

坑内採炭切羽地圧解明のための諸要素の現場測定

中 嶋 滋 夫*

1. 緒 言

石炭資源開発の特徴は、工場などの装置産業とは異なり、地下深部に賦存する鉱量を求めて、生産現場が深く、遠くに移行していくことにある。世界の石炭採掘現場の深度は、時として地表面から500mの深度に及び、実績上の最深度は1,000mを超える。この点は同じ資源採掘でも石油や天然ガス採掘とは大いに趣を異にする。石油などの場合、これを包蔵する油母頁岩は、岩石そのものを採掘するのではなく、岩石中に包蔵される原油は高い圧力があるために採掘初期には自噴性があり、自噴圧を失った場合も地上から負圧を掛けて吸引すれば、これらは岩石中の孔隙を通じて油井に収集される。すなわち石油採掘の場合は、作業員や採掘設備を坑内に入れる必要はなく、すべてが地表からの遠隔作業で操業され、岩石を採集したりそのために地下深部に人工的な空洞を生ずることもない。

一方、石炭や金属鉱物の採掘に当たっては、採掘対象物が液体やガスではなく固体であるために、採掘に伴って空洞(古洞)が発生し、これを充填しない昨今の採掘法では古洞上部岩盤が逐次弛緩・崩落し、一般的にはその影響が地表面や海底面にまで達して、いわゆる地表沈下をもたらす。石炭採掘の場合、夾炭岩石層は堆積岩(水成岩)であるため、金属鉱床の火成岩と異なり、強度(圧縮強度)・ヤング率などが小さく、古洞の発生により上部岩盤の変形・破壊・崩落を促しやすい。

従って坑内石炭生産方式の成果は、地圧の制御や切羽直上に介在し、片持ち梁状に古洞に向けて懸垂する岩盤層の挙動によって切羽支保に発生する荷重をうまく制御出来るか否かにかかっている。

そこで本論文では、本格的な岩盤の挙動と、発生荷重の関係を求める準備段階として、特殊な坑内石炭生産法である累層採掘方式の下段払いの天盤となる間盤の性状を長期間観察し、解析したものである。地山一層採掘の場合、切羽支保にかかる荷重を解析するにしても、稼行対象炭層上部のどの岩盤層が、切羽支保に荷重をもたらす主要因となるかを判定するのは極めて難しい。例えば、地山一層採掘において、2弾性支点(水圧鉄柱列)を有する傾斜した不静定梁として計算することは可能であるが、肝心の梁の存在そのものが曖昧であるため、 E (梁の弾性係数)・ I (断面二次モーメント)などのデータは得られず、正確な数値化は至難である。それに対し、累層下段払いの場合は、梁として存在するのは、上下段払い間に賦存する間盤のみであるから、 I の値は既知量となり、この

*東洋大学国際地域学部；Faculty of Regional Development Studies, Toyo University

場合の不静定梁は E を唯一の未知数として計算により求めることが出来る。

ただ、累層下段払いの間盤を梁として計算する場合にも、対象となる梁の素材は鋼材ではなく、粘弾的性質を有する岩石層であるため、これを梁として材料力学解析を行うには特別の注意が必要である。

ここでは、間盤の切羽進行に伴う逐次破壊の状態を知るために、始発から終掘に至るプロセスの中での岩盤破壊状態を観察した。また、トロンピーター圏の拡大と共に、下部白亜紀層に存在する含水層からの湧水状態の影響も確認した。採掘規模の拡大に伴って、間盤が先行する本層払いに生起する地圧作用により亀裂を生ずると、梁本来の強度が損なわれ計算対象にならない。また、湧水現象があれば、岩盤層は水濡れのためにやはり著しく強度を減ずる。これら岩盤層の本来強度を損なうエリアを掌握し、その部分を棄却すれば、岩盤の本来強度を有する範囲を規定することが出来、その範囲に限り水圧鉄柱にかかる荷重測定を行うことによって、岩盤にかかる地圧現象を解明できるものと考えた。

2. 坑内石炭採掘と地圧発生の概要

坑内深部の炭層を長壁式採炭方式のような大掛かりな方法で採掘すると、それによって数100mも上部の地表面あるいは海底部分までもが撓んだり、あるいは破壊するなど様々な影響を蒙る。幸い通常の坑内石炭生産では、このような岩盤の挙動によって、切羽周辺部分に発生する圧力は山ハネのような動的な破壊現象を伴うことはなく、静的な圧力平衡によって逐次古洞内へ圧力分散を生ずるが、それでもなお地山炭層採掘の場合は切羽稼働中において、大部分の圧力が周辺炭壁によって支えられていることを窺い知ることが出来る。

さらに切羽直上50m程度までの切羽稼働中の岩盤破壊の程度を Reservoir Theory で判定してみると、稼行丈の数倍程度までの直上天盤は、著しく擾乱されている。すなわち、直上天盤が頁岩、砂岩等の互層で構成されている場合、これらは層間剝離し、かつ垂直方向の亀裂が切羽直上約10mまでの範囲では水平方向と差違のない Permeability を示すことが確認された。

採炭切羽は模型的に言えば、直上天盤については上述のように脆弱なブロック上の岩塊で構成されていて、非常に大きな外圧を受けているものと考えることが出来る。このような岩盤層の弛緩・破壊状態の中であって、なおかつ採炭切羽支保に重圧が発生するのは、切羽直上天盤中に強固で厚い岩盤層が存在し、これら岩盤層は地圧による亀裂の発生、あるいは破断を免れ、古洞ズリの自然崩落充填高さ近辺において吊り天盤を構成することに由来する。

