

鉄筋コンクリート版の衝撃爆破破壊シミュレーション

NUMERICAL SIMULATION OF IMPACT FRACTURE OF RC PLATE
SUBJECTED TO BLAST LOADING

丹羽一邦*, 藤掛一典**

Kazukuni NIWA and Kazunori FUJIKAKE

*工修 (株) テラバイト 取締役 (〒113-0034 東京都文京区湯島3丁目31-6 大塚ビル4F)

**博(工) 防衛大学校助教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

キーワード: 鉄筋コンクリート版、爆薬荷重、衝撃破壊、FEMシミュレーション、JWL
(RC plate, blast loading, impact fracture, FEM simulation, JWL)

1. はじめに

近年テロによる被害が著しく増大している中で、重要構造物に対する耐衝撃性能評価への関心が高まっている。ここでは、鉄筋コンクリート構造物の耐衝撃性能評価の方法を解析シミュレーションによって確立するため、商用ソフトであるLS-DYNA¹⁾を利用した解析を実施し、萩谷らの爆破実験結果²⁾と比較検討を行った。

LS-DYNA は、衝撃解析用の汎用ソフトとして自動車の衝突解析をはじめ、携帯電話、ノートパソコン等の落下衝撃解析に盛んに利用されている。また、昨年にはLS-DYNA を用いた米国ペンタゴンへの飛行機衝突シミュレーション³⁾も報告されている。

これまでRC構造物の爆破破壊の問題を扱うには、Lagrange要素を利用した解析が以前から行われているが種々の問題点が指摘されている。その改善策として、Euler要素を使った構造-流体連成解析が提案されているが、水中爆破の問題や成形爆薬のシミュレーション報告がある程度である。

一般に鉄筋コンクリート版(RC版)の爆破破壊については、クレータとスポール及び貫通口が形成されることが知られている。スポール破壊は内側に存在する人間や器材に対して大きな危害を加えることが考えられる。また、貫通口ができると、高温、高圧の爆風が進入しこれによる深刻な被害も想定される。したがって、解析により爆破荷重を受けるRC版の破壊状況を予測する技術を確認することは非常に重要である。

特に本研究では、コンクリート要素の破壊による要素削除の手法を採用し、構造-流体連成解析によ

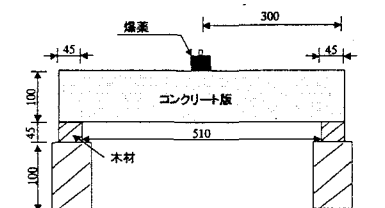


図1. コンクリート版と爆破実験

りRC版の爆破破壊の現象が解析可能であることを示す。

2. 実験概要

萩谷らは、図1に示すRC版の爆薬による破壊実験を行なっている。ここでは、コンクリート圧縮強度47.5MPa、爆薬については、102gペントライト爆薬の実験結果を対象として解析を実施した。実験は図中に示すようにコンクリート版を2本の角材上に設置し、爆薬をコンクリート中央に設置している。

3. LS-DYNAの衝撃解析手法

LS-DYNAではALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian)法に基づいた解析手法を採用している。一般の構造体にはLagrange法を使い流体にはEuler法を使うが、物質が何であるかに依らずこれらを同時に利用することが可能である。運動方程式の時間積分には中央差分法と集中質量を利用し陽解法による求解手法を採用している。

空間の離散化は有限要素法によって行われている。要素は低次アイソパラメトリック要素で、次数低減1点積分により剛性を評価している。また、アワーグラス

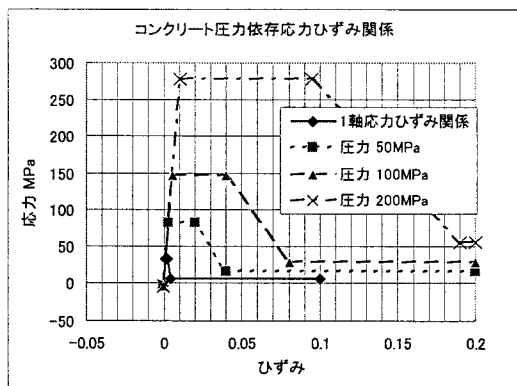


図2. コンクリート圧縮特性 (塑性モデル)

表1. コンクリートの材料定数

密度 ton/mm ³	ヤング率 GPa	ポアソン比	圧縮強度 MPa
2.34×10 ⁻⁹	22.5	0.2	47.5

表2. 鉄筋の材料定数

鉄筋タイプ	ヤング率 MPa	ポアソン比	降伏応力 MPa
D6	177	0.3	333
D10	186	0.3	394

コントロールの補正には Hollquist 等の粘性型抵抗力 η を要素節点に加えている。

構造-流体連成解析では、構造表面でペナルティ法による圧力カップリングをおこなっており、要素の破壊による要素削除がある場合でも残った要素とのカップリングを自動的にこなっている。

