

## 平坦状の先端を有する飛来物衝突を受ける鋼板の貫通破壊に関する数値解析的研究

防衛大学校 学生会員 ○濱田 匠李 正会員 別府 万寿博 市野 宏嘉

## 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、竜巻飛来物や火山噴石が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。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 130m/s 程度であると想定されている<sup>1)</sup>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。本研究は、平坦状の先端部を有する飛翔体を衝突速度 40~100m/s で SS400 鋼板に衝突させる実験を行うとともに、実験に対する数値解析を行い、鋼板の貫通破壊について検討を行ったものである。

## 2. 実験の概要と鋼板の破壊性状

衝突実験は、図-1 に示す高圧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。飛翔体は、図-2 に示すように長さ 280mm の後部の先端に、長さ 50mm、直径 50mm の平坦状の先端部を取り付けた。質量は 6.0kg、材質は S45C である。図-3 に、鋼板の外観および設置状況を示す。鋼板の寸法は 1150mm×1150mm、板厚 6mm、9mm および 12mm である。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。鋼板の力学特性については、板厚 6mm の降伏応力および引張強度はそれぞれ 343N/mm<sup>2</sup> および 452N/mm<sup>2</sup> であり、伸びは 31% である。また、板厚 9mm および 12mm の試験体は、いずれも降伏応力および引張強度がそれぞれ 323N/mm<sup>2</sup> および 428N/mm<sup>2</sup> であり、伸びは 31% である。表-1 に、実験ケースを示す。板厚 6mm、9mm および 12mm の鋼板に対し、それぞれ衝突速度を 4 段階に変化させ、合計 12 ケースの実験を実施した。板厚 6mm の非貫通および貫通ケースについて鋼板の変形および貫通破壊性状を、図-4 に示す。板厚 6mm で衝突速度 57.1m/s のケースでは鋼板の破壊モードは非貫通となり、鋼板に貫通は生じなかったが、飛翔体が衝突した面の外縁部周辺に約 1mm の凹みが生じた。また、衝突部の真裏には飛翔体の直径よりも約 0.5mm 大きい突起が生じた。衝突速度を 58.5m/s に増加させると、飛翔体が衝突した面の外縁部周辺が押し抜かれるような貫通が生じた。板厚 9mm および 12mm のケースについても、同様の変形および貫通破壊性状であった。

## 3. 数値解析結果および考察

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 を使用した。解析モデルは変形の対称性を考慮し、3 次元軸対称系の 1/4 モデルとした。解析の対象は、板厚が 6mm で衝突速度 58.5m/s (貫通) のケースである。鋼板は中心から 300mm までをモデル化し、1mm×1mm の要素分割とした。また、飛翔体は計算効率を考慮した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、飛翔体モデルの節点に初速度を設定した。材料定数を表-2 に示す。材

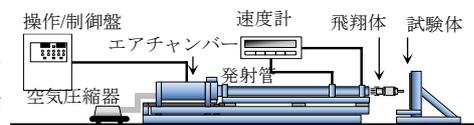


図-1 高圧空気式飛翔体発射装置

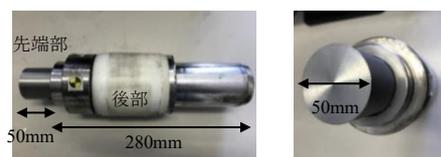


図-2 平坦状鋼製飛翔体

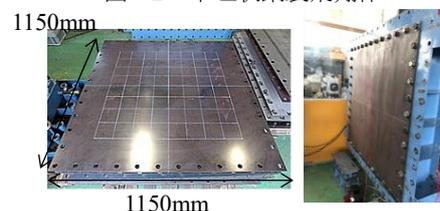


図-3 鋼板の外観および設置状況

表-1 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	41.6
2			52.1
3			57.1
4			58.5
5			62.7
6	9mm		63.6
7			67.8
8			77.4
9			83.5
10	12mm		86.7
11			90.6
12			95.1

