

京都大学工学部 正員

〇佐々宏一

"

伊藤 一郎

1. 緒 言

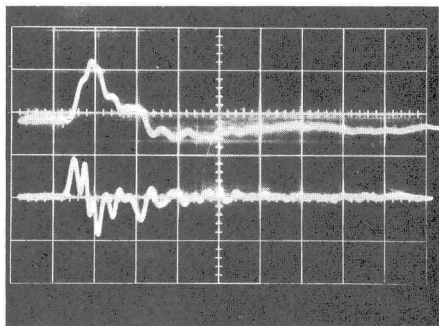
爆破作業を実施した場合に爆源近傍にどのような破壊が発生し、生成する破壊面の大きさはどの程度であるかということを推定できれば、それは爆破によるゆりみ領域の大きさの推定や合理的な爆破設計のための重要な資料となる。そこで今回は岩盤内で爆薬が爆轟した場合にその周囲に発生する応力状態および破壊の様相に関するシミュレーションを電子計算機による動的応力解析方法の一種である *Tensor Code*¹⁾ を用いて実施し、その結果と実測結果とを対比することによって爆源近傍の破壊状況を推定したのでその結果について報告する。

2. 実験方法および結果

電子計算機によるシミュレーションの結果と対比して検討するために、無限の広がりを持つと考えられる岩盤内で爆薬が爆轟した場合に周囲の岩盤内へ投射される応力波による岩盤粒子の変位状態の測定を実施した。実験にはほぼ水平で均質な岩盤表面からまず一直線上に60cm間隔で孔径5cm、長さ約10mのゲージ孔をボーリングマシンを用いて穿孔し、その孔底に特殊な固定装置を用いて圧電型加速度計と固定した。ついでこのゲージ孔列の延長線上に直径10cm、深さほぼ10mの装薬孔をボーリングマシンで穿孔し、ゲージ孔内の加速度計と爆薬の中心とを結ぶ線が自由面下ほぼ10mの同一面内にくるように爆薬を装填し、砂タンピングを行なったのち起爆して、この爆轟衝撃に起因する岩盤粒子の変位状態をゲージ孔内に設置した5個の加速度計を用いて測定した。

実験現場の岩石は鉄鉱石であって、その密度は $3.7g/cm^3$ 、一軸圧縮強度は $2,380kg/cm^2$ 、圧裂試験より求めた引張強度は $85kg/cm^2$ 、ヤング率は $1.1 \times 10^{10}kg/cm^2$ 、ポアソン比0.3である。使用した爆薬は密度 $1.4g/cm^3$ 爆速 $6,300m/s$ のダイナマイトであり、使用した薬包の形状は直径9cm、長さ40cmであり、その重

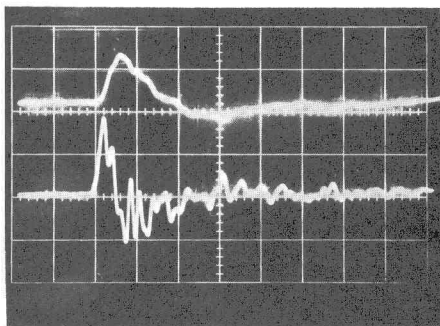
変位速度

変位
加速度

タイムマーク: 0.2 msec/div.

第1図 爆源から350cmの位置における
オシログラム

変位速度

変位
加速度

タイムマーク: 0.2 msec/div.

第2図 爆源から450cmの位置における
オシログラム

きは3.400gである。

得られたオシログラムの一例として、第1図は爆源から350cmの位置における変位加速度および変位速度のオシログラムであり、第2図は爆源から450cmの位置におけるそれらである。これらのオシログラムより上記の岩盤内で3400gのダイナマイトが爆発した場合に発生する粒子の変位速度の最初のパルスの幅はほぼ0.4msecであることがわかる。さらに第3図は変位速度の最高値が爆源からの距離が増大するにつれてどのように減衰するかを示したものである。

以上のように自由面の存在を無視しうる条件で波動に起因する岩石粒子の変位状態が測定できたので、つぎにこのような変位状態を示す場合にはどのような破壊が発生してゐるかを材料の破壊を考慮した応力解析を実施して検討した。

