

平成21年3月31日現在

研究種目：基盤研究 (B)	
研究期間：2006～2008	
課題番号：18360432	
研究課題名 (和文)	ボアホールジャッキ破碎による高精度応力測定システムの開発と 原位置計測への適用
研究課題名 (英文)	Development of high accuracy stress measurement system by borehole jack fracturing and application of it to field measurement
研究代表者	水田 義明 (MIZUTA YOSHIKI)
	崇城大学・工学部・教授
	研究者番号：20107733

研究成果の概要：ボアホールジャッキ式乾式破碎プローブを試作し、新プローブで孔内载荷したときの薄板岩石供試体上のひずみ分布計測実験、二軸载荷を受けた立方体岩石供試体の破碎実験および釜石鉱山坑内における原位置計測実験を行った。これらの実験から得られた知見をもとに、再開口圧検出の精度を上げるための接線ひずみセンサーの改良し、神岡鉱山坑内における原位置応力測定を行い、その結果を高剛性水圧破碎応力測定の結果と比較して、新プローブによる高精度応力測定が可能であることを確かめた。また、载荷力を高めるための改良すなわち油圧シリンダーの断面を小判形にし、ジャッキ間隔を狭くしたミニジャッキを試作し、ミニジャッキで载荷したときの薄板岩石供試体上のひずみ分布計測実験を行った。さらに、光センサーによる接線ひずみ計測の可能性を検討するために、薄板岩石供試体を用いた室内較正実験を行った。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
18年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
19年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
20年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
年度			
総計	13,000,000	3,900,000	16,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・地球・資源システム工学

キーワード：ボアホールジャッキ、室内較正試験、原位置計測、数値シミュレーション、亀裂再開口圧の高精度検出、水圧破碎結果との比較、小判形ジャッキ断面

## 1. 研究開始当初の背景

(1) これまでに、信頼性の高い原位置応力測定法として、実際に用いられてきたのは、応力解放法、水圧破碎法及びスリーブ式乾式破碎法である。これらのうち、応力解放法は深部の応力測定には不向きと言われてきた

が、最近では、応力解放法による深部応力測定も行われるようになってきている(石井 紘、2003)。

応力解放法においては、無限遠点の六つの応力テンソル成分と、オーバーコアリングによって計測位置に誘起されるひずみ成分と

を結ぶ関係式に基づいた観測方程式により応力成分を求めるのが普通である。この解析は、通常、線形等方弾性体仮定のもとになされる。これが厳密には成り立たないことは、岩石力学のミクロな視点から明白である。静水圧下のひずみキャリブレーション結果から直接応力成分を求める試みもなされてきたが、固体の変形は変形方向の応力テンソル成分だけでなく、その他の成分の影響も受けるので、信頼性の高い方法とは言い難い。また、深部ボアホールをめざすと、応力測定プローブの固定のしやすさの点から埋設型が有利と考えられるが、不均質問題としての検討が十分には行われていない。オーバーコアリングは応力の部分開放ではなく応力を完全に解放するので、オーバーコアリングの径が十分に大きければ、ゲージ部の剛性が無視できないほど大きくても、厳密な解析（計測ひずみから解放前の応力場を逆算）を必要としない。しかし、測定点が深くなればなるほど大孔径のオーバーコアリングは経済的に難しくなるので、現実には深部応力測定においては大孔径のオーバーコアリングは行われていない。また、オーバーコアリングの径が十分に大きくなければ、計測孔とオーバーコアリング孔の径およびゲージ部と岩体部の剛性を考慮に入れた厳密な逆解析が必要となるが、それが未だ実施されないままに、間違った逆算が行われているという大きな問題がある。

(2) 水圧破碎法が地殻応力測定に有効な方法と認められ、さまざまな地点で測定が実施されるようになると、再開口圧  $P_r$  とシャットイン圧  $P_s$  がほぼ等しいケースが続出した。この観測事実は、間隙圧を無視すると、世界中のいかなる場所においても主応力比が2に等しいことを意味する。Lee and Haimson (1989)は、これが事実であるというより、むしろ  $P_r$  や  $P_s$  の決定方法に問題があると考えた。一方、Pine et al. (1983)は、圧力-時間曲線の非線形開始点で定義される再開口圧  $P_r$  は原理的に最小主応力  $Sh$  に等しくなると述べ、Ito and Hayashi (1993)もまた、亀裂モデルによる数値シミュレーションにより、 $P_r$  とシャットイン圧 (ISIP : instantaneous shut-in pressure) が等しいと結論した。  $P_r = P_s$  が成り立つならば、再開口圧とシャットイン圧が等しい場合が多いという観測事実を説明することができるが、再開口圧を用いた方法は適用できないことを意味するので、水圧破碎法にとっては深刻な問題であった。

