



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	炭層発破により生ずる変位及び応力の坑内測定結果と発破振動が突出パラメータに及ぼす影響について
Author(s)	氏平, 増之; Ujihira, Masuyuki; 渡辺, 勉 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 137, 19-29
Issue Date	1987-10-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42051
Type	departmental bulletin paper
File Information	137_19-30.pdf



炭層発破により生ずる変位及び応力の坑内測定結果と 発破振動が突出パラメータに及ぼす影響について

氏平 増之* 渡辺 勉**

(昭和 62 年 6 月 30 日受理)

On the displacement and stress in the coal seam around a shot point and their effect against the parameters of coal and gas outbursts

Masuyuki UJIHIRA and Tsutomu WATANABE

(Received June 30, 1987)

Abstract

To evaluate the effect of blasting shock against the occurrence of coal and gas outbursts, it is necessary to prepare data regarding the dynamic behaviour of the coal seam around a shot point. We previously conducted strain and particle velocity measurement in the underground of Sorachi Coal Mine. From the measurements, it was found that the value of displacement decreases according to a power function of the distance r from a shot point and the decreasing index is -1.559 .

Then it was determined that when dynamic vibration is added to the coal seam, cohesion or the coefficient of internal friction would suddenly decrease.

1. はじめに

ガス突出を警戒している区域での炭層や岩盤に対する発破は、「この発破でカバーロックを取り去ると、それだけでバランスが崩れるかもしれない」、「応力分布が急変して新掘進面付近が急速に破壊するかもしれない」、あるいは「炭層を破壊または振動させて圧出力に対する止め金が外れるかもしれない」などを懸念しつつ行なわれていると考えられる。ガス突出発生に対する発破の影響を定量的に検討するためには、炭層の状態の把握と炭層に対する発破振動についてのデータが必要である¹⁾。本報文では、発破点火直後10数 ms 以内 (単発発破の場合) に生ずる動的変位、応力等について、空知炭鉱坑内で実測した結果を示し、ガス突出時の圧出条件式のどのパラメータに影響を及ぼすかを考察する。

2. 測定箇所及び測定方法

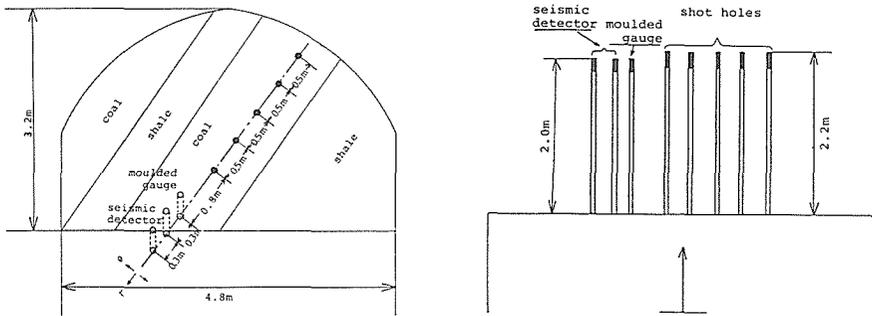
測定は、空知炭鉱一160 mL 芳野三番下層の沿層掘進切羽において行なった。炭層は厚さ 0.6 m の挟みにより上下二層に分かれ、上炭の厚さが 0.7 m、下炭が 1.3 m であった。測定孔及び発破孔を設けた下炭は、縦弾性波速度 1630 m/s、横弾性波速度 930 m/s、密度 1.32 g/cm³、動特ヤング率 2.9×10^4 kgf/cm²、圧縮強度 59 kgf/cm² 等の機械的性質を有するものであった。これはわが国

* 資源開発工学科保安学講座

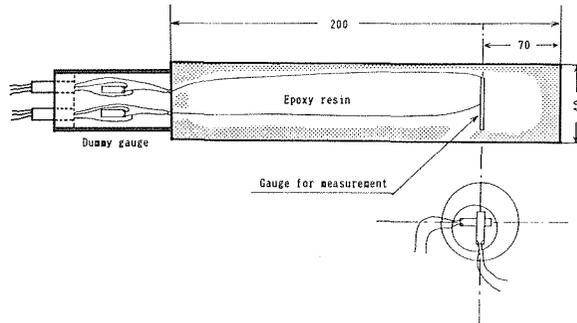
** 資源開発工学科採鉱学講座

の平均的強度を有する炭層といえる。

第1図は測定孔及び発破孔の配置を示している。測定孔3孔のうち2孔には変位速度計を、他の1孔にはひずみ測定用モールドゲージを埋設した。使用した変位速度計は GEO SPACE 社製、



