

(74) ボアホールスロッターを利用する水圧破碎応力測定法 に関する基礎的研究 (2)

日本国土開発 (株)	正会員	菊地 慎二
日本国土開発 (株)	正会員	中村 哲也
日本国土開発 (株)	正会員	○徳永和広
山口大学工学部	正会員	水田 義明
山口大学大学院		原 雅秀

A Fundamental Study of Hydraulic Fracturing Stress Measurement Using a Borehole Slotter (2)

Shinji KIKUCHI, JDC Corporation
Tetsuya NAKAMURA, JDC Corporation
Kazuhiro TOKUNAGA, JDC Corporation
Yoshiaki MIZUTA, Yamaguchi University
Masahide HARA, Graduate Student, Yamaguchi Univ.

Abstract

As the hydraulic fracturing technique for determination of in situ stress has the advantage in no need of the elastic modulus of rock, it has been used not only in deep boreholes but also at shallow underground sites. However, it has still a limitation in confidence of the measured maximum principal stress which is more important for rational design of underground construction. Therefore, the authors have studied the possibility to measure the maximum principal stress directly from the shut-in pressure data by making artificial longitudinal slots along the minimum principal stress direction. This paper briefly describes the numerical analyses by boundary element method and the laboratory tests using cubic specimens of mortar, which are presented already, and introduces the results of in situ measurements using a borehole slotting machine which is the same type that Dr. Bock produced for stress determination by stress relief method.

1. はじめに

応力測定技術としての水圧破碎法は、最近急速に広まっており、水圧破碎法の利点である大深度での測定ばかりでなく、比較的浅い深度での測定にも使われるようになってきている。

この方法は、他の応力測定法に比べて、岩盤の弾性係数を必要とせず、比較的廉価であるという特徴を持っている。一方、最小主応力はシャットインプレッシャー (P_s : Shut-in Pressure) から直接求めることができるが、最大主応力は、変形等方性を仮定する弾性理論から算出するため、その応力値の信頼性が低いという問題がある。また、一般に岩盤構造物を設計する上では、地山応力のうち最大主応力値の方がより重要となり、最大主応力値測定の信頼性を向上させることが望ましい。

著者らは、上記の観点から最大主応力値の直接測定に関し、以下に述べるような方法を考案し、その可能

性について研究している。この方法は、数mの違いにより主応力値とその方向は大きく変化しないという前提に基づいている。すなわち、あらかじめ最大、最小主応力方向を通常の水圧破砕法により求めた後、水圧破砕により発生した亀裂の影響を受けない位置まで測定区間を移動し、その孔壁面内の最小主応力方向に半小判状のスロットをボアホール軸に沿って人工的に切削する。その後、同位置で水圧破砕を行う (Fig. -1 参照) という方法である。水圧载荷により人工スロットから亀裂が発生した場合、最大主応力値は、その亀裂のP sとして直接測定されるわけである。

現在までに著者らは、①数値解析、②モルタル供試体

を用いた室内実験を行い、その結果について報告している^{1), 2)}。本文では、原位置においてスロットを切削する機器を開発し、その機器を用いて石灰石鉱山で試験を実施した結果について報告する。

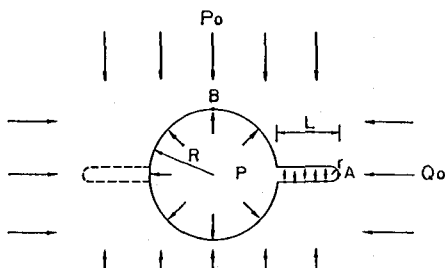


Fig.-1 The borehole with slot(s).
P : internal pressure
 P_o, Q_o ($P_o > Q_o$) : principal stress
R : borehole radius
r : radius of slot tip
L : slot length

2. 現在までの研究概要

(1) 数値解析による亀裂発生の可能性の検討

水圧破砕法により最小方向に設けたスロットから亀裂が発生する場合、亀裂発生に影響を与える要素として、岩盤主応力の大きさや最大、最小主応力の比のほか、岩盤物性（主として透水性）およびスロットの形状があげられる。そこで、透水性については、非透水性、透水性の効果が大きい場合と小さい場合の3ケースを考え、また、スロットの形状に関しては、スロット数、スロット先端形状、スロット長、スロット幅について種々の組み合わせを必要に応じて行い、境界要素法（応力不連続法）を用いてその影響を計算し、亀裂発生規準を作成した。この結果、引張強度が大きく、スロットの先端が半円状で、スロット長が長く薄い方が、亀裂がスロット先端から発生する確率が高くなることが判明した。

