

自動車用鋼板の破断予測精度向上技術

Advanced Technologies for Fracture Prediction in Automotive Steel Sheets

相藤 孝博*
Takahiro AITO新田 淳
Jun NITTA濱田 幸一
Koichi HAMADA米村 繁
Shigeru YONEMURA丹羽 俊之
Toshiyuki NIWA

抄 録

自動車車体の衝突試験において材料破断及びスポット溶接部破断が発生した場合、変形モードが変化することによって狙いのエネルギー吸収が得られない可能性がある。そのためFEM解析を用いて材料破断を事前に予測し、対策を打つことが求められている。日本製鉄(株)において汎用の衝突解析ソルバーと連成して材料破断予測を行えるソフトウェアを開発した。本ソフトウェアの特徴は、FEM解析モデルの要素サイズの影響を考慮した破断予測にある。更に、この技術を応用したスポット溶接の熱影響部からの破断予測機能についても紹介した。

Abstract

In the crash test of automobile bodies, when the material fracture and the spot weld fracture occur, there is a possibility that the intended energy absorption can not be obtained due to the change of the deformation mode. Therefore, it is required to predict fracture of the spot weld using FEM analysis and take countermeasures in advance. We developed the software that enables us to predict fracture of the material in conjunction with a general-purpose crash analysis solver. The feature of this software is the prediction of fracture considering the influence of Element size in FEM analysis model. In addition, we introduced the fracture prediction function from heat affected zone of spot welding.

1. 緒 言

自動車車体の衝突試験において材料破断及びスポット溶接部破断が発生した場合、狙いのエネルギー吸収が得られない可能性がある。また近年では、超高強度鋼板の適用が進み、従来に比べ車体設計の難しさが増してきており、FEM解析を用いてこれら破断を事前に予測し、対策を打つことが求められている。そのため、日本製鉄(株)において自動車車体の衝突解析の分野において広く用いられている汎用ソルバー LS-DYNA®のサブルーチンプログラムとして動作する、NSafe®-SPOT(スポット溶接部破断予測ソフトウェア)及びNSafe®-MAT(材料破断予測ソフトウェア)を開発し、実装した。これらソフトウェアは、フルビークルモデルでの使用を前提として開発しており、新鋼種への対応を取りながら、予測精度向上のための機能改善、機能追加を図っている。

NSafe®-MATは、ひずみFLD(Forming Limit Diagram)を応力空間に変換した応力FLDを用いて材料破断を予測する^{1,2)}。その破断限界ひずみは、S-R理論³⁾を基に、鋼板の引張強度特性から得られるスリフト係数(n値)を用いて作成される。S-R理論は、局部くびれ開始を予測する理論であるため、FLDの実験結果と比較すると安全側(早期)に破断判定される特徴がある。また、一般に有限要素法はその要素単位でひずみが計算されるため、実際のひずみの分布(勾配)に対して、要素を十分細かく分割できていない場合は、正しいひずみの値を求めることができない。

自動車各社のフルビークルモデルの要素サイズは、計算負荷の観点から2~5mm程度と粗いサイズが用いられている。粗い要素サイズを用いた場合、材料が均一に変形している部位は特に問題にならないが、局所変形が生じ、ひずみが局所化している(破断の可能性のある)部位については、正しいひずみの値を求めることができないだけでな

く、ユーザーが用いる要素サイズによって、計算されるひずみの値が異なってしまう、いわゆる要素サイズ依存性の問題が生じてしまう。

これら課題に対して新田ら⁹⁾は、破断限界ひずみのゲージ長さ（以下 GL）依存性予測式を提案している。FLD 実験において様々な GL における破断限界ひずみを測定し、GL と破断限界ひずみの関係を数式化する手法が取られている。これによって、局部くびれ開始ではなく、破断開始を予測できる。更に、FEM における要素サイズは、FLD 実験における GL とほぼ同等であるため、この関係式を用いることで要素サイズ依存性の問題にも対応することができる。ただし、比較的低強度の高強度鋼（ハイテン）材を対象に開発されていたことから、980MPa 級を超える超ハイテン材には対応できないことも判っている。そのため、超ハイテン材の FLD 実験を行い、GL と破断限界ひずみの関係を取得すると共に、超ハイテン材に対応できる関係式となるよう式の構成を見直し、NSafe[®]-MAT のプログラムに反映させた。更に、JIS5 号引張試験片モデルを様々な要素サイズで作成し、NSafe[®]-MAT を用いて引張試験時の破断予測を行い、精度を検証した。

