

## コンクリート破砕薬による材料の破壊について

BLASTING BY SPECIALLY MADE LOW EXPLOSIVES FOR URBAN WORKS.

伊藤 一郎\*・佐々宏一\*\*・谷本親伯\*\*\*  
By Ichiro Ito, Koichi Sassa and Chikaosa Tanimoto

## 1. 緒 言

産業や文化の発達につれて都市の再開発が必要となるが、そのためにはどうしても既存の構造物を破壊撤去しなくてはならない。さて、構造物、特にコンクリート構造物を破壊する方法としては火薬類を使用する方法と機械力を用いる方法とが考えられる。火薬類を用いる方法は手軽であり、かつ経済的であるが、従来は爆発音、爆破震動、飛石などのために市街地での火薬類の使用はかなり困難であった。しかし、近年コンクリート破砕薬と呼ばれる一種の弱い火薬が開発され、これらを用いることによって市街地におけるコンクリート構造物の破壊がかなり容易に行なえるようになってきた。そこでわれわれはこの種の火薬類の合理的な使用法について検討する資料を得るために、コンクリート破砕薬による材料の破壊機構について検討したのでその結果について報告する。

## 2. コンクリート破砕薬の爆発にともなう現象

コンクリート破砕薬の爆発にともなう諸現象について検討するためには、その爆発によってどのような圧力が発生するかを知る必要がある。さて、現在市販されているコンクリート破砕薬の燃焼速度はかなり遅く、いずれも 300 m/sec 以下であって、ダイナマイトの爆速 (3 000 ~ 6 000 m/sec) のほぼ 1/10~1/20 である。したがって、その爆発によって装薬室内壁に作用する圧力の立ち上り時間 (圧力が作用しはじめてから最高値に達するまでの時間)、および圧力最高値はダイナマイトの場合のそれら (立ち上り時間: 数マイクロセカンド<sup>1)</sup>、爆発圧力: 数

万~十数万 kg/cm<sup>2</sup>) とはかなり異なるであろうと推定される。そこでまず、コンクリート破砕薬を鋼製の密閉容器内で爆発させ、その爆発によって容器内壁に作用する爆発圧力の実測を行なった。今回はとりあえずコンクリート破砕薬のうち CCR と SLB III 型とについて圧力測定を行なったが、その結果、両者にはほとんど差異はなく、いずれも圧力の立ち上り時間はほぼ 5 msec、爆発圧力は 1 000~1 500 kg/cm<sup>2</sup> という値が得られた<sup>2)</sup>。

上記のように、コンクリート破砕薬が爆発した場合に装薬室内壁に作用する圧力の立ち上り時間は、ダイナマイトが爆発した場合のそのほぼ 1 000 倍であるから、このようなゆるやかな立ち上り時間を持った圧力が装薬室内壁に作用した場合の材料の破壊機構は、ダイナマイトが爆発した場合のそれ<sup>3)</sup> とはかなり異なるものと考えられる。そこで次に、装薬室内壁に作用する圧力の立ち上り時間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について検討した。まず、上記の関係についての一般的な性質を知るために、無限の拡がりを持つと考えられる完全弾性体内に設けた半径  $a$  の球形空洞の内面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どのような応力状態が発生するかを弾性理論から導びかれた計算式<sup>4)</sup> を用いて、主として球形空洞内に作用する圧力の立ち上り時間との関係について計算した。計算の対象とした材料は、弾性縦波の伝播速度が 4 000 m/sec、密度が 2.0 g/cm<sup>3</sup>、ポアソン比が 0.25 のものであり、内圧が作用する球形空洞の半径は 10 cm とした。計算結果の一例を示したのが図-1 (a), (b), (c) であって、これらの図には、鎖線で示したような時間的に変化する内圧が球形空洞内に作用した場合に、その球形空洞の中心から 50 cm の位置における半径方向の応力  $\sigma_r$  および接線方向の応力  $\sigma_\theta$  が時間的にどのように変化するかが実線および点線で示してある。なお、 $P_0$  は球面に作用させた圧力の最高値である。

