

(論文)

高強度薄板金属材料の破断予測シミュレーション

Simulation to Predict Failure in High-Strength Steel Sheet



鎮西将太*¹
Shota CHINZEI



内藤純也*¹
Junya NAITO

Automotive materials are becoming stronger and thinner to improve fuel economy while ensuring collision safety. Now one of the major issues is the fracturing of body frames upon collision, due to the decreased ductility associated with increased strength. Thus, it has become important to use numerical analysis at the design stage to predict material cracking and member fracture upon collision. This study was conducted on two types of dual-phase steels, each having a tensile strength of 980 MPa grade. Experimentally measured failure strain was used to identify failure criteria, and discussions were held as to how differences in the mechanical properties of the materials affects the failure criteria. Furthermore, these failure criteria were used for the reproduction analysis of crush tests on members having hat-shaped cross sections to elucidate how the difference in the crack resistance of the materials relates to the failure criteria.

まえがき = 地球環境への負荷低減に向け、自動車の燃費やCO₂排出量の規制基準は年々強化されており、その対応策の一つとして自動車車体の軽量化が強く求められている。そのいっぽうで、衝突安全性の向上を目指した衝突安全基準の厳格化に伴い、ボデーの強化やエネルギー吸収量の向上が求められている。

このような自動車車体の軽量化と衝突安全性確保を両立させるため、引張強度（以下、TSという）980MPa以上の超高強度鋼材の適用に加え、軽量素材である樹脂やアルミ材への置換、材料を適材適所に適用するマルチマテリアル化が拡大している。

そうしたなか、材料の高強度化に伴う延性低下、あるいは軽量化を目的に薄肉化したことに起因する衝突した際の車体部材の破断が懸念される、このため、衝突時の部材の変形や破断を数値解析的に予測するなど、設計段階における材料および強度両面からの十分な検討が重要となってきた。

既往の取り組みとしては、材料試験レベル、部材レベルで様々な破断予測モデルを用いた数多くの研究がなされてきている^{1)~3)}。しかしながら、これらの報告の多くは単一の材料を対象とした破断予測精度の検証にとどまっている。最近では、自動車車体部材に用いられる材料の多様化、高強度化が進み、同じ強度クラスの材料においても用途に応じた使い分けがなされてきていることから、耐割れ性の差異に着目した研究が重要となりつつある。

本稿では、機械的特性の異なる2種類のTS980MPa級Dual-Phase鋼（以下、DP鋼という）を対象に、実験によって測定した破断ひずみを用いて破断クライテリア

を同定し、材料の機械的特性の違いが破断クライテリアに及ぼす影響について考察した。さらに、これら破断クライテリアを用いてハット断面部材（以下、ハット部材という）を対象とした圧壊試験の再現解析を行い、これら2種類の材料の耐割れ性の差異と破断クライテリアの関係性を明らかにした。

1. 破断予測モデル

図1に薄板金属材料の引張試験における変形の局所化の様相を示す。拡散くびれの開始点であるA点までは一様に変形し、B点で変形がせん断帯に局所化して局所くびれが発生（すなわち、塑性不安定が開始）した後、延性破壊に至る（C点）。

金属の延性破壊は、静水圧応力成分の影響を受けることが一般的に知られており、静水圧応力成分の影響を表

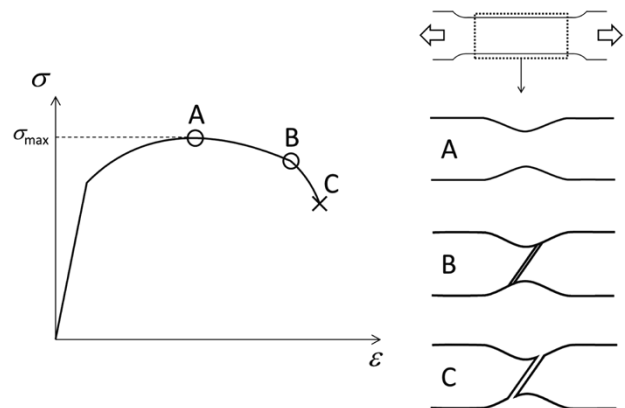


図1 変形の局所化の概念図
Fig.1 Schematic image of deformation localization

*¹ 技術開発本部 機械研究所

す指標として式(1)に示す応力3軸度 η が用いられる⁴⁾。

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} \{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\}} \dots\dots (3)$$

