長壁式切羽の進行に伴って現れる

周辺岩盤の力学的擾乱*

——大型2次元模型試験に基づく研究——

杉浦 高 広¹ 石 島 洋 二² 出 口 剛 太³

Mechanical Disturbances Accompanying Longwall Mining

—— Study based on large-scaled models ——

by Takahiro SUGIURA¹, Yoji ISHIJIMA¹ and Gota DEGUCHI²

1. Faculty of Engineering, Hokkaido University, Kita-ku, Sapporo 060

2. The Coal Mining Research Centre, Japan

Large-scaled model experiments have been conducted to study the strata behaviors accompanying longwall mining in a flat coal seam at a great depth, leading to the following results:

With the face approaching, the abutment pressure appeared which was recognized by the increase of the in-situ stress, P-wave velocity and amplitude. With the face passing, the roof failure occurred which was characterized by the rapid decrease of P-wave velocity and amplitude. And then they were regained in the closed goaf. When the bonding strength between the seams was relatively large, roof caving hardly occurred in the goaf. It resulted in the maximum abutment stress of about five times the virgin stress. But, when the bonding strength was small, the bed separation and the roof caving easily occurred with the face advancing, and the corresponding abutment stress was restricted twice the virgin stress.

In the field observations on stress changes and caving at Yotsuyama pit of Miike Colliery, the phenomena which are similar to those of the models were gained.

KEY WORDS: Strata Model, Longwall Mining, Roof Control, Induced Stress, P-wave

1. 緒 言

深部化した炭鉱において長壁式採掘切羽の周囲で発生する種々の地圧現象は、周辺岩盤の力学的な特性や地質構造に関連して生じると考えられる。これらの現象の中で特に崩落などの破壊現象は災害と密接に関係するので、工学的に重要であり、どのような条件の下で発生するかについての解明が急がれる。数値応力解析の実行は一つの有用な方法である¹⁾。しかし、地層模型を用いる試験を行えば、より詳細な情報を得ることができると期待される²⁾。

そこで、本研究では、地下深部に賦存する単一の平層（炭層）を長壁式採掘法によって稼行していくときに、採掘空間の周辺で発生する地圧現象とその推移に関して、地層の強度が互いに異なる3つの大型2次元模型を用いて詳細に検討することにした。また、模型試験の結果の妥当性を検討するために現場計測結果と比較した。

炭坑における採掘空間の天盤制御を目的とした模型試験に関しては、現在までに、以下に述べるような研究がなされている。Jacobi and Everlingらは、旧西ドイツの炭鉱の事例を想定した模型試験を数多く行い、切羽天盤の局所的なくさび状の変形・破

壊現象などに関して幾つか有用な知見を得ている³⁾。また、切羽支保や袖巻き充填などについても研究し、指針を得ている³⁾。蔣・江崎らは、切羽の盤圧と天盤の変形・破壊挙動との関係を、模型試験に基づき論じている⁴⁾。佐藤・板倉らは、直接天盤を弾塑性あるいは完全塑性の梁とみなすことにより導かれる払跡天盤の崩落の条件を模型試験結果と比較し、払跡天盤が自立する長さについて評価している⁵⁾。オーストラリアでは、模型試験を新しい採炭法の力学的安定性に関する評価に応用している⁶⁾。これらの試験に供される模型は、多くの場合、大型で、詳細な観察を行えるという利点がある。しかし、いずれの場合も試験装置の構造上、炭層の掘削の際にはいったん外圧を解放し、掘削後再び載荷する方式が用いられており、実際とは載荷経路が異なっている。この差異のために、模型実験で得られた結果が実際と異なる可能性は否定できないという問題が残る。

岡村・菅原らは遠心載荷装置を利用した模型試験を行い、払跡天盤の崩落の条件について検討している⁷⁾。亀田・西田ら⁸⁾は底面摩擦試験装置を用いて浅所陥没の発生機構について検討している。これらの模型装置は重力場を実現できるという利点はあるものの、使用できる模型は小型に限られており、採掘の進行などに関する試験の実施が困難で、定量的な結果を得ることが難しいといった制約は免れない。

本研究では、実際に近い載荷経路を再現するために、既報の模型試験装置²⁾により、常に地圧が作用した状態の下で採掘を進める方法を用いた。また、地圧変化や変形・破壊現象を詳細に捉え

* 1992年2月25日受付 6月5日受理 資源・素材学会平成3年度春季大会にて一部発表

1. 正会員 北海道大学大学院 工学部資源開発工学科
2. 正会員 工博 北海道大学教授 工学部資源開発工学科
3. 正会員 工博 (財)石炭技術研究所 第一研究室室長代理
キーワード: 地層模型, 長壁式採炭, 天盤制御, 地圧変化, P波

