

ボーリングコアの非弾性ひずみ計測による 初期地圧の評価例

林 為人¹・伊藤 久男²・葉 恩肇³

¹ 正会員 (独) 海洋研究開発機構 高知コア研究所 (〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2-15)
E-mail: lin@jamstec.go.jp

² (独) 海洋研究開発機構 地球深部探査センター (〒236-0001 横浜市金沢区昭和町3173-25)

³ (独) 海洋研究開発機構 高知コア研究所 (〒237-0061 高知県南国市物部乙200)

マグニチュードMw7.6の台湾集々地震(1999)の断層を掘削する台湾チェルンブ断層掘削プロジェクト(Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project, TCDP)は、同断層の北部で2本のボーリング(最大深度2000mと1300m)を行い、深度1100付近で地震断層を貫通した。そのコア試料を用いた非弾性ひずみ回復法(Anelastic Strain Recovery, ASR)による初期地圧の測定を、断層付近のみならず、断層より浅部および深部で実施した。その結果、第四紀~新第三紀の砂岩、シルト岩試料から数百マイクロストレーンの有効な非弾性ひずみを計測することが出来た。それを用いて初期地圧の主方向を評価した結果、地震時の断層滑りと考えられる影響で、最大主応力方向は断層の上下で変化することが認められた。

Key Words : in-situ stress, anelastic strain recovery, core-based method, active fault, TCDP

1. はじめに

1999年9月21日マグニチュードMw7.6の台湾集々(Chichi)地震は発生して、約2500名の死者を含む甚大な被害をもたらした。この地震の発生および破壊の伝搬過程の解明を目的とする台湾チェルンブ断層掘削プロジェクト(Taiwan Chelungpu-fault Drilling Program, TCDP)は主に台湾の予算による科学掘削として、国際陸上科学掘削計画

(ICDP)の後援を受けて、2004年1月からボーリングを開始した。2005年5月、2本のボーリング孔とも目標深度に到達して、掘削作業がほぼ終了した。同科学掘削プロジェクトの主要目的の一つは、断層近傍の応力状態を測定することである。筆者らは、このプロジェクトに参加し、掘削コアの非弾性ひずみ回復(Anelastic Strain Recovery, ASR)を計測して、三次元的な初期地圧の評価を試みた。本稿では、同掘削プロジェクトの研究を概略的に紹介し

