

# I-7 小型鋼管柱の軸方向座屈実験

(株) 日本製鋼所 正員 小枝 日出夫  
 (株) 日本製鋼所 小野 信市  
 (株) 日本製鋼所 正員 熱海 明彦  
 (株) 日本製鋼所 正員 別所 俊彦  
 (株) 日本製鋼所 正員 長谷川 久

## 1. はじめに

鋼管部材は、陸上構造物、海洋構造物などにおいて主要な構成部材の一部として使用されており、その座屈強度を推定することは設計上重要である。そのため、鋼管部材の座屈に関する多くの研究が実験や理論解析により行なわれてきた。しかし、これらの研究は静的荷重下での座屈に関するものがほとんどで、風や地震などによる動的あるいは衝撃荷重に対する座屈に関しては、まだ不明な点が多く懸念されるところである。

このような地震などによる衝撃荷重に対し、鋼管部材の座屈や破壊を防止する方法として、その一部に緩衝機能を有する部位を設け、外力によるエネルギーをその部位の塑性変形に消費させることが考えられる。この方法によれば、鋼管部材の寸法を大きくすることなく強度の増加が得られ、さらに、緩衝部を交換可能なように部品化すれば極めて経済性に優れる。

このような緩衝部を設計するには、衝撃荷重下における鋼管の座屈挙動やエネルギー吸収特性などが明確になっていなければならない。しかし、衝撃荷重下での軸方向座屈は動的な塑性不安定問題であるため、理論や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である。

そこで本研究では、重錘落下式衝撃実験装置を用いて、小型鋼管の軸方向衝撃座屈実験を行ない、衝撃荷重下における鋼管の座屈挙動とエネルギー吸収特性を調査した。また、静的座屈試験から得られる結果との関係について考察を行なった。

## 2. 実験の概要

### 2.1 供試材および試験体

供試材は、JIS規格の配管用炭素鋼鋼管 (JIS G 3452 SGP 90A) を用いた。その化学成分および機械的性質を表1に、降伏応力のひずみ速度依存性を表2に示す。機械的性質は、鋼管から製作したJIS 6号試験片による引張試験により、また、降伏応力のひずみ速度依存性は円柱圧縮試験 (径3.5mm, 高さ5.25mm) により求めた。

上記鋼管から図1に示す2種類の試験体を製作した。これら試験体はいずれも単一の鋼管を所要の長さで切断し、旋盤により内外面を切削して所定の寸法に加工したものである。2種類の試験体のうち、高さ304mmのものは鋼管部材本体を、また高さ

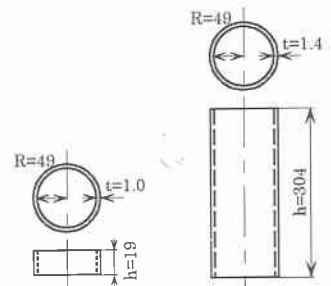


図1 試験体の形状および寸法

表1 供試材の化学成分および機械的性質

鋼種	外径 (mm)	板厚 (mm)	C	Mn	P	S	引張強さ (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
SGP 90A	101.6	4.2	0.06	0.27	0.020	0.004	41.3	37.9

表2 降伏応力のひずみ速度依存性

ひずみ速度(1/s)	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>0</sup>	10 <sup>1</sup>
降伏応力(kgf/mm <sup>2</sup> )	31.3	32.7	36.5	46.5

An Axial Buckling Behavior on Tubular Steel Column under Impact Loading.

by Hideo KOEDA, Shinichi ONO, Akihiko ATSUMI, Toshihiko BESSYO and Hisashi HASEGAWA

19mm のものは本体に付与する緩衝部を模擬している。したがって、高さ 19mm の試験体は 304mm の試験体よりも座屈荷重が低くなるように板厚を小さくしている。

