

(論文)

自動車用アルミ押出バンパ補強材の衝突強度評価

Design Considerations for Automotive Bumper Reinforcement Parts for Impact Test Requirements Based on Aluminum Extrusion Processes



橋村 徹*

Toru Hashimura



福本幸司*

Kouji Fukumoto



橋本成一**

Narikazu Hashimoto



石飛秀樹***

Hideki Ishitobi

New deformation behavior estimation methods for automotive bumper reinforcement parts made of aluminum extrusion tubes subjected to impact loads are presented in this paper. The technology consists of two primary methods: 1) a prediction method for beam bending collapse strength; and 2) deformation prediction after load impact. As a result of these new estimation technologies, the amount of deformation after impact test could be predicted, based on the sectional shape of the extruded aluminum beams.

まえがき = 自動車用バンパ補強材は、車体前後端に取付けられる部品のため、軽量化メリットの大きい部材であり、北米や欧州においては比較的早くからアルミ化の検討が進められてきた¹⁾。わが国においても自動車軽量化の潮流を受け、これまで主流であった鋼板からアルミニウム材への転換が着実に進められている。

ほかの部位に先駆けて軽量化が進められている背景には、バンパ補強材が次のような特質を持っているためと考えられる。

- ・バンパは重心位置から離れた車体端部の部品であり、その軽量化により慣性モーメントが低減されれば走行運動性能の向上が期待できる。
- ・外付け部品のため、ほかの部品設計との干渉が少なく、比較的設計自由度が高い。

特にアルミ押出型材による軽量化が進められることが多い理由は、次のようなメリットがあるためと考えることができる。

- ・断面の自由度が高く、軽量、効率的でかつ材料強度の高い断面形状が押出材で提供できる。
- ・プレス成形とスポット溶接組立ての2工程で作られる鋼板製補強材に比べ、部品点数、組立工数低減が期待できる。

本報では、自動車用バンパに求められる各種規格に対応し、アルミ押出材を用いた効率的なバンパ補強材を設計するための簡易設計手法を提案する。このために必要な衝突強度の評価方法、断面形状の決定方法についても報告する。

1. 自動車バンパの衝突規準

図1にバンパシステムの例を示す²⁾。最近の乗用車では、バンパカバーの内部に緩衝材、その後方に補強材が

取付けられている。さらに補強材は、ステイなどの取付治具を介して車体メンバに取付けられることが多いようである。バンパ補強材は、前方もしくは後方との衝突時にカバー・緩衝材など一体になって衝突荷重を受け、ボデーの損傷を低減する役割がある。また後述するように、最近では中・高速衝突時のエネルギーの一部を吸収する特性も求められるようになってきている。

