

スームプラスチックにおける起爆秒時精度の影響

金子勝比古*, 山本雅昭**, 諸岡敬太***, 田中義晴***

亀裂進展と起爆秒時差を考慮した動的応力解析により, スームプラスチックにおける岩石の破碎プロセスについて考察した。とくに, 起爆に電子遅延雷管もしくはDS雷管を用いた場合および斉発の場合のそれぞれについて, 最大主応力分布と亀裂進展プロセスとの関係を示し, 起爆秒時誤差の影響を具体的に検討した。そして, 電子遅延雷管を用いた場合は, 隣接する孔の発破により生成される動的・準静的応力場の干渉により亀裂制御がなされることを明らかにした。また, 起爆秒時精度を向上させることにより岩盤損傷領域が抑制されること, 電子遅延雷管を用いた場合の損傷領域は斉発の場合とほぼ等しいこと, などを明らかにした。

1. 緒言

現在, トンネル掘削の最外周部の発破は通常スームプラスチック(以下SBと略す)により実施される。SBの効果としては, 予定掘削面に沿った滑らかな破断面の形成とともに岩盤の発破損傷の抑制が期待される。そして, これらの結果として, 余掘りや当たりの低減および支保の軽減など掘削コストの低減を計ることができる。

SB孔の起爆には通常比較的後段のDS雷管が使用されるため, その秒時誤差は大きく斉発性は期待できない。そして, SBのメカニズムは, 先行して起爆した発破孔からの応力波により隣接孔にクローズドクラックが発生した後, この隣接孔の発破により既存のクローズドクラックが成長して破断面を生成する, と説明されている¹⁾。しかし, 最近, 電子遅延雷管²⁾などの高精度起爆システムが開発され, そのSBへの適用が試みられている。そして, 起爆秒時精度を向上させることにより, のみ跡率の向上と岩盤損傷圏の抑制が

なされることが報告されている³⁾。この結果は, 最新の起爆システムを用いることにより, 現行SBとは現象的に異なるより高度なSBが実現される可能性を示唆している。そして, この実現のためには, 起爆秒時精度の観点から, SBの破碎プロセスとそのメカニズムを再検討する必要があると思われる。

筆者等は先に発破における岩石の破碎過程の数値実験手法として破壊力学に基づいた動的応力解析法を提案した⁴⁾。本論文では, 提案した手法により, SBにおける岩石の破碎プロセスをシミュレートし, SBにおける破断面形成のメカニズムについて考察を加えるとともに, 起爆秒時精度が破碎プロセスや岩盤損傷に与える影響について検討する。

2. 解析方法および解析条件

2.1 数値解析法の概要

解析には, 強度不均一性と亀裂の発生・進展を考慮した動的有限要素法を用いた。本解析では, 岩石の破壊として引張破壊と圧縮破壊を考え, 破壊基準はそれぞれ最大引張応力基準(引張強度 S_t)およびモール・クーロン基準(内部摩擦角 ϕ , 粘着力 c もしくは一軸圧縮強度 S_c)を用いた。そして, 引張破壊は要素境界辺に発生するものと仮定し, 要素境界辺の引張強度をワイブル分布(均一性係数 m)で与えた。なお, 最近の実験結果⁵⁾に基づいて, 強度の寸法効果は体積の $(1/2m)$ 乗に逆比例するものと仮定した。そして, 亀裂の発生・伸長は要素境界辺の分離として表現し, 亀裂面の結合力は引張軟化則 $1/4$ モデル(破壊エネルギー G_f)で与えた。また, 圧縮破壊は要素の破壊として取り扱い, 要素の圧縮強度は要素周囲境界辺の引張強度の平均値の定数倍で与えた。そして, 破壊基準を

1997年3月21日受理

*北海道大学大学院工学研究科環境資源工学専攻
(当時, 熊本大学工学部環境システム工学科)

〒060 札幌市北区北13条西8丁目

TEL 011-706-6322

FAX 011-706-6322

**旭化成工業(株)火薬研究所

〒100 千代田区内幸町1-1-1

TEL 03-3507-7812

FAX 03-3507-2670

***西松建設(株)技術研究所

〒242 神奈川県大和市下鶴間2570-4

TEL 0462-75-1135

FAX 0462-75-6796

Table 1 Physical constants of rock

P-wave velocity, V_p (m/s)	6000
S-wave velocity, V_s (m/s)	3464
Density, ρ (kg/m ³)	2700
Mean compressive strength, Sc (MPa)	250
Mean tensile strength, St (MPa)	18
Internal friction angle, ϕ (degrees)	60
Fracture energy, Gf (Pa·m)	300
Coefficient of uniformity, m (—)	5

上回る場合には、その過剰応力を符号反転させたものを要素初期応力として与え、この要素初期応力に対応する要素初期ひずみにより降伏後の塑性ひずみを表わした。なお、解析法の詳細については参考文献4)を参照されたい。

2.2 解析モデル

解析モデルはFig. 1に示すような自由面に平行な3つの発破孔を有する一自由面発破を想定したものである。発破孔径は45mmとし、孔間隔および最小抵抗線はともに50cmとした。モデルの下側境界は自由境界、上側および左右境界は連続境界(粘性境界)の条件を与え、それぞれの発破孔内壁に爆薬の爆発による動的圧力を作用させた。起爆としては電子遅延雷管とDS雷管を用いた場合を考えたが、比較のため斉発の条件についても解析を行った。とくに、電子遅延雷管およびDS雷管の場合は雷管の秒時誤差を考慮して、後述するように、それぞれの発破孔の圧力の作用開始時刻を変化させた。岩盤は健全な花崗岩を想定し、諸物性値をTable 1の様に設定した。また、有限要素モデルの要素分割はFig. 2に示すようであり、初期節点数および要素数はそれぞれ28,374および56,664、計算時間増分は0.1 μ sである。さらに、起爆秒時差の影響を明瞭にみるために、すべてのケースともに岩盤中の強度の空間分布(不均一性)が同じモデルを用いた。

