

# 間隙水圧計測可能な亀裂変位計の現場適用試験

Site application of Joint-Extensometer with Pore Water Pressure Measurement

堀田政國\*・松井裕哉\*\*・杉原弘造\*\*\*・船戸明雄\*\*\*\*

Masakuni HORITA, Hiroya MATSUI, Kozo SUGIHARA, and Akio FUNATO

The aperture of a joint in rock will be changed due to the re-distribution of stress in rock during the excavation of a cavern like a drift in rock. The pore water pressure in the joint and the permeability of the joint will be changed with the aperture change.

In this study, a joint-extensometer with pore water pressure measurement was installed in a borehole and the changes of aperture of a joint and pore water pressure were monitored during the excavation of a drift. Permeability tests of the joints were conducted before and after the drift excavation.

## 1. はじめに

亀裂性岩盤内に坑道などの空洞を掘削すると、周辺岩盤内の亀裂は応力再配分により変位して、開口あるいは閉口する。この亀裂変位にともない、亀裂内の水圧と亀裂の透水性が変化すると考えられる。これまで、これらの亀裂変位、亀裂間げき水圧ならびに亀裂透水性は計測されていたが、同一区間、同時計測は行なわれていなかった。したがって、今回岩手県釜石鉱山内で実施している掘削影響試験において、ダブルパッカーを有する亀裂変位計<sup>1)</sup>を原位置岩盤内の湧水を伴う亀裂に設置し、坑道掘削に伴う亀裂変位と間げき水圧のモニタリングを同時に実施し、これらの変化の相関についての調査を行った。また、このシステムはダブルパッカー区間において透水試験も可能であり、坑道掘削前後において、試験対象亀裂の透水試験を実施した。

## 2. 亀裂変位計の仕様

亀裂変位計は図-1に示すとおり、変位アンカー（機械式アンカー）2個と水圧計測区間止水用パッカー2個（窒素ガスで膨張）で構成される。適用試錐孔径は76mmである。亀裂の変位については、変位アンカー間の軸方向変位をLVDTにより計測する。パッカーで止水された水圧計測区間には3本のシンフレックスチューブが孔口から通じており、1本は水圧計測用、1本は注水用、もう1本は排水用であり、水圧計測および透水試験が可能なシステムになっている。間隙水圧は孔口に設置した水圧計で計測している。亀裂変位計の仕様は、以下の通りである。

○変位計：LVDT（測定レンジ±6mm、精度0.5%FS）

- 
- |      |     |              |              |
|------|-----|--------------|--------------|
| *    | 正会員 | 清水建設株式会社     | 電力・エネルギー本部   |
| **   | 正会員 | 動力炉・核燃料開発事業団 | 釜石事務所        |
| ***  | 正会員 | 動力炉・核燃料開発事業団 | 東濃地科学センター    |
| **** | 正会員 | 応用地質株式会社     | OYOコアラボ岩盤物性部 |