のために、大型模型の特徴を生かしてあらかじめ模型内に応力とP波の伝播挙動を検出する2種類のセンサを一定の配置パターンに従って埋設し、採掘時に連続的な計測を行った。

本研究で用いた2次元の大型模型の諸元と作製方法、試験装置とその性能、および計測手段や実験方法などについては既に報告している²⁾ので、ここでは省略する。

2. 供試地層模型と実験方法

本実験には、模型B-1、B-2およびB-3と名付けた3種類の地層模型を供した。図1、図2および図3に示すように、いずれも16～22枚の層が累積した地質構造を呈している。模型は特定の炭鉱の地層を想定したものではない。しかし、4.で述べるように、典型的な夾炭層を模擬しているといえる。

図1 模型B-1の地質状況とセンサの位置。①, ②, …は採掘ステップを示す(図2, 3も同様)

図2 模型B-2の地質状況とセンサの位置

図3 模型B-3の地質状況とセンサの位置

表1 模型を構成するモルタル系材料の配合比および単軸圧縮強度

地層材料名	配合*1 重量比 (ss/c)	強度*2 (原型) MPa	模型で使用されている地層番号*3		
			B-1	B-2	B-3
R①	15	0.81(41)	L2-4, 20, 21	L3-8, 10-15	L2, 18
R②	9	1.34(67)	L1, 22	L1, 2, 16	L1, 19
R③	20	0.53(26)	L5-11, L13-19	L9	L3-9, L11-17
C S	30	0.23(12)	L12	—	L10

注) *1 ss:珪砂, c:セメント, 詳細については文献2)を参照されたい。

*2 単軸圧縮強度については原型に換算した強度を()に示した。

*3 地層番号については図1～3を参照されたい。

各物理量の縮尺は、文献2)の表1に示したとおりである。それぞれの地層模型を構成する材料の配合比、単軸圧縮強度等の基本的性質を表1に示す。

模型は夾炭層の力学的な諸特徴を反映させるようにした。まず、第1に、模型中央の炭層に相当する層の強度を上下盤よりも小さくした。第2に、累層構造における層間強度が層自体の強度に比べ弱めになるようにした。このために、累層構造を持つ地層模型は、下位の層を流し込んでから12～24時間養生し、層表面が幾分乾燥した後、層表面を切削・整形した上で上位の層を打設するという作業を順次繰り返して作製していった。このとき、模型B-1およびB-2では、下位の層の上に直接上位の層を打設した。これに対して、模型B-3では、上位の層の打設に先立ち、下位の層の表面に油を染み込ませた新聞紙を敷いた。

両者で層間の引張強度がどの程度異なるかを簡易に評価するために、径100mm、厚さ50mmの円盤状供試体を地層から層の境界を含むように切り出し、圧裂引張試験を行った。このとき、上下の載荷点を結ぶ線と層の境界が一致するようにした。参考のために、層の境界を含まず単一の層からなる供試体も用意した。いずれの場合にも上下の載荷点を結ぶ線に沿って引張割れを起こしたので、通常の評価式を用いて圧裂引張強度を算定した。層を構成する材料の引張強度は27.7kPaであったが、層間に新聞紙を挟んだ場合は6.59kPa、直接打設した場合は10.7kPaであった。このような方法でどの程度正確な引張(または付着)強度が評価できるかについての詳細な検討は別の機会に譲ることにしたいが、いずれにしても、層間の強度は層自体の強度より小さいこと、特に、紙を挟むと強度がより小さくなることは明らかであろう。

3つの模型の強度の大小関係は次のようになっている。各地層を平均した強度に関しては、ほぼ同一強さのB-1、B-3に比べ、B-2は50%程度大きい。また、層間の強度に関しては、同一条件で打設したB-1、B-2に比べ、B-3は小さい。従って、模型全体の強度は、B-2、B-1、B-3の順に小さい。

模型の寸法は幅2m、高さ1.16mなので、原型に換算して幅60m、高さ34.8mの領域を解析の対象としている。模型の炭丈は5cm(原寸1.5m、なお、原寸とは原型の寸法を意味するものとする)、砂岩を想定した直接天盤は約3cm(原寸0.9m)である。

模型B-1では両端10cmを除いた180cm(54m)の間、模型B-2、B-3では両端40cmを除いた120cm(36m)の間を左から右へ掘削した。この掘削は、模型B-1の場合には12ステップ、模型B-2、B-3の場合には8ステップに分けて行った。1ステップあたり15cm長の模型炭層を掘削するのに、約1時間を要した。これは原型に換算して、1.0m/hの速度で切羽が進行することを意味する。

