

S7-2-4 アルミニウム中空押出し型材製箱型構体の軸圧潰挙動解明と緩衝特性評価

○田畑 正隆 (芝工大院) [機] 岡本 紀明 (芝工大) 久信田 裕士 (芝工大院)

[機] 川崎 健 (日立機械研) 山本 隆久 (日立笠戸)

Axial crush behaviors and buffer characteristics on box structures made of aluminum hollow extrusions

Masataka Tabata, Noriaki Okamoto, Hiroshi Kushida (Shibaura Institute of Technology)

Takeshi Kawasaki, Takahisa Yamamoto (Hitachi, Ltd)

Railway vehicle has been required to achieve high safety in its collision. The development and study of crashworthy structures which are able to absorb the kinetic energy are widely carried out in Europe and the United States. This paper deals with the experimental and analytical study on the mechanism of progressive buckling about aluminum hollow extrusions and box structures made of them, using moiré topography and cutting method of the test piece as well as explicit FEA.

キーワード: アルミニウム中空押出し型材, モアレトポグラフィ法, 有限要素解析, エネルギー吸収, 座屈

Keyword: Aluminum hollow extrusions, Moiré topography, FEA, Energy absorption, Buckling

1. 緒言

鉄道車両は万が一衝突した際に乗客や乗員の安全性を確保することが求められる。欧州や米国では、耐衝突構造の開発が盛んに行われており、近年では日本でも注目を集めるようになってきた。乗り物の耐衝突構造としては自動車をもっとも進んでいるが、鉄道車両は自動車と比べ質量が巨大で衝突エネルギーが大きく、その上クラッシュパルゼンも限られていることから耐衝突構造を考える上で、相応の工夫が必要である。

筆者らの研究より耐衝突構造として、車両構体に利用されているアルミニウム中空押出し型材の角部を溶接によって箱型に形成した、箱型構体が有効であることが判明している²⁾³⁾。本報ではまず、要素特性研究としてアルミ中空押出し型材、次いで実機特性評価として箱型構体に関してそれぞれ、モアレトポグラフィ法を用いた静的軸圧潰実験及び、有限要素解析を行い、さらに、実験後の供試体を切断し、3次元で座屈断面を観察することで総合的に圧潰のメカニズムの解明と緩衝特性の評価を行った。

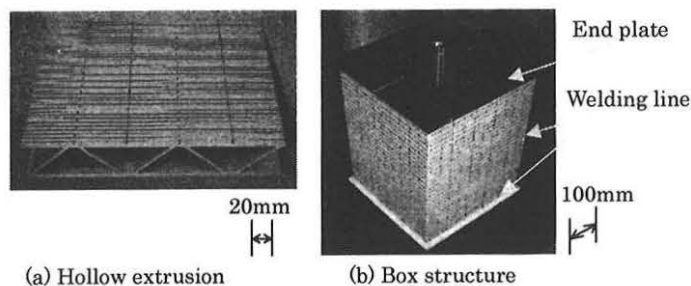


Fig.1 Aluminum hollow extrusion and box structure

2. 中空型材による要素実験

2.1 実験供試体

緩衝材には、一般的に式(1)で示されるエネルギー吸収効率 η が高いこと、すなわちピーク荷重に対する平均圧潰荷重が高いことが求められる。そこで、箱型構体を構成する中空型材の材料として、代表的な押出し合金である A6063-T5 よりもエネルギー吸収効率の良い²⁾焼鈍材 A6N01-O を使用した。実験に使用した供試体の形状を図 2 に、ピッチを 1 としたときの寸法比を表 1 に示す。

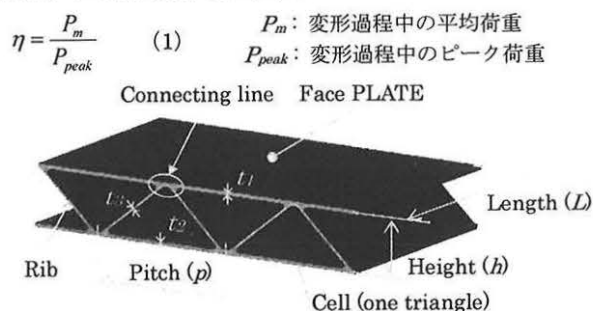


Fig.2 Configuration of the hollow extrusion

Table.1 Dimensions of the hollow extrusion

Model name	p	h/p	$t_1/p=t_2/p$	t_3/p	L/p
BLP66_35	1	0.530	0.038	0.026	3.03
BLP85_40_A	1	0.470	0.033	0.020	2.35
BLP85_40_B					

