

スムーズブラस्टィングの機構に関する数値 シミュレーション

中川浩二*・坂本 佐**

Numerical Simulation Analysis of the Mechanism of Smooth Blasting

Koji NAKAGAWA and Takeshi SAKAMOTO

Abstract

Smooth blasting techniques are used to minimize overbreak (or fracturing of rock) beyond the designed boundary of main excavation areas. In recent years the approaches have become more sophisticated, but they remain essentially trial-and-error proposition as far as practical field application is concerned. One of the reasons of this proposition may be the lack of knowledge about the smooth blasting mechanism.

In order to make clear the mechanism of smooth rock wall formation in blasting, the authors studied experimentally the blasting crack development in cement mortar specimen.

In this study the time lag dependence of the detonations in two adjacent blast holes on crack formation between holes. In the numerical simulation analysis, dynamic finite element method was employed.

1. はじめに

トンネル掘削における NATM の一般化、岩盤内への石油備蓄の計画、あるいは地下発電所の建設などにより近年岩盤の掘削におけるスムーズブラस्टィング(以下 SB と略)の重要性が見直されてきたようである。

先に筆者らはセメントモルタルブロックを用いて SB に関する基礎的模型実験を行ない、隣接孔が爆破される場合の起爆時間差が SB 結果に与える影響について検討した。そしてその結果起爆時間差を小さくすることが平滑な最終岩壁面を作る上からもまた地山を傷めないという目的からも重要であると報告した¹⁾。

本研究はこの模型実験で得られた結果の主な部分を有限要素法を用いたモデルによりシミュレーション解析し、前報の推論の合理性を確認したものである。

2. 爆破問題の数値シミュレーション

爆破による岩質材料の破壊をシミュレートするためには考慮すべき多くの問題がある。筆者らは先に爆破衝撃のみを受ける岩質材料板の破壊に関する実験と、

それに対するシミュレーション解析とを行ない、シミュレーションの有効性を示した²⁾。そこで本研究ではこの方法を発展させて用いることとした。本研究に用いたシミュレーションの方法と仮定は概略次に述べるとおりである。詳しくは文献²⁾を参照されたい。

2.1 数値計算法

数値解析には動的問題に対する平面有限要素法を用い、平面ひずみ状態で考えることにした。要素分割には直角二等辺三角形を用い、質量は集中質量法によった。

時間に関する数値積分は Newmark の方法³⁾

$$u^{n+1} = u^n + \dot{u}^n \Delta t + \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \ddot{u} \Delta t^2 + \beta \ddot{u}^{n+1} \Delta t^2$$

$$\dot{u}^{n+1} = \dot{u}^n + (1 - \gamma) \ddot{u}^n \Delta t + \gamma \ddot{u}^{n+1} \Delta t$$

(u^n , \dot{u}^n , \ddot{u}^n はそれぞれ第 n ステップにおける変位、速度、加速度であり、 Δt は時間刻み幅、 β , γ は積分定数)において $\beta=0.25$, $\gamma=0.7$ とした。爆破問題のように立ち上りの鋭い波動伝播問題を差分法、Newmark の方法などで時間積分するとき、波形に大きなオーバーシュートとそれに続く振動が生じる。この大きな振動は波動伝播の過程で実際には生じない大きな引張応力を生じることがある。岩質材料はよく知られるように圧縮に比べて引張に対して著るしく弱く、

* 土木工学科

** 日本化薬(株), 前非常勤講師

シミュレーションにおいて実際とは異ったこの引張応力による破壊を生じる可能性を有する。そこで $\gamma=0.7$ ととることにより波動全体の減衰が著しくない範囲で伝播する波のうち高周波成分を選択的に減衰させ、波の振動を小さくさせることとした。また要素の直角をはさむ2辺の長さを $\Delta x=\Delta y=1$ とするとき、一次元棒中を伝わる縦波の伝播速度 c に対して時間刻み幅 Δt を $c\Delta t=0.5$ とした。波動伝播問題においては解析領域の境界からの反射波の影響をさけるための境界条件を考慮することが必要となる。そのため本研究では解析領域の全境界においてLysmerらによる粘性境界の条件⁴⁾を与えることにした。ポアソン比は0.2としている。