2.3 発破孔作用圧力

発破孔の孔壁に作用する動的圧力の時間変化は、周囲岩盤が十分に剛で発破孔内における波動の反射などを無視して問題を単純化すると、Fig. 3のように考えることができる。Fig. 3(a)は、一般的な逆起爆の例であるが、この場合、爆轟波およびこれによる気体衝撃波は孔底から孔口に向かって爆速 D で伝播する。そして、この爆発衝撃波が孔口に到達し孔口から外部に出ていくと、孔口から希薄波が侵入し孔底に向かって音速 V で進行していく。なお、この例ではタンピングを無視しているが、タンピングのある場合にはタンピングの押し出しに要する時間だけ希薄波の侵入に若

Table 2 JWL parameters of SB explosive

A (GPa)	254.8	R_1	5.661
B (GPa)	5.578	R_2	1.490
C (GPa)	0.914	ω	0.317

Remarks: $P=A\exp(-R_1V)+B\exp(-R_2V)+CV^{\omega-1}$;
 P : Pressure; V : Volume ratio.

干の時間遅れが生ずるものと思われる。したがって、ある断面における圧力の変化はFig. 3(b)のようであると予想される。 T_1 , T_2 および T_3 はそれぞれ圧力の立ち上がり時間、持続時間および減衰時間である。とくに、デカップリングが比較的大きな場合には、発破孔内壁に作用する圧力にパルス状の衝撃圧が認められなくなることから、爆発生成ガスの圧力のみを考えている。そして、爆発生成ガスの圧力は、等エントロピー膨張を仮定したJWL状態式で表現し、これによりデカップリングや発破孔の体積変化による圧力変化を表現した。なお、使用爆薬はSB用スラリー爆薬(サンベックス400s, 薬径22mm)とし、JWLパラメータはKHTコード⁶⁾による計算値⁷⁾から求めた(Table 2)。次に、 T_1 , T_2 および T_3 などは以下のように与えることとした。まず、圧力の不連続な立ち上がりによる解の不安定化を抑制するため、 $T_1=1\mu$ sとした。また、 T_2 は爆発衝撃波が通過した後、孔口からの希薄波が到達するまでの時間として推定した。今、仮に、 $D=3000$ m/s, $V=340$ m/sとして、孔口から1mの断面を考えると $T_2=3.3$ msとなる。この時間は電子遅延雷管の秒時誤差60 μ sに比較して極めて長い、DS後段の秒時誤差に比較して極めて短い。また、予備計算として一つの発破孔による解析を行ったところ、応力波による破壊が完了するまでの時間は300 μ s以下となった。この結果は、電子遅延雷管の場合には、先行して起爆した発破孔の中に爆発生成ガスの圧力が維持されている状態で、後続の発破孔が起爆することを意味している。したがって、電子遅延雷管の場合には、解析時間は数百 μ s以内で十分であるため、 T_3 の設定は不要となる。これに対しDS雷管の場合には、 T_3 の値が、 T_2 と同程度もしくはそれ以下であると仮定すると、先行して起爆した発破孔内の圧力がほぼ完全に低下した後に、後続の発破孔が起爆することになる。したがって、DS雷管の場合には、先行して起爆した発破孔の圧力をこれによる破壊が完了するまでの時間維持させた後、圧力を徐々に低下させて静的状態を達成させ、その後、後続の発破孔に圧力を作用させれば良いことになる。そこで、DS雷管の解析では、計算時間の節約のため、 T_2 および T_3 の値