第1図 変位速度及びひずみ測定孔と発破孔の配置

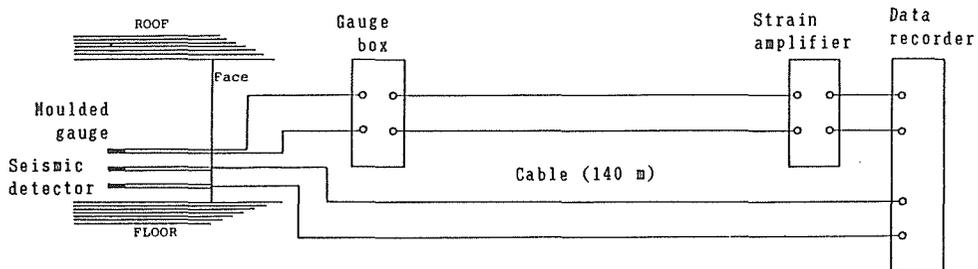


第2図 ひずみ測定用モールドゲージの構造

HS-J, MODEL-L-1である。2箇の変位速度計は測定孔々底に挿入し、受感方向をセットしたのちセメントミルクで固定した。次に、ひずみ測定用モールドゲージは第2図に示すごとく、円柱形樹脂内にクロスゲージを埋込んだ埋込型ひずみゲージである²⁾。モールド材料は硬化した後の密度が 1.19 g/cm^3 、P波速度が 1860 m/s になるエポキシ樹脂を用いており、動的ヤング率は $3.36 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ で石炭に近い機械的性質を持つものであった。

3本の測定孔は孔長 2.0 m とし、発破孔々長は装薬中心がセンサーと一直線上に並ぶようにするため 2.2 m とした。

発破装薬量は各孔とも 400 g (Eqs) とし、発破点火には 6 号瞬発電気雷管を用いた。タンピン



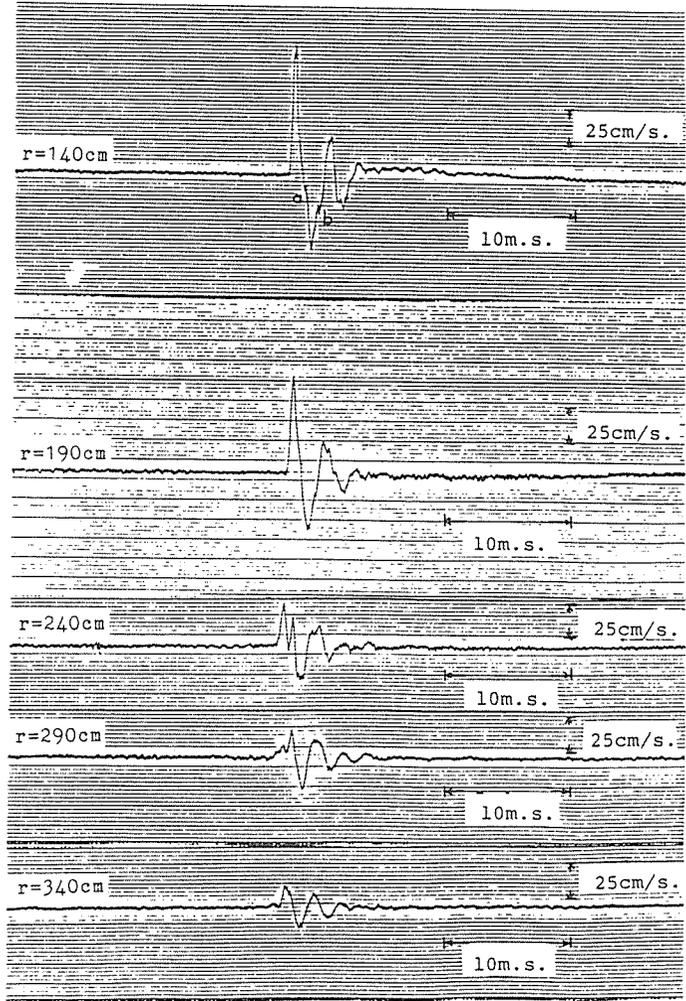
第3図 変位速度及びひずみ測定に用いた防爆型計器類

グは口元まで砂タampingを行ない発破を奥鳴させた。また、発破孔は測定孔から遠い位置より50 cm きざみで近づけてゆく方法をとった。第3図に示すように、変位速度計からの出力はアンプを介さず直接データレコーダに入力した。また、モールドゲージからの出力は、掘進面から約10 m 後方の坑道側壁に設置した防爆型ゲージボックスを経由して、さらに約140 m 後方の発破点火箇所を設置した防爆型動ひずみアンプ及びデータレコーダに入力され記録された。

3. 変位速度測定結果及び変位量

3-1 変位速度測定結果

本報文中では、爆源の放射方向を r 方向、それと直角な接線方向を θ 方向とする。変位速度計により計測されたいくつかの測点での r 方向の変位速度波形例を示しているのが第4図である。この実験における変位度は、数～10 ms 以内に、大きくは2回振動をくりかえしている。また、例えば同図 $r=140$ cm における波形例の a, b 点は、ハサミ、上下盤境界面での反射波がセンサーに入射していることを示している。反射の影響の相対的な大きさは $r=240$ cm より遠い測点で大きくなっている。各測点における変位速度から r 方向の最大変位速度（押し） U'_{rmax} を読みとり、その値を第1表に示している。たとえば U'_{rmax} は $r=80$ cm の位置で162.3 cm/s、本測定で最も爆源から遠い $r=370$



