

## 拘束圧を制御した花崗岩の室内水圧破碎実験

愛媛大学大学院 学生会員 ○佐古大地 正会員 安原英明  
正会員 木下尚樹

### 1. はじめに

地熱発電の開発を阻害している要因の1つに、地熱貯留槽周辺岩盤の低透水性が挙げられる。地熱発電では、貯留槽からの地熱流体（蒸気・熱水）を回収し使用するため、周辺岩盤が低透水性である場合、蒸気生産量が十分に得られない可能性がある。この対策として開発が進められている地熱増産システム（EGS : Enhanced (or Engineering) Geothermal System) <sup>1)</sup>は、水圧破碎を用いて人口的に亀裂を造成・進展させることで透水性を改善する技術である。今後のEGS技術向上のため、水圧破碎により発生する亀裂進展の把握が必要不可欠である。そこで本研究では、稲田花崗岩を対象に拘束圧を制御した室内水圧破碎実験を行い、水圧の減少及び側圧の上昇から供試体の破碎を確認した。また、得られた破碎圧から間隙水圧の影響を確認した。

### 2. 水圧破碎実験

#### 2.1 実験方法

供試体作製方法及び、実験方法について説明する。まず、供試体作製方法について説明する。本研究では、岩石の強度異方性を把握するため、供試体作製前に岩石ブロックに対する弾性波試験を行った。測定点は、岩石ブロックにおける方向の異なる3面に、各面3つずつ設けた。計測した結果を表1に示す。また、本実験に用いた非貫通円孔を中央に有する供試体（直径30mm、高さ60mm、円孔深さ30mm）を図1に示す。表1を基に、最も強度が高いHardway面、最も強度が低いRift面、その間となるGrain面を把握し、Hardway面とRift面が直行する様Grain面に対してボール盤を用いてφ10mmの非貫通円孔を掘削した（図2）。次に、ボーリングマシンを用いてコアリングを行い、中央に非貫通円孔を有するφ30mmの供試体を作製した。最後に、研磨機を用いて円柱の両端面を研磨し、円孔深さ30mm、供試体高さ60mmとなるよう成形し、24時間以上脱気した。

次に、実験方法について説明する。本実験では、高温・高圧三軸透水試験装置を使用して水圧破碎を行った。実験装置概要図を図3に、実験条件を表2に示す。まず、供試体をネオプレンゴム、熱収縮チューブで被覆しセルに設置した。次に、ハンドポンプによる軸圧16MPa（最大主応力）と三軸圧縮試験機による側圧（最小主応力）を载荷した。ただし、供試体（IGG10）は破碎圧が実験前に想定を超え、軸圧16MPaを上回る可能性があり、19MPaとした。そして、ハイドロポ

ンプを用いて水圧を増圧し、レギュレータで制御し供試体中央の非貫通円孔に加圧した。最大水圧への到達を確認後、透水を終了した。

表1 弾性波試験結果

	平均速度 [km/s]
Hardway 面	4.16
Grain 面	4.08
Rift 面	3.73



図1 非貫通円孔を有する供試体

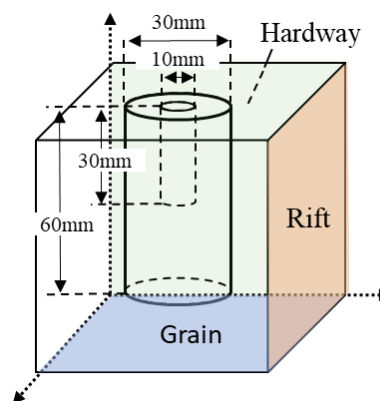


図2 異方性を考慮したコアリングイメージ

## 2.2 実験結果

本節では、実験結果について述べる。供試体 (IGG8) の水圧、側圧の経時変化を図 4 に示す。水圧が破碎圧 11.9 MPa を示した後、減少を始め、それとほぼ同時に側圧の上昇が確認された。ここで、破碎圧は測定された最大水圧とする。この挙動は、非貫通円孔から供試体側面に亀裂が発生した事によるものと考えられる。各供試体 (IGG7~IGG10) の破碎圧を図 5 に示す。また、図 5 には森ら<sup>2)</sup>を参考に、式(1)および式(2)に示す破碎圧算定式から算出した側圧と破碎圧の関係を示している。なお、式(1)、式(2)は、破碎時における孔壁の間隙水圧が破碎圧に及ぼす影響を考慮している。

