

## 接触爆発を受ける鋼板の局部破壊メカニズムに関する研究

防衛大学校 学生会員 ○長谷川 大 学生会員 金子 鉄兵  
学生会員 上野 裕稔 正会員 別府 万寿博

## 1. 緒言

近年、世界的に爆破テロが多発しており、テロの対象となり得る重要構造物に対しては耐爆設計を行う必要がある<sup>1)</sup>。これまでに、コンクリート板に対する爆発、高速衝突実験や数値解析は行われているが、鋼板の耐爆性に関する研究はあまり行われていない。本研究は、SS400 鋼板の接触爆発実験および数値シミュレーションを行い、局部破壊の発生メカニズムについて検討したものである。

## 2. 実験の概要

図-1 に実験の概要を示す。図に示すように、SS400 鋼板(縦 150mm×横 150mm×板厚 22mm)を支持幅 11cm となるように設置した。実験で用いた爆薬は、密度  $1.4\text{g/cm}^3$  の Composition C-4 (C4 爆薬) であり、質量は 50g(高さ 36mm, 直径 36mm の円柱)とした。実験は 2 回実施し、破壊性状を観察した。

## 3. 数値シミュレーション

## 3.1 解析モデル

衝撃解析コード AUTODYN を用いて、シミュレーション解析を行った。図-2 に解析モデルを示す。解析モデルは鋼板の対称性を考慮して、板供試体を 2 次元軸対称系でモデル化した。鋼板の寸法は  $75\text{mm}\times 22\text{mm}$  とし、実験と同様に端から 20mm の区間を固定した。C4 爆薬の寸法は実験と同じであり、図中の赤色で示す位置に設置した。なお、図-2 に示すように C4 爆薬の起爆点は中央に設定した。また、要素分割は空気を  $100\times 100$  分割、鋼板は  $75\times 22$  分割とした。すなわち、空気、鋼材および C4 爆薬の総分割数は、それぞれ 8,342, 1,650, 8 である。C4 爆薬と空気は要素間の物質移流を評価することにより物質の挙動を記述するオイラー座標系でモデル化し、鋼板のモデル化にはラグランジュ座標系を用いた。また、ラグランジュとオイラー要素の境界には相互作用面を設定し、空気の部分は境界面を爆風圧が通り抜けるように流出条件を設定した。解析定数は、表-1 に示すように状態方程式は線形モデル、降伏条件は Von Mises の降伏条件、破壊基準はスポール破壊基準を使用した。

図-3 に圧力の出力点を示す。図に示すように、C4 爆薬を設置した面を表面、反対面を裏面とし、圧力の出力点は、表面(出力点 1)、鋼材の中央(出力点 2)、裏面(出力点 3)とする。

## 3.2 解析結果および考察

## (1) 破壊性状

図-4 に実験および解析で得られた破壊性状を示す。実験では、表面がへこむように塑性変形し、その中央の深さは  $4.3\text{mm}$  であった。裏面は剥離破壊しており、裏面の剥離の幅は  $47.1\text{mm}$  となった。一方、解析結果では表面の残留変形の深さが実験の約 2 倍( $8\text{mm}$ )となり、裏面に生じた剥離の幅は実験の約 1.2 倍( $56.2\text{mm}$ )であった。裏面の破壊性状は、実験結果に比べ広範囲に広がっているが、定性的には再現するこ



