

ドアインパクトビーム用鋼管

High Strength Pipe for Automotive Side Impact Beams

田 邊 弘 人^{*(1)}
Hiroto TANABE宮 坂 明 博^{*(1)}
Akihiro MIYASAKA山 崎 一 正^{*(2)}
Kazumasa
YAMAZAKI岩 崎 利 男^{*(3)}
Toshio IWASAKI赤 田 英 雄^{*(4)}
Hideo AKADA

抄 録

自動車側方衝突時の車体補強用に用いられるドアインパクトビーム用鋼管の曲げ変形挙動を実験的に検討した。その変形過程は、鋼管断面の楕円化、塑性屈服、周方向座屈の三つの変形過程に分けられる。これらの変形過程と押込み変位-荷重曲線あるいは吸収エネルギー特性を整理するとともに、最大荷重の推定を行った。又、この変形挙動よりドアインパクトビームに必要な延性を求め、この延性を満たすことができる1 470N/mm²級の高強度電縫鋼管を開発した。

Abstract

With regard to pipe for automotive side impact beams used as car body reinforcing member at the time of a car side crush, some variations of bending deformation were experimentally studied. The processes of the deformation may be divided into the following three; pipe flattening in a cross section, plastic collapse, and circumferential buckling. Such deformation processes are discussed together with the applied load versus crush distance relationship and the absorbed energy characteristics, and the resultant maximum loads are estimated. Further, a ductility required for the impact beams according to the deformation behavior was investigated, and a high strength electric welded steel tube of 1 470N/mm² grade has been developed to satisfy the ductility.

1. 緒 言

自動車メーカー各社においては乗用車の側方衝突による死傷者を減らす目的で、ドア内部にドアインパクトビーム（ドア補強材）を用いることにより、車体側方の強度向上を計っている。これは、側方衝突時に衝突物の運動エネルギーをドア部の初期変形で吸収し、搭乗者が受けるダメージを軽減するためである。従来は、高強度鋼板をプレス成形したドアインパクトビームが主流であったが、高強度鋼管を用いることにより軽量化が可能であるとして、鋼管材の採用が伸びつつある^{1,2)}。

本報告では、軽量、高吸収エネルギーを達成する鋼管形状のドアインパクトビームの変形挙動について解説するとともに、ドアインパクトビームとして有効な高強度電縫鋼管について紹介する。

2. インパクトビーム用鋼管の曲げ変形挙動

ドア内部での鋼管の塑性変形挙動を観察するため、車体側方の強度試験(JASO B 103-86 又は FMVSS No.214)に対応した3点曲げ試験方法を考案した。試験方法の概要を図1に示す。使用した各種鋼管の成分範囲、強度範囲を表1に示す。

図2に曲げ試験時の典型的な押込み荷重-変位曲線を示す。鋼管の剛性に応じて荷重が押込み量に対して直線的に増加した後、荷重増加が緩やかになり最大荷重点に達する。そして、緩やかに荷重低下した後急激な荷重低下に至る。図3に負荷子直下部での楕円化の進行を示す。楕円化は全歪理論に基づいて導かれる曲げ部の変形エネルギー低減のための楕円化³⁾に、負荷子の集中荷重による楕円化^{1,2)}が重畳したもので、薄肉（低t/D）、短スパン（高負荷子荷重）の場合

P : Applied load
d : Crush distance

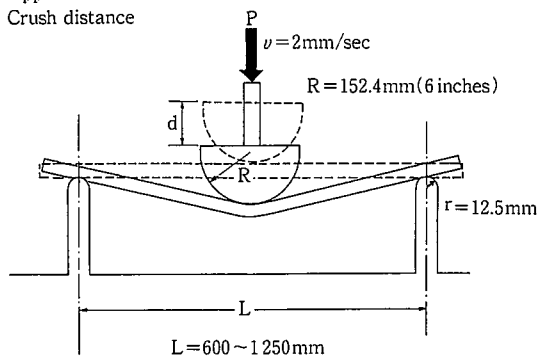


図 1 曲げ試験方法

⁽¹⁾ 技術開発本部 名古屋技術研究部 主任研究員⁽²⁾ 技術開発本部 名古屋技術研究部 主幹研究員*⁽³⁾ 名古屋製鐵所 品質管理部 部長代理*⁽⁴⁾ 名古屋製鐵所 厚板・鋼管部 部長代理

