

(論文)

超高強度鋼板によるロールフォーム技術を活用した軽量車体構造コンセプト

Light Weight Vehicle Side Structures Made by Roll-forming Ultra High Strength Steels



橋 美枝*
Mie Tachibana



渡辺 憲一*
Kenichi Watanabe



M. Wiemann**



D. Frankenberg**

Roll-forming technologies for ultra high strength steels are one of the most effective ways to decrease automobile body weight and improve vehicle crash performance. In this study, a new vehicle side structure, that satisfies IIHS impact test criteria, was developed by using roll-forming technologies that do not require the conventional stamping process. From a CAE estimation of the side structure module, the newly developed structures are lighter and perform better under crash conditions than conventional manufactured structures.

まえがき = 自動車の安全衝突性向上の要求により、世界各国で衝突規制の強化が進められているとともに、JNCAP (Japan New Car Assessment Program), Euro NCAP, IIHS (Insurance Institute for Highway Safety) に代表されるように、車両衝突試験のレーティング結果が公表されるようになった¹⁾。それに対応するため、自動車会社各社では車体 (Body-in white : 以後, BIW) 構造の強化を進めており、その結果車体重量の増加を引き起こしている。一方、環境保護の観点から CO₂ 削減のため、車体の軽量化が求められている。これらの相反する要求を満たすために、鋼製 BIW において高強度鋼板 (High strength steel : 以後, HSS) の適用をはじめ、様々な技術が試みられている。また引張強度が 780MPa を超える超高強度鋼板 (Ultra high strength steel : 以後, UHSS) の適用²⁾ やホットスタンプ、ハイドロフォームなどの適用も始められている³⁾⁴⁾。一方、UHSS の有効利用技術の一つとして、ロールフォーム技術の適用も注目を集め始めている⁵⁾。この技術は製造コストが低く、UHSS のプレス成形時に問題となる寸法精度にも優れており、部品の閉断面化による強度、剛性向上効果が期待できるなど様々な長所がある。しかしながら、断面形状を長手方向で変化させることが難しいことや、ほかの部品との接合の問題など、BIW への適用には課題が残されている。

そこで本稿では、車体軽量化に対する、UHSS を用いたロールフォーム部品適用の優位性を確認することを目的として、現在最も対応が難しいといわれている IIHS が実施している、大型 SUV (Sports utility vehicle) 車との側面衝突を模擬した側突試験に対応できる軽量な BIW 側面構造コンセプトを検討した。

1. 本検討の概要

1.1 本検討の基本的な考え

本検討の基本的な考えは、次のとおりである。

部品のロールフォーム化により、BIW へ UHSS を最大限適用することにより軽量化を追求する。

開発する車体構造コンセプトの実現性を高めるため、スペースフレームのような構造ではなく、現行のプレス成形部品をベースとした BIW に対し、ロールフォーム部品を組み込む構造とする。

1.2 本検討のプロセス

本検討は次の手順で進めた。

センタピラー、サイドシル、クロスメンバなどの主要な側突対応構造部品について、UHSS を適用したロールフォームによる閉断面構造のアイデアを抽出する。各部品の単品レベルでの衝突シミュレーションにより、ベスト案を抽出する。

得られたベスト案を BIW モジュールモデルに組み込み、IIHS 側突試験を模擬したモジュールレベルでの衝突シミュレーションにて衝突性能の確認を行う。

一部の部品については試作を行い、圧壊試験により性能を確認する。

1.3 本検討のターゲット

IIHS の側突試験には「構造性能」、「障害値」、「頭部保護」の 3 つの基準がある。本検討では構造性能において「Good」の評価を得ることを目標とした。「障害値」「頭部保護」についてはエアバックやトリムなどの様々な部品に影響されるため、検討の対象としなかった。

図 1 に IIHS 側突試験の概要と評価基準を示す。比較車両は、590MPa までの HSS を使用したプレス成形部品

* 鉄鋼部門 加古川製鉄所 技術研究センター ** voestalpine Automotive Inc.

