爆破による岩石の破壊機構*

(主としてガス圧による破壊)

伊藤 一郎** 佐々 宏一** 谷本 親伯***

Mechanism of Rock Breakage under Pressure of Gas Explosion

by

Ichiro ITO, Koichi SASSA

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

and Chikaosa TANIMOTO

(Nishimatsu Const. Co., Ltd., Tokyo)

It is believed that rock breakage by blasting is normally completed both by the dynamic breakage under intense stress waves, and by the quasi-static breakage under the pressure of gas explosion. First in this study the stress condition caused by the time dependent pressure in an elastic medium was computed from time to time as it worked on the spherical cavity, and thereby were inferred what were the stresses in the medium that were affected by the variation of the rise time of the pressure in the cavity. It is concluded that the values of the dynamic stresses in the medium caused by the stress wave decrease with increase of the rise time of the pressure, and that the stress condition in the medium is controlled by the quasi-static stress caused by the pressure in the cavity. It is considered therefore that the breakage of rocks caused by the explosion of the explosives having low velocity of deflagration is completed chiefly by the quasi-static pressure of the gas explosion.

Next the stress condition caused by the quasi-static pressure was analyzed by using the finite element method as it worked on the circular boreholes, assuming the cases in which the boreholes ranged linearly with constant spacing of $10a$, where a was the radius of the hole. At first pressure was applied to every other borehole, and the stress condition around the hole where no pressure was applied was carefully observed, and then the pressure was applied to every hole, and probable change in the stress distribution was studied upon the assumed growth of four radial cracks that would be originated from the inner surfaces of the holes, as two cracks grew along the line which connected the centre of each hole, and two other cracks grew along the line perpendicular to the above. These cracks are supposed to have been produced from the inner surface of each hole when the value of the pressure exceeds the tensile strength of the material. It is clarified as the result that the cracks along the line which connects the centre of each hole will grow further while those which grow perpendicular to the above are repressed. By comparing the results of these stress analyses with the strain measured in the material and the pattern of the crack produced actually by the pressure of the gas explosion, it is concluded finally that the quasi-static gas pressure contributes very much to the completion of smooth wall in the smooth blasting operation.

(Received Sep. 30, 1970)

1 緒 言

火薬類を用いて物体を破壊する作業を一括して爆破と呼んでいるが、それに使用される火薬類の性能は多種多様であって、爆速が 7 000 m/s, 爆轟圧が数10万気圧にも達する強力な爆薬から、爆轟せず単に燃焼す

るだけの火薬類, たとえば, 燃速が 100 m/s 以下, 爆発圧力 500 kg/cm² 程度といったものまでが使用されている。さて, 一般に爆破による材料の破壊は爆轟に起因する衝撃作用による動的応力による動的破壊と爆発生成ガスによる準静的な応力による静的破壊とが相乗的に作用して達成されるものと考えられている。しかし, 上記のように火薬類の性能が多種多様であり, さらに, その使用法も種々あるので, それらの適当な

* 原稿受理 昭和45年 9月30日

** 正 会 員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

*** 西松建設(株) 東京都港区芝西久保桜川町

組み合わせによっては材料の破壊が主として動的応力による動的破壊によって完成する場合もあり、逆に、静的応力による破壊が支配的であると考えられる場合もある。そこで今回は、爆発生成ガスの準静的な圧力による破壊に着目し、ガス圧によって材料内にどのような応力状態が発生し、それによってどのような破壊が生じるかを主としてスモースラスティングの場合を例にとって検討したのでその結果について報告する。

2 圧力の時間的変化状態と応力状態との関係

火薬類の爆発によって材料が受ける力は当然時間の関数として変化する。そこでまず、無限の広がりを持つと考えられる弾性体内に存在する球形空洞の内壁に時間的に変化する圧力が作用する場合を対象として、材料に作用する圧力の時間的変化状態の差異によって材料内に発生する応力状態がどのように変化するかを検討した。

さて、火薬類の爆発によって材料に作用する圧力の時間的変化状態はパルスの場合が多いので、圧力の時間的変化状態を表わす関数として、圧力が作用しはじめてからその最高値に達するまでの時間（以後この時間を圧力の立ち上がり時間と呼ぶことにする）、および、圧力継続時間を任意に変えうる(1)式に示す関数を用いることにした。なお、使用した計算式はすでに公表されているので、それを参照していただきたい。¹⁾

$$P(t) = P_0 N (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

P_0 : 圧力最高値, N : 圧力最高値を規定する定数,

t : 時間, α : 圧力の継続時間に関する係数,

β : 圧力の立ち上がり時間に関する係数。

今回採用した計算条件はつぎのとおりである。

材料内の弾性縦波の伝ば速度 : 4000 m/s, 材料のポアソン比 : 0.25, 球形空洞の半径 : 10 cm.

