

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24246147

研究課題名(和文) 水圧破砕とコア変形原理を統合した自己補償型深部地殻応力測定法の構築と実用化

研究課題名(英文) Development of Deep Rock Stress Tester Based upon Hydraulic Fracturing and Diametrical Core Deformation Analysis

研究代表者

伊藤 高敏 (ITO, Takatoshi)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：00184664

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、多方面で関心が高まっている、深度数kmにおける地殻応力の原位置測定を可能とする実用的な方法を提案して実証した。これによれば、水圧ポンプを組み込んだ坑内ツールを用い、坑底に設けた補助孔(ベビー孔)で水圧破砕を行うことでコンプライアンスが十分小さい加圧系を実現し、ワイヤーライン式ツールにつきまとう抑留リスクを、ドリルパイプの中でツールを昇降させることで回避し、検出が極めて困難な水圧破砕き裂の方位を用いず、ベビー孔のコアの形状を解析して地殻応力の方位を決定し、同時に得られる地殻応力差を使って水圧破砕法で得た結果を補償し、さらに、水圧破砕法が原理的に内包する測定範囲の限界を排除できる。

研究成果の概要(英文)：We are developing new methods based upon hydraulic fracturing (HF), which allow us to measure in-situ stress at few km deep. It is assumed here that a drill string containing a wireline retrievable core barrel assembly has been set in the borehole in advance. The tool is conveyed on a wireline through the drill string, while the outer barrel remains at the bottom of the borehole. This way contributes greatly to avoid the risk of trouble occurring in boreholes such as the tool getting stuck. Then the HF test is carried out in a short hole additionally-drilled at the bottom of the original borehole, which is referred to the baby hole. The core retrieved from the baby hole can be applied to the Diametrical Core Deformation Analysis, DCDA, and we can have additional information on stress state independently of HF. By combining those data obtained from HF and DCDA, we can validate the estimated magnitude and azimuth of the in-situ stresses.

研究分野：ジオメカニクス

キーワード：地殻工学 地殻応力計測 水圧破砕 BABHY方式 大深度

1. 研究開始当初の背景

日本のみならず世界をまさに震撼させた東日本大震災では、地震学では全く想定されていなかった規模と場所で地震が発生し、従来の統計に基づく地震挙動予測の限界を露呈した。これにより、地震の駆動力となる地殻応力の蓄積など、生の情報に基づく地震挙動の評価が求められている。一方、コスト的に従来は対象とならなかった石油・天然ガス資源（非在来型資源）の開発が近年になって急速に進み、近い将来に予測される化石燃料不足を補うものに発展することが期待されている。米国で開発が始まったシェールガスはその好例である。この背景には、坑井掘削と貯留層の挙動予測のために新たに導入された、地殻応力と地層の力学応答を考慮したモデル、すなわちジオメカニクスの成功がある。これにより、モデルの境界条件となる地殻応力を、開発のより早い段階で正しく把握することへの要求が増加している。このように、地殻応力測定に対する時代の要請は、かつての土木・鉱山開発の分野で対象とされてきた数十～数百 m の浅深度から、エネルギー開発、地震対策などの分野が必要とする数 km 以深へと対象が拡大している。しかしながら、掘削技術が対象深度によって大きく変わるように、浅深度用として構築された従来の地殻応力測定法を、そのまま km 級の深度に適用することは全く不可能である。これは、深度が増えると坑井内が高圧、高温となり、坑壁の不安定性が相対的に増え、また掘削コストも増すために、それに見合った高い信頼性と耐久性が要求されるからである。このため、それらの条件を満足する新たな技術開発が必要となっている。

2. 研究の目的

上記したように多方面で関心が高まっている、深度数 km における地殻応力の原位置測定を可能とする実用的な方法を提案し、それを具体化することが本研究の目的である。そこで、これまで実現を妨げてきた様々な課題を新たな方式 (BABHY-2) によって一挙に解決する。すなわち、(a) 水圧破碎システムに求められる低コンプライアンスの条件を満足させるため、水圧ポンプを測定ツール内に組み込み、かつ、坑底に設けた補助孔 (ベビー孔) で水圧破碎を行うことでコンパクトな加圧系を実現し、(b) ワイヤーライン式ツールにつきまとう抑留リスクを、ドリルパイプの中でツールを昇降させることで回避し、(c) 検出が極めて困難な水圧破碎き裂の方位を用いず、掘削コアの形状を解析して地殻応力の方位を決定し、(d) 同時に得られる地殻応力差を使って水圧破碎法で得た結果を補償し、さらに、水圧破碎法が原理的に内包する測定範囲の限界を排除することを目指す。

