

鋼棒の衝突を受ける鋼板の貫通メカニズムに関する数値解析的検討

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

鋼製の平板が衝突作用を受けると、一般的には衝突エネルギーを吸収して延性的な破壊を示す。しかし、著者らが過去に行ったSS400 鋼板に対する鋼棒の衝突実験においては、衝突速度が50~60m/s と大きいため、衝突部外縁周辺が破断するような局部的かつ脆性的な貫通モードを示した¹⁾。本研究は、このようなSS400 鋼板の貫通モードを対象として、数値シミュレーションを行ったものである。飛翔体の速度をパラメータとして、鋼板の脆性的な貫通メカニズムについて検討を行った。

2. 解析ケース

解析の対象とした衝突実験は、厚さ 9mm の SS400 鋼板に対し、鋼製飛来物を衝突速度 57m/s で衝突させて貫通が生じたケースである。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。鋼板は鋼製の裏面支持具にボルトを用いて4辺固定し、飛翔体は図-2 に示すように飛翔体の先端に丸鋼(φ22)を取付けて衝突させた。飛翔体の質量は、4.3kg である。試験体の貫通性状を図-3 に示す。鋼板の変形や破壊に対する速度の影響を比較検討するため、衝突速度 10m/s、57m/s および 100m/s のケースについて解析を行った。

3. 解析モデル

解析モデルは、図-4 に示す2次元軸対称モデルとした。飛翔体は半径方向を5.5mm、長さ方向を5mmで分割し、総要素数は280とした。飛翔体後部は計算効率を考慮し、簡易的なモデルとした。初期条件として、飛翔体モデルの全節点に衝突速度を与えた。鋼板は厚さ方向を9分割、長さ方向を50分割し、衝突部周辺の挙動を詳しく観察するため、鋼板中心部30mmについては1mm×1mmの要素とし、鋼板中心から30mm以降は徐々に粗い要素を用いた(総要素数450)。境界条件は、鋼板の最上部の節点に対してx、y方向自由度を固定した。

表-1に、飛翔体と鋼板の材料定数を示す。材料モデルにはひずみ速度依存性および熱の影響を考慮するため、Johnson-Cookの降伏基準を用いた。材料定数についてはJIS規格値を用い、解析に用いる構成則の中では、真応力~真ひずみに変換し、鋼板の破断は、相当塑性ひずみが破断ひずみに達した要素を削除することで表現した。

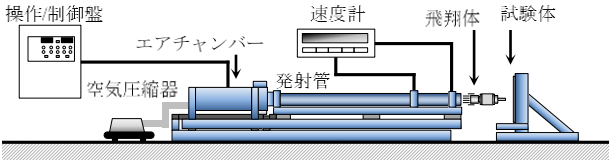


図-1 高圧空気式飛翔体発射装置

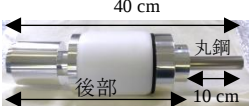


図-2 鋼製飛翔体

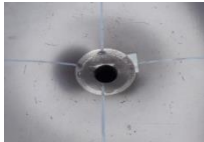


図-3 鋼板の貫通性状

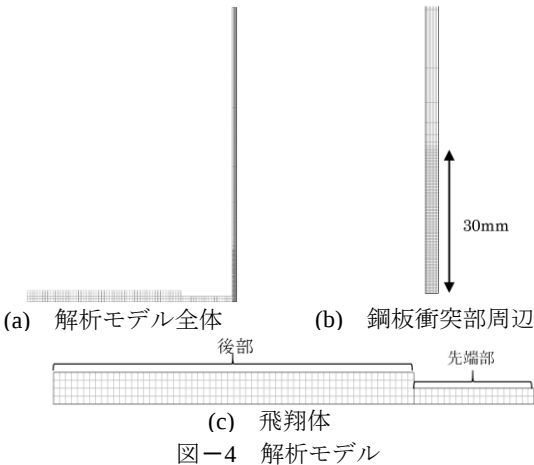


表-1 材料モデルおよび材料定数

項目	SS400 (鋼板および飛翔体先端部)	Projectile Steel (飛翔体後部)
密度 (g/cm ³)	7.85	10.61
ヤング率 (kN/mm ²)	200	200×10 ³
ポアソン比 (-)	0.3	0.3
構成則	Johnson-Cook $\sigma = (A + B\epsilon_p^n) \left(1 + C \log \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) (1 - T^{*m})$ $T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}$ $A=245 \text{ N/mm}^2, B=1420 \text{ N/mm}^2,$ $n=1.0, C=0.055, \dot{\epsilon}_0=0.01 \text{ s}^{-1},$ $T_{room}=293\text{K}, T_{melt}=1796\text{K}$	von Mises
破壊則	相当塑性ひずみ 破断ひずみ 17%	なし
エロージョン則	相当塑性ひずみ 破断ひずみ 17%	なし

