

### 鋼棒の衝突を受ける鋼板の耐貫通性能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 正会員 市野 宏嘉  
東電設計株式会社 正会員 間瀬 辰也 正会員 中田 達也

#### 1. 緒言

近年、竜巻によって巻き上げられた物体が原子力関連施設などの重要施設に衝突することで生じる被害が懸念されている<sup>1)</sup>。竜巻飛来物の防護設計では、鋼板の貫通版厚を求める評価式である Ballistic Research Laboratories Formula(BRL)式が用いられているが、実験結果に対して保守的な評価を与えることが報告されている<sup>2)</sup>。また、複層化した鋼板や材質の相違の影響は明らかになっていない。本研究は、板厚の異なる単層および複層化した鋼板に対する衝突実験を行い、BRL 式の適用性および鋼板の耐貫通性能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り、本実験においては全てのケースで衝突速度を 57m/s に固定した。飛翔体は、図-2 に示す竜巻飛来物を模擬した丸鋼(φ22)を先端に取付けて衝突させた。飛翔体の質量は 4.3kg である。BRL 式の適用性を確認するための基本ケースとして SS400 鋼板を用い、厚さの異なる単層板(9mm および 12mm)を作製した。また、複層化する効果を確認するため、板厚の異なる 4 種類の複層板と中空層を設けた複層板を 1 ケース作製した。材質の影響を確認するため、SS400 の単層板と同じ板厚を有するステンレス鋼板も作製した。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。なお、衝突前後の飛翔体を側方から高速度ビデオカメラ(30000 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および加速度を求めた。衝突荷重については、加速度に飛翔体の質量を乗じて求めた。

#### 3. 実験結果および考察

図-4 および表-1 に、鋼板の貫通性状、実験結果および次式に示す BRL 式による貫通限界板厚の評価結果を示す。

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

ここに、 $T$ : 貫通限界厚さ (in),  $M$ : 飛来物の質量 (lb・s<sup>2</sup>/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。

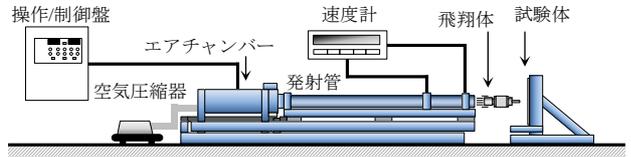


図-1 高圧空気式飛翔体発射装置

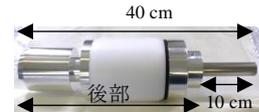


図-2 鋼製飛翔体

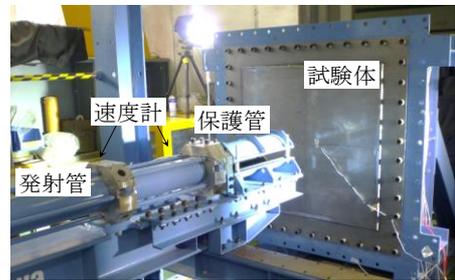


図-3 試験体設置状況



(a) No.2(9mm : 貫通)



(b) No.3(12mm : 非貫通)



(c) No.4(4.5mm+  
4.5mm : 貫通)



(d) No.7(6.0mm+40mm  
中空+6.0mm : 貫通)



(e) No.8(9.0mm+  
4.5mm : 貫通)



(f) No.9(9.0mm  
ステンレス : 非貫通)

図-4 鋼板の貫通性状

キーワード 竜巻飛来物, 鋼板, BRL 式, 衝突実験

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 TEL046-841-3810

単層板の板厚 9mm のケース(No.1, 2) では、実験結果は貫通が生じ、BRL 式の評価結果と一致した。板厚 12mm のケース(No.3)では、BRL 式による評価は貫通であるが、実験結果は非貫通となり既報と同様に BRL 式の保守性が認められた。板厚 9mm, 10.5mm および 12mm の複層板のケース(No.4, 5, 6, 7) では、BRL 式の評価結果は貫通であり、実験結果も同様に貫通が生じた。単層板の板厚 12mm は非貫通であったのに対し、同様の板厚を有する複層板においては貫通が生じたことから、複層板の耐貫通性能は単層板に比べて低いことがわかる。板厚 9mm および 12mm のステンレス鋼板のケース(No.9, 10)をみると、SS400 鋼板では同じ板厚で貫通が生じたが、ステンレス鋼板においてはいずれも非貫通であり、SS 材に比べてステンレス材は耐貫通性能が高いことがわかる。

