

半球状飛来物の衝突を受ける鋼板の貫通破壊に関する実験的研究

An experimental study on the perforation failure of steel plates subjected to a semi-spherical projectile impact

濱田匠李*, 別府万寿博**, 市野宏嘉***
Shori Hamada, Masuhiro Beppu, Hiroyoshi Ichino

*防衛大学校, 理工学研究科後期課程 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

**博(工), 防衛大学校教授, システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

***博(工), 防衛大学校准教授, システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

Key Words: steel plates, perforation failure, projectile impact, BRL formula

キーワード: 鋼板, 貫通破壊, 飛来物衝突, BRL 式

1. 緒言

近年, 国内における竜巻や火山噴火が増加傾向にあり, 竜巻によって巻き上げられた物体(竜巻飛来物)や火山噴火時に飛散する噴石(火山噴石)が原子力関連施設などの重要施設に衝突して被害が生じることが懸念されている。そのため, 竜巻飛来物を対象とした衝突に対する防護構造物の設計および補強法について検討が行われており, 2013年には原子力規制委員会から原子力関連施設の安全性評価に関する指針類が示されている^{1,2)}。なお, この中では竜巻飛来物の最大速度は60m/sと想定されている。一方, 火山噴石に対しても原子力規制委員会および内閣府から指針類^{3), 4)}が示されており, 直径10cm~50cmの火山噴石が衝突速度100m/s~130m/sで衝突するものと設定している。

原子力発電所等の重要構造物の防護設計や補強法の検討において鋼板を用いる場合, 貫通評価には貫通限界板厚を算定するBallistic Research Laboratory (BRL) 式⁵⁾が用いられている。ただし, BRL式は根拠となる文献が非公開であるため, 入力パラメータの決定法や適用範囲が不明であるなどの問題点が指摘されている。

原子力発電所の防護設計を確立するための研究として, 国内でもいくつかの実験が行われている。例えば, 北田ら⁶⁾は, 質量1300kgの実規模鋼管を板厚3mm~11mmの鋼板へ自由落下させる実験を行っている。ただし, この実規模実験では, 落下高さの制約を受けて重錘落下実験における衝突速度が20m/s以下に制限されている。また, 実験結果は貫通および非貫通の判定のみにとどまっているため, 今後, 飛来物衝突に対する鋼板の破壊挙動や破壊メカニズムについても検討する必要がある。

鋼板の貫通破壊には, 衝突する飛来物の先端形状が強

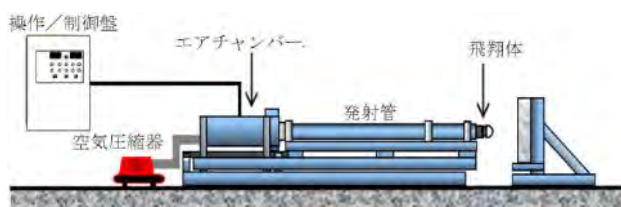


図-1 高压空気式飛翔体発射装置

く影響していると考えられる⁷⁾。しかし, 北田ら⁶⁾や土田らの研究⁸⁻¹¹⁾のように, 鋼管や先端部が平坦状の飛翔体を用いた研究が多く, 飛翔体の形状が鋼板の破壊メカニズムに及ぼす影響が未解明であるとともに貫通の評価法についても検討が十分になされていない現状にある。

本研究では, 板厚6mmおよび9mmのSS400鋼板に対し, 先端部を半球状(直径50mm)とした質量6kgの飛翔体を速度約50m/s~100m/sで衝突させる実験を行い, 鋼板の破壊挙動について検討を行ったものである。また, 実験結果と既往の評価式であるBRL式および大手らの式を比較することで, これらの式との整合性を確認した。なお, 参考のため, 先端部が平坦状の飛翔体を用いた既往の実験結果⁸⁻¹¹⁾との比較も行った。

2. 鋼板の衝撃挙動に関する実験的検討

2.1 衝突実験の概要

(1) 実験装置

衝突実験は, 図-1に示す高压空気式飛翔体発射装置を用いて行った。本装置は, 空気圧縮器, エアチャンバーおよび発射管で構成されており, 空気圧を利用して飛翔体を発射するものである。本実験で用いた質量6kgの飛翔体の場合は, 空気圧を調整することで約40~120m/sの速度で発射することができる。