2.2 実験方法

実験は図 3 のようにガイドと加圧子を用いて、供試体を試験機に取り付け軸方向に負荷した。その際ガイドの V 溝に二硫化モリブデンを塗布し、供試体とガイドの摩擦を低

減させた。また、壁面座屈モード、面外変形量を測定するために実体格子型モアレトポグラフィ法を用いた。

2.3 中空形材の荷重 - 変位曲線

図 4 に実験から得た荷重比 - 変位曲線を示す。荷重は BLP85_40_B 実験の第 1 ピーク荷重が 1 となるように無次元化した。

図より、どの曲線も第 1 ピーク荷重後に荷重の低下が起き、その後荷重が再上昇していることが見て取れる。荷重の再上昇後は、荷重がほぼ一定の値を保つプラトー領域が発生することがわかった。

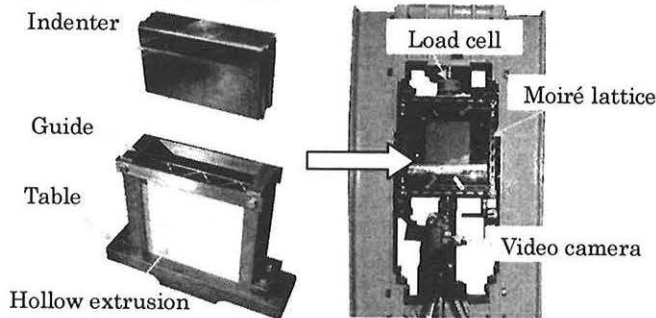


Fig.3 Experimental setup

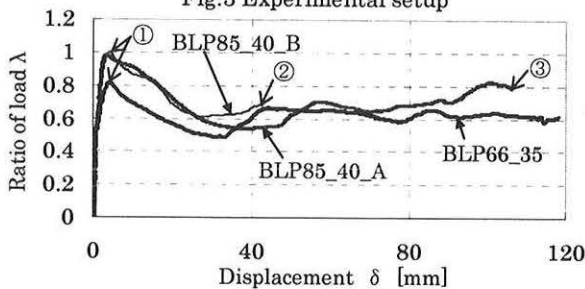


Fig.4 Load-displacement curves of hollow extrusion

2.4 中空形材の軸圧潰メカニズムと緩衝特性

荷重が再上昇する②と最終変位③で供試体を切断し座屈断面を観察した。BLP85_40 実験の面版と縦断面を図 5 に示す。

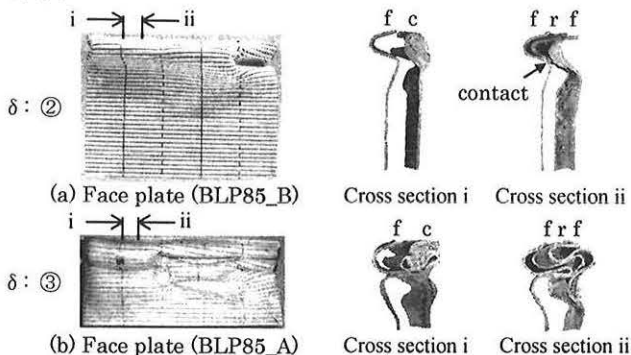


Fig.5 Deformation of face plate and cross section of the hollow extrusion

“f”, “c”, “r” show face plate, connecting line, rib, each other
モアレトポグラフィ法を用いた実験より、第 1 ピーク荷重①に至る前に各セル毎に面版部で壁面座屈が起こることがわかった。壁面座屈が起こってからも荷重がただちに降下しないのは、結節線の形状が保持しているためだと考え

られる。また、ピーク荷重後リンクルが次々と形成され、リンクル数が増加していくが、荷重の変動は少ないことがわかった。②では縦断面 i で見るように結節線も座屈し、縦断面 ii でリブを介して面版同士が接触していることが確認できる。このような接触が断面 ii 以外のいくつかの断面でも起こり荷重再上昇の要因となる。変位が進み③になると面版同士の接触も起こり、面版とリブが幾重にも重なって接触していることがわかる。

3. 箱型構体の静的軸圧潰試験

3.1 実験方法

断面形状の異なる 2 体の箱型構体について実験を行った。ピッチを 1 としたときの供試体寸法比を表 2 に、実験装置を図 6 に示す。箱型構体の軸圧潰実験では、供試体に対してできるだけ水平な荷重を作用させることに注意した。このため、供試体にひずみゲージを貼付してバランスを調整した上で圧潰実験を実施した。さらに、壁面座屈モード、面外変形量を測定するために実体格子型モアレトポグラフィ法を用いた。