表 1 供試鋼管の形状及び化学成分 (mass %)

Diameter	Thickness	t/D×100	C	Si	Mn	Nb	Cr	Mo	B	TS
25.4~40.0mm	1.6~5.0mm	5~15%	0.14 0.30	0.15 0.23	0.80 1.60	0.03	0.30	0.40	0.002	583~ 1 840N/mm ²

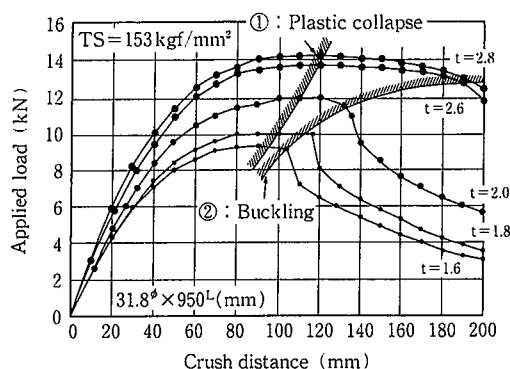


図 2 押込荷重-変位曲線

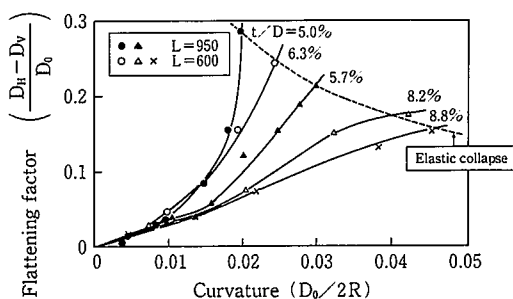
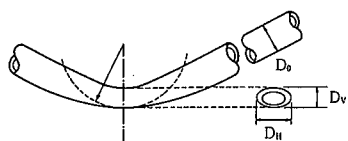
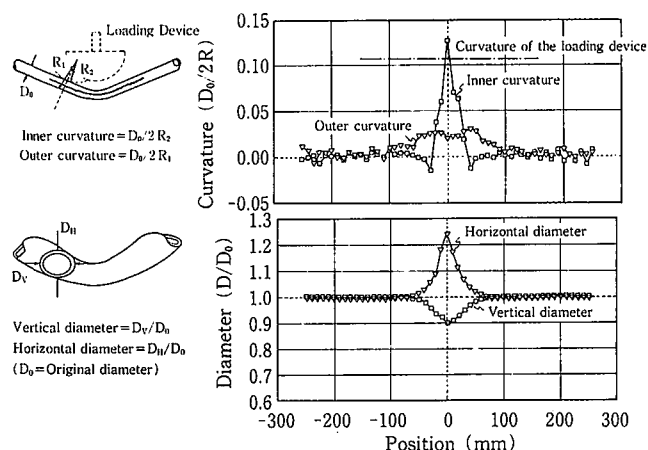
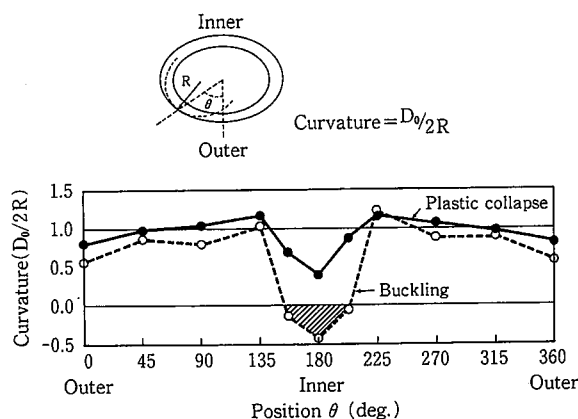


