

鋼製飛来物の衝突を受ける鋼板の貫通メカニズムに関する基礎的研究

防衛大学校 学生会員 ○濱田 匠李 正会員 別府 万寿博

1. 緒言

飛来物に対する鋼板の防護設計では、鋼板の貫通限界版厚を求めるため、Ballistic Research Laboratories (BRL)式が用いられている。BRL 式では、飛来物の直径や衝突速度が入力パラメータであるが、直径の決定法や衝突速度の適用範囲が不明であるなどの問題点が指摘されている。著者らが過去に行った SS400 鋼板に対する直径 22mm の鋼製飛来物を用いた衝突実験では、BRL 式は実験結果に対して保守的な評価であった¹⁾。本研究は、直径がより大きい 50mm の飛来物を用いて、鋼板の板厚および飛翔体の衝突速度をパラメータとした実験を行い、BRL 式の適用性および貫通メカニズムについて考察を行ったものである。

2. 衝突実験の概要

衝突実験には、図-1 に示す高圧空気式飛翔体発射装置を用いた。この装置は、空気圧を調節することにより設定した衝突速度で飛翔体を発射することが可能である。飛翔体は図-2 に示すように飛翔体の先端に平坦の丸鋼(直径 50 mm)を取付けて衝突させた。飛翔体の質量は 6kg である。鋼板の設置については、図-3 に示すように鋼製の裏面支持具にボルトで 4 辺を固定した。本実験では BRL 式の適用性を確認するため、板厚 6mm および 9mm の SS400 鋼板に対して、衝突速度を約 50~70m/s に設定して実験を行った。実験ケースを表-1 に示す。なお、衝突前後の飛翔体を側方から高速ビデオカメラ(100000 フレーム/秒)を用いて撮影し、画像解析により変位時刻歴を求め、微分することで速度を求めた。また、ロードセルを鋼板裏面支持具の四隅に設置し、支点反力を計測した。

3. 実験結果および考察

図-4 に、板厚 6mm で貫通したケース(No.4)、板厚 9mm で非貫通(No.7)および貫通(No.8)のケースにおける鋼板の貫通性状を示す。図-4(a)から、板厚 6mm、衝突速度 56.82m/s の場合は、鋼板全体の変形量は小さく、飛翔体衝突部の外縁周辺が破断するような局部的な貫通性状を示した。図-4(b)に示す板厚 9mm、衝突速度 60.78m/s の場合は、貫通が生じることなく、飛翔体の衝突部外縁に変形が集中し、押し込まれるような変形が生じた。また、図-4(c)に示す板厚 9mm、衝突速度 67.13m/s の場合は、板厚 6mm の貫通したケースと同様に、鋼板全体の変形量は小さく、飛翔体衝突部の外縁周辺が破断するような局所

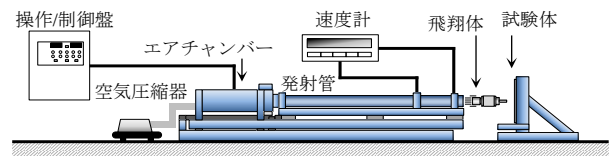


図-1 高圧空気式飛翔体発射装置

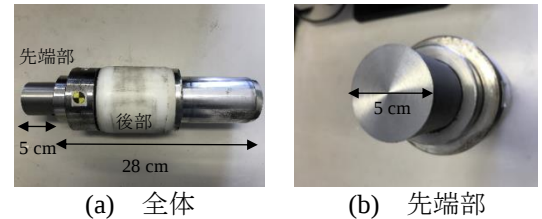


図-2 飛翔体

表-1 実験ケース

No.	飛翔体 速度(m/s)	衝突体 板厚(mm)
1	49.08	6
2	51.57	
3	52.84	
4	56.82	
5	56.66	9
6	59.50	
7	60.78	
8	67.13	

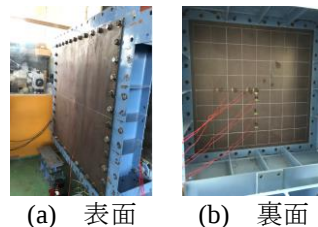
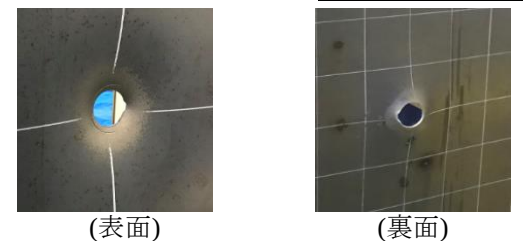


図-3 試験体設置状況



(a) No.4(板厚 6mm, 速度 56.82m/s : 貫通)



(b) No.7(板厚 9mm, 速度 60.78m/s : 非貫通)



(c) No.8(板厚 9mm, 速度 67.13m/s : 貫通)