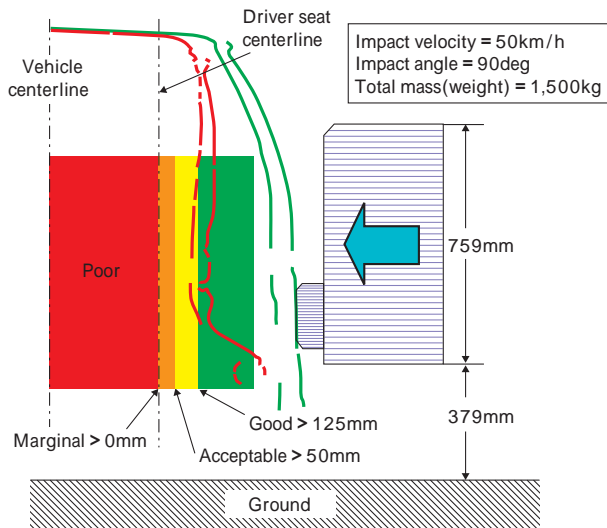


図1 IIHS側突試験の概要と評価基準

Fig. 1 Schematic illustration and rating of IIHS side impact crash test



図2 比較車両の車体構造

Fig. 2 BIW of reference vehicle

構造のBIWをIIHS側突試験に対応できるように強化した2,000ccクラスの中型セダン(図2)を用いた。これに対し、側面主要骨格部材であるセンタピラー、サイドシル、ルーフレール、フロアクロスメンバに対し、プレス部品とUHSSロールフォーム部品を組み合わせた構造を検討し、軽量化効果を算出した。

2. 使用材料

図3に各種鋼板の強度と伸びの関係を示す。また使用した各材料の機械的特性およびSwiftのパラメータを表1に示す。

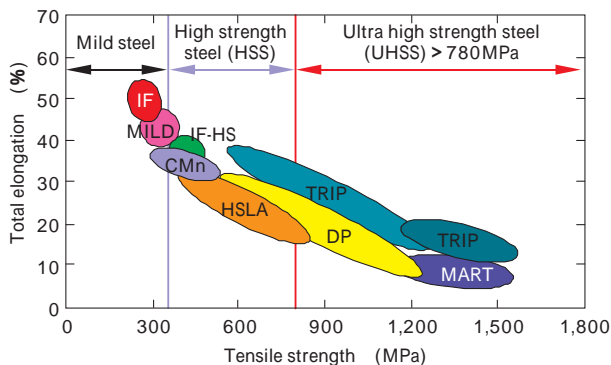


図3 各種鋼板の強度と伸びの関係

Fig. 3 Total elongation vs. tensile strength for various steel sheets

表1 使用した材料の機械的特性

Table 1 Mechanical properties of steels

Grade	YS (MPa)	TS (MPa)	TE (%)	$= F(E_0 + \rho)^n$			
				F	E_0	n	
TS270	IF	192	308	48	585.3	0.0153	0.270
TS440	CMn	334	443	37	715.9	0.0197	0.190
TS590	DP	480	605	28	922.2	0.0112	0.146
TS780	DP	529	827	20	1,262.4	0.0017	0.137
TS980	DP	724	1,009	15	1,403.4	0.0007	0.093
TS1,270	DP	1,150	1,271	8	1,490.5	0.0019	0.040

3. 各部材の単品での構造アイデアおよび衝突性能検討

3.1 解析手法

本検討では、解析モデル作成コスト低減および計算時間短縮のため、マルチスケールシミュレーションと呼ばれる手法を活用した。

汎用ソフトLS-DYNAを用い、要素タイプ16(完全積分)、要素サイズ約2.5mm、動的引張試験で測定したCowper-Symondsモデル⁶⁾によりひずみ速度依存性を考慮した。