換言すれば、切羽周辺にかかる圧力は二重構造を呈し、炭壁にかかる圧力は深度比例のいわゆる地圧であり、採炭切羽支保にかかる地圧は深度には関係なく、炭層近辺の強固な岩盤の存在することが支配的なのである。ただ、硬い岩盤の存在と同時に採掘深度の増大によって片持ち梁の支承となる切羽炭壁も破壊され、かつ切羽進行毎に破碎帯のアーチ圧分布率が異なる等、切羽支保にもたらされる地圧の要因は、決して単純なものではない。また、切羽直上15m程度までの直接天盤につい

でも、切羽支保に微妙な影響を与えることが予想される。本論文では、このような不安定な状態における採炭切羽の直上天盤の状態をより詳しく知るために、太平洋炭鉱で行った現場観測の結果を示し、直上天盤の破壊の状態につき考察した。

4. 間盤の切羽操業による弛緩・破壊の観測要領

(1) 観測現場について

観測現場は太平洋炭鉱春採鉱西10片6号下層ロングとした。同ロングは6号本層ロングと一対で、当時同鉱で全面的に採用されていた同時追い掛け累層払いを構成している。下層ロングは、一般に30mの安定距離を置いて後方に位置し、本層・下層間には約2mの間盤が下層の天盤の役割を果たし、本層の崩落したズリがその上に堆積する。間盤は Fig.1 に示したように異なる性質の6枚の岩石、石炭層からなり、崩落は主に図示の4群に別れて行われる。そこでこれらを下から、第1~4天盤と名付けた。古洞においてこの4群の間盤が喰い切られて崩落すると、本層ロング採掘跡の崩落ズリが下層古洞に二次崩落する。この時本層古洞中の残炭も共に崩落するので、観測上は、4群の間盤の部分崩落の段階では崩落ズリの色が白く、本層からの二次崩落の場合は、残炭のため色が黒く変わるので観測上好都合であった。

下層ロングにおいては、間盤が古洞に自然沈下している場合が、天盤が安定し荷重も少なく、切羽操業が容易である。これに反し、間盤が最終列柱直後で崩落して、本層ズリが下層古洞に入り込む状態は、荷重状態、天盤状態共に不安定で、切羽元から天盤崩落する危険を伴う。間盤に発生する亀裂、又は古洞の崩落線は一般に列柱間隔と一致し、古洞崩落線の観察は目視によるものではあるが、極めて正確に行われた。なお、6号下層ロングの稼行丈は約1.9mで、支保としては三井三池製作所製フェロタイプ HH-20型水圧鉄柱を使用した。

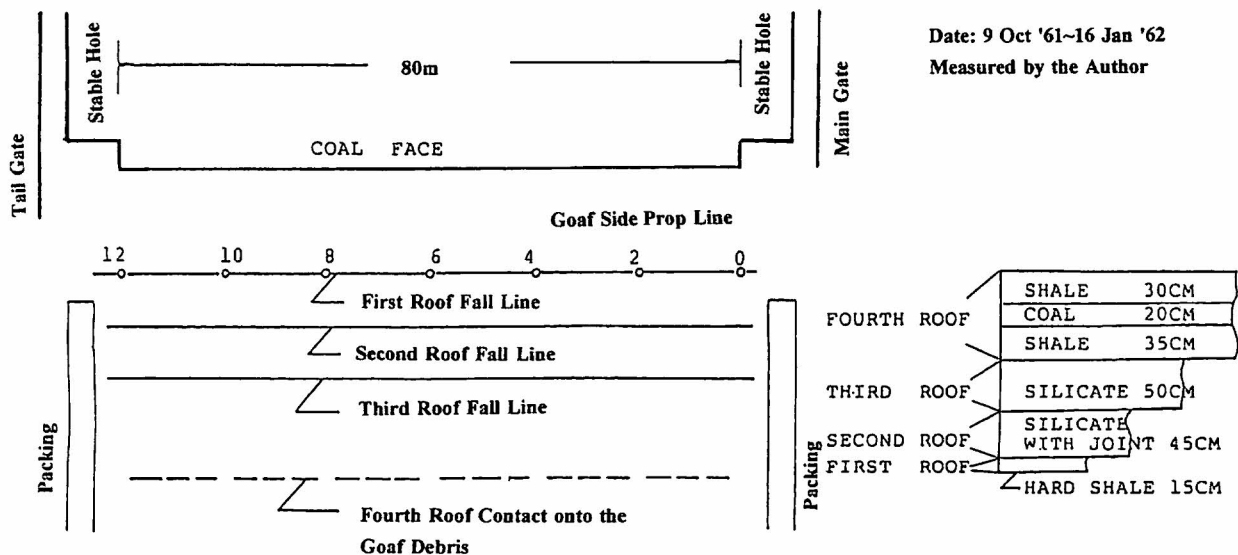


Fig.1 Prefactory Explanations on the Roof Fall at West No.10 Level No.6 Longwall

(2) 天盤崩落状況観測図 (Fig.2~6)