図-4 鋼板の貫通性状

キーワード 竜巻飛来物, 鋼板, BRL 式, 衝突

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

的な貫通性状を示した。

表-2 に、次式に示す BRL 式による評価結果および実験結果を示す。

$$T^{3/2} = 0.5MV^2 / (17400K^2 D^{3/2}) \quad (1)$$

ここに、 T ：貫通限界厚さ (in)， M ：飛来物の質量 ($\text{lb}\cdot\text{s}^2/\text{ft}$)， V ：飛来物の衝突速度 (ft/s)， K ：鋼板の材質に関する係数 (≈ 1)， D ：飛来物の直径 (in)である。板厚 6mm の実験では、No.2 のケースにおいて、BRL 式による評価は貫通であるのに対し、実験結果では非貫通となり、保守的な結果となった。一方、板厚 9mm の実験では、No.8 のケースにおいて、BRL 式による評価が非貫通であるのに対し、実験では貫通となり、危険側の評価を与える結果となった。

図-5 に、画像解析により算定した飛翔体の速度～時間関係およびロードセルにより計測した支点反力～時間関係を示す。実験ケースは、板厚 6mm で貫通したケース(No.4)，板厚 9mm で非貫通(No.7)および貫通(No.8)のケースの結果を示している。図-5(a)に示す板厚 6mm で貫通したケースでは、衝突後時刻 2ms まで減速した後約 25m/s の一定値を示し、その後、2 度目の減速がみられた。これは、飛翔体先端部が貫通した後、飛翔体後部が鋼板に衝突したことにより、生じたものと考えられる。支点反力～時間関係をみると、飛翔体の 1 度目の減速後、飛翔体速度が約 25m/s の一定値に達した後に、支点反力が発生しており、鋼板の貫通破壊が局部的であることがわかる。図-5(b)に示す板厚 9mm で貫通しないケースでは、約 2ms で速度が急激に減少し、0 m/s に達した後、飛翔体が跳ね返り、速度は負値を示している。支点反力～時間関係をみると、飛翔体の衝突後、約 4.5ms で最大値約 900kN を示した。図-5(c)の板厚 9mm で貫通したケースをみると、貫通とともに約 3ms まで速度が急激に減少し、飛翔体の衝突後、飛翔体速度が 0m/s に達した後に、支点反力が発生しており、鋼板の貫通破壊が局部的であることを示している。

4. 結言

本研究は、質量 6kg、直径 50mm および先端形状が平坦の飛翔体を用い、板厚 6mm および 9mm の SS400 鋼板に対する衝突実験を行ったものである。板厚 6mm の場合は、BRL 式による評価が実験結果に対し保守的な結果となった。一方、板厚 9mm の場合は、BRL 式による貫通評価が危険側の評価を与えるケースがみられた。また、画像解析により求めた飛翔体速度～時間関係および支点反力～時間関係の結果から、鋼板の貫通破壊が局部的であることがわかった。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 15K06203、25289139 の助成を受けたものです。ここに示して謝意を表します。

参考文献

- 1) 別府万寿博，小笠原義浩，土田恭平，和内博樹，松浦淳，間瀬辰也，荻原実：鋼製飛来物に対する鋼板の貫通評価に関する研究 (その 2) 飛来物として丸鋼を用いた衝突実験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東)，2015.9

表-2 実験結果および BRL 式による評価結果

No.	飛翔体				衝突体 板厚 T (mm)	BRL 式による 貫通限界速度 (m/s)	BRL 式 評価	実験 結果
	先端 形状	直径 D (mm)	質量 M (kg)	速度 V (m/s)				
1	平坦	50	6	49.08	6	49.94	×	×
2				51.57			○	×
3				52.84			○	○
4				56.82			○	○
5				56.66	9	67.69	×	×
6				59.50			×	×
7				60.78			×	×
8				63.47			×	○

※ ○：貫通，×：非貫通

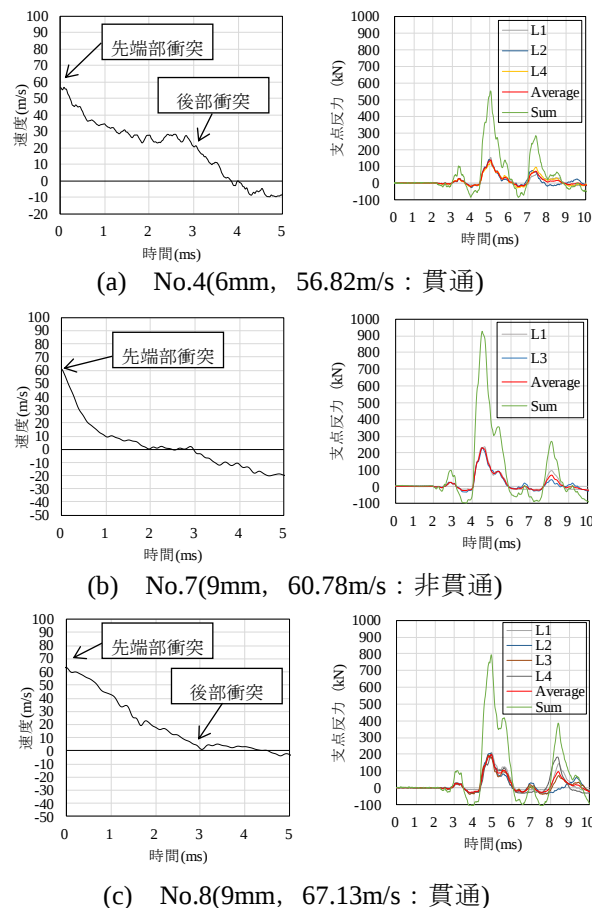


図-5 飛翔体の速度および支点反力～時間