Table.2 Dimensions of box structure

Model name	p	h/p	$t_1/p=t_2/p$	t_3/p	L/p	outside length
BXP66_35_05	1	0.530	0.038	0.026	6.82	335×334
BXP85_40_05	1	0.470	0.033	0.020	5.29	345.6×335

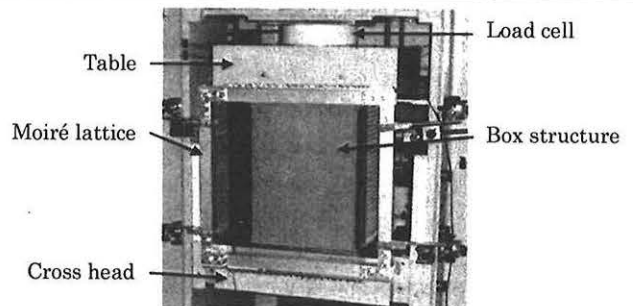


Fig.6 Compressive loading device

3.2 箱型構体の軸圧潰メカニズム

(1) 荷重 - 変位曲線

図 7 に実験、有限要素解析から得た荷重比 - 変位曲線を示す。荷重は BXP85_40_05 実験の第 1 ピーク荷重が 1 となるように無次元化した。

実験より、BXP66_35_05 の押し込み変位 80mm 付近、BXP85_40_05 の 165mm 付近で見られる、荷重の上下変動がある孤立峰と、BXP66 の 150mm～190mm、BXP85 の 90mm～130mm のようにプラトー領域を保つ連峰を表す荷重 - 変位曲線が得られることがわかった。

(2) 壁面座屈モード

第 1 ピーク荷重時での壁面座屈モードのモアレトポグラフと面外変形量の模式図を図 8 に、ピッチを p で無次元化したリンクル長 l_w を表 3 に示す。

ピーク荷重後 BXP66_35_05 では 35% 程度、BXP85_40_05 では 45% 程度、荷重が落ち込む。リンクル長

に違いが見られることから、荷重の落ち込みにはリンクル長が影響していると考えられる。図 8 より、BXP66_35_05 では上側から面外変形が、BXP85_40_05 では下側から面外変形が進んでいることがわかる。これは、ピーク荷重に至る前に上側と下側に同時にリンクルが形成され、どちらかのリンクルが進行する。この後も壁面座屈のモードは、荷重軸方向に蛇腹状に進行していくことがわかった。

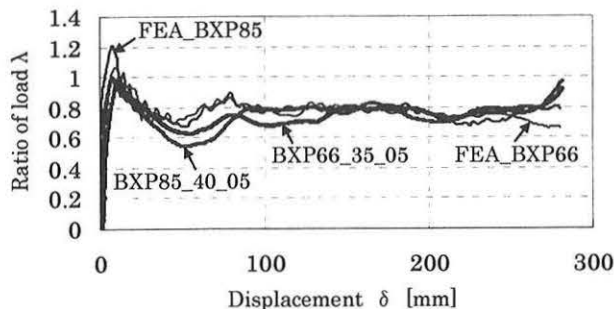
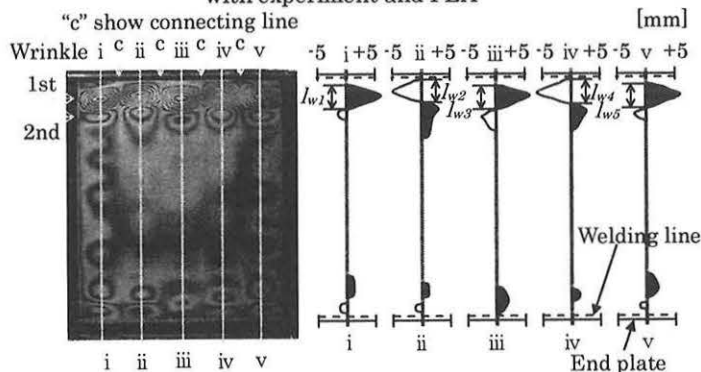


Fig.7 Load-displacement curves of box structures with experiment and FEA



(a) Out of plane deformation of BXP66_30_05 under the peak load

(b) Out of plane deformation of BXP85_40_05 under the peak load

Fig.8 Wrinkle mode by Moiré topography

Table.3 Wrinkle length of BXP66_35_05 and BXP85_40_05

Model name	l_{w1}/p	l_{w2}/p	l_{w3}/p	l_{w4}/p	l_{w5}/p
BXP66_35_05	0.583	0.530	0.605	0.570	0.605
BXP85_40_05	0.555	0.495	0.681	0.714	

