石炭強度の載荷速度依存性に関する研究*

大久保 誠 介¹ 福井 勝 則² 斉 慶 新³

Loading-Rate Dependency of Coal Strength

by Seisuke OKUBO^a, Katsunori FUKUI^a and Qingxin QI^a

a. Department of Geosystem Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

Uniaxial compression, uniaxial tension and indirect tension (Brazilian) tests were carried out for coal (anthracite) obtained in a coal mine located about 26 km west of Beijing.

Complete stress-strain curves not only in uniaxial compression test but also in uniaxial tension test were successfully obtained. In post-failure region of uniaxial tension test, the curve showed Class I characteristics accompanied with small amount of residual strength. The peak strength obtained by the uniaxial tension test was far less than the indirect tensile test frequently conducted.

The strain rate was alternatively increased and decreased to obtain the loading-rate dependency. When strain rate was increased, stress increased abruptly by a certain amount depending on the loading-rate dependency of the rock. The experimental results showed that loading-rate dependency of the coal both under the uniaxial compression and tension stress was relatively smaller than the most rocks that had been tested by the authors.

KEY WORDS : Coal, Uniaxial Compression Strength, Uniaxial Tension Strength, Indirect Tension Strength, Complete Stress-Strain Curve, Loading-Rate Dependency, Time-dependent Behaviour

1. は じ め に

石炭の一軸圧縮強度に関する研究は、古くから行われており (例えば Evans et al., 11961a), 特にその寸法効果に関しては注目すべき成果があがっている (Bieniawski, 1968 ; Mark and Barton, 1996)。また、引張強度に関しても、主として圧裂引張試験 (Bernbaum and Brodie, 1959) や曲げ試験 (Pomeroy et al., 1956) により、その異方性を含めて研究がなされてきた (Evans, 1961b)。しかしながら、石炭の強度に関する研究のピークが数 10 年前であったこともあり、最近の機器と手段を使用した研究結果には乏しいところがある。例えば、一軸圧縮強度の載荷速度依存性や、さらに一歩進んで時間依存性挙動については知られているところが充分とはいえない。一軸引張応力下での挙動に関しては、公表されている研究成果はほとんどなく、強度の載荷速度依存性はもちろんのこと、より基礎的な完全応力-歪曲線についてさえ定説があるとはいえない。

わが国の炭坑は諸般の事情で少数になっているが、世界規模で見ると石炭の重要性は今後増す可能性が高く、石炭の基礎的な力学特性を調べる意義は十分あると思われる。また、今後の大規模地下空間利用においては、炭層を含む地域の開発もありえると考えている。

本研究では、実用性を重んじて、比較的少ない試料を用いて、圧縮強度と引張強度の載荷依存性を調べる方法を試行することにした。既報 (大久保・西松, 1986) で述べたように、これまで調べ

た岩石に関する限り、載荷速度依存性は岩石の時間依存性や粘弾性的性質と密接なかわりを持っている重要な性質であった。今後の研究にゆだねられるところが多いが、石炭に関しても時間依存性を調べる際の第一歩として、強度の載荷速度依存性は適当と判断して本研究を実施した。

2. 実 験 試 料

2・1 試料採取地点と試料ブロック

本研究で使用したジュラ紀無煙炭は、中国北京市西方約 26 km の九龍山麓に位置する門頭溝炭坑で、2000 年 5 月 31 日と 6 月 1 日に採取した。門頭溝炭坑は北京炭鉱の支坑の一つで、1921 年に開発が始まり、最盛期であった 1970 年代の出炭量は年 120 万 t 前後であったが、2000 年 7 月末に閉山した。

試料ブロック採取場所はこの炭坑のほぼ中央であり、地表面から約 350 m、海水面から約 130 m の深さであった。周辺炭層の傾斜は約 15° で、炭丈は平均 2.2 m であった。試料ブロック採取地点の周辺は柱房法により採炭されており、炭柱からコールピックを使用して 5 個の試料ブロックを掘り出した後、手仕上げで面をできる限り滑らかにした。5 個の試料ブロックの内、本研究ではブロック #2 を使用することにし、残りのブロックは今後クリープ試験などに使用する予定である。

試料ブロックは 1 辺が 15 ~ 25 cm の直方体であり図 1 に示すように、成層面のほかに、成層面とほぼ直交する主炭理 (Major Cleat) と、斜めに傾斜した従炭理 (Butt Cleat) が観察できた。主炭理は間隔 2 ~ 10 mm であるのに対して、従炭理の間隔は 3 ~ 30 mm とやや広がった。