表-1 試験体の力学特性

力学特性	公称応力		真応力		伸び (%)	
	降伏応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	降伏応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)		
板厚	6mm	323	452	324	592	31
	9mm	292	428	292	561	31

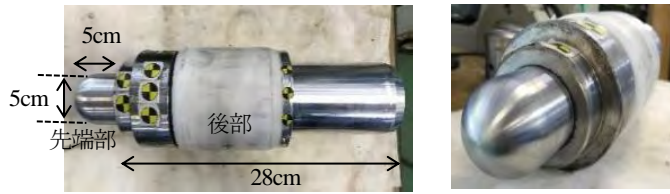


写真-1 半球状飛翔体の外観 (●:追跡点)

表-2 実験ケース

No.	鋼板板厚	飛翔体 (質量,直径)	衝突速度(m/s)
1	6mm	6kg, 50mm	50.4
2			56.7
3			66.8
4			70.9
5	9mm		77.2
6			83.0
7			89.2
8			96.0

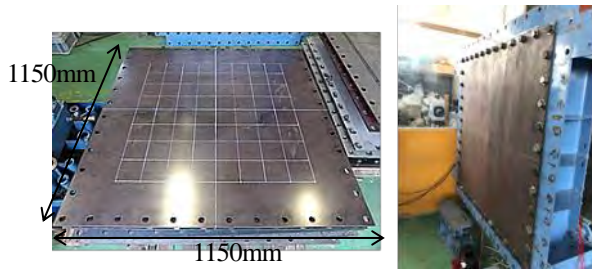


写真-2 試験体外観および設置状況

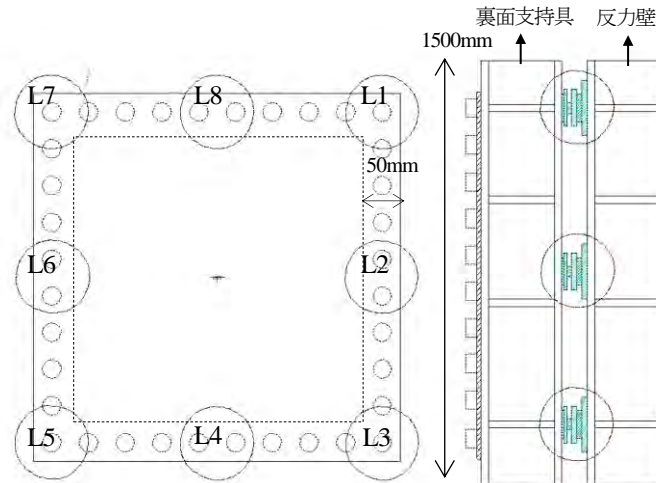


図-2 ロードセル設置位置の模式図

(2) 飛翔体および試験体

実験には、写真-1 に示す先端部が半球状の飛翔体を用いた。長さ 28cm の後部の先端に、長さ 5cm の半球状の先端部を取り付けた。先端部の直径は 5cm、質量は 6kg、材質は S45C である。写真-2 に、試験体の外観および設置状況を示す。寸法は 1150mm×1150mm であり、板厚は 6mm および 9mm とした。試験体の材質は SS400 であり、裏面支持具にボルトを用いて四辺を固定した。SS400 試験体の力学特性を表-1 に示す。

(3) 計測項目

本実験では 2 台の高速度ビデオカメラを用いて、鋼板の変形状態および飛翔体の挙動を撮影した。すなわち、一台の高速度ビデオカメラを鋼板の裏面側に設置し、鋼板の変形状態を観察した。なお、実験後に目視で貫通破壊の有無についても調べた。この高速度ビデオカメラの撮影速度は 50000fps である。また、もう一台の高速度ビ

