

成層岩盤中に開削された空どうの周辺の応力について

荻野正二*

Stresses around Openings in Bedded Rock.

Shoji OGINO

Abstract

Distribution of stresses about rectangular openings excavated in bedded rock was investigated by means of photoelastic experiments using 37 kinds of models made of gelatine jelly.

By those model experiments, influence of ratio of the breadth to the height of the opening, thickness and elastic modulus of immediate roof and high roof, thickness of packs in the goaf, and fissures contained in the immediate roof or the high roof on the distribution of stresses around the opening was studied. Influence of the thickness of immediate roof, height of caved rocks in the goaf or rigidity of face props in long wall working face were investigated as well.

As the results of those experiments, following conclusions were obtained :

1. The tensile stresses of the roof in the bedded rock are larger than these stresses which arise in the non-bedded rock, and the tensile stresses on the roof are larger than the tensile stresses on the floor.
2. When the immediate roof is thick, the tensile stresses on the roof and the compressive stresses on the side walls are considerably smaller than those stresses which arise when the immediate roof is thin.
3. When the high roof is thick, the tensile stresses on the roof are still more small, and the compressive stresses on the side walls are a little larger than these stresses which arise when the high roof is thin.
4. When the modulus of elasticity of the immediate roof is large, the tensile stresses on the roof are larger and the compressive stresses on the side walls are smaller than these stresses which arise when the modulus of elasticity of the immediate roof is large.
5. The compressive stresses on the face decrease as the thickness of the packs in the goaf increases. However, the magnitudes of tensile stresses on the roof undergo only little change.
6. When the immediate roof is fissured, tensile stresses on the roof are almost equal to zero.
7. When the high roof is fissured, the tensile stresses are larger as compared with the case in which the high roof is not fissured.
8. The compressive stresses on the long wall face decrease as the height of caved rocks in the goaf increases.
9. The compressive stresses on the face decrease as the rigidity of face props increases.

* 資源工学教室

1. 緒言

地下に空どうを開削したとき、その空どうの周囲の岩盤に現われる応力の変化は岩盤の力学的性質によって異なることはいうまでもない。鉱山・炭鉱において採掘の対象となる岩盤は、硬い密な岩石で構成されている場合が多いが、通常、節理・層理・断層・採掘の影響によって発生した亀裂などの不連続面を持っており、このような不連続面が著しく発達している場合も少なくない。また岩石自身が軟弱であって塑性体として行動する場合もある。したがって坑内空どうに現われた地圧現象を論じる場合、岩盤の実情に応じて、岩盤を均質弾性体と見なすべき場合もあり、塑性体、粉体、あるいは板の積み重ねと見なした方が妥当である場合もあると考えられる。

最近十数年間に、岩石力学や坑内地圧に関して活発な研究が進められて来ており、特に岩盤を連続した均質弾性体と仮定して、坑内空どうのまわりの岩盤中の応力を解析する研究は数多く発表されている¹⁾²⁾。また、成層岩盤中に開さくされた空どうのまわりの応力に関しても、直交異方性弾性体と見なせるような成層岩盤について理論や光弾性実験による研究が行なわれている³⁾⁴⁾。

炭鉱の地山は、砂岩・けつ岩、炭層などのたい積岩で構成されているが、緩傾斜の炭層を長壁切羽によって採掘する場合、天盤が各層ごとに板として行動することはしばしば経験されることである。このような緩傾斜の炭層に長壁切羽を開設して、切羽面を進行させて行く場合、採掘跡の空どうの幅がある限度を越え、ると、天盤の岩層に破壊が生じ、適当な支持物がなければ崩落を起こして、その結果切羽に大荷が現われることになる。

このような天盤の崩落を起こす採掘幅は、天盤の各岩層の厚さ、岩石の強度その他の諸性質、亀裂の状態、採掘の進行速度など多くの条件に関係するので、これをはりの理論によって決定することは妥当でないと考えられる⁵⁾。

また、長壁採炭切羽の天盤が丈夫な砂岩層である場合と、軟弱なけつ岩層である場合との、炭層内の地圧分布や天盤制御方法の相異についても、現場での経験に基づく研究が発表されているが、その理論的根拠は十分明らかにされていない⁶⁾。

そこで、このような問題を研究するための一つの手段として、横に長い空どうを設けた種々の条件の成層岩盤を表わす模型を用いて光弾性実験を行ない、空ど

う周辺に生じる応力の分布を求めた。

2. 実験方法

2.1. 模型の材料

緒言で述べたような、成層岩盤中に開さくされた空どうの周辺の応力を求めることを目的とする模型実験では、模型の自重によって生ずる、ごく僅かな応力を求めることが必要であるので、このような目的に適した材料であるゼラチンゼリーを使用して模型を作成した。ゼラチンゼリーはエポキシ樹脂などの光弾性材料と比べて力学的性質が不安定であって、弾性係数や光弾性感度が温度によって変化するなどの欠点を持っているが、フリッジ値は極めて低いので、上述のような、自重によって生ずる応力を求める目的には適している⁷⁾⁸⁾。

2.2. 模型の種類

この実験に使用した成層岩盤の模型は、高さ2cm、幅4cm、長さ30cmの角柱状のゼラチンゼリーを型わくを用いて作成し、これらを積み上げたものを使用した。Fig. 1は実験に使用した一連の模型の正面図を示したものであって、いずれも幅30cm、高さ30cm、奥行4cmの寸法を持っている。

模型Ⅰは非成層均質弾性岩盤中に長方形断面を持った空どうが開さくされた場合を表わす模型である。模型Ⅱは成層岩盤の各層が同一材料で作られており、また厚さも等しいとき、一つの層にその厚さに等しい高さを持つ長方形断面の空どうが開さくされた場合を表わすものである。模型Ⅲは成層岩盤の各層が同一の材料で作られており、直接天盤層の厚さが $2h$ 、他の各層の厚さが h である場合の模型である。模型Ⅳは大天盤層の厚さが $2h$ 、他の各層の厚さが h である場合の模型である。