(2) スロットを有するボアホールを使った水圧破砕室内実験

供試体は 190mm のモルタルの立方体で、ボアホールとスロットは、モルタル打設時にあらかじめアルミパイプを使った型を設置し、打設後、型抜きを行って作成した。ボアホールの径は 20mm、スロットの深さは 4～8mm とし、载荷用のミニチュアパッカーはボアホールの径に適合するように作成した。実験は、供試体を圧力容器に入れ、供試体の側方からフラットジャッキにより二軸载荷を行い拘束圧（主応力）を発生させ、ミニチュアパッカーをボアホールに挿入し、水圧により孔内载荷する方法で 19 個の供試体を用いて実施した。

結果を概説すると、1) 数値解析で求めた亀裂発生規準と調和的だったのは、スロット長がボアホール半径の 0.8 倍の場合である、2) 最大主応力に対応する P s の精度は、通常の水圧破砕における最小主応力に対応する P s の精度に匹敵する、ことが判明した。しかし、寸法効果の問題や、亀裂の湾曲が P s に与える影響などについては考察できていない。

3. ボアホールスロッターの製作

室内実験では、スロットを供試体内に容易に形成する必要上、透水性であるモルタルを材料として用いたが、実際の水圧破砕法を適用する岩盤は、非透水性に近い材料と考えるべきであり、非透水性あるいは低透水性の材料を用いて実証実験を行う必要がある。しかし、室内実験でこのような材料にスロットを切削することは非常に困難である。また、寸法効果を取り除く上では、実寸法の規模、すなわち原位置でのボアホールを用いた実験の方が望ましい。そこで原位置のボアホール内を切削するための装置を製作する方針とし、Bockら³⁾が提唱している応力解放法の一つである応力測定に用いているボアホールスロッターを参考にして、

エア駆動モーターによるダイヤモンドブレードカッターを装備したボアホールロッターを試作した。Table-1 にボアホールロッターの諸元を示す。

試作したボアホールロッターの径は74mmで、適用ボアホール径は76mmである。ボアホールロッターに装着されている加速度計タイプの方向検知計により、方向を決定した後、ロッターの先端に取り付けられているくさびにより、ボアホールロッターの固定は行われる。くさびは、エアシリンダーのピストンに連結され、孔口に置かれたコントロールボックスにより操作される。ブレードカッターは、Photo-1 に示されるように接続しているエアモータにより回転し、エアモータは、孔口に設置されたコンプレッサから供給されるエアーにより駆動する。ブレードカッターは孔口まで伸びている特殊ロッド（スレッドが切ってある）を回転させることによりブレードカッターの両側にあるガイドロッドに沿って前後方向に移動する。スロットの切削長は、このロッドの回転により移動したロッド長によって知ることができる。

切削深さ(r)とボアホール半径(R)の比は、0.53程度であり、現在までの研究成果において望ましいとされる切削深さとボアホール半径の比0.8よりも小さい値となっている。

4. 原位置測定

ボアホールロッターを用いた原位置測定は、石灰石鉱山の坑道の最奥部に水平方向のボアホール（長さ13m）を2本掘削して実施した。この坑道の大きさは、幅10m、高さ5mであり、坑道周辺の平面図をFig.-2に示す。石灰石の一軸圧縮強度は約80MPaで、亀裂の比較的小さいほぼ均質な岩盤である。Fig.-2には、2本のボアホールの他に約3年前に実施したダブルフラクチャー法による応力測定を実施したボアホールの位置もあわせて示す。このときの測定結果によると、深度3mの位置で、最大主応力 $P_0=6.85\text{MPa}$ 、最小主応力 $Q_0=5.25\text{MPa}$ であり、最大主応力の方向は、孔口から孔底を見て反時計方向に約45°回転した方向であった。

原位置測定は、次の手順で実施した。まず、ボアホール内にボアホールロッターを所定の位置まで挿入し、ブレードカッターを最小主応力方向に合わせる。次に、ブレードカッターを回転させ、孔壁を切削する。ブレードカッターが最深深度に到達した後、ロッドを操作してブレードカッターを軸方向に移動させ、スロットを作成する。終了後、同様な手順で180°反対方向を切削する。両方向にスロットを切削後、ストラドルパッカーを挿入し、通常の水圧破砕を実施し、圧力と時間の関係を記録する。水圧破砕を実施した後は、ストラドルパッカーの代わりに型どりパッカー（ここでは、ダブ

Table-1 The specifications of the borehole slotter.

Diameter x Length	74 mm x 770 mm
Blade diameter	72 mm
Blade thickness	1 mm
Borehole diameter	76 mm
Slotting depth (r)	20 mm
Max. slotting depth	7 m
Pneumatic pressure	4~5 kgf/cm ²

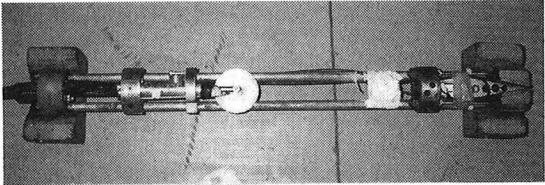


Photo-1 The borehole slotter.