2.2 入 力

爆破による入力には鋭い立ち上りを有する衝撃波部分とそれに続く準静的なガス圧部分とからなることを考えることができる。そこでここでは爆破により爆破孔周縁に作用する圧力を三角波とそれに続く一定応力の波との合成波とし一定圧力部分の大きさを三角波ピーク値 P_0 の50%とした。この場合三角波部分の数値計算上のステップ数は前述の数値積分法との関連から立ち上り5ステップ、下り20ステップとし、一定圧力部分は下りが10ステップすぎたところから一定状態となるようにした。

いま要素の直角をはさむ2辺のそれぞれの長さが3.2cmに対応するとすると、 $c\Delta t=0.5$ より材料中の縦波の伝播速度を4,000m/secとして、一時間刻み幅は4 μ secとなる。この場合入力は立ち上り20 μ sec、下り40 μ secの後十分に長い時間の一定ガス圧の作用があるものとなる。

2.3 材料の破壊条件および破壊後の挙動

材料の破壊は引張応力値によって決定されるとした。本研究の対象とする問題においては供試体の破壊は引張応力によって生じる部分が多いと考えられる。さらにたとえばGriffithの破壊条件を動的問題に拡大解釈して考えれば圧縮応力の絶対値が引張応力の3倍となるまでは引張応力一定の条件と一致し、この仮定は十分に合理的であろう。

岩質材料の動的破壊を論じる場合には破壊の進行速度が問題になる。一般にクラックの進行速度はそのクラックの先端における応力状態に依存するといわれ最大で横波の伝播速度程度とされているようである⁵⁾。このことは岩質材料の動的破壊の有限要素シミュレーションを行なう場合に要素が破壊されるのに要する時

間が有限であることを意味する。しかし本研究ではこのクラックの進行速度をも含めて解析することは破壊過程にある要素の材料定数の仮定などが非常に複雑となるため、要素の引張応力がある値に達すると直ちに破断するとしている。

シミュレーションにおいて破壊した要素は引張応力と垂直な方向にクラックが生じるものとし、クラックに垂直な方向の弾性係数を0とする直交異方性要素とした。クラック面がその後の波の伝播にともない圧縮応力を受け、あるいはせん断応力を負担することも実際の爆破においては考えられる。しかし破壊面の圧縮、引張に応じて弾性係数を変化させる方法はよほど慎重な取り扱いをしないと弾性係数の修正の不完全さにより要素内に事実上生じ得ない大きな応力状態を生じることがある。この混乱を避けるため破壊面の閉そくによる弾性係数の回復は考慮しないこととした。

また爆源近くでは材料は非常に大きな衝撃的圧力のため圧潰のような形で変質し、いわゆる破砕域を形成するが、この特性が不明確なことから、爆源近傍を除いてはその影響は大きくないと考えることからこの現象はシミュレートせず、破壊の機構としては考慮していない。

3. 数値計算結果と検討

有限要素シミュレーションに用いたモデルの要素分割はFig.2にみられるとおりでである。まずA孔(左下)に載荷しその後一定時間を経てB孔(右上)に載荷することとした。また図の最大の孔間隔をSとし、この間隔を4/5(孔間隔4)、3/5(孔間隔3)と短かくして解析した。

