

公害資源研究所資源第四部 正會員 小杉昌幸  
正會員 小林秀男  
正會員 速水博秀

地圧測定法については多くの研究者によって検討が加えられ、主な測定法として応力解放法や水圧破碎法等が提案されている。前者の代表的な測定器としてボアホール・ゲージ、孔底ひずみ計等があげられ、長年の研究開発によって高い信頼性を持つものの、応力解放のボーリングが必要であるために比較的浅い所に使用範囲が限られる。また、後者は地下数千m程度の深部に適用できるものの、水圧破碎機構に関する著者らの研究<sup>1)</sup>によると、既存き裂の影響や造成き裂と流体挙動との関係等の検討すべき点が多く残されている。

応力解放に伴う孔径変化は、図1に示す二軸応力  $\sigma_x, \sigma_y$  が作用する平面応力条件では、直交異方性の弾性体において次式のように導かれる<sup>2)</sup>。

— 101 —

一定の掘進速度で内径 100 mm のオーバー・コアリングを行ない、掘削中の孔径変化を連続して計測した。

表 1 岩石試料の力学的異方性

| Type             | Tension           |                             |                    | Compression       |                             |                    | Shear             |                                  |
|------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------|-------------------|----------------------------------|
|                  | Strength<br>(MPa) | Elastic<br>Modulus<br>(GPa) | Poisson's<br>Ratio | Strength<br>(MPa) | Elastic<br>Modulus<br>(GPa) | Poisson's<br>Ratio | Strength<br>(MPa) | Angle of<br>Internal<br>Friction |
| INADA<br>Granite | I                 | 69                          | 23.5               | 0.077             | 209.4                       | 61.9               | 0.260             | 15.1                             |
|                  | II                | 41                          | 19.8               | 0.037             | 193.3                       | 58.4               | 0.364             | 10.4                             |
| KOFU<br>Andesite | I                 | 138                         | 68.1               | 0.202             | 245.2                       | 72.7               | 0.261             | 20.6                             |
|                  | II                | 140                         | 63.7               | 0.212             | —                           | —                  | —                 | —                                |

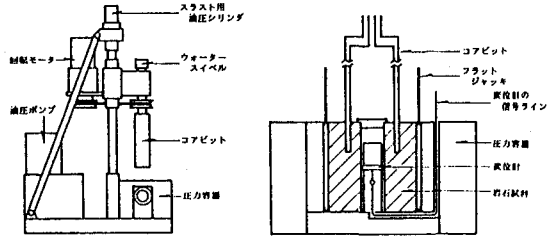


図 2 応力解放実験装置の概観

3.3 二軸応力下の孔径変化

甲府安山岩及び稲田花こう岩の封圧  $\sigma$  ( $=\sigma_x=\sigma_y$ ) と孔径変化との関係を図 3 に示す。図中の変位は孔井内で計測した 4 方向のうち 3 方向について示し、孔径が縮む方向を負値とした。図から明らかなように、甲府安山岩ではほぼ等方性の変形挙動と考えられるものの、稲田花こう岩では明瞭な異方性による挙動の差異を示した。

