

DRA による封圧下での先行応力推定

Estimation of previous stress using DRA under Confining Pressure

後藤史樹*・島田英樹**・松井紀久男***・瀬戸政宏****

Fumiki GOTO, Hideki SHIMADA, Kikuo MATSUI, Masahiro SETO

In the present study we have experimentally investigated Deformation Rate Analysis (DRA) to understand the effect of confining pressure on stress estimation. In addition, a new DRA using the strain data under a confining pressure has been fundamentally tried to estimate the previous stress which is close to uniaxial compressive strength. The following main results were obtained.

- (1) The confining pressure did not have any significant influence on the stress estimation in DRA.
- (2) DRA using the strain data in the test under a confining pressure enabled us to accurately estimate the axial stress which was previously applied under a confining pressure, even if the previous stress was very close to the uniaxial compressive strength.

1. 緒言

地圧計測法には大きく分けて二つの方法がある。その一つは応力解放法や水圧破碎法などに代表される原位置で地圧を計測する方法で、現在まで多くの実績がある。他の方法は、原位置で採取したコアを用いて室内で地圧を測定する方法で、AE 法¹⁾、変形率変化法²⁾(Deformation Rate Analysis, 以下 DRA)、DSCA(Differential Strain Curve Analysis)などが含まれる。コアを用いる方法は、試験に利用可能な良質のコアを採取できれば、

- ① 地下深部の Virgin Field の地圧測定
- ② 空洞周辺の地圧の連続的分布や三次元主応力の測定

ができるという大きな可能性を有している。

しかし、コアを用いる方法は、その原理も含めて明らかにすべき課題が多く残されている。その一つとして、求めたい方向の地圧以外の地圧成分が、推定結果に及ぼす影響の把握が充分でないことが挙げられる。また、AE 法や DRA では、採取した岩石コアの一軸圧縮強度(以下、 Sc)に近い地圧の測定が困難なことが挙げられる。

本研究では、DRA について、まず、先行応力として軸応力と封圧を同時に作用させたときの、DRA による軸応力推定に及ぼす封圧の影響について検討した。また、 Sc に近い先行応力を推定する方法として、封圧下で先行応力を与えた岩石を任意の封圧下で試験し、そのときのひずみ計測結果に基づいた DRA による地圧測定法について検討した。

2. 実験の概要

-
- | | | | |
|------|-----|---------|--------------------------|
| * | 非会員 | 九州大学大学院 | 工学研究科資源工学専攻修士課程 |
| ** | 正会員 | 工博 | 九州大学助教授 工学部地球資源システム工学科 |
| *** | 正会員 | 工博 | 九州大学教授 工学部地球資源システム工学科 |
| **** | 正会員 | 工博 | 工業技術院資源環境技術総合研究所構造安全研究室長 |

2.1 岩石試料と先行応力条件

本実験では、岩石試料として田下凝灰岩、来待砂岩を用いた。 σ_c はそれぞれ 18.2MPa、31.5MPa である。試験片の寸法は、直径 30mm、高さ 70mm の円柱形であり、端面の平行度は $\pm 1/20\text{mm}$ 以内に整形した。試験では、ある一定の先行応力をクリープ的に数時間与えたが、同時に計測した軸ひずみと周ひずみが一定の値に落ち着いた後、この先行応力を除荷した。先行応力の荷重パターンを Fig.1 に示す。

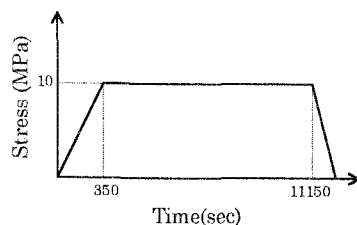


Fig.1 An example of loading previous stress.