2・2 実験計画と試験片の作成

試料ブロックを観察したところ、強度に異方性がある可能性が高いと判断した。そこで、図 1 に示すように成層面と垂直に Z 軸を、主炭理と垂直に X 軸をとり、X、Y、Z 軸方向からボーリング

* 2001 年 9 月 10 日受付 10 月 31 日受理

1. 普通会員 工博 東京大学教授 工学系研究科地球システム工学専攻
2. 普通会員 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
3. PhD 東京大学研究生 工学系研究科地球システム工学専攻 (現 煤炭科学研究所 研究員北京開採研究所)

[著者連絡先] FAX 03-5841-7035 (東大・地球システム)
E-mail : ttokubo@geosys.t.u-tokyo.ac.jp

キーワード : 石炭, 一軸圧縮強度, 一軸引張強度, 圧裂引張強度, 完全応力-歪曲線, 載荷速度依存性, 時間依存性挙動

図1 石炭ブロック #2 の概要。成層面 (Z 軸と垂直), 主炭理 (X 軸と垂直), 従炭理を示す。

図2 荷重速度依存性を調べるための強度試験の概念図。ここに示すように、歪速度を2段階に繰り返し変えて試験を行った。

したコアより試験片を作成することにした。理想的には、従炭理と垂直方向にボーリングしたコアも必要であるが、試料ブロックの大きさが充分でないと判断して見送ることにした。

炭理の間隔から判断して、できる限り大きな試験片を用いた強度試験の方が望ましいことは明らかであるが、これも試料ブロックの大きさから制限を受け、検討の後、直径 25 mm の試験片を使用することにした。このように比較的小さな試験片を使用することにしても、一つのブロックから抜いたある方向 (例えば X 方向) のコアから作成できる試験片は、長さ 50 mm の一軸圧縮試験片と一軸引張試験片用が各 5 本程度と、長さ 25 mm の圧裂引張試験片用が 10 ~ 20 個程度でしかない。したがって、これまで三城目安山岩などを対象として行ってきたように (大久保他, 1992b), 荷重速度を 4 段階程度に変え、各荷重速度で 5 本程度の試験を行うことはできないことがわかった。そこで、後で述べるように、一軸圧縮試験と一軸引張試験では、1 本の試験片を使用した試験中に荷重速度を増減し、その結果として生じる応力の増減から荷重速度依存性を求めることにした。すなわち、荷重速度の増減に伴う応力の増減が大きいほど、荷重速度依存性が大きいことを利用した試験方法を試みることにした。

なお、試験はすべて気乾状態で行われ、試験室の温度は $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度は $60 \pm 15\%$ であった。

3. 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験は容量 1,500 kN の MTS 社製サーボ試験機を用い、歪速度を制御して行った。図 2 に模式的に描くように、試験途中で歪が 0.15×10^{-3} だけ増加するごとに、歪速度を $10^{-5}/\text{s}$ と $10^{-6}/\text{s}$ とで交互に変化させ、それぞれの歪速度で描く応力-歪曲線をなめらかに繋いだ。こうして求めた 2 本の曲線を、近似的にそれ

(a) X 方向試験片 (主炭理と垂直に荷重)

(b) Y 方向試験片

(c) Z 方向試験片 (成層面と垂直に荷重)

図3 一軸圧縮試験における応力-歪曲線

ぞれの歪速度で得られた応力-歪曲線とみなしてデータ整理を行った (大久保他, 2002)。なお、この試験方法は、Okubo et al.(1990) が 10 年ほど前に提案した方法を改良したものである。Okubo et al.(1990) が提案した方法では、強度破壊点の直前に歪速度を増加し、そのときの応力の増加から荷重速度依存性を推定するが、この方法の実施に当たっては、歪速度を増加するタイミングの選定に工夫を要するなど、実験者がかなり試験方法に習熟している必要があった。一方、本研究で採用した試験方法では、歪速度の増減を機械的に行うだけでよく、実験技術の難易度は大幅に低下する。