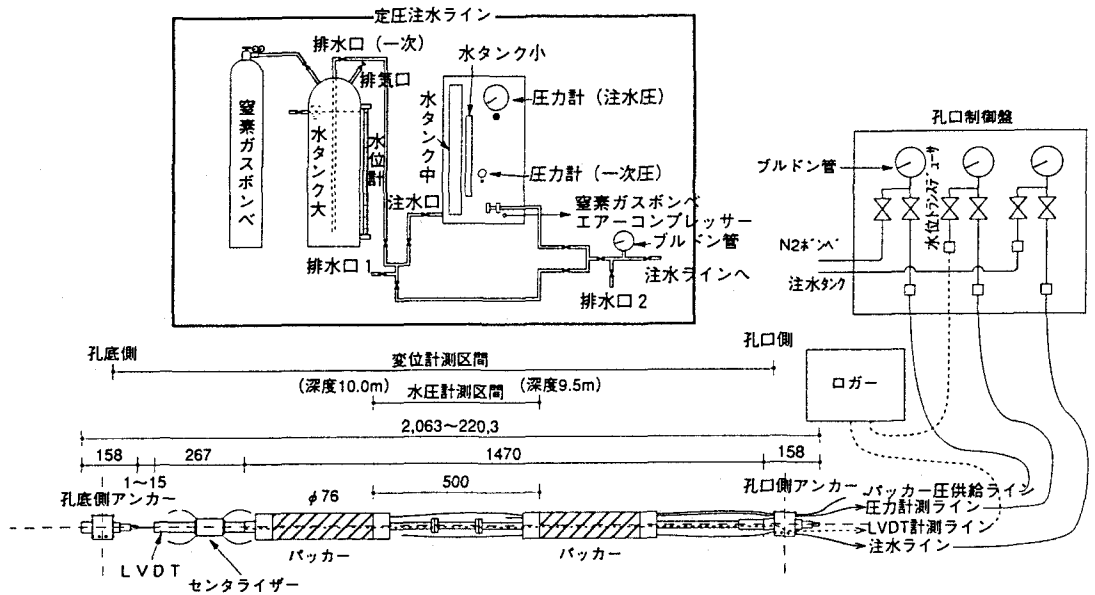


図-1 亀裂変位計の概要および透水試験用注水装置概要

- 間隙水圧計：圧電型トランスデューサー（最大水圧 3.5 MPa、精度 0.3%FS）
  - パッカー長：30 cm
  - パッカー最短区間長：50 cm
  - 変位アンカー最短区間長：2.0 m
- 計測は防湿型データロガーを用いた自動計測である。

### 3. 亀裂変位計の設置

#### 3. 1 計測位置ならびに地質

本計測は釜石鉱山の土被り 730m の 250m レベル坑道で実施された。対象岩盤は栗橋花崗閃緑岩である。母岩の一軸圧縮強度は約 140MPa である。走行 E-W 方向で垂直に近い亀裂が卓越している。長さ 3 m 以上の亀裂密度は 2 本/m である。円錐孔底法で測定した初期応力は、最大主応力が 42.6MPa、最小主応力 26.8MPa であり、最大主応力方向はほぼ南北方向である。

#### 3. 2 計測位置

亀裂変位計の設置位置を図-2 に示す。亀裂変位計は、新規に掘削した計測坑道側壁の左 2m、床からの高さ 1.2m に計測坑道と平行に削孔された試験孔の中に坑道掘削前に設置した。試験孔の孔径は 76 mm である。試験対象亀裂は、透水性が高く、坑道掘削前後の変化が大きいと考えられる坑壁に平行に近い亀裂を選定した。BTV 観測の結果、深度 9.7m に湧水を伴う割れ目が認められたため、深度 9.5m~10.0m を透水試験ならびに水圧計測区間とした（写真-1 参照）。変位計測用の機械式アンカーは深度 8.7m と 10.7m に設置した。

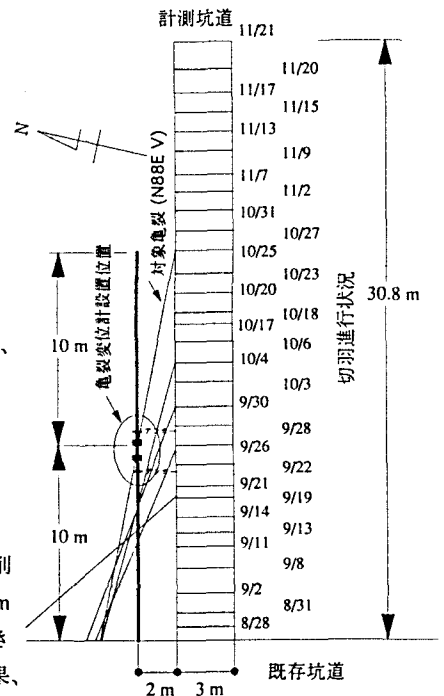


図-2 設置位置と掘削状況

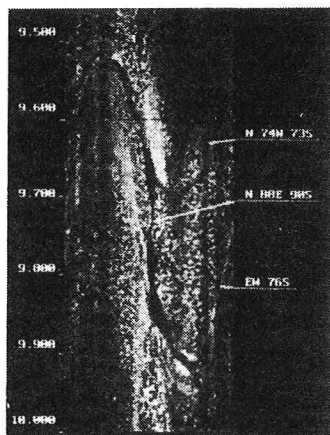


写真-1 対象亀裂 (BTV映像)