第4図 測定された変位速度波形

第1表 変位速度及びひずみ測定結果と計算により求めた変位量及び応力

r cm	U'_{rmax} cm/s	U_{rmax} mm	ϵ_{rmax} $\times 10^{-6}$	$\epsilon_{\theta max}$ $\times 10^{-6}$	σ_{rmax} kg/cm ²	$\sigma_{\theta max}$ kg/cm ²
50	—	—	-2920	810	-82.3	4.9
80	162.3	0.8	-3425	1180	-91.0	16.4
100	—	—	-595	590	-24.5	10.4
110	91.2	0.64	—	—	—	—
120	161.1	0.62	—	—	—	—
130	96.4	0.66	-1770	570	-48.0	6.6
140	84.7	0.42	—	—	—	—

150	—	—	-685	450	-25.1	5.6
160	60.5	0.51	—	—	—	—
170	110.1	0.56	—	—	—	—
180	99.2	0.71	-960	415	-24.7	8.0
190	60.9	0.36	—	—	—	—
200	—	—	-260	195	-5.9	3.4
210	35.9	0.25	—	—	—	—
220	80.3	0.48	—	—	—	—
230	60.5	0.35	-300	240	-5.3	1.8
240	27.8	0.17	—	—	—	—
260	17.9	0.15	—	—	—	—
270	58.3	0.27	—	—	—	—
280	47.3	0.26	-205	205	-6.7	4.0
290	17.2	0.11	—	—	—	—
300	—	—	-80	70	-2.7	1.2
310	12.3	0.09	—	—	—	—
320	35.8	0.18	—	—	—	—
330	25.2	0.15	—	—	—	—
340	14.6	0.09	—	—	—	—
370	11.3	0.09	—	—	—	—

cm の位置で 11.3 cm/s である。横軸に r/r_0 、縦軸に U'_{rmax}/U'_0 をとり、 $r/r_0 - U'_{rmax}/U'_0$ の関係を両対数紙上にプロットすると、第 5 図のように、データはほぼ直線的にプロットされる。ここで r_0, U'_0 は無次元化のための単位長さ及び単位変位速度で、 $r_0 = 1$ cm, $U'_0 = 1$ cm/s である。実験式を求めると、

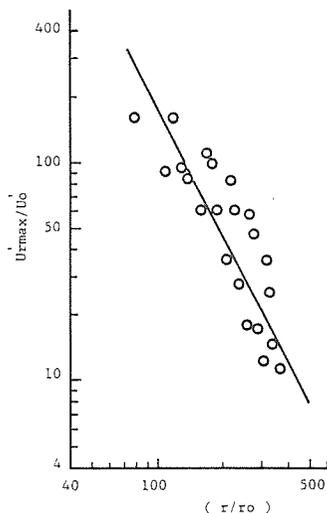
$$U'_{rmax}/U'_0 = 1.27 \times 10^6 (r/r_0)^{-1.930} \quad (1)$$

となる。Eqs 400 g を用いた単発発破で外周の炭層内に主ずる変位速度は、爆源からの距離の -1.930 乗にしたがい減衰することを示している。実験式(1)はわが国の他の炭層においても当てはめることができると考えられる。