試験体を実際に圧縮する際には、試験体の上下端に厚さ 10mm の剛板を取付けた。剛板には、試験体の板厚にあわせて幅で深さ 2mm の溝が加工しており、この溝によって試験体の上下端部の半径方向変位と回転角を拘束した。したがって、座屈に対する試験体の有効高さは、300mm と 15mm である。

### 2.2 静的圧縮実験

圧縮実験は、油圧式試験機を用いて行なった。負荷の制御は変位制御とし、変位速度 0.1mm/s と 10mm/s の 2 種類の条件について実験を行なった。また実験に際しては、試験体の荷重と圧縮量を、それぞれ容量 20ton のロードセルおよび容量 50mm のひずみゲージ式変位計で計測し、これらの電圧信号を A/D 変換後パーソナルコンピュータで連続記録した。表 3 に、衝撃圧縮実験の場合も合わせて実験条件をまとめて示す。実験は、本体単体と本体の上部に緩衝部を付けた 2 種類の試験体について行なった。

### 2.3 衝撃圧縮実験

衝撃圧縮実験は、図 2 に示す重錘落下式衝撃実験装置を用いて行なった。この衝撃実験装置は、高さ 4m のフレーム、2本の丸棒ガイド、クロスヘッド、重錘、ロードセルなどから構成されている。実験は、ロードセル上に置いた試験体を落下してきた重錘により圧縮させる方式である。重錘は 50~200kg の範囲で増減可能であり、その最大衝突速度は約 5m/s である。また、使用したロードセルの容量は 40ton、設置状態における最低次の固有振動数は 6.5kHz である。

本実験における計測は、試験体の荷重と圧縮量について行なった。荷重の計測には、上記ロードセルを用い、圧縮量についてはクロスヘッドの変位を容量 100mm のレーザ変位計により非接触にとらえる方法で行なった。試験体への重錘の衝突速度は、この変位計の出力を時間微分することにより求めた。これらロードセルおよび変位計の電圧信号は、サンプリング速度 5 $\mu$ s、分解能 16bit でデジタルレコーダに記録した。

表 3 実験条件

試験体 No	部位	試験体寸法 (mm)			負荷方法	負荷速度 m/s	重錘質量 kg
		板厚	半径	高さ			
S-1	本体単体	1.4	49	300	静的	1.0 $\times$ 10 <sup>-4</sup>	
S-2						1.0 $\times$ 10 <sup>-4</sup>	
S-3						1.0 $\times$ 10 <sup>-2</sup>	
S-4						1.0 $\times$ 10 <sup>-2</sup>	
I-1	本体単体	1.4	49	300	衝撃	3.5	100
I-2						4.0	80
I-3						4.0	80
I-4						3.0	150
I-5						3.0	150
SH-1	緩衝部	1.0	49	15	静的	1.0 $\times$ 10 <sup>-4</sup>	
	本体	1.4	49	300			
IH-1	緩衝部	1.0	49	15	衝撃	3.29	150
	本体	1.4	49	300			

