

超高压下での岩石のひずみとP波速度の測定による緩み評価

EVALUATION LOOSENED ZONE BY THE MEASUREMENT OF STRAIN AND P-WAVE VELOCITY UNDER THE HYDROSTATIC PRESSURE

松村 真一郎*・薛 自求*・佐藤 稔紀**

Shinichiro MATSUMURA, Ziqiu XUE and Toshinori SATO

The closing of cracks under hydrostatic pressure provides a useful method for determining the loosened zone around underground caverns. The hydrostatic tests were carried out for Kurihashi granodiorite retrieved from a drift wall of the Kamaishi mine. We measured strain and P-wave velocity of rock specimens ranged from 0 MPa to 150 MPa. On the basis of the test results, we determined the pressure and strain required to close all cracks, and calculated the aspect ratio of cracks. The result showed that there are many cracks in the rock near the drift wall, and the aspect ratio of cracks in the rock near the drift wall is relatively larger than that of intact rock. In addition, these results were also harmonious on the result of the PS well logging.

Keywords : hydrostatic test, granodiorite, microcrack, aspect ratio, loosened zone

1. まえがき

岩盤の空洞掘削による緩みは、空洞の設計において重要な要素の1つである。緩み域の評価は、直接的にはボアホールテレビによる亀裂観察、間接的には空洞周辺の変位(ひずみ)の測定、弾性波速度の変化、あるいは透水性、透気性の測定などの原位置試験から推定されている。また、測定結果の妥当性を検証するために、測定法の異なる原位置試験を実施してクロスチェックしたり¹⁾、詳細なコア観察や弾性波速度試験との対比²⁾が行われている。

本論文では、原位置試験結果の検証として、室内岩石試験によって岩石中のクラックを定量化し、緩み域を評価する方法を示す。これまでの緩み域調査を念頭においた岩石試験は、強度・変形特性、弾性波速度など岩石固有の物性を測定し、その差異から緩み範囲が推定される。しかし、結晶質岩のように目視で確認できないクラックが緩みに起因するような場合では、緩みに起因する物性変化を大気圧下で把握するのは、測定精度の限界があると考ええる。そこで、超高压の静水圧を岩石に負荷し、岩石のマトリックス部分とクラック部分の挙動(ひずみとP波速度)を分離して評価する方法を示す。

2. 岩石の緩み抽出

図-1は間隙率の小さい結晶質岩の典型的な静水圧～体積ひずみの概念図である^{3) 4)}。体積ひずみはX、

* 正会員 基礎地盤コンサルタンツ株式会社 岩盤工学センター

** 正会員 核燃料サイクル開発機構

Y, Z 方向のひずみの総和として与え、圧縮側を正にしている。図より、変曲点 A ($P=P_A$) で岩石のクラックがすべて閉鎖したと仮定すると、それ以後では岩石マトリックスの変形 (圧縮率) のみに支配されるため両者の関係は直線になるが、それ以前ではクラックの閉鎖による変形が含まれるため非線形になる。