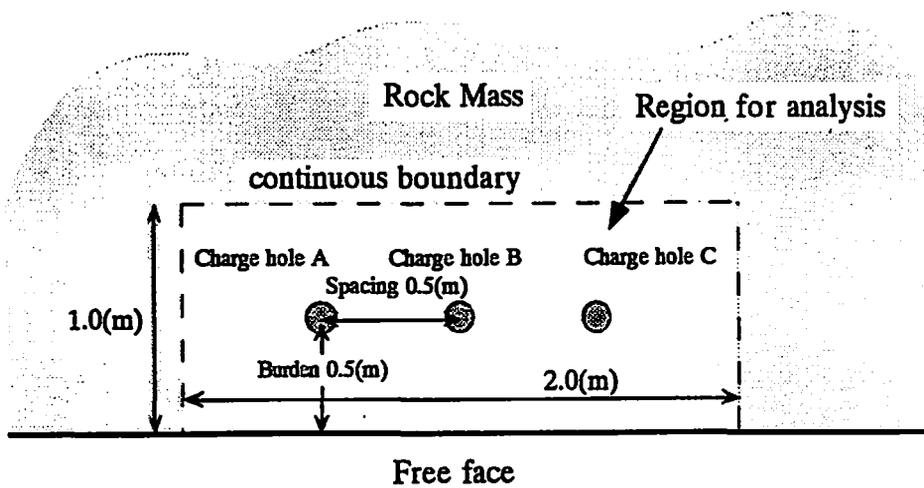


Fig. 1 Model for the computation

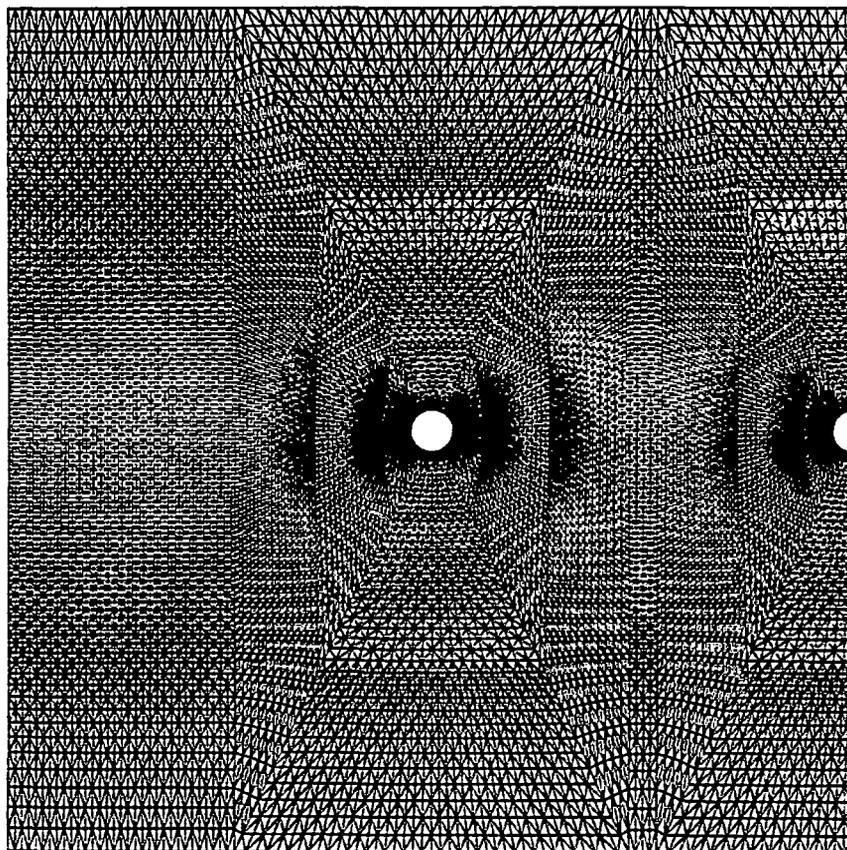


Fig. 2 Finite element mesh for a half region of the model

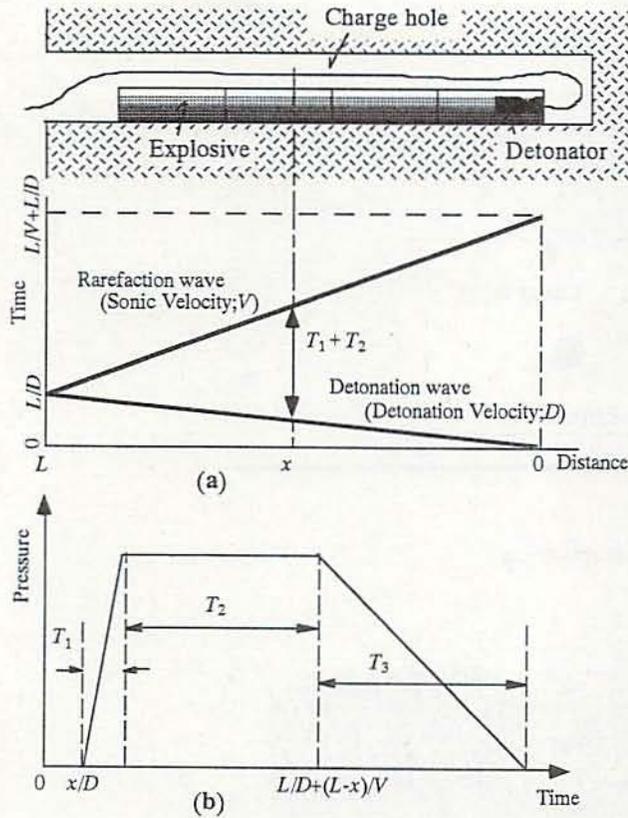


Fig. 3 Explanation of gas pressure in a blast hole; (a) assumption for gas flow in a blast hole; (b) change of gas pressure at the distance x from the initiation point

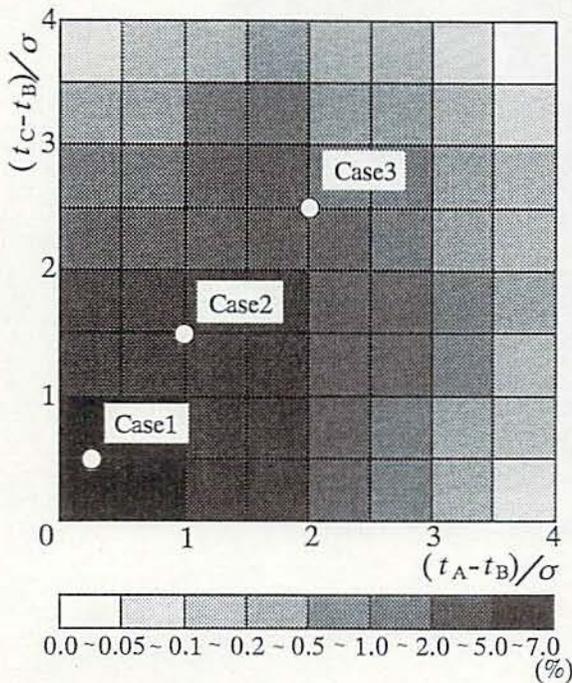


Fig. 4 Probability distribution of relative delay time error, where t_A , t_B and t_C are the initiation time of charge holes A, B and C in Fig. 1, respectively, and σ is the standard deviation of delay time