まず、球面に作用させた圧力の立ち上り時間をみてみ

\* 工博 京都大学教授 工学部資源工学教室

\*\* 正会員 工博 京都大学講師 工学部資源工学教室

\*\*\* 正会員 工修 西松建設(株) 土木設計部

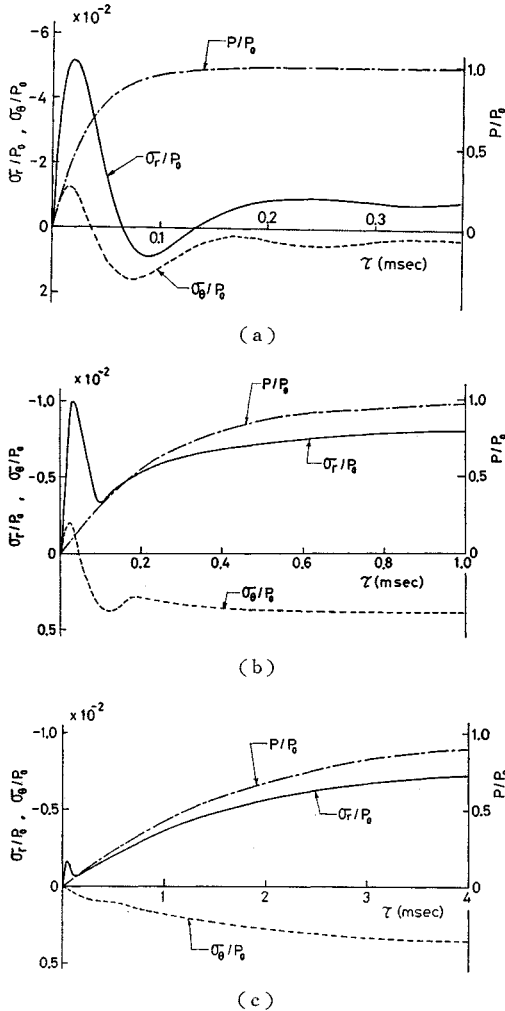


図-1 球形空洞内に作用する圧力の立ち上がり時間と材料内の応力状態との関係

ると、(a) 図に示したものはほぼ 0.1 msec、(b) 図および (c) 図に示したものではそれぞれほぼ 0.8 msec および 5 msec となっており、順次長くなっている。そこでたとえば、半径方向の応力  $\sigma_r$  をみてみると、(a) 図の場合にはその最高値は  $-0.052 P_0$ 、(b) 図の場合には  $-0.01 P_0$  となっている。これらの  $\sigma_r$  の時間的変化状態において、最初に現われるピークは波動によって生じた応力のピークであり、その後にくつなだらかな変化を示す応力（その値はほぼ  $-0.008 P_0$ ）は  $P_0$  なる大きさの静的圧力が球面に作用した場合にその位置に発生する静的応力である。(c) 図においては波動による応力が非常に小さくなり、静的圧力に対応する応力値の方が大きくなっており、応力の時間的変化状態も球面に作用する圧力のそれとほぼ等しくなっている。このことは、圧力の立ち上がり時間がある程度長くなると波動が発生しなくなり、材料内の応力状態は球面上にゆるやかに変化する

静的圧力が作用した場合とほぼ同じとなることを示している。

以上に弾性理論による計算結果を示したが、コンクリート破砕薬がコンクリート内で爆発した場合にはどのような応力状態が発生するかを確認するために、大きさが  $0.9\text{ m} \times 1.0\text{ m} \times 1.5\text{ m}$  のセメントモルタルブロック内でコンクリート破砕薬の一種である CCR および比較のために無煙火薬を爆発させた場合に発生するブロック側面の変位および変位速度の測定を行なった。測定点は装薬の中心からブロック側面へ下した法線とブロック側面との交点であって、装薬の中心から測定点までの距離はすべて 50 cm である。図-2 は、上記のブロック内で CCR 10 g を爆発させた場合にブロック側面上で面に直角な方向に生じた変位および変位速度の記録を示したものであり、図-3 は、比較のために無煙火薬 5 g を爆発

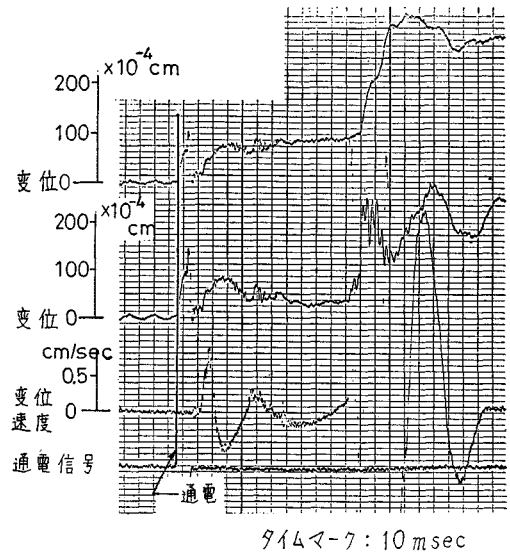


図-2 CCR 10 g の爆発に起因するブロック側面の変位および変位速度記録の一例

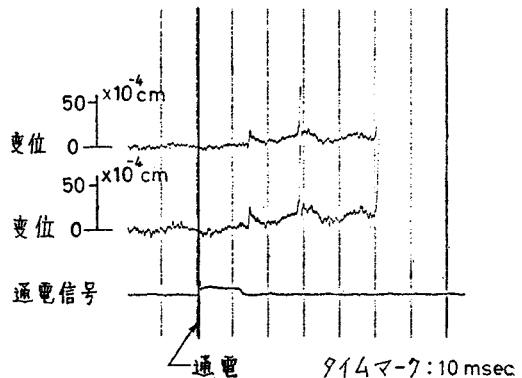


図-3 無煙火薬 5 g の爆発に起因するブロック側面の変位記録の一例

させた場合の記録を示したものであって、いずれの記録においても基線より上方への振れがブロック側面がふくらむ方向への変位または変位速度を示している。なお、変位の測定には岩崎通信機製の容量型微小変位計を使用し、変位速度の測定には Geospace 社製の変位速度計を使用した。また、図-2 に示した変位記録において、通電と同時に現われているパルス的な変化は点火電流に起因するノイズである。このことは、その時間に対応する変位速度記録に全く変化がないことから理解することができる。したがって、このパルス的な変化は無視して記録を見る必要がある。