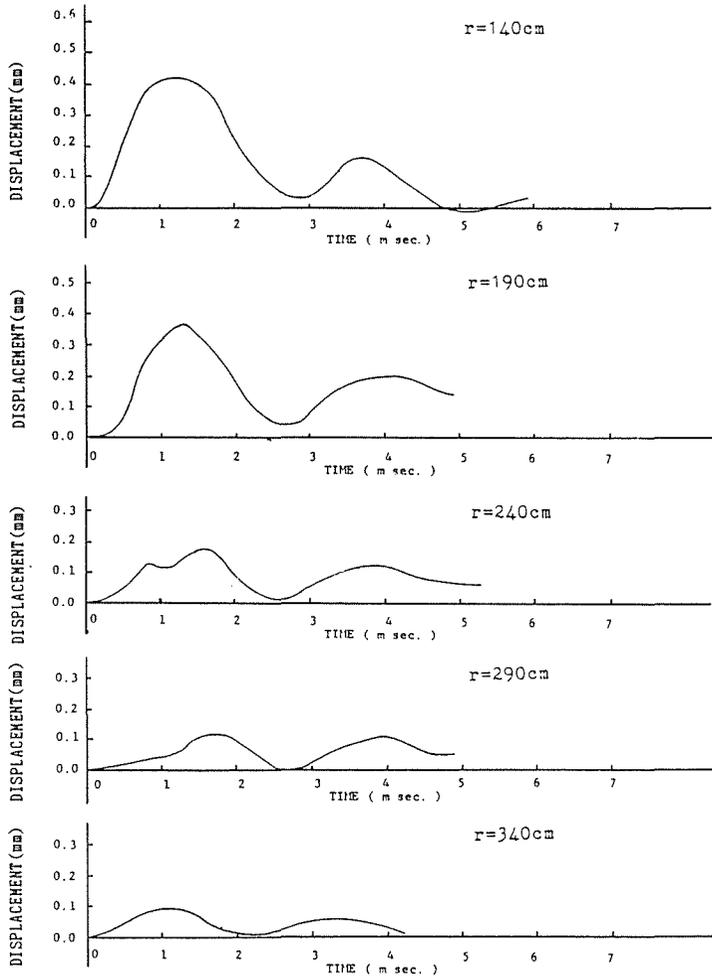
3-2 変位量について

第 6 図は、第 4 図の変位速度波を時間で積分した変位波形例を示し、両図の爆源からの距離は対応している。同図によると、変位量の場合も大きくは 2 度押し引きがくりかえされている。変位速度でみた場合には、ハサミ、上下盤での反射波の影響が明瞭に現われていたが、変位自身の場合はほとんど影響を受けていないことがわかる。各測点について求めた変位波形から、 r 方向の最大変位量 U_{rmax} を読みとり、その値をやはり第 1 表に示している。横軸に r/r_0 を、縦軸に U_{rmax}/U_0 をとり、両者の関係を両対数紙上にプロットしたのが第 7 図である。ここにおいても、 r_0, U_0 は無次元化のための単位長さ及び単位変位量で、 $r_0 = 1$ cm, $U_0 = 1$ mm/s である。表と図によると、たとえば、 $r = 80$ cm の点では最大 0.81 mm の変位がみられ、 $r = 190$ cm では 0.36 mm, $r = 370$ cm では 0.09 mm の変位がみられた。 $r/r_0 - U_{rmax}/U_0$ の関係について実験式を求めると、

$$U_{rmax}/U_0 = 1.18 \times 10^3 (r/r_0)^{-1.559} \quad (2)$$



第 5 図 爆源からの距離と放射方向最大変位速度との関係



第6図 変位速度を時間で積分して得られた変位波形(図4に対応)

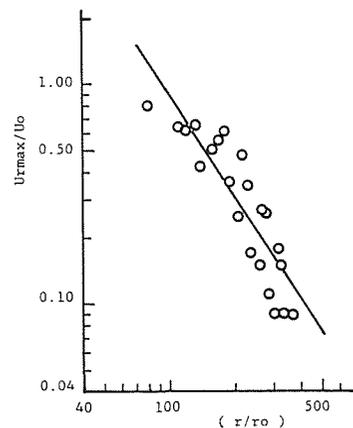
となる。この実験における Eqs 400 g の単発発破の変位量の減衰指数は -1.559 であり、変位速度の場合より絶対値が 0.371 小さい。

以上のごとく、変位速度測定により、わが国の平均的な強度を有する炭層に発破した時の炭層の振動状況が明らかになった。すなわち、爆源から $1\sim 4$ m の範囲が、数 ~ 10 ms の間、 1 m 程度の部分は約 0.8 mm、 4 m 程度の部分は約 0.01 mm、大きくは 2 度押し引きされるということである。

4. ひずみ測定結果と発破応力

4-1 ひずみ測定結果

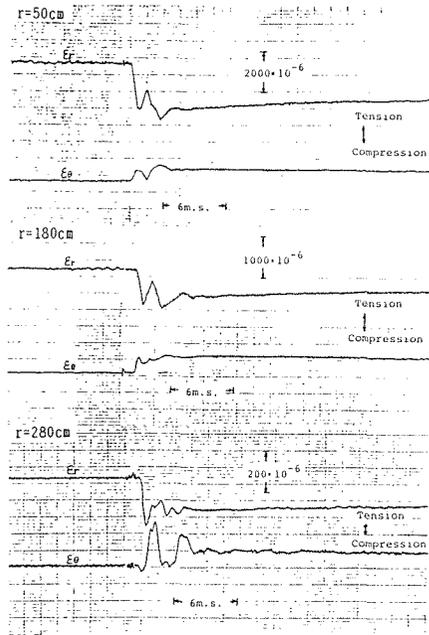
発破では、実験ごとに第8図に示されるようなひずみが測定された。この場合も、爆源の放射方向を r 方向、それと直角な折続方向を θ 方向とし、これらの方向のひ



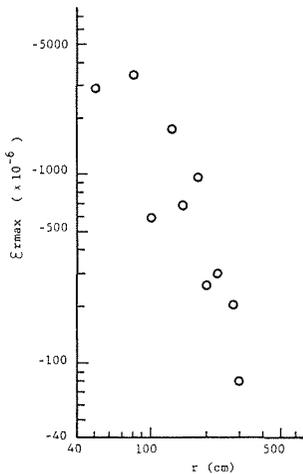
第7図 爆源からの距離と放射方向変位の関係

ずみを $\epsilon_r, \epsilon_\theta$ として表わすことにする。図によると $r=180\text{ cm}$ 付近までのひずみ波形は比較的単調で、 $\epsilon_r, \epsilon_\theta$ とも圧縮と引張が2度大きくくり返えされ、その後ひずみが残留している。また、 ϵ_r と ϵ_θ の同一時刻での挙動は一方が圧縮である場合には他方が引張になっている。 $r=280\text{ cm}$ 程度離れると、上下盤からの反射の影響が相対的に大きく現われるようになり、波形がみだれ振動的になっている。これらの特徴は、概ね速度波形の場合と一致しており、振動持続時間も測点の位置により大きい変化はなく数 $\sim 10\text{ ms}$ である。

