

半球型飛来物の衝突を受ける鋼板の貫通破壊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

1. 緒言

近年、国内では竜巻や火山噴火が増加傾向にあり、竜巻飛来物や火山噴石が人や構造物に衝突して被害が生じることが懸念されている。竜巻飛来物および火山噴石の最大衝突速度はそれぞれ 60m/s および 100m/s 程度であると想定されているが、これらの飛来物衝突を受ける鋼板の貫通破壊に関する研究は少ない。また、鋼板の貫通破壊には、衝突する飛来物の先端形状が大きく影響していると考えられるが、既往の研究では鋼管や先端部が平坦状の飛翔体を用いた研究が多い。本研究は、板厚 6mm および 9mm の SS400 鋼板に対し、半球状(直径 50mm)の先端を有する質量 6kg の飛翔体を速度約 50m/s ～100m/s で衝突させる実験を行い、鋼板の貫通破壊について検討を行ったものである。

2. 衝突実験の概要と実験結果

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できる。飛翔体は、図-2 に示すように飛翔体に半球状の先端部(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。鋼板は図-3 に示すように、鋼製の裏面支持具にボルトを用いて鋼板の 4 辺を固定した。実験では、板厚 6mm および 9mm の SS400 鋼板に対して、衝突速度を約 50～100m/s に設定して実験を行った。実験ケースを表-1 に示す。また、SS400 鋼材の力学特性を表-2 に示す。

鋼板の変形および貫通破壊性状を図-4 に示す。板厚 6mm、衝突速度 50.4m/s のケースでは、表面に約 30mm の凹みが生じ、裏面には球状の変形が生じた。衝突速度 70.9m/s では、衝突部が花卉状に引き裂かれ、飛翔体の先端が完全に貫通した。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な変形を示した。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に集中するため、その衝撃力を受けた鋼板の一部が慣性力の影響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 96.0m/s では、この 2 段階の変形の境界に亀裂が生じて貫通が発生しており、亀裂が裏面側に広がるような貫通性状を示した。

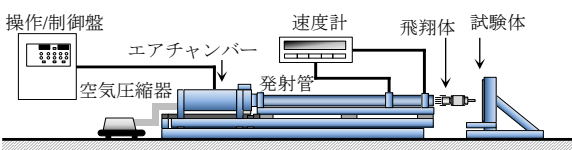


図-1 高圧空気式飛翔体発射装置

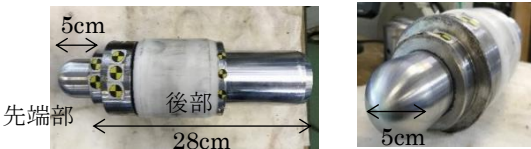


図-2 飛翔体の外観 (●:追跡点)

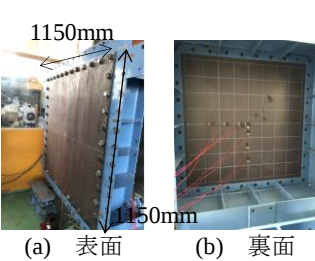


図-3 試験体の設置状況

表-1 実験ケース

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

表-2 鋼材の力学特性

力学特性	板厚	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)	
	6mm	323	452	324	592	31
	9mm	292	428	292	561	31

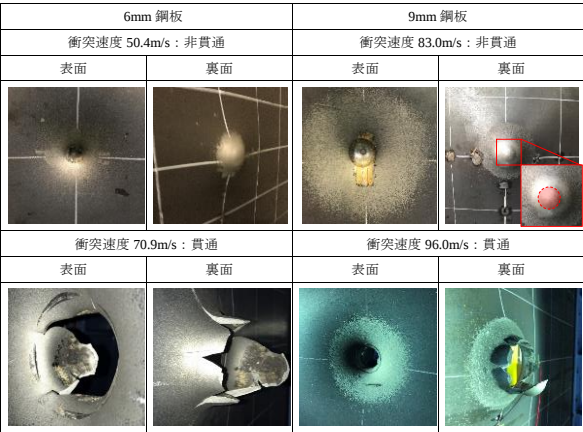


図-4 鋼板の貫通破壊・変形性状

キーワード 竜巻飛来物, 鋼板, 飛翔体, 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

3. 数値解析の概要と解析結果

解析モデルを図-5に示す。解析には衝撃解析コード ANSYS AUTODYN Ver.17 を使用し、2次元軸対称モデルとした。解析の対象は、板厚が6mmで衝突速度66.8m/s（非貫通）および70.9m/s（貫通）のケースである。鋼板は、鋼板中央から30mmの位置までは0.5mm×0.5mmの要素分割とした。また、飛翔体の後部は計算効率を考慮し、簡易的なモデルとした。境界条件として、鋼板の端部の節点を固定した。また、初期条件としては、飛翔体モデルの節点に初速度を設定した。表-3に、解析定数を示す。鋼板のヤング係数、密度およびポアソン比は全てのケースで同一の値とし、降伏基準にはひずみ速度依存性を考慮した Johnson-Cook の降伏基準¹⁾を用いた。破壊基準には、損傷を考慮した Johnson-Cook の破壊基準²⁾を用いた。これらの入力値には、破断ひずみに及ぼす応力三軸度の影響を考慮した北田³⁾および破断ひずみに及ぼす応力三軸度およびひずみ速度の影響を考慮した Banerjee ら⁴⁾の研究を引用した。それぞれのパラメータにおける破断時の相当塑性ひずみ～応力三軸度関係を図-6に示す。

