

竜巻飛来物衝突を想定した鋼板貫通試験によるBRL式の適用性検討

Investigation on applicability of BRL formula by steel plate perforation test assumed tornado missile impact

南波 宏介*, 佐多 大地**

Kosuke Namba, Sata Daichi

* 工博, 主任研究員, 電力中央研究所 原子力リスク研究センター(〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

** 工修, 研究員, 電力中央研究所 地球工学研究所(〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

Key Words: Tornado missile, Steel plate, Perforation resistant performance, Ballistic Research Laboratory formula

キーワード: 竜巻飛来物, 鋼板, 耐貫通性能, BRL式

1. はじめに

原子力規制委員会の定める「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則¹⁾」第6条において、外部からの衝撃による損傷の防止として、安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならないとしている。敷地周辺の自然環境を基に想定される自然現象の一つとして、竜巻の影響を挙げている。当該規定に関連して、竜巻およびその随伴事象等によって原子炉施設の安全性を損なうことのない設計であることを評価するための「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド²⁾」（以下、ガイド）が示されている。

竜巻から防護すべき竜巻防護施設のうち、屋外施設または外殻となる施設により防護が期待できない設備に関して、竜巻に起因した飛来物（以下、竜巻飛来物）の衝突により安全機能に影響が及ぶ可能性がある場合には、適切な防護対策が必要となる。

表-1に、ガイド²⁾に例示されている2種類の竜巻飛来物の仕様および衝突速度を示す。竜巻飛来物の防護対策工に、調達性に優れた軟鋼板を使用した場合、竜巻飛来物衝突を想定した鋼板構造物の構造健全性を確認する必要がある。鋼板構造物の構造健全性評価法の一つとして、評価対象の部材厚が貫通限界厚さ（飛来物衝突を受ける鋼板に貫通が発生しない最小の厚さ）よりも大きいことを確認する方法が用いられており、貫通限界厚さを算定する評価式として式(1)に示すBRL式（Ballistic Research Laboratory formula）³⁾が用いられることが多い。

$$t^{3/2} = \frac{0.5mv^2}{1.4396 \times 10^9 K^2 d^{3/2}} \quad (1)$$

t (m) : 鋼板の貫通限界厚さ, m (kg) : 飛来物質量

v (m/s) : 飛来物速度, d (m) : 飛来物直径

K (-) : 鋼板の等級に関わる係数 (=1)

しかし、BRL式の根拠となる文献は非公開となっており、式の元となる衝突速度や衝突部形状、鋼板材質や支持条件等の試験条件は明らかにされておらず、BRL式の竜巻飛来物への適用性は必ずしも明確ではない。これまでも国内外の各研究機関により、鋼板構造物の局部破壊評価に関する研究が行われてきたものの、限られた衝突条件に関する評価に留まっており、明確に示された試験方法による一連の試験実績や研究事例^{4)~6)}は少ない。

本報では、まず、試験方法、計測方法を整理し、竜巻飛来物で想定される50m/s前後の衝突速度で質量の異なる飛翔体と板厚の異なるSS400鋼板を用いた鋼板貫通試験（以下、貫通試験）を実施した。次に、鋼板の材質、飛翔体先端形状を変化させた実験結果とBRL式を比較することで、各衝突パラメータによる鋼板の耐貫通性能に及ぼす影響を把握し、最後にBRL式の竜巻飛来物への適用性を検討した。

2. 鋼板貫通試験の概要

試験で想定する竜巻飛来物の衝突条件を衝突径50mm、飛翔体質量8.4kg程度、衝突速度50m/s程度とした。以下に、試験設備、飛翔体、試験体について示す。

表-1 竜巻飛来物の想定条件²⁾

想定飛来物	寸法	質量	最大水平速度	最大鉛直速度
鋼製パイプ	長さ2m× 直径0.05m	8.4 kg	49m/s	33m/s
鋼製材	長さ4.2m×幅0.3m ×奥行0.2m	135 kg	51m/s	34m/s

2.1 高速貫通試験設備

高速貫通試験設備を用いて飛翔体を鋼板試験体に垂直方向から衝突させる貫通試験を実施した。図-1に、試験設備の外観を示す。貫通試験では、エアチャンバーに固定した飛翔体に圧縮空気の圧力を作用させ、飛翔体を射出して加速管内を滑走させ、支持架台に固定された試験体に衝突させた。加速管先端の側面には開口部が設けられており、衝突直前の飛翔体の挙動を確認可能である。

