



Title	石炭と炭層の破壊挙動
Author(s)	木下, 重教; Kinoshita, Shigenori; 石島, 洋二 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 116, 15-25
Issue Date	1983-10-31
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/41809">https://hdl.handle.net/2115/41809</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	116_15-26.pdf



## 石炭と炭層の破壊挙動

木下重教 石島洋二 福田和寛  
(昭和 58 年 6 月 30 日受理)

### Post-failure Behaviors of Coal and Coal Seams

Shigenori KINOSHITA, Yoji ISHIJIMA and Kazuhiro FUKUDA  
(Received June 30, 1983)

#### Abstract

The post-failure behavior under the triaxial loading condition is examined for the two different types of coal. It is observed that, even in a heavily fractured coal sample, there still exists some substantial strength in proportion to the confining pressure and the stick-slip fracturing of brittle mode can occur. Slight differences on the post-failure behaviors are found between the two types of coal, which could be mainly attributed to the difference of the density of the pre-existing fissures.

From the several case studies on the stress change in failed coal seam in the deep coal mines, evidences are obtained to demonstrate that the similar fracturing phenomena with the ones observed in the laboratory are also generated in the field. This result should indicate the frequent fracturings around the deep mining excavations to be interpreted in terms of the post-failure behaviors of the coal seam.

#### 1. 緒 言

炭層内で発生する力学的諸現象を解明するためには、炭層を形成する石炭の力学的性質を把握する必要がある。特に、地表下 1000 m にも達する深部化した炭層の場合、採掘活動によって、切羽周縁部に必ず破壊が誘起されるので、石炭の破壊機構と破壊以降の変形挙動に関する知識が重要となる。

そこで、本研究では、2 炭鉱で採取した性質の異なる石炭を用いて、サーボ制御試験機による石炭の一軸、三軸圧縮試験を行い、破壊後の挙動に重点を置いた調査を実施した。一方、深部化した炭層内で地圧挙動の計測を行い、両者がどの程度対応するものか検討を加えた。

#### 2. 供試石炭について

対象供試石炭としては、幾春別層中の 4 番層炭 (幌内炭鉱において地表下 980 m の切羽で採取) と夕張層中の本層炭 (南大夕張炭鉱において地表下 860 m の切羽で採取) の 2 種を用いた。以後、それぞれ幌内炭、南夕炭と略称する。

幌内炭は、輝炭、暗炭、炭質頁岩から成り、層に垂直方向の不均一性が見られるが、暗炭部が

---

資源開発工学科 岩石力学講座

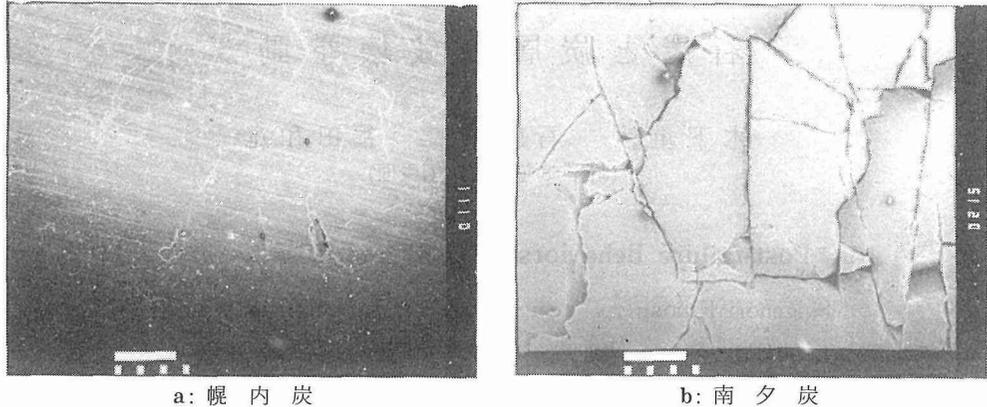


Fig. 1 石炭表面の電子顕微鏡写真

多く、試験にはこれを用いた。成分的には、南夕炭に比べ灰分が多く、固定炭素が少ないため、一般炭に分類されている。炭塊には、層理に沿ったき裂と層理に垂直で互いに直交する2系のき裂が散在する以外には、き裂の発達はあまり認められない(図1-a参照)。

南夕炭は、発熱量が高く灰分が少ないので、我国で最高品位に属する原料炭として使用されている。炭層は大部分が輝炭から成り、破碎、粉化しやすい。炭塊には、ブロックを形成する大きなき裂と、数mm間隔のき裂が密に発達している。特に、層に垂直で互いに直交するき裂群の発達が卓越しており、このため、炭塊はゆるんだ状態になっている。図1は、石炭表面の電子顕微鏡写真を示したものである。幌内炭(図1-a)に比べ、南夕炭(図1-b)の場合、き裂密度がきわだっていることがわかる。

### 3. 供試体の作製方法と試験方法

試験片の製作に当たっては、1辺が40~60cmの炭塊から切り出した角柱をキャスト<sup>1)</sup>により固定し、湿式ボーリングで円柱コアを抜いた後、両端を切断し、さらに端面間の平行度を1/50mm以内に仕上げて供試体とした。