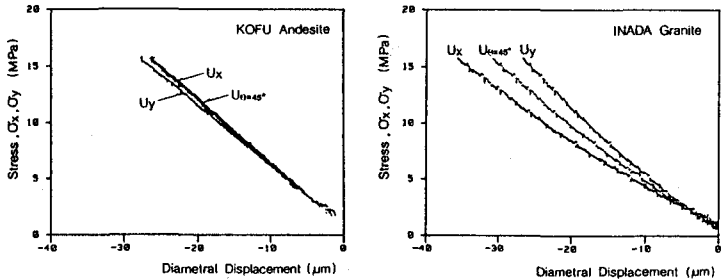


図 3 封圧と孔径変化との関係

次に、一方の応力を一定にして他方を変化させた場合の稲田花こう岩における応力比 ( $\sigma_y/\sigma_x$ ,  $\sigma_z/\sigma_x$ ) と孔径変化との関係を図 4 に示す。ここでも同様に  $U_x$  と  $U_y$  との挙動の差異が大きいため、この実験結果について (1) 及び (2) 式による異方性の評価を行ない、これらの結果を甲府安山岩の場合と比較して表 2 に示す。甲府安山岩では  $E_1$ ,  $E_2$  がほぼ同じ値となり、ほぼ等方性の変形挙動を呈することを示した。しかし、稲田花こう岩の実験から得られた有効弾性係数は、表 1 の圧縮試験によるヤング率、ポアソン比を用いて (3) 式から求めた  $E_1$  (Type II) = 50.7 GPa、 $E_2$  (Type I) = 57.7 GPa に近い値を示し、顕著な変形異方性が認められた。これらの結果、孔径変位挙動に基づいた応力評価においては異方性への配慮が望まれることを明らかにした。

表 2 二軸応力下の孔径変化に関する弾性定数の評価結果

|            | Stress (MPa) |            | $S_1$ | $S_2$ | $S_7$ | $S_8$ | Effective Moduli |             |
|------------|--------------|------------|-------|-------|-------|-------|------------------|-------------|
|            | $\sigma_x$   | $\sigma_y$ |       |       |       |       | $E_1$            | $E_2$ (GPa) |
| KA-21      | 9.8          | 3.5-15.9   | 2.60  | -0.76 | ---   | ---   | 74.5             | 75.9        |
|            | 3.8-16.2     | 9.8        | ---   | -0.73 | 2.67  | ---   | ---              | ---         |
|            | 9.8          | 3.8-16.0   | 2.82  | -0.76 | ---   | ---   | 75.0             | 73.4        |
| KA-22      | 4.2-16.4     | 9.8        | ---   | -0.74 | 2.85  | ---   | ---              | ---         |
|            | 9.8          | 4.2-16.4   | ---   | -0.74 | 2.85  | ---   | ---              | ---         |
|            | 9.8          | 4.2-16.4   | ---   | -0.74 | 2.85  | ---   | ---              | ---         |
| EA average |              |            | 2.76  | -0.76 | -0.74 | 2.76  | 75.0             | 73.6        |
| IC-23      | 9.9          | 4.8-16.2   | 2.85  | -1.32 | ---   | ---   | 44.6             | 57.8        |
|            | 4.2-16.4     | 9.9        | ---   | -0.92 | 3.82  | ---   | ---              | ---         |
|            | 9.9          | 4.2-16.4   | 2.79  | -1.38 | ---   | ---   | 43.5             | 56.5        |
| IC-24      | 10.1         | 5.8-15.9   | 2.79  | -1.38 | ---   | ---   | 43.5             | 56.5        |
|            | 5.8-15.8     | 10.1       | ---   | -0.98 | 3.53  | ---   | ---              | ---         |
|            | 10.1         | 5.8-16.0   | 2.90  | -1.14 | ---   | ---   | 53.4             | 61.3        |
| IC-25      | 5.9-16.1     | 10.8       | ---   | -0.84 | 3.53  | ---   | ---              | ---         |
|            | 10.8         | 5.9-16.1   | ---   | -0.84 | 3.53  | ---   | ---              | ---         |
|            | 10.8         | 5.9-16.1   | ---   | -0.84 | 3.53  | ---   | ---              | ---         |
| IC average |              |            | 2.82  | -1.25 | -0.91 | 3.63  | 47.0             | 58.6        |