2.2 飛翔体

図-2に、飛翔体の概要と衝突部の概況を示す。飛翔体は本体部に衝突部を固定したものであり、一体となって飛翔する。衝突部は交換可能であり、先端形状を自由に変更することが出来る。衝突部は、円形の中実な円柱状（以下、円柱）と円形であるが接触幅が4mmの剛なパイプ状（以下、剛パイプ）、円形状と外周長さが等価な多角形の六角形、四角形の4種類を用意した。衝突部には衝突時に変形が生じないように焼入れ処理を施した鋼材を用いて製作した。衝突部はいずれも設計質量2kgであり、質量の異なる本体部を用いることで飛翔体の設計質量は6kg、8.4kg、11.5kgとなる。

2.3 鋼板試験体

図-3に、試験体の概要図を示す。試験に使用した鋼板は、日本産業規格^[7]（旧日本工業規格）に準拠した軟鋼板であり、採用実績が豊富なSS400、SM490に強度の異なるSM520を加えた3種類とした。鋼板厚さは4.5mm、

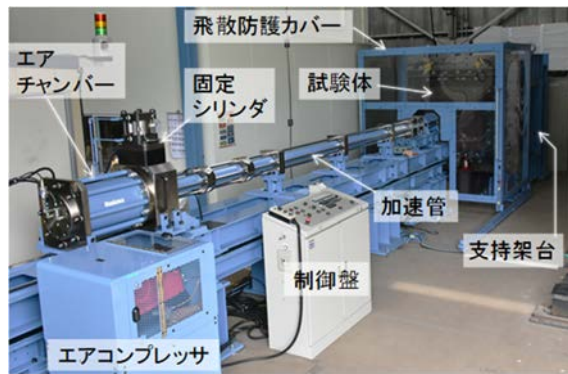


図-1 高速貫通試験設備

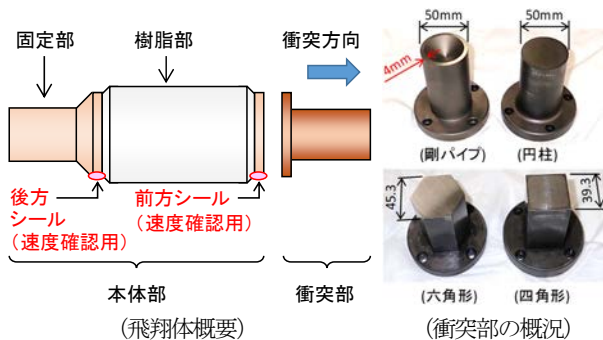


図-2 飛翔体概要と衝突部の概況

6mm、9mm（以下、t4.5、t6、t9と示す）を用意した。鋼板は口の字形（内寸法1m×1m）の押え板と鋼製枠に挟まれた状態でM30六角ボルトにより一体化されることから、試験体は有効寸法1m×1mの四辺固定支持された鋼板と見なすことが出来る。

2.4 試験計測

(1) 衝突速度

衝突速度は、飛翔体と鋼板の衝突現象に影響を与えることのない高速度カメラ（以下、HSC：High Speed Camera）を用いた非接触式の計測方法により測定した。衝突速度の計測では、加速管先端の開口部を通過する飛翔体を側方から撮影し、動画像運動解析ソフトウェアを用いて、映像内で飛翔体側面に貼り付けた高輝度反射シール（以下、シール）を追跡し、時々刻々のシール座標データを得た。映像から得られる座標データはピクセル座標系（単位：pixel）であることから、2枚のシール間距離を用いて、データを実際の座標（単位：mm）に変換した。図-4に、HSC映像の動画分析結果の例を示す。撮影開始時刻から飛翔体の衝突時刻直前までの座標時刻歴は線形に増加しており、衝突直前の飛翔体は等速運動と判断される。衝突速度を前方シール座標の時刻歴の変化率として算出すると、衝突速度は59.10m/sとなる。