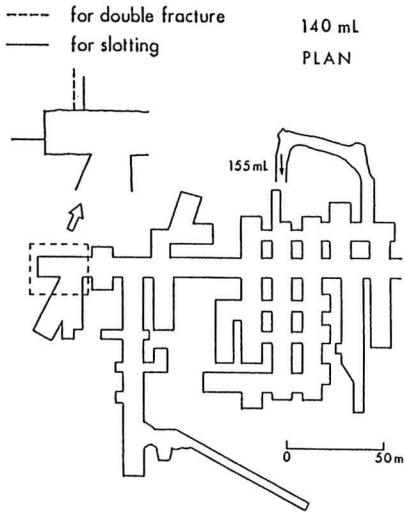


Fig.-2 The structure of underground openings and location of experimental site in a lime stone mine.

ルフラクチャー法で用いるS-200プローブに熱収縮チューブを被覆させ使用）により発生した亀裂の状態を型どり、一連の作業は終了する。なお、今回の測定では、ボアホールスロッターを挿入し、ブレードカッターを操作する特殊ロッドの操作限界により、測定深度は7 mまでであった。

5. 測定結果

Table-2 には、切羽側と側壁部のボアホールで実施した測定の結果を示す。スロットの位置（実線）と亀裂の発生位置（破線）はFig.-3 に示すとおりである。ここでは孔口から孔底方向を見たときのボアホール断面を示している。

Table-2 において、切羽側の深度4.4m、5.5mでは、スロットを設けずに通常の水圧破砕を行っている。深度2.15mのスロットは片側のみである。また、3.6mの深度では水圧破砕を2回実施しており、Table には2回目の載荷の結果に☆印をしている。側壁部では、1.65mの深度においてはスロットを最大主応力方向に切削している。また、深度5.9mでは、スロットを最大と最小主応力方向に片側ずつ切削している。

Fig.-3 の断面において、亀裂は発生しているが、その亀裂がボアホール軸と平行にならなかった（すなわち、縦亀裂ではない）深度の亀裂方向は記述していない。

原位置測定の結果は以下のようにまとめることができる。

- 1) 浅い深度では、最小主応力方向にスロットがあるにもかかわらず、亀裂は最大主応力方向に発生している。
- 2) 深度3.6mでスロット先端から亀裂が発生している。しかし、2回目の載荷で亀裂は、孔壁上で最大主応力方向に湾曲している（Photo-2 参照）。
- 3) 測定深度が深くなるにつれ、孔壁面の亀裂の発生方向は、ボアホール軸に対し傾斜（すなわち横亀裂となる）していく傾向がある。
- 4) Ps はボアホールにより異なり、切羽部では2.4～3.1MPa、側壁部では4.2～4.4MPaであった（浅い深度のデータを除く）。

このように、今回の測定の主な目的である最小主応力方向にスロットを設け、同方向に亀裂を発生させるという試みは1例にとどまっている。この理由の1つとしては、測定位置を応力が集中している大きな坑道の隅角部に設けており、主応力値やその方向が大きく変化しているためと考えられる。また、スロットの深

Table-2 The results of experiments at every measured depth.

Site:the tunnel face side

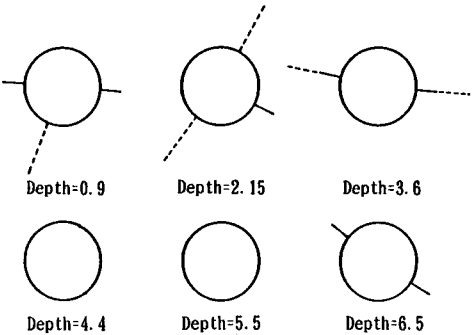
D (m)	Pb (MPa)	Psb (MPa)	Ps (MPa)	※θs (deg.)	※θc (deg.)
0.9	10.3	7.0	4.6	106 273	201
2.15	9.4	6.2	2.7	117	30 217
3.6	10.6	5.7	3.2 ☆2.6	94 282	94 282
4.4	7.7	5.8	3.1	no slot	not longitudinal
5.5	8.7	4.8	2.4	no slot	not longitudinal
6.5	5.7	5.1	2.6	122 308	not longitudinal

Site:the side wall

D (m)	Pb (MPa)	Psb (MPa)	Ps (MPa)	※θs (deg.)	※θc (deg.)
1.65	12.6	10.2	6.0	149 318	149
2.4	9.1	6.8	4.2	39 216	334
5.9	9.0	7.9	4.3	26 310	310

