

スムーズ・ブラスティングに関する研究 (第2報)

破壊機構に関する理論的考察

山口梅太郎**・下村弥太郎**

1. はじめに

すでに1年以上になるが、スムーズ・ブラスティングに関する研究(第1報)¹⁾として、実験室における模型実験について発表した。結論として、セメント・モルタルのブロックで電気雷管を用いてスムーズブラスティングの実施に必要な実験的知識を得ることができたこと、デカップリング、孔間隔、最小抵抗線などが、スムーズ・ブラスティングの実施に当たって必要な要素であることなどを示した。しかしこれらの要素はすべて実験的に求められ、しかもそれほど定量的に定められるものでないこともたしかで、このことは、スムーズ・ブラスティングにおける壁面形成の理論が確立されていないことによるといつてもよいであろう。

スムーズ・ブラスティングによって岩盤の保護が行なわれ、なぜスムーズな壁面が形成されるのか説明はむづかしい。岩石の爆破理論そのものが不完全な状態では当然であるが、今日までに行なわれている1、2の理論にもなつとくのない点が多い。²⁾

スムーズ・ブラスティングの実験を通して、筆者らには、スムーズ・ブラスティングにより生ずるスムーズな壁面の形成は、主として爆薬の静的な力によると考えることが妥当であるように思われた。そこで、そのような力に立脚した一つの考察を行なつたので、スムーズ・ブラスティングの研究(第2報)として、まとめることとした。

2. 従来の理論

1) W. I. Duvall および R. S. Paine らの理論³⁾

ベンチカットの整列発破などで、各孔を単独に爆破した場合には、爆破面は鋸の刃のように凹凸の激しい面となるが、斉発で同時に、あるいはMSのような短かい時間間隔で各孔を爆破すると、爆破面が平らになることはよく知られている。このように破断面が一線になることは、各爆破孔からの爆破応力波がたがいに干渉し合うためだと説明されている。W. I. Duvall や

R. S. Paine からもこの考え方に立つてスムーズ・ブラスティングの破断面の形成を説明している。すなわち……爆破によって岩石の中に生じた粒子運動は、爆破孔を中心に放射状に外方へ向かう。この外方への運動が、一般に hoop stress と呼ばれている接線方向への引張応力を発生する。……二つの爆破孔から進んできた二つの半径方向に進むひずみ波は、図に示されるように相互に干渉するようになる。二つの波頭が重なり合っているところでは、太い矢印で示される合力となり、二つの爆破孔をつなぐ面に垂直または外方に作用する。面(図の中央の点線)の一方の側では、岩石はその方向に動き、反対側の岩石は反対の方向に動くから、引張面が中央の爆破孔をつなぐ面に沿って生ずる。全体としての引張応力がこの面に沿って破断をおこす (Fig. 1)。

この説明では、爆破孔から伝播する応力波の波頭部分の干渉が亀裂の発生の原因であるとしているところは問題である。もしも、隣接する爆破孔が同時にでなく僅かな時間差をおいて爆轟したとすると、このような応力波(頭部分)の干渉は行なわれない。孔間隔が30cmで弾性波速度が3000m/sであるとする、点爆に0.1msの差があれば応力波は中間で衝突しないことになる。

爆破孔の中間における応力波の衝突が亀裂発生の原因とすれば、亀裂は二つの爆破孔の中間にまず発生し

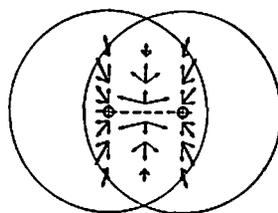


Fig. 1 Radial propagation of explosion-generated strain pulses from blasthole and vector forces resulting from instantaneous blasting of adjacent holes. (after R. S. Paine et al.)