領域は 1,000m の深度にあり、初期地圧の鉛直方向・水平方向の応力成分はそれぞれ 25.5 MPa (かぶり圧に一致), 12.8 MPa と仮定し、試験が終了するまでその状態を保った。

3. 実験結果

まず、掘削長の大きな模型 B-1 の実験結果について述べる。つぎに、模型 B-2, B-3 の実験結果について、互いの相違点を中心に述べる。

3・1 模型 B-1 の実験結果

3・1・1 変形・破壊の状況 切羽が進行するに従い、払跡では次第に天盤層が下方へたわみ出した。ステップ⑤ (掘削長 75 cm, 原寸で 22.5 m, 以下同様) になると、切羽始発部の天盤および下盤から払跡に向かってそれぞれ 45° および 60° 方向に開口型の亀裂が入り始めた (図 4(a))。同時に始発部の炭壁には縦割れが生じた。ステップ⑥ (90 cm, 27.0 m) になると、縦割れをした薄板状の炭壁が中央で払跡に向かって折れ曲がり、座屈状の破壊を起こした。また、上下盤内の亀裂は徐々に開口した (図 4(b))。ステップ⑦ (105 cm, 31.5 m) では、始発部における炭壁の破壊が進み、破片が払跡に向かって崩れ落ちた。やがて、始発部に接する払跡はこのずりで約半分の高さまで埋まる状態になった (図 4(c))。ステップ⑧ (120 cm, 36 m) になると、払跡側の天盤がそこに入った亀裂に沿って大きく沈降した。同時に始発部における炭壁の破壊域が拡大し、始発部に接する払跡では、炭壁から出た崩落ずりが沈下する天盤に押し潰されるという状況が出現した (図 4(d))。

ステップ⑨ (135 cm, 40.5 m) に至ると、始発部近傍のずりがいっそう圧縮され、その先の払跡では上下盤の接触が起こり始めた (図 4(e))。空洞が閉塞し始めたわけであるが、この閉塞領域は、切羽の進行と共に切羽に向かって次第に拡大してい

図 4 切羽進行に伴う払跡周辺の状況 (模型 B-1)。(a)~(d), (f) はそれぞれステップ⑤, ⑥, ⑦, ⑧ および⑨における切羽始発部の状況を, (e) はステップ⑨における切羽後方 105 cm の払跡地点の状況を示している。

った。このような状況においても、直接天盤 (炭層の直上の層) を含めて層間の剝離は認められず、また、閉塞部でも天盤、下盤ともに破壊が認められなかった。始発部で発生した亀裂は天盤の沈降と共に、天盤側では押し潰され、下盤側では閉鎖した (図 4(f))。

ステップ⑫ (180 cm, 54 m) の掘削中に、急激で大規模な落盤が起こり、払跡はほとんど閉塞した。同時に、切羽部分の炭壁が掘削のために開かれていた観察窓から圧出する事態が生じた。このため、以後の掘削は不可能となった。なお、天盤内に目視できる程度の層間の剝離は依然として認められなかった。

炭層を挟む上下層の変位挙動に関し、写真撮影から算定して得た結果を述べる。ステップ②で有意な量の天盤の沈下が現れ始め、その後は、切羽の進行に対してほぼ一定の割合で増加した後、ステップ⑧, ⑫で大きな変位を生じた。なお、天盤の沈下は、切羽の前方 30~45 cm (9~13.5 m) の地点より生じ始めた。

切羽進行に伴い、下盤層は次第に隆起したが、上盤の沈下量に比べ小さな変化しか示さなかった。上下盤の変位挙動に対応して、上下盤接近量は、測点を切羽が通過する直前のステップから変化を示し始めた。また、ステップ⑧, ⑫では上盤の沈下に対応して大きな変化を生じた。

3・1・2 地圧の状況 模型内に配置した 50 個のセンサの内、49 個で切羽の接近に伴う鉛直方向の応力成分 (以下、単に地圧と呼ぶ) の増大、つまり先行圧の発生が認められた (残り 1 個は断線により測定不能であった)。図 5 はその一部を示したものである。炭層に最も近い L10 層および L14 層内のセンサでは、切羽の約 6~12 cm (1.8~3.6 m) 前方で地圧のピークを記録した。このピーク値は初期地圧の 1.6~5 倍に達するが、図に示すように、払跡の拡大につれて大きくなる傾向が認められる (図 16(a) も参照さ

