福井 勝則¹ 大久保 誠介² 清水 剛³

Failure Process of Rock in Uniaxial Tension

by Katsunori FUKUI¹, Seisuke OKUBO¹ and Tsuyoshi SHIMIZU²

1. Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

2. Graduate Student of Faculty of Engineering, The University of Tokyo

The behavior of rock in tension is considered to be as important as in compression for designing underground structures, especially large ones. But few results of tensile tests have been reported.

The servo-controlled testing machine was used in this study, and uniaxial tension tests were conducted on six rocks (one granite, one andesite, one tuff and three sandstones). Complete stress-strain curves were successfully obtained, and compliance and irrecoverable strain were evaluated by unloading-reloading test. The main results can be summarized as follows;

1) Compliance increases through the whole process. But in the pre-failure region, the increase rate is relatively slight. On the other hand, compliance in the post-failure region increases rapidly with decrease of the load bearing capacity.

2) Irrecoverable strain is closely correlated with compliance change, i. e. with crack growth. The failure process of rock was discussed in detail based on the evaluation of compliance as well as irrecoverable strain.

3) The shape of stress-elastic strain curves in uniaxial tension tests are similar to those in uniaxial compression tests.

KEY WORDS : Rock, Uniaxial Tension, Compliance, Elastic Strain, Process Zone

1. はじめに

岩盤構造物の天盤には引張応力が発生しやすく、そのため落石などが生じるだけでなく、構造物全体の安定性に影響を与えることもある。近年、岩盤構造物の大型化によって天盤の曲率半径が大きくなり、岩盤の自重で引張応力が作用しやすい環境となっている。この場合の力学的安定性を評価する上で岩盤の引張強度だけでなく変形挙動も重要である。また、引張試験での破壊機構は圧縮試験に比べ、比較的単純であると考えられ、岩石の破壊過程に関する基礎的研究としても意義がある。しかしながら、引張破壊過程については実験自体が難しく、圧縮破壊過程（例えば Paterson, 1986）に比べて報告が非常に少なく、現在でも判明しない事項が多い。

福井ら（1995）および Okubo and Fukui（1996）は、強度破壊点以降も含めた応力-歪曲線を求める方法を確立し、6種類の岩石の完全応力-歪曲線を求めた。その結果、強度破壊点以降の応力-歪曲線はさほど脆性的でなく、圧縮応力下と比較的似ていることがわかった。また圧縮応力下と同様に残留強度領域が存在することを明らかにした。

さて、曲げ試験などで除荷・載荷を繰り返すことより、亀裂長

を求めることは従来から数多く行われている。これと似た考えに基づき、大久保ら（1987）は一軸圧縮試験の際に除荷・載荷を繰り返し、その時点でのコンプライアンスを求め、弾性的な挙動と非弾性的な挙動に分離をして圧縮破壊過程について検討した。

本研究では、大久保ら（1987）の方法を引張試験に適用して、引張破壊過程を詳細に調べることにした。すなわち、完全応力-歪曲線を得る際に除荷・載荷を繰り返し、弾性的な挙動と非弾性的な挙動に分離し、検討した結果について述べることにする。

2. 実験方法および試料岩石

一軸引張試験機としては、独自に開発した容量 500 kN のサーボ試験機を用いた。図 1 に実験装置の載荷部を示す。福井ら（1995）は、試験終了後の試験片の取り外しやすさを考慮して、上部プラテンの固定にねじとナットを用いた。今回の実験では除荷・載荷を行うため、ねじナット部でのヒステリシスが実験結果に現れる可能性が考えられた。そこで、図 1 に示すようにナットを使用せず、上下のプラテンをねじでしっかりと固定した。このため、上部プラテンとラム、下部プラテンと荷重計の接触面では大きな圧縮応力が作用しており、岩石を破壊させる程度の引張試験を行っても、圧縮応力が作用したままとなるため、この部分でのヒステリシスは生じにくい。また、ねじナット部ではどうしても剛性が低下しやすいが、この点も改善された。

実験では、まず上下のプラテンをねじで固定した後、エポキシ系接着剤（ニチバン製、AR-R30）をプラテンおよび試験片の上下に塗布する。つぎに試験片を挿入し、圧縮荷重が数十 N 程度となるようにシリンダを動かし、1 日程度接着剤が硬化するまで

