

## 論文の内容の要旨

### 1 申請者

防衛大学校 濱田 匠李

### 2 論文題目

飛来物衝突を受ける鋼板の耐貫通性能に関する研究

### 3 論文の内容の要旨 (博士:2,000 字程度)

近年、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などによる衝突 (10m/s ~130m/s) 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いる。原子力規制委員会や内閣府から原子力発電所や火山噴石に対する退避壕の安全性評価に関する指針類が示されている。これらの衝突荷重に対する防護構造物の設計および補強法においては、鉄筋コンクリート版に加えて鋼板が多く用いられている。例えば、火山噴石に対する退避壕では、鉄筋コンクリート造の退避壕のみならず、鋼板を使用することによって噴石に対する耐衝撃性を高めた鋼製の退避壕等について検討が行われている。また、原子力関連施設に対する飛来物対策として鋼板が用いられており、竜巻影響評価における建物および設備の構造安全性の照査に際しては、飛来物衝突を受ける鋼板の耐衝撃設計法の確立が求められている。

本研究では、竜巻による飛来物や火山噴石の衝突に対する防護構造物の設計法に資するため、衝突速度約 30m/s~120m/s の飛翔体の衝突を受ける鋼板の貫通評価法について、材料実験、衝突実験および数値解析に基づいて検討を行ったものである。本研究で対象とする速度帯においては、鋼板の衝突部には高い圧力が発生することで多軸応力状態となり、変形時のひずみ速度も増加することから、鋼板の変形や貫通破壊が局所化することが想定される。そのため、まず、多軸応力状態や高ひずみ速度下における鋼材の材料特性について調べた。既往の研究によると、静的載荷時においても、鋼材の応力三軸度が鋼材の破断ひずみに影響を及ぼすという報告がある。そこで、限定されたひずみ速度の条件ではあるが、動的載荷時における応力三軸度と鋼材の破断ひずみの関係を実験的に調べた。SS400 鋼材を用いた動的引張試験の結果、材料の降伏応力および引張強度はひずみ速度の増加に伴って強度倍率が増大した。また、応力三軸度およびひずみ速度の増加に伴う破断ひずみの低下が確認された。

次に、質量 6.0kg、直径 50mm の平坦、半球および円錐状の先端を有する飛翔体を、速度約 30m/s~120m/s で板厚 6mm、9mm および 12mm の SS400 鋼板に対して衝突させる実験を行い、鋼板の変形および貫通破壊について検討を行った。実験では、高速度ビデオカメラによる連続画像から衝突前後における飛翔体の変位-時間関係を求め、これを微分して速度-時間関係を算定した。また、鋼板のひずみ応答や支点反力を計測して、これらのデータを比較するとともに、鋼板の変形および破壊の特徴を観察することにより鋼板の貫通破壊挙動を

考察した。衝突実験の結果、鋼板の残留変位分布から、いずれの先端形状においても、鋼板の変形は中心部周辺に生じる局所的な応答であり、正規化した変位分布形状は板厚や衝突速度に関わらず類似した形状であることがわかった。また、先端形状の違いによって破壊性状が異なることがわかった。さらに、既往の貫通評価式である BRL 式を準用し、先端形状を考慮するための係数（先端形状係数） $\alpha$  を含む修正 BRL 式を提案した。先端形状係数  $\alpha$  を本実験と整合するように調整した結果、平坦、半球および円錐状飛翔体の時、それぞれ 1.0、1.1 および 0.7 とすると実験結果と概ね良い一致を示した。

続いて、衝突実験に対する数値解析を行い、鋼板の貫通破壊メカニズムについて調べた。数値解析には、鋼板の降伏基準にひずみ速度依存性を考慮した Johnson-Cook の降伏基準を用い、破壊基準には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 Johnson-Cook の破壊モデルを用いた。数値解析の結果、平坦及び半球状飛翔体においては、衝突時に飛翔体先端部と鋼板が接触した領域が一度鋼板と離れて運動し、その後に飛翔体先端の外縁部が鋼板と点接触した状態で変形が進展する挙動を示した。鋼板の破壊は初期に離れた領域とその外側の領域の境界付近で生じた。円錐状飛翔体においては、飛翔体と鋼板は点接触で衝突し、接触部には力が集中的に作用して先端部が押し込むことで変形が進展した。鋼板の破壊は鋼板の裏面中心に生じた。また、正規化した変位分布から、いずれの先端形状においても、中心部に局所的な変位が生じて変形範囲が支点に向かって進展し、中心と変形領域の端部との間の領域には伸び変形が生じていることがわかった。さらに、変形の特徴点について断面のひずみおよび応力分布の分析を行った結果、板厚および衝突速度が異なるケースでも、特徴点の断面のひずみおよび応力分布が類似した応答を示すことがわかった。

最後に、実験および数値解析結果から得られた破壊メカニズムに基づく応答計算法を提案した。応答計算により求めた変形角と修正 BRL 式より算出した限界変形角を比較することで貫通評価を行った結果、実験結果と概ね整合した。

#### 4 キーワード（5 個程度）

飛来物衝突, SS400鋼板, 貫通, 耐衝撃設計