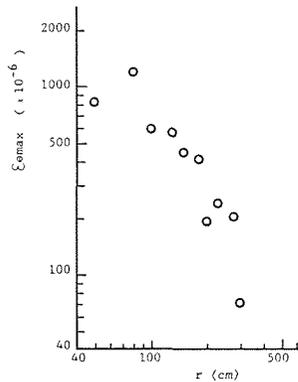
記録・再生されたひずみ波形から r 方向の最大圧縮ひずみ $\epsilon_{r\max}$ と θ 方向の最大引張ひずみ $\epsilon_{\theta\max}$ を読みとり、その値を第1表に示している。ここでは圧縮をマイナス符号、引張をプラス符号で表わすものとする。両対数紙上の横軸に r をとり、 $r-\epsilon_{r\max}, r-\epsilon_{\theta\max}$ の関係をプロットすると、第9, 10図のようになる。 $\epsilon_r, \epsilon_\theta$ の場合とも $r=100\sim 130\text{ cm}$ までは 10^{-3} オーダーのひずみを示し、 $r=300\text{ cm}$ 付近では 10^{-5} オーダーになっている。両者とも対数紙上ではほぼ直線的にプロットされる。



第8図 測定されたひずみ波形例



第9図 爆源からの距離と放射方向最大圧縮ひずみとの関係



第10図 爆源からの距離と接線方向最大引張ひずみとの関係

4-2 ひずみから変換された応力値

上述のごとく、本測定では、爆源から r だけ離れた点の任意の時刻 t における r 方向のひずみ $\epsilon_r(r, t)$ と θ 方向のひずみ $\epsilon_\theta(r, t)$ が測定されている。本節では、測定されたひずみ波から距離 r における点火後の各時刻の放射方向応力 $\sigma_r(r, t)$ 及び θ 方向応力 $\sigma_\theta(r, t)$ ($=\sigma_\phi(r, t)$) を求めた。応力変換には3次元フックの法則(3), (4)式を用いた³⁻⁵⁾。ここで ϕ 方向とは第1図の測定孔軸方向を示す。

$$\sigma_r(r, t) = 2\mu\epsilon_r(r, t) + \lambda e(r, t) \quad (3)$$

$$\sigma_\theta(r, t) = \sigma_\phi(r, t) = 2\mu\epsilon_\theta(r, t) + \lambda e(r, t) \quad (4)$$

ただし、 $\tau_{r\theta} = \tau_{r\phi} = \tau_{\theta\phi} = 0$ 、 $\epsilon_\theta(r, t) = \epsilon_\phi(r, t)$ と仮定。

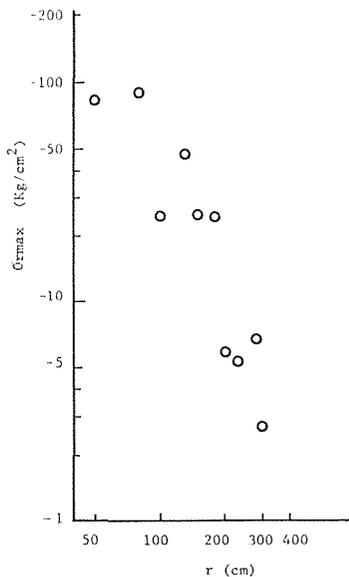
また、用いた記号は、

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad \lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

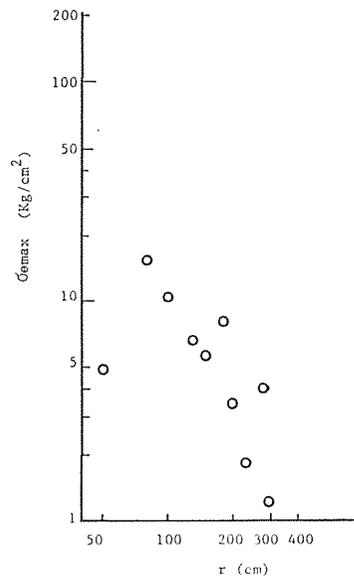
E ：ヤング率， ν ：ポアッソン比

$$e(r, t) = \epsilon_r(r, t) + \epsilon_\theta(r, t) + \epsilon_\phi(r, t)$$

求められた各測点における σ_r の圧縮の最大値 σ_{rmax} (圧縮をマイナス符号としている)、および σ_θ の引張の最大値 $\sigma_{\theta max}$ (引張をプラス符号としている) をやはり第1表に示している。ひずみの場合と同様、横軸に爆源からの距離 r をとり、 $r - \sigma_{rmax}$ 、 $r - \sigma_{\theta max}$ の関係を両対数紙上にプロットすると、第11、12図のようになる。両図及び第1表によると、 σ_{rmax} は $r = 50 \sim 100$ cm 間で 100 kgf/cm^2 前後の圧縮応力となり、 $r = 300$ cm 付近では $2 \sim$ 数 kgf/cm^2 の圧縮応力になっている。また、 $\sigma_{\theta max}$ は $r = 50 \sim 100$ cm 間で $10 \sim 10$ 数 kgf/cm^2 の引張応力となり、 $r = 300$ cm 付近では $1 \sim$ 数 kgf/cm^2 の引張応力となった。 σ_{rmax} 、 $\sigma_{\theta max}$ は、第11、12図で、ひずみの場合と同様直線的にプロットされている。



