

飛来物衝突を受ける鋼板の耐貫通性能に関する研究

防衛大学校理工学研究科後期課程

装備・基盤工学系専攻 防災工学教育研究分野

濱田 匠李

令和4年3月

本研究の概要

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の衝突を対象とした衝突 ($10\text{m/s} \sim 130\text{m/s}$) 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に対しては、鉄筋コンクリート造の退避壕のみならず、鋼板を使用した補強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も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。

本研究は、衝突速度約 $30\text{m/s} \sim 120\text{m/s}$ の飛来物衝突を受ける鋼板の耐貫通性能について調べたものである。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。次に、平坦、半球および円錐状の先端を有する鋼製飛翔体を、速度約 $30 \sim 120\text{m/s}$ の範囲で、板厚 6mm , 9mm および 12mm の鋼板に衝突させる実験を行った。実験結果に基づいて、鋼板の貫通挙動や耐貫通性能について調べた。また、既往の貫通評価式である BRL 式に準じて、先端形状に関する係数を考慮した修正式を提案した。さらに、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。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、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。

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 鋼材の力学特性に関する既往の研究	1
1.2.1 鋼材の力学特性.....	1
1.2.2 応力-ひずみ関係および降伏応力および引張強度に及ぼすひずみ速度の影響....	3
1.2.3 変形能力に及ぼすひずみ速度の影響	4
1.2.4 破断ひずみに及ぼす応力三軸度の影響	4
1.3 衝突作用を受ける鋼板の耐衝撃性に関する研究.....	5
1.3.1 衝突作用を受ける鋼板の耐衝撃性に関する研究の概要.....	5
1.3.2 低速度衝突を受ける鋼板の耐衝撃性	6
1.3.3 高速度衝突を受ける鋼板の耐衝撃性	6
1.3.4 中速度衝突を受ける鋼板の耐衝撃性	7
1.3.6 鋼板の貫通限界評価式	8
1.4 既往の研究における問題点と今後の課題.....	9
1.5 研究の目的と概要	10
1.6 本論文の構成.....	10
第2章 ひずみ速度が鋼材の動的強度特性および破断ひずみに及ぼす影響	11
2.1 序言.....	11
2.2 試験の概要	11
2.2.1 急速引張試験の概要.....	11
2.2.2 引張試験体の概要および計測要領	13
2.2.3 試験結果の評価および実験ケース	16
2.3 実験結果.....	17
2.3.1 破壊の特徴.....	17
2.3.2 応力-ひずみ関係	19
2.3.3 強度特性のひずみ速度依存性.....	20
2.3.4 DICによるひずみの特徴	24
2.4 結言.....	27
第3章 飛翔体衝突を受ける鋼板の貫通破壊挙動に関する実験的検討	28
3.1 序言.....	28
3.2 実験の概要	28
3.2.1 実験装置の概要.....	28
3.2.2 飛翔体および鋼板	29

3.2.3	計測項目	30
3.2.4	実験ケース	31
3.3	平坦状飛翔体を用いた衝突実験結果	32
3.3.1	鋼板の変形および破壊性状	32
3.3.2	飛翔体の速度、支点反力および鋼板のひずみ－時間関係	40
3.4	半球状飛翔体を用いた衝突実験結果	44
3.4.1	鋼板の変形および破壊性状	44
3.4.2	飛翔体の速度、支点反力および鋼板のひずみ－時間関係	52
3.5	円錐状飛翔体を用いた衝突実験結果	57
3.5.1	鋼板の変形および破壊性状	57
3.5.2	飛翔体の速度、支点反力および鋼板のひずみ－時間関係	64
3.6	結言	69
第4章	飛翔体衝突を受ける鋼板の貫通破壊挙動に関する数値解析的検討	70
4.1	序言	70
4.2	衝突実験に対する数値解析	70
4.2.1	数値解析モデル	70
4.2.2	構成則および解析定数	71
4.2.3	実験結果の再現性	73
4.2.4	変形および破壊の特徴	75
4.2.5	断面のひずみおよび応力分布	97
4.3	結言	112
第5章	飛来物衝突を受ける鋼板の貫通評価法の提案	113
5.1	序言	113
5.2	貫通評価法の概要	113
5.3	変形モデルによる応答計算と限界変形角の算出	115
5.3.1	変形モデルによる応答計算	115
5.3.2	限界変形角の算定	119
5.4	貫通評価モデルの妥当性に関する検討	119
5.5	結言	125
第6章	結論	126
6.1	主要な成果および結論	126
6.1.1	第1章「序論」	126
6.1.2	第2章「ひずみ速度が鋼材の動的力学特性および破断ひずみに及ぼす影響」	126
6.1.3	第3章「飛翔体衝突を受ける鋼板の貫通破壊挙動に関する実験的検討」	126
6.1.4	第4章「飛翔体衝突を受ける鋼板の貫通破壊挙動に関する数値解析的検討」	127

6.1.5 第5章「飛来物衝突を受ける鋼板の貫通評価法の提案」	128
6.2 今後の課題	128
謝辞.....	130
参考文献.....	131
研究に関連して発表した論文等	135

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

土木・建築分野において対象としている衝撃現象は、豪雨によって生じる土石流や急崖での落石、直下型地震などの「自然的」なものと、危険物の貯蔵・運搬時の爆発事故や車両・航空機の衝突事故などの「人為的」なものに大別される。これらの衝撃作用の発生確率は非常に小さいが、一旦発生すると人命や構造物に甚大な被害を及ぼすものと考えられる。世界的なテロ事件の増加や気候変動による豪雨災害の増加などを考慮すると、社会的に重要な構造物に対しては、これらの衝撃作用に対しても構造物の安全性を確保する必要があり、衝撃力に対する構造物の応答評価法や耐衝撃設計法に関する研究の重要性が増してきていると言える。

国内では、土石流や落石および車両の防護柵への衝突などを対象とした比較的低速度（10m/s 以下）の衝突に対する研究が行われており、日本道路協会や土木学会等において落石防護構造物の耐衝撃設計法の指針が策定されている¹⁾³⁾。また、航空機の衝突や爆破テロによる飛散物を想定した飛来物の衝突、および原子力関連施設などの重要施設を対象とした高速度の衝突⁴⁾（100m/s～1000m/s）に関する研究も国内外で行われている。近年では、竜巻によって巻き上げられた物体（竜巻飛来物）や火山噴石などの衝突を対象とした衝突（10m/s～100m/s）に対する防護構造物の設計および補強法についても検討が行われており、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⁵⁾⁷⁾。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に対しては、鉄筋コンクリート造の退避壕のみならず、鋼板を使用した補強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も検討が行われている⁷⁾。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⁸⁾、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。

1.2 鋼材の力学特性に関する既往の研究

本節では、鋼材の応力-ひずみ関係、鋼材の力学特性に及ぼすひずみ速度および応力三軸度の影響に関する既往の研究について概説する。

1.2.1 鋼材の力学特性

鋼材は延性、展性を有しており、形を自由に変えることができるため、様々な用途で用いられる。建築構造用に使用する鋼材は、建築基準法第 37 条により国土交通大臣の指定建築材料となっており、その品質が同法第 37 条第 1 項「国土交通大臣の指定する日本工業規格に適合するもの」または同第 2 項「定められた技術基準に適合しているとして国土交通大臣が認

定したもの」と規定されている。現在、同法第 37 条で構造用鋼材として指定され、かつ、設計用の基準強度等が定められている構造用鋼材には表-1.1 に示す種類がある。構造用鋼材のうち鋼板として用いられるのは、一般構造用圧延鋼材、溶接構造用圧延鋼材、建築構造用圧延鋼材、溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材および建築構造用ステンレス鋼材である。構造用鋼材は、引張強度に応じて鋼種が区分されている。例えば、SS400 は引張強度の特性値（最低値）が 400N/mm^2 である一般構造用圧延鋼材を意味し、土木・建築構造物においては最も多く用いられている鋼材である。

表-1.1 建築基準法で一般に使用が認められている建築構造用鋼材規格

規格	名称および鋼種	製品の種類
JIS G 3101	(一般構造用圧延鋼材) SS400, SS490, SS540	鋼板, 鋼帯, 形鋼, 平鋼, 棒鋼
JIS G 3106	(溶接構造用圧延鋼材) SM400A, SM400B, SM400C, SM490A, SM490B, SM490C, SM490YA, SM490YB, SM520B, SM520C	鋼板, 鋼帯, 形鋼, 平鋼
JIS G 3136	(建築構造用圧延鋼材) SN400A, SN400B, SN400C, SN490B, SN490C	鋼板, 鋼帯, 形鋼, 平鋼
JIS G 3114	(溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材) SMA400AW, SMA400AP, SMA400BW, SMA400BP, SMA400CW, SMA400CP, SMA490AW, SMA490AP, SMA490BW, SMA490BP, SMA490CW, SMA490CP	鋼板, 鋼帯, 形鋼
JIS G 3138	(建築構造用圧延棒鋼) SNR400A, SNR400B, SNR490B	棒鋼
JIS G 3444	(一般構造用炭素鋼鋼管) STK400, STK490	円形鋼管
JIS G 3475	(建築構造用炭素鋼管) STKN400W, STKN400B, STKN490B	円形鋼管
JIS G 3466	(一般構造用角形鋼管) STKR400, STKR490	角形鋼管
JIS G 3350	(一般構造用軽量形鋼) SSC400	軽量形鋼
JIS G 3353	(一般構造用溶接軽量H形鋼) SWH400	溶接軽量H形鋼
JIS G 4321	(建築構造用ステンレス鋼材) SUS304A, SUS316A, SUS304N2A, SUS14AA-CF	鋼板, 鋼帯, 形鋼, 平鋼, 円形鋼管, 角形鋼管, 軽量形鋼, 遠心鋳鋼管

1.2.2 応力-ひずみ関係および降伏応力および引張強度に及ぼすひずみ速度の影響

鋼材の応力-ひずみ関係の特性は様々な種類があるが、大きく分類すると、図-1.1(a)に示すように降伏棚（塑性流れ）がある鋼材と、図-1.1(b)に示す降伏棚がない鋼材に区分される。

小野ら⁹⁾は、性質の異なる種々の鋼材を用いた引張試験を行い、建築構造用圧延鋼材や一般構造用圧延鋼材などの普通鋼は降伏棚を示し、高引張力鋼、ステンレス鋼および低降伏点鋼などは降伏棚を示さないことを報告している。

降伏応力および引張強度は、いずれもひずみ速度の増加とともに上昇する。既往の研究によると、ひずみ速度の増加による強度等の上昇は静的強度に対する増加割合（動的倍率）で与えられることが多く、通常、ひずみ速度の指数または対数に対して表示されている。

これまでに、鉄筋や鋼板などを対象として、降伏応力や引張強度などに及ぼすひずみ速度の影響について研究が行われている¹¹⁾⁻¹⁵⁾。例えば、高橋¹⁵⁾は鋼板（SS400）および鉄筋（SR24, SD30 および SD34）を対象として、載荷速度を3種類（静的、低速および高速）に変化させた引張試験を行い、鋼材のひずみ硬化域における特性や破断ひずみに及ぼすひずみ速度の影響を調べている。その結果、①上降伏点の変化率については鋼種の違いによる影響は小さく、ひずみ速度の影響はほぼ同一である、②下降伏点の変化率はひずみ速度が $10^0/s$ の場合、SS400 が他の3種に比べて大きな値を示すが、全体的な傾向としてはひずみ速度の対数値に対して線形的に増加する、③引張強度の変化率および破断ひずみの変化率は、ひずみ速度の対数値の増加にともなって線形的に増加することを報告している。高橋の式は、鋼板（SS400）および鉄筋（SR24, SD30 および SD34）を対象として、載荷速度を3種類（静的、低速および高速）に変化させた引張試験により得られたものである。

$$DIF_{\sigma_{UY}} = 10^{m+c_1} \quad (1.1)$$

$$m = a_1 \log \dot{\epsilon} + b_1 \quad (1.2)$$

ここに、 $DIF_{\sigma_{UY}}$ は上降伏点の動的強度倍率、 $a_1=0.3796$ 、 $b_1=-0.2579$ 、 $c_1=0.993$ 、 $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度である。また、引張強度の動的強度倍率 DIF_{σ_c} は次式で表される。

$$DIF_{\sigma_c} = a_2 + b_2 \log \dot{\epsilon} \quad (1.3)$$

ここに、 $a_2=1.172$ 、 $b_2=0.037$ である。

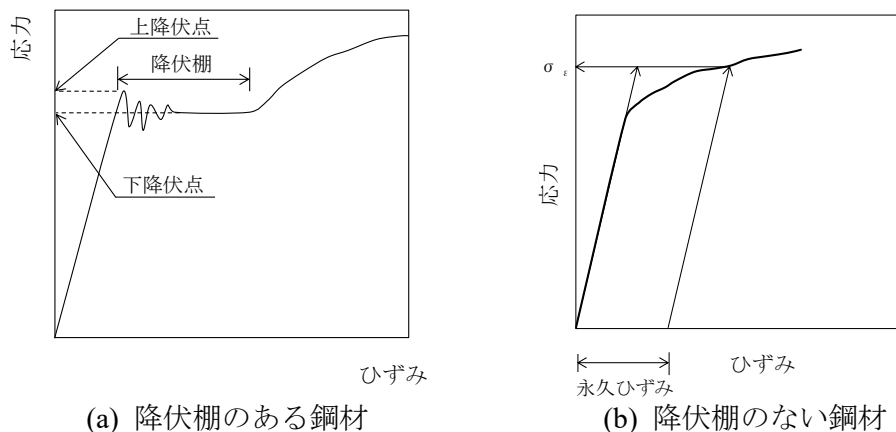


図-1.1 鋼材の応力-ひずみ関係の模式図

1.2.3 変形能力に及ぼすひずみ速度の影響

前項で述べたように、降伏応力や引張強度などの強度特性は、高いひずみ速度依存性を示すのに対し、変形についてはひずみ速度依存性が比較的小さいことが知られている。見波ら¹⁶⁾は、SM490A の高速引張試験を行い、伸び、絞りおよび一様伸びに及ぼすひずみ速度の影響について報告している。なお、一様伸びとは引張試験において、試験片平行部がほぼ一様に変形する永久伸びの限界値のことであり、通常は最大引張荷重に対応する永久伸びとして求められる。実験結果から、破断伸びや絞りについてはひずみ速度依存性が低いことを報告している。ただし、一様伸びについては、ひずみ速度約 $10^{-3}/s$ の時に約 0.09、ひずみ速度約 $10^{-1}/s \sim 10^2/s$ で約 0.07~0.05 に低下する傾向がみられることから、破断伸びや絞りと比較するとひずみ速度依存性が認められる。

1.2.4 破断ひずみに及ぼす応力三軸度の影響

既往の研究から、多軸応力状態の指標として、応力三軸度 η が定義されている¹⁰⁾。すなわち、応力三軸度とは平均応力を相当応力で除した値であり、以下の式で表される。

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3}{\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}} = \frac{\sqrt{3}}{3} \left\{ 1 + 2 \ln \left(1 + \frac{t_0}{4R} \right) \right\} \quad (1.4)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (1.5)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (1.6)$$

ここに、 σ_m ：平均応力 (N/mm²)、 $\bar{\sigma}$ ：相当応力 (N/mm²)、 σ_1 、 σ_2 および σ_3 ：主応力 (N/mm²)、 R ：切欠き半径 (mm)、 t_0 ：切り欠き底部の厚さ (mm) を示す。

大塚ら¹⁰⁾は、低強度鋼における延性破壊の発生に及ぼす応力三軸度の影響を調べるため、環状切欠き丸棒試験片を用いた引張試験を行っている。応力三軸度は切り欠き半径 R が小さいほど大きな値となる。実験の結果、応力三軸度が大きくなるにしたがい、降伏応力は増加し、破壊発生時のひずみが低下することを報告している。

1.3 衝突作用を受ける鋼板の耐衝撃性に関する研究

本節では、低、中および高速度の衝突を受ける鋼板の耐衝撃性に関する実験および解析に関する既往の研究および貫通限界評価式について述べる。

1.3.1 衝突作用を受ける鋼板の耐衝撃性に関する研究の概要

衝突作用を受ける鋼板の研究は過去に数多く行われているが、ここでは便宜的に衝突速度帯を低速度、中速度、高速度および超高速度の4つに区分する。表-1.3に、衝突速度の区分を示す。

低速度衝突とは衝突速度10m/s以下の衝突であり、土木分野における構造物としては落石防護構造物や港湾部の防波堤、車両の衝突等による衝撃荷重を対象に様々な研究が行われている。中速度衝突とは衝突速度10～100m/sの衝突であり、近年、竜巻飛来物や火山噴石が構造物に対して衝突することを想定し、防護構造物の設計法や補強方法が検討されている。高速度衝突とは衝突速度100～1000m/sの衝突であり、軍事的な問題に対する研究や原子力発電施設に対する航空機の衝突に関する耐衝撃設計法の研究がある。超高速衝突は、隕石の衝突などである。既往の研究では低速度および高速度衝突に関する研究が比較的多いため、まず低速度および高速度衝突に関する既往の研究をまとめ、その後に中速度衝突に関する近年の研究を整理する。

表-1.3 衝突速度の区分

速度帯の分類	静的	準静的	低速度	中速度	高速度	超高速度
載荷・衝突速度 (m/s)	0 ————— 1 ————— 10 ————— 100 ————— 10 ³ ————— 10 ⁵					
関連事象		波浪・地震動				
		船舶の衝突				
		キャスク・重量物の落下				
		土石流・落石				
		車両の衝突		タービンミサイルの衝突		
				航空機の衝突		
		車両の速度		小銃弾・砲弾の速度		隕石の速度
				航空機（ジェット）の速度		
動的効果	クリープ速度	一定ひずみ速度	試験体の機会的共振		弾性塑性波の伝播	衝撃波の伝播
	慣性力無視		慣性力の影響大			
	等温的		断熱的			

1.3.2 低速度衝突を受ける鋼板の耐衝撃性

車両衝突に対する新型車両用鋼製防護柵の性能評価として、伊藤ら^{17),18)}は橋梁用鋼製防護柵部材に対して静的載荷実験および重錘衝突実験を行い、鋼製防護柵支柱パイプの耐衝撃性について調べている。その結果、最大水平変位、最大水平荷重および残留変位の比較から、新型防護柵は緩衝性に優れた耐衝突性能を発揮することを明らかにしている。また、土木学会が提示している車両防護施設の包括設計コード¹⁹⁾においては、このような防護柵のほかにも板部材を用いたガードレール等が取り上げられている。土石流・落石を対象とした研究では、透過型砂防堰堤や落石防護柵の耐衝撃性に関する様々な研究が行われている^{20),21)}。嶋ら²⁰⁾は、極めて大きな土石流荷重が鋼製砂防堰堤に作用した場合の衝突解析を行い、砂防堰堤の破壊挙動について調べることで、計画規模を上回る土石流荷重に対する現行設計法の問題点について検討を行っている。解析結果から、想定した条件においては、衝突荷重や底板コンクリートの破壊状態などの局所的な応答に関しては衝突位置による影響が認められた。一方で、底板コンクリートへの影響は少なく、衝突エネルギーのほとんどが鋼製堰堤本体に吸収されることを報告している。つまり、本解析結果から、砂防堰堤の安定性を損なうような巨礫の衝突に対しても、鋼製砂防堰堤は鋼管によって衝突エネルギーを吸収し、転倒・滑動といった安定性にまで影響することはないことが確認されている。

1.3.3 高速度衝突を受ける鋼板の耐衝撃性

高速度衝突については、前述のとおり軍事的な問題に対して行われてきた研究や原子力発電施設に対する航空機の衝突に関する構造設計法に関する研究が数多く行われている²²⁾⁻²⁵⁾。国内では、南波ら²²⁾が航空機衝突時の衝撃荷重を受ける金属キャスク（使用済み燃料の貯蔵や輸送に用いられる専用の容器）の密封性能について研究を行っている。すなわち、原子力発電所の燃料貯蔵施設に民間航空機が衝突した場合を想定して貯蔵施設の局部破壊評価や衝撃荷重の算定を行うとともに、ひずみ速度依存性を考慮した Cowper & Symonds モデルを用いた数値解析により、金属キャスクの耐衝撃評価を行っている。また、国外においては Rosenberg ら²⁴⁾や Hiermaier²⁵⁾は、衝突速度 100m/s 以上の弾丸の衝突を受ける鋼板の破壊挙動について調べ、飛翔体の衝突速度や先端形状、鋼板の厚さや鋼種などが異なると破壊性状が異なることを示すとともに、それぞれの破壊挙動について詳細な検討を行っている。また、Chen らは、質量 25.8g の半球状飛翔体を用いて、板厚 1.36mm, 1.90mm および 2.86mm の軟鋼板に 200m/s ~ 400m/s で衝突させる実験を実施し、鋼板の変形および貫通に至るまでの過程を bulging deformation stage, dishing deformation stage, ductile hole enlargement stage および perforation followed by exit stage の 4 つの段階に区分した、エネルギー基準による鋼板の設計モデルを提案している。

1.3.4 中速度衝突を受ける鋼板の耐衝撃性

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が原子力関連施設などの重要施設に衝突することで被害が生じることが懸念されている。これまでに、飛来物衝突を受ける鋼板の貫通評価に関する研究は行われているが、主として衝突速度 100m/s 以上の衝突問題を対象としている。このため、近年では、原子力施設等の竜巻飛来物に対する防護設計を確立するために、日本でも実験や数値解析が行われている。近年行われた実験および解析的研究として、坂本ら²⁶⁾は竜巻飛来物を模擬した角形鋼管(1100kg)を板厚 9mm の鋼板(SS400 および SUS304)へ自由落下衝突させる実験を行うとともに、実験の再現解析を行っている。また、角形鋼管を対象として、次節に示す BRL 式へ入力する直径の設定方法について検討を行っている。南波ら²⁷⁾は、鋼管を用いた衝突速度 49m/s の衝突実験に対する数値解析を行い、鋼板試験体の貫通時に発生した最大相当塑性ひずみの値を考察し、応力多軸度係数(Triaxiality Factor : TF)の推奨値の妥当性や保守性を確認している。ここで、TF とは 3 軸方向の主応力の和を相当応力で除したものであり、多軸応力下における鋼材の破断ひずみの低下を示す係数である。土田ら^{28)~31)}は、飛翔体(質量 4.3kg)を速度 57m/s で鋼板に衝突させる実験を行い、BRL 式の保守性と衝突面の形状効果について検討するとともに、数値解析による実験結果の再現性について検討を行っている。また、飛来物の直径に関して、角形鋼管のような中空断面の場合は、外形寸法を基準として直径を設定する方が、実際の断面積と等価な円の直径を設定するよりも実験結果と整合することを明らかにしている。さらに、衝撃解析ソフト LS-DYNA を用いて、ミーゼスの降伏条件に多直線近似等方硬化則モデルを適用することで、鋼板の衝撃挙動を良く再現できることを示している。北田ら³²⁾は、実規模の鋼管(1300kg)を板厚 3mm~11mm の鋼板(SS400 および SUS304)へ自由落下させる実験を行うとともに、実験の再現解析を行っている。解析では、局所貫通における熱軟化の影響と多軸応力による延性低下の影響を考慮した材料モデルを適用した衝突解析を行い、実験結果を再現している。ただし、重錘落下実験による研究では、重錘落下実験における衝突速度(落下高さ)の制約のため、衝突速度を 20m/s 以下にして質量を増加させることで、衝突条件の運動エネルギーを想定した衝突エネルギーと一致させている。また、実験結果は貫通・非貫通の判定のみにとどまっているため、今後、想定している衝突速度(51m/s)における鋼板の破壊性状や破壊メカニズムについてもさらに検討する必要がある。

1.3.6 鋼板の貫通限界評価式

これまで鋼板の貫通を評価する実験式はいくつか提案されているが、これらの中でよく用いられる式として、BRL 式³³⁾および大手ら³⁴⁾の式がある。BRL 式は、飛翔体の質量、衝突速度および飛翔体直径をパラメータとしており、以下の式で表される。

$$T^{3/2} = 0.5MV^2 / (1.4396 \times 10^9 K^2 D^{3/2}) \quad (1.1)$$

ここに、 T ：貫通限界厚さ(m)、 M ：飛来物の質量 (kg)、 V ：飛来物の衝突速度 (m/s)、 K ：鋼板の材質に関する係数(≈ 1)、 D ：飛来物の直径 (m)である。

また、大手らは、飛翔体の先端形状が円柱、半球および円錐状の場合に適用できる破損限界板厚の評価式を提案している。ここで、鋼板に変形のみが生じる場合は非破損であり、亀裂や貫通が生じる場合が破損であると定義している。評価式は以下の式で表される。

$$T_d^{3/2} = E_f / (3.0 \times 10^8 D_e^{3/2}) \quad (1.2)$$

ただし、円錐状飛翔体に対しては、

$$D_e = T_d \left\{ 1 + 2.9 \left(\tan \frac{\theta_p}{2} \right)^{2.1} \right\} \quad (1.3)$$

また、円柱状、半球状および円錐状 ($D_e > D_m$ のとき) 飛翔体に対しては

$$D_e = D_m \quad (1.4)$$

ここに、 T_d ：破損限界厚さ (m)、 E_f ：破損限界エネルギー (kgf・m)、 D_m ：飛翔体直径 (m)、 θ_p ：円錐状飛翔体の先端角度である。適用範囲は、飛翔体速度 V ： $V=25\text{m/s} \sim 180\text{m/s}$ 、鋼板材質：SGV49 である。

1.4 既往の研究における問題点と今後の課題

各速度レベルにおける既往の研究を概観すると、衝突速度が大きくなるにつれて鋼板の破壊は局所的となることが知られている。また、衝突荷重を受ける鋼板の破壊形態は、鋼板の厚さや材料特性、飛翔体の形状や材質の相違、衝突速度に応じた応力波や慣性力の影響などのさまざまな要因に影響を受けることがわかっている。竜巻飛来物や火山噴石を対象とした速度 30～120m/s に対する鋼板の破壊現象は非常に複雑であるため、貫通破壊メカニズムについては未解明な点が多く、詳細な検討が十分に行われていないのが現状である。この衝突速度帯に対して現在提案されている鋼板の設計法では実験データに基づいた回帰式が用いられているが、実験の適用範囲外では使用できないことやばらつきが不明瞭であるなどの問題がある。なお、提案されている評価式の中では、飛翔体の運動エネルギーや直径をパラメータとする BRL 式が広く用いられているが、この評価式の根拠となる文献が非公開となっているため、評価可能な適用範囲が明らかでない。さらに、実験条件によっては保守的な値を与える場合が多く、合理的、経済的ではないという問題点が指摘されている。

これらの問題を解決するためには、鋼板の貫通破壊メカニズムの解明とそれに基づく合理的な評価法の確立が必要である。また、数値解析においては、鋼板の貫通挙動を精度よく再現する材料モデルを確立する必要がある。以下に課題を述べる。

(1) 鋼材の動的力学特性の検討

ひずみ速度および応力三軸度（多軸応力状態の指標）が鋼材の破壊に及ぼす影響を明らかにするため、載荷速度、応力三軸度をパラメータとした引張試験を行う必要がある。

(2) 鋼板の貫通破壊挙動に関する実験的検討

飛翔体の衝突速度（運動エネルギー）、先端形状および鋼板の板厚が貫通破壊に及ぼす影響を調べるため、これらをパラメータとした衝突実験を行い、貫通破壊挙動を調べる必要がある。

(3) 鋼板の変形および貫通破壊メカニズムの数値解析的検討

衝突実験に対する数値解析を行い、鋼板および飛翔体の材料モデルについて検討を行うとともに、変形および貫通破壊メカニズムについて検討する必要がある。

(4) 鋼板の貫通評価法の検討

実験及び数値解析から得られた貫通破壊メカニズムに基づく力学モデルを用いた貫通評価法を検討する必要がある。

1.5 研究の目的と概要

これまでに述べたように、速度 30~120m/s の衝突を受ける鋼板の耐貫通性能に関する研究は非常に少ないのが現状である。また今後、鋼板の貫通限界式を確立するにあたっては、鋼板の貫通メカニズムに関する知見を蓄積する必要がある。

本研究は、衝突速度約 30m/s~120m/s の飛来物衝突を受ける鋼板の耐貫通性能について調べるものである。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。次に、平坦、半球および円錐状の先端を有する鋼製飛翔体を、速度約 30~120m/s の範囲で、板厚 6mm, 9mm および 12mm の鋼板に衝突させる実験を行った。実験結果に基づいて、鋼板の貫通挙動や耐貫通性能について調べた。また、衝突実験に対する数値シミュレーションを行い、鋼板の貫通破壊メカニズムについて調べた。最後に、実験および数値解析結果に基づいて貫通評価法を提案した。

1.6 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。

第 1 章「序論」では、本研究の背景、鋼板の耐衝撃性ならびに鋼材の力学特性について既往の研究を整理し、研究の目的および概要について説明している。

第 2 章「ひずみ速度が鋼材の力学特性および破断ひずみに及ぼす影響に関する検討」では、急速載荷試験装置を用いてひずみ速度 10^{-5} ~ 10^0 /s における切欠き付試験片の動的引張試験を行い、SS400 鋼材の動的強度特性および破断ひずみに及ぼすひずみ速度および応力三軸度の影響について検討を行った。

第 3 章「飛翔体衝突を受ける鋼板の貫通破壊挙動に関する実験的検討」では、質量 6kg、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用いて、板厚 6mm, 9mm および 12mm の SS400 鋼板に対する速度約 30m/s~120m/s の衝突実験を行い、鋼板の貫通破壊および変形挙動について検討した。また、既往の評価式である BRL 式を用いて、実験結果と整合するような修正式を提案した。

第 4 章「飛翔体衝突を受ける鋼板の貫通破壊挙動に関する数値解析的検討」では、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 Johnson-Cook の破壊モデルを用いた数値解析シミュレーションを行い、実験の再現性を確認するとともに鋼板の変形および貫通破壊メカニズムについて検討した。

第 5 章「飛来物衝突を受ける鋼板の貫通評価法の提案」では、実験および数値解析結果に基づいて提案した鋼板の変形モデルを用いた貫通評価法を検討した。

第 6 章「結論」では、本研究の成果を総括するとともに、今後の研究課題について整理した。

第2章 ひずみ速度が鋼材の動的強度特性および破断ひずみに及ぼす影響

2.1 序言

本研究で対象とする速度帯（10m/s～130m/s）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，鋼板の貫通破壊メカニズムを検討するにあたっては，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る必要がある．静的な材料試験結果によると，鋼材の応力三軸度が強度特性および破断ひずみに大きな影響を及ぼすことが知られている^{1)~5)}．すなわち，鋼材は多軸応力状態において，降伏応力および引張強度は上昇し，破断ひずみが小さくなることが実験的に知られている．本研究は，飛来物衝突を受ける鋼板の貫通挙動を対象としており，鋼板の動的な力学特性を把握する必要がある．過去に，ひずみ速度が鋼材の降伏応力や引張強度特性に及ぼす影響を調べた研究例はある^{6)~8)}が，応力三軸度による破断ひずみの低下に与える影響を調べた例は非常に少ないのが現状である．

本章では，高ひずみ速度下および多軸応力状態における鋼材の材料特性を調べるため，サーボ制御式急速载荷装置を用いて，切欠き半径の異なる SS400 平板試験体に対し静的，ひずみ速度 $10^{-5}/s$ （静的）， $10^{-2}/s$ および $10^0/s$ における動的引張実験を行う．この際，鋼板試験体の切欠き半径を変化させることで，異なる応力三軸度を設定した．実験結果に基づいて，ひずみ速度が SS400 鋼材の強度特性および破断ひずみに与える影響について調べた．

2.2 試験の概要

2.2.1 急速引張試験の概要

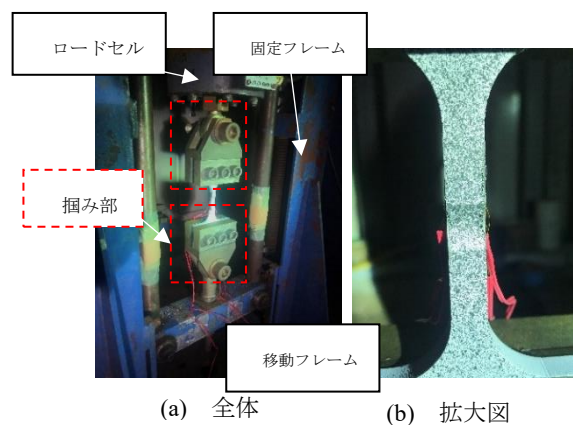
静的および動的引張試験は，図-2.1 に示すサーボ制御式急速载荷装置を用いて行った．なお，最大载荷力は 980kN，最大载荷速度は 4m/s である．本実験装置は，油圧とガス圧を利用したアクチュエーターにより，設定した変位速度を一定に保持した状態で载荷できる機能を有している．本実験装置は圧縮载荷用に作製されているが，図-2.2 に示す引張試験装置を併用することで，引張試験を行うことが可能となる．試験体の設置状況を，図-2.3 に示す．引張試験装置の掴み部に試験体を固定し，引張用载荷フレームを下方向に载荷することで試験体に引張力を与えることができる．



図-2.1 サーボ制御式急速载荷装置



図-2.2 引張試験装置



(a) 全体

(b) 拡大図

図-2.3 試験体設置状況

2.2.2 引張試験体の概要および計測要領

引張試験に用いた試験体の形状を、図-2.4 に示す。試験体の形状は、金属材料の引張試験に用いる標準試験片について規定する JISZ2201 の 7 号試験片によるものとし、平行部の長さとは幅はそれぞれ 50mm および 10mm、厚さは 9mm である。試験体の種類は、切欠き無しの平板試験体および切欠き半径の異なる 3 種類（切欠き半径 $R=35.0\text{mm}$ 、 8.8mm および 2.5mm ）の平板試験体である。切欠き部は、いずれの切欠き半径の場合も試験体の中央部に設置し、切欠きを有する試験体の切欠き底部の厚さを 4mm とした。以降では、それぞれの試験体を、試験体 A（切欠き無しの平板）、試験体 B ($R=35.0$)、試験体 C ($R=8.8$) および試験体 D ($R=2.5$) と称する。

既往の研究から、試験体に切欠きを設けることで、引張力が作用した際に多軸応力状態となることが知られている¹⁾。この指標として、応力三軸度 η が定義されている。すなわち、応力三軸度とは平均応力を相当応力で除した値であり、以下の式で表される。

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3}{\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}} = \frac{\sqrt{3}}{3} \left\{ 1 + 2 \ln \left(1 + \frac{t_0}{4R} \right) \right\} \quad (2.1)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (2.2)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2.3)$$

ここに、 σ_m ：平均応力 (N/mm^2)、 $\bar{\sigma}$ ：相当応力 (N/mm^2)、 σ_1 、 σ_2 および σ_3 ：主応力 (N/mm^2)、 R ：切欠き半径 (mm)、 t_0 ：切り欠き底部の厚さ (mm) を示す。

式 (2.1) から、試験体 A（切欠き無し）、試験体 B ($R=35.0\text{mm}$)、試験体 C ($R=8.8\text{mm}$) および試験体 D ($R=2.5\text{mm}$) の応力三軸度を算定すると、それぞれ 0.33、0.61、0.70 および 0.97 となる。

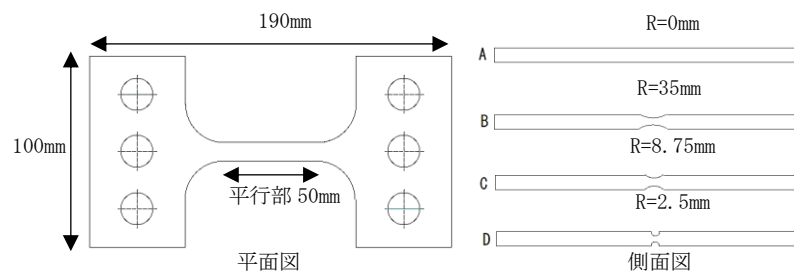
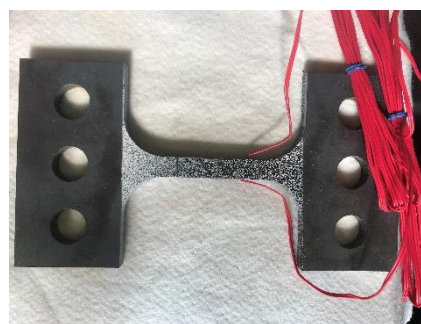


図-2.4 試験体の形状

載荷速度は、静的、0.01m/s および 4m/s（試験装置の最大速度）である。この載荷速度によって、試験体に生じるひずみ速度は約 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^0$ (1/s) となる。引張試験における計測項目は、荷重については引張試験治具の上部に設置している定格容量 1000kN ロードセルを用いて計測した。また、試験体のひずみについては、弾性域についてはゲージ長 5mm のひずみゲージを貼付して計測した。切欠きの無い試験体 A には、ひずみゲージを平行部中心位置の両側面に 1 枚ずつ貼付し、切欠きのある試験体 B, C および D については、図-2.5(a)に示すように、切欠き底部の側面および切欠き部を除いた平行部の両側面にそれぞれ貼付した。また、主として降伏後から破断直前までのひずみを、デジタル画像相関法（Digital Image Correlation, 以下、DIC）を用いて計測した。DIC とは、荷重を受ける前後で試験体のデジタル画像を記録し、試験体の表面に施されたランダムなパターンを追跡することで、実験時における試験体の変形やひずみを算定する手法のことである¹⁰⁾。具体的には、載荷前に記録した画像の小領域（サブセット）を、変形後の画像の中から正規化された相関係数の最適値となる領域を探し出すことによって変位を求め、さらに変形やひずみを算定している。この処理を全てのサブセットで繰り返すことによって、試験体全体の変形やひずみを得ることができる。本研究では、ランダムパターンの大きさに基づいて予備的な分析を行い、サブセットを約 2.5mm に設定した。DIC によるひずみの計測領域は、変形が局所化する試験体切欠き底部とした。実験前のひずみゲージの貼付位置、および DIC に必要な塗装処置状況を図-2.5(b) および(c)に示す。試験体の塗装については、計測部に白色塗料を塗布した後、黒色塗料でランダムパターンを塗布した。



(a) 試験体のひずみゲージ貼付け箇所



(b) 試験体 A(R0)



(c) 試験体 C(R8.75)

図-2.5 試験体の処置状況

DIC に用いた高速度ビデオカメラ（フォトロン製 FASTCAM）を，図-2.6 に示す．高速度ビデオカメラの撮影速度は，静的試験時は 60 フレーム/秒（fps）とし，载荷速度 0.01m/s および 4m/s ではそれぞれ 5000fps および 20000fps に設定した．また，高速度ビデオカメラの設置位置を，図-2.7 に示す．DIC を行うためには 2 台の高速度ビデオカメラが必要であるため，図-2.7(a)に示すように試験体の前方に 2 台を設置し，高速度ビデオカメラ間の撮影角度については図-2.7(b)に示すように推奨値の範囲内である約 30°とした．



図-2.6 高速度ビデオカメラ



(a) 設置状況



(b) 高速度ビデオカメラの撮影角度

図-2.7 高速度ビデオカメラの設置位置

2.2.3 試験結果の評価および実験ケース

図-2.8 に、静的引張試験で得られた応力－ひずみ関係の一例を示す。降伏応力は、試験で得られた応力－ひずみ関係の上降伏点とした。なお、切欠きを設けた試験体は降伏点を明瞭に示さなかったため、残留ひずみ 0.2%のときの応力 (0.2%耐力) を降伏応力とした。図-2.9 に、引張試験で得られた荷重－時間関係の一例を示す。引張強度は、ロードセルで計測した荷重－時間関係の最大値を初期の断面積で除して求めた。図-2.10 に、引張試験で得られたひずみ－時間関係の一例を示す。本研究では、ひずみ速度を图中的赤線の直線で示すように、試験体の降伏応力に達したときのひずみと降伏応力の 1/3 点におけるひずみの勾配とした。

表-2.1 に、実験ケースを示す。本実験におけるパラメータは、载荷速度および試験体の種類であり、各ケース 3 体ずつ、合計 36 体の実験を行った。

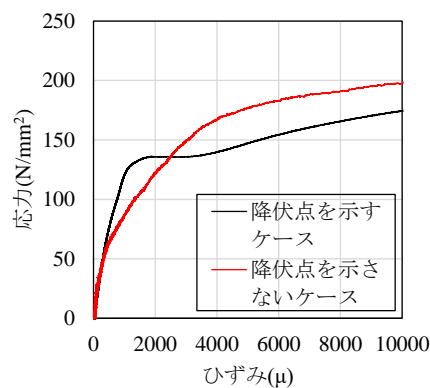


図-2.8 応力－ひずみ関係の例
(ひずみ速度 $10^{-2}(1/s)$ 試験)

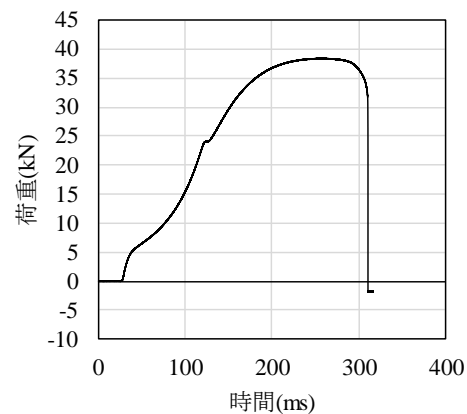


図-2.9 荷重－時間関係の一例

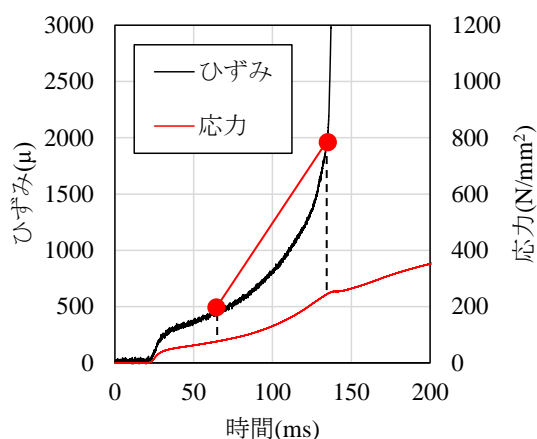


図-2.10 ひずみ－時間関係の例

表-2.1 実験ケース

No.	载荷速度	試験片規格
1~3	静的	A
4~6		B
7~9		C
10~12		D
13~15	0.01m/s	A
16~18		B
19~21		C
22~24		D
25~27	4m/s	A
28~30		B
31~33		C
34~36		D

2.3 実験結果

2.3.1 破壊の特徴

図-2.11 に，静的および動的引張試験による試験体の亀裂の進展状況を示す．図中には静的およびひずみ速度約 1.0×10^0 (1/s) の状況を示している．図から，試験体 A (R0) については，静的およびひずみ速度約 1.0×10^0 (1/s) のいずれにおいても，ネッキングが発生した後に試験体の側方から亀裂が生じて破断した．このとき水平方向に $10 \sim 20^\circ$ の角度を有する破断面が生じた．切欠きを有する試験体 B (R35)，C (R8.75) および D (R2.5) については，いずれのケースもひずみ速度によらず，切欠き部において載荷方向に対して直交方向に破断面が確認された．図から，試験体中央部に明瞭なネッキングが生じ，最終的には中央部に生じた亀裂が外側に進展して破断が生じていることがわかる．

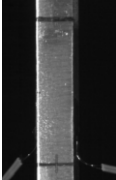
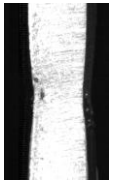
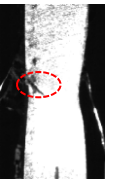

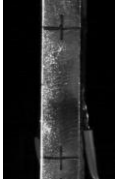

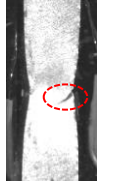
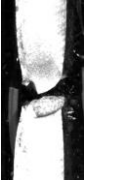
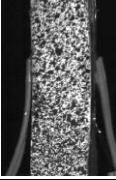
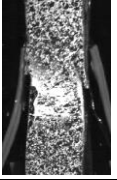
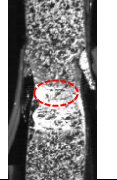
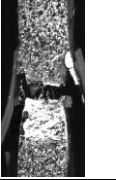
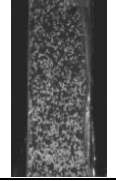

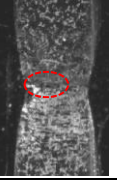
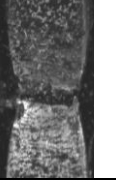
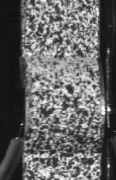
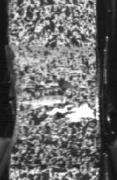

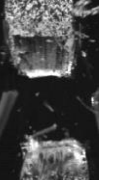
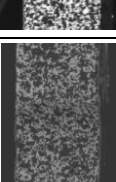
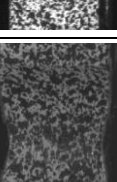

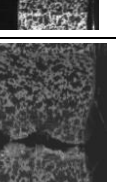
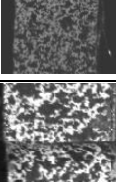
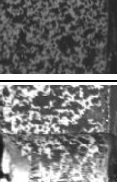
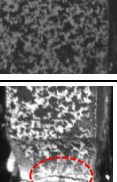
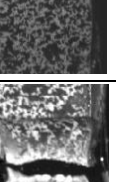
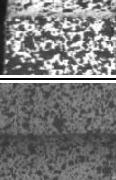
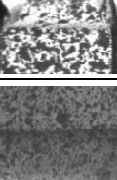
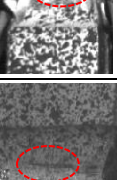
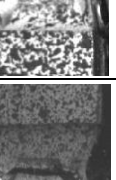
試験体	荷重速度	破壊の進展			
		荷重前	ネッキング	亀裂発生	破断
A (R0)	静的				
	4m/s				
B (R35)	静的				
	4m/s				
C (R8.75)	静的				
	4m/s				
D (R2.5)	静的				
	4m/s				

図-2.11 破壊の進展状況 (○は亀裂を示す)

2.3.2 応力-ひずみ関係

図-2.12 に、実験で得られた各試験体の応力-ひずみ関係を示す。なお、図中のひずみはひずみゲージで計測したものであり、ひずみゲージが破断するまでのデータを示している。図から、明瞭な降伏点を示したケースは、静的試験、ひずみ速度約 1.0×10^{-2} (1/s) における試験体 A (R0) および試験体 B (R35) のみであった。応力三軸度の高い試験体 C (R8.75) および D (R2.5) については、全てのケースで明瞭な降伏点を示さなかった。図から、全ての試験体において、ひずみ速度の増加に伴い、降伏応力および引張強度の増加が認められた。特にひずみ速度約 1.0×10^0 (1/s) においては、最大応力が非常に大きくなった。切欠きを有する試験体の応力値については、試験体 A (R0) の結果と比較して半分程度の値となっている。これは先述した破壊の特徴から、切欠きを有する試験体では、切欠き底部付近の試験体中央に生じた亀裂が外側に進展して破断が生じていることから、全断面が降伏する前に中央の一部に亀裂が生じて破断しているために荷重が低くなった可能性がある。また、この荷重を試験体の公称断面積で除して応力を算出しているため応力値が低くなったことも考えられる。加えて、実験ケースごとに破断位置がやや異なり、切欠き底部ではない位置で破断が生じているため、応力値が変化した可能性がある。これらについては、今後も詳細に検討する必要がある。切欠きを有する試験体では最大応力以降に軟化挙動を示し、応力三軸度が大きくなる（曲率半径が小さくなる）ほど軟化の度合いも大きくなった。

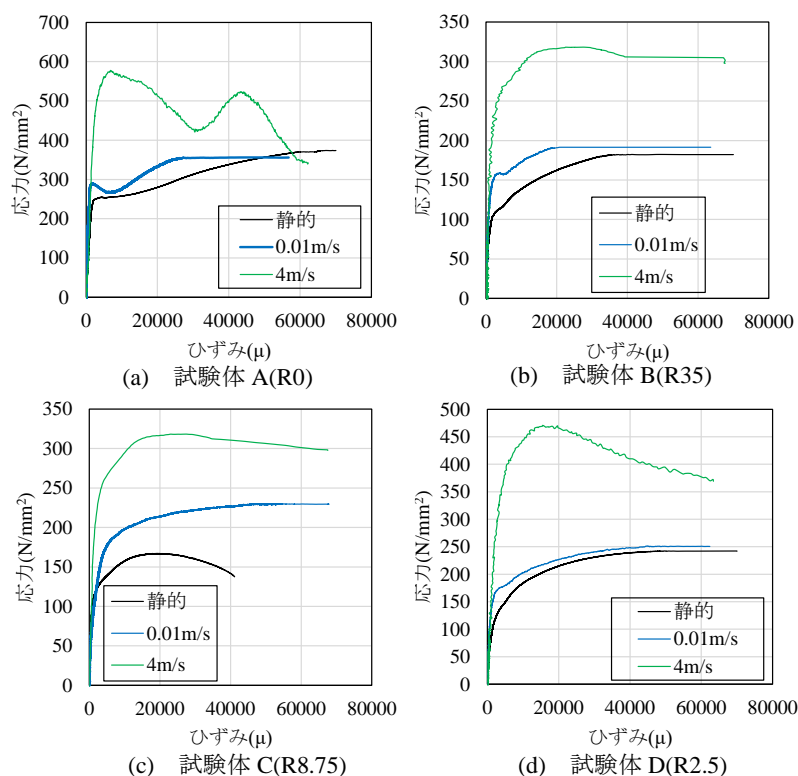


図-2.12 応力-ひずみ関係

2.3.3 強度特性のひずみ速度依存性

表-2.2 に、各試験ケースのひずみ速度、降伏応力、引張強度および各強度特性の動的強度倍率 (Dynamic Increase Factor, DIF) を示す。図-2.13 に、降伏応力-ひずみ速度関係を示す。なお、図中には、実験結果から得られる線形の近似式を破線で示している。図から、全ての試験体において、ひずみ速度の増加にともなって降伏応力の増大が認められた。降伏応力の値は、ひずみ速度によらず試験体 A (平板) が最も大きく、ひずみ速度 $10^{-5}/s$ (静的) における平均値は 254.7 N/mm^2 、ひずみ速度 $10^{-2}/s$ における平均値は 304.9 N/mm^2 、ひずみ速度 $10^0/s$ における平均値は 399.0 N/mm^2 であった。