2.2 実験方法

2.1 の方法で先行応力を加えた後、試験では荷重速度制御(2kg/sec)により先行応力以上の一定の応力まで 5 回の繰り返し載荷を行った。ひずみの計測では、ひずみゲージ(ゲージ長 20mm)を岩石試験片の側面に軸方向と周方向にそれぞれ 2 枚ずつ接着した。ひずみと荷重のデータは 0.2 秒毎に A/D 変換してコンピューターに取り込み、実験終了後にディスクに記録した。なお載荷では、載荷軸方向のひずみ進行速度がほぼ等しくなるように載荷盤を調整し、片当たりが起きないように十分に注意した。

3. DRA による先行応力推定

3.1 DRA におけるひずみ差と推定応力の関係

DRA は、先行応力を受けた岩石に再載荷した時の、先行応力レベルを境としたマイクロクラック挙動の変化を利用した方法である。この方法では、原位置で採取した岩石コアを整形して繰り返し一軸圧縮試験を行い、各載荷サイクルのひずみ差と応力の関係に出現する屈曲点から先行応力を推定する。Fig.2 は、一軸圧縮応力下で先行応力 11.9MPa を人為的に与え、その後、繰り返し載荷試験を行い、DRA によって先行応力を推定した結果を示している。Fig.2(a)に示すように、先行応力載荷後 3 時間経過した軸ひずみは $3100\mu\epsilon$ で飽和状態であった。また、同図(b)に示すように先行応力除荷後の残留ひずみは $663\mu\epsilon$ であり、飽和状態との差は $2437\mu\epsilon$ である。同図(c)は DRA における載荷 2 回目と 1 回目のひずみ差と応力の関係を示しているが、この結果から推定された応力は 11.8MPa であった。ここで、同図(b)に示した試験時の 1 回目の載荷における応力-ひずみ線図から、DRA によって推定された応力値 11.8MPa でのひずみ量は $2380\mu\epsilon$ である。これは先行応力を与えたときの飽和ひずみ量と除荷後の残留ひずみとの差である $2437\mu\epsilon$ とほぼ一致する。つまり、DRA により推定される応力は、解放されたひずみ量に対応する応力に一致するものと考えられる。これは、村山ら³⁾による AE のカイザー効果に関する検討結果と一致する。

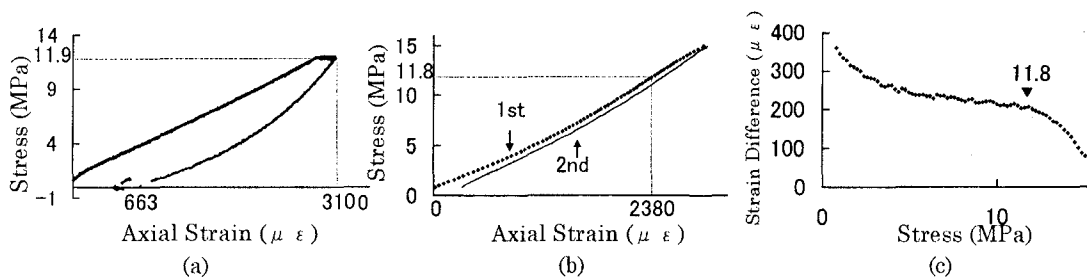


Fig.2 An example of estimating previous stress from DRA.

次に、本実験で得られたひずみ差－応力関係の代表例を Fig.3 に示す。ひずみ差－応力関係の中には TYPE. II やⅢのように、複数の屈曲点を持つ場合がある。このような場合、どの点を先行応力値として読み取るかについては、これまでに様々な考えがあるが未だ明確にはされていない。そこで、基礎実験により得られた結果に基づいてクラックの挙動と屈曲点の関係について考察する。