昭和44年3月15日受理

* 第1報は本誌 Vol. 28 No. 6, 1967, 459~467頁

** 東京大学工学部資源開発工学科 東京都文京区本郷7-3-1

それぞれの爆破孔の方向へ伝播していくことになる。しかし、第1報の実験から感ぜられることは、亀裂はむしろ爆破孔からはじまって中間へ向かって伸びていくようである。高速度カメラの撮影によつて、亀裂が爆破孔の内壁からはじまり隣接孔の方向へ伸び、中間で直結することを確認したという報告もある³⁾。U. Langefors も、亀裂の長さあるいは方向が隣接する空孔の影響を受けることなどから、亀裂は爆破孔の内壁からはじまるといつている⁶⁾。

2) C.H. Johansson および U. Langefors の考え方⁷⁾

爆破クレーター形成に対する C.H. Johansson の考え方をとれば、爆轟によつて生じた高压の爆発ガスが爆破孔の内部に比較的長い時間高压の状態に残留し、爆破孔周囲の切線方向の引張応力により生じたポアホールの内壁の亀裂に圧入し、亀裂を押しひろげる。そしてさらに、亀裂は周囲の潜在クラックに連結して大きな亀裂になる、とすることができる。しかしこの説明でも、スムーズ・プラスティングの場合のように、なぜ隣接孔の方向にだけ大きな亀裂が伸びるのかということになると満足できない。

U. Langefors は、引張りの状態にある平面板にあっては円孔の周囲の応力集中によつて、スムーズ・プラスティングの亀裂を説明しようとしている。

Johansson, Langefors の考え方はともに定性的な考え方ではあるが、いずれも、1) の考え方にくらべて爆破の静的な効果によるものとする事ができる。

3) 伊藤・佐々の理論⁸⁾

京都大学の伊藤一郎教授らの考え方はきわめて興味深い。伊藤教授らはまず、デカップリング指数と爆破孔内壁に発生する接線方向の応力の関係を求め、爆破

孔内壁に発生する接線方向の応力はデカップリング指数が大きくなると、時間的に、いわゆる pressure spike が消失して、全体として台状の応力変化を示すようになることを確かめられた。そして次に、このような爆発生成ガスによる準静的な圧力が爆破孔内壁に作用した場合、この爆破孔の近傍に存在する空孔の内壁の、爆破孔と空孔とを結ぶ線上の点には大きな応力集中が生ずることを示された。

まず最初に起爆した装薬孔からの応力波によつて、装薬孔周辺のみならず隣接孔の壁面にも、切線予定面に沿うクローズド・クラックが発生する。ついで、このような亀裂がすでに入っている装薬孔内の爆薬が起爆する。この場合には、既成のクローズド・クラックが発達して切線予定面に沿う長い亀裂となり、他の方向にはあまり亀裂が発生しない。同時にこの装薬の爆

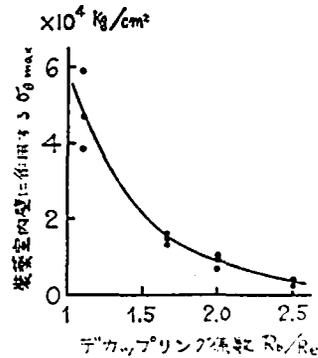


Fig. 2 Relationship between the maximum tangential tensile stress, σ_{max} , at the inner surface of the charge hole and the decoupling. (after I. Ito and K. Sasa)

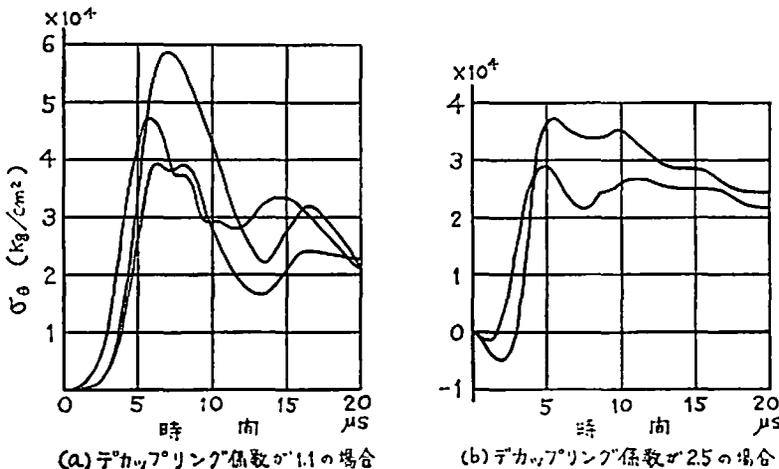


Fig. 3 Time-changes of the tangential tensile stress at the inner surface of the charge hole (after I. Ito and K. Sasa)