デオカメラを用いて飛翔体の衝突前後の挙動を側方から撮影した。この際、飛翔体に追跡点を貼付し、この追跡点の移動について画像解析を行い、飛翔体の変位～時間関係を求めた。さらに、変位～時間関係を時間に関して微分することで速度～時間関係を算定した。この高速度ビデオカメラの撮影速度は 100000fps である。ロードセルを裏面支持具の裏側に 8 箇所設置し、支点反力を計測した。ロードセルの最大容量は約 220kN である。ロードセルの設置位置を図-2 に示す。ロードセルは裏面支持具と反力壁の間に設置した。

(4) 実験ケース

実験ケースを表-2 に示す。板厚 6mm および 9mm の SS400 鋼板に対し、質量 6kg で先端部が半球状（直径 50mm）の飛翔体を衝突速度約 50m/s～100m/s で衝突させた。試験体数は板厚 6mm および 9mm とともに 4 体ずつであり、合計 8 回の実験を行った。

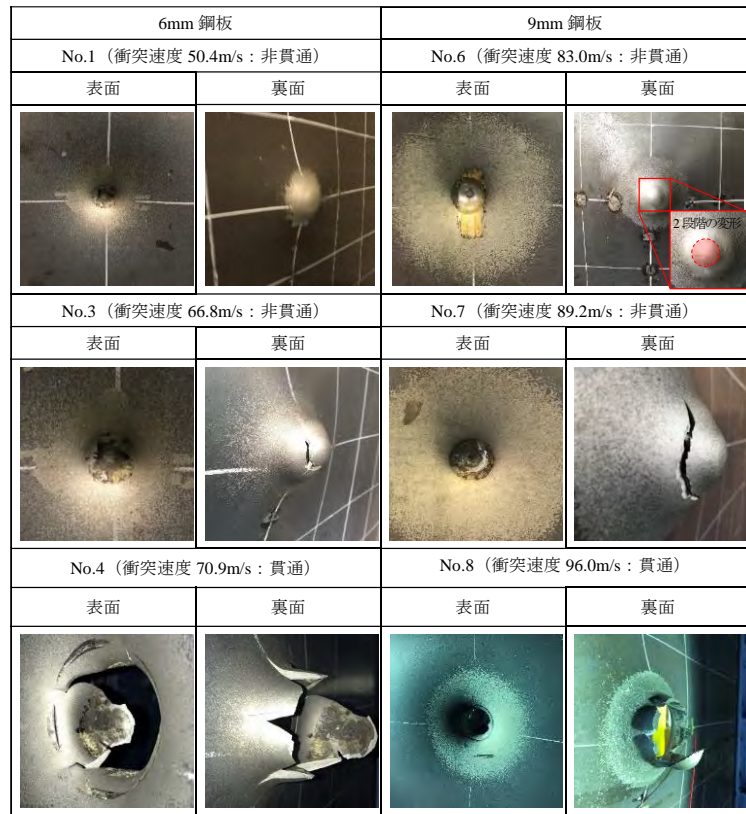


写真-3 鋼板の変形および貫通破壊性状

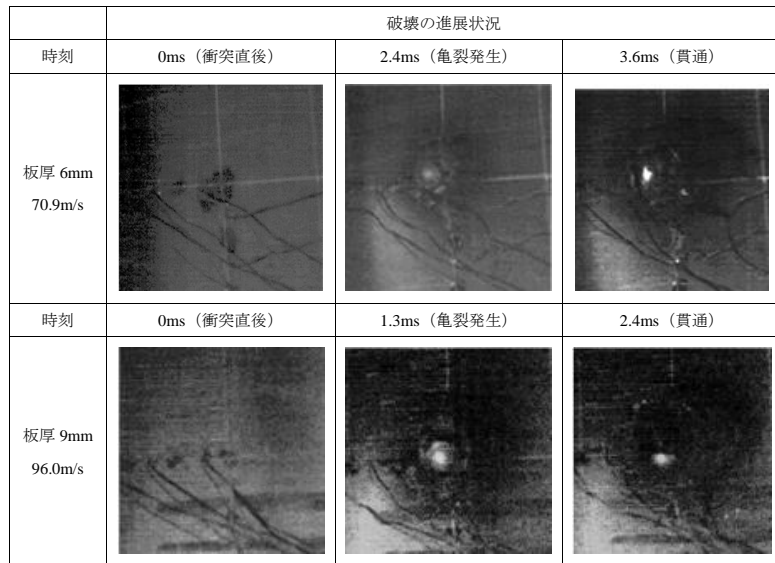


写真-4 破壊の進展状況

2.2 衝突実験結果

(1) 鋼板の変形および貫通破壊性状

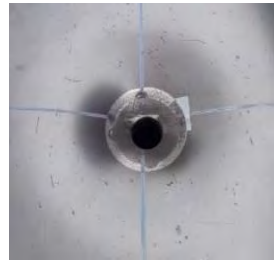
鋼板の変形および貫通破壊性状を写真-3 に示す。板厚が 6mm で衝突速度 50.4m/s のケースでは、表面に約 30mm の凹みが生じた。衝突速度を 66.8m/s に増加させると、図に示すような亀裂が生じた。衝突速度 70.9m/s では、飛翔体の先端が完全に貫通した。この際、衝突部は花弁状に引き裂かれた。次に、板厚 9mm のケースでは、衝突速度 83.0m/s のケースにおいて、鋼板中心部が 2 段階に変形するような変形性状を示した。図中に示す赤点線の円が 1 段階目の変形部分であり曲率が大きい変形