表-2.2 実験結果

試験体	載荷速度	ひずみ速度	降伏荷重 (kN)	降伏応力			最大荷重 (kN)	引張強度			試験体	載荷速度	ひずみ速度	降伏荷重 (kN)	降伏応力			最大荷重 (kN)	引張強度		
				応力 (N/mm ²)	DIF	平均		強度 (N/mm ²)	DIF	平均					応力 (N/mm ²)	DIF	平均		強度 (N/mm ²)	DIF	平均
A (R0)	静的	2.1×10 ⁻⁵	22.3	247.4	0.97	1.00	37.6	417.6	1.00	1.00	C (R8.75)	静的	4.2×10 ⁻⁵	5.1	128.6	0.97	8.8	220.6	0.99	1.00	
		3.0×10 ⁻⁵	22.3	248.3	0.97		37.1	411.7	0.98				6.2×10 ⁻⁶	5.4	135.8	1.03	9.1	227.1	1.02		
		3.1×10 ⁻⁵	24.2	268.4	1.05		38.4	426.6	1.02				7.6×10 ⁻⁶	5.3	132.8	1.00	8.9	222.2	1.00		
	0.01m/s	8.6×10 ⁻³	27.3	303.0	1.19	1.20	39.5	439.3	1.05	1.05		0.01m/s	1.3×10 ⁻²	6.1	152.6	1.15	9.3	233.3	1.05	1.12	
		7.7×10 ⁻³	28.9	320.7	1.26		40.9	454.8	1.09				2.1×10 ⁻²	7.0	174.1	1.31	10.0	250.4	1.12		
		5.9×10 ⁻³	26.2	291.1	1.14		38.1	423.7	1.01				1.6×10 ⁻²	6.7	167.4	1.26	10.7	266.7	1.19		
	4m/s	3.5×10 ⁰	36.9	410.4	1.61	1.57	51.2	568.9	1.36	1.42		4m/s	7.1×10 ⁰	9.3	231.7	1.75	12.7	317.8	1.42	1.38	
		2.9×10 ⁰	35.3	392.6	1.54		51.6	573.3	1.37				6.4×10 ⁰	8.9	221.7	1.67	11.8	295.6	1.32		
		2.0×10 ⁰	35.5	394.1	1.55		57.2	635.6	1.52				5.2×10 ⁰	9.9	248.3	1.88	12.4	310.4	1.39		
		6.2×10 ⁻⁶	5.3	131.3	1.03		9.2	229.4	0.97				6.0×10 ⁻⁶	4.5	112.9	1.10	8.0	199.7	1.01		
		8.4×10 ⁻⁶	4.6	114.3	0.89		9.7	243.6	1.03				8.0×10 ⁻⁶	4.2	104.3	1.01	8.3	206.6	1.05		
B (R35.0)	静的	9.2×10 ⁻⁶	5.5	137.9	1.08	1.00	9.4	235.9	1.00	1.00	D (R2.5)	静的	6.5×10 ⁻⁶	3.7	92.0	0.89	7.4	185.9	0.94	1.00	
		1.9×10 ⁻²	6.6	164.4	1.29		10.2	255.6	1.08				1.0×10 ⁻²	6.1	153.3	1.49	9.1	228.2	1.16		
		1.3×10 ⁻²	6.7	166.7	1.30		9.3	232.6	0.98				1.3×10 ⁻²	6.6	164.4	1.60	8.9	223.7	1.13		
	0.01m/s	1.5×10 ⁻³	7.0	174.1	1.36	1.32	10.0	250.4	1.06	1.04		0.01m/s	1.5×10 ⁻²	6.1	153.4	1.49	8.9	222.2	1.13	1.14	
		2.8×10 ⁰	7.3	181.7	1.42		16.4	411.1	1.74				2.2×10 ⁰	9.5	238.3	2.31	12.3	308.2	1.56		
		2.7×10 ⁰	8.1	203.3	1.59		14.7	367.4	1.55				3.6×10 ⁰	7.9	198.3	1.92	13.4	335.6	1.70		
	4m/s	3.3×10 ⁰	8.9	221.7	1.73	1.58	15.6	389.6	1.65	1.65		4m/s	4.0×10 ⁰	10.3	256.7	2.49	12.4	309.6	1.57	1.61	

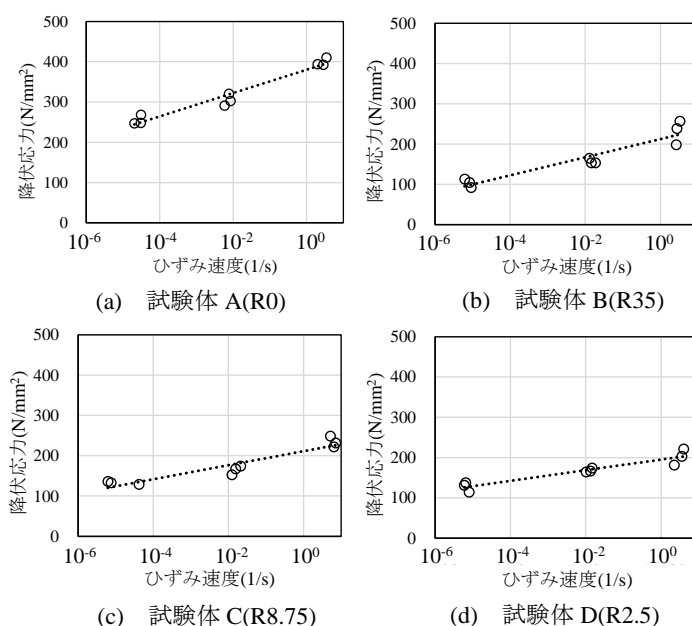


図-2.13 降伏応力-ひずみ速度関係

図-2.14 に引張強度－ひずみ速度関係を示す．図から，試験体 A（平板）は，ひずみ速度 10^{-2} (1/s) 付近では静的载荷に対して約 5%，ひずみ速度 10^0 (1/s) では静的载荷に対して約 42% の増加が認められた．同様に，試験体 B（R35）および試験体 C（R8.75）では，ひずみ速度 10^{-2} (1/s) で，静的载荷に対してそれぞれ約 14%，12%，ひずみ速度 10^0 (1/s) ではそれぞれ約 61%，38% の増加が認められた．一方，試験体 D（R2.5）では，ひずみ速度 10^{-2} (1/s) での強度増加はあまり認められなかったが，ひずみ速度 10^0 (1/s) では約 65% の強度増加が認められた．

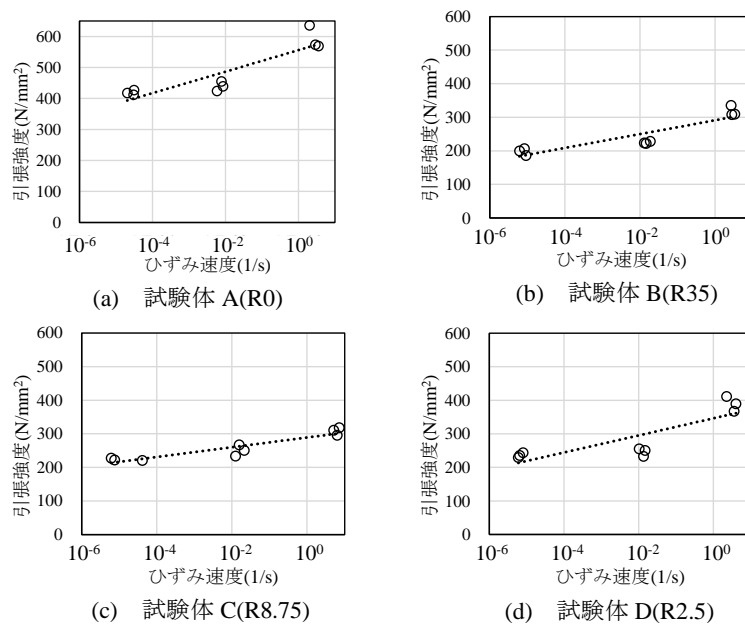


図-2.14 引張強度－ひずみ速度関係

既往の研究⁵⁾によると、ひずみ速度の増加による強度等の上昇は静的強度に対する増加割合（動的強度倍率）で表されることが多い。図-2.15 に、降伏応力の DIF および引張強度の DIF－ひずみ速度関係を示す。参考のため、図中には以下に示す高橋⁵⁾の実験式も比較して示している。高橋の式は、鋼板（SS400）および鉄筋（SR24, SD30 および SD34）を対象として、載荷速度を 3 種類（静的、低速および高速）に変化させた引張試験により得られたものである。

$$DIF_{\sigma_{UY}} = 10^{m+c_1} \quad (2.4)$$

$$m = a_1 \log \dot{\epsilon} + b_1 \quad (2.5)$$

ここに、 $DIF_{\sigma_{UY}}$ は上降伏点の動的強度倍率、 $a_1=0.3796$ 、 $b_1=-0.2579$ 、 $c_1=0.993$ 、 $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度である。また、引張強度の動的強度倍率 DIF_{σ_c} は次式で表される。

$$DIF_{\sigma_c} = a_2 + b_2 \log \dot{\epsilon} \quad (2.6)$$

ここに、 $a_2=1.172$ 、 $b_2=0.037$ である。

図-2.15 (a) に示す降伏応力の DIF については、全ての試験体において、ひずみ速度にともなって増加する傾向を示した。ただし、試験体の種類によってばらつきが生じ、ひずみ速度 10^0 (1/s) 付近で最もばらつきが大きくなった。ひずみ速度約 10^{-2} (1/s) における試験体 A（平板）、B（R35）、C（R8.75）および D（R2.5）の DIF の平均は、それぞれ 1.20、1.23、1.29 および 1.32 であり、試験体 D（R2.5）の場合が最も大きくなった。また、ひずみ速度約 10^0 (1/s) における試験体 A（平板）、B（R35）、C（R8.75）および D（R2.5）の DIF の平均は、それぞれ 1.57、1.81、1.83 および 1.58 であり、試験体 C の場合が最も大きくなった。高橋の実験式 (2.4) および (2.5) と比較すると、ひずみ速度 10^0 (1/s) 付近で最も差が大きく、約 12% の差が認められた。図-2.15 (a) に、本実験で得られた降伏応力 DIF－ひずみ速度関係に対して求めた以下の回帰式を示す。

$$DIF_{\sigma_Y} = 10^{m+0.993} \quad (2.7)$$

$$m = 0.25 \log \dot{\epsilon} - 0.1 \quad (2.8)$$

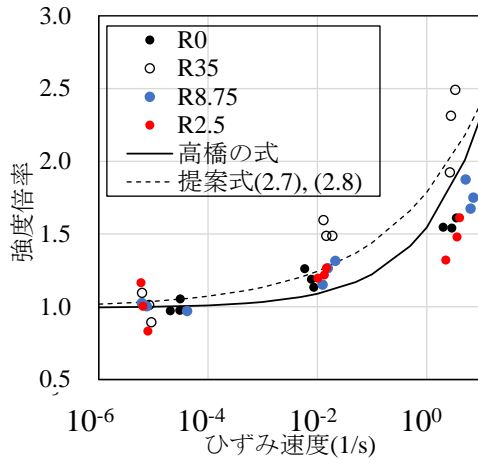
ここに、 DIF_{σ_Y} は降伏応力の動的強度倍率である。適用範囲は本実験条件とし、 $1.0 \times 10^{-5} \leq \dot{\epsilon} \leq 1.0 \times 10^0$ 、 $\eta=0.33$ 、 0.61 、 0.70 および 0.97 である。

図-2.15 (b) に示す引張強度の DIF については、ひずみ速度約 10^{-2} (1/s) における試験体 A（平板）、B（R35）、C（R8.75）および D（R2.5）の平均が、それぞれ 1.05、0.95、1.12 および 1.04 であり、試験体 A（平板）、C（R8.75）および D（R2.5）は増加しているが、試験体 B（R35）ではやや低下する結果となった。また、ひずみ速度約 10^0 (1/s) における試験体 A（平板）、B（R35）、C（R8.75）および D（R2.5）の DIF の平均はそれぞれ、1.42、1.35、1.38 および 1.65 であり、試験体の種類によって結果の違いが認められ、試験体 D（R2.5）の場合が最も大きくなった。高橋の実験式 (2.6) と比較すると、ひずみ速度 10^0 (1/s) 付近で最も差が大きく、最大で約 25% の差が認められた。また、図-2.15 (b) に、本実験で得られた引張強度の動的強度倍率－ひずみ速度関係に対して求めた以下の回帰式を示す。図から、回帰式は実験結果とある程度の一致を示すことがわかる。

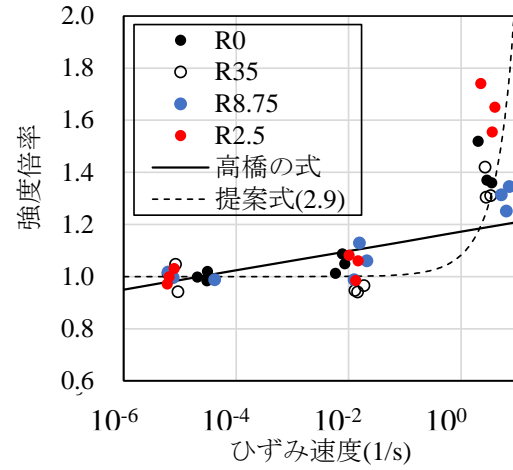
$$DIF_{\sigma_c} = 1.0e^{0.08\dot{\epsilon}} \quad (2.9)$$

ここに、 DIF_{σ_c} は引張強度の動的強度倍率である．適用範囲は本実験条件とし、 $1.0 \times 10^{-5} \leq \dot{\epsilon} \leq 1.0 \times 10^0$ 、 $\eta=0.33, 0.61, 0.70$ および 0.97 である．

以上の結果から、応力三軸度は降伏応力および引張強度の動的強度倍率に対しては大きな影響を及ぼさないものと考えられる．



(a) 降伏応力の強度倍率



(b) 引張強度の強度倍率

図-2.15 各強度特性の DIF－ひずみ速度関係

2.3.4 DICによるひずみの特徴

図-2.16に、ひずみ速度 1.0×10^{-5} (1/s) およびひずみ速度 1.0×10^0 (1/s) における試験体 B (R35), C (R8.75) および D (R2.5) のひずみ分布を示す。なお、試験体 A (平板) の破断ひずみについては、変形初期に塗装が剥がれ落ちたため DIC による計測を行うことができなかった。図中には、載荷前のひずみが一様に分布している状態からひずみが切欠き部に局所化し、亀裂が進展する挙動を段階的に示している。ひずみ速度 1.0×10^{-5} (1/s) の結果をみると、試験体 B (R35) では、変形開始後に変形が切欠き部に局所化し、変形の進展とともにひずみが切欠き部の中央に集中した。初期の亀裂が生じる直前には、切欠き部の最小断面の中心部に高いひずみ (0.6~0.7) が発生し、切欠き部の最小断面の中心部に亀裂が生じた。試験体 C (R8.75) および D (R2.5) についても同様の挙動を示したが、ひずみの最大値は試験体 B (R35) よりも小さい結果であった。次に、ひずみ速度 1.0×10^0 (1/s) の結果をみると、いずれの試験体においても静的試験と同様に、変形が進むにつれてひずみが切欠き部の中央に局所化し、初期の亀裂は切欠き部の最小断面の中心部に生じた。

図-2.17 に、DIC により計測した破断ひずみ-応力三軸度関係を示す。計測結果をみると、全てのひずみ速度において、応力三軸度の増加に伴う破断ひずみの低下が確認された。ひずみ速度約 1.0×10^{-5} (1/s) においては、切欠き付き試験体のうち応力三軸度が最も小さい試験体 B (R35) の破断ひずみが最大であり約 0.71 であった。また、応力三軸度が最も大きい試験体 D (R2.5) の破断ひずみが最小であり約 0.58 であった。北村⁷⁾の行った切欠き付き平板試験体の静的引張試験結果によると、SM490Y 鋼を用いた検討ではあるが、R35 試験体において破断ひずみが約 0.6~0.7 であり、R8.75 および R2.5 の試験体の破断ひずみはそれぞれ約 0.4~0.5 および約 0.3~0.4 となる結果であり、今回行った実験結果は北村の傾向とほぼ一致している。

以上の結果に基づいて、Johnson-Cook の破壊基準のパラメータを決定する。図-2.18 に、DIC により計測した破断ひずみ-応力三軸度関係と Johnson-Cook の破壊基準¹⁴⁾を示す。なお、応力三軸度の表示は、第 4 章で行う数値解析において適用する範囲である。Johnson-Cook の破壊基準は以下の式で表される。

$$\varepsilon_f = \{D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)\} \{1 + D_4 \ln(\dot{\varepsilon}^*)\} (1 + D_5 T^*) \quad (2.10)$$

ここに、 ε_f は破断ひずみ、 D_1 , D_2 および D_3 は応力三軸度と破断ひずみの関係に関するパラメータ、 D_4 は破断ひずみのひずみ速度依存性に関するパラメータ、 D_5 は破断ひずみの温度依存性に関するパラメータである。 σ^* は応力三軸度であり、 $\sigma^* = \sigma_m / \sigma_{eq}$ で表す。 σ_m は平均応力または静水圧応力であり、 σ_{eq} は相当応力である。なお、実験において熱を計測していないため熱の影響は考慮していない。

式(2.10)に示す Johnson-Cook 破壊基準を適用し、その係数を $D_1=0.57$, $D_2=15$, $D_3=-8$ および $D_4=-0.005$ とすると実験結果とある程度の一致を示すことがわかる。相関係数については、ひずみ速度 10^{-5} (1/s) および 10^0 (1/s) の時、平均値に対して 0.99 であった。

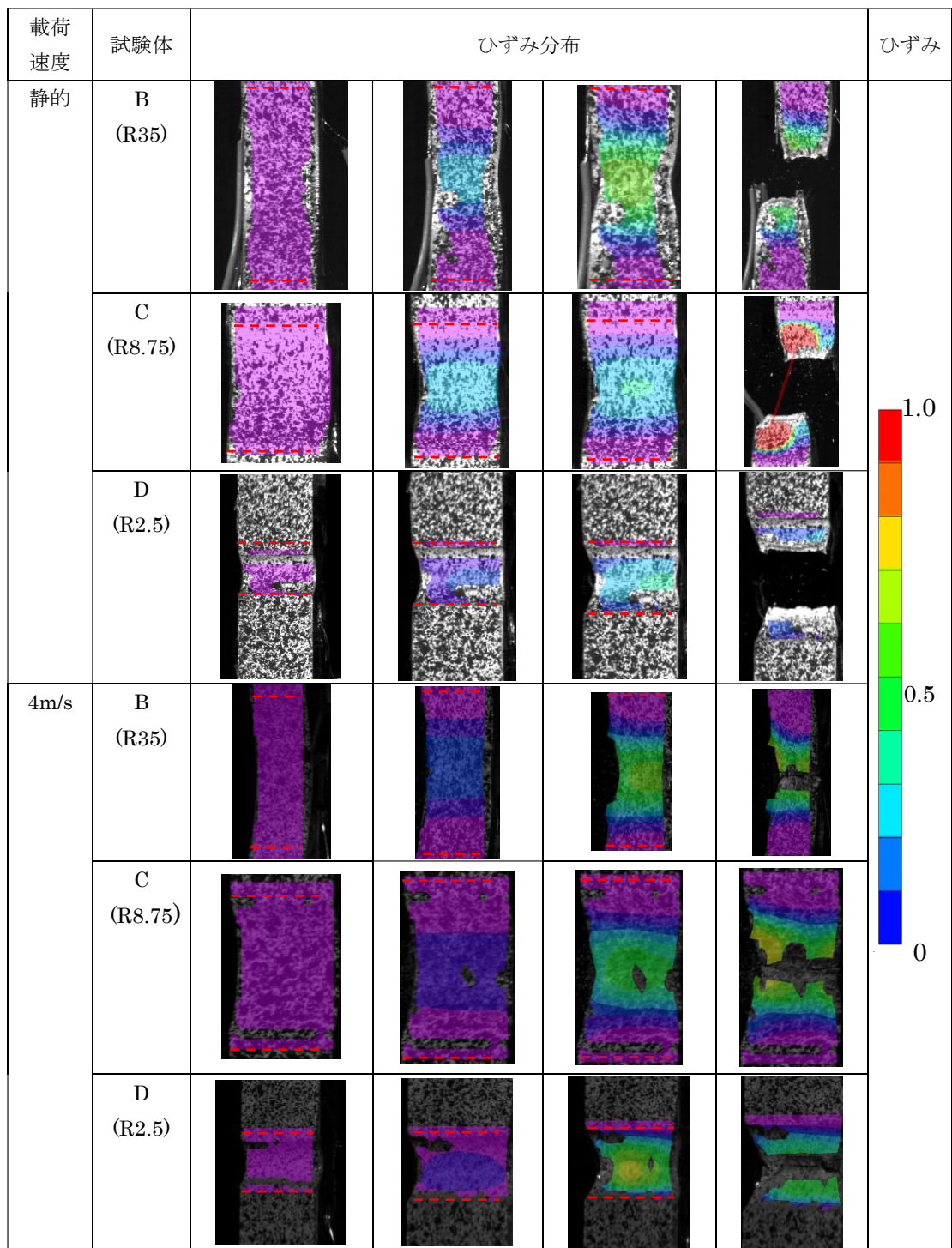


図-2.16 DICによるひずみ分布（図中の点線は切欠きの端部を示す）

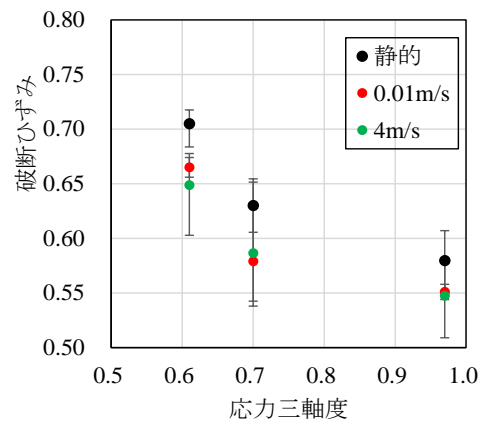


図-2.17 破断ひずみ－応力三軸度関係

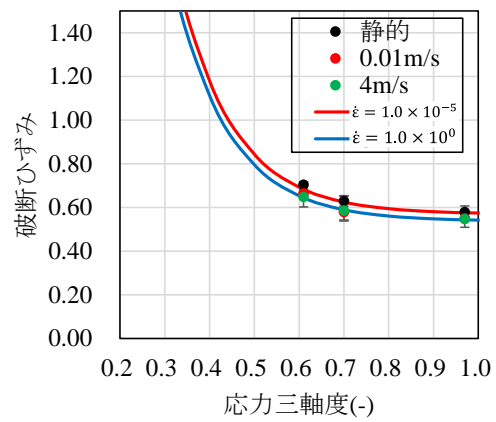


図-2.18 Johnson-Cook 破壊基準による定式化

2.4 結言

本章は、切欠き半径の異なる SS400 平板試験体に対し、ひずみ速度 $10^{-5}/s$ （静的）～ $10^0/s$ における動的引張実験を行った。本章の結論を以下に要約する。

- (1) 降伏応力の動的な増加率については、ひずみ速度 $10^{-2}/s$ の試験で 19.7%～31.7%，ひずみ速度約 $10^0/s$ の試験で 56.6%～83.0%となり、ひずみ速度の増加に伴って降伏応力が大きく増大した。
- (2) 引張強度の動的な増加率については、ひずみ速度 $10^{-2}/s$ の試験で-4.9%～5.8%，ひずみ速度約 $10^0/s$ の試験で 30.3%～64.8%であり、ひずみ速度 $10^{-2}/s$ 付近では強度の変化は小さく、ひずみ速度 $10^0/s$ 付近では引張強度の大幅な増加が認められた。ただし、降伏応力の動的倍率と比べると小さな値であった。
- (3) 変形が局所化する試験体切欠き底部の DIC 分析により破断時のひずみを算定し、ひずみ速度および応力三軸度が破断ひずみに及ぼす影響について考察した。実験の結果、全てのひずみ速度において、応力三軸度の増加に伴う破断ひずみの低下が確認された。また、ひずみ速度が破断ひずみに及ぼす影響についてはある程度認められ、応力三軸度 0.97 のケースでは、ひずみ速度 $10^{-5}/s$ および $10^0/s$ の試験において破断ひずみに約 4%の差が生じた。

第3章 飛翔体衝突を受ける鋼板の貫通破壊挙動に関する実験的検討

3.1 序言

本章は、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ものである。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。さらに、既往の評価式である BRL 式¹⁾を用いて、実験結果と整合するような修正式を提案した。

3.2 実験の概要

3.2.1 実験装置の概要

衝突実験は、図-3.1 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。なお、衝突速度は加速管の先端部に設置した速度センサーで計測することができる。ただし、後述するように、本研究では高速度ビデオカメラによる画像解析から衝突直前の衝突速度を算定したため、速度センサーの値は参考値とした。図-3.2 に、質量 6.0kg の飛翔体を用いた場合の衝突速度－空気圧の関係を示す。本実験で用いた質量 6.0kg の飛翔体の場合は、空気圧を調整することで約 20m/s～120m/s の速度で発射することができる。

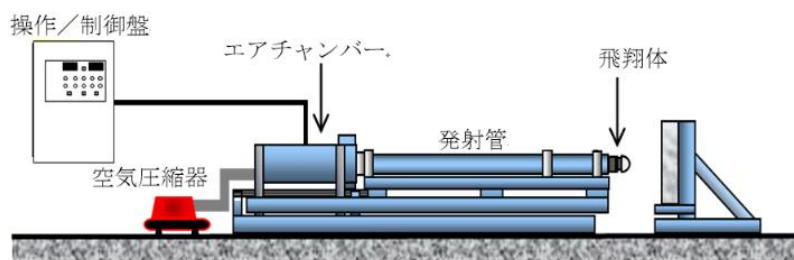


図-3.1 高圧空気式飛翔体発射装置

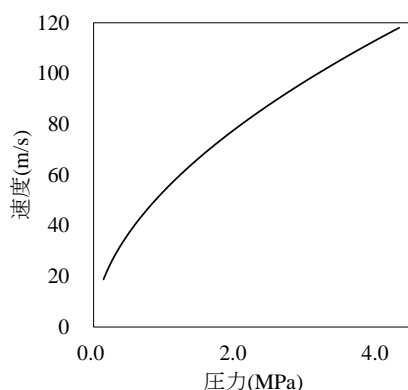
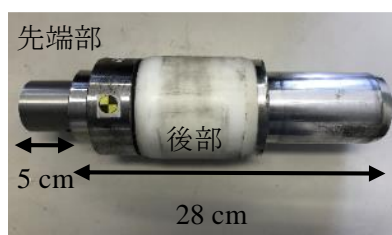


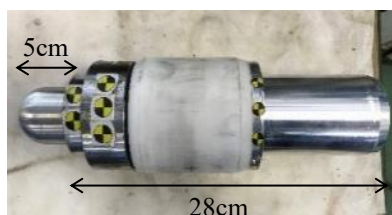
図-3.2 空気圧－衝突速度関係

3.2.2 飛翔体および鋼板

実験には、図-3.3に示す先端部が平坦、半球および円錐状の飛翔体を用いた。飛翔体の質量は6.0kg、先端部は直径50mmであり、材質はS45Cである。飛翔体は、各形状の先端部の後部に長さ28cmの胴体部が接続されている。先端部よりも直径が大きい後部を有するため、鋼板に貫通が生じると、飛翔体の後部が鋼板に衝突する。飛翔体には、衝突後における飛翔体の運動を高速ビデオカメラで記録するため、飛翔体に追跡用の目印を貼付した。図-3.4に、鋼板試験体の外観および設置状況を示す。鋼板はSS400であり、寸法は1150mm×1150mm、板厚は6mm、9mmおよび12mmとした。鋼板試験体は、裏面支持具にボルトを用いて四辺を固定した。表-3.1に、飛翔体および鋼板の力学特性を示す。板厚6mmの降伏応力および引張強度は、平坦状の実験ではそれぞれ343N/mm²および452N/mm²、半球状および円錐状の実験ではそれぞれ323N/mm²および428N/mm²あり、伸びは全て31%である。また、板厚9mmおよび12mmの試験体は、平坦状の実験ではいずれも降伏応力および引張強度がそれぞれ323N/mm²および428N/mm²、半球状および円錐状の実験ではそれぞれ292N/mm²および428N/mm²であり、伸びは全て31%である。



(a) 平坦状飛翔体



(b) 半球状飛翔体



(c) 円錐状飛翔体

図-3.3 飛翔体の外観

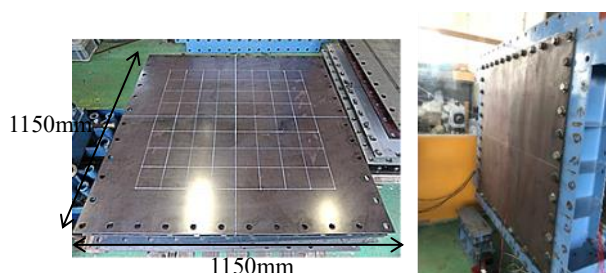


図-3.4 SS400 試験体および試験体設置状況

表-3.1 飛翔体および鋼板の力学特性

鋼板および飛翔体		公称応力		伸び(%)
		降伏応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	
平坦	6mm	343	452	31
	9mm	323	428	
	12mm			
半球 ・ 円錐	6mm	323	452	
	9mm	292	428	
	12mm			
飛翔体(S45C)		574	798	26

3.2.3 計測項目

高速度ビデオカメラ 2 台を用いて、それぞれ飛翔体の運動および鋼板の変形性状を観察するとともに、実験後に目視で鋼板の貫通破壊の有無を調べた。高速度ビデオカメラの設置は、発射管の側方（飛翔体の運動観察用）および鋼板の裏面側（鋼板の変形性状観察用）である。なお、高速度ビデオカメラの撮影速度は、それぞれ 100000fps および 50000fps である。また、発射管の側方から高速度ビデオカメラにより撮影した飛翔体の画像を解析して飛翔体の変位－時間関係を求めた。さらに、変位－時間関係を時間に関して微分することで速度－時間関係および加速度－時間関係を算定した。また、図-3.5 に示すように容量約 220kN のロードセルを裏面支持具の裏側に 8 箇所設置して支点反力を計測した。さらに、鋼板の変形および破壊挙動を調べるため、ひずみゲージ（ゲージ長 5mm）を図-3.6 に示す位置に貼付した。すなわち、鋼板裏面の中心から横方向にひずみゲージ（ゲージ長 5mm）を 50mm 間隔で 3 枚（B1、B2 および B3）、縦方向に 3 枚（C1、C2 および C3）貼付し、鋼板裏面のひずみ応答を計測した。この際、飛翔体が鋼板に衝突した時間を検知するため、試験体表面中心にひずみゲージ（A）を貼付し、ひずみが発生した時刻を飛翔体が鋼板に衝突した時刻とした。

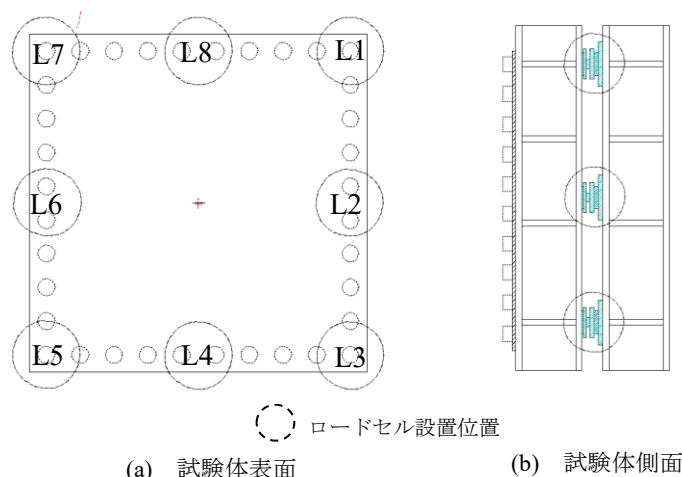


図-3.5 ロードセル設置位置の模式図

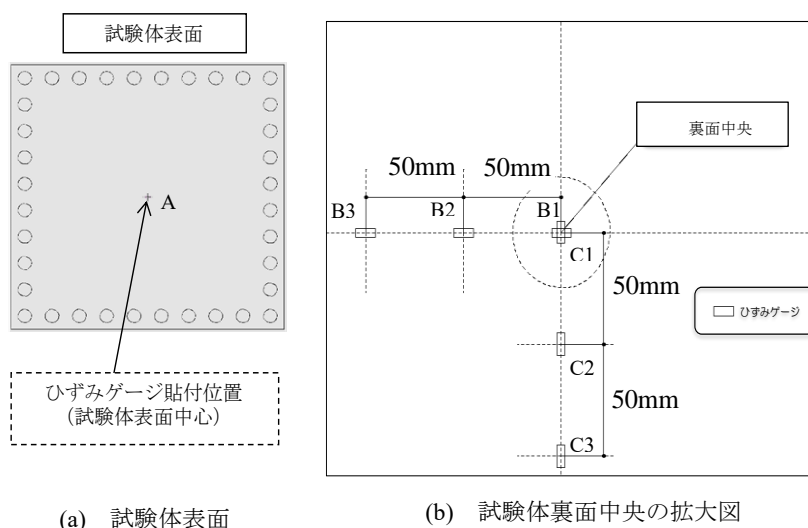


図-3.6 ひずみゲージ貼付位置の模式図

3.2.4 実験ケース

実験ケースを表-3.2 に示す。板厚 6mm, 9mm および 12mm の SS400 鋼板に対し、衝突速度を平坦、半球および円錐状飛翔体を用いて、それぞれ約 40m/s～100m/s, 50m/s～120m/s および 30m/s～120m/s で衝突させた。平坦および円錐状飛翔体を用いた場合では、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 ケースずつ実験を行った。半球状飛翔体を用いた場合では、板厚 12mm のケースのみ 3 ケースの合計 11 ケース実験を行った。鋼板の破壊モードは非貫通、貫通および亀裂と分類し、非貫通は飛翔体先端部が貫通せず、鋼板にひび割れが発生していない状態である。また、貫通は飛翔体先端部が鋼板を完全に通り抜けた状態、亀裂は鋼板にひび割れが発生しても貫通には至っていない状態と定義した。

表-3.2 実験ケース

(a) 平坦状飛翔体			(b) 半球状飛翔体			(c) 円錐状飛翔体		
No.	板厚 (mm)	衝突速度 (m/s)	No.	板厚 (mm)	衝突速度 (m/s)	No.	板厚 (mm)	衝突速度 (m/s)
1	6	41.6	1	6	50.4	1	6	29
2		52.1	2		56.7	2		37.4
3		57.1	3		66.8	3		44.9
4		58.5	4		70.9	4		59.9
5	9	62.7	5	9	77.2	5	9	52.4
6		63.6	6		83	6		61
7		67.8	7		89.2	7		65.3
8		77.4	8		96	8		77.5
9	12	83.5	9	12	100.7	9	12	89.3
10		86.7	10		114.7	10		95.9
11		90.6	11		115.5	11		111.4
12		95.1				12		116.2

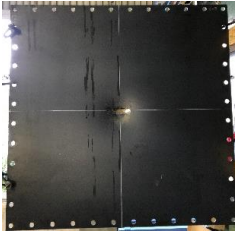
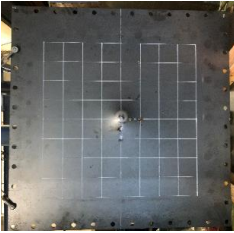
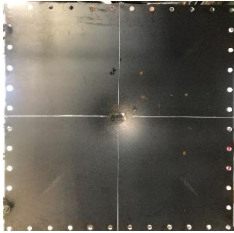
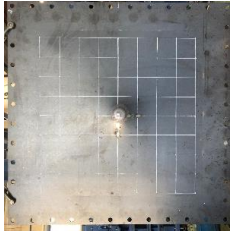





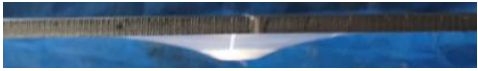
3.3 平坦状飛翔体を用いた衝突実験結果

3.3.1 鋼板の変形および破壊性状

鋼板の変形および貫通破壊性状を、図-3.7～3.9 に示す。図-3.7 に示す板厚 6mm のケースでは、衝突速度 41.6m/s, 52.1m/s および 57.1m/s のケースにおいては、鋼板の破壊モードは非貫通となった。衝突速度を 58.5m/s に増加すると、鋼板には貫通が生じた。すなわち、板厚 6mm に対する貫通限界速度は 57.1m/s～58.5m/s の間である。衝突速度 41.6m/s のケースでは、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、側面を見ると、飛翔体が衝突した鋼板部が局所的に変形していた。速度 52.1m/s および 57.1m/s のケースも同様に、飛翔体が衝突した面の外縁部周辺に約 1mm の凹みが生じていた。また、衝突部の真裏には突起が生じ、衝突速度の増加とともに変形が進展した。側面の写真からわかるように、衝突速度 41.6m/s～57.1m/s における両者の変形は同程度である。ただし、速度 57.1m/s のケースでは裏面に飛翔体の直径と同程度の平坦状の突起が生じており、飛翔体の貫入がかなり進行したことがわかる。さらに、衝突速度を 58.5m/s に増加させると貫通が生じた。いずれのケースも、試験体の裏面中央から半径 10cm 以内に顕著な変形が生じた。貫通時に生じた貫通片の外観を、図-3.10 に示す。図に示すように、飛翔体が衝突した面の外縁部周辺が押し抜かれるように、飛翔体の直径より約 0.5mm 大きい円盤状の貫通片が生じた。

図-3.8 に示す板厚 9mm のケースでは、衝突速度 62.7m/s, 63.6m/s および 67.8m/s のケースに対して、鋼板の破壊モードは非貫通となった。衝突速度 77.4m/s のケースになると鋼板には貫通が生じた。すなわち、板厚 9mm に対する貫通限界速度は 67.8m/s～77.4m/s の間である。非貫通のケースにおいては、板厚 6mm の非貫通ケースと同様に、飛翔体先端部が貫入して約 1mm の凹みが生じた。なお、衝突速度 63.6m/s のケースから、裏面中央に平坦状の突起が形成され始め、衝突速度 67.8m/s ではこの突起がより明瞭に確認できる。側面の変形量をみると、この速度までに生じた変形量に大きな差異は認められなかった。衝突速度 77.4m/s のケースでは、板厚 6mm のケースと類似した飛翔体衝突部の外縁が破断するような貫通性状を示した。板厚 9mm のケースでも、裏面中央から半径 10cm 以内の変形が大きくなる特徴を示した。

図-3.9 に示す板厚 12mm のケースでは、衝突速度 83.5m/s のケースに対しては非貫通となり、衝突速度 86.7m/s, 90.6m/s および 95.1m/s のケースになると鋼板には貫通が生じた。すなわち、板厚 12mm に対する貫通限界速度は 83.5m/s～86.7m/s の間である。衝突速度 83.5m/s のケースでは、表面に約 1mm の凹みが発生し、裏面に突起状の変形が発生した。ただし、板厚 6mm および 9mm の実験で確認されたような平坦状ではなかった。板厚 12mm のケースでも、他の板厚と同様に、裏面中央から半径 10cm 以内の変形が大きい特徴を示した。衝突速度が 86.7m/s を超えると、板厚 6mm および板厚 9mm のケースと類似した、飛翔体衝突部の外縁が破断するような貫通性状を示した。

衝突速度 41.6m/s		衝突速度 52.1m/s	
表面	表面	表面	裏面
			
			
側面		側面	
			

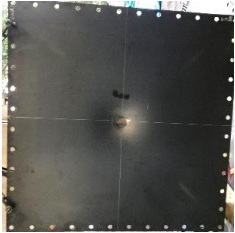
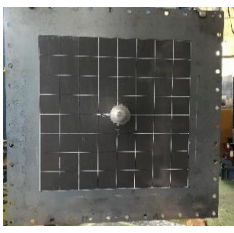

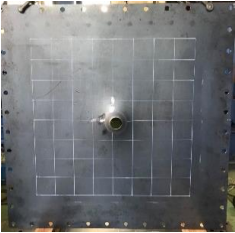






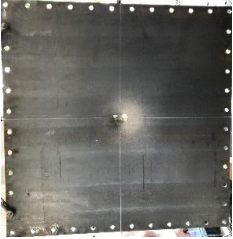
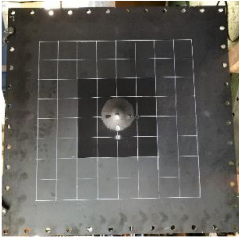
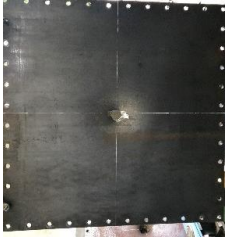
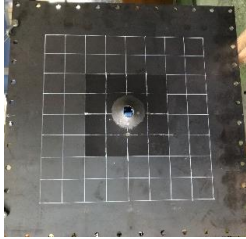






衝突速度 57.1m/s		衝突速度 58.5m/s	
表面	表面	表面	裏面
			
			
側面		側面	
			

図-3.7 鋼板の破壊性状（平坦状飛翔体，板厚 6mm）



図-3.8 鋼板の破壊性状（平坦状飛翔体，板厚 9mm）

衝突速度 83.5m/s		衝突速度 86.7m/s	
表面	表面	表面	裏面
			
			
側面		側面	
			


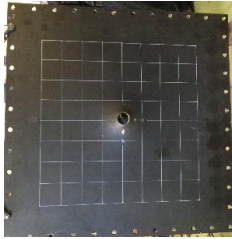

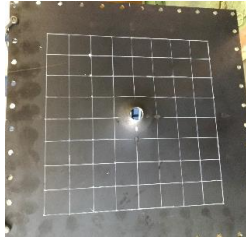

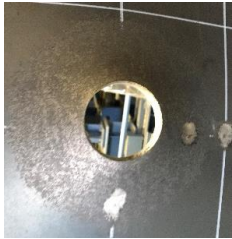




衝突速度 90.6m/s		衝突速度 95.1m/s	
表面	表面	表面	裏面
			
			
側面		側面	
			

図-3.9 鋼板の破壊性状（平坦状飛翔体，板厚 12mm）

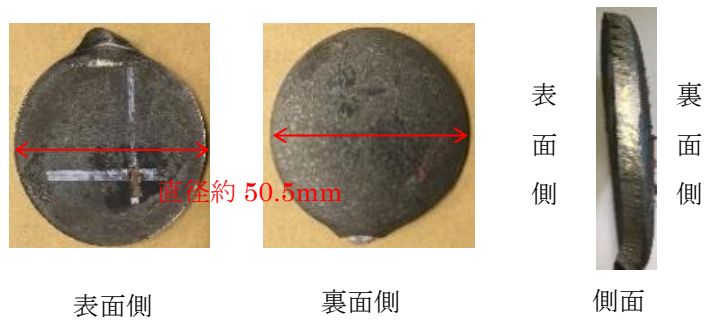










図-3.10 貫通片の外観（平坦状飛翔体，板厚 6mm，衝突速度 58.5m/s）

図-3.11 に、実験後に撮影した先端部の状況を示す。図の左方向が衝突面側である。図から、貫通が生じたケースについては鋼板との接触部に擦痕が認められるが、全てのケースで軸方向の残留変形は1%以下であった。

板厚 6mm			
41.6m/s	52.1m/s	57.1m/s	58.5m/s
			

板厚 9mm			
62.7m/s	63.6m/s	67.8m/s	77.4m/s
			





板厚 12mm			
83.5m/s	86.7m/s	90.6m/s	95.1m/s
			

図-3.11 先端部の変形状況（平坦状飛翔体）

図-3.12 に、破壊モードと修正 BRL 式の比較結果を示す。本研究では BRL 式を準用し、飛翔体の質量、衝突速度および飛翔体直径のパラメータに加えて先端形状を考慮するための係数（先端形状係数） α を含む以下の修正 BRL 式を提案する。

$$T^{3/2} = 0.5MV^2 / (1.4396 \times 10^9 K^2 (\alpha D)^{3/2}) \quad (3.1)$$

ここに、 T ：貫通限界厚さ(m)， M ：飛来物の質量 (kg)， V ：飛来物の衝突速度 (m/s)， K ：鋼板の材質に関する係数(≈ 1)， α ：先端形状係数， D ：飛来物の直径 (m)である。

実験結果と $\alpha=1.0$ とした修正 BRL 式による判定を比較すると、板厚 6mm のケースでは、衝突速度 41.6m/s および 58.5m/s のケースにおいて実験結果と修正 BRL 式による判定は一致しており、衝突速度 52.1m/s および 57.1m/s のケースにおいては修正 BRL 式における貫通評価に対して実験では非貫通の結果であった。また、板厚 9mm のケースでは、衝突速度 62.7m/s、63.6m/s および 77.4m/s のケースにおいて実験結果と修正 BRL 式による判定は一致しており、衝突速度 67.8m/s のケースにおいては BRL 式における貫通評価に対して実験では非貫通の結果であった。さらに、板厚 12mm のケースでは、全てのケースにおいて実験結果と修正 BRL 式による判定が一致する結果となった。以上から、平坦状飛翔体の場合においては、先端形状係数 $\alpha=1.0$ で修正 BRL 式による貫通評価と実験結果が一致した。

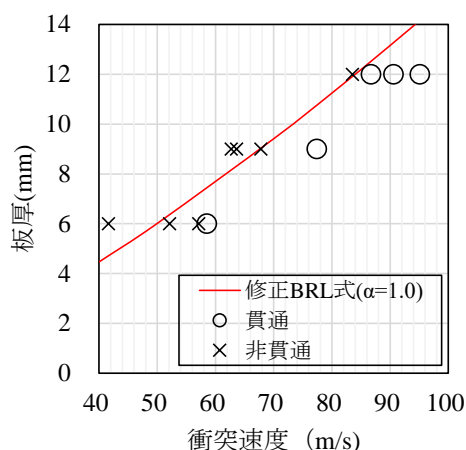


図-3.12 既往評価式との比較

一例として、板厚 6mm および 12mm のケースにおける鋼板の残留変位分布を、図-3.13 に示す。なお、貫通したケースの変形については、飛翔体の先端が鋼板を貫通した後に飛翔体後部が衝突しているため、参考のために示している。図-3.13(a)および(b)から、いずれ板厚のケースも衝突速度が増加することで中心部の残留変位が大きくなっていることがわかる。なお、板厚 9mm のケースにおいても同様の結果であった。また、図-3.13(c)に示す変位を最大変位で除して正規化した分布から、全てのケースで類似した変位分布になっている。すなわち、板厚 6mm, 9mm および 12mm のケースで生じる残留変位の大きさは異なるが変位分布形状はほぼ等しく、同様のメカニズムで変形が生じた可能性があることを示唆している。

一例として、高速度ビデオカメラで撮影した衝突速度 58.5m/s のケース鋼板の破壊の進展状況を、図-3.14 に示す。図から、飛翔体が衝突した後、時間の経過に伴って衝突部のたわみ変形が増大し、時刻 0.8ms で亀裂が生じた。その後、亀裂が進展して貫通が生じていることがわかる。

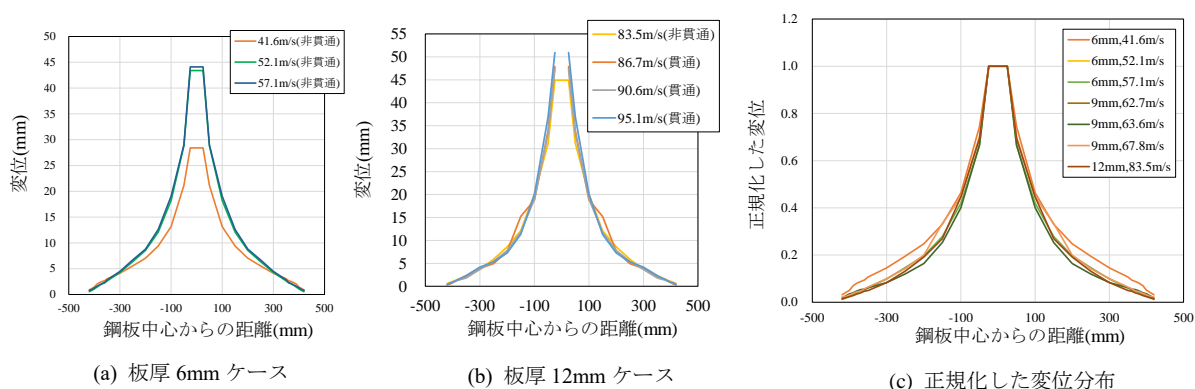


図-3.13 残留変位分布

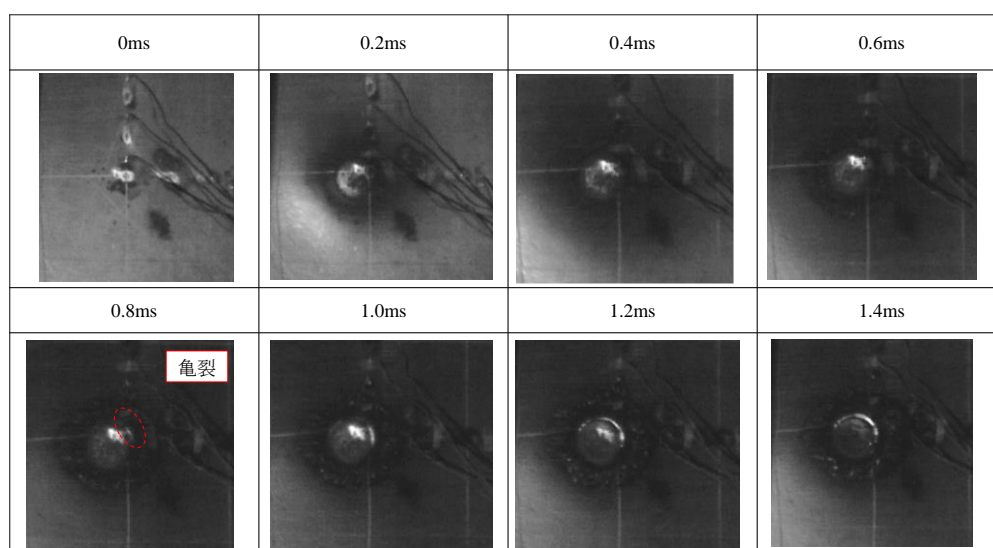


図-3.14 破壊の進展状況（平坦状飛翔体，6mm，58.5m/s）

3.3.2 飛翔体の速度、支点反力および鋼板のひずみ－時間関係

各板厚で非貫通のケースおよび貫通が生じたケースにおける飛翔体の速度、支点反力および鋼板のひずみ－時間関係を、図-3.15～3.17 に示す。各時刻歴の原点は、鋼板表面中央に貼付したひずみゲージ A の値が生じた時刻とした。図-3.15 に示す板厚 6mm のケースでは、速度 41.6m/s に対する破壊モードは非貫通であった。速度－時間関係から、衝突後から速度はほぼ線形に低下し、時刻 2.0～4.0ms において緩やかな低下を示す。その後、速度は負値を示しており、跳ね返っていることを示している。また、ひずみ－時間関係をみると、衝突部真裏のひずみゲージ B1 は、衝突直後に約 15000 μ の引張ひずみが瞬間的に発生し、それ以降は約 4000 μ の残留引張ひずみが生じた。一方で、ひずみゲージ B1 から 5cm および 10cm 離れた位置のひずみゲージ B2 および B3 をみると、衝突直後には最大で約 5000 μ の圧縮ひずみが発生した。なお、圧縮ひずみの最大値は、中央部に近いひずみゲージ B2 の方が大きい値を示した。時刻 0.5ms になると、ひずみゲージ B2 は引張側へ転じ、ひずみゲージ B3 はほぼゼロの値を示した。以上から、本ケースでは、鋼板の中央部は高次の振動モードを示していることが推察される。支点反力－時間関係から、支点反力は衝突後約 2ms から生じ、時刻 5.5ms において約 320kN を示した。飛翔体の速度－時間関係から、時刻 2ms では速度は約 2m/s と小さいこと、またひずみ－時間関係では時刻 1ms において残留ひずみが生じていることから、支点反力が増大する前に衝突現象はほぼ終了したものと考えられる。速度 58.5m/s で貫通が生じたケースでは、飛翔体の速度－時間関係から、衝突後から速度はほぼ線形に低下し、図-3.15 に示したように貫通が生じる時刻約 1.0ms において速度が一定値約 30m/s となった。その後、時刻約 4.0ms で 2 回目の減速が生じて速度が 0m/s となる挙動を示した。この減速は、飛翔体の先端が鋼板を貫通した後に、胴体部が鋼板に衝突したためと考えられる。ひずみ－時間関係から、いずれの位置のひずみゲージも非貫通のケースと同様の挙動を示した。また、支点反力－時間関係をみると、非貫通のケースと同様に、時刻 2ms 以降において支点反力が増大し、時刻 6.5ms で 450kN を示した。本ケースでは、時刻約 1ms において貫通が発生していることから、本実験条件における鋼板の変形や貫通は非常に局所的な応答であることを示している。

