衝突による薄肉円筒の圧潰とエネルギー吸収特性* (計測法および評価法について)

宇治橋 貞幸^{*1}, 石井 義唯^{*2}
足立 忠晴^{*1}, 太田 道隆^{*3}

Experimental Measurements for Energy Absorption Abilities of Thin-Walled Circular Cylinders by Crushing Due to Impact Loading (On the Method of Measurement and Evaluation)

Sadayuki UJIHASHI, Yoshitada ISHII
Tadaharu ADACHI and Michitaka OHTA

In this paper, axial crushing tests on thin-walled circular cylinders of aluminium were conducted on an impact testing machine accelerated by air pressure, which is installed in the authors' laboratory at Tokyo Institute of Technology, and measurements for the variations of the loads applied to the specimens and the crushing deformations with time during impact were made with considerable accuracy. The dynamic load-deformation diagrams were extracted from these measurements to estimate the energy absorption abilities of the specimens, thus determining the effects of dimension or material of the specimens and crushing mode. The above results were compared with those of static crushing tests and the differences were discussed.

Key Words: Shock, Experimental Mechanics, Buckling, Crushing, Energy Absorption, Thin-Walled Circular Cylinder, Impact Testig Machine, Measurement

1. 緒 言

自動車の構造に使われている薄肉断面部材は、衝突時には塑性変形によって車の運動エネルギーを吸収することが求められている。この特性を向上させるためには、基本的な構造部材についてエネルギー吸収のメカニズムの解明を行い、基礎的な知見を得なければならない。そのためにさまざまな形状を有する薄肉断面部材の軸圧縮による圧潰特性が研究されている^{(1)~(4)}。その手法は主に実験解析と計算機シミュレーションとに大別されるが、この問題は座屈現象を含んでいるために、計算機シミュレーションだけで解明することは困難であり、まず実験による現象の把握が必要となっている。実験では従来、静的圧縮試験による解析が主であったが、自動車の衝突問題などを想定すれば、衝突を利用した動的試験による解析が必要である。しかし基本構造部材のレベルにおいても衝突試験による精密な計測評価と解析が十分に行われていないのが現状である。

そこで本研究では、水平式の空気圧による加速衝突試験装置を利用し、試験片にスチールおよびアルミニウムの薄肉円筒を用いた衝突試験を行い、まず試験片の塑性変形が進行している間の荷重と変形の時間変化を正確に計測した。そして次に、この結果から、時間を消去した動的荷重・変形線図を求め、これにより各試験片のエネルギー吸収特性と試験片の形状・材質および圧潰モードとの関係を明らかにした。以上により衝突による薄肉円筒の圧潰とエネルギー吸収特性に関する基礎的な知見を得ることができた。

2. 衝突試験装置および試験片

実験に用いた衝突試験装置の概略は図1のとおりであり、2台の台車は鋼製(総質量32kg)のもので、それぞれ4組のカムフォロワ形ベアリングにより支持され、2本のレールにより案内され滑走するようになっている。試験片は台車1にマウントされたロード・セルのフランジ部に取付けた。台車は空気圧により弾丸を介して加速され、静止している台車2のロード・セルのフランジ部に衝突し、2基のロード・セルのフランジにはさまれた試験片が圧縮され潰されることになる。この間に台車2も移動を初め、最終的に残留した運動エネルギーはすべてショック・アブソーバによっ

* 原稿受付 平成4年7月3日。

^{*1} 正員、東京工業大学 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

^{*2} JR 東海 (〒450 名古屋市中村区名駅 1-1-4)。

^{*3} マツダ(株)車両実験研究部 (〒730-91 広島県安芸郡府中町新地 3-1)。

で吸収される。2台の台車およびロード・セルは全く同じ材質・形状・質量であり、試験片を中心にしてみると対称形に配置されており、それぞれの台車には加速度計も取付けられている。

試験に用いた円筒は、表1に示されたような肉厚を変えた純アルミニウム製(1050)の自作のものと、表2に示された形状を変えた市販のスチール製飲料水用罐(つなぎ目有)である。