主なものを示すに留める。

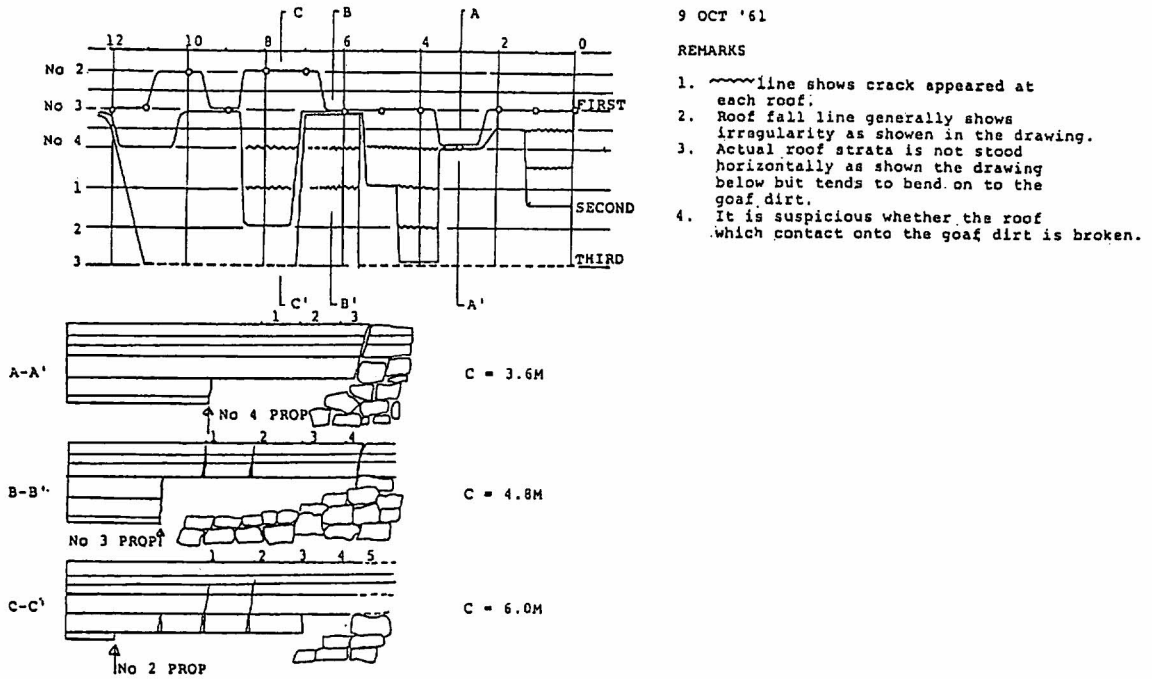


Fig.2 Roof Fall Observation (Case-1) Observed by the Author

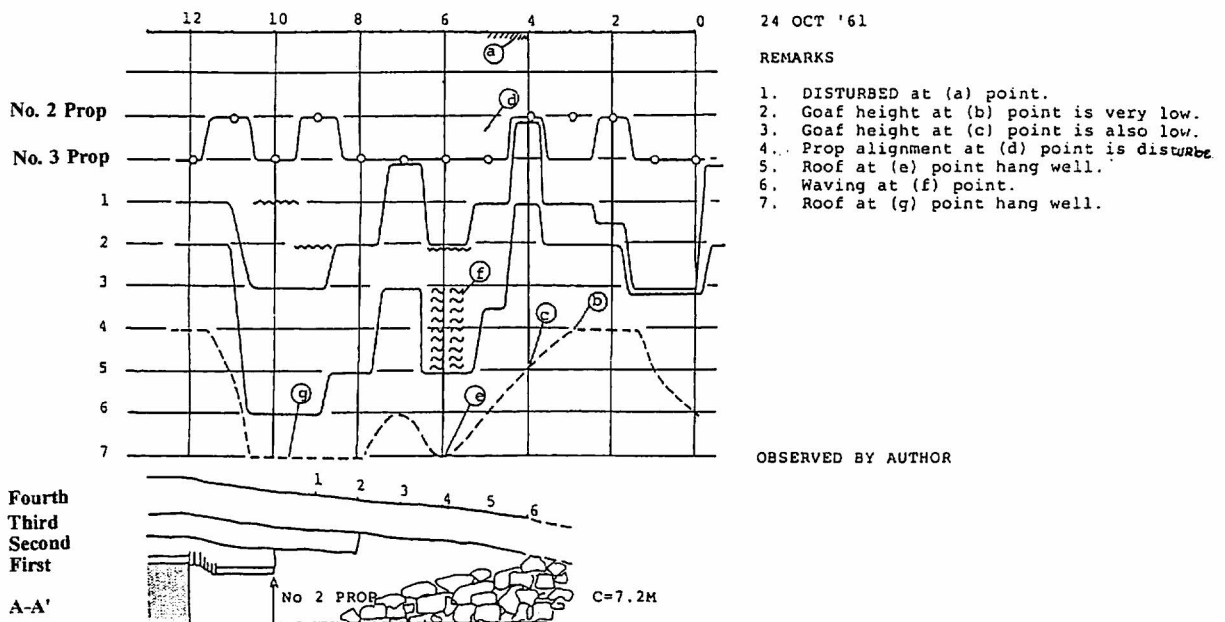
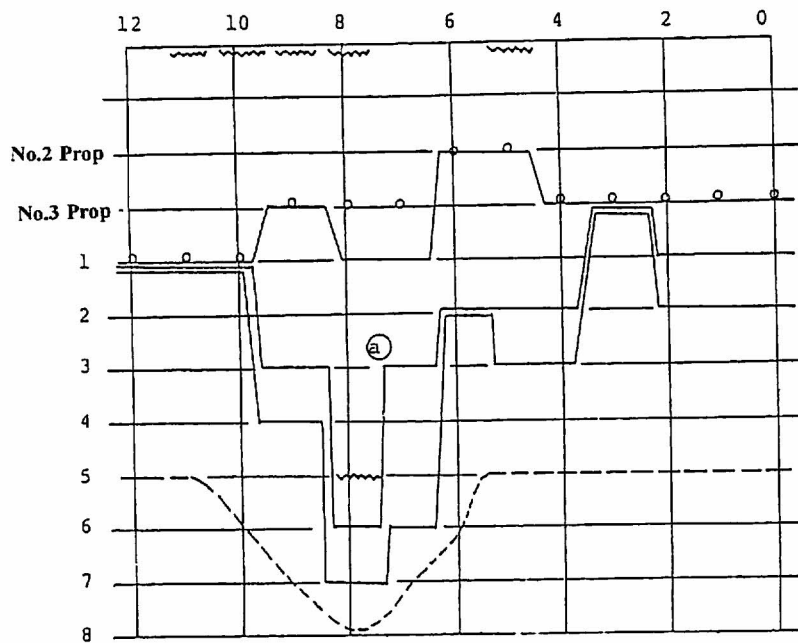


Fig.3 Roof Fall Observation (Case-11)