円柱形供試体はすべて、軸が層理に対し垂直方向となるように統一した。寸法は、直径60mm、長さ60mmを標準としたが、一部、直径30mm、長さ60mmのものも用いた。

軸方向の载荷はサーボ制御試験機を用い、軸ひずみ速度を $1 \times 10^{-5}/\text{sec}$ に設定した。この試験方法により、供試体が最大強度点に達した後の、いわゆる破壊後の挙動も捉えることが可能となり、最終状態に至るまでの応力-ひずみ関係(完全応力-ひずみ曲線)が得られた。三軸圧縮試験における側圧(すなわち封圧)の制御は、通常の封圧装置<sup>2)</sup>によって行った。

## 4. 一軸、三軸圧縮試験結果とその考察

### 4.1 幌内炭

(1) 差応力-軸ひずみ関係 幌内炭の一軸圧縮試験は47供試体について実施した。応力-ひずみ線図の数例を図2に示す。応力が最大値をとる前の応力とひずみの間には直線関係が成立し、石炭が弾性的挙動をすることを示している。最大強度点(応力が最大値をとる点)に達すると、破壊音を伴う応力低下が起る。引続き载荷を継続すると、応力は階段状に低下し、破壊が進行する。そして、最終的には強度を完全に失う。階段状の応力低下の際には、破壊音の発生と、供試

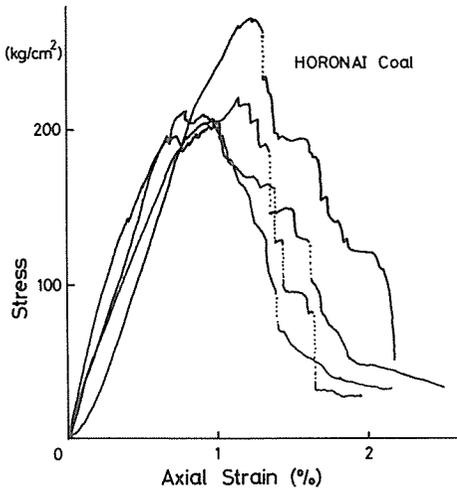


Fig. 2 応力-ひずみ線図（幌内炭一軸圧縮試験）

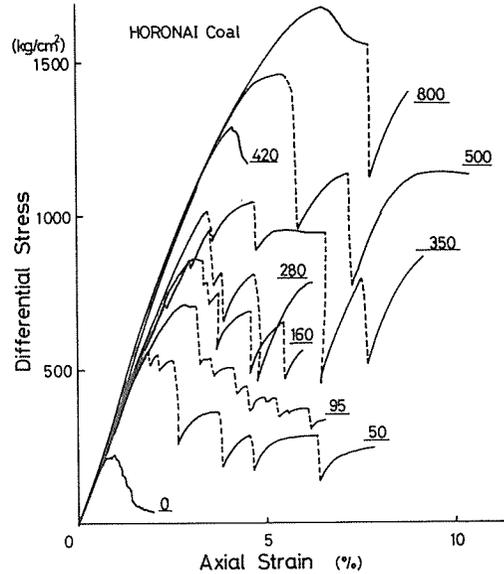


Fig. 3 差応力-軸ひずみ線図（幌内炭）

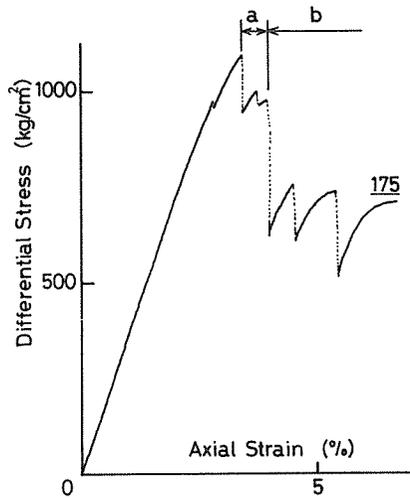


Fig. 4 幌内炭の典型的な差応力-軸ひずみ曲線

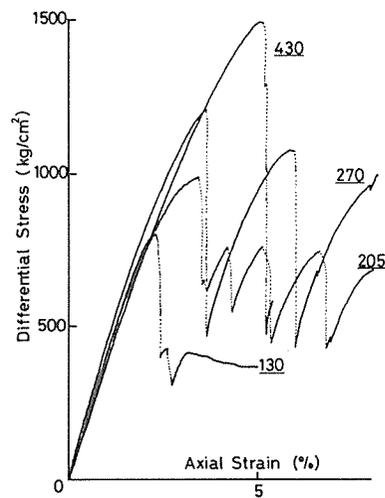


Fig. 5 差応力-軸ひずみ線図（幌内炭 直径 30 mm 供試体）

体側面より細片がはく離、飛散する現象が見られる。図中の点線は、応力低下が急激であったため、試験機で制御できなかったことを意味する。このようなぜい性的な破壊進行の形態は、幌内炭に特徴的であり、南夕炭では見られなかった。