4. 解析モデル

4.1 コンクリートの有限要素モデル

コンクリートは形状対称性を考慮し、1/4 モデルとした。辺長 5mm のソリッド要素で板厚方向 20 分割、1/2 幅方向には 60 分割した。

材料構成則には、圧力依存の塑性モデルを採用し、コンクリートの圧壊とスポール破壊が模擬できるモデルを利用した。材料定数を表1に示す。またコンクリートの圧縮特性は、藤掛らの3軸圧縮載荷試験結果⁴⁾を参考に図2に示すように決定した。

コンクリートの破壊には、1) スポール破壊のような局所的な引張側応力による破壊、2) 主応力方向に直交する引張ひび割れ破壊、3) 圧壊による圧縮破壊が考えられる。1) は爆破衝撃による圧縮応力波がコンクリートの裏面で膨張波として反射する結果生じ、引張側の応力により判定する。2) については曲げによる引張り領域に発生する。3) は爆薬直下のクレータの発生を引き起こすと考えられる。

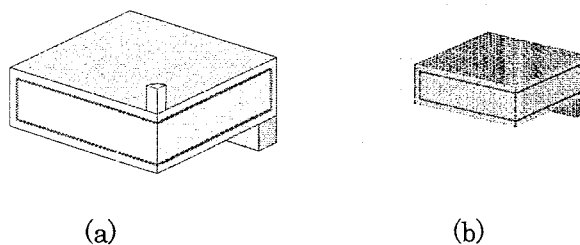


図3. 解析モデル 爆薬の(a)Lagrange 要素によるモデルと(b)Euler 要素によるモデル

ここでは、1)、2)の判定にはコンクリート圧縮強度の10分の1の値を用いた。圧壊については図2のようにコンクリート圧縮軟化剛性特性として取り入れた。

コンクリート破壊後の扱いとして、破壊した要素の削除を行った。要素削除の判定基準には、4) 引張側のひび割れ破壊、5) 圧壊をそれぞれ考慮し、要素消去引張圧力値には引張破壊圧力の3倍、圧壊については要素消去せん断ひずみを用いその値を0.1とした。

4.2 鉄筋の有限要素モデル

鉄筋はビーム要素でモデル化し、2直線近似の弾塑性材料とした。表2に解析で用いた鉄筋の材料定数を示す。

4.3 爆薬の有限要素モデル

爆薬のモデル化には以下の2種類を検討した。すなわち(1) Lagrange 要素によりモデル化し、コンクリート版との間に接触定義を行なって、圧力が伝わるよう設定する。(2) 爆薬と空気を Euler 要素でモデル化し、コンクリートとは構造-流体連成問題として扱う。これらのモデルを図3に示す。爆薬の材料モデルにおける圧力計算には次式で与えられる JWL(Jones-Wilkins-Lee)の状態方程式を利用する。

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}$$

ここに、 p は圧力、 V は相対体積、 E は内部エネルギー、 A, B, R_1, R_2, ω は材料定数である。表3および4に爆薬の詳細および JWL の状態方程式で使用する材料定数を示す。

表3. 爆薬条件

爆薬	密度 ton/mm ³	C-J速度 m/sec	C-Jエネルギー ギ- J/mm ³	C-J圧力 MPa
ペントラ イト 102g	1.62×10 ⁻⁹	7530	8.10	177

表4. JWL 状態方程式の定数

A MPa	B MPa	R1	R2	ω
540	9.37	4.50	1.10	0.35

5. 解析結果

5.1 爆薬に Lagrange 要素を使用した結果

爆薬のモデルを Lagrange 要素でモデル化し、この要素の材料構成則に JWL を使用した解析結果を図4に示す。この要素は圧力により急速に膨張し、接触作用によってコンクリート版に衝撃力を発生させる。コンクリートの破壊による要素削除を行わないモデルでは、この爆薬の爆破圧力はコンクリート表面にそのまま伝えられる。一方破壊による要素削除を行う場合には、破壊により陥没したコンクリート面には爆薬要素の形状が追従できず、その部分では圧力が充分伝わらないことが考えられる。