第11図 爆源からの距離と方射方向最大圧縮
応力との関係



第12図 爆源からの距離と接線方向最大引張
ひずみとの関係

5. ガス突出における炭層圧出条件と発破振動

ガス突出には少なくとも2つのパターンがある。その1つは炭層露出面から連鎖的に破壊物がほとんど同時に放出されてゆくタイプである⁶⁻⁸⁾。他の1つはすでに破壊している炭層又は地質的に塑性化した炭層が、内部のガス圧及び地圧で圧出されるタイプである⁹⁾。ここでは2番目のタイプの突出が発生するために必要な圧出条件(力の不均衡条件)式を求め、発破振動がどのパラメ

ータに影響を与えるかを考察する。

5-1 炭層の圧出条件

第13図は、炭層の破壊の程度と掘進面付近のガス圧分布及び地圧分布を示している。この炭層内の微小部分を拡大し、これに作用する力を図示したのが第14図である。微小部分には原点に向かう圧出力とそれに対する抑止力が働いている。微小部分に働く圧出力 dp は、

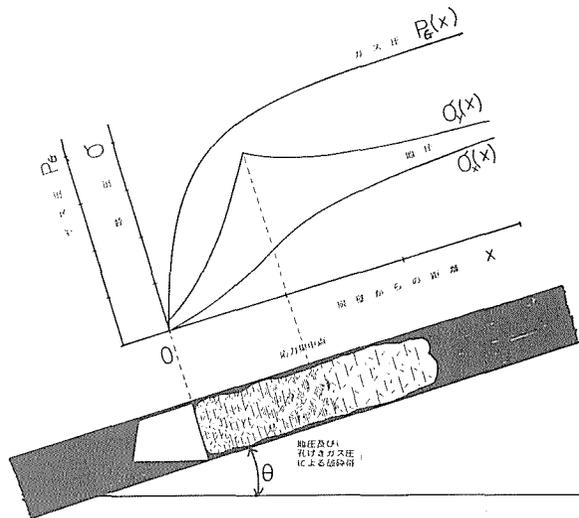
$$dp(x) = DH \{ G'(x) + \sigma'_x(x) + \rho g \sin \theta \} dx \quad (5)$$

抑止力 dR は、

$$dR(x) = 2D \left\{ C_1 + \left\{ \sigma_y(x) + \frac{1}{2} \sigma'_y(x) dx \right\} \tan \phi_1 \right\} dx \\ + 2H \left\{ C_2 + \left\{ \sigma_x(x) + \frac{1}{2} \sigma'_x(x) dx \right\} \tan \phi_2 \right\} dx \quad (6)$$

(5), (6)上における記号は次のようであるとする。

- x : 掘進面からの奥行き [cm]
- D : 圧出有無を検討するのに仮想した角柱の横幅 [cm]
- H : 圧出の有無を検討するのに仮想した角柱の高さ [cm]
- ρ : 炭層の密度 [kg/cm³]
- g : 重力の加速度 [cm/s²]
- θ : 炭層の傾斜 [deg]
- C_1 : 上下盤と炭層間の粘着力 [kgf/cm²]
- C_2 : 炭層自身の粘着力 [kgf/cm²]
- ϕ_1 : 上下盤と炭層間の内部摩擦角 [deg]
- ϕ_2 : 炭層自身の内部摩擦角 [deg]
- $G(x)$: ガス圧関数 [kgf/cm²]
- $\sigma_x(x)$: 奥行き方向の応力関数 [kgf/cm²]
- $\sigma_y(x)$: 炭層に鉛直な応力関数 [kgf/cm²]



第13図 掘進面側方の地圧分布とガス圧分布概念図

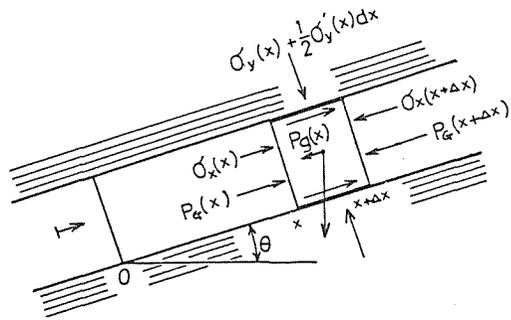
$P(x)$: x 方向の圧出力 [kgf]