表1にバンパの主として低速度衝突に関する各国の規準例を示す。ペンデュラム衝突試験は、図2に示すように、規定の打撃子を振子に取付け、それを規定速度で落

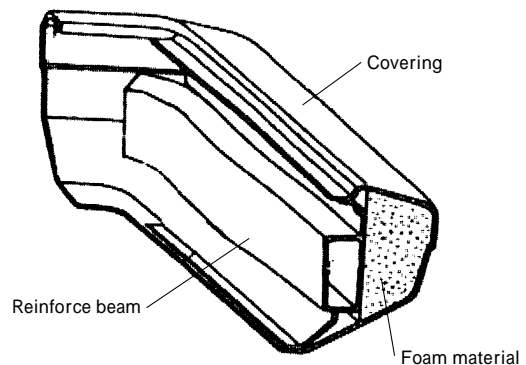


図1 バンパシステムの構造例

Fig. 1 Example of bumper structure

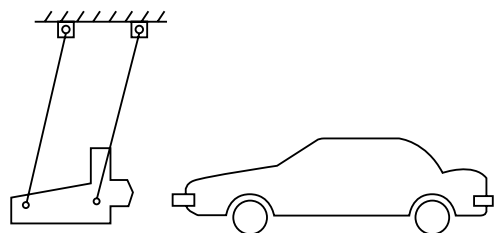


図2 振り衝突試験

Fig. 2 Pendulum impact test apparatus

*アルミ・銅カンパニー・技術部 **アルミ・銅カンパニー・長府製造所・アルミ押出研究室 ***神鋼アルコア輸送機材課

表1 各国バンパ衝突試験規準
Table 1 Bumper impact test standards

Enforce country	Name of standard	Pendulum impact		Barrier impact	Evaluation points
		Center	Corner		
USA	(former) Part 581	5mph (2 times)	3mph (2 times)	5mph	No body damage No functional damage
	Part 581	2.5mph (2 times)	1.5mph (2 times)	2.5mph	No body damage No functional damage
	IIHS*	-	-	5mph	Evaluating by repair costs
Canada	CMVSS215	5mph	3mph	5mph	No functional damage
Europe Union	ECE No.42	4.0km/h (2 times)	2.5km/h (2 times)	-	No functional damage
Gulf countries	G. S. 41	4.0km/h (2 times)	2.5km/h (2 times)	-	No functional damage

* Insurance Institute of Highway Safety, mph : mile/h

下させて乗用車に衝突させるものであり、正面衝突と斜め30度衝突の2種類がある。またバリア衝突試験は同様に剛なコンクリート壁に牽引装置を用いて規定速度で衝突させるものである。性能の判定基準としては、衝突後の車体のボディ損傷の有無や、ランプ点灯・ボンネット開閉の可否など車の機能性が問われる。またIIHS(米国保険機構)の規準など、修理費の高低を評価基準とするものもある。わが国においては欧州ECE規準が準用されることが多かったが、世界市場への展開を踏まえ、低速度衝突に関し、より厳しい北米規準の準用が増加しているようである。

従来、このようなアルミ押出材製バンパ補強材の断面形状の決定には、概略設計 試作 評価 修正試作 決定のプロセスを必要とし、第一の概略設計段階において的確な断面形状の決定手法が存在しない場合、第三段階と第四段階において数回の繰返しプロセスが必須であった。これに対し各種衝突規準と車体条件に応じ、的確な衝突強度をもった断面形状を決定する技術を開発すれば、試作回数及びコストの低減が可能になるとともに、迅速な形状提案ができることから、顧客の開発計画の短縮にもつなげられる。このような観点から、断面の決定手法の開発を行った。

表2 押出形材試験体寸法と曲げ強度
Table 2 Specimen of extruded aluminum box beam

Specimen No.	Cross section type	B (mm)	H (mm)	Corner R (mm)	Ultimate strength (MPa)	Yield strength (MPa)	El. (%)	M _p * (kN·m)	M _{cr} ** (kN·m)
1	W1	80	60	3	453	405	16	6.58	6.62
2	W1	80	60	2	455	407	15	5.69	4.99
3	W1	90	60	3	450	389	17	10.7	7.82
4	W1	90	60	3	301	256	17	7.00	6.25
5	W1	90	60	3	440	389	17	5.28	5.39
6	W2	138	70	1.5	368	301	18	8.01	7.15
7	W2	138	70	1.5	345	283	15	7.78	6.91
8	W2	138	70	8	369	301	19	8.27	7.40
9	W1	91	79.5	3	390	366		9.45	6.64
10	W1	90	60	3	313	268	16	7.33	6.00
11	W1	96	106	2	389	329	15	21.5	21.2
12	W1	96	106	2	378	319	14	11.07	7.57
13	W1	91	79.5	3.5	232	203	11	3.89	3.26
14	W2	114	60	3	316	271	18	5.28	5.17
15	W2	114	60	3	300	254	17	4.79	4.24
16	W2	138	75	8	319	273	16	8.26	6.64
17	W0	90	70	2	344	275	17	5.19	2.35

* M_p is full plastic moment calculated from expression(1).

