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*

中 川 浩 二** 坂 本 佐*** 山 本 顕 一 郎***

Fracture of Cement-Mortar Plates under In-Plane Impacting Load by an Explosive and Its Numerical Simulation

by

Koji NAKAGAWA

(Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Ube)

Takeshi SAKAMOTO and Ken-ichiro YAMAMOTO

(Nippon Kayaku Co. Ltd., Yamaguchi)

The main purpose of this study was to obtain a numerical simulation method for dynamic fracture in blasting. As a model of simulation analysis, cement mortar plates were selected and subject to in-plane impacting load by an explosive. In the numerical analysis, finite element method with lumped mass was used for spacial discretization and Newmark's method with γ -dispersion was employed for time integration.

The numerical results showed good simulation of the fracture of mortar plates and the fracture mechanism was clarified.

(Received Oct. 18, 1979)

キー・ワード：爆破，破壊，シミュレーション，波動

1 はじめに

発破あるいはその他の爆発現象により岩盤や構造物が衝撃的荷重を受ける問題は実際にしばしばみられるところである。発破による破壊効果は一般にその急激な立ち上りをもつ衝撃波による破壊と、それに続くガス圧による破壊の総合的な結果であると考えられる。そしてそれぞれ前者は動的な破壊、後者は準静的な破壊として理解されている。

通常の爆薬を用いた発破においてはまず衝撃波の伝ばによりクラックの発達、あるいはスラブ化などの現象が生じ、その後ガス圧による吹き飛ばし現象が生じると考えられるが、これらを厳密に切り離して検討することは必ずしも容易ではない。そして、発破による破壊理論は動的あるいは準静的な破壊のそれぞれに重点を置いて展開したものがみられるようである。

本研究は発破効果のうち特に動的な破壊である衝撃波による破壊をとり上げ、供試体中の波動の伝ばと供試体の破壊の機構との関連を検討した。モデルとしては準静的なガス圧の影響を受けることの少ない状況での

発破を考え、面内方向に爆破衝撃を受けるモルタル板の破壊実験を行った。そしてここで取り上げたモルタル板の破壊に関して有限要素法による数値シミュレーションを行い、シミュレーション方法の検討をすると同時にモルタル板の破壊の機構を力学的に説明することを試みた。

2 モルタル板の破壊実験

2・1 供試体

爆破衝撃破壊実験に用いたセメントモルタル板供試体の寸法は $50 \times 50 \times 3$ cm および $50 \times 25 \times 3$ cm の角板である。材料には砕砂と早強ポルトランドセメントを用い、配合は重量比で水：セメント：砂 = 0.5 : 1.0 : 2.0 とした。ねり混ぜの後、鋼製型わく上に打設、約24時間で脱型、6日間水中養生ののち室内に約1週間保存し、材令約2週間で実験に供した。なお一辺50 cmの正方形板の一部は中心に直径6.5 mm、10 mm、15 mmの円柱を埋め込み硬化後抜き取るにより孔を穿け、装薬孔とした。

2・2 爆薬

用いた爆薬はペントリットである。はりつけ発破の場合には薬量10, 20, 30 gを直径20 mm, 25 mm, 30 mmの紙筒に入れ、テープで供試体端に固定し、

* 原稿受理 昭和54年10月18日

** 正会員 山口大学工学部 宇部市常盤台

*** 日本化薬(株)厚狭工場 山口県厚狭郡山陽町

Fig. 1. Experimental specimens.

Fig. 2. Experimental setup.

6号電気雷管で起爆した。また正方形板を中心装薬で爆破する場合には薬量を6号雷管1本, 6号雷管+ペントリット 2g, 6号雷管+ペントリット 10gとし, 密装薬とした。いずれの場合にも円柱状紙筒の中心位置, 長さいっぱい雷管を保ち周囲にペントリットを詰める形とし, 雷管は薬筒底にまで達している。3種の供試体とその装薬の状況を Fig. 1 に示す。

爆破に際して供試体は砂上約 10 cm の高さの 4 個の台の上に置かれた 4 個のゴム柱上に静置し, 支点からの反射波の影響ならびに地表からの爆風の反射の影響の軽減に努めた。衝撃実験状況の概略を Fig. 2 に示す。実験の結果得られた供試体の破壊の状況を Fig. 3 に示す。破壊した供試体はクラックを写真撮影のため黒色インクでトレースし, また分離した供試体は破片を元の形につなぎ合せている。供試体は爆破により, 特に薬量の大きい場合にはいくつかの破片として飛散することになる。その場合破片は周囲のコンクリート壁などへの衝突によりさらに 2 次的な破壊を生じる可能性を有しているが, 破壊機構の大勢を理解するうえには大きな問題とはならないであろう。