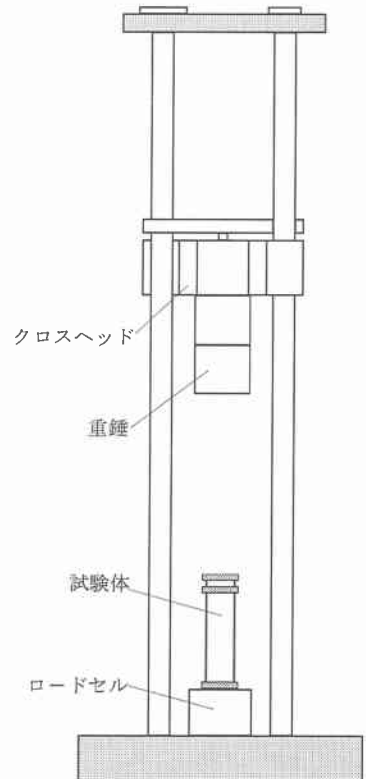


図 2 重錘落下式衝撃実験装置

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 単体試験体の圧縮実験

鋼管単体の圧縮実験結果を表4に、また、得られた平均応力-圧縮量曲線の例を図3に示す。表4において、衝撃試験における負荷速度は重錘の試験体への衝突速度であり、負荷エネルギーは衝突速度から換算した重錘の運動エネルギーである。また、座屈エネルギーおよび吸収エネルギーは、座屈および最大圧縮時までに要するエネルギーであり、平均応力-圧縮量曲線を積分して求めた。また、図3における平均応力は、荷重を試験体の初期断面積で除したものである。

静的圧縮（負荷速度0.1および10mm/s）の場合の座屈形態は、試験体の上端部あるいは下端部近傍のいずれかから軸対称形の局部座屈が生じ、そのまま軸対称形を維持しながら変形した。ただし、負荷速度10mm/sで行なった1体は、三角波形の非軸対称形に遷移した。宇佐美ら<sup>1)</sup>の実験結果によれば、径厚比 $R/t < 40$ で軸対称形、 $R/t > 55$ で非軸対称形の座屈形態となるようであるが、 $R/t = 35$ の本実験結果と一致する。また、衝撃圧縮の場合の座屈形態は、軸方向の座屈位置が端部に近くなったことを除いて、静的圧縮の場合とほぼ同様であった。図3によれば、弾性域の勾配など平均応力-圧縮量曲線全体の傾向は負荷速度によらずほぼ同様である。このことは、試験体の座屈形状が負荷速度によらず同一なものと合致する。

図4に、負荷速度と座屈応力および座屈エネルギーの関係を示すが、負荷速度の増加にともない座屈応力、座屈エネルギーとも大幅に増加している。この理由として、ひずみ速度の増加にともなう降伏応力の増加が考えられる。表4には、各試験体について、座屈時のひずみ速度とそのひずみ速度における降伏応力も示してある。ただし、このひずみ速度は、座屈が開始するまで試験体は軸方向に一樣に変形するとの仮定のもとに、静的負荷の場合は負荷速度を、

