

ボーリングコアを用いた地下応力推定試験

----- DSCA 法と ASR 法 -----

Estimations of in-situ stresses from ASR and DSCA measurements on drilled cores

伊藤 久男¹⁾・西澤 修¹⁾・佐野 修²⁾・薛 自求³⁾

Hisao ITO, Osamu NISHIZAWA, Osamu SANO and Ziqiu XUE

Anelastic strain and differential strain measurements performed on two freshly drilled cores were used to determine in-situ stresses. Both techniques, ASR (Anelastic Strain Recovery) and DSCA (Differential Strain Curve Analysis) rely on the development of preferentially oriented strain distribution in a piece of core due to relief of the stress field. Cores retrieved from depth about 600m have exhibited similar relaxation behavior, and distinctive pattern have been observed. Directions of three principal strains determined by each sample have been definitive and results have agreed within acceptable magnitude. Results obtained from ASR and DSCA methods, have suggested that the maximum principal stress acts in the horizontal plane which perpendicular to the borehole axis. Stress induced borehole breakouts at that depth, have close relation with the large deviated stresses in the horizontal plane.

1. はじめに

ASR (Anelastic Strain Recovery) 法は、採取直後のボーリングコアが示す非弾性ひずみ（時間に依存するひずみ）に基づいて地下応力を推定する試験法である。Voight(1968)によって提案されてから数多くの研究報告がなされている（例えば、Blanton, 1983; Warpinski and Teufel, 1986; Wolter and Berckhemer, 1989 など）。非弾性ひずみは、コア内部のマイクロクラックの進展と密接に関係すると指摘されている（加藤ほか, 1994）。一方、このような応力解放後のマイクロクラックによるひずみを精密に測定し、地下応力を推定する手法が DSCA (Differential Strain Curve Analysis) 法である (Ren and Roegiers, 1983)。そこで、もし DSCA 試験時のマイクロクラックが非弾性ひずみを発生させたものならば、ASR 法で得た地下応力の結果と合致しなければならない。ASR 法と DSCA 法では応力解析時の前提条件の合理性の検討や非弾性ひず

¹⁾ 地質調査所地殻熱部

²⁾ 山口大学工学部

³⁾ 基礎地盤コンサルタンツ（株）

みの発生メカニズムの解明などが課題として残されているが、いずれも簡便かつ経済的な試験法である。とくに、水圧破砕法などと併用すれば、推定された応力結果の信頼性を高めることができる。われわれは、同一コア試料に両試験法を適用した例が少ないことを念頭に、有馬一高槻構造線沿いのボーリング調査の際に ASR 試験と DSCA 試験を併せて実施した。以下では測定コア（流紋岩）ASR-1(590.9m～591.0m)及び ASR-4(602.1m～602.4m)の結果について報告する。

2. 試験方法

ASR 試験ではひずみゲージを用いて非弾性ひずみを測定する方法を採用した。ゲージ長 10mm のロゼットタイプポリエステル箔ゲージをコアの側面に 72°置きに計 5 枚の貼り付け、コアの軸方向 (ϵ_{zz})、周方向 ($\epsilon_{\theta\theta}$) 及びこれらと 45°の方向 (ϵ_{45}) の 3 成分のひずみの経時変化を測定した (図-1 (a), θ : X 軸方向から反時計まわりの角度)。X 軸方向にゲージ # 1 を配置し、そこから反時計まわりに 72°間隔でゲージ # 2, # 3, # 4, # 5 の順に配置した。ひずみ測定時のコアの湿度や温度の変化による影響を低減させるために、コアをフィルムや断熱材で被覆した後、空調室に置かれたデシケーター内にセットした。熱電対でコア表面の温度を測定し、そのデータをデータロガーで測定したひずみデータとともに、GPIB を介してパソコンに 10 分間隔で記録した。本報告ではひずみの正值と負値がそれぞれ伸びと縮みを意味する。

ASR 法では地下応力解析時に、3 枚のゲージのひずみデータを用いれば、直交座標系の独立した 6 つのひずみ成分 ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , ϵ_{zz} , γ_{xy} , γ_{yx} , γ_{xz} を得ることができる (加藤ほか, 1994)。本試験では 5 枚のゲージの組み合わせによる 10 通りのデータセットのほか、同一方向の平均ひずみを加えて計 11 通りの直交座標系の独立した 6 つのひずみ成分を得ることができる。これらのひずみを基に 3 次元の主ひずみ (ϵ_{11} , ϵ_{22} , ϵ_{33}) の方向を求め、その結果をステレオネットにプロットした。なお、直交座標系では、ボーリングコア軸方向を Z 軸とし、これと直交する X Y 平面ではゲージ # 1 の位置を X 軸とした。