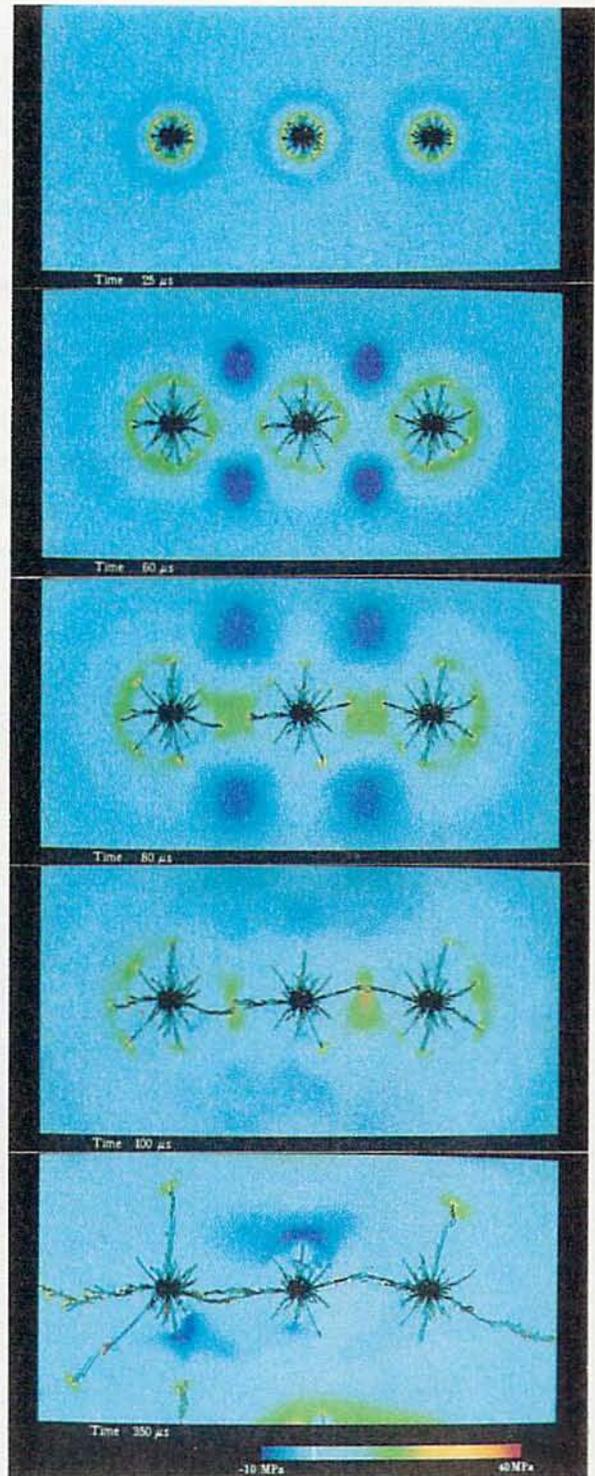


Fig. 5 Distribution of maximum principal stress and crack propagation process for the case of simultaneous initiation

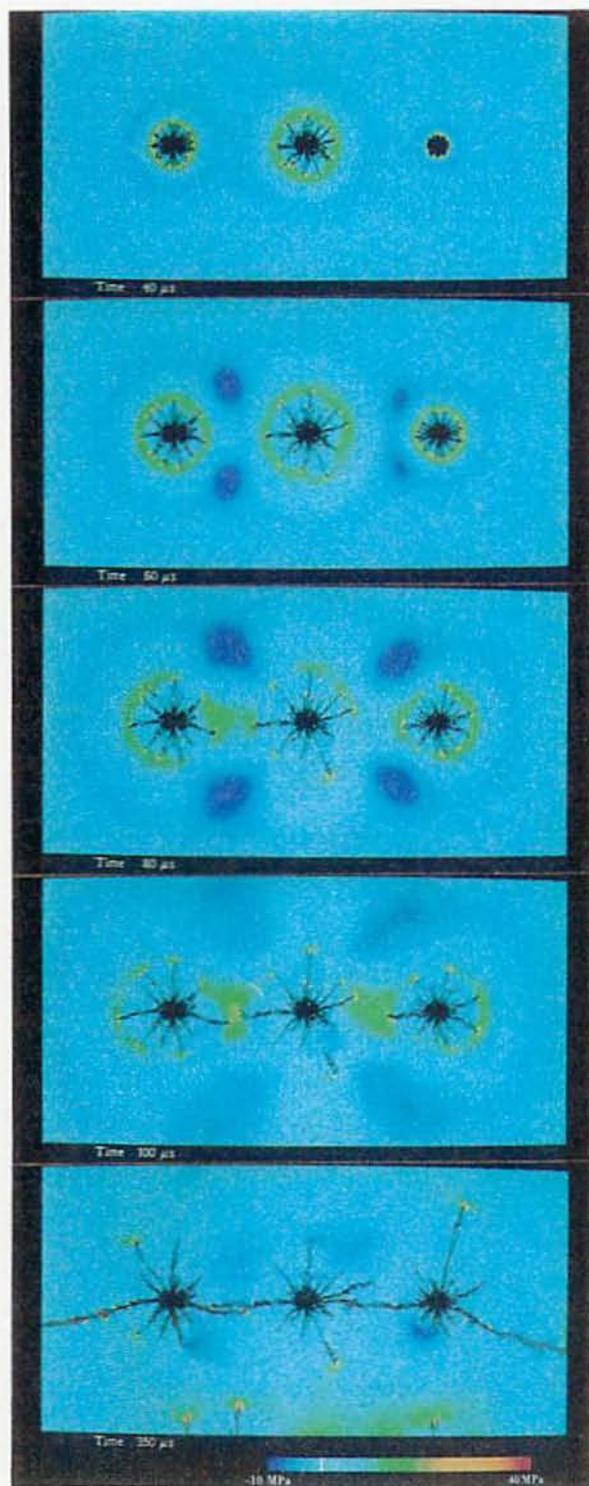


Fig. 6 Distribution of maximum principal stress and crack propagation process for the case of electronic detonator initiation. Case 1 : $(t_A, t_B, t_C) = (+15 \text{ ms}, 0, +30 \text{ ms})$.