一方、超ハイテン材はマルテンサイトを活用して引張強度を確保しているケースが多く、スポット溶接を行うと熱影響部（Heat Affected Zone：以下 HAZ）が焼戻され軟化する⁹⁾。自動車用鋼板では引張強さが 780MPa 級を超えた付近から、スポット溶接部に HAZ 軟化が認められることが報告されている⁹⁾。スポット溶接継手の評価法である TSS 試験や CTS 試験においては、HAZ 軟化の影響は小さいとされる^{7,9)}。一方で、スポット溶接部を有する 1500MPa 級ホットスタンプ鋼板に面内引張を加えた場合、HAZ 軟化部にひずみが集中し、母材に比べ全伸びが低下することが報告されている¹⁰⁾。自動車の側面衝突試験において、B ピラーのフランジが上記に近い変形モードになる場合があり、スポット溶接部の HAZ 軟化部を起点に破断する可能性があるため、各種対策が検討されている¹¹⁾。

HAZ 軟化部は、スポット溶接によって生じるが、前述したようにスポット溶接部の継手強度に与える影響は小さく、むしろ面内の引張力によって生じる母材破断の一種であると考えられる。そのため NSafe[®]-SPOT ではなく、NSafe[®]-MAT に機能を追加することで HAZ 破断に対応できると考えた。HAZ 軟化部の幅は 0.5 ～ 2.0mm 程度と考えられるため、一般的に用いられる要素サイズと比べると HAZ 軟化部の要素サイズは相対的に小さくする必要がある。更に、HAZ 軟化部のようにひずみが集中する部位においては、要素サイズ依存性の問題が生じる。これら課題に対しては、前述した要素サイズ依存性に対応した関係式を反映させた NSafe[®]-MAT で対応可能と考えられる。更に、Pre ソフトウェア（NSafe[®]-MAT Pre）に、数千打点に及ぶスポット溶接の中から、HAZ 軟化が生じている打点を選定し、破断予測を行

うための設定を自動で行うための機能を追加した。これら開発機能を用いて、ハット部材や B ピラーの 3 点曲げ試験で発生した HAZ 軟化部破断の予測を行い、精度を検証した。

2. 要素サイズ依存性予測式の導出

新田らが行った実験⁹⁾に超ハイテン材も加えた 270MPa 級～1310MPa 級鋼板について FLD 実験を行い、GL と破断限界ひずみの関係を調査した。代表して JSC1180Y の各 GL と破断ひずみ ϵ_{fl} の関係をプロット点で図 1 に示す。また、式 (1) に示す GL 依存性予測式でフィッティングした計算値（実線）も合わせて示す。

$$\epsilon_{fl} = \alpha (GL)^{-\beta} \quad (1)$$

各鋼種、各ひずみ比 ρ 毎に得られる式 (1) の α と β を一般化するために、270MPa 級～1310MPa 級鋼板についてひずみ比 ρ 毎の α を整理したところ、 α は引張強度 TS と線型の関係にあることが判った。次に、実験結果もしくは S-R 理論に基づく理論 FLD カーブを用いて基準 GL での FLD カーブを定める。基準 GL の FLD カーブから、特定の鋼種における任意のひずみ比 ρ に対する ϵ_{fl} が決定できる。更に、これらの値と式 (1) から β を決定することができる。このようにして決定した α と β を式 (1) に代入することで任意の GL に対する ϵ_{fl} を決定することができる。以下これを要素サイズ依存性予測式と呼ぶ。

3. HAZ 軟化部モデル化手法

例えば 1500MPa 級ホットスタンプ鋼板の場合、HAZ 軟化部幅はおよそ 1.0 ～ 2.0mm 程度で、母材に対する強度が 20% 以上軟化している場合に HAZ 軟化部を起点として破断が発生することが報告されている¹⁰⁾。そのため、FEM でモデル化する際には HAZ 部の要素サイズを母材の要素サイズよりも細かくする必要があると共に、軟質化した HAZ 部の材料特性を正しく定義する必要がある。また、低強度材では HAZ 軟化部からの破断は発生せず、1180MPa 級を超える材料にて HAZ 軟化部を起点とした破断が発生すると報告¹⁰⁾ されていることから、NSafe[®]-MAT における HAZ 破断の評価対象鋼種も 1180MPa 級鋼板以上とした。