三軸圧縮試験は、封圧を  $30\sim 800\text{ kg/cm}^2$  の範囲に設定し、53供試体について実施した。得られた差応力（軸応力と封圧との差）一軸ひずみ線図の例を図3に示す。一軸圧縮の場合と同様、最大強度点以降は、破壊音を伴う数回の急激な応力低下が起っているが、異なる点は、応力低下の後多少の回復が見られることである。最大強度点以降、ひずみが増大するにつれ、応力は漸次減少し、やがて一定値すなわち最終強度に収束する傾向を示す。これをより詳細に観察するならば、図4に示すように、*a*、*b* 2種の領域の存在が認められる。

*a* 領域では、それぞれの応力ピーク値が変形の進行につれ減少しており、一軸荷荷の場合と同

様に、逐次破壊が進展しているものと考えられる。これに対し、**b** 領域では応力のピーク値がほぼ一定であるが、これは供試体内部の逐次破壊が完了し、全体が残留強度状態に達したためと解釈される。

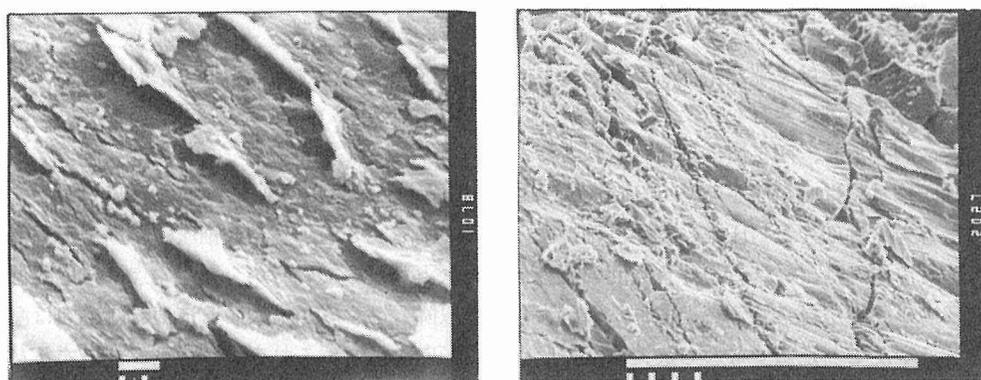
注目すべきことに、供試体の直径が 60 mm の場合には例外なく **a** 領域が現われているのに、直径 30 mm の供試体の場合には、図 5 に示すように、**a** 領域がほとんど認められない。これは、幌内炭の場合、直径 30 mm 程度の寸法では 1 度のぜい性破壊によって供試体全体が残留強度状態に達するのに対し、直径 60 mm の供試体では、全体に破壊が進展するまでに数度の局部的なぜい性破壊が発生するためであると考えられる。佐藤<sup>3)</sup>は、強度差のあるぜい性材料要素が複数個並列に配置した模型について、破壊過程の応力-ひずみ線図を示したが、直径 60 mm の供試体の **a** 領域における線図はこれに酷似している。

**a** 領域における応力低下の回数は、封圧増加に伴い減少し、逆に 1 回当たりの低下量は増大する傾向が見られる (図 3 参照)。これらの現象は、封圧の増加につれ供試体内部のき裂の一部が閉鎖するため、見掛上の並列要素数が減少する一方で、1 要素の挙動が供試体全体の挙動に及ぼす寄与率が増すことによるものと解釈できよう。このように、幌内炭の場合、最大強度点の直後、すなわち、**a** 領域における挙動は、ぜい性材料の並列要素モデルによって説明することが可能である。

次に、図 4 の **b** 領域においては、応力の急激な低下とその回復のくり返し現象が特徴的であるが、これは *stick-slip* と呼ばれるものに似ている。*stick-slip* の発生機構は、次のように説明されている<sup>4)</sup>。

ぜい性材料がせん断破壊をした場合、そのせん断面に作用する直応力が十分大きいときには、破面上下の相対的な滑り運動は拘束されるが、もし、何らかの原因で破面の凹凸のうち最弱の部分が急激に破壊すれば、そこがわずかに滑り、同時に急激な応力低下を起す。しかし、破面に凹凸が十分に分布していれば、それらによって滑りが拘束され、応力は再び元の値まで回復する。*stick-slip* は、この過程のくり返しによって発生する。

(2) 破壊面の様子 供試体は、試験後、破面の観察に供した。幾つかのせん断面の形成が認められたが、これが既存のき裂と連続、合体し、通常の岩石に比べると複雑な破壊の様相を呈していた。観察可能なものから得られたせん断角は  $27^{\circ} \sim 53^{\circ}$  と大きくばらつき、封圧との関連性も認められなかった。この理由としては、上述の他に、試験片の直径と長さが等しいために、供試体



a: 幌内炭

b: 南夕炭

Fig. 6 破壊面の電子顕微鏡写真

端面拘束の影響が大きかったことも挙げることができよう。

**b** 領域が明瞭に現れた供試体には、そうでないものに比べ、卓越したせん断面の形成が認められた。図 6-a は、その面の様子を示した電子顕微鏡写真である。図中、あたかも破面上の凸部が破壊されて生じたような石炭の細片が観察される。

この観察結果から、直ちに、幌内炭の **b** 領域の挙動が一般のぜい性材料に見られる *stick-slip* と同一であると判断するのは早計かも知れない。しかし、**b** 領域の存在は、残留状態においてもせん断面で音を伴うような急激な滑りが依然として発生し得ることを示しており、注目に値する。

