
FEM 解析技術の活用による高強度鋼板の自動車車体への適用拡大

Utilization of Finite Element Method for Expanding Application of High Strength Steels to Automotive Body

比良 隆明(Takaaki Hira) 平本 治郎(Jiro Hiramoto) 坂田 敬(Kei Sakata)

要旨：

高強度鋼板の自動車車体への適用拡大は、車体軽量化に対して実用的で有効な方法である。それにより、走行時の燃費が改善され、地球環境負荷の低減という社会的な要請に応えることができる。高強度鋼板を自動車車体に適用することにより、衝突安全を損なうことなく車体軽量化が可能になるが、プレス加工時のわれ、スプリングバックなどの問題点が生じる。本報では、有限要素法解析により、高強度鋼板を車体部品に用いた時の衝突時のエネルギー吸収、テーラードブランク材の成形性、スプリングバック挙動などを明確化した結果を報告する。解析により、衝突時の部材のひずみ、ひずみ速度、成形時の割れ、スプリングバックの評価などが可能になり、成形方法のさらなる改善、高強度鋼板の開発に貢献できる。

Synopsis：

Increased application of high strength steel sheets to automobile bodies is a practically effective means to reduce body weight and to enhance the fuel mileage of automobile, which meet the social requirement of decreasing loads on the global environment. Although the reduction of body weight without sacrificing collision safety can be attained by applying steel sheets of high strength to the bodies, this type of sheets may result in forming problems such as fracture or spring-back during sheet forming. This article reports Finite Element Method (FEM) analysis which has been successfully applied to clarify energy absorption during collisions, formability of tailor-welded blanks and spring-back behavior of high strength steels used for automotive body parts. The analysis results, i.e., the estimation of strain or strain-rate of body parts during collision, fracture or spring-back during forming, contribute to the improvement of forming process and the development of high strength steel sheets.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

FEM 解析技術の活用による 高強度鋼板の自動車車体への適用拡大*

川崎製鉄技報
33 (2001) 2, 66-71

Utilization of Finite Element Method for Expanding Application of High Strength Steels to Automotive Body



比良 隆明
Takaaki Hira

技術研究所 加工技術
開発センター 主任研
究員(部長補)



平本 治郎
Jiro Hiramoto

技術研究所 加工技術
開発センター 主任研
究員(課長補)



坂田 敬
Kei Sakata

技術研究所 薄板研究
部門長

要旨

高強度鋼板の自動車車体への適用拡大は、車体軽量化に対して実用的で有効な方法である。それにより、走行時の燃費が改善され、地球環境負荷の低減という社会的な要請に応えることができる。高強度鋼板を自動車車体に適用することにより、衝突安全を損なうことなく車体軽量化が可能になるが、プレス加工時のわれ、スプリングバックなどの問題点が生じる。本報では、有限要素法解析により、高強度鋼板を車体部品に用いた時の衝突時のエネルギー吸収、テールードブランク材の成形性、スプリングバック挙動などを明確化した結果を報告する。解析により、衝突時の部材のひずみ、ひずみ速度、成形時の割れ、スプリングバックの評価などが可能になり、成形方法のさらなる改善、高強度鋼板の開発に貢献できる。

Synopsis:

Increased application of high strength steel sheets to automobile bodies is a practically effective means to reduce body weight and to enhance the fuel mileage of automobile, which meet the social requirement of decreasing loads on the global environment. Although the reduction of body weight without sacrificing collision safety can be attained by applying steel sheets of high strength to the bodies, this type of sheets may result in forming problems such as fracture or spring-back during sheet forming. This article reports Finite Element Method (FEM) analysis which has been successfully applied to clarify energy absorption during collisions, formability of tailor-welded blanks and spring-back behavior of high strength steels used for automotive body parts. The analysis results, i.e., the estimation of strain or strain-rate of body parts during collision, fracture or spring-back during forming, contribute to the improvement of forming process and the development of high strength steel sheets.