* 1998 年 3 月 6 日受付 6 月 30 日受理 資源・素材学会平成 9 年度春季大会、秋季大会および第 10 回岩の力学国内シンポジウムにて一部発表

1. 正会員 工博 東京大学助教授 工学系研究科地球システム工学専攻

2. 正会員 工博 東京大学教授 工学系研究科地球システム工学専攻

3. 東京大学大学院修士課程 工学系研究科地球システム工学専攻

【著者連絡先】FAX 03-3818-7492（東大・地球システム）

キーワード：岩石、一軸引張、コンプライアンス、弾性歪、プロセスゾーン

図1 実験装置載荷部の概念図

放置する。接着剤の硬化を確認後、実験を開始する。

実験では、強度破壊点以降でも安定に破壊させるために、次式で表される応力帰還制御（大久保・西松，1984 a）を用いた。

$$\varepsilon - \alpha \cdot \sigma / E = C \cdot t \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 ε 、 σ 、 E 、 C 、 t はそれぞれ歪、応力、初期ヤング率、載荷速度および時間である。歪は、シリンダに取り付けた変位計より求めた。また、載荷速度 C は 10^{-6} s^{-1} とした。 α は応力の帰還量を決める定数で、稲田花崗岩では0.45、田下凝灰岩では0.1、その他の岩石では0.3とした。

実験では、応力が約0.5 MPa程度変化するごとに除荷を行った。除荷の量は、履歴にさほど影響を与えないように0.5 MPa程度とし、これを強度破壊点以降で応力がほぼ0となるまで繰り返した。図2に実験によって得られる応力 σ -歪 ε 曲線の概念図を示す。除荷曲線の傾きの逆数をコンプライアンス λ （＝歪の変化量/応力の変化量）とし、歪を応力に依存する歪 ε_1 （弾性歪）と、依存しない歪 ε_2 （非弾性歪）に分離した。なお、除荷と載荷とでヒステリシスを描く場合には、ヒステリシスループの中心軸の傾きからコンプライアンスを求めた。さて、歪はシリンダ後端に取り付けた変位計より求めたので、試験機剛性の影響を受ける。本研究で用いた試験機の剛性は2~3 GN/m程度であり、ヤング率の比較的大きい稲田花崗岩や諫早砂岩の場合には、歪のほか、弾性歪やコンプライアンスは若干その影響を受ける。しかし、図2に示すように荷重0まで外挿し求めた非弾性歪は試験機剛性の影響を受けない。

試料岩石として、稲田花崗岩、三城目安山岩、田下凝灰岩および3種類の砂岩（諫早砂岩、平島砂岩、白浜砂岩）の6種類の岩石を用いた。直径25 mm、高さ50 mmの円柱形の試験片に整形し、その後、温度 $22 \pm 2^\circ \text{C}$ 、湿度 $60 \pm 15\%$ の実験室内にて2週間以上放置し、自然乾燥させてから実験に供した。なお、同一の岩石で3本以上の試験を行った。各岩石の物性値を表1に示す。

図2 除荷・載荷試験の概念図

表1 試料岩石の物性値

岩石名	試験本数	一軸引張強度 (MPa)	初期ヤング率 (GPa)	見かけ比重	一軸圧縮強度 (MPa)	弾性波速度 (m/s)
稲田花崗岩	5	8.61 (8.18, 9.06)	32.2	2.65	204	4560
三城目安山岩	5	4.27 (3.18, 4.90)	16.5	2.12	89.2	3410
田下凝灰岩	5	2.27 (1.94, 2.77)	7.60	1.78	15.3	2640
平島砂岩	3	2.48 (2.02, 2.94)	15.4	2.35	93.8	2790
白浜砂岩	3	2.27 (2.24, 2.29)	10.3	2.30	50.4	2390
諫早砂岩	3	5.85 (5.22, 6.58)	25.2	2.43	108	3860

一軸引張強度は、平均値（最小値，最大値）を表す。

3. 実験結果

3.1 応力と歪

除荷・載荷を行った場合の応力と歪の関係を図3に実線で示す。図3において得られた応力と歪の関係を外包するような曲線がほぼ応力-歪曲線を表しており、その応力-歪曲線から左下方向に0.5 MPa程度低下しているものが、除荷および載荷の際に得られた曲線である。図には横軸を非弾性歪とした、非弾性歪と応力の関係も破線で示した。