** M_{cr} is maximum bending moment obtained from three-point bending test.

2. 低速度衝突に対する設計手法

表1に示したような低速度衝突基準に適した補強材の断面形状を決定する方法のうち、振り衝突に対する設計手法を例にとり以下に述べる。

2.1 静的曲げに対する強度推定方法

バンパ補強材は両端付近で支持された梁であるため、衝突時に前方のカバー及び緩衝材が一体となって受けた荷重に対し、補強材は曲げ支配で抵抗する。そこで押出形材の静的曲げ試験を行い、形材の強度支配因子について検討した。試験に用いたアルミ押出形材の代表的な形状を図3に、その寸法詳細を表2に示す。

一般に座屈などの不安定現象を生じない理想的な状態では、形材は全塑性モーメント M_p まで曲げモーメントを負担することができる。

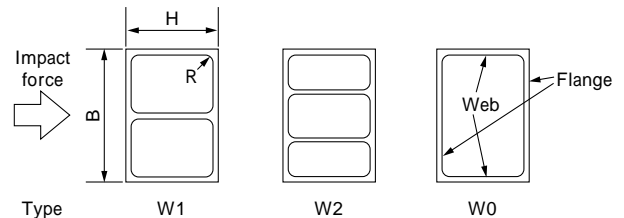


図3 検討した断面形状の例
Fig. 3 Typical section type

$$M_p = Z_p \cdot \sigma_y \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 Z_p ：塑性断面係数
 σ_y ：材料耐力

図3に示した形材から算定した M_p を表2右側に示した。これら形材を用いて静的3点曲げ試験を行い形材の崩壊を観察したところ、形材の幅Bもしくは高さHに比べて肉厚が薄い(すなわち幅厚比が大きい)形状において、最大荷重付近で曲げ圧縮側の座屈が顕著になり、表2に示すように最大曲げ強度 M_{cr} が M_p より低下する傾向がみられた。そこで曲げ圧縮側の座屈を考慮した形材の崩壊強度を検討することにした。

曲げ圧縮側の座屈支配で強度が決まる場合、形材の崩壊曲げモーメント M_{cr} は、係数 k を用いて次式で表わせる。

$$M_{cr} = k \cdot Z_p \cdot \sigma_y \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 $k = M_{cr} / M_p$

係数 k は、曲げ圧縮側のフランジやウェブ要素の座屈を考慮した強度低減係数である。その値は、フランジ及びウェブ双方の座屈発生の難易により変化する。FEM解析により主として矩形閉断面について係数 k の値を検討した結果を、整理し図4に示す³⁾。図中 r_f は、フランジ座屈に対するウェブの拘束度を表わすパラメータであり、式(3)で表わされる。

$$r_f = \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^3 \left\{ 1 - \left(\frac{R_w}{R_f} \right)^2 \right\} \dots \dots \dots (3)$$

また、 R_f 、 R_w は断面のフランジ及びウェブ幅厚比に比例する無次元パラメータであり、幅厚比と材料定数を用いて式(4)で表すことができる。

$$R_f = \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{4E} \cdot \sigma_y \cdot \left(\frac{B}{t_f} \right)}, R_w = \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{4E} \cdot \sigma_y \cdot \left(\frac{H}{t_w} \right)} \dots (4)$$

ただし、 t_f 、 t_w ：フランジまたはウェブの板厚
 E ：材料の弾性率
 ν ：材料のポアソン比
 σ_y ：材料の降伏耐力

図4から、フランジ板厚が増すと R_f が小さくなり、無次元化強度(= k)が高くなる傾向がわかる。また、フランジに比較してウェブの板厚が増すほど r_f が大きくなり、拘束度が高くなって無次元化強度も高くなる。従って図4を使えば、断面形状と材料定数で決まる上記幅厚比パラメータと拘束度から、形材の静的曲げ強度を概略予測できる。

