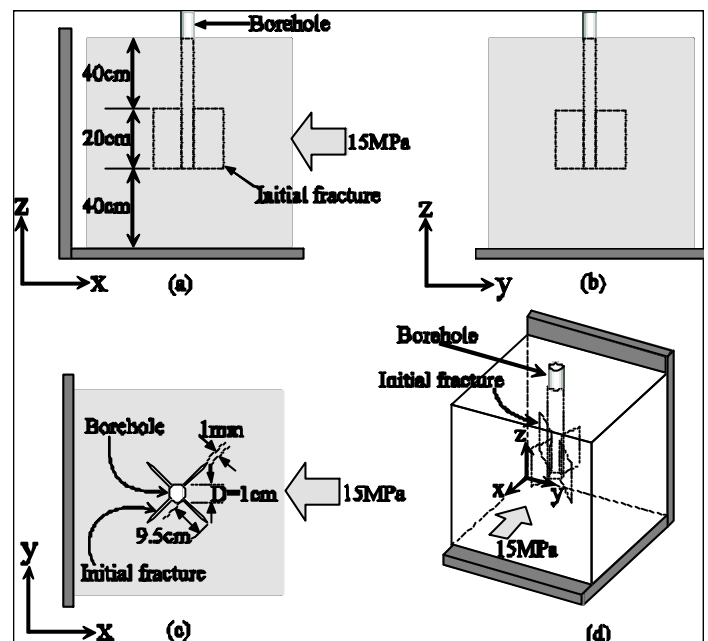


図-1 実験供試体の概要

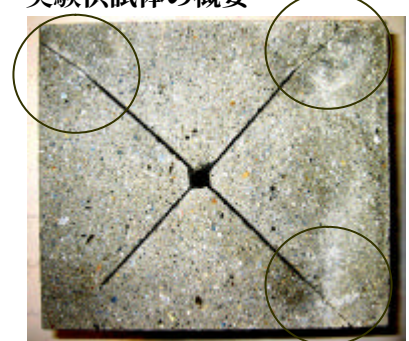


図-2 亀裂部位の切断面

$$K_{IIC}^P = K_{IIC}^0 + K_{IIC}^\infty (1 - e^{cP})$$

(2)

表－1　じん性試験結果一覧

供試体 No.	K_{IC}^C (MPam ^{0.5})	K_{NI} (GPa/m)	a	b	K_{IIC}^0 (MPam ^{0.5})	K_{IIC}^B (MPam ^{0.5})	c
1	0.90	200	71.57	37.27	0.30	0.13	1.86
2	0.94	159	189.83	32.22			
3	1.02	39	71.29	25.37			

4. 破壊力学による解析

以上の実験結果を用いて、境界要素法を用いた破壊力学による解析を行った。このコードは FRACOD と呼ばれ、グリフィス破壊条件をモード I と II のエネルギー解法率の足し合わせで定義している。このようにすることによって、引張破壊とせん断破壊の両者による亀裂の進展をシミュレートすることができる。まず、実験と同様に 15MPa の一軸载荷を行った。その結果、図－4 に示すようにこの時点で亀裂が進展した。そして、この亀裂はせん断亀裂である。次に一軸载荷と同時に水圧破碎が生じた圧力を孔に作用させると図－5 のようにせん断亀裂が進展した。そして、この亀裂の進展方向は図－2 に示した実験での観察結果と非常によく似ている。実験においては、一軸载荷時に中央の亀裂部分ではないが、供試体の端部に亀裂が入った。これは恐らく载荷面が偏心していたためと思われるが、一軸载荷によって供試体に亀裂が生じた事実とも整合が取れている。

5. 連続体による解析

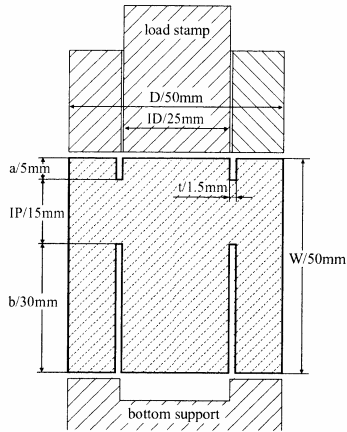
FRACOD による解析を検証するために連続体モデルによる解析も行った。構成則にはカムクレイを用いた。主なパラメータを表－2 に示す。モデルでは非常に大きな過圧密状態となっている。

図－6 に亀裂先端部と孔底部での有効応力経路を示す。亀裂先端では最初の一軸载荷でせん断応力が上昇した後、孔内で载荷しても応力状態はほとんど変化しない結果になった。一方、孔底部では一軸载荷したときに降伏し、降伏曲面が拡大した後、孔内で载荷すると、吸水膨潤して軟化挙動を示す。

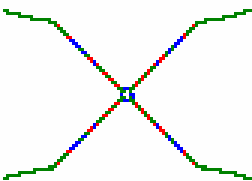
以上の連続体による解析結果は FRACOD による破壊力学による解析結果と調和的であり、本実験での亀裂はせん断破壊による亀裂である可能性が高いことが分かる。

6. 考 察

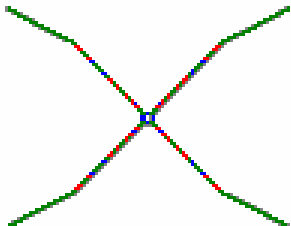
一般に水圧破碎時の亀裂は引張破壊と考えることが多い。引張破壊であれば、主応力方向に亀裂が延びるので、今回の実験では、図－5 の水平方向に伸びることになるが、図－2 に示すように今回はそのような結果にならなかった。それを破壊力学および連続体解析で検討した結果、今回用いたような K_{IIC} が K_{IC} よりも小さい延性的な材料では、せん断破壊が起こる可能性が分かった。



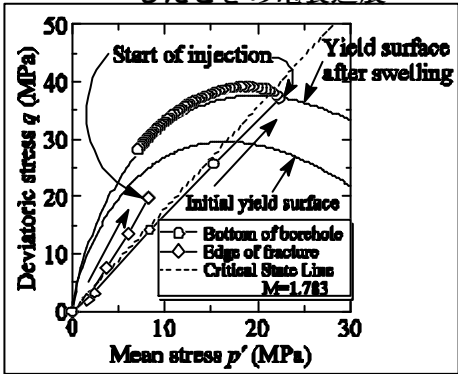
図－3　せん断試験概要



図－4　一軸応力状態での亀裂進展



図－5　一軸応力状態で水圧载荷したときの亀裂進展



図－6　亀裂先端と孔低での応力経路

表－2　カムクレイパラメーター

圧縮指数λ	0.0034
膨潤指数κ	0.0017
ダイレイタンスー係数D	0.001
限界状態パラメーターM	1.783