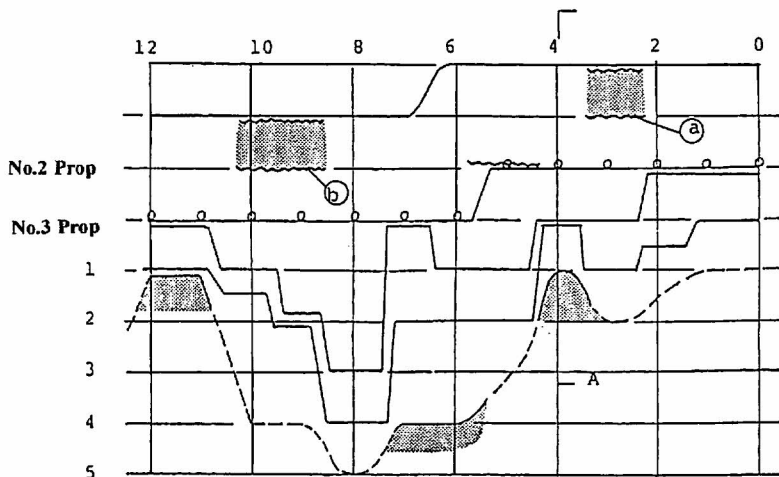


Remarks

1. Hung well at (a) Point

CHARACTERISTICS OF FLOOR AT WASTE SIDE PROP LINE	SHALE	CLAY	SHALE	CLAY	CLAY	SHALE
HEIGHT AT WASTE SIDE PROP LINE	1.60M	1.75M	1.48M	1.28M	1.45M	1.50M

Fig.4 Roof Fall Observation (Case-21)



11 Dec '61

Remarks

1. Partial first roof fall at (a) and (b) points.

Fig. 5 Roof Fall Observation (Case-31)

OBSERVED BY AUTHOR

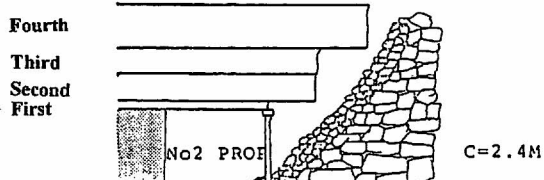


Fig.5 Roof Fall Observation (Case-31)

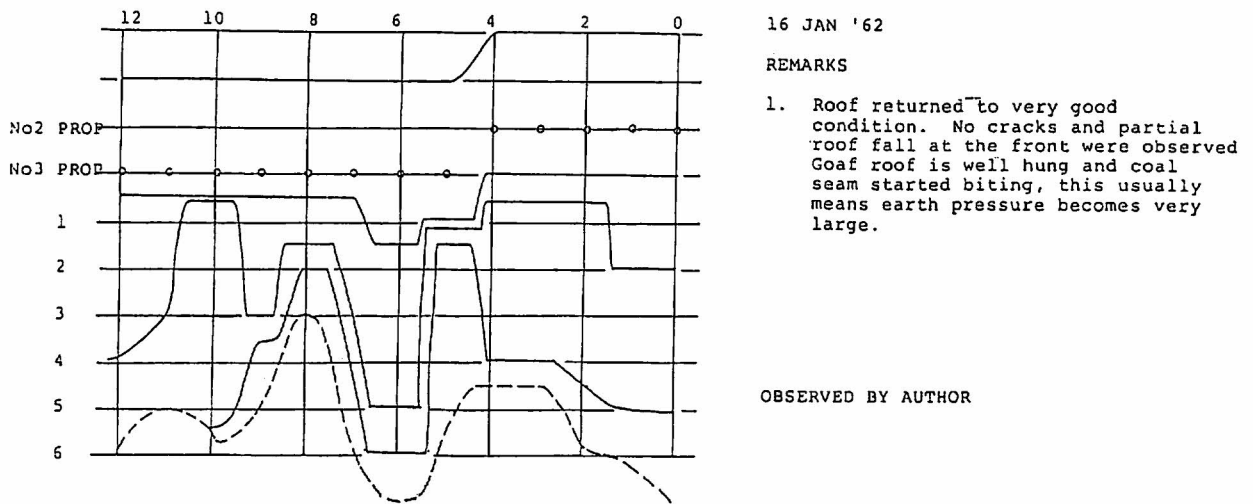


Fig.6 Roof Fall Observation (Case-36) Observed by the Author

5. 観測結果の分析

Fig.1~Fig.6 に切羽内の設けた13カ所の測点毎に第1天盤から第4天盤に至る天盤の崩落又は自然沈下の位置と観測度数の関係を示した。第1天盤から第3天盤までは操業開始の初期段階を除いて崩落し、第4天盤は一般に第3天盤までの崩落ズリの上に自然沈下することが多く、状況に応じて喰い切られることもある。

(1) 各天盤の崩落状況の分析

(a) 第1天盤の崩落 (Fig.7)

第1天盤は約15cmの厚さの硬い頁岩であるが、直接天盤であるだけに地圧の影響を容易に受け、

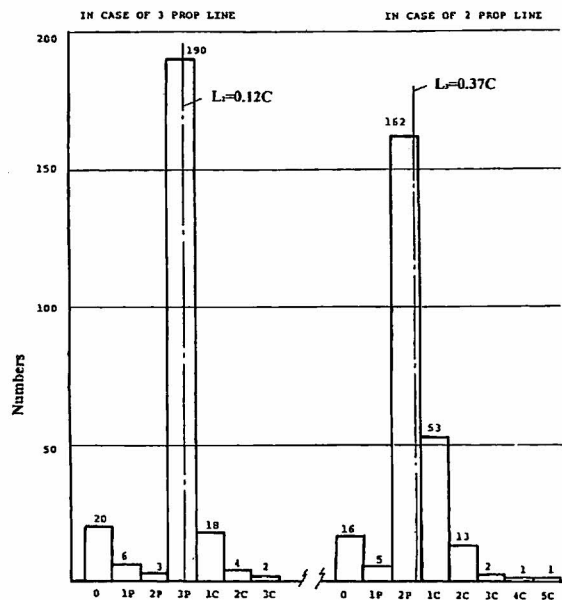


Fig.7 Histogram of Cantilevering Length of First Roof Length (P=Prop Line, C=Cantilevering Length from Wasteside, 1P and/or 1C=1.2m)