(a)の稲田花崗岩と(b)の三城目安山岩とは比較的に似ており、次のような特徴を示す。最初、除荷曲線は応力-歪曲線と重なって

図3 除荷・載荷を行った応力 σ と歪 ε の関係
破線は非弾性歪を表す。

いるが、強度の 50 % 程度から両者に差異が認められるようになる。応力の増大に従いその差異は大きくなっていき、強度破壊点を過ぎると除荷曲線と載荷曲線にも、ヒステリシスが現れ始めていることもわかる。強度破壊点以前では歪に占める非弾性歪はわずかであるが、強度破壊点以降に徐々に割合が増加していき、残留強度領域では歪のほとんどは非弾性歪であることがわかる。

(c)の田下凝灰岩の応力-歪曲線は強度破壊点を境にして、強度破壊点以前と以降とはほぼ対称的な形となっており、強度破壊点以降では今回用いた岩石で最も延性的な挙動を示した。除荷曲線は載荷直後から応力-歪曲線と異なっている。その傾向は応力の増加に従い増していき、強度破壊点以降で応力が強度の 50 % 以降ではヒステリシスが顕著となっている。非弾性歪は稲田花崗岩や三城目安山岩と異なり、強度破壊点において歪の 50 % 程度を占めており、強度破壊点以降ではその割合を増している。

(d)~(f)は 3 種類の砂岩であり、強度およびヤング率は諫早砂岩、平島砂岩、白浜砂岩の順に小さい。(d)の白浜砂岩の強度破壊点以前での応力-歪曲線は今回用いた試料岩石の中で最も塑性的な特徴を示している。他の岩石の場合には、強度破壊点での歪は $4 \sim 7 \times 10^{-4}$ であるのに対して、白浜砂岩は 2×10^{-3} とかなり大きく、この歪の大部分は非弾性歪である。強度破壊点以降では強度の 30 % 程度に低下するまでは歪はほとんど変化しておらず、脆性的に破壊が進行している。

(e)の平島砂岩では、強度破壊点以前で応力の小さいうちから応力-歪曲線が曲がり始めており、白浜砂岩ほどではないが塑性的な挙動を示している。強度破壊点では歪の 60 % が非弾性歪である。強度破壊点以降では歪の増加はわずかであり、白浜砂岩と似ている。

(f)の諫早砂岩では、強度の 50 % までではほぼ応力-歪曲線と除荷曲線が一致しており、強度破壊点以降の特徴も稲田花崗岩や三城目安山岩と似ている。

以上のように、花崗岩や安山岩に比べ砂岩では、強度破壊点以前での非弾性歪の増加が比較的大きく、強度破壊点以降では応力が 50 % 程度減少するまでは非弾性歪の変化が小さい傾向がみられた。

3・2 応力とコンプライアンス

除荷を開始した応力と、除荷曲線の傾きから求めたコンプライアンスの逆数 λ^{-1} との関係を図 4 に示す。全体的な傾向としては、初期の λ^{-1} が最も大きく、載荷に従い、若干上に凸の曲線を描きながら、 λ^{-1} は徐々に低下していき、強度破壊点では初期の 60~80 % に低下する。その後、強度破壊点以降では応力の低下に従い、上に凸の傾向を持ちながら λ^{-1} は減少している。また応力が 0 に近くなると λ^{-1} も 0 に近づいている。

(a)の稲田花崗岩では、最初 λ^{-1} は 34 GPa であったものが、

(a) 稲田花崗岩、三城目安山岩、田下凝灰岩 (b) 平島砂岩、白浜砂岩、諫早砂岩

図 4 応力 σ とコンプライアンスの逆数 λ^{-1} の関係

載荷に従い徐々に低下していき、強度の 70 % 程度から λ^{-1} の低下速度が増し、強度破壊点では 25 GPa と初期の 75 % まで低下している。強度破壊点以降では応力の低下に従い、ほぼ直線的に低下していき、応力が 1.5 MPa 付近から若干傾きがきつくなっていることがわかる。三城目安山岩では、載荷直後の λ^{-1} は稲田花崗岩の半分の 17 GPa であり、強度破壊点では 14 GPa と 80 % 程度になっている。強度破壊点以降では応力の低下に従い λ^{-1} も低下しており、応力が 1.5 MPa 付近から若干傾きがきつくなっている点は稲田花崗岩と似ている。田下凝灰岩では初期の λ^{-1} は 7.5 GPa とかなり小さく、強度破壊点では 6 GPa となり、強度破壊点以降ではほぼ応力の低下にほぼ比例して λ^{-1} も低下している。