まず、図-2 に示した変位速度記録より、CCR 10 g を爆発させた場合には、通電から約 15 msec 経過した時に装薬が爆発して装薬室内壁に圧力が作用しはじめ、それに起因する変位が側壁に発生したことがわかる。その後ほぼ 20 msec の間は変位は増大し、約 80 ミクロンの変位となり、この変位はしばらく持続するか、または、徐々に減少し、通電後ほぼ 120 msec 経過したときに再び大きな変化を示し、側面が 200~400 ミクロン移動したことを示している。同様に、図-3 に示した無煙火薬 5 g を爆発させた場合の変位記録においても、通電後約 15 msec 経過したときに装薬が爆発してそれに起因する急激な立ち上がりを持つ変位が現われており、通電後ほぼ 50 msec 後に 300 ミクロン以上の大きな変化が現われている。図-2 に示した記録においては通電後ほぼ 120 msec で、図-3 に示した記録においては通電後ほぼ 50 msec で現われている大きな変化は、爆発によって生成したきれつがブロック表面まで到達し、ブロックが2個に分離し、移動を開始したことを示しているものである。したがって、図-1 に示した計算結果と図-2 および図-3 に示した実測結果とを対比する場合にはブロックが分離し、剛体変位を開始するまでの変位記録と計算結果とを対比しなければならない。以上のことを考慮して、図-1 に示した結果と図-2 および図-3 に示したそれらとを対比することによって、CCR が爆発した場合に材料内に発生する応力状態は図-1(c) に示したような状態に対応しており、無煙火薬が爆発した場合には図-1(b) に示した状態に近いことがわかる。さらにまた、図-1、図-2、図-3 を対比することによって、CCR が爆発した場合には爆発に起因する波動はほとんど発生しないが、無煙火薬が爆発した場合には、その程度はそれほど大きくはないが波動が発生することがわかる。

以上の検討の結果より、コンクリート破砕薬を用いて爆破を実施した場合に発生する震動の主要部分は、コンクリート破砕薬の爆発圧力によって直接的に発生するのではなく、ガス圧によって生成したきれつによって分離した破片が移動する時に加えられる、または解放される、

外力および破砕片の落下、衝突などに起因して2次的に発生するものであると考えることができる。このことは最小抵抗線の長さを長くし、破砕片ができないような条件下で爆破を行えば、震動はほとんど発生しないという事実と一致している。

### 3. 装薬室内に作用する準静的なガス圧によるきれつの発生および進展とそれにもともなう応力状態の変化

前節で示したように、コンクリート破砕薬が爆発した場合には波動はほとんど発生せず、材料内の応力状態は時間とともに徐々に変化する準静的な圧力が装薬室内に作用したと考えた場合とほぼ等しくなるので、コンクリート破砕薬の爆発にもともなう材料内の応力状態は静的な応力解析法を用いて解析することができるものと考えられる。そこでまず、破壊の進展にもなつて材料内の応力状態がどのように変化するかを有限要素法を用いて解析してみた。

さて、かなりの長さをもつ円柱状装薬の場合には、問題をほぼ2次的に考えうるし、また、ガス圧による破壊の進展にもともなう応力状態の一般の性質は2次元解析で検討しうるもので、ここでは簡単のために、2次元問題として考えてみることにする。弾性理論によれば、無限の拡がりを持つと考えられる弾性体内に存在する円孔内壁に圧力  $P$  が作用した場合には、円孔内壁に接線方向に作用する応力  $\sigma_\theta$  は内圧  $P$  と等しい値を持つ引張応力となる。コンクリート破砕薬の爆発圧力は  $1000 \text{ kg/cm}^2$  程度であるから、内圧が最高値に達するまでに円孔内壁の  $\sigma_\theta$  の値は材料の引張強度以上となり、内壁から半径方向のきれつが生成することになる。この場合、現実に存在する装薬孔の断面は完全な円形ではなく、また、材料の強度も円孔内壁のいたる所で全く同一ということはありませんので、内圧が材料の平均引張強度  $S_t$  に近づくと円孔内壁の中でもっとも弱い所がまず破壊し、半径方向にきれつが生成するものと考えられる。このように円孔内の1カ所にまずきれつが発生すると、きれつが発生した位置の反対側近傍の円孔内壁の引張応力がそれによって増大するから、ついで、反対側近傍から半径方向のきれつが生成するものと考えることができる。そこでまず、図-4 に示すように、円孔内壁から  $x$  軸の正および負方向に向って同じ長さの2本の半径方向のきれつが発生したと仮定した場合に、これらの半径方向のきれつの発生によって材料内の引張応力がどのように変化するかを有限要素法を用いて解析した。その一例として、きれつの長さ  $(c)$  が円孔半径  $(a)$  の2倍である場合について材料内に発生する最大主応力(引張主応力)の値が等し