よく知られているように有限要素法などの離散化手法を用いて進行性破壊の検討を行なう場合、破壊の進行方向が要素分割の方向に大きく影響される。今の問

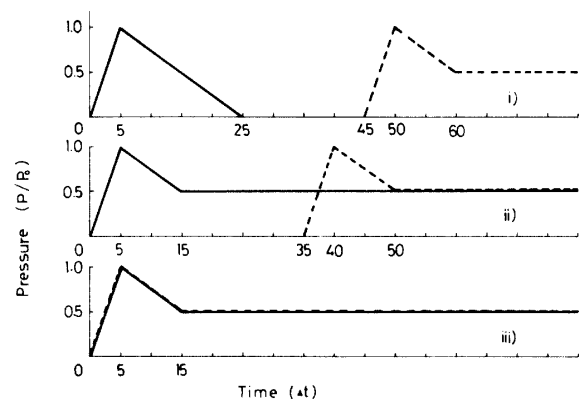


Fig.1 Bore hole pressure in each loading condition. (—; hole A, ----; hole B), P_0 ; peak value of triangle stress pulse

題のように二等辺三角形を基本として波動によるクラックの発達を解析するとクラックは要素境界線に影響されその線に沿った方向に著しく発達することになる。換言すればこの線に沿わない方向へのクラックの発達はいくらか生じにくくなる。

本研究ではこの要素境界線に沿う方向および沿わない方向の破壊が隣接孔間の荷重開始時間の差によりどのような影響を受けるかを検討することによりSBの機構に関する検討を行なおうとするものである。

解析の対象とすべき爆破時間差の条件は、i) 第1孔

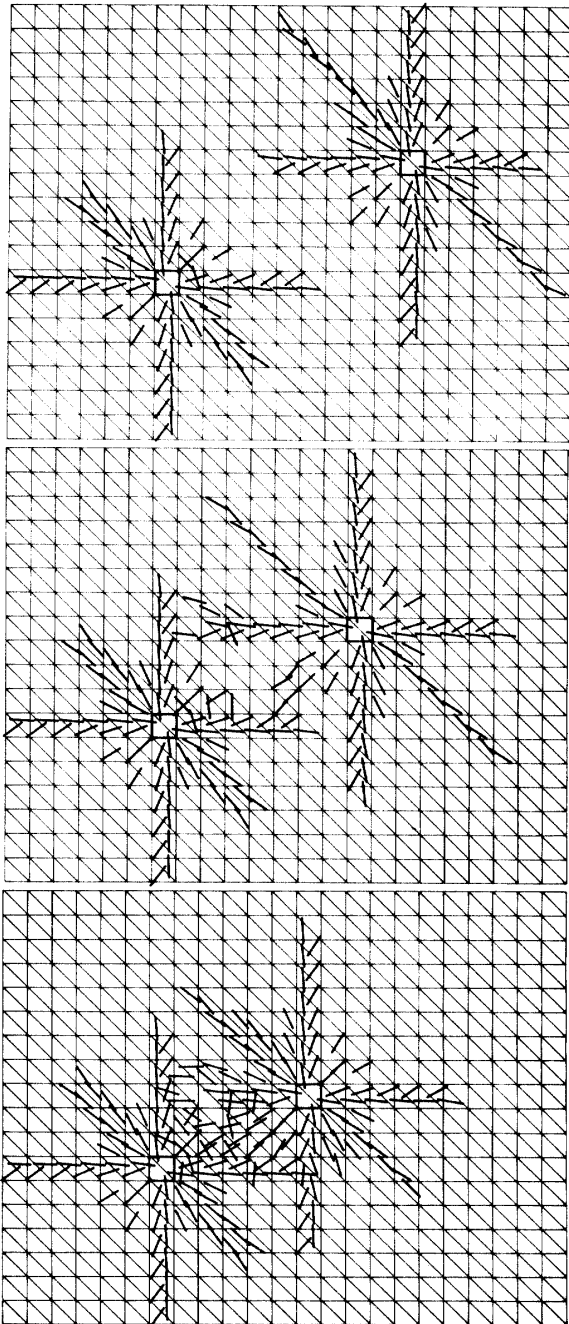


Fig.2 Development of crack pattern due to loading
i) loading of hole B (right upper) without gas pressure in hole A (left lower)