(b)の砂岩でも傾向的には、(a)に示した岩石と定性的な傾向は同様である。白浜砂岩と平島砂岩の曲線は比較的良好に似ており、強度破壊点での λ^{-1} は初期の 60 % 程度と他の岩石に比べて小さくなっている。他方、諫早砂岩では強度破壊点での λ^{-1} は初期の 80 % 程度と、 λ^{-1} の低下は小さい。また強度破壊点以前での応力に対する λ^{-1} の変化は、(a)の場合と比較して砂岩ではどちらかといえば、直線的な傾向がみられる。強度破壊点以降では応力と λ^{-1} の関係は白浜砂岩ではほぼ直線的であるのに対して、平島砂岩や諫早砂岩ではそれぞれ応力が 0.5 MPa、1.5 MPa で屈曲しているようにもみえる。

3・3 コンプライアンスと非弾性歪

各岩石のコンプライアンスと非弾性歪の関係を両対数グラフ上に示したのが、図 5 である。また、図には強度破壊点でのコンプライアンスと非弾性歪を●で示した。

(a)に示した、稲田花崗岩、三城目安山岩、田下凝灰岩では載荷に従い、コンプライアンスおよび非弾性歪は増加していき、●で示した強度破壊点を迎える。強度破壊点以前ではコンプライアンスの変化に比べて、非弾性歪の増加が顕著であり、強度破壊点以降では非弾性歪の変化に比べて、コンプライアンスの増加が顕著となる傾向がみられる。また強度破壊点付近では強度破壊点以前と以降での特性がなめらかに変化しているようにみられ、この 3 岩石は同じような曲線を描いていることがわかる。

(b)に示した砂岩では、強度破壊点以前では非弾性歪が、強度破壊点以降ではコンプライアンスが主に変化している傾向は(a)に示した岩石と共通した特徴を示している。しかし、(a)ではコンプライアンスと非弾性歪の関係は強度破壊点付近で徐々に変化していたが、(b)では強度破壊点を境に急激に変化している様子がみられる。

4. 考 察

4・1 圧縮試験結果との比較とグリフィス軌跡

(a) 稲田花崗岩、三城目安山岩、田下凝灰岩 (b) 平島砂岩、白浜砂岩、諫早砂岩

図 5 コンプライアンス λ と非弾性歪 ε_2 の関係

表2 一軸圧縮強度の比較

	稲田花崗岩	三城目安山岩
本研究	204 MPa	83.6 MPa
大久保ら(1987)	180 MPa	90 MPa

 図6 正規化した応力 σ^* とコンプライアンスの逆数 λ^{-1} の関係
 応力は強度で正規化した。圧縮試験結果は大久保 (1987) より引用

4. では、3. の実験結果に基づいて引張破壊過程についての考察を行うことにする。

大久保ら (1987) は5種類の岩石を用い、圧縮試験において強度破壊点以降で除荷・載荷試験を行った。そのうち、稲田花崗岩と三城目安山岩は今回の試料岩石と共通するので、今回の引張試験と比較してみる。ただし、試験片は同じブロックから採取したものでないため、強度は若干異なっており、表2に今回用いた試験片と大久保ら (1987) の一軸圧縮強度の比較を示す。本研究で用いた試験片の一軸圧縮強度は大久保ら (1987) に比べて、稲田花崗岩では10%増、三城目安山岩では10%減である。

図6に応力 σ^* と λ^{-1} の関係を示す。ただし、応力 σ^* はそれぞれの強度で正規化している。稲田花崗岩では、強度破壊点での λ^{-1} は引張試験で25 GPaであるのに対して、圧縮試験では43 GPaと70%程度も大きい。三城目安山岩では、引張試験で14 GPaなのに対して、圧縮試験では21 GPaと50%程度大きくなっている。表2の強度を考慮に入れても、圧縮試験の強度破壊点での λ^{-1} は引張試験に比べ、かなり大きいことがわかる。引張試験と異なり、圧縮試験の強度破壊点以前では応力の増加に従い、 λ^{-1} が増加する。 λ^{-1} が増加する原因として、潜在亀裂や空隙が閉じることが考えられる。強度破壊点以前でもダイラタンシーが観察されるので、亀裂の進展が生じ、 λ^{-1} が低下する要因もあると思われるが、亀裂や空隙の閉鎖現象が卓越しているので、 λ^{-1} が増加する。他方、今回実施した引張試験では、図4に示したように λ^{-1} は単調に減少する。引張試験においても、潜在亀裂や空隙の閉鎖はありえるが、その影響は比較的小さいためと考えられる。