図 3 曲げの進行と楕円化の関係

合ほど楕円化が顕著である。そして楕円化の進行は、続いて起こる塑性屈服の発生時の曲げ曲率に影響している。図 4 に塑性屈服^{4,5)}が発生した時点における鋼管形状を示す。鋼管の楕円化が負荷子直下部に集中し、曲げ内側の曲率が負荷子曲率より大きくなる、いわゆる鋼管の長手方向座屈が発生している。このときの曲げ荷重は図 2 の最大荷重に相当する。さらに負荷子の押込みを続けると、局部的な楕円化が更に進行し、曲げ内側の曲率の不均一も増大する。このときの荷重低下は緩やかであるが、図 5 に示す周方向の座屈が発生すると荷重が急激に低下する。図 5 は塑性屈服直後と、周方向座屈後の負荷子直下部の周方向曲率分布を示す。塑性屈服後は偏平化は進行しているものの、全周に渡り凸(+)の曲率を持っているのに対して、周方向座屈後は曲げ内側で、凹(-)の曲率を持つ。曲げ内側が折れ込むことにより、急激な曲げ荷重低下を起こしていると考えられる。以上に述べたように、鋼管の曲げ変形は、鋼管断面の楕円化、塑性屈服、周方向座屈の三つの過程をたどる。

塑性屈服に相当する最大荷重の推定方法としては、室田ら⁵⁾の楕円化を考慮した曲げモーメントの推定方法がある。しかし、彼らの方法では最大荷重点の発生を定性的に求めることはできたが、厳密に

図 4 塑性屈服発生直後の負荷子直下部の鋼管形状 (31.8mmφ×1.8mm^t)図 5 塑性屈服及び周方向座屈発生直後の鋼管断面形状の比較 (31.8mmφ×1.8mm^t)

は負荷子直下部が単純な楕円ではない(図 5 参照)ため、定量的には十分な解が得られなかった²⁾。そこで、実験結果を基に次の最大荷重の推定式を求めた^{1,2)}。

$$P_{cal} = 0.550 \times (\sigma_{4\%}/L) \times ((D_0^4 - (D_0 - 2t)^4)/D_0) \quad \dots\dots(1)$$

各種の鋼管に対する試験結果から、材料強度としては 4% 歪における変形応力($\sigma_{4\%}$)を用いている。ここで、 D_0 は曲げ試験前の鋼管外径、 t は板厚、 L は曲げスパンである。図 6 に(1)式を用いて推定した値と実験結果との比較を示す。図 6 からわかるように両者は良く一致している。図 6 を用いて最大荷重を精度良く推定することが可能である。

3. ドアインパクトビームに必要な伸び特性

曲げ変形の際、鋼管の外側側は大きな引張変形を受ける。このとき、曲げ外側でクラックが発生すると、曲げ荷重が急激に低下したり、曲げ吸収エネルギーが不足するだけでなく、搭乗者側にクラック開口部が向かう恐れがある。そこで、塑性屈服現象での曲げ外

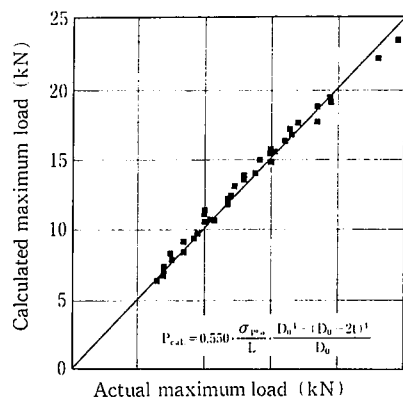


図 6 最大曲げ荷重の計算値と実験値の関係

側の歪を推定し、鋼管に必要な延性を求めた。図 7 は鋼管断面が扁平化しないと仮定した場合の、曲げ外側の伸びを推定したものである。実際には変形途中で鋼管が楕円化するため、その補正が必要である。図 8 に実際に曲げ外側の歪を計測した結果から求めた補正係数 (●印) を示す。これは、図 3 に示した鋼管の楕円化による歪の補正量 (○印)、及び塑性屈服が曲げ変形早期に起こるため歪が集積しにくいことによる補正量 (○印と●印の差分) の和と考えられる。これらの寄与はいずれも鋼管の t/D の関数で表される²⁻⁵⁾。図 9 に、図 7、8 より求めたインパクトビーム用鋼管のサイズと必要な伸びの関係を示す。