ただし、ごく最近においては、注水系統を

高剛性とし、正しい再開口圧算定式を用いることでこの問題は無くなりつつある。

(3) 乾式破碎法は応力解放法と比較した時の水圧破碎法の利点を共有している。また、加圧流体が破碎亀裂に流入する水圧破碎と異なり、圧力媒体は加圧用のスリーブやジャッキ内に閉じ込められているので、加圧システムがコンパクトとなり、容易にダウンホールに設置可能である。ただし、破碎亀裂内に流体圧が作用しないため、亀裂を伸ばすために必要な圧力が高くなり、加圧システムには高い設計耐圧が必要となる。

乾式破碎は流体にかかわる水圧破碎のすべての問題から逃れることができる。また、水圧破碎と異なり、ダブルパッカーによる止水の必要もない。また、地下深部の高圧下でボアホールがダメージを受けた場合でも、モルタル等による修復を行えば適用可能と期待される。この場合、プローブ、モルタルおよび岩盤の三つの系で構成される不均質媒体の問題となるが、この問題は、新しく開発された3次元境界要素法による数値シミュレーションにより解決できる (Liu et al., 2005)。乾式破碎法による応力測定においては、孔内加圧により、意図する方向に人工亀裂を造成し、いったん除荷した後再び載荷する。この操作を三つの方向について行い、それぞれの亀裂が再開口する瞬間の圧力を検出する。これらの再開口圧を基にして三つの方程式を立てて最大主応力  $SH$  と最小主応力  $Sh$  の大きさおよびそれらの方向を算定する。しかしながら、従来のスリーブ式乾式破碎においては、亀裂の再開口圧を圧力-孔径変化曲線から読み取るので、再開口圧を正確に検出できないという問題がある。Serata Geomechanics, Inc. が開発したスリーブ式乾式破碎による計測方法、すなわち、圧力-孔径変化曲線の勾配が変化（載荷量の増分に対する孔径変化の増分が増大）する点から亀裂再開口圧を読みとれば、それは真の再開口圧よりかなり大きくなる (石田ら、2002)。

## 2. 研究の目的

(1) 新しく開発したボアホールジャッキ式乾式破碎プローブ (水田ら、2003) は、独特の亀裂再開口圧検出方式 (接線ひずみセンサーによる) を採用しているため、再開口の瞬間を高精度に検出できる。また独特の加圧方式を用いているため、ボアホールジャッキ式でありながら、ほぼ孔壁の全周にわたって載荷することができる。加圧プレートの外周とそれに取り付けられている加圧シールの内

周とは曲率半径が異なっているため、無載荷の状態ではそれらの間に隙間がある。載荷時には、加圧プレートの進入によって加圧シェルが曲げられ、加圧シェルの内周は加圧プレートの外周に一致し、かつ加圧シェル外周の曲率と孔壁の曲率とが一致するように設計されている。その結果、一对の加圧シェルの片方は孔壁の半周（ $180^\circ$ ）の  $8/9$ （ $160^\circ$ ）にわたって載荷できる構造となっている。また、そのような構造であることにより、無載荷のときには、孔壁との間にクリアランスをとることができる。

（2）本研究の目的は、まず、室内較正試験を行って、新プローブを用いれば高精度の応力測定が可能であることを実証し、つぎに、原位置（被り圧は大きいが接近点からのボーリング孔は浅い）応力測定を行う。その原位置では過去に多くの応力測定が行われているが、それらは調和的でなく、それゆえに決定的なデータが得られていない。それは、測定原理のそれぞれに上に述べたような信頼性を損う要因があるからである（例えば、応力解放法では主応力差が大きく算定され、水圧破碎法やスリーブ式乾式破碎法ではそれが小さく算定されてしまう）。そこで、過去の計測データの問題点を洗い出し、それらを基にして応力場の修正を試み、新プローブによる計測値を決定的なデータとすることの妥当性を示す。

すなわち、地殻絶対応力測定の信頼性を飛躍的に向上させて、繰り返し応力測定による地震などの危険予知が可能となるシステムの確立をめざしたもので、その基礎の確立を目的としている。