の爆破後十分な時間を経てから第2孔を爆破、ii) 第1孔の準静的なガス圧の作用する場で第2孔を爆破、iii) 2孔同時爆破とした。

これらの条件の数値シミュレーションは次のように行なった。すなわち i) の場合にはまずA孔に一定圧力部分のない三角波を荷重し、その影響が小さくなると思われる時間経過後B孔に荷重する。ii) の場合はA孔荷重後三角形部分の影響が去り、一定圧力部分の作用による定常状態になったと思われる後B孔に荷重し、iii) ではA、B孔を同時に荷重した (Fig.1)。

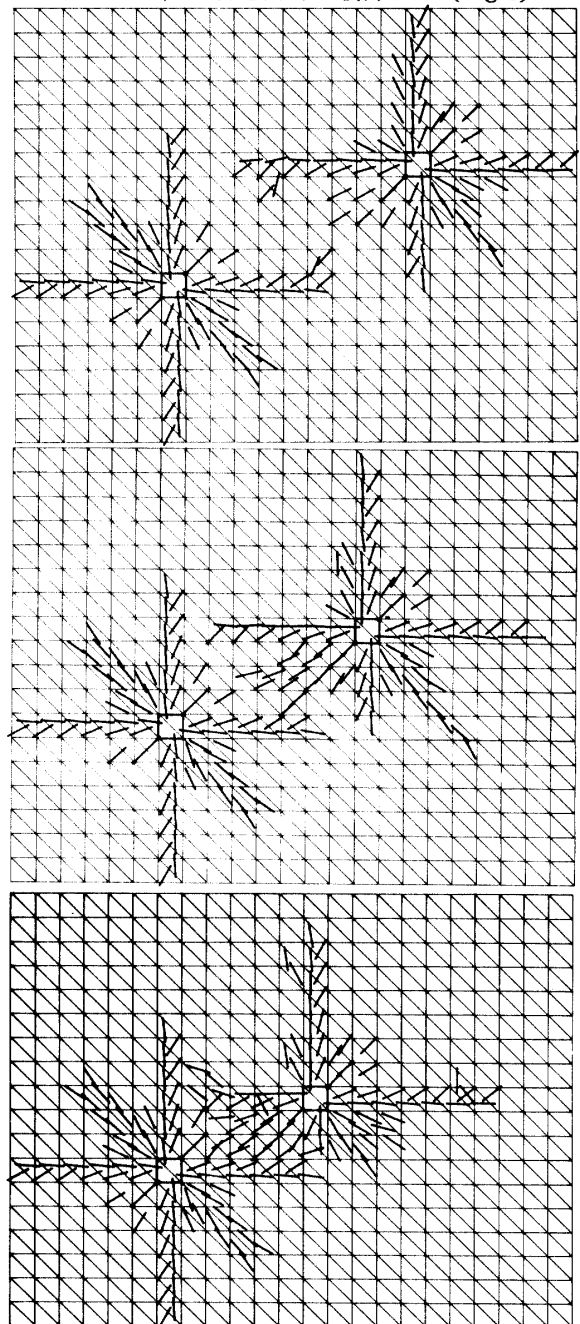


Fig.3 Development of crack pattern due to loading
ii) loading of hole B (right upper) with gas pressure in hole A (left lower)

i) の場合の一定圧力部分のない三角波のみの単独
 載荷によるクラックの発達は一一定圧力部分を伴う入
 力による載荷の場合とほとんど差がないことが予備計
 算の結果認められている。