ここに、

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: 主応力

σ_m : 静水圧応力

σ_{eq} : 相当応力

本稿での数値解析には陽解法汎用有限要素法 (Finite Element Method, 以下FEという) ソルバであるLS-DYNA[®]を用い、破断予測モデルは破断クライテリアの自由度が高いGISSMO (Generalized Incremental Stress-State dependent damage Model)⁵⁾を用いた。GISSMOはダメージと呼ばれる損傷値で破断判定を行い、ダメージ値が1に達すると破断 (要素削除) に至る。ダメージ値の進展式を式(4)に示す。

$$\Delta D = \frac{D_{exp}}{\varepsilon_f} D \left(1 - \frac{1}{D_{exp}}\right) \Delta \varepsilon_{eq} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

D : ダメージ値

ΔD : ダメージ増分

D_{exp} : ダメージの増加度合いを表すパラメータ

$\Delta \varepsilon_{eq}$: 相当塑性ひずみ増分

ε_f : 応力3軸度に応じた破断ひずみ

破断限界を示す応力3軸度の軸上で定義された相当塑性ひずみ ε_f と相当塑性ひずみ増分 $\Delta \varepsilon_{eq}$ によってダメージ増分 ΔD が算出される。相当塑性ひずみ増分が同等でも応力3軸度が異なる場合は、比較する破断曲線の相当塑性ひずみが異なるため、 ΔD が同等とならない。このため、応力3軸度の履歴に伴う破断限界の変化も破断判定に反映されることとなる。また、GISSMOでは塑性不安定と変形の局所化を考慮できるモデルとなっており、不安定性指標 F により応力軟化の開始を判定する。式(5)に示す F の進展式によって不安定性指標が1に達すると塑性不安定が開始し、その後の応力軟化挙動は式(6)のとおりとなる。

$$\Delta F = \frac{D_{exp}}{\varepsilon_i} F \left(1 - \frac{1}{D_{exp}}\right) \Delta \varepsilon_{eq} \dots\dots\dots (5)$$

$$\sigma_{new} = \sigma_{old} \left(1 - \left(\frac{D - D_c}{1 - D_c}\right)^{F_{exp}}\right) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、

ΔF : 不安定性指標増分

ε_i : 応力3軸度に応じて塑性不安定が開始するときの相当塑性ひずみ

D_c : F が1に達したときのダメージ値

F_{exp} : 応力軟化の度合いを表すパラメータ

2. 破断クライテリアの実験的同定手法

2.1 試験供試材料

本稿では、耐割れ性の異なる2種類のTS980MPa級

DP鋼板を用い、破断クライテリアの同定から破断予測解析までを実施した。JIS 5号試験片の引張試験から得られた機械的特性、および穴広げ率を表1に示す。試験には板厚1.4mmの鋼板を用いた。

穴広げ率は、塑性不安定が開始してから破断に至るまでの延性である局所延性と相関がある。表1に示すとおり、Aタイプは穴広げ率が高くなるよう開発された曲げ加工性に優れた材料である。いっぽうで、Bタイプは絞り成形性に優れた材料として開発し、全伸びおよび均一伸びを高めた材料となっている。これらの材料は、化学成分は同一であるが、製造工程の熱処理で造り分けている⁶⁾。

2.2 破断ひずみの測定

金属の延性破壊は静水圧応力成分の影響を強く受ける。このため本稿では、図2に示すように応力3軸度に応じた破断ひずみを実験により測定した。純粋せん断試験、小R、大Rの2種類の切欠を設けた試験片の引張試験⁷⁾、およびエリクセン試験により、それぞれ純粋せん断 ($\eta = 0$)、単軸引張 ($\eta = \frac{1}{3}$)、平面ひずみ ($\eta = \frac{1}{\sqrt{3}}$)、および2軸引張 ($\eta = \frac{2}{3}$) の応力状態における破断ひずみを測定した。