3 数値シミュレーション

本研究におけるシミュレーションは先に得られた実験の結果をできるだけ忠実に表しうるモデルを作ることとを目的とし, シミュレーション方法について次のような検討を行った。

3・1 入力波形と数値計算法

電子計算機の進歩とそれに伴う数値計算法の発達により, 問題を材料の力学的挙動のみに限っても実に広範囲に数値計算法が提案され, また数値シミュレーション

によりその力学的解釈がなされている。波動伝ば問題の数値計算法としては空間, 時間をそれぞれ離散化して数値積分するのが一般的であり, 空間の離散化の方法としては差分法, 有限要素法, テンサコード^{1)~3)}などの手法があり, それぞれ成果を挙げている。本研究では空間の離散化に対しては材料の破壊の機構を論じるという目的に最も取り扱いが容易であると思われる有限要素法を用いることとした。

爆破衝撃のように特に立ち上りの著しく鋭い波動伝ば問題の数値解析には解析手法上の問題点があることがよく知られている。すなわちたとえば step 状の立ち上りをもつ波動伝ばの解析を通常の非減衰の数値積分法を用いて行う場合, 伝ばする波に大きな振動が現れ, その振幅は著しく大きい⁴⁾。この振動は岩質材料の破壊を問題にすると岩質材料が圧縮と比べて著しく引張に弱いということを考慮すれば不適切な破壊を生じる可能性を有し, 大きな問題がある。振動を小さくする方法としては空間の離散化⁵⁾において集中質量法ではなく適合質量法を用いる方法や, あるいは 1 次元問題において空間刻み幅 Δx と波動伝ば速度 c に対して空間刻み幅 Δt を $c\Delta t = \Delta x$ ととる方法がある⁶⁾。しかし前者は計算機容量の点から, また後者は 2 次元問題になると事実上不可能となることから実際的ではない。また応力波の立ち上りを変化させ, こう配をつけることによって振動を小さくできることが知られているが, この点については対象となる波形についての検討が必要となる。

発破により岩盤中に投入される波は爆源のごく近傍を除いて弾性波として取り扱うことができよう。この弾性波の波形についてはいくつかの実験例がありその概形についてはおおよそのところは知られている⁷⁾。いまこれをシミュレーション計算のための入力として考える場合, 入力波形を鋭い立ち上りを有する三角波とすることが考えられる。しかし数値計算上垂直に近い立ち上りを有する波と仮定することは前述のように大きな波の振動をもたらす, 数値計算上良くない。そこで本研究では数値計算法との関連の上で立ち上に有限

Fig. 3. Fracture patterns of specimens.

のこう配をもつ三角波とすることにした。

時間に関する数値積分法については波の振動をできるだけ小さくする目的から波長によって選択的な減衰を与えることのできる Newmark の方法を用いることにした。Newmark の方法

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

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

において u^n , $\dot{u}^{n+1}$, $\ddot{u}^{n+1}$ 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 は積分定数である。ここで定数 β はその変化が波の振動, 減衰に与える影響が γ と比べて大きくないことから $\beta=1/4$ とする。いま入力波形として立ち上り 5 ステップ, 下り 10 ステップの三角波を考える。また波の伝ば速度を c とし, 空間刻み幅 Δx に対して時間刻み幅 Δt を $c\Delta t=0.5\Delta x$ とする。この波が有限要素化された 1 次元棒中へ入力されるとき, 载荷端より第 1, 11, 21 番要素中の応力の時間変化を連続体棒中を伝わる波と比較したものが Fig. 4 である。ここでは連続体棒中を伝わる波のピーク値を σ_0 として示してある。この図から伝ば過程において波の振動, 減衰がいずれも著しくないということより $\gamma=0.7$ とすることにした。

いま実際の衝撃波入力の継続時間をおよそ $50\mu\text{sec}$

Fig. 4. Propagation of triangle pulse in an one dimensional bar and dispersion with γ -values.