1 緒 言

昨今、素材の採掘から製品の廃棄にわたる LCA (ライフサイクルアセスメント) の視点から、自動車の地球環境に対する負荷を定量化しようとする試みがなされている。その中で走行エネルギーは総エネルギーの約 80% を占めるため、パワートレインの改善とともに車両の軽量化が極めて重要なものとして認識された。世界の鉄鋼各社の参加によるプロジェクト・ULSAB[®] はまさに車体軽量化を主目的とした活動であり、高強度鋼板の適用拡大、新工法採用などが検討された。一方、衝突安全に対しては乗員保護の観点から、各自動車会社独自のコンセプトの下に車体構造の改善が行われている。安全性確保のためにはレインフォースによる補強、使用材料の厚肉化などが有効であるが、一般に車体重量が増加する傾向にある。これを少しでも回避するべく車体構造の最適化とともに高強度鋼板

の適用が脚光をあびている³⁾。高強度鋼板を用いた場合、形状凍結性の低下、しわ発生など成形性の低下を余儀なくされる。しかし高強度鋼板の自動車車体への適用はこうした問題をはらみながらも、最も有効な軽量化手段として認識され、しだいにその使用比率が増大し、1990 年半ばから 45% 以上の使用比率の車両も見られるようになった。高強度鋼板の成形性の低下は、事前にその予測ができれば成形金型の改善によって防止でき、場合によっては単純な形状への設計変更などが可能である。高強度鋼板の自動車車体への適用にあたっては、成形性の予測、さらには車体機能としての衝突エネルギーの評価などは欠かせない技術である。こうした予測技術の有効な手段として有限要素法 (finite element method) が広く用いられるようになった。有限要素法による構造解析は古くから行われているが、これが自動車用鋼板の成形、自動車車体の機能解析に盛んに用いられるようになったのは比較的最近である。それは、有限要素法による解析を行う上では中心となるソルバー、入出力のプリ・ポストプロセサーならびにそれを動かすコンピュータが進歩したためと考えられる。

* 平成13年2月20日原稿受付

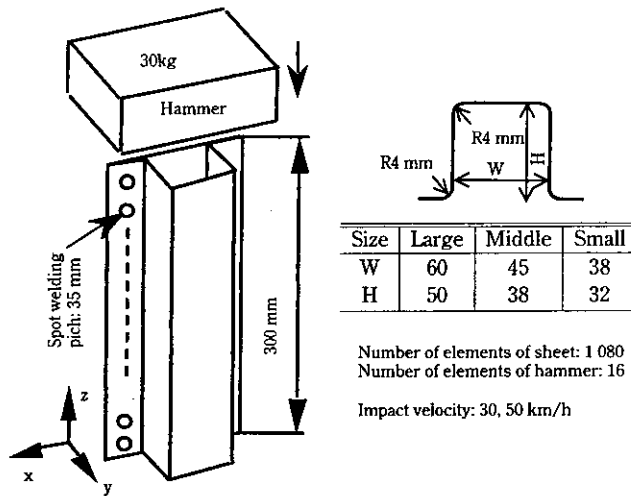


Fig. 1 Collision analysis model of hat shape section

本報告では FEM 解析を用いて、高強度鋼板を自動車車体に適用する場合の成形性、部材機能の一つである耐衝突性の評価を行った結果と実験について述べる。

2 骨格部材における衝突・変形解析

一般に部材強度が高いほど衝突時のエネルギー吸収が大きいため、フロントサイドメンバーなどの骨格部材には高強度鋼板が適する⁵⁻¹¹⁾。耐衝突部材には高ひずみ速度下での応力が高く、応力-ひずみ線図の面積で表わされるエネルギーの大きい材料が適する。系統的に衝突問題を定量化するには、実験やデータ採取が困難なため、有限要素法を用いた解析が有効である。ここでは衝突時の潰れ挙動に及ぼす材料のひずみ分布、ひずみ速度などの影響を明確にする。そのために、動的陽解法の有限要素法「LS-DYNA」を用いて骨格部材の軸方向高速圧縮変形の解析を行った。動的陽解法は剛性方程式を解く必要がなく計算の安定性に優れている。

解析例として Fig. 1 に示すようにフロントサイドメンバーを模擬したハット型断面モデルを用いた。サイズは大型、中型、小型の 3 水準であり、板厚はいずれも 1.6 mm とした。サンプルの軸 (z) 方向に 30 kg の錘りを 30 km/h と 50 km/h で衝突させ、その変形挙動を解析した。FEM 解析での材料の要素数は 1080、重りの要素数は 16 である。モデルの対称性から半分を解析に用いた。境界条件として底面の節点に対してはすべての変位と回転を、また対称面に位置する節点の x 方向変位、y、z 軸回りの回転を拘束した。要素は Belytschko-Tsay シェル要素 (4 節点) で応力-ひずみ線図を多直線近似した等方弾塑性要素とした。錘りは 8 節点個体要素で剛体とした。材料として Fig. 2 に示す TS が 300 MPa~690 MPa の 4 水準の鋼板 (A)~(D) を用いた。高ひずみ速度での特性はホプキンソン棒法衝撃引張試験機 (2 バー)¹¹⁾ により測定した。