Fig. 1 および Fig. 2 は計算結果の一例を示したものであって、それぞれの図に示す鎖線が球形空洞内壁に作用させた圧力の時間的変化状態を示し、実線および破線で示した半径方向の応力 σ_r および接線方向の応力 σ_θ は空洞の中心から 50 cm 離れた点におけるそ

Fig. 1. Change in the stresses with time at $r=50$ cm for the case that the rise time of the pressure in the cavity is about 0.2 ms.

Fig. 2. Change in the stresses with time at $r=50$ cm for the case that the rise time of the pressure in the cavity is about 1.0 ms

れらの変化を示したものである。まず Fig. 1 は、圧力の立ち上がり時間がほぼ 0.2 ms の場合の計算結果であるが、図よりこの場合には、空洞内壁に作用する圧力が比較的急激に立ち上がるために弾性体内へ波動が投射され、その波動による応力がその点の応力状態を支配しており、その値は半径 10 cm の球面に P_0 なる大きさの静的圧力が作用した場合にその点に発生する応力 ($\sigma_r = -0.008 P_0$, $\sigma_\theta = 0.004 P_0$) よりもかなり大きいことがわかる。一方、Fig. 2 は圧力の立ち上がり時間がほぼ 1.0 ms の場合の計算結果であるが、図に示すように、圧力の立ち上がり時間が長くなると衝撃効果が減少するので波動が発生しにくくなり、Fig. 1 に示した場合には $\sigma_{r\max} = -0.052 P_0$, $\sigma_{\theta\max} = 0.016 P_0$ という値であった波動による応力の最高値はこの場合にはかなり減少し、それぞれ $-0.01 P_0$, $0.004 P_0$ という値になっており、静的圧力による応力値とほぼ等しくなっている。

Fig. 3 は、内圧の立ち上がり時間を変化させる(1)式の係数 β の値と、空洞の中心から 50 cm 離れた位置における波動による応力の最高値およびその点に発生する静的な応力値とを対比して示したものであるが、図より β の値がほぼ 5×10^5 以下、すなわち圧力の立ち上がり時間がほぼ $10 \mu\text{s}$ 以上となると波動による応力の最高値が徐々に減少しはじめ、 β の値がほぼ 4×10^3 となると波動による応力の最高値は静的な応力とほぼ

Fig. 3. Relation between the value of the exponential coefficient β shown in Eq. (1) and the peak value of the radial stress caused by the stress wave.

等しい値となり、その後は材料内の応力状態は静的な応力によって支配されることがわかる。以上に示した計算結果より、燃焼速度の比較的遅い火薬類を使用して爆破を行なう場合とか、爆轟にともなう衝撃作用を軽減させるような爆破法を採用した場合などには、爆発生成ガスの準静的な圧力による破壊が材料の破壊をかなり支配するのであると推定することができる。

3 スムースブラスティングによる破壊に寄与する ガス圧の効果

スームスプラスチックにおいては一般にデカップリング装薬が採用されるので、爆薬の爆轟に伴う動的破壊のみならず、爆発生成ガスの圧力による準静的な破壊も破断面の形成にかなり寄与しているものと考えられる。そこで、スームスプラスチックのように一列に装薬孔が並んでいる場合について、孔内に作用するガス圧によってどのような応力状態が発生し、それによってどのような破壊が発生するかを有限要素法による応力解析結果を用いて検討した。今回は解析条件の基本として、Fig. 4 に示すように半径 a の円孔が $10a$ 間隔で一列に並んでいる場合をとりあげ、これを自由面が存在しない場合と各円孔の軸を含む面 (Fig. 4 に示す x 軸) と平行な自由面が円孔の中心から $10a$ の位置に存在する場合 (Fig. 4 に示す $y=10a$ の線) との 2 条件に分割して検討した。以後前者を自由面が存在しない場合、後者を自由面が存在する場合と呼ぶことにする。なお、前者はブリスブリッティング爆破の場合、後者は自由面を有するスームスプラスチックの場合の応力解析条件に対応している。

さて、実際の爆破作業においては、各孔に装入されている装薬を瞬発雷管を用いて起爆したとしても、雷管個々の点爆時間のばらつきのために、各孔が全く同時に起爆するということはあり得ない。そこでまず、Fig. 4 に示した A 孔のみに内圧が作用し、B 孔には内圧は作用していないという条件の場合の応力解析を行

Fig. 4. Basic configuration for stress analysis.