発にともない、隣接装薬孔周辺にも新たな亀裂を発生せしめる。このような亀裂が全体として連続し、スムーズな壁面を形成する。

この考え方に立つて、伊藤教授らは、補助空孔による有効なスムーズ・プラスティングの実施の方法を示されたが、筆者らはとくに、デカップリングによる準静的な圧力が爆破孔内に発生するという考え方を採り入れて筆者らの考えを展開することとした。

3. デカップリングについて

デカップリングの定義は、爆薬の直径と薬室の直径の比であつて、密充填のときがもつとも小さく1.00であり、薬室が大きくなるにしたがつてデカップリング指数の値も大きくなる。このデカップリングの概念に基づいたクッション・プラスティングの効果がスムーズ・プラスティングの実施に当つて重要な役割りを果たしていることは明らかである。第1報においても、デカップリングが爆力にどう影響するかを調べる実験を行ない、スムーズ・プラスティングの実施に当つてデカップリング指数が重要な要素であることを確かめている。

T. C. Atchison らの研究⁹⁾の結果では、爆薬から一定の距離で測定したひずみ波の振幅は、同一薬量に対してデカップリング指数が大きくなるにつれて指数的に減少し、また半径方向のひずみ波の basic period もデカップリングの値により影響を受けることが求められている。

先に述べた伊藤・佐々の実験の結果を Fig. 2, Fig. 3 に示したが、装薬室内壁に作用する接線応力の最大値 $\sigma_{\theta_{max}}$ の値はデカップリング指数の増加とともに指数関数的に減少しており、その波形もデカップリング指数が大きくなると、かなり長い時間にわたつてほぼ一定の大きさの圧力が内壁に作用することを示している。

Fig. 2 のグラフは、第1報で報告したデカップリング指数とクレーターの形状の関係にある種の示唆を与えるものように思われる。第1報でも示したように、スムーズ・プラスティング実施の条件の一つとして、筆者らが考えたクレーターが生じない条件、すなわち臨界深度の考え方は、伊藤・佐々による Fig. 3 の関係、すなわちかなり長い時間にわたつて爆破孔内壁にある一定の圧力が作用する条件を充すものと考えてよいように思われる。

4. P なる圧力が内壁に作用している2円孔を有する板の二次元応力問題

爆破による岩石の破壊機構の問題がきわめて複雑な問題であることはよく知っているが、スムーズ・ブラ

スティングの破壊機構を考えるために、この問題をできるだけ簡単化することを試みた。

スムーズ・プラスティングでは、プレスプリッティングにせよ、クッション・プラスティングにせよ、いずれも長い爆破孔をできるだけ平行にさく孔し、爆薬をできるだけ平均に装填して爆破孔の間に亀裂を作る

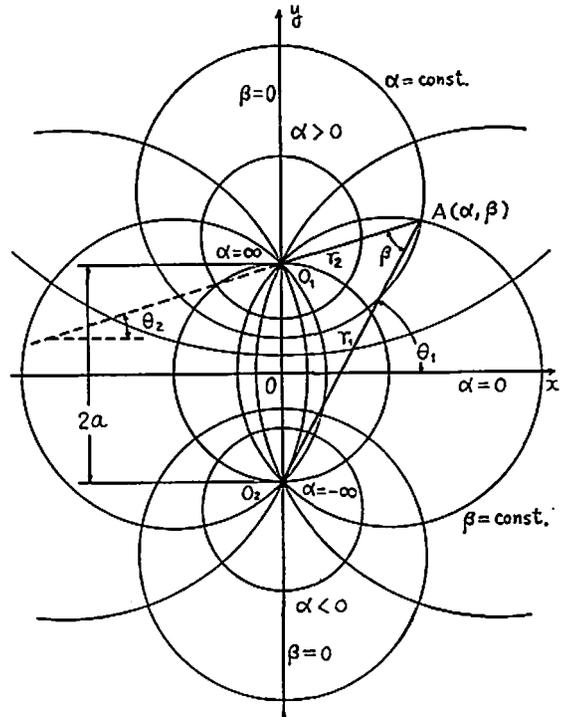


Fig. 4 General scheme of the curvilinear coordinates.