模型Ⅴ、ⅥおよびⅦは各層の厚さが等しく、一つの層が他の層よりも弾性係数の高い材料で作られている場合であって、ハッチを施した部分が弾性係数の高い層を表わしている。模型Ⅴは採掘層、模型Ⅵは直接天盤、模型Ⅶは大天盤の弾性係数がそれぞれ高い場合に相当する。模型Ⅰ～Ⅶでは、いずれも $b/h=1, 2, 3$ および4の4通りの場合について実験を行なった。 b は空どうの幅である。

模型Ⅷは長壁切羽の採掘跡に充てんを施した場合に、充てんの高さが切羽面や上下盤の応力におよぼす影響を調べることを目的として行なった実験に使用した模型である。空どうの幅、すなわち切羽面から充てんまでの距離は層の厚さの3倍とした。空どうの右側

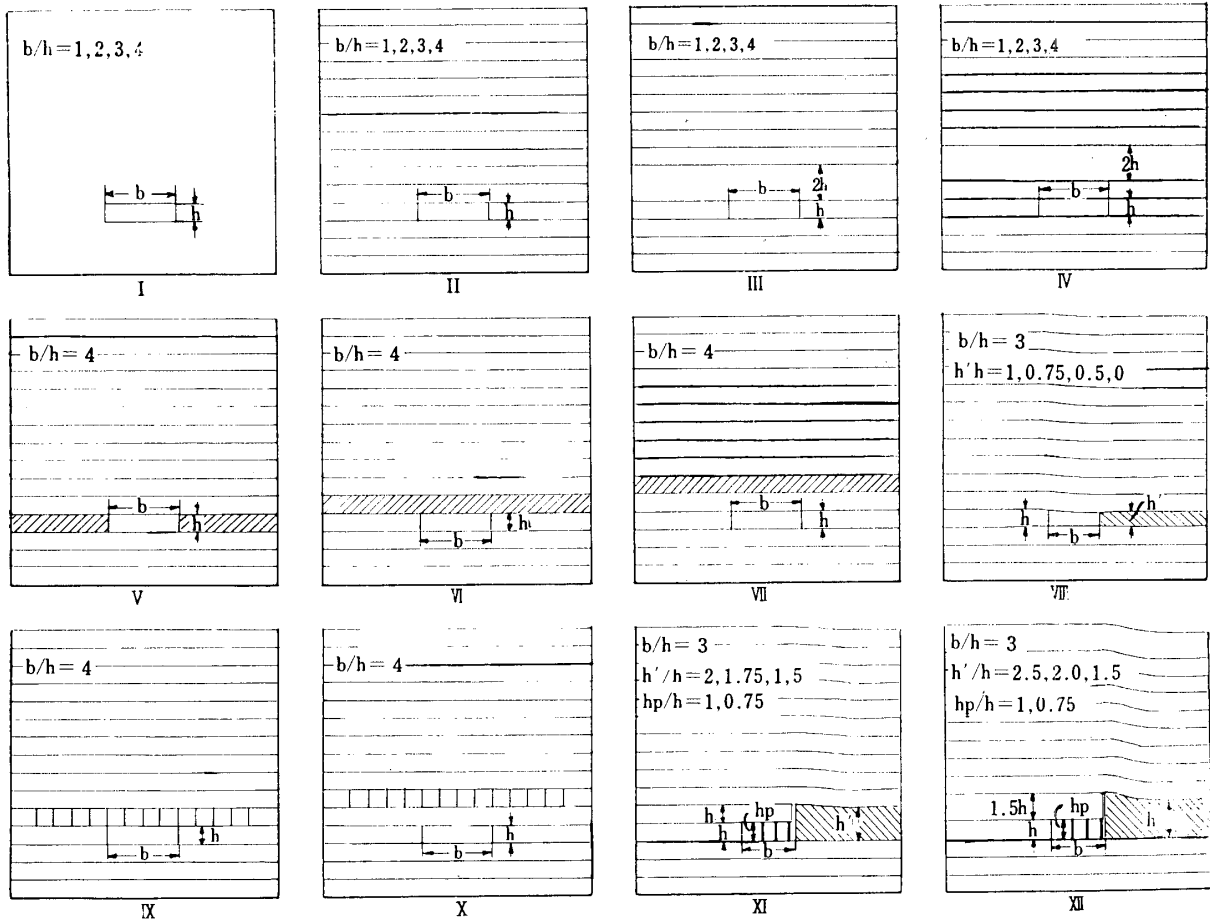


Fig. 1 Models made of gelatine jelly, employed in the photoelastic experiments.

のハッチを施した部分が充てんに相当する。充てんの厚さ h' と層の厚さ h との比を 1.0, 0.75, 0.5 および 0 の 4 通りに変化した。

模型 IX および X は、天盤に亀裂がある場合の影響を調べる実験に供したものであって、IX は直接天盤に、X は大天盤に、それぞれ層の厚さに等しい間隔で鉛直の切れ目を入れた模型である。

模型 XI および XII は、長壁切羽の採掘跡の崩落ぼたや支柱の高さを変化して、炭壁の圧縮応力を調べる実験に用いた模型である。模型 XI は直接天盤の厚さ h_1 が炭層の厚さ h と等しい場合であって、崩落ぼたに相当する部分の厚さ h' を、炭層の厚さの 2.0 倍, 1.75 倍および 1.5 倍に変化した。模型 XII は $h_1 = 1.5h$ の場合の模型であって、 h' を h の 2.5 倍, 2.0 倍および 1.5 倍に変化した。さらに、模型 XI および XII において、切羽支柱を表わす 3 枚の板の高さ h_p を $1.0h$ および $0.75h$ の 2 通りに変化した。