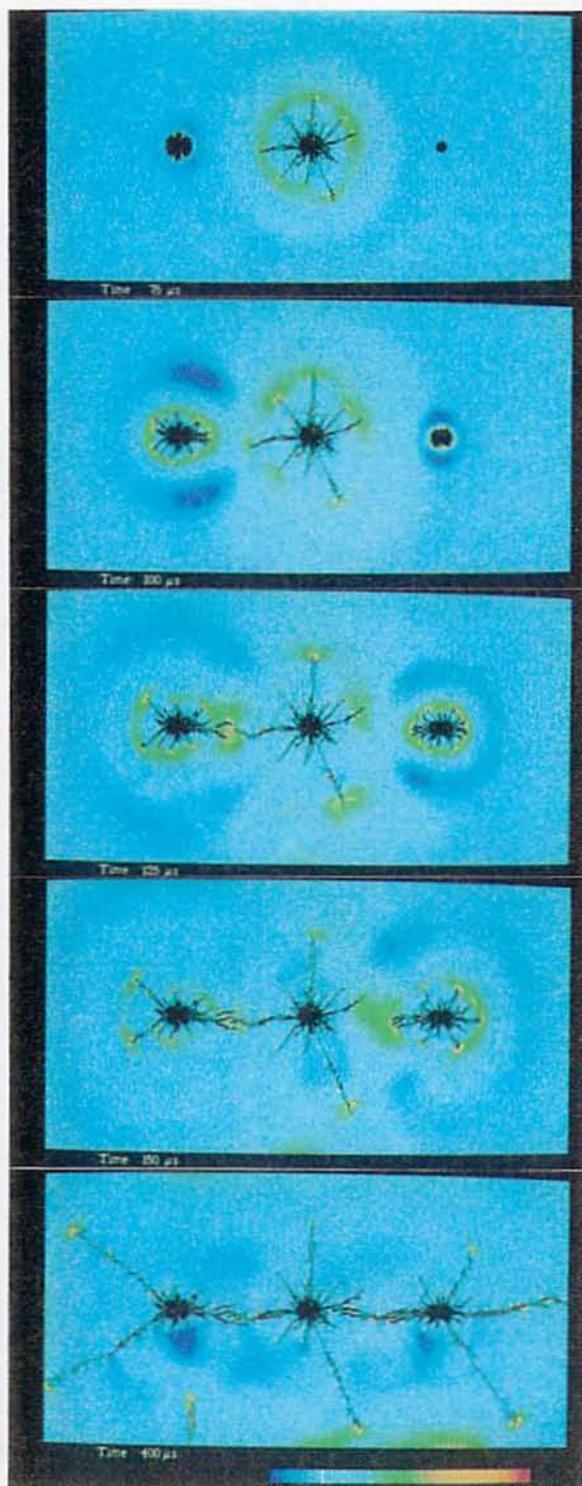


Fig. 7 Distribution of maximum principal stress and crack propagation process for the case of electronic detonator initiation. Case 2 : $(t_A, t_B, t_C) = (+60 \text{ ms}, 0, +90 \text{ ms})$.

