

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360399

研究課題名(和文)インテリジェント円錐孔底ひずみ法の開発と3D JAPAN STRESS MAP

研究課題名(英文)Development of the Intelligent Compact Conical-ended Borehole Overcoring method and 3D JAPAN STRESS MAP

研究代表者

坂口 清敏 (SAKAGUCHI, KIYOTOSHI)

東北大学・環境科学研究科・准教授

研究者番号：50261590

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円、(間接経費) 4,320,000円

研究成果の概要(和文)：高精度地圧計測法の実現と得られた地圧情報の共有を目的として研究を行った。その中で、東北地方太平洋沖地震後の地圧測定を実施し、地震前の結果と比較検討した。成果を以下にまとめる。

(1)高精度深部地圧測定法の開発を目的としてインテリジェント円錐孔底ひずみ法に使用する超小型データロガーおよびストレインセル貼付装置を開発した。(2)釜石鉱山において東北地方太平洋沖地震後1年～3年後において地圧測定を行い、地震前の結果との比較検討を行い、3D JAPAN STRESS MAP構築のための重要なデータを得た。浅所における測定からでも定点測定を行えば、地震と地殻応力の関係が抽出できる可能性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study was conducted for purposes of development of high-precision in-situ rock stress measurement method and the information disclosure of the in-situ rock stress state. We carried out the in-situ stress measurement after the 2011 Tohoku-oki earthquake and performed the comparison with the results before the earthquake. The results are summarized as follows:

(1) The Cyclone Compact Data logger and the bonding device of the strain-cell unit for the Downward Compact Conical-ended Borehole Overcoring method were developed. (2) The in-situ stress measurements were performed three times after the 2011 Tohoku-oki earthquake. We obtained very important results to develop of 3D JAPAN STRESS MAP from the comparison with the results before the earthquake. The results of this study suggest that measurements at a fixed position, albeit at a shallow depth, can be effective for studying the relation between crustal stress and earthquakes.

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：地圧測定 地震 円錐孔底ひずみ法 東北地方太平洋沖地震

1. 研究開始当初の背景

地圧情報はその測定手法の進歩により格段に向上しつつある。研究代表者は、応力解放法に着目した研究を進め、高精度で低コスト、かつ迅速な測定方法を開発していた。その成果の一つが円錐孔底ひずみ法である。この方法は ISRM(International Society for Rock Mechanics)において国際標準試験法として提案されている。研究代表者は、この方法を 1,000m 以深における大深度地圧測定法に拡張するため、平成 9 年度～平成 11 年度の期間、基盤研究(B)(2)展開研究(課題番号 09555317)の助成を受け、さらに、その実用化に向けて平成 14 年度～平成 16 年度に若手研究(A)(課題番号 14702058)においても研究を進め実績を挙げてきた。さらに、異方性岩盤などの複雑な挙動を示す岩盤を対象とした地圧測定を現実のものとするために、平成 18 年度～平成 20 年度に、「オールマイティー地圧計測・評価システムの開発」(基盤研究(B):課題番号 18360427)の研究を実施している。このように、研究代表者は、正確な地圧情報の把握を目的とした研究を精力的に実施しており、その目的達成が現実のものとなりつつある感触を得つつあった。すなわち、本研究の目的の一つ「確実な地圧計測の実現」をこれまでの研究の集大成と位置づけたいとこの着想に至った。

また、地圧情報の共有と公開については、例えば、地殻運動のモデリング、油田の管理、廃棄物処分場などの地下構造物の安定性評価、断層のすべりや地震などの予測のために地圧情報が自由に使用できれば、その効果は計り知れない。現在、ドイツのカーlsruhe 大学が中心となって World Stress Map の作成プロジェクトが推し進められており、上述の目的のために、地圧情報が自由に使用できる仕組みになっている。しかし、地震予知の上で、我が国は世界をリードする必要があるにも拘わらず、現在の World Stress Map には日本列島の応力状態の情報はわずかしか記載されていない。また、World Stress Map では、二次元的(平面的)な応力の分布を示しているに過ぎず、地震予知の観点では重要となる深度情報を考慮した三次元的な地圧情報は示されていない。そこで筆者は、これまでに日本列島において様々な方法で測定された岩盤応力の測定結果を集約するとともに、新たに測定された情報を随時追加しながら地圧データベース(3D JAPAN STRESS MAP)を整備する必要があると考えた。