具体的には、せん断試験では破断部近傍で測定したせん断ひずみから、切欠付引張試験では破断起点近傍の板厚減少率から、エリクセン試験では試験材表面に転写したスクライブドサークルの変形と破断起点近傍の板厚減少率からそれぞれの応力状態における破断ひずみを算出した。

2.3 破断クライテリア

実験により測定した破断ひずみから同定した破断クライテリアを図3に示す。図3の実線は破断判定のクライテリア ε_f 、破線は塑性不安定開始判定のクライテリア ε_i を示している。

表1 供試材の機械的特性
Table 1 Mechanical properties of steel sheets

Material	YS (MPa)	TS (MPa)	Uniform elongation (%)	Total elongation (%)	Hole expansion (%)
A-type	790	1 031	6.8	15.5	77.6
B-type	644	1 015	9.4	18.3	31.0

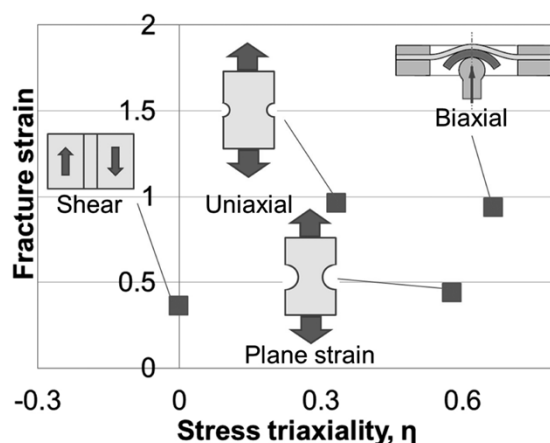


図2 破断ひずみ測定試験

Fig. 2 Tests for measuring fracture strain

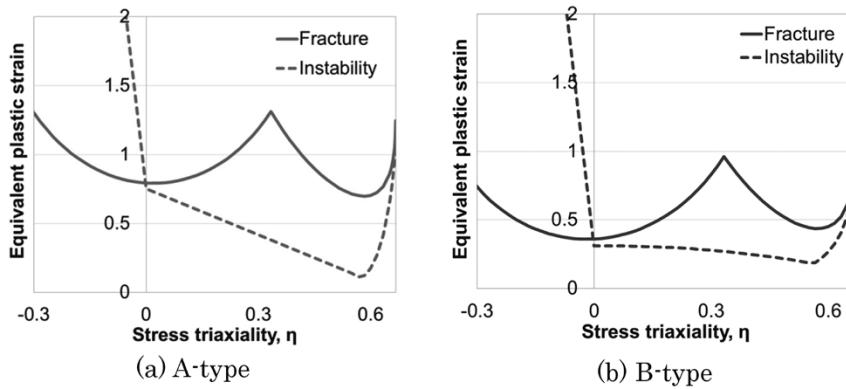


図3 破断クライテリウム曲線
Fig. 3 Fracture criterion curves

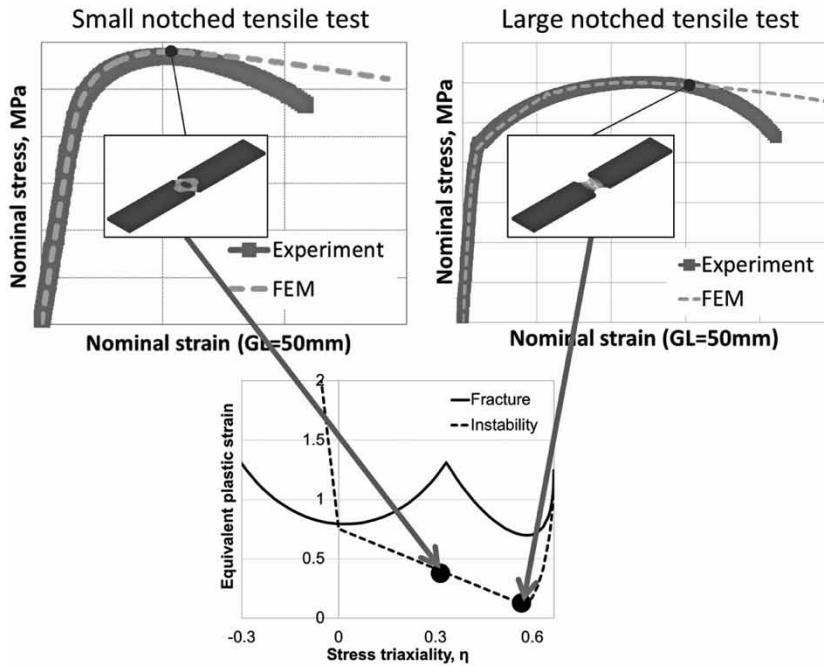


図4 ϵ_i の同定方法
Fig. 4 Identification of ϵ_i

破断判定のクライテリウムは式(7)、(8)に示す曲線式¹⁾により同定した。

$$\epsilon_f = d_1 e^{-f\theta} + d_2 e^{f\theta} \dots\dots\dots (7)$$

$$\theta = \frac{\sigma_{eq}}{\tau_{max}} (1 - 3k_s \eta) \dots\dots\dots (8)$$

ここに、

τ_{max} : 最大せん断応力

d_1, d_2, f_1, k_s : 同定パラメータ