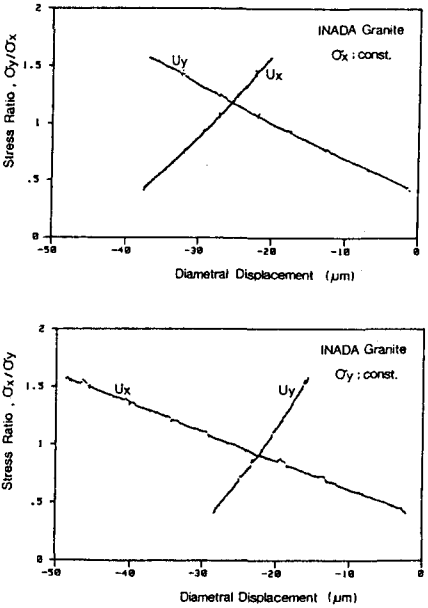


図 4 応力比 ( $\sigma_y/\sigma_x$ ,  $\sigma_x/\sigma_y$ ) と孔径変化との関係

3.4 応力解放に伴う孔径変化

稲田花こう岩の応力解放に伴う孔径変位の経時変化を図5に示す。図中の矢印は、各変位計測点をコアリング・ビットが通過した時点を示し、これ以前の孔径の縮小はプリ・コアリングの影響を表す。これらの実験における解放応力とそれに伴う孔径変化をまとめ、

(1) 及び (2) 式による評価結果と比較して表3に示す。表中の変位計測方向は図1に示したX軸を基線とする角度  $\theta$  で表し、計算評価の孔径変化  $U$  及び解放応力  $\sigma_x, \sigma_y$  は表2の有効弾性係数と実験応力条件及び孔径変化の実験値からそれぞれ求めた。表中の実験結果と計算結果は定性的に良い一致を示すとともに、定量的にも  $\pm 15\%$  以内で評価できることを示した。このため、稲田花こう岩の孔径変位挙動は異方性の評価が有効であるとともに、解放応力の評価には異方性への配慮が必要であるものと考えられる。

応力解放実験の回収コアの加圧実験による封圧と孔径変位との関係においても同様に線形相関の挙動を呈することが認められ、この傾きを用いて (1) 式から求めた弾性定数  $U/\sigma$  も同様に表2の結果と良い一致を示した。しかし、稲田花こう岩では図3に示した挙動と同様に 6~8 MPa の応力条件を境界に変形性が変わる傾向を示した。

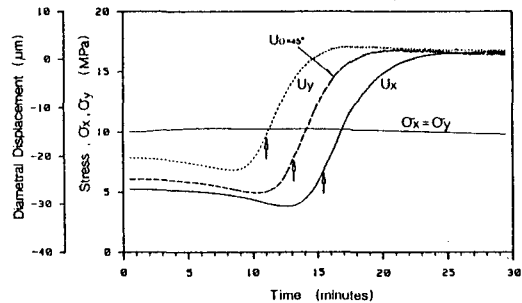


図5 稲田花こう岩の応力解放に伴う孔径変化挙動

表3 応力解放に伴う孔径変化の実験結果と計算結果との比較

|       | Experimental Result |                  |              | Numerical Result (Equation (1)) |                   |                   |
|-------|---------------------|------------------|--------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|
|       | $\sigma_x$ (MPa)    | $\sigma_y$ (MPa) | $\theta$ (°) | $U$ (μm)                        | $\sigma'_x$ (MPa) | $\sigma'_y$ (MPa) |
| KA-21 | 5.27                | 5.27             | 0            | 9.97                            | 10.54             | 4.99              |
|       |                     |                  | 45           | 9.37                            |                   |                   |
|       |                     |                  | 90           | 9.69                            |                   |                   |
| KA-22 | 10.30               | 12.20            | 0            | 19.74                           | 19.16             | 10.43             |
|       |                     |                  | 45           | 22.70                           |                   |                   |
|       |                     |                  | 90           | 26.48                           |                   |                   |
| 10-24 | 10.71               | 12.56            | 0            | 25.85                           | 22.10             | 10.71             |
|       |                     |                  | 45           | 27.67                           |                   |                   |
|       |                     |                  | 90           | 28.62                           |                   |                   |
| 10-25 | 12.14               | 10.41            | 0            | 32.04                           | 29.83             | 13.83             |
|       |                     |                  | 45           | 25.90                           |                   |                   |
|       |                     |                  | 90           | 21.06                           |                   |                   |

