

(77) 三軸圧縮試験を利用したAE法による先行応力推定

佐賀大学 正会員 石橋 孝治

Estimation of Pre-loaded Stress Using Conventional Triaxial Compression Test
Equipped with Acoustic Emission Measurement

Koji ISHIBASHI, Saga University

Abstract

Conceptions about underground spaces such as storage excavations for radioactive waste materials and compressed air show that depth of underground openings will become deep. Within the range of depth in Civil Engineering field, it is allowed to consider that geo-stress is in a state of equilibrium in the elastic stress state. The observed stress-strain relations in triaxial compression testing of rocks under various confining pressures remind us that natural ground does not always keep the balance of geo-stress in the elastic stress state. This means that there are two points showing the same value of stress on the stress-strain curve in the case of low confining pressures and rock can be applied the stress exceeding its uniaxial compressive strength (UCS) under the conditions of high confining pressures.

In order to cope with this problem, the author adopted acoustic emission (AE) technique to conventional triaxial compression testing of rock for estimation of geo-stress. The author has studied on the relation between Kaiser effect of AE and relative pre-loaded stress level to UCS. In this study, conventional triaxial compression tests of rock models were carried out and AE activities in both brittle and ductile stress states were measured. Through a series of tests using rock models, a new procedure to estimate the pre-loaded stress in both stress states, was proposed.

1. はじめに

近年、地下空間の開発とその利用形態に関する議論が盛んになり、多くの地下空間利用構想が発表されている。これらの構想における注目すべき傾向として、圧縮空気貯蔵や放射性廃棄物の地下処分施設構想にみられるように、地下空間の深度が大深度化することが挙げられる。これまで土木工学が取り扱ってきた地下深度では、初期応力は岩石の強度破壊点以前の領域で平衡を保っていると考えて差し支えない。しかしながら、地下空洞位置の大深度化に伴い岩石が置かれている周囲の拘束剛性が増大することから、岩石の強度破壊点以降の領域で初期応力の平衡が保たれている可能性を見逃せなくなって来た。

この問題に対処する方法として、筆者は従来の一軸圧縮試験に基づくAE法を擬似三軸圧縮試験に導入することを考えた。岩石の応力～ひずみ曲線の線形が試験時の拘束剛性に依存する特性に着目し、低強度の岩石モデルを用いた基礎的な研究^{1)・2)}を行って来た。この岩石モデルを用いた実験では、主応力の方向と試験時の載荷方向が一致する最も単純な場合を対象とした。岩石モデルの一軸圧縮強度と与えた先行応力の相対的な大きさと、AEのカイザー効果の発現特性に関する検討を行い、三軸圧縮試験を利用するAE法に基づく先行応力推定の原理を提案した³⁾。本研究は、提案した原理の検証を目的として低強度岩石モデルを用いた実験を行い、AE法による応力～ひずみ関係の全領域にわたる先行応力推定法を提案したものである。

2. 応力～ひずみ曲線と初期応力の関係

岩石の三軸圧縮試験結果から得られる差応力～軸ひずみ曲線においては、差応力～軸ひずみ曲線の線形が拘束圧の大きさにより変化することは衆知の通りである。すなわち、低い拘束圧の下ではひずみ軟化現象が生じ、

脆性的な関係が観察されるのに対して、高い拘束圧の下ではひずみ硬化現象が生じ、延性的な関係が観察される。

Fig. 1 (a), (b)は岩石の三軸圧縮試験結果から得られる差応力～軸ひずみ曲線上において、初期応力の平衡位置を模式化して示したものである。(a)に示したひずみ軟化現象が生ずるような低い拘束剛性の下では、A, B点とA', B'点が示すように同じ応力を与える点が差応力～軸ひずみ曲線上に2つ存在する。A, A'点は強度破壊点以前の領域に、B, B'点は強度破壊点以降の領域にそれぞれ位置している。同じ応力レベルであってもA, A'点とB, B'点では破壊の進行度が著しく異なる。したがって、初期応力に関しては、その大きさだけでなく平衡が保たれていた応力～ひずみ曲線上領域も同時に推定しておくことが要求される。また、A', B'点は岩石の一軸圧縮強度強以上の応力レベルにあり、一