Fig. 5. Contours of σ_1/P_0 in the material with a free face when a pressure of which value is P_0 is applied only in the hole A , where σ_1 is the maximum tensile stress.

なった。Fig. 5 は、自由面が存在する場合について A 孔のみに内圧を加えた場合に得られた等 σ_1/P_0 線図を示したものである。ここに、 σ_1 は各点に発生する最大引張応力であり、 P_0 は A 孔内壁に作用させた内圧の値である。Fig. 5 より、内圧の作用する半径 a の円孔 (A 孔) の中心から $10a$ の位置に半径 a の空孔 (B 孔) が存在しても、空孔の存在は内圧の作用する円孔の近傍の引張応力の分布にはほとんど影響をおよぼさないことがわかる。しかし、内圧の作用しない円孔の内壁と各孔とを結ぶ線との交点近傍において引張応力の集中が現われており、空孔内壁近傍においてはその値は $0.07 P_0$ となっている。Fig. 5 は自由面が存在する場合の解析結果であるが、自由面が存在しない場合について求めた解析結果においては、内圧の作用する A 孔近傍の応力状態は自由面が存在しなくてもそれほど変化しないが、空孔である B 孔の内壁と A、B 両孔の中心を結ぶ線との交点に発生する引張応力の値は自由面が存在しない場合には $0.02 P_0$ となった。このことは自由面の存在によって空孔内壁と両孔の中心を結ぶ線との交点に発生する引張応力の値がかなり増大することを示しており、興味ある結果である。以上に示した結果より、スームブラスティングにおいては、まず最初に起爆する装薬孔の内壁から発生する半径方向のき裂に対しては方向性を持たせることができないので、どちらの方向にまずき裂が発生するかは不明である。しかし、ついでそれに隣接する装薬孔内に装てんされている装薬が爆轟した場合には、すでにその装薬孔の内壁と切断予定線である各孔を結ぶ線との交点近傍に引張応力が発生している状態にある円孔内壁に爆轟に起因する内圧が作用することになるから、切断予定線にそうき裂がまず発生するものと考えられる。なお、上記の結果はスームブラスティングの場合の動的応力の解析結果とよく一致している²⁾。

以上に, A孔のみに内圧が作用したと考えた場合の解析結果を示したが, 装薬孔内に作用するガス圧の継続時間は雷管の点爆のばらつきの時間よりはるかに長いので, すべての装薬が起爆した時点以後では各孔に内圧が作用することになる. そこでつぎに, 各孔に内圧が作用した場合について検討することにする.

さて, 爆破の場合のように, 装薬孔内壁に作用する最高圧力が材料の引張強度よりもはるかに高い場合には円孔内壁から半径方向にき裂が生成することになるが, そのき裂の数は円孔内に作用する圧力の立ち上り時間が遅く, 波動が発生しないような条件の場合には4本以上にはなり得ない³⁾. そこで今回は内圧を有する各円孔からFig. 4に示した x および y 方向にそって4本のき裂が発達すると仮定した場合について応力解析を行なった.

Fig. 6は自由面が存在しない場合について x, y 両方向に長さが $1.75a$ のき裂が生成したと考えた場合の等 σ_1/P_0 線図であり, Fig. 7は自由面が存在する場合のそれである. さらにFig. 8は, x 軸にそうき裂の先端のごく近傍に発生する接線方向の引張応力 $\sigma_{\theta x}$ および y 軸にそうき裂の先端のごく近傍に発生する接線方向の引張応力 $\sigma_{\theta y}$ の値とき裂の長さ C との関係を, 自由面が存在する場合(実線)と存在しない場合(点線)とについて示したものである. これらの図よりまず, x, y 両方向にき裂が生成すると, 円孔内壁に発

Fig. 7. Contours of σ_1/P_0 in the material with a free face when a pressure is applied in every hole and the holes have four radial cracks of length $1.75a$.

Fig. 6. Contours of σ_1/P_0 in the material with no free face when a pressure is applied in every hole and the holes have four radial cracks of length $1.75a$.