(2) 試験体応答

飛翔体の衝突を受ける鋼板の応答を確認するため、試験体を支持する鋼製枠裏面に荷重測定用ロードセルを

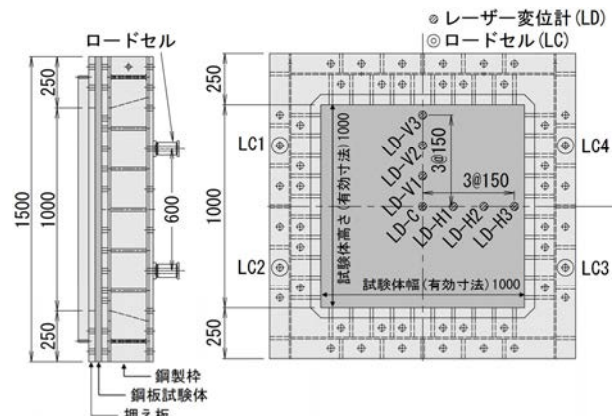


図-3 試験体概要と試験計測位置

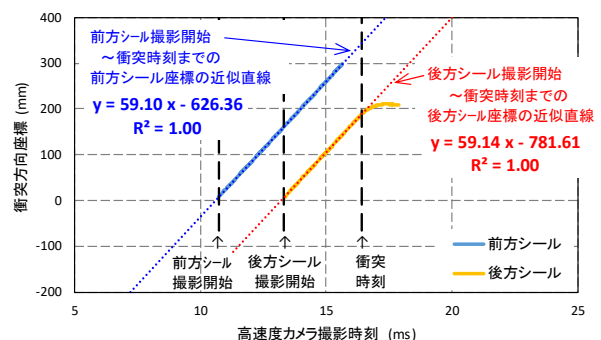


図-4 動画分析結果の例（シールの実座標時刻歴）

表-2 計測機材一覧

機材	型式	試験時設定
収録装置	共和電業製 EDX-3000B	サンプリング周波数 200kHz
ロードセル	共和電業製 BLD-A-500KNS	最大容量 0.5MN
高速度カメラ (HSC)	速度計測用 : nac 製 MEMRECAM HX-5	最大 70,000 コマ/s 517×137pixel
	鋼板応答確認用 MEMRECAM HX-7s	最大 20,000 コマ/s 384×392pixel
レーザー変位計	キーエンス製 IL-1000, IL-600	測定範囲 200~1,000mm

表-3 試験条件一覧

飛翔体			鋼板試験体		試験数 (回)
先端	質量 (kg)	衝突速度 (m/s)	公称板厚(mm)	材質	
剛パイプ	8.4	33.50-36.03	4.5	SS400	2
剛パイプ	8.4	38.93-52.07	6	SS400	3
円柱	8.4	34.00-38.38	4.5	SS400	3
円柱	8.4	39.14-45.78	6	SS400	4
円柱	8.4	55.61-61.37	9	SS400	2
円柱	6	42.42-43.90	4.5	SS400	2
円柱	6	48.99-53.58	6	SS400	3
円柱	6	66.60-70.77	9	SS400	2
円柱	11.5	29.91-33.13	4.5	SS400	3
円柱	11.5	35.28-38.65	6	SS400	2
円柱	11.5	47.90-51.91	9	SS400	2
剛パイプ	8.4	45.24-51.15	6	SM490	3
円柱	8.4	45.01-46.12	6	SM490	2
円柱	6	56.59-59.46	6	SM490	2
円柱	11.5	43.25-44.74	6	SM490	2
円柱	11.5	55.21-59.86	9	SM490	2
円柱	6	56.41-62.81	6	SM520	3
六角形	6	50.07-50.96	6	SS400	2
四角形	6	48.36-50.89	6	SS400	3

設置して荷重を測定し、鋼板の裏面（衝突面の反対側）にレーザー変位計を設置して衝突方向変位を測定した。また試験後に、鋼板の残留変形量を記録した。表-2に、使用した計測機材一覧を示す。