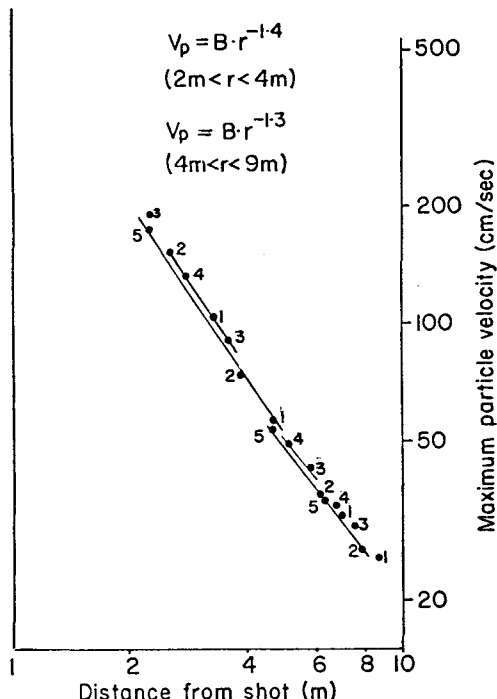
3. 応力解析結果と検討

上記の実験の場合の装薬室は10cmφ×40cmの円筒形であるが応力解析に際しては簡単にす

ために、体積が等しい球状装薬室を考へて応力解析を実施した。この球状装薬室の半径は8.2cmである。装薬室壁面に作用する爆轟圧は数マイクロ秒でその最高値に達し、それが減少する様相は周囲の破壊の程度やタンピング効果などによって変化するが数ミリ〜数十ミリ秒程度であると考えられる。そこで今回の解析においては第4図に示すようにほぼ60マイクロ秒で最高値に達し、1.3ミリ秒後には最高値のほぼ1/10の圧力にまで減衰するという圧力を爆轟圧と仮定し、半径8.2cmの球形空洞内に作用させた。

球形圧力源から放射される波動によって発生する主応力の作用方向は、爆源を中心とする極座標(r, θ, ϕ)の r, θ, ϕ 方向と一致し、 θ 方向の主応力 σ_θ と ϕ 方向の主応力 σ_ϕ とは等しいから、破壊の条件としてはそのうちのほうらく線に応力 σ が接した時に破壊するという条件を採用し、破壊するまでは岩石は弾性的に挙動するが破壊後は別に実施した爆薬による岩石の衝撃実験より求めた破壊後の岩石のP-V曲線²⁾に示たがうと考へて応力解析を行なった。

一般に材料の動的強度は材料試験機を用いて測定した静的強度よりも大きい。したがって、先に示した岩石の静的強度の値を計算に採用することはできない。さらに、この解析方法は断熱圧縮による岩石の温度上昇なども考慮してゐないで、実際に装薬室内に作用するであろう爆轟圧の最高値を計算に採用することもできない。そこで、半径8.2cmの球形空洞に作用させる圧力の最高値および岩石の強度を種々変化させ、それぞれの場合にどのような波動が放射されるかを計算した。その結果、破壊を考慮しない弾性理論による解析結果³⁾や、すでに実施したTensor Codeを用いた解析結果⁴⁾