2. 研究の目的

地殻の有効利用の社会的要請は、放射性廃棄物の地層処分、二酸化炭素の地下保管などに代表されるように、より深く、より広く、そして、より高度にと更なる展開を求めている。地下を有効に利用するためには、地下岩盤中に作用している応力(地圧)を正確に把握することが重要となる。また、地圧は地震

の発生とも密接に関係しており、地震予知にとっても重要な情報である。したがって、あらゆる条件下において確実に地圧を測定できる方法の確立が必要である。さらに、廃棄物等の地下保管などの社会的要請や地震予知の観点から、関連研究者間での深度情報を含む三次元地圧情報の共有と、国民への地圧情報の公開も必要となる。本研究は、高精度地圧計測法の実現と、得られた地圧情報の共有およびその公開を目的としている。また、本研究が 1 年を経過した頃、東北地方太平洋沖地震が発生した。そのため、東北地方太平洋沖地震前後の東北地方(特に釜石地域)の地圧場の変動を定量することも目的とした。なお、この地圧変動の情報は、3D JAPAN STRESS MAP を整備する上で貴重かつ重要なデータとなる。

3. 研究の方法

本研究は以下の方法により実施した。

(1)下向き円錐孔底ひずみ法の実用性を向上させるために、ストレインセル貼付方法の改良と新しい貼付装置の開発を行う。さらに、原位置試験を実施し、実測定に基づく問題点の抽出等を行い、現場技術者が直ちに利用できる測定手法として完成させる。

(2)これまでに公表されている地圧情報を収集するとともに、新たな地圧データの測定を行う。さらに、東北地方太平洋沖地震後の地圧を測定し、地震前後の応力場の変動を考察し、巨大地震の予兆現象の定量化を試みる。

4. 研究成果

(1)インテリジェント円錐孔底ひずみ法の開発(図 1 参照)

高精度地圧計測測定法としてのインテリジェント円錐孔底ひずみ法の開発を行い、その性能評価を行った。結果を以下にまとめる。
①ひずみ 1 6 入力、温度 1 入力、方位傾斜 3 入力(方位角・ロール角・ピッチ角)を備えた超小型データロガー(Cyclone Compact Data Logger)を開発した。このロガーは、従来の装置に比較して 80%の単尺化(幅 32mm×長さ 200mm)に成功した。このデータロガーは従来のものよりも厳しい環境での動作が可能で、また、スリープ機能により起動するタイミングをプログラム設定可能で、消費電力量を抑えることができ、発熱抑制や動作時間延長を達成している。さらに、電圧ドロップ抑制電源回路も搭載しており動作信頼性も向上した。

②開発した小型データロガーを内蔵でき、かつ、ストレインセルを孔底に貼付するための貼付装置(ストレインセルユニット貼付マシン)を開発した。本装置は、水没した孔底の所定の位置にストレインセルユニットを自動で(孔口から落とすだけという意味)貼付することができる。本装置は、これまでに開発した下向き円錐孔底ひずみ法用の貼付装置を一部改良したものである。



図1 データロガーと貼付装置の一部

(2)地圧情報収集および地圧測定

3D STRESS MAP 整備およびデータの蓄積のための地圧計測を行った。本研究では特に、東北地方太平洋沖地震後の地圧測定を実施し、地震前のデータ(収集し、コンパイルしたデータ)を比較する手法において、巨大地震による地圧変動の貴重なデータが得られているので、以下に報告する。測定方法は、円錐孔底ひずみ法である。