Fig. 3 に潰れ量の実験と計算との比較を示す。高速ほど、また材料強度の小さいほど潰れ量が大きく、計算値は実験値とよく一致していることがわかる。潰れ形状も実験と同様の形態を示した。同一エネルギーを与えた場合、高強度鋼板ほど潰れ量が少ない。換言すれば潰れ量が同一であれば、材料強度が高いほど吸収エネルギー (変形に要するエネルギー) が大きい。

次にこのような高速での座屈変形におけるひずみ速度、ひずみ量を調べた。Fig. 4 には時速 50 km で衝突させた場合の、材料上端

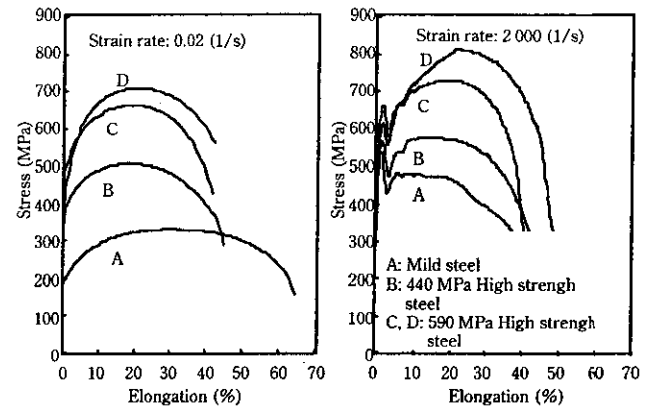


Fig. 2 Stress-strain relation of materials used in collision analysis

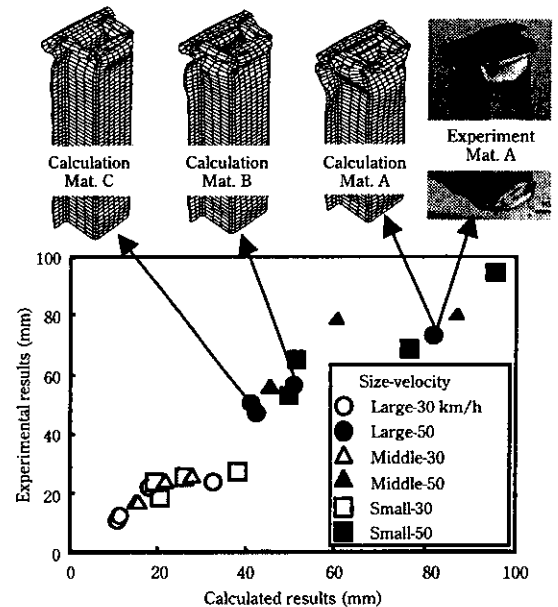


Fig. 3 Comparison of collapse length of model between experimental and calculated results

より 80 mm (ほぼ潰れた長さに等しい) までのコーナー部に位置する 16 要素のひずみ速度の変化を時間経過とともに示す。3 ヶ所でひずみ速度のピークが認められ、図中の矢印で示す座屈が発生している箇所要素で生じる。重りの速度が最も大きい上面に近い座屈部のひずみ速度が最も高く、約 550 s^{-1} である。Fig. 5 には潰れ部分 (上端から 80 mm) に該当する全体の要素 (板表、裏面および板厚中心) のひずみのヒストグラムを示す。図のように 0.05~0.1 の比較的低ひずみの占める割合が最も多い。累積値で見た場合、0.3 以下のひずみの占める割合が 80% 以上である。

軸方向の高速圧潰挙動についての結果をまとめると

- (1) 高速圧潰挙動は FEM 解析によってシミュレーションで計算値は実測値とよく一致する。
- (2) 高強度鋼板ほど潰れ量が小さく、逆に同一潰れ量では吸収するエネルギーが大きい。
- (3) 50 km/h で衝突させた場合、材料のひずみ速度の最大値は約 600 s^{-1} である。
- (4) 蛇腹状に座屈変形した部材でも 80% 以上の箇所が 30% 以下のひずみであり、比較的低ひずみでの応力がエネルギー吸収に影響する。