図 3(a) にブロック #2 から切り出した X 方向の試験片を用いたときの応力-歪曲線を示す。これからわかるように、強度破壊点を過ぎると急激に破壊し、定歪速度試験では制御できない部分があることがわかる。このような挙動を、Wawersik and Fairhurst (1970) はクラス II 特性と名付けた。急激な破壊で完全に耐荷能力がなくなったのが 2 例に対し、ピーク強度の 5 ~ 10 % 程度の残留応力が観察されたのが 2 例であった。なお、強度のもっとも低い試験片の端面近くに何本かの従炭理が含まれており、破壊はこの部分で生じた。他方、強度がもっとも高い試験片では、主炭理から破壊が生じたように見受けられた。

図 3(b) に Y 方向の試験片を用いたときの応力-歪曲線を示す。もっとも強度の高い試験片の破壊様式は主炭理に沿った縦割であり、強度が 2 番目に高い試験片のそれは縦割とせん断破壊とが入り混じったものであった。また、強度の弱い 2 試験片の破壊様式はせん断破壊であった。総じて X 方向の試験片と比べると強度が低いことがわかる。クラス II 特性を示すことは同じであるが、残留強度は全試験片で観察できた。また、試験片ごとの応力-歪曲線の差異は、比較的小さいとの印象を受けた。

図 3(c) に Z 方向の試験片を用いたときの応力-歪曲線を示す。強度の高い 3 試験片の破壊様式はいずれも主炭理に沿った縦割であるのに対し、強度の低い 2 試験片はせん断破壊と例外的な部分破壊であった。総じて X 方向の試験片と比べると強度が低く、Y 方向の試験片と同程度であることがわかる。いずれも、クラス II 特性を示すことは他の方向と同じである。Y 方向と同様に、わずかなではあるが残留強度が観察できた。

試験片の破壊様式には、大きく分けて縦割とせん断破壊とがみられた。しかしながら、破断面の分岐や交差が頻繁にみられるとともに、破断面の凹凸も激しかった。なお、X、Y、Z の各方向について特徴的なことは、試験片の数が少なかったので見出せなかった。この点の解明は今後の課題としたい。

表 1(a) に一軸圧縮試験の結果をまとめておいた。これからわかるように、X 方向の試験片強度のみがかなり大きく、Y と Z 方向の試験片の強度は比較的小さかった。図 1 を参照しつつ考えると、おそらく主炭理の引張強度が、成層面や従炭理より小さい可能性が高いと判断した。

表 1 試験結果のまとめ
(a) 一軸圧縮試験のまとめ

ボーリング方向	試験片個数	一軸圧縮強度 (MPa)	50%接線ヤング率 (GPa)	n
X 方向	4	50	11	140
Y 方向	4	25	7.0	150
Z 方向	5	22	6.1	120

(b) 一軸引張試験のまとめ

ボーリング方向	試験片個数	一軸引張強度 (MPa)	50%接線ヤング率 (GPa)	n
X 方向	4	0.42	1.7	100
Y 方向	5	1.04	3.0	140
Z 方向	6	0.57	2.1	100

(c) 圧裂引張試験のまとめ

ボーリング方向 (載荷方向)	引張応力の方向	試験片個数	圧裂引張強度 (MPa)
Y (Z)	X	6	2.1
Z (Y)	X	10	1.9
X (Z)	Y	8	3.7
Z (X)	Y	5	2.8
Y (Z)	Z	8	3.2
Z (Y)	Z	5	3.0

図 3 からわかるように Y と Z 方向の試験片強度のばらつきと比較して、X 方向のそれは大きかった。試験片の個数が少ないので、詳しいことはわからないが、考えられる原因の一つを参考までに記しておく。主炭理の間隔は比較的狭いので、個々の試験片に含まれる可能性が高く、主炭理の影響を大きく受ける Y と Z 方向試験片強度のばらつきは比較的小さい。他方、従炭理の間隔は広いので、個々の試験片に含まれたり含まれなかったりするので、従炭理の影響を強く受ける X 方向試験片の強度が大きくばらついた可能性がある。もしこの説明のように、個々の試験片に弱い面 (欠陥) が含まれるか否か、あるいはどのように含まれるかが試験結果のばらつきの主因であるとしたら、より大きな試験片を用いることが、もっとも有効な解決方法といえる。このことは、後で述べる一軸引張試験や圧裂引張試験における試験結果のばらつきに対してもいえる。