(3) 強度特性と破壊条件 図 7 は、最大強度と封圧との関係を示したものである。封圧増加に伴う強度増大の割合は、特に封圧 100 kg/cm<sup>2</sup> 以下の低封圧部で著しく、それ以上の封圧下では、ほぼ一定になっている。したがって、両者の関係を表わす式、すなわち、破壊条件式としては、Hobbs<sup>5)</sup> が提案した式：

$$\tau = c + \mu\sigma^a \quad (1)$$

が比較的良くあてはまるように思われる。図中の曲線は目見当によりデータをあてはめたものであるが、これにより、 $c=0$ 、 $\mu=19.2$ 、 $a=0.52$  を得た。なお、英国の石炭は、 $a=0.43\sim 0.88$  の範囲内に収まっていると報告されている。

(4) 封圧とヤング率の関係 図 8 は、封圧とヤング率の関係を示したものである。ばらつきはあるものの、一軸状態から封圧 150 kg/cm<sup>2</sup> 程度に至る間、ヤング率は封圧と共に微増し、それ以降はほぼ一定値に収束している。ヤング率の低封圧領域での増大は、主に石炭組織の圧密によるものと想像されるが、この傾向が低封圧部に限られ、かつ、増加量も少ないのは、石炭中に空隙やき裂の少ないことと関係しているものと考えられる。

(5) 強度とヤング率の関係 図 9 は強度とヤング率の関係を示したものであるが、ばらつきが大きく、強度とヤング率の間には明確な相関が見られない。

図 7～9 に示したデータのばらつきは、均質な岩石の場合に比べ、かなり大きい。これは、炭層の構成成分のばらつきの他に、既存のき裂

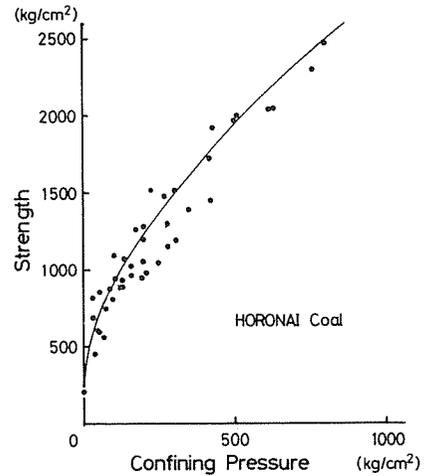


Fig. 7 強度と封圧の関係（幌内炭）

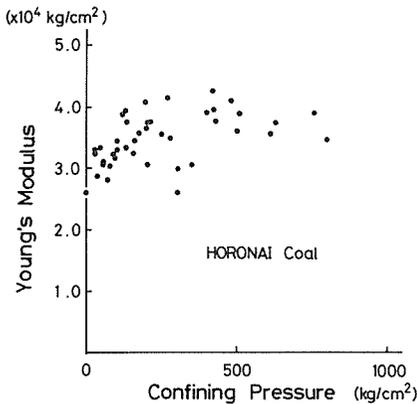


Fig. 8 ヤング率と封圧の関係（幌内炭）

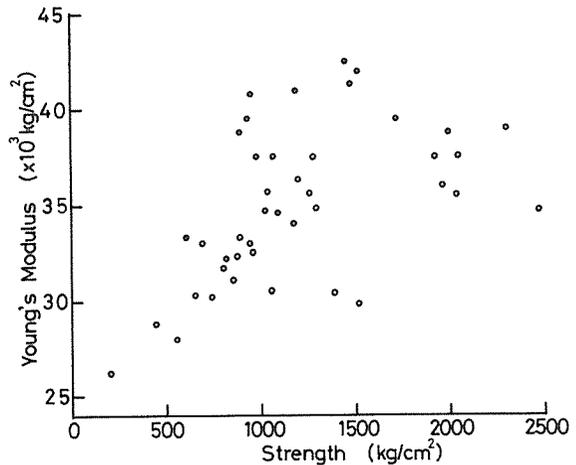


Fig. 9 強度とヤング率の関係（幌内炭）

の方向および密度に関するばらつきが大きく、その影響が強く現れているためであろう。例えば、既存のき裂の影響に関し、以下のことが考えられる。幌内炭の場合、層に垂直と平行の2系のき裂が認められたが、もし、層に垂直方向、すなわち、载荷方向のき裂が優勢な場合、ヤング率は石炭本来の値に近くなるものの、縦割れ破壊の頻度が増えるので強度の減少をもたらすだろう。逆に、圧縮軸に直交するき裂が優勢な場合には、圧縮過程でき裂の閉鎖が起こり見掛けヤング率の低下をもたらすが、強度にはそれほど影響を与えないであろう。いずれのき裂群が優勢であるかは偶発事象であり、供試体毎に異なるため、図7に示したようなばらつきが得られたものと解釈される。