を示した。また、その周囲が曲率の緩やかな 2 段階目の変形部分である。このような変形が生じた理由は明らかではないが、衝突した飛翔体の衝撃力は先端部で最も大きく、その衝撃力を受けた鋼板の一部が慣性力によって周囲よりも大きく変形し、2 段階の変形が生じたものと考えている。衝突速度 89.2m/s では、2 段階に変形した部分の境界付近で亀裂が生じた。衝突速度 96.0m/s では、貫通が生じており、亀裂が裏面側に広がるような貫通破壊性状を示した。

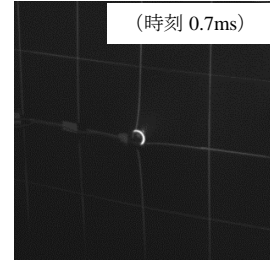
高速度ビデオカメラで撮影した鋼板の破壊の進展状況を、写真-4 に示す。写真から、板厚 6mm で貫通が生じ



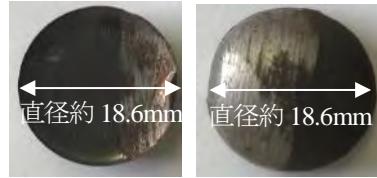
(a) 板厚 12mm, 速度 57.1m/s : 非貫通



(b) 板厚 6mm, 速度 56.6m/s : 貫通



飛行体



表面側

裏面側



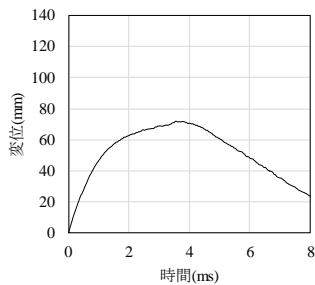
表面

裏面

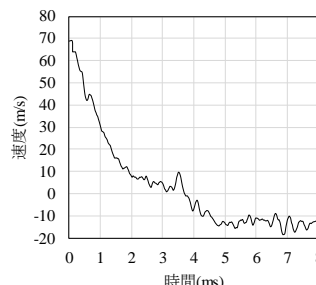
側面

(c) 飛行体および貫通片の外観

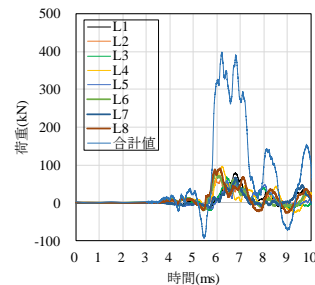
写真-5 鋼板の変形および貫通性状 (平坦状飛行体)



(a) 変位～時間関係



(b) 速度～時間関係



(c) 支点反力～時間関係

図-3 飛行体の変位, 速度および支点反力～時間関係

(No.1 : 板厚 6mm, 衝突速度 66.8m/s, 非貫通)