図 5 模型内の垂直方向の応力成分の切羽進行に伴う変化の一例 (模型 B-1)。測点の位置はグラフの右上に L14 ④-⑤ のように示されている。L14 は縦座標、④-⑤ は横座標を表す (図 1 参照)。図中の矢印はセンサの埋設断面を切羽が通過した位置を示す。

図6 受振されたP波の切羽進行に伴う変化の一例(模型B-1, 受振子PS12)。ステップ⑧~⑩では波の伝達時間が500 μ sec以上であったため、波形は図中には現れていない。ステップ⑪は波の減衰が著しく、計測不能であった。

れたい)。

切羽がさらに接近すると、地圧は減少し始め、切羽の通過とともに激減した。切羽が十分に遠ざかり、払跡空洞が完全に閉塞すると、接触圧に起因する地圧が発生した。センサが破壊域の中にあつたものについては、大きさが初期地圧の2倍以上になった例もある。

3・1・3 P波の挙動 L20層内の発振子T2とL18層内の受振子PS12間を伝播するP波が、切羽進行に伴って変化する様子を示したのが図6である。切羽が測点に近づいたステップ③のとき、第一波形の振幅が約50%大きくなり、波の伝達時間も若干短くなっている。さらに切羽が接近したステップ④では、第一波形の振幅が激減するなど波形の乱れが生じているが、ステップ⑤では再び波の立ち上がりが大きくなっている。ステップ⑥のとき、切羽は測点を通過したが、受振波形の振幅は全体的に小さくなり、伝達時間は元に比べ約2倍になっている。切羽が遠ざかるにつれて波はいっそう減衰し、伝達時間がさらに長くなるとともに、波形はより滑らかになっている。ステップ⑪では、ついに波形の検出が不可能となったが、払跡天盤が大規模に崩落し、払跡が完全に閉塞したステップ⑫では、再び波形が出現している。他の測点でも同様の結果が得られた。

今述べたように、地圧変化や破壊と関係したP波の挙動として、速度(伝達時間)、第一波形の振幅、卓越周波数の3つが注目される。これらの挙動を整理してみよう。切羽進行長とP波の速度変化および第一波形の振幅変化の関係を、それぞれ図7、図8に示す。これらから次のようなP波の挙動が認められる。P波は速度も振幅も、切羽が接近すると若干大きくなり、切羽通過時に大きく減少した後、漸減し、ついに検出不能となったが、その後再び増加している。これらは切羽進行に伴う先行圧の発生、払

図7 P波速度の切羽進行に伴う変化(模型B-1)。センサ位置や矢印については図5と同様の表記方法を用いた。図8、13も同様である。

図8 P波の第1波形の振幅の切羽進行に伴う変化(模型B-1)。

跡における地圧の解放（荷抜け）と崩落ずりの圧密といった一連の地圧現象を反映している。なお、振幅の変化は速度に比べて大きく、それだけ地圧変化に敏感であるといえるが、これは別の模型試験でも確認されている²⁾。

図9は、ステップ④、⑤において受振子PS32で取り込まれたP波（発振子はT2）の波形を示したものである。2つのP波に関し、波形の変化を明らかにする一助として、高速フーリエ変換（FFT）による周波数解析⁹⁾を行った。図10は区間A-A'に対して得た結果であるが、ステップ④のときにみられた10 kHz、25 kHzおよび45 kHz付近のピークが、ステップ⑤になると消滅している。

整数倍の周期以外の区間に対してFFTを行うと、漏れ（Leakage）と呼ばれる余分な周波数成分がつけ加わる可能性が指摘されている⁹⁾。特に今回のように短時間で減衰してしまうような波の場合、その影響が大きいと考えられる。そこで、波の1周期と思われる部分（図9中のB-B'）についても、FFTを行ってみた。その結果、ステップ④で見られた25 kHz付近のピークと40 kHz付近のピークが、ステップ⑤では共になくなっていくことがわか

図9 受振子PS32で取り込まれた波の立ち上がり部分。(a)はステップ④、(b)はステップ⑤の結果を示している。

図10 受振感度-周波数の関係。図9のA-A'区間に対してFFTを行って得た。(a)はステップ④、(b)はステップ⑤の結果を示している。

った。このように、両者では詳細な点が異なるものの、ステップの進行に伴い高周波成分が消えるという傾向が共通して認められる。

一般に材料の破壊が進み亀裂が多くなると、P波を含む弾性波は著しく減衰するが、高周波成分の波ほどの傾向が顕著に現れるという報告がある¹⁰⁾。従って、上述の波形の変化は、破壊が生じていることを示唆している。ただし、ステップ④から⑤への過程で、測点付近の地圧は解放されているので、卓越周波数の変化はこれとも関係しているかもしれない。