軸圧縮試験による後載荷ではA', B'点の応力レベルを再現することは困難となる。一方、(b)に示したひずみ硬化現象が生ずるような高い拘束剛性の下では、C点が示すように岩石の一軸圧縮強度強を遥かに越える高い応力レベルで初期応力の平衡が保たれている。初期応力レベルを再現するためには、三軸圧縮試験の導入が必要となる。AEのカイザー効果の発現特性に関するこれまで行ってきた基礎的な研究^{1), 2)}から、

- ① カイザー効果を応力とではなく、ひずみと対応させて“再負荷の際、先行最大ひずみを越えるまではAEの発生は少ない”と定義すると、応力～ひずみ曲線上の全領域においてカイザー効果に普遍性を持たせることができること。
- ② 先行応力がひずみ軟化域あるいはひずみ硬化域から除荷された場合、AEの発生総数の急増点を与えるひずみレベル ϵ_{e} と、ピーク強度もしくは降伏応力に対応するひずみレベル ϵ_{p} がほぼ等しくなること。
- ③ 先行載荷時より低い周圧の下で後載荷を行うと②と同じ現象が観察されること。

が明かとなっている。

3. 実験方法

3-1 AE計測を導入した擬似三軸圧縮試験装置

上記の問題に対処するために、従来の一軸圧縮試験に基づくAE法を三軸圧縮試験に導入することを考えた。本実験で使用した三軸圧縮試験装置はいわゆる、

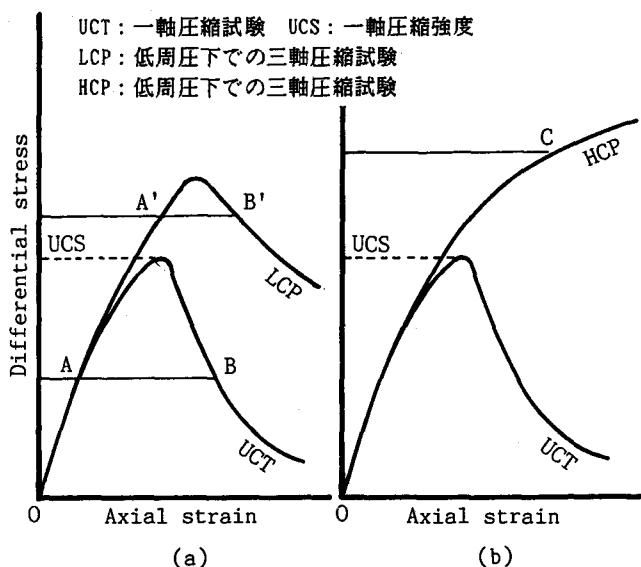
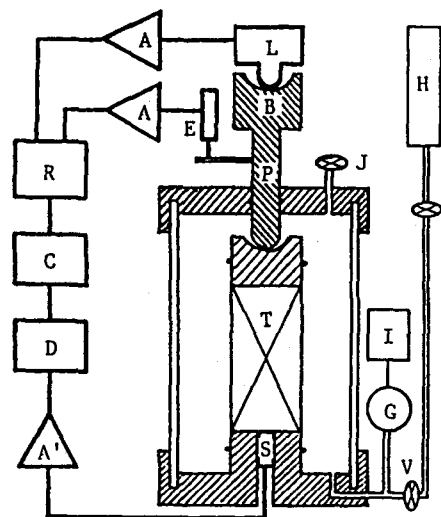


図-1 模式化した応力～ひずみ曲線図



L: Load cell E: Displacement transducer
A: Amplifier S: AE transducer
A': Pre-amplifier D: Discriminator
C: Rate/Total counter R: X-Y Recorder
H: Oxygen cylinder T: Testpiece
V: Pressure-regulating valve
J: Pressure-releasing valve
G: Pressure transducer
I: Pressure indicator
P: Piston B: Spherical seating

図-2 三軸圧縮試験装置の概略とAEの検出系統図

擬似三軸圧縮試験用の装置であり、その最大載荷荷重は1 tf、最大周圧は10 kgf/cm²である。本実験では、軸力载荷中の周圧は一定とし、ポンプからレギュレーターを通して供給される酸素ガスでこれを与え、軸力は0.1 mm/minの変位速度で载荷した。