3. 荷重と変形の時間変化の計測

3.1 ロード・セルによる荷重計測 ロード・セルは検出部に2本の鋼棒($\phi 20 \times 40$ mm)を用いて平行に配置し、それぞれに半導体ひずみゲージ(共和電業製: KSP-2-E4)を接着した自作のものである。校正は静的および動的試験による二段階で行った。まず、万能試験機によりロード・セルに静圧縮荷重を加え、ゲージ率の検定を行った。そして次に、鋼棒($\phi 20 \times 300$ mm)による弾性衝突試験を行い、ロード・セルの周波数特性に対する検定を行った。棒上の二点において測定したひずみ応答から、ロード・セルに作用した真の衝撃力を波動伝ば理論により求め、これとロード・セルの出力をフーリエ変換した上で比較した。その結果、ロード・セルの出力波形には不要な高周波成分が多く含まれていることが判明し、これを取り除くために1.5 kHzのローパス・フィルタが必要であることが判明した。しかし、このフィルタ処理は鋭いピークの値に大きな影響を与える。例えばType A・2の試験片を用いた場合について遮断周波数と荷重応答波形との関係を示した図2を見れば明白なように鋭いピークほど最大値が小さくなる。ところが遮断周波数が1.5 kHz程度までであれば、波形の積分値(力積)にはフィルタ処理をしない場合に対してほとんど差がなかった。そこで、ロード・セルによる荷重計測においては、遮断周波数1.5 kHzのローパス・フィルタ処理を行う

こととした。

3.2 加速度計による変位計測 変位計測には加速度計(日本電気三栄製: 9 F 02, 圧電式)による計測結果に対して2回の時間積分を行うことにより求める方法を採用した。加速度波形にも不必要な高周波成分が含まれているので、ロード・セルによる計測と同様に1.5 kHzのフィルタ処理を行うことにした。図3はフィルタ処理前後の波形を示している。加速度波形に前述のフィルタ処理を行った上で、2回の時間積分を行って変位を求め、その結果が非接触光学式変位計により計測した正しい結果と一致するように加速度計の換算係数を修正した。この修正を台車1および2の加速度計に対して行い、両台車の変位差すなわち相対変位を試験片の変形とした。時間積分における積分定数は初期条件により決定した。

なお、積分結果に及ぼすフィルタ処理(1.5 kHz)の有無の影響はあまり大きくなかった。この加速度の2回積分による変位計測では、試験片に潰れ代がなく弾性衝突となる場合などでは十分な精度は得られなかった。したがって、この加速度の2回積分による方法は万能ではないので注意を要する。

フィルタ処理をした後の加速度波形に台車の総質量を乗ずることにより衝撃荷重とする試みを行ってみたが、図4に示すようになかなか似た結果が得られなかった。したがって、場合によってはこの方法により荷重を求めることも可能であるが、やはり乗ずるべき質量の見積もりなどに難しい点があり、無条件に結果を認めるわけにはゆかない。そこで、本研究ではロード・セルの出力から衝撃荷重を求めることにした。

表1 純アルミニウム製円筒試験片の形状

Type	Length L	Inner Radius R	Thickness h	Ratio R/h
A・1	100 mm	15 mm	0.3 mm	50.0
A・2	100 mm	15 mm	0.5 mm	30.0
A・3	100 mm	15 mm	0.7 mm	21.4

表2 スチール製飲料水円筒(つなぎ目有)の形状

Type	Length L	Mean Radius R	Thickness h	Ratio R/h
B・1	121.0	32.8 mm	0.25 mm	131
B・2	132.5	26.5 mm	0.25 mm	106
B・3	104.0	26.5 mm	0.25 mm	106

図1 衝撃試験装置

(a) フィルター処理無し

(b) 遮断周波数: 2 kHz

(c) 遮断周波数: 1.5 kHz

(d) 遮断周波数: 1 kHz

図 2 ロード・セル-2 の出力 (Specimen: A*2, Velocity: 4.03 m/s, Crushing Mode: Axisymmetry)

(a) フィルター処理無し

(b) 遮断周波数: 1.5 kHz

図 3 加速度計-2 の出力
(Specimen: A*2, Velocity: 5.07 m/s)

(a) ロード・セル-1 の出力

(b) 加速度計-1 の出力

図 4 荷重の時間変動 (Specimen: A*2, Velocity: 5.07 m/s, Cut-Off Frequency: 1.5 kHz)