3.2 模型B-2の実験結果

掘削がステップ⑥に進んだとき、初めて始発部の天盤に払跡に向って約30°の傾斜を持つ亀裂が若干数発生した。その後の切羽進行に対し、この亀裂はあまり成長せず、従って、天盤の崩落も生じなかった。掘削の全過程を通して、模型中心部では下盤の隆起はほとんどなく、わずかの量の天盤の沈下が認められたに留まった。これらの変形挙動は模型B-1と似ているが、変形量はかなり小さい。

切羽進行に伴う地圧変化も、模型B-1とほぼ同様であるが、切羽進行長が短いために、先行圧の大きさは初期地圧の1.2～4倍に留まった。

地圧の増大に対し、P波の速度・振幅はともに若干増加した程度であったが、切羽通過に伴う荷抜けによって、30～60%の大きさの減少がみられた。

当模型の場合、天盤の崩落がなく破壊も小規模であったので、弾性モデルとの対応がある程度つくと考えられる。そこで、測定結果の正確さを検討する一助として、応力分布に関して、8節点アイソパラメトリック有限要素法による2次元弾性解析結果と模型試験結果との比較を行った。なお、数値計算では層構造や層の弾性定数は模型と同じにしたが、層間は完全接着条件を仮定し、文献11)に示す方法で解析を実行した。

図11に示したL11層内の地圧の分布に関し、次のような特徴が実験、数値解析の両方で捉えられていることがわかる。

- (i) 払跡では応力が0近くになっている。
- (ii) 切羽先端で応力集中を起している。
- (iii) この応力集中の程度は払跡の拡大と共に増大している。

なお、採掘の進行に伴う変位挙動は両者とも似ていたが、変位量に関しては模型の方が数値解析よりも約30倍大きな値が得られた。数値計算において、模型では発生した破壊を考慮しなかったこと、層間の力学特性を簡略化したことなどが、変位量の差異の原因として考えられる。

3.3 模型B-3の実験結果

図11 ステップ②、④、⑥におけるL11層中心線上（図2参照）の応力分布（模型B-2）。数値解析結果は実線、実験結果は破線で示している。横軸に記されている②と下向き矢印はステップ②における切羽の位置を表す。

図12 切羽進行に伴う弘跡周辺の状況(模型B-3)。(a)はステップ④における切羽始発部前方30cm地点の状況を、(b)はステップ⑥における同60cm地点の状況を、(c)～(e)はそれぞれステップ⑥、⑦および⑧における同90cm地点の状況を、(f)はステップ⑧における切羽(同120cm地点)の状況を示している。

図12(a)に示すように、掘削がステップ④まで進んだとき、弘跡の中央部の直接天盤層が剥離し始め、その上位の層との間に最大5mm程度の隙間が生じた。ステップ⑥になると層間剥離は天盤の3層に及んだ。また、弘跡のほぼ中央で直接天盤層とその上位の2つの層を垂直に貫く開口型の亀裂が発生した(図12(b))。同時に、弘跡の両端、つまり始発部と切羽においても、天盤に約60°の傾斜を持つ亀裂が発生した(切羽天盤に現れたものをF亀裂と名付ける、図12(c))。そして、図(b)、(c)に示すように、これらの亀裂に囲まれた弘跡中央の直接天盤層およびその上位の2つの層が弘跡に向かってV字形に折れ曲がった。

ステップ⑦では、折れ曲がった天盤が弘跡中央で下盤に接するようになり、また、層間剥離が拡大した。しかし、V字形に崩落した天盤層が支柱となり、直接天盤にあったF亀裂は閉鎖した(図12(d))。ステップ⑧に至ると、上下盤の接触した領域が拡大

図14 P波の切羽進行に伴う変化の一例(模型B-3)

し、切羽側ではこれがF亀裂付近にまで達した。そして、このF亀裂付近から、この亀裂とは直接関係がないと思われる新たな破壊が上方に進展した(図12(e))。同時に、切羽直上の天盤層には約60°の傾斜で弘跡側に倒れた亀裂が発生した(図12(f))。この状態は、図(c)に示したステップ⑥における切羽周辺の状況とほぼ同じである。従って、切羽がさらに進行すれば、ステップ⑥～⑧の現象が繰り返し発生する、つまり、ステップ⑥以降、9～18m(原型)の周期で天盤の崩落が起こるものと推定される。

切羽進行に伴う地圧変化の一例を図13に示す。全体的な傾向は模型B-1、B-2と同様であるが、地圧の最大値(先行圧)は各測点ともに初期地圧の1.5～2.0倍に留まった。この値は、他の2つのモデルの場合に比較して小さい。これは、天盤層の層間剥離や崩落現象と密接に関係していると考えられる。