2.2 動的曲げに対する変形推定方法

振り衝突の結果生じる形材の変形と、アルミ押出形材の強度の関係が明確になれば、形材の強度設計が容易になる。このような観点から図2の衝突試験を数多く行い、その結果から衝突変形量とアルミ押出形材の曲げ強度の関係を求めた。検討結果の例を図5に示す。同図は車重1500kgに相当する台車を使い、その前端にアルミ押出補強材を取付け、速度5mphで振り衝突試験した結果を整理したもので、スパン長で正規化した押出形材の曲げ強度と、衝突後の形材中央の最大変形量(maximum deformation)、及び永久変形量(permanent set)の関係

として表したものである⁴⁾。

図5から、形材の曲げ強度が一定値(この例では10kN)以上あると、衝突後の永久変形量がほぼ0になることがわかる。また逆に、曲げ強度がこの値よりも小さくなると永久変形量が急激に増加することも読み取れる。

この図を用いれば、形材のスパン長と曲げ強度から、衝突後の補強材の永久変形量を概略予測することができる。また逆に、車種ごとに設定される許容永久変形量から、必要な補強材の曲げ強度を求めることができる。

図5で例を示した条件以外に、車重や衝突条件などが変化した場合でも、このような関係図表を整備すれば、多くの衝突条件、車種への対応が可能であり、設計条件に応じた経済的な断面の選択に有効と考えられる。

2.3 設計手法

2.1及び2.2節の知見を組み合わせれば、パンパ形材の概略断面設計に利用することができる。すなわち衝突後の形材の変形量を一定値以下に保つことを設計条件と考えれば、まず図5を用いて制限する変形量から形材に必要な曲げ強度を求める。次に図4を用い、この必要曲げ強度を得るための断面の幅厚比と材料特性、すなわち補強材の断面形状と材質を決定することができる。これをフローにすれば、図6となる。

また一般に衝突現象の場合、材料強度の歪速度依存性

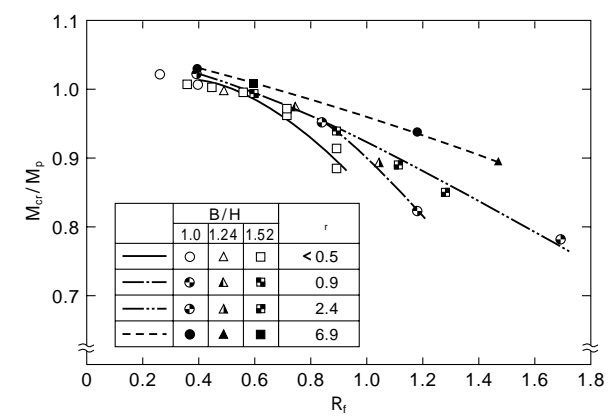


図4 フランジ幅厚比と無次元曲げ強度の関係
 Fig. 4 Relationship between static bending strength and R_f

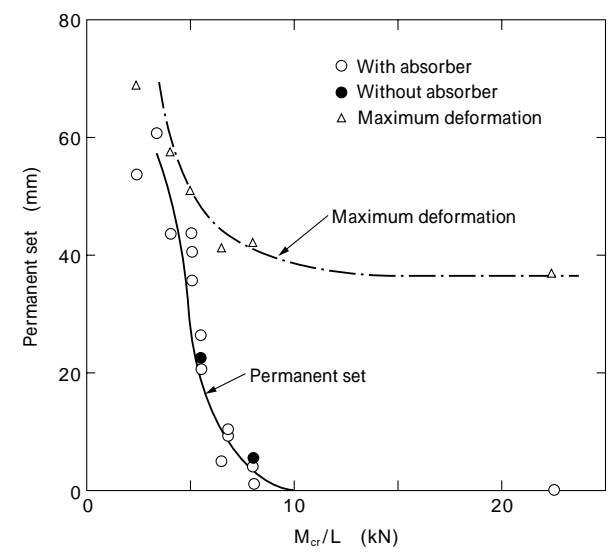


図5 振り中央衝突による変形量(重量1.5トン、衝突速度5mph)
 Fig. 5 Center permanent set by pendulum impact