また、図4に示すように、切欠付き引張試験の結果とそれらの再現解析(破断を考慮しない)結果において、公称応力-公称ひずみ関係を比較し、両者の応力-ひずみ線図が乖離(かいり)し始めるときに変形の局所化が開始するとし、塑性不安定開始を判定する曲線 ϵ_i を同定した。なお、圧縮($\eta \leq 0$)、および、2軸引張($\eta = 2/3$)の応力状態では塑性不安定は生じないと仮定している。

Aタイプ、Bタイプは同じ化学成分で同等の引張強度であるが、伸びおよび穴広げ率の異なる材料である。この機械的特性の違いを破断クライテリウム曲線の相違として定量的に表すことができる。図3における実線 ϵ_f と破線 ϵ_i の差は、応力軟化を開始してから破断に至るま

で増加する相当塑性ひずみであるため、材料の局所延性に相当する。応力3軸度が $0 \leq \eta \leq 2/3$ の領域において、実線と破線で囲まれる面積はAタイプ>Bタイプとなっており、一般的に局所延性と相関があるとされる穴広げ率の大小関係とも整合する。このように、実験結果から破断クライテリウムを同定することによって、材料の破断特性を応力3軸度と相当塑性ひずみの関係で表現することができた。

3. 破断予測解析

3.1 FE解析モデル

図3の破断クライテリウムを用いてハット部材の準静的軸圧壊試験の破断予測解析を行った。解析条件はハット部材の形状や接合点位置を含め、実際のハット部材の軸圧壊試験と同様にした。解析モデルを図5に示す。シェル要素のサイズは2.5mmで試験体の板厚は1.4mm、板厚方向の積分点は5点(完全積分)とした。ハット材準静的軸圧壊試験の破断予測解析(ハット部要素数: 10,560)では、ハット材および裏板材の端部節点を上板、下板に剛体結合し、押し込み量として上板に150mmの

強制変位を与えた。軸圧壊試験においてスポット溶接部の破断は生じなかったため、破断予測解析ではスポット溶接部の破断は考慮していない。

3.2 FE解析結果

ハット部材の軸圧壊試験結果と破断予測解析結果（押し込み変位150mm）を図6に示す。実験結果における図中の破線は割れを示している。AタイプのほうがBタイプよりも割れが小さく、これら2種類の材料で割れ発生の程度に差異が見られる。FE解析結果においても、