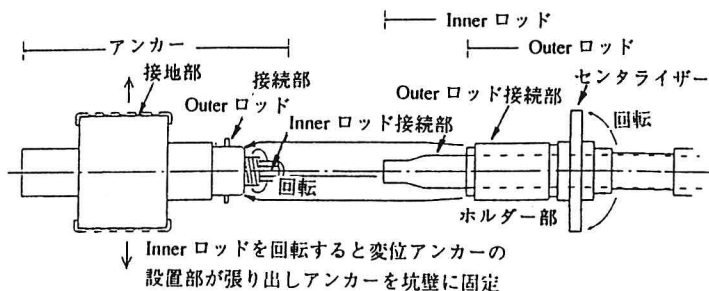


図-3 変位アンカーの概要図

### 3. 3 設置手法

亀裂変位計の設置は、以下の手順で行った。

- 1) 孔底側アンカーを OUTER ロッド及び INNER ロッドを使用して所定深度 (深度 10.7m) に設置する。設置する際に、透水試験区間との距離に注意する。変位アンカーの設置方法を以下に示す (図-3)。
- 1-1) 孔底側アンカーにアンカー設置用の INNER ロッド、アンカー位置決め用の OUTER ロッドを着け、計測孔の所定の位置まで挿入する。アンカー設置用のロッドの接合手順を図-4 に示す。変位アンカーの設置は、深度 1 cm の精度で実施可能である。
- 1-2) INNER ロッドのみを回転させ、変位アンカーを固定する。トルクレンチを用いて固定トルク (70Nm)を確認する。
- 1-3) OUTER ロッドを押ししながら回転し、アンカーと OUTER ロッドを分離する。
- 1-4) OUTER ロッド及び INNER ロッドを回収する。
- 2) パッカー、LVDT、孔底側アンカーを組み上げ、ラインの接続を実施する。これを、孔口側アンカーの方を孔口に向け、OUTER ロッドを使用して試験孔に挿入する。
- 3) LVDT をデーターロガーに接続し、出力が  $\pm 0$  mm になるように測定しながら孔口アンカーの位置を調整する。
- 4) パッカー給圧ラインに窒素ポンペを接続しパッカーを膨らます。給圧は試験予定圧力 + 自然水压を越える必要がある。今回は 1.5Mpa をかけた。
- 5) 孔口側アンカーを所定深度に固定する。
- 6) OUTER ロッド及び INNER ロッドを回収する。

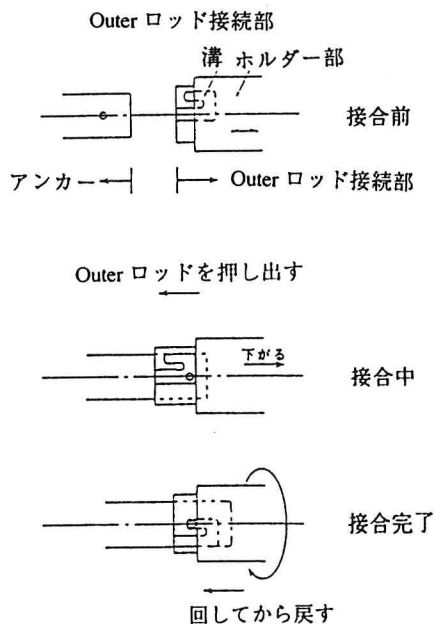


図-4 アンカー設置用ロッド接合手順

#### 4. 計測結果

表-1 パルス試験結果一覧表

| 注水圧<br>kgf/cm <sup>2</sup> | 透水係数 (cm/sec)         |                                                |
|----------------------------|-----------------------|------------------------------------------------|
|                            | 掘削前                   | 掘削後                                            |
| 1.15                       | $1.75 \times 10^{-4}$ |                                                |
| 1.75                       | $1.00 \times 10^{-4}$ |                                                |
| 2.00                       |                       | $2.31 \times 10^{-4}$<br>$1.38 \times 10^{-4}$ |
| 2.50                       | $1.72 \times 10^{-4}$ |                                                |
| 3.00                       |                       | $4.96 \times 10^{-4}$                          |
| 4.00                       |                       | $4.12 \times 10^{-4}$                          |
| 平均値                        | $1.49 \times 10^{-4}$ | $3.19 \times 10^{-4}$                          |