図 2 に示すように NSafe[®]-MAT の Pre ソフトウェアに新

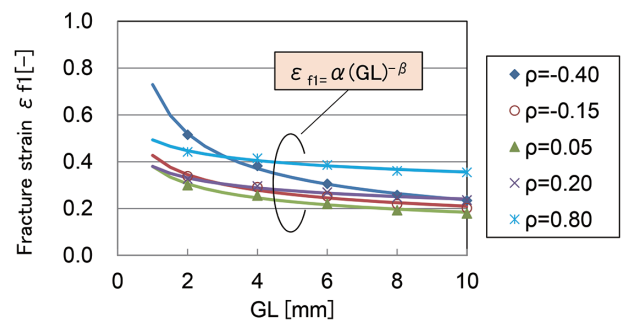


図 1 JSC1180Y の GL と破断ひずみの関係
Relationship between GL and fracture strain in JSC1180Y

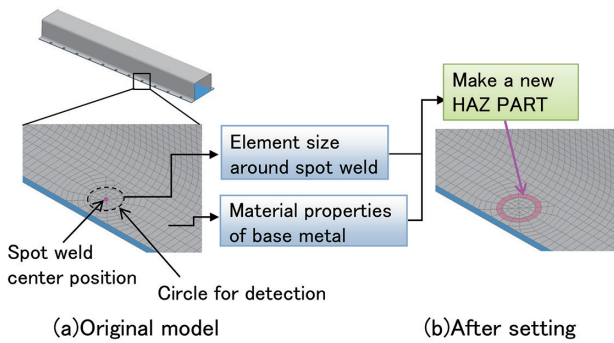


図2 NSafe[®]-MAT PreによるHAZ軟化部設定機能
HAZ softening part setting function by NSafe[™]-MAT Pre

たな機能を実装した。各スポット溶接部（ビーム要素）が接合する母材の要素をサーチし、母材の材料特性及び平均メッシュサイズを読み取ると共に、スポット溶接中心位置から“ナゲット径+0.4mm”の径の円をフランジ面上に描き、その円と交差する要素を抽出する。抽出した要素は母材とは別の新たなPARTに設定し直し、HAZ軟化部の平均メッシュサイズを取得すると共に母材と同じ板厚を定義する。また、材料特性はHAZ軟化部の微小引張試験のデータを基に、母材部の引張強度からHAZ軟化部のスリフト係数を線形補完して求めた。

4. 要素サイズ依存性予測式の精度検証結果

代表してJSC1180Yについて要素サイズ依存性予測式で求めたGL=2, 6, 10mmにおけるFLD予測値及び比較のためのFLD実験値を図3に示す。いずれのGLにおいても実験結果を精度良く予測できていることが確認できた。

要素サイズに対する破断予測精度を検証するために、要素サイズを2, 3, 5mmとしたJIS5号引張試験モデルを作成した（JSC980Y, 板厚1.6mm）。

先ず比較のため、従来用いられているMAT24を用いた相当塑性ひずみによる破断予測結果を図4に示す。要素サイズ2mmのモデルの標点間ひずみ（標点間距離50mm）が、実験で破断が発生した標点間ひずみ（=0.147）と同じ値となるまで引張を加え、この時の最大の相当塑性ひずみ値（=0.50）を読み取り、クライテリアとした。同クライテリア

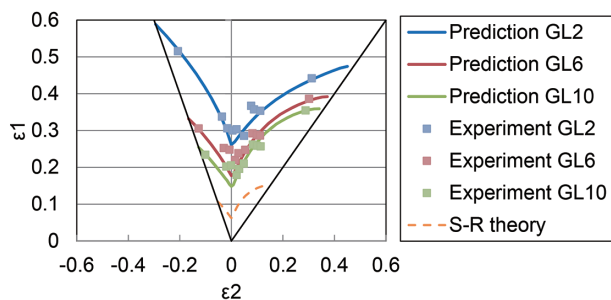
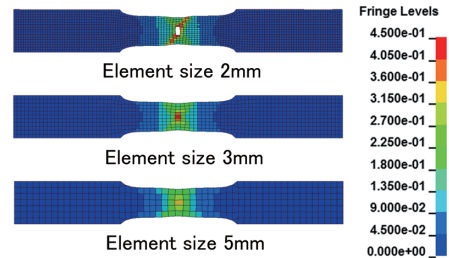