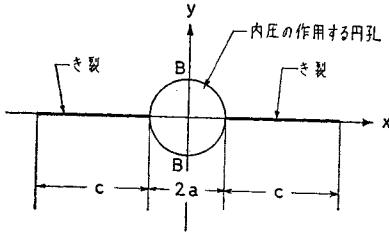


図-4 応力解析条件の一例

い点を結んだ等最大(引張り)主応力線を示したのが図-5である。なお、図に示した曲線に付した数字は最大主応力の値( $\sigma_{max}$ )を内圧 $P$ で除した値である。また、図にはきれつが存在しない場合の等最大主応力線が点線で示してある。図-5に示すように、円孔内壁から半径方向のきれつが発生すると、きれつ先端には応力集中が発生するので、きれつ先端近傍の点の引張応力の値はきれつが発生するまでにその点に発生していた引張応力

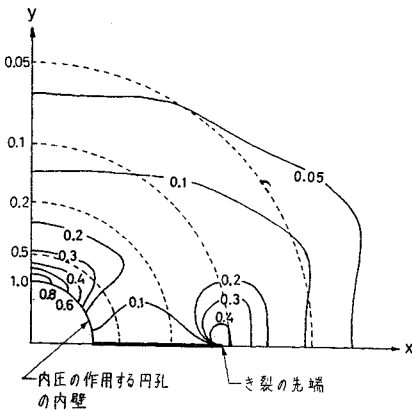


図-5 内圧の作用する半径  $a$  の円孔から長さ  $2a$  の半径方向のきれつが一直線上に発生した場合の等最大(引張)主応力線図

の値よりもかなり大きくなる。一方、きれつの発生にともなう円孔内壁の接線方向の引張応力の変化をみると、きれつの生成によってきれつ近傍の接線方向の応力が開放されるので、きれつと円孔内壁との交点近傍の引張応力はかなり低下している。このことは、ある一点から半径方向のきれつが生成すると、そのきれつの近傍には別の新たなきれつは生成しないことを示している。図-6は、きれつ先端近傍の引張応力の値および図-4に示した円孔上のB点、すなわち、きれつの進行方向と直交する(y方向)と円孔内壁との交点に発生する引張応力の値がきれつの進展につれてどのように変化するかを示したものである。図より、きれつ先端近傍の引張応力の値はきれつの長さが長くなるにしたがって減少するが、B点の引張応力の値はきれつの長さが長くなってもそれほど変化しないことがわかる。

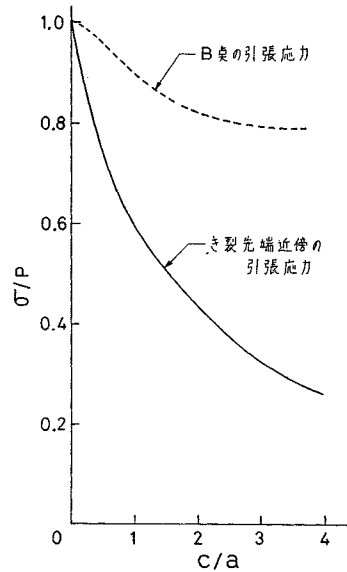


図-6 きれつの進展にともなうきれつ先端近傍および円孔壁面上のB点の引張応力の変化

さて、円孔内に作用する準静的な圧力によって発生する半径方向のきれつの長さは、きれつ先端における引張応力の値と材料の引張強度とによって決定されるが、今回行った有限要素法による解析においては、きれつ先端の曲率は考慮されておらず、さらに、分割された要素も有限の面積を持っているために、今回の計算結果からは発生するきれつの長さを正確に推定することはできない。しかし、図-6に示したように、B点の引張応力の値ときれつ先端近傍の引張応力の値との比はきれつの長さが長くなるにつれて増大するので、x軸にそうきれつがまず発生したとしても、ついで、y軸にそうきれつが発生する可能性があると考えられる。そこで次に、x, y両軸の正、負両方向にそって4本のきれつが発生したと考

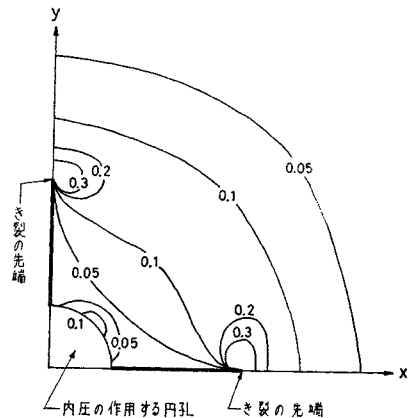


図-7 直交する4方向に長さ  $2a$  のきれつが生成した場合の等最大(引張)主応力線図

えた場合の応力状態を解析した。その結果の一例を示したのが 図-7 である。図に示すように、互いに直交する 4 方向にきれつが生成した場合には、円孔内壁に発生する引張応力の値がかなり低下し、この値はきれつ先端近傍に発生している引張応力の値より小さくなっている。このことは、直交する 4 方向にきれつが発生してしまえば、もはやそれ以上別の新たなきれつが装薬孔内壁から発生し得ないことを意味している。以上の検討の結果より、コンクリート破砕薬を用いて材料を破壊する場合には、破砕片は大塊となるのがわかる。このことは今までに実施された施工の結果と一致している。

