

構造用鋼材の耐爆性に関する実験的研究

防衛大学校 学生会員 ○ペン ダラボポール 正会員 市野 宏嘉 別府 万寿博

1. はじめに

爆破テロや爆発事故などの爆発災害では、構造物の大規模な損壊や死傷者の発生など大きな被害が生じることがある。このため、近年では構造物の耐爆性に関する研究が国内外で行われており、特に鉄筋コンクリート構造を対象とした研究の発展は著しいものがある。一方、鋼材は構造物の主要な材料であるにもかかわらず、爆発時の損傷についての検討例は極めて少ない。本研究では、鋼材に対する接触爆発実験を行い、その損傷性状を調べてその評価を試みるとともに、爆発にスペーサー設置によって鋼材の損傷を低減する方策について検討する。

2. 実験方法

本研究では、図-1 に示すように、防衛大学校火薬類実験施設の爆発ピット内ではり状に設置した鋼材を爆破する実験を行った。試験体の鋼材は JIS G 3101 に規定される一般構造用圧延鋼材 SS400 の平鋼（引張強度 $446 \sim 469 \text{ N/mm}^2$ ）である。爆発ピットの地盤面を水平に整地して厚さ 12mm の鋼板を設置し、その上に試験体の支持具を組み立てた。支持具となる角材と鋼板には 6 箇所のボルト穴が穿孔されており、うち左右 2 箇所ずつで平鋼試験体とともに M12 ボルトを通してナットで締結した。はりのスパンは 400mm、平鋼試験体の幅は $w=50\text{mm}$ である。実験ケースを表-1 に示す。試験体の厚さは $t=9, 12$ および 16mm とし、爆薬量 M を変化させて合計 18 ケースの実験を行った。爆薬の種類は C-4 であり、幅 $1.5 \times t\text{mm}$ 、奥行き $w=50\text{mm}$ の直方体に成型し、はり状の試験体の支点間中央に設置して起爆した。また、爆発による鋼材の損傷の低減法を検討するため、板厚 $t=9\text{mm}$ の実験のうち 3 ケースでは表-1 中の写真に示すように爆薬と試験体の間にスペーサーとして厚さ 2mm のバルサ板（密度約 0.15g/cm^3 ）を敷いて実験を行った。

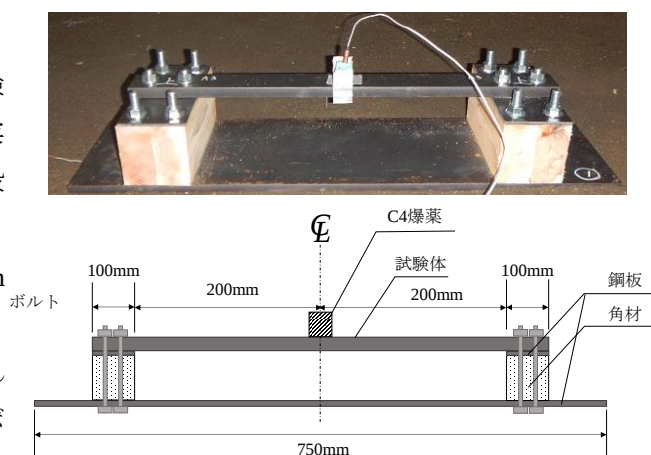


図-1 試験体の概要

表-1 実験ケース

厚さ t (mm)	爆薬量 M (g)
9	8,10,14,18
12	10,12,18,24,30,40,54
16	16,20,24,32
9+スペーサー2mm 	18,24,32

3. 実験結果および考察

爆発後の鋼材の損傷性状は、「変形」、「変形・亀裂／剥離」および「破断」の3種類に区分した。「変形」は、爆発によって鋼材が変形されているが、試験体に亀裂や剥離といった顕著な外傷が確認できない状態である。「変形・亀裂／剥離」とは、試験体の上下面に亀裂や剥離のいずれかまたは両方が認められるものの試験体の分断には至らない状態を示す。「破断」とは、爆発により鋼材が2つに分断されている状態である。爆発後の試験体の代表例を図-2～4に示す。爆薬量や試験体の断面寸法等の条件に応じて損傷性状が変化する。同一の厚さであれば爆薬量が大きくなるほど損傷が顕著となり、同一の爆薬量では板厚が大きいほど損傷が低減される。図-2は $t=12\text{mm}$ 、 $M=10\text{g}$ の試験体を斜め上方から撮影した写真である。この時の損傷性状は「変形」に区分される。爆薬の直下に

キーワード 鋼材, 接触爆発, スポール, スペーサー

連絡先〒239-0811 横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 TEL. 046-841-3810 E-mail : ichino@nda.ac.jp