3.2 センタピラー

図4にセンタピラーのアイデアを抽出した例を示す。比較車両では、センタピラー上部においてプレスにてハット型に成形されたアウトレインフォースの内側にコの字型補強レインフォースが追加された構造となっている。これに対し、本検討ではアウトレインフォースの車両前後の縦壁をTS = 1,270MPa級のUHSSロールフォーム部品に置き換える構造とした。この部品をプレス部品に結合することにより、部材強度を向上させるとともに、BIWへの組込性能も両立させている。

これらのアイデアに対し、モデルの作成時間、コストを削減するため、乗員の胸部、腰部相当位置の断面のみを抽出し、一様断面に引伸ばしたモデルにて、側突時の変形モードを考慮した解析を実施し、断面特性の評価を行った。

胸部相当位置はR = 150mmの剛体にて3点曲げ圧壊解析、腰部相当位置はIIHS側突バリアのバンパを模擬した

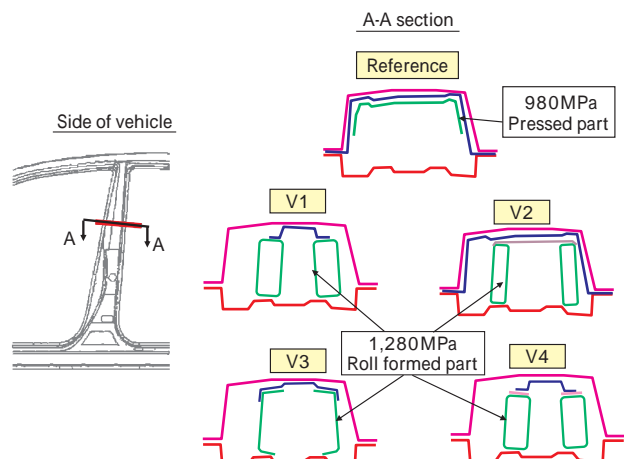


図4 センタピラーのアイデア抽出の例

Fig. 4 Structural ideas about center-pillar

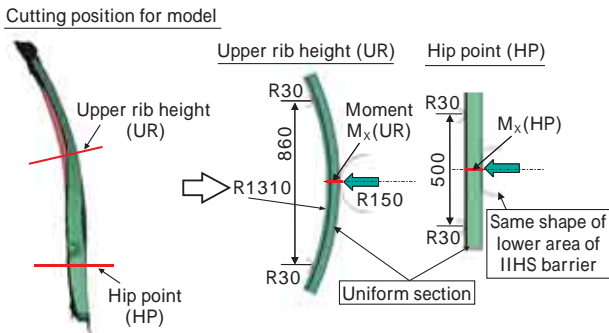


図5 センタピラーのシミュレーションモデル
Fig. 5 CAE model of center-pillar

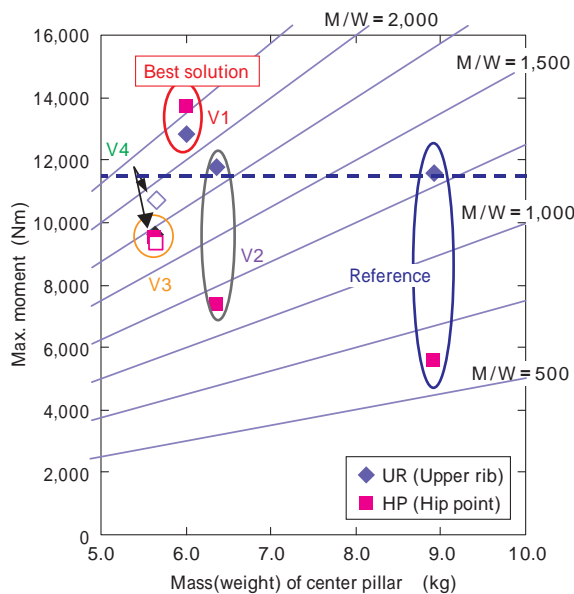


図6 センタピラーの質量(重量)と最大モーメント比較
Fig. 6 Maximum moment vs. mass(weight) of center-pillar