たケースをみると、飛行体が衝突した後に変形が生じ、時刻 2.4ms で亀裂が生じた。最終的には、時刻 3.6ms で貫通が生じた。板厚 9mm のケースも同様の挙動を示している。ただし、鋼板の衝突部が 2 段階に変形し、その境界付近に亀裂が生じて貫通破壊が生じていることが特徴的であった。比較のため、質量 4.3kg, 直径 18.6mm の平坦状飛行体 (写真-5(c)参照) の衝突による SS400 鋼板の変形および貫通性状^{8)・11)}を、写真-5 に示す。写真-5(a)は、板厚 12mm, 衝突速度 57.1m/s のケース (非貫通) であり、飛行体衝突部外縁がめり込むような変形状を示している。また、写真-5(b)は、板厚 6mm, 衝突速度 56.6m/s において貫通となったケースの貫通破壊性状および高速度ビデオカメラで撮影した貫通孔 (時刻 $t=0.7\text{ms}$) の画像を示している。図から、飛行体の衝突部が押し抜けるような貫通破壊性状を示している。この理由は、平坦状飛行体の縁端部に応力が集中したためと考えられる。写真-5(c)は、実験に用いた飛行体と、貫通片の外観である。写真のように、飛行体衝突部とほぼ同じ直径の円盤状の貫通片が生じている。このような貫通片は、半球状飛行体を用いた本実験では認められず、平坦状飛行体

を用いた場合の大きな特徴の一つである。以上から、異なる先端形状により、鋼板の変形および貫通性状の特徴が変化することがわかる。

(2) 飛行体の変位, 速度および支点反力～時間関係

図-3 に、実験ケース No.1 (板厚 6mm, 衝突速度 66.8m/s) に対する画像解析により算出した飛行体の変位および速度～時間関係、またロードセルにより計測した支点反力～時間関係を示す。なお、表面のひずみゲージが応答を始めた時刻を飛行体が鋼板に衝突した時刻とし、各図の時刻 0ms としている。変位～時間関係から、衝突後に鋼板に変形が生じることで最大変位約 70mm に達し、その後は変位が低下している。飛行体の速度～時間関係をみると、衝突後に速度が急激に減少し、変位が最大となる時刻 3.7ms で速度 0m/s となる。その後は、飛行体に負の速度が生じて跳ね返っている。また、支点反力～時間関係をみると、時刻約 3.0~4.0ms において支点反力が生じ、時刻約 6.1ms において最大支点反力約 400kN を示している。これは、飛行体の速度が 0m/s になった時刻約 3.7ms よりも後に生じており、鋼板の変形挙動は非常に短い間に終了していると言える。