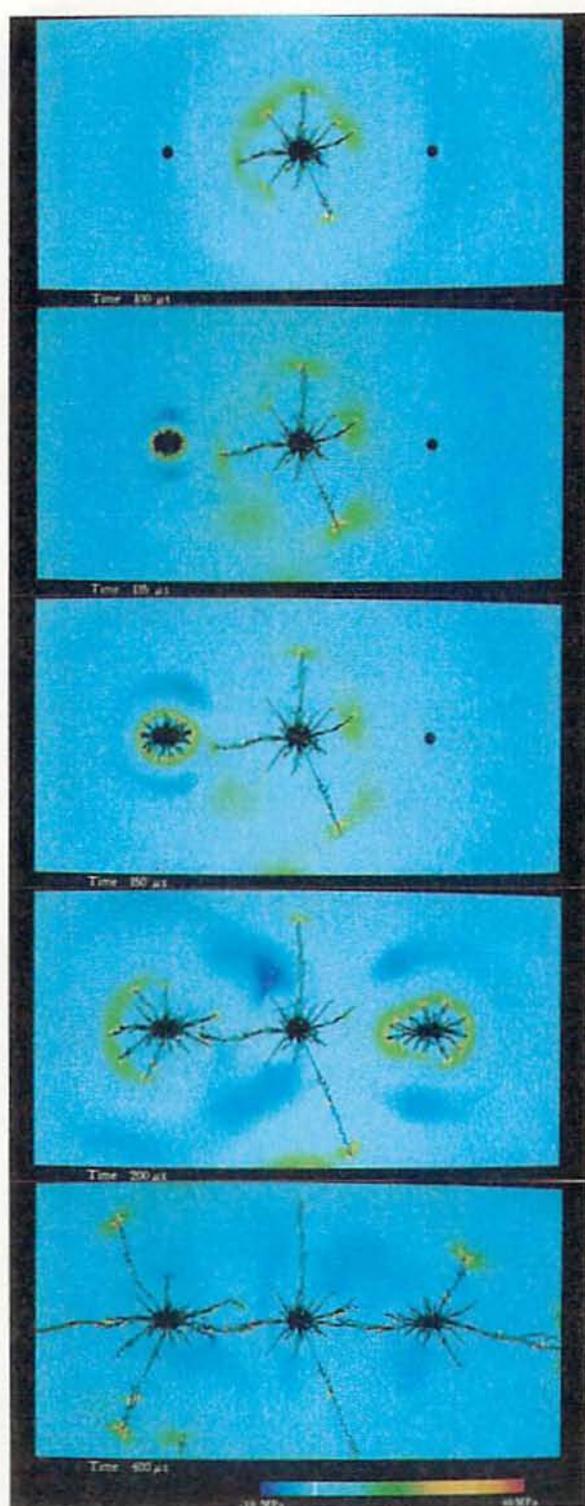


Fig. 8 Distribution of maximum principal stress and crack propagation process for the case of electronic detonator initiation. Case 3: $(t_A, t_B, t_C) = (+120 \text{ ms}, 0, +150 \text{ ms})$.



Fig. 9 Distribution of maximum principal stress and crack propagation process for the case of conventional DS detonator initiation

をそれぞれ $T_2 = 300 \mu\text{s}$, $T_3 = 50 \mu\text{s}$ と設定した。

2.4 起爆秒時誤差

遅延雷管の秒時誤差が標準偏差 σ の正規分布に従うと仮定し、Fig. 1 に示す中心発破孔 B が先に起爆した後左右の発破孔 A もしくは C が起爆する場合を考えると、相対起爆時間差は発破孔 A および C の起爆時刻 t_A , t_C と発破孔 B の起爆時刻 t_B との差 $t_A - t_B$, $t_C - t_B$ として与えられる。そこで、それぞれの雷管の秒時誤差を正規乱数で与えて、相対起爆時間差を求めた。求められた結果から相対起爆時間差がある範囲にある確率を求めると Fig. 4 のようである。そこで、この確率分布を参考にして、ここでは、図中に示すような相対起爆時間差 ($t_A - t_B$, $t_C - t_B$) が異なる 3 ケース、すなわち、Case 1 (0.25σ , 0.5σ), Case 2 (1.0σ , 1.5σ), Case 3 (2.0σ , 2.5σ) を考えることにした。

電子遅延雷管の秒時誤差の標準偏差を $60 \mu\text{s}$ とすると、これら 3 ケースに対応する発破孔の起爆時刻 (t_A , t_B , t_C) は、 t_B を基準とすると ($+15 \mu\text{s}$, 0 , $+30 \mu\text{s}$), ($+60 \mu\text{s}$, 0 , $+90 \mu\text{s}$), ($+120 \mu\text{s}$, 0 , $+150 \mu\text{s}$) となる。また、DS 雷管の場合は、秒時誤差の標準偏差は数十 ms 以上と見積もられることから、いずれのケースでも、相対起爆時間差がガス圧維持時間より長くなる。したがって、DS 雷管の場合は、上記の T_2 および T_3 の設定で、先行する発破孔の作用圧力が 0 となった後 $50 \mu\text{s}$ の時間遅れをおいてから後続の発破孔に圧力を作用させる 1 ケースのみを解析することにした。また、当然のことながら、斉発 (秒時誤差 0) の条件ではすべてを同時に起爆する 1 ケースを解析した。なお、計算にはワークステーション (CPU: DEC/alfa/300 MHz, RAM 512 MB, HD 4 GB) を用いたが、計算時間は電子遅延雷管および斉発の場合約 14 時間、DS 雷管の場合約 52 時間であった。

3. 破断面形成プロセス

解析結果の一例として、斉発の場合、電子遅延雷管もしくは DS 雷管を用いた場合、それぞれの場合の各時刻における亀裂進展状態と最大主応力分布を Fig. 5 ~ 9 に示す。ただし、Fig. 5 は斉発の場合、Fig. 6, 7, 8 は電子遅延雷管で相対起爆時間差の異なる 3 ケース、Fig. 9 は DS 雷管を用いた場合である。すべて図中の時刻は最も早く起爆した発破孔の起爆時刻を基準として表わしているが、DS 雷管の場合は前述した解析上の理由により実時間に対応していない。また、応力は引張を正としており、最小主応力は常に圧縮であることを注意されたい。さらに、ここで示した例ではすべて圧縮破壊は発生していない。

まず、Fig. 5 に示す斉発の場合には、初めに、各発破孔近傍に放射状の多くの微亀裂が生成し、発破孔か

らの同心円状の応力波の伝播に伴って、これらの亀裂が選択的に伸長していくことがわかる。とくに、これは、以下すべてに共通することであるが、応力波のフロントは最大主応力 (円周方向応力) が圧縮であるが、その後方では引張に転じ、この引張応力波の後方で亀裂が進展する。そして、応力波の伝播に伴って、互いに隣接する発破孔からの応力波の干渉が生じ、孔間の領域で引張応力が增大するとともにその上下に圧縮のゾーンが形成される。とくに、この圧縮ゾーンはそれぞれの発破孔から発生した応力波の円周方向成分 (引張) とそれらと隣接する発破孔からの応力波の半径方向成分 (圧縮) が重ね合わされた結果生じる。これらの結果、孔間を結ぶ方向の亀裂が卓越した伸長を示すとともに、岩盤奥部への亀裂の進展が抑制される。