図-3.16 および図-3.17 に示す板厚 9mm および板厚 12mm のケースについても、飛翔体の速度－時間関係、鋼板のひずみ－時間関係および支点反力－時間関係は、板厚 6mm の応答と同様の挙動を示した。ただし、速度－時間関係については、衝突速度と板厚が大きくなると、速度がゼロに低下するまでの時間がやや短くなった。また、裏面の最大ひずみをみると、衝突速度と板厚が大きくなるにしたがって、ひずみゲージ B1 の最大引張ひずみおよびひずみゲージ B2 の最大圧縮ひずみが大きくなる傾向が認められる。

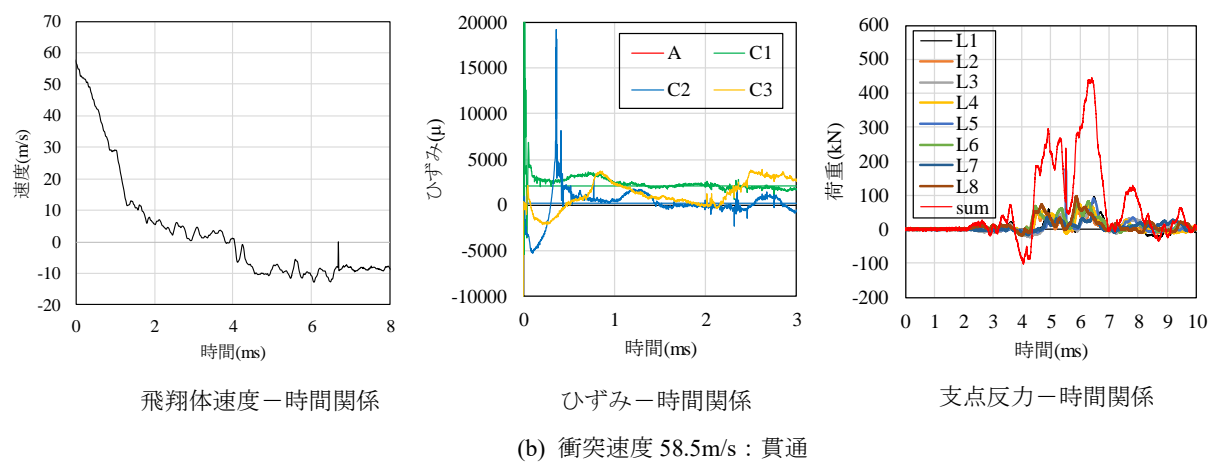
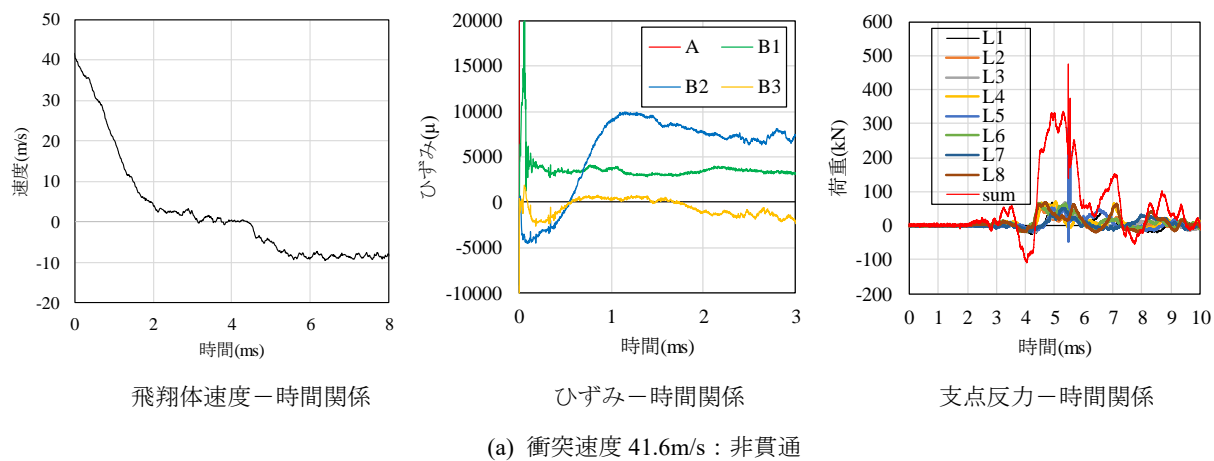
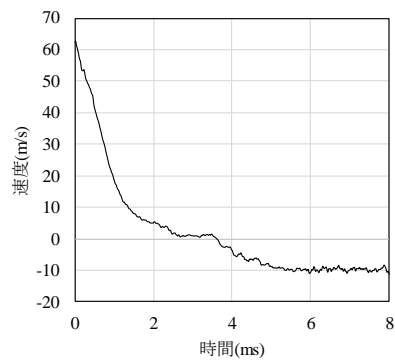
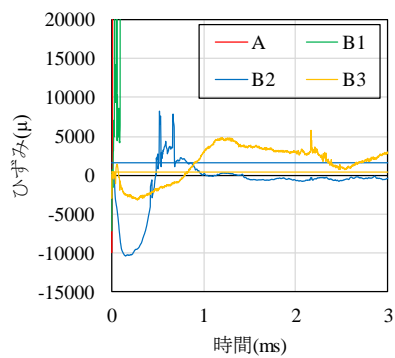


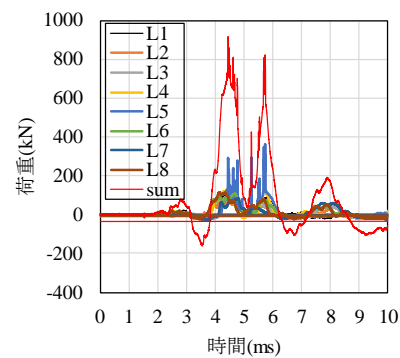
図-3.15 飛翔体の速度，支点反力およびひずみ-時間関係（平坦状飛翔体，板厚 6mm）



飛翔体速度－時間関係

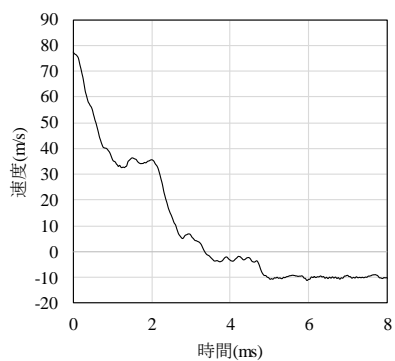


ひずみ－時間関係

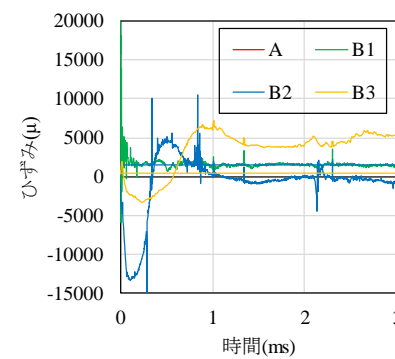


支点反力－時間関係

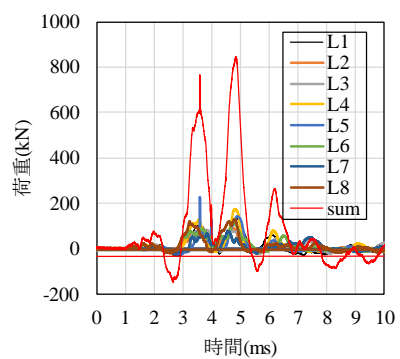
(a) 衝突速度 62.7m/s : 非貫通



飛翔体速度－時間関係



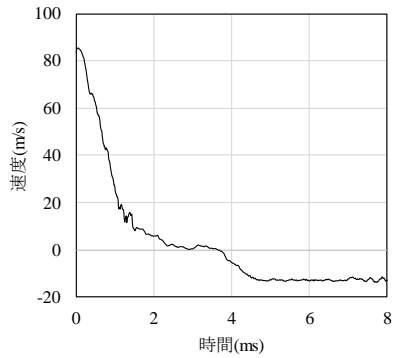
ひずみ－時間関係



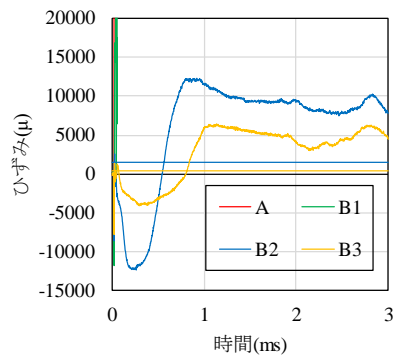
支点反力－時間関係

(b) 衝突速度 77.4m/s : 貫通

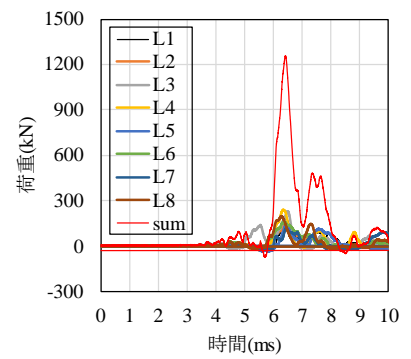
図-3.16 飛翔体の速度，支点反力およびひずみ－時間関係（平坦状飛翔体，板厚 9mm）



飛翔体速度－時間関係

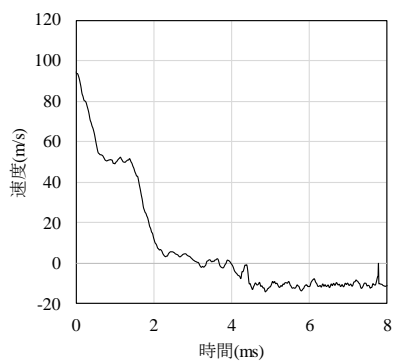


ひずみ－時間関係

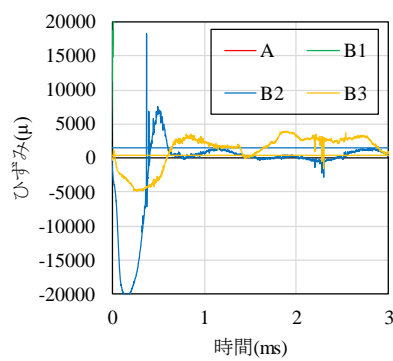


支点反力－時間関係

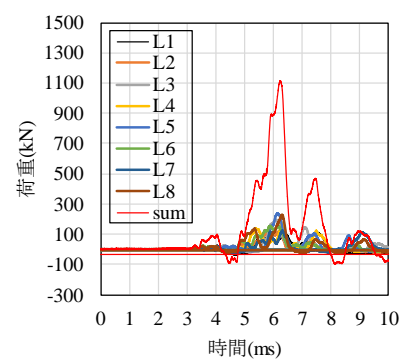
(a) 衝突速度 83.5m/s：非貫通



飛翔体速度－時間関係



ひずみ－時間関係



支点反力－時間関係

(b) 衝突速度 95.1m/s：貫通

図-3.17 飛翔体の速度，支点反力およびひずみ－時間関係（平坦状飛翔体，板厚 12mm）

3.4 半球状飛翔体を用いた衝突実験結果

3.4.1 鋼板の変形および破壊性状

鋼板の変形および貫通破壊性状を、図-3.18～3.20 に示す。図-3.18 に示す板厚 6mm のケースでは、衝突速度 50.4m/s および 56.7m/s に対する鋼板の破壊モードは非貫通となった。衝突速度 56.7m/s では、衝突部の裏面側に直径約 16mm の突起変形がみられた。衝突速度 66.8m/s においては、衝突速度 56.7m/s と同様に衝突部の裏面側に突起変形が生じ、この突起変形の境界に沿って亀裂が生じた。亀裂の発生位置は鋼板中心から約 9.1mm であり、これは飛翔体先端部の半径の約 36%である。衝突速度 70.9m/s では、衝突速度 56.7m/s および 66.8m/s と同様に衝突部の裏面側に突起変形が生じ、突起変形の境界に沿って発生した亀裂が飛翔体先端部に押し込まれることで拡大するとともに、新たに 3 方向に亀裂が生じて拡大し裏面側に広がる花弁状の貫通性状を示した。突起変形の境界に沿って発生した亀裂の発生位置は鋼板中心から約 9.3mm であり、これは飛翔体先端部の半径の約 37%である。

図-3.19 に示す板厚 9mm のケースでは、衝突速度 77.2m/s および 83.0m/s では、鋼板の破壊モードは非貫通となった。いずれのケースにおいても、衝突部の裏面側に突起変形がみられた。板厚 6mm のケースと比較すると突起変形の境界がやや不明瞭であったが、直径は板厚 6mm のケースと同程度で約 16mm であった。衝突速度 89.2m/s においては、同様に衝突部の裏面側に突起変形が生じ、この突起変形の境界に沿って亀裂が生じた。亀裂の発生位置は鋼板中心から約 11.0mm であり、これは飛翔体先端部の半径の約 44%である。衝突速度 96.0m/s では、突起変形の境界に沿って発生した亀裂と、その他 4 方向に亀裂が生じて拡大し裏面側に押し広げられた花弁状の貫通性状を示した。突起変形の境界に沿って発生した亀裂の発生位置は鋼板中心から約 11.4mm であり、これは飛翔体先端部の半径の約 46%である。

図-3.20 に示す板厚 12mm のケースでは、衝突速度 100.7m/s では、鋼板の破壊モードは非貫通となった。突起変形の境界が不明瞭であるが、他の板厚のケースと同様に衝突部の裏面側に突起変形がみられた。衝突速度 114.7m/s においては、同様に衝突部の裏面側に突起変形が生じ、この突起変形の境界に沿って亀裂が生じた。亀裂の発生位置は鋼板中心から約 14.2mm であり、これは飛翔体先端部の半径の約 57%である。衝突速度 115.5m/s では、突起変形の境界に沿って発生した亀裂の他 2 か所に亀裂が生じて拡大する破壊性状を示した。突起変形の境界に沿って発生した亀裂の発生位置は鋼板中心から約 14.4mm であり、これは飛翔体先端部の半径の約 58%である。

図-3.21 に、破壊部半径の位置と破壊部半径－板厚関係を示す。図-3.21(a)に示すように、突起変形の境界に沿って発生した亀裂の発生位置を破壊部半径とした。図-3.21(b)に示す破壊部半径－板厚関係から、板厚の増加に伴って破壊部半径は増大することがわかる。

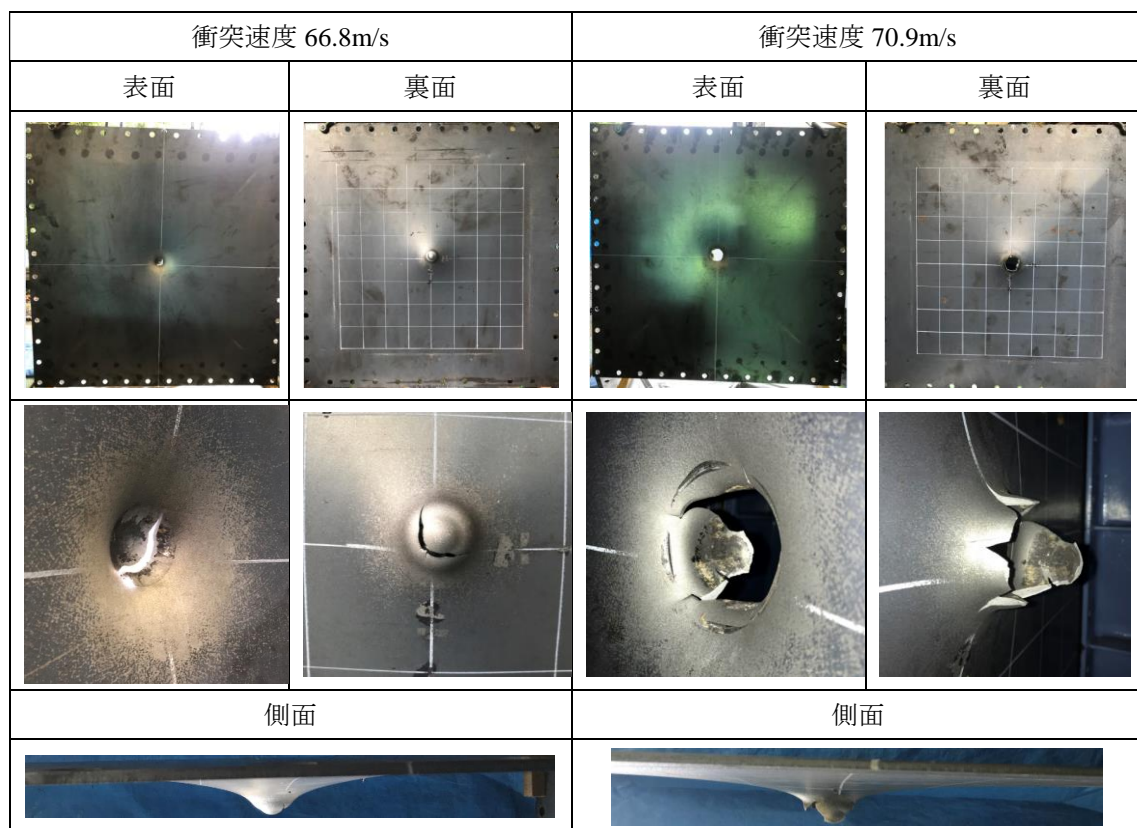
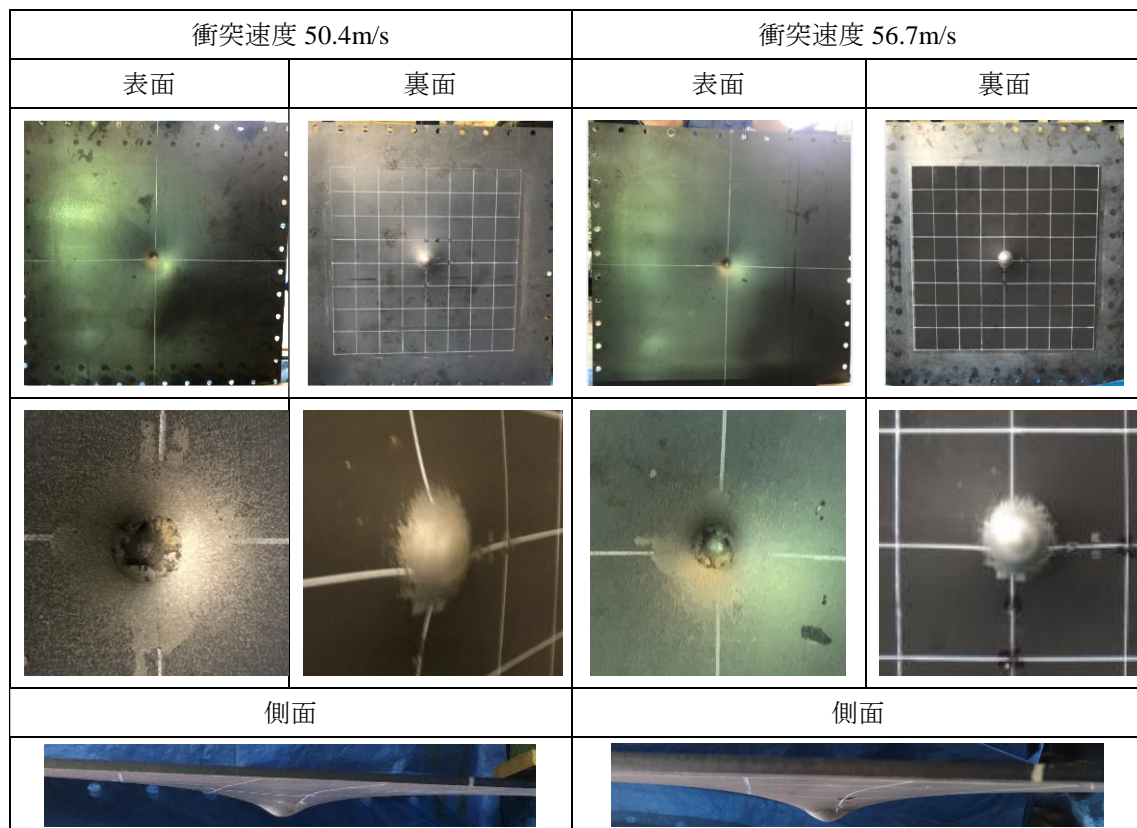


図-3.18 鋼板の破壊性状（半球状飛翔体，板厚 6mm）

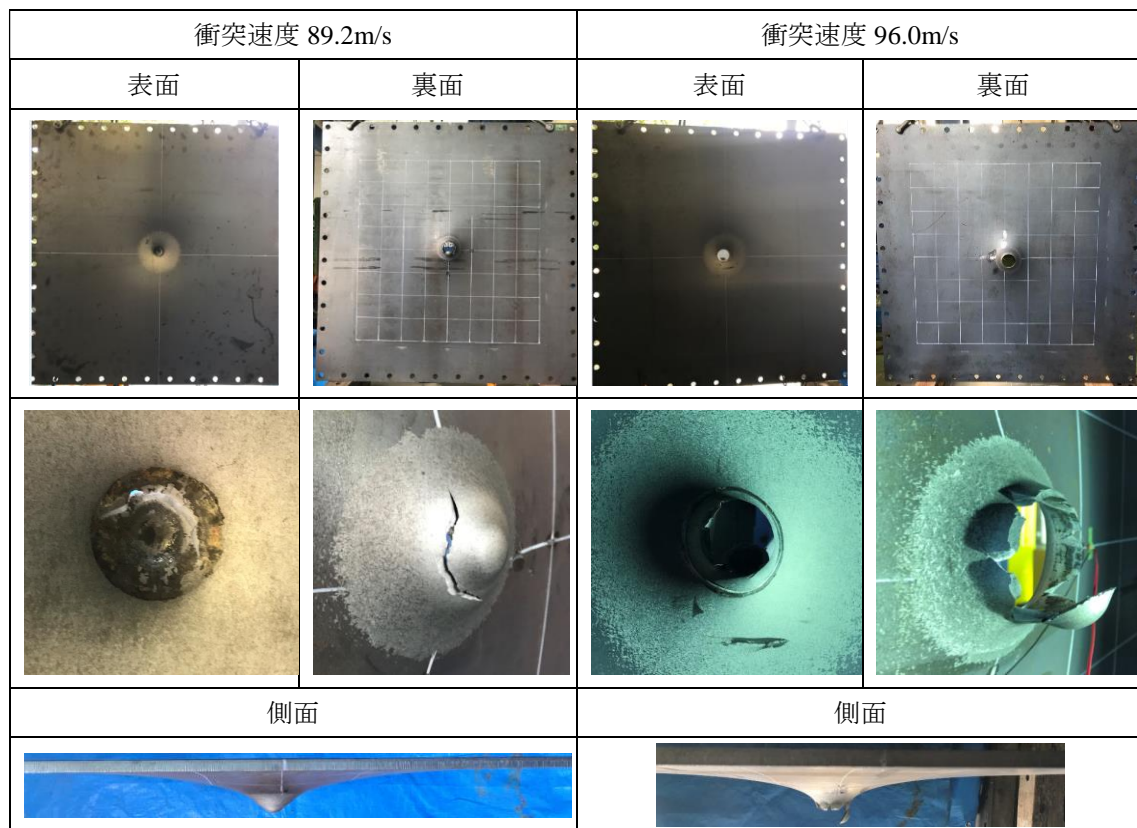
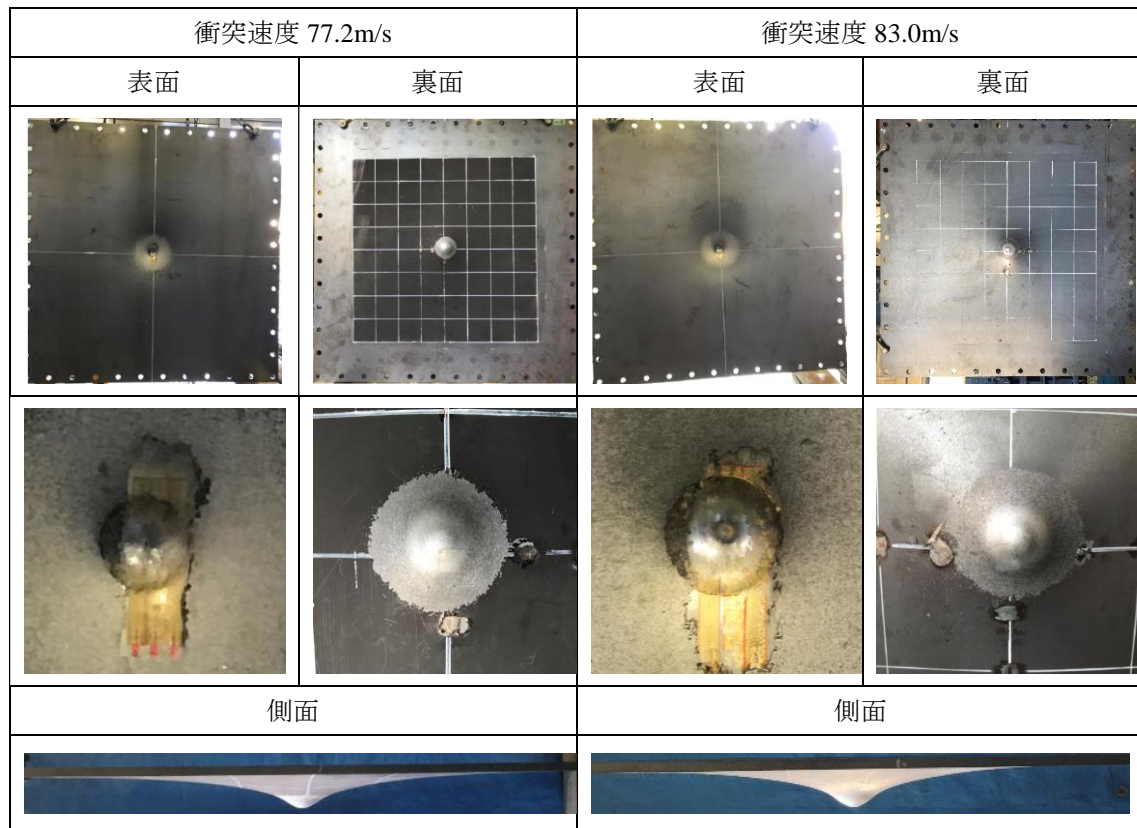


図-3.19 鋼板の破壊性状（半球状飛翔体，板厚 9mm）

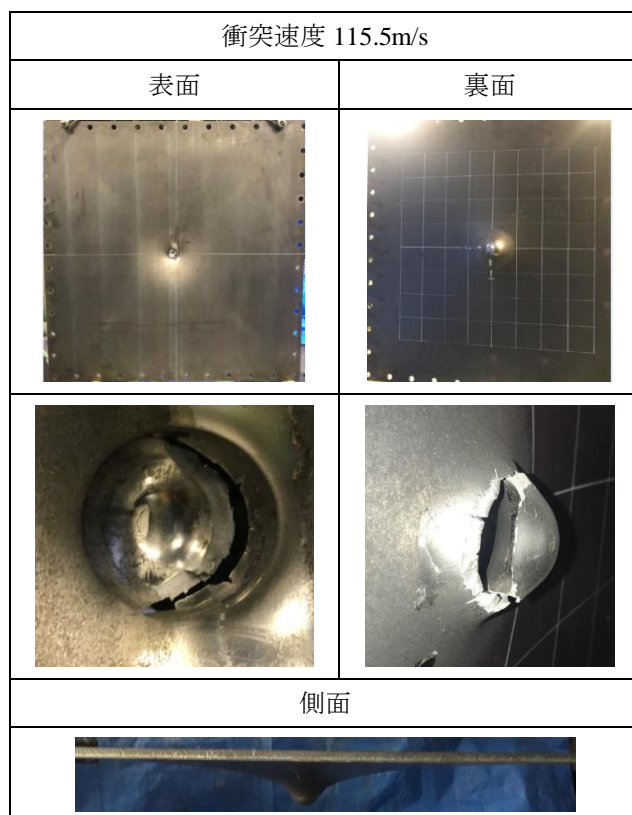
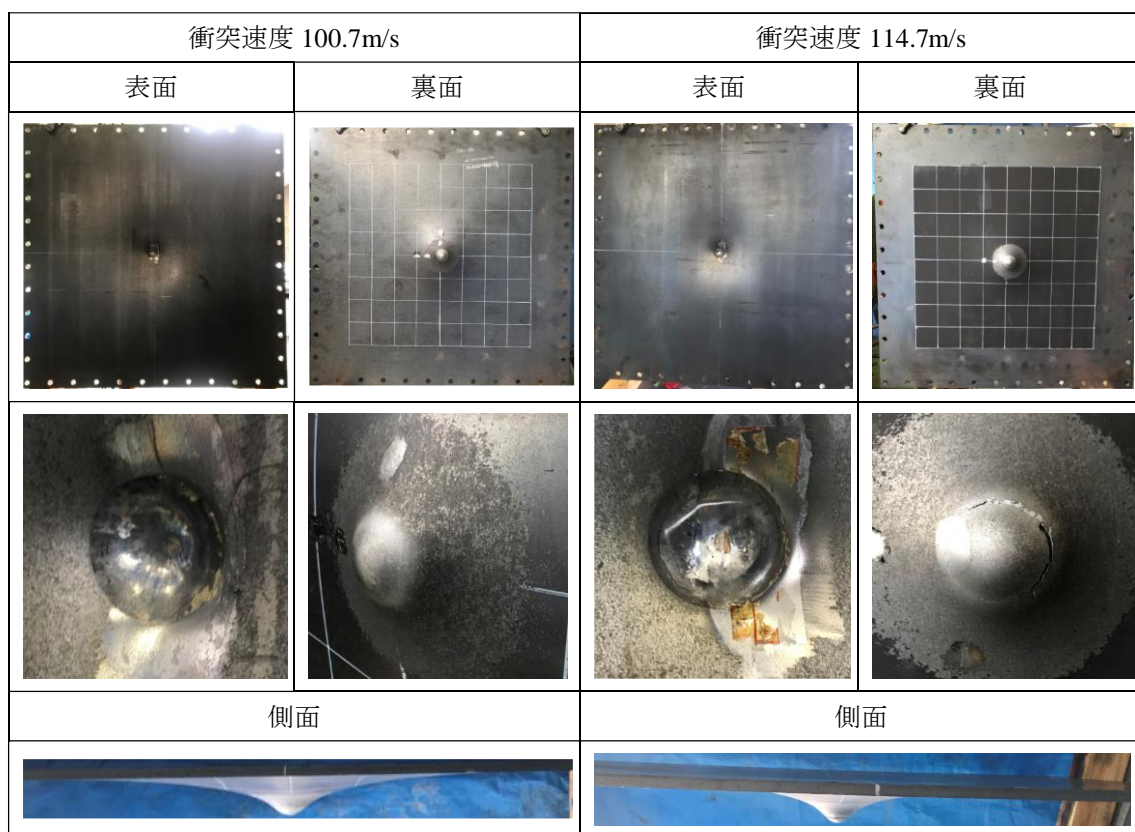
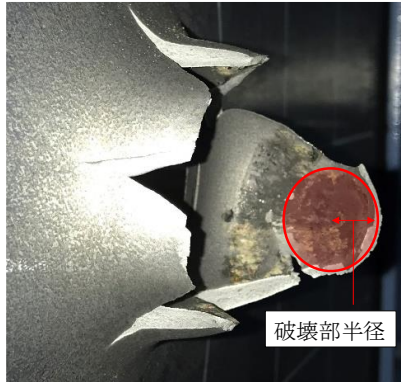
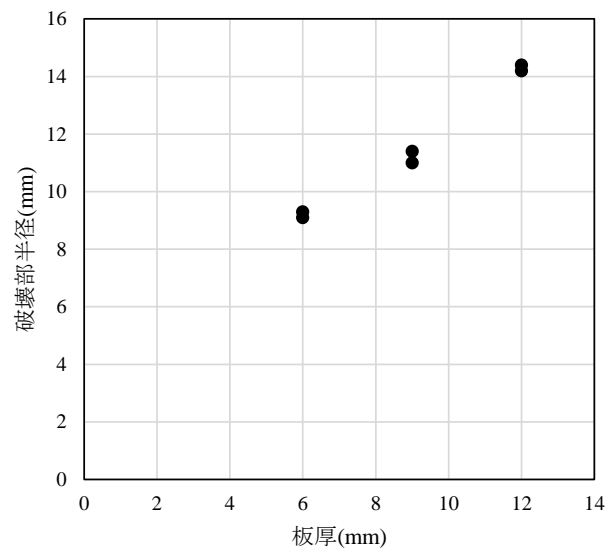


図-3.20 鋼板の破壊性状（半球状飛翔体，板厚 12mm）







(a) 破壊部半径の位置







(b) 破壊部半径－板厚関係

図-3.21 破壊部半径の位置と破壊部半径－板厚関係

図-3.22 に、実験後に撮影した先端部の状況を示す。図から、いずれのケースにおいても、鋼板との接触部に擦痕が認められるが、軸方向の残留変形は 1%以下であった。

板厚 6mm ケース			
50.4m/s	56.7m/s	66.8m/s	70.9m/s
			

板厚 9mm ケース			
77.2m/s	83.0m/s	89.2m/s	96.0m/s
			




板厚 12mm ケース		
100.7m/s	114.7m/s	115.5m/s
		

図-3.22 飛翔体先端部の変形状況（半球状飛翔体）

図-3.23 に、破壊モードと修正 BRL 式の比較結果を示す。飛翔体の先端形状係数 α を 1.1 とすると BRL 式と実験結果が概ね一致した。すなわち、平坦状飛翔体のケースと比較すると、保守的な評価を示すことがわかる。このことから、平坦状飛翔体の場合では $\alpha=1.0$ で実験結果と整合したことを考慮すると、半球状飛翔体による貫通は平坦状飛翔体の直径が 10%大きくなったことに相当すると考えられる。

一例として、板厚 6mm および 12mm のケースにおける鋼板の残留変位分布を、図-3.24 に示す。なお、貫通したケースの変形については、飛翔体の先端が鋼板を貫通した後に飛翔体後部が衝突しているため、参考のため示している。図-3.24(a)および(b)から、いずれ板厚のケースも衝突速度が増加することで中心部の残留変位が大きくなった。なお、板厚 9mm のケースにおいても同様の結果であった。これは、平坦状のケースと類似した傾向である。ただし、同程度の衝突速度において、平坦状のケースよりも半球状のケースの方が残留変位は大きい傾向が認められた。また、図-3.24(c)に示す変位を最大変位で除して正規化した分布から、全てのケースで類似した変位分布になっている。すなわち、板厚 6mm, 9mm および 12mm のケースで生じる残留変位の大きさは異なるが変位分布形状はほぼ等しく、同様のメカニズムで変形が生じた可能性があることを示唆している。

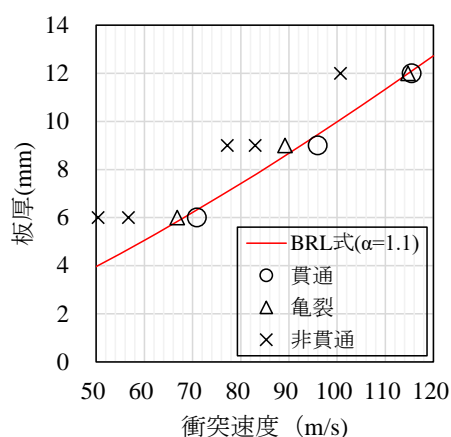


図-3.23 既往評価式との比較（半球状飛翔体）

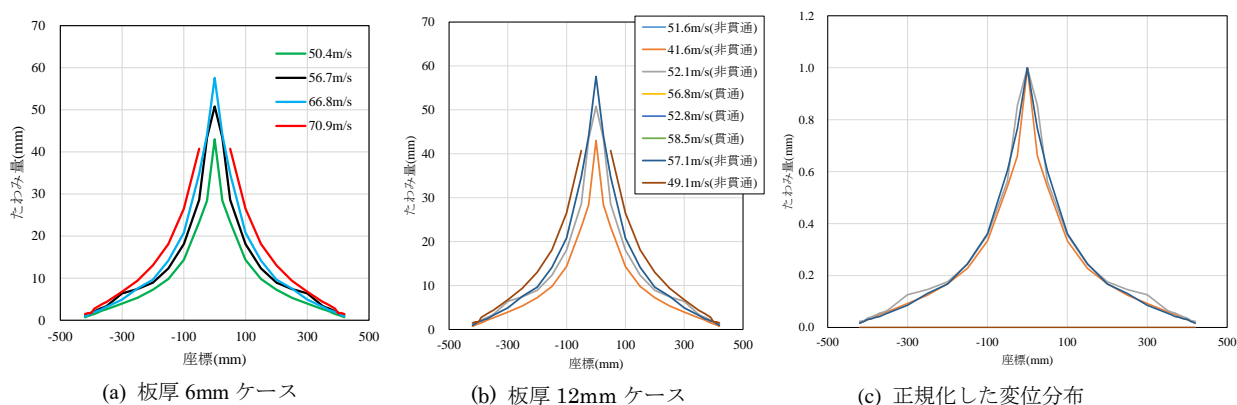


図-3.24 残留変位分布

高速度ビデオカメラで撮影した鋼板の破壊の進展状況を, 図-3.25 に示す. 図から, 板厚 6mm で貫通が生じたケースをみると, 飛翔体が衝突した後に変形が生じ, 時刻 2.4ms で亀裂が生じた. 最終的には, 時刻 3.6ms で貫通が生じた. 板厚 9mm および 12mm のケースも同様の挙動を示している. ただし, 鋼板の衝突部に突起変形が生じ, その境界付近に亀裂が生じて貫通破壊が生じていることが特徴的であった. 平坦状飛翔体を用いた実験で発生した貫通片は, 半球状飛翔体を用いた実験では認められなかった. 以上から, 異なる先端形状により, 鋼板の変形および貫通性状の特徴が変化することがわかる.

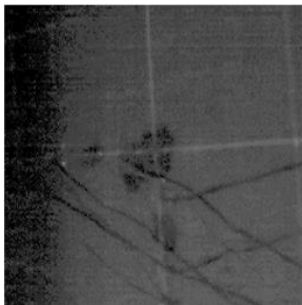
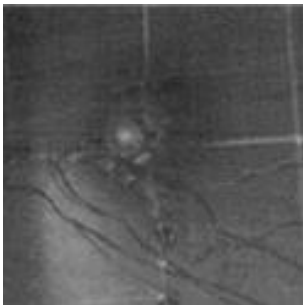

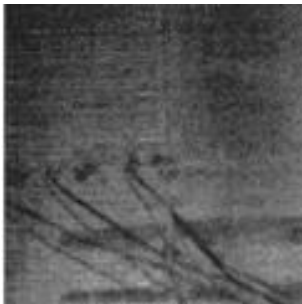
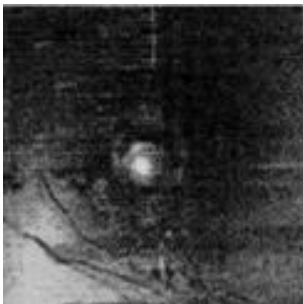

	破壊の進展状況		
時刻	0ms (衝突直後)	2.4ms (亀裂発生)	3.6ms (貫通)
板厚 6mm 70.9m/s			
時刻	0ms (衝突直後)	1.3ms (亀裂発生)	2.4ms (貫通)
板厚 9mm 96.0m/s			

図-3.25 破壊の進展状況 (半球状飛翔体)

3.4.2 飛翔体の速度、支点反力および鋼板のひずみ－時間関係

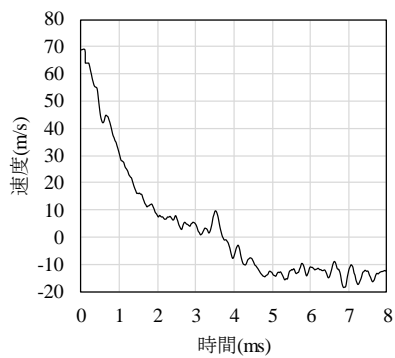
各板厚で貫通が生じたケースおよび非貫通のケースにおける飛翔体の速度、支点反力および鋼板のひずみ－時間関係を、図-3.26～3.28 に示す。各時刻歴の原点は、鋼板表面中央に貼付したひずみゲージ A の値が生じた時刻とした。図-3.26 に示す板厚 6mm のケースでは、速度 66.8m/s に対する破壊モードは非貫通であった。速度－時間関係から、衝突後から速度はほぼ線形に低下し、時刻 2.0～4.0ms において緩やかな低下を示す。その後、速度は負値を示しており、跳ね返っていることを示している。また、ひずみ－時間関係をみると、まず裏面中央の B1 は引張ひずみを生じ、瞬間的にひずみの最大設定値に達した。一方で、ひずみゲージ B1 から 5cm および 10cm 離れた位置のひずみゲージ B2 および B3 をみると、衝突直後には最大で約 4500 μ の圧縮ひずみが発生した。なお、圧縮ひずみの最大値は、中央部に近いひずみゲージ B2 の方が大きい値を示した。時刻 0.4ms になると、ひずみゲージ B2 は引張側へ転じ、ひずみゲージ B3 はほぼゼロの値を示した。以上から、本ケースでは、鋼板の中央部は高次の振動モードを示していることが推察される。支点反力－時間関係から、支点反力は衝突後約 2ms から生じ、時刻 5.5ms において約 400kN を示した。飛翔体の速度－時間関係から、時刻 2ms では速度は約 7m/s と小さいこと、またひずみ－時間関係ではひずみはほぼゼロとなっていることから、平坦状飛翔体の場合と同様に支点反力が増大する前に衝突現象はほぼ終了したものと考えられる。速度 58.5m/s で貫通が生じたケースでは、飛翔体の速度－時間関係から、衝突後から速度はほぼ線形に低下し、約 1.5ms で速度の低下が緩やかになり、その後約 2.3ms 以降において 2 度目の減速が生じて速度が 0m/s となった。この減速は、飛翔体の先端が鋼板を貫通した後に、胴体部が鋼板に衝突したためと考えられる。ひずみ－時間関係から、いずれの位置のひずみゲージも非貫通のケースと同様の挙動を示した。また、支点反力－時間関係をみると、非貫通のケースと同様に、時刻 2.3ms 以降において支点反力が増大し、時刻 3.6ms で 350kN を示した。本ケースでは、支点反力が生じる時刻 2.3ms よりも前に鋼板に亀裂が生じ、その後、飛翔体の後部が鋼板に衝突することで飛翔体の 2 度目の減速が生じて貫通が発生していることから、本実験条件における鋼板の変形や貫通は非常に局所的な応答であることを示している。

図-3.27 に、板厚 9mm、衝突速度 89.2m/s および 96.0m/s の速度－時間関係、ひずみ－時間関係および支点反力－時間関係を示す。衝突速度 89.2m/s に対して非貫通のケースでは、板厚 6mm の非貫通ケースと同様の挙動を示しており、衝突後、急激に減速して時刻約 3ms で速度が 0m/s となった。また、衝突速度 96.0m/s で貫通が生じたケースでは、衝突後約 1.3ms で速度が一定値約 40m/s を示し、その後約 2.4ms 以降において 2 度目の減速が生じて速度が 0m/s になった。なお、高速度ビデオカメラ画像からも、時刻 1.31ms で亀裂が発生し、時刻 2.38ms で貫通が生じていた。すなわち、飛翔体先端部が衝突して、鋼板が変形することでエネルギーを吸収して亀裂が生じる。その後、変形が局所化して亀裂が進展することで抵抗力が低下しながら、飛翔体の速度は時刻 2.4ms で 8m/s と小さくなり貫通が生じる。その後は、飛翔体後部が鋼板に衝突することで 2 度目の減速（時刻 2.4ms～3ms）が生じたものと考えられる。

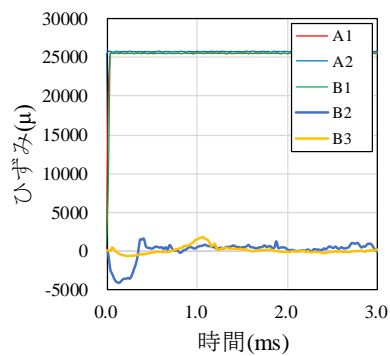
次に、ひずみ－時間関係をみると、飛翔体が衝突すると、まず裏面中央の B1 は引張ひずみを生じ、瞬間的にひずみの最大設定値に達した。その後、ひずみ B2 および B3 には非貫通のケースでは最大圧縮ひずみ 4000μ が、貫通のケースでは最大圧縮ひずみ 6000μ が生じた。一方、縦方向に貼付したひずみ C1 は応答初期において圧縮ひずみを示しており、横方向に貼付したひずみ B1 とは異なるが、これは本ケースにおいて飛翔体の衝突位置が鋼板中央から少し上方にずれたためであると考えている。

図-3.28 に、板厚 12mm、衝突速度 100.7m/s および 115.5m/s の速度－時間関係、ひずみ－時間関係および支点反力－時間関係を示す。衝突速度 100.7m/s に対して非貫通のケースでは、衝突後、急激に減速して時刻約 2.0ms で速度が 0m/s となった。また、衝突速度 96.0m/s で貫通が生じたケースでは、衝突後約 1.9ms で速度が一定値約 6m/s を示し、その後約 3.0ms 以降において 2 度目の減速が生じて速度が 0m/s になった。板厚 6mm および 9mm のケースと同様の挙動を示した。

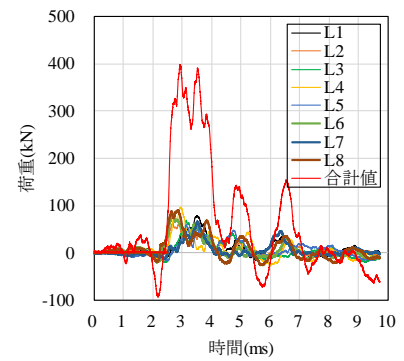
以上から、裏面中央付近では面内方向の引張ひずみが生じ、中央から 50mm および 100mm の位置では圧縮ひずみが生じており、半球状飛翔体の衝突を受けた鋼板の衝突部においても、平坦状飛翔体の場合と同様に高次の振動モードのような変形が生じていたと考えられる。また、いずれの先端形状においても、非常に短時間に局所的な特徴を示す点が共通している。



飛翔体速度－時間関係

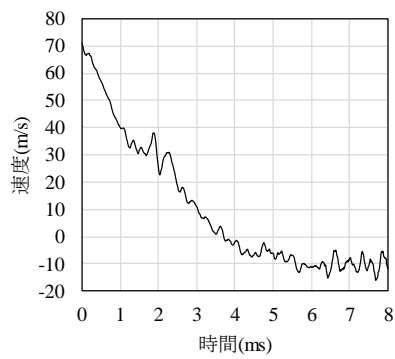


ひずみ－時間関係

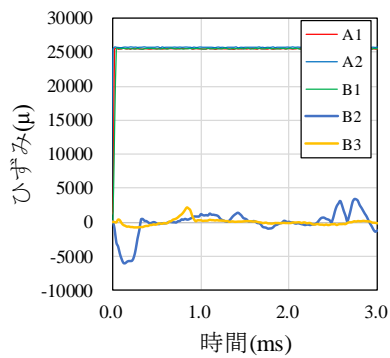


支点反力－時間関係

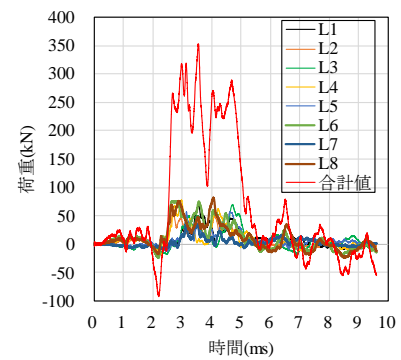
(a) 衝突速度 66.8/s : 非貫通



飛翔体速度－時間関係



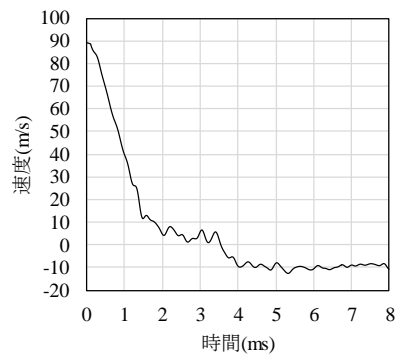
ひずみ－時間関係



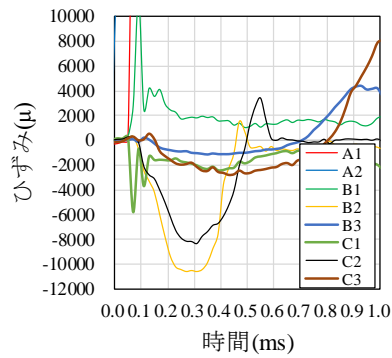
支点反力－時間関係

(b) 衝突速度 70.9m/s : 貫通

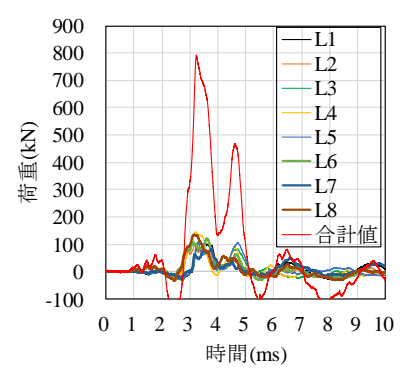
図-3.26 飛翔体の速度，支点反力およびひずみ－時間関係（半球状飛翔体，板厚 6mm）



飛翔体速度－時間関係

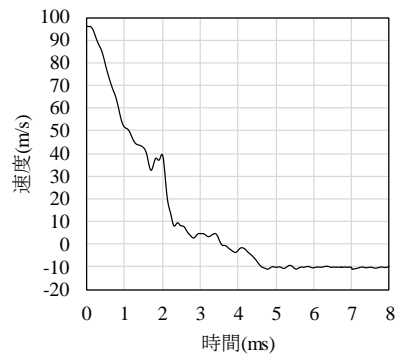


ひずみ－時間関係

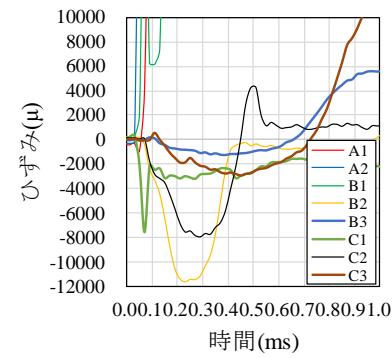


支点反力－時間関係

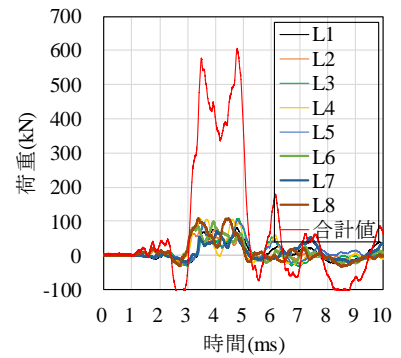
(a) 衝突速度 89.2/s : 非貫通



飛翔体速度－時間関係



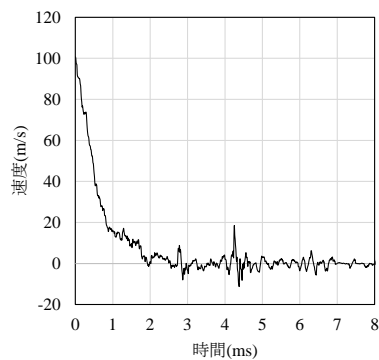
ひずみ－時間関係



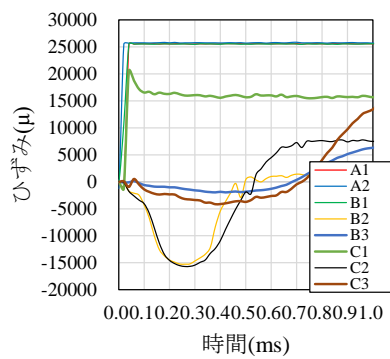
支点反力－時間関係

(b) 衝突速度 96.0m/s : 貫通

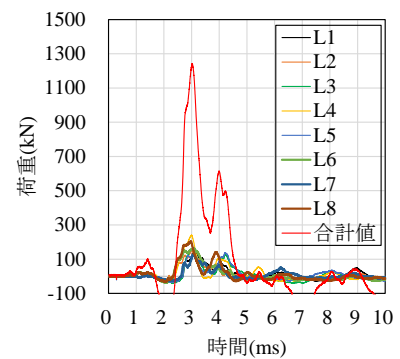
図-3.27 飛翔体の速度，支点反力およびひずみ－時間関係（半球状飛翔体，板厚 9mm）