次に、半径方向のきれつの進展とともに材料内に発生する接線方向の応力がどのように変化するかについてみてみることにする。いま、図-4 に示したように  $x$  軸にそって 2 方向にきれつが進展する場合について、図-8 に示した各点の接線方向の応力がきれつの先端の移動とともにどのように変化するかを示したのが 図-9 である。なお、この場合には孔内に作用する圧力は時間に関

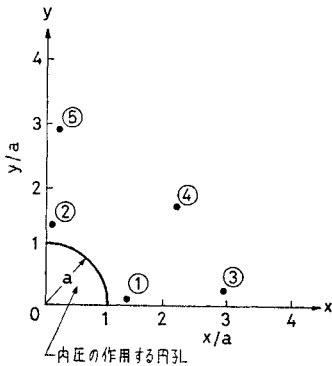


図-8 図-9 に応力状態を示した点の位置

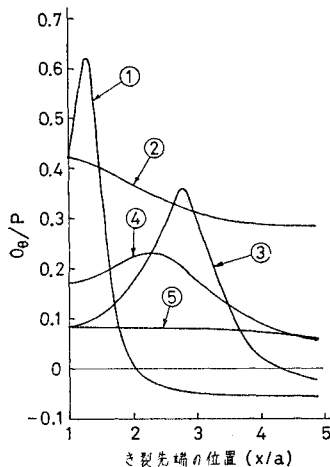


図-9  $x$  軸にそってきれつの進展とともに図-8 に示した各点の接線方向の応力の変化状態

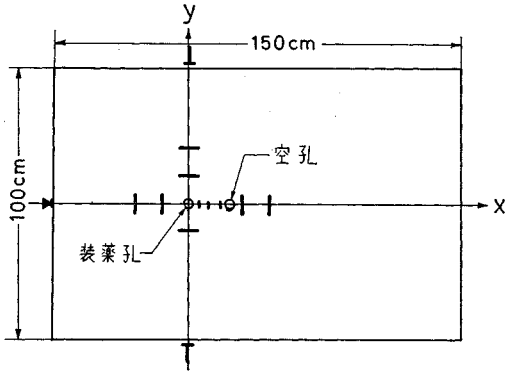
係なく一定であると考えている。図-9 より、きれつが進行してくる方向にある点の接線方向の引張応力は、孔内に作用する圧力が一定であっても、きれつの先端がその点に近づいてくるにしたがって増大し、きれつの先端がその点にもっとも近づいた時に最大値を示し、その点の近傍を通過してしまうと急激に減少することがわかる。このことからきれつの進行方向にある点の接線方向の引張応力が最高値に達するまでの時間はきれつ先端の進行速度と関係があることがわかる。

一方、きれつの進行方向に直交する方向にある点の接線方向の応力値はきれつの進展とともに徐々に減少してはいるが、それほど顕著な変化は示していない。このことは、きれつの進行方向に対して直交する方向の点の接線方向の引張応力の時間的変化状態は、孔内に作用する圧力の時間的変化状態とほぼ同じ（きれつの進展とともにその値はやや低下するが）となることを示している。

以上のように、図-9 に示した解析結果より、材料内の点に生ずる接線方向のひずみの時間的な変化状態は、装薬室内壁に作用する圧力の時間的変化状態のみならず、きれつの進展状態およびきれつに対するその点の相対位置と関係があることが明らかとなった。このことは、装薬室近傍において接線方向のひずみの測定を行えば、装薬室内壁から発生した半径方向のきれつの方向や長さを、たとえそのきれつが表面まで達していないものであっても推定することができることを示している。そこで次にこれらのことを確かめるために、コンクリート破砕薬の一種である 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った。

#### 4. コンクリート破砕薬によるセメントモルタルブロックの破壊実験

実験に使用したセメントモルタルブロックは  $90 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} \times 150 \text{ cm}$  の直方体であって、ブロックの破壊状況をくわしく検討するためにその内部に多数の抵抗線ひずみゲージをセメントモルタル打設時にあらかじめ埋め込んだものである。このブロックにせん孔した装薬孔、空孔および埋め込んだひずみゲージの位置ならびにブロック側面の変位および変位速度測定点の位置を図示したのが 図-10 である。なお、ひずみゲージおよび変位ならびに変位速度測定点はすべて装薬の中心を通る平面、すなわち、ブロックの上面 ( $100 \text{ cm} \times 150 \text{ cm}$  の面) から  $50 \text{ cm}$  下方の平面内にある。測定記録の一例として、図-10 に示した装薬孔内に CCR  $10 \text{ g}$  を装填し、セメントモルタルを用いてタンピングを行ない、これが固結した後に点火してブロックを破壊した場合に得られたひずみ記録を示したのが 図-11 である。図-11 に示した