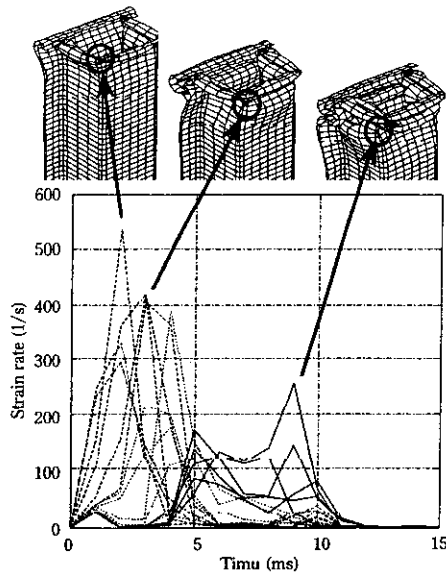


Fig. 4 Change of strain rate at corner collapse portion during collision

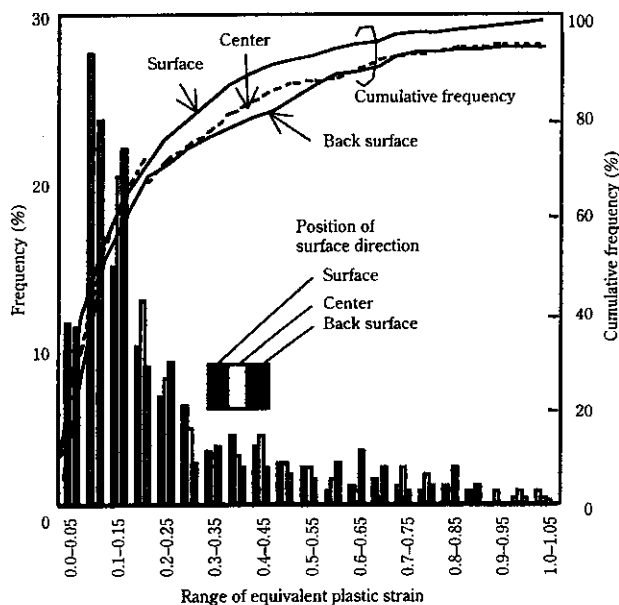


Fig. 5 Frequency of strain at collapse zone of model

3 テーラードブランク材の成形解析

自動車車体の高剛性化、軽量化、材料歩留りの向上、金型費削減など多くのメリットが期待される異鋼板の接合技術とそれのプレス成形技術が実用化されている¹²⁻¹⁴⁾。レーザ、マッシュシームなどの手法によって接合され一体化されたブランクはテーラードブランクと呼ばれ、最近では衝突時のエネルギー吸収を効率良く行うためにフロントサイドメンバなどの耐衝突部材などに適用されている。本節では変形の基本である平面ひずみ、深絞りの変形実験と、FEM (LS-DYNA) を用いた成形シミュレーションを行った結果について述べる。実験、解析に供した材料は軟鋼、370 MPa、440 MPa 級の 3 種類の鋼板とした。板厚はいずれも 0.7 mm であり、CO₂ レーザにより接合した後に成形試験に供した。

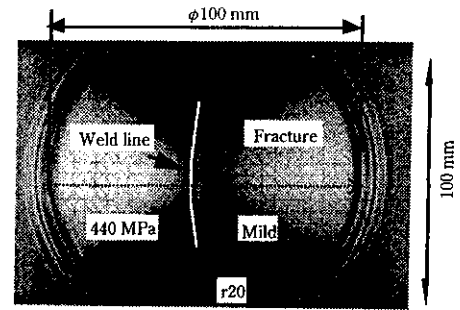


Photo 1 Weld line and fracture portion of test piece after plane strain stretch forming

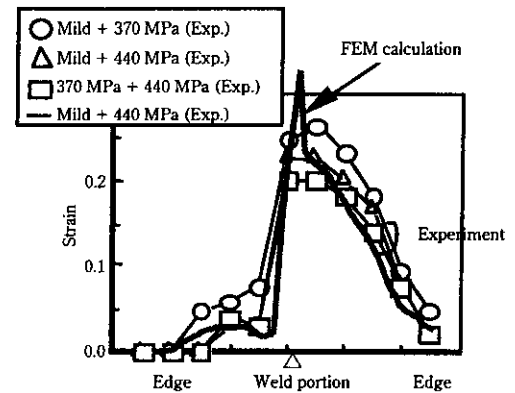


Fig. 6 Principal strain distribution after plane strain forming (right-hand side: lower tensile materials)