爆薬に Lagrange 要素を適用し、コンクリートの破壊による要素削除を行わない場合と行った場合のそれぞれの解析結果と萩谷らの実験結果とを比較したものを図5に示す。コンクリートの破壊は、引張破壊と圧縮破壊により模擬できるが、その結果をここでは、主ひずみ量で表示した。これらの解析結果は実験で得られた RC 版の破壊状況と定性的にはほぼ一致している。

一般的に爆薬の Lagrange 要素は時間の経過とともに過大に膨張していき、その結果有限要素としての精度は低下していくと考えられる。従って、貫通口が生じるような場合には適していない。しかしながら、この解析ではコンクリートの主たる破壊は、爆発直後の短時間で終了していることから、この間は充分精度が保持されていると考えられる。

5.2 爆薬に Euler 要素を使用した結果

爆薬および周囲空気を Euler 要素でモデル化し、Lagrange 要素のコンクリート版との構造-流体連成解析を行った結果を図6に示す。この図は流体の速度ベクトルおよび圧力分布を等値面で表示したものである。また、各時刻に対応したコンクリート版の破壊の様子を同図中に示す。この解析結果と爆薬に Lagrange 要素を使用した場合のコンクリートの

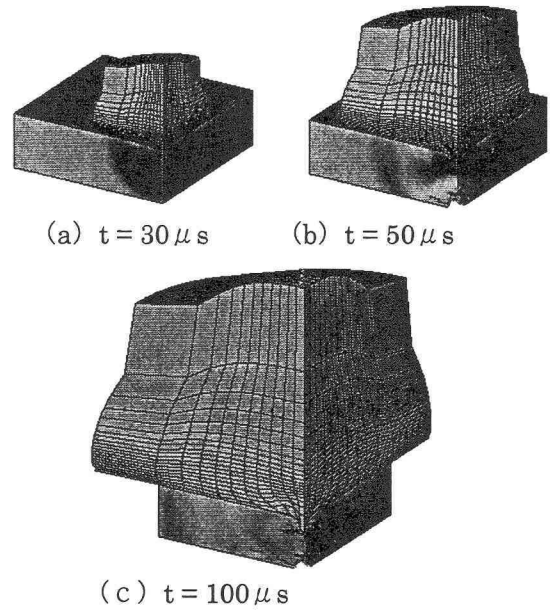
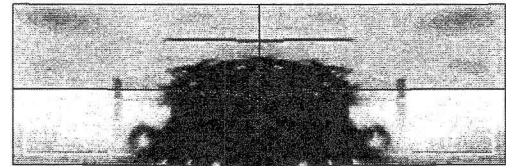
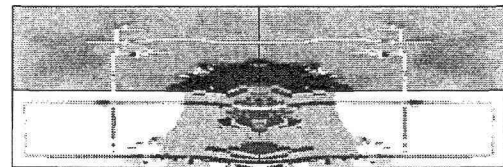