飛翔体速度－時間関係

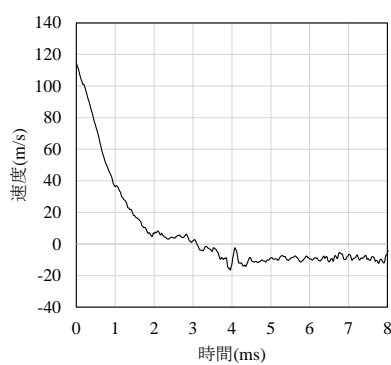


ひずみ－時間関係

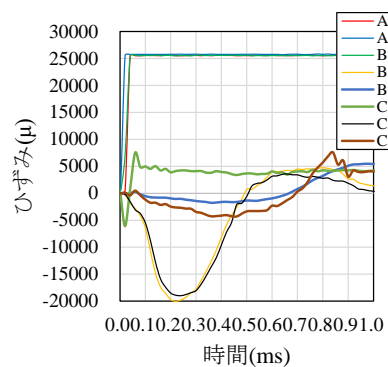


支点反力－時間関係

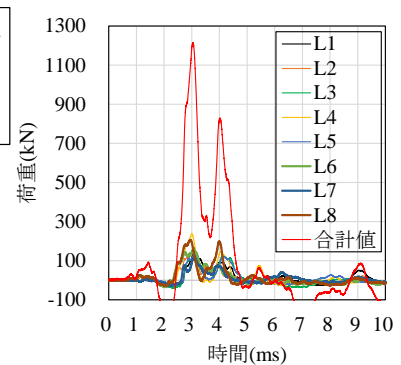
(a) 衝突速度 100.7m/s : 非貫通



飛翔体速度－時間関係



ひずみ－時間関係



支点反力－時間関係

(b) 衝突速度 115.5m/s : 貫通

図-3.28 飛翔体の速度，支点反力およびひずみ－時間関係（半球状飛翔体，板厚 12mm）

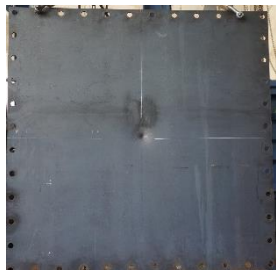
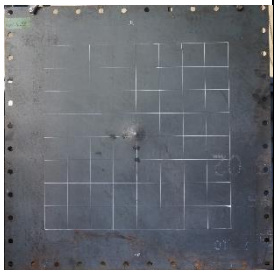
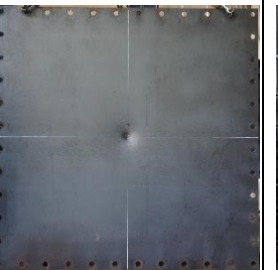
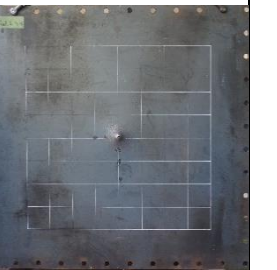
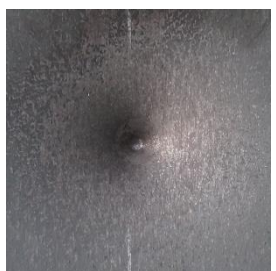



3.5 円錐状飛翔体を用いた衝突実験結果

3.5.1 鋼板の変形および破壊性状

鋼板の変形および貫通破壊性状を，図-3.29～3.31 に示す．図-3.29 に示す板厚 6mm のケースでは，衝突速度 29.0m/s では，鋼板の破壊モードは非貫通となった．衝突速度 37.4m/s および 44.9m/s では，中心から 3 方向に亀裂が生じた．衝突速度 59.9m/s においては，中心から 3 方向に亀裂が生じ，飛翔体によって裏面側に押し広げられる貫通性状を示した．

図-3.30 に示す板厚 9mm のケースでは，衝突速度 52.4m/s，61.0m/s および 65.3m/s では，鋼板の裏面中央に亀裂が生じた．速度の増加に伴って亀裂が進展し，衝突速度 77.5m/s においては，鋼板に貫通が生じる結果となった．

図-3.31 に示す板厚 12mm のケースでは，衝突速度 89.3m/s および 95.9m/s では，鋼板の裏面側に亀裂が生じた．板厚 6mm および 9mm の場合と異なり，中心から拡大するような亀裂ではなく，円弧状の亀裂がみられた．衝突速度 111.4m/s においては，板厚 6mm および 9mm の場合と同様に中心から 3 方向に亀裂が生じた．衝突速度 116.2m/s では，亀裂が上下 2 方向に進展して拡大することで貫通が生じた．

衝突速度 29.0m/s : 非貫通		衝突速度 37.4m/s : 亀裂	
表面	裏面	表面	裏面
			
表面拡大	裏面拡大	表面拡大	裏面拡大
			



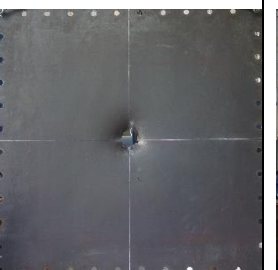

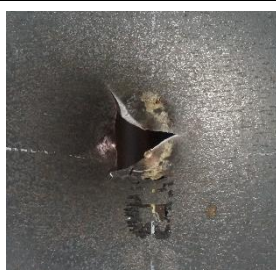



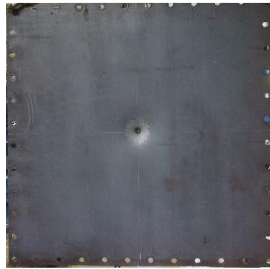
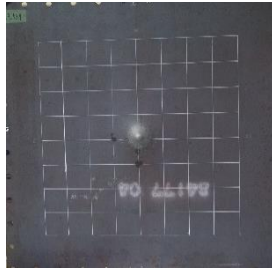
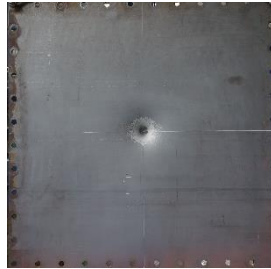
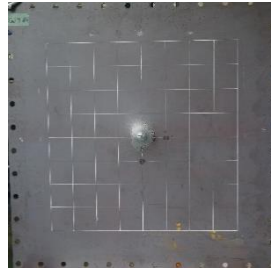




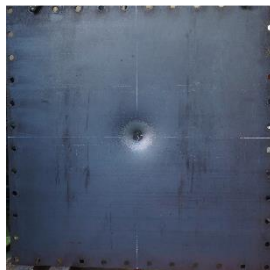

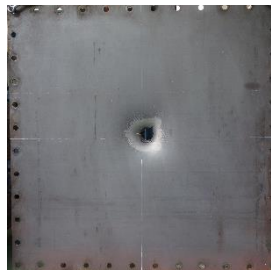

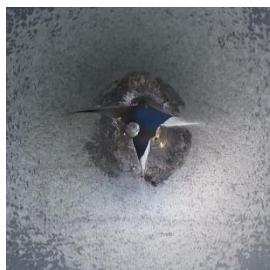




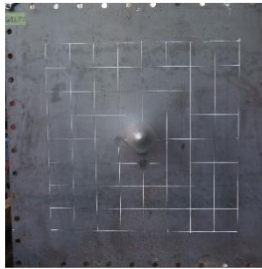

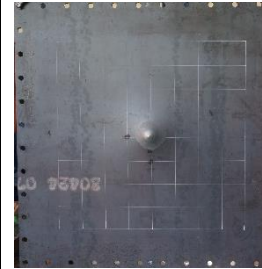

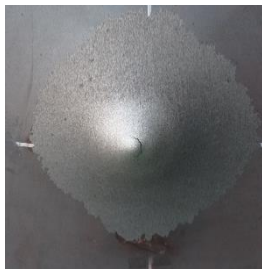

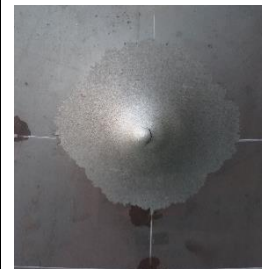
衝突速度 44.9m/s : 亀裂		衝突速度 59.9m/s : 貫通	
表面	裏面	表面	裏面
			
表面拡大	裏面拡大	表面拡大	裏面拡大
			

図-3.29 鋼板の破壊性状（円錐状飛翔体，板厚 6mm）

衝突速度 52.4m/s : 非貫通		衝突速度 61.0m/s : 亀裂	
表面	裏面	表面	裏面
			
表面拡大	裏面拡大	表面拡大	裏面拡大
			

衝突速度 65.3m/s : 亀裂		衝突速度 77.5m/s : 貫通	
表面	裏面	表面	裏面
			
表面拡大	裏面拡大	表面拡大	裏面拡大
			

衝突速度 89.3m/s : 非貫通		衝突速度 95.9m/s : 非貫通	
表面	裏面	表面	裏面
			
表面拡大	裏面拡大	表面拡大	裏面拡大
			




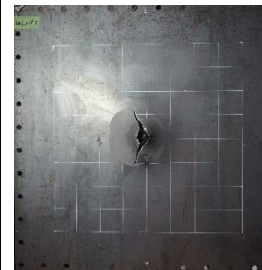



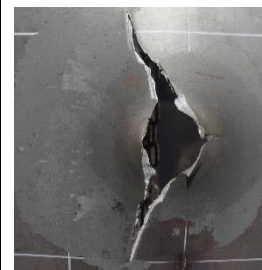
衝突速度 111.4m/s : 亀裂		衝突速度 116.2m/s : 貫通	
表面	裏面	表面	裏面
			
表面拡大	裏面拡大	表面拡大	裏面拡大
			

図-3.32 に、実験後に撮影した先端部の状況を示す。各板厚の一例を示しているが、いずれのケースにおいても、先端部が圧潰し残留変形が認められた。図-3.33 に、先端部の軸方向の変形量と板厚の関係を示す。図から、板厚の増加に伴って変形量が増加する傾向が認められ、板厚 12mm のケースでは最大約 4mm の変形が生じた。

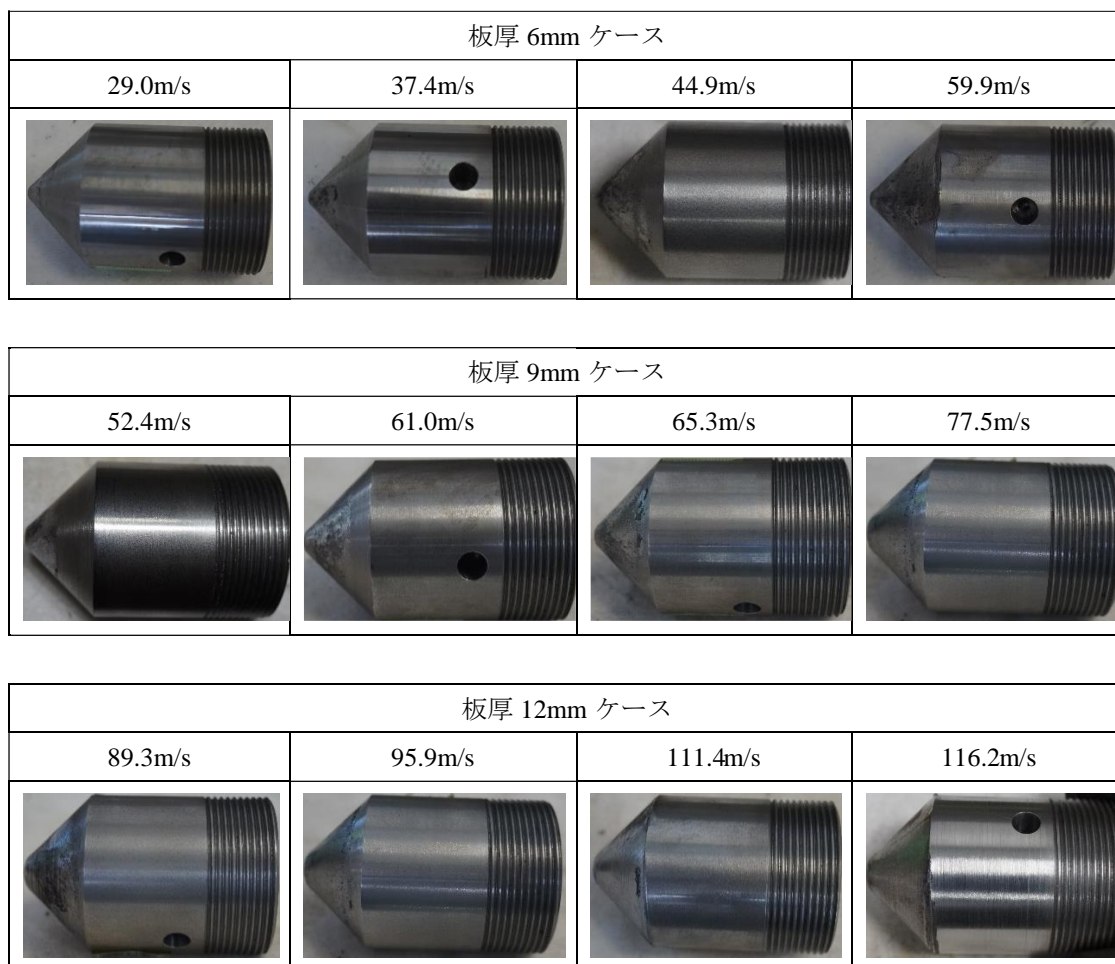


図-3.32 飛翔体先端部の変形状況（円錐状飛翔体）

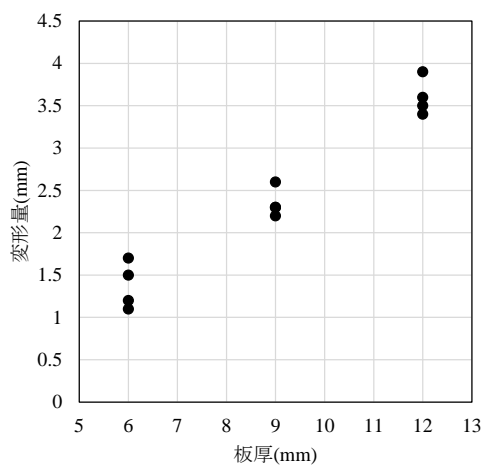


図-3.33 飛翔体先端部の変形量－板厚関係（円錐状飛翔体）

図-3.34 に、破壊モードと修正 BRL 式の比較結果を示す。図から、板厚 6mm および 9mm のケースについては、先端形状係数 α を 0.7 とすると修正 BRL 式と実験結果が概ね一致した。このことから、平坦状飛翔体の場合では $\alpha=1.0$ で実験結果と整合したことを考慮すると、円錐状飛翔体による貫通は平坦状飛翔体の直径が 30% 小さくなったことに相当すると考えられる。一方、板厚 12mm のケースでは適合性が低い結果となった。これは、飛翔体先端部が圧潰して塑性変形が生じたことで形状が変化し、鋼板との接触面積が増加したことによるものと考えられる。

一例として、板厚 6mm および 12mm のケースにおける鋼板の残留変位分布を、図-3.35 に示す。なお、貫通が生じたケースの変形については、飛翔体の先端が鋼板を貫通した後に飛翔体後部が衝突しているため、参考のために示している。図-3.35(a)および(b)から、いずれ板厚のケースも衝突速度が増加することで中心部の残留変位が大きくなった。なお、板厚 9mm のケースにおいても同様の結果であった。これは、平坦および半球状のケースと類似した傾向である。また、図-3.35(c)に示す変位を最大変位で除して正規化した分布から、全てのケースで類似した変位分布になっている。すなわち、板厚 6mm, 9mm および 12mm のケースで生じる残留変位の大きさは異なるが変位分布形状はほぼ等しく、同様のメカニズムで変形が生じた可能性があることを示唆している。

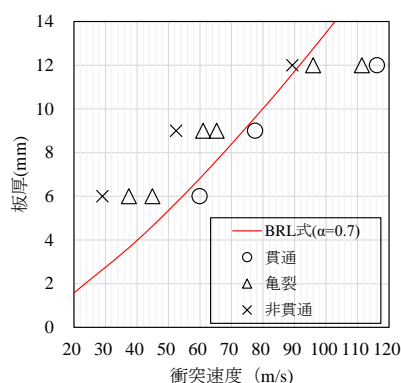


図-3.34 既往評価式との比較（円錐状飛翔体）

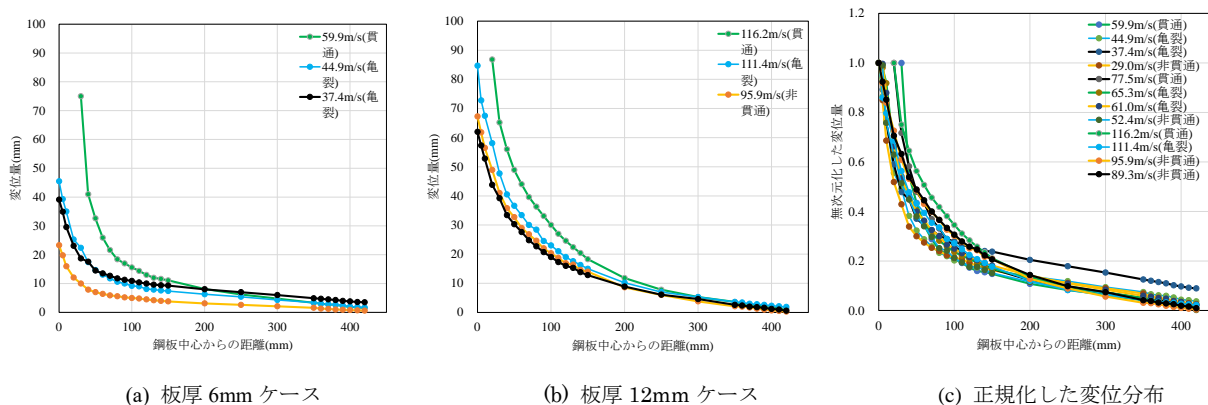


図-3.35 残留変位分布（円錐状飛翔体）

高速度ビデオカメラで撮影した鋼板の破壊の進展状況を, 図-3.36 に示す. 図から, 板厚 6mm で貫通が生じたケースをみると, 飛翔体が衝突した後に変形が生じ, 時刻 0.3ms で亀裂が生じた. 最終的には, 時刻 0.8ms で貫通が生じた. 板厚 9mm および 12mm のケースも同様の挙動を示している.

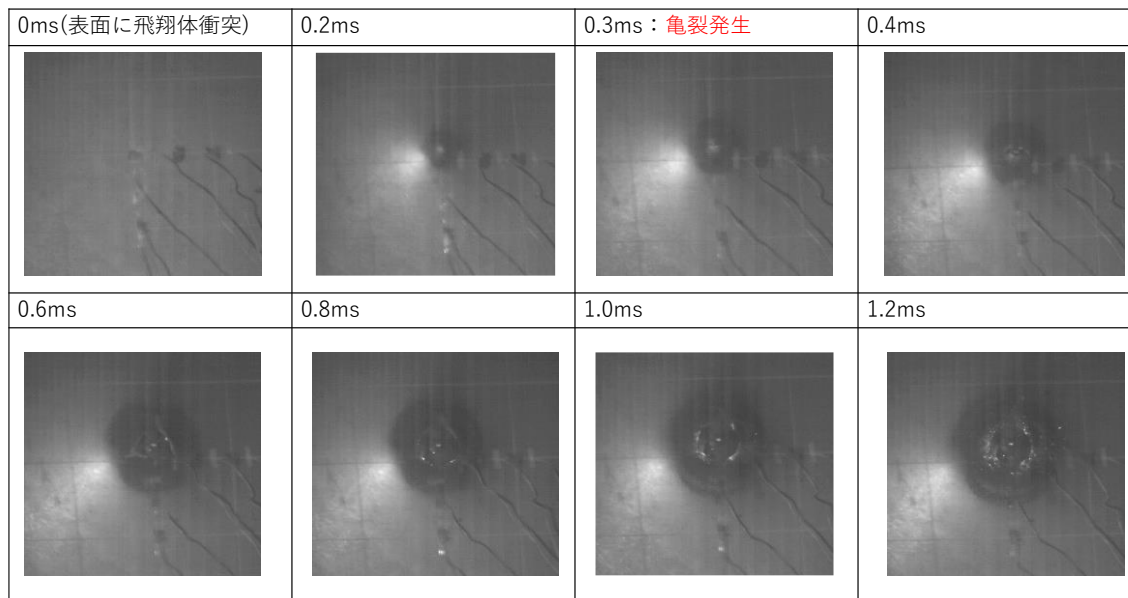


図-3.36 破壊の進展状況 (円錐状飛翔体)

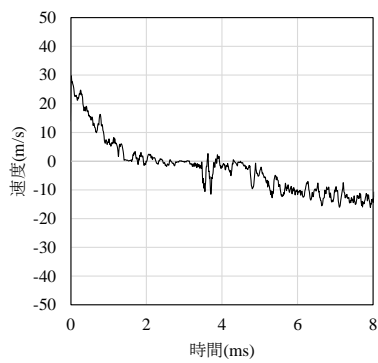
3.5.2 飛翔体の速度、支点反力および鋼板のひずみ－時間関係

各板厚で貫通が生じたケースおよび非貫通のケースにおける飛翔体の速度、支点反力および鋼板のひずみ－時間関係を、図-3.37～3.39 に示す。各時刻歴の原点は、鋼板表面中央に貼付したひずみゲージ A の値が生じた時刻とした。図-3.37 に示す板厚 6mm のケースでは、速度 29.0m/s に対する破壊モードは非貫通であった。速度－時間関係から、衝突後から速度はほぼ線形に低下し、時刻 2.0ms において速度はゼロまで低下した。その後、速度は負値を示しており、跳ね返っていることを示している。また、ひずみ－時間関係をみると、まず裏面中央の B1 は引張ひずみを生じ、瞬間的に約 6000 μ の引張ひずみが発生した。一方で、ひずみゲージ B2 については、衝突後から圧縮ひずみが発生し、時刻約 0.8ms で約 2500 μ に達し、その後は約 2000 μ 程度の値で推移した。また、B3 については約 2000 μ の圧縮ひずみが発生したのちに、時刻約 0.8ms で引張ひずみに移行する挙動を示した。以上から、飛翔体衝突後から時刻 0.8ms までの間においては、中心部に引張ひずみが生じ、中心から 50mm および 100mm の位置には圧縮ひずみが生じており、この間は鋼板中心を最大値とするたわみが生じていることがわかる。また、時刻 0.8ms 以降については、各位置のひずみが振動していることから、高次の振動モードを示していることが推察される。支点反力－時間関係から、支点反力の主要な波形は衝突後約 3ms から生じ、時刻 4.0ms において約 300kN を示した。飛翔体の速度－時間関係から、時刻 2ms で速度はほぼゼロとなっていることから、平坦および半球状飛翔体の場合と同様に支点反力が増大する前に衝突現象はほぼ終了したものと考えられる。速度 59.9m/s で貫通が生じたケースでは、飛翔体の速度－時間関係から、衝突後から速度はほぼ線形に低下し、時刻 3.0ms において速度はゼロまで低下した。平坦状飛翔体の場合にみられた 2 段階の速度低下はみられなかった。ひずみ－時間関係から、裏面中央の B1 は引張ひずみを生じ、瞬間的に約 20000 μ の引張ひずみが発生した。また、ひずみゲージ B2 および B3 はいずれも、約 2000 μ の圧縮ひずみが発生したのちに、時刻約 0.8ms で引張ひずみに移行する挙動を示した。支点反力－時間関係をみると、非貫通のケースと同様に、時刻 2.5ms 以降において支点反力が増大し、時刻 4.8ms で 340kN を示した。本ケースでは、支点反力が生じる時刻 2.5ms よりも前に鋼板に亀裂が生じており、本実験条件における鋼板の変形や貫通は非常に局所的な応答であることを示している。

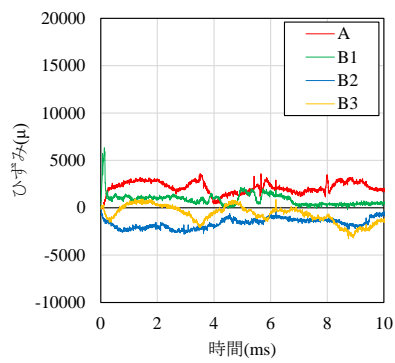
図-3.38 に示す板厚 9mm のケースでは、速度 52.4m/s に対する破壊モードは非貫通であった。速度－時間関係から、衝突後から速度はほぼ線形に低下し、時刻約 2.0ms 以降は速度が緩やかに低下した。その後、速度は負値を示しており、跳ね返っていることを示している。また、ひずみ－時間関係をみると、まず裏面中央の B1 は引張ひずみを生じ、瞬間的に約 14000 μ の引張ひずみが発生した。ひずみゲージ B2 については、約 6000 μ の圧縮ひずみが発生したのちに、時刻約 0.7ms でひずみがほぼゼロに近い値となる挙動を示した。また、B3 については、衝突後から圧縮ひずみが発生し、時刻約 0.2ms で約 1500 μ に達し、その後、時刻約 1.3ms でひずみがほぼゼロに近い値となって振動する挙動を示した。以上から、このケースでは、板厚 6mm ケースよりも中心部の最大ひずみが大きく、中心部により局所的な変形が生じたこと

がわかる．支点反力－時間関係から，支点反力は衝突後約 2.5ms から生じ，時刻 3.3ms において約 600kN を示した．飛翔体の速度－時間関係から，時刻 3.0ms で速度はほぼゼロとなっていることから，本ケースについても支点反力が増大する前に衝突現象はほぼ終了したものと考えられる．速度 77.5m/s で貫通が生じたケースでは，飛翔体の速度－時間関係から，衝突後から速度はほぼ線形に低下し，約 2.0ms で速度がゼロとなった．ひずみ－時間関係から，いずれの位置のひずみゲージも非貫通のケースと同様の挙動を示した．また，支点反力－時間関係をみると，非貫通のケースと同様に，時刻 2.5ms 以降において支点反力が増大し，時刻 3.3ms で 680kN を示した．本ケースは，支点反力が生じる時刻 2.5ms よりも前に鋼板に亀裂が生じており，鋼板の変形や貫通は非常に局所的な応答であることを示している．

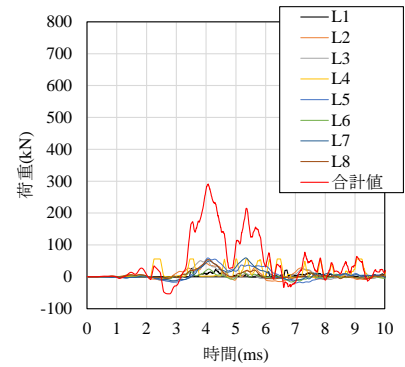
図-3.39 に示す板厚 12mm のケースでは，速度 89.3m/s に対する破壊モードは非貫通であった．速度－時間関係から，衝突後から速度はほぼ線形に低下し，時刻約 0.7ms 以降は速度が緩やかに低下した．その後，時刻 3.0ms 以降に速度は負値を示しており，跳ね返っていることを示している．また，ひずみ－時間関係をみると，まず裏面中央の B1 は引張ひずみを生じ，瞬間的に約 8000 μ の引張ひずみが発生した．ひずみゲージ B2 については，約 10000 μ の圧縮ひずみが発生したのちに，時刻約 0.3ms でひずみがほぼゼロに近い値となる挙動を示した．また，B3 については，衝突後から時刻約 0.2ms で約 4000 μ の圧縮ひずみが生じ，その後，時刻約 0.9ms 以降は引張ひずみに移行する挙動を示した．このことから，衝突初期に生じたたわみ変形が，中心から 100mm の位置まで進展していることがわかる．支点反力－時間関係から，支点反力は衝突後約 2.2ms から生じ，時刻 2.9ms において約 910kN を示した．飛翔体の速度－時間関係から，時刻 2.0ms で速度はほぼゼロとなっていることから，本ケースについても支点反力が増大する前に衝突現象はほぼ終了したものと考えられる．速度 116.2m/s で貫通が生じたケースでは，飛翔体の速度－時間関係から，衝突後から速度はほぼ線形に低下し，約 1.6ms で速度がゼロとなった．ひずみ－時間関係から，いずれの位置のひずみゲージも時刻 0.9ms までは非貫通のケースと同様の挙動を示し，その後は鋼板に亀裂が生じることでひずみが一定値を示した．また，支点反力－時間関係をみると，非貫通のケースと同様に，時刻 2.1ms 以降において支点反力が増大し，時刻 4.1ms で 1000kN を示した．本ケースは，支点反力が生じる時刻 2.1ms よりも前に鋼板に亀裂が生じており，鋼板の変形や貫通は非常に局所的な応答であることを示している．



飛翔体速度－時間関係

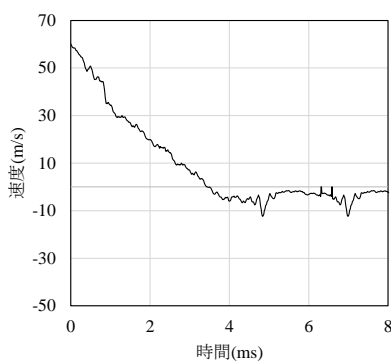


ひずみ－時間関係

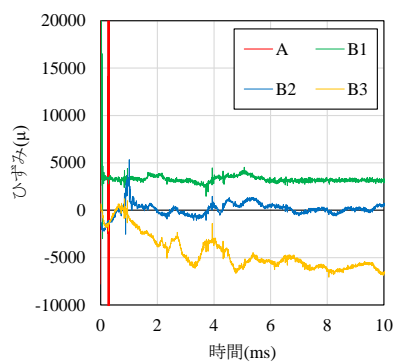


支点反力－時間関係

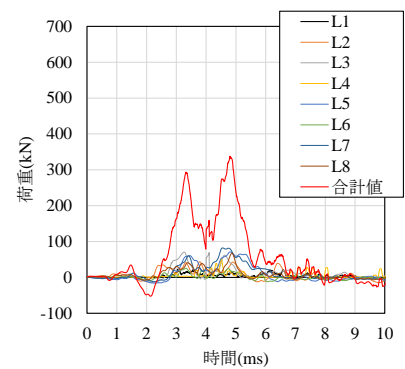
(a) 衝突速度 29.0m/s : 非貫通



飛翔体速度－時間関係



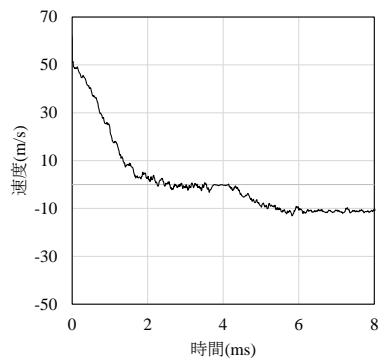
ひずみ－時間関係



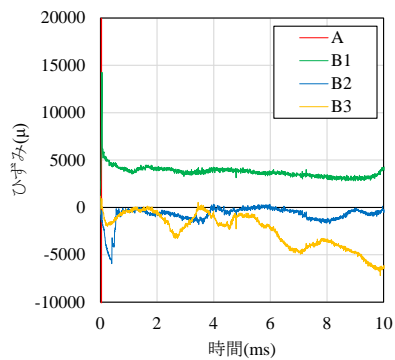
支点反力－時間関係

(b) 衝突速度 59.9m/s : 貫通

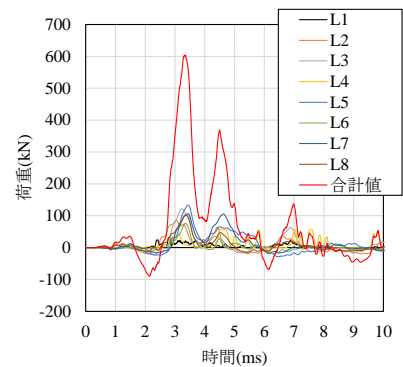
図-3.37 飛翔体の速度，支点反力およびひずみ－時間関係（円錐状飛翔体，板厚 6mm）



飛翔体速度－時間関係

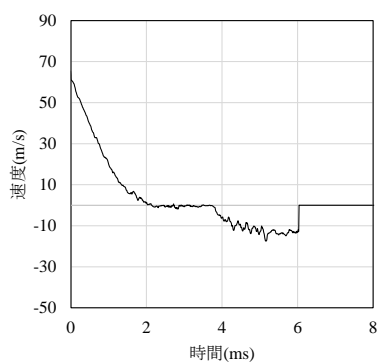


ひずみ－時間関係

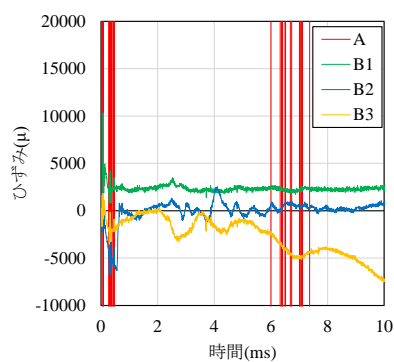


支点反力－時間関係

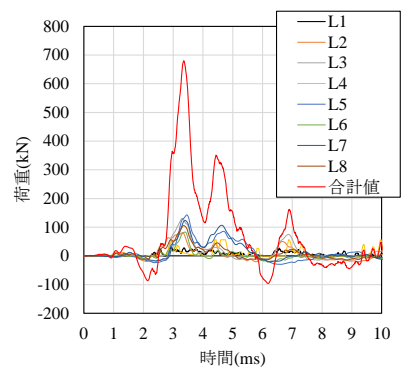
(a) 衝突速度 52.4m/s : 非貫通



飛翔体速度－時間関係



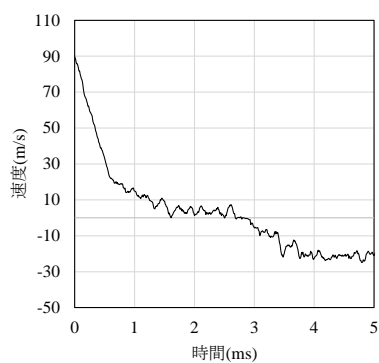
ひずみ－時間関係



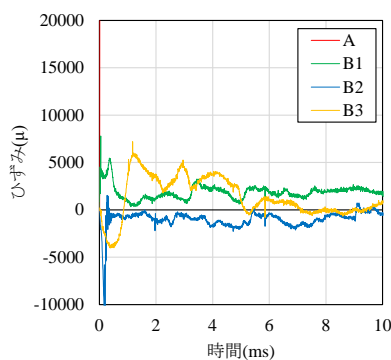
支点反力－時間関係

(b) 衝突速度 77.5m/s : 貫通

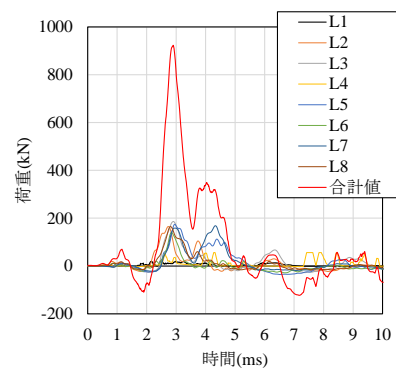
図-3.38 飛翔体の速度，支点反力およびひずみ－時間関係（円錐状飛翔体，板厚 9mm）



飛翔体速度－時間関係

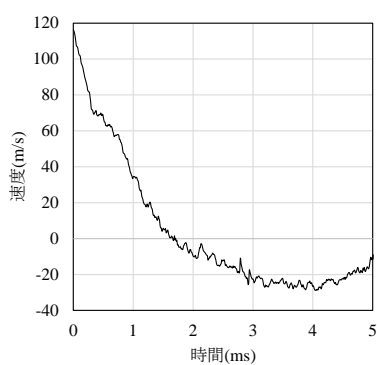


ひずみ－時間関係

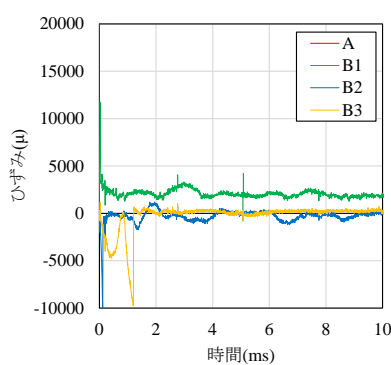


支点反力－時間関係

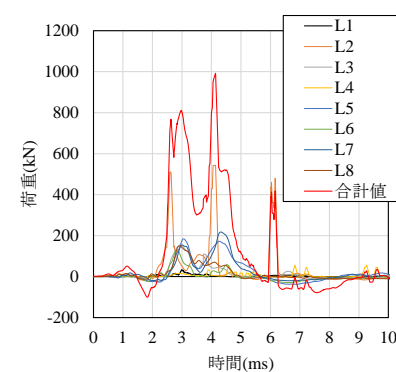
(a) 衝突速度 89.3m/s：非貫通



飛翔体速度－時間関係



ひずみ－時間関係



支点反力－時間関係

(b) 衝突速度 116.2m/s：貫通

図-3.39 飛翔体の速度，支点反力およびひずみ－時間関係（円錐状飛翔体，板厚 12mm）

3.6 結言

本章は、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挙動について検討を行ったものである。本章の成果を以下に示す。

- (1) 衝突実験から、各先端形状に対する鋼板の貫通限界速度がわかった。また、いずれの先端形状の場合においても、鋼板の貫通破壊は支点反力が発生する前に生じる非常に局所的な応答であることがわかった。
- (2) 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。鋼板の破壊は、平坦状飛翔体の場合では鋼板と飛翔体先端部の外縁が接触した位置、半球状飛翔体の場合では飛翔体先端部の半径の 36%～58% の位置、円錐状飛翔体の場合では衝突部の中心付近に発生した。
- (3) 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。
- (4) 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） α を含む修正 BRL 式を提案した。先端形状係数 α 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ある程度の一致を示した。このことから、平坦状飛翔体の場合では $\alpha=1.0$ で実験結果と整合したことを考慮すると、半球状飛翔体による貫通は平坦状飛翔体の直径が 10%大きくなり、円錐状飛翔体による貫通は平坦状飛翔体の直径が 30%小さくなったことに相当すると考えられる。ただし、円錐状の板厚 12mm のケースでは、飛翔体先端部が圧潰し塑性変形が生じたことで適合性が低い結果となった。

第4章 飛翔体衝突を受ける鋼板の貫通破壊挙動に関する数値解析的検討

4.1 序言

本章では、第3章で行った衝突実験に対する数値解析シミュレーションを行い、鋼板の貫通メカニズムについて考察する。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¹⁾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²⁾を用いた。各飛翔体の先端形状および板厚に対して貫通したケースおよび非貫通のケースに対する数値解析シミュレーションから、実験結果の再現性について検討を行うとともに、貫通破壊メカニズムに関する考察を行った。

4.2 衝突実験に対する数値解析

4.2.1 数値解析モデル

解析モデルを図-4.1 に示す。解析には有限差分法による衝撃解析コード ANSYS AUTODYN ver.19 を使用した。鋼板の貫通は非常に局部的であり、鋼板の変形は中心から同心円状に拡大したため、2次元軸対称系でモデル化した。鋼板、飛翔体および裏面支持具は、いずれも4節点の4角形(1次)要素を用いてモデル化し、1mm×1mmの要素分割とした。また、初期条件としては、飛翔体モデルの全節点に初速度を設定した。境界条件として、鋼板と裏面支持具の接触部は剛結合とし、裏面支持具の裏面側の節点に対してx、y方向自由度を固定した。

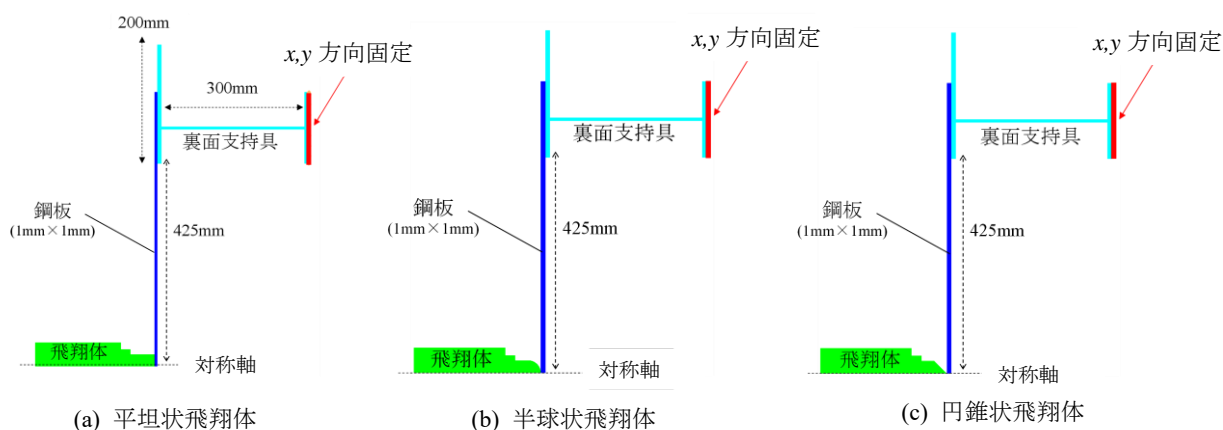


図-4.1 解析モデル

4.2.2 構成則および解析定数

鋼板および飛翔体材料の材料定数を表-4.1 に示す．鋼板の力学特性については実験に用いた鋼板の力学特性値を入力した．すなわち，板厚 6mm の降伏応力および引張強度については，平坦状飛翔体を用いた実験では，板厚 6mm の試験体が 343N/mm² および 452N/mm²，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/mm² および 428N/mm² であり，伸びは全て 31% である．半球状および円錐状の実験では，板厚 6mm の試験体がそれぞれ 323N/mm² および 452N/mm²，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 292N/mm² および 428N/mm² であり，伸びは全て 31% である．

表-4.2 に，解析パラメータを示す．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公称値とし，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．Johnson-Cook の降伏基準における流動応力は以下の式で表される．

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}\right) (1 - T^{*m}) \quad (4.1)$$

ここに， A は降伏応力， B および n はひずみ硬化を表す定数， C はひずみ速度依存性係数， $\dot{\varepsilon}_p$ は塑性ひずみ速度， $\dot{\varepsilon}_0$ は基準ひずみ速度， T^* は相対温度， m は温度依存性係数を表す．

入力パラメータは，鋼板の検査証明書に記載された公称応力および公称ひずみを真応力および真ひずみに変換して用いた．また，ひずみ速度依存性に関するパラメータ C は，崎野ら³⁾の研究を参照して決定した．図-4.2 に鋼板の材料モデルを示す．鋼板の応力-ひずみ関係は，図-4.2(a)に示すように，バイリニア型とした．また，降伏応力のひずみ速度依存性は，図-4.2(b)に示すように基準ひずみ速度を 10⁰ (1/s) とし，崎野らの実験式³⁾とひずみ速度 10² (1/s) において一致するように入力値を決定した．予備的検討として，第2章で行った材料実験結果を再現した DIF を用いて解析を行ったが，実験結果の再現性が低いことが判明した．そこで，パラメータ解析を行い，実験結果を概ね再現する崎野らの実験式を用いてパラメータを決定した．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．Johnson-Cook の破壊基準は以下の式で表される．

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_f}{\varepsilon_f} \leq 1 \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_f = \{D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)\} \{1 + D_4 \ln(\dot{\varepsilon}^*)\} (1 + D_5 T^*) \quad (4.3)$$

ここに， D は損傷変数， $\Delta \varepsilon_f$ は相当塑性ひずみの増分， ε_f は破断時の相当塑性ひずみ， D_1 ， D_2 および D_3 は破断ひずみと応力三軸度の関係に関するパラメータ， D_4 は破断ひずみのひずみ速度依存性に関するパラメータ， D_5 は破断ひずみの温度依存性に関するパラメータである． σ^* は応力三軸度であり， $\sigma^* = \sigma_m / \sigma_{eq}$ で表す． σ_m は平均応力または静水圧応力であり， σ_{eq} は相当応力である．

既往の実験から，破断ひずみは応力三軸度およびひずみ速度の増加に伴い低下することが報告されている．また，第2章において切欠きを有するSS400鋼板に対する動的載荷実験から同様の傾向を確認している．そこで，第2章の実験結果を参照して図-4.2(c)に示す破断時の相

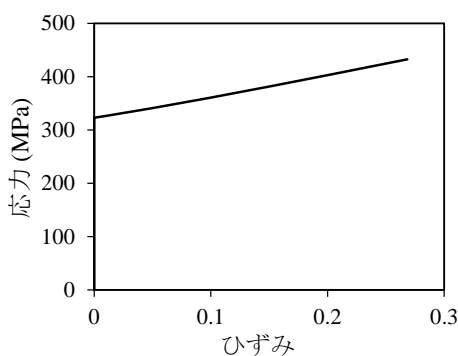
当塑性ひずみ ε_f と応力三軸度 σ^* の関係を用いた。予備的検討として、第2章で行った材料実験結果を再現した破断ひずみー応力三軸度関係を用いて解析を行ったが、解析モデルの要素寸法と破壊基準のパラメータの両方が解析結果に影響を与えるため、実験結果の再現性が低いことが判明した。そこで、本解析モデルの要素寸法の場合に実験結果を再現するように破壊基準のパラメータを調整して用いた。なお、非貫通のケースについては、衝突後に減衰を作用させた準静的解析を行い、変位を残留値に収束させた。

表-4.1 材料定数

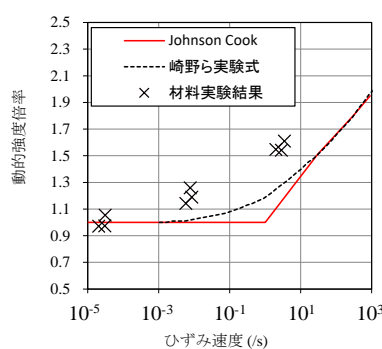
鋼板および飛翔体		公称応力		伸び(%)
		降伏応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	
平坦	6mm	343	452	31
	9mm	323	428	
	12mm			
半球 ・ 円錐	6mm	323	452	
	9mm	292	428	
	12mm			
飛翔体(S45C)		574	798	26

表-4.2 解析パラメータ

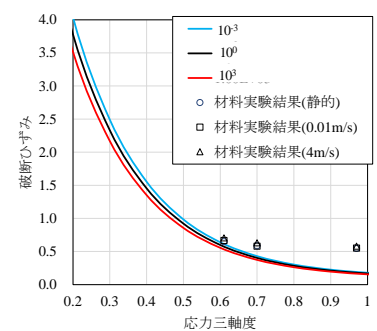
解析パラメータ			試験体(SS400)									飛翔体 (S45C)
パラメータ	記号	単位	平坦状			半球状			円錐状			
板厚	t	mm	6	9	12	6	9	12	6	9	12	
ヤング係数	E	kN/mm ²	205									
密度	ρ	g/cm ³	7.85									10.18
ポアソン比	ν	-	0.30									
Johnson-Cook 降伏基準	A	N/mm ²	343	323	323	323	292	292	323	292	292	574
	B	N/mm ²	452	428	428	452	428	428	452	428	428	798
	n	-	1.21	1.19	1.19	1.06	0.98	0.98	1.06	0.98	0.98	0.94
	C	-	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15



(a) 鋼板の応力ーひずみ関係



(b) 動的倍率ーひずみ速度関係



(c) 破断時の相当塑性ひずみー
応力三軸度関係

図-4.2 材料モデル

4.2.3 実験結果の再現性

解析結果の詳細は次節で説明するが、図-4.3 に、解析で得られた破壊性状を実験結果と比較して示す。図から、平坦状飛翔体の場合ではいずれの先端形状および板厚においても実験および解析の破壊性状は全てのケースで一致した。ただし、2次元軸対称系でモデル化していることから、半球および円錐状飛翔体の場合において実験で得られたような3次元的な亀裂や貫通性状を再現することができないため、貫通ケースについては鋼板に亀裂が生じる（ある断面において表面側から裏面側までの要素が全て破壊した状態）まで解析を行った。図-4.4 に、平坦状飛翔体、板厚 6mm、衝突速度 58.5m/s のケースにおける飛翔体の変位、速度および衝突荷重－時間関係および平坦状飛翔体、板厚 6mm、衝突速度 41.6m/s の変位分布の比較を示す。変位－時間関係については、衝突後から貫通発生までの間、実験と同様にほぼ線形に増加した。衝突速度－時間関係は、衝突から直線的に速度が低下して貫通が生じ、実験結果と良い一致を示している。また、衝突荷重については、飛翔体が貫通するまでの間に山なりの荷重を示し、実験結果よりもやや大きい最大荷重を示した。図から、解析による変位、速度および荷重－時間関係は、貫通が生じる時刻 0.8ms までの変位および速度の挙動ならびに最大衝突荷重が生じる時刻を概ね再現している。ただし、貫通発生後の荷重－時間関係は数値解析では値がゼロとなり、実験との再現性は低い。鋼板の変位分布についても概ね一致したが、解析値の中心部の最大変位は実験値よりもやや大きな結果となった。なお、他の実験ケースにおいても、本ケースと同様に実験結果を再現した。

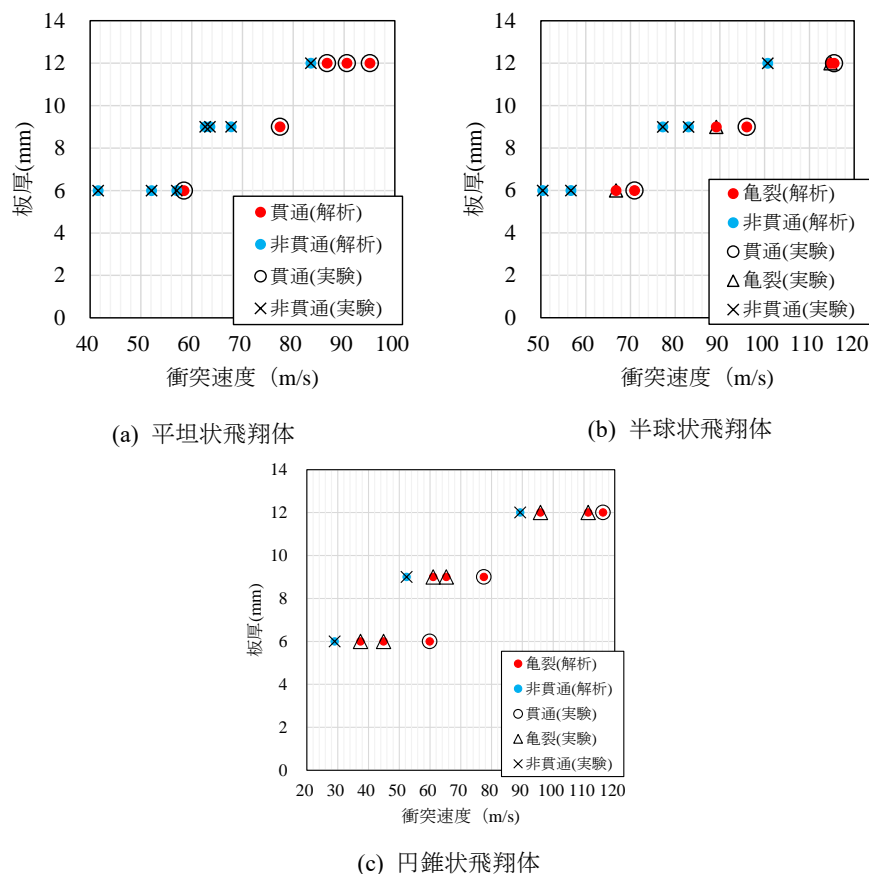
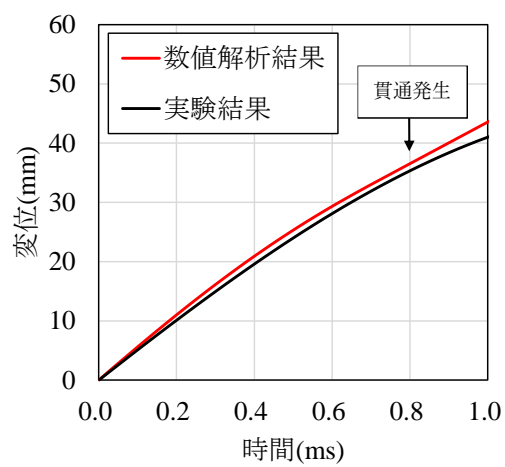
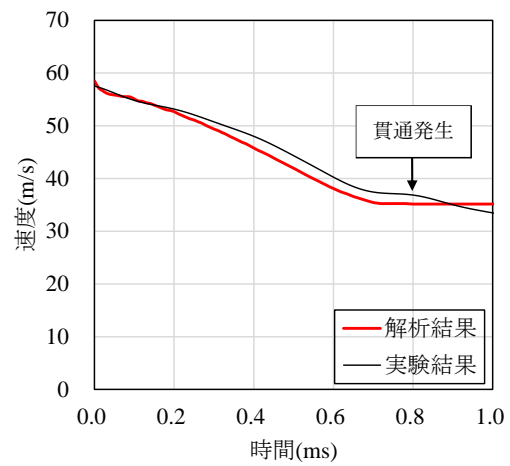