3. 研究の方法

本研究では、図 1 と以下に述べる手順によっ

て地殻応力を原位置で測定することを提案し、実験および解析によって基本原理を確認し、また、必要な機材を実際に製作して測定法の具体性を明らかにした。この測定概念を Baby Borehole Hydraulic Fracturing II (略して BABHY-II) 方式と呼び、その測定に用いるツールのことを Deep Rock Stress Tester (略して DRST) と呼ぶ。

- (i) 本体坑井用コアリング用インナーバレルの代わりにベビー孔用のコアビットを取り付けたツールを降ろし、本体坑井用アウターバレルに固定する。固定方法は、コアリング用インナーバレルを固定するのと同様にラッチ機構による。
- (ii) 通常のを領でドリルパイプを回転させ、ベビー孔を掘削する。
- (iii) ベビー孔掘削ツールをワイヤーラインで引き上げ、コアを回収する。そのコアの観察により、水圧破碎試験区間に人工き裂形成の支障となる既存き裂がないことを確認する。
- (iv) ワイヤーラインで水圧破碎ツールを降ろす。
- (v) 水圧破碎ツールのダブルパッカーが所定の試験区間深度の位置に来るようにドリルパイプを下げ固定する。このとき、ツール先端に取り付けたキャリパーによって測定された坑井断面形状の変化から、ツールが正しくベビー孔に挿入されたことを確認すると共に、ベビー孔に崩落がなく、水圧破碎試験に適した円形の断面となっていることを確認する。
- (vi) ダブルパッカーを膨張させて試験区間を周囲から隔離する。そして、試験区間を一定レートで加圧して人工き裂を作成し、またそれを開閉口させて、地殻応力評価に必要な、き裂開口圧 P_f およびき裂閉口圧 P_c を測定する。
- (vii) ダブルパッカーを収縮させてから、水圧破碎ツールを引き上げる。
- (viii) 本体坑井用コアビットでベビー孔部分を掘り抜く。
- (ix) ステップ(i)に戻る。

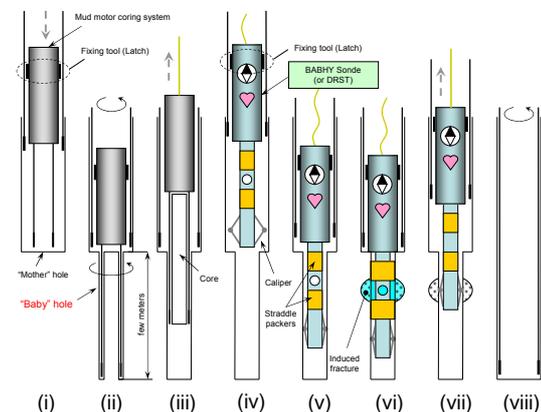


図 1 本研究で提案する原位置地殻応力の測定方法の基本概念

なお、地熱井などで坑底温度が高い場合には、ステップ(iv)において泥水を循環させ、坑内を冷却しながらツールを降ろす。このようにツールを冷却できる手段があることは、BABHY-II方式の特長の一つである。

上記のステップ(iv)で得られる P_r および P_s に加えて、(iii)で回収されるコアから地殻応力評価に用いるデータを得る。すなわち、回転するビットの先端に位置するコアの断面は真円のはずであるが、掘削が進んでビット先端が遠ざかるにつれて応力が解放されるため、各方向の解放応力に比例する、非対称な半径方向の変形が同断面に生じる。よって、鉛直孔井の場合、コアの直径が最大となる方位として水平面内最大応力 S_{Hmax} の方位を決定できる。さらに、コアの変形が弾性的に起こるとすれば、応力解放が完了した後のコア直径の最大値 d_{max} および最小値 d_{min} から、次式によって応力差 ($S_{Hmax} - S_{Hmin}$) が求められる。

$$S_{Hmax} - S_{Hmin} = \frac{E}{1+\nu} \frac{d_{max} - d_{min}}{d_{min}} \quad (1)$$