上述のような合計 37 種類の模型を作成して実験を行った。

2. 3. 模型の作成

模型の材料のゼラチンゼリーは、ゼラチン、グリセリンおよび水を所定の比率で混合し、加熱して溶融させたものを型わくに流しこんだ後、室温の下で約 24 時間放置して固化させたものを使用した。型わくは厚さ 5 mm のガラス板を組み立てたものを使用した。模型の表面を滑かな平面とし、また気ほうの混入を防ぐために、層の長手の方向を鉛直にした状態で注型し、厚さ 2 cm, 幅 4 cm, 長さ 30 cm の直方体の層模型を同時に 10 個作成する方法をとった。

ゼラチン、グリセリン、水の配合は 1 : 0.7 : 2.2 の重量比を標準としたが、弾性係数の高いゼラチンゼリーを作成する場合には 1 : 0.7 : 1.1 の重量比とし、また採掘跡の充てんや崩落ぼたを表わす部分の材料は 1 : 0.7 : 3.3 の重量比に配合した。

模型 I は空どうの断面形を持った石こう製の中子を、ガラス容器の中の所定の位置に固定した状態で、容器にゼラチンゼリーを注入して作成したものである。

2. 4. 等色線の観察

各模型はいずれも外部から荷重を加えた状態で、光

弾性装置の所定の位置に設置し、自重によって生じた等色線の観察および写真撮影を行なった。各模型の高さが厚さに比べて大であるため、前後に倒れやすいので、前面と後面の上部を軽く支えたが、その他は前面、後面および左右両端の面は拘束しない状態とした。

成層模型では層の境界面において応力じまが不連続となり、しま次数の決定が困難となる場合があるので、必要に応じて上部の層を切り取ったり、側面に力を加えるなどの手段によって零次のしまを生じさせ、これを基準として次数を数える方法によってしま次数の決定を行なった。

2. 5. フリンジ値の測定

模型材料のフリンジ値を測定する場合には、高さ4 cm、幅4 cmの層の1つを長さ25 cmに切断したものを試験片とし、これを円筒形の支点で支え、両端を支持したはりの状態として、自重によって生じた応力じまを数えて、次式によってフリンジ値 s を求めた。

$$s = \frac{3\gamma l^2 b}{4hn}$$

ただし、 γ はゼラチンゼリーの単位体積の重量、 b は試験片の幅、 h は試験片の高さ、 l は支点間隔、 n ははりの中央断面の上下端におけるしま次数の平均である。非成層模型の材料については、模型を切断して、上記の場合と同一の寸法の試料を作り、同様の方法でフリンジ値を求めた。

2. 6. 模型材料の弾性係数の測定

縦弾性係数は、模型を高さ2 cm、幅および奥行4 cmに切断したものを3個積み重ね、その上面に鉄板

を載せて、試料の前面および後面の縦方向の縮みを測微顕微鏡によって測定する方法によって求めた。ゼラチンゼリーのフリンジ値や縦弾性係数は温度によって変化するので、これらを測定する実験は応力模様の写真撮影に引き続いて行ない、温度の影響を少なくすることに努めた。

3. 実験結果

3. 1. ゼラチンゼリーの応力ひずみ図

実験に使用したゼラチンゼリーの圧縮試験によって求めた応力ひずみ図の1例を Fig. 2 に示す。Aはゼラチン、グリセリン、水の重量比が1:0.7:2.2、Bはこの比が1:0.7:3.3の配合のものについて得られた曲線である。この試験では試験片に亀裂が発生する程度まで荷重を加えたが、自重によって模型内に生ずる圧縮応力は最大約0.2 kg/cm²であるから、この程度の応力は材料の比例限度内にある。

3. 2. 模型の高さが応力分布におよぼす影響の検討

前述の成層模型は、角柱状のゼラチンゼリーを積み上げて作成したものであるが、このような模型では、天盤の各層が自重および上部の層の重量によって変形するので、空どうの壁面上の任意の点における接線方向の応力 σ_t と、空どうの中心の深さにおける鉛直方向の初期応力 p との比は模型の深さによって変化する。ここに初期応力 p は、上表面から空どうまでの中心での距離 H に模型材料の単位体積の重量 γ を乗じて得られる値に等しい大きさを持つ応力である。

そこで、 H を変化して、空どうの天井の中央と両端

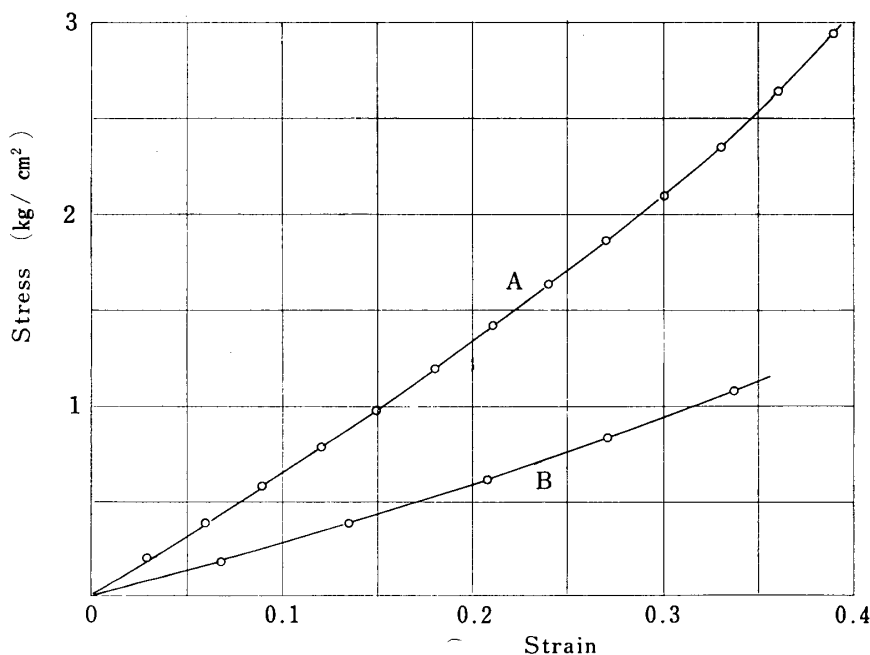


Fig. 2 Stress-strain curves obtained by compression tests.