Fig. 8. Change in $\sigma_{\theta x}$ and $\sigma_{\theta y}$ with the growth of four radial cracks, where $\sigma_{\theta x}$ and $\sigma_{\theta y}$ are the tangential tensile stresses near the tips of the cracks along x axis and y axis, respectively.

Table I. Optimum blasting condition for smooth blasting and presplit blasting (After U. Langefors and B. Kihlström).

Drill hole diameter d mm (in)	Concentration of charge l kg/m (lb/ft)	Charge units	Smooth blasting		Presplitting	
			E_1 m	V_1	E_1 m	(ft)
30 ($1\frac{1}{2}$)		Gurit	0.5	0.7	0.25-0.4	($1-1\frac{1}{2}$)
37 ($1\frac{1}{2}$)	0.12 (0.08)	Gurit	0.6	0.9	0.30-0.5	($1-1\frac{1}{2}$)
44 ($1\frac{3}{4}$)	0.17 (0.11)	Gurit	0.6	0.9	0.30-0.5	($1-1\frac{1}{2}$)
50 (2)	0.25 (0.17)	Gurit	0.8	1.1	0.45-0.70	($1\frac{1}{2}-2$)
62 ($2\frac{1}{2}$)	0.35 (0.23)	Nabit 22 mm	1.0	1.3	0.55-0.80	($2-2\frac{1}{2}$)
75 (3)	0.5 (0.34)	Nabit 25 mm	1.2	1.6	0.6-0.9	(2-3)
87 ($3\frac{1}{2}$)	0.7 (0.5)	Dynamite 25 mm	1.4	1.9	0.7-1.0	(2-3)
100 (4)	0.9 (0.6)	Dynamite 29 mm	1.6	2.1	0.8-1.2	(3-4)
125 (5)	1.4 (0.9)	Nabit 40 mm	2.0	2.7	1.0-1.5	(3-5)
150 (6)	2.0 (1.3)	Nabit 50 mm	2.4	3.2	1.2-1.8	(4-6)
200 (8)	3.0 (2.0)	Dynamite 52 mm	3.0	4.0	1.5-2.1	(5-7)

E Distance between the holes
V Length of burden

生する引張応力の値が低下し、すべての点においてき裂先端近傍に発生するそれらよりも低くなっている。このことは4方向にき裂が生成するともはやそれ以上半径方向のき裂は生成し得ないことを意味している。さらに、 x 、 y 両方向に長さが等しいき裂がある場合には x 軸にそったき裂の先端近傍に発生する引張応力の方が y 軸にそったき裂の先端近傍に発生するそれよりもつねに大きくなっている。このことは x 軸、したがって、各孔の中心を結ぶ線にそったき裂の方がつねにそれと直交する方向のき裂よりも長くなることを意味している。なお、この傾向は自由面が存在する方が顕著になっている。さらにまた、 x 軸にそったき裂の先端に発生する引張応力の値におよぼしている自由面の効果を見ることによって、自由面が存在すれば自由面が存在しない場合より低い内圧で各孔を結ぶ線にそったき裂が完成することがわかる。以上に示した応力解析結果より、たとえまづ y 方向にき裂が発生したとしてもそれがかなりの長さ発達するまでに隣接孔内の装薬が起爆して内圧が作用するならば、 y 方向のき裂は抑制され、 x 方向、したがって、切断予定線にそったき裂の方が助長されて長くなること、および、自由面が存在する場合、すなわち、スムーズブラスティングの場合の方が自由面がない場合、すなわちブリスプリッティングの場合よりも孔間隔を増大しうることがわかる。Table I は、試験爆破の結果より実験的に求められたスムーズブラスティングおよびブリスプリッティングの場合の最適孔間隔などを示したものであるが、この表より、実際の爆破の場合にもブリスプリッティングの方がスムーズブラスティングの場合より孔間隔を短くしなければならぬことがわかる。この結果は上

記の解析結果とよく一致している。

4 ガス圧によるセメントモルタルブロックの破壊実験

上記の有限要素法による解析結果を確かめるために、主としてガス圧によって材料を破壊する火薬類の一種である CCR を用いてセメントモルタルを破壊する実験を行なった。実験に使用したセメントモルタルブロックは、Fig. 9 に示すように $1.5\text{ m} \times 1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ の大きさのブロックであって、これに深さ 50 cm の2個の装薬孔を穿孔するとともに、その内部に CCR の爆発によって装薬を含む面上の各点に生ずるひずみが測定できるように、抵抗線ひずみゲージを埋め込んだものである。実験に際しては、上記の2本の装薬孔に CCR 10 g を装てんし、これらを直列結線と同時に点火してブロックを破壊するとともに、その場合に材料内に発生したひずみの測定を行なった。Fig. 10 は、Fig. 9 に示した各点のひずみ記録を示したものである。まず、C孔近傍の点 f 、 g 、 i のひずみ記録とA孔近

Fig. 9. Position of strain gauge and charge holes in the test block.