測点PS12において受振された発振子T2からのP波の速度と振幅は、図14に示すように、ステップ④になると減少し、また、波形に明瞭な変化が現れている。その後の掘削過程で波は減衰を続け、ステップ⑦以降はほとんど計測不能となった。P波挙動に関する全体的な傾向は模型B-1、B-2とほぼ同様であるが、速度・振幅ともに減少が急激ではない点が異なっている。波線が多くの層を跨ぐような(炭層に近い)測点PS41(発振子T1)、PS42(発振子T2)では、切羽と測点との距離がかなり大きい段階から計測不能となった。

3・4 地層自体の強度および層間強度の影響

3つの模型について、最初の破壊は、それぞれ、

図13 模型内の垂直方向の応力成分の切羽進行に伴う変化の一例(模型B-3)

図15 弘跡の未崩落域の長さとの切羽進行長の関係

図16 先行圧のピークと切羽進行長の関係。(a)は模型B-1のL8層およびL16層中の結果を示している。(b)は模型B-2のL5層およびL13層中の結果を示している。なお、実線は3・2で述べた数値解析に基づく結果である。(c)は模型B-3のL6層およびL14層中の結果を示している。なお、埋設時に起きたセンサの転倒やケーブル切断により計測不能であった測点が、模型B-1で1つ、B-3で2つであった。これらの結果は図中には示されていない。

ステップ④(B-3)、ステップ⑤(B-1)、ステップ⑥(B-2)で認められた。模型の総合的な強度が小さいほど、早期に破壊が起こっていることがわかる。

払跡において空間が維持されている長さ(未崩落域の長さ)と切羽進行長の関係を示した図15から、模型B-1、B-3では、未崩落域の長さの最大値が倍近く異なっていることがわかる(B-2は崩落が起こらなかった)。両者でかなり異なるのは、層間強度の差異によってもたらされる層間剝離の有無のためであろう。

模型B-1では、払跡の未崩落域の長さが最大値を取った後、炭壁の圧出現象を伴う急激な天盤崩落が発生した。しばしば指摘されているように、天盤が吊る現象は極めて危険なことが改めて確認されたといえる。

図16は、先行圧のピークと切羽進行長の関係を示したものである。先行圧は進行長に対して2次関数的に増大する傾向が認められる。模型B-2については、対応する数値解析結果でも同図(b)に示すように同様な結果が得られている。この増加の程度は、模型B-1とB-2でほぼ同程度であるが、模型B-3はこれらに比べやや小さい。この差異は、やはり層間強度の差異に起因すると思われる。つまり、油紙を介在させて層間強度を小さくした模型B-3の場合には払跡空洞の天盤層が順次剝離・崩落し、先行圧は小さな値に留まった。これに対し、層間に介在物のない模型B-1、2では、層自体の強度の大小にかかわらず、吊り天井の状態が現れ大きな地圧が計測された。このように、切羽周辺の力学的状態に対しては、層自体の強度特性にも増して、層間の強度特性が強く影響していると推定される。

4. 現場計測結果との比較・検討

三池炭鉱四山鉱における海面下595～640mの上層西35卸部内、および本層35卸部内は、後述するように、地質構造を始め諸条件に模型試験と類似性がある。また、長壁式採掘時に諸計測が行われている。そこで、上記の2部内を原型として選び、諸現象について原型と模型を比較してみよう。

2部内に近い670m坑道で実施した応力解放法による地圧計測によると、初期応力状態は、3つの主応力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 で表すと次のようであった¹²⁾。 $\sigma_1=20.2$ MPa(ほぼかぶり圧方向に一致)、 $\sigma_2=10.6$ MPa(ほぼ切羽の進行方向に一致)、 $\sigma_3=4.2$ MPa。模型では幾何学的縮尺を1/30、応力の縮尺を1/50としているので、模型に対応した初期地圧は、 $\sigma_1=0.40$ MPa、 $\sigma_2=0.21$ MPa、 $\sigma_3=0.08$ MPaとなる。 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 をそれぞれ鉛直、水平および2次元模型の表裏方向の負荷応力に対応させると、20%程度の誤差内で本実験の設定圧と一致する。