試験途中で歪速度を変えたが、図 3 ではよくわからないので、強度破壊点付近を拡大した例を図 4 に示す (Y 方向、試験片番号 7)。これからわかるように、歪速度を上げると応力は上昇し、下げると応力は下がる。各歪速度での結果をなめらかに繋いだ曲線を図中に示した。それぞれの曲線から得られるピーク強度より、次式を用いて (大久保, 1992a), 載荷速度依存性を示すパラメータ n を求め表 1 に示した。

$$\sigma_F / \sigma_S = (\varepsilon_F / \varepsilon_S)^{1/(n+1)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、添字 F と S はそれぞれ速い歪速度と遅い歪速度を表し、 σ_F と σ_S は、それぞれ速い歪速度 ε_F と遅い歪速度 ε_S でのピーク強度である。計算した結果を表 1 に示すが、 n の平均値は 120 ~ 150 であることがわかる。表 2 には、これまでに求めた岩石の n を参考までに示したが、これらと比べると今回使用した石炭の n は大きく、したがって載荷速度依存性は小さいといえる。

図 4 強度破壊点付近の応力-歪曲線。一軸圧縮試験で、Y 方向、試験片番号 7

表 2 種々の岩石の n 値

著者 (発表年)	岩石	試験の種類	n
秋他 (1995)	三城目安山岩	一軸引張試験	38
々	々	圧裂引張試験	39
大久保・新 (1984)	々	破壊靱性値	37
々	々	曲げ強度	34
西松・山口 (1980)	々	一軸引張クリープ	37
Okubo et al. (1990)	々	一軸圧縮試験	35
何他 (1989)	稲田花崗岩	々	42
々	河津凝灰岩	々	66
大久保他 (1992b)	大谷凝灰岩	々	35
大久保・福井 (1997)	田下凝灰岩	々	42
大久保他 (1987)	秋吉大理石	々	64
大久保他 (1987)	和泉砂岩	々	61

*すべて気乾状態での値

4. 一軸引張試験

一軸引張試験は容量 10 kN のサーボ試験機を用い、歪速度を制御して行った(福井他, 1995)。一軸圧縮試験の場合と同様に、試験途中で、歪速度を $10^{-6}/\text{s}$ (70 s の間)と、 $10^{-7}/\text{s}$ (300 s の間)とで交互に変化させた。

図 5(a) にブロック 2 から切り出した X 方向の試験片を用いたときの応力-歪曲線を示す。これからわかるように、強度破壊点を過ぎても急激に破壊することなく(クラス I 特性)、定歪速度試験で制御可能であることがわかる(Wawersik and Fairhurst, 1970)。また、ピーク強度と比較してかなり大きな残留応力が観察された。破断面は载荷軸と直交する場合が多く、この場合には主炭理に

(a) X 方向試験片(主炭理と垂直に载荷)

(b) Y 方向試験片

(c) Z 方向試験片(成層面と垂直に载荷)

図 5 一軸引張試験における応力-歪曲線

そって破壊したものと思われた。少数ではあるが、载荷軸と斜交する破断面が観察された。この場合には炭理の寄与が大きかったと思われる。図 5(b) に Y 方向の試験片を用いたときの応力-歪曲線を示す。X 方向の試験片と比べると強度がかなり高いことがわかる。クラス I 特性を示すことは同じであり、さらにピーク強度と比較してかなり大きな残留強度が全試験片で観察できた。Y 方向試験片の破断面には、激しい凹凸がみられた。おそらく炭理がもっとも大きく影響していると思われるが、同時に成層面と主炭理もある程度の影響を及ぼすので複雑な形状の破断面が形成されたものと思われる。図 5(c) に Z 方向の試験片を用いたときの応力-歪曲線を示す。X 方向の試験片と比べると強度が若干高いが、Y 方向の試験片よりは小さいことがわかる。いずれの応力-歪曲線も、クラス I 特性を示すことは他の方向と同じである。Z 方向試験片の破断面については、X 方向試験片の場合と似た傾向がみられた。

表 1(b) に一軸引張試験の結果をまとめておいた。これからわかるように、Y 方向の試験片強度がもっとも大きく、ついで Z 方向であり、X 方向の試験片の強度はもっとも小さかった。この結果は、一軸圧縮試験の強度の異方性から類推した、主炭理の引張強度がもっとも小さいという予測と一致する。