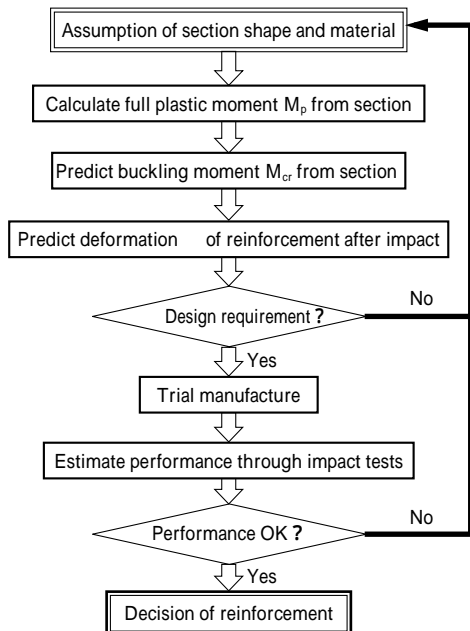


図6 低速衝突時のバンパ断面形状決定フロー
Fig. 6 Design flow chart of bumper reinforcement at low speed impact

を考慮する必要があるが、アルミニウム材料の歪速度依存性は小さいこと、低速度衝突現象を対象とすることから、その影響は無視しえるものと考えている。

以上、主として振り正面衝突時の変形制限に係わる設計手法を述べた。このほかにも表1記載のように、斜め衝突やバリア衝突などの考慮すべき規準がある。バリア衝突には、上記と同様な手法でバリア衝突時の変形と形材強度の関係データベースを構築することにより対応が可能である。また斜め衝突に対しては、例えば当社では文献5)のような検討を行っている。

3. 中高速衝突規準への対応

表1に示したように、ただか5mph(時速8km)程度の低速度衝突で、変形や修理費の評価を行う規準が従来はほとんどであった。これは低速度衝突時の車体保護がバンパの役割と考えられているためと思われる。近年、自動車の衝突規制がますます厳しくなってきたことより、これら低速度衝突特性に加え、中～高速度域での衝突エネルギー吸収特性(以下、EA特性)が求められるようになってきている。この場合バンパシステムのみで車体全体の衝突エネルギーを吸収させることは無理であるが、バンパもしくは取付けステイに多少のEA特性を持たせることにより、車体全体のEA特性を向上させたり、あるいは後方車体のエネルギー吸収を妨げないよう衝突を受ける際の発生荷重及び変形の制限などが設けられることが多く、バンパシステムに求められる新たな性能要件となってきた。

中高速衝突のような、バンパシステムに一定のEA特性を持たせる設計が必要な場合、前章で述べたような強度データベースを活用した手法では限界がある。これはバンパシステムの最大強度でなく、EA特性の予想手法が必要なためである。断面が押し潰されて比較的大きな変形が生じEA特性を発揮する部材の定量的な特性予測

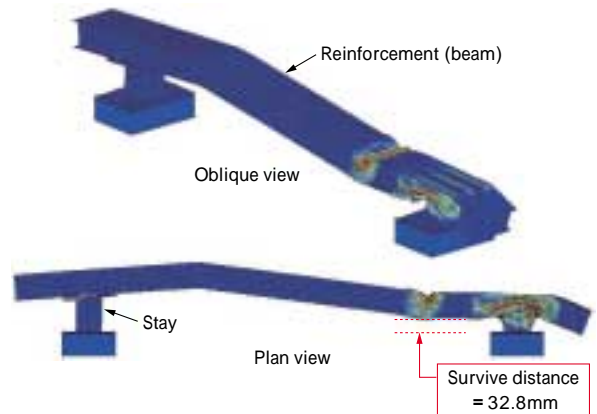


図7 オフセットバリア衝突 FEM 解析結果の例 (15km/h 衝突)
Fig. 7 Deformation behavior of offset barrier impact analysis (15km/h)