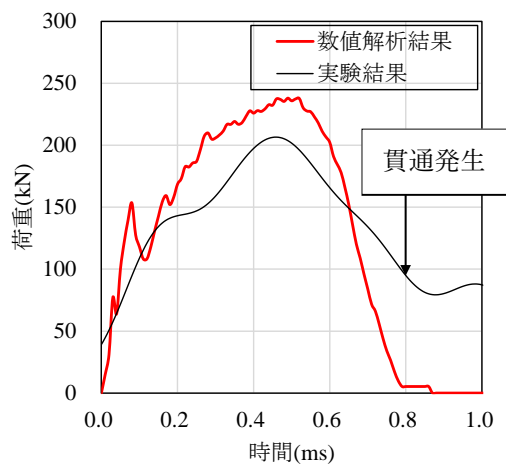
図-4.3 解析結果の破壊性状



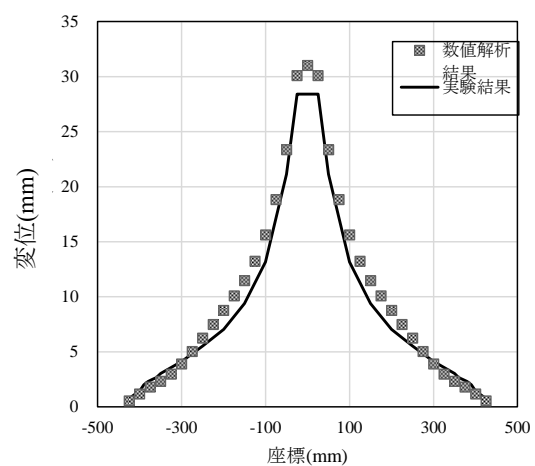
(a) 変位—時間関係



(b) 速度—時間関係



(c) 荷重—時間関係



(d) 変位分布
(板厚 6mm, 41.6m/s)

図-4.4 実験結果と解析結果の比較

4.2.2 変形および破壊の特徴

(1) 平坦状飛翔体

図-4.5 に、平坦状飛翔体のケースにおける鋼板の変形の進展状況を示す。図中の緑色の領域は弾性領域を表し、赤色の領域は塑性および破壊領域を表している。図-4.5 (a)に示す平坦状飛翔体、板厚 6mm、衝突速度 58.5m/s のケースでは、衝突後時刻 0.1ms においては鋼板中心から半径約 100mm の領域が塑性化し、時間の経過に伴って表面側が先に塑性化した後に裏面側の塑性化領域が拡大している。図-4.5 (b)に示す平坦状飛翔体、板厚 9mm、衝突速度 77.4m/s のケースおよび図-4.5 (c)に示す平坦状飛翔体、板厚 12mm、衝突速度 95.1m/s のケースでは、衝突初期の塑性化領域はそれぞれ、鋼板中心から半径約 120mm および 125mm であり、その後は板厚 6mm のケースと同様に表面側が先に塑性化し、裏面側の塑性化領域が拡大した。

図-4.6 に、平坦状飛翔体のケースにおける鋼板に生じた破壊の進展状況を示す。図は飛翔体近傍を拡大して示している。図中の緑色の領域は弾性領域、水色の領域は塑性領域、赤色の領域は破壊領域を表している。図-4.6(a)に示す平坦状飛翔体、板厚 6mm、衝突速度 58.5m/s のケースにおいては、衝突後時刻 0.1ms において飛翔体近傍の広い領域で塑性化が進展し、時刻 0.6ms において飛翔体の外縁部が衝突した領域の裏面側の要素に破壊が生じた。この破壊を起点として、裏面側から表面側に破壊が進展することで貫通が生じた。図-4.6 (b)に示す平坦状飛翔体、板厚 9mm、衝突速度 77.4m/s のケースおよび図-4.6 (c)に示す平坦状飛翔体、板厚 12mm、衝突速度 95.1m/s のケースにおいても、同様の破壊の特徴を示したが、板厚 12mm のケースでは要素に破壊が生じる時刻および亀裂発生時刻が 0.2ms 早い結果となった。

図-4.7 に、平坦状飛翔体、板厚 6mm、衝突速度 58.5m/s のケースにおける鋼板の加速度および速度分布を示す。加速度分布から、鋼板中心から半径約 40mm において衝突後時刻 0.01ms で最大約 6000m/s^2 の加速度が生じた。また、速度分布から、衝突直後に鋼板中心から半径約 40mm の範囲に大きな速度が生じ、時刻 0.04ms で最大 88m/s となった。その後、中心部の速度は減少し、時刻 0.1ms では鋼板中心から約 25mm の位置（飛翔体先端部の端部接触領域付近）で飛翔体の速度 57m/s とほぼ同一の値となるが、中心部ではそれよりも低い約 38m/s となっている。このことから、鋼板中心部については衝突直後においては飛翔体先端部と接することなく運動し、その後に減速していることがわかる。

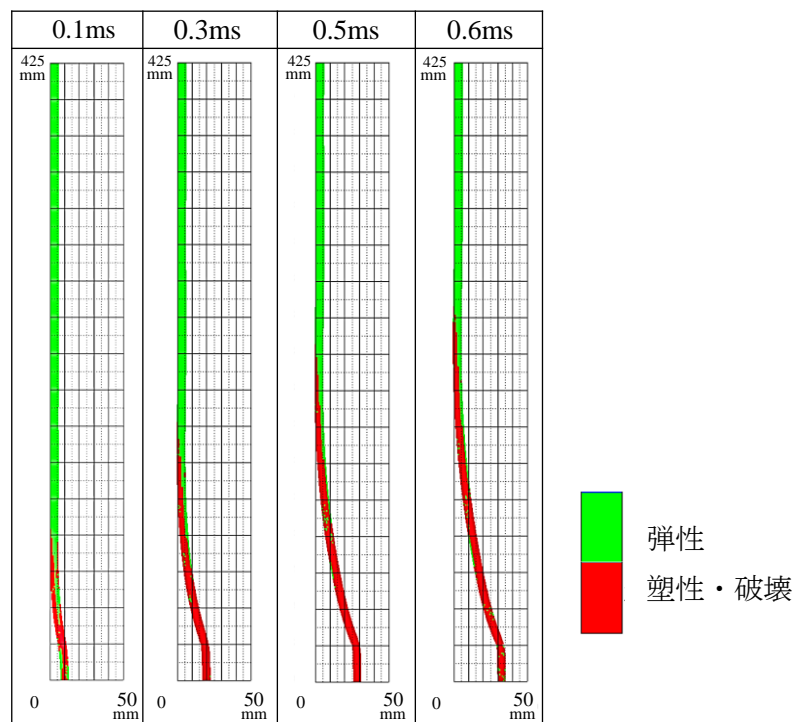
図-4.8 に、平坦状飛翔体における鋼板の相当塑性ひずみ分布を示す。図-4.8(a) に示す板厚 6mm の非貫通ケースの結果から、飛翔体衝突後、飛翔体先端の外縁が衝突した位置の裏面側にひずみが局所化し、時間の経過に伴って増大していることがわかる。図-4.8(b) に示す板厚 6mm の貫通ケースでは、この位置のひずみがより大きくなっている。図-4.8(c)および(d)には、板厚 9mm および 12mm の貫通ケースの結果を示しているが、いずれのケースにおいても、飛翔体先端の外縁が衝突した位置の裏面側にひずみが局所化し、時間の経過に伴って増大する板厚 6mm ケースと同様の挙動を示した。

図-4.9 に、平坦、板厚 6mm、衝突速度 41.6m/s の非貫通ケースおよび 58.5m/s の貫通ケースにおける、鋼板中心から 25mm 位置の要素の相当塑性ひずみ-時間関係を示す。図から、貫

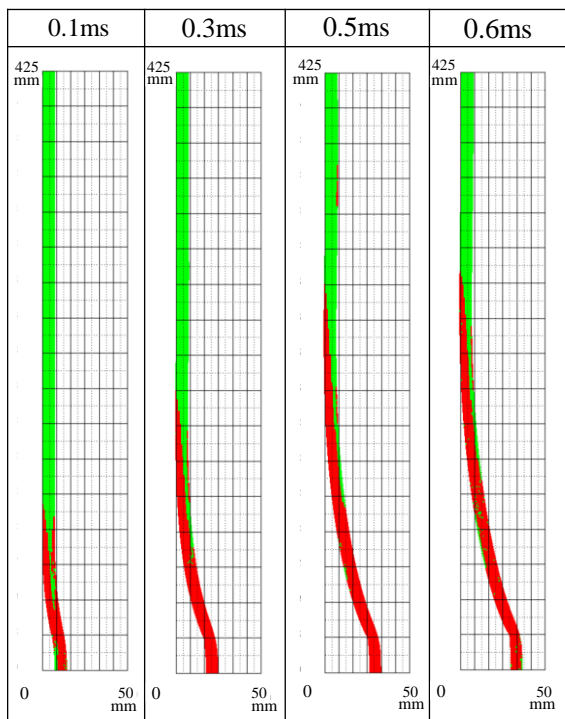
通ケースにおいて初期の要素破壊が生じる時刻における表面から 6mm 位置の要素の相当塑性ひずみは貫通が生じたケースの方が約 2.0 倍大きな値を示していることがわかる。

平坦状飛翔体のケースにおいて破壊が生じた要素の応力三軸度，ひずみ速度および破断ひずみ－時間関係を図-4.10 に示す．図-4.10(a)に示す応力三軸度－時間関係をみると，衝突直後から貫通が生じたケースの方が平均で約 20%程度高い応力三軸度を示すことがわかる．これは，降伏基準のひずみ速度依存性が要因と考えられる．貫通が生じたケースは衝突速度が大きく，要素に生じるひずみ速度が増加することによって平均応力が約 1.2 倍の値になった．貫通が生じたケースの応力三軸度は，時刻約 0.3ms から破壊が生じる時刻約 0.6ms までの間において概ね一定値で推移し，非貫通のケースの約 1.2 倍の大きな値であった．図-4.10(b)に示すひずみ速度－時間関係についても，衝突直後から貫通が生じたケースの方がより高い値を示しており，要素の破壊が生じる時刻約 0.6ms までの間，平均で約 1.6 倍高い値であった．また，図-4.10(c)に示すように，破断ひずみは衝突直後から貫通が生じたケースの方が約 2% 低い値となって推移していることがわかる．これは，先述した応力三軸度およびひずみ速度は貫通が生じたケースの方が大きく，破断ひずみがより小さくなるためである．損傷 D は，破断ひずみに対する相当塑性ひずみの増分比の総和で定義されており，衝突速度が増加するとひずみが増加するとともに，応力三軸度およびひずみ速度が増加することで基準となる破断ひずみが低下し，損傷が増加したものと考えられる．

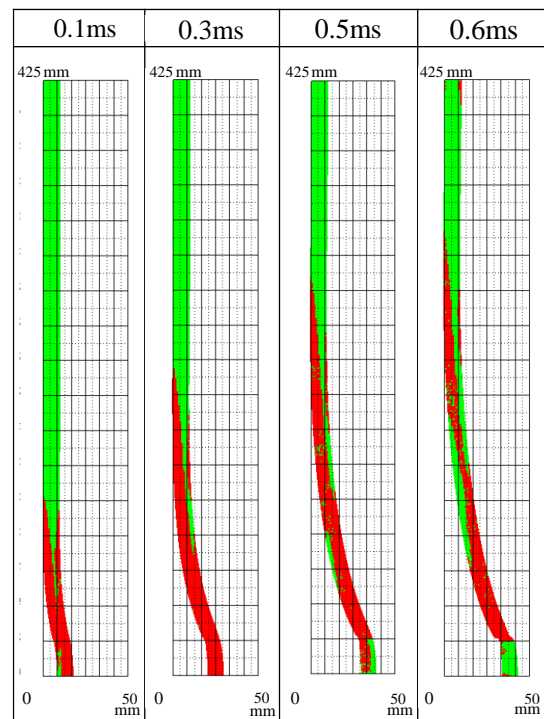
図-4.11 に，時刻 0.6ms で初期に破壊が生じた裏面側の要素および鋼板中心から 50mm 位置の要素における応力三軸度，ひずみ速度および破断ひずみ－時間関係の比較結果を示す．比較した要素の位置を，図-4.11(a)に示す．図-4.11(b)に示す応力三軸度－時間関係をみると，破壊が発生した要素においては衝突後時刻 0.1ms までは急激に応力三軸度が増加し，時刻 0.1ms 以降は約 0.6 の値で推移している．一方，中心から 50mm 位置の要素においては，衝突後時刻約 0.02ms から応力三軸度が急増し，時刻約 0.04ms で応力三軸度約 0.4 に達するが時刻約 0.06ms で一度 0 まで低下し，その後時刻約 0.11ms 以降は応力三軸度が徐々に増加して時刻 0.6ms では応力三軸度約 0.55 を示した．このことから，破壊が生じた要素は，衝突後から破壊が生じるまでの時刻 0.6ms までの間，中心から 50mm 位置の要素よりも常に高い応力三軸度を示すことがわかる．次に，図-4.11(c)に示すひずみ速度－時間関係から，破壊が生じた要素においては，衝突後から最大約 $1.0 \times 10^3 (1/s)$ のひずみ速度が生じる挙動を示した．一方，中心から 50mm 位置の要素においては，ほぼゼロの値で推移した．このことから，破壊が生じた要素については，中心から 50mm 位置の要素よりも高いひずみ速度を示すことがわかる．図-4.11(d)に示す破断ひずみ－時間関係をみると，破壊が生じた要素においては，衝突後時刻 0.6ms までの間において破断ひずみ約 0.5 の値で推移した．中心から 50mm 位置の要素については，衝突後時刻約 0.15ms までの間に変動するが，その後は破壊が生じた要素のひずみよりも約 0.2 高い値で推移している．以上から，破壊が生じた要素については，中心から 50mm 位置の要素よりも高い応力三軸度およびひずみ速度の状態となっており，これによって破断ひずみが低下していることがわかった．



(a) 板厚 6mm, 58.5m/s

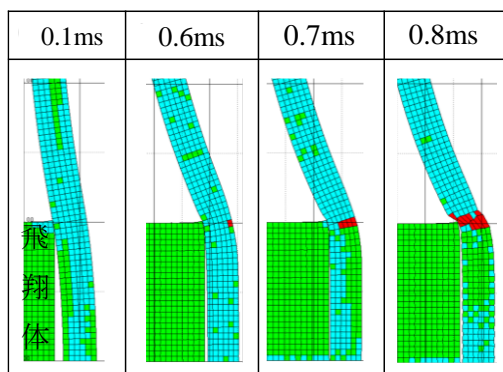


(b) 板厚 9mm, 77.4m/s

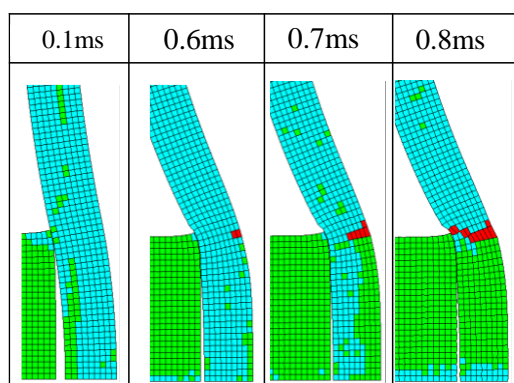


(c) 板厚 12mm, 95.1m/s

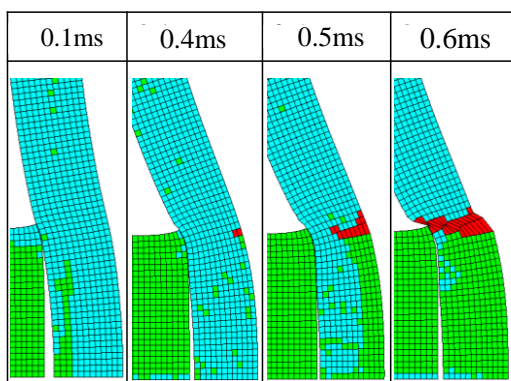
図-4.5 鋼板の変形の進展状況
(平坦状飛翔体)



(a) 板厚 6mm, 58.5m/s

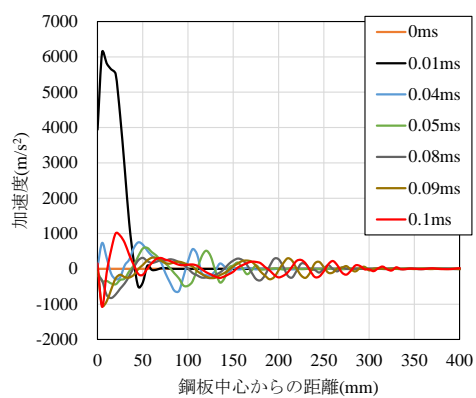


(b) 板厚 9mm, 77.4m/s

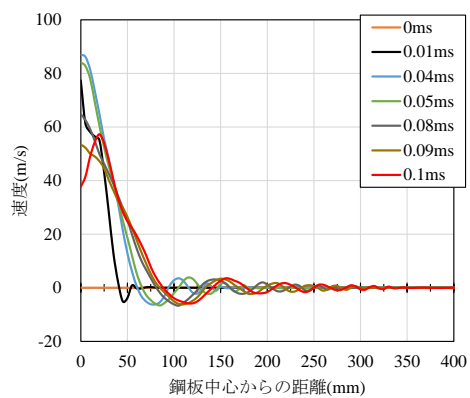


(c) 板厚 12mm, 95.1m/s

図-4.6 破壊の進展状況
(平坦状飛翔体)

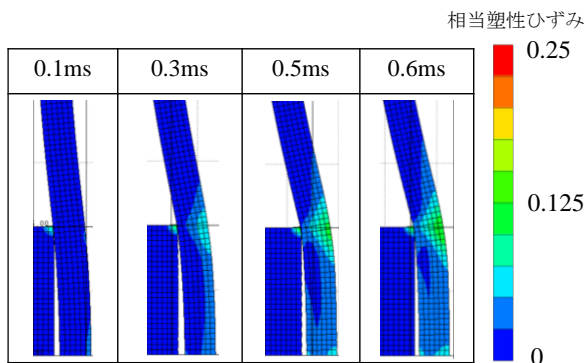


(a) 加速度分布

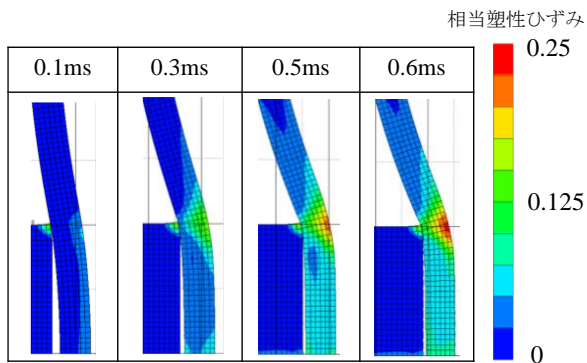


(b) 速度分布

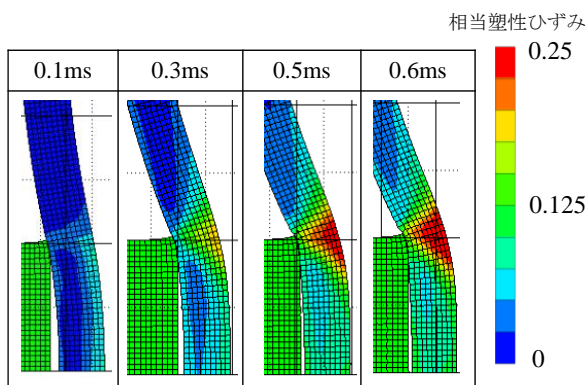
図-4.7 鋼板の加速度および
速度分布



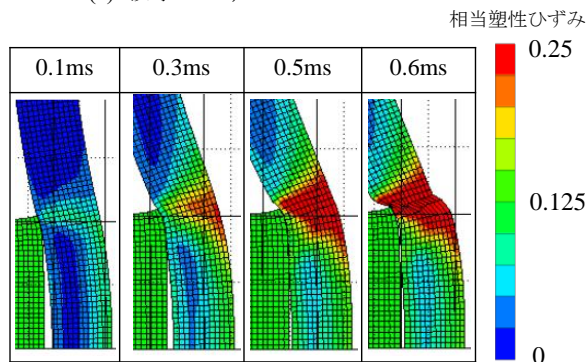
(a) 板厚 6mm, 衝突速度 41.6m/s



(b) 板厚 6mm, 衝突速度 58.5m/s

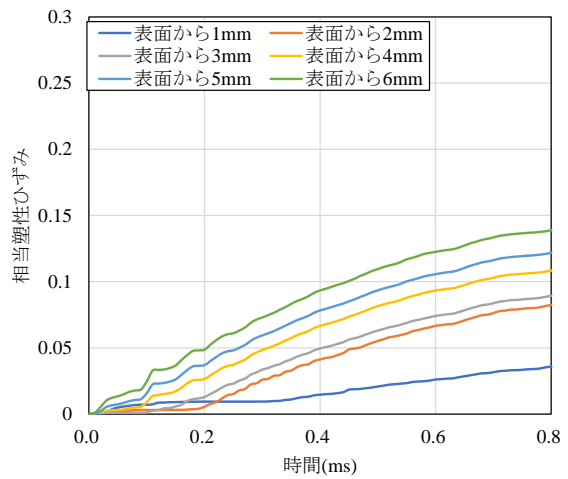


(c) 板厚 9mm, 77.4m/s

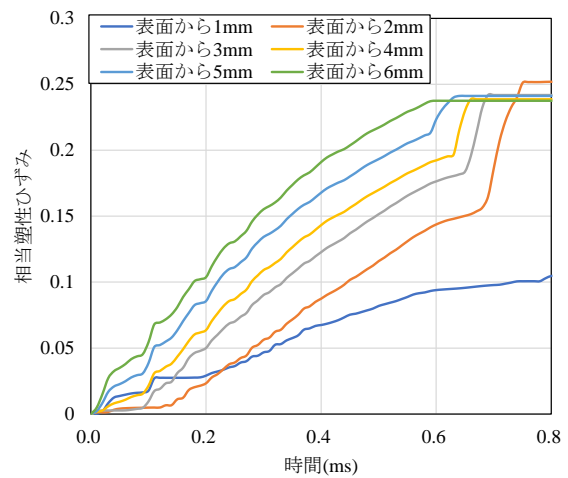


(d) 板厚 12mm, 95.1m/s

図-4.8 相当塑性ひずみ分布 (平坦)



(a) 板厚 6mm, 衝突速度 41.6m/s



(b) 板厚 6mm, 衝突速度 58.5m/s

図-4.9 鋼板中心から 25mm 位置の要素
の相当塑性ひずみー時間関係

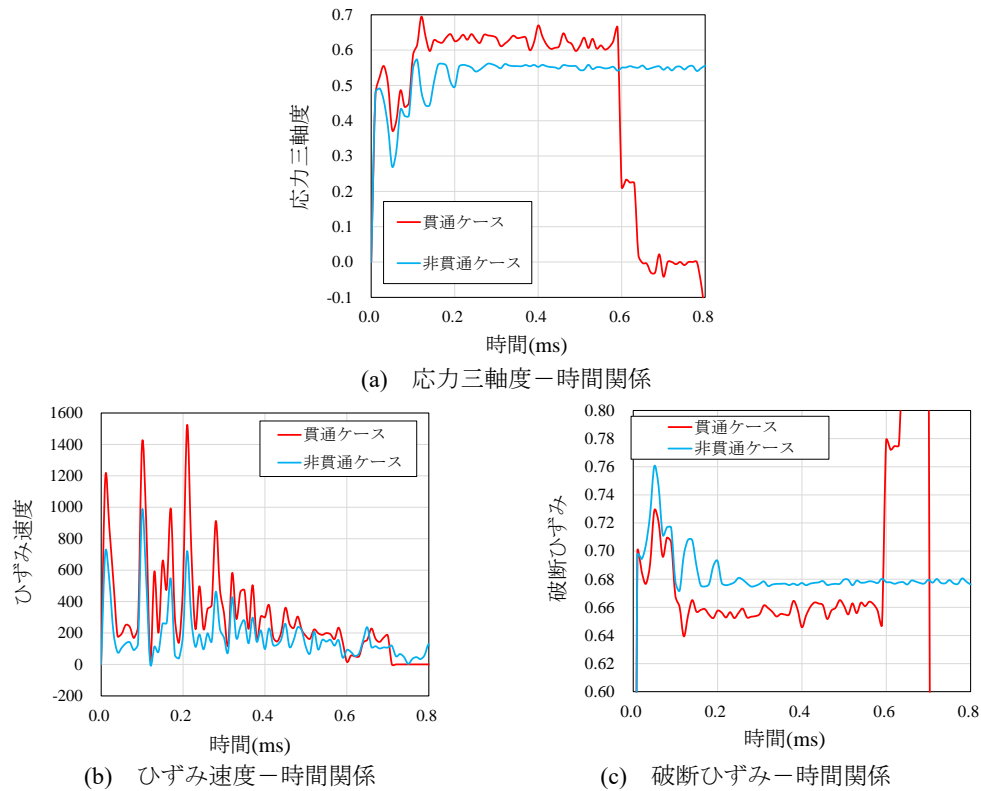


図-4.10 応力三軸度，ひずみ速度および破断ひずみ—時間関係
(平坦状飛翔体)

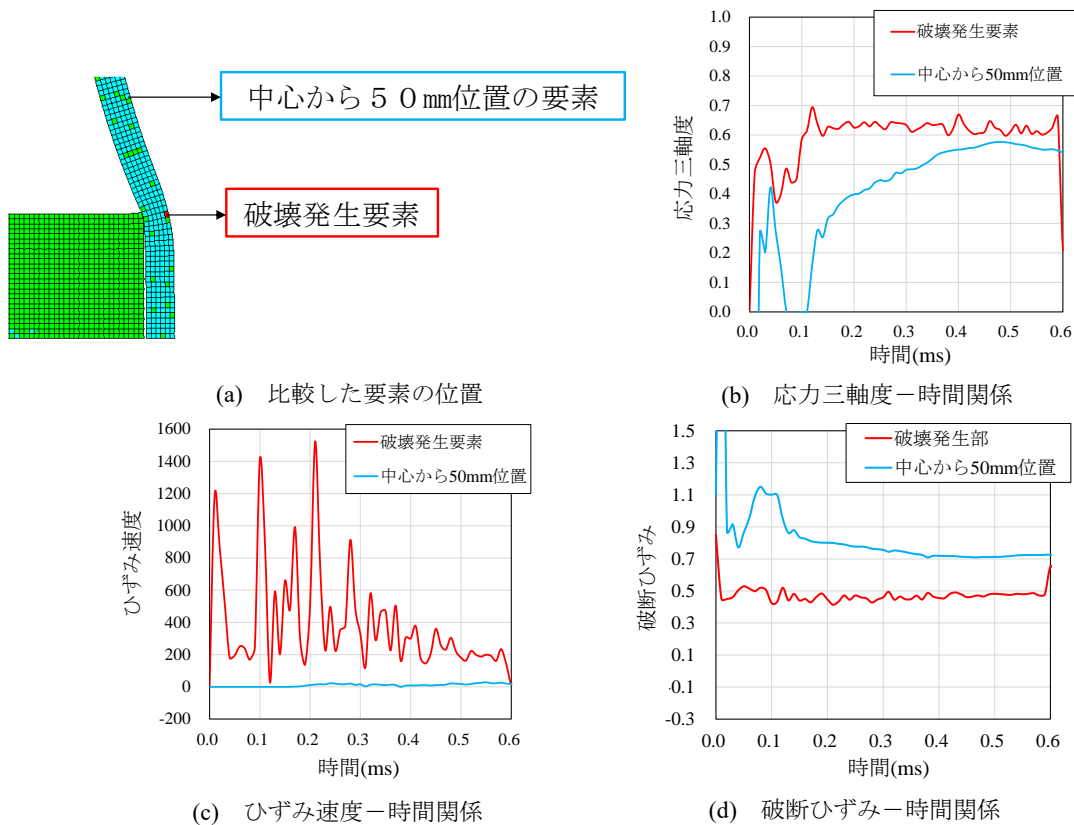


図-4.11 応力三軸度，ひずみ速度および破断ひずみ—時間関係の比較結果
(平坦状飛翔体，板厚 6mm，衝突速度 58.5m/s)

(2) 半球状飛翔体

図-4.12 に、半球状飛翔体のケースにおける鋼板の変形の進展状況を示す。図-4.12(a)に示す半球状飛翔体、板厚 6mm、衝突速度 70.9m/s のケースでは、衝突後時刻 0.1ms においては鋼板中心から半径約 80mm の領域が塑性化し、時間の経過に伴って表面側が先に塑性化した後に裏面側の塑性化領域が拡大していることがわかる。その後の塑性化領域は、平坦の板厚 6mm ケースよりも狭い範囲に生じており、塑性変形が鋼板中心部周辺に生じる特徴がある。図-4.12(b)に示す半球状飛翔体、板厚 9mm、衝突速度 96.0m/s のケースおよび図-4.12(c)に示す半球状飛翔体、板厚 12mm、衝突速度 115.5m/s のケースでは、衝突初期の塑性化領域はそれぞれ、鋼板中心から半径約 95mm および 110mm であり、その後は板厚 6mm のケースと同様に、表面側が先に塑性化した後に裏面側の塑性化領域が拡大した。

図-4.13 に、半球状飛翔体のケースにおける鋼板の破壊の進展状況を示す。図は飛翔体近傍を拡大して示している。図-4.13(a)に示す半球状、板厚 6mm、衝突速度 70.9m/s のケースにおいては、飛翔体衝突後、時刻 0.7ms において、鋼板裏面の中心から約 9mm の位置に初期の要素破壊が生じた。その後、破壊は裏面側から表面側へ進展し、時刻 1.1ms において最も表面側の要素に破壊が生じることで鋼板に亀裂が生じた。図-4.13(b)に示す半球、板厚 9mm、衝突速度 96.0m/s のケースおよび図-4.13(c)に示す半球、板厚 12mm、衝突速度 115.5m/s のケースでは、いずれも板厚 6mm の場合よりも早い時刻 0.3ms で初期の要素破壊が生じ、時刻 0.4ms で亀裂が発生した。亀裂の発生位置は、それぞれ鋼板の中心から約 13.1mm および 15.0mm であった。

図-4.14 に、半球状飛翔体のケースにおける鋼板の破壊の破壊部半径－板厚関係を示す。図から、数値解析においても実験結果と同様に破壊部半径は板厚の増加に伴って増大する傾向が認められた。

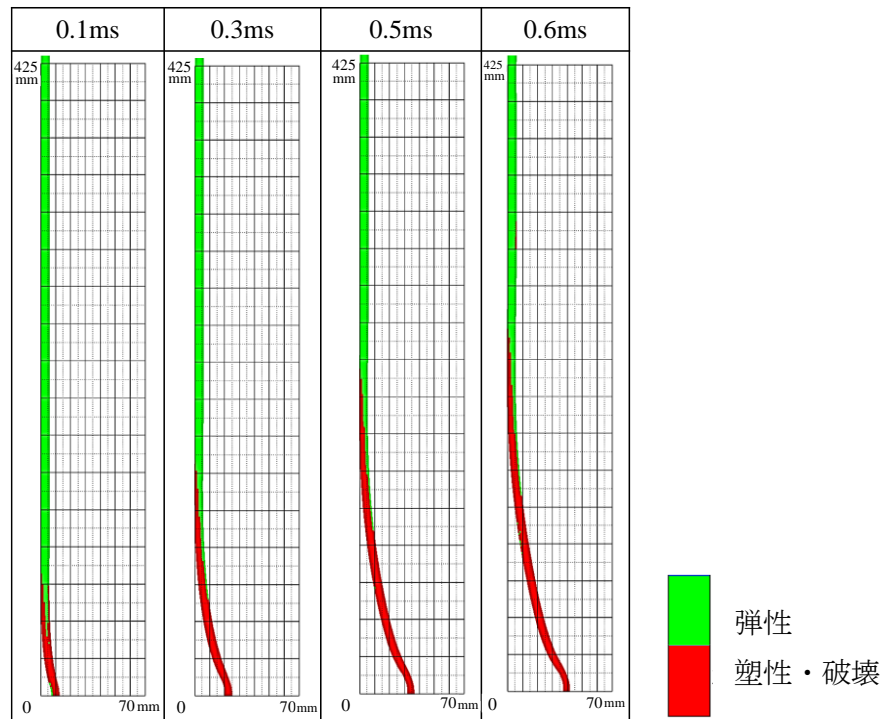
図-4.15 に、半球状飛翔体、板厚 6mm、衝突速度 70.9m/s のケースにおける鋼板の加速度および速度分布を示す。加速度分布から、鋼板中心から半径約 20mm において衝突後時刻 0.01ms で最大約 6800m/s^2 の加速度が生じた。また、速度分布から、衝突直後に鋼板中心から半径約 20mm の範囲に大きな速度が生じ、時刻 0.03ms で最大 73m/s となった。その後、速度分布は時間の経過に伴って拡大し、全体的に徐々に減速した。

図-4.16 に、半球状飛翔体における鋼板の相当塑性ひずみ分布を示す。図-4.16(a) に示す板厚 6mm の非貫通ケースの結果から、衝突後時刻 0.1ms において、飛翔体先端部と鋼板の接触部にひずみが集中し、裏面側にはより大きなひずみが生じた。時刻 0.7ms においては、ひずみは飛翔体先端部との接触部を境界に中心部側には平均 0.25 程度のひずみが生じ、外側には 0.1 以下のひずみが生じて変形が進展した。また、裏面側の中心から約 9mm の位置にひずみが局所化していることがわかる。その後、時間の経過に伴ってこの局所化した位置のひずみが増大した。図-4.16(b) に示す板厚 6mm の貫通ケースにおいては、衝突後からひずみが局所化する間については非貫通ケースと同様の挙動を示し、ひずみがより大きくなることで時刻 0.7ms に要素破壊が生じた。一つの要素に破壊が生じた後には、破壊発生位置付近にひずみが

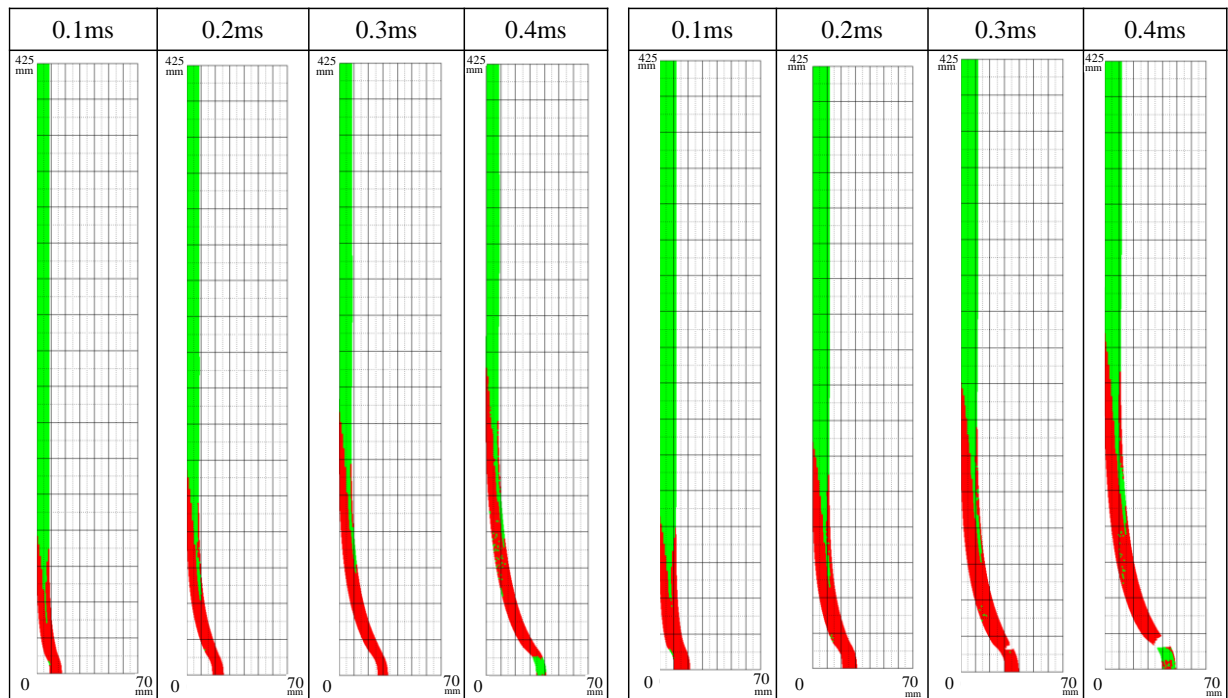
集中して生じ、時刻 1.1ms において亀裂が発生した。図-4.16(c)に示す半球状飛翔体、板厚 9mm、衝突速度 96.0m/s のケースでは、衝突直後である時刻 0.01ms において、飛翔体先端部と鋼板の接触部の外縁部付近に、最大約 0.25 の鋼板中心部よりも大きなひずみが生じた。時刻 0.2ms においては、ひずみが裏面側に局所化し、時間の経過に伴って増大することで要素破壊が生じた。図-4.16(d)に示す半球状飛翔体、板厚 12mm、衝突速度 115.5m/s のケースでも、これと同様の挙動が認められた。

図-4.17 に、半球状飛翔体、板厚 6mm、衝突速度 50.4m/s の非貫通ケースおよび 70.9m/s の貫通ケースにおける、鋼板中心から 9mm 位置の要素の相当塑性ひずみ－時間関係を示す。図から、貫通ケースにおいて初期の要素破壊が生じる時刻における表面から 6mm 位置の要素の相当塑性ひずみは、貫通が生じたケースの方が約 1.4 倍大きな値を示していることがわかる。

半球状飛翔体において初期に破壊が生じた要素の応力三軸度、ひずみ速度および破断ひずみ－時間関係を図-4.18 に示す。図-4.18(a)に示す応力三軸度－時間関係をみると、衝突直後における値に差が認められ、時刻 0.1ms においては貫通ケースが約 12%大きな値を示した。その後、貫通ケースの値は徐々に低下する傾向がみられ、時刻約 0.25ms で値は逆転し、要素に破壊が生じる時刻約 0.63ms においては、非貫通ケースの方が約 8%大きな値を示した。これは、降伏基準のひずみ速度依存性が要因と考えられる。図-4.18(b)に示すひずみ速度－時間関係についても、衝突直後から貫通が生じたケースの方がより高い値を示しており、要素に破壊が生じる時刻約 0.3ms までの間、最大値で約 2 倍高い値であった。また、図-4.18(c)に示すように、破断ひずみは衝突直後から貫通が生じたケースの方が低い値となって推移しており、時刻 0.2ms までの間において最大約 5%の差が認められた。



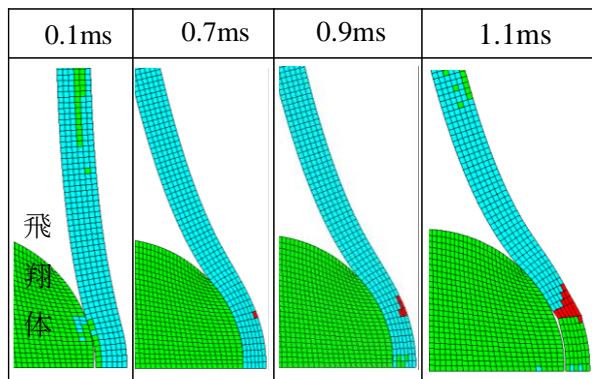
(a) 板厚 6mm, 70.9m/s



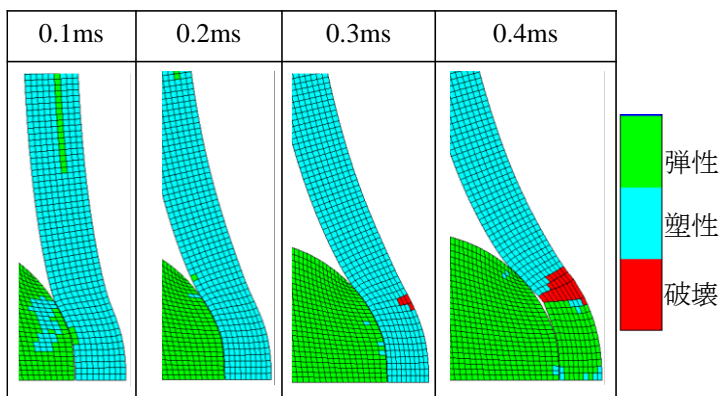
(b) 板厚 9mm, 96.0m/s

(c) 板厚 12mm, 115.5m/s

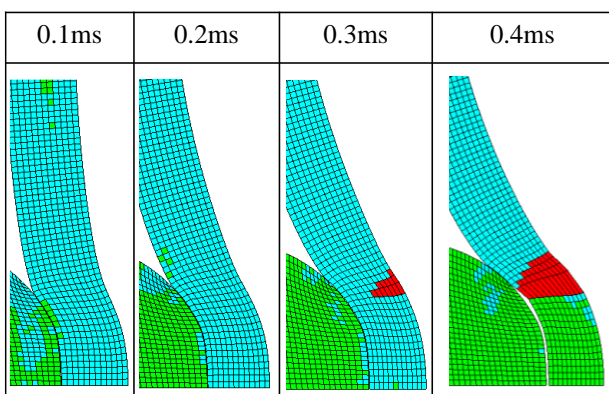
図-4.12 鋼板の変形の進展状況（半球状飛翔体）



(a) 板厚 6mm, 70.9m/s



(b) 板厚 9mm, 96.0m/s



(c) 板厚 12mm, 115.5m/s

図-4.13 破壊の進展状況
(半球状飛翔体)

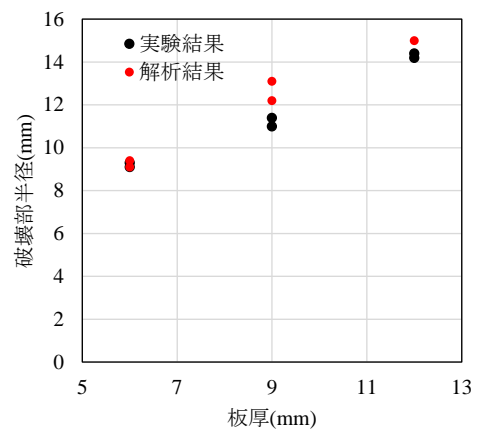
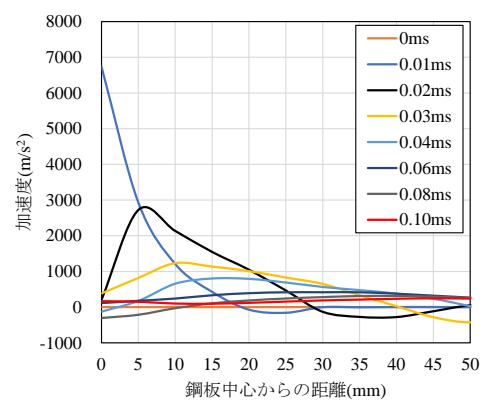
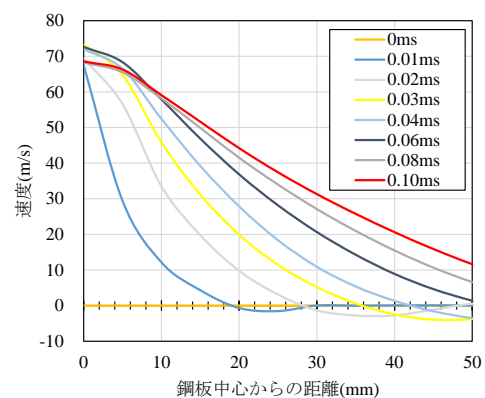


図-4.14 破壊部の半径－衝突速度
関係

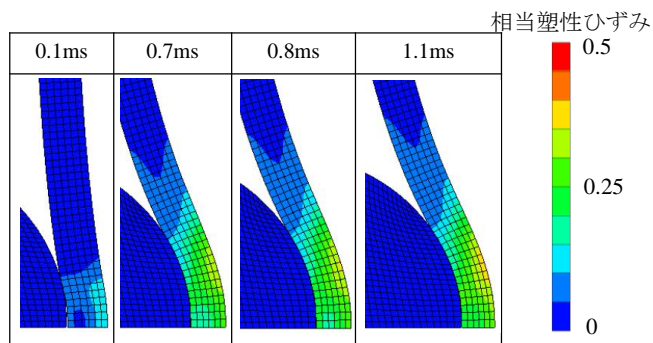


(a) 加速度分布

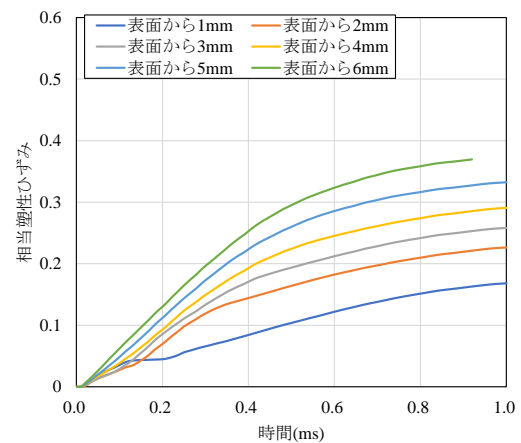


(b) 速度分布

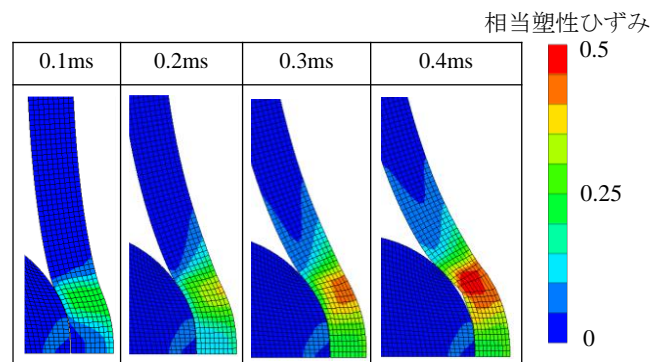
図-4.15 鋼板の加速度および
速度分布



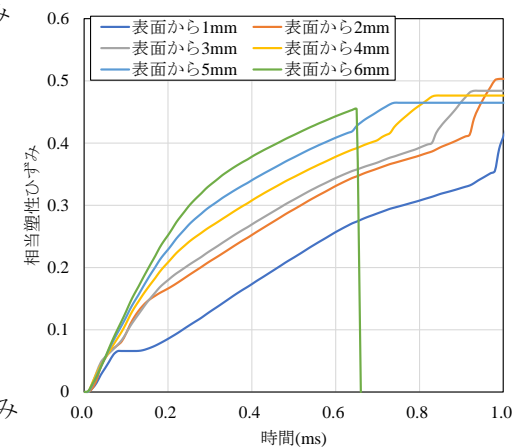
(a) 板厚 6mm, 衝突速度 50.4m/s



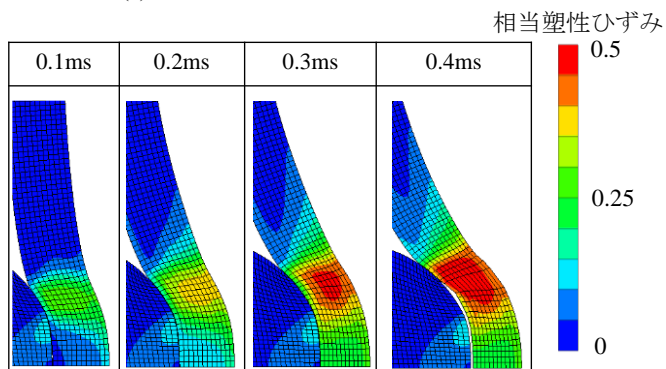
(a) 板厚 6mm, 衝突速度 50.4m/s



(c) 板厚 9mm, 96.0m/s



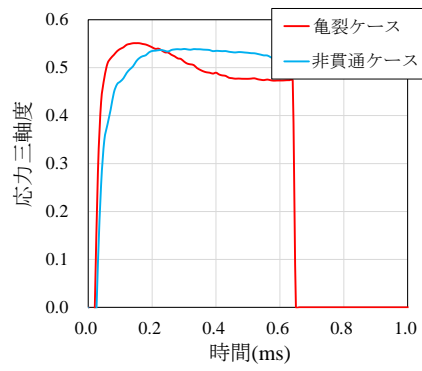
(b) 板厚 6mm, 衝突速度 70.9m/s



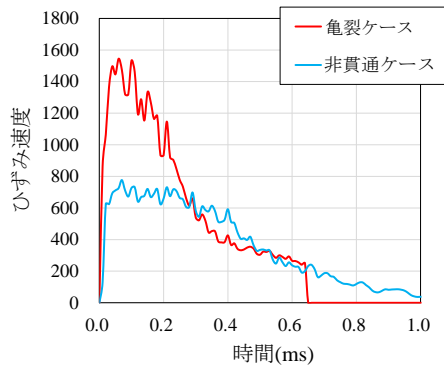
(d) 板厚 12mm, 115.5m/s

図-4.17 鋼板中心から 9mm 位置の要素
の相当塑性ひずみ-時間関係

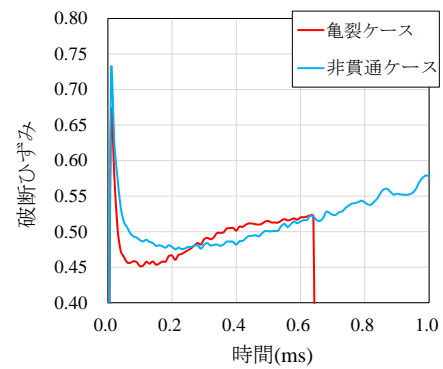
図-4.16 相当塑性ひずみ分布 (半球)