3.1 平面ひずみ張出し変形

プレス成形時の破断は平面ひずみ部分で生じやすい。それをシミュレーションするために 100×190 mm の接合ブランクを用い、100φの球頭ポンチで張出し成形した。材料、ポンチ間には潤滑油を塗付したビニールを重ね、極端に小さい摩擦係数（摩擦係数 $\mu < 0.05$ ）を与えた。成形により、接合部近傍は平面ひずみ変形を受け、成形高さが高くなると Photo 1 のように接合部に隣接した軟質材でネッキングが生じて破断に至る。実験と同じ条件で、軟鋼と 440 MPa 材の組み合わせで接合したブランクの平面ひずみ張出し成形の FEM 解析を行った。要素数は 3402 である。Photo 1 に示す破断線に沿って主ひずみ分布を実測した結果を FEM 解析結果と合わせて Fig. 6 に示す。接合部から右が軟質材側に相当し、接合部近傍が最もひずみが大きく、接合部から遠ざかるとともにひずみが減少していく。FEM 解析の主ひずみ分布も同じ傾向を示すことが認められる。

3.2 深絞り変形

テーラードブランク材の深絞り変形挙動を把握するために、軟鋼と 440 MPa 材の接合材を深絞り成形した。ブランクサイズは φ93 mm であり、直径の 3/4 を 440 MPa 材、残りを軟鋼で接合したケース (A)、中央で接合したケース (B)、(A) と材料を逆にしたケース (C) の 3 種類の接合ブランクを用いた。所定の高さまで成形し、板厚分布などを調べた。一方、同一条件で FEM によるシミュレーション解析を行った。要素数は 1792~2145 である。Fig. 7 に実測値と計算結果の比較を示す。(A) から (C) いずれのケースも実験値

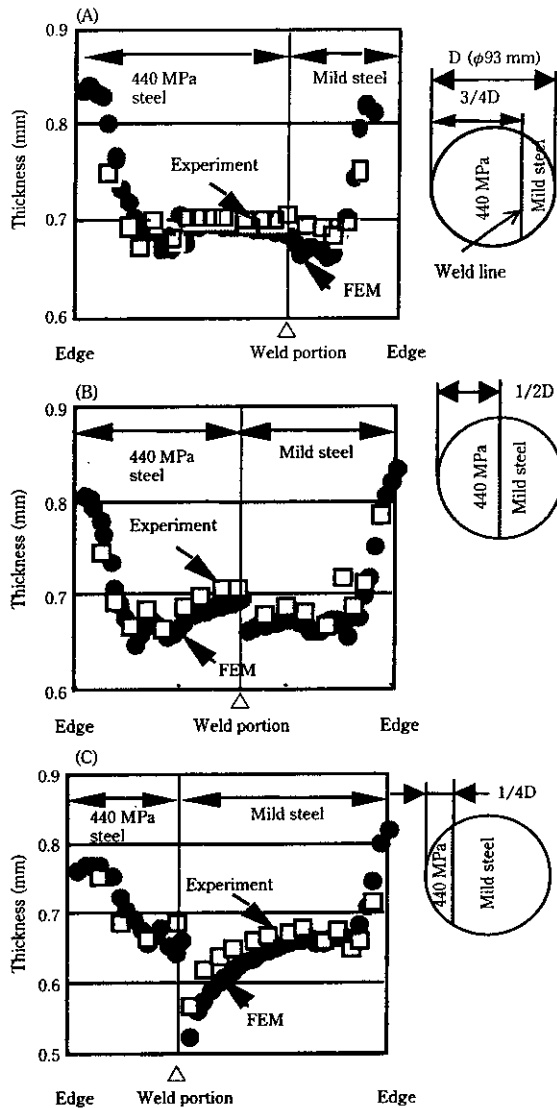


Fig. 7 Comparison in thickness distribution of cups between experimental and calculated results after deep drawing

と計算結果とはよく一致している。ケース (A) の場合、板厚分布は両材ともほぼ同様である。ケース (B)、すなわち軟質材と硬質材をブランクの中央で接合した場合、接合部近傍では軟質材側の板厚減少が大きい。ケース (C) の場合、接合線近傍の軟質材の板厚減少がさらに大きく、破断する危険がある。このように深絞りの場合、接合位置により破断危険部が異なり、部品の機能の他に成形時の破断を考慮した素材の組み合わせ設計が必要である。

前述の結果から次のことが明らかになった。

- (1) 平面ひずみ変形、深絞り変形とも実験結果と FEM 計算結果とは良く一致する。
- (2) テーラードブランク材の成形にあたっては、材料強度の組み合わせ、接合位置の最適化が必要であり、FEM によって事前予測することが可能である。