剛体にて4点曲げ圧壊解析を行った。図5にそのモデルの例を示す。

図6に各モデルの重量と圧壊時の最大モーメント比較を示す。胸部相当位置については、UHSS製パイプを2本束ねたV1が最も重量効率が優れている。腰部相当位置については、全ての形状において比較車両よりも重量効率が優れている。一般的に、センタピラーの下部の曲げ強度が高すぎると側突において胸部付近での座屈の危険性が高まる。そこで適切な強度バランスを得るため、V1の腰部相当位置でパイプを切断することとした。図7に切断後の断面形状と最大荷重を示す。

3.3 フロアクロスメンバ

センタピラー下部にクロスメンバを追加することは、側突時にサイドシルの侵入を防止するのに有効な手段であるが、この部分には後席乗員の足先が入るため、レイアウトの制約がある。そこで図8に示すように、クロスメンバをフロアに設置する方法と、ロールフォーム製パイプをサイドシル上部から直接フロアトンネル側に繋ぐ方法(以後、air beam)の2タイプを検討した。このときプレス部品のブラケットを追加することで、クロスメンバをサイドシルとフロアパネルに取付けるようにしている。

また短いサイドシルとフロアパネルにクロスメンバを

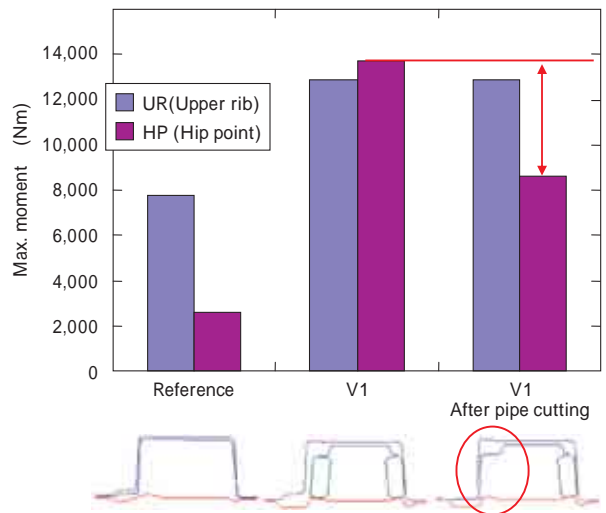


図7 腰部相当位置の最大モーメント比較
Fig. 7 Maximum moment after pipe cutting on HP section

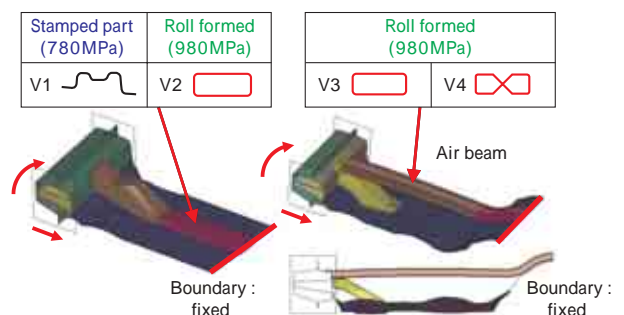


図8 フロアクロスメンバの構造アイデアの一例
Fig. 8 Examples of structural ideas about floor cross member

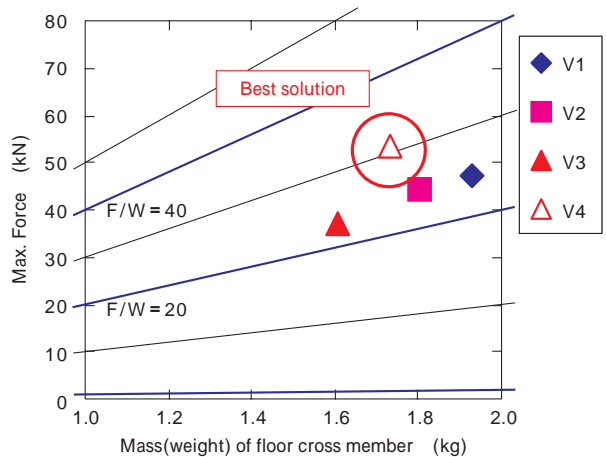


図9 フロアクロスメンバの質量(重量)と最大荷重の比較
Fig. 9 Maximum force vs. mass(weight) of floor cross member