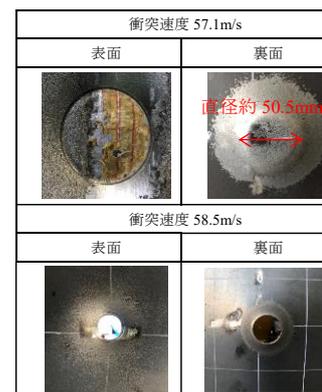


図-4 鋼板の変形および貫通破壊性状

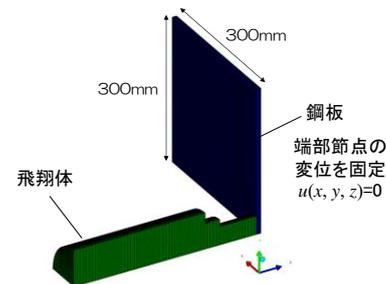


図-5 解析モデル

キーワード 衝突作用, 鋼板, 貫通, 飛翔体

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 E-mail : ed19003@nda.ac.jp

料定数は、著者らが行った材料実験の結果<sup>2)</sup>から決定した。材料モデルにはひずみ速度依存性を考慮するため、Johnson-Cookの降伏基準<sup>3)</sup>を用いた。また、破壊基準として応力三軸度を考慮したJohnson-Cookの破壊基準<sup>4)</sup>を用いた。図-6(a)に、動的強度倍率～ひずみ速度関係を示す。図に示すように、ひずみ速度の増加に伴い、強度が増加するモデルとした。図-6(b)に、破断ひずみ～応力三軸度関係を示す。図に示すように、ひずみ速度の増加に伴う破断ひずみの低下を考慮した。解析結果として、飛翔体の速度時間関係の比較を図-7に示す。図に示すように、実験結果を概ね再現するとともに、貫通発生時間は、実験では時刻0.8msであったのに対し、解析では時刻0.9msとなった。図-8に、鋼板の変形および破壊の進展を示す。図から、衝突後時刻0.6msで鋼板裏面の要素に破壊が生じて破壊が裏面から表面に向けて進展し、時刻0.9msで貫通が生じた。図-9に、各時刻における鋼板の速度分布を示す。衝突直後は飛翔体衝突部に大きな速度が生じ、時刻0.2msで一度飛翔体中央部と鋼板が離れる挙動が認められた。その後、鋼板中央部が一度減速し、時刻0.5msで再度飛翔体中央部と鋼板が衝突して、鋼板中央部が加速するとともに、鋼板裏面の要素に破壊が生じた。このように、鋼板中心部とその周辺に速度差が生じることで、要素に破壊が生じた部分の周辺に変形が局所化して、破断が生じたと考えられる。

4. 結言

本研究で得られた成果を以下に要約する。

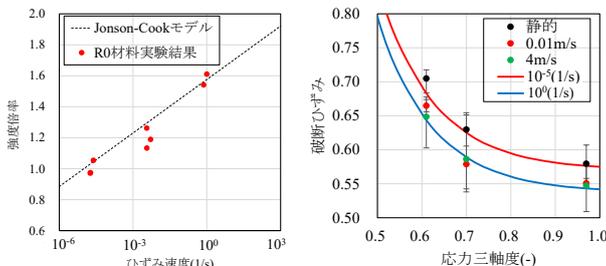
- (1) 平坦状の先端部を有する飛翔体を衝突速度40～100m/sでSS400鋼板に衝突させる実験を行った。その結果、鋼板に貫通が生じると、飛翔体が衝突した面の外縁部周辺が押し抜かれるような破壊性状を示した。
- (2) 鋼板の材料モデルにひずみ速度効果を考慮したJohnson-Cookの降伏基準および応力三軸度による破断ひずみの低下を考慮したJohnson-Cookの破壊モデルを用いることで、実験結果をある程度再現できた。

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1409172号，改訂2014。
- 2) 濱田匠李，別府万寿博，堤成一郎，市野宏嘉：SS400鋼材の動的力学特性に及ぼす応力三軸度の影響に関する基礎的研究，土木学会論文集A2（応用力学），76巻2号，2020。
- 3) 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.
- 4) 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.

表-2 解析定数

解析定数			SS400鋼板		飛翔体先端部(S45C)
パラメータ名	記号	単位			
ヤング係数	E	Gpa	205		
密度	$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	7.85		
ポアソン比	$\nu$	-	0.3		
Johnson-Cook降伏基準	A	MPa	343	320	
	B	MPa	452	457	
	n	-	0.63	0.85	
	C	-	0.055	0.065	
Johnson-Cook破壊モデル	D <sub>1</sub>	-	0.57		
	D <sub>2</sub>	-	15		
	D <sub>3</sub>	-	-8		
	D <sub>4</sub>	-	-0.005		



(a) 強度倍率～ひずみ速度関係 (b) 破断ひずみ～応力三軸度関係

図-6 鋼板のひずみ速度効果および破断ひずみ

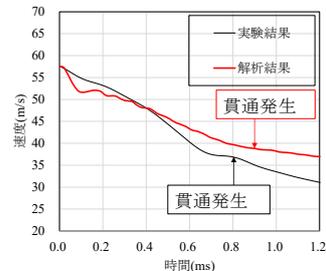


図-7 飛翔体の速度～時間関係

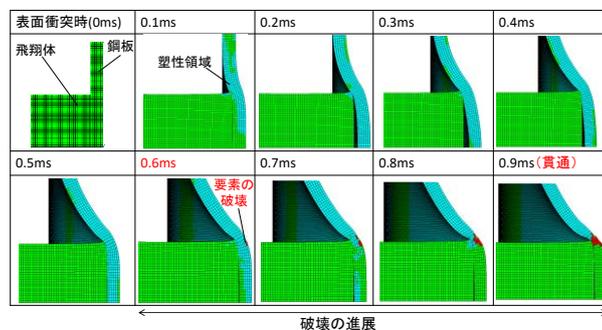


図-8 鋼板の変形および破壊の進展状況

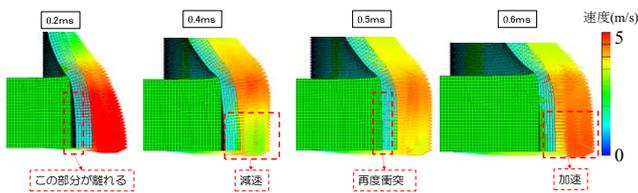


図-9 鋼板の速度分布