- : ゲージ長さ8cmの抵抗線ひずみゲージ(L)
- - : ゲージ長さ1cmの抵抗線ひずみゲージ(S)
- T : 容量型変位計
- : 速度型振動計

図-10 セメントモルタルブロック内部に埋め込んだひずみゲージおよび変位および変位速度測定点の位置

ひずみ記録は、すべて基線より上が引張ひずみ、下が圧縮ひずみであり、それぞれの記録に付した $+4x$ とか $-10y$ という記号はその記録が得られたひずみゲージの位置を示しており、たとえば $+4x$ であれば図-10に示した $x$ 軸の正方向に原点(装薬孔の中心)から4cmの位置に設置された接線方向のひずみゲージの記録であるという意味であり、 $-10y$ であれば $y$ 軸の負方向に10cm離れた位置でのひずみ記録であるということを示している。なお、(S)、(L)の記号は、図-10に示したように、使用したひずみゲージの長さを示す記号である。さて、図-9に示した計算結果を念頭において図-11に示したひずみ記録をみてみることにする。まず、 $-10y$ および $+8x$ の位置でのひずみゲージの記録より、このゲージをきれつが横切りゲージを切断したことがわかる。そこで次に $+4x$ 、 $+13x$ 、 $+10y$ の位置での記録

をみてみると、いずれもはじめは引張ひずみを示しており、通電から10~15msec後に最高値となり、15~25msec後には圧縮ひずみに変化している。このようなひずみの変化は図-9に示した点①の引張応力の変化とよく似ている。このことより、通電から10~15msec経過したときにこれらの点のごく近傍を半径方向のきれつが通過したことがわかる。なお、 $+4x$ の位置のひずみ記録に現われているかなり大きな圧縮ひずみは、きれつ内に進入したガスの圧力によるものと考えられる。さらに、 $+20x$ 、 $+20y$ の位置でのひずみ記録において、これらの点に生じた引張ひずみが最高値に達するまでの通電からの時間は20~25msecであって、 $+13x$ 、 $+10y$ の点のそれらよりも5~10msec遅くなっており、さらに圧縮ひずみに変化するまでの時間も40~50msecと遅くなっている。これらの現象が図-9に示した点③の計算結果と一致していることを考慮すれば、通電から20~25msec後にこれらの点のごく近傍を半径方向のきれつが通過したことがわかる。図-10に示したように、このブロックには $+15x$ の位置に空孔が存在しているが、上に述べたひずみ記録の解析結果から明らかとなり、半径方向に生じたきれつは空孔に到達し、空孔の位置をこえてさらに進展していることがわかる。このことは、実験後に空孔内でガス測定を行なったところ、空孔内に爆発生成ガスが存在していることが確かめられたことによっても裏づけられている。次に、 $-10x$ の位置でのひずみ記録をみてみると、 $+10y$ 、 $+13x$ の位置でのひずみ記録に現われているような圧縮ひずみは認められず、引張ひずみは急激に減少するが圧縮ひずみにはなっていない。このようなひずみの変化状態は、図-9に示した点④の接線方向の応力の変化と一致している。このことより、 $-10x$ のごく近傍には半径方向のきれつは発生せず、半径方向のきれつはこの点よりやや離れた位置を通過しているものと推定できる。最後に、 $+30x$ 、 $-20x$

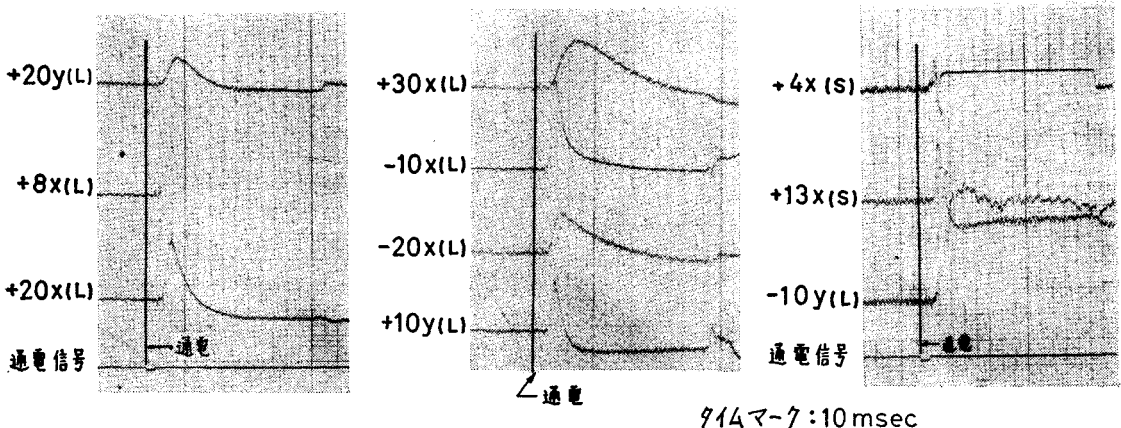


図-11 ひずみ記録の一例

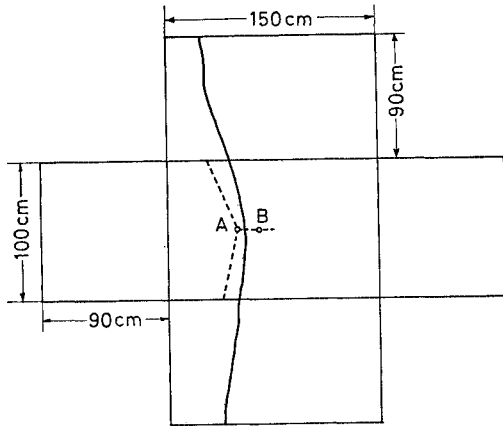


図-12 ブロックの破壊状況

の位置のひずみは最高値に達するまでの時間も遅く、引張ひずみもゆるやかに消失している。このことは、これらの位置の近傍にはきれつが発生しなかったことを意味しているものと考えられる。図-12は、上記の爆破で生成したきれつの様相を示したものであって、実線は表面に現われたきれつの外観を示したものであり、点線は装薬を含む面上におけるきれつの様相を推定して示したものである。図に示すように、このブロックは幅が1.5～2mmの1本のきれつで2個に分離したが、上記のひずみ記録や爆破直後にB孔内に爆発生成ガスが存在したことなどから、装薬を含む面においては3方向にきれつが生成しているものと考えられる。