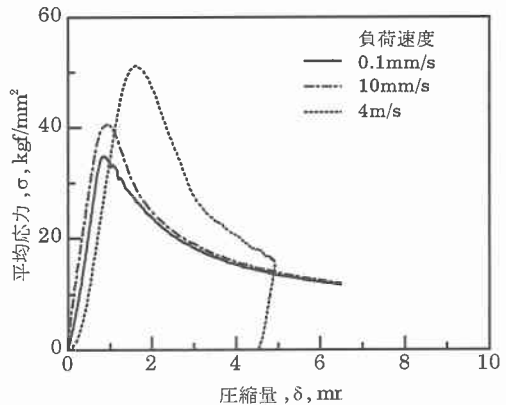


図3 平均応力-圧縮量曲線（単体試験体）

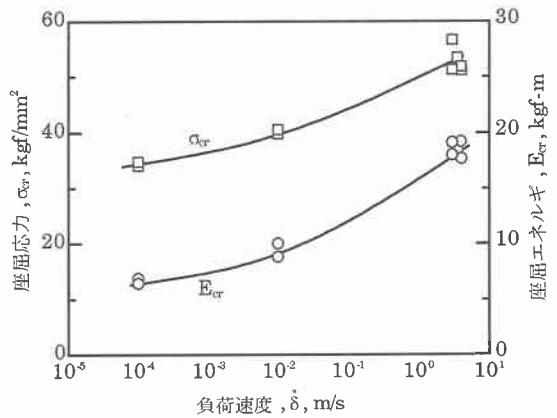


図4 座屈応力および座屈エネルギーにおよぼす負荷速度の影響

表4 単体試験体の圧縮実験結果

試験体 No	荷重方法	負荷速度 m/s	重錘質量 kg	負荷エネルギー kgf·m	座屈形状		座屈エネルギー kgf·m	座屈応力 kgf/mm²	圧縮量 mm	吸収エネルギー kgf·m	ひずみ速度 1/s	降伏応力 kgf/mm²
					軸方向位置	周方向波形						
S-1	静的	$1.0 \times 10^{-4}$	/	/	上端から10mm	軸対称	6.9	34.1	9.20	68.5	$3.3 \times 10^{-4}$	31.5
S-2		$1.0 \times 10^{-4}$			上端から10mm	軸対称	6.4	34.8	19.59	113.7	$3.3 \times 10^{-4}$	31.5
S-3		$1.0 \times 10^{-2}$			上端から8mm	軸対称⇒三角形	8.8	39.8	9.74	66.7	$3.3 \times 10^{-2}$	33.4
S-4		$1.0 \times 10^{-2}$			下端から9mm	軸対称	10.0	40.5	19.60	117.9	$3.3 \times 10^{-2}$	33.4
I-1	衝撃	3.53	100	63.4	下端から8mm	軸対称	18.4	53.4	5.18	62.3	8.6	45.6
I-2		4.05	80	66.9	上端から8mm	軸対称	17.7	51.1	4.52	59.2	9.5	46.2
I-3		4.01	80	65.5	下端から8mm	軸対称	19.2	51.8	4.13	55.5	9.2	46.0
I-4		2.99	150	68.2	上端から8mm	軸対称	18.0	56.6	5.84	66.3	7.8	45.0
I-5		2.98	150	67.9	上端から8mm	軸対称⇒4角形	19.1	51.2	5.43	66.9	7.9	45.1

衝撃負荷の場合は座屈時の重錘速度をそれぞれ試験体高さで除することで求めた。また、各ひずみ速度における降伏応力は、表2の結果を補間して求めた。図5に、負荷速度と座屈応力/降伏応力比の関係を示すが、この比は負荷速度によらず1.0~1.2の範囲でほぼ一定の値となっている。したがって、降伏応力のひずみ速度依存性を考慮することにより、静的な座屈応力を基準に他の負荷速度における座屈応力を推定できるものと考えられる。図5には、次項で述べる試験体高さと板厚の異なる緩衝部の結果も記されており、試験体の寸法によらず座屈応力/降伏応力比がほぼ一定の値となることが注目される。

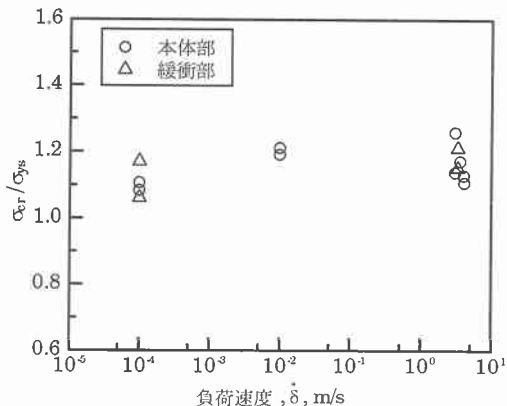


図5 負荷速度と座屈応力/降伏応力比の関係

### 3.2 緩衝部付試験体の圧縮実験

緩衝部付試験体の圧縮実験結果を表5に、また、得られた平均応力-圧縮量曲線を図6に示す。平均応力は、荷重を試験体本体部の初期断面積で除したものである。この図によれば、平均応力-圧縮量曲線全体の傾向は負荷速度によらずほぼ同様であり、試験体の座屈形状が負荷速度によらず同一であることが予想される。実際の座屈挙動は以下のものであった。

静的圧縮(負荷速度0.1mm/s)の場合の座屈挙動は、まず最初に本体部よりも断面積が小さい緩衝部においてその中央部から軸対称形の局部座屈が生じ、軸対称の形状を維持しながら変形した。緩衝部の変形が終了すると、単体の場合と同様に本体の下端部近傍から軸対称座屈が生じた。これら緩衝部および本体部の座屈は、平均応力-圧縮量曲線の2つのピーク位置とそれぞれ対応している。

