

剛・柔飛翔体の衝突を受ける鋼板の貫通挙動に関する基礎的考察

防衛大学校 学生会員 ○山崎 大輔 片岡 新之介 濱田 匠李
正会員 別府 万寿博 市野 宏嘉

1. 緒言

近年、竜巻によって巻き上げられた飛来物が構造物に衝突することで被害が生じており、防護設計法の確立が急務である。構造物の防護方法の一つとして鋼板を用いる場合があるため、剛飛来物の衝突を受ける鋼板の貫通評価式が提案されている¹⁾。一方で、飛来物の多くは飛翔体が変形する柔飛来物であることが考えられるが、柔飛来物の衝突を受ける鋼板の貫通挙動は未解明の点が多い。本研究は、飛翔体の衝突を受ける鋼板の貫通挙動について調べるため、衝突実験および数値シミュレーションによる検討を行ったものである。

2. 剛飛翔体による衝突実験

飛来物の衝突を受ける鋼板の貫通性状を把握するため、剛飛翔体を用いた衝突実験を行った。図-1 に示す直径 50mm の平坦状の先端部を有する飛翔体を作製し、図-2 に示す高圧空気式飛翔体発射装置により実験を行った。飛翔体の質量は 6.0kg であり、先端部の材質は S45C である。鋼板の材質は SS400 を使用し、寸法は 1150mm × 1150mm、板厚は 6mm とした。鋼板は、図-3 に示すように四辺をボルトにより反力壁に固定して設置した。飛翔体の衝突速度は 40 ~ 60m/s に変化させて実験を行った。図-4 に、鋼板裏面の衝突部周辺における破壊性状を示す。衝突速度 57.1m/s のケースでは飛翔体は貫通せず、衝突部に飛翔体の先端形状と同様の円周状の変形や突起が生じた。衝突速度 58.5m/s のケースでは飛翔体が貫通し、飛翔体の先端部と同様の直径を有する貫通孔が生じた。

3. 衝突実験の再現解析

解析には、衝撃解析コード AUTODYN Ver.17 を用いた。解析モデルは図-5 に示す 2 次元軸対称モデルとした。飛翔体は 1 辺が 1mm の四角形要素を用いて要素分割し、鋼板は厚さ方向を 1mm で分割し、長さ方向を 100 分割した。また、衝突部周辺の挙動を詳しく観察するため、鋼板中心部 30mm については 0.5mm × 0.5mm の要素とし、鋼板中心から 30mm 以降は徐々に粗い要素を用いた。初期条件として、衝突速度を飛翔体の全節点に与えた。境界条件については、鋼板の最上部の節点の x, y 方向変位を固定した。鋼板および飛翔体の構成則にはひずみ速度依存性を考慮するため、Johnson-Cook の降伏関数および破壊基準を用いており、表-1 に示す解析定数を用いて解析を行った。図-6 に、数値解析で得られた鋼板の破壊モードを示

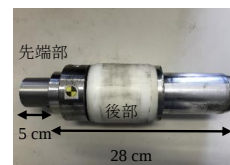


図-1 平坦状飛翔体

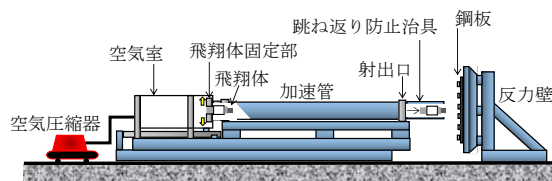


図-2 高圧空気式飛翔体発射装置

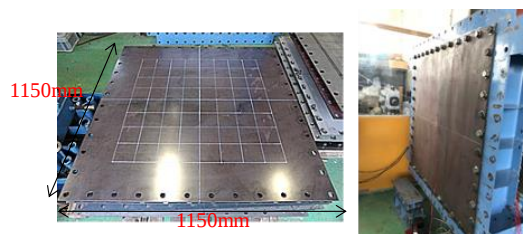


図-3 鋼板試験体および試験体の設置状況



(a) 衝突速度 57.1m/s



(b) 衝突速度 58.5m/s

図-4 鋼板試験体の破壊性状

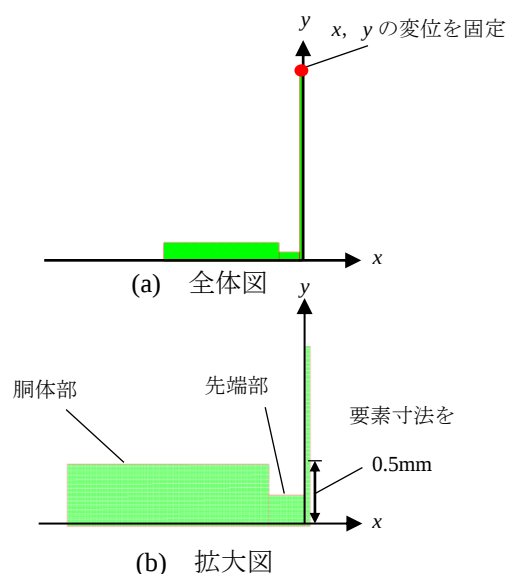


図-5 解析モデル

キーワード 飛来物衝突, 飛翔体, 鋼板, 貫通挙動

連絡先 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 TEL : 046-841-3810 E-mail : beppu@nda.ac.jp