DSCA 試験では ASR 試験のコアと共通する座標系となるように、測定コアより一辺 35mm の立方体試料を切り出した。試料の各面を最終 #2000 で研磨した後、ゲージ長 10mm のひずみゲージを図-1 (b)に示すように計 18 枚貼り付けた。応力解析では Dey and Brown(1986)が提案したギャップ法を採用した。圧力 P から $P+dP$ の間で閉じるクラックによるひずみを $\nu_{ij}(P)$ とすると、 $\nu_{ij}=P(d^2 \epsilon_{ij}/dP^2)$ となる。ここで、 ϵ_{ij} は岩石試料のひずみから溶融石英のひずみを差し引いたひずみ (差ひずみ) である。測定されたひずみデータのうち、他のゲージと明らかに異なる挙動を示すものを除外して主値 ν_{ii} ($ii=1,2,3$) の方向を求め、その結果をステレオネットにプロットした。

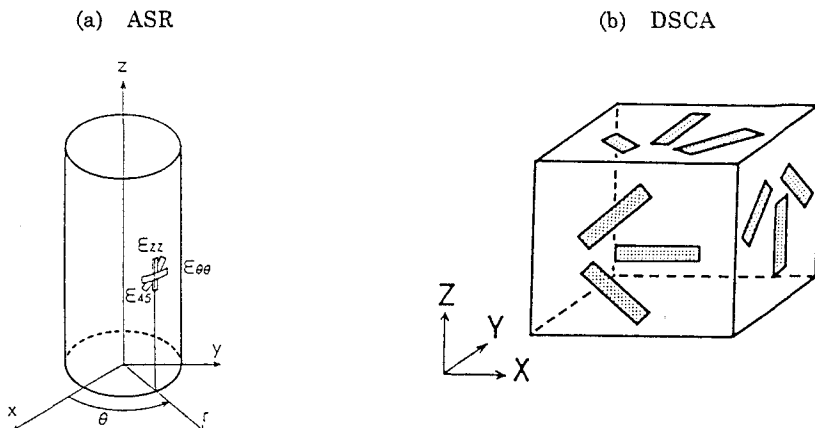


図-1 ASR 試験及び DSCA 試験でのひずみゲージの配置

3. ASR 試験及び DSCA 試験の結果

3. 1 試料 ASR-1(590.9m~591.0m)

図-2 は ASR-1 のコア表面の温度変化とひずみ変化を示している。図-2(b)~図-2(d)では、シンボルによるひずみゲージの判別ができるように、1時間ごとのひずみのみを示している。図-2(a)よりコア表面温度は測定環境がエアコンで制御された室内であったにもかかわらず、気温の日変動の影響を受けていたことがわかった。その最大変動量は約7℃もあったが、懸念されたひずみ変化への影響はそれほど大きくなかった。図-2(b)に示す深度方向のひずみ ϵ_{zz} では、ゲージ#1 ($\theta=0^\circ$) が測定開始後5時間までは伸び方向にひずみの著しい増加がみられた。その間、他のゲージではともに縮み方向に小さいひずみを示し、中でもゲージ#2 ($\theta=72^\circ$) は最大の縮みひずみを記録した。しかし、ゲージ#2のひずみの変化は徐々に伸びへ転じている傾向にある。したがって、測定時間をさらに長くすれば、ゲージ#2はゲージ#3~#5と同様に伸びのひずみを示すと推測できる。周方向のひずみ $\epsilon_{\theta\theta}$ 及び 45° 方向のひずみ ϵ_{45} では、縮み方向のひずみはみられず、周方向のゲージ#5(5-2)を除いてはひずみのばらつきも小さい。また、3方向のひずみ変化がまだ収束していないことを考慮すると、ひずみ測定の終了が少し早かったと思われる。