4 高強度鋼板の形状凍結性解析

高強度鋼板を自動車車体に適用する場合、成形上の最大の問題は、われ・しわの発生とともに、形状凍結性、すなわちスプリングバック、反りであるといっても過言ではない。当社ではこれに対応するべく、二つの手法により材料と形状凍結性との関係を定量化してい

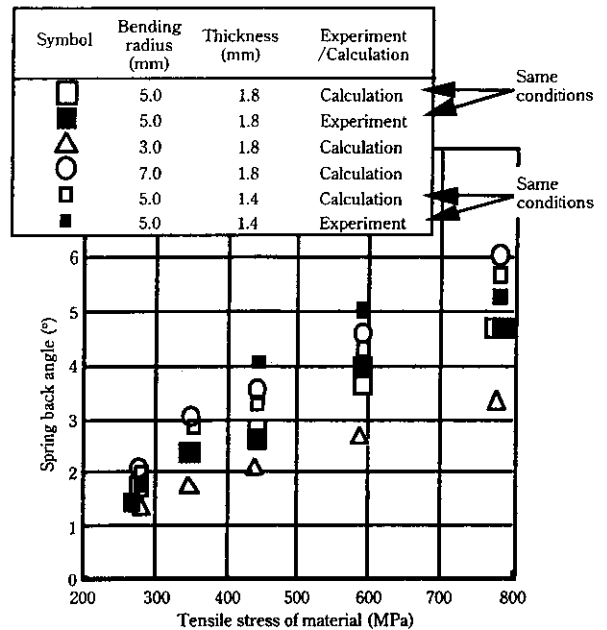


Fig. 8 Effect of tensile stress, thickness and bending radius on spring back, and its comparison between experimental and calculated results

る。一つは曲げ変形量が既知の場合であり、弾塑性ひずみ増分理論に基づく解析^{15,16)}を適用する。一方、曲げ変形量が未知の場合には FEM 解析を用いる。本節ではこれらの手法に基づいた解析例を述べる。

4.1 弾塑性ひずみ増分理論に基づく解析

板厚方向に要素を細分割し、各要素に曲げひずみ増分を与え応力を計算する手法である。計算上の主な仮定は以下の通りである。

- (1) 板厚方向応力を 0 にした平面応力
- (2) 板厚方向のみ塑性異方性考慮
- (3) 剪断応力を無視

材料の加工硬化特性、応力増分、ひずみ増分関係式については、文献¹⁵⁾を参照されたい。

フロントサイドメンバのような比較的単純なハット状の曲げを受ける場合の形状凍結性について検討した。ハット曲げ成形後の形状凍結性は、一般的にボンチ肩でのスプリングバックと縦壁部の反りで評価されている。前述の解析の妥当性を検討するため、ボンチ肩でのスプリングバック角度、および縦壁部での反り曲率に着目した実験を行い解析と比較した。

ボンチ肩でのスプリングバック挙動に及ぼす材料特性の影響を明らかにするため、270～780 MPa 級の各種鋼板を用いて、曲げ実験を行い、成形後のスプリングバック角度を調べた。Fig. 8 にその結果を示すように、高強度材ほど、板厚が薄いほど、ボンチ肩半径が大きいほどスプリングバック量は増大する。また、実験値と解析計算値には良い一致が認められる。

次にハット曲げ成形における縦壁部の反り挙動に及ぼす材料特性の影響を明らかにするため、270～590 MPa 級の鋼板を用いて、ハット曲げ成形の縦壁部に相当する曲げ・曲戻し変形を与え、除荷後の反り曲率を調べた。その結果を Fig. 9 に示す。高強度材ほど反り曲率が大きく形状凍結性が低いこと、降伏応力よりも引張応力との相関が強いことが分かる。解析値も実験値とはほぼ同様の傾向を示すが、高強度材の場合、解析値が実験値より大きい。これは、解析

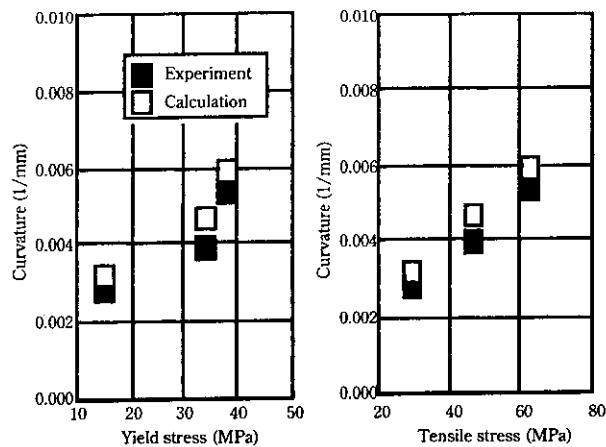


Fig. 9 Effect of yield stress and tensile stress on wall curvature of specimen after bending-reverse bending, and its comparison between experimental and calculated results