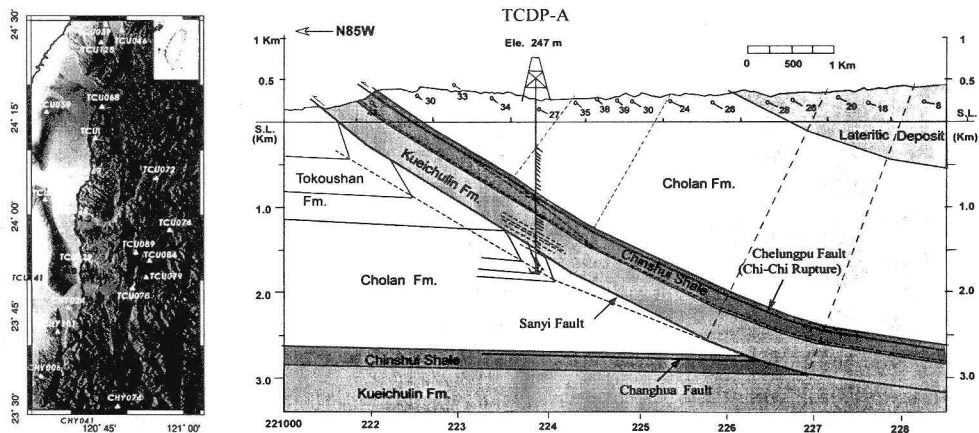


図-1 地上で確認された台湾集々地震のチェルンブ断層および TCDP 掘削サイトの位置●(左図¹⁾)と掘削サイトの地質予想断面図(N85W方向, 右図²⁾)。

たうえ、ASR測定による初期地圧の評価の初歩的な結果を報告する。

2. 台湾チェルンプ断層掘削プロジェクトの概要および初期地圧の測定計画

チェルンプ断層はプレート境界からの分岐断層(splay fault)であり、震探データからChinshui Shale Fm(錦水頁岩層)とKueichulin Fm(桂竹林層、砂岩)の境界付近に位置しているとされている(図-1を参照)。この断層は過去に300~400年に一度の頻度で計1000回くらいも動いてきており、その累積変位は12kmにも及んでいるとされている。TCDPは、台湾中部台中市の郊外において2本の鉛直ボーリング(Hole-A, Hole-B)を行い、地震断層を貫通して、コア試料を得たほか、各種孔内検層や長期モニタリングを行う予定である。この掘削サイトの地下に位置するチェルンプ断層は、集々地震時の滑り変位量が10m以上に達しており、約100kmの長さに及ぶチェルンプ断層の中では変位がもっとも大きい地点である。Hole-A(最大深度2000m)は1110~1230mの深度区間で、Hole-B(最大深度1350m)は、1130~1250mの区間で、それぞれ3本比較的大きな断層帯を掘り当てて、軟質な断層粘土を含む断層帯のコア試料がほぼ完全に採取することができた。Hole-AとHole-Bの孔口間距離はわずか40m程度しか離れていないにもかかわらず、それぞれの断層帯はHole-AとBでは異なる構造上の特徴を呈することが確認された。また、今回の掘削で捕らえた3本の断層帯のうち、どの断層が1999年の集々地震を引き起こしたかについては、今後の各種コア等の解析結果による詳細な検討を待たなければならない。

TCDPの主要な科学目標の一つは、初期地圧を評価することであるため、このサイトでは次の各種地圧測定が計画・実施されている。

- Hole-Bの950mと1350mの区間内において、4-5カ所でダブるパッカーによる水圧破碎を行い、初期地

圧の絶対値を測定する。

- FMIによる孔壁イメージングやその他の検層データに基づいたブレイクアウトなどの孔壁破壊現象解析から応力情報を得る。
- 各種コアを用いた手法による応力測定を実施する。筆者らは非弾性ひずみ回復法を用いて、三次元主応力の方向を決定し、ある仮定に基づいて三次元主応力値を推定する。
- 数カ所コアディスクングのような現象が認められ、その認定を行ったうえ、応力解析も行う予定である。

これらの計測結果を総合的に検討し、地震発生してから約5年経過したボーリング実施の時点において、断層の付近を含む同地点の深度方向における初期地圧分布の情報を得ようとしている。

3. 非弾性ひずみ回復量計測

ASR法は最初、コアの軸方向を一つの主方向と仮定して、軸に直行な平面内で測定を行う二次元的な手法として、提案された初期地圧測定手法である^{3) 4)}。その後、松木⁵⁾は、これを完全な応力テンソルを得る三次元手法に理論的に拡張した。ASR法は、コアの応力解放後の非弾性ひずみを測定して応力を評価するので、精度良く非弾性ひずみを測定することが重要である。一般的に、非弾性ひずみの回復量は弾性ひずみより遥かに小さい。したがって、ASR法は応力レベルの高い大深度や、非弾性ひずみコンプライアンスが大きい岩種のケースに適すといえる。大深度ボーリングのコア試料は得られるチャンスが少ないこともあって、ASR法を用いた三次元応力の計測例はまだ少ない^{6) 7)}。

本研究で行ったASR法による応力測定は、三次元手法に基づいている。供試体の形状・ひずみゲージの位置と方向および測定システムを模式的に図-2と図-3に示す。具体的な実施方法や、用いた非弾性ひずみ回復量の