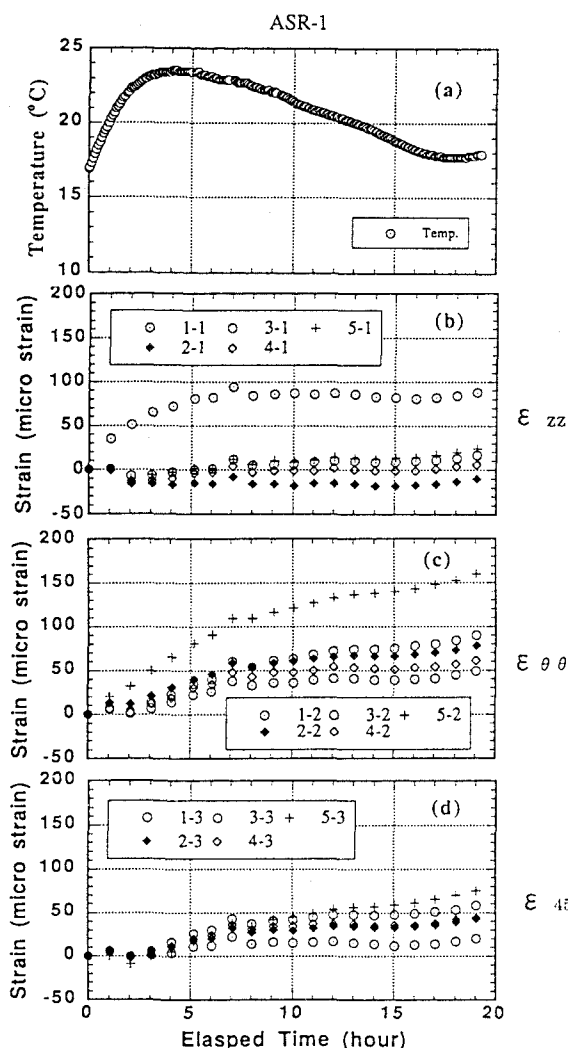


図-2 コア表面の温度と非弾性ひずみの変化

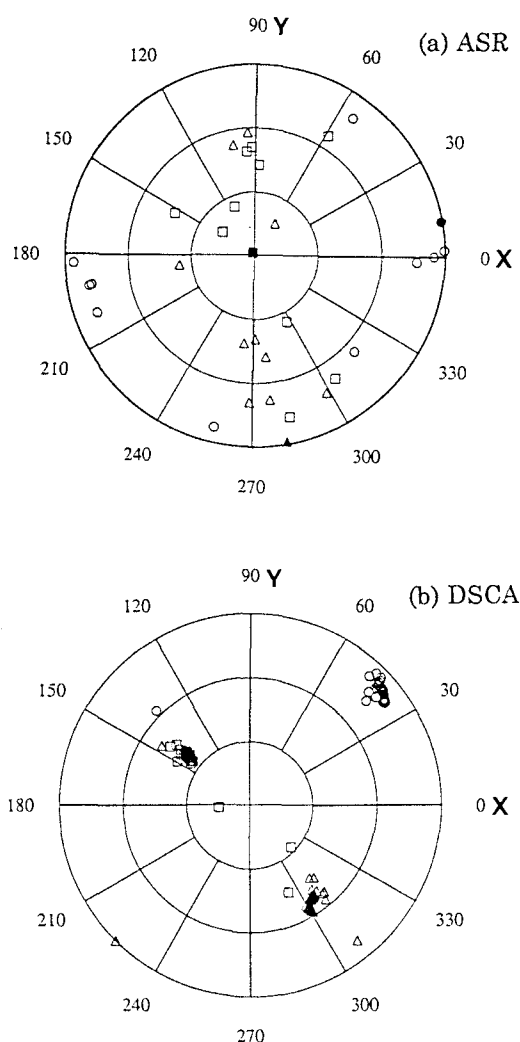


図-3 主ひずみ方向の上半球への投影

ASR 試験で得られた 3 つの主ひずみの方向をステレオネット（上半球）にプロットしたのが図-3(a)である。図中では○, △と□はそれぞれ最大主ひずみ ϵ_{11} , 中間主ひずみ ϵ_{22} 及び最小主ひずみ ϵ_{33} を表し, 黒塗りの方は同一方向の平均ひずみより得た解である。最大主ひずみ ϵ_{11} の傾斜角は小さく, その方向は X 軸方向とそこから反時計まわり約 20° の間に位置する。これらに対し, 中間主ひずみ ϵ_{22} では方向が Y 軸とほぼ一致するが, 傾斜角にばらつきがみられた。また, 最小主ひずみ ϵ_{33} では傾斜角と方向にともにばらつきが認められた。一方, 平均ひずみによる解では, 最小主ひずみ (■) が鉛直方向に位置し, 最大主ひずみ (●) と中間主ひずみ (▲) は鉛直方向と直交する XY 平面に位置し, 傾斜角はともにゼロである。

この試料の DSCA 試験結果を図-3(b)に示した。ASR 試験結果と比較すると, 3 つの主ひずみの方向が時計まわりにそれぞれ約 25° ずれているが, 最大主ひずみの傾斜角はほぼ一致している。

3. 2 試料 ASR-4(602.1m~602.4m)