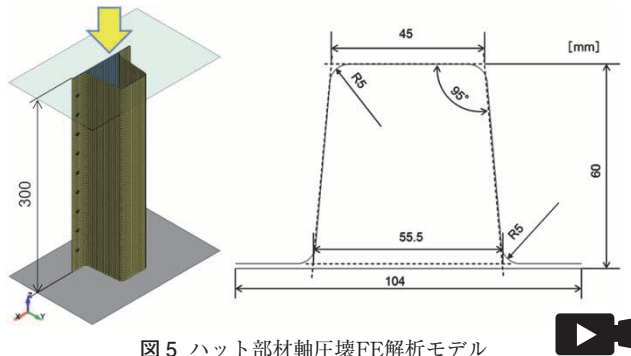


図5 ハット部材軸圧壊FE解析モデル
Fig. 5 FE model for axial crush of HAT member

ハット部の破断要素数はAタイプが21要素、Bタイプが384要素となっており、試験結果の挙動と一致する。また、破断予測解析結果における割れ発生位置についても、試験結果の割れ発生位置と一致することが確認できた。

3.3 考察

ハット部材の軸圧壊解析結果において、AタイプとBタイプで破断要素数に差異が見られた。どの応力3軸度における破断クライテリアがこの差異に支配的な影響を及ぼしているのかを調査するため、図7に示す破断近傍要素の応力3軸度と相当塑性ひずみの関係を分析した。ここで、同図のコンタ（要素の濃淡塗分け）は相当塑性ひずみの大きさの分布を示している。図中の要素A1とB1はいずれも、ハット形状のR部に位置していた要素であり、座屈変形によって曲げ変形を受けている。また、要素A2とB2は座屈部の曲げ端部に位置しており、それぞれ同様の変形を受けている要素をAタイプとBタイプの解析結果から抽出している。