2部内の地質は、多少の不連続面を含むものの、傾斜が約5°のほぼ水平な累層構造をしており、本実験で用いた供試模型に似ている。上層西35卸西9片坑道の払跡発部から約500m進んだ位置において実施した天盤と下盤のコアボーリングを基に、各層の層厚と単軸圧縮強度が求められた¹³⁾。層厚は、岩盤層が0.10～4.70m(平均0.74m)、炭層部が1.95mであった。なお、本層35卸8片坑道で実施されたコアボーリングでも、ほぼ同様の結果が得られている¹²⁾。単軸圧縮強度は、岩盤層が17.9～76.4 MPa(平均42.8 MPa)、炭層部が9.2 MPaであった。強度の寸法効果を考慮し、岩盤の強度は供試体強度の1/4～1/2程度である¹⁴⁾とすれば、岩盤および炭層の平均強度はそれぞれ10～20 MPa、2～5 MPaと見積もられる。

以上の数値は上述の縮尺を用いると、岩盤の層厚は3～153mm(平均25mm)、炭層の厚さは65mmとなり、単軸圧縮強度は、岩盤層が0.2～0.4 MPa(平均0.3 MPa)、炭層部が0.07 MPaとなる。層の平均的な厚さは、模型と原型とで大略一致している。強度は模型の平均値がB-1、B-3で0.28 MPa、B-2で0.55 MPaであるので、これについても模型と原型はオーダ的に一致しているといえる。

現場での目測によると、払跡天盤の未崩落域の長さは数m～十数mで周期的に変化している(文献16)の第21図参照)。この値は、模型B-3の場合、9～18mであり(3・3参照)、原型の値とほぼ一致している。

天盤の長壁式払の接近に伴う沈下挙動に関しては、西4片片盤坑道上部天盤の場合¹⁵⁾、沈下量に天盤の上下で差がなく、厚い天盤が一体となって沈下したことを示した。この挙動に関しては、模型B-1およびB-2で得られた結果に似ている。また、天盤が沈下を開始する距離については、現場では払の前方85mであったのに対し、模型では約20mであった。この差異の原因の一つとしては、模型が十分に大きな寸法を有していなかったことが考えられる。払が測点近傍を通過するまでの沈下量は、炭層上方10mの測点の場合、現場では18～28mm(文献15)のFig.2参照)、模型では0～60mmであった。

現場では、払が数十m接近したときに炭層および上下盤で地圧の増大が観測された(模型ではこの距離が約30m)。また現場では、先行圧のピークと切羽の距離は、5～10m¹⁶⁾および10～20m¹²⁾であった(模型では1.8～3.6m)。この距離は模型の方が短い。この差異として、模型では2次元状態であること、拘束板と模型表面間の摩擦の影響があることなどが考えられる。なお、この距離はイギリス、ドイツの炭鉱では1～3m、5～10mである¹⁷⁾。

先行圧のピーク値は、現場では初期地圧の1.2～1.4倍であったが、模型B-3では1.4～1.8倍であった。油圧カプセルで計測される地圧変化は実際より20～30%小さい可能性がある¹⁸⁾ことを考えると、油圧カプセルを用いた現場計測結果と模型試験で得た結果の一致の程度はよいといえる。

現場において水平面内で計測したP波の挙動に関し、文献19)の事例では、払通過による速度や振幅の減少が認められたが、こ

これらの挙動は、模型試験結果に一致しているといえる（文献16）の第24図および本文の図13参照）。

総体的に、模型B-3と原型とは諸現象の対応が良いという結果が得られた。模型B-3が、模型B-1やB-2と著しく異なる点は層間強度である。従って、層間強度特性に関し、原型の地層は模型B-1、B-2に比べB-3により近く、層間強度が小さいことを示唆している。採炭切羽の周囲で発生する特徴的な力学的諸現象の内、かなりの部分が層間強度の小さい累層構造と密接に関係しているものと推定される。

5. 結 言

長壁式切羽の進行に伴って生じる払周辺岩盤の力学的挙動を模型試験によって調べ、以下の知見が得られた。

(i) 切羽前方の応力集中（先行圧）は切羽のやや前方に生じ、応力集中の程度は初期地圧の1.5～5倍になった。また、この先行圧は、未崩落域の長さに対して2次関数的に大きくなった。先行圧帯では、P波の伝播速度および振幅が若干大きくなった。

(ii) 切羽通過に伴い、上下盤の応力が著しく減少した。この減少は払跡に近いほど大きい。また、岩盤を伝播するP波に関し、著しい速度減少・振幅減衰、高周波成分の消滅が観察された。さらに、切羽の通過に伴う上下盤の変位量について、弾性計算に基づく予想より約30倍大きな値が得られた。これは、払周辺岩盤中に、層間剥離を含む塑性域の発生があったことを示唆している。

(iii) 払跡が拡大するにつれて、上下盤が接触し、接触圧が生じた。このような場所では、上下層内で圧縮応力が増加した。また、減衰しきって計測不能であったP波伝播が再び観測できるようになった。