4. 水圧破碎キャリパを用いた原位置実験

4.1 試作装置ならびに実験手順

ボアホール・ゲージと水圧破碎用パッカーを組み合わせた「水圧破碎キャリパ」の構造を図6に示す。本装置は直径 64mm、長さ 1,700mm であり、パッカー部と孔径変位計測部とからなる。パッカーは、ウレタンゴムをシーリング・エレメントとし、センターホール・ジャッキによって圧縮してシールする構造である。孔径変位計はパッカーのセットに連動する板バネの反力によって孔井壁面に圧着され、パッカーの加圧区間で三方向の直径変位を検出する。なお、本装置の耐圧は 40 MPa であり、孔井内で計測したデータはディスクに記録した。

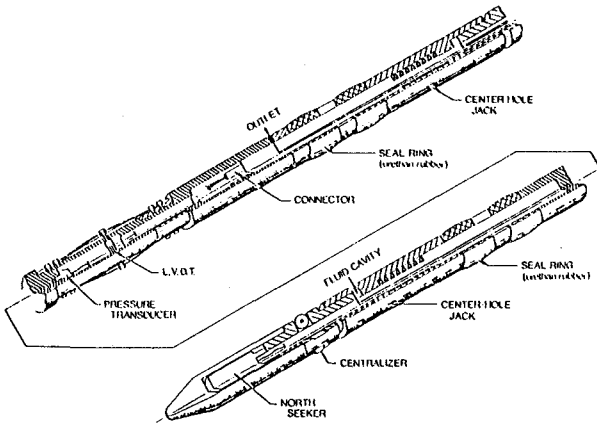


図6 水圧破碎キャリパの構造図

「水圧破碎キャリパ」による原位置実験では、孔井内に本装置をセットしてダブル・プランジャ・ポンプによって一定流量を注水して水圧破碎を行ない、その後、更に深い位置に再セットしてオーバー・コアリングによる応力解放実験を行なった。また、本装置の検証実験には、直径 66mm の孔井を有する稲田花こう岩の 0.6×0.6×1.2m のブロック試料を用いた。

4.2 応力解放実験

原位置応力解放実験では、 $\pm 0.2 \mu\text{m}$  以内の精度で孔径変化を安定計測できることを示し、本装置がボアホ

ール・ゲージとして有効であることを明らかにした。また、本実験における  $4.0 \sim 5.5 \mu\text{m}$  程度の解放孔径変化を用いて (1) 式から求めた解放応力はほぼ  $1.9 \sim 3.1 \text{ MPa}$  となり、原位置実験サイトの土かぶり (約  $20 \text{ m}$ ) に相当する履歴地圧を示したものと考えられる。

#### 4.3 水圧破砕実験

稲田花こう岩の水圧破砕における孔井内圧力と孔径変位の経時変化を図7に示す。最初の加压において破砕 (break-down) が認められた後は直ちに送水ラインを開放 (venting) し、さらに再加圧を行なった。再加圧の孔径変位挙動では造成き裂に起因すると思われる顕著な変化が認められたため、このような手法によってき裂の方向と開口変位が計測できるものと考えられる。しかし、孔径変化は弾性係数で説明できないほど大きな値を示したため、水圧破砕においては孔壁近傍の間隙水圧が孔径変位に大きな影響を及ぼすものと考えられる。以上の結果、試作装置には板バネの強度調整等の改良点があるものの、異方性岩盤の地圧計測装置として適用性が認められた。

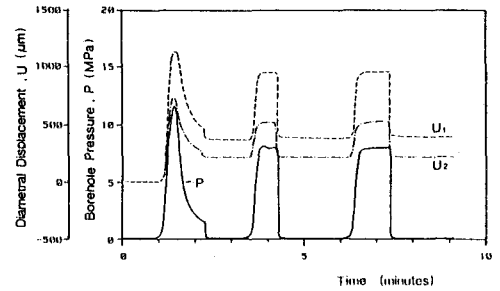


図7 原位置水圧破砕における孔井内圧力と孔径変位の経時変化

#### 4.4 原位置計測法の提案

本装置をオーバー・コアリングが可能な比較的浅い所で用いる場合は、図8に手順を示すように、孔井内から装置を抜き取ることなく数回の水圧破砕と1回の応力解放実験が可能となり、それぞれの実験データの相互検証によって、評価結果の信頼性向上を図ることができる。また、深部の地圧計測を行う場合は、水圧破砕のための装置のセットによって造成き裂の方向や開口変位も同時に評価できるため、従来法の手順の簡略化が期待される。