解析で得られた損傷分布を図-7に示す。図は、衝突部周辺を拡大したものである。まず、北田らのパラメータを用いた解析ケース No.1 および No.2 から、解析ケース No.1（衝突速度66.8m/s）では鋼板裏面中心から約8mmの位置に約0.3～0.4程度の損傷が集中し、実験結果と同じ非貫通の結果となった。解析ケース No.2（衝突速度70.9m/s）では、解析ケース No.1 と比べて損傷が約0.4～0.5へ増加したが、実験結果とは異なる非貫通の結果となった。次に、Banerjee らの入力パラメータを用いた解析ケース No.3 および No.4 では、損傷が蓄積する位置については北田らのパラメータを用いたケースの結果と同様であった。ただし、解析ケース No.4 では損傷が約2倍程度増加して限界値を超えて破断が生じた。この理由は、ひずみ速度の増加によって破断時の相当塑性ひずみが小さくなったためと考えられる。

4. 結言

- (1) SS400 鋼板に対して半球状の先端を有する飛翔体の衝突実験を行った結果、非貫通の場合には裏面に2段階の変形がみられ、貫通発生時にはその境界部が破壊して貫通が生じることがわかった。
- (2) 鋼板の材料モデルに応力三軸度による破断ひずみの低下を考慮した Johnson-Cook の破壊モデルを用いることで、鋼板の破断をある程度再現できた。

参考文献

- 1) G.R. Johnson, W.H. Cook : A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, Proceeding of 7th International Symposium on Ballistics, pp.541-547, 1983.
- 2) G.R. Johnson, W.H. Cook : Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, Engineering Fracture Mechanics, Vol.21, pp.31-48, 1985.
- 3) 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, Vol83, No.851, p.16-00501, 2017.
- 4) A. Banerjee, S. Dhar, Acharyya, D.Datta, N.Nayak : Determination of Johnson cook material and failure model constants and numerical modelling of Charpy impact test of armour steel, Material Science & Engineering, A640, pp.200-209, 2015.

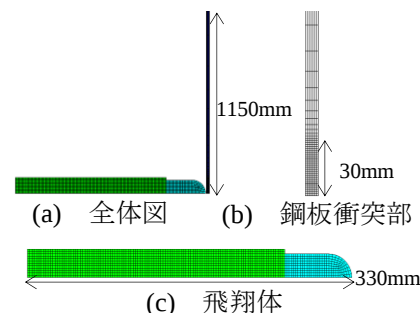


図-5 解析モデル

表-3 解析定数

解析条件			試験体 (SS400鋼板)			
パラメータ	記号	単位	No.1	No.2	No.3	No.4
衝突速度	-	m/s	66.8	70.9	66.8	70.9
ヤング係数	E	Gpa	205			
密度	ρ	g/cm ³	7.85			
ポアソン比	ν	-	0.3			
Johnson-Cook 降伏基準	A	MPa	324			
	B	MPa	592			
	n	-	0.59			
	C	-	0.15			
Johnson-Cook 破壊基準	D ₁	-	0.05		0.34	
	D ₂	-	0.8		1.95	
	D ₃	-	-0.44		-2.32	
	D ₄	-	-0.046		0	

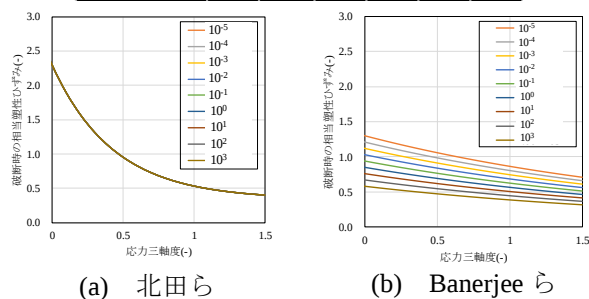


図-6 破断時の相当塑性ひずみ～応力三軸度関係

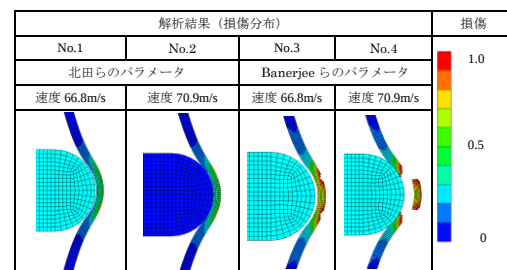


図-7 鋼板の破壊状況（損傷分布）