一方、衝撃圧縮(負荷速度3.3m/s)の場合の座屈挙動は、静的な場合と同様に緩衝部の中央から軸対称座屈が生じ、軸対称の形状を維持しながら変形した。しかし、緩衝部の変形が終了したあとは、荷重が一時的に増加しただけで、本体部の座屈は発生しなかった。これは、重錘による負荷エネルギーが緩衝部の変形に消費され、その残りのエネルギーが本体部の座屈に必要なエネルギーよりも小さかったためと考えられる。このことは、図7に示す圧縮量に対する重錘の運動エネルギーおよび試験体の吸収エネルギーの推移曲線から次のように説明される。試験体は、重錘が衝突してから座屈するまでは緩衝部と本体部の弾性変形によりエネルギーを蓄積し、重錘の運動エネルギーはこの弾性エネルギーに相当する分だけ減少する。試験体の座屈に必要なエネルギーは、単体の圧縮実験結果から本体部で約19kgf・mであり、緩衝部の

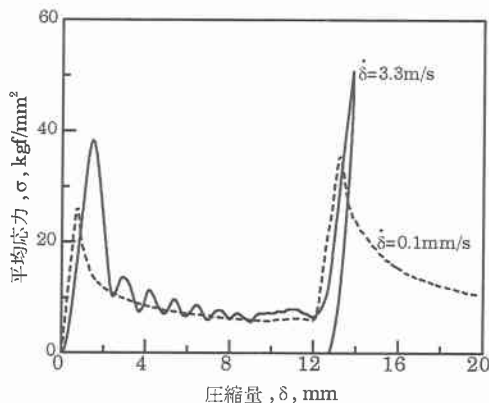


図6 平均応力-圧縮量曲線(緩衝部付加試験体)

表5 緩衝部付加試験体の圧縮実験結果

試験体 No.	部位	荷重方法	負荷速度 m/s	重錘質量 kg	負荷エネルギー kgf-m	座屈形状		座屈エネルギー kgf-m	座屈応力 kgf/mm²	圧縮量 mm	吸収エネルギー kgf-m	ひずみ速度 1/s	降伏応力 kgf/mm²
						軸方向位置	周方向波形						
SH-1	緩衝部	静的	1.0×10 <sup>-4</sup>	/	/	中央部	軸対称	4.3	36.8	12.32	44.8	3.0×10 <sup>-4</sup>	31.5
	本体					下端から9mm	軸対称	10.1	35.6	7.78	59.6	3.0×10 <sup>-4</sup>	31.5
IH-1	緩衝部	衝撃	3.29	150	82.9	中央部	軸対称	11.3	53.6	12.53	61.5	9.5	46.2
	本体												

11.3kgf-mの方が小さい。そのため、試験体に蓄積される弾性エネルギーが11.3kgf-mに達した時に緩衝部で座屈が生じる(図7のAの区間)。座屈後緩衝部の変形が終了するまでは(図7のBの区間)、重錘の運動エネルギーが緩衝部の塑性変形に随時消費されるため、本体部の弾性エネルギーは増加せず、したがって本体部が座屈することはない。そして緩衝部の変形が終了した後、重錘の運動エネルギーが残っている場合は、本体部の弾性エネルギーに置き変わり(図7のCの区間)、そのエネルギーが本体部の座屈に必要なエネルギーよりも大きければ本体部が座屈する。この試験体の場合、残存する重錘の運動エネルギーは約17kgf-mであり、本体部の座屈に必要なエネルギー約19kgf-mに満たないため、17kgf-m分だけ弾性変形し荷重は増加するが座屈は生じないことになる。なお、上記の説明において、重錘の位置エネルギーは微小なので省略した。上記の考え方に基けば、緩衝部付試験体の座屈挙動を、本体部および緩衝部単体それぞれの座屈挙動から推定することが可能であると考えられる。

