

動的破壊過程の3次元数値解析コードの開発

Development of the Three-dimensional Numerical Analysis Code for Dynamic Fracture Process

山地 宏志 HIROSHI YAMACHI

土木技術部 高橋 浩 HIROSHI TAKAHASHI

土木技術部 鷹賀 智司 SATOSHI TAKANOHASHI

本論文では、有限差分法と破壊力学を基にした動的破壊過程解析手法を提案する。この提案手法は各種条件下で任意の破壊伝播を解析することが可能である。また、2004年に施工技術総合研究所において実施した爆破実験の数値シミュレーションを実施し、当該提案手法の妥当性を検証した。

キーワード：有限差分法、破壊力学、爆破解体

In this paper a method of dynamic fracture process analysis, based on the finite difference method and fracture mechanics is proposed. The proposed method is capable of analyzing arbitrary fracture propagation in brittle materials under various conditions. We have also carried out a numerical simulation of the blasting experiment, which was conducted in 2004 at Japan Construction Method and Machinery Research Institute, and this simulation proved the validity of proposed method.

Key Words: Finite Differential Method, Fracture Mechanics, Blasting Demolition

1. はじめに

爆破は非日常的事象であるため、構造物爆破解体工法は不要な警戒を近隣住民に与え、環境負荷が大きな工法であると誤解されている側面がある。しかし、環境負荷は発生する負荷の大きさとその継続時間の積として評価されるべきであるから、継続時間の極めて短い爆破解体工法は、むしろ環境負荷の小さい解体工法であると考えることが妥当である。

たとえば、水辺の開放と日本橋の賑わい再生を目的に、今日、実現が望まれている日本橋上部首都高速道路移転プロジェクトにおいて、ブレーカーやワイヤーソー等による橋脚や桁の解体が、どれほどの振動・騒音被害を日本橋周辺に与えるかを想像することは容易である。もし、これを爆破によってたちまちのうちに倒壊・解体し、船舶によって東京湾を経て処分地に運搬すれば、日常生活・業務にほとんど影響を与えずにこれを撤去することが可能であることは自明である。

しかしながら、爆破工法はその制御が難しく、低環境負荷を担保する爆破計画が確立されていない。これは、爆破事象が再起性のない唯一事象であるため、その爆破計画が経験豊かな技術者の裁量に委ねられるためであると考えられる。今日の爆破計画において優先されるべき

は、環境負荷の低減よりも、失敗のない爆破工であるため、火薬装薬は自ずと過装薬の傾向をとる。このため、爆破時に過剰な振動・騒音が発生するだけでなく、飛散物の飛散寸法と飛散距離も増大する。これが、都市部において爆破解体工法が敬遠される大きな理由の一つである。

爆破解体工に限らず、精密かつ低負荷な爆破工法が望まれる今日にあつて、これを開発し、実務に適用するためには、動的な破壊過程を工学的に評価することのできる解析コードが不可欠であると考えた。Uenishi, K. and H.P.Rossmann¹⁾は、有限差分法を用いて2次元弾性体の応力波伝播とその相互作用を評価することのできる解析コードを開発し、これをソフトウェア・パッケージSWIFD¹⁾として広く世界に配布している。また、S.H.Cho²⁾は動的有限要素法によって引張・圧縮・せん断破壊過程を評価することのできる2次元解析コードを開発した。なお、当該解析コードはガス圧の影響をも評価することが可能である。

筆者らは爆破とこれに続く構造物の飛散・落下・倒壊現象を評価するためには、爆轟による亀裂発生後の重力作用を正しく評価することが重要と考えた。このためには、3次元の動的な破壊過程を評価することのできる解析コードも開発が不可欠となる。また、爆轟の非常に短

い伝播時間内に発生・伝播する構造物破壊は引張破壊が支配的であるものと考えた。したがって、引張破壊過程を正しく評価することができれば実務的に十分な解を得られるものと判断した。

以上のような観点から開発した解析コード GAIA_Blasting の概要を以下に示し、その妥当性を検証する。

2. GAIA_Blasting の概要

GAIA_Blasting は、以下の運動方程式、釣合い条件式 (Navier の式) を有限差分法により定式化した数値解析コードである。すなわち、

$$\frac{\partial r_i}{\partial t} = v_i \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}) + K_i \quad (2)$$