①測定場所

原位置応力測定場所としては、地震の影響を受けたであろう地域を選定することになるが、本研究では、岩手県釜石鉾山を選定した。釜石鉾山は、震源から北西に約 170 km に位置しており、この地域の地震による地殻変動は、東南東へ 3.32m の水平移動、0.5m 沈降したと報告されている。また、鉾山内部においても、これまで経験したことのない非常に激しい揺れを感じたとの鉾山関係者の話もあり、採掘空洞跡で岩盤の一部崩落も確認されている。

釜石鉾山では、地震発生前までに幾つかの応力測定が実施されており、信頼性の高い測定結果が報告されている。本研究では、近傍における測定実績があり、かつ、坑道や掘削空洞跡の影響を受けない場所として、550mL 主要坑道を坑口から約 5km 進んだ地点を選定した(図2参照)。

本測定場所一帯は、栗橋花崗閃緑岩で構成されており、大半を優白質中粒花崗閃緑岩が占め、一部優黒質細粒花崗閃緑岩が混じる。

図2は釜石鉾山 550mL の主要坑道一帯の平面図であり、今回の測定地点と過去に円錐孔底ひずみ法(1つは下向き円錐孔底ひずみ法)によって測定された場所が示してある。図中、K-1 は坂口ら(1995)、K-2 は核燃料サイクル機構(JNC)(現:(独)日本原子力研究開発機構)による測定場所(1999)、K-3 および K-4 は菅原ら(1999, 1996)による測定場所である。K-5 は坂口ら(2010)による測定場所であり、今回の2回の測定場所と同じである。各測定場所は、南北に約 1.5km の範囲内に分布している。

原位置測定は、地震発生約 1 年後となる 2012 年 2 月 27 日~3 月 1 日と地震発生後約 2 年後となる 2012 年 12 月 17 日~19 日、および 3 年後となる 2014 年 3 月 10 日~3 月 12 日

の 3 期間内で実施した。

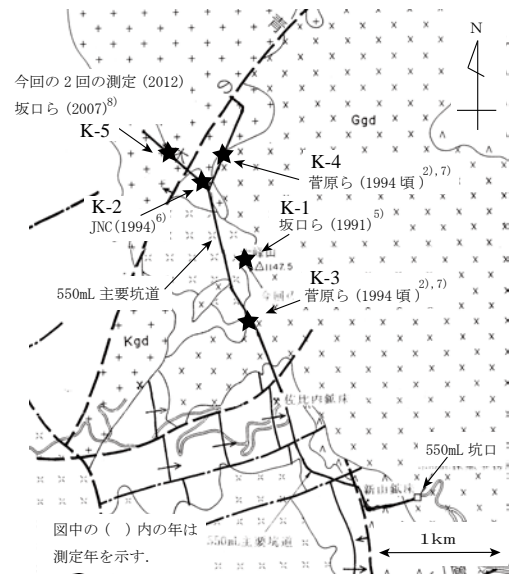


図2 釜石鉾山 550mL 主要坑道と測定場所

②測定結果

主応力($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$)の方向について、図3に K-1~K-5 の測定結果、図4に地震 1 年後の測定結果を、図5に地震約 2 年後の測定結果を、図6に地震 3 年後の測定結果それぞれ下半球投影で示す。また表 1~表 4 にそれぞれの測定から得られた主応力と鉛直応力(σ_v)および推定被り圧 σ_0 (単位体積重量 27kN/m³)の大きさをまとめる。

主応力に方向については、最大主応力 σ_1 は地震前後において、その方向は概略南北性を示しており、一見、大きな変化は無い。一方、中間主応力 σ_2 と最小主応力 σ_3 には、地震前後において明瞭な違いがある。特に地震後は、中間主応力は東西にほぼ水平方向、最小主応力は鉛直方向となっており、地震後に明瞭な逆断層型の応力場に転じ、約 3 年後もその傾向を維持していることがわかる。地震前後において概ね南北方向を示す最大主応力についてももう少し細かく検討すると、地震前は北北西方向だったのが、地震発生 1 年後にはほぼ南北になり、約 2 年後には北北東寄りに転じ、3 年後には北北東寄りが顕著になっている。