とすると実験に用いたと同じ材料のモルタル丸棒中の縦波の伝ば速度およそ 3900 m/sec から入力波形と立ち上り部分 $16\mu\text{sec}$ (5 ステップ), 下り部分 $32\mu\text{sec}$ (10 ステップ)の三角波とし, $c\Delta t=0.5\Delta x$ として $\Delta x \doteq 2.5\text{ cm}$ となる。

3・2 材料挙動

静的な応力下におけるモルタルの挙動に関しては今日かなり詳しく知られており, その破壊の条件もいろいろな形で提案されている。しかし応力波に対する岩

質材料の破壊についてはほとんど知られておらず多軸状態での応力波に対する破壊条件に関する知識は皆無と言って良い。そこで本研究では簡単のため材料の破壊は引張応力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供試体の破壊は引張応力により生じる部分が多いと考えられ、またたとえば Griffith の破壊条件を動的問題に拡張解釈して考えれば圧縮応力の絶対値が引張強度の 3 倍となるまでは引張応力一定の条件と一致するため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、最大で横波の伝ば速度程度とされているようである。このことは岩質材料の破壊の有限要素シミュレーションを行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。しかし本研究において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。破壊面がその後の波の伝ばにより再び圧縮応力を受け、あるいはせん断応力を負担することも可能性としてはあるが、破断面の圧縮、引張に応じて弾性係数を変化させる方法は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断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波を受け、材料は圧潰のような形に変質、飛散するがこの特性が不明確なことから現象はシミュレートせず、破壊のメカニズムとしては考慮していない。

4 実験結果とシミュレーション結果との検討

Fig. 5 に解析モデルの例と要素分割法とを示す。有限要素モデルでは直角三角形要素の等しい 2 辺の長さを $\Delta x (=1.0)$ としているがモルタル供試体では 2.5 cm に対応する。ここで爆源における供試体中への衝撃波入力分布の問題がある。すなわち爆薬の爆発による衝撃波入力は爆発点より放射状であり、この入力とは 2 次元解析においては供試体端に対して垂直方向 (y 方向) および接線方向 (x 方向) への分力に分けることができる。さらにこれらの力が供試体表面の狭い

Fig. 5. Finite element models for the simulation.

Fig. 6. Numerical fracture patterns with various horizontal pulse component Q .

範囲に作用するとき、これを単一の節点に作用する x, y 方向力と与えることが合理的と思われる。ここでははりつけ発破の場合（モデル B, C）には図に示すように自由境界上対称線上の拘束を外し、入力を垂直方向分力 P と水平方向分力 Q で与えることにした。

Fig. 6 にははりつけ発破の場合（モデル B）のシミュレーションによる供試体の破壊の機構を示す。図中太実直線は要素に発生したクラックの方向を示している（以下同様）。破壊の条件は実際の爆破衝撃による入力の大きさが明確でないため、垂直入力値の最大値 $P=100.0$ に対し破壊強度を $\sigma_t=12.0$ としている。ここでそれ以後のクラックの発達は大きくないことから数値計算は載荷点を発した縦波が再び載荷点へ戻ってくる時点で打ち切っている。図からみられるように水平入力比 Q/P を 1.0 とした場合以外にはクラック発生のメカニズムが実験の結果とかなり異っている。このことと前の Fig. 2 A, B の比較よりここで用いたように爆薬を自由面にはりつけて発破した場合、埋め込んで発破した場合と比べて威力の点では大きく異なるが、破壊のメカニズム、したがってそれをもたらす入力の方は埋め込みの場合と大きな差はないといえよう。

モデル A とモデル B の破壊の機構を実験結果から次の五つに分類することができる（ここでモデル A は考

察の都合上供試体の下半分について考える）。すなわち(1)爆源近傍の圧潰、(2)圧潰部分に続く放射状の破壊、(3)底面に平行に発達する破壊、(4)側面に平行に発達する破壊、(5)供試体の隅角部をとりまく破壊、となる。

いまこれらについてシミュレーション結果 Fig. 7, 8 と比較のうえ検討する。以下シミュレーション結果には $\sigma_t=15.0, 12.0, 10.0$ の 3 種の方法強度に対応する計算結果を示している。まず、(1)の爆源近傍の破壊については前述のように材料挙動をつねに弾性とし、破壊の機構としては引張破壊しか考慮していないためシミュレーション結果には現れてこない。これに続く(2)の放射状のクラックは圧縮波の半径方向への伝ばに伴う円周方向引張応力によるものであり、モデル B と比べて A の場合に著しく、シミュレーションでもこの傾向が見られる。(3)、(4)の底面あるいは側面に沿う破壊がモデル A において一致するのは対称性から当然のことである。いまシミュレーションにおいてモデル B の(3)と(4)を比較するときいくらか(3)の方が多いようであり実験結果にもこの傾向がみられる。また、供試体の隅角部をとりまく破壊は実験において薬量の大きい場合、すなわち入力の大きい場合に認められるところであるがシミュレーションにおいても同様な傾向が認められる。

Fig. 7. Numerical fracture patterns of square plates with central charge, Model A (tensile strength of the element $\sigma_t=15.0$ (a), 12.0 (b), 10.0 (c)).