2.5 試験ケース

表-3に試験ケース一覧を示す。試験は飛翔体質量、衝突速度、鋼板板厚、鋼板材質、飛翔体先端形状をパラメータにして、計47回実施した。

3. 鋼板貫通試験結果

3.1 評価方法

試験で使用した飛翔体の質量、直径、鋼板の板厚は、

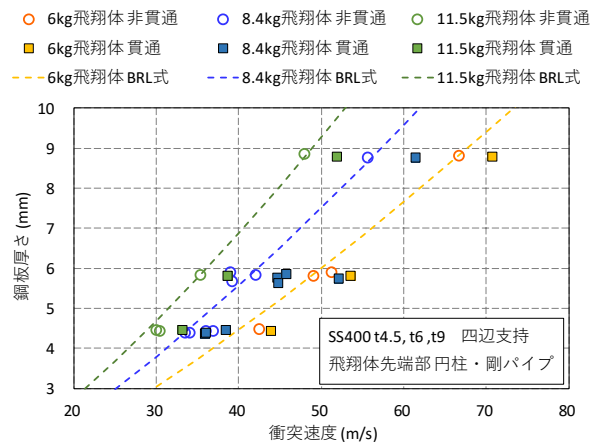


図-5 飛翔体質量と衝突速度を変化させた試験結果

製作誤差等により設計値、公称値と若干異なり、試験毎にバラツキを有する。そのため、BRL式を用いた評価を行う際は、いずれも試験毎に測定した実測値を使用する。

評価では、鋼板の耐貫通性能を表す指標としてBRL式により算出される貫通限界厚さ（以下、BRL式厚さ t_{BRL} と呼称する）を用いる。BRL式厚さ t_{BRL} と試験に使用した鋼板の板厚実測値（以下、実測厚 t_m と呼称する）の関係が $t_{BRL}/t_m < 1$ となる場合、飛翔体は鋼板を貫通しない（以下、非貫通）試験条件と予測され、 $t_{BRL}/t_m > 1$ となる場合、飛翔体は鋼板を貫通する（以下、貫通）試験条件と判定される。

以上のように、BRL式厚さ t_{BRL} と実測厚 t_m の比と実験結果（貫通／非貫通）との整合性を確認することで、衝突パラメータの影響、貫通試験に関するBRL式の適用性を評価する。

3.2 飛翔体質量と衝突速度の影響

既報⁸⁾では、先端形状の異なる剛パイプ状と円柱状衝突部の8.4kg飛翔体を用いてSS400鋼板に対する貫通試験を実施し、BRL式の適用性を確認した。次に、飛翔体の質量、衝突速度（鋼板の板厚）を変化させた場合のBRL式の適用性を確認するため、8.4kg飛翔体に加え6kg飛翔体および11.5kg飛翔体を使用し、t4.5~t9のSS400を対象とした貫通試験を実施した。

図-5に、縦軸に鋼板実測厚さ、横軸に衝突速度をとり、各試験結果とBRL式による評価結果を比較して示している。図-5より、試験において貫通が生じた試験ケースはBRL式による評価結果（図中、点線）の右側の領域に位置しており、BRL式は飛翔体質量および衝突速度によらず、試験結果を適切に評価している。

図-6に、試験体板厚毎に最も衝突速度が大きく非貫通となった試験で確認された残留変形量を示す。いずれの鋼板厚さの試験体においても質量が小さく、衝突速度の大きい6kg飛翔体を用いた試験の材端のたわみ角が他の飛翔体を用いた場合に比べて小さい。また、同一の飛翔体毎に鋼板厚さの異なる試験体の残留変形量をみると、

試験体厚さが大きいほど衝突速度が大きくなり、材端たわみ角が小さく、衝突部の局所変形が顕在化して衝突部近傍の変形が顕著になっていると推察される。図-7に、図-6で示したt6鋼板、6kg、11.5kg飛翔体を使用した試験の試験後鋼板を切断した衝突部の断面観察写真を示す。試験後鋼板の断面観察写真を見ると、衝突速度の大きい6kg飛翔体（衝突速度51.18m/s）の試験体では鋼板衝突部の飛翔体のめり込み量（貫入量）が1.3mm程度であるのに対し、11.5kg飛翔体（衝突速度35.28m/s）では0.7mm程度に留まっていることから、衝突部の局所変形が増大する傾向が確認出来る。

今回、6kg飛翔体の衝突速度は最大66m/s程度であり、表-1に例示される竜巻飛来物で想定される衝突速度を上回る速度域であり、図-7に示した試験ケース間には飛翔体の衝突エネルギーに差があるものの、衝突速度が高速になるに従い、衝突部の変形が局所化し、評価上厳しくなることが予測されるため、注意が必要である。