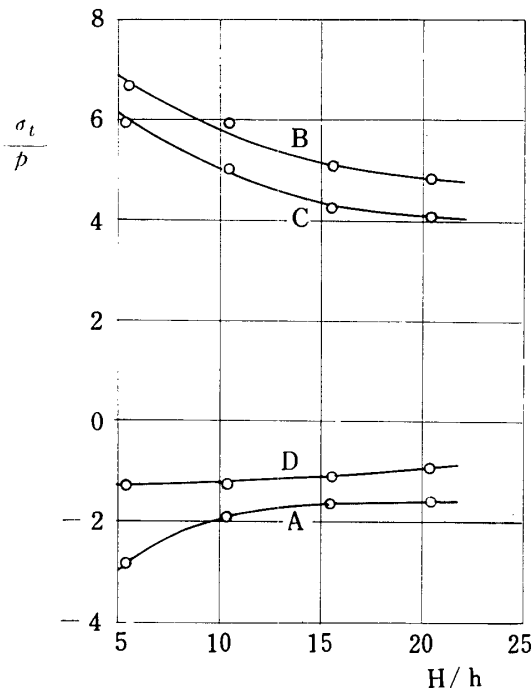


Fig. 3 Influence of height of the model on the stresses around the opening.

の点、側壁の中央の点および床の中央の点に現われた σ_t と p との比を求める実験を行ない、 σ_t/p の値がどのように変化するかを検討した。Fig. 3 は上記の実験によって得られた σ_t/p と H/h との関係を示すが、 σ_t/p の絶対値は上記のいずれの点においても H/h が増加するほど小さくなり、一定値に近づいて行く傾向が認められる。

3. 3. 模型 I, II, III, IV

これらの4系統の模型には16種類の模型が属するが、各模型の自重によって空どうのまわりに生じた応力分布を決定した。Fig. 4 (a) は模型 I の $b/h=4$ の場合、同図 (b) は模型 II の $b/h=4$ の場合の等色線写真である。(a) と (b) の等色線を比べると、成層岩盤の場合には、天盤の各層には、曲げを受けたはりに現われる等色線と同様の等色線が認められ、空どうの天井や両側壁の表面の応力は非成層岩盤の場合よりもかなり高くなっていることがわかる。また空どうの天井には床面よりも高い引張応力が現われていることが認められる。Fig. 5 は空どうの幅と高さの比 b/h が 1, 2, 3 および 4 である場合のおのおのについて、模型 I, II, III および IV の空どうの壁面上の応力分布を示したものであって、いずれも空どうの左半分の壁面の輪郭を一直線に展開したものを横軸とし、空どうの壁面上の任意の点における壁面の接線方向の応力 σ_t と、空どうの中心を通る水平線上の諸点における鉛直方向

の初期応力 p との比を縦軸にとったものである。

天井の中央を A, 天井の両端を B, 側壁の中央を C, 床面の両端を D, 床面の中央を E とすれば、上記の実験結果からこれらの諸点の応力係数 σ_t/p と b/h との関係は Fig. 6 に示すようである。

模型 A, B, C, D のいずれにおいても、空どうの天井と床面にはほとんど全面にわたって引張応力が生じており、それぞれの中央において引張応力が最大となっている。また、天盤の引張応力の最大値は下盤の引張応力の最大値よりも高く、その差は空どうの幅が増すほど大きい。

成層岩盤と非成層岩盤とを比較すると、空どうの幅が同じであれば、成層岩盤の方が天盤の引張応力や側壁の圧縮応力が高く、 $b/h=4$ の場合では、模型 II の空どうの天盤に現われる最大引張応力は模型 I の空どうの天盤に現われる最大引張応力の約 2.1 倍となっており、模型 II の空どう側壁の圧縮応力は模型 I のその約 1.6 倍となっている。

模型 III, すなわち空どうの直接天盤の厚さが他の各層の 2 倍である場合、天盤に現われる引張応力の最大値は模型 II の場合の約 0.89 倍、側壁に現われる圧縮応力の最大値は模型 II の場合の約 0.53 倍であって、床面に現われる引張応力は模型 I の場合とほとんど等しい。

模型 IV, すなわち大天盤の厚さが他の各層の厚さの 2 倍である模型では、空どうの天盤に現われる引張応力の最大値は模型 II の場合の約 0.58 倍、側壁に現われる圧縮応力の最大値は模型 II の場合の約 0.70 倍となっている。これは模型 IV の大天盤の曲げ剛性が模型 II の場合の 8 倍であって、大天盤から直接天盤に加えられる荷重が減少するためであると考えられる。

3. 4. 模型 V, VI, VII

模型 V, VI および VII ではそれぞれ採掘層、直接天盤および大天盤層の材料の弾性係数がほぼ 5.43 kg/cm^2 他の各層の材料の弾性係数が 2.25 kg/cm^2 である。Fig. 7 はこれらの各模型の空どうの壁面上の応力分布を示したものであって、Fig. 5 と同様に、空どうの左半分の輪郭を一直線に展開したものを横軸とし、空どう壁面上の任意の点における輪郭の接線方向の応力 σ_t と p との比を縦軸として示されている。図の 3 本の曲線を比較すると、空どうの床面の応力は大差はないが、側壁の圧縮応力は模型 V, すなわち採掘層の弾性係数の高い場合が最も高く、次は模型 VI, すなわち直接天盤層の弾性係数が高い場合であって、大天盤の弾性係数が高い模型 VII では最も低くなっている。