#### 4.2 南夕炭

(1) 差応力-軸ひずみ線図 一軸試験は11個、三軸試験は30個の供試体について実施した。

図10は、差応力-軸ひずみ線図の例を示したものである。幌内炭の場合(図2, 3)に比べ、最大強度点以降の変形がなめらかに推移していることがわかる。これに対応し、一軸試験の場合にも、最大強度点に達したとき、破壊音を伴ったり、細片が飛散することはなかった。

封圧 400 kg/cm<sup>2</sup> 以下の比較的封圧領域では、最大強度点に達した後、応力低下が見られるが、その低下は急激でなく、徐々に生じている。応力低下量は封圧と共に大きくなり、かつ、その傾向が急になっている。

しかし、封圧が 400 kg/cm<sup>2</sup> を越えると、この応力低下現象が突然見られなくなる。つまり、封圧 400 kg/cm<sup>2</sup> を境に、見掛上、石炭はぜい性から延性に転じるという結果が得られたわけである。

南夕炭では、残留強度状態に達しても、幌内炭に見られた *stick-slip* 的な現象は現れない。ところが、破壊強度点以降で、設定封圧を段階的に低下させながら载荷をくり返す試験を実施したところ、図11に示すように、*stick-slip* 的な現象が観察された。この場合、図4の *a* 領域は見られず、*b* 領域がいきなり現れている。すなわち、封圧を下げることで、直ちにそれに対応する残留強度状態に移行したことを示している。なお、図は省略したが、残留強度状態にある供試体に対し、逆に封圧を増加させたところ、残留強度もそれに応じて増加することを確認した。これらの結果は、残留強度が応力経路によらず、封圧の大

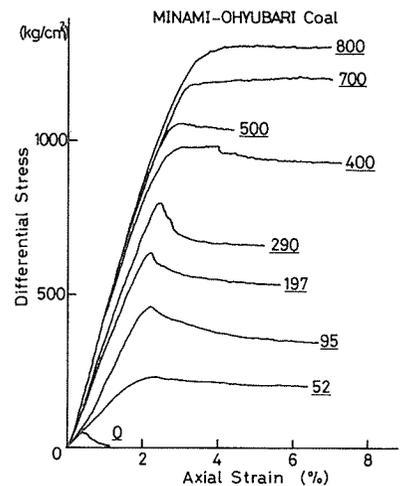


Fig. 10 差応力-軸ひずみ線図 (南夕張)

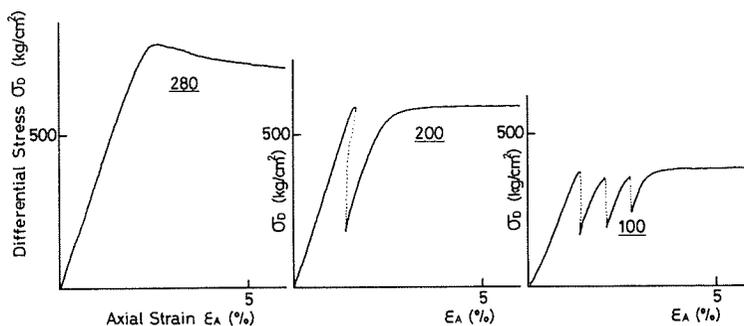


Fig. 11 封圧を変えたくり返し試験結果 (南夕張)

きさだけに依存していることを示している。すなわち、相当に傷んだ石炭も拘束力に応じた支持力を持つ性質があると言える。

(2) 破壊面の状況 幌内炭に比べると破壊が顕著であり、幾つかのせん断型の破面に加えて、粉炭を含む多数の細片の形成が供試体全体に観察された。また、破碎の程度は、封圧と共に増す傾向が見られた。低封圧試験に供したものの幾つかについては、せん断面の観察が可能であったが、それらはすべてモールの包絡線から予想される角度よりも小さかった。これは、せん断き裂が層に垂直な既存のき裂と合体したためと考えられる。

*stick-slip* 状の現象を引起した供試体については、平行な幾つかのせん断面の存在が認められた。その面の状況を図6-bに示す。この面は周りのき裂群を横切っており、優勢な滑りがここで起ったことを暗示しているように見える。