以上にひずみ記録の解析の一例を示したが、今回行った多数のひずみ測定結果より、材料内の接線方向のひずみを測定することによって、材料内に発生した半径方向のきれつの方向や長さなどを推定しうることが明らかとなった。このことはひずみ測定を行なうことによって表面に現われないきれつや肉眼では検出しにくいヘヤクラックの発生などを検出しうることを意味している。

次に、装薬室内に爆発圧力が作用しはじめてからきれつが発生し、それが進展してブロックの壁面まで達し、ブロックが分離するまでの時間をみてみることにする。さきに図-2に示した記録は図-10に示した変位および変位速度測定点で測定した変位および変位速度の記録の一例であって、CCR 10gを用いてブロックを破壊した場合に得られたものである。なお、この爆破ではブロックは1本のきれつによって2個に分離した。図-2に示した変位のオシログラムにおいて、装薬室壁面に圧力が作用しはじめてからほぼ15msec経過したときに1つのピークを形成しているほぼ80ミクロンの変位は、先にも示したように、装薬室壁面に作用した爆発圧力に起因するブロック側面のふくらみに対応する変位であり、その後ほぼ90msec後に現われている300ミクロン以

上の大きな変位は、きれつがブロックの壁面にまで達しブロックが2個に分離して移動を開始したために生じた破断片の剛体変位に対応するものである。したがって、図-2に示した記録が得られた爆破の場合には、装薬室内に圧力が作用しはじめてから、きれつが完成し、ブロックが2個に分離して移動を開始するまでにほぼ110msecもの時間がかかっていることがわかる。一方、図-11に示したひずみ記録より、装薬室の中心から10～20cmの位置に半径方向に進展するきれつが発生した時刻（接線方向の引張ひずみが最高値となる時刻）は装薬室内に圧力が作用しはじめてから5～10msec後であることがわかる。

以上に示したきれつの発生時刻に関するデータより、図-10に示した装薬孔内でCCR 10gを爆発させてブロックを破壊する場合の破壊状況を次のように推定することができる。すなわち、先にも示したように、コンクリート破砕薬の爆発圧力の最高値はほぼ1000kg/cm<sup>2</sup>であるから、装薬室内でコンクリート破砕薬が爆発するとその圧力が最高値に達しないうちに装薬室壁面から半径方向に進展するきれつが発生するものと考えられる。このきれつの先端に発生する引張応力の大きさは、図-6に示した結果からも明らかのように、きれつの長さが長くなるにつれて減少するので、爆発ガスの圧力が装薬室の壁面のみに作用すると考えると、半径方向に進展するきれつの先端は装薬室内に爆発圧力の最高値が作用したときにきれつ先端に発生する引張応力の値がその材料の引張強度と等しくなる位置まで進展することになり、このきれつが発生する時間は爆発圧力が最高値に達するまでであると考えられる。さて、装薬室内に作用する爆発ガスの圧力はその最高値に達した後は体積膨張と温度低下によってその圧力値は減少するので、装薬室壁面のみに圧力が作用していると考えると装薬室内に爆発圧力の最高値が作用したときに生成しているきれつがブロック表面まで達しなければその後はきれつは進展し得ないのでブロックは分離しないことになる。しかし実際には、装薬室壁面から半径方向に向って発生しているきれつ内へ爆発生成ガスが進入し、装薬室壁面のみならずきれつの内面にもガス圧が作用するようになるので、それによってきれつ先端の引張応力が上昇し、爆発圧力が最高値に達した後もきれつは進展することになる<sup>9)</sup>。このように、きれつ内へ進入した爆発ガスの圧力によってきれつが発達している段階においては、きれつの進展速度はきれつ内へのガスの進入速度で規定されるから当然かなり遅くなるものと考えられる。さらに、このきれつがどこまで進展するかはきれつ内へどこまで深くガスが進入するかということ、および、その圧力値に関係していることになる。なお、実際にきれつ内に爆発

生成ガスが進入しきれつの内面にもガス圧が作用していることは、図-11 に示した +4x の位置のひずみ記録に明瞭に現われている。

以上のように今回の実験において、装薬室近傍にきれつが発生してからそれが進展してブロックの壁面まで達し、破断片が生成するまでにかなりの時間がかかっているのは、今回の実験条件の場合には装薬室壁面のみに圧力が作用するという条件ではきれつはブロック壁面まで達し得ず、きつれ内へ爆発生成ガスが進入したことによるきれつの助長によってブロックが分離したためと考えることができる。なお、この推論が正しいことは、立方体のコンクリートブロックの中央に装薬してブロックを破壊する実験を薬量を順次増加させながら実施すると、薬量が増加するにつれて破断片の数が多くなり、それとともに、きれつが完成するのに要する時間も短くなるという実験結果、および、きれつの内面にもガス圧が作用した場合に材料内に発生する応力状態の解析結果によって裏づけられている。