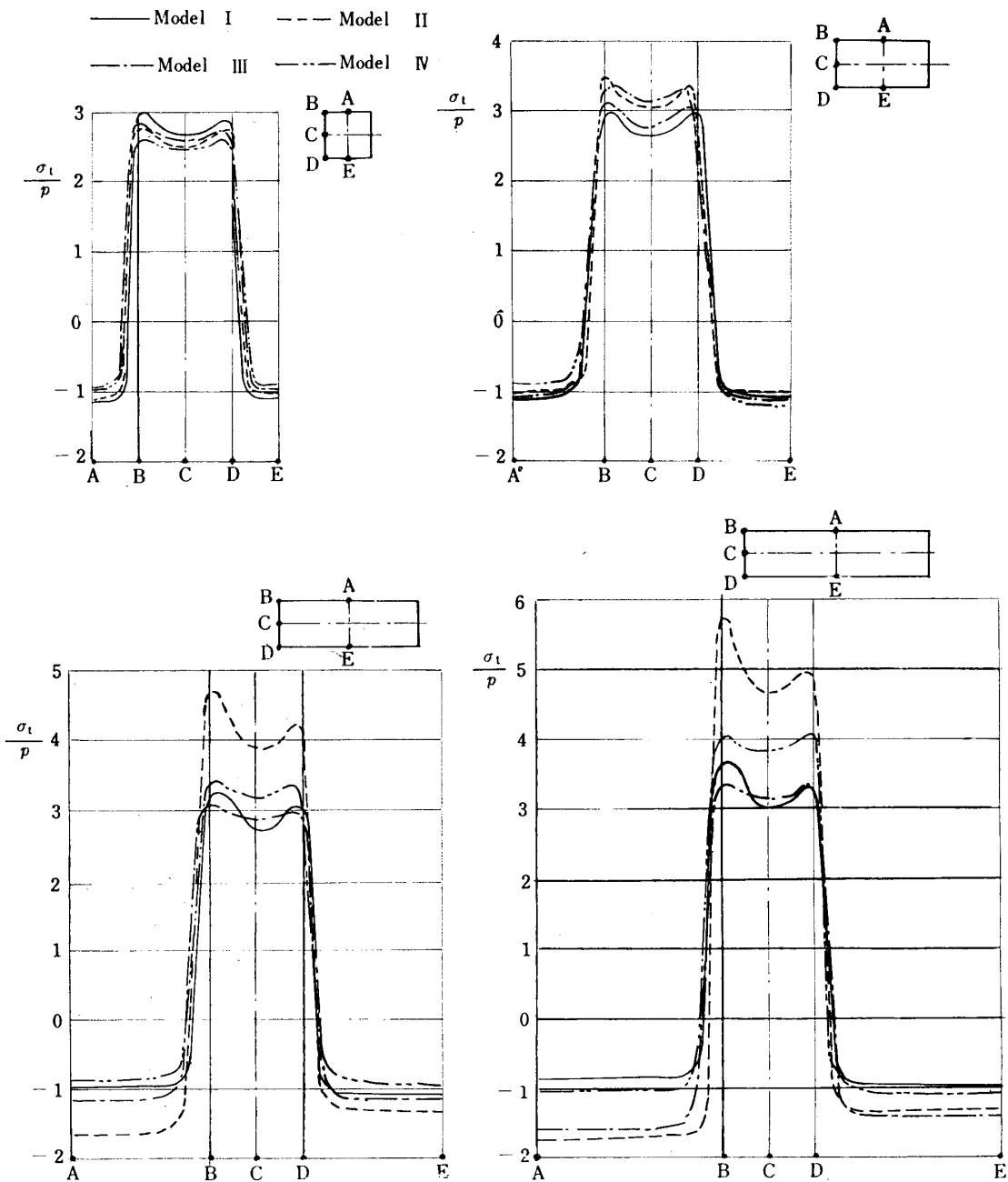


Fig. 4 Distribution of stresses around the openings in models I, II, III and IV.

空どうの天井に現われる引張応力の大きさは模型VIが最も高く、模型Vがこれに次ぎ、模型VIIが最も低い。模型VIの空どうの天井の引張応力が高いのは、直接天盤の弾性係数が大きく、曲げ剛さが大であるために、大天盤から受ける荷重が増すことによるものと考えられ、また、模型VIIの空どうの天井の引張応力が低いのは、大天盤の曲げ剛さが大きく、直接天盤に上方から加えられた荷重が小さいためと考えられる。空どうの左右の層に現われる等色線の状態から判断すると、模型VIIは模型IIの $b/h=4$ の場合よりも側壁付近での応力集中度が低い。このことは、採炭切羽での観

察に基づき、砂岩天盤の切羽の炭壁の内部では、けつ岩天盤の場合に比べて炭壁付近の地圧の集中度が低く、増加地圧が広範囲に分布しているという事実を裏付けているものと考えられる。

3.5. 模型 VIII

模型VIIIは長壁切羽の採掘跡に充てんを施した場合に相当し、層の厚さの3倍の幅を持った空どうの右側の充てんに相当する部分を、縦弾性係数が 1.05kg/cm^2 の軟かい材料で作し、採掘層の厚さの $\frac{3}{4}$ の場合、 $\frac{1}{2}$ の場合および無充てんの場合の4通りについて実験を行なった。Fig. 8は空どうの天井の中央の

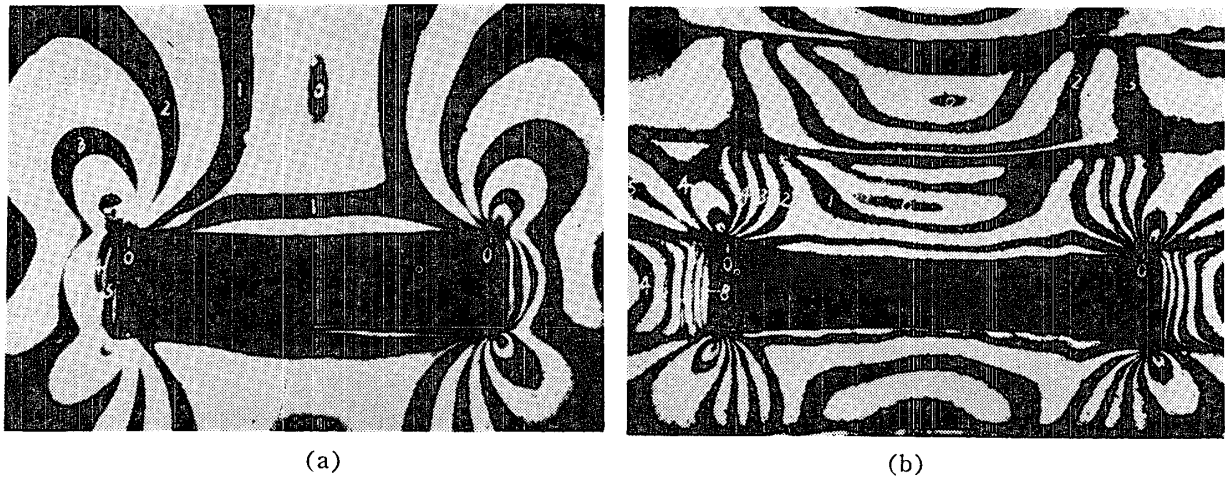


Fig. 5 Stress patterns of models I and II
 ($b/h=4$) made of gelatine jelly.
 (a) : Model I, (b) : Model II