図3 JSC1180YのFLDにおける予測値と実験値の比較
Comparison of predicted values and experimental values in JSC1180Y FLD

を使って、要素サイズ3, 5mmのモデルで破断を予測した結果、要素サイズが大きくなるほど、くびれ発生部のひずみの集中を再現できないことから破断発生タイミングが遅くなり、実験結果を予測できないことが判った。

一方、要素サイズ依存性予測式をNSafe[®]-MATに組み込み破断予測を行った結果を図5に示す。NSafe[®]-MAT Pre



Equivalent plastic strain contour diagram at strain 0.147 between reference points at which fracture occurred in the experiment

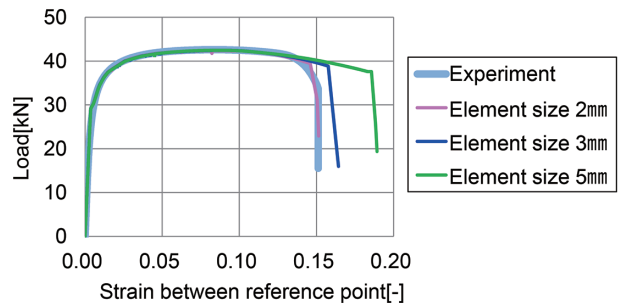
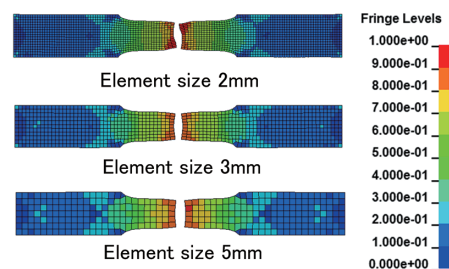


図4 従来手法 (MAT24) による JIS5号引張試験モデル破断予測結果

JIS No.5 tensile test model fracture prediction result by conventional method (MAT24)



Fracture rate contour diagram immediately after fracture occurred by NSafe[™]-MAT

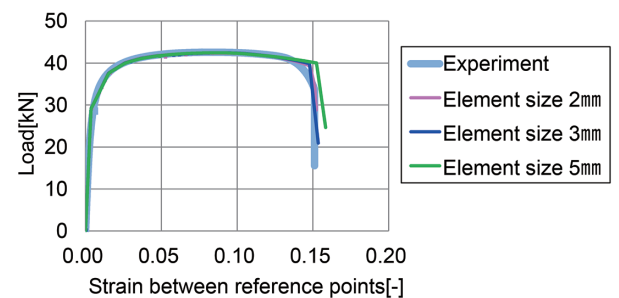


図5 NSafe[®]-MATによるJIS5号引張試験モデル破断予測結果

JIS No.5 tensile test model fracture prediction result by NSafe[™]-MAT

により S-S (Stress-Strain) カーブからスリット係数を取得すると共に、平均要素サイズを読み取った。これらの値を使って NSafe[®]-MAT によりひずみ FLD を作成し、更に応力 FLD に変換して破断予測を行った。図 5 から、実験の破断タイミングを精度良く予測できると共に、いずれの要素サイズであっても、ほぼ同じタイミングで破断を予測することができた。以上のことから、本開発手法を用いることで材料破断を予測する際の要素サイズ依存性の問題を解決できると考えられる。