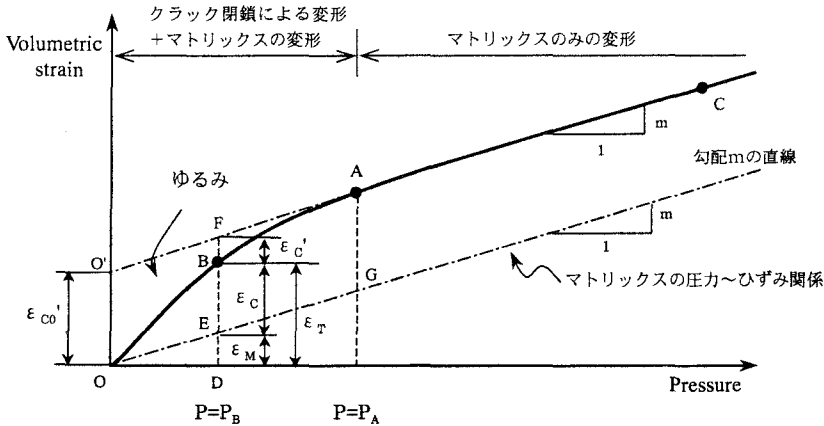


図-1 静水圧～体積ひずみの概念図

クラックを定量化するために、岩石の変形をマトリックス (固体実質部分) とクラック部分にわけて考える。図-1において、変曲点 A より前の任意の圧力段階 ($P=P_B$) では、測定される体積ひずみ ε_T は、マトリックスの体積ひずみ ε_M とクラックの閉鎖で生じる体積ひずみ ε_C の和として定義する。

$$\varepsilon_T = \varepsilon_M + \varepsilon_C \quad (1)$$

マトリックスの体積ひずみ ε_M は全圧力範囲で圧縮率のみに支配されているので、図上では、直線 AC に平行で原点を通る勾配mの直線と $P=P_B$ との交点 E の縦座標 (DE) であらわされる。したがって式(1)より、クラックひずみ ε_C は線分 BE であらわされる。一方 $P=P_A$ では、定義よりクラックはすべて閉鎖するので、 ε_C はすべてのクラックの閉鎖で生じるひずみに相当する。これは図上では線分 AG であるが、直線 AC のひずみ軸切片 OO' (これを ε_{C0}' とする) に等しい。以上より、 $P=P_B$ においてまだ閉塞されていないクラックひずみ ε_C' (以後、残存クラックひずみと呼ぶ) は、以下のように与えることができる。

$$\varepsilon_C' = \varepsilon_{C0}' - \varepsilon_C \quad (2)$$

ε_C' は大気圧下では ε_{C0}' に相当するが、静水圧の増加により徐々に減少し、 $P=P_A$ でゼロになる。そこで ε_C' をある静水圧下での緩みと定義する。室内試験で ε_C' を求めるには、岩石に連続的に超高圧まで静水圧を負荷し、図-1の AC 直線の勾配mと切片 ε_{C0}' を求める。任意の静水圧 $P=P_i$ での ε_C' は式(3)で求められる。

$$\varepsilon_C' = mP_i + \varepsilon_{C0}' - \varepsilon_T \quad (3)$$

3. 超高圧静水圧試験

3.1 試験方法

(a) 試料採取位置と地質

試料採取地点は釜石鉱山の 250m レベル坑道 (地表下約 730m) の計測坑道であり、図-2のように坑壁より 0.1, 0.25, 0.4, 0.7, 1.5mの地点のボーリングコアを用いた (順に S1~S5 とする)。岩種は栗橋花崗

閃緑岩（有効間隙率 0.48%，平均密度 2.77g/cm^3 ）である。

(b) 供試体の準備

ボーリングコアは図-2のように、3辺がボーリング軸(X)、坑道軸(Y)、鉛直下向(Z)になるように4cmの立方体（気乾状態）に整形する。次に、ひずみ（6方向）とP波速度（3方向）を測定するために、ロゼットゲージとP波用振動子（PZT；共振周波数1MHz）を貼付する。供試体はこのあとシリコンゴムで被覆し、圧力容器にセットする。

(c) 载荷方法

図-3に計測システムを示す。载荷段階は150MPaまでの段階载荷とし、载荷ステップは0~20MPaまで2.5MPaピッチ、20~100MPaまで5MPaピッチ、100~150MPaまで10MPaピッチの全29段階である。各圧力段階ではひずみが落ち着いてからP波速度を測定した（サンプリング間隔は5nsec）。

3.2 試験結果

(a) 静水圧～ひずみの関係

図-4は典型的なひずみと静水圧の関係（S1：0.1m）である。20MPa付近を境にひずみの増加傾向が異なることがわかる。また、異方性はほとんど認められない。図-1の整理方法にしたがい、静水圧100MPa以上を直線とみなし最小2乗法により直線ACを求め、切片と傾きから式(3)により残存クラックひずみを求めた。直線回帰式の相関係数は0.99991~0.99998であり、この範囲で直線とみなせる。