次に、Fig. 6 に示す起爆時刻 ($+15 \mu\text{s}$, 0 , $+30 \mu\text{s}$) の結果を Fig. 5 と比較してみると、この起爆時間差の条件では、中心発破孔からの応力波のフロントが左右の発破孔に到達する以前に左右の発破孔が起爆するため、比較的斉発に近い亀裂進展プロセスを示すが、起爆時間差に応じて、応力波の干渉時刻が変化し、圧縮ゾーンが孔間中央から左右の発破孔側に移動していくことがわかる。また、Fig. 7 に示す起爆時刻 ($+60 \mu\text{s}$, 0 , $+90 \mu\text{s}$) の場合は、中心発破孔からの応力波のフロントが左右の発破孔に到達する直前もしくは直後に左右の発破孔が起爆する。ここで、Fig. 7 の左側発破孔に注目すると、左側発破孔の起爆直後に中心孔からの応力波が左側発破孔に到達するため、互いの発破孔から発生した応力波のフロントが干渉して左側発破孔の斜め上下方向に強い圧縮ゾーンが形成される。その後、左側発破孔から発生した応力波が伝播すると、孔間で互いの発破孔からの引張応力波が干渉し、この領域の引張応力が高められる。特に、この段階では、左側発破孔からの応力波の円周方向成分と中心発破孔からの応力波の半径方向成分が重ねられ、左側発破孔の斜め上下方に圧縮ゾーンが維持された状態となる。そして、中心発破孔のガス圧が維持された状態ではその応力波が通過後に中心発破孔を中心とした半径方向圧縮、円周方向引張の準静的応力場が形成されるため、上記の効果は持続する。したがって、これらの効果により、孔間方向の亀裂が卓越した伸長を示し、孔間を結ぶ線上に破断面が形成され、岩盤奥部への亀裂進展が抑制される。この傾向は右側発破孔起爆後にも同様に認められる。さらに、Fig. 8 に示す起爆時刻差 ($+120 \mu\text{s}$, 0 , $+150 \mu\text{s}$) の場合は、中心発破孔からの応力波が左右の発破孔を通過後に左右の発破孔が起爆するため、中心発破孔からの応力波およびその後形成される準静的応力場の影響がより明瞭となる。すなわち、

中心発破孔を中心とした半径方向圧縮、円周方向引張の応力場により左右の発破孔の孔間方向の孔壁に引張応力集中が生じ、それと直交方向の孔壁に圧縮応力集中が生じた状態で左右の発破孔が起爆する。そして、左右の発破孔からの応力波が中心発破孔による応力場と重ね合わせられ、孔間の領域の引張応力が高まるとともに発破孔の上下に圧縮ゾーンが形成される。

次に、Fig. 9 に示すDS雷管の場合の結果を見ると、中心発破孔から発生した応力波のフロントが左右の発破孔を通過すると、Fig. 8 と同様に左右の発破孔周囲に応力集中が生じるが、時間経過に伴って、岩盤内は中心発破孔を中心として半径方向圧縮、円周方向引張の準静的応力場に移行する。そして、これと亀裂進展に伴って上記の応力集中が高まり、左側発破孔の孔壁から孔間を結ぶ方向の亀裂が発生する。また、この例では、右側発破孔壁には亀裂が発生しないが、これは亀裂の発生が強度不均一性と中心孔からの亀裂進展状態に依存する確率的な現象であることを示している。そして、この準静的応力状態で平衡に達すると亀裂進展は停止し、その後中心発破孔の圧力低下に伴って岩盤内の応力は低下する。次に、左側発破孔が起爆すると、放射状に亀裂は進展するが、起爆以前に発生していた孔間を結ぶ方向の亀裂が卓越した伸長を示し、孔間を連結する破断面が形成される。また、右側発破孔壁には起爆前に亀裂が発生していないが、孔間方向に亀裂が伸長して、孔間を連結する破断面が形成される。これは、亀裂進展の確率的性質に関係するものと考えられ、その解明は今後の課題であると思われる。しかし、いずれにせよ、この秒時誤差の条件では奥部への亀裂進展を抑制する圧縮ゾーンが形成されないため、亀裂は破断面よりかなり奥部まで伸長する。

4. 電子遅延雷管を用いたSBのメカニズムに関する考察

前章に示した結果をまとめると電子遅延雷管を用いたSBは現行SB⁹⁾と現象が異なり、その破断面形成と損傷抑制のメカニズムは次の二つに分類される。

- (a) 互いの発破孔からの応力波の干渉により、孔間の領域の引張応力が高まるとともにその領域の上下に圧縮ゾーンが形成され、これにより孔間を結ぶ方向の亀裂が卓越した伸長を示し、奥部への亀裂進展が抑制される。
- (b) 先行して起爆した発破孔により形成された応力場の影響下で隣接孔が起爆すると、それにより発生した応力波とこの応力場が干渉し、孔間の領域の引張応力が高まるとともに隣接孔の上下部に圧縮ゾーンが形成され、これにより、孔間を結ぶ方向の亀裂が卓越伸長するとともに奥部

への亀裂進展が抑制される。

ここで、岩盤のP波速度を V_P 、孔間隔を W とおくと、(a)は相対起爆時間差が0以上で大略 $W/(2V_P)$ 以下の条件で、(b)は相対起爆時間差が大略 W/V_P 以上でガス圧が低下するまでの時間範囲で、それぞれ主因となると考えられる。とくに、電子遅延雷管を用いたSBは比較的秒時誤差が小さい場合(a)に、大きい場合(b)に対応すると考えられる。なお、上記のガス圧の低下が発破孔孔口からの希薄波の侵入によると考えれば、その時間は想定する断面の孔口からの距離と空気の音速により推定される。しかし、発破孔の変形や、開口した亀裂内へのガスの侵入などを考慮すると、より短い時間である可能性もあり、その検討は今後の課題である。また、起爆時間差 $W/(2V_P)$ から W/V_P の範囲では(a)および(b)の遷移過程にあり両者の中間的な亀裂進展挙動となる。