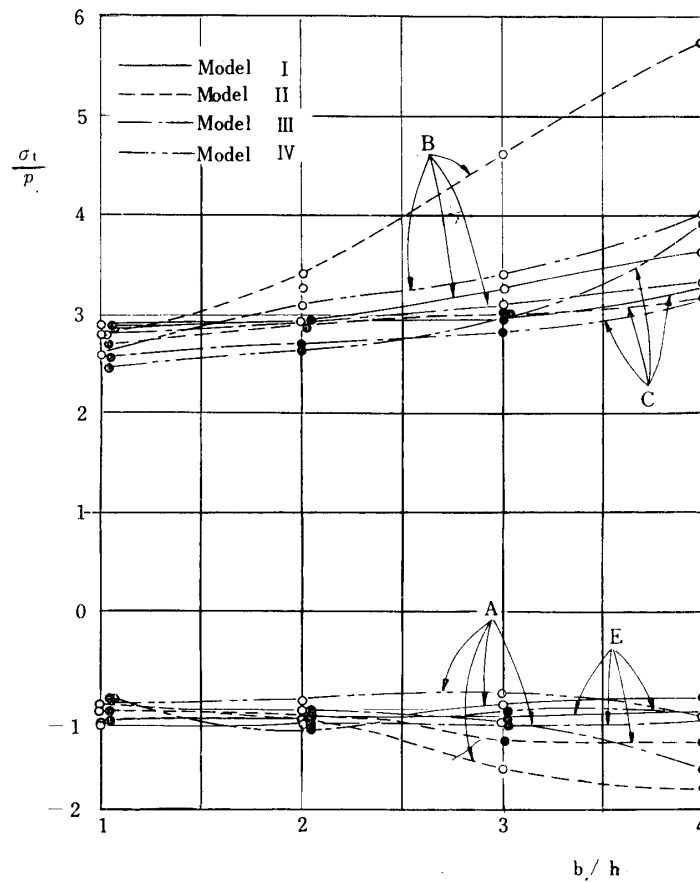


Fig. 6 Relation between b/h and magnitudes of stresses on several points around the openings in models I, II, III and IV.

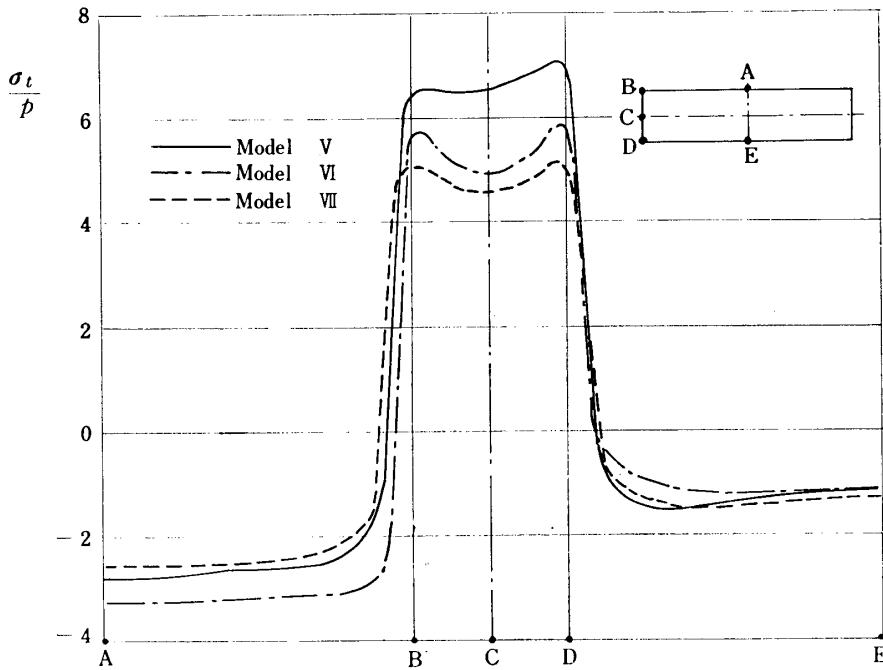


Fig. 7 Distribution of stresses around the openings in models V, VI and VII.

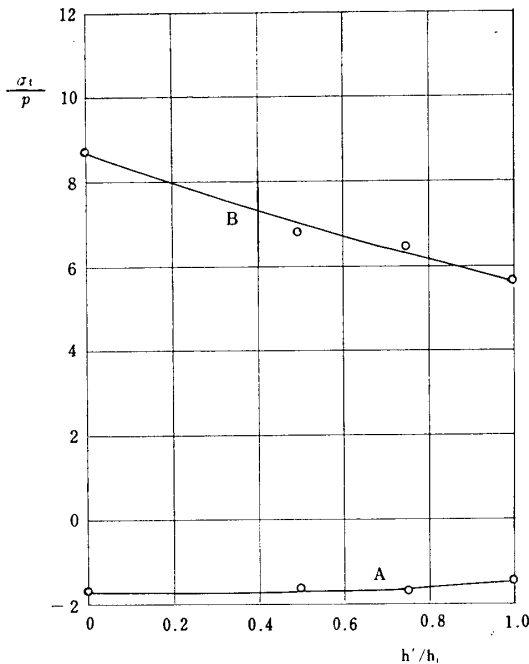


Fig. 8 Relation between the thickness of the packs and stresses on two points in model VIII.