ではダイ肩に材料がなじんで曲げられるという仮定に基づいているのに対し、実際の成形においては、条件によって材料がダイ肩に完全に巻き付かないことによる影響と考えられる。

曲げ半径があらかじめわかっている場合、上記の手法により形状凍結性の予測が比較的精度良くできる。しかし高強度鋼板の反り解析結果のように、実験結果と若干異なる場合もあり、これは前述したように、予測した曲げ半径に曲げられていない場合に生じる。このような場合には以下に述べる FEM による解析が有効である。

4.2 FEM によるスプリングバック解析

曲げ変形量が未知であり、ねじれのような 3 次元変形をとまう場合には FEM 解析が有効である。ここでは FEM プログラムとして「JSTAMP-WORKS」を用いた解析事例をとりあげる。本プログラムでは成形までは、先述した動的陽解法に基づく「LS-DYNA」で、スプリングバック時には静的陰解法プログラム「NIKE3D」で計算する。

Fig. 10, 11 には 590 MPa 級の高強度鋼板をダイ肩半径を変化させてハット曲げ成形した時の形状凍結挙動を解析した例を示す。形状凍結性は Fig. 11 に示す口開き量で評価した。FEM によらない解析ではダイ肩での曲げ半径が小さくなるとともに曲げひずみが増大するので、曲げモーメントが増加し、模式的に同図の破線で示すようにダイ肩半径が小さくなるとともに口開き量は増加する。一方 FEM ではダイ半径が小さい場合むしろ口開き量は小さく、実際に経験する形状凍結挙動と一致している。この現象が計算によって求められることは FEM 以外の手法では困難である。曲げ変形量が不明な場合の形状凍結挙動解析には FEM 解析が有効な手法となる。

4.3 形状凍結性の向上対策

次に形状凍結性を向上させる方法に関し、先の弾塑性ひずみ増分理論解析に基づいて検討した結果を述べる。形状凍結性を向上させるためには原理的に以下の方法が考えられる。

- (1) 板厚内の応力分布によって生じる曲げモーメントを減少させる。これには成形後期の張力付与、ダイ肩での曲げ変形を極力減らす工法などが有効である。
- (2) 逆方向のモーメントを与える。たとえば縦壁の反りに対しては、ダイ肩通過後に予測される反りと逆方向の反りをポンチ側面と与えることが考えられる。またポンチ肩部のスプリングバックに対しては 2 工程目の成形で 1 工程目の成形より小さいポ

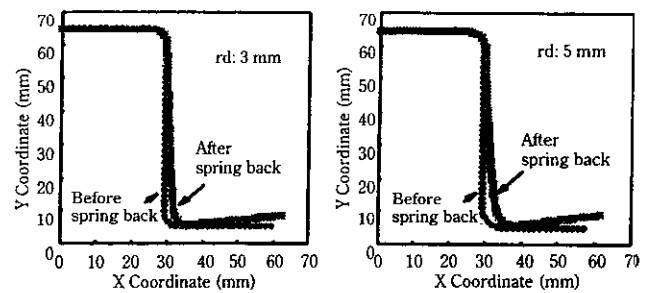


Fig. 10 Comparison of die shoulder radius (rd) on sectional shape of specimen after forming by FEM analysis