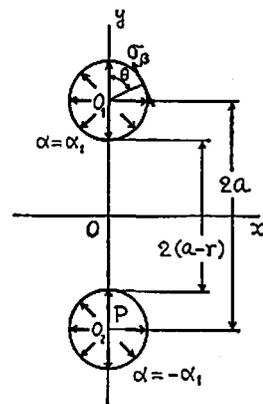


Fig. 5 The case of a problem in which constant pressure, P, acts instantaneously on the inside wall of holes having the same diameter, r.

こと、あるいは爆破孔を結ぶ面で岩盤を破断することが行なわれる。このことから、爆破孔あるいは破断面に垂直な平面で切った面の上の二次元問題として取扱うことが可能である。さらに、亀裂もしくは破壊については二つの爆破孔の間のみを考えればよいから、2円孔を有する板の問題とすることも可能である。クッション・プラスティングのように自由面を考慮する必要のある場合にも、プレスブリッキングと同様であると割り切つてしまうと、板は無限大の大きさを持つとしてよいことになる。

爆破が斉発もしくはMSで点爆されること、デカップリングの効果が前節で述べたような状態であることを考えると、2円孔の内壁には、それぞれPなる一定の圧力が作用していると仮定することも許されるであろう。

以上のように単純化すると、スミス・プラスティングの破壊機構を論ずる問題は、Pなる圧力が内壁に作用している2円孔を有する板の二次元応力問題にシミュレートすることができる。2円孔を有する無限平板に関する二次元応力問題は従来から多くの人々によって取扱われており、Pなる同一の内圧を受けている2円孔の問題も、東京大学の鶴戸口教授によって、双極座標を用いた研究が知られている。¹⁰⁾

Fig. 4の座標系について、Fig. 5のように同一の内圧Pが作用している同じ大きさの二つの円孔を持つ無限大の大きさの板の上の応力状態は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\alpha} &= (\cosh \alpha - \cos \beta) \frac{\partial^2(hX)}{\partial \beta^2} - \sinh \alpha \frac{\partial(hX)}{\partial \alpha} \\ &\quad - \sin \beta \frac{\partial(hX)}{\partial \beta} + \cosh \alpha \cdot (hX) - P \\ \sigma_{\beta} &= (\cosh \alpha - \cos \beta) \frac{\partial^2(hX)}{\partial \alpha^2} - \sinh \alpha \frac{\partial(hX)}{\partial \alpha} \\ &\quad - \sin \beta \frac{\partial(hX)}{\partial \beta} + \cos \beta \cdot (hX) - P \\ \sigma_r &= -(\cosh \alpha - \cos \beta) \frac{\partial^2(hX)}{\partial \alpha \cdot \partial \beta} \end{aligned} \right\} (1)$$

ここに (hX) は

$$(hX) = K (\cosh \alpha - \cos \beta) \log (\cosh \alpha - \cos \beta) + \sum_{n=1}^{\infty} \{ A_n \cosh (n+1) \alpha + B_n \cosh (n-1) \alpha \} \cos n \beta \quad (2)$$