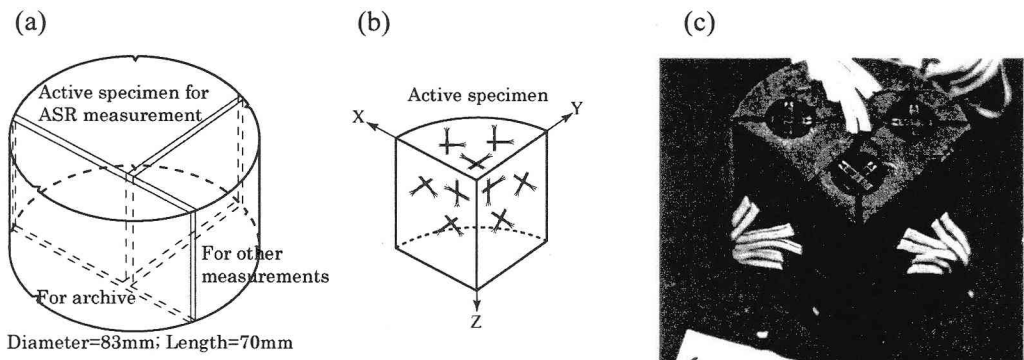


図-2 ASR計測用コア試料の形状(a)、歪みゲージの配置模式図(b)、および測定後試料の写真(c)。

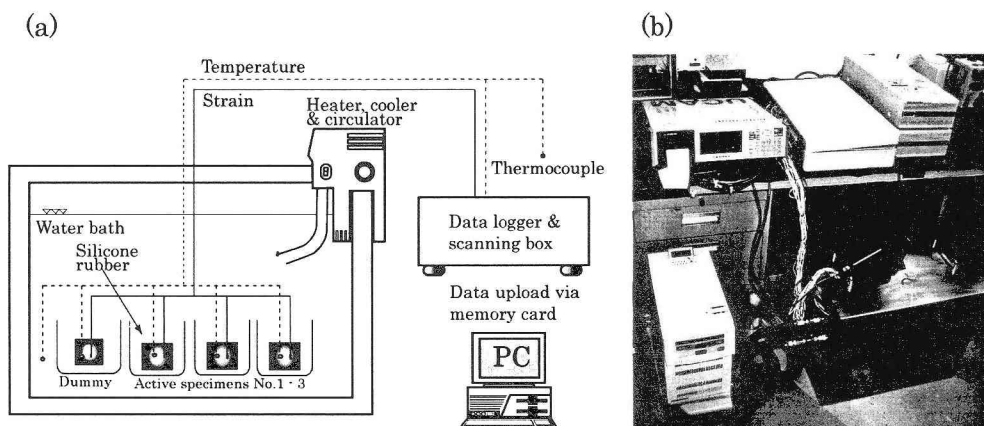


図-3 ASR 計測システムの模式図(a)と写真(b).

計測システムの記述については、Lin *et al.*⁷⁾を参照されたい。本 ASR 計測は、Hole-A とともに、Hole-B でも実施したが、本稿では ASR 法による初期地圧の計測手法ならびに実施例を示すことを目的としているため、Hole-A の 3 深度分のみの初歩的な結果を以下に述べる。

592m, 1112m, 1755m の三深度から採取したコア試料は ASR 測定に用いた。ここの地層は砂泥互層がしばしば認められるので、堆積層界面の傾斜角と走行を用いて、コア試料の方位を決定した。なお、ASR 測定用のコア試料は均質な部分から採取するように注意した。見かけ上では、試料の顕著な異方性が認められなかった。1112m コア試料（シルト岩、錦水頁岩層、鮮新世前期）は、一つの断層帯の中の破碎ゾーンに位置している。この断層帯は掘り当てた 3 つの断層帯の中で、最も大きく、1999 集々地震を起こした可能性が最も高いと思われる。592m と 1755m で採取した試料は、両方とも同じ Cholan Fm.（卓蘭砂岩層、鮮新世～更新世）の均質な砂岩である。この地層の繰り返しは、衝上断層運動により生じた現象である。