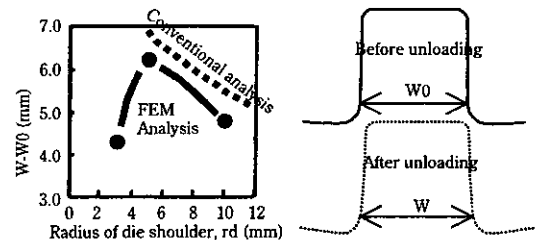


Fig. 11 Effect of die shoulder radius (rd) on spring back by FEM analysis

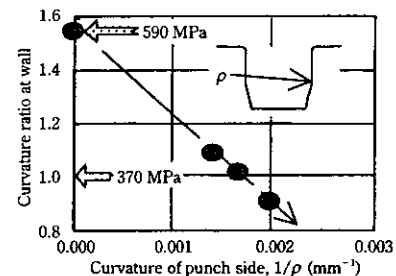


Fig. 12 Example of improvement of wall curl by reverse moment at punch side

ンチ肩半径の工具を用いるのが効果的である。

Fig. 12 にダイ肩半径 10 mm の工具で板厚 1.8 mm の 590 MPa 材をハット曲げ成形する場合の形状凍結性向上の解析例を示す。縦軸は 370 MPa 材の縦壁部の反りに対する 590 MPa 材の反りの比を示す。横軸はポンチ側面（材料の縦壁部に相当）の曲率であり、予測される反りと逆方向の曲率を付けて反りを矯正させた。ポンチ側面が平坦 ($1/\rho = 0$) な従来工具を用いた場合、590 MPa 材の反りは 370 MPa 材の約 1.6 倍である。しかし同図のように 590 MPa 材に対してポンチ側面に逆方向反り曲率を与えて成形すれば、従来工具で成形した 370 MPa 材の曲率に近づき、0.0017 の曲率（半径 600 mm）を与えれば 370 MPa 材レベルの反りにおさえられる。

以上をまとめると、

- (1) 塑性異方性を考慮した弾塑性歪増分理論による解析はあらかじめ曲げ変形量がわかっている場合に適用でき、スプリングバック、反りの予測が可能である。
- (2) 曲げ変形量が未知な場合、FEM 解析が有効である。
- (3) ハット成形時の縦壁に生じる反りの矯正技術例を示した。

5 結 言

本報告では FEM 解析を中心に、高強度鋼板を自動車車体に適用

する場合の耐衝突性、成形性の評価を行った結果、下記の知見を得た。

(1) 骨格部材の衝突解析を行い、衝突時の潰れ変形に及ぼす材料強度、速度、潰れ時のひずみ、ひずみ速度などの影響を明確化した。

(2) 基本的な平面ひずみ、深絞り成形におけるテーラードブランク材の成形性解析と実験を行い、FEM 解析による評価の有効性を確認した。

(3) 高強度鋼板の形状凍結性解析を行い、材料強度、板厚、曲げ半径などの影響を明らかにした。

参 考 文 献

- 1) 大見泰明, 中西栄三郎, 森 孝男, 橋本浩二, 清水哲雄, 藤原東彦, 小野守章:自動車技術会シンポジウム, (2000)05-00, 8
- 2) たとえば橋本浩二, 栗山幸久, 滝田道夫:自動車技術会 1998 年春季大会 材料フォーラム前刷り集, (1998), 1
- 3) 安田 顕, 古君 修, 清野芳一:川崎製鉄技報, 32(2000)1,1-6
- 4) 柴田真志:第 180 回塑性加工シンポジウム, (1998), 9
- 5) S. Takagi, K. Miura, T. Hira, T. Shimizu, and S. Tanimura: 31st ISATA, 98NM008
- 6) 水井直光, 福井清之, 小嶋啓達, 山本三幸, 川口嘉昭, 岡本篤樹: CAMP-ISIJ, 9(1996), 1100
- 7) 上西朗弘, 末広正芳, 栗山幸久, 臼田松男: CAMP-ISIJ, 9(1996), 1112
- 8) 佐藤健太郎, 吉武明英, 大北智良: CAMP-ISIJ, 9(1996), 1104
- 9) 比良隆明, 三浦和哉, 古君 修, 小原 隆, 谷村真治:塑性加工春季講演会論文集, (1997), 181
- 10) 比良隆明, 三浦和哉, 坂田 敬, 古君 修, 谷村真治:第 48 回塑性加工連合講演会論文集, (1997), 253
- 11) 石川雄一, 三村耕司, 三浦和哉, 古君 修, 谷村真治:日本機械学会第 74 期講演論文集, (1996)96-15
- 12) 池本公一, 杉浦宏明, 東 和男, 有馬幸一, 高砂俊之:塑性と加工, 32(1991)370, 1383
- 13) R. H. Wagoner and F. I. Sanders: Proc. of Plasticity '95, (1995), 1051
- 14) 比良隆明, 加藤俊之, 木谷 靖:46 回塑性加工連合講演, (1995), 219
- 15) 比良隆明, 飯塚栄治, 加藤俊之:自動車技術会学術講演会, 942(1994), 65
- 16) 飯塚栄治, 平本治郎, 比良隆明, 古君 修:自動車技術会学術講演会, (1999)81-99, 21