試験途中で歪速度を変えたが、図 5 ではよくわからないので、強度破壊点付近を拡大した例を図 6 に示す(Y 方向、試験片番号 9)。これからわかるように、歪速度を上げると応力は上昇し、下げると応力は下がる。各歪速度での結果をなめらかに繋いだ曲線を図中に示した。それぞれの曲線から得られるピーク強度より、式(1)を用いて、载荷速度依存性を示すパラメータ n を求め表 1(b) に示した。これからわかるように、かなりのばらつきをみせるが、一軸圧縮強度の場合とほぼ同じで、100~140 であることがわかる。

5. 圧裂引張試験

圧裂引張試験には、容量 10 kN の万能試験機を使用した。試験中のプラテンの移動速度は約 0.014 mm/s であった。圧裂引張試験は、2 方向から载荷した。例えば X 方向試験片(X 方向にボーリングした試験片)では、Y 方向と Z 方向に载荷した。これらを以下では X(Y), X(Z) のように表すことにする。表 1(c) に圧裂試験結果をまとめて示す。これからわかるように、Y 方向の強度を示す X(Z) および Z(X) 方向試験片より求めた圧裂引張強度がもっとも大きく、ついで Z 方向であり、X 方向の引張強度を示す Y(Z) および Z(Y) 方向試験片の結果がもっとも小さかった。

X 方向の引張強度を示す Y(Z) および Z(Y) 方向試験片の場合、破断面はプラテンとの接触点を結ぶように形成されることが多

図 6 強度破壊点付近の応力-歪曲線。一軸引張試験で、Y 方向、試験片番号 9

かった。これに比べ、他の場合には、複雑な破断面が形成されることが多く、載荷点付近での圧壊、交差・分岐した破断面、複数の破断面などがみられた。

圧裂引張試験の結果は、強度の高い順に Y, Z, X 方向と並ぶ点では一軸引張強度と同じであったが、その値を比べてみると、一軸引張強度の 2 ～ 3 倍であった。この点については今後の検討が必要であろう。

6. 考 察

6・1 強度試験と完全応力-歪曲線

Pomeroy et al.(1956) は、適当な引張強度の測定方法が確立されていないと述べた後で、主として石炭を対象として開発された曲げ試験機を紹介し、この試験機を使用して石炭の引張強度とその寸法効果などを検討した結果を述べている。その後、Evans(1961) は、曲げ試験は実施が困難であるうえ、かなり大き目の強度となる可能性があることを指摘した後、圧裂試験を実施して強度の方向性を検討し、満足できる結果が得られたとしている。また、Berenbaum and Brodie(1959) も圧裂試験を実施した結果、妥当なデータが得られたとしている。わが国でも、会田・岡本(1962) は、石炭を対象とした幅広い研究を行った。強度の方向性を調べた研究では、一軸圧縮強度は方向により ±10% 程度変化するのみだが、圧裂引張強度は ±50% 変化する場合もあるとの実験結果を示している。

このように石炭の強度に関する研究のピークは数 10 年前にあり、今一度見直す時期にきているのではないかと考えて今回の試験を実施した。従来から広く行われてきた一軸圧縮試験と圧裂引張試験に加えて、著者らが開発した一軸引張試験方法(福井他, 1995)を石炭に適用したところ、ほぼ満足できる結果が得られた。石炭に対し、一軸引張応力下の完全応力-歪曲線を得たことは、本研究の成果の一つと考えている。得られた完全応力-歪曲線の形状はかなりばらついたが、これは個々の試験片に含まれる成層面、炭理の影響を強く受けたためと考えている。また、興味深いことに、強度破壊点以降においても応力が急激に低下するわけではなく、徐々に低下していくことがわかった。さらに、歪で 2×10^{-3} になると応力-歪曲線の傾きは緩やかになり、応力があまり低下しなくなる。この部分を残留強度と呼ぶことは可能であろう。残念ながら、強度破壊点以降の破壊機構については、今回の研究で明らかにすることはできなかったが、今後の検討課題としては重要なものの一つと考えている。

今回の研究結果では、圧裂引張強度に比べて、一軸引張強度が 2 ～ 3 倍となった。同様に圧裂引張強度の方が相当に大きいとの結果は、著者らが最近行った土丹を用いた実験でも得られた(大久保, 2002)。圧裂引張試験では、①試験片と載荷板との接触面がへこんで平らになること、②引張応力の大きい部分が、試験片の中心部分に限られ、成層面や炭理の影響を受け難くなることなどが原因として考えられる。硬岩の圧裂引張試験と一軸引張試験における強度の違いについては、かなり議論されてきたと思うが(平松他, 1969; Wijk, 1978)、石炭に関する従来の検討は不十分であり、今後さらに検討を進める必要があると考える。