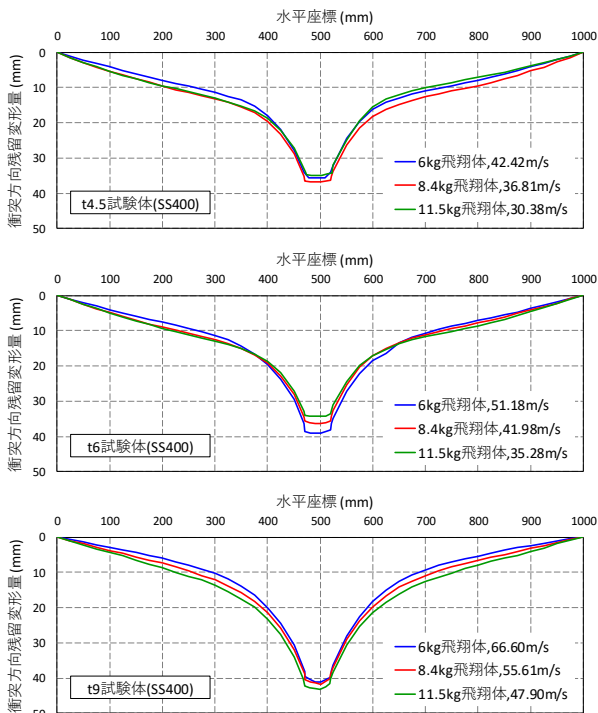


図-6 板厚毎の試験体残留変形量（非貫通）

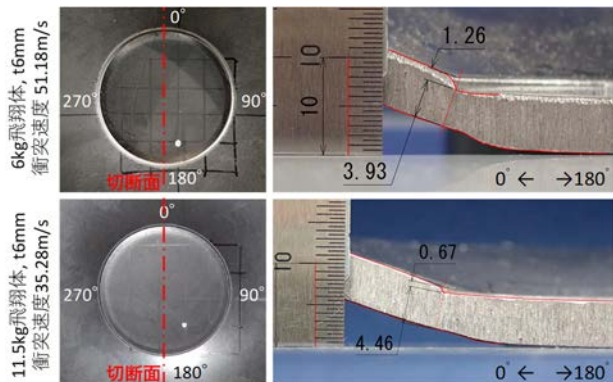


図-7 試験後断面観察写真（飛翔体質量6kg、11.5kg）

3.3 鋼板材質の影響

BRL式には、鋼板材質を考慮する定数 K が含まれており、既往の文献³⁾では「 $K=1$ 」と記載されているのみである。先行研究⁶⁾では、SS400を対象とした場合に、 $K=1$ としてBRL式を使用することは評価上問題の無いことを実験的に明らかにしている。一方、SS400以外の材料定数 K に関する知見はほとんどない。また、材料強度による鋼板の耐貫通性能に関する検討はほとんど行われていない。

以上のことから、SM490、SM520を用いた貫通試験を実施し、材質毎の耐貫通性能を確認した。また、BRL式による合理的な評価を目指し、本報で実施した円形状飛翔体を用いた貫通試験結果から比較的試験データが蓄積