3.3 箱型構体の緩衝特性

BXP85_40_05 のプラトーを表している 100mm 時点での実験の A 面 (モアレ適用面)、C 面 (A 面の裏面、B、D 面は A、C 面の側面)、BC 隅角部、CD 隅角部の圧潰形状を図 9 に示す。

実験より、100mm 時点での A 面と C 面はほぼ対称の面外変形を起こしていることがわかり、このまま蛇腹状の圧潰変形を続けていく。また箱型構体は、圧潰が進行するにつれて部分的に溶接線に割れが生じる。実験時の観察より両方の供試体とも最初の溶接線の割れはピーク荷重後の荷重が落ち込んでいるときに割れ始め、リンクルが潰れきって再上昇とともに割れが進行することがわかった。

両方の供試体とも変位 250mm を超えたあたりから荷重が急激に上昇し始める。これはストロークエンドに達したためである。そこで荷重が第 1 ピーク荷重を超えるまでの押し込み変位を有効ストロークとすると、有効ストロークを初期の長さ L で割ったストローク効率率は 60%~65%程度となる。

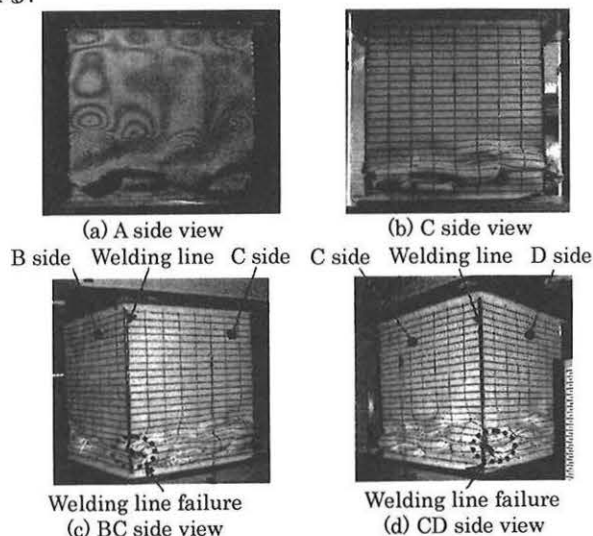


Fig.9 Deformation of BXP85

4. 有限要素解析と緩衝特性評価

4.1 材料引張試験

供試体材料の引張試験を行った。公称応力 - ひずみ線図を図 10 に示す。

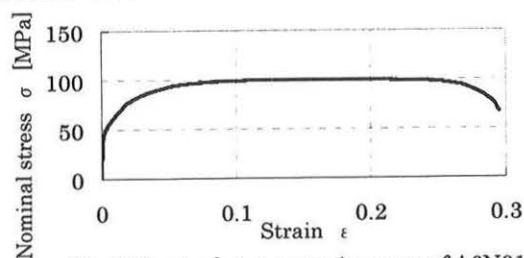


Fig.9 Nominal stress-strain curve of A6N01-O

4.2 解析モデル

実験と同じ条件で構築した FEA モデルで圧潰解析を行った。解析モデルにはシェル要素を用い、上下端に剛平面を設けた。上端の剛平面を全方向に拘束し、下端の剛平面に軸方向へ強制変位を与えた。解析コードは、陽解法有限要素解析コードである ABAQUS/Explicit を用いた。

4.3 中空形材と箱型構体の応力分布と挙動

図7のFEAは、実験と比較しピーク荷重がどちらも高くなっているが、実験の荷重特性をよく表していることがわかる。図10に第1ピーク荷重時における全体の膜応力分布とユニットの形状を図11にユニットの膜応力分布を示す。ここで図10の横断面1は1段目リンクの腹の断面、横断面nは1段目リンクの節の断面である。また、図11の縦軸は膜応力 σ_m と降伏応力(0.2%耐力) σ_y の比であり、横軸はユニットの中心部0からの距離 s とピッチ p の比である。