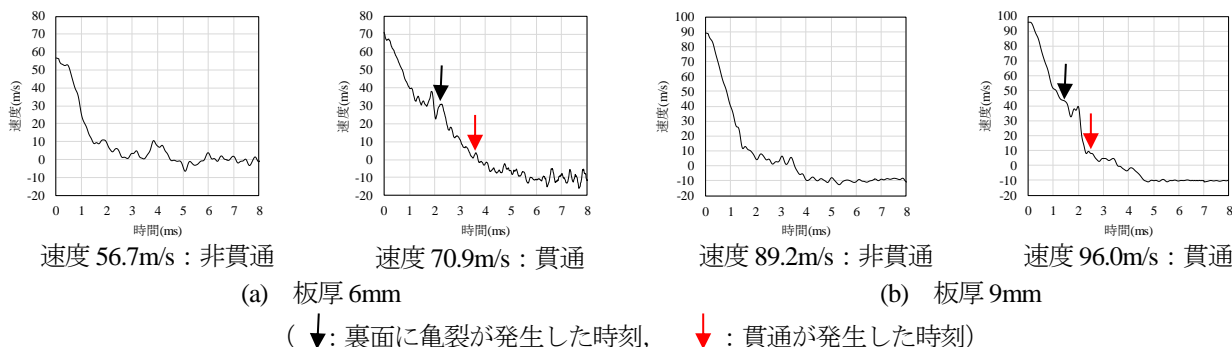


図-4 飛翔体速度～時間関係

表-3 実験結果と評価式の比較

No.	鋼板板厚 (mm)	飛翔体 (質量,直径)	衝突速度 (m/s)	実験結果	BRL式による貫通限界板厚 (mm)	BRL式による判定	大手らの式による破損限界板厚 (mm)	大手らの式による判定
1	6	6.0kg, 5.0mm	50.4	非貫通	6.1	貫通	2.3	非破損
2			56.7	非貫通	7.1		2.9	
3			66.8	非貫通	8.8		4.0	
4			70.9	貫通	9.6		4.5	
5	9		77.2	非貫通	10.7		5.3	
6			83.0	非貫通	11.8		6.2	
7			89.2	非貫通	13.0		7.1	
8			96.0	貫通	14.3		8.2	

図-4に、板厚6mmおよび9mmに対して非貫通および貫通となったケースの飛翔体の速度～時間関係を示す。図中には、高速度ビデオカメラで確認した、裏面に亀裂が生じた時刻および貫通が生じた時刻を矢印で示している。なお、支点反力については、全てのケースにおいて、先に示した実験ケースNo.1の結果と同様に、衝突速度が0m/sを示した後に大きな値を示した。飛翔体の速度～時間関係をみると、板厚6mm、衝突速度56.7m/s(非貫通)のケースの場合、飛翔体が衝突した後急激に減速し、時刻約2.8msで速度が0m/sとなった。板厚6mm、衝突速度70.9m/sで貫通が生じたケースにおいては、衝突後約1.5msで速度の低下が緩やかになり、その後約2.3ms以降において2度目の減速が生じて速度が0m/sとなった。高速度ビデオカメラの撮影画像から、時刻2.4msで亀裂が発生し、時刻3.6msで貫通が生じており、図中の矢印間で亀裂が進展して貫通が生じたことを示している。

板厚9mmの場合をみると、衝突速度89.2m/sに対して非貫通のケースでは、板厚6mmの非貫通ケースと同様の挙動を示しており、衝突後、急激に減速して時刻約2.7msで速度が0m/sとなった。また、衝突速度96.0m/sで貫通が生じたケースでは、衝突後約1.3msで速度の低下が緩やかになり、その後約2.0ms以降において2度目の減速が生じて速度が0m/sになった。なお、高速度ビデオカメラの画像においては、時刻1.3msで亀裂が発生し、時刻2.4msで貫通が生じていた。すなわち、飛翔体先端部が衝突して、鋼板が変形することでエネルギーを吸収して亀裂が生じる。その後、変形が局所化して亀裂が進展することで抵抗力が低下しながら、飛翔体の速度は時

刻2.4msで8m/sと小さくなり貫通が生じる。それ以降は、飛翔体後部が鋼板に衝突することで2度目の減速(時刻2.4ms～3.0ms)が生じたものと考えられる。

(3) 実験結果と既往評価式の比較

実験結果と既往の評価式であるBRL式および大手ら¹²⁾の式との比較を行う。ここで、BRL式は、飛翔体の質量、衝突速度および飛翔体直径をパラメータとしており、以下の式で表される。

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

ここに、 T : 貫通限界厚さ (in), M : 飛来物の質量 (lb・s²/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。

また、大手らは、飛翔体の先端形状が円柱状、半球状および円錐状の場合に適用できる破損限界板厚の評価式を提案している。ここで、鋼板に変形のみが生じる場合は非破損であり、亀裂や貫通が生じる場合が破損であると定義している。評価式は以下の式で表される。

$$T_d^{3/2} = E_f / (3.0 \times 10^8 D_e^{3/2}) \quad (2)$$

$$D_e = T \left\{ 1 + 2.9 \left(\tan \frac{\theta}{2} \right)^{2.1} \right\} \quad (\text{円錐状}) \quad (3a)$$

$$D_e = D_m \quad (\text{半球状および円柱状}) \quad (3b)$$

ここに、 T_d : 破損限界厚さ (m), E_f : 破損限界エネルギー (kgf・m), D_e : 相当直径 (m), D_m : 飛翔体直径 (m), θ : 円錐状飛翔体先端角度である。