Fig. 8. Numerical fracture patterns of rectangular plates with edge charge, Model B (tensile strength of the element $\sigma_t=15.0$ (a), 12.0 (b), 10.0 (c)).

Fig. 9. Numerical fracture patterns of square plates with edge charge, Model C (tensile strength of the element $\sigma_t=15.0$ (a), 12.0 (b), 10.0 (c)).

つぎに Fig. 9 に正方形板の一边の中点に載荷した場合 (モデルC) のシミュレーション結果を示す. 実験によるとこの場合も破壊の形式は先の(1)~(5)にほぼ準じることとなる. (1), (2)の破壊はモデルBとCとで一致することが期待されるが量的には差が見られるようである. (3)および(4)の破壊はモデルAおよびBにおいてはほぼ同様であったのに比べてモデルCではかなり明りょうな相違を示している. すなわち底面からの反射波による破壊は側面からの反射による破壊に連ならずむしろ底面に平行なままで供試体を横切ろうとし, 側面からの反射によって破壊は位置が深くなるとともに供試体中央部へと方向を転じ, 載荷点を取り巻くような形となる. そして本実験の範囲では(5)に対応する破壊はみられない.

いまこれらについてシミュレーション結果は実験の結果を忠実に表しているようである. 特に(4)の側面からの反射によるクラックの発達に関しては先のモデルA, Bと比べてモデルCでは座標が大きくなるに従い, 全体的なクラックの傾向のみならず, 個々のクラックの載荷点を取りまく方向に回転し, 供試体の深さによる破壊の機構の変化を示しているところに興味がある.

5 おわりに

以上のように本研究では面内爆破衝撃を受ける三種類のモルタル板を例としてとり, その破壊機構を検討するとともにその破壊機構のシミュレーションを有限要素モデルを用いて行い, ほぼその破壊の機構をシミュレートすることに成功した. 爆破衝撃を受ける岩盤, 構造体などの例は多くあるがその破壊の機構は必ずしも明確ではない. ここでは爆破における波動による破

壊のみをとり上げ, 簡単ないくつかの仮定を設けることによりシミュレートしている. シミュレーション結果は実験結果をかなり忠実に表しており, このことから爆破衝撃による岩質材料の破壊が弾性波動の伝ば, 反射などから説明されることが予想される. そして本研究における方法を用いて多くの衝撃波を受ける構造体の破壊の機構等が解明されると期待される.

なお本研究の一部である爆破実験は日本化薬(株)厚狭工場 (山口県厚狭郡山陽町) の爆発実験場において行われたものである. 実験に便宜をお計りいただいた日本化薬(株)石井工場長ならびに日本化薬の諸氏, 実験にご協力いただいた山口大学, 徳山工専の諸氏に謝意を表するしだいである.

(昭和54年10月4日 第23回材料研究連合講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) たとえば, 佐藤 誠, 土木学会論文報告集, No. 265, 37 (1977).
- 2) Costantino, C. J., Proc. ASCE, EM2, 153 (1967).
- 3) 佐々宏一, 伊藤一郎, 材料, **21**, 123 (1972).
- 4) 桜井春輔, 小島省三, 第5回マトリックス構造解析法研究発表論文集, 338 (1971).
- 5) 工藤洋三, 中川浩二, 山口大学工学部研究報告, **28**, 39 (1978).
- 6) Hughes, T. J. R., et al., J. Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., **8**, 249 (1976).
- 7) たとえば, 工業火薬協会編, “発破ハンドブック”(1976) 山海堂
- 8) Newmark, N. M., Proc. ASCE, EM3, 67 (1959).
- 9) Goudreau, G. L., and R. L. Taylor, J. Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., **2**, 69 (1973).
- 10) 中川浩二, 山口大学工学部研究報告, **30**, 1 (1979).
- 11) Bieniawski, Z. T., Inter. J. Fracture Mech., **4**, 415 (1968).