図11より、ユニットの膜応力分布は結節線を中心に高くなっていることがわかる。しかし、極端な高低の応力分布とはなっていない。

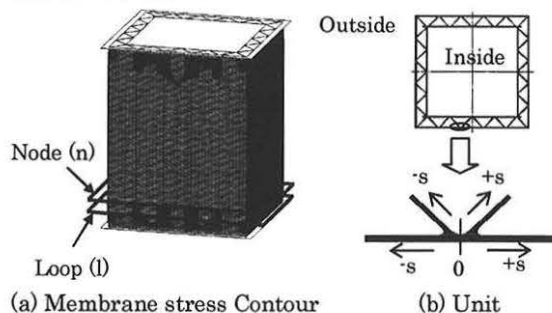


Fig.10 Shape of cross section and unit

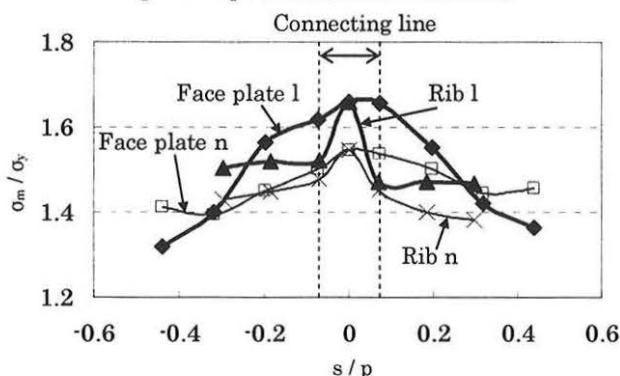


Fig.11 Membrane stress of unit

4.4. 中空形材と箱型構体のピーク荷重

縦軸にピーク荷重 P_{peak} に対する降伏応力 σ_y とユニットの断面積 A の積の比をとり、横軸にユニット数をとると図12のような関係となる。

図よりピーク荷重の無次元量はユニット数に比例して上昇することから、本実験範囲では中空形材、箱型構体はユニットで整理できると考えられる。

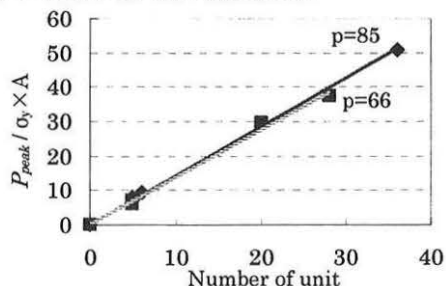


Fig.12 Relation of peak load and number of unit

4.5. エネルギー吸収量とエネルギー吸収効率

図13に箱型構体のエネルギー吸収量と変位の関係を、表4に中空形材と箱型構体のエネルギー吸収効率を示す。エネルギー吸収量はBXP85_40_05実験の280mm変位時の吸収量が1となるように無次元化した。

図13よりFEAのエネルギー吸収量は実験と比較し4%程度異なる値を示しているが、実験結果の傾向をよく表している。また、両構体ともほとんど同じ特性を示す。エネルギー吸収効率は中空形材、箱型構体ともにプラトー領域が発生することから高エネルギー吸収効率を示している。

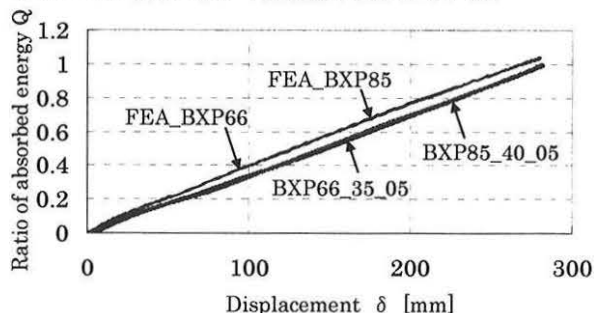


Fig13. Absorbed energy of box structure with experiment and FEA

Table.4 Absorbed energy efficiency of experiment

Efficiency	BLP66_35	BLP85_40_A	BXP66_35_05	BXP85_40_05
η	0.73	0.69	0.75	0.75

5. 結言

要素特性研究として中空形材、実機特性評価として箱型構体に関して検討を行った。主な結果を以下に示す。

- (1) 大型モアレ格子を用いモアレトポグラフィ法を箱型構体に適用することで、壁面屈曲観察システムが確立できた。
- (2) 中空形材、箱型構体の荷重 - 変位曲線では、プラトー領域が発生するために共に高いエネルギー吸収率が得られる。
- (3) 第1ピーク荷重はユニット数に比例して上昇する。

6. 謝辞

モアレ格子の作成及びモアレトポグラフィ法を用いた実験は、同研究室の上原氏、福永氏より多大な協力を得た。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 川崎, 他 4 名: 焼鈍したアルミニウム合金中空押出形材を用いた鉄道車両用エネルギー吸収部材の開発, 機論 A, Vol.70, No.697, 1341-1347, (2004-9)
- 2) 田畑, 岡本, 他 2 名: アルミニウム中空押出形材を用いた衝突エネルギー吸収材の軸圧潰メカニズムの解明, 機講論, No.040-2, 259-250, (2004-9)
- 3) 久信田, 岡本, 他 2 名: アルミニウム中空押出形材箱型構体の軸圧潰挙動と緩衝特性, 機講論, Vol.5, No.05-1, 307-308, (2005-9)