主応力の大きさには、地震前後で明瞭な違いが見られる。表2の地震後 1 年の結果をみると、全ての主応力値が、地震前のその 2 倍~4 倍程度に大きくなっている。また鉛直応力 σ_v は該当する測定点の推定被り圧 σ_0 と比較して 2.2 倍~2.5 倍程度と大きくなっている。表3の地震後約 2 年の結果をみると、最大主応力は地震前と比較して依然として大きいものの、1 年後のそれとの比較では小さくなっている。中間主応力、最小主応力は地震前と同程度であり、鉛直応力は推定被り圧とほぼ等しい値になっている。表4の地震後 3 年の結果は、地震前の大きさに戻ってきている。

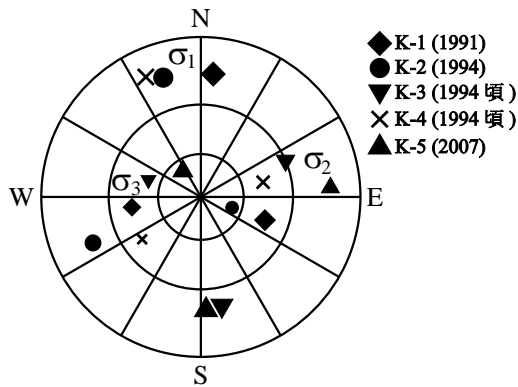


図3 地震前の測定結果（下半球投影）

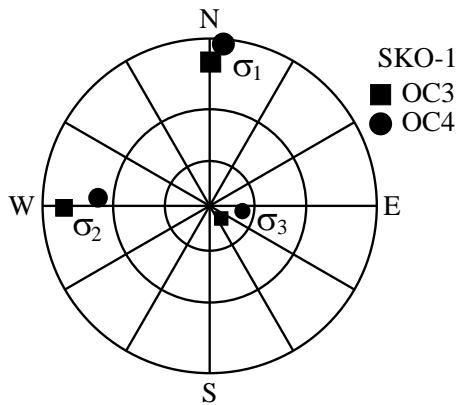


図4 1年後の測定結果（下半球投影）

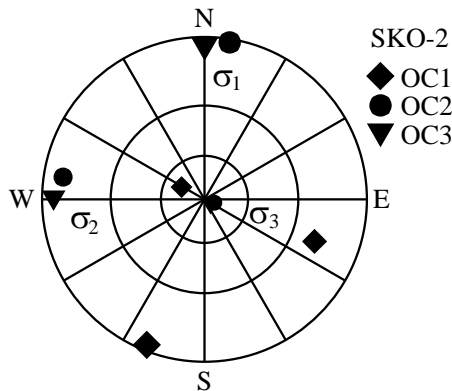


図5 2年後の測定結果（下半球投影）

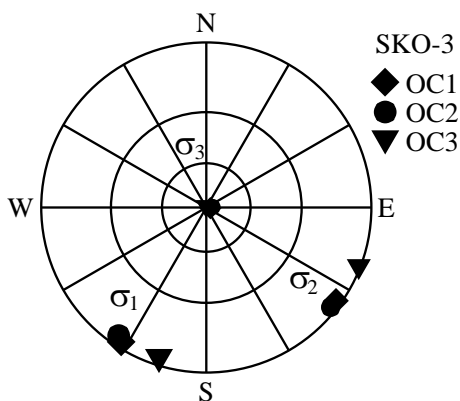


図6 3年後の測定結果（下半球投影）

表1 地震前の測定結果(単位:MPa)

	σ_1	σ_2	σ_3	σ_v	σ_o
K-1	22.3	14.2	4.4	10.3	13.9
K-2	29.3	7.6	2.9	4.7	7.0
K-3	27.0	7.6	6.2	8.9	11.5
K-4	25.0	8.0	6.6	7.9	6.4
K-5	10.8	7.5	2.7	7.9	7.3