Heerden(1975) は、縦横比を 1/1.14 から 1/3.39 まで変えて 10 回の原位置試験を行った。そのうち、縦横比 1/1.28 と 1/3.28 の完全応力-歪曲線が論文に掲載されている。両者ともクラス I 特性を示すが、縦横比の小さい後者がより延性的となっている。本研究では、縦横比 2 の試験片の一軸圧縮応力下における完全応力-歪曲線を求めた。その結果をみると、強度破壊点以降、急激に応力が低下しクラス II 特性を示す場合が多かった。原因として、石

炭自体、石炭試料の寸法、湿度や温度、載荷条件の相違なども考えられるが、本研究では縦横比が大きい縦長の試験片を使用したことが、おそらく主因であろうと考えている。破壊後の試験片を観察すると、成層面や炭理に沿って破面が形成されることが多かった。縦長の試験片では、これらの弱い面の一部がすべりはじめると、巨視的なすべり面(破面)が容易に形成され、一気に応力が低下するのでクラス II 特性を示すものと思われた。

6・2 時間依存性と載荷速度依存性

石炭でも時間依存性挙動がみられることは古くから知られている。例えば、Morgans and Terry(1958) は、瀝青炭のクリープ試験を行った。試験開始後 80 min までのクリープ歪の結果を Burgers モデルにあてはめると、2 次クリープを代表する粘性係数は 10^{16} poises 程度であったと述べている。

Kaizer and Morgenstern (1981, 1982) は、円形坑道の変形について、特にその時間依存性に注目した一連の研究を行った。研究の対象は比較的軟弱でジョイントを含む一般の岩石であるが、実際に実験で使用したのはカナダのアルベルタ州で採取した石炭ブロックである。この石炭(sub-bituminous coal)の 1 次クリープは次式で近似できるとしている。

$$de/dt = A \exp(\alpha \sigma') t^{-m} \quad (2)$$

σ' は応力レベル、 $A = 1.0 \times 10^5 / \text{min}$ 、 $\alpha = 1.9$ 、 $m = 0.9$ である。石炭ブロックは露天掘りのサイトで採取された後、61 cm × 61 cm × 20.3 cm に整形された。石炭ブロックに設けられた坑道モデルの直径は 12.5 cm であり、この坑道壁面の変形は LVDT など で測定された。石炭ブロック側面に加える荷重を一定に保ったとき、坑道は時間の経過に伴って次第に変形していくが、変形速度は次第に低下していくと述べている。さらに、Kaizer et al.(1985) は、坑道周辺の破壊に注目し、石炭ブロックに掘削した 152 mm のモデル坑道のコンバージェンスや岩盤内変位を測定し、破壊領域が時間に伴って広がっていくとした。

比較的最近になって Cristescu(1987) は、石炭も含めた岩石の構成方程式について検討したが、石炭に関しては定量的な結論を得るまでにはいたっていない。

炭坑におけるさまざまな時間依存性挙動のほかに、長期間の使用を前提として今後建設される放射性廃棄物処分場予定地等に挟炭層が存在する可能性があることから、石炭の時間依存性を引き続いて検討していく予定である。先に述べたとおり、時間依存性を調べる方法にはクリープ試験、応力緩和試験など各種あるが、これまでにを行った岩石を使用した実験結果を吟味・検討したところ、比較的短時間で試験の終了する載荷速度依存性が最初の一步としては妥当との結果を得たので、載荷速度依存性の検討を主たる目的とした本研究を実施した。その際、最近開発した歪速度を試験中に増減する方法を試用し、この方法が石炭に対しても適用可能であることを示したつもりである。ただし、石炭に対する経験が浅いため、歪速度の選び方やある歪速度をどの位の時間持続すればよいかについては今後改良の余地があると思う。

実験結果を整理してみると、式(1)の n は、一軸圧縮と一軸引張応力下で大きな差がみられず 100 ～ 150 の範囲であった。 n が小さいほど載荷速度依存性は顕著で、時間依存性も大きいといえる。ちなみに、一つの極限として $n=1$ があるがこれは、せん断速度が小さいときに水が示すニュートン粘性となる。他方、銅やニッケルなどの面心立方金属では、降伏点の載荷速度依存性は小さく、 n が 100 以上になることが知られている(武内, 1974)。すでに述べたように、これまで著者らが実験を行った岩石の n は 34 ～ 66 であったが、これらの岩石と比較して石炭の載荷速度依存性や時間依存性は小さいといえる。また、圧縮と引張応力下での n が同