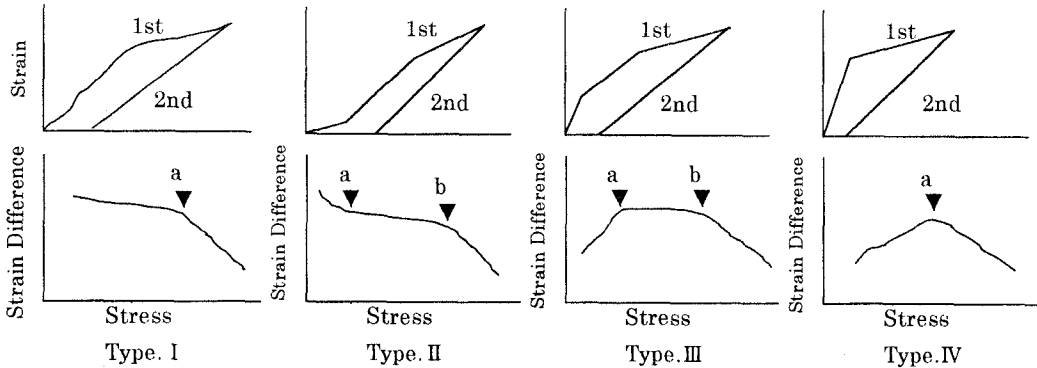


Fig.3 Typical DRA curve patterns.

まず、先行応力を与えられたことによって、岩石内に微小なクラック群(KE クラック)が形成されると考える(Fig.4)。このクラックを有する岩石に圧縮応力を加えていくと、クラックの閉塞、せん断変形、そして開口クラックの発生という過程を経て、新たなクラックが形成され成長していくと考えられる。この新たなクラックが成長を始めた時点の応力が先行応力に相当する⁴⁾。

ここで、TYPE. I からⅣの形が出現するときの、それぞれの荷重 1 回目のクラック挙動について考えると、

TYPE. I) KE クラックは閉塞状態にあり、a 点までは線形的に変形し、a 点以降で新たなクラックが成長するものと考えられる。従って、a 点を屈曲点として読み取る。

TYPE. II) 開口している KE クラックは応力を受けて閉塞し、a 点から線形的に変形し、b 点以降で新たなクラックが形成され成長していくと考えられる。従って、b 点を屈曲点として読み取る。

TYPE. III) KE クラックは閉塞しにくい状態にあり変形が少ないが、a 点で閉塞した後に線形的に変形し、b 点以降で新たなクラックが形成され成長していると考えられる。従って、b 点を屈曲点として読み取る。

TYPE. IV) Ⅲの場合と同様に KE クラックは閉塞しにくい状態にあるが、a 点で閉塞し、それと同時に新たなクラックが形成され成長していく。従って、a 点を屈曲点として読み取る。

3.2 屈曲点の読み取り

3.1 の考察をもとに屈曲点を読み取るが、ひずみ差－応力関係の変化は一般的に明瞭ではなく、読み取り点を決定する際には、これまで、任意の直線を引いたり、最小自乗近似直線を用いる手法などが用いられるが、主観的意思の介入を許している。そこで、本報では、以下に示すような方法を確立し、屈曲点を客観的に読み取った。

1) まず、各ひずみ差をその最大値で正規化し、正規化し

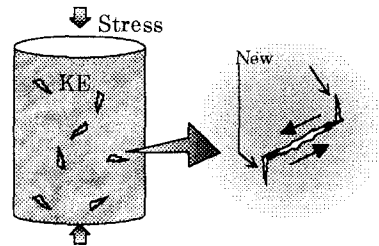


Fig.4 Growth of crack in the rock.

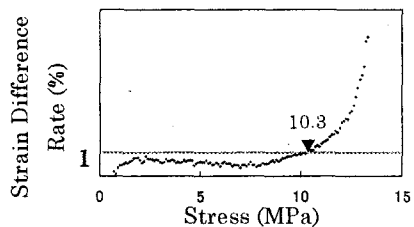


Fig.5 An example of previous stress estimation from Criterion.