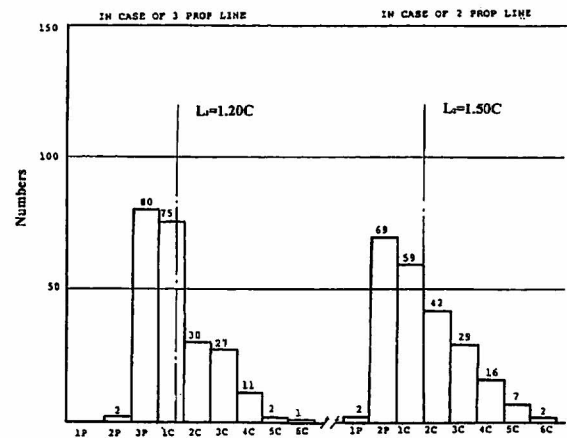


Fig.8 Histogram of Cantilevering Length of Second Roof Length (P=Prop Line, C=Cantilevering Length from Wasteside, 1P and/or 1C=1.2m)

列柱の構成が2列柱の場合も3列柱の場合も曳き柱と同時に剝離崩落する。平均崩落位置は

$$L_3 = 0.12C$$

$$L_2 = 0.37C$$

ただし

L_3 : 3列柱目を原点とした古洞方向への吊り天長

L_2 : 2列柱目を原点とした古洞方向への吊り天長

C : カッペ長 (=1.2m)

である。第1天盤が長く古洞に吊ることはなく、400点以上の観測度数中、 $L=4C$, $L=5C$ が各1点あるに過ぎなかった。反面切羽の終掘に近づくに従い、第1天盤が切羽元で崩落する頻度はかなり多く、全体の10%の比率を占めた。しかし第1天盤は薄いため、剝離しても天盤制御あるいは切羽操業に与える影響は少ない。

(b) 第2天盤の崩落 (Fig.8)

第2天盤は45cm厚の珪岩であるが、比較的脆い性質である。第1天盤の場合、崩落位置がほとんど最終列柱位置に集中するのに反し、第2天盤の崩落位置は、2列柱、3列柱の場合ともに頻度としては、最終列柱位置が最大ではあるがバラツキが大きくなり、最大吊り天長は $L=6C$ に達している。平均値としては

$$L_3 = 1.20C$$

$$L_2 = 1.50C$$

であって、何れの場合も最終列柱から1スパン (約1カッペ長) 離れた位置で崩落している。最終列柱位置より切羽元側で崩落しているのは4例のみである。

(c) 第3天盤の崩落 (Fig.9)

第3天盤は50cm厚の珪岩で初成亀裂はなく、第2天盤よりも硬い。崩落の状態は第2天盤よりもさらに不規則で、バラツキの幅も広くなり、 $L=7\sim 9C$ の吊り天長を示すものもある。平均値は

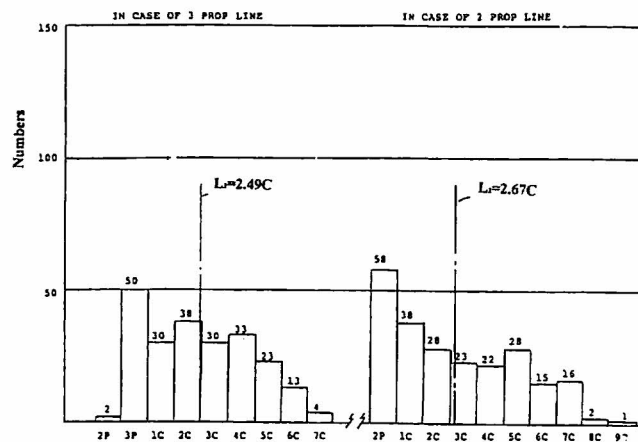


Fig.9 Histogram of Cantilevering Length of Third Roof Length (P=Prop Line, C=Cantilevering Length from Wasteside, 1P and/or 1C=1.2m)

$$L_3 = 2.49C$$

$$L_2 = 2.67C$$

で、上部の岩盤ほど吊り天長が大となることが明らかである。また、第1~3天盤とも第2列柱の吊り天長が、3列柱のそれよりも若干長い。これは時間経過の差が主因と思われるが、正確な時間との関係は把握しがたい。最終列柱より前で崩落する例はさらに少なく、2例しかない。

(d) 第4天盤の崩落及び自然沈下 (Fig.10)

第4天盤は下から35cmの頁岩、20cmの石炭、30cmの頁岩でなり、比較的長いスパンで吊るために第3天盤までの崩落ズリの上に撓んで自然沈下し、両端支持梁を構成するため一般には崩落しない。従ってこの点片持ち梁上に吊る第3天盤までの岩盤とは著しく性格を異にする。以上の理由から吊り天長も最大である。

しかし、第4天盤が崩落する場合は、 $L=1\sim 3C$ 程度の比較的短いスパンで崩落することが注目される。

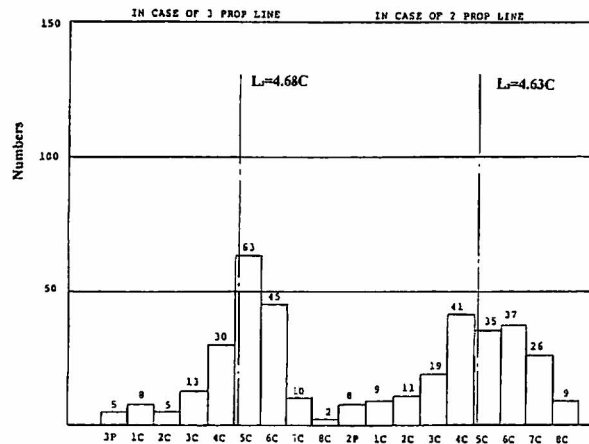


Fig.10 Histogram of Cantilevering Length of Fourth Roof
Length (P=Prop Line, C=Cantilevering Length from Wasteside, 1P and/or 1C=1.2m)