図-1 実験の概要

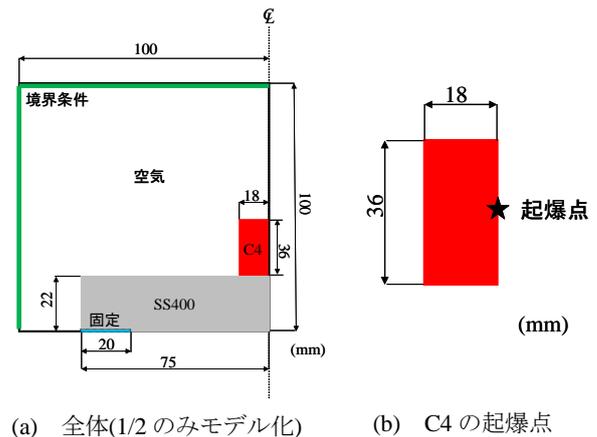


図-2 解析モデル

表-1 鋼板の解析定数

	SS400
ヤング率	$2.06\times 10^5(\text{N/mm}^2)$
ポアソン比	0.3
状態方程式	線形型
降伏条件	Von Misesの降伏条件
破壊基準	スポール破壊
エロージョンひずみ	2.0
体積弾性率	$1.717\times 10^6(\text{N/mm}^2)$
横弾性率	$7.9\times 10^4(\text{N/mm}^2)$
降伏応力	$2.35\times 10^2(\text{N/mm}^2)$
スポール圧力	$-2.0\times 10^6(\text{N/mm}^2)$
密度	$7.9(\text{g/cm}^3)$

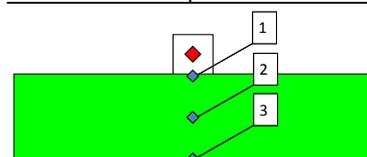
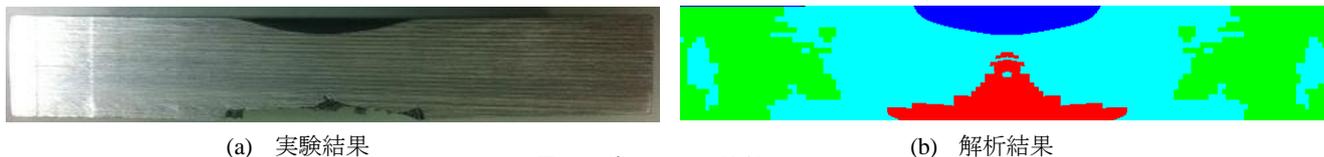


図-3 圧力の出力点

とができた。しかし、解析による破壊は鋼板の中央まで破壊されている点の実験結果と異なる。これはひずみ速度効果を考慮していないためと考えられる。

## (2) 破壊メカニズム

図-5 に破壊性状の時系列図を示す。 $t=0\text{ms}$  から始まり、時間の経過とともに塑性域が増加し、 $t=0.75\times 10^{-2}\text{ms}$  には圧縮の圧力が裏面で反射してスポール破壊が起こり、 $t=1.20\times 10^{-2}$