(a) 応力三軸度－時間関係



(b) ひずみ速度－時間関係



(c) 破断ひずみ－時間関係

図-4.18 応力三軸度，ひずみ速度および破断ひずみ－時間関係
(半球状飛翔体)

(3) 円錐状飛翔体

図-4.19 に、円錐状飛翔体のケースにおける鋼板の変形の進展状況を示す。図-4.19 (a)に示す円錐状飛翔体、板厚 6mm、衝突速度 59.9m/s のケースでは、衝突後時刻 0.1ms においては鋼板中心から半径約 50mm の領域が塑性化し、時間の経過に伴って表面側が先に塑性化した後に裏面側の塑性化領域が拡大していることがわかる。衝突初期の塑性化範囲は、平坦および半球状飛翔体のケースと比較して最も狭くなった。図-4.19 (b)に示す円錐状飛翔体、板厚 9mm、衝突速度 77.5m/s のケースおよび図-4.19 (c)に示す円錐状飛翔体、板厚 12mm、衝突速度 116.2m/s のケースでは、衝突初期の塑性化領域はそれぞれ、鋼板中心から半径約 65mm および 80mm であり、その後は板厚 6mm のケースと同様に、表面側が先に塑性化した後に裏面側の塑性領域が拡大した。

図-4.20 に、円錐状飛翔体のケースにおける鋼板の破壊の進展状況を示す。図-4.20(a)に示す円錐状飛翔体、板厚 6mm、衝突速度 59.9m/s のケースにおいては、飛翔体衝突後時刻 0.3ms において鋼板の裏面中央の裏面側の要素に初期破壊が生じた。その後、裏面中心から外側に向けて破壊が進展するとともに、裏面側から表面側に破壊が進展し、時刻 0.6ms において鋼板中心部に亀裂が生じた。図-4.20(b)に示す円錐状飛翔体、板厚 9mm、衝突速度 77.5m/s のケースおよび図-4.20(c)に示す円錐状飛翔体、板厚 12mm、衝突速度 116.2m/s のケースでは、いずれも衝突後時刻 0.3ms において鋼板中央の裏面側の要素に初期破壊が生じた。その後は板厚 6mm ケースと同様に、裏面中心から外側に向けて破壊が進展するとともに、裏面側から表面側に破壊が進展し、鋼板中央部に亀裂が生じた。

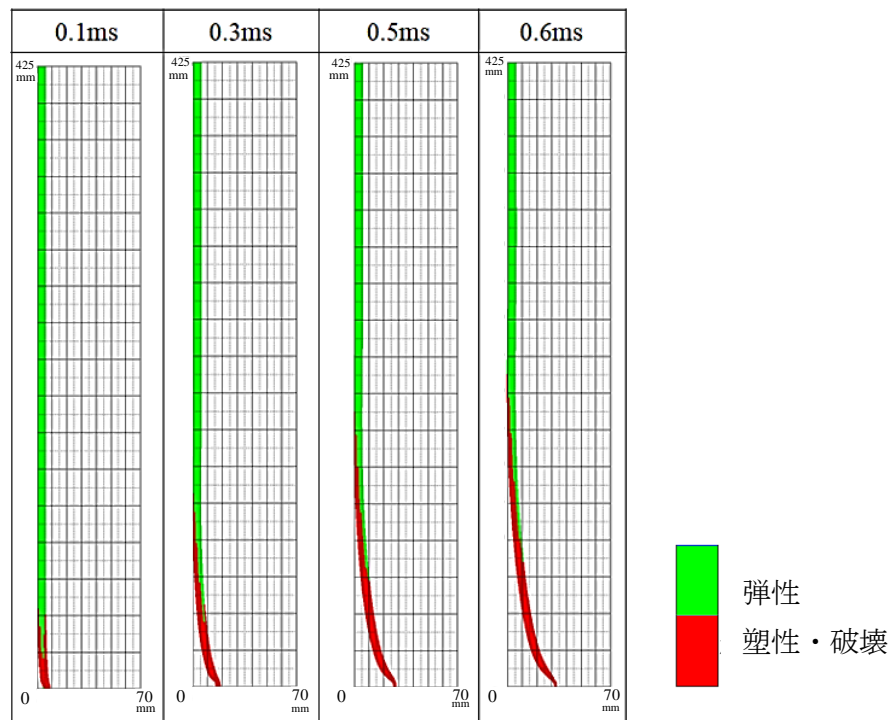
図-4.21 に、円錐状飛翔体、板厚 6mm、衝突速度 59.9m/s のケースにおける鋼板の加速度および速度分布を示す。加速度分布から、鋼板中心から半径約 5mm において衝突後時刻 0.04ms で最大約 2200m/s^2 の加速度が生じた。また、速度分布から、衝突直後に鋼板中心から半径約 5mm の範囲に大きな速度が生じ、時刻 0.08ms で最大 62m/s となった。その後、速度分布は時間の経過に伴って拡大し、全体的に徐々に減速した。

図-4.22 に、円錐状飛翔体のケースにおける鋼板の相当塑性ひずみ分布を示す。図-4.22(a) に示す板厚 6mm の非貫通ケースの結果から、衝突後時刻 0.1ms においては、飛翔体先端部と鋼板の衝突部において最大約 0.2 のひずみが生じた。時刻 0.3ms では、鋼板の変形が進展することに伴い、鋼板裏面にひずみが発生し、その後は変形の進展に伴って裏面側にひずみが局所化した。図-4.22(b) に示す板厚 6mm の貫通ケースにおいては、衝突速度が増加することで衝突後時刻 0.1ms の時点で鋼板裏面側にもひずみが発生し、時刻 0.3ms では鋼板裏面中央のひずみが破断ひずみに達して破壊が生じた。その後破壊が生じた断面にひずみが局所化して亀裂が生じる挙動を示した。図-4.22(c)に示す円錐状飛翔体、板厚 9mm、衝突速度 77.5m/s のケースおよび図-4.22(d)に示す円錐、板厚 12mm、衝突速度 116.2m/s のケースでは、ひずみがより広い範囲に拡大し、鋼板裏面中心だけでなく中心から約 15mm の位置にもひずみの局所化がみられ、裏面の一部の要素に破壊が生じた。

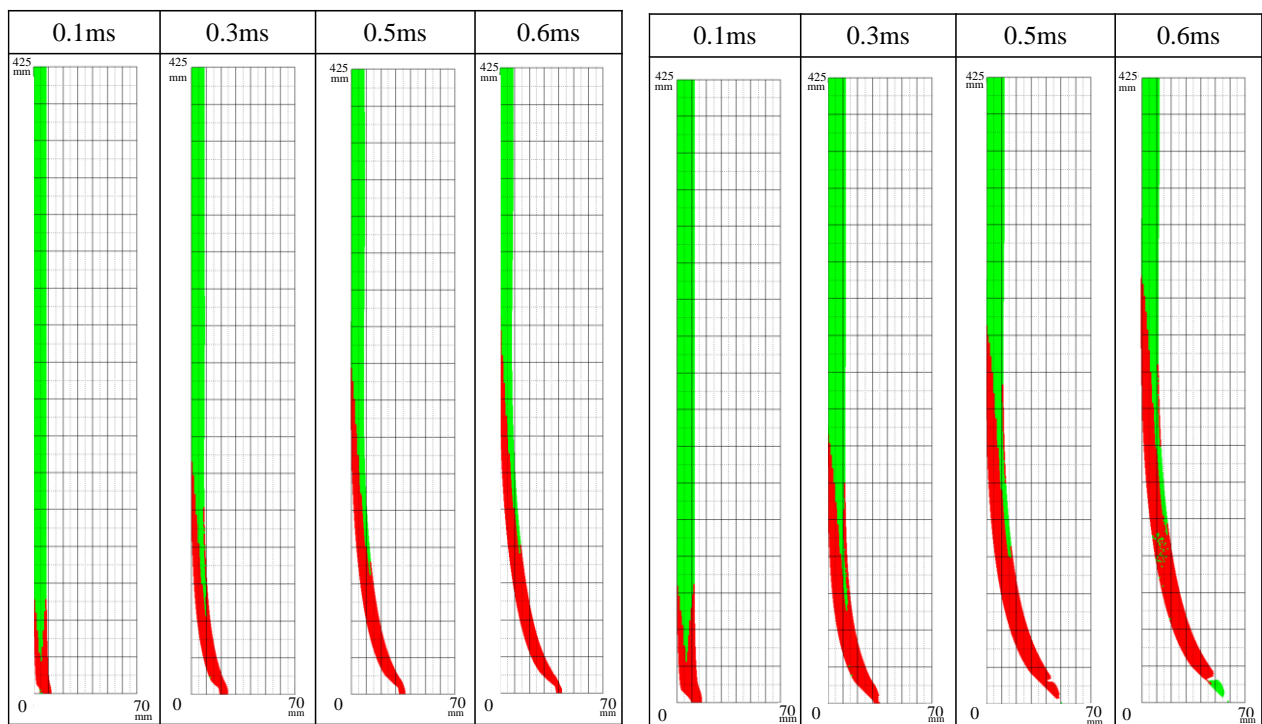
図-4.23 に、円錐状飛翔体、板厚 6mm、衝突速度 29.0m/s の非貫通ケースおよび 59.9m/s の

貫通ケースにおける，鋼板中心の要素の相当塑性ひずみ－時間関係を示す．図から，貫通ケースにおいて初期の要素破壊が生じる時刻における表面から 6mm 位置の要素の相当塑性ひずみは，貫通が生じたケースの方が約 1.8 倍大きな値を示した．

円錐状飛翔体のケースにおいて初期に破壊が生じた要素の応力三軸度，ひずみ速度および破断ひずみ－時間関係を図-4.24 に示す．図-4.24(a)に示す応力三軸度－時間関係をみると，衝突直後から時刻 0.15ms までの間は概ね同程度の値で推移し，その後時刻約 0.19ms において貫通ケースが約 11%大きな値を示した．その後，要素に破壊が生じるまでの間は貫通が生じたケースの方が大きな値で推移した．図-4.24(b)に示すひずみ速度－時間関係については，衝突直後から貫通が生じたケースの方がより高い値を示しており，要素の破壊が生じる時刻約 0.3ms までの間，平均で約 2 倍高い値であった．また，図-4.24(c)に示すように，破断ひずみは衝突直後から貫通が生じたケースの方が低い値となって推移しており，時刻 0.3ms までの間において最低値で約 4%の差が認められた．



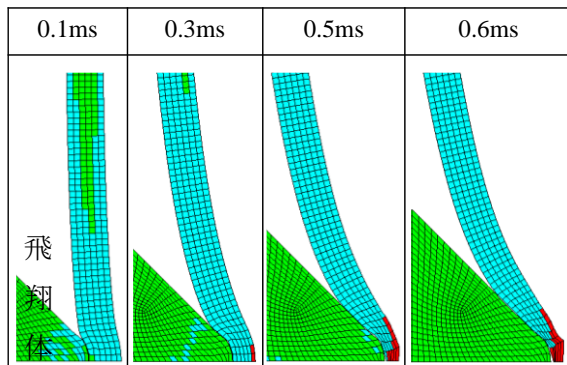
(a) 板厚 6mm, 59.9m/s



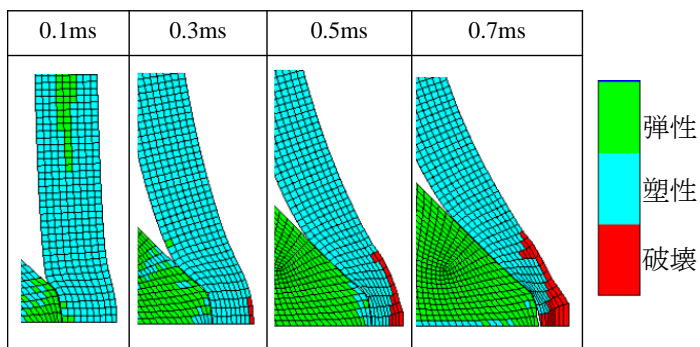
(b) 板厚 9mm, 77.5m/s

(c) 板厚 12mm, 116.2m/s

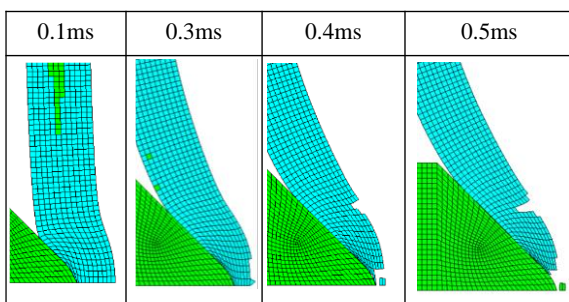
図-4.19 鋼板の変形の進展状況（円錐状飛翔体）



(a) 板厚 6mm, 59.9m/s

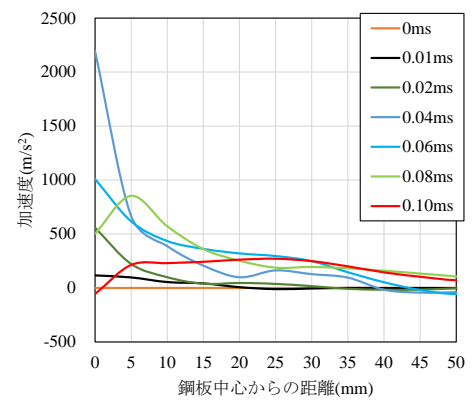


(b) 板厚 9mm, 77.5m/s

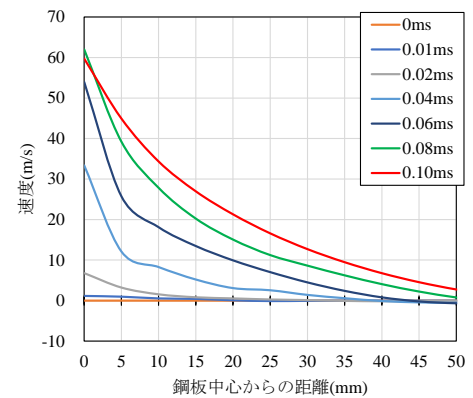


(c) 板厚 12mm, 116.2m/s

図-4.20 破壊の進展状況
(円錐状飛翔体)

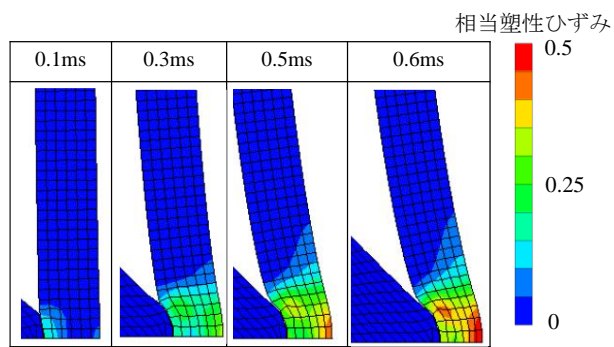


(a) 加速度分布

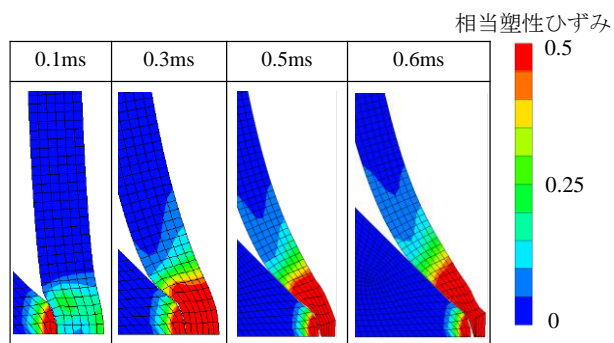


(b) 速度分布

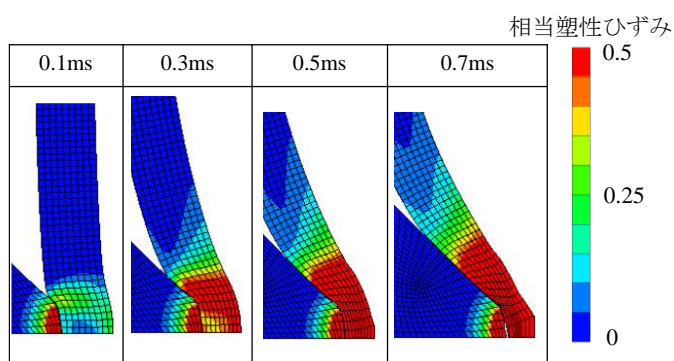
図-4.21 鋼板の加速度および速度分布



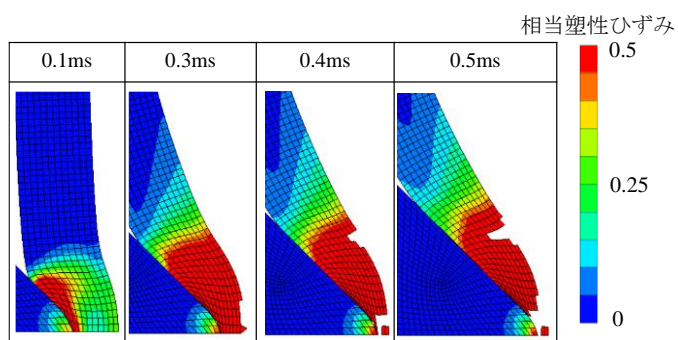
(a) 板厚 6mm, 衝突速度 29.0m/s



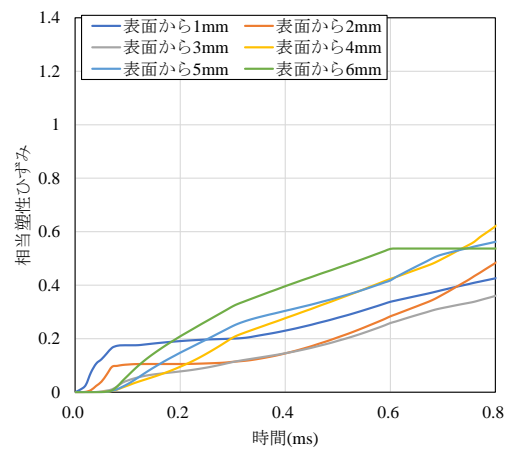
(b) 板厚 6mm, 衝突速度 59.9m/s



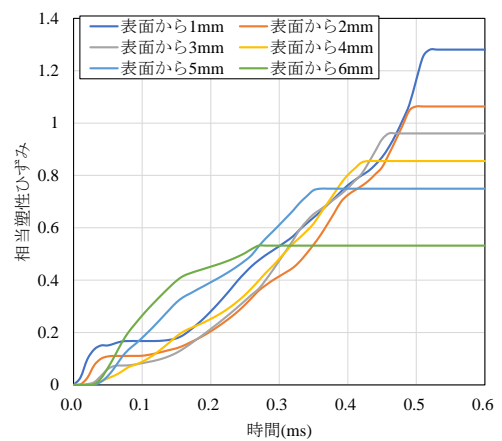
(c) 板厚 9mm, 77.5m/s



(d) 板厚 12mm, 116.2m/s



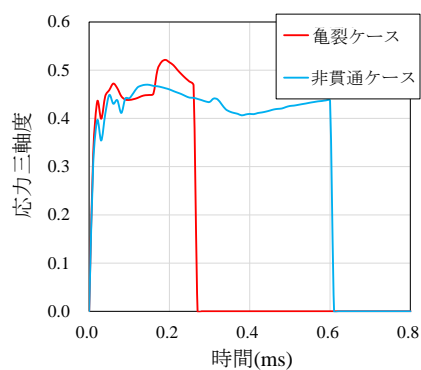
(a) 板厚 6mm, 衝突速度 29.0m/s



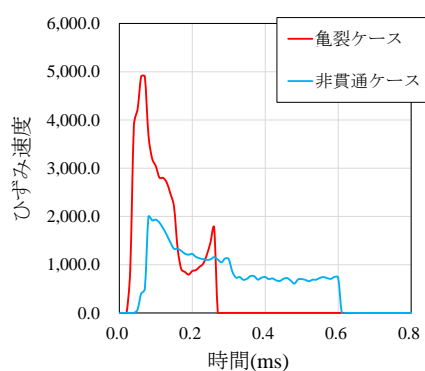
(b) 板厚 6mm, 衝突速度 59.9m/s

図-4.23 鋼板中心の要素の相当塑性ひずみ-時間関係

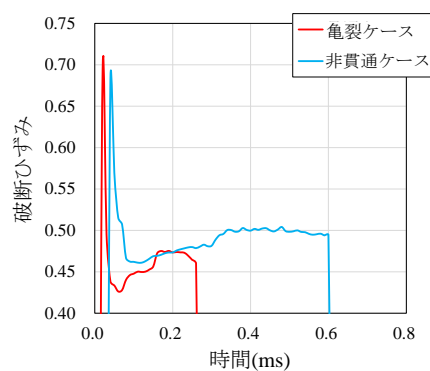
図-4.22 相当塑性ひずみ分布 (円錐)



(a) 応力三軸度－時間関係



(b) ひずみ速度－時間関係

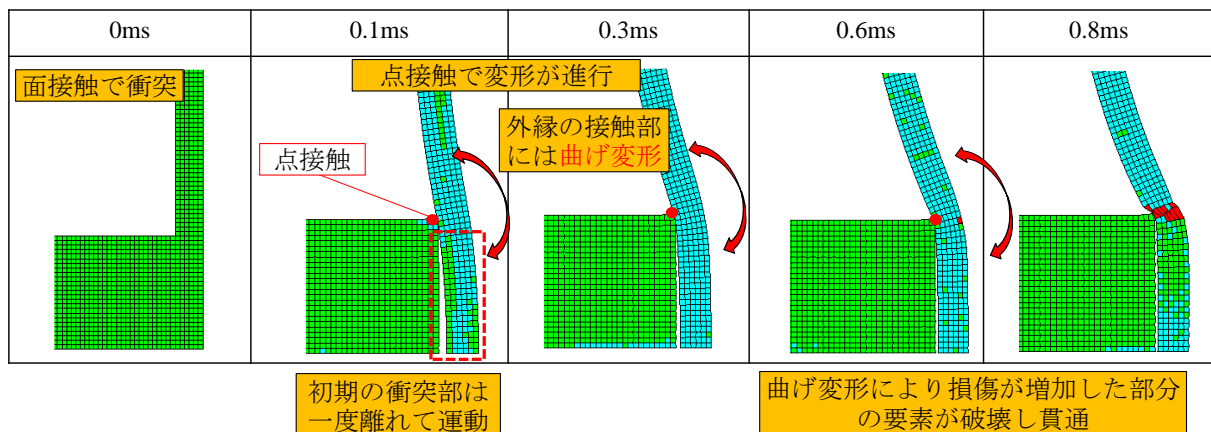


(c) 破断ひずみ－時間関係

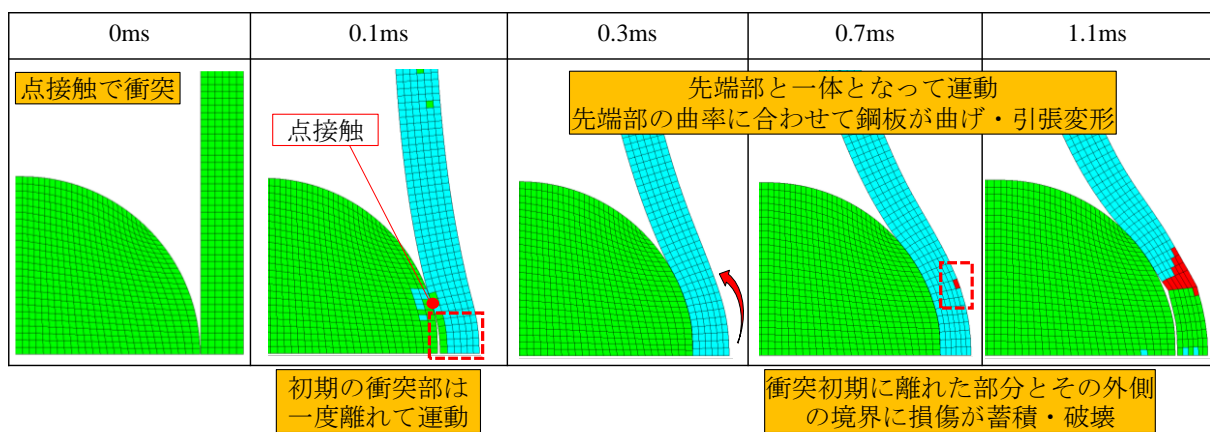
図-4.24 破壊が生じた要素の応力三軸度，ひずみ速度および破断ひずみ－時間関係
(円錐状飛翔体)

(4) 各先端形状における貫通破壊メカニズムの検討

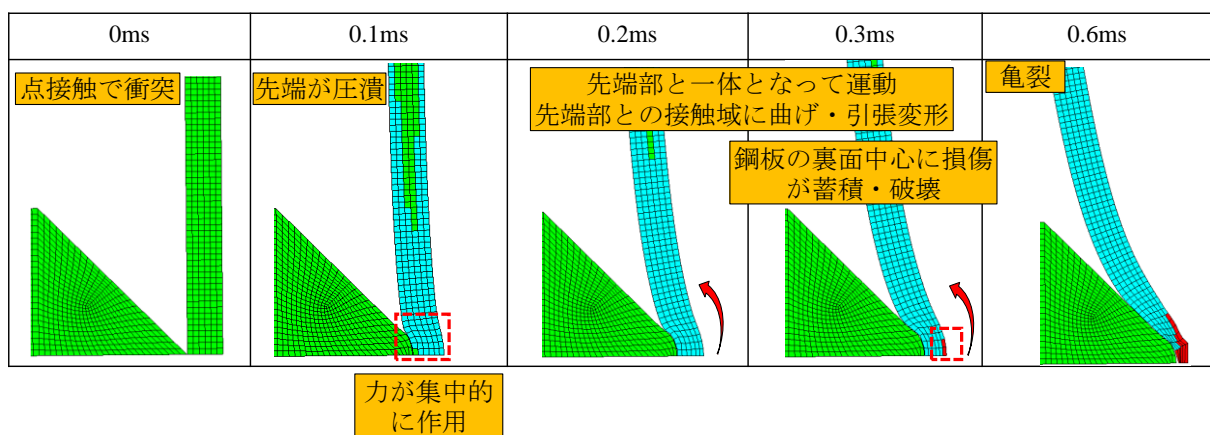
図-4.25 に、これまでの解析結果に基づいて検討した各先端形状における鋼板の貫通破壊メカニズムの模式図を示す。図-4.25(a)に示す平坦状飛翔体の場合では、飛翔体と鋼板は面接触の状態で衝突した後、鋼板の衝突部分は飛翔体先端部と離れる。その後は時刻 0.1ms に示すように、鋼板には飛翔体先端部の外縁のみが接触しており、力は点（線）で作用して変形が進展する。点接触の領域には曲げ変形が生じ、時間の経過に伴って鋼板の裏面側に局所的に損傷が集中して破壊が生じた。図-4.25(b)に示す半球状飛翔体の場合では、飛翔体と鋼板は点接触で衝突するが、徐々に接触部が拡大する。しかし、その後、鋼板の衝突部分とその周囲は飛翔体先端部と離れる。この間、鋼板と飛翔体の先端部は点接触のような形態で鋼板の変形が進展し(0.1ms)、その後は飛翔体と鋼板が一体となって運動する。鋼板には飛翔体先端部の曲率に合わせて曲げおよび引張変形が生じ、衝突初期に飛翔体先端部と鋼板が点接触した近傍に損傷が局所的に蓄積して破壊が生じた。図-4.25(c)に示す円錐状飛翔体の場合では、飛翔体と鋼板は点接触で衝突するが、飛翔体の変形とともに接触部が拡大する。その後、飛翔体と鋼板は一体となって運動し、接触している領域には曲げおよび引張変形が生じて変形が進展する。最終的には、鋼板の裏面中心に局所的に損傷が蓄積して破壊が生じた。



(a) 平坦状飛翔体



(b) 半球状飛翔体

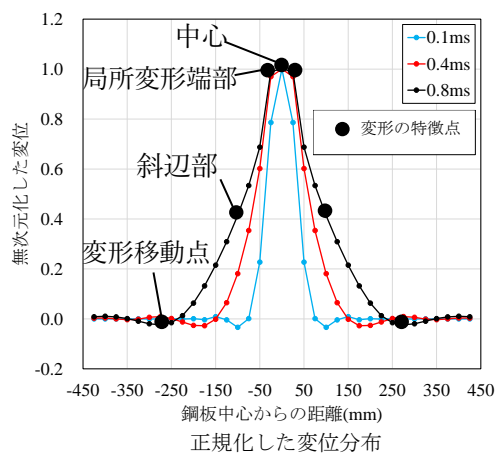
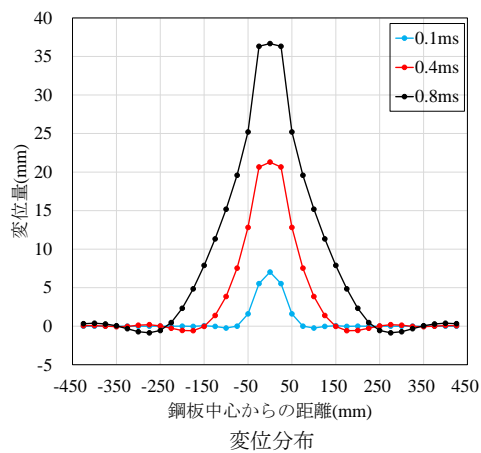


(c) 円錐状飛翔体

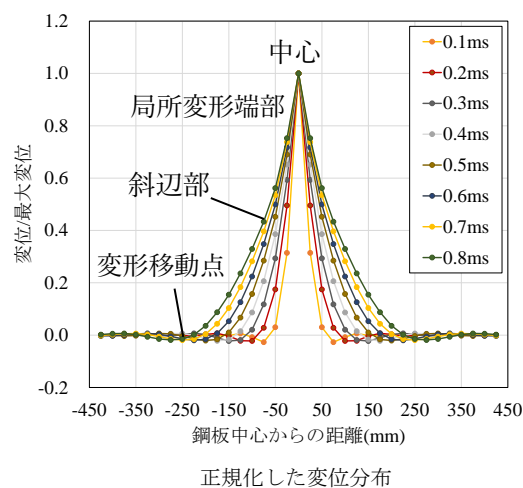
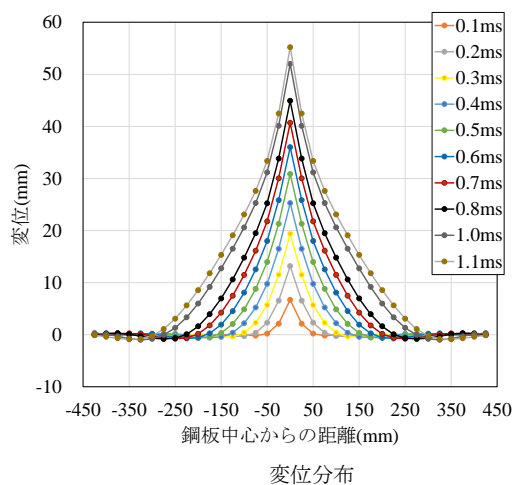
図-4.25 各先端形状における鋼板の貫通破壊メカニズムの模式図

(5) 各先端形状における変形の特徴的な位置

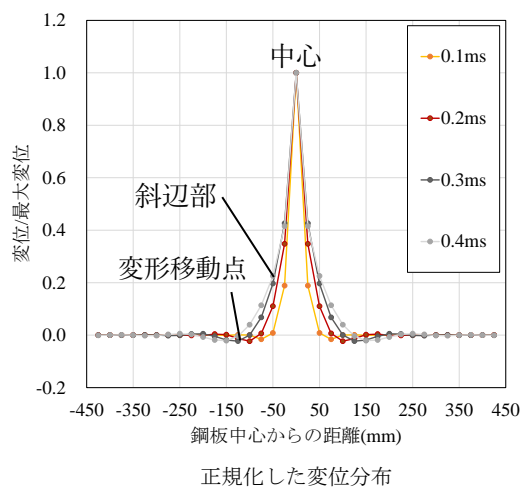
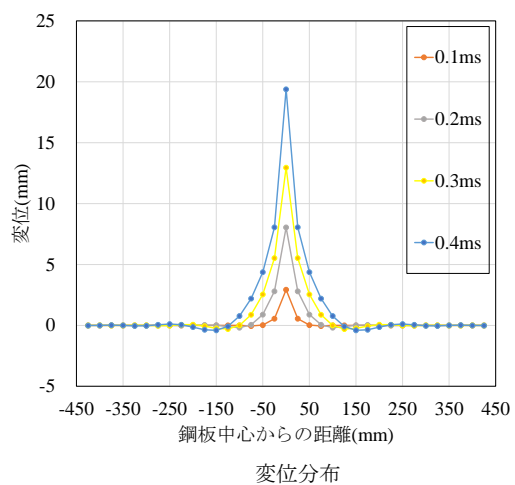
図-4.26 に、各先端形状における変位分布の時間変化および正規化した変位分布の時間変化を示す。図-4.26(a)に示す平坦状飛翔体の結果をみると、衝突によって中心部付近の変位が増大するとともに、変形領域が支点に向かって進展していることがわかる。また、各位置の変位を中心の変位で除した正規化変位の分布から、平坦状飛翔体のケースではいずれの時刻においても中心部に局所的な変位が生じ、徐々に変形範囲が進展した。この間、中心部と変形の端部との間の領域には伸び変形が生じていることがわかる。これらの変形の特徴的な位置として、図中に示すように中心から支点へ向かって「中心」、「局所変形端部」、「斜辺部」および「変形移動点」と定義し、これらの位置における断面内のひずみおよび応力分布を考察する。なお、「斜辺部」は変位分布における「局所変形端部」と「変形移動点」の間の変形部分を示しており、代表的な一つの断面に着目して考察する。図-4.26 (b)に示す半球状飛翔体の結果をみると、平坦状飛翔体の場合と同様に衝突によって中心部付近の変位が増大するとともに、変形領域が支点に向かって進展していることがわかる。また、各位置の変位を中心の変位で除した正規化変位の分布から、いずれの時刻においても中心部に局所的な変位が生じ、徐々に変形範囲が進展した。図中に示すように中心から支点へ向かって「中心」、「局所変形端部」、「斜辺部」および「変形移動点」と定義し、これらの位置における断面内のひずみおよび応力分布を考察する。図-4.26(c)に示す円錐状飛翔体の結果から、平坦および半球状飛翔体の場合と同様に衝突によって中心部付近の変位が増大するとともに、変形領域が支点に向かって進展した。また、各位置の変位を中心の変位で除した正規化変位の分布から、いずれの時刻においても中心部に局所的な変位が生じ、徐々に変形範囲が進展した。変形の特徴的な位置として、図中に示すように中心から支点へ向かって「中心」、「斜辺部」および「変形移動点」と定義し、これらの位置における断面内のひずみおよび応力分布を考察する。



(a) 平坦状飛翔体



(b) 半球状飛翔体



(c) 円錐状飛翔体

図-4.26 変位分布の時間変化 (板厚 6mm)

4.2.5 断面のひずみおよび応力分布

(1) 平坦状飛翔体

図-4.27 に、一例として平坦状飛翔体、板厚 6mm、衝突速度 58.5m/s のケースにおける局所変形端部および斜辺部の衝突後 0.08ms までのひずみおよび応力分布を示す。鋼板の面内方向の垂直ひずみおよび垂直応力に着目し、ひずみおよび応力は引張を正、縦軸は衝突部である表面側を正とした。図-4.27 (a)に示す局所変形端部のひずみ分布から、衝突直後の 0.01ms、0.02ms では衝突による局所的な変形や貫入の影響を受けると考えられるが、概ね板厚の中心が中立軸となるような曲げひずみ分布を示している。なお、最大ひずみは約 0.013 (1.3%) であった。その後、斜辺部の引張変形の影響を受けて全体的にシフトし、曲げと軸変形が混在するようなひずみ分布を示した。時刻 0.08ms になると、衝突裏面において最大ひずみ 0.03 (3%) を示した。次に、応力分布から、時刻 0.01ms、0.02ms では圧縮および引張縁ともに大きなひずみに対応した形で塑性化が進行している。ただし、圧縮側に 1000MPa を超える応力が発生している理由は、衝突による高い圧力やひずみ速度の影響を受けたためと考えられる。時刻 0.04ms 以降は、圧縮と引張が対称となる応力分布を示し、全塑性状態に類似した分布となった。発生応力は 500MPa であり静的な降伏応力の 1.5 倍となっているが、これはひずみ速度効果の影響と考えられる。時刻 0.08ms では、軸力の影響を受けて全体的に引張側へ移動するような分布となった。

図-4.27(b)に示す斜辺部のひずみ分布から、衝突直後の 0.01ms～0.02ms では板厚の中心が中立軸となるような曲げひずみ分布を示している。なお、最大ひずみは約 0.003 (0.3%) であった。その後、時刻 0.04ms 以降になると引張変形の影響を受けて曲げひずみに約 0.003 の引張ひずみが加わっている。すなわち、衝突直後は曲げ変形を示すが、時刻 0.04ms 以降になると軸方向の変形が生じることを示して。次に、応力分布から、時刻 0.01ms、0.02ms ではひずみに対応した弾性的な応力分布となった。最大応力は 500MPa を超えているにも関わらず弾性範囲である理由は、ひずみ速度効果によって降伏応力が高くなったためと考えられる。時刻 0.04ms では、圧縮と引張が対称となる応力分布を示し、全塑性状態に類似した分布となった。時刻 0.08ms では、軸力の影響を受けて全体的に引張側へ移動するような分布となった。

時刻 0.4ms における変形の特徴点断面のひずみおよび応力分布を、図-4.28 に示す。なお、時刻 0.2ms から貫通が生じた時刻 0.8ms までの間は以下に示す分布と同様の結果であった。

「中心」および「斜辺部」においては、いずれもひずみ勾配は認められるが、断面には引張ひずみだけが生じている。また、応力分布は断面内でほぼ一様となっている。この理由は、鋼板の中央では衝突によってたわみ変形が生じるためと考えられる。また、斜辺部では飛翔体の進行とともに引張変形が進展するため初期の曲げ変形（図-4.27(b)参照）から引張変形へと移行することを示している。一方で、局所変形端部では、曲げと軸ひずみが重なったような分布を示し、応力も全塑性状態の応力が引張側へ移行したような形となった。これは、衝突初期に形成された塑性ヒンジを維持したまま引張変形を受けたことを示唆している。なお、変形移動点については、正の曲げモーメントを形成した。

図-4.29 に、一例として、平坦状飛翔体、板厚 6mm、衝突速度 58.5m/s のケースにおける変形移動点から中心側および支点側に 25mm 離れた位置の応力分布を示す。図から、変形移動点の中心側においては、最大応力 500MPa の全塑性状態に近い分布を示している。また、変形移動点の支点側では、モーメントの向きは符号が反転し、弾性の曲げ応力分布を示した。すなわち、変形が支点へ移動する場合には、変形移動点の中心側に塑性ヒンジを伴うこと、また支点側においては高次の変形モードのような変形が生じることを示している。ここで、同ケースにおける変形移動点の位置－時間関係を、図-4.30 に示す。図から、変形移動点が衝突後 0.1ms に中心から 100mm の位置に生じて支点に向けて移動すると仮定すると、移動速度は約 285.7m/s となる。なお、この変形移動点の応力状態は 0.1ms 毎に確認した。塑性ヒンジは変形移動点の内側に生じるため、変形移動点の位置－時間関係から求めた変形移動点の速度を塑性ヒンジの移動速度とした。

図-4.31 に、平坦状飛翔体、板厚 6mm、衝突速度 41.6m/s、平坦状飛翔体、板厚 9mm、衝突速度 62.7m/s および平坦状飛翔体、板厚 12mm、衝突速度 83.5m/s の時刻 0.1ms および時刻 0.4ms における断面の応力を最大値で正規化した値の分布を示す。図-4.31 (a)の時刻 0.1ms における比較から、変形の特徴点の応力分布は類似した形状であることがわかる。「中心」および「斜辺部」における応力分布については、板厚および衝突速度の増加に伴って、表面側および裏面側の値が大きくなる傾向が認められる。図-4.31(b)の時刻 0.4ms における比較結果についても、各変位分布の特徴点の応力分布は類似した形状であることがわかる。以上から、板厚および衝突速度が異なるケースでも、変位分布の特徴点については、断面の応力およびひずみ分布が類似した応答を示しており、同様の変形メカニズムで説明できると考えられる。

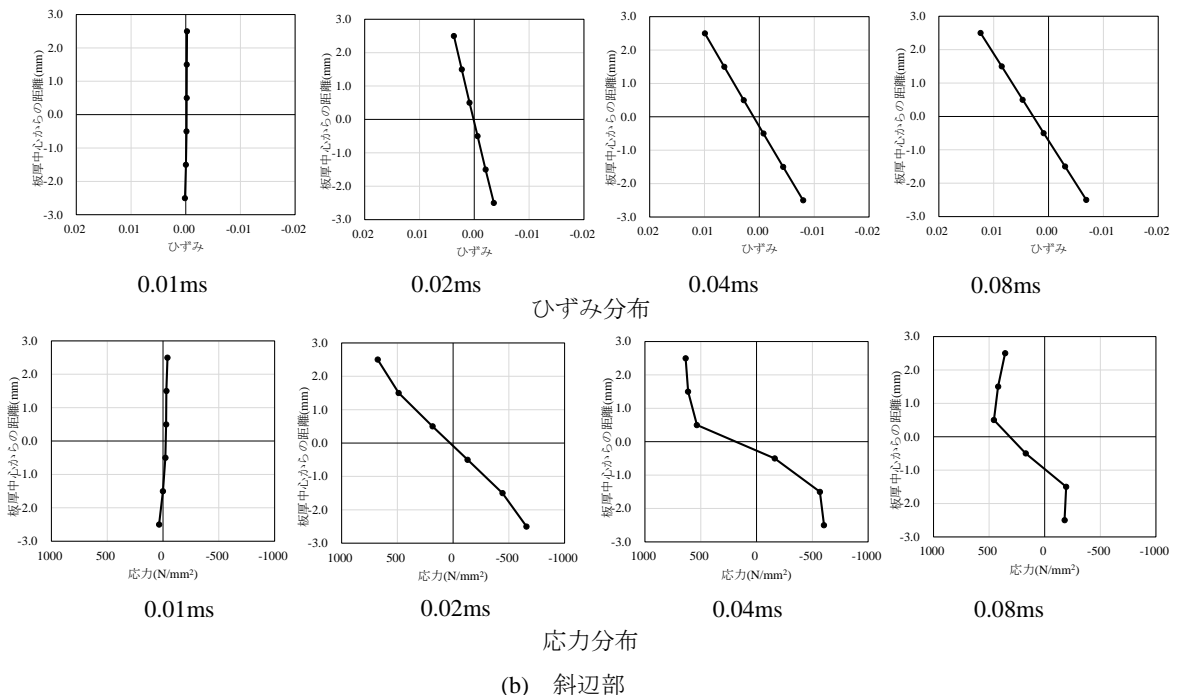
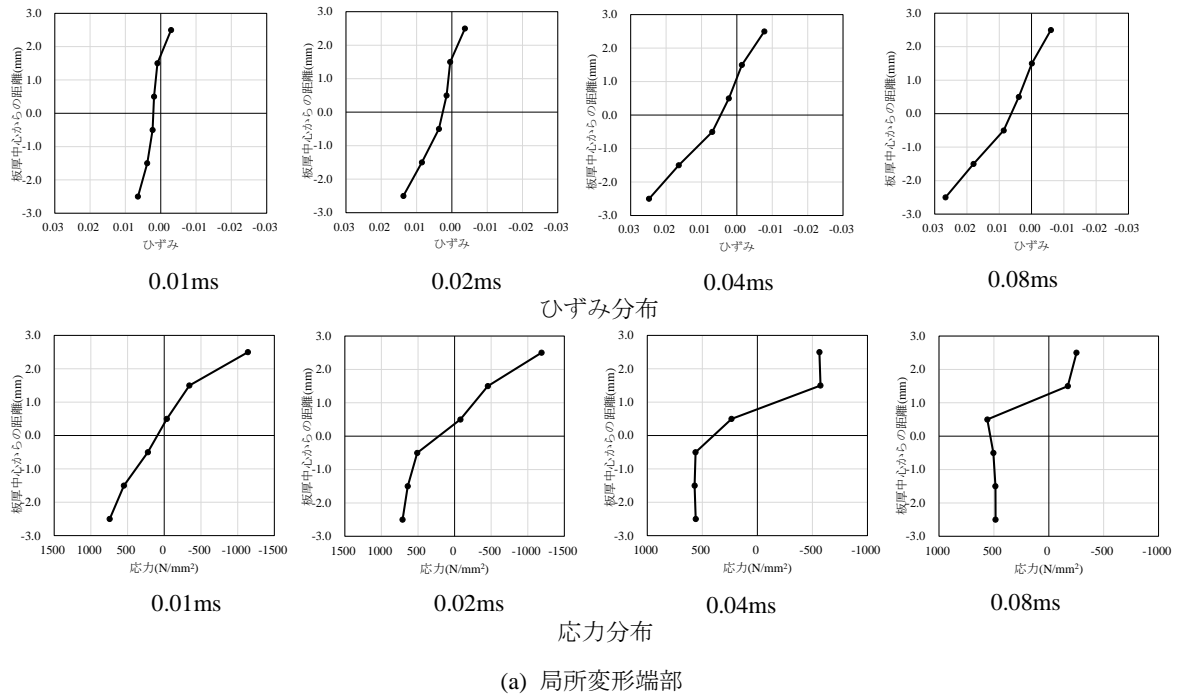
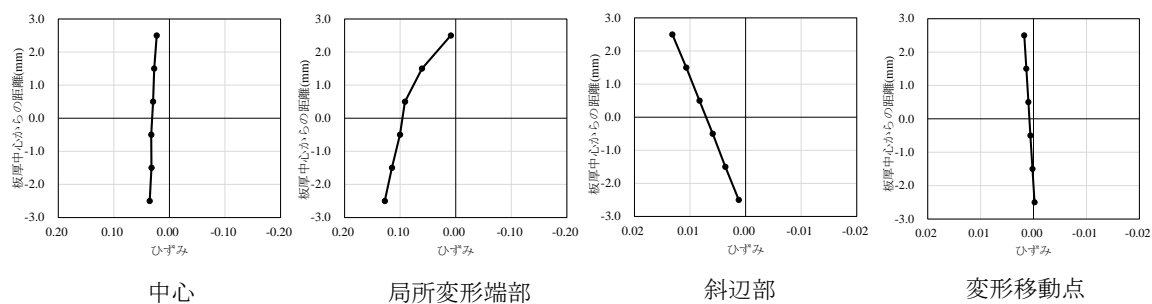
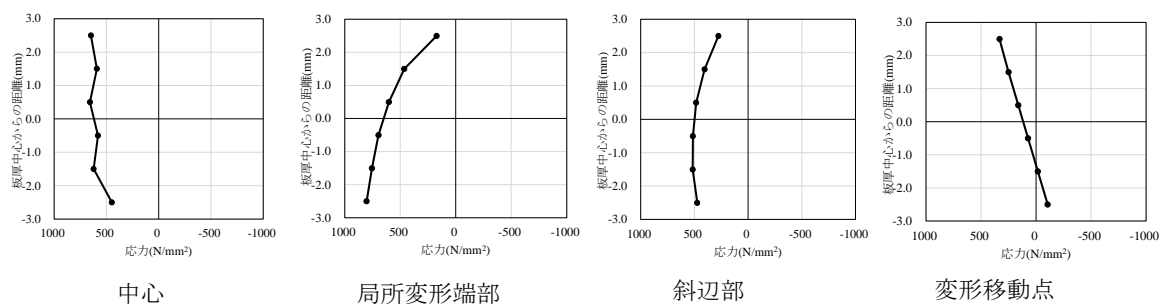


図-4.27 ひずみおよび応力分布の時間変化
(平坦状飛翔体, 板厚 6mm, 衝突速度 58.5m/s)



(a) ひずみ分布



(b) 応力分布

図-4.28 特徴的な変形部断面のひずみおよび応力分布
(平坦状飛翔体, 板厚 6mm, 衝突速度 58.5m/s, 時刻 0.4 ms)

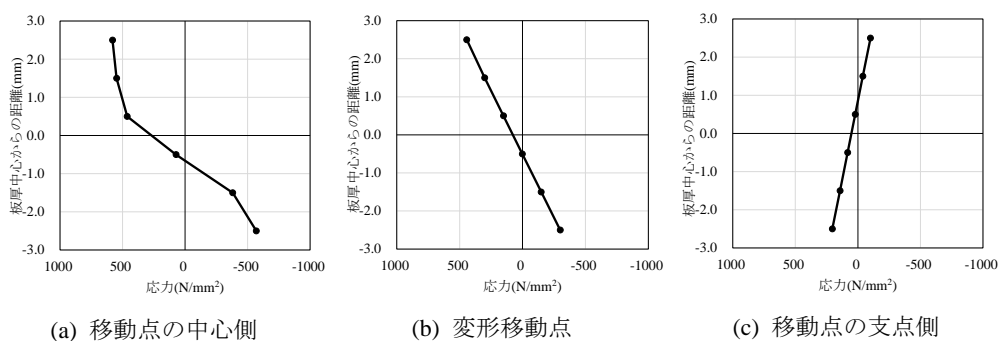


図-4.29 変形移動点周辺の応力分布

(平坦状飛翔体, 板厚 6mm, 衝突速度 58.5m/s, 時刻 0.1 ms)

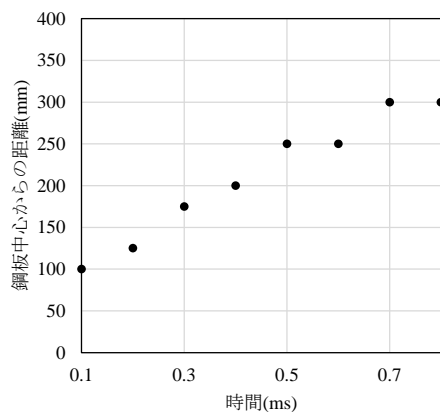


図-4.30 変形移動点の位置～時間関係
(平坦状飛翔体, 板厚 6mm, 衝突速度 58.5m/s)