ところで、鋼管外径はドア内部の許容スペース、板厚は必要な曲げ荷重、吸収エネルギーから決まる。図 9 中の○印は現在使用され

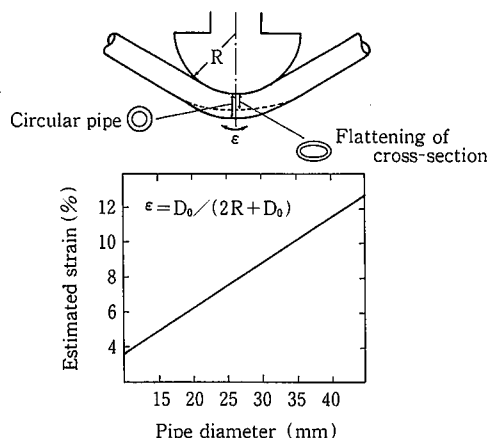


図 7 鋼管が楕円化しない場合の曲げ外側歪の推定

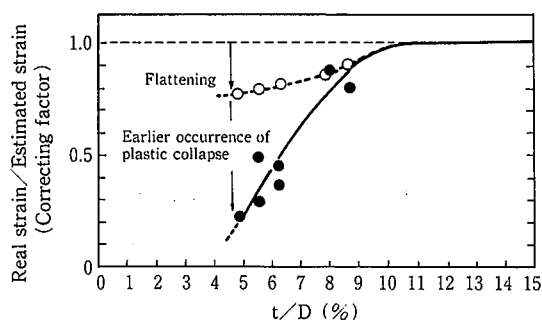


図 8 曲げ外側歪の補正係数

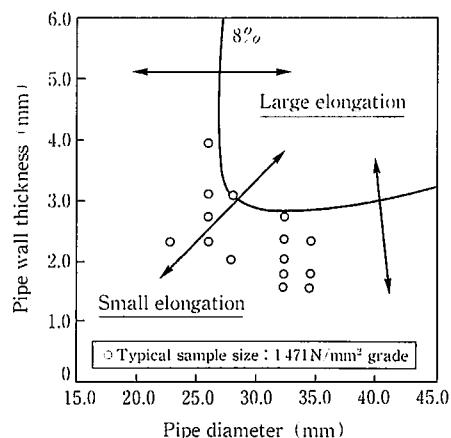


図 9 塑性屈服発生前に鋼管曲げ外側に必要な伸び(模式図)

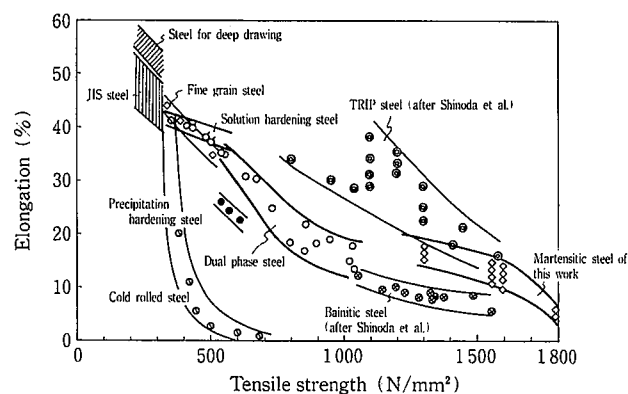
ている典型的なドインパクトビーム用高強度鋼管 ($TS > 1470 \text{ N/mm}^2$) の寸法を示す。図 9 より、曲げ変形に供せられる現行寸法のようなドインパクトビーム用鋼管には、8%以上の伸びが必要であることが分かる。

4. ドインパクトビーム用高強度鋼管

式(1)から明らかなように軽量で高い曲げ強度を得るためには、高強度化が有効である。図10に各種高強度鋼材の強度と延性の関係を示す^{6,7)}。ドインパクトビームとして必要な8%程度以上の伸びを有し、引張強度が1470N/mm²以上である材料を商業的に安価な工程で製造できる鋼として、マルテンサイト鋼が有効である。マルテンサイト鋼の硬さは主に炭素に起因し、他の元素の寄与は小さい⁸⁻¹⁰⁾。図11に、 $C=0.15\sim0.30\text{mass}\%$ の鋼を焼入れすることにより、99%以上のマルテンサイト組織^{2,9,10)}を得た場合の機械的性質を示す。 $C=0.16\sim0.24\text{mass}\%$ の場合に、焼入れままのマルテンサイト組織であっても、高強度、高延性、高靱性が得られる。従って、軽量のインパクトビーム用鋼管を得るには、低C ($C=0.20\text{mass}\%$ 前後)マルテンサイト組織が有効である。