(3) 強度特性と破壊条件 延性的な挙動を示したデータの強度は、弾性から塑性状態に転じた直後の応力値で定義した。このようにして得た破壊強度と封圧の関係を示したのが、図12である。両者の間には、幌内炭と同様、上に凸の曲線関係が認められるが、幌内炭の場合(図7)に比べ、データのばらつきが小さい。これらを Hobbs の提案した(1)式にあてはめたところ、 $c=0$ 、 $\mu=10$ 、 $a=0.58$  を得た(図中の曲線)。幌内、南夕、両炭の一軸圧縮強度をあてはめた曲線によって比較すると、南夕炭は幌内炭に比べ約  $240 \text{ kg/cm}^2$  低く、かなり弱いことがわかる。一方、共通点として、他の夾炭層炭石に比べて、低封圧下における封圧効果が著しいことを挙げる事ができる。これは、封圧がわずかでもあれば、既存のき裂が閉じ石炭の構成要素が一体化し、強度が増すためであろう。したがって、地山にある炭層と切羽や坑道の側壁に現れた拘束のない炭層とでは、性質が相当異なる可能性のあることに注意しなければならない。

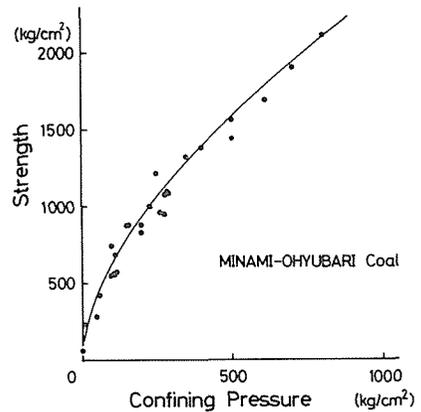


Fig. 12 強度と封圧の関係(南夕炭)

#### 4.3 南夕炭と幌内炭との力学的性質における差違

既述のように、南夕炭には幌内炭に比べ、力学的挙動に関し幾つかの差違が認められた。その最大の理由として、き裂密度の差違(2章参照)が考えられる。南夕炭の場合強度のばらつきが小さく(図12)、また、最大強度点以降も応力-ひずみ線図がなめらかで、通常の均質な岩石に見られるものに似ているのは、き裂密度が十分大きいと解釈できる。同じ理由で、最大強度点への到達以降、新たにぜい性破壊を起すような部分が供試体内部に欠落しているため、南夕炭では幌内炭に見られたぜい性的な逐次破壊( $\alpha$ 領域の存在)が起らず、速やかに残留強度状態へと移行する結果が得られたものと考えられる。この時、*stick-slip* 的現象が現れないのも、やはり既存のき裂密度が高いため、新たなせん断面が容易に形成されてしまうためであろう。そして、封圧を下げた時に初めて *stick-slip* 的現象が現れるのは、前段階で形成されたせん断面の内、最弱のものが活動を開始するからであると解釈できる。

このように、両石炭に見られた幾つかの力学的差違はき裂密度に最も依存しており、石炭の構成材料そのものの差違の影響は相対的に小さいものと判断される。き裂密度に関し、地山状態においても供試体と同様の差違があるか否かについては、今のところ不明である。しかし、もし、両者の差違が小さい場合には、上述の考察が正しいとするならば、両炭層とも類似の地圧現象が

起るであろう。

## 5. 炭層挙動の計測事例と室内試験結果との対比

当研究室では、深部炭鉱における炭層挙動の現場計測を、過去数年間にわたり実施している。計測結果のうち、特に、炭層の破壊挙動に関係すると思われる事例を、以下に抽出してみた。

### 5.1 炭柱内の地圧変化

幌内炭鉱の地表下約 1000 m の採炭現場で計測した 2 例について述べる。

(事例 1) ロングパネル肩部に残された幅 8 m の炭柱の地圧挙動：採炭ロングが後退式であったため、払通過前に地圧変化を受感するセンサー（油圧カプセル）を炭柱中央部に埋設し、払通過前後の地圧変化を測定した。

一方、炭層を弾性と仮定した計算結果によると、炭柱内には、切羽が接近、通過し、遠ざかるにつれ、次第に地圧の上昇が起り、切羽がかなりの距離が進んだ後に、初めて一定圧に落ち着くことが予想された。

図 13 に示す測定結果によると、払が測定点に接近する時点から緩い地圧上昇が現れ、払通過後もしばらくの間それが持続している。したがって、弾性計算の予測通りの観測結果が得られたと言える。ところが、払が通過し 13 m 離れた時点で、突然、急激な地圧低下が生じ、新しい平衡状態に入った。坑内でも、同時期に、炭柱の傷みがひどくなったことが観察されている。

(事例 2) 前進式ロング肩部の幅約 23 m の炭柱における地圧変化：坑道壁から 5.6 m の深さの炭柱内に埋設した油圧カプセルで得た、採炭活動に伴う地圧変化を、図 14 に示す。この場合にも、払が進行し測定点から離れるに従い、地圧の上昇が現れている。地圧は払後方約 150 m でピークに達した後、緩慢な降下を示した。この下降過程で階段状の箇所が見られるが、これは炭柱内の逐次破壊に対応するものであ