AEの計測方法としては、AEセンサーを直接供試に取り付けて測定が行えるようベDESTAL部を改良した。Fig. 2に本実験で用いた三軸圧縮試験装置の概略図とAEの検出系統図を示す。用いたAEセンサーはNF回路社製のAE901S型のセンサーであり、その共振周波数は約140kHzである。AE信号はプリアンプで40dB、ディスクリミネーターで30dB増幅し、0.1MHz~1MHzのバンドパスフィルターを通して計測した。本実験で設定したディスクリレベルは、250 mVと100mVである。また、採用したAEパラメータは発生総数のみである。

3-2 繰り返し载荷パターン

岩石モデル供試体の形状は、φ5cm×10cmの円柱供試体であり、試験機の载荷能力を考慮して目標強度として15 kgf/cm²を設定し、炭酸カルシウムを混入したセメントモルタルを用いてこれを製作した。なお岩石モデルの実際の一軸圧縮強度は13.4 kgf/cm²であった。Fig. 3に岩石モデルの差応力~ひずみ曲線の一例を示す。この結果は、岩石モデルの応力~ひずみ曲線的全領域にわたって先行応力の検討が行え、材料的に本実験の目的に叶うことを示している。

最初の先行応力は、一軸圧縮試験により軸方向応力がピーク強度あるいはひずみ軟化域内の応力になるように与えた。以後は周圧を2 kgf/cm²あるいは3 kgf/cm²ずつ増分させ、一定周圧下での軸力の载荷、除荷を繰り返した。

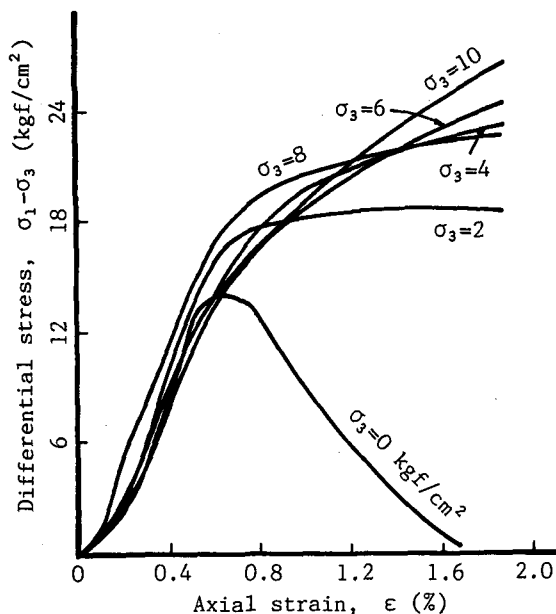


図-3 岩石モデルの応力~ひずみ曲線

4. 実験結果

実験結果の一例として、Fig. 4に最初の先行応力をピーク強度とした場合のAE発生総数と差応力~ひずみ曲線の関係をFig. 5に最初の先行応力をひずみ軟化域内の応力レベルとした場合のAE発生総数と差応力~ひずみ曲線の関係を示す。なお、同図中のnは载荷次数を表している。1次载荷と2次载荷の関係のみに注目すれば、周圧の付加により2次载荷時の差応力は1次载荷時の除荷差応力を確実に上回っており、AEの発生総数の急増点が与えるひずみを利用して1次载荷における除荷差応力を標定することが可能であることを示している。このような先行応力状態に対しては、2次载荷を一軸圧縮試験ではなく三軸圧縮試験によって行うことが必要であると言える。