4. 薄肉円筒のエネルギー吸収特性

4.1 静圧縮試験による結果 まず、表1および表2に示した薄肉円筒試験片について行った静圧縮試験の結果を示す。これは、次節で示す衝突試験による結果を理解する上で、大いに参考となる。

図5はアルミニウム円筒について行った試験の荷重・変形線図であり、潰れモードはType A・1の円筒では非軸対称、Type A・2およびA・3の円筒では軸対称であった。軸対称の潰れモードでは、荷重の上下が明りょうに観察され、それぞれのピークが塑性関節の発生に対応している。すなわち、ピークが2個で1周期の潰れモード発生と対応している。これに対して非

(a) Type A・1 (非軸対称)

(b) Type A・2 (軸対称)

(c) Type A・3 (軸対称)

図5 アルミニウム円筒の静圧縮試験結果

軸対称の潰れモードでは、塑性関節の発生過程が複雑であり、荷重のピークとの明確な対応を観察することができなかった。軸対称モードでは、軸方向に約6 mmごとに1周期の潰れが生じ、肉厚によって多少の差がみられた。非対称モードでは、周方向に4周期、軸方向に1周期当たり約6 mmの潰れが生じた。所要エネルギーは当然のごとく肉厚の厚いもののほうが大きい。これから単位潰れ長さ当たりのエネルギー吸収量(平均荷重)を求め、これを断面積で除しさらに質量密度で除した値を求めれば、試験片の単位質量当たりのエネルギー吸収量が得られる。これらの結果をまとめたものが表3である。なお、計算に当たっては、アルミニウムおよびスチールの質量密度をそれぞれ $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ および $7.86 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とした。この単位質量当たりのエネルギー吸収量を基準値として比較すれば、試験片のエネルギー吸収能と形状あるいは材質との関係を議論することができる。Type A・3とA・2の差は肉厚の影響であり、肉厚の厚いほうが高いエネルギー吸収能をもっているということがいえる。一方、Type A・2とA・1の差は20%程度とやや大きくなっており、この差には明らかに潰れモードの影響が含まれており、軸対称モードのほうがエネルギー吸収特性がややよくなっている。しかし、その差は予想に反してわずかでしかなかった。図6は、Type Aの試験片の試験後の潰れモードを示したものである。一方、スチール製飲料水用罐について行った試験では、肉厚が薄いために常に非軸対称の潰れモードとなり、Type Aの円筒に比べると、円周方向には節数が多く、軸方向にはピッチの長い潰れモードとなった。吸収エネルギー

(a) 試験前 (b) Type A・1
(c) Type A・2 (d) Type A・3

図6 静圧縮試験によるアルミニウム円筒の潰れモード

ギーについてアルミニウム円筒の結果と比較すると、単位体積当たりの値には大きな差はなかったが、単位質量当たりの値にすると大きな差が生じた。試験片の直径や肉厚が Type A と Type B とでは全く異なっているので、この表 3 の結果をそのまま材料の影響と見るのは早計であるように思われる。しかし、総質量を同じにするために密度の低いほうの材料の肉厚を厚くすれば、エネルギー吸収量の面で有利になることは考えられる。

4・2 衝突試験による結果 表 1 に示した各試験片について衝突試験を行い、3 章で示した計測法により荷重および変形の時間変化を求めた一例が、図 7 である。(a)はロード・セル-1 の出力に 1.5 kHz のロー

パス・フィルタを乗じて求めたものであり、(b)は加速度計-1 および 2 の出力に 1.5 kHz のローパス・フィルタをかけた後、2 回の時間積分と衝突速度 $V=4.03 \text{ m/s}$ とにより台車 1 および 2 の変位を出し、さらに両台車の変位の差をとって求めたものである。変位の最終値は試験片の試験後の永久変形 $\delta=30.2 \text{ mm}$ とほぼ一致している。このような荷重および変形の時間変動から時間を消去し、動的な荷重・変形線図を求めた。図 8 は、Type A・2 の円筒について、発生した潰れモードの種類別に代表的な動的荷重・変形線図を示したものであり、図 9 は潰れモードを示す写真である。衝突試験による潰れモードは、よく観察すると静圧縮試験によるものと違いが見られたが、だいたいにおい