5. 要素サイズ依存性予測式を用いたHAZ軟化部破断予測結果

前述した NSafe[®]-MAT Pre を用いて HAZ 軟化部をモデル化すると共に、要素サイズ依存性予測式を反映させた NSafe[®]-MAT を用いて HAZ 軟化部からの破断予測精度を検証した。図 6 に示す 1500MPa 級ホットスタンプ鋼板、板厚 1.6mm のハット部材 (背板は 440MPa 級鋼板、板厚 1.2mm) の 3 点曲げ FEM モデルを作成し、実験と荷重-ストローク線図及び破断発生位置、タイミングを比較した。精度検証のために、スポット溶接周りのメッシュ切りの方
法として推奨するスパイダーメッシュとした条件 (要素サイズ: 母材 1.33mm, HAZ 部 1.16mm) と、メッシュ作成負荷の低い格子状メッシュとした条件 (要素サイズ: 母材 1.0mm, HAZ 部 1.0mm) を比較した。また、HAZ 軟化部をスパイダーメッシュとしたモデルで、実験において HAZ 軟化部からの破断が発生しなかったフランジ幅を拡大した条件 (フランジ幅 9.2mm → 14.2mm) についても解析した。

ハット部材の 3 点曲げ実験結果及び NSafe[®]-MAT による破断予測結果における破断発生状況を図 7 に、荷重-ストローク線図を図 8 に示す。実験において HAZ 軟化部を起点に破断が発生した。また、NSafe[®]-MAT による予測において HAZ 軟化部のメッシュをスパイダー状にした場合、格子状にした場合、いずれもほぼ同タイミングで破断を予測しており、かつ実験との比較においても良い精度を示す

ことが確認できた。また、実験において破断が発生しなかったフランジ幅拡大条件においては、最終ストロークにおいても破断が発生せず、実験結果を再現することができた。

破断が発生しなかったフランジ幅拡大条件と、ベース条件であるスパイダーメッシュ条件の破断起点となる要素の主応力履歴を図 9 に示す。いずれの条件も、変形初期に圧縮応力が加わり、その後、平面ひずみ域の応力が加わっていることが判る。フランジ幅を拡大することで、最終的な

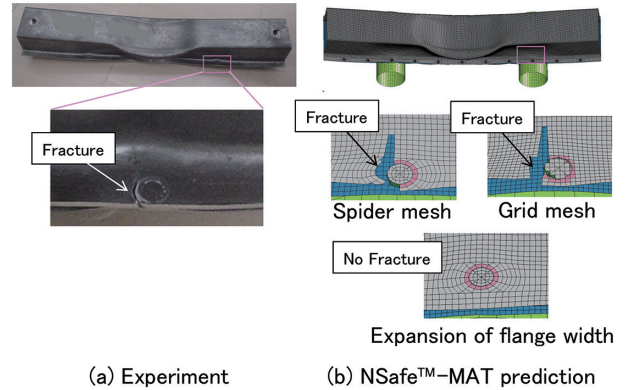


図 7 ハット部材 3 点曲げ実験結果及び NSafe[®]-MAT による破断予測結果

Three-point bending test result of hat member and fracture prediction result by NSafe[®]-MAT

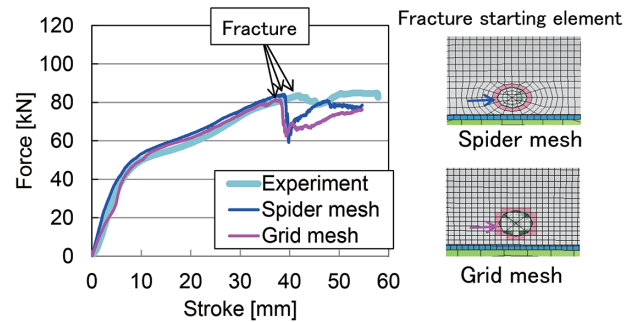


図 8 ハット部材 3 点曲げにおける荷重-ストローク線図
Force-stroke diagram in three-point bending of hat member

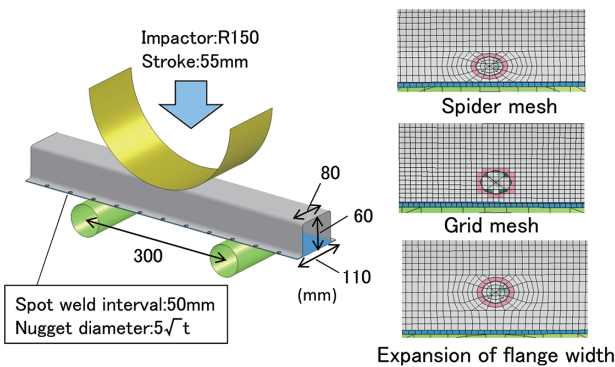


図 6 ハット部材 3 点曲げ FEM モデル及び HAZ 軟化部モデル化方法
Three-point bending FEM model of hat type member and HAZ part modeling