であり、K、A_n、B_nなどは、それぞれ

$$\left. \begin{aligned} K &= \frac{aP}{G(\alpha_1)} \\ G(\alpha_1) &= \frac{1}{2} + \frac{\sinh^3 \alpha_1}{\cosh \alpha_1} - 4 \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n^2 - 1} M_n \\ M_n &= \frac{1}{n} \left(\frac{1}{2} \frac{n^2 \sinh^2 \alpha_1 - \sinh^2 n \alpha_1}{n \sinh 2 \alpha_1 + \sinh 2 n \alpha_1} \right) \end{aligned} \right\} (3)$$

$$\left. \begin{aligned} A_n &= K \frac{2e^{-n\alpha_1}}{n(n+1)} \\ &\quad \cdot \frac{ne^{(n-1)\alpha_1} \sinh \alpha_1 + \sinh n \alpha_1}{n \sinh 2 \alpha_1 + \sinh 2 \alpha_1} \quad (n \geq 1) \\ B_n &= -K \frac{2e^{-n\alpha_1}}{n(n-1)} \\ &\quad \cdot \frac{ne^{(n+1)\alpha_1} \sinh \alpha_1 + \sinh n \alpha_1}{n \sinh 2 \alpha_1 + \sinh 2 n \alpha_1} \quad (n \geq 2) \\ B_1 &= \frac{K}{2} \cosh 2 \alpha_1 \tanh \alpha_1 \quad (n=1 \text{ に対して}) \end{aligned} \right\} (5)$$

で与えられる。

α および β はそれぞれ

$$\alpha = \log \frac{r_1}{r_2} = \text{一定}$$

$$\beta = \theta_1 - \theta_2 = \text{一定}$$

であるから、円孔の内壁として α = α₁ (> 0 または < 0) にとり、α₁ に対して適当な α (≤ α₁ または ≥ α₁)、β を指定してやれば、2円孔の周辺の応力状態を知ることができる。

Fig. 6 および Fig. 7 は、以上について計算した結果から求めたものであるが、計算に当たっては a = 1,

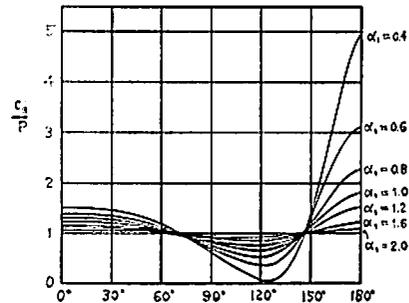


Fig. 6 Tangential tensile stress, σ_{β}/P , depending on θ and $\alpha = \alpha_1$

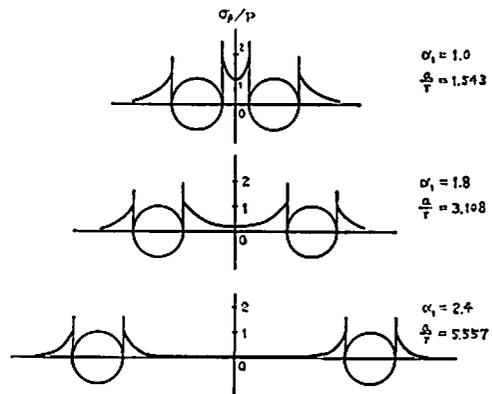


Fig. 7 Tangential tensile stress generated on the center line.

Table 1 Tangential tensile stress generated on the nearest and farthest points of the inside wall of hole.

α_1	$\frac{a}{r}$	Tangential tensile stress on the inside wall of hole	
		Nearest point $\theta=\pi$	Farthest point $\theta=0$
0	1.0000	—	—
0.4	1.0811	4.9628	1.5070
0.6	1.1855	3.1190	1.4033
0.8	1.3374	2.2732	1.3139
1.0	1.5431	1.8175	1.2426
1.2	1.8107	1.5298	1.1856
1.4	2.1509	1.3427	1.1399
1.6	2.5775	1.2210	1.1038
1.8	3.1075	1.1425	1.0757
2.0	3.7622	1.0920	1.0544
2.2	4.5679	1.0596	1.0386
2.4	5.5569	1.0387	1.0271
∞	∞	1.0000	1.0000

$P=1$ とした。なお、この計算は電子計算機で行なったのであるが、(4)、(5) 式の計算に必要な n の値としては、計算機の容量の関係から $n \leq 50$ とした。^{*}