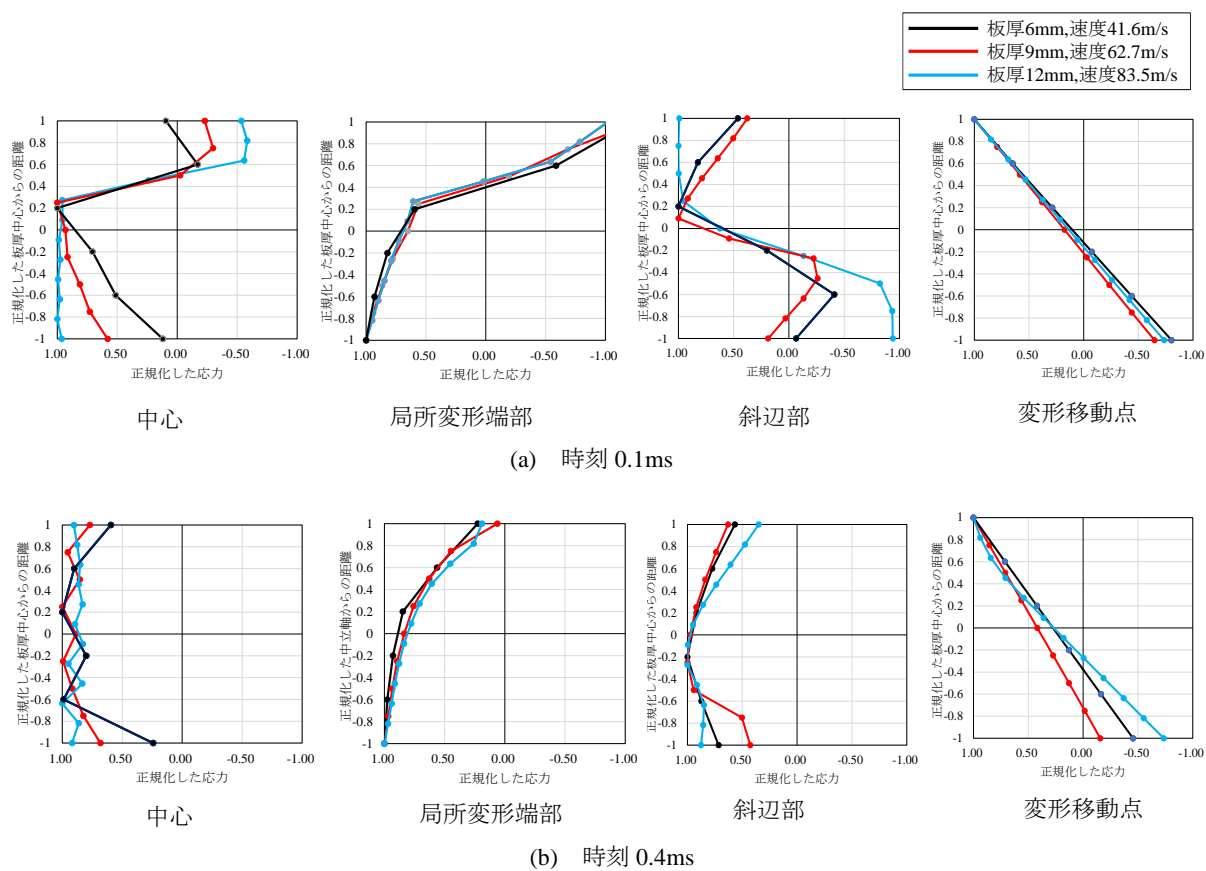


図-4.31 正規化した応力分布の比較（平坦状飛翔体）

(2) 半球状飛翔体

図-4.32 に、一例として半球状飛翔体、板厚 6mm、衝突速度 70.9m/s のケースにおける鋼板中心および斜辺部の衝突後 0.08ms までのひずみおよび応力分布を示す。図-4.32(a)に示す鋼板中心のひずみ分布から、衝突直後の 0.01ms、0.02ms では、概ね板厚の中心が中立軸となるような曲げひずみ分布を示している。なお、最大ひずみは約 0.06 (6.0%) であった。その後、斜辺部の引張変形の影響を受けて全体的にシフトし、曲げと軸変形が混在するようなひずみ分布を示した。時刻 0.08ms になると、衝突裏面において最大ひずみ 0.075 (7.5%) を示した。次に、応力分布から、時刻 0.01ms では圧縮および引張縁ともに大きなひずみに対応した形で塑性化が進行している。ただし、圧縮側には、平坦状の場合の約 1.5 倍となる 1500MPa 近い応力が発生した。この理由は、半球状の場合は衝突時に飛翔体と鋼板が点接触となるため、衝突部となる鋼板中心により高い圧力やひずみ速度が発生し、この影響を受けたためと考えられる。時刻 0.04ms では、圧縮と引張が対称となる応力分布を示し、全塑性状態に類似した分布となった。発生応力は 1000MPa であり静的な降伏応力の 3 倍となった。時刻 0.08ms では、軸力の影響を受けて全体的に引張側へ移動するような分布となった。

図-4.32(b)に示す局所変形端部のひずみ分布から、衝突直後の 0.01ms ではひずみがほとんど生じず、0.04ms および 0.08ms においては衝突による局所的な変形や貫入の影響を受けると考えられるが、概ね板厚の中心が中立軸となるような曲げひずみ分布を示している。なお、最大ひずみは約 0.03 (3%) であった。その後、斜辺部の引張変形の影響を受けて全体的にシフトし、曲げと軸変形が混在するようなひずみ分布を示した。時刻 0.12ms になると、衝突裏面において最大ひずみ 0.045 (4.5%) を示した。次に、応力分布から、時刻 0.01ms では最も裏面側の要素に約 400MPa の圧縮応力が生じる弾性の応力状態を示し、時刻 0.04ms では概ね板厚の中心が中立軸となるような曲げ応力分布を示した。その後、時刻 0.08ms では圧縮および引張縁ともに大きなひずみに対応した形で塑性化が進行している。ただし、圧縮側に 1000MPa を超える応力が発生している理由は、衝突による高い圧力やひずみ速度の影響を受けたためと考えられる。時刻 0.12ms では、軸力の影響を受けて全体的に引張側へ移動するような分布となった。

図-4.32(c)に示す斜辺部のひずみ分布から、衝突直後の 0.01ms～0.02ms では板厚の中心が中立軸となるような曲げひずみ分布を示している。なお、最大ひずみは約 0.003 (0.3%) であった。その後、時刻 0.08ms になると引張変形の影響を受けて曲げひずみに約 0.004 の引張ひずみが加わっている。すなわち、衝突直後は曲げ変形を示すが、時刻 0.08ms になると軸方向の変形が生じることを示している。次に、応力分布から、時刻 0.01ms、0.02ms ではひずみに対応した弾性的な応力分布となった。最大応力は 500MPa を超えているにも関わらず弾性範囲である理由は、ひずみ速度効果によって降伏応力が高くなったためと考えられる。時刻 0.04ms では、圧縮と引張が対称となる応力分布を示し、全塑性状態に類似した分布となった。時刻 0.08ms では、軸力の影響を受けて全体的に引張側へ移動するような分布となった。

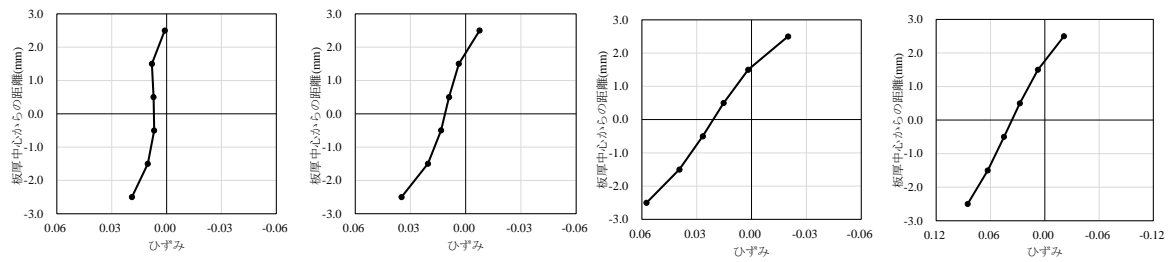
時刻 0.4ms における変形の特徴点断面のひずみおよび応力分布を、図-4.33 に示す。なお、

時刻 0.2ms から貫通が生じた時刻 1.1ms までの間は以下に示す分布と同様の結果であった。

「中心」および「斜辺部」においては、いずれもひずみ勾配は認められるが、断面には引張ひずみだけが生じている。また、応力分布は断面内でほぼ一様となっている。この理由は、鋼板の中央では衝突によって半球状の飛翔体先端部の形状に沿った変形が生じるためと考えられる。また、斜辺部では飛翔体の進行とともに引張変形が進展するため初期の曲げ変形（図-4.32(c)参照）から引張変形へと移行することを示している。変形移動点については、正の曲げモーメントを形成した。

図-4.34 に、一例として、半球状飛翔体、板厚 6mm、衝突速度 70.9m/s のケースにおける変形移動点から中心側および支点側に 25mm 離れた位置の応力分布を示す。図から、変形移動点の中心側においては、最大応力 500MPa の全塑性状態に近い分布を示している。また、変形移動点の支点側では、モーメントの向きは符号が反転し、弾性の曲げ応力分布を示した。すなわち、変形が支点へ移動する場合には、変形移動点の中心側に塑性ヒンジを伴うこと、また支点側においては高次の変形モードのような変形が生じることを示している。ここで、同ケースにおける変形移動点の位置－時間関係を、図-4.35 に示す。図から、変形移動点が衝突後 0.1ms に中心から 50mm の位置に生じて支点に向けて移動すると仮定すると、移動速度は約 343.7m/s となる。なお、この変形移動点の応力状態は 0.1ms 毎に確認した。塑性ヒンジは変形移動点の内側に生じるため、変形移動点の位置－時間関係から求めた変形移動点の速度を塑性ヒンジの移動速度とした。

図-4.36 に、半球状飛翔体、板厚 6mm、衝突速度 70.9m/s、半球状飛翔体、板厚 9mm、衝突速度 96.0m/s および半球状飛翔体、板厚 12mm、衝突速度 115.5m/s の時刻 0.1ms および時刻 0.4ms における断面の応力を最大値で正規化した値の分布を示す。図-4.36 (a)の時刻 0.1ms における比較から、変形の特徴点の応力分布は類似した形状であることがわかる。図-4.36(b)の時刻 0.2ms における比較結果についても、各変位分布の特徴点の応力分布は類似した形状であることがわかる。以上から、板厚および衝突速度が異なるケースでも、変位分布の特徴点については、断面の応力およびひずみ分布が類似した応答を示しており、同様の変形メカニズムで説明できると考えられる。



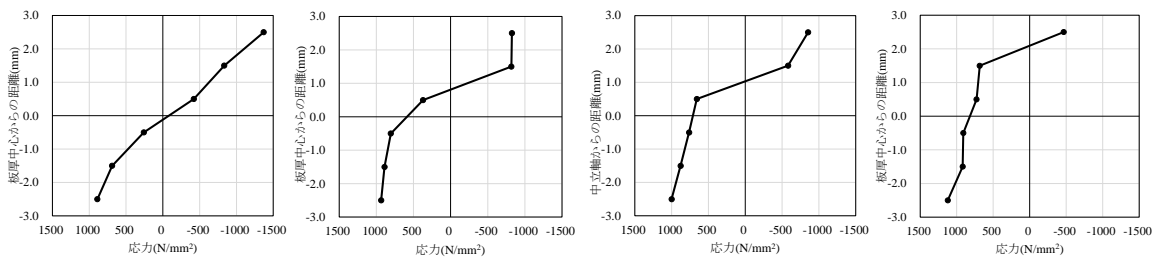
0.01ms

0.02ms

0.04ms

0.08ms

ひずみ分布



0.01ms

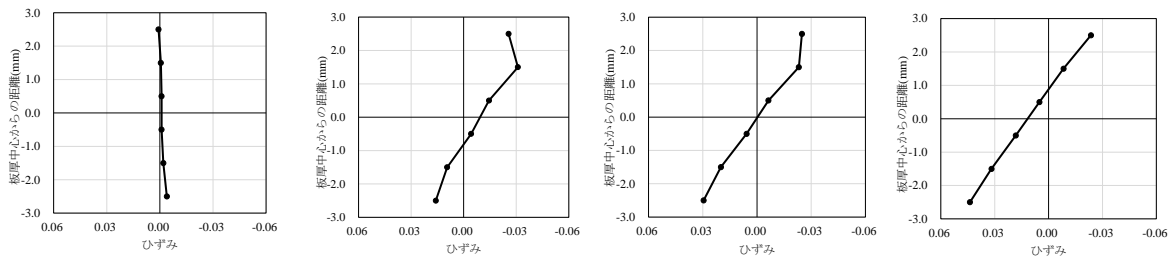
0.02ms

0.04ms

0.08ms

応力分布

(a) 中心



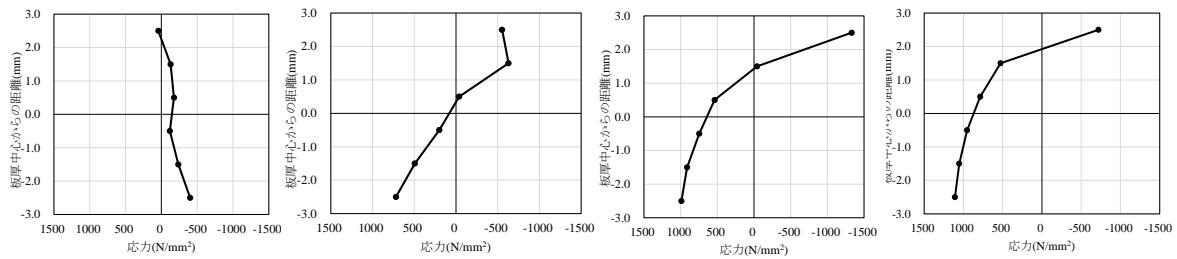
0.01ms

0.04ms

0.08ms

0.12ms

ひずみ分布



0.01ms

0.04ms

0.08ms

0.12ms

応力分布

(b) 局所変形端部

図-4.32 ひずみおよび応力分布の時間変化
(半球状飛翔体, 板厚 6mm, 衝突速度 70.9m/s)

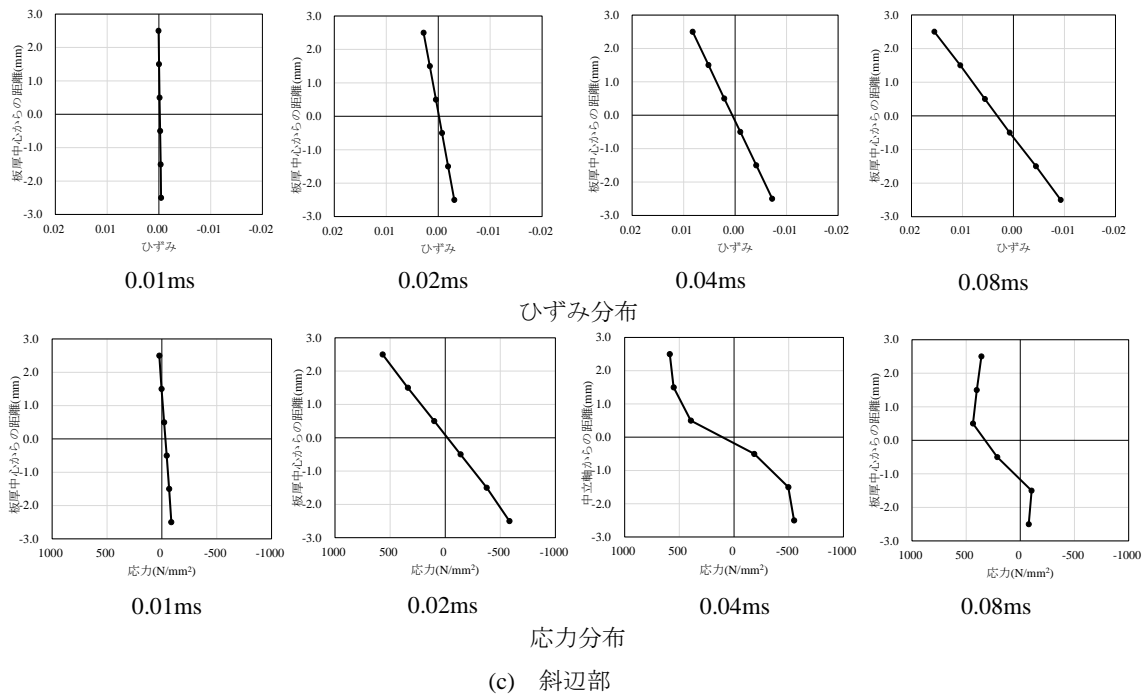


図-4.32 ひずみおよび応力分布の時間変化
(半球状飛翔体, 板厚 6mm, 衝突速度 70.9m/s)

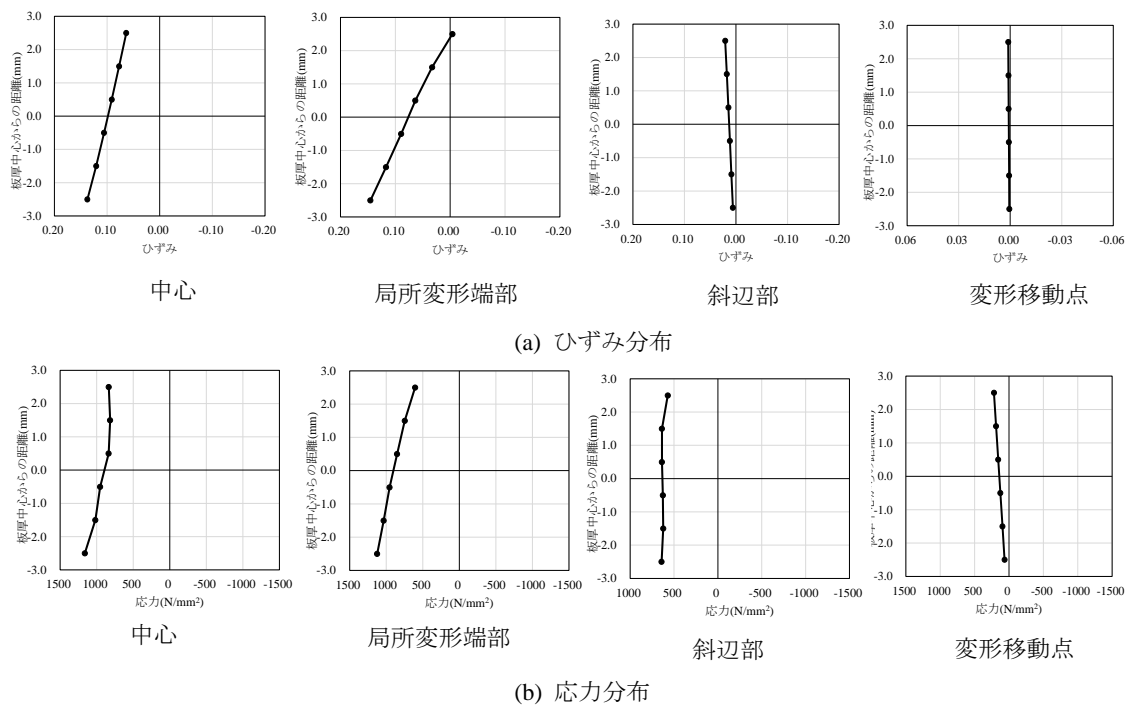


図-4.33 特徴的な変形部断面のひずみおよび応力分布
(半球状飛翔体, 板厚 6mm, 衝突速度 70.9m/s, 時刻 0.4 ms)

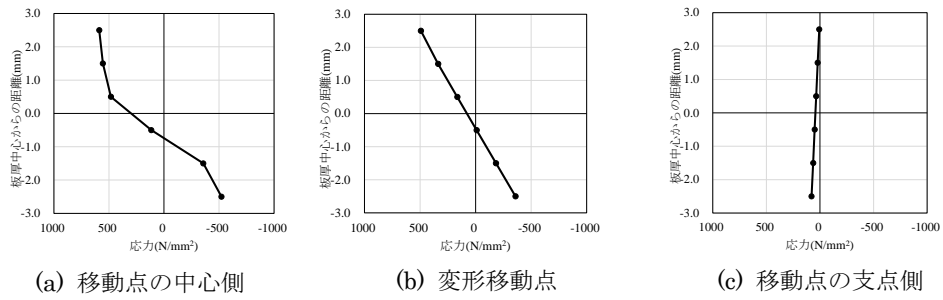


図-4.34 変形移動点周辺の応力分布

(半球状飛翔体, 板厚 6mm, 衝突速度 70.9m/s, 時刻 0.1 ms)

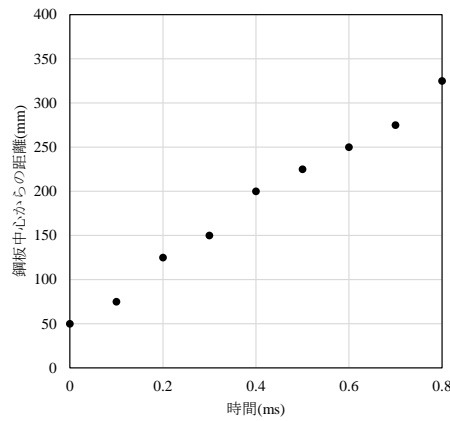


図-4.35 変形移動点の位置～時間関係

(半球状飛翔体, 板厚 6mm, 衝突速度 70.9m/s)

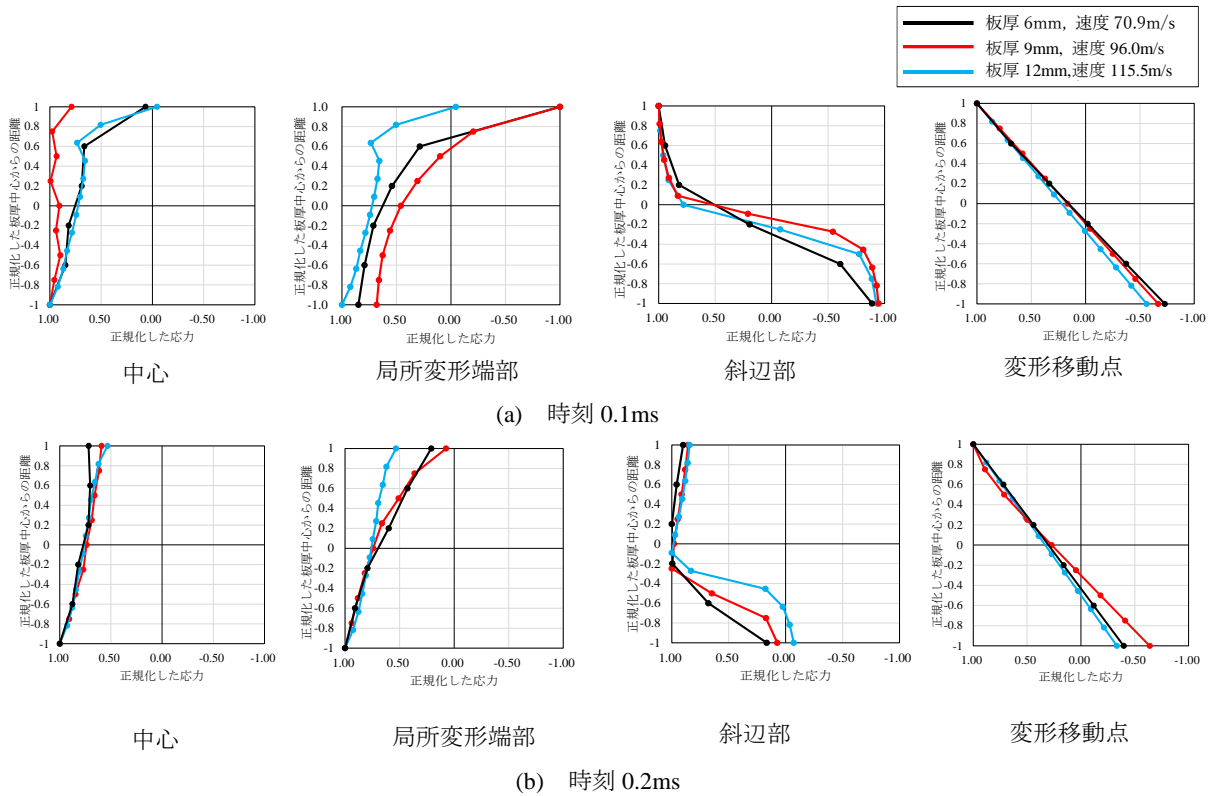


図-4.36 正規化した応力分布の比較 (半球状飛翔体)

(3) 円錐状飛翔体

図-4.37 に、一例として円錐状飛翔体、板厚 6mm、衝突速度 59.9m/s のケースにおける鋼板中心および斜辺部の衝突後 0.08ms までのひずみおよび応力分布を示す。図-4.37(a)に示す中心のひずみ分布から、衝突直後の 0.01ms においては、ひずみはほぼ発生しなかった。その後 0.03ms において表面側に引張ひずみが生じた。これは、衝突直後に飛翔体の先端部に変形が生じており、この変形に合わせて鋼板も衝突方向と直行方向に押し広げられるような状態となったためと考えられる。時刻 0.06ms では、表面側の引張ひずみが進展するとともに、鋼板中心から裏面側にかけてひずみが大きくなる分布形状となった。なお、最大ひずみは約 0.06 (6.0%) であった。時刻 0.08ms では、軸力の影響を受けて全体的に引張側へ移動するような分布となった。次に、応力分布から、衝突直後の 0.01ms では最も表面側の要素にのみ約 1200MPa の大きな圧縮応力が生じた。0.03ms では、概ね板厚の中心が中立軸となるような曲げひずみ分布を示している。0.06ms では最も表面側の要素のみ、応力が引張側に移行した。時刻 0.08ms では、軸力の影響を受けて全体的に引張側へ移動するような分布となった。

図-4.37(b)に示す斜辺部のひずみ分布から、衝突直後の 0.01ms ではひずみがほとんど生じなかったが、0.02ms では板厚の中心が中立軸となるような曲げひずみ分布を示している。なお、最大ひずみは約 0.001 (0.1%) であった。その後、時刻 0.08ms になるとひずみが増大し、最大ひずみは約 0.003 (0.3%) となった。また、応力分布から、時刻 0.01ms, 0.02ms および 0.06ms ではひずみに対応した弾性的な応力分布となった。時刻 0.08ms では、圧縮と引張が対称となる応力分布を示し、全塑性状態に類似した分布となった。

時刻 0.3ms における変形の特徴点断面のひずみおよび応力分布を、図-4.38 に示す。図から、「中心」および「斜辺部」においては、衝突初期の時刻 0.1ms までに生じたひずみおよび応力分布が、軸力の影響を受けて全体的に引張側へ移動するような分布となった。変形移動点については、正の曲げモーメントを形成した。

図-4.39 に、一例として、円錐状飛翔体、板厚 6mm、衝突速度 59.9m/s のケースにおける変形移動点から中心側および支点側に 25mm 離れた位置の応力分布を示す。図から、変形移動点の中心側においては、最大応力 500MPa の全塑性状態に近い分布を示している。また、変形移動点の支点側では、モーメントの向きは符号が反転し、弾性の曲げ応力分布を示した。すなわち、変形が支点へ移動する場合には、変形移動点の中心側に塑性ヒンジを伴うこと、また支点側においては高次の変形モードのような変形が生じることを示している。ここで、同ケースにおける変形移動点の位置－時間関係を、図-4.40 に示す。図から、変形移動点が衝突後 0.1ms に中心から 50mm の位置に生じて支点に向けて移動すると仮定すると、移動速度は約 321.4m/s となる。なお、この変形移動点の応力状態は 0.1ms 毎に確認した。塑性ヒンジは変形移動点の内側に生じるため、変形移動点の位置－時間関係から求めた変形移動点の速度を塑性ヒンジの移動速度とした。

図-4.41 に、円錐状飛翔体、板厚 6mm、衝突速度 59.9m/s、円錐状飛翔体、板厚 9mm、衝突速度 77.5m/s および円錐状飛翔体、板厚 12mm、衝突速度 116.2m/s の時刻 0.1ms および時刻

0.4ms における断面の応力を最大値で正規化した値の分布を示す．図-4.41(a)の時刻 0.1ms における比較から，変形の特徴点の応力分布は類似した形状であることがわかる．図-4.41(b)の時刻 0.2ms における比較結果についても，各変位分布の特徴点の応力分布は類似した形状であることがわかる．以上から，板厚および衝突速度が異なるケースでも，変位分布の特徴点については，断面の応力およびひずみ分布が類似した応答を示しており，同様の変形メカニズムで説明できると考えられる．

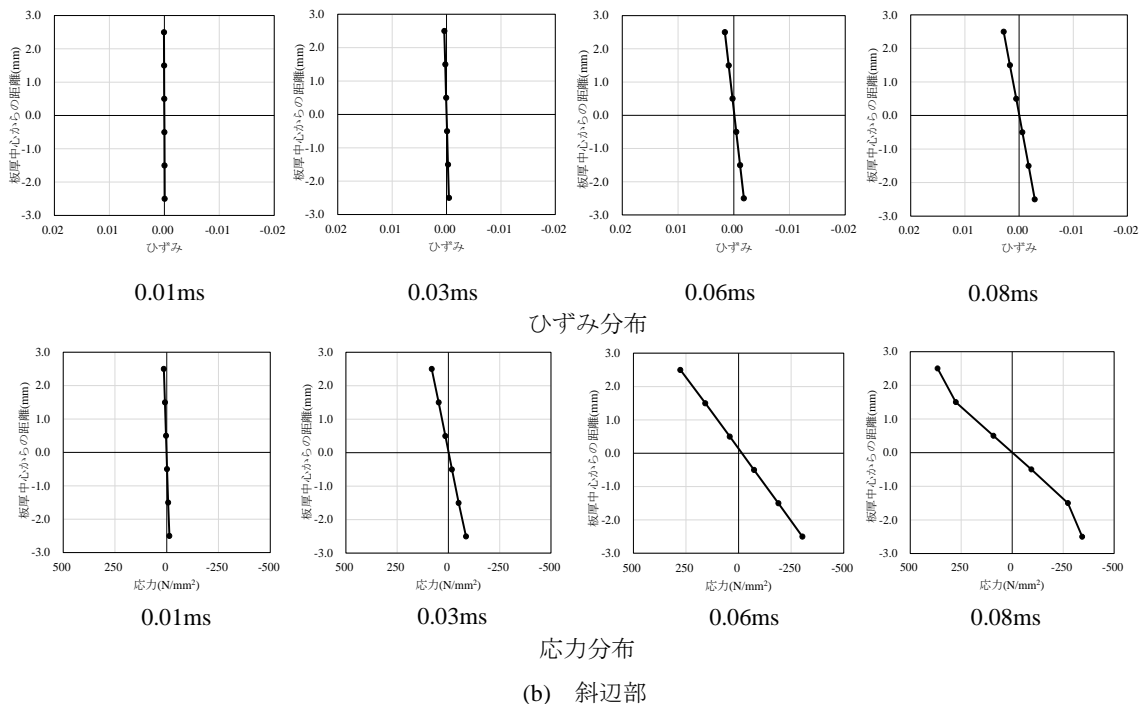
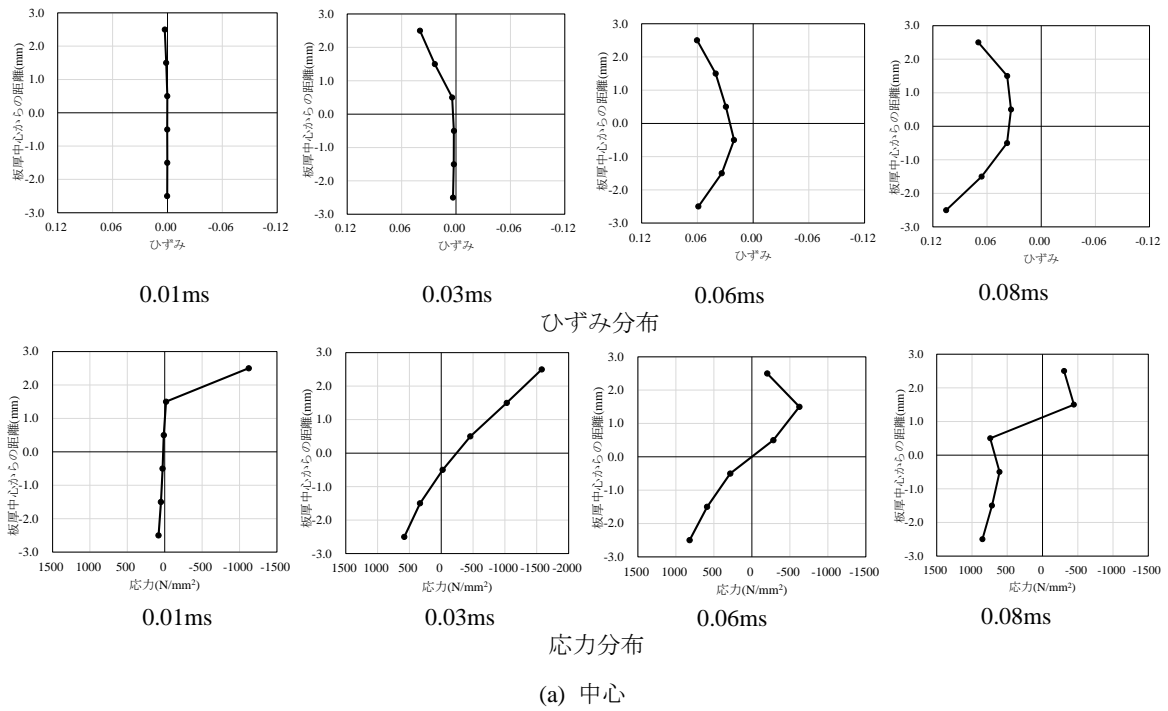


図-4.37 ひずみおよび応力分布の時間変化
(円錐状飛翔体, 板厚 6mm, 衝突速度 59.9m/s)

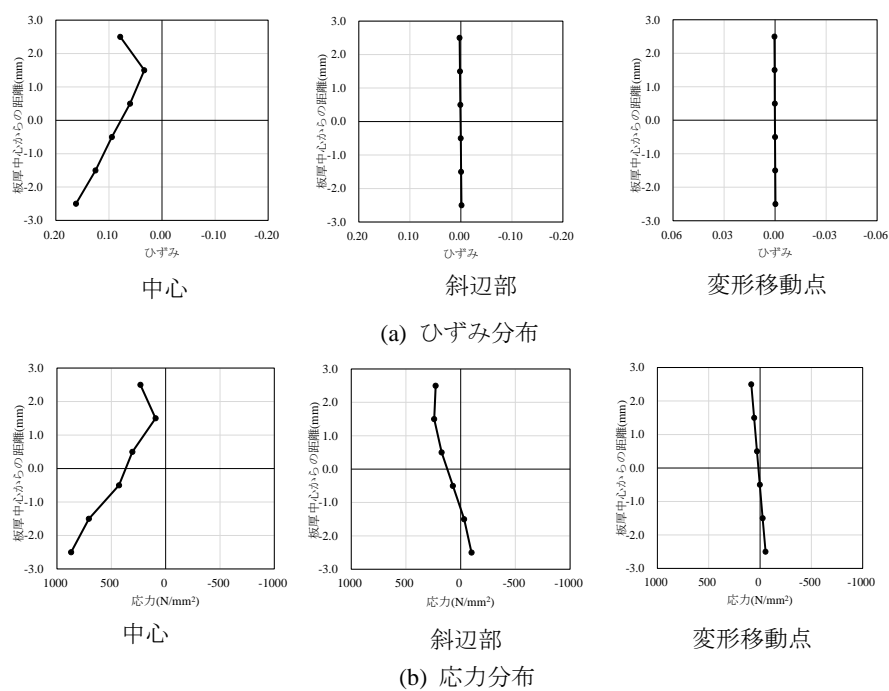


図-4.38 特徴的な変形部断面のひずみおよび応力分布
(円錐状飛翔体, 板厚 6mm, 衝突速度 59.9m/s, 時刻 0.3 ms)

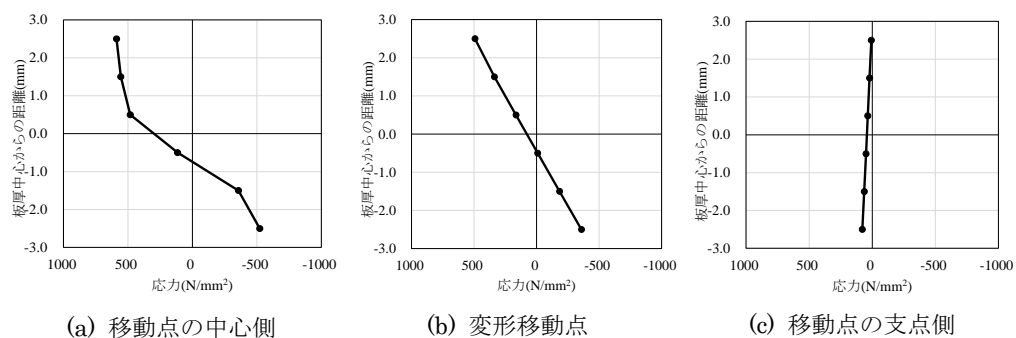


図-4.39 変形移動点周辺の応力分布

(円錐状飛翔体, 板厚 6mm, 衝突速度 59.9m/s, 時刻 0.1 ms)

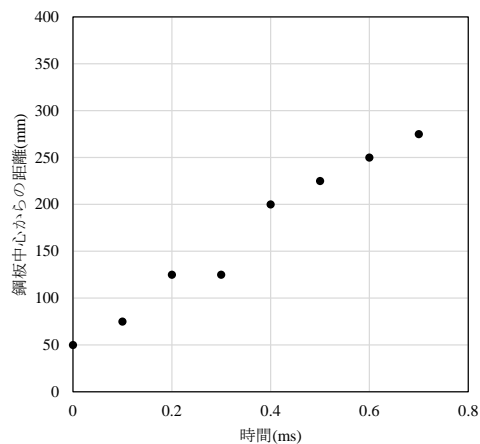


図-4.40 変形移動点の位置～時間関係

(円錐状飛翔体, 板厚 6mm, 衝突速度 59.9m/s)

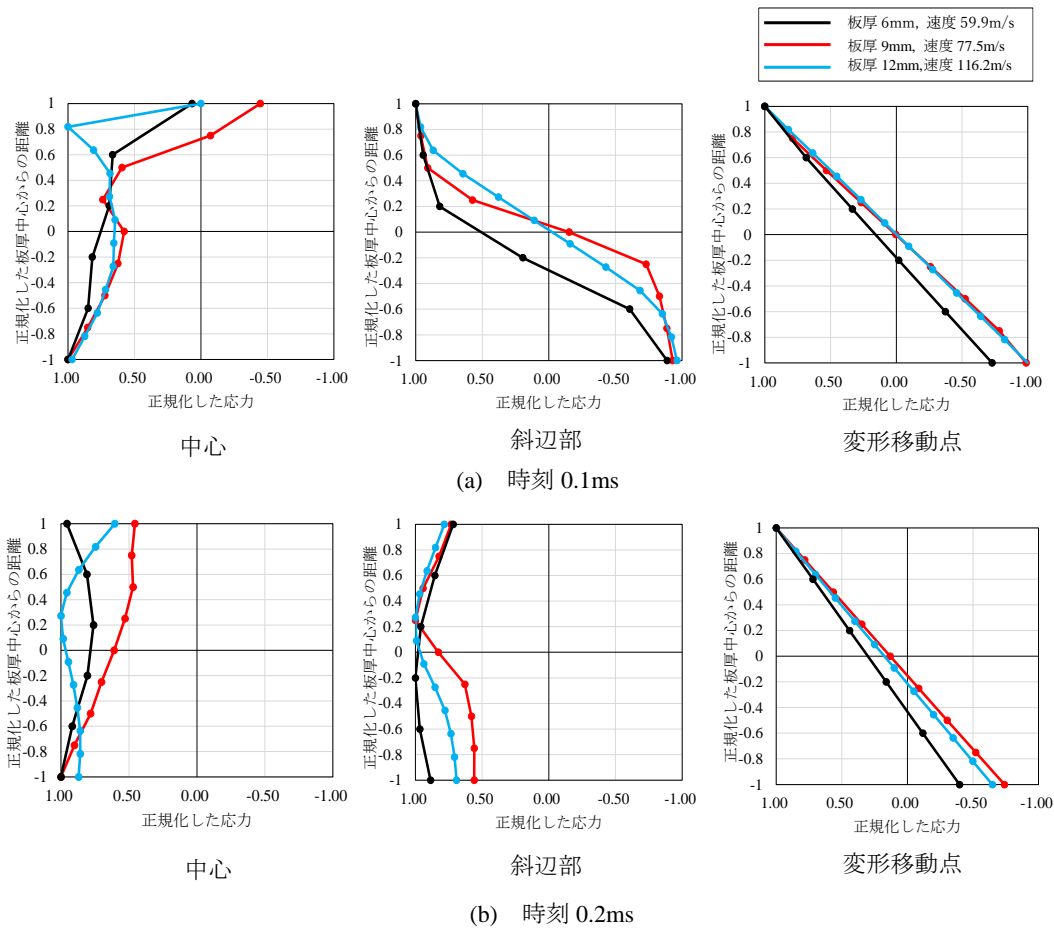


図-4.41 正規化した応力分布の比較（円錐状飛翔体）

4.3 結言

本章は、各飛翔体の先端形状および板厚に対して貫通したケースおよび非貫通のケースに対する数値解析シミュレーションから、実験結果の再現性について検討を行うとともに、貫通破壊メカニズムに関する考察を行った。本章の結論を以下に要約する。

- (1) 2次元軸対称モデルを用いて、SS400 鋼板の材料モデルにひずみ速度依存性を考慮した Johnson-Cook の降伏基準および損傷を考慮した Johnson-Cook の破壊基準を用いることで実験結果を概ね再現した。
- (2) 鋼板の破壊発生部は高応力三軸度および高ひずみ速度状態となっており、その影響で破断ひずみが低下していることがわかった。
- (3) 平坦状飛翔体の場合では、飛翔体と鋼板は面接触の状態で衝突した後、鋼板の衝突部分は飛翔体先端部と離れる。その後、鋼板には飛翔体先端部の外縁のみが接触しており、力は点で作用して変形が進展する。点接触の領域には曲げ変形が生じ、時間の経過に伴って鋼板の裏面側に局所的に損傷が集中して破壊が生じた。半球状飛翔体の場合では、飛翔体と鋼板は点接触で衝突するが、徐々に接触部が拡大する。しかし、その後、鋼板の衝突部分とその周囲は飛翔体先端部と離れる。この間、鋼板と飛翔体の先端部は点接触のような形態で鋼板の変形が進展し、その後は飛翔体と鋼板が一体となって運動する。鋼板には飛翔体先端部の曲率に合わせて曲げおよび引張変形が生じ、衝突初期に飛翔体先端部と鋼板が点接触した近傍に損傷が局所的に蓄積して破壊が生じた。円錐状飛翔体の場合では、飛翔体と鋼板は点接触で衝突するが、飛翔体の変形とともに接触部が拡大する。その後、飛翔体と鋼板は一体となって運動し、接触している領域には曲げおよび引張変形が生じて変形が進展する。最終的には、鋼板の裏面中心に局所的に損傷が蓄積して破壊が生じた。
- (4) 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。
- (5) 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。

第5章 飛来物衝突を受ける鋼板の貫通評価法の提案

5.1 序言

本章では、実験および数値解析の結果から得られた貫通破壊メカニズムに基づいて鋼板の貫通を評価するモデルを提案した。これまでの検討において明らかになった事項は次の内容である。

- (1) 先端形状の違いによって鋼板に生じる破壊性状が異なることがわかった。鋼板の破壊発生位置は、平坦状飛翔体の場合では鋼板と飛翔体先端部の外縁が接触した位置、半球状飛翔体の場合では飛翔体先端部の半径の36%~58%の位置、円錐状飛翔体の場合では衝突部の鋼板中心付近であった。
- (2) いずれの先端形状においても、鋼板に貫通が生じるまでの変形は中心部に局所的な変形が生じるとともに、変形範囲が支点に向かって進展した。また、中心部と変形領域の端部との間には伸び変形が生じていることがわかった。
- (3) 変形の特徴点について断面の応力およびひずみ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、変位分布の特徴点については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。

これらの特徴に基づいて、飛翔体の各先端形状に対する鋼板の変形モデルを提案するとともに、鋼板の変形角を破壊判定の指標とした貫通評価を行った。

5.2 貫通評価法の概要

実験および数値解析結果から得られた鋼板の貫通破壊メカニズムに基づいて、各先端形状における簡易的な変形モデルを提案する。すなわち、先端が平坦および半球状のケースでは局所変形端部および変形移動点に、先端が円錐状のケースでは鋼板中心および変形移動点に塑性ヒンジが形成され、これらの塑性ヒンジの間には全断面降伏を仮定して軸方向の伸び変形が生じるメカニズムを仮定した。

基本的な考え方としては、飛翔体の運動エネルギーが全て鋼板の変形で吸収されると仮定する。鋼板の変形による吸収エネルギー E_a は、塑性ヒンジによる吸収エネルギー E_h と軸方向の変形による吸収エネルギー E_n の和と仮定し、それぞれの吸収エネルギーについて算出する。これらの吸収エネルギーの増分の和が飛翔体の運動エネルギーの低下量と等価であることを仮定して飛翔体の速度を更新し、運動エネルギーがゼロになるまで時々刻々応答計算を行う。

貫通評価の手順を図-5.1に示す。

- (1) 各先端形状の変形モデルを用い、衝突の初期条件として飛翔体の質量、衝突速度、鋼板の板厚、降伏応力および塑性ヒンジの移動速度を入力して、鋼板の変形を時々刻々計算する。
- (2) 応答計算結果で得られた鋼板の変形状態から、変形角を求める。
- (3) 限界変形角を算定し、変形角と比較することにより、貫通を判定する。

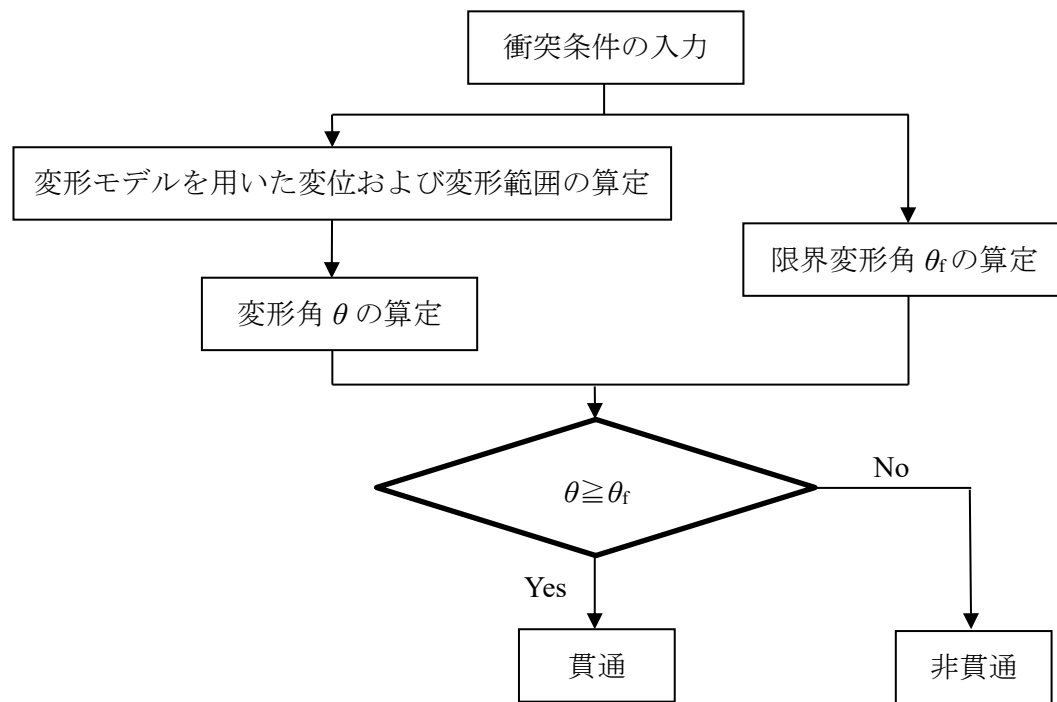


図-5.1 貫通評価の判定手順

5.3 変形モデルによる応答計算と限界変形角の算出

5.3.1 変形モデルによる応答計算

図-5.2 に、各先端形状における鋼板の変形のモデルを示す。解析結果から、図-5.2(a)に示す平坦状飛翔体を用いたケースでは、局所変形端部および変形移動点に塑性ヒンジが形成され、これらの塑性ヒンジの間には軸方向の伸び変形が生じるメカニズムを仮定した。次に、図-5.2(b)に示す半球状飛翔体を用いたケースでは、局所変形端部および変形移動点に塑性ヒンジが形成され、これらの塑性ヒンジの間には、軸方向の伸び変形が生じるメカニズムを仮定した。図-5.2(c)に示す円錐状飛翔体を用いたケースでは、鋼板中心および変形移動点に塑性ヒンジが形成され、これらの塑性ヒンジの間には、軸方向の伸び変形が生じるメカニズムを仮定した。

平坦状飛翔体の変形モデルを一例に、鋼板の応答計算の流れについて述べる。図-5.3 に、鋼板の変形モデルを用いた応答計算の概念図を示す。図に示すように、衝突部近傍の局所変形端部に生じる塑性ヒンジは、飛翔体の衝突方向に速度 V_u で移動し、変形移動点の生じる塑性ヒンジは、端部方向に速度 V_r で移動する。先述したように、飛翔体の運動エネルギーが全て鋼板の変形で吸収されると仮定する。鋼板の変形による吸収エネルギー E_a は、塑性ヒンジによる吸収エネルギー E_h と軸方向の変形による吸収エネルギー E_n の和と仮定し、それぞれの吸収エネルギーについて算出する。図-5.4 に、各吸収エネルギー算出の模式図を示す。図-5.4(a)に示す塑性ヒンジ形成による吸収エネルギーの模式図から、塑性ヒンジ形成による吸収エネルギーは、単位長さ当たりの塑性モーメント M_p 、変位角 θ および円周状に生じる塑性ヒンジの周長 R を用いて $E_h = M_p \theta R$ で求める。なお、鋼板の板厚を t とすると、平板の単位長さ当たりの塑性モーメント M_p は $M_p = \sigma_y t^2 / 4$ で与えられる。変位角 θ と変位 u との関係は、 $\theta = u / (a - b)$ で与えられる。具体的には、図に示す外側および内側の塑性ヒンジが発生する領域の周長を R_0 および R_1 とすると、中心からの長さがそれぞれ a および b であるため、 $R_0 = 2\pi a$ および $R_1 = 2\pi b$ となる。以上から、塑性ヒンジによる吸収エネルギー E_h を $E_h = M_p \theta R_0 + M_p \theta R_1$ で算出することができる。

図-5.4(b)に、軸方向の変形による吸収エネルギーの模式図を示す。図に示すように、黄色部分の変形を平板の軸方向の変形に変換してエネルギーを算出した。全断面降伏および近似的に断面積が一定であると仮定した。断面には降伏応力 σ_y が生じるので、断面積 S を $S = t(R_0 + R_1) / 2$ と近似すると、軸の軸力は $N = \sigma_y S = \sigma_y t(R_0 + R_1) / 2$ で算出される。また、軸方向の変形量 l は変位 u と変形部の元の長さ $(a - b)$ の関係から、 $l = \sqrt{(a - b)^2 + u^2}$ で求め、軸方向の伸び量 Δl は、 $\Delta l = l - (a - b)$ で求められる。以上から、軸方向の変形による吸収エネルギー E_n は、軸力 N と伸び量 Δl から、 $E_n = N \Delta l$ で算出することができる。

ここで、ステップ i における鋼板の吸収エネルギー増分 ΔE_{ai} は、

$$\Delta E_{ai} = \Delta E_{ni} + \Delta E_{hi} \quad (5.1)$$

で算定される。また、飛翔体の速度低下によるエネルギー ΔE_{Ki} は、

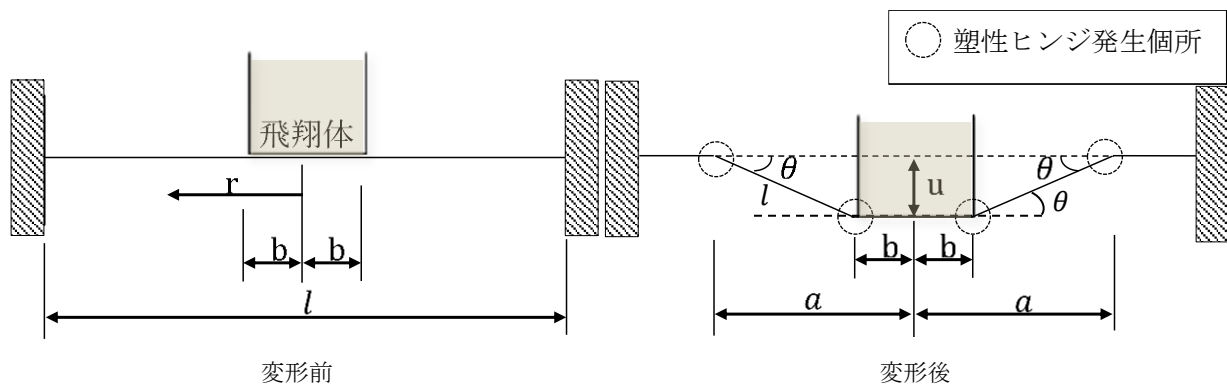
$$\Delta E_{Ki} = 0.5 M (V_{u+i}^2 - V_{ui}^2) \quad (5.2)$$