$$u = u_0 \text{ の時, } P_f' = 2 \cdot \sigma_3' + \sigma_t \quad (1)$$

$$u = P_f \text{ の時, } P_f' = \sigma_3' + \sigma_t / 2 \quad (2)$$

ここで、 $P_f'$ : 有効破碎圧 [MPa],  $\sigma_3'$ : 最小有効主応力 [MPa],  $\sigma_t$ : 圧裂引張強さ [MPa],  $u$ : 間隙水圧 [MPa],  $u_0$ : 背圧 [MPa],  $P_f$ : 注入圧 [MPa] である。また、本実験では、背圧  $u_0$  は 0 MPa を、圧裂引張強さ  $\sigma_t$  は Rift 面における強度を予め測定しておき 5.63 MPa を用いた。図 5 より、式(1)、式(2)の中央値付近を実験値が示すことが確認できる。このことから、本実験による破碎は内圧のみではなく、間隙水圧による影響が存在したと考えられる。

## 3. おわりに

本研究では、拘束圧を制御した室内水圧破碎実験を行った。その結果、破碎圧以降の水圧の減少と、同時に起こる側圧の上昇を確認した。また、実験から得た破碎圧と破碎圧算定式から、破碎圧への間隙水圧の影響を確認した。今後は、貫通供試体を用いた実験による間隙水圧等の確認や、X 線 CT を用いて鉱物分布を把握した水圧破碎実験を行い、更なるデータを蓄積する必要がある。

## 4. 参考文献

- 1) 海江田秀志：地熱増産システム(EGS)技術開発の現状と課題，電力中央研究所報告，No.14017，pp.1-20，2015。
- 2) 森麟，田村昌仁，千柄植：砂質地盤における割裂発生機構，土木学会論文集，第 388 号，pp.61-70，1987。

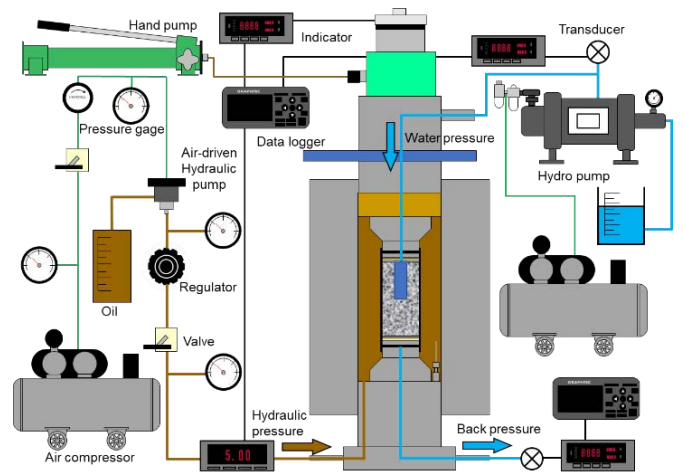


図 3 実験装置概要図

表 2 実験条件

	軸圧 [MPa]	側圧 [MPa]
IGG7	16	3
IGG8	16	5
IGG9	16	7
IGG10	19	9

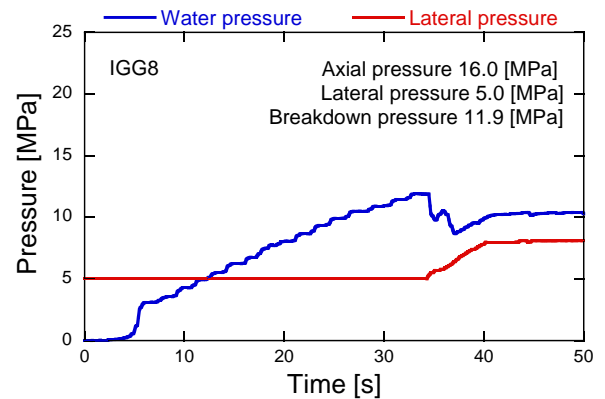


図 4 水圧，側圧経時変化 (IGG8)

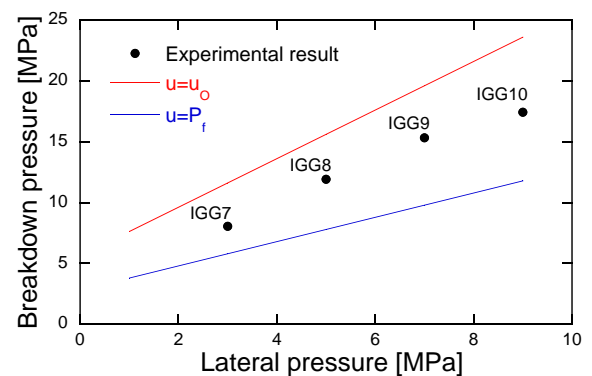


図 5 破碎圧と側圧の関係 (IGG7~IGG10)