図-5は各供試体の静水圧と残存クラックひずみの関係である。切片（ ϵ_{c0} ）に着目すると、坑壁近傍のS1, S2（0.1m, 0.25m）では160~190 $\mu\epsilon$ であるが、その奥のS3, S4（0.4m, 0.7m）では60~100 $\mu\epsilon$ と極端に小さい。さらにその奥のS5（1.5m）では130 $\mu\epsilon$ であり、坑壁近傍ほどではないことがわかる。すべてのクラックが閉塞する圧力（図-1； $P=P_A$ ）は静水圧軸との切片に相当するが、矢印で示したように、坑壁から奥へ向かうほど、100, 100, 80, 80, 40MPaと小さくなる。

(b) 静水圧～P波速度の関係

図-6に典型的な例として、S1（0.1m）の各軸方向のP波速度と静水圧の関係を示す。P波速度は100MPaを過ぎるあたりから一定値に収束する傾向にある。そこで、ひずみと同様な考え方をP波速度に適用する。図-7のように、マトリックスのP波速度を V_{PM} とすると、クラックを含む岩では、P波速度は V_{PM} より低下すると考える。この低下量は V_{PM} から測定速度 V_p を引いた値であり、これを V_{pc} とする。

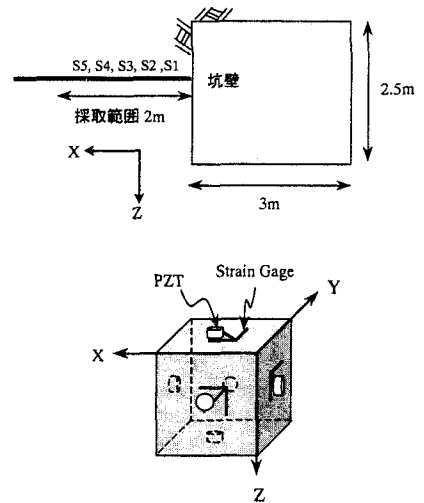


図-2 試料採取位置と供試体

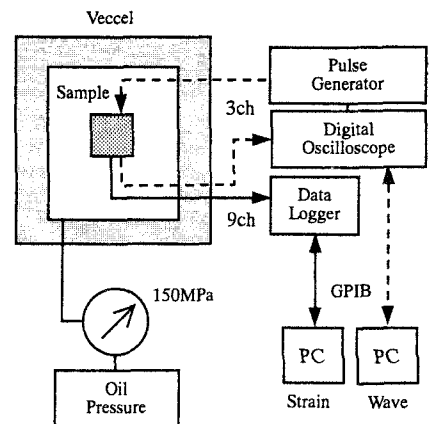


図-3 計測システム

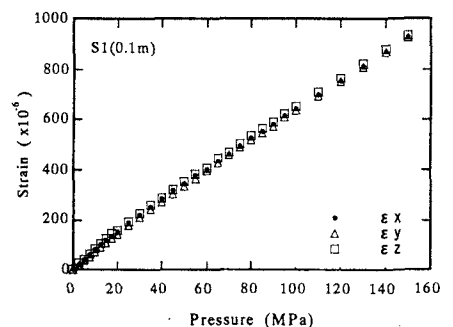


図-4 静水圧～ひずみ曲線

図-8にX軸方向(孔軸方向)の V_{PC} と静水圧の関係を示す。大気圧下での V_{PC} をみると、ひずみほど明瞭ではないものの、坑壁近傍はそれより奥に比べ大きい傾向にある。

4. 考察

クラックはアスペクト比が小さいほど(扁平ほど)、より低い静水圧下で閉じやすい性質がある⁴⁾。したがって、図-5において、圧力軸切片 P_A が大きいほどアスペクト比の大きいクラックが閉鎖されていることを示している。クラックのアスペクト比 α は静水圧 P とヤング率 E から式(4)で簡便的に計算できる⁴⁾。

$$P \approx \alpha E \quad (4)$$

P を P_A 、 E を静水圧 $\sim$ ひずみ曲線から得られる $P=P_A$ における値とし、各供試体の最大アスペクト比を計算すると、S1, S2で2.7/500、S3, S4で1.8/500、S5で0.6/500となり、坑壁に近いほど α は大きいことがわかる。