で算定される．式(5.1)および式(5.2)が等しいと仮定すると，ステップ $i+1$ における速度 V_{i+1} は以下の式で算定される．

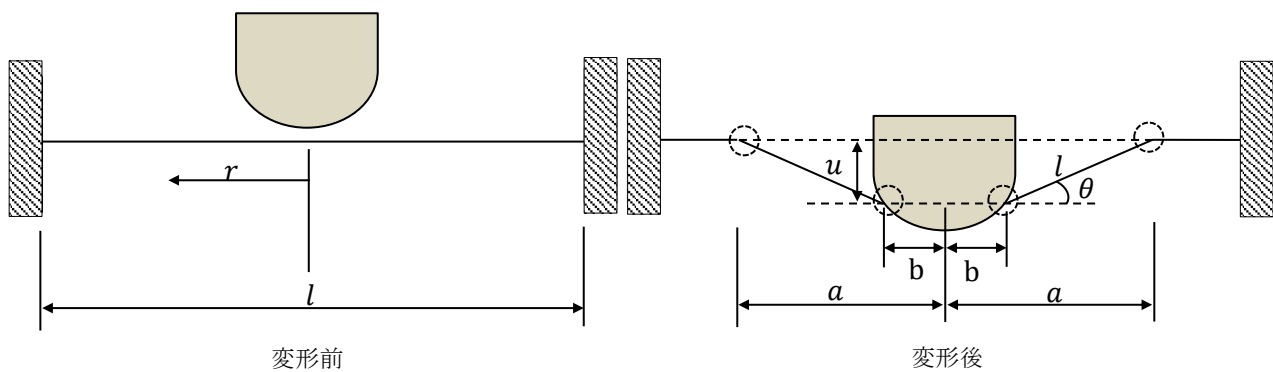
$$V_{i+1} = \sqrt{V_i^2 + \frac{2}{M}(\Delta E_{ni} + \Delta E_{hi})} \quad (5.3)$$

また，変形移動点の生じる塑性ヒンジの移動速度 V_r は，数値解析結果から得られた各ケースにおける塑性ヒンジの移動速度を用いた．以上の算出方法で速度を更新し，時々刻々応答計算を行った．

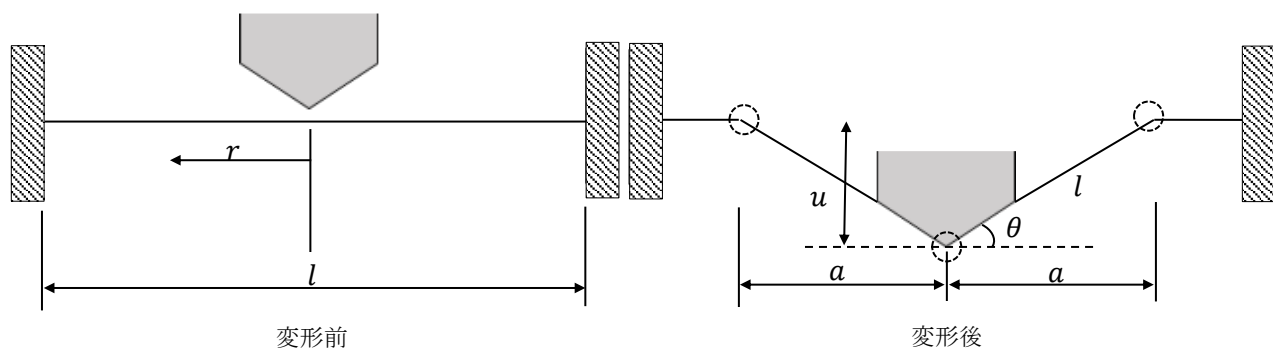
上記の計算を行うと，各塑性ヒンジの位置および変形角 θ を求めることができる．求めた変形角と後述する限界変形角を比較することで，貫通の発生を評価した．



(a) 平坦状飛行体



(b) 半球状飛行体



(c) 円錐状飛行体

図-5.2 鋼板の変形モデル

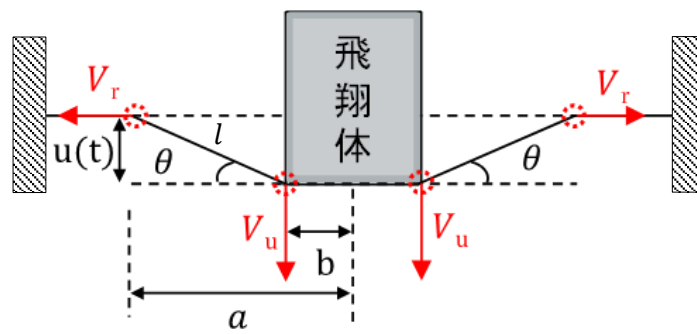
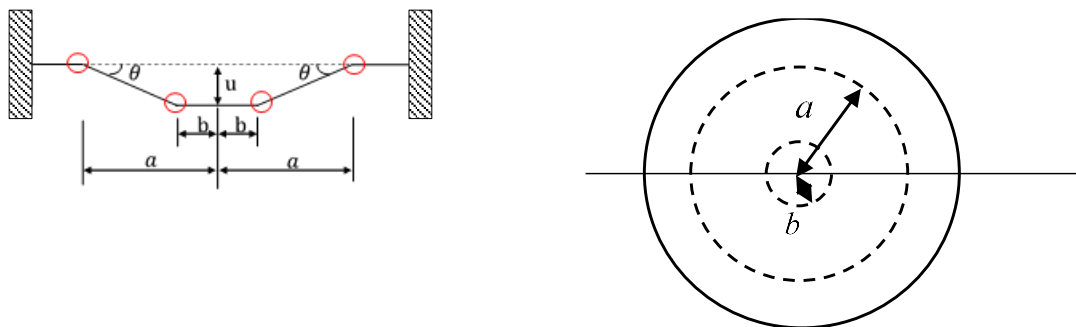
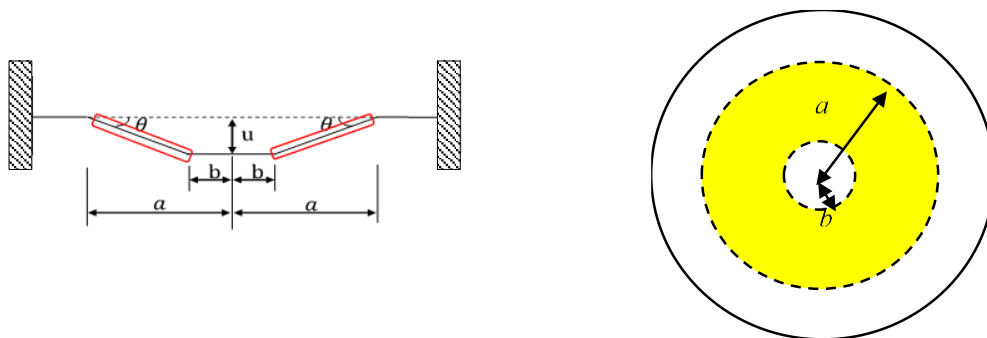


図-5.3 鋼板の変形モデルを用いた応答計算の概念図



(a) 塑性ヒンジの形成による吸収エネルギーの模式図



(b) 軸方向の変形による吸収エネルギーの模式図

図-5.4 各吸収エネルギー算出の模式図

5.3.2 限界変形角の算定

貫通の発生を変形角で評価するために、修正 BRL 式¹⁾を用いて各板厚における貫通限界エネルギー E_f を算出し、応答計算における鋼板の吸収エネルギー E_a の積分値が貫通限界エネルギー E_f に達した時の変形角を限界変形角 θ_f として評価を行った。貫通限界エネルギー E_f は、修正 BRL 式を次のように変換して求めた。

$$T^{3/2} = 0.5MV^2 / (1.4396 \times 10^9 K^2 (\alpha D)^{3/2}) \quad (5.4)$$

右辺の $0.5MV^2$ は飛翔体の運動エネルギーを表すため、これを E_f と置換して式変換すると次式を得ることができる。

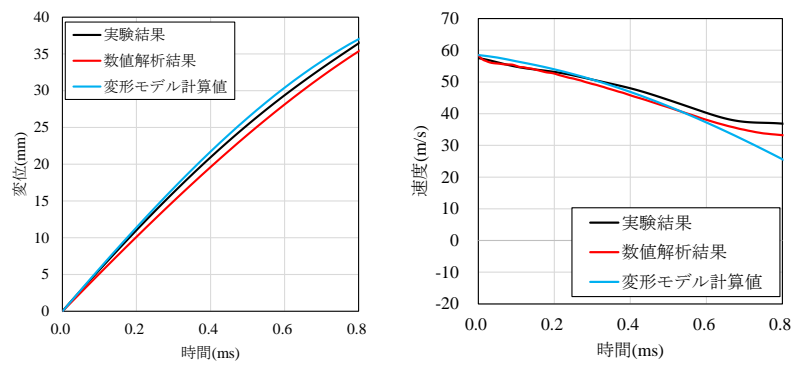
$$E_f = (1.4396 \times 10^9 K^2 (\alpha D)^{3/2}) T^{3/2} \quad (5.5)$$

ここに、 E_f ：貫通限界エネルギー(J)， K ：鋼板の材質に関する係数($\cong 1$)， α ：先端形状係数， D ：飛来物の直径 (m)， T ：鋼板の板厚(m)である。

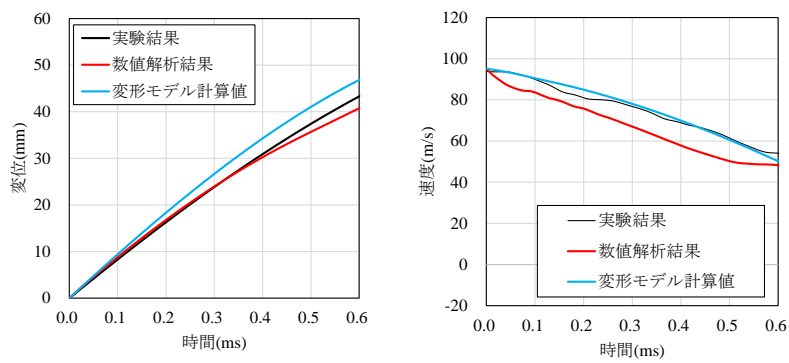
一例として、平坦状飛翔体の板厚 6mm のケースでは貫通限界エネルギーが 7480.4J となり、前節で示した手順で求めた鋼板の吸収エネルギーがこの貫通限界エネルギーに達した時刻における変形角を限界変形角として求めると、限界変形角 θ_f は 0.156 である。

5.4 貫通評価モデルの妥当性に関する検討

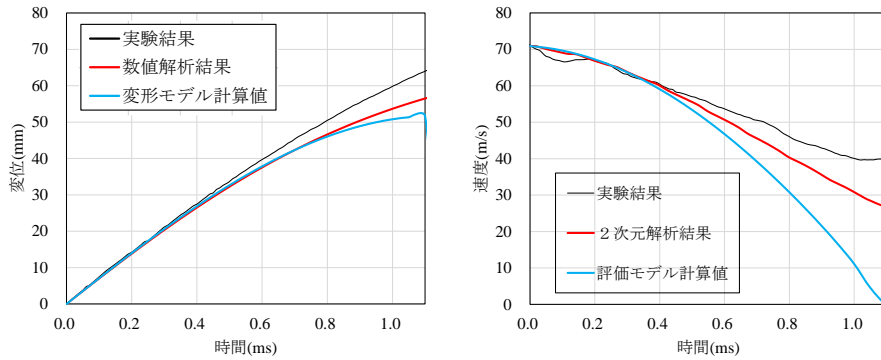
図-5.5 に、変位および速度－時間関係の比較結果を示す。図-5.5 (a)に示す平坦状飛翔体の板厚 6mm，58.5m/s のケースでは、評価モデルによる計算値は実験および数値解析結果と概ね一致した。図-5.5(b)に示す平坦状飛翔体の板厚 12mm，95.1m/s のケースにおいては、評価モデルによる計算値は実験結果および数値解析結果よりも時間の経過に伴って値が大きくなる結果となった。図-5.5(c)に示す半球状飛翔体の板厚 6mm，70.9m/s のケースでは、衝突後時刻 0.4ms までの挙動については、評価モデルによる計算値は実験および数値解析結果と概ね一致したが、鋼板に貫通が生じる時刻 1.1ms における飛翔体の残留速度は評価モデルの計算値で 0m/s となり、実験および数値解析結果の残留速度 40m/s および 26m/s とは異なる結果となった。図-5.5(d)に示す円錐状飛翔体の板厚 6mm，115.5m/s のケースでは、鋼板に貫通が生じる時刻 0.6ms までの変位および速度の挙動は、評価モデルによる計算値は実験および数値解析結果と概ね一致した。



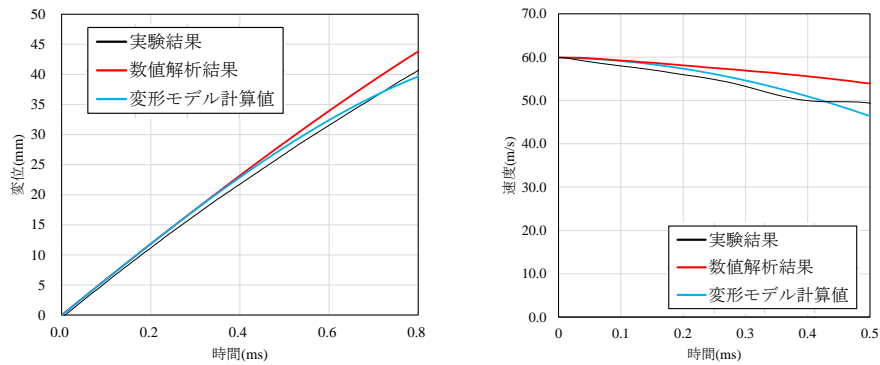
(a) 平坦, 板厚 6mm, 58.5m/s



(b) 平坦, 板厚 12mm, 95.1m/s



(c) 半球, 板厚 6mm, 70.9m/s



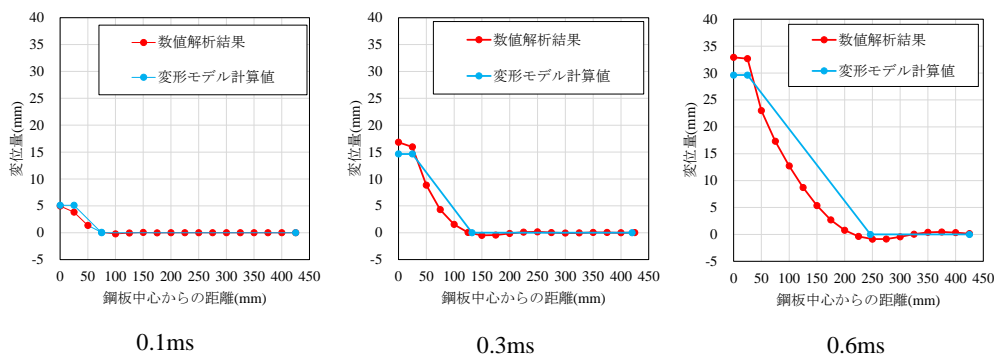
(d) 円錐, 板厚 6mm, 115.5m/s

図-5.5 変位－時間関係および速度－時間関係の比較

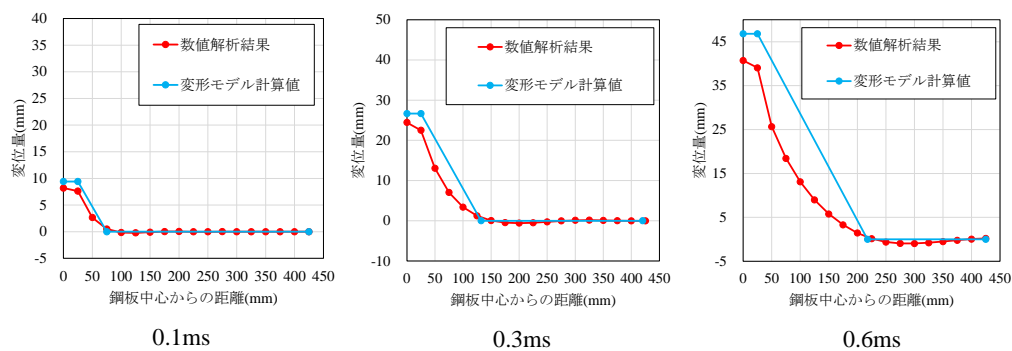
図-5.6 に、変位分布の比較結果を示す。図-5.6 (a)に示す板厚 6mm のケースでは、評価モデルは数値解析結果よりもやや小さな値を示した。一方で、図-5.6(b)に示す板厚 12mm のケースでは中心部の変位が数値解析結果よりも約 6mm 大きくなった。図-5.6(c)に示す半球状飛翔体の板厚 6mm, 70.9m/s のケースについては、中心の変位は衝突後時刻 0.3ms までは概ね一致した。その後、数値解析において鋼板に亀裂が生じる時刻 0.6ms においては、評価モデルによる計算値は数値解析結果よりも約 5mm 小さな結果となった。図-5.6(d)に示す円錐状飛翔体の板厚 6mm, 115.5m/s のケースでは、中心の変位をみると、衝突後 0.1ms 以降、数値解析結果よりも評価モデルによる計算値は常時大きな値で推移した。

図-5.7 に、変形の評価モデルから算出された変形角－時間関係を示す。また、図中には BRL 式から算出した限界変形角を合わせて示している。図から、いずれの先端形状においても板厚および衝突速度の増加に伴って算出される変形角が大きくなることがわかる。図-5.7(a)に示す平坦状飛翔体の場合は、板厚 6mm および 9mm において実験結果の貫通および非貫通の結果を適切に評価した。なお、板厚 12mm のケースでは、やや過大な評価を与える結果となった。図-5.7(b)に示す半球状飛翔体の場合では、実験および数値解析において非貫通および亀裂のケースに対しては、貫通評価モデルにおいて非貫通の評価となり、貫通のケースについては全て貫通の評価となった。図-5.7(c)に示す円錐状飛翔体の場合についても、半球状飛翔体の場合と同様に、実験および数値解析において非貫通および亀裂のケースに対しては、貫通評価モデルにおいて非貫通の評価となり、貫通のケースについては全て貫通の評価となった。

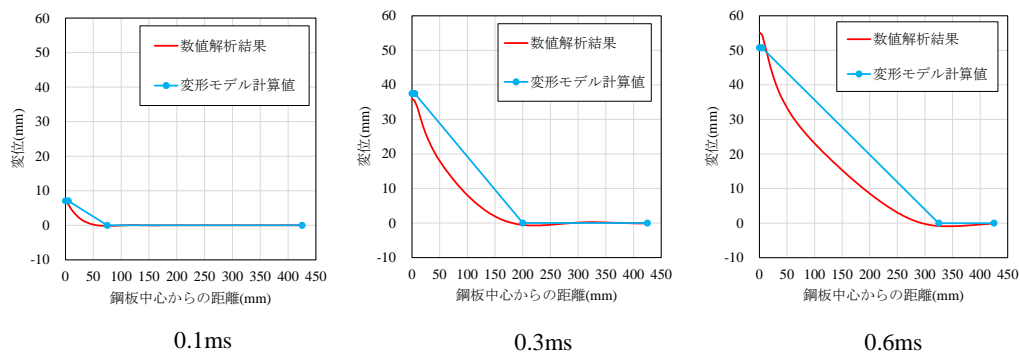
以上の貫通評価の結果を、図-5.8 に示す。本実験は BRL 式との適合性が高いため、本限界値によって実験を概ね再現したが、半球および円錐状飛翔体のケースにおいては、亀裂の発生は評価できておらず、この点は今後の課題である。今後は限界値の設定や安全性の余裕度について詳細に検討する必要がある。



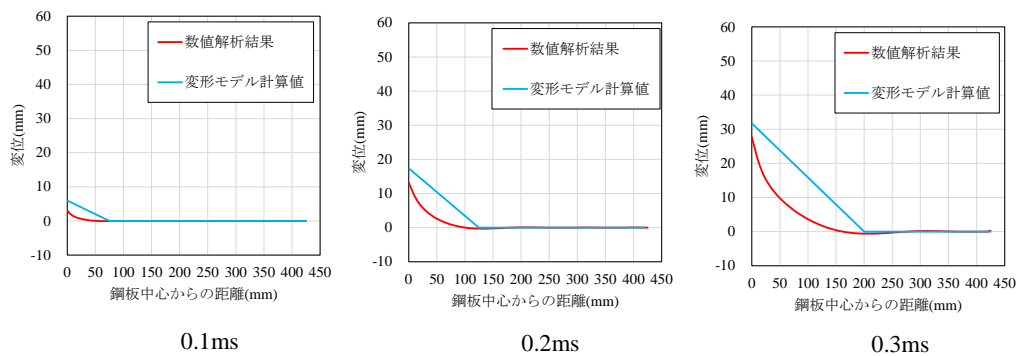
(a) 平坦状飛翔体, 板厚 6mm, 58.5m/s



(b) 平坦状飛翔体, 板厚 12mm, 95.1m/s

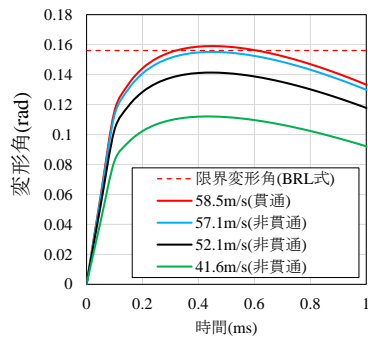


(c) 半球状飛翔体, 板厚 6mm, 70.9m/s

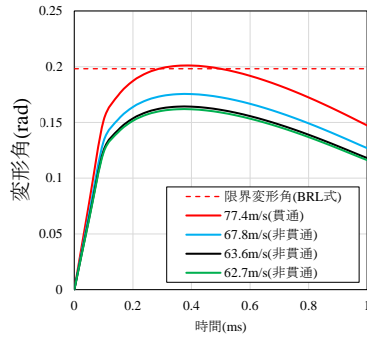


(d) 円錐状飛翔体, 板厚 6mm, 115.5m/s

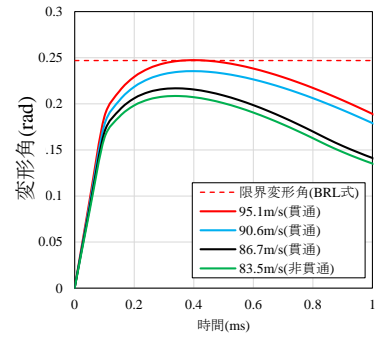
図-5.6 変位分布の比較



板厚 6mm

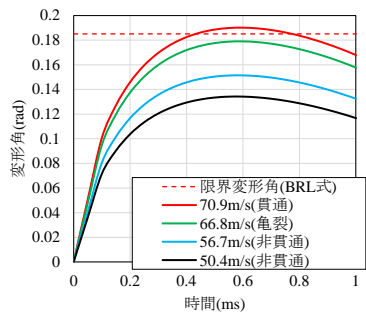


板厚 9mm

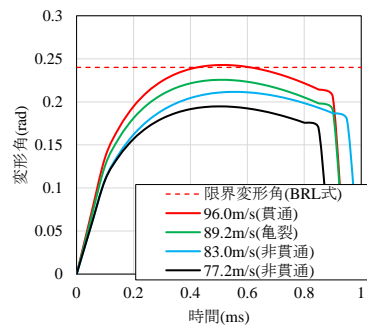


板厚 12mm

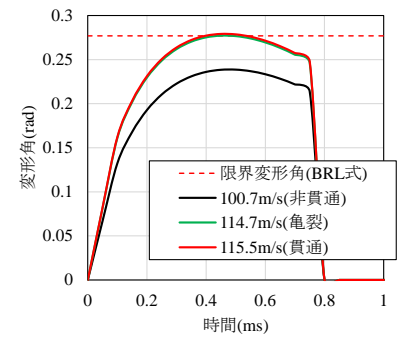
(a) 平坦状飛翔体



板厚 6mm

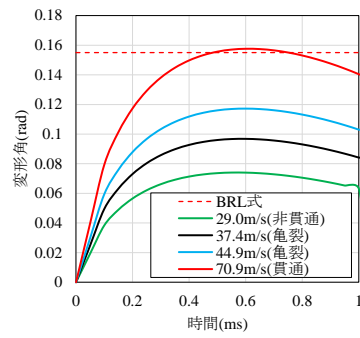


板厚 9mm

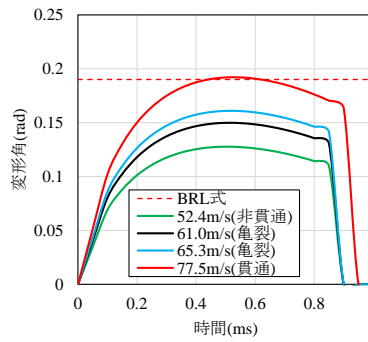


板厚 12mm

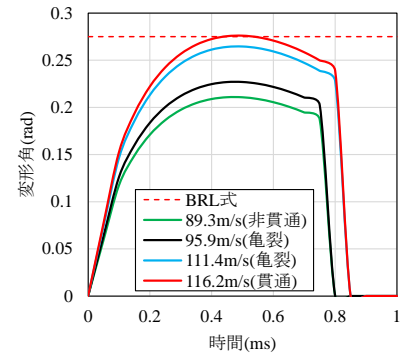
(b) 半球状飛翔体



板厚 6mm



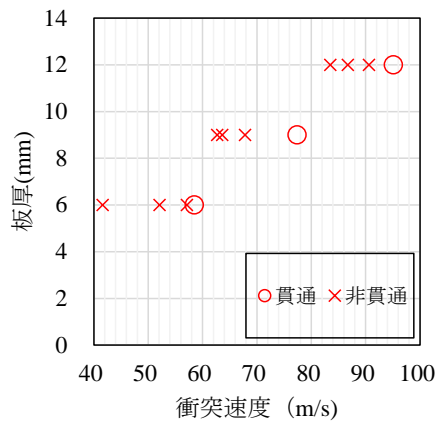
板厚 9mm



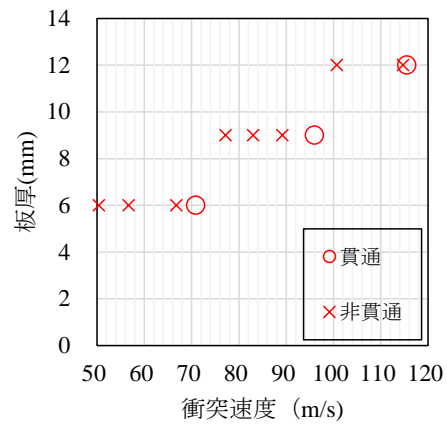
板厚 12mm

(c) 円錐状飛翔体

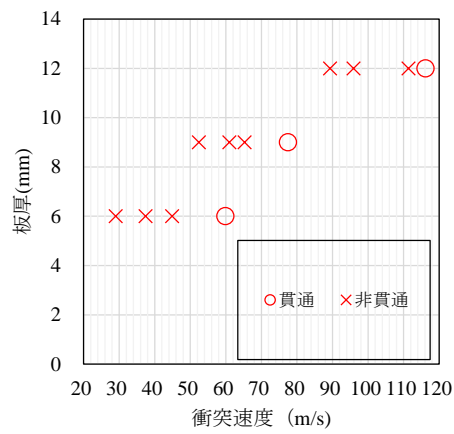
図-5.7 変形角－時間関係



(a) 平坦状飛翔体



(b) 半球状飛翔体



(c) 円錐状飛翔体

図-5.8 破壊性状の比較

5.5 結言

本章は、実験および数値解析の結果から得られた変形メカニズムに基づくエネルギー基準を用いて鋼板の貫通評価法を提案した。本研究の成果を以下に要約する。

- (1) 実験および数値解析結果から得られた鋼板の貫通破壊メカニズムに基づいて、各先端形状における簡易的な変形モデルを提案した。すなわち、先端が平坦および半球状のケースでは局所変形端部および変形移動点に、先端が円錐状のケースでは鋼板中心および変形移動点に塑性ヒンジが形成され、これらの塑性ヒンジの間には全断面降伏を仮定して軸方向の伸び変形が生じるメカニズムを仮定した。また、飛翔体の運動エネルギーが塑性ヒンジの形成と軸方向の変形によるエネルギーによって吸収することを仮定した応答計算法を提案した。
- (2) 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。

第 6 章 結論

本研究では、竜巻などによる飛散物や火山噴火における噴石の衝突に対する防護構造物の設計法に関して、衝突速度約 30m/s～120m/s の飛翔体の衝突を受ける鋼板の耐貫通性能に関して、材料実験、衝突実験および数値解析により検討を行ったものである。本章では、本研究で得られた主要な成果および今後の課題を示す。

6.1 主要な成果および結論

6.1.1 第 1 章「序論」

本研究の背景、鋼板の耐衝撃性ならびに鋼材の力学特性や破断ひずみに及ぼすひずみ速度および応力三軸度に関する既往の研究を整理し、研究の目的および概要について述べた。

6.1.2 第 2 章「ひずみ速度が鋼材の動的力学特性および破断ひずみに及ぼす影響」

高ひずみ速度下および多軸応力状態における鋼材の材料特性を調べるため、サーボ制御式急速載荷装置を用いて、切欠き半径の異なる SS400 平板試験体に対し静的、ひずみ速度 10^{-5} /s (静的)、 10^{-2} /s および 10^0 /s における動的引張実験を行った。

- (1) 降伏応力の動的な増加率については、ひずみ速度 10^{-2} /s の試験で 19.7%～31.7%，ひずみ速度約 10^0 /s の試験で 56.6%～83.0%となり、ひずみ速度の増加に伴って降伏応力が大きく増大した。
- (2) 引張強度の動的な増加率については、ひずみ速度 10^{-2} /s の試験で -4.9%～5.8%，ひずみ速度約 10^0 /s の試験で 30.3%～64.8%であり、ひずみ速度 10^{-2} /s 付近では強度の変化は小さく、ひずみ速度 10^0 /s 付近では引張強度の大幅な増加が認められた。ただし、降伏応力の動的倍率と比べると小さな値であった。
- (3) 変形が局所化する試験体切欠き底部の DIC 分析により破断時のひずみを算定し、ひずみ速度および応力三軸度が破断ひずみに及ぼす影響について考察した。実験の結果、全てのひずみ速度において、応力三軸度の増加に伴う破断ひずみの低下が確認された。また、ひずみ速度が破断ひずみに及ぼす影響についてはある程度認められ、応力三軸度 0.97 のケースでは、ひずみ速度 10^{-5} /s および 10^0 /s の試験において破断ひずみに約 4%の差が生じた。

6.1.3 第 3 章「飛翔体衝突を受ける鋼板の貫通破壊挙動に関する実験的検討」

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ものである。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。さらに、既往の評価式である BRL 式を用いて、実験結果と整合するような修正式を提案した。

- (1) 衝突実験から、各先端形状に対する鋼板の貫通限界速度がわかった。また、いずれの先端形状の場合においても、鋼板の貫通破壊は支点反力が発生する前に生じる非常に局所的な応答であることがわかった。
- (2) 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。鋼板の破壊は、平坦状飛翔体の場合では鋼板と飛翔体先端部の外縁が接触した位置、半球状飛翔体の場合では飛翔体先端部の半径の 36%~58%の位置、円錐状飛翔体の場合では衝突部の中心付近に発生した。
- (3) 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。
- (4) 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） α を含む修正 BRL 式を提案した。先端形状係数 α 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ある程度的一致を示した。このことから、平坦状飛翔体の場合では $\alpha=1.0$ で実験結果と整合したことを考慮すると、半球状飛翔体による貫通は平坦状飛翔体の直径が 10%大きくなり、円錐状飛翔体による貫通は平坦状飛翔体の直径が 30%小さくなったことに相当すると考えられる。ただし、円錐状の板厚 12mm のケースでは、飛翔体先端部が圧潰し塑性変形が生じたことで適合性が低い結果となった。

6.1.4 第 4 章「飛翔体衝突を受ける鋼板の貫通破壊挙動に関する数値解析的検討」

第 3 章で行った衝突実験に対する数値解析シミュレーションを行い、鋼板の貫通メカニズムについて考察した。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。各飛翔体の先端形状および板厚に対して貫通したケースおよび非貫通のケースに対する数値解析シミュレーションから、実験結果の再現性について検討を行うとともに、貫通破壊メカニズムに関する考察を行った。

- (1) 2 次元軸対称モデルを用いて、SS400 鋼板の材料モデルにひずみ速度依存性を考慮した Johnson-Cook の降伏基準および損傷を考慮した Johnson-Cook の破壊基準を用いることで実験結果を概ね再現した。
- (2) 鋼板の破壊発生部は高応力三軸度および高ひずみ速度状態となっており、その影響で破断ひずみが低下していることがわかった。
- (3) 平坦状飛翔体の場合では、飛翔体と鋼板は面接触で衝突するが、鋼板の衝突部分は飛翔体先端部と離れる。その後、鋼板には飛翔体先端部の外縁のみが接触しており、力は点

で作用して変形が進展する。点接触の領域には曲げ変形が生じ、時間の経過に伴って鋼板の裏面側に局所的に損傷が集中して破壊が生じた。半球状飛翔体の場合では、飛翔体と鋼板は点接触で衝突するが、徐々に接触部が拡大した。しかし、その後、鋼板の衝突部分とその周囲は飛翔体先端部と離れた。この間、鋼板と飛翔体の先端部は点接触のような形態で鋼板の変形が進展し、その後は飛翔体と鋼板が一体となって運動した。鋼板には飛翔体先端部の曲率に合わせて曲げおよび引張変形が生じ、衝突初期に飛翔体先端部と鋼板が点接触した近傍に損傷が局所的に蓄積して破壊が生じた。円錐状飛翔体の場合では、飛翔体と鋼板は点接触で衝突するが、飛翔体の変形とともに接触部が拡大した。その後、飛翔体と鋼板は一体となって運動し、接触している領域には曲げおよび引張変形が生じて変形が進展した。最終的には、鋼板の裏面中心に局所的に損傷が蓄積して破壊が生じた。

- (4) 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。
- (5) 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。

6.1.5 第5章「飛来物衝突を受ける鋼板の貫通評価法の提案」

実験および数値解析の結果から得られた鋼板の貫通破壊メカニズムに基づいて鋼板の貫通を評価するモデルを提案した。

- (1) 実験および数値解析結果から得られた鋼板の貫通破壊メカニズムに基づいて、各先端形状における簡易的な変形モデルを提案した。すなわち、先端が平坦および半球状のケースでは局所変形端部および変形移動点に、先端が円錐状のケースでは鋼板中心および変形移動点に塑性ヒンジが形成され、これらの塑性ヒンジの間には全断面降伏を仮定して軸方向の伸び変形が生じるメカニズムを仮定した。また、飛翔体の運動エネルギーが塑性ヒンジの形成と軸方向の変形によるエネルギーによって吸収することを仮定した応答計算法を提案した。
- (2) 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。

6.2 今後の課題

今後の課題として、以下の2点を挙げる。

- (1) 2次元軸対称モデルを用いた数値解析では、半球および円錐状飛翔体の破壊性状を完全には再現できておらず、提案した力学モデルでは破壊部に生じた亀裂による吸収エネルギーを考慮できない。今後は、3次元モデルを用いた解析による検討が必要である。

- (2) 数値解析における鋼鈑の材料モデルについて検討する必要がある.
- (3) 半球状飛翔体の破壊発生位置および塑性ヒンジの移動速度の決定方法について検討が必要である.
- (4) 貫通評価における限界変形角の設定方法については, 検討する必要がある.

謝辞

本論文は、防衛大学校建設環境工学科 別府万寿博教授のご指導の下にまとめられたものです。別府先生には、研究の進め方や研究に対する姿勢、科学・論理的な考察を行うことの重要性についてだけではなく、社会人としての常識や礼儀作法に到るまで、終始懇切丁寧なご指導、ご鞭撻を賜りました。心より感謝申し上げます。失敗ばかりの5年間で本当に多くのご迷惑、ご苦勞をおかけしましたが、これまでの反省や先生から頂いたご指導を心に刻み、自衛隊の発展や社会に貢献できる人材になれるよう、今後も精進いたします。

防衛大学校システム工学群 藤掛一典教授、同 黒田一郎教授、同 市野宏嘉准教授には本研究をまとめるにあたり、懇切丁寧なご指導、ご鞭撻を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。室蘭工業大学大学院工学研究科 もの創造系領域 小室 雅人教授には、本研究をまとめる上で貴重なご意見、ご指導を頂きました。ご多忙にもかかわらず審査委員を引き受けて頂きました先生方に、心から御礼申し上げます。

山梨大学大学院総合研究部 工学域 岡澤重信教授、大阪大学接合科学研究所 堤成一郎准教授には、本研究を進めるにあたり、多大なご意見、ご教示を頂くとともに、暖かい励ましのお言葉を頂きました。深く感謝いたします。

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 伊東雅晴氏、松澤遼氏、末木未来氏には数値解析に関する多くのご助言を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

防衛大学校理工学研究科後期課程第15期 上野裕稔氏、同16期 永田真氏、同17期 片岡新之介氏、には、研究、実験支援をはじめ、公私共に温かいご助言を頂きました。同前期課程第55期 岩根利浩氏、同56期 長谷川大氏、同58期 清田翔吾氏、同59期 山内稔也氏、同59期 森広毅氏には、実験の準備・実施についてご協力頂きました。心から感謝申し上げます。

防衛大学校本科 62期 杉山佳那恵氏、峯好古氏、同63期 山口啓氏、山崎大輔氏、増本正二郎氏、寺澤拓真氏、同64期 森山源太氏、三浦賢卓氏、渡邊駿介氏、坂井知士氏、同65期 郷原将哉氏、藤田蓮氏、氷見爽氏、ペン・ダラボポール氏、同66期 内山拓也氏、清水祐里氏、飯田和満氏、アピシット・イェンサイ氏には実験の実施・準備等にご協力頂きました。心から感謝申し上げます。

本研究の機会を与えてくださいました航空自衛隊、特に航空幕僚監部防衛部前施設課長平井勇一郎1佐および現施設課長山崎浩二1佐を始め、研究科の先輩である重久1佐および原木1佐、施設課の方々には、理工学研究科への門戸を開いて頂いた上に、期間中様々な面でご指導、ご支援をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

防衛大学校建設環境工学科 高橋峰雄氏、同システム工学群機械実習工場の皆様には、試験体や実験器具の作成にあたり多大なるご支援を頂きました。心から感謝申し上げます。

末筆ながら、5年間の研究を様々な面から支えて頂きました建設環境工学科の皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献

第 1 章

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，2000.
- 2) 土木学会：ロックシェットの耐衝撃設計，1999.
- 3) 土木学会：防災・安全対策技術者のための衝撃作用を受ける土木構造物の性能設計，2013.
- 4) R. P. Kennedy：A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects, nuclear engineering and design 37, 1976.
- 5) 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 13061911 号，2013.
- 6) 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.
- 7) 内閣府（防災担当）：活火山における退避壕等の充実に向けた手引き，2015.
- 8) 九州電力株式会社：川内原子力発電所 1 号炉および 2 号炉竜巻影響評価について，川内原子力発電所 1 号，2 号炉審査資料，SA-024 改 5，2013.
- 9) 小野徹郎，上之郷貴重，吉田文久，岩田衛，林賢一：金属系素材の素材特性および履歴挙動に関する研究，日本建築学会構造系論文集第 498 号，pp.137-143，1997.
- 10) 大塚昭夫，宮田隆司，西村誠二，木村雅保，馬淵宗人：低強度鋼における延性破壊の発生に及ぼす応力三軸度の影響，材料，第 29 巻，第 322 号，pp.717-723，1980.
- 11) 睦好宏史，町田篤彦：動的外力を受ける鉄筋コンクリート部材の力学特性に関する研究，土木学会論文集，第 354 号，pp.81-90，1985.
- 12) 岩井哲，吉田望，中村武，若林實：構造部材の挙動に及ぼす載荷速度の影響に関する実験的研究（その 1 コンクリートと鋼材の応力-歪関係に及ぼす歪速度の影響），日本建築学会論文報告集，第 314 号，pp.102-111，1982.
- 13) 金多潔，甲津功夫，藤村和男，篠原祥，木上貴夫：高速載荷時の鋼構造接合部の力学的挙動に関する実験的研究（その 1 鋼素材，突き合わせ溶接接合部，高力ボルト摩擦接合部の載荷実験），日本建築学会論文報告集，第 359 号，pp.84-92，1986.
- 14) 野島武敏：高ひずみ速度下における炭素鋼の下降伏応力のひずみ速度依存性，材料，第 35 巻，第 397 号，pp.1118-1124，1985.
- 15) 高橋芳彦：高速載荷試験における鉄筋コンクリートはりおよび鋼板・コンクリート合成はりの耐衝撃性評価に関する基礎的研究，九州大学博士論文，1990.
- 16) 見波進，山崎真司：鋼材の応力-ひずみ関係に及ぼす温度・歪速度の影響，構造工学論文集 Vol.45B，pp.391-396，1999.
- 17) 伊藤義人，劉斌，宇佐見康一，草間竜一，貝沼重信：車両衝突を受ける橋梁要構成防護柵の材料ひずみ速度効果と性能照査に関する研究，土木学会論文集 No.759，pp.337-353，2004.

- 18) 伊藤義人, 伊藤誠慈, 北根安雄, 高堂治: 景観性に配慮した橋梁用防護柵の衝突性能に関する実験的・数値解析的研究, 土木学会論文集 A1, Vol.68, No.2, pp.413-426, 2012.
- 19) 土木学会: 防災・安全対策技術者のための衝撃作用を受ける土木構造物の性能設計—基準体制の指針—, 2013.
- 20) 嶋丈示, 松澤遼, 山口聖勝, 武田一平, 石川信隆, 水山高久: 礫衝突を受ける鋼製透過型砂防堰堤の現行設計法の問題点と衝撃解析, 砂防学会誌, Vol.70, pp.54-59, 2017.
- 21) 吉田博, 梶谷浩, 藤井智弘, 前川幸次: 鋼製落石防護柵の落石による衝撃特性, 土木学会論文集, 第 409 号, pp.75-84, 1989.
- 22) 南波宏介, 白井孝治, 三枝利有, 島村和夫: 航空機衝突時の衝撃荷重を受ける金属キャスクの密封性能に関する数値解析的評価, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1376-1387, 2009.
- 23) 高橋尚志, 黒部明, 浅田和雄: 高速衝撃下での金属材料の破壊現象に関する数値シミュレーション, 圧力技術, 第 30 巻, pp.190-199, 1992.
- 24) Z. Rosenberg, E. Dekel: Terminal Ballistics, 2016.
- 25) S. Hiermaier: Structures under Crash and Impact, 2008.
- 26) 坂本裕子, 白井孝治, 宇田川敏子, 近藤俊介: 竜巻飛来物を模擬した重錘の鋼板上への自由落下衝突試験による鋼板貫通評価手法の提案, 電力中央研究所研究報告, N15004, 2015.
- 27) 南波宏介, 白井孝治, 坂本裕子: 竜巻飛来物の衝突を受ける鋼板の耐貫通性能に関する数値解析的研究, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.1163-1176, 2017.
- 28) 土田恭平, 小笠原義浩, 別府万寿博, 和内博樹, 松浦敦, 間瀬辰也, 荻原実: 鋼製飛来物に対する鋼板の貫通評価に関する研究 (その 1) 衝突実験による BRL 式の検証, 日本建築学会学術講演梗概集, 2015.
- 29) 別府万寿博, 小笠原義浩, 土田恭平, 和内博樹, 松浦敦, 間瀬辰也, 荻原実: 鋼製飛来物に対する鋼板の貫通評価に関する研究 (その 2) 飛来物として丸鋼を用いた衝突実験結果, 日本建築学会学術講演梗概集, 2015.
- 30) 荻原実, 小笠原義浩, 土田恭平, 別府万寿博, 和内博樹, 松浦敦, 間瀬辰也: 鋼製飛来物に対する鋼板の貫通評価に関する研究 (その 3) 飛来物として角型鋼管を用いた衝突実験結果, 日本建築学会学術講演梗概集, 2015.
- 31) 松浦敦, 小笠原義浩, 土田恭平, 別府万寿博, 和内博樹, 間瀬辰也: 鋼製飛来物に対する鋼板の貫通評価に関する研究 (その 4) 衝突実験の再現解析, 日本建築学会学術講演梗概集, 2015.
- 32) 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, Vol.83, No.851, p.16-00501, 2017.
- 33) 防衛施設学会: 衝突作用を受ける構造物の局部破壊に関する評価ガイドライン, 2018.

- 34) 大手敏, 吉沢弘泰, 千葉矩正, 志田茂: 飛来物体に対する鋼板の耐衝撃性(第 2 報)鋼板の破壊限界エネルギー評価式, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.47, No.424, pp.1373-1379, 1981.

第 2 章

- 1) 大塚昭夫, 宮田隆司, 西村誠二, 木村雅保, 馬淵宗人: 低強度鋼における延性破壊の発生に及ぼす応力三軸度の影響, 材料, 第 29 巻, pp.717-723, 1980.
- 2) 北村拓也: 構造用鋼材の延性破壊および低サイクル疲労特性に対する応力三軸度および Lode 角依存性評価, 大阪大学大学院工学研究科修士論文, 2018.
- 3) Millan, M. R., Gonzalez, D. G., Rusinek, A. and Arias, A.: Influence of stress state on the mechanical impact and deformation behaviors of aluminum alloys, *Metals*, Vol.8, No.520, 2018.
- 4) Hancock, J. W. and Mackenzie, A. C.: On the mechanisms of ductile failure in high-strength steels subjected to multi-axial stress-states, *J. Mech, Phys, Solids*, Vol.24, 1976.
- 5) Mohr, D. and Henn, S.: Calibration of stress-triaxiality dependent crack formation criteria: A new experimental-numerical method, *Experimental Mechanics*, Vol.47, 2007.
- 6) 高橋芳彦: 高速載荷試験における鉄筋コンクリートはりおよび鋼板・コンクリート合成はりの耐衝撃性評価に関する基礎的研究, 九州大学博士論文, 1990.
- 7) 崎野清憲: 広いひずみ速度領域における鉄の変形応力のひずみ速度依存性, 実験力学, Vol.2, No.3, pp.177-182, 2002.
- 8) 野島武敏: 高ひずみ速度下における炭素鋼の下降伏応力のひずみ速度依存性, 材料, 第 35 巻, 第 397 号, pp.1118-1124, 1985.
- 9) S. Tsutsumi, T. Kitamura, R. Fincato : Ductile behaviour of carbon steel for welded structures: Experiments and numerical simulations, *Journal of constructional steel research*, 172, 2020.
- 10) 小田和生, 三上欣希, 望月正人: デジタル画像相関法と結晶方位解析を併用した微視的三次元ひずみ算出手法の構築, 溶接学会全国大会講演概要, 2012.

第 3 章

- 1) 防衛施設学会：衝突作用を受ける構造物の局部破壊に関する評価ガイドライン，2018.

第 4 章

- 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) 崎野清憲：広いひずみ速度領域における鉄の変形応力のひずみ速度依存性，実験力学, Vol.2, No.3, pp.177-182, 2002.

第 5 章

- 1) 防衛施設学会：衝突作用を受ける構造物の局部破壊に関する評価ガイドライン，2018.

研究に関連して発表した論文等

(1) 学術論文

番号	著者名	題 目	論文名	年 月
1	濱田 匠李 別府 万寿博 間瀬 辰也 中田 達也	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 (応用力学 論文集 Vol.21) I_421-I_429	2019.1
2	濱田 匠李 別府 万寿博 市野 宏嘉	半球状飛来物の衝突を受ける鋼板の貫通破壊に関する研究	構造工学論文集 Vol.65A p.876~889	2020.1
3	濱田 匠李 別府 万寿博 市野 宏嘉 堤 成一郎	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) Vol.76, No.2 (応用力学 論文集 Vol.22) I_379-I_387	2021.2
4	濱田 匠李 別府 万寿博 堤 成一郎 市野 宏嘉	平坦状の先端を有する飛来物衝突を受ける鋼板の貫通挙動に関する研究	土木学会論文集 A2 (応用力学) Vol.77, No.2 (応用力学 論文集 Vol.22) I_359-I_370	
5	濱田 匠李 別府 万寿博 市野 宏嘉 堤 成一郎	平坦状の先端を有する飛来物衝突を受ける鋼板の貫通評価モデルに関する検討	構造工学論文集 Vol.68A	2022.3 (掲載 予定)

(2) 国際会議

番号	登壇者（○印） および共同研究者	題 目	発表会名	年月
1	Masuhiko Beppu○ <u>Shori Hamada</u>	An experimental study on the perforation failure of steel plates subjected to a steel projectile impact	13th Workshop of DYNAMIC BEHAVIOR OF MATERIALS AND ITS APPLICATIONS IN INDUSTRIAL PROCESSES Nicosia, Cyprus	2019.4
2	Masuhiko Beppu○ <u>Shori Hamada</u> Hiroyoshi Ichino Hiroyoshi Ichino Ryo Matsuzawa Masaharu Itoh	A study on perforation failure of steel plates subjected to impact by a semi-spherical projectile velocity impact	18 th International Symposium for the Interaction of Munitions with Structures (ISIEMS2019)	2019.10

(4) 口頭発表等

番号	登壇者（○印） および共同研究者	題 目	発表会名	年月
1	○濱田 匠李 別府 万寿博 市野 宏嘉 間瀬 辰也 中田 達也	鋼棒の衝突を受ける鋼板の耐貫通性能に関する基礎的研究	第 72 回土木学会 全国大会 年次学術講演会	2017.12
2	○濱田 匠李 別府 万寿博 市野 宏嘉 間瀬 辰也 中田 達也	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	第 45 回土木学会 関東支部	2018.3
3	○濱田 匠李 別府 万寿博	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	土木学会応用力学委員会 第 21 回応用力学シンポジウム	2018.5
4	○濱田 匠李 別府 万寿博	鋼製飛来物の衝突を受ける鋼板の貫通メカニズムに関する基礎的研究	第 73 回土木学会 全国大会 年次学術講演会	2018.8
5	○濱田 匠李 別府 万寿博 市野 宏嘉	半球および平坦の先端を有する飛翔体衝突を受ける鋼板の貫通破壊に関する研究	第 46 回土木学会 関東支部	2019.3

6	○濱田 匠李 別府 万寿博 市野 宏嘉	半球状飛来物の衝突を受ける 鋼板の貫通破壊に関する研究	第 65 回構造工学シ ンポジウム	2018.3
7	○濱田 匠李 別府 万寿博 市野 宏嘉	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	第 74 回土木学会 全国大会 年次学術講演会	2019.9
8	○濱田 匠李 別府 万寿博 市野 宏嘉	半球状飛来物の衝突を受け る鋼板の貫通破壊に関する実 験的研究	第 12 回構造物の衝 撃問題に関するシン ポジウム	2019.12
9	○濱田 匠李 別府 万寿博 市野 宏嘉	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 に関する実験的研究	第 47 回土木学会 関東支部	2020.3
10	○濱田 匠李 別府 万寿博 市野 宏嘉	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	第 75 回土木学会 全国大会 年次学術講演会	2020.9
11	○濱田 匠李 別府 万寿博 市野 宏嘉	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	第 48 回土木学会 関東支部	2021.3
12	○濱田 匠李 別府 万寿博 市野 宏嘉 堤 成一郎	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 に関する研究	土木学会応用力学委 員会 第 24 回応用力学シ ンポジウム	2021.5