岩盤損傷の観点からは、電子遅延雷管を用いたSBは現行SBに比較してその抑制効果が十分に期待できる。とくに、(a)の場合にはすべての発破孔周囲において圧縮ゾーンが形成されるため、すべての発破孔ともに損傷が抑制されるが、応力波の干渉開始時刻以前の亀裂進展は制御不可能である(Fig. 5)。これに対し(b)の場合は、先行して起爆した発破孔周囲の損傷領域は(a)に比較して大きい、後続して起爆する発破孔では起爆当初から岩盤奥部への亀裂進展に対する抑制効果が働くため、後続発破孔周囲の損傷領域は(a)に比較して小さくなる(Fig. 7, 8)。そして、損傷圏の平均的寸法を考えれば、(a)と(b)はほぼ等しいと考えることもできる。すなわち、電子遅延雷管で比較的秒時誤差が大きい場合と斉発とでは、損傷抑制のメカニズムは異なるが、ともに同程度の損傷抑制効果が期待できることを示している。

さらに、(a)および(b)の効果は、孔間隔の増大に伴って低下するがこの効果が消滅することはないため、起爆精度が高い場合には孔間隔をある程度広くすることも可能であると思われる。ただし、高精度起爆システムを用いた場合でも、孔間隔を広げれば岩盤損傷圏は拡大するため、目的に応じた設計が必要であると思われる。

5. 結 言

本論文では、数値解析結果に基づいて、スムーズブラスティングにおける破断面形成のメカニズムについて考察を加え、起爆秒時精度が破碎プロセスや岩盤損傷に与える影響を明らかにした。得られた知見をまとめると以下のようである。

- (1) 斉発もしくは電子遅延雷管で比較的起爆秒時誤差が小さい場合には、互いの発破孔からの応力

波が孔間領域で干渉し、孔間領域の引張応力が高まるとともにその上下に圧縮ゾーンが形成され、これにより孔間を結ぶ破断面が形成されるとともに岩盤奥部の損傷が抑制される。

- (2) 電子遅延雷管で比較的起爆秒時誤差が大きい場合には、先行して起爆した発破孔により形成された応力場の影響下で隣接孔が起爆するため、それにより発生した応力波とこの応力場が干渉し、孔間の領域の引張応力が高まるとともに隣接孔の上下部に圧縮ゾーンが形成され、これにより、孔間を結ぶ破断面が形成するとともに岩盤奥部の損傷が抑制される。
- (3) 電子遅延雷管を用いることにより岩盤損傷を大幅に抑制することができる。とくに、電子遅延雷管と斉発の場合の損傷圏の平均的寸法はほぼ等しいが、電子遅延雷管を用いた場合の損傷圏寸法は、先行して起爆した発破孔周囲では斉発の場合より大きく、後続して起爆する発破孔周囲では斉発の場合より小さい。

なお、ここでは限られた例のみを示したが、定量的

評価のためには、より多くの解析結果を統計処理する必要があると思われる。この問題については稿を改めて報告する予定である。

文 献

- 1) 伊藤一郎, 佐々宏一: 日本鉱業会誌, 84, 964号, 1059-1065, (1968)
- 2) 山本雅昭, 市川清: 工業火薬協会誌, 49(6), 367-374, (1988)
- 3) 田中義晴, 平田篤夫, 山本雅昭, 松永博文: 火薬学会誌, 56(1), 2-8, (1995)
- 4) 金子勝比古, 松永幸徳, 山本雅昭: 火薬学会誌, 56(5), 207-215, (1995)
- 5) 津嘉山良治, 北野亮, 吉永徹, 金子勝比古: 資源・素材学会春季大会講演要旨集, (1997)
- 6) 火薬学会編: 火薬ハンドブック, 200-204, (1987)
- 7) 山本雅昭, 松永博文, 平田篤夫, 金子勝比古: 火薬学会誌, 58(3), 100, (1997)
- 8) 山口梅太郎, 下村弥太郎: 工業火薬協会誌, 31(2), 67, (1970)

Influence of delay time accuracy on the fragmentation process in smooth blasting

by Katsuhiko KANEKO*, Masaaki YAMAMOTO**, Keita MOROOKA*** and Yoshifumi TANAKA***

The fragmentation process of rock in the smooth blasting was analyzed by Finite Element Method with taking into account the crack propagation and the delay time error of the blast initiation.

The effect of delay time accuracy on surface smoothness and remaining rock damage can be interpreted by analyzing the crack propagation process and stress field in rock. The characteristics of the maximum principal stress distribution indicate that the interference of dynamic and/or quasi-static stress fields induced by blasts of adjacent holes plays important role to control the crack propagation in SB with electronic detonator initiation. Furthermore, it is confirmed that the depth of damage in the remaining rock reduces by using detonators with an accurate delay time and that the average depth of damage with the electronic detonator initiation is nearly equal to that with simultaneous initiation.

(*Division of Environmental Resource Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, N 13 W 8, Kita-ku, Sapporo 060, JAPAN.

**Asahi Chemical Industry Co., Ltd., 1-1-1, Uchisaiwaicho, Chiyoda-ku, Tokyo 100, JAPAN.

***Nishimatsu Construction Co., Ltd., Yamato, Kanagawa-ken 242, JAPAN.)