ここで、 r_i は弾性体の座標を、 v_i 、 ρ はその速度と密度をそれぞれ示し、 λ 、 μ はラメの定数を、 K_i は作用する外力を示す。また、 ε_{ij} はひずみテンソルを示す。

当該解析コードにより安定した解を得るためには、入力条件に関して、いくつかの解析条件が満たされる必要がある。すなわち、解析モデルの要素分割幅 Δx が、伝播媒体の最小波長 Λ_{\min} と以下の関係にあることが求められる。

$$\Lambda_{\min} > 10\Delta x \quad (3)$$

また、時間間隔 Δt も CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) 条件を満たすよう設定されなければならない。すなわち、

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{2c_p} \quad (4)$$

ここで、 c_p は解析に採用された媒体のうちで最も伝播速度の速い縦波の伝播速度を示す。さらに、作用する衝撃 (爆轟作用) の継続時間 T についても式 (3) を満たす要素分割幅 Δx に対して、以下の規制がある。

$$T > \frac{10\Delta x}{c_{\min}} \quad (5)$$

ここで、 c_{\min} は解析に採用された媒体のうちで最も伝播速度の遅いせん断波の伝播速度を示す。なお、安定した解析を実行するためには、この継続時間に関する衝撃

圧作用の二次勾配が連続することが望ましい。したがって、単独パルスのような作用形態は最も不安定な計算結果を導くものとなる。

また、破壊の評価は最も単純な引張破壊のみを評価することとし、以下のような条件を設けた。すなわち、

$$D = \begin{cases} 1 & (\sigma_1 \geq \sigma') \\ 0 & (\sigma_1 < \sigma') \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 σ_1 は最大主応力を、 σ' は材料の引張強度をそれぞれ示す。また、 D は損傷の状態を示すパラメータであり、 $D=0$ のとき材料は損傷のない健全な状態であり、 $D=1$ のとき完全な破断状態が生じ、当該部に応力が作用しないものとした。

以下、当該解析コードを用いて平成15年施工技術総合研究所において実施した RC 梁の爆破解体実験³⁾ をシミュレーションし、その妥当性を検証した。

3. 爆破解体実験とそのモデル化

図-1に平成15年施工技術総合研究所において実施した爆破解体実験の供試体寸法と発破孔の穿孔位置・深さ、ならびに配筋を示す。図に示すように、当該供試体は 9,000(L) × 1,800(W) × 1,000(H) の RC 梁で図-1(a) のような配筋がなされている。

爆破はこの梁を切断する目的で実施し、梁中央部に25孔の発破孔を図-1(a)、(b)に示すように深さ625mmまで穿孔した。火薬はエマルジョン系含水爆薬を用い、装薬量は1孔当たり300gとした。これは、配筋の拘束状況を考慮したものである。なお、海側端部2孔のみは飛石の発生防止を目的として装薬量を200gとした。したがって、総装薬量は7,300gとなる。また、雷管は瞬発式の電子雷管を用い、斉発発破法を採用した。図-3に爆破実験後の供試体スケッチを示す。図のハッチ部は爆破により破砕された領域を示すものである。

図-1に示した供試体を図-4のようにモデル化し、50mmの分割幅で有限差分近似する。図には装薬部も併せて示す。また、入力には表-1に示すコンクリート物性を用いるが、ここでは配筋の影響を考慮しないものとした。

爆轟は供試体表面から 375 ~ 725mm (250 mm) の範囲で一様に作用するものとし、エマルジョン火薬の一般的な物性から作用時間を 0.5×10^{-4} sec とし、その作用過程を式 (7) のように与えるものとした。式 (7) で示される爆轟の経過時間と爆轟力の関係を図-5に示す。