接合し、サイドシル前後端に側突時の動きを模擬した並進とねじり回転を与え、フロアクロスメンバを圧壊した単品衝突シミュレーションを行い、性能を評価した。図9に重量と圧壊時の最大荷重を示す。この結果、V4が最も重量-性能効率が良かったため最適案とした。

3.4 サイドシル

比較車両では、プレスにてハット型に成形されたアウトとインナに部分的にバルクヘッドなどで補強した構造となっている。これに対し、本検討では部材内部にハット型や十字型などの補強レイフォースを追加した構造とした。

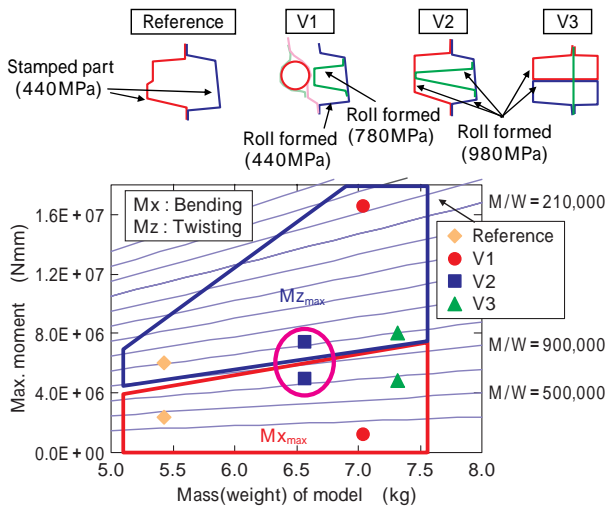


図10 サイドシルの質量(重量)と最大モーメントの比較
Fig.10 Maximum moment vs. mass(weight) of side sill

センタピラーまわりで車体前後方向にあるクロスメンバの位置でサイドシルを切断し、センタピラー下部の部分を、側突時のねじられながら曲げ座屈変形するモードにて性能を評価した。重量・性能の比較を図10に示す。曲げ強度(Mx)とねじり強度(Mz)のバランスを重視するとともに、組立て性を考慮し、V2の3つのロールフォーム製ハットチャンネル構造を最適案とした。

3.5 ルーフクロスメンバ

ルーフクロスメンバに関しては、種々の断面形状について材料強度、板厚を変化させ検討を実施したが、目標とする性能は得られなかった。これは乗員のヘッドクリアランスを確保するため、メンバの厚みを非常に薄くする必要があり、側突時にメンバが弾性座屈し、材料強度アップによる部材強度アップ効果が小さかったからだと考えられる。また本検討ではルーフパネルをモデル化していないため、パネルによるサポート効果が考慮されていないことも原因と考えられる。

そこで、成形性を考慮し、590MPa級材を適用することとした。

3.6 ルーフレール

ルーフレールについては、フロントピラーとセンタピラーの中間位置付近で最も断面サイズが小さくなっている。ロールフォーム部品を用いる場合、プレスなど後加工により部分的に断面サイズを変更しないと、この中間位置付近で最大断面サイズが決まる。そのため現行のプレス部品に比べ、センタピラーとの取付位置において断面が小さくなり曲げ強度が弱くなる。そこで本検討では440MPa級材の現行プレス部品による構造を採用した。