E および ν はそれぞれ岩体のヤング率とポアソン比である。これが研究協力者の船戸によって考案されたコアを用いた地殻応力評価法(コア変形法)であり、仮定が少なく単純で優れた方法であるが、 S_{Hmax} と S_{Hmin} のそれぞれを個別に求めることはできない。そこで、この方法を水圧破碎法と組み合わせ、次のようにして地殻応力の大きさと方位を決定する。まずベビー孔のコアの断面形状を測定し、その結果から S_{Hmax} の方位を決定する。また、直径差から式(1)によって応力差 ($S_{Hmax} - S_{Hmin}$) を決定する。一方、水圧破碎試験で測定された P_s から次式によって S_{Hmin} を決定し、それとコア形状から求めた応力差の和として S_{Hmax} を決定する。

$$S_{Hmin} = P_s \quad (2)$$

この方法によれば、困難が予想されるき裂の方位測定が不要となり、水圧破碎法が原理的に内包する測定限界 ($S_{Hmax} / S_{Hmin} < 3$) の問題も解決できる。さらに、 P_r と P_s から次式で求められる S_{Hmax} を上記の結果と比較することで、その信頼性を確認することが可能となる。

$$S_{Hmax} = 3P_s - 2P_r \quad (3)$$

4. 研究成果

上述した BABHY-II 方式の実現性は、下記 2つの事項に左右される。すなわち、水圧破碎試験を行うためのツール(DRST)が実際に作れるか否か、また、当初は原理の提案段階にあったコア変形法が実際に使えるのか否かである。そこで両者の検討を行った。

(1) 水圧破碎試験ツール(DRST)の実証
ツールの実現性を明らかにするために、まずツールの仕様を検討した。ここで考慮すべき要点は、坑井直径、掘削ロッドの内壁とツ

ル表面との隙間(隙間が小さいとツールが通らないだけでなく、隙間を水が抜けにくくなってツールの移動抵抗が増え、特に降ろす時間が長くなる)、深度と共に増加する坑内圧力と温度ならびに地殻応力、ワイヤーラインの長さと共に増加する電気抵抗と通信障害の起き易さなどである。これに対して本研究では、地震対策とエネルギー資源開発へ応用することを前提に様々な検討を重ね、最終的に下記の仕様を決定した。対象坑井径：HQサイズ、ツール外径：70 mm程度(HQサイズ掘管の中を昇降できること)、使用深度：3000 m以浅、使用温度：100 以上、水圧破碎圧力：坑井内圧 + 50 MPa 以上、水圧破碎流量：100 cc/min 以上、パッカー加圧圧力：10 ~ 20 MPa (坑内圧との差圧)

パッカー収縮外径：60 mm未満(HQコアビットを通過できること)、データ：圧力(油、水、坑内水など)、流量(ピストン変位)、温度(ツール内・外、モーター)、ツール方位・傾斜、キャリパー出力など、サンプリング：10 Hz 以上、制御：リアルタイムでポンプおよび切替えバルブを作動できることである。また、ツールを、電源制御、油圧供給、水圧供給、パッカーおよびキャリパーの各ユニットに分割し、また、坑井入口で組立/分解ができる構造とすることとした。ここで油圧供給ユニットは、パッカーを膨張させるための圧力および水圧供給ユニットを駆動する圧力を供給するものである。

上記の仕様を満足するツール実際に製作した。その基本構造を模式的に表したものが図2である。ツールの坑内に降ろす部分は、1.測定制御・電圧供給ユニット、2.油圧供給ユニット、3.油圧水圧変換ユニット、4.ライン切り替えユニット、5.パッカーユニットおよび6.キャリパーユニットの6つの部分に分割される。これに加えて地表に設置される通信制御陸上ユニットがある。製作したツールを分割した状態で平置きした写真が図3である。各ユニットの長さは1.0 ~ 4.7 mであり、全て接続すると約19 mの長さとなる。また、通信制御陸上ユニットの操作画面が図4である。