#### 4. 2 透水試験

透水試験としては、対象区間に一定の注水圧をかけた後、加圧バルブを閉じ、区間の経時水圧低下を計測するパルス試験法と、一定注水圧での注水量を計測するルジオン試験法の2種類を実施した。パルス試験結果は表1にまとめられている。掘削前後の比較では、掘削前の平均透水係数が  $1.49 \times 10^{-4}$  cm/sec、掘削後が  $3.19 \times 10^{-4}$  cm/sec であり、掘削後の方が透水係数が若干大きくなっている。

ルジオン試験の結果は、注水圧と注入量の関係を図-5に示している。この勾配から求めた透水係数は、掘削前で  $1.76 \times 10^{-5}$  cm/sec、掘削後で  $1.87 \times 10^{-5}$  cm/sec であった。図-5の掘削前の試験結果において、圧力の増加に伴って、注入量が減少している。これは機器設置直後の区間水圧が十分に安定していない状態で注水試験が実施されたためと思われる。

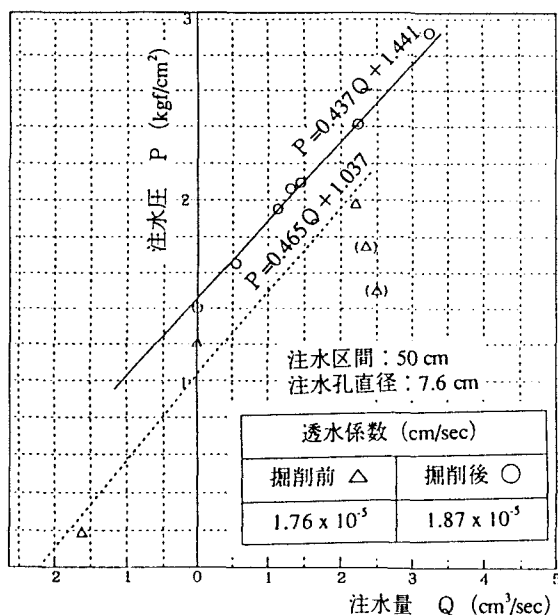


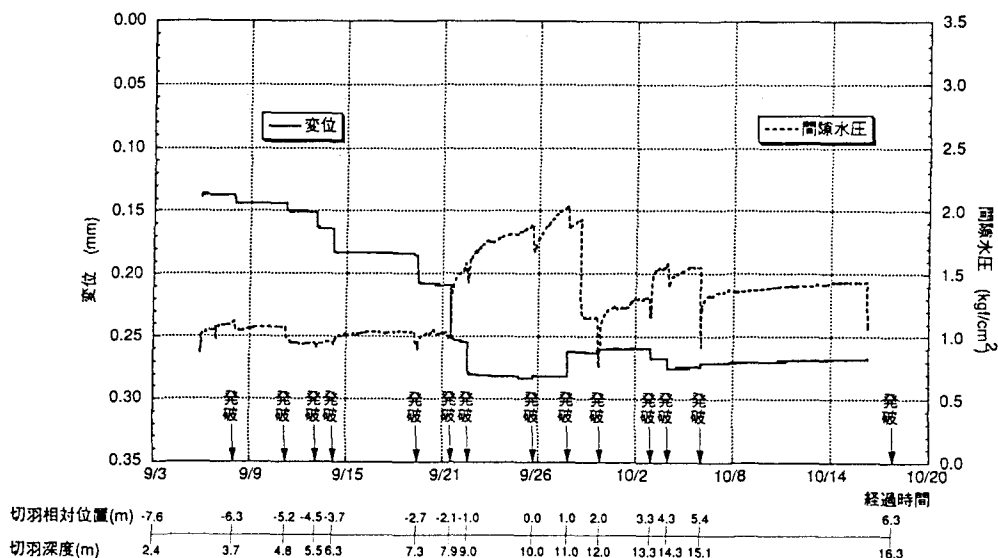
図-5 ルジオン試験結果 (P-Q 曲線)