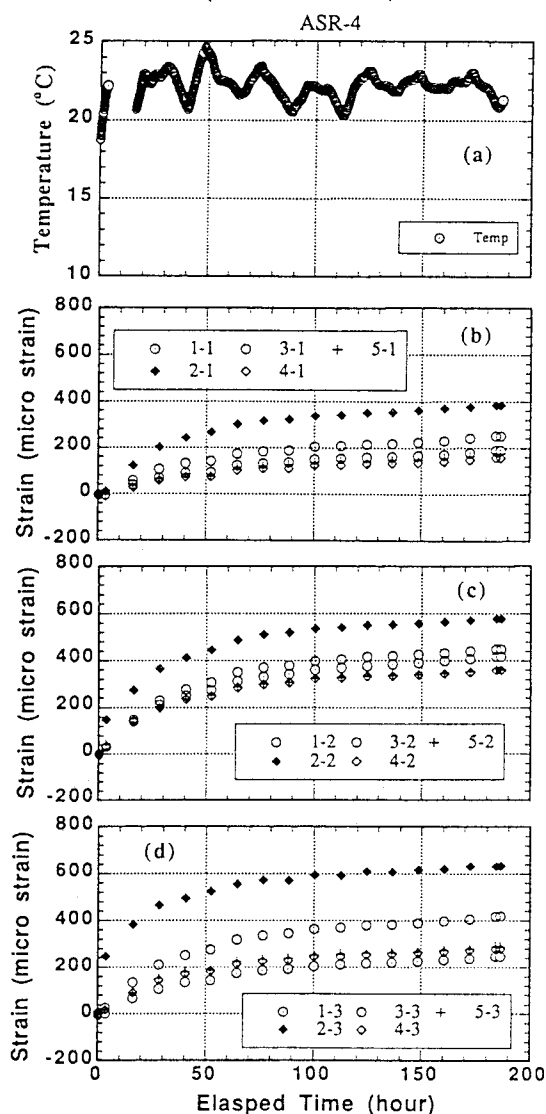


図-4 コア表面の温度と非弾性ひずみの変化

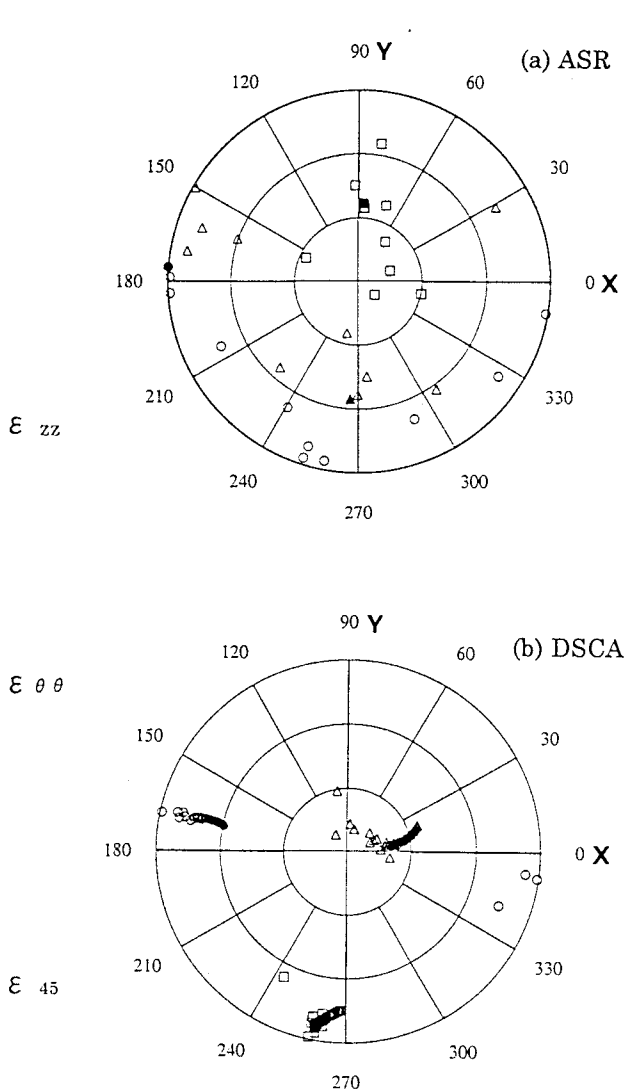


図-5 主ひずみ方向の上半球への投影

試料 ASR-4 のコア表面の温度変化とひずみ変化を示したのが図-4である。ASR-1 と同様、この試料のコアの表面温度でも気温の日変動の影響がみられた (図-4(a))。図-4(b)~図-4(d)では12時間ごとのひずみを示しており、鉛直ひずみ ε_{zz} 、周方向ひずみ $\varepsilon_{\theta\theta}$ 及び 45° 方向のひずみ ε_{45} では共通する現象がみられた。即ち、ゲージ # 2 ($\theta=72^\circ$) が他のゲージに比べると、3成分とも1.5~2倍ほど大きい。試料 ASR-4 は ASR-1 より採取深度が約10mほど深いだけで、肉眼観察でもコア表面の違いがほとんど認められなかった。しかし、測定終了時のひずみ量については、ASR-4の方がASR-1より数倍ひずみが大きい。