(2) 切羽進行と天盤崩落状態の変化

以上の観測は、当該切羽の採炭開始から終掘までの全採掘期間の内の大半を占めているが、筆者はこれらの全体を単に平均的に示すことは、これらの現象を生じせしめる要素が複雑多岐にわたること、及び観測図にも明らかなように全採掘期間をいくつかに分割可能な天盤崩落傾向に顕著な変化のあるところから、採炭期間を前期と後期の二つの「期」に分け、改めて各天盤毎の吊り天長を期毎に分析した。その結果を Fig.11~13に示す。

筆者は長年採炭切羽の作業上の経験として言われる「100m切羽進行すると山が落ち着く」現象のあることを根拠に、二つに期に分けた理由を次のような仮想してみた。

(a) 前期の地圧現象 (始発から約100mまで)

アーチ圧に関するこれまでの研究結果により、採炭切羽の初期段階のアーチ圧は小さい。切羽進行20mの場合のアーチ圧は約100kg/cm²程度で、石炭の圧縮強度の300kg/cm²に比べ遙かに小さい。

また炭壁圧縮量とアーチ圧受け持ち幅の関係から、切羽進行100mに至る過程のアーチ圧受け持ち幅はべき関数的変化をすることが明らかで、言い換えれば、切羽周辺炭壁に全岩盤層重量はまだ関与しておらず、切羽直上の限定された岩盤厚さが地圧の発生源として作用しており、ただ切羽進行100mまでの間にべき関数的に状況が急激に変化する。そして100m以上の採掘空間では全岩盤層が周辺炭壁に発生する地圧に関与するようになる。

すなわち、前期のプロセスで最も重要な地圧現象上の特徴は、アーチ圧がまだ小さく直接天盤には亀裂が入らないと言うことである。従って採炭切羽の進行に伴い、露出される直接天盤は炭壁を固定端とし、鉄柱を支点として古洞に伸長された片持ち梁と考えることが出来る。この片持ち梁は、アーチ圧によって地山岩石強度を損なうことがなく、十分に吊って大きな曲げモーメントにより、切羽支保の圧力を加える状態で崩落するのである。

採炭現場の維持から見ると、このように支保にかかる圧力が0からゼルポー荷重に至るまで周期的に変化することは、立柱状態が極めて不安定な状態であることを意味し、また過去の実績上、この期における崩落事故は決して少なくない。

(b) 後期の地圧現象（採炭切羽の100m進行から終掘まで）

後期においては、切羽縁辺部にかかる地圧は相対的に非常に大きくなっている。炭壁は採掘深度、岩盤の強度及び切羽進行長等の一定に割合によって破壊され、真のアーチ圧受け持ち部分は逐次炭層奥部に移動する。同時に岩盤の撓みによって破碎された炭層も一定の比率で再び岩盤層を支えるようになる。支えるべき岩盤層の重量が著しく大きくなると、岩盤がより一層撓んで古洞の崩落ズリ上に接触し、全体の圧力バランスが保たれるようになる。

このような周辺炭層の破壊現象は、単に炭層のみの破壊に留まらず、ガス透過性に関する検討結果が示すように直上天盤についてもその崩落以前に亀裂が発生していると見られる。もしこのように後期において直上天盤のアーチ圧による亀裂発生が確かであるならば、「100m進行すれば山が落ち着く」現象は次のように説明できよう。

露出された片持ち梁上の直上天盤の吊り天長は、アーチ圧による亀裂発生により地山岩石強度を失った結果、比較的短くなり、異常に長く吊って大きな曲げモーメントを発生し、切羽支保に大きな圧力を発生させることが少ない。大きなアーチ圧と岩盤の著しい撓みは、亀裂の発生のみでなく、互層を形成する岩盤層の層間剝離を惹起し、結果として直上天盤は速やかにしかも細かく崩落する。従って古洞において崩落ズリがより速やかに上部天盤の支承としての作用をすることになる。

以上の現象は、次に西6号下層の古洞崩落観測結果を各期毎に分類した分析により計数的にも明らかとすることが出来た。

6. 各期毎の各天盤の崩落状況

本分析では、西20片6号下層ロングにおいて初めて第4天盤の喰いきりの認められた10月25日以降を後期、それ以前を前期とした。本層6号ロングは10月24日までに約80m進行しており、当時まで

の6号下層ロングは約50mの切羽進行である。

(1) 第1天盤の崩落

第1天盤は15cmの薄い直接天盤であり、各期毎に分類するまでもなく、各作業サイクル毎に切羽元で亀裂が貫入するほど脆く、期別による事象の区別は意味がない。ただ、Phase-2において切羽元における剝離現象が顕著になっていることが認められた。

(2) 第2天盤の崩落 (Fig.11)

第2天盤においては、本節において仮定した後期におけるアーチ圧による亀裂の発生が明らかである。すなわち前期においては、吊り天長平均値が

$$L_2 = 2.17C$$

$$L_3 = 1.68C$$

であって、何れの場合も平均値がほぼピークとなり、かつ均一な分布状態を示している。これに対して、後期では、完全に異なる吊り天長の分布状態となり、最終列柱近辺における崩落頻度が最大となっている。この変化は、鉄柱にかかる荷重との関係は認められないので、荷重の変化によりもたらされたものではなく、間盤が先行する6号本層ロングの下盤として本層ロングにおけるアーチ圧を受けた段階で既に破壊され、容易に崩落しやすくなったものと見ることが出来る。