表2 1年後の測定結果(単位:MPa)

	σ_1	σ_2	σ_3	σ_v	σ_o
OC-3	48.2	28.4	16.3	17.2	7.7
OC-4	43.9	31.4	17.3	19.4	7.7

表3 2年後の測定結果(単位:MPa)

	σ_1	σ_2	σ_3	σ_v	σ_o
OC-1	30.9	10.9	7.5	7.9	7.7
OC-2	32.4	12.8	6.7	6.8	7.7
OC-4	31.8	12.6	3.8	4.0	7.7

表4 3年後の測定結果(単位:MPa)

	σ_1	σ_2	σ_3	σ_v	σ_o
OC-1	24.4	12.0	4.1	4.2	7.7
OC-2	28.7	13.6	5.0	5.2	7.7
OC-3	27.2	19.0	5.8	5.9	7.7

③浅所地殻応力と地震の関係に関する考察

図7は、本報告で取り扱った全ての地圧測定結果について、水平面(E-N面)内における最大水平応力 S_{Hmax} と最小水平応力 S_{Hmin} を求め、平均応力に対するせん断応力の比： $\mu_m = (S_{Hmax} - S_{Hmin}) / (S_{Hmax} + S_{Hmin})$ の経年変化としてまとめたものである。なお、地震発生1年後、2年後および3年後の結果については、各測定点の結果を平均した値から算出した。図からわかるように、東北地方太平洋沖地震前の μ_m は増加傾向にあり、2007年の測定段階では $\mu_m = 5.6$ 程度となっている。地震直前の値は不明であるが、図中点線で示すように、増加していた可能性は否定できない。一方、地震1年後には μ_m の値は大幅に減少し、約2年後および3年後の測定結果では、再び増加傾向に転じている。これは、地震によって増加傾向にあったせん断応力がそれ以前の応力値レベルに戻ったとも考えられる。この傾向は、兵庫県南部地震前後の応力測定結果でも報告されている。なお、地震2年後の結果は3年後に比べて大きい値であるが、これは、余効変動の活発な時期における測定であったことがその理由かもしれない。

今回の原位置応力測定は、地表下300m程度の深度での測定である。従来から、地震研究には震源により近い深度での測定が必要であるとされていたが、本研究の結果は、浅所における測定からでも定点測定を行えば、

地震と地殻応力の関係が抽出できる可能性を示唆している。

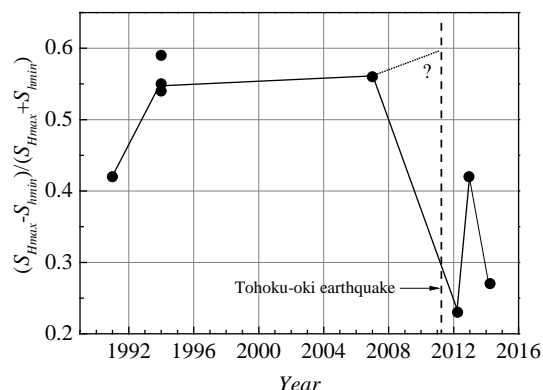


図7 平均応力に対するせん断応力の比の経年変化

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 2件)

①坂口清敏、宇佐美順也、木崎彰久、円錐孔底ひずみ法の直交異方性岩盤への適用、Journal of MMIJ、査読有、Vol. 129、No. 7、2013、455-460

②松木浩二、及川寧己、坂口清敏、粒界の粘弾性挙動に基づく応力解放時の岩石の損傷評価、Journal of MMIJ、査読有、Vol. 128、No. 3、2012、121-133、https://www.jstage.jst.go.jp/article/journalofmmij/128/3/128_121/_article

[学会発表] (計 13件)

①Kiyotoshi Sakaguchi, Noriaki Watanabe and Tatsuya Yokoyama, Changes in-situ rock stress in the Kamaishi mine before and after the 2011 Tohoku-oki earthquake, 8th Asian Rock Mechanics Symposium, Sapporo, Japan, 2014年10月14日(発表決定)