#### 4. 3 間隙水圧・変位計測

図-6に計測坑道掘削時の間隙水圧・変位計測の計測結果を示した。間隙水圧は、掘削前は  $1.056$  kgf/cm<sup>2</sup> であったが、9/22の発破で大きく増加し、9/28には  $2$  kgf/cm<sup>2</sup> にまで増加する。9/29の削孔で  $1.2$  kgf/cm<sup>2</sup> に減少するが、その後発破にともない段階的に値が増加し、10/6には  $1.5$  kgf/cm<sup>2</sup> にまで増加する。10/6の発破で大きく変動するが、その後微増しつづけ、10/16には  $1.42$  kgf/cm<sup>2</sup> となっている。以上より、間隙水圧は、 $0.1$  kgf/cm<sup>2</sup> 以下の精度で計測され、坑道掘削期間の水圧変化の範囲はほぼ  $1$  kgf/cm<sup>2</sup> であったといえる。

亀裂変位は、掘削前は  $0.13$  mm で、切羽進行に伴って、圧縮方向に変位する。間隙水圧が急増した9/22には、 $0.05$  mm の圧縮変位が生じている。9/28に  $0.02$  mm 引張側に変位し、それにひきつづき間隙水圧が減少している。その後、10/3から10/4にかけて発破に連動して圧縮側に変位する。10/4以降は、大きな変化はなく、10/16には  $0.27$  mm となっている。以上より、亀裂変位は  $1 \mu\text{m}$  以下の精度で計測できており、坑道掘削中の変位は  $0.15$  mm 程度であったといえる。

変位と間隙水圧の関係では、9/22に圧縮に変位が生じた時に間隙水圧が増加、9/30に引張に変位が生じた時に間隙水圧が減少、10/3から10/4にも変位と間隙水圧の間に相関関係が認められる。全体に圧縮変位が生じた時に間隙水圧が増加、引張変位が生じた時に間隙水圧が減少する傾向が認められる。



図ー6 計測坑道掘削にともなう亀裂変位と区間間隙水圧の変化

#### 4. 4 透水係数の評価

計測坑道掘削前後の透水係数は、パルス試験・ルジオン試験ともに、掘削後の方が掘削前より大きな値を示している。ただし、ルジオン試験での両者の差は小さく、パルス試験の結果も同程度の注水圧レベル（注水圧 1.15～2.50 kgf/cm<sup>2</sup>）で比較するとほとんど有意な差は確認できなかった。したがって、前述の亀裂変位挙動と、この掘削前後の透水性の変化との関連性に関する定量的な評価は困難であった。また、パルス試験により求められた透水係数は、ルジオン試験で求められた透水係数よりも 10 倍程度大きな値を示した。これは、パルス試験におけるパッカーやチューブ等のシステム自体の圧縮性（システムコンプライアンス）に起因すると考えられるため、今後の検討が必要である。

#### 5. まとめ

間隙水圧計測可能な亀裂変位計の日本の岩盤への適用性を確認するため、同装置を用いて計測坑道掘削前後の透水試験および掘削中の水圧・亀裂変位モニタリングを実施した。その結果、以下のような結果が明らかになった。

- 1) 変位アンカーおよび止水用パッカーとも設置は簡単であり、深度 1 c m 以下の精度で設置が可能である。
- 2) 坑道掘削中の亀裂変位の計測精度は 1  $\mu$ m 以下であった。今回の計測坑道掘削にともなう変位は 0.15 mm 程度であった。変位は各発破に対応して生じることも確認された。
- 3) パッカー区間の水圧は 0.1 kgf/cm<sup>2</sup> 以下精度で計測された。計測坑道掘削期間における水圧変化の範囲はほぼ 1 kgf/cm<sup>2</sup> であった。
- 4) 本計測器により坑道掘削中の亀裂変位と間隙水圧が同時に計測され、その連成挙動について評価できることがわかった。
- 5) パルス試験から求めた透水性は注水試験から求めた透水性よりもかなり大きくなっている。両者の対比については今後の検討が必要である。

#### 参考文献

- 1) Thompson, P.M. and E.T. Kozac, "In situ measurement of coupled hydraulic pressure/fracture dilation in stiff crystalline rock", Field Measurements in Geomechanics, pp.23 - 31, 1991.