Fig. 6 は、 $\alpha=\alpha_1$ の円孔の内壁に P なる圧力が作用したときの円孔壁面の接線方向の応力 σ_θ の分布を示したものである。 α_1 の値は、円孔の大きさと 2 円孔の中心間の距離の関係を与えており、それぞれは a を 1 としたときの関係として Table 1 に示される。この図からわかるように、二つの同じ大きさの円孔が並んでおり、内壁に同じ大きさの圧力 P が作用する場合には、円孔の壁面の、2 円孔の中心を結ぶ線上の点に、非常に大きな引張応力が接線方向に発生する。このような接線方向の応力は、隣接孔から遠い点にも発生する。このような応力の集中は、2 円孔の中心間距離が近接している程、円孔の直径が大きい程著しいことが示される。 $\alpha=\alpha_1=\infty$ の場合には、内壁に生ずる接線応力はすべて P となり、円孔が一つだけ無限大の板にあいている、あるいは、二つの円孔が無限に離れてあいているときに、内壁に P なる圧力が作用している場合と一致する。

次に、Fig. 7 は、 $\alpha=\alpha_1=1.0, 1.8, 2.4$ のときの 2 円孔の中心を結ぶ線上の点の x 方向の応力分布を示している。この図で明らかなことは、二つの円孔中心を結ぶ線上では接線方向の応力の最大値は 2 円孔の壁面にあつて、亀裂が生ずるとすればまず円孔の壁面に

* われわれが計算機で求めた計算結果と、当然のことながら、鶴戸口教授が手計算で求められた結果とは、わずかな差はあるがほぼ一致した。

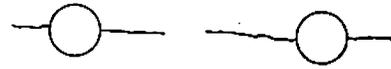


Fig. 8 An example of in-completed crack observed in the smooth blasting experiment.

生ずるといえることである。2 円孔があまり離れていない場合には、2 円孔の外側にもかなり著しい引張応力が生ずることも示される。

5. 実験結果の説明としての静的応力

第 1 報で述べた実験結果のうち、デカップリング指数とクレーターの大きさの関係は、非常にバラツキがあるがかなりはつきりとした傾向を持ち、デカップリング指数が大きくなるにつれて、クレーターの大きさは指数関数的に減少する。これは Fig. 2 の伊藤教授らの結果とも、デカップリング指数を最初に定義した T. C. Atchison らの同様の報告とも一致する。このように、爆破孔のデカップリング指数を大きくすることはスムーズ・プラスティングの実施にきわめて重要なことであるが、伊藤教授らのいわゆる pressure spike の消滅する状態で爆破を行なうこと、すなわち、ほぼ一定の圧力 P がかなり長い時間にわたって爆破孔内壁に作用することに、つながるといつてよいであろう。

静的圧力 P が爆破孔内壁に作用した場合、引張応力が著しく高くなるところに亀裂が生ずると考えれば二つの爆破孔の間、あるいはそれらを結ぶ線上にできる亀裂を説明することができる。そして、二つの爆破孔の大きさと両者の距離とが、亀裂の生成に関係していること、数多い亀裂でなく、ただ 1 本の亀裂が二つの爆破孔の間を結ぶようになることなどは、爆破孔内壁の接線方向の引張応力の集中の状況を見れば考え得ることである。

第 1 報における実験のなかで、Fig. 8 のように亀裂が完結せず二つの爆破孔の中間で停止してしまつたものもあつたが、この場合でも、亀裂の伸びて行く方向は応力集中の方向と一致している。隣接する空孔の影響については、計算は行なっていないが、やはり隣接する空孔の方向に応力集中があると考えれば、この場合の亀裂生成の説明が得られるものと考えてよい。

二つの爆破孔が極端に接近した場合には、それぞれの応力は相互に干渉し合つて、一つの楕円孔を持つ板の問題となり、周囲に楕円形の応力場を作ることが知られている¹¹⁾。われわれの実験でも、各爆破孔 1 本ではクレーターが生じない条件においても、二つの爆破孔が極端に接近した場合には楕円形のクレーターが観察されることがしばしばあつた。