らう。応力低下時の挙動が事例 1 と異なるのは、炭柱幅の差違によるものと考えられる。

### 5.2 払前方炭層内の地圧挙動

(事例 3) 幌内炭鉱の払前方深側の炭層中で計測した地圧変化（図 15）：油圧カプセルはすべて、坑道壁から 6 m 奥部に埋設している。作孔中ジャミングが 6~10 m 奥部で頻発したことを考えると、油圧カプセルは、いわゆるゆるみ域（最大強度点を越えた状態）内に埋設したことになる。図 16 に示した炭層押し出し量の測定結果も、これを裏付けている。すなわち、固定点が 6 m 奥

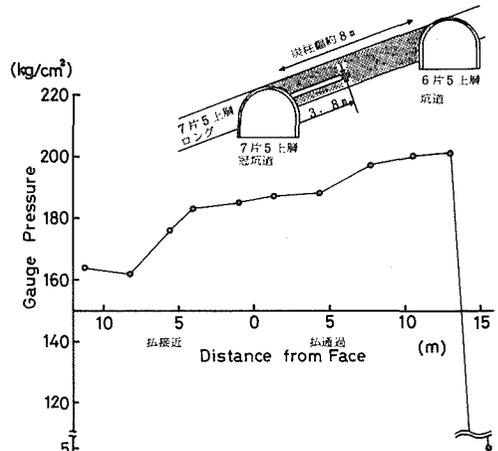


Fig. 13 炭柱内の地圧変化（事例 1）

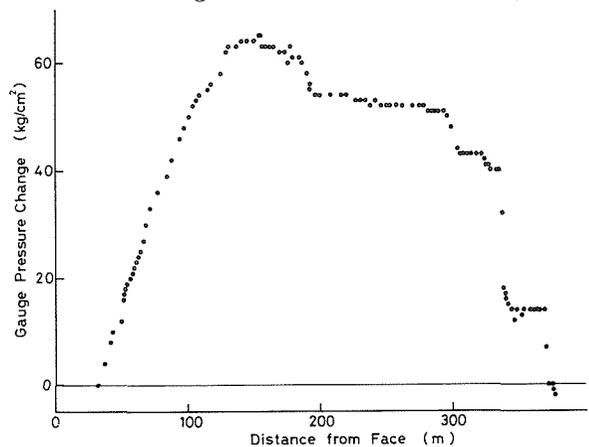


Fig. 14 炭柱内の地圧変化（事例 2）

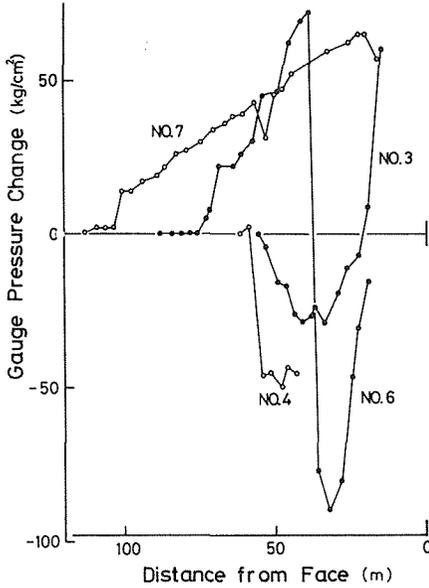


Fig. 15 掘前方炭層内の地圧変化 (事例 3)

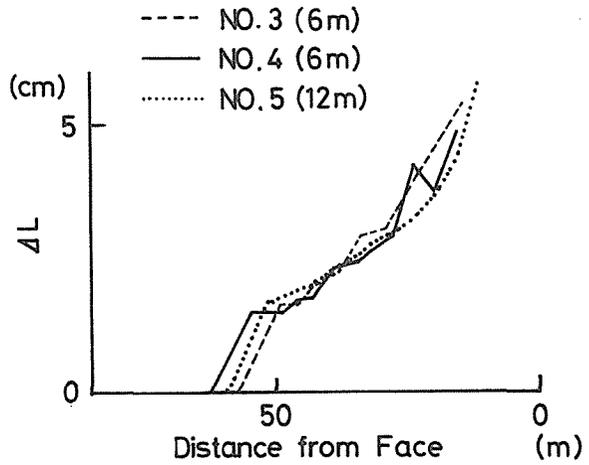


Fig. 16 炭層押し出し量の変化 (事例 3)

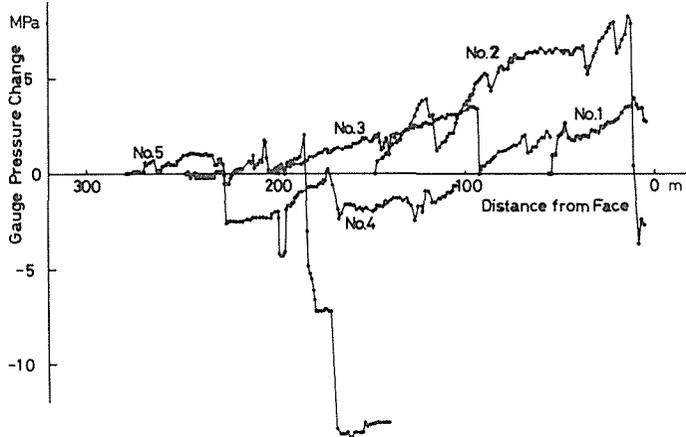


Fig. 17 掘前方炭層内の地圧変化 (事例 4)