表 3 各試験片のエネルギー吸収特性

Specimen Type	Crushing Mode	Load	Crushing Distance [mm]	Absorbed Energy [J]	Mean Load [kN]	Absorbed Energy by Unit Volume [J/mm ³]	Absorbed Energy by Unit Mass [kJ/kg]
A・1	Non-Sym	Static	30.0	46.9	1.56	0.0552	20.4
	Non-Sym	Dynamic	30.5	51.8	1.69	0.0598	22.1
A・2	Sym	Static	30.0	96.2	3.21	0.0682	25.2
	Sym	Dynamic	30.2	118.4	3.92	0.0832	30.8
	Non-Sym	Dynamic	31.2	119.3	3.82	0.0812	30.1
A・3	Sym	Static	30.0	140.4	4.68	0.0710	26.3
	Sym	Dynamic	32.1	189.4	5.90	0.0895	33.1
A・2 with Mandrel	Sym	Dynamic	26.4	98.7	3.74	0.0794	29.4
	Curling	Dynamic	19.3	131.0	6.79	0.144	53.4
B・1	Non-Sym	Static	50.0	129	2.58	0.0501	6.37
B・2	Non-Sym	Static	50.0	97	1.94	0.0466	5.93
B・3	Non-Sym	Static	50.0	74	1.48	0.0356	4.53

(a) 荷重の時間変動

(b) 変形の時間変動

図 7 ロード・セルおよび加速度計による測定結果 (Type: A・2, Axisymmetry, $V=4.03 \text{ m/s}$, $\delta=30.2 \text{ mm}$)

(a) 軸対称 (4.11 m/s, 28.1 mm, 115.6 J)

(b) 非軸対称 (4.03 m/s, 31.2 mm, 119.3 J)

(c) 軸対称 (Mandrel, 3.70 m/s, 26.4 mm, 98.7 J)

(d) 鋼製マンドレルによるカーリング
(4.27 m/s, 19.3 mm, 131.0 J)

図 8 荷重・変位 (潰れ) 線図 (Specimen: A・2)

(a) 試験前
(b) 軸対称圧潰
(c) 非軸対称圧潰
(d) カーリング

図 9 衝撃圧縮試験によるアルミニウム円筒の潰れモード

ては同一モード形であった。したがって、荷重・変形線図も静圧縮試験のものと同様な形になると予想されるが、衝突試験においては静圧縮試験では起こらなかった形の潰れモードが観察された。

潰れモードが静圧縮試験の結果と同じ場合においては、図 5 と比較してわかるようにほぼ同じ傾向の荷重・変形線図が得られた。図 8 のほうが、全体として丸みをもった図形となっているが、これはローパス・フィルタを通したためであると思われる。これらの図形によって囲まれた領域の面積が円筒の潰れによって吸収されたエネルギーと考えられる。そこで、この吸収エネルギー等を、まとめて表 3 に示した。軸対称と非軸対称の潰れモードについては、エネルギー吸収特性に大きな影響はみられなかった。マンドレルにより円筒の内側への変形を拘束した場合には、時々カーリング変形がみられたが、この場合の特性は他の潰れモードに比べて格段に優れていた。動的結果は静的結果よりもすべて大きくなっているが、円筒の肉厚が厚くなるほど、単位質量当たりのエネルギー吸収量が大きくなる傾向は、静圧縮試験による結果と全く一致している。動的エネルギー吸収量の静的結果に対する割合を計算してみると、A・1, A・2, A・3 の円筒に対してそれぞれ、1.08, 1.22, 1.26 となり、その増加率はやはり肉厚の厚い円筒のほうが大きくなっている。この傾向は動的平均荷重が静的平均荷重よりも高くなっていることからくる。その原因については材料のひずみ速度依存性あるいは慣性効果などが考えられるが、詳細については今後の課題である。

5. 結 言

本研究で採用した衝突試験法とその計測法および評価法により、薄肉円筒の衝撃軸圧縮によるエネルギー吸収特性と各種の影響因子との相関を従来よりも明確に調べることができるようになった。

文 献

- (1) Johnes, N., *Structural Impact*, (1989), 385, Cambridge University Press.
 - (2) Reid, S. R., ほか 2 名, *Int. J. Mech. Sci.*, 28-5(1986), 295.
 - (3) 萩原・ほか 2 名, 機論, 55-514, A(1989), 1407.
 - (4) 自枝会編, 薄肉曲がり部材の崩壊特性, I & II (1989), 3.
-