従って、後期における吊り天長は二つの異なる曲線、つまり二つの異なる要因の合成と見られ、Fig.11に示すように、一方の曲線は、前期で見られる第2天盤に亀裂のない場合に見られる分布であり、これに亀裂発生により岩盤の性質が変化した場合の全く異なるカーブが重畳したものと見なす

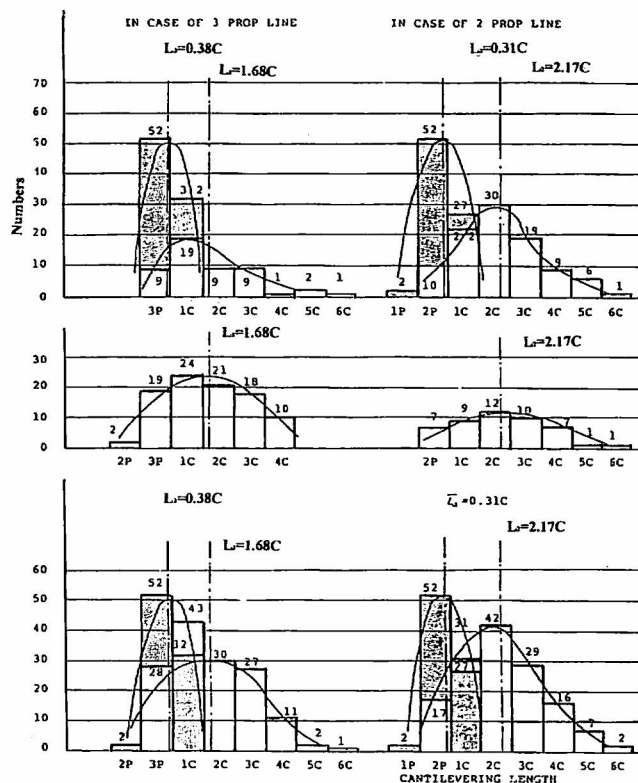


Fig.11 Histogram of Cantilevering Length of Second Roof when divided into Two Phases. Black Tone Histogram shows Special Phenomenon only appears at Phase-II

ことが出来る。

(3) 第3天盤の崩落 (Fig.12)

第3天盤の崩落も、期毎に第2天盤と全く同じ現象が認められる。すなわちその平均吊り天長は

$$L_2 = 4.41C$$

$$L_3 = 3.43C$$

であって、最終列柱よりも3~4スパン第2天盤より吊り天長が長くなり、度数の分布もほぼ同様のバラツキを示すが、後期ではやはり亀裂の発生により、曳き柱と同時に最終列柱で崩落する、全く別の性質の崩落現象が共存している。

(4) 第4天盤の崩落 (Fig.13)

第4天盤は、一般に堆積ズリ上に自然沈下し、第3天盤までの片持ち梁状の吊り天状態に比し、力学的な構造も異なり崩落しにくい。そこで第4天盤については、後期中でも完全崩落した場合のみを取り出し、自然沈下した場合との吊り天長の比較を行った。

7. 考 察

長期間にわたる採炭切羽の古洞における直接天盤の崩落状況を観察した結果を要約すると次のようになる。

第一に採炭切羽の始発点から100m程度までの範囲とそれ以降の範囲とでは、直接天盤の崩落に顕著な差違を生ずる。前述の分析に明らかなように、第一期の吊り天盤状態とは異なる小周期の天盤

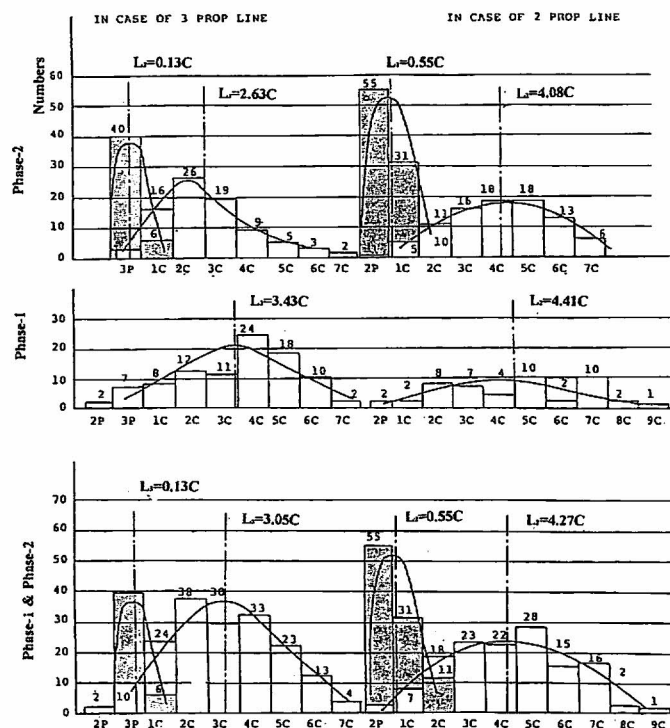


Fig.12 Histogram of Cantilevering Length of Third Roof when divided into Two Phases. Black Tone Histogram shows Special Phenomenon only appears at Phase-II