最終的に全てのユニットを組み合わせて

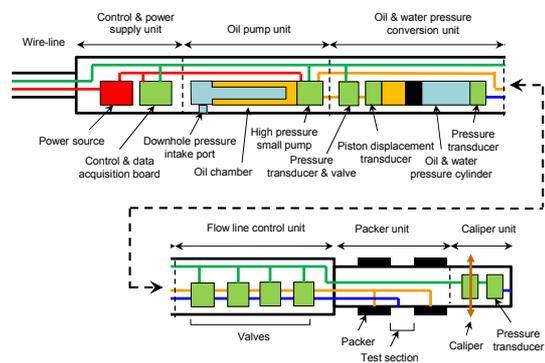


図2 製作した水圧破碎ツール(DRST)の基本構造

動作させる試験を行った。試験は、(a) 地表に横置きした各ユニットを、別途用意した電線と配管で接続した状態および (b) 各ユニットを直結して試験坑井に挿入した状態のそれぞれで実施した(図5)。これにより、製作した装置が所定の性能を有していることを確認した。



図3 製作した水圧破碎ツール(分割して平置きした状態)

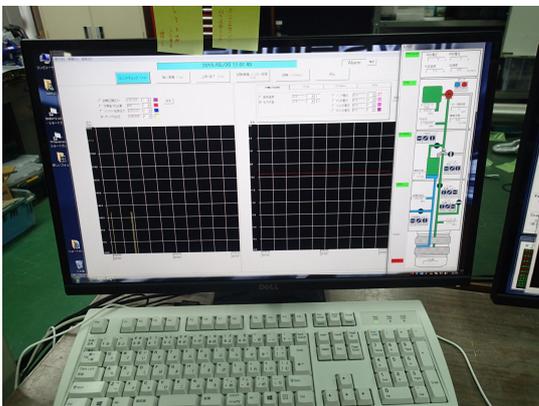


図4 通信制御陸上ユニットの操作画面



図5 総合試験の実施状況

(2) コア変形法の検証

コア変形法は、応力解放に伴うコアの弾性変形に基づく方法である。その弾性変形は、ビット先端の近傍で起こると考えられるが、その詳細は不明である。また、近傍であるが故に、コアの変形挙動がビットの影響で乱され

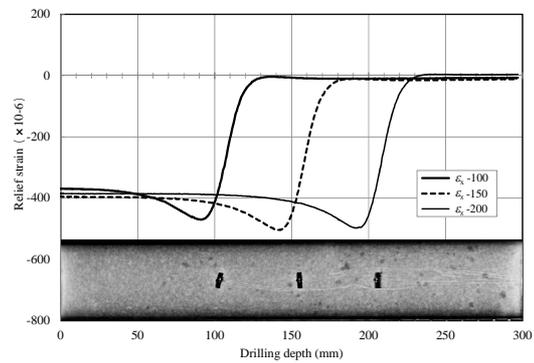


図6 埋設ひずみゲージで測定されたコア部分のひずみ変化

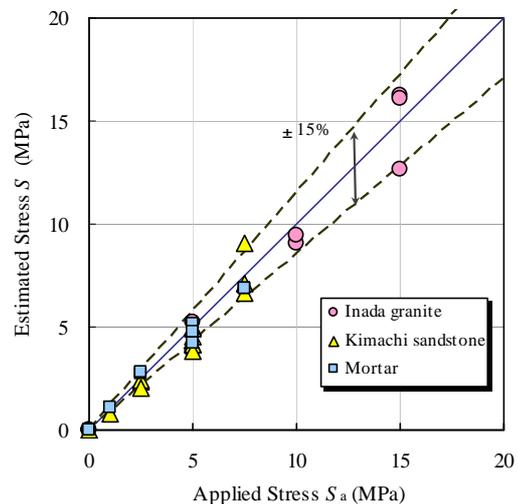


図7 試験片に実際に負荷した圧縮応力とコア変形から評価した結果の比較

る可能性も否定できない。そこで、ひずみゲージを埋め込んだモルタル製の 300mm 角立方体ブロック型試験片を作成し、それを外径φ60 mmのコアビットでくり抜いた時に、くり抜かれた部分すなわちコアに生じるひずみの変化を調べた。その結果の一例が図6である。この例では試験片に7.5 MPaの一軸圧縮応力を負荷した状態で、ひずみゲージを埋設した部分をくり抜いた。図中の横軸が掘進長、縦軸がひずみゲージの出力であり、無負荷の状態を零としている。同図には埋設ひずみゲージの位置と方向を確認するために撮影した回収コアの X 線画像を合わせて示してある。同画像に3つ見える四角状の黒い部分がひずみゲージである。ひずみゲージの向きと試験片に負荷した一軸圧縮応力の方向は一致している。図6の結果より、削孔時のひずみ変化は、ビット先端がひずみゲージの位置に達する前に圧縮側にひずみが一旦増加した後、ビットの通過とともにひずみがほぼ100%解放されて、やがて零の状態に戻っていることがわかる。一方、弾性変形を仮定した有限要素法で削孔時のひずみ変化を求めたところ、図6の結果とほぼ同じになった。