図11に単品側突シミュレーションで見出した各部材の最適構造を示す。

4. BIW 側突性能の検討

単品衝突シミュレーションにて得られた各部材の最適案を車体側面構造に組み込み、IIHS 側突試験を模擬したモジュール衝突シミュレーションにて性能を評価した。

車体の運転席側、センタピラーを中心として車体前後の約900mmをモデル化した。ここでサイドシル前後端の境界条件は周辺部材強度を考慮して可動とし、それ以外の境界は剛体平板に固定した。モデルの車体重心位置には車両相当の質量(重量)と慣性モーメントを与えている。またIIHSの側突試験ではハニカムバリアを使用するが、シミュレーションコストを削減するため、パンパ部とフロントグリル部を分割した剛体とし、実際のバリアと強度特性が同等となるばねを用いてつないでいる。この剛体にバリア質量(重量)1,500kg、初速度50km/hを与え、車体構造モジュールに衝突させた。

図12に開発した車体側面構造のモジュール衝突シミュレーションでのバリア最大侵入時の変形状態を示す。フロアクロスメンバの支えによりサイドシルの折れやねじりが抑制され、ルーフクロスメンバもルーフレールの折れを防止している。また、センタピラーも局所的な折れは発生していない。

図13に比較車両と開発した車体側面構造の最大侵入時におけるセンタピラー変形状態、表2に車両の質量

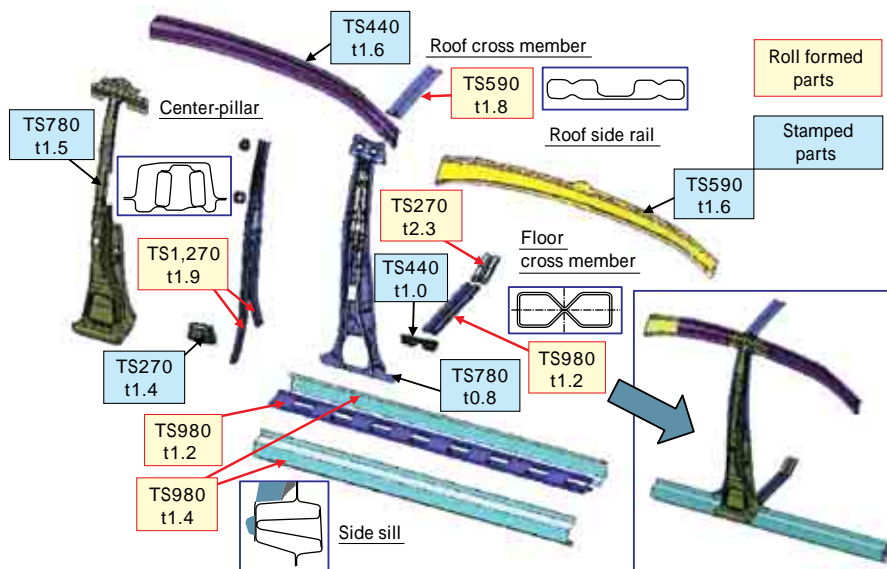


図11 単品衝突シミュレーションでの最適側面構造
Fig.11 Best solutions of BIW side structure from the unit simulations

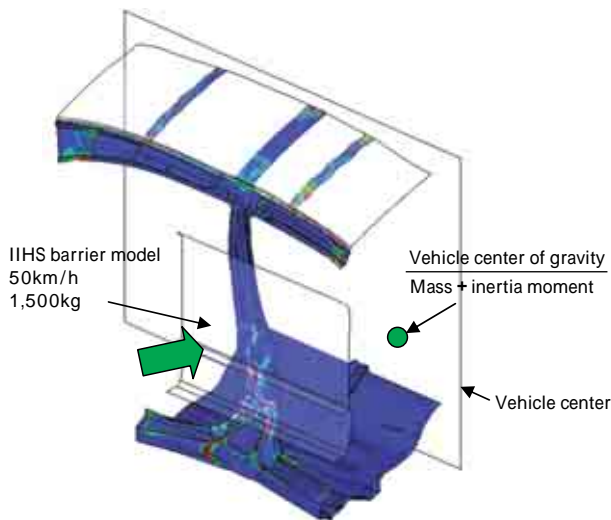


図12 モジュール衝突シミュレーションでのバリア最大侵入時の変形状態
Fig.12 Deformation of developed side structure module