図8は、圧縮量および負荷速度の違いによるエネルギー吸収量を考察するために、負荷速度と単位体積当りの吸収エネルギーの関係を示したものである。単位体積当りの吸収エネルギーは、試験体が吸収した全エネルギー量を試験体が圧縮した部分の全体積で除することにより求めた。図中には本体部の結果も合わせて示したが、本体部および緩衝部とも、負荷速度の増加にともない吸収エネルギーが増加している。また、緩衝部に比較して本体部が吸収エネルギーおよびその増加率が大きい。これは、緩衝部の板厚1.0mmに対し、本体部の板厚が1.4mmと大きいためであり、宇治橋<sup>2)</sup>らも同様な実験結果を報告している。

#### 4. まとめ

本研究では、重錘落下式衝撃実験装置を用いて、小型鋼管の軸方向衝撃座屈実験を行ない、衝撃荷重下における鋼管の座屈挙動とエネルギー吸収特性を調査、検討した。また、静的座屈試験結果との対比、検討も行った。得られた結果を以下に要約する。

- (1) 単体試験体の座屈形態は、負荷速度に影響されず、静的負荷と衝撃負荷ではほぼ同様であった。
- (2) 座屈応力および座屈エネルギーは、負荷速度の増加にともない大幅に増加した。
- (3) 降伏応力のひずみ速度依存性を考慮することにより、試験体の寸法によらず座屈応力と降伏応力の比はほぼ一定となった。
- (4) 緩衝部付き試験体の座屈形態は、負荷速度に影響されず、静的負荷と衝撃負荷ではほぼ同様であった。
- (5) 単位体積当りの吸収エネルギーは、本体部および緩衝部とも、負荷速度の増加にともない増加した。

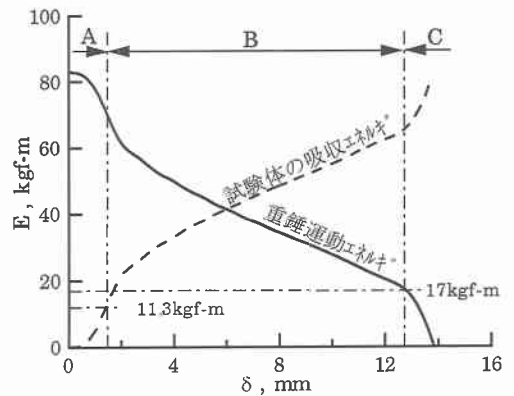


図7 重錘の運動エネルギーおよび試験体の吸収エネルギーの推移曲線

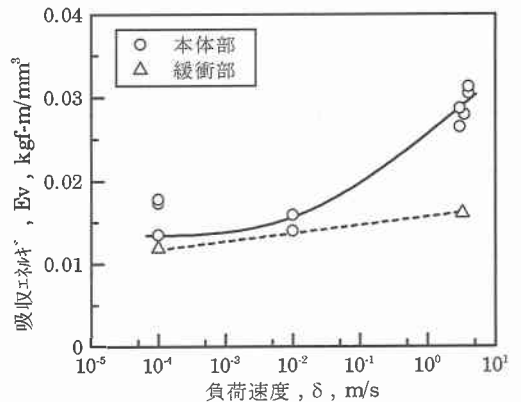


図8 負荷速度と単位体積当りの吸収エネルギーの関係

参考文献

- 1) 宇佐美勉、青木徹彦、加藤正宏：鋼管短柱の圧縮および曲げ耐荷力実験、土木学会論文集、第 416 号 / I-13、pp.255-264、1990
- 2) 宇治橋貞幸、足立忠晴、石井義唯、太田道隆：衝突による薄肉円筒の圧潰とエネルギー吸収特性、機械学会論文集、A 編 59 卷 558 号、pp.471-477、1993