Fig. 10. Strain oscillograms at the points shown in Fig. 9.

Fig. 11. Pattern of the cracks produced actually.

傍の点 b , c , d のひずみ記録とを対比することによって, この実験の場合にはまず C 孔が起爆し, その後ほぼ 15 ms 遅れて A 孔が起爆していることがわかる. そこで, A 孔近傍の点 c , d のひずみ記録をみると, 先に示した応力解析結果に現われていたように, C 孔の爆発によって A 孔内壁と両孔の中心を結ぶ線との交点近傍に引張応力が発生し, その引張応力に A 孔内の装薬の爆発に起因する引張応力が重畳し, これによって材料が破壊していることがわかる. なお, このブロックは Fig. 11 に示したように破壊したが, この破壊の様相は, まず最初に起爆する装薬孔から発生するき裂には方向性を持たせることはできないが, ついでそれに隣接する装薬孔内の装薬が爆轟した場合には, 両孔の中心を結ぶ線にそうき裂が発生するという今回の解析結果から推定される破壊の様相と合致している. さらにまた, Fig. 6 および Fig. 7 より, き裂が発生すると, き裂近傍の引張応力が消失することがわかる. そこで, Fig. 10 に示した点 g と点 i とのひずみ記録を対比してみると, 両者はほぼ同じ時間的变化状態を示しており, ほぼ同じ時間に引張ひずみが消失し, 圧縮ひずみに変化している. このことは C

孔内の装薬の爆発によってブロックは Fig. 11 に示すように, ほぼ g 軸にそって破断したけれども, 装薬の中心近傍のブロック内部では x および z 軸にそうき裂が発生していることを示しているものと考えられる. 以上のように, 表面に現われていないき裂をも含めてひずみ記録から推定しうるき裂の様相もまた, 有限要素法による解析結果を裏づけている.

5 結 言

本研究においては, まず, 無限の広がりを持つと考えられる弾性体内に存在する球形空洞の内部に時間の関数としての圧力が作用した場合に弾性体内に発生する応力の時間的变化状態を計算することによって, 圧力の時間的变化状態の差異によって応力状態がどのように変化するかを検討した. その結果, 圧力の立ち上がり時間が短い場合には, 材料内の応力状態は主として波動による動的応力によって支配されるが, 立ち上がり時間が遅くなるにつれて波動が発生しにくくなり, 最終的には空洞内に静圧が作用したと考えた場合に材料内に発生する静的応力状態となることを示した. したがって, 燃焼速度が遅く圧力の立ち上がり時間の遅い火薬類を用いた場合とか, 爆発にともなう衝撃を軽減するような爆破法を用いた場合には, 爆発ガスの圧力による準静的な破壊が破断面の形成にかなり寄与するであろうと考えられる. そこでつぎに, スムースプラスティングのように, 装薬孔が一列に並んでいる場合を例にとってガス圧による放射状き裂の発生状況と, その進展に伴って材料内にどのような応力状態が発生するかを有限要素法による応力解析結果を用いて検討し, さらに, 主としてガス圧によって材料を破壊する火薬類の一種である CCR を用いてセメントモルタルブロックを破壊する実験を行ない, これらを総合してガス圧による材料の破壊について検討し, スムースプラスティングの場合の破断面の形成にはガス圧がかなり寄与している場合があることを明らかにした.

なお, 上記の CCR によるセメントモルタルブロックの破壊実験は, 旭化成工業株式会社雷管工場と共同して実施したものであることを付記しておく.

(昭和45年11月27日 第3回岩の力学国内シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 伊藤一郎, 佐々宏一, 水曜会誌, **16**, 75 (1966).
- 2) 伊藤一郎, 佐々宏一, 日本鉱業会誌, **84**, 1059 (1968).
- 3) 伊藤一郎, 佐々宏一, 谷本親伯, 土木学会昭和45年度全国大会講演概要集 (第Ⅲ部門).