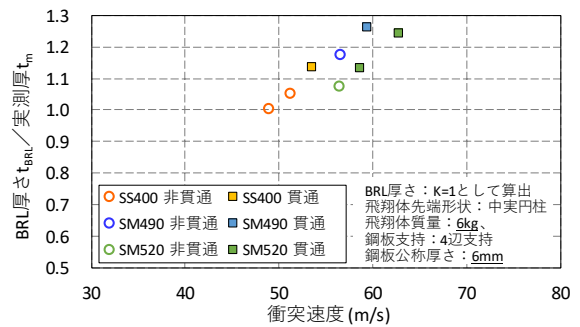


図-8 材質の異なる t6mm 鋼板の試験結果

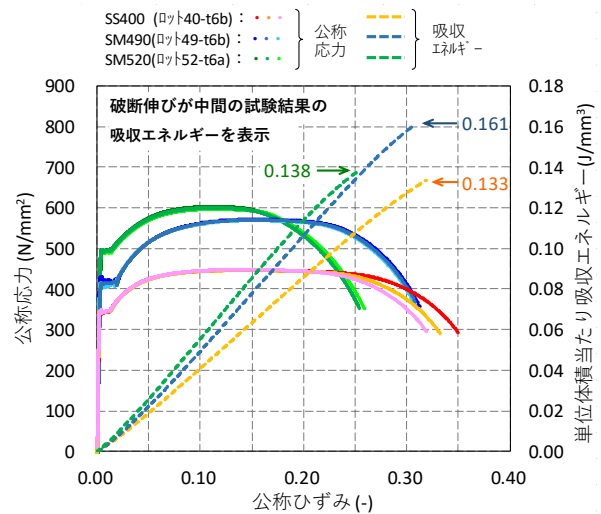


図-9 公称応力、吸収エネルギー—公称ひずみ関係

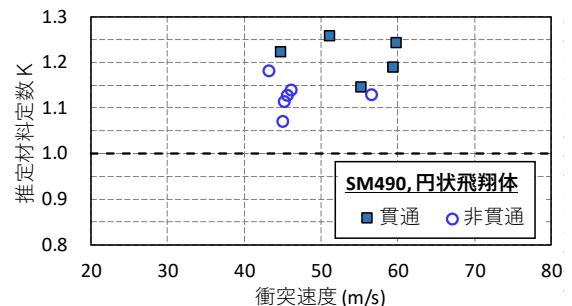


図-10 試験結果から推定した SM490 の材料定数 K

されたSM490の材料定数 K の想定される範囲を推定した。材質の違いによる検討は、共通の鋼板厚さ $t_6\text{mm}$ の鋼板を用いて行う。図-8に、縦軸に t_{BRL}/t_m 、横軸に衝突速度をとって整理した材質の異なる t_6 鋼板の試験結果を示す。SS400では t_{BRL}/t_m が1.05である試験条件で非貫通の結果が得られている。SM490, SM520では t_{BRL}/t_m がそれぞれ1.18, 1.07となる試験条件で非貫通の試験結果となっており、SM490, SM520はSS400に比べ耐貫通性能に優れる傾向がみられる。一方、SM520の材料強度(降伏点, 引張強さ)は、SM490に比べて優れるにも拘わらず、耐貫通性能はSM490がSM520を上回っている。図-9に、SS400, SM490, SM520を対象にした各3回の静的引張試験で得た公称応力-公称ひずみ関係と公称応力-公称ひずみ線図で囲まれた面積として算出される単位体積当たりの吸収エネルギーを示す。公称応力-公称ひずみ線図から分かるとおり、SM520は他の材質に比べて引張強さ発生時、破断時の伸びが小さい。そのため、SM520の破断発生時の吸収エネルギー(0.138J/mm³)はSS400(0.133J/mm³)に比べて大きいものの、SM490(0.161J/mm³)に比べて小さく、耐貫通性能と同様の傾向を示している。衝突を受ける鋼板の衝突部には飛翔体の貫入による変形が生じ、鋼板裏面側の引張変形により飛翔体のエネルギーを吸収しているものと推察されることから、材料の強度と吸収エネルギーの両方が耐貫通性能に関する重要な指標となり得るものと推察される。

材質の異なる試験結果を用いて、SM490に関する材料定数 K の推定を行う。材料定数 K は式(1)に、鋼板厚さ実測値 t_m 、試験に使用した飛翔体の衝突部直径、質量を入力することで算出可能である。一方、厳密には材料定数は貫通限界となる試験条件の下で得られるものであるため、本検討では貫通と非貫通の試験条件から K の取り得る範囲として検討する。図-10に、SM490の試験条件から推定した材料定数 K を示す。SM490では、 $K=1.14$ 近傍で貫通の結果が見られているものの、本試験の推定材料定数 K が1.1以下の範囲では貫通は生じていない。このことから、SM490の材料定数 K の取り得る範囲は1.1未満と考えられる。

3.4 多角形の衝突形状の影響

貫通試験において、これまで円形状の飛翔体を対象に検討を行ってきたが、実現象では角型断面の飛翔体衝突も否定出来ない。また、BRL式では飛翔体形状を飛来物直径 d として与える必要があるが、角型断面の飛翔体の入力方法については明示されていない。以上のことから、角型の先端形状を有する飛翔体に対する鋼板の耐貫通性能とBRL式への入力方法を検討するために、円柱先端部と四角形先端部に加え、両者の中間的な形状として六角形先端部による貫通試験を実施し、鋼板の耐貫通性能への影響を検討した。既報⁹⁾より、鋼板の耐貫通性能は飛翔体の接触面積による影響は小さいことが明らかとなっ