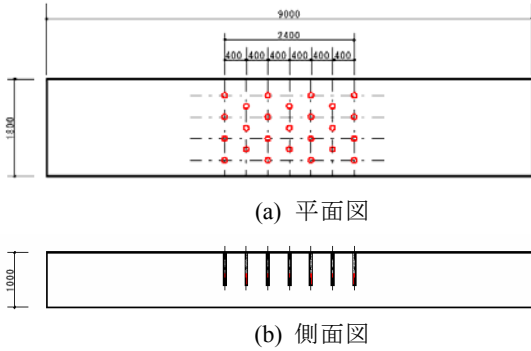


図-1 爆破解体供試体寸法・穿孔位置図

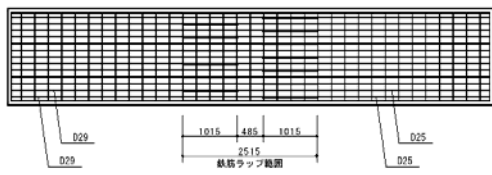


図-2 爆破解体供試体配筋図

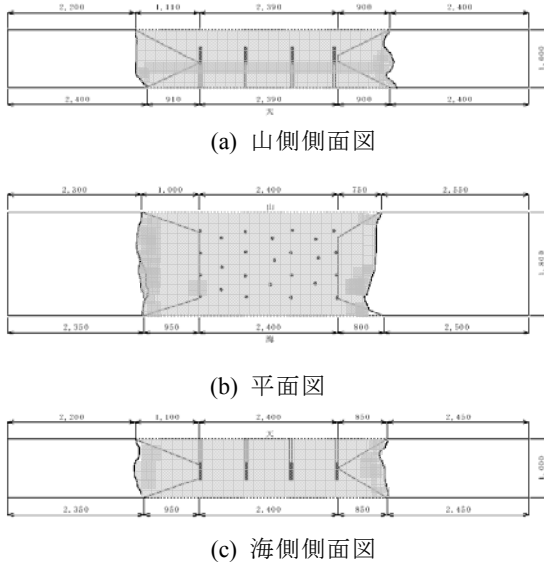


図-3 供試体爆破状況スケッチ

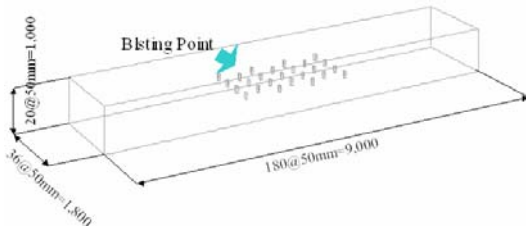


図-4 シミュレーションに供したモデル

$$P = A \frac{8t}{T} e^{1 - \frac{8t}{T}} \quad (7)$$

ここで、 P は作用する爆轟力を、また A は火薬種から

表-1 解析に用いたコンクリートの物性

Properties	Value
Density	2,700kg/m ³
Young's modulus	400Gpa
Poisson's ratio	0.2
P-wave speed (c_p)	4,000m/s
S-wave speed (c_{min})	2,500m/s

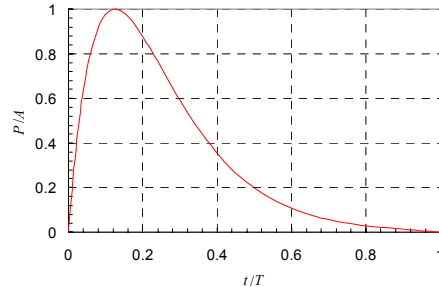


図-5 爆轟の経過時間と爆轟力の関係

定まる最大爆轟力を示す。なお、 t は点火からの経過時間を示すものである。

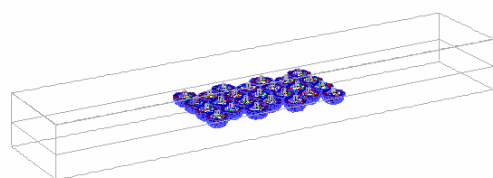
4. 爆破解体シミュレーション結果

(1) エネルギー・応力波伝播の検討

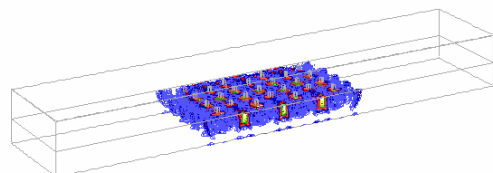
上述のモデルを用いて、爆轟による応力伝播のみを評価するシミュレーションを実施した。したがって、ここでのシミュレーションは式(6)で示される損傷状態を考慮しないものとする。