たひずみ差と応力の関係を求める。

- 2) 正規化ひずみ差の移動平均を計算する。
- 3) 2)で求めた移動平均値の変化率と応力の関係図を求める。(Fig.5)
- 4) その変化率が、1%を超えた点を屈曲点として読み取る。

なお、Fig.5 に示した結果における実際の先行軸応力は 10.1MPa であった。

4.実験結果

4.1 封圧の影響

ここでは、軸応力と封圧とを同時にクリープ的に先行応力として与え、除荷後に繰り返し一軸圧縮試験を行い、DRA による推定値に及ぼす封圧の影響について調べた。Fig.6 に田下凝灰岩の DRA による推定結果の一例を示している。この試験では、2MPa の封圧下で先行軸応力 10.1MPa(差応力 8.1MPa)を作用させ、その除荷直後に一軸圧縮試験を行った。ひずみ差－応力関係の屈曲点は明瞭であり、3.2 で述べた読み取り手順によって先行応力は 9.6MPa と推定された。これは軸方向の先行応力 10.1MPa より 5%低い値であるが、差応力ではなく軸応力が推定されていると考えられる。

4.2 封圧下での DRA

従来の繰り返し一軸圧縮試験による DRA では、先行応力が Sc に対して高い応力レベルにある場合には、試験時の最大応力が高くなるために、ダイラタンシーによる非線形的な変形の影響を受けて、推定精度が大きく低下する。Fig.7 は、一例として田下凝灰岩に一軸圧縮応力下で先行応力 15MPa を与えた後、試験時に 17MPa まで繰り返し載荷したときの、ひずみ差－応力関係を示している。推定値は 11.2MPa となり、先行応力 15.0MPa より 15%低い値となった。これは、先行応力レベル(15MPa)が、田下凝灰岩の Sc の 75%に当たり、さらに、試験時の最大載荷応力 17MPa は Sc の 93%に相当する。このため、岩石内には試験載荷時に先行応力より低い応力レベルで新しいクラックが発生したためにその応力レベルから非線形的な挙動が出現したものと考えられる。これにより、推定された応力値が小さくなったものと推察される。

従来法では、 Sc に対して先行応力レベルが高い場合においては先行応力の推定が困難となる。そこで本研究では、封圧を作用させて岩石の非線形挙動を抑制し、先行応力によって形成されたKEクラックの挙動変化のみを検出して、先行応力を推定できるか否かについて検討した。Fig.8は、2MPa の封圧下で先行軸応力 17.1MPa を作用させ、1MPa の封圧下で繰り返し載荷試験(最大軸応力 22MPa)を行っ

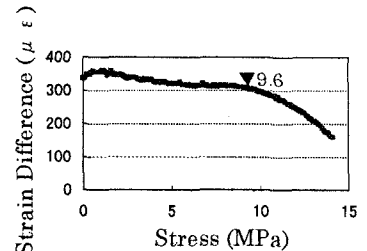


Fig.6 Strain difference function for a Tuff.
(Previous axial stress: 10.1MPa, Confining Pressure: 2MPa)

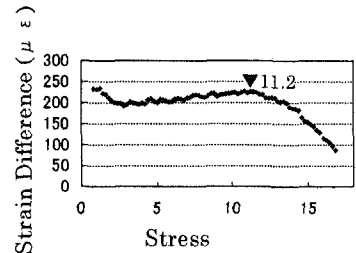


Fig.7 Strain difference function for a Tuff.
(Previous stress: 15MPa)

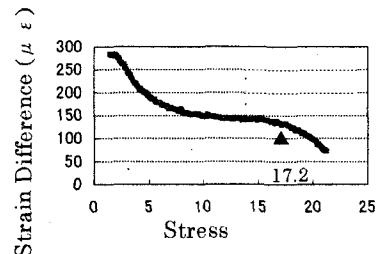


Fig.8 Strain difference function for a Tuff
under confining pressure of 2MPa.
(Previous axial stress: 10.1MPa, Confining Pressure: 2MPa)