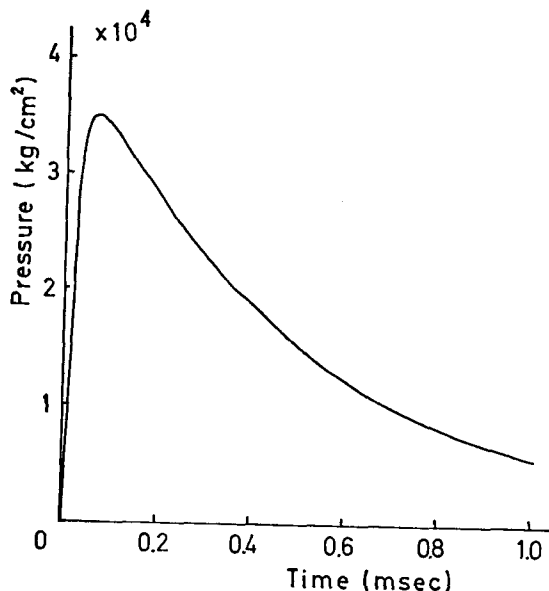


第3図 変位速度最高値と爆源からの距離との関係

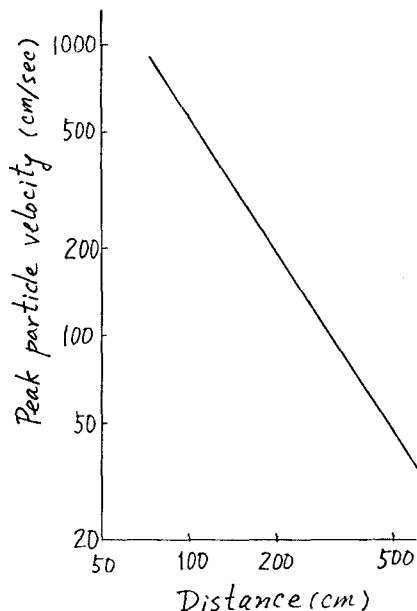
などからも推定しうることであるが、破壊
 図の大きさが大きくなるにつれて破壊圏外
 へ投射される波動の最初のパルスの幅が長
 くなるという結果が得られた。また、第1
 図、第2図、第3図に示した実測結果とほ
 ぼ同一の計算結果は、半径8.2cmの球形
 空洞内に第4図に示すように最高値が
 $35,000 \text{ kg/cm}^2$ の圧力を作用させ、岩石
 の動的圧縮強度として静的なそれのほぼ2
 倍である $4,800 \text{ kg/cm}^2$ と、動的引張強度
 として静的なそれのほぼ3倍である 250
 kg/cm^2 を採用して計算した場合に得られ
 た。この条件の場合の計算結果の一例とし
 て、第5図は第3図に対応する結果であっ
 て、変位速度の最高値と球形空洞の中心か
 らの距離との関係を示したものであり、第
 6図は $r = 350 \text{ cm}$ の位置における変位速度の変化
 状態を示したものである。第1図、第2図と第6図、
 および第3図と第5図とを対比することによつて、計
 算結果と実測結果とがかなり良く一致してゐることか
 らわかる。したがつて、計算によつて定められた破壊圏
 の大きさは実際に発生してゐるであろう破壊圏の大き
 さをかなり正確に示してゐるであろうと推定するこ
 とができる。上記の条件の場合に得られた破壊圏の大き
 さ、すなわち、放射状引張り裂の先端の位置として
 $r = 200 \text{ cm}$ という結果が得られた。なお、爆轟に起
 因する岩盤粒子の変位状態を測定した現場でクレータ
 試験を実施し、 $3,400 \text{ g}$ の薬量を用ゐて一自由面爆破
 を行はつた場合に標準クレータが生成すると推定され
 る最小抵抗線の長さを求めたところ 150 cm という値
 が得られた。したがつて、この値から考えても上記の
 計算によつて得られた破壊圏の大きさ($r = 200 \text{ cm}$)
 は妥当なものであると考えられる。

最後に、使用した爆薬の爆轟圧を次式を用ゐて計算
 した。

$$P_d = 0.4157 \Delta (1 - 0.5430 \Delta + 0.1925 \Delta^2) D^2 \quad (\text{C.G.S})$$



第4図 半径8.2cmの空洞内に作用させた圧力

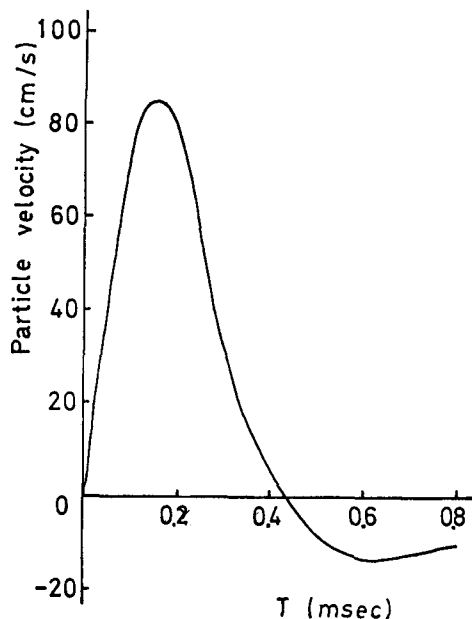


第5図 Tensor Codeによる計算
 結果(変位速度最高値と距離との関係)

ここに、 Δ は密度、 D は爆速である。

その結果、計算爆轟圧は $145,000 \text{ kg/cm}^2$ という値が得られた。したがって、上記の解析に採用した値は計算爆轟圧のほぼ $1/4$ ということになる。

以上のように、計算した爆轟圧の値および岩石の静的強度を適当に修正した値をTensor Codeの入力データとして破壊を考慮した解析を行なうことによって、破壊圏の大きさや破壊圏外へ投射される波動の様相を推定しうる可能性があると明らかとなった。そこで、このことを確かめるために、コンクリート内で密度 0.85 g/cm^3 のRDX 10 g を爆轟させた場合について検討したところ、上記の可能性を裏付ける結果が得られた。



第6図 Tensor Codeによる計算結果
($r=350 \text{ cm}$ の位置における変位速度)

参 考 文 献

- 1) G. Maenchen and S. Sack : The Tensor Code, Methods in Computational Physics, Vol. 3, p. 181~210, 1964, Academic Press.
- 2) K. Sassa, D.F. Coates and I. Ito : Coupling and Stress Wave in close proximity to Surface Explosions, Int. Jour., Rock Mech. Min. Sci., Vol. 4, p. 229~243, 1967
- 3) たとえば, K. Sezawa and Kanai : Elastic Waves formed by Local Stress Change of Different Rapidities, 東京帝国大学地震研究所彙報, 14巻, 1号, 昭和11年3月, 10~17頁
- 4) 佐々富一, 伊藤一郎 : 爆轟衝撃による材料の破壊と波動について, 材料, 21巻, 221号, 昭和47年2月, 123~129頁