Fig.2 に i) の場合の結果を示す。以下図中太実線
 は要素中に発生したクラックとその方向を示す。破壊
 条件は爆破孔壁単位長さ当りの入力 100 に対して 25 と
 した。また数値計算はクラックの発達がほぼ終了する
 ステップ数で打ち切っている。この場合 B 孔からのク
 ラックの発達には A 孔からのそれにくらべて大きな差
 がみられる。すなわち B 孔からのクラックは A 孔から
 のそれにくらべてかなり大きく発達し、これは A 孔から
 のクラック面による波の反射等によるものであると
 考えられる。孔間の距離が小さくなるに従い B 孔から
 のクラックは A 孔からのクラックに連結されるかのよ
 うな傾向をとるが、クラックの連結という観点からみ
 た相互の影響は小さく、結果として連結が生じたとい
 えよう。

次に ii) の場合の結果を Fig.3 に示す。距離 5 では
 クラックの連結はみられないが両孔からのクラックは
 十分に相互の影響を受けている。距離 4 では両孔間は
 クラックによって連結され、いわゆる SB が成功した
 状態となっている。この場合 A 孔からのクラックは B
 孔の影響をあまり受けずに発達するのにくらべて B 孔
 からのクラックは A 孔からの一定圧力による応力場
 の載荷となるため、要素分割のため発達したくない方
 向である両孔間を結ぶ方向へクラックが発達するの
 がみられる。さらに距離 3 となると両孔間はクラック
 で連結されるがその場合クラックの分布は広がる。

iii) の両孔同時爆破の場合 (Fig.4) 距離 5 では ii)
 の場合と大差ない。距離 4 となると両孔間の連結はク
 ラックが S 字形をなしている。この状態は次のように
 考えることができる。すなわち同時爆破の場合には両
 孔でのクラックの発生時には相互の孔の影響は及んで
 おらず、各孔からのクラックの発達は要素分割線に沿
 った方向に卓越し、ある程度発達した後応力波の伝達
 により相互に影響を及ぼし合って連結されることにな
 る。距離が 3 となるとクラックが孔から十分に発達し
 ない間に隣接孔からの影響が到達するため、早くから
 クラックは相手方の孔の方向をとり、比較的直線的な
 連結が実現する。

SB のもう一つの目的である地山方向への破壊の発
 達の軽減という観点から孔間を結ぶ方向に対して垂直
 に近い方向へのクラックの発達をみると同時載荷の場
 合が著るしく小さく、時間差の増加とともに大きくな
 ることが示される。これは右孔から孔間を結ぶ方向と

垂直な方向へのクラックが発達しようとするとき、そ
 の部分への隣接孔からの波の影響がどの程度存在する
 かによって決ってくる。例えば同時載荷の場合一つの
 孔から孔間を結ぶ線に垂直な方向へクラックが発達す
 るとき、隣接孔からの波はこのクラック先端まで達し
 ているとして波は発達しようとするクラック面に圧縮
 応力を与える。そのためこの方向のクラックの発達は
 著るしく抑えられることになる。