図-5 に、画像解析により算定した飛翔体の変位、速度および衝突荷重～時間関係を示す。実験ケースは、単層板で非貫通のケース(No.3)および同じ板厚を有する複層板のケース(No.7)を示している。図-5(a)に示す単層板の変位をみると、時刻 1ms まで急増した後に緩やかな勾配に転じ、時刻 2ms で最大値約 36mm に到達している。速度についても、時刻 1ms まで急減した後に時刻 2ms でゼロとなった。図-5(b)に示す衝突荷重については、最大値約 300kN を示した後、時刻約 1.5ms でほぼゼロを示している。複層板のケースをみると、変位は時刻 3ms で最大値 130mm を示し、速度は時刻約 0.5ms まで減少した後に 40m/s となった。これは、先端部の丸鋼が 1 枚目の鋼板を貫通した後、複層板の中空層を通過するためであると考えられる。衝突荷重をみると、衝突直後に最大値約 200kN を示した後、飛翔体の後部が衝突したことにより時刻 3ms で最大 300kN の荷重が生じている。以上から、複層板のケースにおいては 1 枚目の鋼板に衝突することで飛翔体の速度が低減し、その後の残存速度によって 2 枚目の鋼板に貫通が生じたものと考えられる。

4. 結言

本研究で行った衝突実験結果から、複層板は同じ板厚を有する単層板に比べて、耐貫通性能が低いことがわかった。また、ステンレス鋼板は SS400 鋼板に比べて耐貫通性能が高いことがわかった。

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。

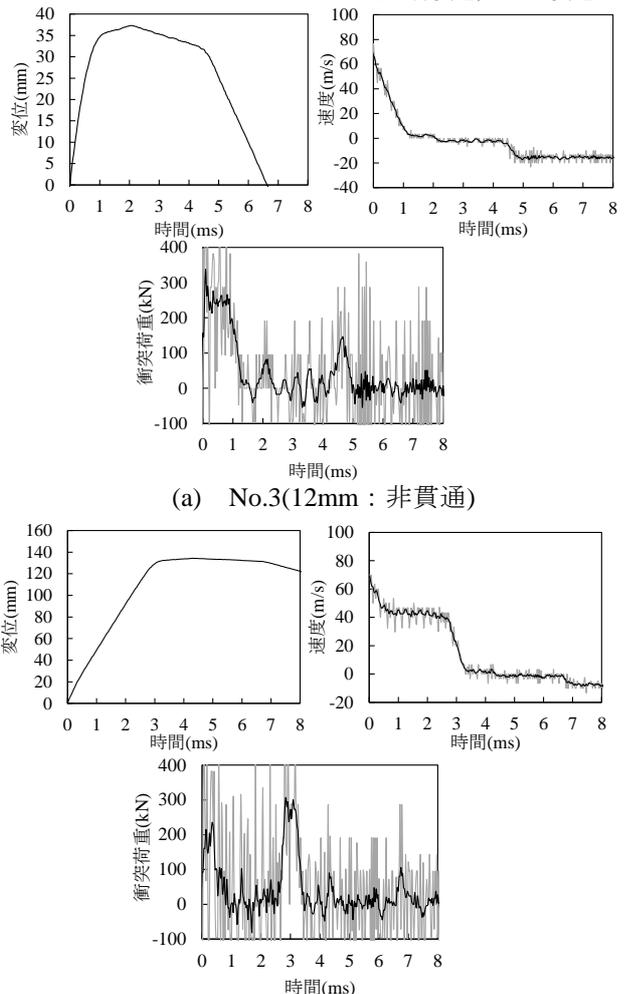
参考文献

- (1) 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド, 原子力規制委員会, 日原規技発 13061911 号, 2013. 6
- (2) 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-1 実験結果および BRL 式による評価結果

No.	鋼板種類	板厚(合計)(mm)	BRL式による貫通限界板厚(mm)	BRL式の貫通判定	実験結果
1	SS400 単層板	9.0	13.1	×	×
2		9.0		×	×
3	12.0	×		○	
4	SS400 複層板	4.5+4.5(9.0)		×	×
5		6.0+4.5(10.5)		×	×
6		6.0+6.0(12.0)		×	×
7		6.0+40中空+6.0(12.0)		×	×
8	ステンレス板	9.0		○	×
9		12.0		×	○
10					×

※ ○ : 非貫通, × : 貫通



(a) No.3(12mm : 非貫通)

(b) No.7(6.0mm+40mm 中空+6.0mm : 貫通)

— 元波形 — 移動平均処理波形

図-5 飛翔体の変位、速度および衝突荷重～時間関係