キーワード 鋼板、貫通、高速飛翔体、衝突解析

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

4. 解析結果

図-5 に、飛翔体の速度～時間関係を示す。図中の実験結果は、飛翔体の変位を高速ビデオカメラで撮影し、その変位を微分して求めたものである。図から、解析結果は実験結果と同様に速度が低下し、いずれも衝突後 0.3～0.4ms で速度が一定値 45～50m/s を示した。衝突時における鋼板衝突部の相当塑性ひずみ分布を図-6 に示す。飛来物の衝突部周辺で鋼板の塑性変形が局部的に発生しており、実験結果と同様に、飛来物衝突面の外縁部周辺が破断するような脆性的な破壊モードを再現している。この際、衝突後約 0.2ms において鋼板裏面中央の要素に過大なひずみが発生し、初期亀裂が裏側から表面へ進展した。この破壊が約 0.3ms で表面へ到達することで、貫通が生じていることがわかる。

各衝突速度における鋼板変形状況を、図-7 に示す。図から、衝突速度 10m/s の場合は、鋼板全体に変形が生じる応答を示した。一方、衝突速度 57m/s および 100m/s の場合は、飛翔体衝突部周辺のみに変形が生じる局部的な変形応答を示していることから、衝突速度が増加すると、鋼板の変形および貫通モードが全体的な応答から局部的な応答に変化することを示している。鋼板に貫通が生じた衝突速度 100m/s における鋼板衝突部の相当塑性ひずみ分布を、図-8 に示す。衝突速度 57m/s の場合とは異なり、鋼板の初期亀裂は衝突面の外縁周辺に生じる。その後、裏面に亀裂が発生し、それぞれの亀裂から破壊が進展することで貫通している。初期亀裂発生時において鋼板衝突部に生じた熱分布を、図-9 に示す。各衝突速度において、初期亀裂が生じた部分周辺の上昇温度は、いずれも 20～30℃である。この温度上昇による応力の低下は 1.5～2%程度であるため、この速度帯では衝突時に発生する温度が破壊に与える影響は小さいと考えられる。

5. 結言

本研究は、SS400 鋼板に対する鋼棒の衝突解析を行い、鋼板の貫通メカニズムについて数値解析的検討を行ったものである。鋼棒を衝突速度 57m/s で衝突させた場合、初期亀裂が鋼板裏面中央付近で発生し、その後、裏側から表面にかけて破壊が進展することで脆性的な貫通モードが生じることがわかった。また、衝突速度を増加させることで、鋼板の変形および破壊が全体的な応答から局部的な応答に変化した。この際、初期亀裂の発生位置が鋼板裏面から衝突部の外縁周辺へ移行し、破壊性状が変化することがわかった。

謝辞

本研究の一部は、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) 別府万寿博, 間瀬辰也, 中田達也: 竜巻飛来物に対する鋼板の合理的な補強方法に関する研究(その2) 実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 2016.8
- 2) 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, 2017.6

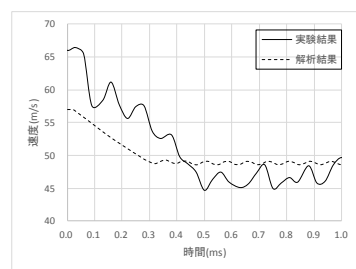


図-5 飛翔体の速度～時間関係

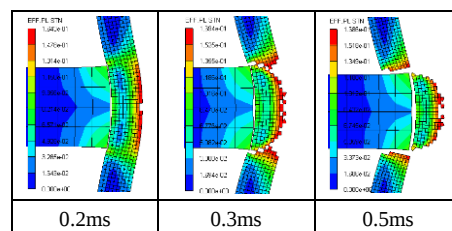


図-6 相当塑性ひずみ分布(57m/s)

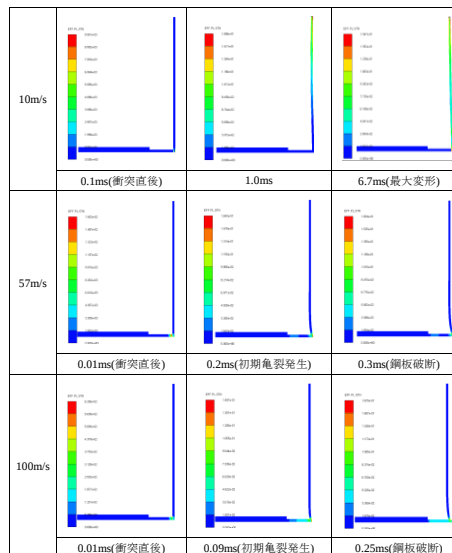


図-7 鋼板の変形状況(相当塑性ひずみ分布)

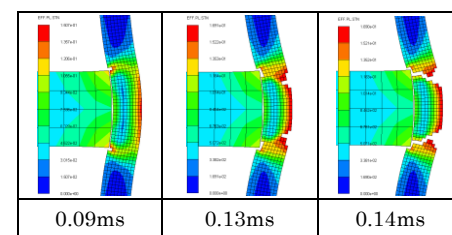


図-8 相当塑性ひずみ分布(100m/s)

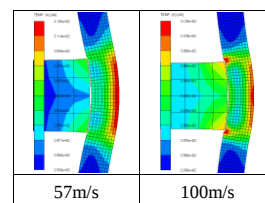


図-9 初期亀裂発生時の熱分布