次に強度破壊点以降を比較してみる。応力と λ^{-1} の関係では原点からの傾きの逆数が弾性歪を表すので、両試験とも強度破壊点以降では弾性歪は減少傾向にある。この様子を詳しく調べるために、強度破壊点での弾性歪で正規化した弾性歪 ε_1^* と、強度で正規化した応力 σ^* の関係を図7に示す。(a)の稲田花崗岩では応力の低下に従い、圧縮試験に比べ引張試験の方が若干弾性歪の減少が大きく、(b)の三城目安山岩でもわずかに引張試験の方が弾性歪の減少が大きいが、両者ともさほど変わらないともいえる。圧縮試験での強度破壊点以降では、応力の低下に伴う閉鎖していた亀裂や空隙の開口による λ^{-1} の低下だけでなく、亀裂の進展に伴う λ^{-1} の低下が現れているものと考えられる。巨視的にみ

 図7 正規化した応力 σ^* と弾性歪 ε_1^* の関係
 応力は強度で、弾性歪は強度破壊点の弾性歪でそれぞれ正規化した。

 図8 グリフィス軌跡における応力 σ^* と弾性歪 ε_1^* の関係
 図中の数字は強度破壊点の亀裂長を表す。破線は引張試験における三城目安山岩の応力と弾性歪の実験結果

た場合に圧縮試験では、亀裂に垂直な応力が作用するため、亀裂での摩擦が起きるなど複雑な現象が生じているため、コンプライアンスの変化から破壊機構に関する考察をすることが難しい。引張破壊では亀裂の摩擦現象はないとはいえないが、圧縮破壊に比べて格段に少ないと考えられる。このように破壊機構はかなり異なると考えられているが、図6や図7の結果からは、明瞭な差はみられなかった。

次に図7をグリフィス軌跡と比較してみる。圧縮破壊におけるグリフィス軌跡は佐藤・木下 (1976) が求めているが、亀裂の方向や摩擦係数など多くのパラメータが存在する。一方、引張破壊の場合は比較的単純である。Berry (1960) の求めた平面応力状態でのグリフィス軌跡の式を、図7のように正規化すると次式となる。

$$\varepsilon_1^* = (\sigma^* + k_1(\sigma^*)^{-3}) / (1 + k_1) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$k_1 = 2\pi C_0^2 / A$$

ただし、 A 、 $2C_0$ はそれぞれ試験片の断面積、不安定成長を始めるときの亀裂長である。試験片の断面積 4.9 cm^2 を用いて、 $2C_0$ を $0.2 \sim 6 \text{ mm}$ の間で変化させた場合のグリフィス軌跡を図8に示す。図には比較のため、三城目安山岩の引張試験での結果も示した。グリフィス軌跡では、最初クラスII岩石のように応力と弾性歪は正の傾きをもったまま両者とも減少し、あるところで弾性歪の低下率が減少していき、逆に弾性歪は増加傾向となる。 $2C_0$ が大きくなれば、弾性歪が増加し始めるときの応力は増加する。実験結果でもグリフィス軌跡と定性的には同じような変化をしている。定量的に比較すると、応力が0.8程度まで低下するまでは、 $2C_0$ が6 mmのグリフィス軌跡に近い。また $2C_0$ が0.2 mmの場合、弾性歪が増加し始める応力が実験結果と一致するが、応力と弾性歪の勾配がかなり異なっている。このように、実験結果とグリフィス軌跡とはかなりの違いがみられる。これはグリフィス軌跡が二次元であることや、軌跡を求める際の仮定などが主な原因であると考えられる。三城目安山岩の潜在亀裂の長さがわからな

いため、詳細な検討はできないが、定性的な傾向が一致していることは今後の検討で重要であると考ええる。

4・2 コンプライアンスと非弾性歪

岩石に引張応力を加えると、荷重方向とほぼ垂直な破断面が最終的に形成されることから、破壊機構として巨視的な亀裂が、荷重と垂直方向に進展する現象が挙げられる。(2)式のグリフィス軌跡でも評価されているように、巨視的な亀裂進展によるコンプライアンスの増加は明らかである。