ている。そのため、衝突径50mmの円形衝突部と周長を同一とする仮定の下、正多角形の断面形状を決定した。

図-11に、 t_{BRL}/t_m を縦軸にとり整理した多角形衝突部による試験結果を示す。図より、 $t_{BRL}/t_m < 1$ の領域においていずれの試験も貫通の結果は生じていない。一方、円形衝突部を用いた試験では、 t_{BRL}/t_m が1.05となる試験条件においても貫通は生じていないが、四角形、六角形衝突部を用いた試験では鋼板に貫通が発生した。また、六角形衝突部を用いた試験では t_{BRL}/t_m が1.03となる試験条件で非貫通の結果が得られたものの、四角形衝突部を用いて同程度の t_{BRL}/t_m となる試験を実施したところ、貫通が生じ、 t_{BRL}/t_m が0.97の試験条件において非貫通の結果を得ている。

これより、多角形の頂点の数が少ないほど、鋼板の耐貫通性能が小さくなる結果となった。図-12に衝突形状毎に最も衝突速度が大きく非貫通となった試験で確認された試験後の鋼板の断面観察写真を示す。円柱衝突部では、外周のいずれの断面においても飛翔体の貫入量は同程度であり、最大で1.3mm程度であった。六角形衝突部では衝突痕の辺にあたる部分に比べ、隅角部にあたる箇所

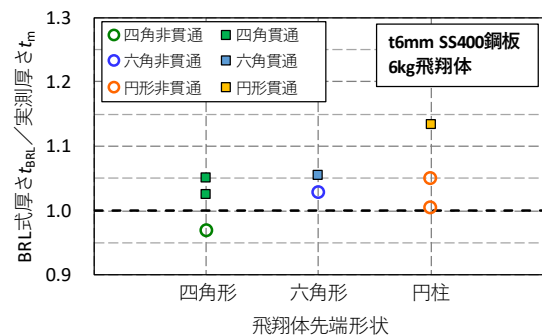


図-11 多角形衝突部による貫通試験結果

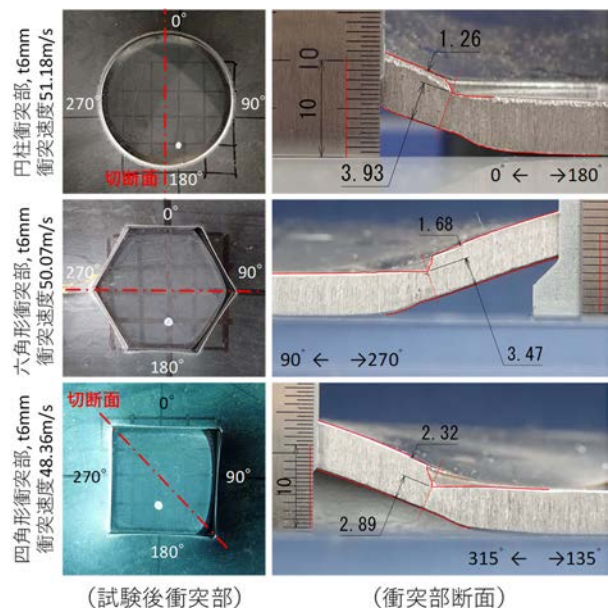


図-12 多角形衝突部を用いた試験後断面観察写真

度であった。四角形衝突部では、他のケースに比べて飛翔体の衝突エネルギーが最も小さいにも拘わらず、衝突痕隅角部に2.3mm程度の貫入が生じ、局所的な損傷としては最も大きい結果であった。

以上のことから、多角形衝突部を想定した場合、飛翔体衝突痕隅角部に変形が集中し、円形状飛来物による衝突に比べて貫入量が大きく、過酷な衝突条件となる。また、BRL式に入力する衝突部直径を外周長さが等価な円断面の直径とすることで、BRL式は多角形衝突部の耐貫通性能についても適切に評価可能であることが示された。

4. BRL式の適用性

表-3で示した鋼板貫通試験条件の全試験ケースを対象に、試験結果とBRL式の評価結果を比較し、BRL式の適用性を検討する。なお、本検討では多角形衝突部の飛翔体を用いた試験、SM490、SM520材を用いた試験も対象としており、材質によらずBRL式を1として検討した。