図-6, 7に供試体下部に投影した運動エネルギーとポテンシャルエネルギー(爆轟エネルギー)の伝播状況を示す。図-6, 7において 0.43×10^{-4} sec時のエネルギー分布は、爆轟途中の分布を示し、他は爆轟終了後のエネルギー分布を示している。図-6, 7に示されるように、ポテンシャルエネルギーは爆轟作用中に最大値を示し、爆轟終了後はほとんど伝播することなく、減衰していく。これは、ポテンシャルエネルギーが、逐次、運動エネルギーに変換されるためであり、変換された運動エネルギーは供試体にひずみを発生させながら波として伝播する。このひずみに伴い発生する応力が、供試体の破壊を誘起することとなる。したがって、供試体に発生するひずみを装薬量や秒時差などにより制御することで、特定箇所のみを破壊したり、不要な範囲に損傷を及ぼさない高精度制御爆轟が可能となる。

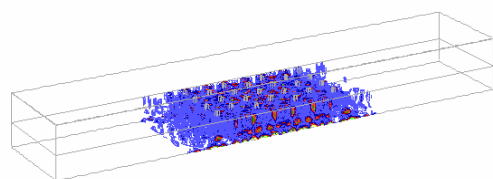
また、運動エネルギーは 1.47×10^{-4} sec頃に発破孔部で最大の値を示し、その後供試体中を伝播しつつ減衰していく。このとき注目すべきは図-6(c)のように供試体表面付近で高いエネルギー領域が形成されることである。



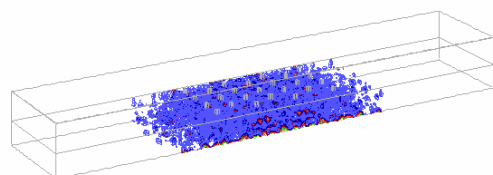
(a) $0.43 \times 10^{-4} \text{sec}$



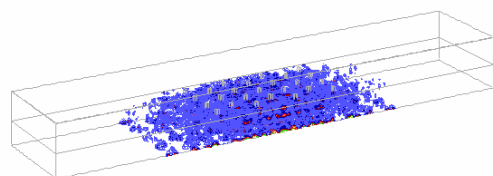
(b) $1.47 \times 10^{-4} \text{sec}$



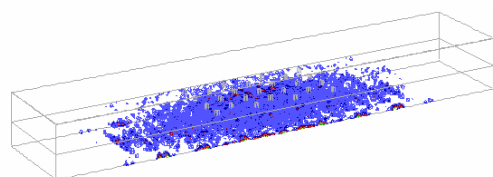
(c) $2.46 \times 10^{-4} \text{sec}$



(d) $3.45 \times 10^{-4} \text{sec}$



(e) $4.33 \times 10^{-4} \text{sec}$

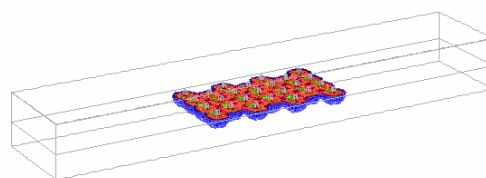


(f) $7.02 \times 10^{-4} \text{sec}$

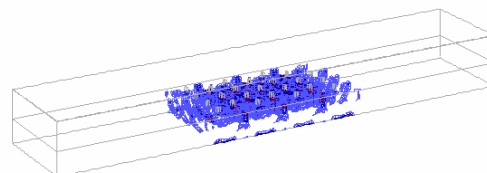


図-6 点火後の運動エネルギー伝播

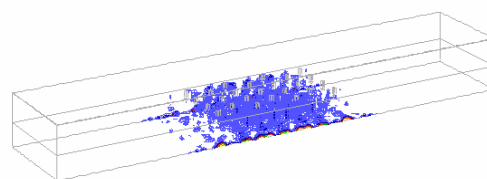
これは先に供試体表面まで達した運動エネルギーが供試体表面で反射し、遅れて伝播したエネルギーと重ね合うことで形成される。したがって、重ね合わせによる高いエネルギー域を、人為的に形成することができればエネルギーが重ね合う位置にのみ爆破を誘導することも可能となる。