程度であったことは、両応力下における破壊機構に共通な部分のあることを示唆している可能性がある。

比較的最近、Khair (1966) は縦横比 1 の試験片 (Waynesburk coal seam) を使用して、載荷速度 $0.000007 \sim 0.69 \text{ MPa/s}$ の間の一軸圧縮試験を行った。得られた結果をみると、試験片ごとの強度のばらつきが変動係数でいって 30% 程度と大きく、載荷速度による強度の変化を論ずることはできそうもない。他に直接比べるべき従来のデータは見出せなかった。

参考までに、間接的にはあるが関連のある研究結果を挙げておこう。Morgans and Terry (1958) は、無煙炭と瀝青炭の静的ヤング率と動的ヤング率を求めている。その結果によれば、無煙炭の動的ヤング率は $4.59 \sim 5.42 \text{ MPa}$ であるのに対して、静的ヤング率は $4.43 \sim 4.61 \text{ MPa}$ である。また、瀝青炭では動的ヤング率が $3.27 \sim 4.08 \text{ MPa}$ で、静的ヤング率は $3.77 \sim 4.13 \text{ MPa}$ である。この結果をみる限りでは、時間依存性や載荷速度依存性と関連のある動的ヤング率と静的ヤング率との差は、他の岩石と比較して小さいといえよう。同様に、Heerden (1985) も、動的ヤング率と静的ヤング率とがほぼ一致したと述べている。

会田・岡本 (1962) は、ピック形パイロによる切削試験を行った。切削速度を変えたときの切削抵抗 (主分力) の変化はデータのばらつきの範囲内で明瞭な傾向はみられない。Potts and Shuttleworth (1957) は、石炭の切削試験を行い、切削速度の増加に伴って切削抵抗が増加するがその程度はわずかであるとしている。

以上に挙げた 4 例の研究も、間接的にはあるが、石炭の時間依存性挙動と結びついたものであり、いずれも今回の実験結果と同様に、石炭の時間依存性や載荷速度依存性はそれほど大きくないことを示していると思われる。その原因について断定的なことを述べる用意はないが、今回使用した石炭では、塑性領域の拡大や亀裂の進展が時間経過に伴って徐々に生じるというよりは、弱い面での摩擦力が耐えうる限度に達すると、一気に破壊が生じるように思われた。ただし、泥炭のように強度が低い石炭では、載荷速度依存性が比較的大きい可能性もあるが、この点の解明は今後の研究を待つ必要がある。

7. ま と め

本実験の結果をまとめると次のようになる。

(1) 石炭の一軸引張試験を実施してその完全応力-歪曲線を求めることができた。一軸引張試験で得られた完全応力-歪曲線は、かなり延性的でクラス I 特性を示すとともに、興味深いことにある程度の残留強度が存在することがわかった。

(2) 一軸引張強度と従来もっとも普通に用いられてきた圧裂引張強度とを比較したところ、圧裂引張強度は一軸引張強度の 2 ～ 3 倍となることがわかった。この点は、今後検討する必要があるだろう。

(3) 少数の試験片で載荷速度依存性を調べるため、試験途中で歪速度を増減させ、それに伴う応力の増減を観察する方法を採用した。新しい試験方法が石炭に適用可能であることを示したことは本研究の成果の一つである。この試験方法はまだ開発して日が浅く、ある程度の誤差の生ずる可能性を否定できないが、石炭のように、各試験片の強度のばらつきが大きい試料では、今のとこ

ろ他に変わるべき試験方法を思いつかない。

(4) その結果、一軸圧縮応力下でも一軸引張応力下でも、石炭の載荷速度依存性は比較的小さいことがわかった。なお、一軸引張応力下での石炭の載荷速度依存性を実験的に求めたのは本研究が最初と思う。