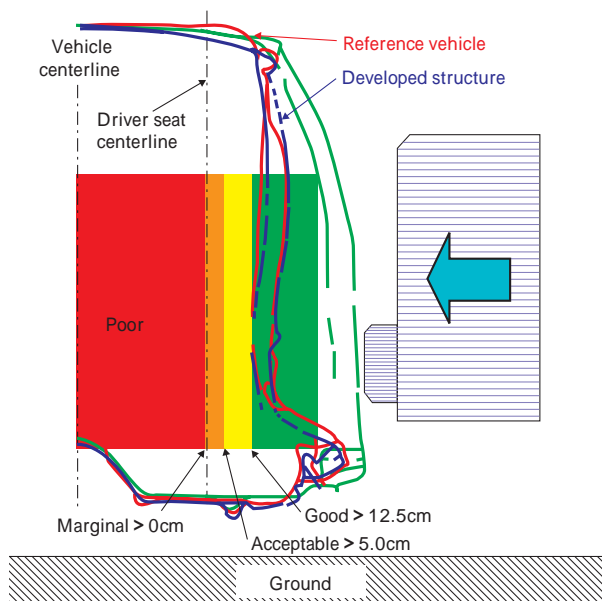


図13 最大侵入時のセンタピラーの変形状態の比較
Fig.13 Center-pillar deformation and rating result of IIHS side impact crash test

表 2 比較車両と開発した側面構造の質量(重量)比較

Table 2 Mass (weight) reduction of developed side structure module

	Module mass(weight) (kg/vehicle)
Reference vehicle (HSS : stamped parts)	61.1
Developed side structure (UHSS : rollformed parts)	46.7
results	- 14.4

(重量)比較を示す。両車両ともIIHS側突レーティングの構造面において「Good」の評価を得ている。また、開発した車体側面構造の質量(重量)は比較車両より、約14.4kg/台の軽量化を達成している。

5. 部品試作および性能試験

5.1 部品試作および性能試験の概要

これまで衝突シミュレーションで検討してきた車体側面構造の実現性を確認するため、各部品の試作を行っ

た。自動車会社の既存の製造設備を活用することを考え、プレス部品とロールフォーム部品はアーク溶接にて接合している。サイドシル、フロアクロスメンバ、ルーフクロスメンバのロールフォーム部品内での接合にはレーザー溶接を適用した。

さらにセンタピラーとサイドシルについて静的圧壊試験を行い、衝突シミュレーションで予測した衝突性能が実際の部品で発揮できるか確認を行った。実験条件は試作部品の変形が側突試験時のBIWの変形状態を模擬できるように圧壊シミュレーションによって決定した。

5.2 センタピラーの性能試験

試験コストを減らすためIIHS側突バリアと同形状の剛体バリアを、IIHS側突試験のバリア衝突位置に押し込み座屈させた。

写真1に圧壊試験の外観および圧壊後の座屈状態を示す。モジュール衝突シミュレーションとほぼ同様の変形状態が得られており、座屈位置においてもパイプに破断は生じていない。

図14に試験(TEST1~3)と衝突シミュレーション



写真1 センタピラーの圧壊試験および試験後の座屈状態
Photo 1 Center-pillar collapse test device and deformation of center-pillar after the test