以上のようにシミュレーションによるクラックの発
 生、発達の状態は大筋において実験結果をうまく説明

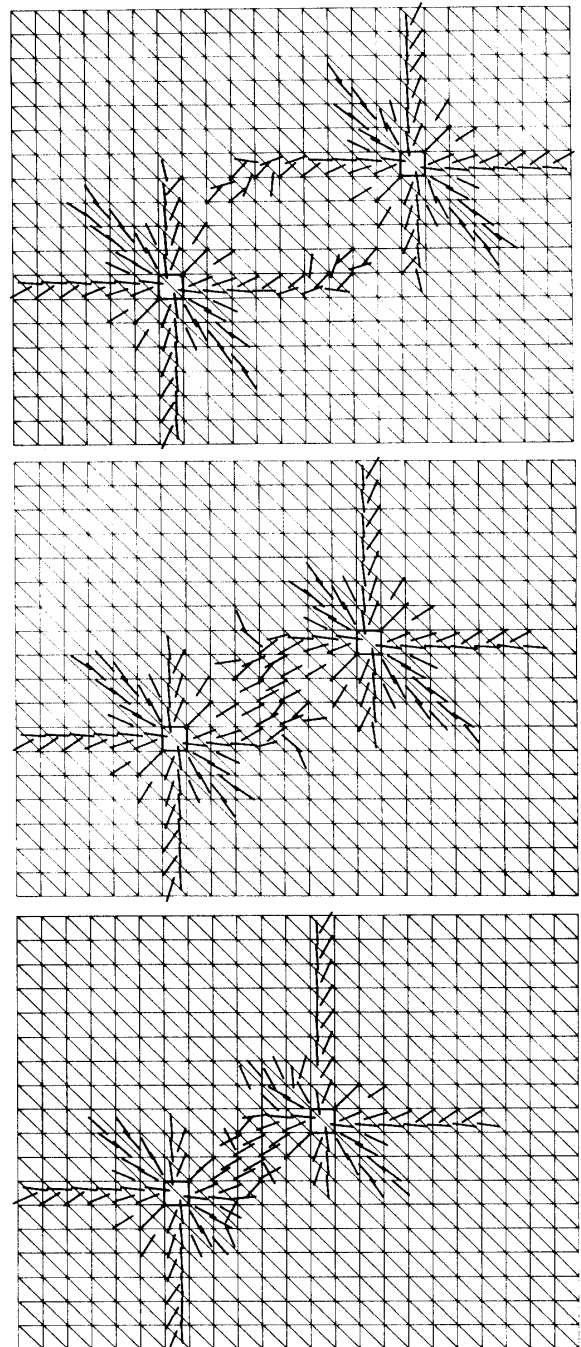


Fig.4 Development of crack pattern due to loading
 iii) simultaneous loading

するようである。しかし実際の爆破の場合とくらべてクラックの発生する領域が著るしく広いかのようであり、また同時載荷の距離の場合のように著るしい曲線状の連結がみられる。この理由は次のように説明できる。すなわち実際の爆破においては波動により発生したクラックは一般に微小であり、肉眼では検出できるまでに至らないことが多い。そしてクラックのうちのいくつかはその後のガス圧等の作用により拡大し、破断面を形成する。また爆破により生じるガス圧は爆破孔壁のみに作用するのではなく、発生したクラック内へのガスの浸入によりこのクラックを卓越発達させ、かつ周囲のクラックの発達を抑える。しかるに本解析においてはこの生成ガスのクラックへの浸入はシミュレーションが著るしく困難であるため考慮しておらず、また計算の結果生じたクラックはすべて等しく抜かっている。そのため解析においては非常に多数のクラックの発生が示されることになる。また実際の爆破においては衝撃波の伝播速度くらべてクラックの発達速度ははるかに小さく、同時爆破の場合爆破孔周辺に発達するクラックは破壊のごく初期から隣接孔からの応力場の影響を受け、直線状に近い孔の連結が実現されると考えられる。

以上の諸点を考慮して数値解析結果を前報¹⁾の実験結果と比較すると、本シミュレーション解析はSBの機構における隣接孔間の起爆時間差の影響をよく表現しているようである。このことからSBの機構において隣接孔による応力場の影響を考える前報の推論はおおむね認められよう。

参 考 文 献

- 1) 中川浩二, 坂本 仡, 山本顕一郎: スムーズブラスティングの機構に関する 実験的検討, 土木学会論文報告集, No.316, 51~60. (1981)
- 2) 中川浩二, 坂本 仡, 山本顕一郎: 面内方向に爆破衝撃を受ける岩質材料板の挙動と数値シミュレーション, 材料, No.322, 736~741 (1980)
- 3) Newmark, N.M., "A Method of Computation for Structural Dynamics," Proc. ASCE, **EM-3**, 67~94 (1959)
- 4) Lysmer, J. and R.L. Kuhlmeyer, Finite Dynamic Model for Infinite Media;" Proc. ASCE, **EM-4**, 859~877. (1969)
- 5) Bieneawski, Z.T. "Fracture Dynamics of Rock" Inter. J. Fracture Mech., **4**, 415-430 (1968)

(昭和56年10月15日 受理)