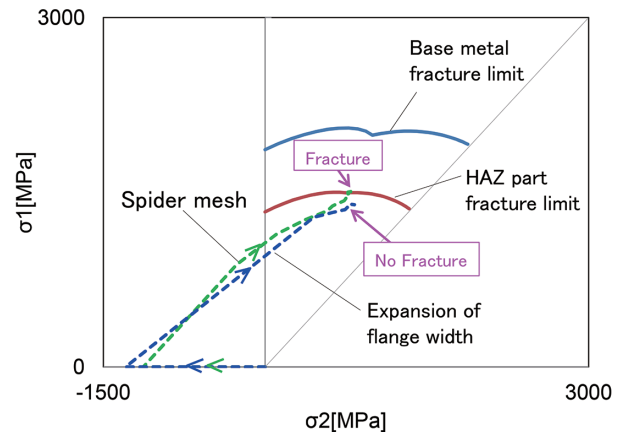


図 9 NSafe[®]-MAT 破断起点要素の主応力履歴
Principal stress history of fracture starting element in NSafe[®]-MAT

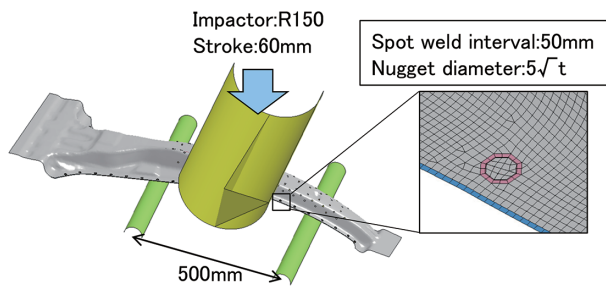


図 10 B ピラー 3 点曲げ FEM モデル及び HAZ 軟化部モデル化方法

Three-point bending FEM model of B-pillar and HAZ part modeling

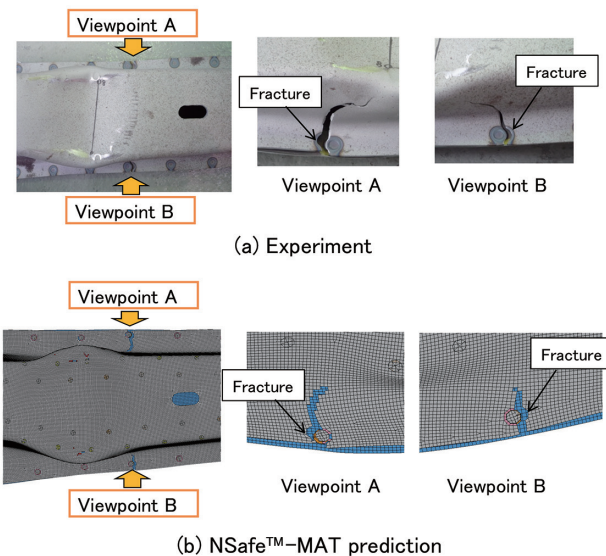


図 11 B ピラー 3 点曲げの NSafe[®]-MAT 破断予測結果
Fracture prediction result by NSafe[™]-MAT in B-pillar three-point bending

平面ひずみ域の応力が低減したため破断が発生しなかったと考えられる。

次に、より実部品に近い条件で評価を行うため図 10 に示す B ピラー (アウト及び Reinforcement: 1500MPa 級ホットスタンプ鋼板, 板厚 1.6mm, インナ: 590MPa 級鋼板, 板厚 1.2mm) の 3 点曲げモデル (要素サイズ: 母材 1.47mm, HAZ 部 1.10mm) を用いて HAZ 軟化部からの破断予測を行った。