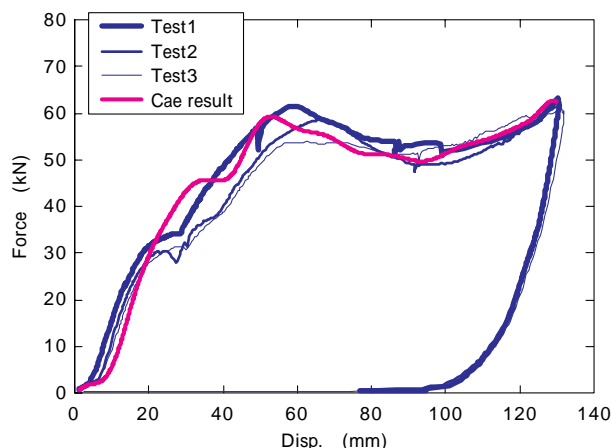


図14 センタピラーの荷重変位線図
Fig.14 Force-displacement curves on center-pillar collapse test



写真2 サイドシルの圧壊試験および試験後の座屈状態
Photo 2 Side sill collapse test device and deformation of side sill after test

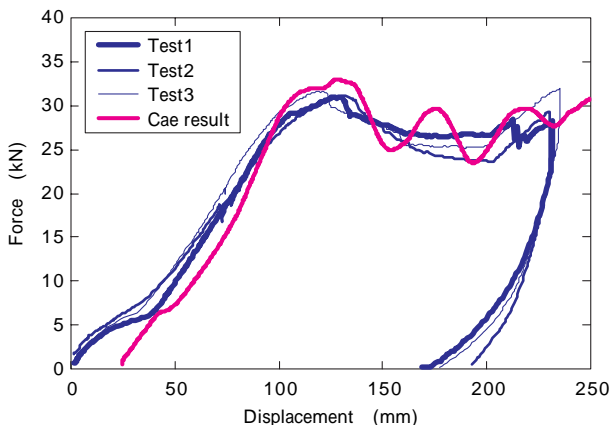


図15 サイドシルの荷重変位線図
Fig.15 Force-displacement curves on side sill collapse test

(CAE)の荷重変位線図を示す。試験と衝突シミュレーションの結果はよく一致しており、本センタピラーが設計どおりの衝突性能を発揮できることを確認した。

5.3 サイドシル

センタピラー下部を組合せたサイドシルの前後端を変形可能な厚板で固定し、センタピラー下部を車室内部方向に押込むことにより、IIHS側突試験時の変形状態と同様のねじり、曲げ変形を与えられるようにした。

写真2に圧壊試験の外観および圧壊後の座屈状態を示す。モジュール衝突シミュレーションとほぼ同様の変形状態が得られており、図15に示す荷重変位線図においても試験(TEST1 ~ 3)と衝突シミュレーション(CAE)はよく一致している。本サイドシルが設計どおりの性能を発揮していることが確認できる。

むすび = IIHSの側突試験の基準を満たす新概念を開発し、以下の結果を得た。

従来のプレス部品構造と比較し、大幅な軽量化が可能な新軽量車体構造コンセプトを見出し、UHSSのBIWへの適用方法としてロールフォーム技術の優位性を確認した。

部品試作を行い、圧壊試験を行った結果、各部品は衝突シミュレーションで予測したとおりの衝突性能を発揮できることを確認した。

マルチスケールシミュレーションの活用により効率よく最適構造のコンセプトを導き出すことが可能となった。

本稿は2006年4月、2006 SAE (Society of Automotive Engineers) World Congress (デトロイト)での発表に加筆した内容である。

参考文献

- 1) Tocalino E. : SAE Paper (2003) No.2003-01-0230.
- 2) Ojima Y. et al : SAE Paper, SP-1349 (1998) p.39-48.
- 3) Schiessl G. et al : Proc IDDRG conference (2004) p.158-166.
- 4) Mason M. : Proc Int Symp Automot Technol Autom, VOL. 29th NO. Vol.1 (1996) p.143-156.
- 5) Lengauer G. : Proc SCT2005 Int Conf on steels in Cars and Trucks (2005).
- 6) Chen, X. M. et al : SAE Paper (2005) No. 2005-01-0354.