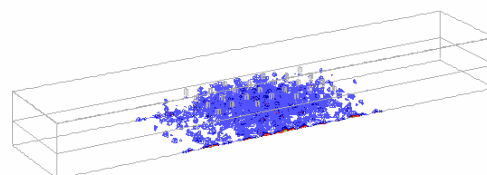
(a) $0.43 \times 10^{-4} \text{sec}$



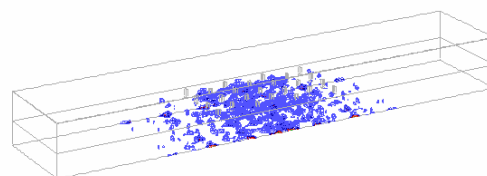
(b) $1.47 \times 10^{-4} \text{sec}$



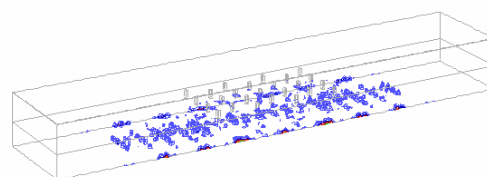
(c) $2.46 \times 10^{-4} \text{sec}$



(d) $3.45 \times 10^{-4} \text{sec}$



(e) $4.33 \times 10^{-4} \text{sec}$



(f) $7.02 \times 10^{-4} \text{sec}$



図-7 点火後のポテンシャルエネルギー伝播

このようなエネルギー伝播の結果として現れる応力伝播の状況を示したものが図-8であり、図-6, 7と同様に供試体下部に八面体せん断応力の分布を投影した。図-8(a)に示すように、 $t=0.43 \times 10^{-4} \text{sec}$ の爆轟途中では発破孔を連結するように比較的大きな八面体せん断応力の領域(3.5 ~ 4.0MPa)が形成される。この領域は各発破孔