この亀裂進展の他に、次のような変形過程も存在する。岩石内部には微小の潜在亀裂が無数に存在しており、この微小亀裂は様々な方向を向いている。ある方向から引張荷重を加えた場合、それと垂直な方向以外の微小亀裂近傍では、引張変形だけでなくせん断変形も生じることとなり、例えば圧縮試験のように、亀裂が閉鎖して亀裂での摩擦が起これ、非弾性歪が生じることが考えられる。また、破壊力学的な見地からの研究、例えば三点曲げ試験(大久保ら, 1984b)やクリープ試験(福井, 1990)などから、プロセスゾーンと呼ばれている微小亀裂が数多く集中した領域が巨視的な亀裂の先端に形成されているとの指摘がある。この場合も潜在亀裂と同様の影響が現れ、非弾性歪を生じさせる。

以上のように、引張破壊過程では、荷重と垂直方向に進展する巨視的な亀裂と、荷重と垂直方向にない微小亀裂の変形の2種類の機構が考えられる。荷重と垂直方向に進展する巨視的な亀裂進展はコンプライアンスに、荷重と垂直方向にない微小亀裂の変形は非弾性歪の増加に大きく影響を与えると考えることができる。

図5に示した、コンプライアンスと非弾性歪の関係において、強度破壊点を境にその特性に変化が生じた。すなわち、強度破壊点以前では非弾性歪の増加が、強度破壊点以降ではコンプライアンスの増加が卓越していた。このことより強度破壊点以前では、亀裂が荷重と垂直な方向に進展する現象より、荷重と垂直な方向にない微小亀裂の変形やプロセスゾーンの形成現象が卓越しているのではないかと考えられる。他方、強度破壊点以降では、コンプライアンスの変化が卓越しているため、荷重と垂直な方向に亀裂が進展する現象が卓越していると考えられる。

図9 応力 σ とコンプライアンスの逆数 λ^{-1} の関係

4・3 強度破壊点以降での応力とコンプライアンス

図4に各岩石の平均的な結果を示したが、同じ岩石でも試験片ごとにかかりの差異がみられた。3本の試験片を用いた平島砂岩の場合をまず説明する。除荷を開始した応力と、除荷曲線の傾きから求めたコンプライアンスの逆数 λ^{-1} との関係を図9(a)に示すが、 λ^{-1} の初期値 13, 15, 18.5 GPa より出発するほぼ平行な3本の曲線となる。他方、強度破壊点以降の曲線はほぼ一致する。試験片は同じブロックから採取したもので、試験片によって粒度や結合物質が異なっているとは考えにくく、初期の λ^{-1} が異なった原因は、試験片の潜在亀裂の長さや数の違いによるものと考えられる。試験片が載荷されると、亀裂の進展や亀裂先端でのプロセスゾーンの拡大が生じ、 λ^{-1} の低下と非弾性歪の増加につながると考えられる。強度破壊点以降では先ほど述べたように荷重と垂直方向に進展する亀裂が変形挙動を支配している。強度破壊点以降では、図9(a)のように同一曲線上を通るので、この時点の特性には潜在亀裂の初期状態の影響が現れていないこともわかる。

図9(b)~(d)に示した、稲田花崗岩、三城目安山岩、田下凝灰岩でも 10~30% 程度、初期の λ^{-1} はばらついているが、強度破壊点以降の曲線はほぼ一致する。

図4に示した λ^{-1} と応力の強度破壊点以降の関係では、応力が同じ場合、田下凝灰岩、白浜砂岩、平島砂岩、三城目安山岩、諫早砂岩、稲田花崗岩の順に λ^{-1} が大きくなっており、ヤング率や強度の順と一致している。これはこの曲線がヤング率や強度と関係が深いことを表している。

図9では、潜在亀裂によって決定される λ^{-1} の初期値から、出発する右下がりの曲線と、強度破壊点以降の曲線とぶつかったところが、強度破壊点であるともみることができる。