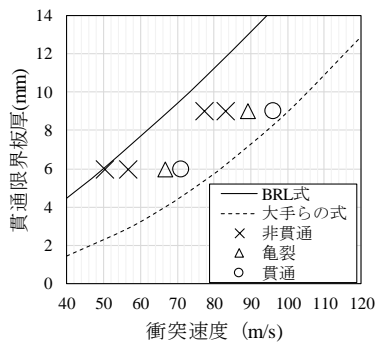


図-5 実験結果と評価式の比較
(貫通限界板厚～衝突速度関係)

比較結果を、表-3 に示す。なお、BRL 式の入力パラメータ K は材料定数であり、ここでは 1.0 とした。また、比較結果として板厚～衝突速度関係を、図-5 に示す。本実験条件を入力して両式から算出される貫通限界板厚または破損限界板厚をみると、BRL 式では全ての実験ケースにおいて貫通する判定となり、大手らの式では全ての実験ケースにおいて非破損の判定となった。以上から、 $K=1.0$ とした BRL 式および大手らの式では、本実験結果と異なる結果を示した。今後、この原因について検討する必要がある。

3. 結言

本研究は、板厚 6mm および 9mm の SS400 鋼板に対し、質量 6kg、先端部が半球状 (直径 50mm) の飛翔体を衝突速度約 50m/s～100m/s で衝突させる実験を行い、鋼板の破壊挙動を調べたものである。本研究の成果を以下に示す。

- (1) 衝突実験の結果から、平坦状飛翔体の場合は飛翔体の衝突部外縁周辺が押し抜けるような貫通性状を示すが、半球状飛翔体の場合は鋼板中心部にくぼみが生じた後に亀裂が発生し、裏面側に広がるような貫通破壊性状を示した。
- (2) 飛翔体速度～時間関係および支点反力～時間関係から、鋼板の変形および貫通破壊および貫通破壊は非常に短い時間に終了し、変形は非常に局部的であることがわかった。

参考文献

- 1) 原子力規制委員会：原子力発電所の竜巻影響評価ガイド、原規技発第 13061911 号、2013。
- 2) 原子力規制委員会：原子力発電所の竜巻影響評価ガイド、原規技発第 1409172 号、改訂 2014。
- 3) 原子力規制庁：原子力発電所の火山影響評価ガイド(案)、2013。
- 4) 内閣府：活火山における退避壕等の充実にに向けた手引き、2015。
- 5) 土木学会：構造工学シリーズ 6、構造物の衝撃挙動と設計法、1993。
- 6) 北田明夫、角大詩、福本智志、西崎信、赤司裕、守屋登康：竜巻飛来物を模擬した角管の落下衝突による鋼板の貫通評価、日本機械学会論文集, Vol.83, No.851, p.16-00501, 2017。
- 7) 千葉矩正、志田茂、大手敏、吉沢弘泰：飛来物体に対する鋼板の耐衝撃性(第 1 報、鋼板の破損限界の板厚依存性)、日本機械学会論文集 A 編, Vol.47, No.422, pp. 1101-1109, 1981。
- 8) 土田恭平、小笠原義浩、別府万寿博、和内博樹、松浦敦、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 1) 衝突実験による BRL 式の検証、日本建築学会学術講演梗概集, 2015。
- 9) 別府万寿博、小笠原義浩、土田恭平、和内博樹、松浦敦、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、日本建築学会学術講演梗概集, 2015。
- 10) 荻原実、小笠原義浩、土田恭平、別府万寿博、和内博樹、松浦敦、間瀬辰也：鋼製飛来物に対する鋼板の貫通評価に関する研究(その 3) 飛来物として角型鋼管を用いた衝突実験結果、日本建築学会学術講演梗概集, 2015。
- 11) 松浦敦、小笠原義浩、土田恭平、別府万寿博、和内博樹、間瀬辰也：鋼製飛来物に対する鋼板の貫通評価に関する研究(その 4) 衝突実験の再現解析、日本建築学会学術講演梗概集, 2015。
- 12) 大手敏、吉沢弘泰、千葉矩正、志田茂：飛来物体に対する鋼板の耐衝撃性(第 2 報)鋼板の破壊限界エネルギー評価式、日本機械学会論文集 A 編, Vol.47, No.424, pp.1373-1379, 1981。