点Aおよび切羽面上端Bにおける壁面の接線方向の応力 σ_t が充てんの高さによっていかに変化するかを示したものであって、 h' は充てんの高さ、 h は層の厚さを表わす。この図によれば、充てんの厚さが減少するほど切羽面の圧縮応力が増加し、最大 $8.8p$ となって

いるが、天盤の中央部の引張応力の変化は少ない。

3.6. 模型 K, X

模型KおよびXは、直接天盤および大天盤に簡単な条件の亀裂を含む場合に相当する。Fig. 9に、これらの空どうの壁面上の応力分布を示す。模型Kでは直接天盤の亀裂面の上部で、その両側のブロックが押しあっているが、空どうの表面付近の応力は切れ目のためにほとんど消失している。また模型Xでは、大天盤の重量の大部分が直接天盤にかかり、直接天盤に生ずる曲げモーメント

が大きくなって、空どうの天井には高い引張応力が現われており、その最大値は約 $2.7p$ である。

3.7. 模型 XI, XII

模型XIおよびXIIは長壁切羽の直接天盤の厚さ、崩落ぼたのたい積高さおよび切羽支柱の剛性が切羽空間のまわりの岩盤中の応力、特に切羽面の圧縮応力におよぼす影響を調べることを目的とする実験に使用した模型である。模型XIは直接天盤の厚さ h_1 が炭層の厚さ h に等しい場合、模型XIIは $h_1=1.5h$ の場合に相当する。模型XIでは支柱の高さ h_p が h に等しい場合および h の0.75倍である場合のおのおのについて、崩落ぼたのたい積高さ h' と h との比を1.5、1.75および2.0に変化し、また模型XIIでは、 $h_p/h=1$ の場合および $h_p/h=0.75$ の場合のおのおのについて、 h'/h の値を1.5、2.0および2.5に変化した。採掘跡の崩落ぼたを表わす部分には、縦弾性係数が 1.05kg/cm^2 の軟かいゼラチンゼリーを用い、また支柱に相当する部分には厚さ1.0mm、幅40mm、高さ20mmおよび15mmの亚克力樹脂板を使用した。Fig.10は切羽面の中央の点Aおよび切羽面上端の点Bにおける壁面の接線方向の圧縮応力 σ_t と h'/h との関係を示したものである。この図によれば、崩落ぼたのたい積高さの増加に伴って切羽面に生ずる圧縮応力が低下し、直接天盤の厚さが厚い場合と薄い場合とを比較すると、厚い

場合の方が炭壁面の圧縮応力が大きい。また、 h_p/h の値が1である場合と0.75である場合とを比較すると、後者の方が炭壁の圧縮応力が高い。実際には、天

盤の岩層が時間の経過に伴って沈下し、切羽支柱や崩落ぼたに支えられるようになるのであるから、上記の模型実験は実際と比べて事情が著しく相違するので

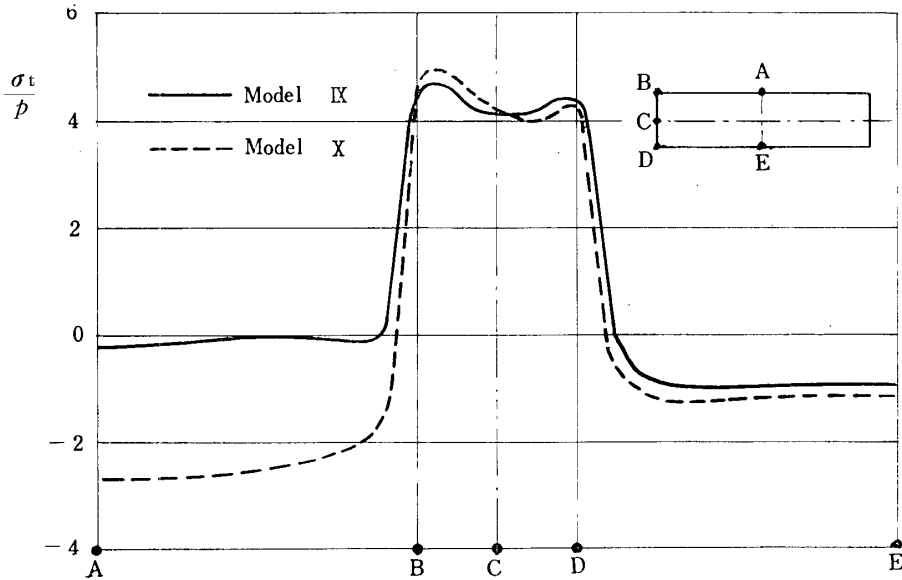


Fig. 9 Distribution of the stresses around the openings in models IX and X.