### 3. 研究の方法

（1）本研究申請に先立ち、地殻絶対応力の高精度計測をめざして、独特の加圧方式および独特の再開口圧検出方式による乾式破碎プローブのプロトタイプを新しく開発し、その有効性を模擬試験と数値シミュレーションによりテストした。また、応力測定プローブとして特許を出願した。

新プローブは水田が設計し、宇部テクノエンジ（株）新規事業推進室長松永隆昌氏が製作したもので、平成21年3月6日に特許第4272479号を取得している。このプローブには、人工亀裂の再開口を直接検出するための接線ひずみセンサー(TSS)が取り付けられている。

（2）2軸載荷装置を利用して、プローブの較正試験を行った。新しく開発されたプローブは東大地震研が所有している。較正試験は、600mm立方の花崗岩供試体および600mm×600mm×5mmの花崗岩供試体を用いて行い、2軸載荷装置およびその中に供試体を収納させるクレーンは崇城大学が現有している。

プローブの較正試験の結果から、新プローブを用いれば高精度の地殻絶対応力測定が可能であることを確認できたが、プロトタイプの接線ひずみセンサーでは、十分にはその機能を発揮し得なかった。そこで、つぎにTSSを改良して較正試験をやり直した。

（3）600mm立方の供試体内円孔のオーバーコアリングを行って、造成されている3枚の人工亀裂を直接観察した。また、供試体の物性試験を行った。

（4）このプローブによる高精度応力測定の可能性は2次元数値シミュレーションの結果からも認められたが、スリーブ式破碎と違って、ボアホール式破碎では境界条件が孔軸方向に一樣ではない。したがって、別途行った鋼管内載荷実験から得られた鋼管外周のひずみ分布は2次元解析から得られた分布の形と少し異なっていた。そこで、つぎに、3次元数値解析を行って、鋼管テストの結果と数値解析の結果とが正確に一致することを確かめた。

（5）上記の結果を踏まえて、釜石鉱山の坑道から20m程度のボーリングを行い、孔内観察を行った上で孔内の数箇所において、新しく開発されたプローブによる原位置応力測定を行った。加圧流体が破碎亀裂に流入する水圧破碎と異なり、乾式破碎では圧力媒体（ハイドロリック油）は加圧プローブ内に閉じ込められているので、加圧システムがコンパクトとなり、容易にダウンホールに設置可能である。また、人工亀裂が最小主応力方向に垂直な方向に造成される水圧破碎と違って、乾式破碎では任意の方向に亀裂を造成することができる。

（6）そこで、意図する方向に人工亀裂を造成するために加圧プローブの方位を正確に固定する回転制御プローブの詳細設計を行い、実際に製作し、その操作性能を室内で確認した上で、原位置において、加圧プローブおよび回転制御プローブの操作実験を行い、それらの性能を再確認した。また、孔内観察を行った上で、（ボーリング孔は浅いが）ワイヤラ

インを使っての応力測定を行った。

(7) 本研究において特に重要なことは、水圧破砕で造成された人工亀裂を新プローブによるジャッキ破砕によって再開口させ、修正水圧破砕法による測定結果が正しいことを数値解析ではなく実験によって実証することである。

(8) つぎに、加圧容量を高めて深部岩盤を破砕できるようにするための超高压プローブの基本設計として油圧シリンダーの断面が小判型のミニジャッキ（原位置計測に用いられるプローブより短い）を製作し、薄板を用いた室内較正試験に供した。

(9) さらに、TSSとして光ファイバーを用いることができるかどうかを確かめるために、光ファイバーを利用した室内較正試験を行った。

#### 4. 研究成果

(1) 本研究では、新しく開発したボアホールジャッキ式乾式破砕プローブ(平成 21 年 3 月 6 日に特許第 4272479 号を取得)を試作し、この新プローブで孔内載荷したときの薄板岩石供試体上のひずみ分布計測実験、二軸載荷を受けた立方体岩石供試体の破砕実験および釜石鉱山坑内における原位置計測実験を行った。また、これらの実験から得られた知見をもとに、再開口圧検出の精度を上げるための接線ひずみセンサーの改良し、神岡鉱山坑内における原位置応力測定を行い、その結果を高剛性水圧破砕応力測定の結果と比較して、新プローブによる高精度応力測定が可能であることを確かめた。また載荷力を高めるための改良すなわち油圧シリンダーの断面を小判形にし、ジャッキ間隔を狭くしたミニジャッキ（製作工程を短縮するために原位置測定用のプローブより短くした）を試作し、ミニジャッキで載荷したときの薄板岩石供試体上のひずみ分布計測実験を行った。さらに、光センサーによる接線ひずみ計測の可能性を検討するために、薄板岩石供試体を用いた室内較正実験を行った。最後に、神岡鉱山坑内における原位置応力測定を行い、その結果を高剛性水圧破砕応力測定の結果と比較して、新プローブによる高精度応力測定が可能であることを確かめた。