以上で述べた強度破壊点以降での応力と λ^{-1} の関係をまとめると、次のようになる。

- 1) 岩石の種類ごとにほぼ一定の曲線を描き、潜在亀裂の影響をほとんど受けない
- 2) 荷重を加えていき、この曲線とぶつかったところが強度破壊点となる

1)と2)より、強度破壊点以降での λ^{-1} と応力の関係は、図10に模式的に示すように、亀裂が安定に成長する領域と不安定に成長する領域に分ける限界条件を表しているともいえる。図中の実線で示した限界条件は、1)より岩石の種類ごとに決まっており、2)より荷重を加えていくと、徐々に λ^{-1} は減少していき、限界条件と交わると強度破壊点となる。強度破壊点以降で安定に破壊させていくと、この限界条件に沿って、応力と λ^{-1} は減少していく。また、潜在亀裂の長さや数が異なることによって、初期の λ^{-1} の値が異なる場合には、図10に示すように強度破壊点以前の軌跡や強度は異なる。しかしながら、この限界条件とぶつかってしまうと、これ以上の応力をささえることができなくなり、亀裂の進展が進み、応力および λ^{-1} は限界条件上を低下していく。

図10 限界条件の概念図(応力 σ とコンプライアンスの逆数 λ^{-1} の関係)

図 10 の斜線で示した領域（限界条件の右側あるいは下側）は、亀裂が不安定に成長するために、(1)式に基づいて安定に破壊させた今回の試験では存在することができない。

引張荷重を加えていき、この限界条件とぶつかったときの応力が引張強度となるので、限界条件は、別の見方をすれば破壊条件を表しているともいえる。その工学的な利用方法として、限界条件をあらかじめ把握していれば、初期の λ^{-1} によってほぼ強度を推定することが可能であるが、事前に限界条件を求める必要があるため、実用的ではない。強度破壊点以降の応力と λ^{-1} の関係は、破壊していく過程での岩石の力学的特性を表しており、しかも潜在亀裂の影響をほとんど含んでいない。そのため、巨視的な亀裂の進展と、試験片が支えることができる最大応力の関係を表現しており、引張応力下での破壊機構の解明の重要な資料となるものと考えられる。

さて、グリフィス軌跡 (Berry, 1960) では、強度破壊点以降の応力と λ^{-1} の関係は次式となる。

$$\lambda^{-1} = AE/(A + k_2 \sigma^{-4}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$k_2 = 2E^2 \gamma^2 / \pi$$

ただし、 A , E , γ はそれぞれ、試験片の断面積、ヤング率、単位面積当たりの表面エネルギーである。(3)式で k_2 は、ヤング率と単位面積当たりの表面エネルギーだけの関数であるので、岩石の種類によって決定される定数である。よって、(3)式は岩石固有の曲線となり、この曲線まで応力を増加させると強度破壊点となる。グリフィス軌跡も上記の 1), 2) の事項を想定していることになる。

4・4 砂岩の特徴

今回は 3 種類の砂岩を用いたので、その特徴について述べる。

図 5 に示したコンプライアンスと非弾性歪との関係は、砂岩以外、強度破壊点付近で徐々に変化していたのに対して、3 種類の砂岩ともに強度破壊点で急激に曲線が屈曲した。強度破壊点以前では微小亀裂の進展や形成による変形が、強度破壊点以降では荷重と垂直方向に進展する亀裂による変形が、それぞれ卓越することを 4・3 で述べた。これより、砂岩では強度破壊点で破壊機構が微小亀裂の進展や形成から、破断面となる亀裂の進展へと急激に変化した可能性が高い。一方、他の 3 岩種では、徐々に変化した可能性が高い。

砂岩の破断面の凹凸は 2~4 mm 程度と他の 3 岩種に比べて小さい。三城目安山岩の破断面の凹凸は 4~6 mm 程度であり (福井ら, 1995)、田下凝灰岩では 10 mm に及ぶものもあった。既報 (福井ら, 1995) で述べたように稲田花崗岩や三城目安山岩では、粒界に沿って破断面が迂回する現象が観察され、これにより凹凸が生じた。またこの凹凸により、残留強度が現れたり非弾性歪が大きくなる可能性を示した。他方、今回使用した砂岩の場合でも粒界に沿った破壊が生じたが、粒子径がそれほど大きくないため、亀裂の迂回は小さく破断面の凹凸も小さかった。そのため、砂岩では亀裂進展に関しての障害は小さく、理論上最も亀裂が進展しやすい、荷重と垂直方向に進展する。荷重と垂直方向にいったん亀裂が進展を始めると、断面積の減少により応力は低下することになるので、強度破壊点を迎える。よって、強度破壊点を境にして、強度破壊点以前では非弾性歪の蓄積が、強度破壊点以降ではコンプライアンスの増加が支配的となったと考える。他方、稲田花崗岩や三城目安山岩では、荷重と垂直方向に亀裂が進展し始めても、亀裂が粒子とぶつかり、非弾性歪を伴う亀裂の迂回が生じる。そのため砂岩と比較して、強度破壊点付近では、コンプ