今回は比較的短時間で、かつ定まった時間で実験を終えることのできる載荷速度依存性について調べた。この載荷速度依存性についてさらに検討を進めるとともに、クリープ試験や応力緩和試験も追加して、時間依存性について総合的な判断を下せるようなデータを揃えることが今後必要であろう。また、今回の試験では石炭ブロックの寸法が充分でないことから、直径 25 mm という、比較的小さな試験片を使用して行った。そのため、個々の試験片に弱い面が含まれたり含まれなかったりして、試験結果が大きくばらついた可能性がある。実施はなかなか困難であるが、より大きな寸法の試験片を使用した追試験が今後望まれる。

今回の実験結果より、一軸引張応力下と一軸圧縮応力下での完全応力-歪曲線が得られたので、例えば著者らが提案したコンプライアンス可変型構成方程式の各定数を求めることが可能であり (大久保・福井, 1997), さらにそれを利用して有限要素法を用いた各種シミュレーションを実施することができる (大久保他, 1998)。これらについては、実験を追加して定数の値の確度を深めつつ今後実施していく予定である。

引用文献

- 会田俊夫・岡本 隆 (1962): 採炭機械, p. 11-12, p. 43-44, 技術書院 (東京)
- Bieniawski, Z. T. (1968): Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 5, p. 325-335
- Berenbaum, R. and Brodie, I. (1959): J. Inst. Fuel, Vol. 32, p. 320-327
- Cristescu (1987): Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 24, No. 5, p. 271-282
- Evans, I., Pomeroy, C. D. and Berenbaum, R. (1961a): Colliery Engineering, p. 75-80, p. 123-127, p. 172-178
- Evans, I. (1961b): Colliery Engineering, p. 428-434
- 福井勝則・金 豊年・大久保誠介 (1995): 資源と素材, Vol. 111, p. 25-30
- Heerden, van (1975): J. South African Institute of Mining and Metallurgy, p. 207-217
- Heerden, van (1985): Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 22, p. 339-343
- 何昌栄・大久保誠介・西松裕一 (1989): 材料, Vol. 38, p. 216-220
- 平松良雄・岡 行俊・木山英郎 (1969): 日本鉱業会誌, Vol. 85, p. 8-14
- Kaizer, P. K. and Morgenstern, N. R. (1981): Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 18, p. 129-152
- Kaizer, P. K. and Morgenstern, N. R. (1982): Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 19, p. 307-324
- Kaizer, P. K., Guenot, A. and Morgenstern, N. R. (1985): Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 22, p. 141-152
- Khair, A. W. (1996): Rock Mech., Aubertin, Hassani & Mitri(eds), p. 431-441, Balkema (Rotterdam)
- Mark, C. and Barton, T. M. (1996): Rock Mech., Aubertin, Hassani & Mitri(eds), p. 405-412, Balkema (Rotterdam)
- Morgans, W. T. A. and Terry, N. B. (1958): J. Inst. Fuel, Vol. 31, p. 201-219
- 西松裕一・山口 勉 (1980): 材料, Vol. 29, p. 192-197
- 大久保誠介・新 孝一・西松裕一 (1984): 材料, Vol. 33, p. 882-887
- 大久保誠介・西松裕一 (1986): 日本鉱業会誌, Vol. 102, p. 395-400
- 大久保誠介・何昌栄・西松裕一 (1987): 日本鉱業会誌, Vol. 103, p. 177-181
- Okubo, S., Nishimatsu, Y. and He, C. (1990): Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 27, p. 559-562
- 大久保誠介 (1992a): 資源と素材, Vol. 108, p. 601-606
- 大久保誠介・西松裕一・何昌栄・秋哲淵 (1992b): 材料, Vol. 41, p. 403-409
- 大久保誠介・福井勝則 (1997): 資源と素材, Vol. 113, p. 561-564
- 大久保誠介・福井勝則・張建東 (1998): 資源と素材, Vol. 114, p. 79-85
- 大久保誠介・福井勝則・木村有仁 (2002): トンネルと地下, Vol. 32, No. 1 (掲載予定)
- Pomeroy, C. D. and Morgans, W. T. A. (1956): British J. Applied Physics, p. 243-246
- Potts and Shuttleworth (1957): Colli. Guard., Vol. 195, p. 341
- 秋哲淵・大久保誠介・福井勝則 (1995): 資源と素材, Vol. 111, p. 231-237
- 武内朋之 (1974): 固体の流動 (上田誠也編), p. 283-300, 東海大学出版会 (東京)
- Wawersik, W. R. and Fairhurst, C. (1970): Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 7, p. 561-575
- Wijk, G. (1978): Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 15, p. 149-160