D Depth
P b Breakdown pressure
Psb Re-opening pressure
P s Shut-in pressure
θs Direction of cutting slot
θc Direction of crack initiation
☆ Second pressurization
※ Clockwise from the top of the horizontal borehole

the tunnel face side



the side wall

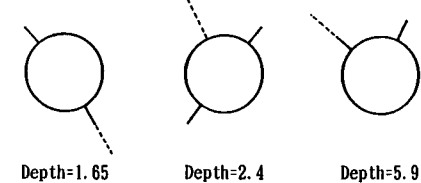


Fig.-3 The positions of slots with solid line and the positions of the fractures with dotted line.

さを20mm程度しか切削できず、数値解析や室内実験で検討したスロット深さとボアホール半径の比 0.8を確保できなかったことも、亀裂がスロット先端から発生する測定例が少なかった原因であると推定される。この切削深さをより深くすることは、今回用いたようなブレードカッターをボアホール内に挿入する方法では、機械構造の点で限界がある。今後も、ブレードカッターについて検討を進めるが、さらに別な切削方法（例えばウォータージェット）を用いたスロット切削システムを研究する必要があるだろう。

深度3.6mにおいて、1回目の水圧破砕ではスロット先端から亀裂が発生しているものの、同位置で2回目の水圧破砕を試みたところPhoto-2に見られるように亀裂がスロット端部（孔壁上）から最大主応力方向に湾曲しながら進展していることが確認された。このことから、最小主応力方向に発生した亀裂は、条件により異なるものの、やがて（岩盤内でも）最大主応力方向に湾曲しつつ進展することは明かであるので、適切なスロット深度の確保と水圧破砕データの評価が必要である。

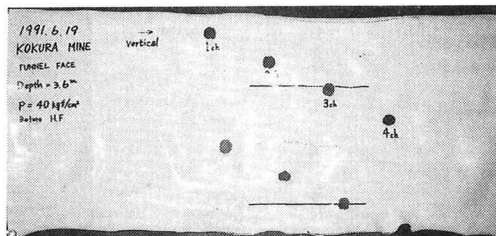
応力値は、3年前のデータの1/2近く小さい結果となっている。ここ3年間で石灰石採掘により測定位置近傍の環境が大きく変化しているためと考えられるが、これについては、本研究の目的ではないのでこれ以上言及しない。

6. おわりに

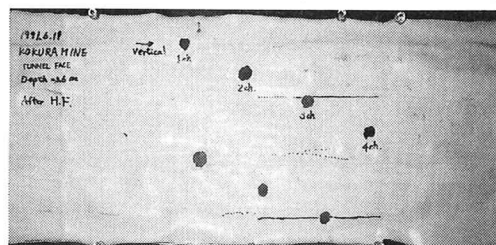
最小主応力方向にあらかじめスロットを切削して水圧破砕を行い、最大主応力を直接測定する試みは、数値解析、室内実験を経て、今回はボアホールスロッターを試作し、原位置測定を実施した結果について報告した。その結果、9回の測定例のうちスロット先端から亀裂が発生した例は1例のみであった。このことは、測定位置の主応力分布が複雑なことに起因するほか、試作した機器のスロット切削能力が所定の深度よりも浅い深度しか切削できなかったことにも原因があるものと考えられ、今後、新しいシステムによる機器開発に取り組んでいく方針である。

引用文献

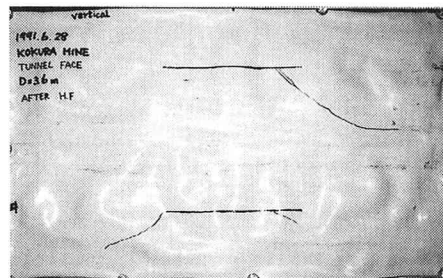
- 1) 水田、佐久間ほか:ボアホールスロッターを利用する水圧破砕応力測定法に関する研究、第21回岩盤力学シンポジウム講演論文集、1989。
- 2) 佐久間、菊地ほか:水圧破砕法による最大主応力の直接測定に関する基礎的研究、土木学会論文集、418/Ⅲ-13、1990。
- 3) Bock, H. and Foruria, V.: A recoverable borehole slotting instrument for in situ stress measurements in rocks, not requiring overcoring, Proc. 1st Int. Symp. on Field Measurement in Geomech. Vol. 1, 1983.



(a) slots impressed before hydraulic fracturing



(b) after first fracturing



(c) secondary fracture extension turning to P_0 direction after second fracturing

Photo-2 Borehole impression at the position of 3.6m depth from the tunnel face.