(iv) 層間の引張強度が相対的に小さい場合には、払跡がある程度拡大した時点で払跡の直接天盤層の剥離が生じ、その後の切羽の進行とともに剥離した層の崩落が起こった。それ以降の払の進行とともに、この剥離・崩落は繰り返し起こることが想定された。波線が多数の層を跨ぐ場合、P波の速度、振幅ともに減少の程度が著しく、層間剥離の影響を受けていることを示した。先行圧は小さく、最大でも初期地圧の約2倍に留まった。

(v) 払跡空洞における天盤の崩落のしやすさや先行圧の大きさについては、層自体の強度よりも層間強度の方が強く影響する。

また、試験の設定条件が類似した現場の計測結果と比較して、以下のような知見が得られた。

(vi) 先行圧の発生位置や大きさについては、模型B-3で得られた結果と大略一致した。

(vii) 払の接近に伴う天盤の沈下挙動や払跡の未崩落域の長さについても両者で一致がみられた。

(viii) 現場における層間強度特性は、3つの模型の中ではB-3に近く、かなり小さいと推定される。

謝辞 実験を進めるに際しては、中村章博士（北海道大学工

学部助手）より幾つか有益な助言を賜った。また、実験の実施と結果の解析・整理については、木村信彦君（現 神岡鉱業（株））、萩野克彦君（北海道大学工学部大学院生）、杉田裕君（現 動力炉・核燃料事業団）、後藤達夫君（現 三菱電機（株））初め、多くの後輩諸君の助力を頂いた。数値解析では、宋文洲氏（シーズ・ラボ（株））の開発した構造解析ソフト『2D- σ 』を使用した。ここに記して謝意を表する次第である。

引 用 文 献

- 1) Park, D. W. and Gall, V.: Rock Mechanics as a Guide for Efficient Utilization of Natural Resources, Khair (ed.), Proceedings of the 30th U.S. Symposium, 133～140, (1989)
- 2) 石島洋二・杉浦高広・中村 章・出口剛太：資源・素材学会誌, 108 [No.3], 173～186, (1992)
- 3) Jacobi, O. et al.: Praxis der Gebirgsbeherrschung, VERLAG GLUCKAUF GMBH, ESSEN, 482P, (1976)
- 4) 蔣宇靜・江崎哲郎・宋振騏：資源・素材学会春季大会講演要旨集, No. 1111, 21～22, (1991)
- 5) 佐藤一彦・板倉賢一・菱谷智幸・中垣 薫：日本鉱業会誌, 103 [1187], 17～22, (1987)
- 6) Gupta, K. K., Singh, T. and Singh, D. P.: The AusIMM Illawarra Branch, 21st Century Higher Production Coal Mining Systems—Their Implications, Wollongong, NSW, 206～214, (1988)
- 7) 岡村 宏・菅原勝彦・小夏英幹・兼重 修・尾原祐三：日本鉱業会誌, 95 [1097], 387～392, (1979)
- 8) 亀田伸裕・西田 正・御厨誠司：日本鉱業会誌, 99 [1145], 543～548, (1983)
- 9) 南 茂夫：科学計測のための波形データ処理, 140～165, CQ出版社, (1986)
- 10) 井上博之・金子勝比古・佐々宏一・伊藤一郎：日本鉱業会誌, 94 [1083], 323～327, (1978)
- 11) FEM研究室(NKK(株))：2D- σ 使用説明書, (1991)
- 12) (財)石炭技術研究所：昭和60年度鉱山保安技術調査受託事業成果報告書, 87～150, (1986)
- 13) (財)石炭技術研究所：昭和61年度鉱山保安技術調査受託事業成果報告書, 第1巻, 251～279, (1987)
- 14) Bieniawski, Z. T.: Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling, A. A. Balkema, 82～83, (1984)
- 15) 木村 治・菅原勝彦・岡村 宏：日本鉱業会誌, 97 [1116], 89～94, (1981)
- 16) (財)石炭技術研究所：昭和61年度鉱山保安技術調査受託事業成果報告書, 第1巻, 298～314, (1987)
- 17) Whittaker, B. N. and Pye, J. H.: Design Methods in Rock Mechanics, 16th Symposium on Rock Mechanics, 198～209, (1975)
- 18) 福田和寛：採炭に伴う岩盤の変形挙動に関する研究, 博士論文, 北海道大学, (1984)
- 19) Guoqi, He and Wilson, T. H.: Rock Mechanics as a Guide for Efficient Utilization of National Resources, Khair (ed.), Proceedings of the 30th U.S. Symposium, 327～334, 1989