一例としては、592m で採取された砂岩試料の非弾性ひずみが図-4 に示したとおりである。計測は当該コアの応力解放から約 5 時間経過後に開始して、計 3 週間程

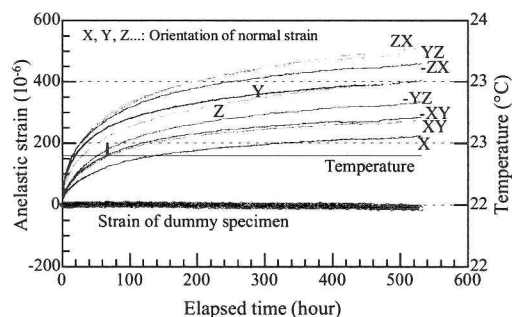


図-4 深度 592m から採取された砂岩試料の非弾性ひずみ回復特性。

度実施した。また、図中の“Active specimen”は掘削により応力解放された Hole-A の砂岩試料である。“dummy specimen”は熱膨張以外の変形がしない砂岩試料であり、ひずみ測定システムの安定性をモニターするために用いられた。“Temperature”は測定コアの近傍の温度である。この図から、非弾性ひずみの回復挙動は安定であり、経過時間との関係カーブはほぼ理想的な形を呈した。また、3 週間の間に回復した非弾性ひずみ量は 200×10^6 以上、 600×10^6 未満で、同測定システムの精度に対しては十分に大きなひずみ量である。

4. 初期地圧の主方向と深度との関係

最小二乗法により、9 方向で計測した垂直非弾性ひずみの回復量を解析して、三次元の主ひずみ方向を求めた。測定した岩石材料は等方体であれば、理論的に、その主応力の方向は主ひずみの方向と等しい。3 深度での主ひずみ・主応力方向は、下半球シュミット投影で表せば、図-5 のようになる。592m と 1112m コア試料の第 1 主応力方向は鉛直に近いが、最も深い 1755m では、第 1 主応力の方向は地層の傾斜とほぼ一致しており、プレートの運動方向と概ね同様である。

このような応力レジメになっている理由については、次のように解釈出来る可能性があると考えられる。すなわち、断層の上盤の方では、断層の地震性滑りにより横方向のテクトニック応力が解放されて、地層の重量に起因した鉛直方向の応力が最大となっている。しかし、断層の下盤ではプレート運動にもたらされるテクトニック応力の影響が大きく、その方向の応力は第 1 主応力となっていると考えられる。しかし、コアを用いた測定法では、その試料の近傍に存在している断裂等に影響されやすいため、さらに多くの試料を計測する必要がある、それらの結果を総合的に検討して結論づけるべきと考えている。