要素A1とB1は両要素とも、1段目の座屈変形時に破断に至っており、要素が削除されていた。いっぽうで要素A2とB2は、同様の変形を受けているにもかかわらず、

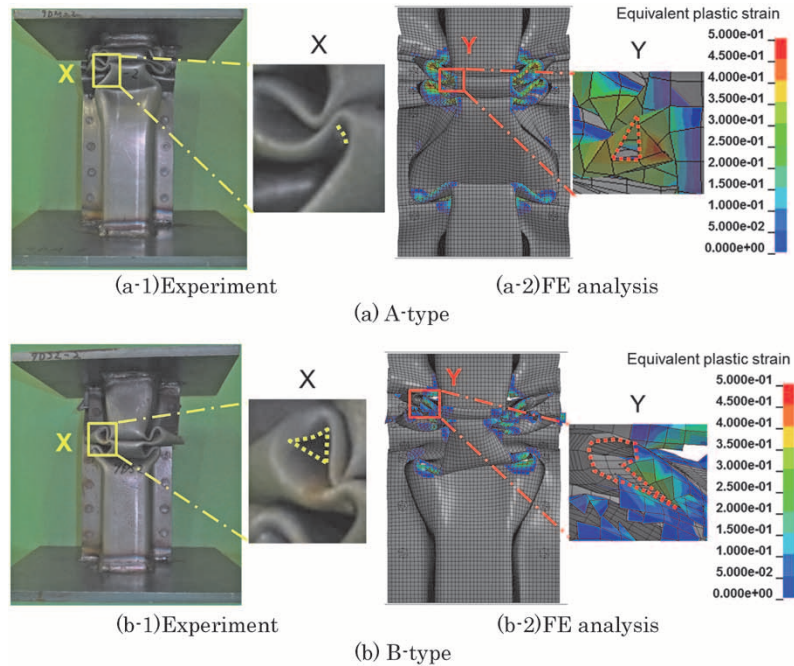


図6 試験結果とFE解析結果
Fig. 6 Results of experiment and FE analysis

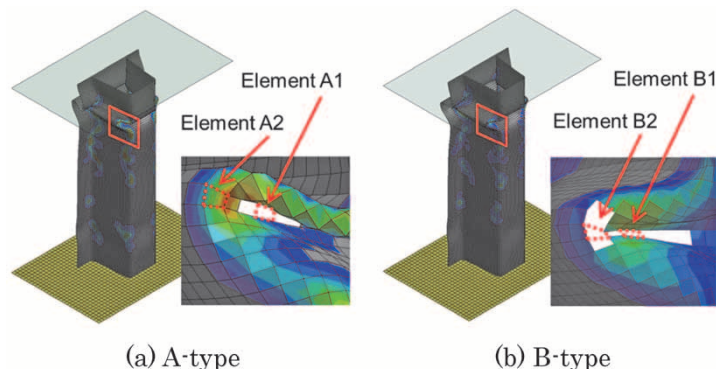


図7 評価した破断部近傍の要素
Fig. 7 Evaluated elements around fracture

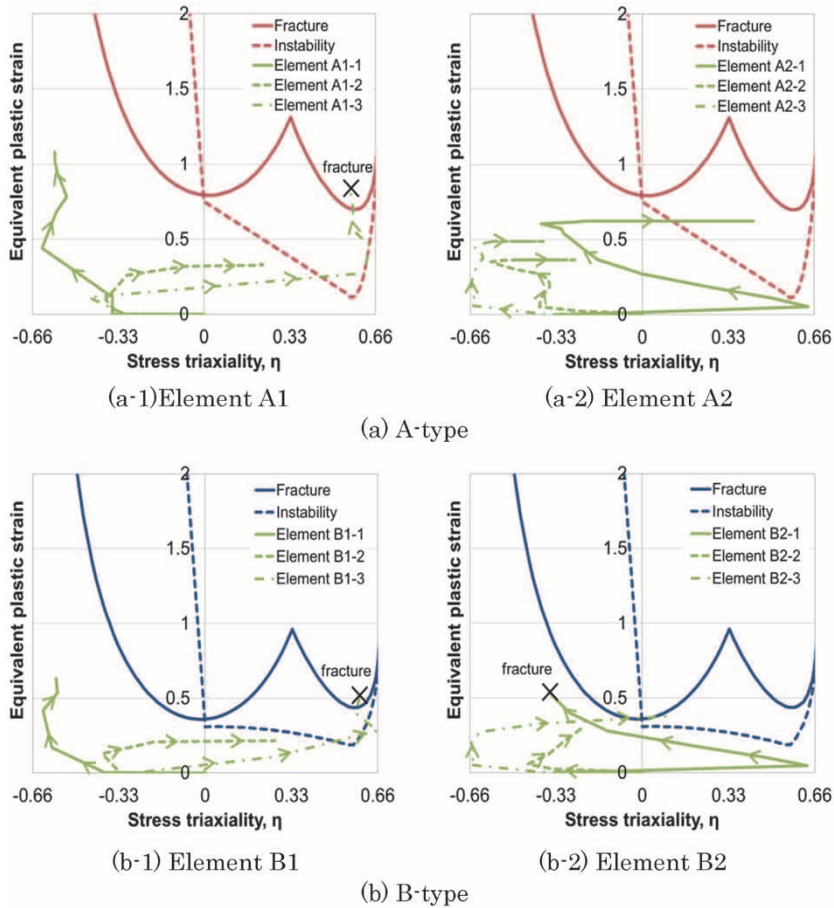


図 8 応力 3 軸度と相当塑性ひずみの関係
 Fig. 8 Relationship between stress triaxiality and equivalent plastic strain

B2は破断に至っているが、A2は破断に至っていなかった。これらの要素の応力 3 軸度 - 相当塑性ひずみ関係を図 8 に示す。図中の要素番号の後に付している数字は板厚方向の積分点位置 (1:ハット外側, 2:板厚中央, 3:ハット内側) を表している。

要素A1とB1は、変形開始直後においてハット外側、内側ともに圧縮の応力状態を示している。変形が進むにつれてハット外側が圧縮、ハット内側が引張の応力状態を示しており、曲げ変形を受けていることが分かる。これらの要素は、引張側であるハット内側の積分点が平面ひずみ付近 ($\eta \approx 0.6$) の応力状態で破断に至っていることが確認できる。

要素A2とB2は、変形開始直後はハット外側が引張、ハット内側が圧縮の応力状態を示しており、要素A1、B1と同様に曲げ変形を受けていることが分かる。変形が進むにつれて各積分点の応力状態は純粋せん断 ($\eta = 0$) の応力状態に近づき、要素B2についてはハット外側の積分点が破断に至っていたが、要素A2は破断に至らず、ハット材の変形は 2 段階目の屈曲変形に移行していた。