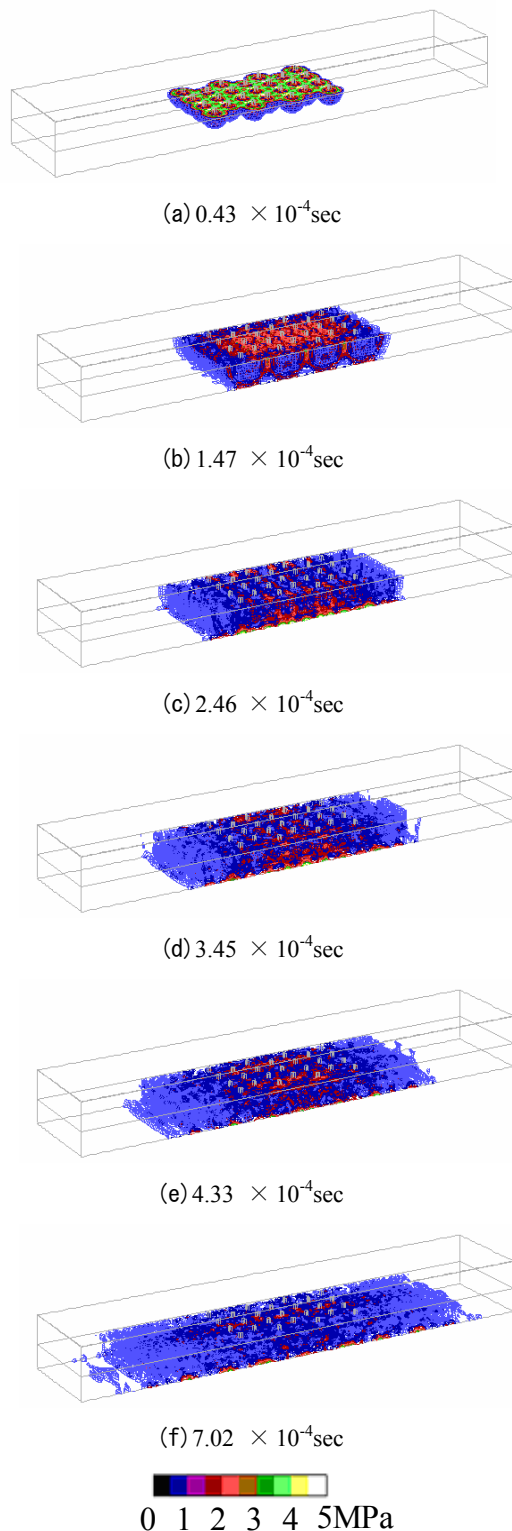


図-8 点火後の八面体せん断応力伝播

の爆轟により生じた応力波が相互に合成することで形成されたものである。

この合成領域は図-8(b)に示されるように、応力レベルを減じながら球状に伝播する。図-8(b)の状態では、発破孔部とこの合成領域だけが2MPa以上の応力レベルを示す。

さらに時間が経過すると、発破孔部の応力レベルは低下し、応力波の合成領域も不確かなものとなるが、供試体壁面付近で新たな応力の合成領域が形成され、2MPa以上の応力レベルを呈する(図-8(c))。この応力波合成は運動エネルギーと同様に供試体表面で反射した応力波と遅れて到達した応力波が合成することで形成され、時間の経過とともに供試体表面付近を供試体軸方向に伝播していく。このことから、爆轟により形成される供試体破壊域は、供試体内部と供試体表面で異なることが予想される。

(2) 破壊領域の検討

上記と同一条件で、式(6)で示される損傷状態を考慮したシミュレーションを実施した。なお、ここでの損傷状態は供試体コンクリートの引張破壊強度を $\sigma^t=5\text{MPa}$ としたものである。図-9に損傷領域の伝播過程を示す。また、図-10には最終状態 $t=7.02 \times 10^{-4} \text{sec}$ における、上・下部表面、ならびに上部から250mm、500mm、750mmの水平断面内損傷分布を示す。

式(6)で示される破損状態は0か1の二値しか取らないが、図-9では描画時の空間補間の関係から0.9程度の損傷状況が現れることがあるが、これは当該領域のほとんどで引張強度を超える最大主応力が発生していることを示すものである。また、応力波の伝播先端部では0.2や0.1程度の破損状況が現れる。これも当該領域の一部が引張強度を超えたものと評価される。

図-9に示されるように、当該のシミュレーションでは爆轟による応力波が伝播した領域のほとんどが供試体コンクリートの引張強度を超える結果となった。これは、爆轟力が過大であるものと判断される。

一方、図-10をみると損傷域の広がりが見出しに示した供試体爆破状況スケッチと分布・寸法ともに非常に良い一致を示しており、当該解析コードにより工学的に十分な精度の爆破予測が可能であると判断する。なお、解析では供試体表面の反射に影響されたとと思われる損傷域の広がりが確認されるが、爆破解体実験後の供試体観察(図-3)ではこれを確認することができなかった。

また、図-9では上部表面から800mm付近で断面中央部を突き抜けるような損傷領域が広がっている。当該位置の水平断面損傷分布は図-11のようなものであり、当該損傷域は飛び地状を成す。このような飛び地状損傷域は、爆破孔からの応力波伝播のみにより形成されるとは考えがたく、供試体表面で反射した応力波とこの近傍で合成することで損傷域が形成されたと考えることが妥当と思われる。残念ながら、爆破解体実験後の供試体観察からはこのような飛び地状の破損領域の存在は確認され