一方、3次载荷以降の繰り返し载荷の相互関係は、ひずみ硬化域内の応力レベルを先行応力とした場合に相当する。いずれの除荷時の差応力レベルも岩石モデルの一軸圧

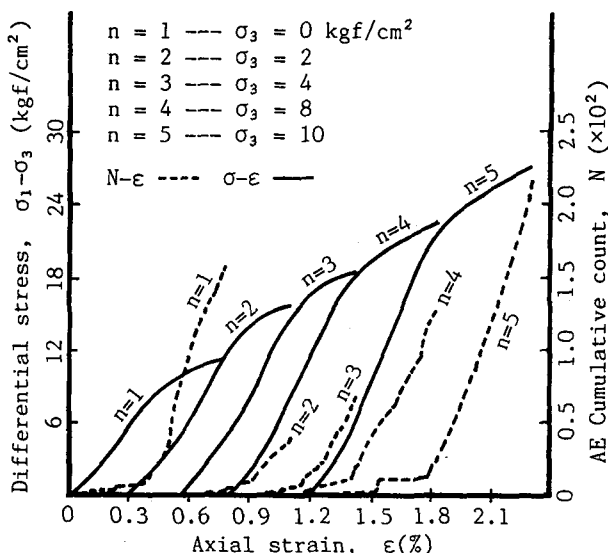


図-4 応力~ひずみ曲線とAE発生総数の関係

縮強度をはるかに越える応力レベルである。このような先行応力状態に対しても、前述した場合と同様に三軸圧縮試験による2次載荷が必要となる。与えた先行応力と同じ応力レベルを再現するためには、先行応力を与える際に供試体に与えた周圧と等しいかそれ以上の大きさの周圧を与えた2次載荷を行うことが要求されることになる。与える周圧が不足した場合には、2-③で述べた同じ現象が観察されるので、必要な周圧の大きさを判断することは可能である。

本研究で行った実験の結果に対して、AEのカイザー効果を利用して先行載荷時の除荷差応力を推定を試みた。各載荷時の周圧の大きさが異なるため、除荷差応力の真値と推定値を直接比較することはできない。このため、差応力に周圧を加えて全応力を算出し、両者の関係を示したのがFig. 6である。●印で示した先行応力としてピーク強度を与えた場合において先行応力が一軸圧縮強度を下回っているが、これは岩石モデルの一軸圧縮強度にばらつきがあるためである。全応力で表した先行応力の真値と推定値は、いわゆる脆性的現象を呈する応力域と延性的現象を呈する応力域の両領域にわたって良好な一致をみせている。同図中の破線は±5%の誤差境界を示している。

4. 三軸圧縮試験を利用するAE法による先行応力推定法

擬似三軸圧縮試験法にAE計測を導入した低強度岩石モデルを用いた軸力の繰返し載荷実験の結果、応力～ひずみ関係の全領域にわたる先行応力がAEのカイザー効果を利用して全応力として精度良く推定できることが確認された。三軸圧縮試験を利用したAE法による先行応力（初期地圧）の推定法として、Fig. 7に示すような手順が提案される。ここに、 ϵ_{ae} と ϵ_{sy} はそれぞれ2次載荷時におけるAE発生総数の急増点を与えるひずみと、ピーク強度もしくは降伏応力に対応するひずみである。

原位置から採取したコア試料について、ひずみ制御による載荷が可能な試験機を用いた一軸圧縮試験を行う。 $\epsilon_{\text{ae}} < \epsilon_{\text{sy}}$ の関係が観察されれば、先行応力は弾性的応力域内にあったと判断され従来のAE法と同じ手順で先行応力が推定される。一方、上記の関係が観察されず $\epsilon_{\text{ae}} \geq \epsilon_{\text{sy}}$ となった場合、三軸圧縮試験を適用する。周圧を段階的に増加させた試験を $\epsilon_{\text{ae}} < \epsilon_{\text{sy}}$ の関係が観察されるまで繰り返す。原位置深度の拘束剛性と等しいかそれ以上の拘束剛性を試験片に与えることのできる周圧でなければ、 $\epsilon_{\text{ae}} \geq \epsilon_{\text{sy}}$ の関係が観察される。 $\epsilon_{\text{ae}} < \epsilon_{\text{sy}}$ の関係が観察されれば、先行応力は全応力として推定される。