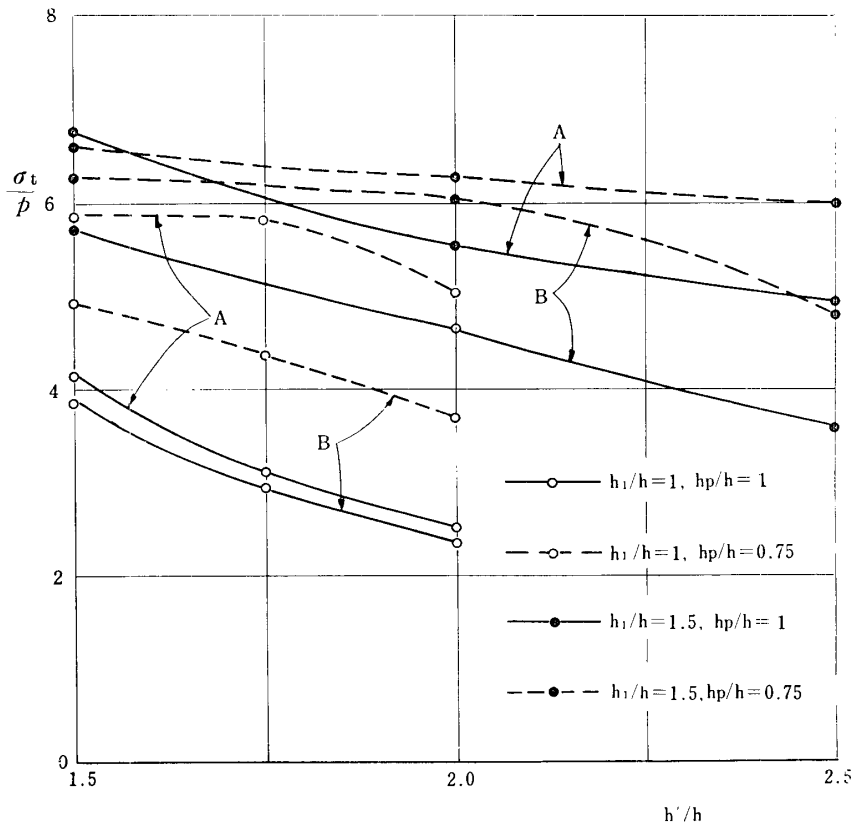


Fig. 10 Influence of the height of caved rocks, thickness of the immediate roof and rigidity of face props on the stress concentration on the long wall face.

あるが、天盤の沈下量が大きいほど炭壁の応力が高くなる傾向は、実際の切羽にも適用できるものと考えられる。

4. 模型と実物の相似に関する検討

模型実験では、模型と実物との応力や変形の相似について考慮する必要がある。連続した均質弾性体の板を使用する2次元光弾性実験では、模型の弾性係数は応力分布に関係しないので、模型実験の結果をそのまま実物に適用することができるが、前述のような成層岩盤の模型実験では、模型の内部には不連続の箇所を含み、また弾性係数の異なる材料で作成した部分が含まれていることや、集中荷重が作用する場合もあるので、模型と実物とか幾何学に相似であっても、模型および実物の材料の弾性係数、比重量および集中荷重の大きさの間にII定理の諸条件を満足する関係が存在しなければ応力分布の相似は成立しない。

したがって、この論文で述べた模型実験の結果は、そのまま模型と幾何学的に相似な成層岩盤に対して適用することはできないが、定性的な傾向を把握する上には役立つものと考えられる。

5. 結 論

炭鉱の岩盤は主として砂岩・けつ岩・炭層から構成される成層岩盤であって、岩石の強度は、通常、金属鉱山の岩石の強度よりも低く、坑道や切羽の周囲の岩層の破壊や変形による空どうの狭小化や支保の破壊が生じやすいので、坑内盤圧の問題は金属鉱山の場合よりも重要である。しかし、成層岩盤中に開さくされた空どうの周辺の岩盤に生ずる応力に関して従来発表されている研究結果は極めて少ないので、この問題を模型実験によって研究した。

この実験では、ゼラチンゼリーを使用して37種類の模型を作成し、空どうの幅と高さの比、直接天盤の厚さ、採掘層・直接天盤・大天盤の弾性係数および採掘跡の充てんの厚さを変化して、2次元弾性実験によって空どうの壁面に生ずる応力分布を求め、また、直接天盤または大天盤に亀裂を含む場合、長壁切羽の採掘跡の崩落ぼたのたい積高さや支柱の剛性度を変化した場合についても模型実験を行なった。これらの実験の結果から得られる結論を要約すれば次のようである。

1. 成層岩盤では、非成層岩盤と比較して天盤の表面の引張応力や側壁の圧縮応力が高く、また天盤の引張応力は、床面の引張応力よりも高い。
2. 直接天盤が厚い場合に、空どうの天井に生ずる引張応力および側壁に生ずる圧縮応力は、直接天盤が

薄い場合よりもかなり低い。

3. 大天盤が厚い場合に空どうの天井に生ずる引張応力は、直接天盤が厚い場合の天井の引張応力よりもさらに低く、側壁の圧縮応力は直接天盤が厚い場合よりもやや高い。

4. 直接天盤の弾性係数が高い場合には、これが低い場合に比べて、空どうの天井に現われる引張応力は高く、側壁の圧縮応力は低い。

5. 大天盤の弾性係数が高い場合は、直接天盤の弾性係数が高い場合に比べて空どう天井の引張応力および側壁の圧縮応力が低い。

6. 採掘跡の充てんの厚さが増加するほど、切羽面の圧縮応力は低下するが、天井の引張応力には大きい変化がない。

7. 直接天盤に亀裂を含む場合には、天井表面の引張応力はほとんど零である。

8. 大天盤に亀裂を含む場合には、亀裂のない場合よりも空どう天井の引張応力が高い。

9. 長壁切羽の払い跡の崩落ぼたのたい積高さが大きいほど切羽面の圧縮応力が低い。

10. 切羽支柱の剛性度が高いほど切羽面の圧縮応力が低い。

終わりに、ゼラチンゼリーを使用する光弾性実験その他に関して御指導をいただいた、京都大学工学部平松良雄教授、岡行俊助教授に厚く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 日本材料学会：岩石力学とその応用、丸善(1966) P.227
- 2) F. Mohr: "Gebirgsmechanik", Hermann Hü bener Verlag K. G., Goslar (1963) S. 56
- 3) 兼重 修, 川本眺万, 岡村 宏: 日本鉱業会誌, **76**, 614 (1960)
- 4) G. Sonntag: Bauingenieur, **33**, 344 (1958)
- 5) P. B. Bucky, A. T. Toering: Engg. & Mining J., **136**, 178 (1935)
- 6) F. Spruth "Strebausbau in Stahl und Leichtmetall", Verlag Glückauf, Essen (1963) S. 20
- 7) 平松良雄, 岡 行俊: 水曜会誌, **15**, 57 (1963)
- 8) D. C. Crisp: Proc. Inst. Mech. Engr., 1952-3, **1B**, 580

(昭和41年6月13日受理)