$R(x)$: 炭層の抑止力 [kgf]

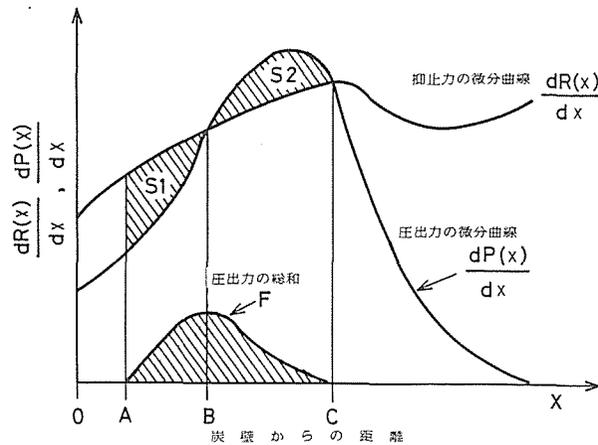
(5), (6)式から求めた微分関数 $dp(x)/dx$, $dR(x)/dx$ が第15図のような変化を示している場合を想定し, 求の積分を考える。

$$F = \int_{x_1}^{x_2} \{dP(x)/dx - dR(x)/dx\} dx \quad (7)$$

このような状況で, 原点 ($x_1=0$) から $x_2=C$ まで行なった定積分値が負, すなわち $F < 0$ であれば炭層は滑動しない。しかし, この場合でも, A → C 間の積分値が $F=0$ であ



第14図 炭層内の微小部分に働く圧出力と抑止力



第15図 炭層圧出力と抑止力の微分曲線及び圧出力総和を示す概念図

れば $S_1=S_2$ となり, 圧出力と抑止力の総和が正になる部分が A~C 間に存在する。このとき O~A

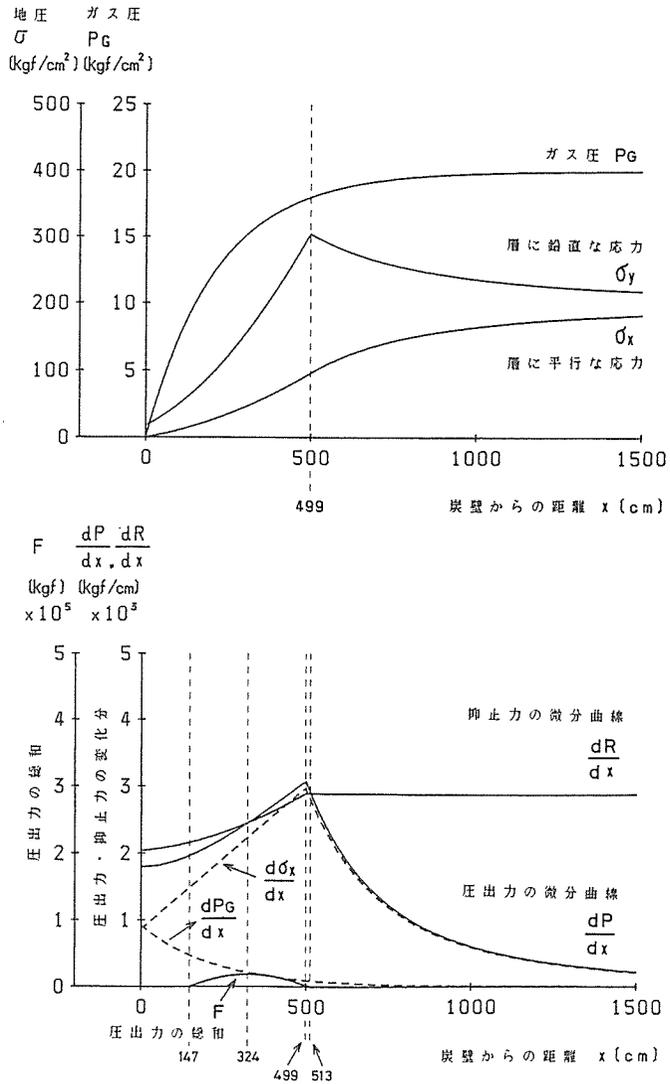
間の炭層を瞬時的に除去すれば圧出条件が満足される。また, 初めから, 原点より $x=c$ までの積分値が正, すなわち $F > 0$ であれば常時圧出条件が満足されていることになる。

ここで具体的に(5)~(7)式のパラメータに第2表の値を代入し, 応力分布及びガス圧分布が第16図(A)のようである場合, すなわち応力集中点が掘進面から約5m (449cm) で, 応力集中点におけるガス圧が 18 kgf/cm^2 である場合の圧出力の計算を行なった。

その結果を第16図(B)に示している。この場合は第15図のように dp/dx と dR/dx 曲線が2点で交わる場合である。この例では, 炭壁から 324~513 cm