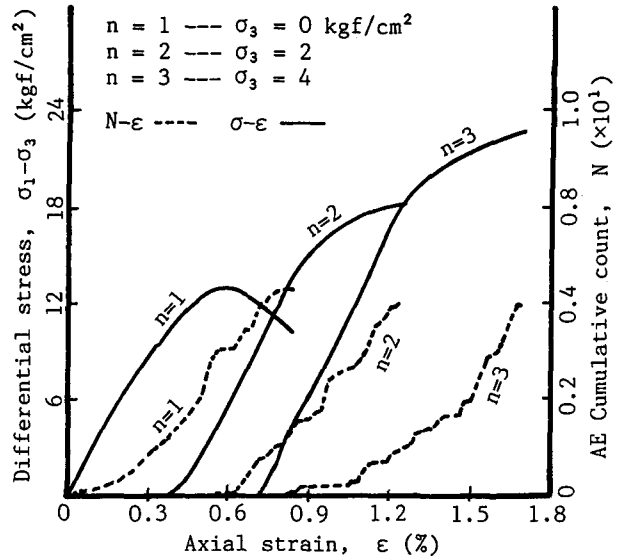


図-5 応力～ひずみ曲線とAE発生総数の関係

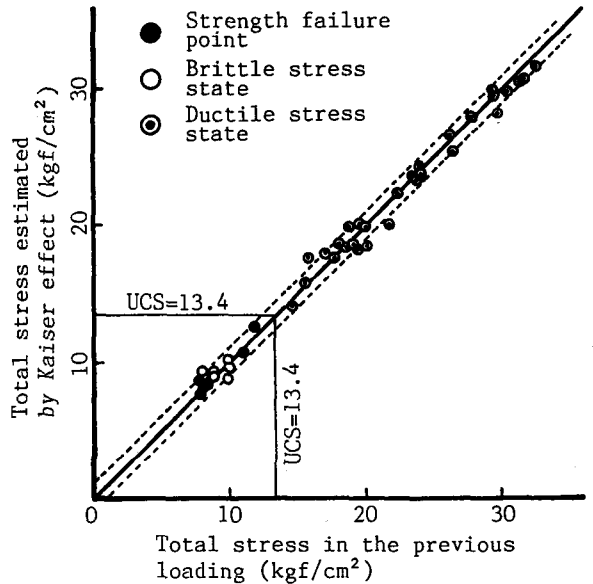


図-6 全応力で表した先行応力の真値と推定値

このように、 $\epsilon_{ae} < \epsilon_{fy}$ の関係が観察されることが、先行応力を推定するための条件となる。この関係が観察されれば、先行応力は従来のAE法の手順と同じ手順で算定される。ひずみ制御による載荷が可能な試験機を用いた一軸圧縮試験の実施については、 $\epsilon_{ae} < \epsilon_{fy}$ の関係を確認する上で必ず必要である。先行応力が弾性的応力域内にある場合には、従来のAE法を適用すれば充分であり、この場合に三軸圧縮試験を利用すると先行応力を過大評価することとなる。このような場合を想定した実験を行ってはいるが、周圧の付加が不要であるとの判断指標となるようなインデックスは見いだせなかった。したがって、現段階では最初に一軸圧縮試験実施のステップを踏む必要がある。

5. むすび

本研究は、室内での岩石モデルを用いた実験の結果を基にして、三軸圧縮試験を利用したAE法による先行応力の推定法について検討を行ったものである。本研究で提案した方法を実際問題に適用するに際しては、高圧下で使用できるAEセンサーの開発やカイザー効果の標定精度の改善等、ハード、ソフトの両面における克服すべき問題が残されている。

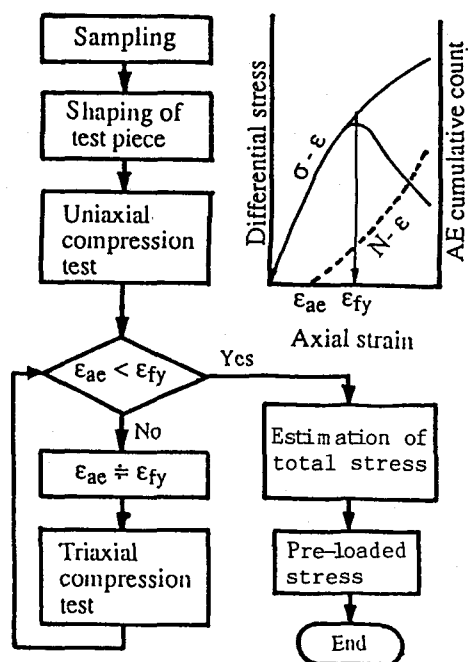


図-7 三軸圧縮試験を利用したAE法による先行応力の推定手順

参考文献

- 1) 石橋孝治, "三軸圧縮応力下における人工軟岩のAE発生特性, 第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集," pp. 156-160, 1989
- 2) ISHIBASHI, K. & T. IWAI, "Acoustic Emission Behaviour of Rock in The Post-failure Region," Proc. of the Int. Symp. on Underground Excavation in Soil and Rocks, Including Earth Pressure Theories, Buried Structures and Tunnels, Bangkok, pp. 501-508, 1989
- 3) ISHIBASHI, K., "Fundamental Study on The Estimation of Geo-stress and Fracturing State of Rock Using Acoustic Emission Technique," Australian Civil Engg. Trans., IEAust., Vol. CE34, No.1 (will be published on Feb. 1992)