②坂口清敏、横山幸也、東北地方太平洋沖地震前後の応力繰り返し測定、第49回地盤工学研究発表会、北九州市、2014年7月15日(発表決定)

③森孝之、中寫誠門、坂口清敏、青木聡、永木和樹、異方性岩盤における円錐孔底ひずみ法による初期地圧測定への適用、第42回岩盤力学に関するシンポジウム、東京、2014年1月9日

④Tatsuya Yokoyama and Kiyotoshi Sakaguchi, Improved CCBO technique by using a new biaxial test for strain sensitivities, The 6th Int. Symp. on In-situ Rock Stress, Sendai, Japan, 2013年8月22日

⑤Kiyotoshi Sakaguchi, Taro Koyano, Tatsuya Yokoyama and Akihisa Kizaki, In-situ rock stress measurement in the Kamaishi mine before and after the 2011 Tohoku-oki earthquake, The 6th Int. Symp. on In-situ Rock Stress, Sendai, Japan,

2013年8月20日

⑥Hiroshi Ogasawara, Harumi Kato, Gerhard Hofmann, Dave Roberts, Phil Pipe, Trevor Clements, Yasuo Yabe and Kiyotoshi Sakaguchi, In-situ stress measurements to constrain stress and strength near seismic faults in deep level South African gold mines, The 6th Int. Symp. on In-situ Rock Stress, Sendai, Japan, 2013年8月21日

⑦坂口清敏、小谷野太郎、横山幸也、釜石鉱山における東北地方太平洋沖地震前後の応力繰り返し測定、資源・素材学会春季大会企画発表、習志野市、2013年3月28日

⑧坂口清敏、小谷野太郎、横山幸也、原位置測定に基づく東日本大震災前後における釜石鉱山周辺応力場の変動、第13回岩の力学国内シンポジウム、沖縄、2013年1月10日

⑨小笠原宏、加藤春實、Gerhard Hofmann、Pieter de Bruin、坂口清敏、大深度・高応力の南アフリカ金鉱山の諸条件に最適な形で円錐孔底ひずみ法応力測定を行う試み、第13回岩の力学国内シンポジウム、沖縄、2013年1月10日

⑩横山幸也、坂口清敏、板本昌治、円錐孔底ひずみ法での感度補正の試み、資源・素材学会春季大会、千葉、2012年3月28日

⑪Kiyotoshi Sakaguchi, Akihisa Kizaki and Koji Matsuki, In situ rock stress measurement using an improved Downward Compact Conical-ended Borehole Overcoring technique, 12th Int. Cong. on Rock Mechanics, 査読有、北京、中国、2011年10月19日

⑫横山幸也、坂口清敏、伊藤高敏、石田毅、国際規格を視野に入れた初期地圧測定法の国内基準化、資源・素材2011(堺)企画発表、堺市、2011年9月28日

⑬Kiyotoshi Sakaguchi, Akihisa Kizaki and Koji Matsuki, In situ rock stress measurement using Downward Compact Conical-ended Borehole Overcoring technique in a vertical HQ-size borehole, 8th Symp. on Field Measurement in GeoMechanics, Berlin, Germany, 2011年9月15日

[図書] (計 1件)

①小笠原宏、加藤春實、Gerhard Hofmann、矢部靖男、坂口清敏、月間地球、Vol. 36、No. 3、2014、146-151

6. 研究組織

(1)研究代表者

坂口清敏 (SAKAGUCHI Kiyotoshi)
東北大学・大学院環境科学研究科・准教授
研究者番号：50261590

(2)研究分担者

松木 浩二 (MATSUKI Koji)
東北大学・大学院環境科学研究科・名誉教授
研究者番号：10108475

木崎 彰久 (KIZAKI Akihisa)
秋田大学・国際資源学部・准教授
研究者番号：60344686