たときの DRA による推定結果を示している。先行軸応力 17.1MPa は一軸圧縮強度の 85%に当たり、従来の一軸圧縮試験による DRA では推定不可能な応力レベルである。しかしながら、封圧下で試験することにより、推定値は 17.2MPa、推定誤差 0.6%と、精度よく推定できた。

Fig.9 に一例として、来待砂岩に 5MPa の封圧下で先行軸応力 19.4MPa を人為的に与え、その後、2MPa の封圧下で繰り返し载荷試験を行い、DRA によって先行軸応力を推定した結果を示している。同図(b)に示すように、推定応力は 18.4MPa で、先行軸応力の約 95%である。また、先行軸応力と封圧を解放後のひずみ量は $2350 \mu\epsilon$ であった。同図(a)は载荷 1 回目と 2 回目の応力-ひずみ線図を示しているが、载荷 1 回目の結果から 18.4MPa でのひずみ量を読み取ると $1760 \mu\epsilon$ である。このひずみ量に 2MPa の静水圧を作用させたときのひずみ量を加えると、先行応力解放時からのひずみ量は $2080 \mu\epsilon$ である。これは解放されたひずみ量 $2350 \mu\epsilon$ と一割程度の差はあるがほぼ一致している。つまり、封圧下においても 3.2 で述べた一軸圧縮応力下の場合と同様に、封圧下の DRA によって推定された応力は、解放された軸ひずみ量に対応する応力にほぼ一致することが分かった。また、この結果は、原位置の岩盤内でその岩石の一軸圧縮強度に極めて近い応力が作用している場合でも、室内での DRA による試験時に封圧を作用させて非線形挙動を抑制することにより、地圧成分を精度よく推定できる可能性を示唆している。

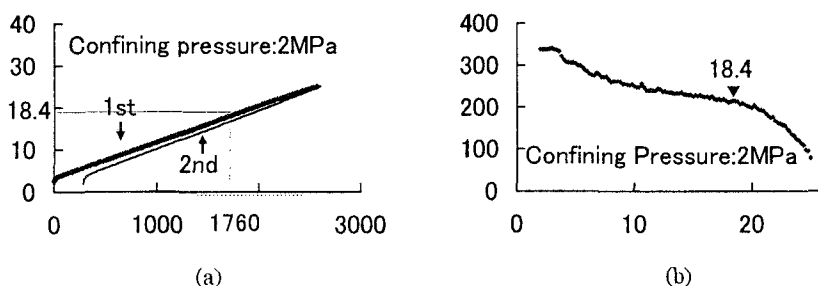


Fig.9 An example of estimating previous stress using DRA under Confining Pressure.

5.結言

本研究では、まず、DRA による客観的な先行応力推定手順を確立し、それに基づいて DRA による先行応力推定に及ぼす封圧の影響について実験的に検討した。また、Scに近い先行応力を推定するための、封圧下での DRA の可能性について検討した。その結果、

- ①DRA による推定応力でのひずみ量は、先行応力除荷後の解放ひずみ量に対応する。
- ②DRA によって推定される応力値は、試験時の载荷軸方向の応力値であり、封圧の影響を受けない。
- ③任意の封圧を作用させて岩石の非線形挙動を抑制することにより、Scに近い応力レベルの先行応力を精度よく推定できることを示した。

参考文献

- 1) 金川忠・林正夫・仲佐博裕: 岩石における地圧成分の Acoustic Emission による推定の試み、土木学会論文報告集、第 258 号、pp.63~75, 1977.
- 2) 山本清彦・乗原保人・平澤朋郎: 地震学会講演予稿集、2, pp.246, 1983.
- 3) 村山朗郎・道廣一利・藤原紀夫・吉岡尚也: AE によって初期地圧を求めるための実験的研究、第 17 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.101~105, 1985
- 4) 瀬戸政宏・歌川学・勝山邦久: 岩石の AE カイザー効果と 3 次元 AE 震源分布からみたマイクロクラッキングとの関係、資源・素材学会誌、108, No.10, pp.17~22