す。図から、飛翔体先端部の外縁部における鋼板の要素が破壊と判定されて飛翔体が貫通しており、実験結果と一致した。

4. 柔飛翔体による衝突シミュレーション

飛翔体の変形が鋼板の破壊性状に与える影響について考察するため、柔飛翔体の衝突を受ける鋼板の衝撃応答について数値シミュレーションを行った。図-7 に、柔飛翔体の解析モデルを示す。飛翔体の一部を変形させるため、先端部と胴体部の間に長さ 150mm、直径 76mm および肉厚 1.2mm の鋼管をはり要素によりモデル化した。鋼管部のはり要素は、1mm 間隔で要素分割し、先端部と胴体部の節点と結合させた。解析ケースについては、剛飛翔体の解析において貫通が生じたケースと比較をするため、衝突速度 58.5m/s を飛翔体の全節点に初期条件として与えた。図-8 に、柔飛翔体の衝突の解析結果を示す。図から、鋼板の衝突部には変形が生じているが、飛翔体は貫通していないことがわかる。また、飛翔体の鋼管部については、先端部および胴体部近傍に座屈変形が生じた。図-9 に、解析で得られた鋼管部の座屈荷重～変形量関係を示す。座屈荷重については鋼管と胴体部の力の釣合いに基づいて、胴体部の加速度に胴体部の質量を乗じて算定した。座屈の変形量は、胴体部の変位量から先端部の変位量を差し引いて算出した。図から、衝突直後に鋼管の座屈荷重は最大値 140kN を示し、その後は鋼管の座屈変形が生じることに伴って 0kN～140kN の範囲で振動している。鋼管の最大変形量は 56.3mm であり、鋼管の長さは最終的には 93.7mm となった。図-9 の座屈荷重～変形量関係を最大変形量まで積分して鋼管の座屈変形による吸収エネルギーを求めると、2500J であった。飛翔体の運動エネルギーを質量および衝突速度から求めると 10267J であり、飛翔体の運動エネルギーの約 24%が鋼管の座屈変形により吸収されたことがわかる。以上から、柔飛翔体の衝突のケースにおいては、鋼管に座屈が生じることによって飛翔体の運動エネルギーが吸収されるため、飛翔体の貫通が生じないことがわかった。

5. 結言

本研究は、質量 6kg の剛および柔飛翔体の衝突を受ける鋼板の貫通挙動について、衝突実験結果および数値解析結果における考察を行ったものである。剛飛翔体の衝突実験から、直径 50mm で平坦状の飛翔体が衝突速度 58.5m/s で衝突すると飛翔体が貫通することがわかった。柔飛翔体の衝突シミュレーションの結果から、同じ衝突条件に対して飛翔体の鋼管部に座屈が生じることにより飛翔体の運動エネルギーが吸収され、飛翔体の貫通が生じないことがわかった。

参考文献

- 1) 防衛施設学会：衝突作用を受ける構造物の局部破壊に関する評価ガイドライン—評価手法と対策技術—，2018。

表-1 解析定数

解析定数	記号	単位	鋼板(SS400)	飛翔体(S45C)
ヤング係数	E	kN/mm ²	205	
密度	ρ	g/cm ³	7.85	10.18
ポアソン比	ν	-	0.3	
Johnson-Cook 降伏基準	A	N/mm ²	323	574
	B	N/mm ²	452	798
	N	-	1.06	0.94
	C	-	0.15	0.15
Johnson-Cook 破壊基準	D ₁	-	0.05	
	D ₂	-	0.8	
	D ₃	-	-0.44	
	D ₄	-	-0.046	

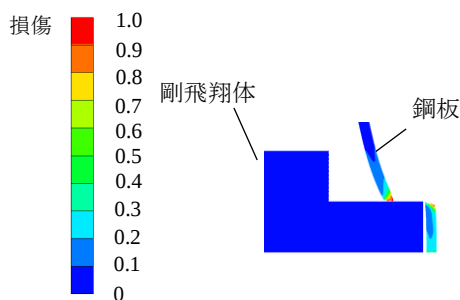


図6 剛飛翔体衝突の解析結果（時刻 2.5ms）

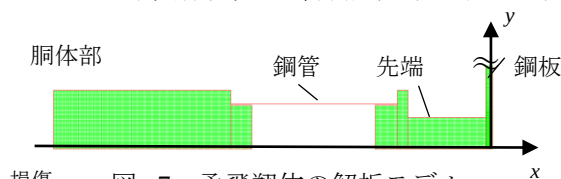


図-7 柔飛翔体の解析モデル

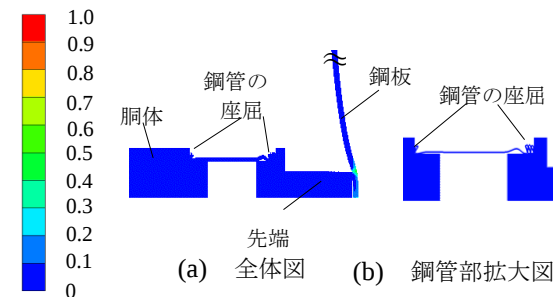


図-8 柔飛翔体衝突の解析結果（時刻 4.0ms）

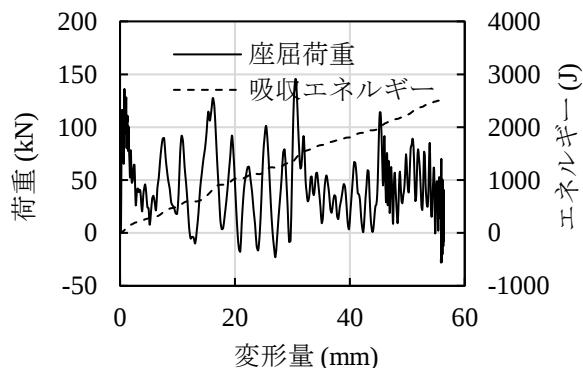


図-9 座屈荷重および吸収エネルギー～変形量