は爆薬の幅にほぼ等しい範囲で円弧状のくぼみが生じたものの、試験体表面に剥離や亀裂は認められない。図-3は $t=12\text{mm}$, $M=12\text{g}$ の試験体を爆発面の反対側から撮影したものである。本実験の損傷性状は「変形・亀裂／剥離」に区分される。爆薬 2g の増加により試験体の外側が剥がれるような損傷が生じた。

図-4は $t=12\text{mm}$, $M=18\text{g}$ の試験体を爆発面の反対側から撮影したものである。図-4より、さらに爆薬量 6g 増したことにより試験体の外側の部分が剥離されて飛び去り、試験体の内部が露出されていることがわかる。この剥離はほぼ爆薬の幅に等しいか、多少広い範囲で生じる。また、支点間の中央部では爆発面と反対側から亀裂が生じた。損傷性状は「変形・剥離／亀裂」に区分される。ただし、本ケースでは試験体は破断には至っていない。爆発面では爆薬に接触していた部分は円弧状の凹部が生じており、さらに爆薬量を増やし、「破断」に至った代表的なケースとして、 $t=12\text{mm}$, $M=24\text{g}$ の試験体を図-5に示す。爆発面の反対側で生じた剥離と亀裂により、試験体が破断された。図-5(b)に示す破面は凹凸が著しくその一部が薄片状を呈する。この破面の性状は、図-3の試験体の内部、図-4の剥離面とも共通している。以上より、本実験では、爆薬量がある一定以上の水準で、スポール（材料が爆発や衝突などの衝撃的な作用を受けた際に、応力波の反射に起因して作用を受けた面の反対側が剥離破壊する現象）による脆性的な破壊が生じたと考えられる。

スポールを引き起こす応力波は伝播距離に対して非線形的に減衰されるため、材料の厚さの影響を顕著に受けると考えられる。そこで、縦軸を試験体の厚さ $t(\text{mm})$ 、横軸を爆薬量 $M(\text{g})$ として本実験結果をプロットし、図-6の損傷マップを得た。図-6より、剥離や破断の限界となる厚さと爆薬量の関係が得られる。さらにデータを蓄積すれば、これらの限界の定式化が可能と考えられる。なお、図-6において、スペーサーを使用した場合は使用しない場合と同じ損傷性状を与えるために必要な爆薬量が増大する。すなわち、スペーサーによる損傷の低減効果が認められる。例えば、 $t=9\text{mm}$ で「破断」となる爆薬量はスペーサーがない場合 18g 以下であるが、スペーサーを使用した場合は 24~32g となり、破断に要する爆薬量が 6~14g 程度増加した。これは、バルサ材のスペーサーが、試験体に入射する応力波を緩和したことによると考えられる。

4. 結言

本研究では、鋼材の損傷性状を調べるために、平鋼試験体に対し爆発実験を行った。その結果、爆発による損傷は主にスポールに起因し、板厚と爆薬量で損傷性状を評価できる可能性が示された。また、厚さ 2mm のバルサ板スペーサーを設置することによって、爆発による試験体の損傷を低減でき、板厚 9mm の試験体において破断に要する爆薬量が 6~14g 程度増加した。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP19K04962 の助成を受けたものです。ここに記して謝意を表します。



図-2 $t=12\text{mm}$, $M=10\text{g}$ (変形)



図-3 $t=12\text{mm}$, $M=12\text{g}$
(変形・亀裂／剥離)



図-4 $t=12\text{mm}$, $M=18\text{g}$
(変形・亀裂／剥離)



(a) 爆発後の全景



(b) 破面の状態

図-5 $t=12\text{mm}$, $M=24\text{g}$ (破断)

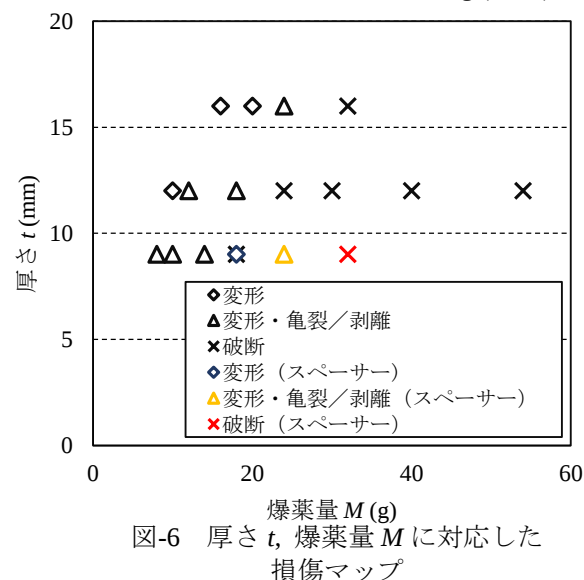


図-6 厚さ t 、爆薬量 M に対応した損傷マップ