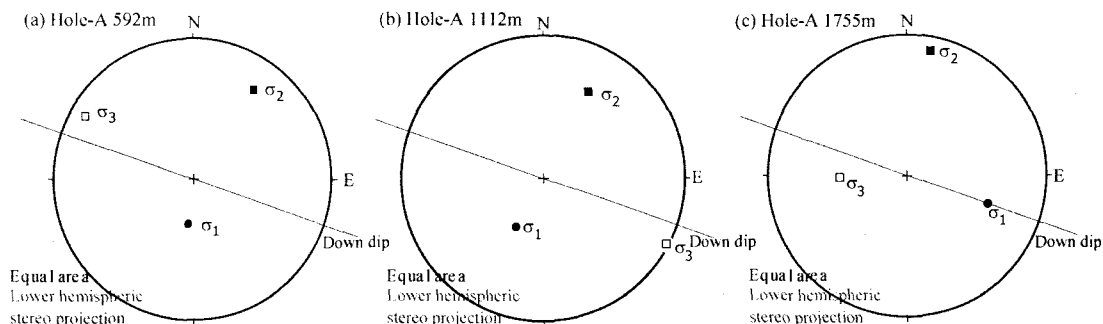


図-5 ASR法による三深度での三次元主応力方向。

5. まとめ

以上のように、1999年の台湾集々地震を起こしたチェルンブ断層を掘削するプロジェクトおよびその初期地圧測定の詳細を紹介したとともに、ボーリングコア試料を用いた非弾性ひずみ回復法（ASR法）の測定途中結果の例を速報した。深度約600m以深で取られた第四紀更新世～第三紀中新世の堆積岩の非弾性ひずみは、応力解析の要求に満たされる精度で計測可能であることが分かり、このようなケースに対してASR法は有効であることが判明した。本稿では、初期地圧の方向について述べたにとどまっているが、今後応力の値の絶対値についても解析する予定である。さらに、計測に用いた堆積岩の異方性特性については実験的に評価して、応力の解析結果に及ぼす影響を検討する予定である。また、別の機会に最終的な初期地圧の計測結果などを報告したい。

謝 辞：本研究の一部は日本学術振興会の科学研究費補助金(基盤研究(C)一般、研究代表者：林 為人、課題番号16540392)によって実施されたものである。また、コア試料の使用について、TCDPのPrincipal Investigatorsより許可頂いた。ここに記して感謝の意を申し上げる。

参考文献

- 1) Ma, K-F *et al.*: Evidence for fault lubrication during the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake (Mw7.6), *GRL*, Vol.30, 1244, doi:10.1029, 2003.
- 2) Hung, J-H *et al.*: Physical Property, Subsurface Structure and Fault Zone Characteristics in Scientific Drill Holes of Taiwan Chelungpu Fault Drilling Project, *TAO*, Submitted.
- 3) Voight, B.: Determination of the virgin state of stress in the vicinity of a borehole from measurements of a partial anelastic strain tensor in drill cores. *Felsmech. Ingenieurgeol.*, 6, 201-215, 1968.
- 4) Teufel, L. W.: Determination of in-situ stress from anelastic strain recovery measurements of oriented core. *SPE paper 11649, SPE/DOE Symposium on Low Permeability*, Denver, CO, 421-430, 1983.
- 5) 松本浩二：岩石の非弾性ひずみ回復を用いた三次元地圧計測法の理論的検討、*資源・素材学会誌*, 108, 41-45, 1992.
- 6) Matsuki, K., and K. Takeuchi: Three-dimensional in-situ stress determination by anelastic strain recovery of a rock core. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 30(7), 1019-1022, 1993.
- 7) Lin, W. *et al.*: Determination of rock stress by anelastic strain recovery measurement of an oriented core in Nittsu region, Japan, in *Rock Stress*, eds: Sugawara, K, Obara, Y. and Sato, A. (*Proceedings of the Third International Symposium on Rock Stress*) - σ_T , Balkema Publishers, Lisse, 225-229, 2003.

AN APPLICATION OF ANELASTIC STRAIN MEASUREMENT OF DRILL CORES ON IN-SITU STRESS ESTIMATION

Weiren LIN, Hisao ITO and En-Chao YEH

In order to understand the feature of rock stress change at different depths above, within and beneath the Chelungpu fault after the Chi-Chi earthquake, we employed a core-based stress measurement method, anelastic strain recovery (ASR) technique to determine the orientations of present three-dimensional principal rock stresses by using drill core samples retrieved from Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project (TCDP) main hole A. Acquired anelastic strains were of high quality and reached several hundred microstrains which is sufficiently high for the accuracy of measurement system used. Thus, the strain data could be used for a three-dimensional analysis resulting in the determination of orientations of the principal in-situ stresses. The preliminary stress measurement results showed that the orientations of the principal stresses changed between the shallower depth above the fault and the deeper depth beneath it, that is, the present stress distribution in TCDP hole might be influenced by the Chelungpu-fault rupture.