また、それらの成果について、いくつかの研究発表を行った。

(2) 最終的な研究成果について、以下に要約して述べる。

図 1 は注水系統を高剛性とし、正しい再開口圧算定式を用いた修正水圧破砕応力測定手順（正しい水圧破砕応力システム）によって得られた水圧破砕結果、すなわち、注水圧—時間（注水量）関係である。また、図 2 は改良された接線ひずみセンサーを用いたボアホールジャッキ破砕手順によって得られたジャッキ圧（亀裂開口部接線応力に換算）—亀裂開口部接線ひずみかんけいである。水圧破砕から得られる再開口圧は

$$Pr = (3 Sh - S_H) / 2$$

ジャッキ破砕から得られる再開口圧は

$$Pr = 3 Sh - S_H$$

であるから、両者は 1 : 2 となる。

図 1, 2 を見るとそれがはっきりと示されている。また、ジャッキ破砕では修正水圧破砕法より明瞭に亀裂再開口圧を検出できることが分かる。

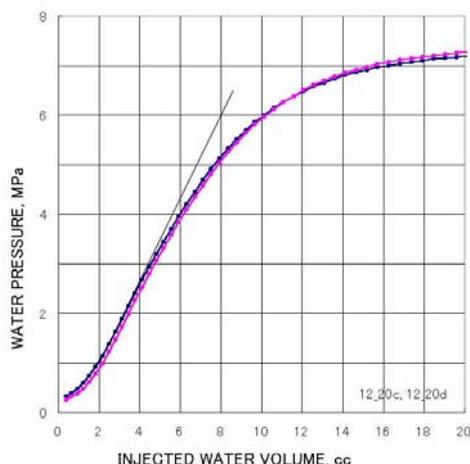


図 1 修正水圧破砕実験結果

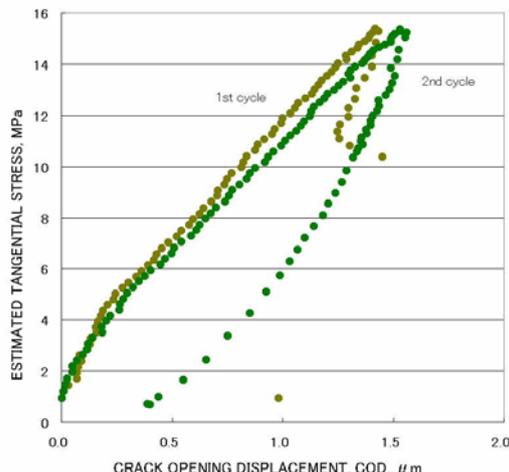


図 2 ジャッキ破砕実験結果

(3) 平成18年度に、東京大学地震研究所の予算によって試作された新プローブの外観および部品分解写真は写真1. に示されている。分解写真は上から順に、加圧プレート(下部)、加圧プレート(上部: 2分割)、摩擦シェルおよびジャッキボックスである。



写真1 新プローブおよび分解された部品

(4) 平成19年度には、プローブの改良、すなわち、接線ひずみセンサー収納スペースを狭くし、加圧システムの改良を行った。

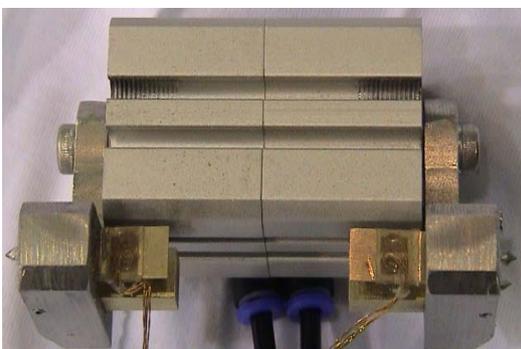
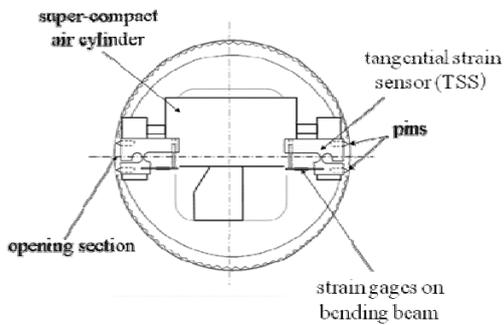