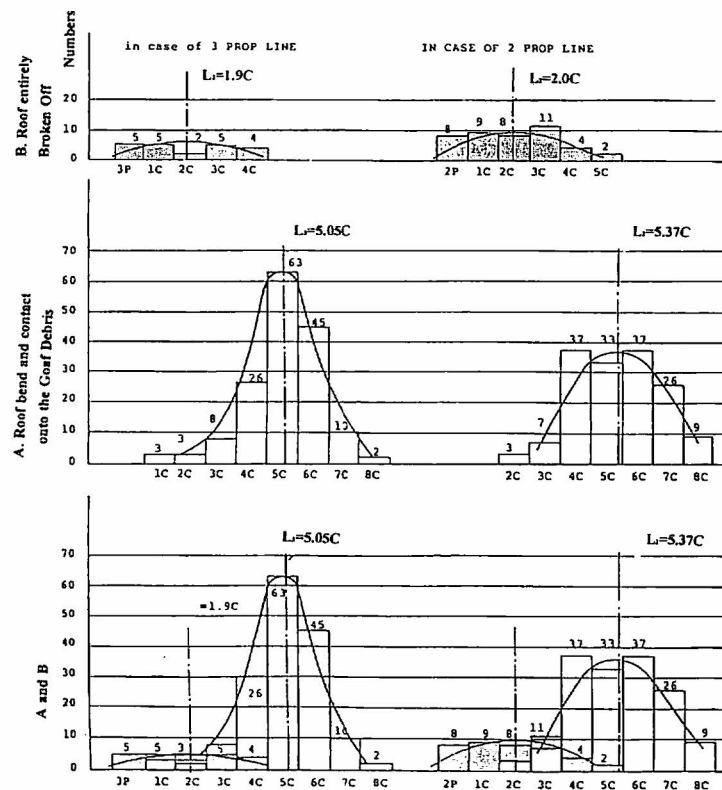


Fig.13 Histogram of Cantilevering Length of Fourth Roof when divided into Two Different Phenomena.

崩落が、第一期の周期にほぼ等しい崩落現象と重畳する形で発生する。これは、切羽進行が100m以上に達したとき、本格的アーチ圧の発生によって、直接天盤は炭壁奥部において破壊されたことを意味している。

第二にアーチ圧による直接天盤の破壊現象が、切羽進行100m前後においてこのように差のあることは、先に述べた炭壁圧縮量、アーチ圧受け持ち幅、及び地表沈下に見られる切羽進行による差と符合する。

ここにアーチ圧のメカニズムのうち、切羽初期段階における特異性が指摘できる。一般には、アーチ圧は切羽周辺炭壁に縁辺部に集中し、地表沈下も切羽切羽進行に伴って速やかに進展する。これまでに究明した地圧に関する諸現象が、進行100mまでに範囲に限っては、このようなルールに従わない理由は、先に述べた上部岩盤の吊り天盤長さに起因するものと考えられる。すなわち、地表沈下のような巨大な地圧現象は、採掘深度のほかに採掘規模（採掘面長、パネル長）も関与するが、採掘規模についてみるとその影響度を規定するのは、スパンの短い採掘面長である。従って、切羽進行が面長よりも未だ短く、例えば50mと仮定すれば、先に述べたように擾乱の影響範囲は50mをスパンとして破断角70度の範囲にあり、上部岩盤の擾乱高さは、未だ50mを超えない。この故に50mを超える上部岩盤はスパンの短さの故に撓むことが出来ず、直上岩盤部分のみが撓んでアーチ圧を発生しているに過ぎない。

第三に直接天盤のアーチ圧による破壊を、採炭切羽における天盤制御の面から見ると、支保にかかる荷重という点からは、吊り天周期の長い第一期の方が、周期的に大きな荷重を受ける危険性が

あり、一方第二期においては、アーチ圧により既に炭壁奥部で破壊され、岩塊化した脆い天盤を受け込むという実技的な困難を伴うことになる。

本論文の主目的であるウォールタイプ採炭方式の支保にかかる荷重の問題を究明するためには、以上に考察した事柄に基づき、極力切羽始発部の未だアーチ圧により天盤が破壊されない範囲における研究が肝要であると判断した。

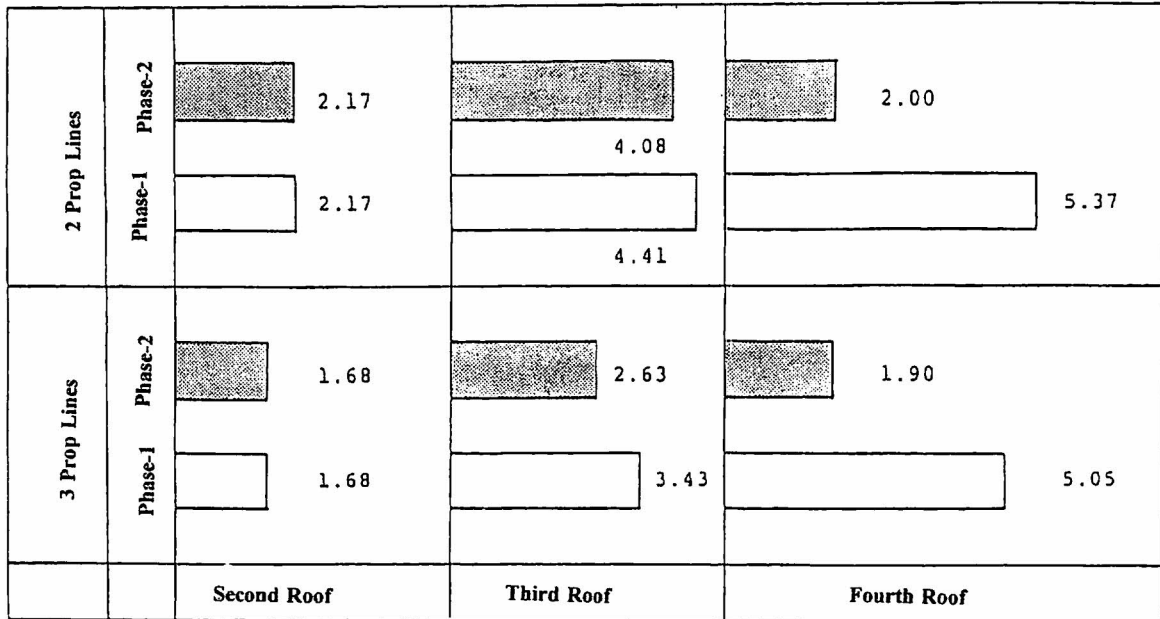


Fig.14 Cantilevering Length of Each Roof at Each Phase