図-13 は、図-10 に示したようなブロックがA孔内の装薬の爆発によって2個に分離した場合に得られた図-2にその一例を示したような変位記録より、装薬室内に圧力が作用したときからきれつが壁面まで達してブロックが分離し、破断片が移動を開始するまでの時間を求め、その値とその爆発によって生成したきれつの幅との関係を示したものである。図より

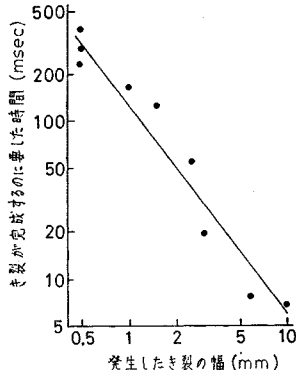


図-13 きれつが完成しブロックが移動を開始するまでの時間と発生したきれつの幅との関係

破断したブロックが移動を開始するまでの時間が短いほど、したがって、きれつ内へそれほど深くまで爆発生成ガスが進入しなくてもブロックを分離しうような装薬条件の場合には、きれつが完成した時に装薬室内に作用している爆発ガスの圧力もまだかなり高いので生成するきれつの幅は広がるが、きれつ内へかなり深くまでガスが進入しなければブロックを分離し得ないような場合には、きれつが完成した時にはかなりガス圧が低下しているために、生成するきれつの幅もかなり小さくなることわかる。このことは、コンクリート破砕薬を用いて飛石のない爆破を行なうためには、装薬孔内に装填したコンクリート破砕薬をセメントモルタルなどを用いて密封し、爆発生成ガスがきれつ内に十分進入しうような条件で爆破を行なう必要があることを示している。

## 5. 結 言

本研究においては、まず、コンクリート破砕薬のように燃焼速度の遅い火薬類が材料内で爆発した場合には、その爆発に起因する波動はほとんど発生しないことを、爆源近傍の粒子の変位の実測結果と弾性理論による計算結果とを対比して検討することによって明らかにした。したがって、コンクリート破砕薬を用いて爆破作業を行なった場合に発生する震動は、分離したブロックがガス圧で移動するときに作用する、または解放される外力などによって生じるものであると考えることができる。ついで、ガス圧が装薬室内に作用した場合には、爆源から進展する半径方向のきれつによって材料が破壊されるので、半径方向のきれつの進展にもなって材料内の応力状態がどのように変化するかを有限要素法を用いて解析した。その結果、ガス圧で材料が破壊する場合には、破断片は大塊となって分離すること、および材料内の接線方向のひずみを測定すれば、表面に現われない半径方向のきれつの長さおよびその方向を推定しうることを明らかにし、さらに、これらのことを実験的に確かめた。最後にコンクリート破砕薬による材料の破壊には、発生したきれつ内へ進入した爆発生成ガスの圧力によるきれつの助長がかなり寄与していることを明らかにし、コンクリート破砕薬を用いて有効な爆破を行なう場合にはセメントモルタルなどを用いて火薬を装薬孔内に密封してから点火する必要があることを示した。

なお、今回行なったコンクリート破砕薬 (CCR) を用いてセメントモルタルブロックを破壊する実験は、旭化成工業 (株) 雷管工場と共同して実施したものである。ここに記して感謝する次第である。

### 参 考 文 献

- 1) 伊藤一郎・佐々宏一：装薬室内壁に作用する爆轟圧について、日本鉱業会誌, Vol. 76, No. 870, p. 904~910, 1960. 12月
- 2) 佐々宏一・伊藤一郎：水中衝撃波法による爆轟圧力の測定、工業火薬協会誌, Vol. 27, No. 4, p. 228~233, 1966. 8月.
- 3) 佐々宏一・谷本親伯・伊藤一郎：CCRの爆発圧力について、工業火薬協会昭和44年秋季研究発表講演会要旨集, p. 39~40, 1969. 11月.
- 4) 伊藤一郎・佐々宏一：一自由面爆破の場合の岩盤内の応力状態について、日本鉱業会誌, Vol. 79, No. 898, p. 261~269, 1963. 4月.
- 5) 伊藤一郎・佐々宏一：爆破にともなう岩盤内応力に及ぼすポアソン比の影響、水曜会誌, Vol. 16, No. 2, p. 75~78, 1966. 12月.
- 6) 伊藤一郎・佐々宏一・谷本親伯：有限要素法の爆破工学への応用 (I) - ガス圧による破壊現象の解析への応用 - 工業火薬協会誌, Vol. 31, No. 1 p. 13~17, 1971. 1月.
- 7) 佐々宏一・伊藤一郎・花崎紘一：爆発ガスの圧力によるぜい性材料の破壊、工業火薬協会誌, Vol. 33, No. 1, 1972. 2月

(1971.9.14・受付)