B ピラーの 3 点曲げ実験及び NSafe[®]-MAT による破断予測結果における破断発生状況を図 11 に、荷重-ストローク線図を図 12 に示す。実験において、42mm ストローク時に視点 A で、52mm ストローク時に視点 B で HAZ 軟化部を起点に破断が発生した。FEM 解析においても同スポット打点位置かつ、ほぼ同タイミングで HAZ 軟化部からの破断を予測できる結果となった。このことから、NSafe[®]-MAT を用いることで実部品においても HAZ 軟化部からの破断を予測できることが確認できた。

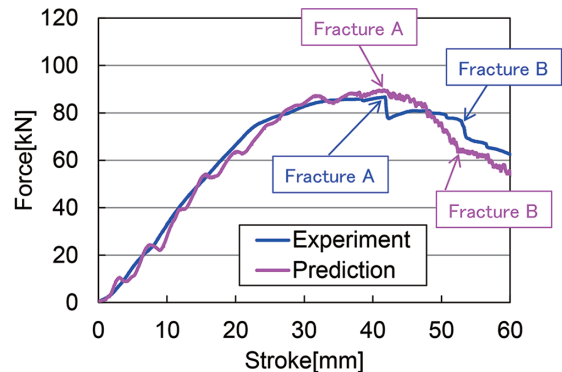


図 12 B ピラー 3 点曲げにおける荷重-ストローク線図
Force-stroke diagram in three-point bending of B-pillar

6. 結 言

自動車フルビークルモデルでの衝突解析において、材料破断を高精度に予測可能なソフトウェア (NSafe[®]-MAT) を開発した。材料破断予測において、要素サイズが異なった場合に、破断予測タイミングが変化する問題に対して、超ハイテン材にも適用可能な破断限界ひずみの要素サイズ依存性予測式を考案した。考案した関係式を NSafe[®]-MAT に反映させ、様々な要素サイズで作成した JIS5 号引張試験の FEM 解析を行った結果、実験の破断タイミングを精度良く予測できると共に、いずれの要素サイズであっても、ほぼ同じタイミングで破断を予測できることが確認できた。

また、NSafe[®]-MAT Pre に HAZ 軟化部のモデル化機能を実装すると共に、要素サイズ依存性予測式を反映した NSafe[®]-MAT を用いることで、ハット部材の 3 点曲げ実験において発生した HAZ 軟化部を起点とした破断を予測できることが確認できた。また、スパイダーメッシュと格子状メッシュの比較においては、メッシュ切りの影響は小さいことが判った。また、フランジ幅を拡大することで HAZ 軟化部破断を抑制できることが判った。更に B ピラー 3 点曲げ実験における HAZ 軟化部を起点とした破断も精度良く予測でき、実部材レベルにおける有用性も確認することができた。

参照文献

- 1) 米村繁 ほか: 鉄と鋼. 93 (4), 317 (2007)
- 2) 上西朗弘 ほか: 新日鉄技報. (393), 32 (2012)
- 3) Stören, S. et al.: J. Mech. Phys. Solids. 23, 421 (1975)
- 4) 新田淳 ほか: 塑性加工連合講演会講演論文集. 56, 39 (2005)
- 5) 富士本博紀 ほか: 溶接学会論文集. 33 (2), 144 (2015)
- 6) 富士本博紀 ほか: 自動車技術会学術講演会前刷集. (105-02), 5 (2002)
- 7) 沖田泰明 ほか: 溶接学会全国大会講演概要. (89), 36 (2011)
- 8) 谷口公一 ほか: 溶接学会全国大会講演概要. (89), 4 (2011)
- 9) 渡辺史徳 ほか: 溶接学会全国大会講演概要. (91), 238 (2012)

10) 富士本博紀 ほか：溶接学会論文集. 34 (4), 285 (2016)

11) 中村岳司 ほか：マツダ技報. (31), 14 (2013)



相藤孝博 Takahiro AITO
鉄鋼研究所 材料ソリューション研究部
主幹研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



新田 淳 Jun NITTA
鉄鋼研究所 材料ソリューション研究部
主任研究員 博士(情報工学)



濱田幸一 Koichi HAMADA
鉄鋼研究所 材料ソリューション研究部
主幹研究員



米村 繁 Shigeru YONEMURA
鉄鋼研究所 材料ソリューション研究部
主幹研究員 博士(工学)



丹羽俊之 Toshiyuki NIWA
鉄鋼研究所 材料ソリューション研究部
上席主幹研究員