ASR 試験と DSCA 試験で得られた3つの主ひずみの方向をステレオネット (上半球) にプロットしたのが図-5である。ASR 試験の結果では3つの主ひずみの方向にばらつきがみられた。平均ひずみに基づく解に注目すると、中間主ひずみ ε_{22} と最小主ひずみ ε_{33} はそれぞれ約 30° と 60° の傾斜をもち、Y軸方向に分布する。これに対しゲージの組み合わせによる解では、傾斜角がゼロに近い最大主ひずみ ε_{11} が、水平面のX軸とY軸にそれぞれクラスターを形成した。これらのうち、DSCA 試験の最大主ひずみの方向と対応するのは、X軸に分布する方である。両試験法で得た3つの主ひずみの方向を比較すると、中間主ひずみと最小主ひずみについては、方向が逆転していることが分かる。

4. まとめ

DSCA 法による地下応力の推定試験では、次のことが応力解析の前提条件となっている。①応力解放に伴うクラックは主応力方向に垂直に発生する、②応力解放と関係しない先在クラックによるひずみへの影響は応力解放によるクラックのとは比べて無視できるほど小さい。このような前提条件はしばしば疑問視され、DSCA 試験法の普及の障害ともなっている。本報告では同一コア試料について、ASR と DSCA 試験を同時に適用し、疑問の解消を試みた。以下では主ひずみの方向を中心に議論することにした。

まず、両コア試料の円周方向のひずみ ($\varepsilon_{\theta\theta}$) に注目しよう。試料 ASR-1 ではX軸方向から反時計まわり 288° に位置するゲージ # 5 が最も大きいひずみを示している。試料 ASR-4 ではX軸方向から反時計まわり 72° に位置するゲージ # 2 が最も大きいひずみを示している。DSCA の前提条件①に従うならば、最大主ひずみ方向はこれらの角度と直交する方向に存在する必要がある。両試料の ASR と DSCA 試験で求められた最大主ひずみの結果はいずれも前提条件①を支持している。

次に、両試験法で求めた3つの主応力の方向を比較してみよう。試料 ASR-1 では ASR 試験で得た3つの主ひずみの方向が DSCA 試験のと角度のずれがみられた。DSCA 試験の主ひずみ方向を時計まわり約 25° 回転させると、ASR 試験の結果とほぼ一致することになる。方向にずれが生じた原因として、ひずみ測定時間が短かったことが挙げられる。これについては、今後測定時間の長い試料 ASR-4 のひずみデータを用いて測定時間の影響を調べる必要がある。

最後に、両試験法で得られた試料 ASR-1 と ASR-4 の最大主ひずみの方向がいずれも水平面に位置することが明らかになった。これは伊藤ほか(1996)が報告した600m付近で発生したボアホールブレイクアウト現象と符合する。ブレイクアウトは水平面内の差応力が大きい場合によく発生すると指摘されている (Obert and Stephenson, 1965)。両試料で観測された著しい非弾性ひずみは大きい差応力が働いていたことを示唆しているとも考えられる。今後はコア試料の円周方向のP波速度を測定し、非弾性ひずみやブレイクアウトの発生機構について検討する予定である。

参考文献 : Blanton T.L.(1983): SPE/DOE, 11624 ; Voight, B.(1968): Felsmechanik u. Ingenieurgeol. Vol.6,p201-215; Warpinski, N.R. and Teufel, L.W.(1986) SPE, 1536; Wolter and Berckhemer(1989): Rock Mech. and Rock Eng. Vol.22, p273-287 ; 加藤ほか(1994): 資源と素材, Vol.110, p80-86 ; Ren and Roegiers(1983): J. Geophy. Res., Vol.83, p1269-1278; Obert and Stephenson(1965): Soc. Min. Eng. Trans., Vol.232, p227-235 ; 伊藤ほか(1996):平成8年度日本応用地質研究発表会講演論文集, p97-100.