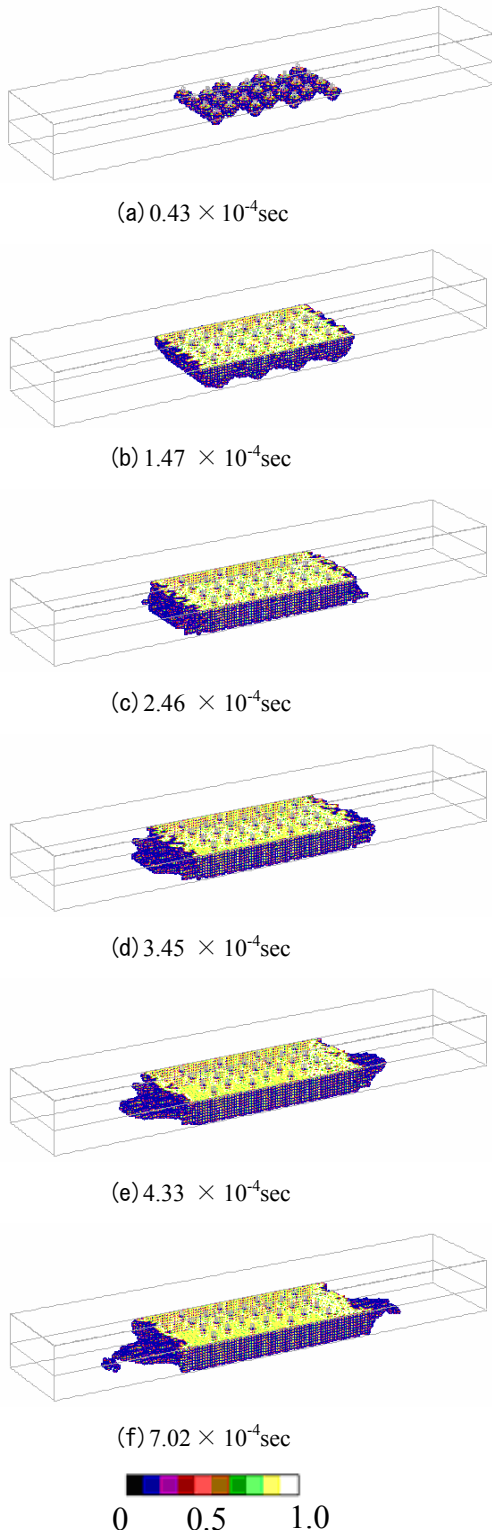


図-9 点火後の破壊領域伝播

ていない。

5. まとめ

有限差分法と破壊力学に基いた弾性応力波伝播とその相互作用に関する3次元数値解析コードを開発し、爆破

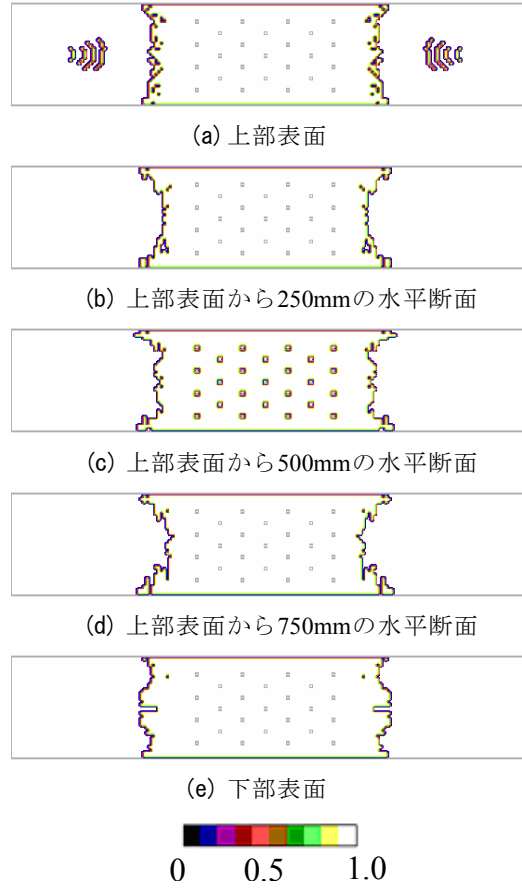


図-10 点火後の破壊領域伝播



図-11 上部表間から800mmの水平断面内破壊領域

解体実験結果との比較を行った。その結果、工学的に十分な精度で爆破の影響を評価できるものと判断した。

謝辞： GAIA_Blasting の開発に当たり神戸大学自然科学系先端融合研究環都市安全研究センター上西幸司准教授には、懇切なご指導と深甚なるご尽力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Uenishi, K. and H.P.Rossmannith ; SWIFD 2D Wave Simulator and User's Manual, SWIFD Development Center, Vienna/Kobe, 1995
- 2) Cho, S.H ; Dynamic fracture process of rock and its application to fragmentation control in blasting, 北海道大学博士論文, 2003
- 3) 林雅博, 廣茂実, 鷹鷲智司 : PC 橋を「発破」で解体 - 国道41号線旧不動橋 -, 土木施工, pp.86-91, 2003