図3 改良された接線ひずみセンサー(図と写真)

また、接線ひずみセンサーの改良を行った。図3は改良された接線ひずみセンサーの立面図と写真を示す。さらに、破砕力を高めるために、ジャッキの断面を小判型にしたジャッキボックス(ミニジャッキ)を試作した。ただし、加工時間を短縮するために試作ミニジャッキは実用に供されるプローブより短くなっている。図4はミニジャッキの写真である。

(4) 平成20年度においては、このミニジャッキを用いて薄板岩石供試体に载荷し、光ファイバーセンサーによる接線ひずみ検出の可能性を検討した。図4は、光ファイバーセンサーによって計測されたボアホール接線方向ひずみ分布を電気抵抗線ひずみ計によって計測されたもの比較したものである。



図4 ミニジャッキ

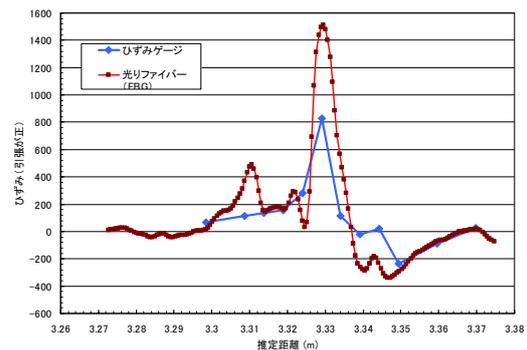


図5 光ファイバーセンサーを装着したときの実験結果

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

① G. LI, Y. Mizuta, T. Ishida, H. Li, S. Nakama and T. Sato, Stress field determination from local measurements by numerical modeling, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 46 (2009) 138-147

[学会発表] (計 3 件)

① 横山幸也、佐野修、板本昌治、中山芳樹、平田篤夫、水田義明、乾式破碎による地殻応力測定法の開発、第 12 回岩の力学国内シンポジウム&第 29 回西日本岩盤工学シンポジウム (2008 年 9 月 6 日) C2-38、山口大学工学部

② Y. Mizuta, Improved procedures for stress determination by borehole jack fracturing, 3<sup>rd</sup> Int. Symp. Modern Mining & Safety Technology (2008 年 8 月 4 日) Keynote Lecture、遼寧工程技術大学

③ 佐野修、横山幸也、小川浩司、折田隆三、中山芳樹、板本昌治、桑原和道、陳渠、平田篤夫、水田義明、第 28 回西日本岩盤工学シンポジウム論文集 (2007 年 9 月 3 日) 65-70、山口大学工学部

○取得状況 (計 1 件)

特許、水田義明、松永隆昌、宇部テクノエンジ株式会社、特許第 4272479、取得 平成 21 年 3 月 6 日

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

水田義明 (MIZUTA YOSHIAKI)  
崇城大学・工学部・教授  
研究者番号：20107733

### (2) 研究分担者

平田篤夫 (HIRATA ATSUO)  
(2006~2007 年度)  
崇城大学・工学部・教授  
研究者番号：20279376  
佐野修 (SANO OSAMU)  
(2006~2007 年度)  
東京大学・地震研究所・教授  
研究者番号：20127765  
伊藤久男 (ITO HISAO)  
(2006~2007 年度)  
海洋研究開発機構・室長  
研究者番号：10356470

石田毅 (ISHIDA TUYOSHI)  
(2006 年度)  
京都大学・工学部・教授  
研究者番号：10232307

### (3) 連携研究者

平田篤夫 (HIRATA ATSUO)  
(2008 年度)  
崇城大学・工学部・教授  
研究者番号：20279376  
佐野修 (SANO OSAMU)  
(2008 年度)  
東京大学・地震研究所・教授  
研究者番号：20127765  
伊藤久男 (ITO HISAO)  
(2008 年度)  
海洋研究開発機構・室長  
研究者番号：10356470