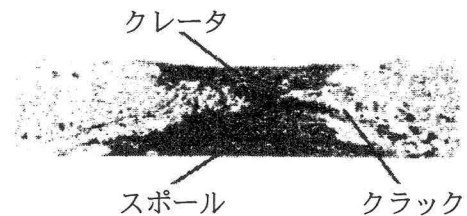
図4. 爆薬に Lagrange 要素を使用した爆薬の挙



(a) 破壊による要素削除を行わない結果



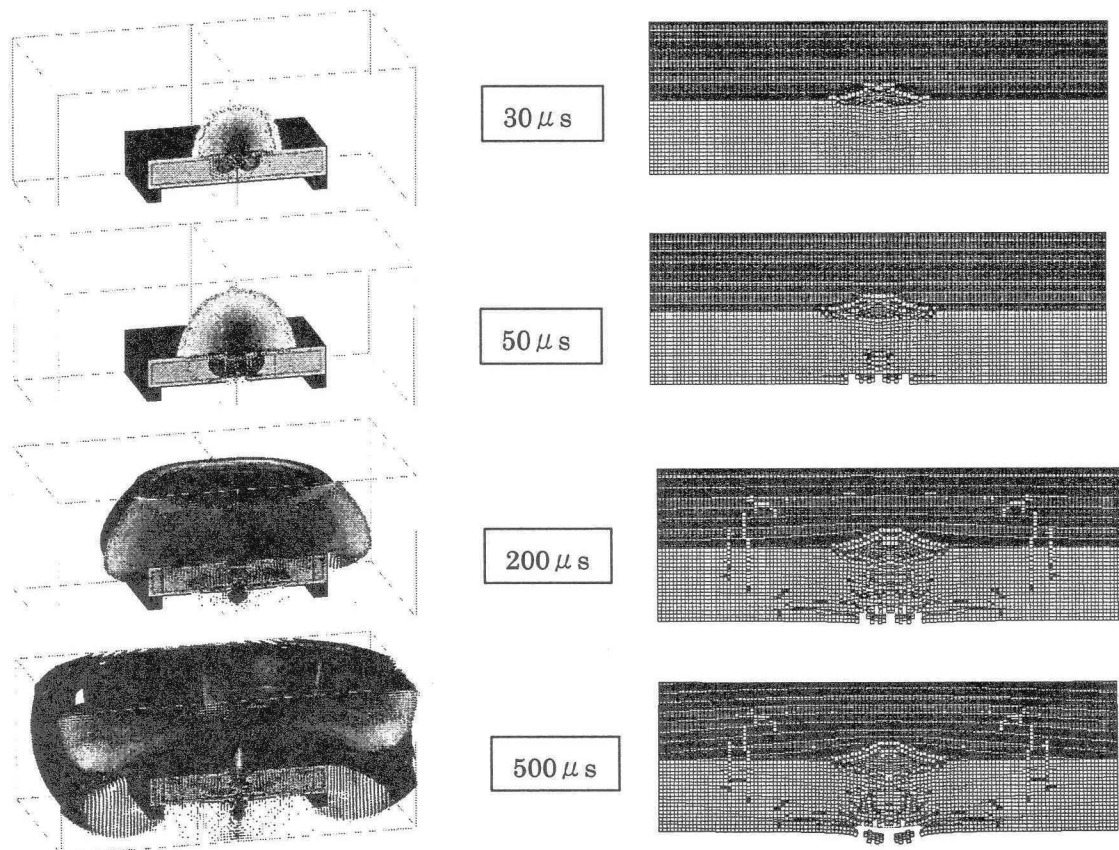
(b) 破壊による要素削除を行った結果



(c) 萩谷らの実験結果 (H-102)

図5. 爆薬に Lagrange 要素を使用した場合のコンクリート破壊状況と実験結果の比較

破壊状況を示した図5を比較するとクレータ部分については Euler 要素を使用した場合のほうがやや大きくなっていることがわかる。表5はこれらの結果を定量的に数値で比較したものである。表中に示す解析で得られたクレータおよびスポール破壊直径は、破壊領域としてコンクリートの最大主ひずみが0.1%以上となる部分を表示させこの領域のサイズを測定したものである。



(a)流速ベクトルと圧力等値面

(b)コンクリート破壊の様子

図6. 構造-流体連成問題として解析した場合のコンクリート破壊の時刻変化の様子

表5. クレータ及びスポール破壊直径の比較

モデル	クレータ直径 mm	スポール直径 mm
実験結果	197	299
Lagrange 要素 1	219.5	318.8
Lagrange 要素 2	189.6	280.4
Euler 要素	209.5	290.5

Lagrange 要素 1 と Lagrange 要素 2 は要素削除を行なわないモデルと削除したモデル

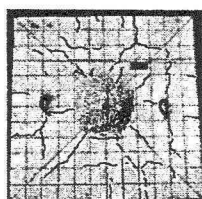
図7に解析と実験で得られたコンクリート版の上下面の破壊パターンを示す。この図から、解析結果は実験結果と概ね一致しているといえる。

6. まとめ

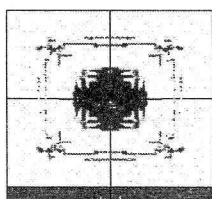
汎用解析コード LS-DYNA による鉄筋コンクリート版の爆薬による衝撃破壊解析を行い、要素の削除によってクレータ及びスポール破壊の解析が可能なことを示した。

参考文献

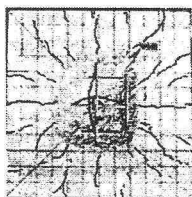
- 1) LS-DYNA User's Manual ver. 970, Livermore Software Technology Corporation, 1970
- 2) 萩谷浩之他、数値シミュレーションを用いた鉄筋コンクリート版の爆発損傷の評価、Science and Technology of Energetic Materials Vol.64, No.5, 2003
- 3) Voicu Popescu 他、Producing High-Quality Visualizations of Large-Scale Simulation, Purdue University, 2003
- 4) 藤掛一典他、ひずみ速度効果を考慮した三軸応力したにおけるコンクリートの直交異方性構成モデルの定式化、土木学会論文集 No.669/V-50, 2001



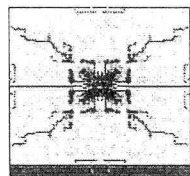
(a)実験上面



(b)解析上面



(c)実験下面



(d)解析下面

図7 コンクリート上下面の破壊パターン