ライアンスの増加と非弾性歪の蓄積が混在していると考えられることができる。

白浜砂岩の場合には、強度破壊点以前での非弾性歪が 15×10^{-4} と他の岩石に比べて格段に大きい。白浜砂岩の平均粒径は 0.1 mm で諫早砂岩や平島砂岩の 1/10 程度と非常に小さく、その構造は粒子が網目状に結合している。また初期の λ^{-1} は 10~11 GPa と今回用いた岩石の中で最もばらつきが小さかったことから、潜在亀裂長はそれほど長いものはないと考えられる。以上より、強度破壊点以前では、網目状に繋がっている構造が局部的に破壊していき、これによって非弾性歪が蓄積されたものと考えられる。非弾性歪が大きくなっても、粒径が小さく、かつ三次元的に複雑に粒子がかみ合っているため、亀裂が荷重と垂直方向になかなか進展できずに、非弾性歪がかなり大きくなったのでないかと考える。諫早砂岩や平島砂岩でも、稲田花崗岩や三城目安山岩に比べて、強度破壊点での非弾性歪が大きい原因は、白浜砂岩と同様であると考えられる。

5. まとめおよび今後の課題

本研究では一軸引張荷重下で除荷・載荷試験を行い、引張歪と弾性歪と非弾性歪の 2 つに分類し、引張破壊過程について検討した。概略を以下に示す。

1) 強度破壊点での非弾性歪は、稲田花崗岩や三城目安山岩に比べて砂岩、特に白浜砂岩で大きい。他方、強度破壊点以降の非弾性歪は砂岩より稲田花崗岩や三城目安山岩の方が相対的に大きい。

2) 圧縮試験と異なり、引張試験ではコンプライアンスの逆数 λ^{-1} が強度破壊点以前から減少する。また強度破壊点以降では応力の減少に従い、 λ^{-1} は減少する。強度破壊点以降の応力と λ^{-1} の関係は、安定に破壊させたときの限界条件であることを示した。

3) コンプライアンスと非弾性歪の関係を調べたところ、強度破壊点以前では非弾性歪が、強度破壊点以降ではコンプライアンスが大きく変化していた。このことより強度破壊点以前では微小亀裂の進展や形成が、強度破壊点以降では巨視的な亀裂の進展が支配的な現象であることを示した。また砂岩では強度破壊点で両者の関係が明瞭に変化しているのに対して、他の 3 岩種では徐々に変化していた。

4) 強度破壊点以降の応力と弾性歪の関係を調べたところ、圧縮試験と引張試験で明瞭な差はみられなかった。

今回は簡単なグリフィス軌跡との関係について述べたが、破壊力学的な見地から、定量的に強度破壊点以降での亀裂の進展とコンプライアンスの変化の関係を明らかにしていくことが、引張応力下での破壊機構の解明に繋がるものと考えられる。

引用文献

- Berry, J. P. (1960): J. Mech. Phys. Solids, Vol. 8, p. 194-206
 大久保誠介・西松裕一 (1984a): 日本鉱業会誌, Vol. 100, p. 1052-1056
 大久保誠介・新 孝一・西松裕一 (1984b): 材料, Vol. 33, p. 96-101
 大久保誠介・何昌榮・西松裕一 (1987): 日本鉱業会誌, Vol. 103, p. 177-181
 Okubo, S. and Fukui, K. (1996): Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 33, p. 549-555
 佐藤一彦・木下重敏 (1976): 日本鉱業会誌, Vol. 92, p. 409-414
 Paterson, M. S. 著・荻野正二・水田義明・佐野 修訳 (1986): 実験岩石力学, p. 104-111 および p. 145-148, 古今書院
 福井勝則 (1990): 複数の荷重条件下における岩石のクリープおよび遅れ破壊, 東京大学学位論文, p. 218-236
 福井勝則・金豊年・大久保誠介 (1995): 資源と素材, Vol. 111, p. 25-29