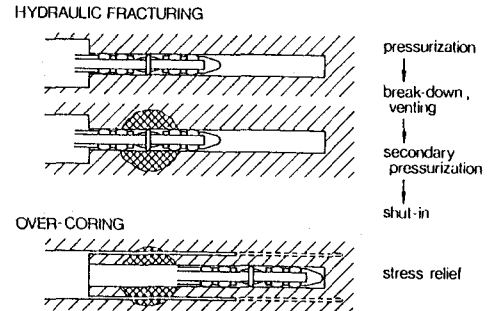


図8 水圧破砕キャリパを用いた原位置実験の手順

#### 5. あとがき

本報では、異方性岩石における地圧計測に関する研究として、応力解放及び水圧破砕における孔径変位挙動を実験的に検討した。得られた結果及びそれに基づく知見を要約すると次のようになる。

- (1) 稲田花こう岩の二軸応力下における孔径変位挙動が変形特性の異方性で説明できることを示し、このような岩盤の孔径変化法による地圧測定では異方性の考慮が必要であることを明らかにした。
- (2) 甲府安山岩及び稲田花こう岩の応力解放に伴う孔径変化を明らかにし、この解放変位から変形異方性を考慮して求めた応力によって実験条件の圧力を $\pm 15\%$ 以内の精度で評価できることを示した。
- (3) 水圧破砕キャリパを用いた応力解放及び水圧破砕の原位置実験の結果、ポアホール・ゲージとして適用できるとともに、水圧破砕による造成き裂き裂方向や開口変位の評価にも有効であることを示した。このため、地圧測定に本装置を用いることにより、実験の簡略化や適用範囲の拡大が計れるものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 小杉昌幸, 小林秀男, 速水博秀: 公害資源研究所報告, 第43号, 1-106頁, 1987.
- 2) Kawamoto, T.: Mem. Fac. Engng. Kumamoto Univ., Vol.10, No.4, pp.1-30, 1964.
- 3) Szwiłski, A.B.: Int. J. Rock Mech. Min. & Geomech. Abstr., Vol.21, No.1, pp.3-12, 1984.
- 4) 小杉昌幸: 日本鉱業会誌, 第102巻, 第1182号, 469-475頁, 1986.

## (21) Diametral Displacement Behavior under Over Coring and Hydraulic Fracturing

Masayuki KOSUGI

Hideo KOBAYASHI

Hirohide HAYAMIZU

National Research Institute for Pollution and Resources

16-3 Onogawa, Tsukuba City, Ibaraki, Japan

### SYNOPSIS

This report describes discussion based on the experiments for the diametral displacement behavior under bi-axial stress condition and stress relief for the purpose of development of in-situ stress measurement technique. Obtained results and knowledges on them are summarized as follows.

- (1) The diametral displacement in Inada granite under bi-axial stress condition was obtained to be the anisotropic behavior with the significant difference between Elastic modulus.

$E_1 = 47.6 \text{ GPa}$  : in the direction parallel to rift plane

$E_2 = 58.6 \text{ GPa}$  : in the direction normal to rift plane

- (2) Using the equation for anisotropic deformation, the stress condition can be determined to an accuracy better than 15 % on the basis of the diametral displacement under over-coring for stress relief.

- (3) The overall in-situ experimental results would indicate that our technique using the new probe, "Hydro-fracturing Caliper", is applicable to both stress relief method and hydraulic fracturing method. In addition, the displacement behavior in process of fracturing might offer a useful information for direction of created fracture and fracture aperture.