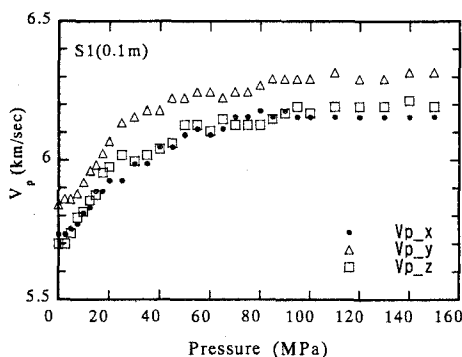


図-6 V_P と静水圧の関係

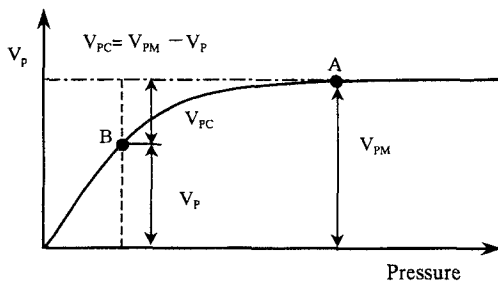


図-7 V_{PC} の定義

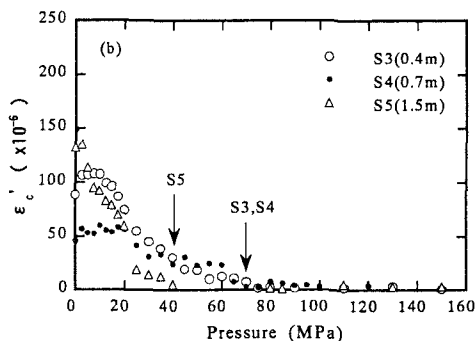
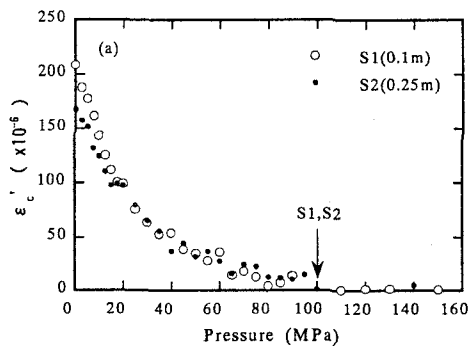


図-5 ϵ'_c と静水圧の関係

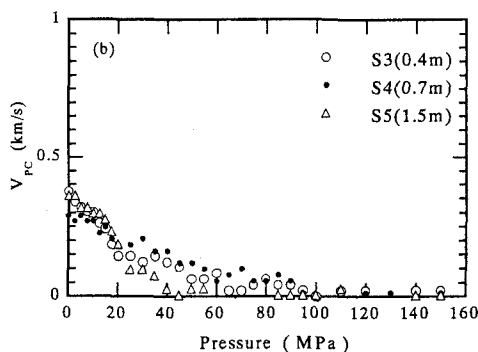
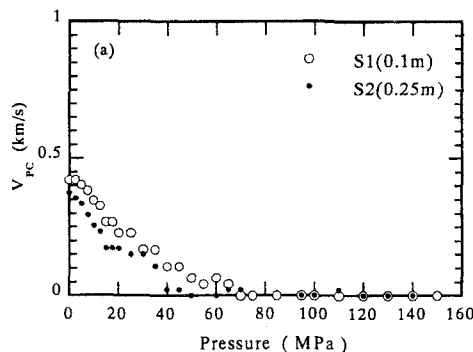