第2表 炭層圧出力の計算条件

d	炭層の幅	100cm
w	炭層の厚さ	100cm
x	炭層の奥行	15m
σ	炭層の密度	$1.25 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$
θ	炭層の傾斜	45°
P_c	地山ガス圧	20 kgf/cm^2
P_0	地圧 (深度800m)	200 kgf/cm^2
c_1	炭層上下盤間の粘着力	5.0 kgf/cm^2
c_2	炭層相互間の粘着力	5.0 kgf/cm^2
ϕ_1	炭層上下盤間の内部摩擦角	0.7°
k	メタンガスの比熱比 (25°C)	1.3028
E	炭層のヤング率	$1.0 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$
ν	炭層のポアソン比	0.3
n	炭層の間隙率 (塑性域)	0.15
	(弾性域)	0.08
g	重力加速度	980 cm/sec^2



第16図 応力集中点が499cmの位置にある場合の圧出力の計算結果 (計算条件は第2表)

間に抑止力よりも圧出力が優るゾーンが存在する。その間の圧出力の総和は 147~324 cm 間の炭層の抑止力の総和と等しく、圧出力の総和を示す曲線 F は 147 cm の点で 0 となる。147 cm までの炭層は余剰に抑止力を与えているものでカバーロック長 147 cm である。

5-2 発破の影響

上記のモデルにおいて、第16図 (B) の炭壁面から 147 cm までの炭層を発破で取り去ればバランスが崩れ、513 cm までの炭層が圧出 (突出) されることになる。ところが、孔長 1 m の発破を実施した場合はどうであろうか。(5), (6) 式の各パラメータに変化がなければ問題はなく圧出されないであろう。第1表における $\sigma_{\theta max}$ についてみると、爆源の奥 1 m 程度の範囲までは 10 kgf/cm² 以上の引張応力を示し、装薬部より奥の範囲に引弾亀裂を生成させる可能性が大である。100 cm から 147 cm の間の炭層に亀裂が入ると粘着力が任下し、 $C_1 = 0$, $C_2 = 0$ になる可能性があり、カ

バーロックとしての役目を失なうことになる。この場合、引張亀裂が生成される範囲は地圧と発破応力の合力で評価しなければならない。次に、破壊にはいたらないが炭層に変位を与える、すなわち炭層をゆする範囲はもっと広く爆源の奥4~5 mに及ぶであろう。第4図に示したとおり、この範囲の炭層は、数msの間に2度揺動させられる。この時は、(6)式の内部摩擦係数 $\tan\phi_1$, $\tan\phi_2$ が低下、抑止力が減少すると考えられる。地表の建造物の発破振動による被害について Langefors は、被害の程度は主として変位速度に依存していると述べている¹⁰⁾。この研究結果を参考にすると $\tan\phi$ は次のように表わされると推定される。

$$\tan\phi = \tan\phi_i \exp\{-\lambda(U'_i/U'_0)\} \quad (8)$$

λ : 定数, U'_0 : 単位変位速度, i : 1, 2

現在のところ、衝撃を加えたせん断試験を行なった研究結果が見当たらないため、定数 λ を推定することができない。ガス突出における発破の影響を量的に評価するためには、衝撃荷重下でのせん断試験が必要であると考えている。

6. ま と め

本報文では、空知炭鉱坑内で行なった発破振動測定結果を示した。Eqs 400 g の爆源周辺の炭層に生ずる変位速度及び変位量については、爆源からの距離 r との間に、 $U'_{\max}/U'_0 = 1.27 \times 10^6 (r/r_0)^{-1.930}$, $U_{\max}/U_0 = 1.18 \times 10^3 (r/r_0)^{-1.559}$ の関係があることがわかった。また、データ数が少ないが、爆源周辺の応力値を示した。圧出型のガス突出モデルを用いて、発破振動が主に圧出条件式の粘着力、内部摩擦係数に影響を与えることを示し、内部摩擦係数と変位速度との関係式を提案した。

参 考 文 献

- 1) 氏平増之, 樋口澄志: 昭和62年度日本鉱業会春季講演要旨集, PP33~34 (1987)
- 2) 石島洋二, 後藤龍彦, 木下重教: 日本鉱業会誌, 91, [1043], PP5~12 (1975)
- 3) 伊藤一郎, 佐々宏一: 日本鉱業会誌, 77, [882], PP11~18 (1961)
- 4) 伊藤一郎, 佐々宏一: 日本鉱業会誌, 79, [898], PP25~33 (1963)
- 5) 氏平増之, 島内洋志: 北大工学部研究報告, [123], Oct. PP. 1~4 (1984)
- 6) 氏平増之, 磯部俊郎, 樋口澄志: 日本鉱業会誌, 100, [1153], PP29~36 (1984)
- 7) 氏平増之, 磯部俊郎, 樋口澄志: 日本鉱業会誌, 100, [1155], PP15~21 (1984)
- 8) 氏平増之, 磯部俊郎, 樋口澄志: 日本鉱業会誌, 101, [1167], PP9~14 (1985)
- 9) 氏平増之, 樋口澄志, 中崎一郎: 昭和61年度日本鉱業会春季講演要旨集, PP281~282 (1986)
- 10) 工業火薬協会編: 発破ハンドブック, PP340~341 (1976), 山海堂