図-13に、縦軸に t_{BRL}/t_m 、横軸に衝突速度をとって整理した全試験結果を示す。対象とした全試験において、事前に非貫通が想定される $t_{BRL}/t_m < 1$ の領域に貫通が生じた試験結果は見られていない。これより、本試験結果では、多角形衝突部と周長を等価とした円断面の直径を用いて評価することでBRL式を満足したと言える。一方、試験結果の一部では同一の鋼板厚さ、同一質量の飛翔体を用いた場合においても、衝突速度の大小関係と反した貫通/非貫通の試験結果が見うけられた。上記の要因として、鋼板製作ロット間の強度や伸び等の機械特性値の相違が影響していることが考えられ、また、貫通試験におけるバラツキ等の可能性も考えられ得る。そのため、今後継続的に貫通試験データの蓄積し、上記の要因について分析を行うことが望ましい。

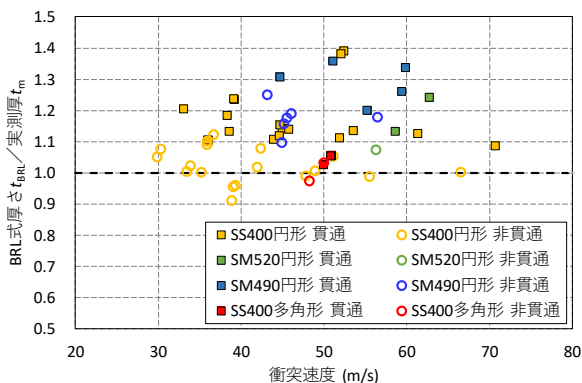


図-13 全試験結果

5. まとめ

本研究では、竜巻飛来物を想定した衝突条件に関するBRL式の適用性を確認するために、貫通試験に関する試験方法、計測方法、評価方法を整理し、飛翔体質量 (6

～11.5kg)、先端形状 (円形、四角形、六角形)、衝突速度 (29.9～70.8m/s)、鋼板厚 (4.5～9mm)、材質 (SS400, SM490, SM520) を変化させた貫通試験を実施し、以下の知見を得た。

- (1) 飛翔体質量6kg～11.5kgの飛翔体を用いて、衝突速度、飛翔体質量を変化させた貫通試験結果は、いずれもBRL式による評価結果と一致し、BRL式は適切に鋼板の貫通の有無を判定可能であることを確認した。
- (2) SM490, SM520はSS400に比べ、高い耐貫通性能が見られた。一方、SM490に比べ強度の高いSM520の耐貫通性能はSM490を下回る結果となった。静的引張試験結果の分析から、材料の強度と吸収エネルギーの両方が耐貫通性能に関する重要な指標となり得るものと推察された。本試験結果に基づきSM490で想定される材料定数Kの取り得る範囲を推定した。
- (3) 多角形衝突部を想定した場合、飛翔体衝突痕隅角部に鋼板の変形が集中し、円形状衝突部に比べて過酷な衝突条件となる。BRL式に入力する衝突部直径を外周長さが等価な円断面の直径とすることで、多角形衝突部についてもBRL式は耐貫通性能を適切に評価可能であることが示された。
- (4) 多角形衝突部を用いた試験も含め、本稿で示した全貫通試験結果をBRL式による評価と比較した結果、多角形衝突部の周長を等価とした円断面の直径を用いることでBRL式は鋼板の耐貫通性能 (貫通/非貫通) を適切に評価することが示された。

参考文献

- [1] 原子力規制委員会. “実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈”. 原規技発第1306193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の一部改訂について”. 原規技発第1409172号. 2014.
- [3] 土木学会. “構造物の衝撃挙動と設計法”. 構造工学シリーズ6. 1993.
- [4] 千葉ら. “飛来物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), 47巻422号, pp.1101-1107, 1981
- [5] 濱田ら. “鋼棒の衝突を受ける鋼板の貫通破壊に関する基礎的検討”. 土木学会論文集A2 (応用力学), Vol.74, No.2, pp.I_421-I_429, 2018
- [6] 北田ら. “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, 2017年
- [7] 例えば, 日本産業規格. “一般構造用圧延鋼材. JIS G 3101. 2015.
- [8] 吉田ら. “先端形状の異なる飛来物の鋼板貫通に関する基礎的検討”, 日本原子力学会2018年度秋の大会予稿集, 2P05, 2018.