図-8 V_{PC} と静水圧の関係

一般的に結晶質岩に含まれるクラックのアスペクト比は 1/500 程度であると言われている³⁾。したがって、坑壁近傍のクラックがこれより大きいアスペクト比を有する理由は、掘削による影響と考えられる。

岩石全体に含まれるクラックの数は、すべてのクラックの閉塞に要するひずみ量に対応すると考えると、図-5 のひずみ軸切片 ε_{c0} に相当する。図より、 ε_{c0} は坑壁近傍の S1, S2 のほうがそれより奥に比べて大きい。したがって、坑壁近傍ほど相対的にクラックが多いと言え、これは上述と同様、掘削による影響と考えられる。

以上より、S1, S2 と S3~S5 では、静水圧に対するひずみ挙動が異なるといえ、緩み境界は S2 と S3 の間（坑壁より 0.25~0.4m）にあると推定できる。これを同じボーリング孔を使った P S 検層（坑壁たたき法⁵⁾）と比較した。図-9 は坑壁近傍の P 波の記録波形である。走時の変曲点は 0.5m 付近にあり、その前後で速度に倍以上の差が生じているため、坑道の緩み域は 0.5m 程度と推定されている⁵⁾。これは静水圧試験の結果と調和的であるといえる。

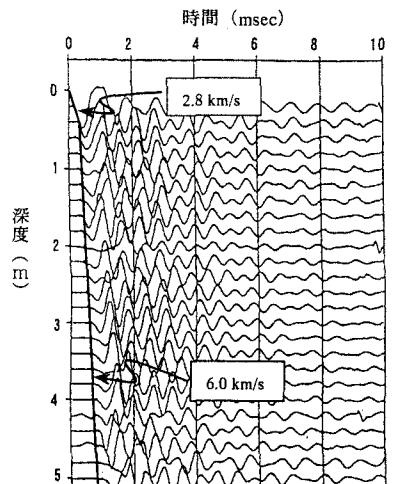


図-9 P S 検層 (P 波)

5. まとめ

坑壁からの水平ボーリングで得られた結晶質岩（栗橋花崗閃緑岩）を用いて、超高压の静水圧試験を行い、ひずみと P 波速度の挙動から空洞周辺の緩みを定量的に評価する方法を検討した。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 残存クラックひずみと静水圧の関係から、クラックの数とアスペクト比を求めた。その結果、坑壁に近い岩石ほど、クラックが相対的に多くかつアスペクト比の大きいクラックが分布していることがわかった。また、P 波速度と静水圧の関係からも、明瞭ではないが傾向を肯定する結果が得られた。
- (2) 坑壁近傍のクラックのアスペクト比は、一般の結晶質岩のクラックのアスペクト比より大きい傾向にあった。これらのクラックは掘削の影響で生じたものと考えられる。
- (3) 残存クラックひずみとクラックのアスペクト比から、緩み境界は 0.25~0.4m の間にあると推定できるが、これは同じボーリング孔で実施された P S 検層の結果と調和的であった。したがって、緩み域の定量的評価に岩石コアを用いた超高压の静水圧試験が有効であることが確かめられた。

参考文献

- 1) たとえば、宇野晴彦，田坂嘉章，大森剛志，工藤奎吾：空洞掘削時岩盤計測に基づく周辺岩盤のゆるみ領域の評価，第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.605-610，1998。
- 2) 工藤洋三，松田浩朗，中川浩二，手塚昌信：弾性波速度を用いた発破による岩盤損傷域の推定，第 28 回岩盤力学に関するシンポジウム，pp.38-42，1998。
- 3) Brace, W.F.: Some New Measurement of Linear Compressibility of Rocks, J.G.R., Vol.70, pp.391-398, 1965
- 4) Walsh, J.B.: The effect of cracks on the compressibility of rock, J.G.R. Vol.18, pp.381-389, 1965.
- 5) 松井祐哉，佐藤稔紀，杉原弘造：弾性波を利用した結晶質岩における既存坑道周りの掘削影響調査，第 27 回岩盤力学に関するシンポジウム，pp.336-341，1996。