ここで、要素A2、B2におけるハット外側の積分点の応力 3 軸度とダメージの関係を図 9 に示す。積分点A2-1におけるダメージの累積は、応力 3 軸度が $\frac{1}{3} \leq \eta \leq \frac{2}{3}$ の範囲では 0.19、 $-\frac{1}{3} \leq \eta \leq \frac{1}{3}$ の範囲では 0.39 となっており、積分点B2-1においては、応力 3 軸度が $\frac{1}{3} \leq \eta \leq \frac{2}{3}$ の範囲では 0.27、 $-\frac{1}{3} \leq \eta \leq \frac{1}{3}$ の範囲では 0.63 のダメージが累積されていた。これらの結果から、純粋せん断 (η

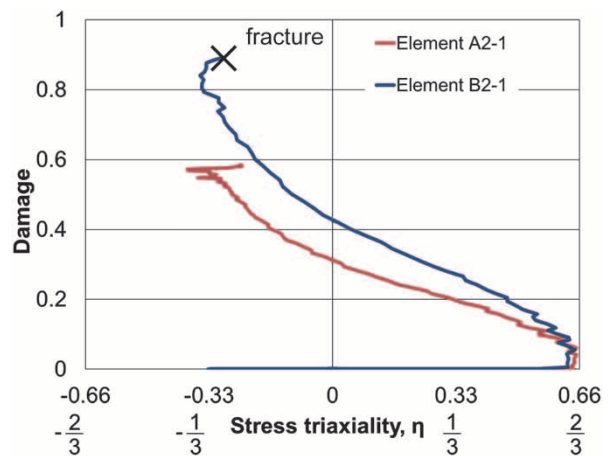


図 9 応力 3 軸度とダメージ値の関係
 Fig. 9 Relationship between stress triaxiality and damage

= 0) の応力状態近傍でダメージが大きく増加していることが分かった。

以上より、今回の実験で用いたハット部材の軸圧壊時の割れに関しては、AタイプとBタイプの純粋せん断の応力状態近傍における破断クライテリアの差異が割れの大きさの違いになったと考えられる。

むすび = 本稿では、同じ強度クラスの 2 種類の材料における耐割れ性に着目し、TS980MPa級DP鋼を対象に破断ひずみを測定した。また、得られた破断ひずみより破断クライテリアを同定した後、それら破断クライテリア

を用いてハット部材圧壊試験の破断予測解析を行うことにより、耐割れ性の差異を再現できることを確認した。今回のハット部材の軸圧壊解析において発生した2種類の材料における割れの大きさの差異については、純粋せん断の応力状態近傍における破断クライテリアが影響していることが分かった。

本稿で紹介した取り組みによって得られた成果の展開として、今後は自動車車体の実部品レベルでの圧壊時における耐割れ性について、破断特性がどのように影響するのかを明らかにしていきたい。また、その後の展望として、フルカーレベルでの衝突時の破断予測解析を行い、破断特性の差異が車両全体の衝突性能に与える影響について明らかとしていきたい。

参 考 文 献

- 1) T. Wierzbicki et al. Int. J. Mech. Sci. 2005, Vol.47, p.719-743.
- 2) Y. Bai et al. Int. J. Plast. 2008, Vol.24, p.1071-1096.
- 3) H. Hooputra et al. Int. J. Crash. 2004, Vol.9, p.449-463.
- 4) A. C. Mackenzie et al. Eng. Fract. Mech. 1977, Vol.9, p.167-188.
- 5) F. Neukamm et al. 7th European LS-DYNA Conference, 2009.
- 6) 田村享昭ほか, R&D神戸製鋼技報, 2002, Vol.52, No.3, p.6.
- 7) E. T. Till et al. AIP CONFERENCE PROCEEDINGS, 2011, p.267-274.

PDFにて本記事をご覧の方へ

図5にある動画マーク  をクリックいただくと動画が再生されます。