部と 12 m 奥部のいずれの場合にも、押し出し量がほぼ等しいが、これは、大きな変形を伴うゆるみ域が、坑道から 6 m 以内に存在していることを示している。

ゆるみ域の近くで計測したせいかわ、No. 3、No. 4 の両測点では、測定開始直後から地圧の低下が現われている。No. 6 の測点は最も急な地圧上昇を示したが、掘が約 40 m まで接近した時点で、炭層の破壊進行を示すと思われる急激な地圧低下が現れた。ただし、その後再び上昇傾向に転じている。最終的には、すべての測点で、掘の接近による地圧の上昇が観測された。

(事例 4) 南大夕張炭鉱における深坑道から 9 m 奥部の採炭パネル内の地圧変化：当炭層では、ボーリング時に約 8 m 奥部で山鳴りやジャミングの発生があったので、ゆるみ域に近接しているものの、それよりも奥部における地圧挙動を測定したことになる。

掘接近に伴う地圧変化の計測例を図 17 に示す。すべての例において、急激な地圧低下が数回現れている。地圧変化と同時に計測した炭層押し出し量の変化の 1 例を図 18 に示す。地圧の急激に低下した時点で、急激な押し出しが観測されている。急激な地圧低下のくり返しは、炭層内の破壊

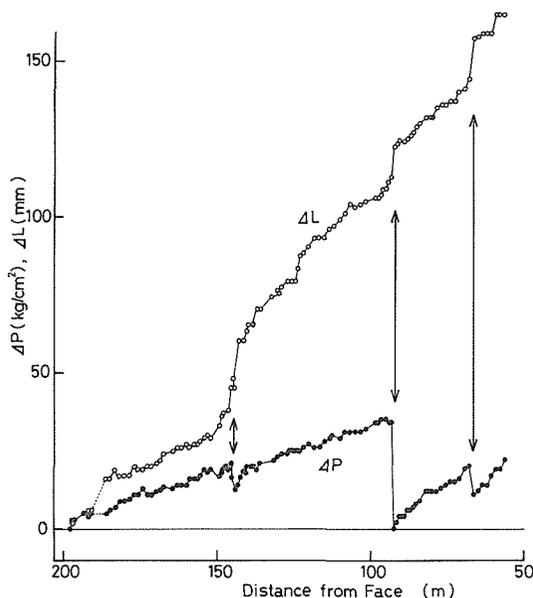


Fig. 18 地圧変化と炭層押し出し量の対応 (事例 4)

の進展過程を捉えたものと解釈できる。

### 5.3 室内試験結果との対応

炭柱は周囲が自由面になっているので、炭柱内の地圧状態は、一軸圧縮または低封圧下の三軸状態に近いものと考えられる。

一軸圧縮状態では、一度破壊が起れば、支持し得る荷重は低下する一方である（この場合の残留強度は0）が、事例1、2の結果は、この点で室内試験結果に一致していると言える。また、事例2で観察された段階的な地圧低下は、室内試験における逐次破壊（図2参照）に似ている。

一方、掘前方の炭層内は自由面が1面だけであり、三軸状態にあるものと推測される。そこで、事例3、4を三軸試験結果と対比することにする。

三軸試験結果によると、残留強度は封圧によって決まり、破壊が起っても、応力の増加と共に再び支持圧が増す。事例3におけるゆるみ域内部での応力上昇は、これによって説明することができる。また、事例4における地圧の比較的急激な上下変動は、室内における *stick-slip* 的現象に対応するものと解釈することができる。

このように、炭層内の地圧挙動と、室内試験結果との間には、ある程度の対応がつくようである。

## 6. 結 言

サーボ試験機を用いた室内試験の結果、石炭は破壊した後も拘束力に応じてかなりの大きさの強度を持つこと、また、破壊がかなり進んだ後でさえ、依然として破壊音を伴うような急激な破壊が起り得ることなどが明らかになった。深部化した採炭空洞周辺で行った現場計測の諸事例は、炭層内でこういったことが実際に起っていることを示した。したがって、深部化した切羽周辺で多発する炭層の破壊現象を理解する上で有益な手掛りが、本研究により得られたものと考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) Crouch, S. L., Fairhurst. C.: The Mechanism of Coal Mine Bumps, (1973), U. S. B. M. Contact Report (H 0101778).
- 2) 木下重教, 他: 工学部研究報告, **76**, (昭 50), pp. 1-10.
- 3) 佐藤一彦: 学位論文 (昭 53), 北海道大学.
- 4) Byerlee, J. D.: Tectonophysics, **9**, (1970), pp. 475-486.
- 5) Hobbs, D. W.: J. Geol., **72**, (1964), pp. 214-231.
- 6) Fukuda, K., etal: Strata Control in Deep Coal Mine in Hokkaido, (1983), 5th Int. Soc. Rock Mech., Melbourne.