もちろん、疑問の点もいくつかある。たとえば、われわれの実験における亀裂生成の最適条件のように、2孔間の距離がかなり大きい ($\alpha = \alpha_1 \geq 2$) 場合についても、実際に観察できるような顕著な応力集中があるといつてよいのかどうか、あるいは雷管のように比較的爆薬ガスが少ないと考えられるものを使った実験で、爆薬の静的効果をどこまで評価し得るか、などである。デカップリングによるクッション作用が爆薬の静的効果そのものであるかどうかなども、疑問点の一つである。

6. おわりに

以上のように、二つの爆破孔の内壁に静的な圧力が作用した場合の爆破孔周辺の応力状態を考察することによつて、かなりよくスムーズ・プラスチックの破壊機構を説明できることを述べてきた。もちろんいくつかの疑問点もあるし、破壊機構を簡単な弾性論の問題にシュミレートした考え方にも問題は多々あると思うが、近年の爆破応力波に基づく動的効果を重視した考え方に対して、爆薬の比較的ゆつくりした効果に基づいた考え方を展開したつもりである。いずれにしても、爆破の問題がきわめて複雑な要素から成り立っていることを、本論文をまとめるに当たつて、あらためて感じた次第である。

この報告を終るに当たつて、東京大学の鶴戸口英善教授の懇切な御指導に深く感謝するとともに、多くの示唆を与えられた京都大学の伊藤一郎教授、東京大学の筈津久一郎教授に深く感謝する次第である。

数値計算の大部分は東京大学計算センターの HIT-AC 5020 E によつて行なわれたが、プログラムの作成、計算の実施に当たつては、本資源開発工学科、大村昭士助手、宮崎道雄助手の手をわづらわせた。併せて感謝の意を表したい。

文 献

- 1) 山口梅太郎, 下村弥太郎: スムース・プラスチックに関する研究 (第1報) 実験室における模型実験, 工業火薬協会誌, 117号, 昭和42年11・12月

- 号, 459~467頁
- 2) 山口梅太郎: スムース・プラスチック, 日本鉱業会誌, 昭和41年6月号, 525~532頁
- 3) R. S. PAINE, D. K. HOLMES and H. E. CLARK: Controlling Overbreak by Presplitting, Proc. of International Symposium on Mining Research, Univ. of Missouri, U. S. A., Feb. 1961, Mining Research, Pergamon Press, 1962, Vol. 1. pp. 179~209
- 4) R. S. PAINE and N. A. EILERTSEN: Mining Method, Technique, and Cost of Presplitting the Flood Control Gate, Littleville Dam, Huntington, Mass., IC 8273, U. S. Bureau of Mines, 1965
- 5) J. J. LUDWIG and A. K. SMITH: Evolution of Pre-Splitting and Controlled Blasting, Mining Congress Journal, Oct. 1965, pp. 66~71
- 6) U. LANGEFORS and B. KIHLSTRÖM: The Modern Technique of Rock Blasting, John Wiley & Sons, 1963, pp. 296~307
- 7) 上掲6) pp. 21~22, および pp. 296~307
- 8) 伊藤一郎, 佐々宏一: スムース・プラスチックにおける破壊機構の一考察, 第2回岩の力学国内シンポジウム (1967) 講演集, 昭和42年11月28~29日, 97~102頁
- 9) T. C. ATCHISON and W. I. DUVALL: Effect of Decoupling on Explosion-Generated Strain Pulses in Rock, Proc. of 5th Symposium on Rock Mechanics, Univ. Minnesota, May 1962, Rock Mechanics, Pergamon Press, 1963, pp. 313~326
- 10) 鶴戸口英善: 二円孔を有する板の平面応力問題, 応用数学力学, 第1巻第1号, 昭和22年, 14~28頁および第1巻第2号, 昭和22年, 61~81頁
- 11) 上掲9)

Study of Smooth Blasting (2nd Report) Theoretical Consideration

by U. Yamaguchi and Y. Shimomura

This is the second report on the study of smooth blasting which is being carried out for gathering information to perform the technique. In this second report, the mechanism of fracturing rock in the smooth blasting is theoretically considered.

The fracturing mechanism is explained by the static effect of explosion produced by decoupling of explosives and the stress concentration on the inside wall of the boreholes which are made in parallel. (Univ. of Tokyo, Tokyo, Japan)