したがって、弾性変形を仮定して導出した式(1)が正しく成立するはずである。そこで、試験片に負荷する一軸圧縮応力 S_a の大きさをを変えてコアを抜き、コアの最大および最小直径と式(1)から得られる一軸圧縮応力の推定値 S を比較した。また、モルタルに加えて稲田花崗岩と来待砂岩から、それぞれ作成した試験片を用いて同様なことを行った。その結果をまとめて図7に示す。これによって、負荷した圧縮応力をほぼ正しく評価できることが明らかとなった。

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3件)

船戸明雄, 伊藤高敏, 三上 央, コア変形法(DCDA)の室内検証実験, *Journal of MMIJ*, 査読有, Vol.130, 2014, 515-521, <http://www.mmij.or.jp/journal/contribute.html>

Ito, T., Funato, A., Lin, W., Doan, M.-L., Boutt, D.F., Kano, Y., Ito, H., Saffer, D., McNeil, L.C., Byrne, T., Moe, K.-T., Determination of Stress State in Deep Subsea Formation by Combination of Hydraulic Fracturing In-situ Test and Core Analysis – A Case Study in the IODP Expedition 319–, *J. Geophys Res.*, 査読有, Vol. 118, 2013, 1203–1215, doi:10.1002/jgrb.50086.

船戸明雄, 伊藤高敏, 三上 央, 岩盤応力評価のためのコア変形法(DCDA), *Journal of MMIJ*, 査読有, Vol. 129, 2013, 577-584, <http://www.mmij.or.jp/journal/contribute.html>.

[学会発表](計6件)

Mikami, H., Funato, A. and Ito, T., A New Concept for Measuring Rock Stress at Depth Using a Core Obtained by Drilling, *Proc. of the 11th Int. Conf. on Flow Dynamics (ICFD2014)*, 査読無, Sendai, Oct. 8-10, 2014, 548-549.

伊藤高敏, 熊野海盆における大水深海底地層での水圧破碎地殻応力評価, 第49回地盤工学研究発表会, 査読無, 小倉, 7月15-17日, 2014, 64. (招待講演)

三上 央, 船戸明雄, 伊藤高敏, 弾性異方性を考慮したコア変形モデル, 資源・素材学会東北支部東北支部平成26年度春季大会, 査読無, 仙台, 6月17日, 2014, P-35.

Ito, T., Difficulties and Possible Solutions for Deep Stress Measurements, *Proc. of the 6th Int. Symp. on In-situ Rock Stress*, 査読無, Sendai, Aug. 20-22, 2013, 634-635. (招待講演)

Funato, A., Ito, T., Diametrical Core Deformation Analysis (DCDA) – Measuring Device and Laboratory Verification -, *Proc. of the 6th Int. Symp. on In-situ Rock Stress*, 査読無, Sendai, Aug. 20-22, 2013, 771-778. Ito, T., Challenges to Stress Measurements in Deep and/or Unconsolidated Rock Formations for Frontier Rock Engineering, *Proc. of the 7th Asian Rock Mech. Symp.*, 査読有, Seoul, Korea, Oct. 15-17, 2012, 15-25. (キーノート講演)

6. 研究組織

(1)研究代表者

伊藤 高敏 (ITO, Takatoshi)
東北大学・流体科学研究所・教授
研究者番号: 00184664

(2)研究分担者

清水 浩之 (SHIMIZU, Hiroyuki)
東北大学・流体科学研究所・助教
研究者番号: 60610178

(3)連携研究者

林 為人 (WEIREN, Lin)
海洋研究開発機構・高知コア研究所・グループリーダー
研究者番号: 80371714

(4)研究協力者

船戸 明雄 (FUNATO, Akio)
深田地質研究所・上席主任研究員
研究者番号: なし

名雪利典 (NAYUKI, Toshinori)
大林組・原子力環境技術部・主任
研究者番号: なし

加藤 和政 (KATO, Kazumasa)

海洋研究開発機構・地球深部探査センター・技術副主幹
研究者番号: なし