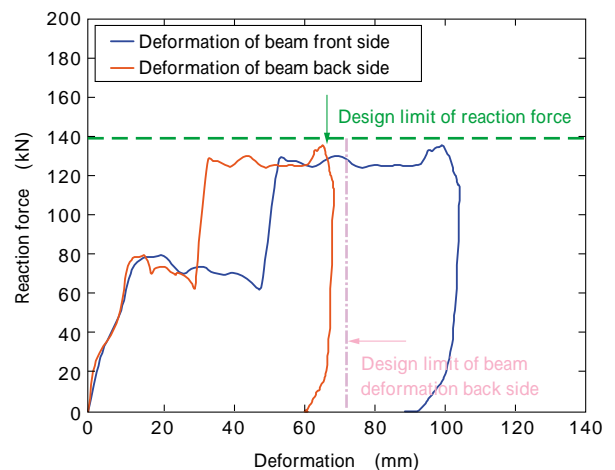


図8 オフセットバリア衝突時の荷重 - 変形関係
Fig. 8 Load-deformation relation of bumper reinforcement beam

は、例えばアルミ矩形管や円管単体が縦圧壊する場合⁶⁾⁷⁾などで試みられている。しかし単純形状の部材ではなく緩衝材やステイを含み、押出方向に対し縦・横両方向に圧壊される複雑形状を持ったバンパシステムのEA特性を的確に評価するためには、FEM解析を用いて評価するほうが実用的と思われる。

図7に補強材とステイが一体化されたバンパシステムが、車幅の40%の重なりをもって対向車と衝突する、オフセットバリア試験条件(IIHS規準)における衝突後の変形のFEM解析事例を示す。この場合の衝突速度は15km/hである。図8にその反力荷重 - 変位関係を示したが、車体側メンバ部材に先立ってEA吸収を行うバンパシステムの背面変形の制限、及び最大反力荷重の制限をクリアすべく検討を行い、変形、反力とも制限値を満足する結果となった。

以上のように解析モデルを適切に作成することにより、オフセット衝突のみならず斜めバリア、後部ポール衝突評価への対応も可能で、中高速衝突時のバンパシステムの挙動を把握することができる。このようなシミュレーション技術を駆使すれば、衝突挙動の事前予測と設計が可能となり、試作・確認試験の工程を最小限のものとする事ができる。

さらに、中高速域での衝突FEM解析及び実験結果を蓄積して適切な整理を行えば、2章で述べたような予測図

表による解析を省略した概略検討を行うことも、比較的単純な形状であれば可能と考えられる。FEM 解析による個別シミュレーション手法と組合わせて、効果を発揮するものと考えられる。

むすび = バンパの低速度及び中高速度衝突試験に対応した、効率的な断面設計手法について報告した。このようなバンパでの検討を手始めにして、アルミ材利用に必須の強度評価技術がますます発展し、そのほかの衝突安全部材へも気軽にアルミ材が採用されるよう、今後も継続して努力したい。

また 国土交通省の計画によれば 2005 年度を目安として歩行者保護規制が乗用車の衝突規準に取入れられる方向性が示されている。その詳細は現在審議されている段階であるが、バンパシステムに歩行者保護の観点から新たな要件が追加されるわけで、新たな評価技術の開発が

必要となるものと考えられる。さらなる技術開発によるアルミ化の促進が期待される。

参 考 文 献

- 1) 例えば, M. L. Sharp et al. : SAE Paper 780140(1978).
- 2) 岡 貴志ほか : アルトピア 8月号 (1997) p.9.
- 3) 藤原昭文ほか : 日本機械学会論文集 A 編, 59 巻 568 号 (1993), p.112.
- 4) T. Hashimura et al. : SAE Paper No.930709 (1993).
- 5) 石飛秀樹ほか : 自動車技術会論文集, Vol.29, No.2 (1998) p.97.
- 6) H. F. Mahmood et al. : SAE Paper No.811302 (1981).
- 7) 橋村 徹ほか : 日本機械学会論文集 A 編, 64 巻 620 号 (1998), p.231.