(a) 実験結果

(b) 解析結果

図-4 破壊性状の比較

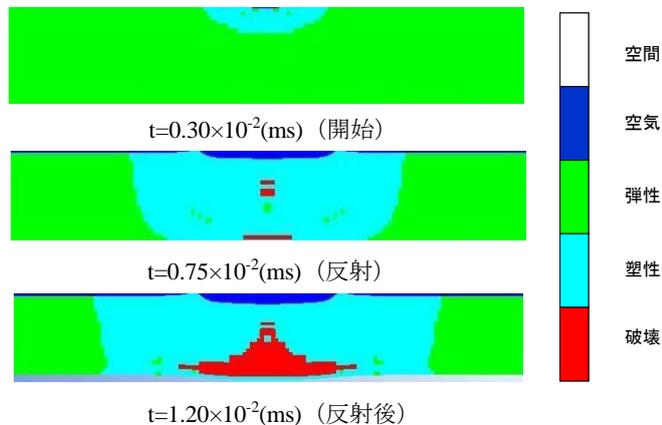


図-5 破壊性状

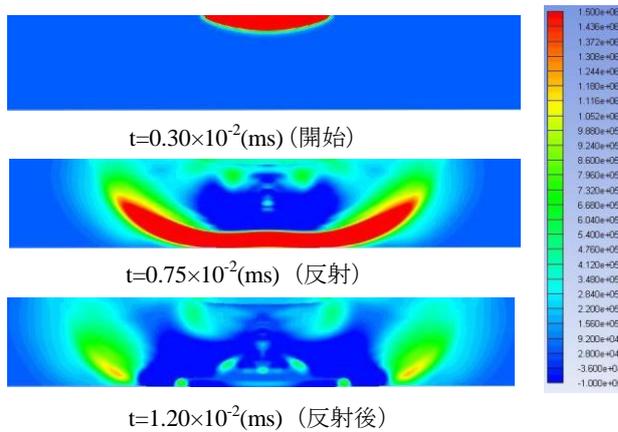


図-6 圧力分布

ms では裏面が薄い膜のように剥離した。

図-6 に内部の圧力分布を示す. 図から, 爆発によって表面から  $1.5 \times 10^3 \text{N/mm}^2$  の圧力が入射され, この圧力が裏面に達すると, 圧力が圧縮から膨張に変化している. 図-7 (a), (b), (c) にそれぞれ出力点 1, 2, 3 の圧力~時間関係を示す. 図では, 圧縮を正, 膨張を負としている. 図-5(a)の出力点 1 は圧縮の圧力のみが発生するが, 図-5(b),(c)の出力点 2,3 では膨張の圧力が生じている. これは, 圧縮圧力が裏面で反射して, 膨張の圧力に変わることによって破壊が始まることを示している.

ピーク圧力は, 出力点 1 では  $t=2.54 \times 10^{-3} \text{ms}$  の時に  $20.4 \text{kN/mm}^2$ , 出力点 2 では  $t=5.03 \times 10^{-3} \text{ms}$  の時に  $12.1 \text{kN/mm}^2$ , 出力点 3 では  $t=6.81 \times 10^{-3} \text{ms}$  のときに  $2.28 \text{kN/mm}^2$  と急激に減衰している. 波の伝播速度は, 出力点 1 から出力点 2 のピークに達するには  $4.42 \text{km/s}$ , 出力点 2 から出力点 3 に達するには  $6.18 \text{km/s}$  となっている. また, 波頭の到達速度は, 出力点 1 から出力点 2 に達するには  $7.19 \text{km/s}$ , 出力点 2 から出力点 3 に達するには  $8.33 \text{km/s}$  となっている. 伝播速度は裏面に進むにつれて速くなっているが, これは鋼材の塑性化が影響したものと考えられる.

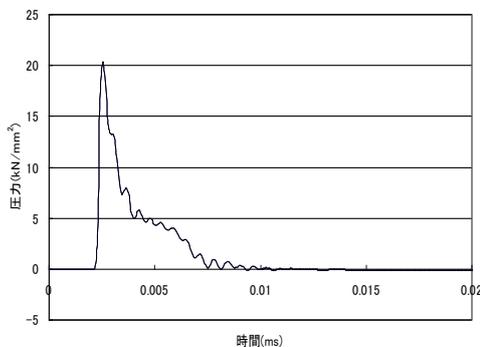
4. 結 言

本研究の成果を以下に示す.

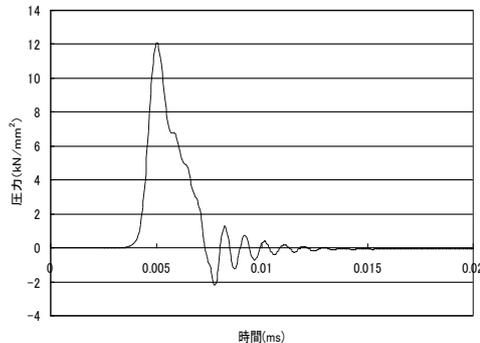
- (1) 解析による破壊性状は, 実験結果に比べて広範囲に広がっているが, ある程度は実験結果を再現できた. しかし, 破壊は鋼板の中央まで破壊されている点の実験結果と異なったため, 今後, ひずみ速度効果等を考慮する必要がある.
- (2) 接触爆発による SS400 鋼板に生じる裏面剥離は, 圧力波の伝播による破壊であることがわかった. 最大圧力は, 応力波が裏面に進むにつれ急激に低減することがわかった.

参考文献

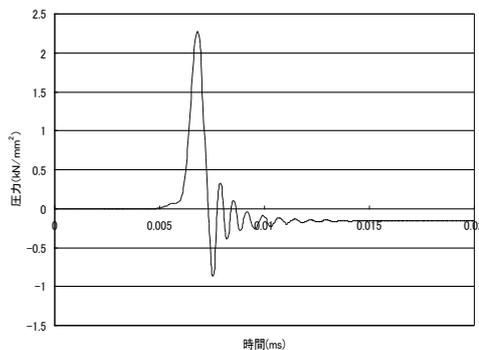
1)石川信隆, 大野友則, 藤掛一典, 別府万寿博: 基礎からの衝撃工学, 森北出版, 2008



(a) 出力点 1



(b) 出力点 2



(c) 出力点 3

図-7 圧力~時間関係