4.1 高強度鋼管の製造方法

低炭素マルテンサイト組織のインパクトビーム用鋼管は、必要な炭素量、介在物制御、臨界冷却速度を調整した鋼を、制御圧延で比較的低強度の鋼板にすることにより、その後のスリット加工、電縫鋼管製造工程の負荷を減らし、ドインパクトビーム用の焼入れ素管が効率よく生産される。その後図12に示す高周波焼入れ工程を通

図 10 各種鋼の引張強さと伸びの関係^{9, 10)}

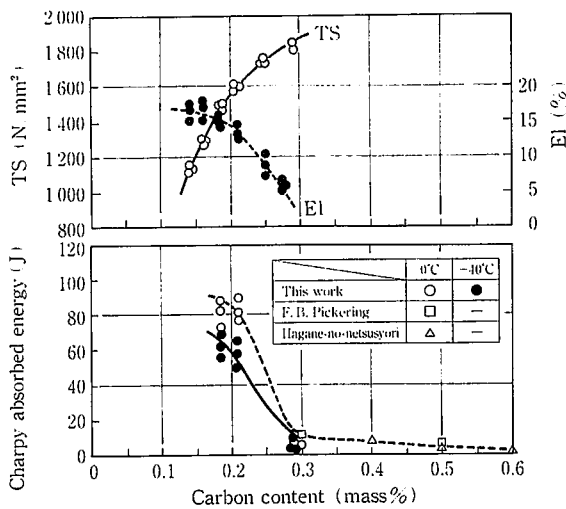
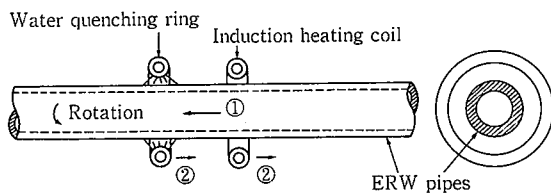
図 11 マルテンサイトの機械的特性⁶⁾

図 12 高周波焼入方法

して、所定の強度と延性を満たすインパクトビーム用鋼管を製造する。写真 1 に電縫溶接部及び母材部の断面組織を示す。高周波焼入れを適用することにより表層の脱炭が少なく、電縫溶接部も含めて均一なマルテンサイト組織が得られている。図13に代表的な寸法における引張試験結果を示す。引張強さが 1470N/mm^2 以上で高延性(破断伸び 8%以上)を安定して確保している。

4.2 遅れ破壊特性

ドアインパクトビーム用電縫鋼管は、焼入れままの高強度($\text{TS} > 1470\text{N/mm}^2$)にてドア内部に取り付けられる。一般に本鋼管のような高強度の材料については、遅れ破壊が懸念される場合がある。しかし、本電縫鋼管は、不純物を低減し、細粒オーステナイト組織で、低残留応力としているため、耐遅れ破壊特性には有利な材料である。

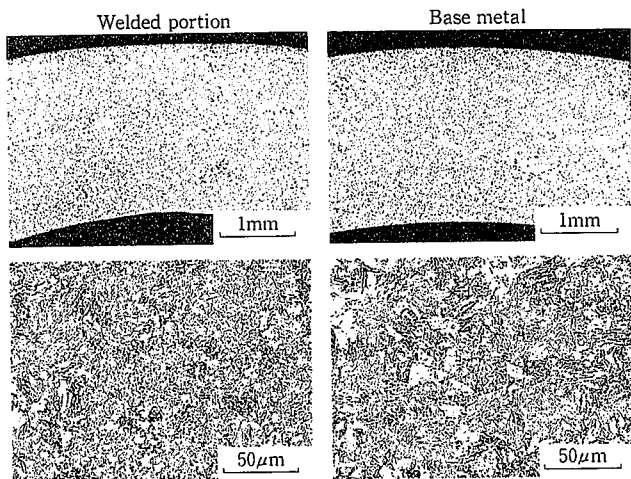
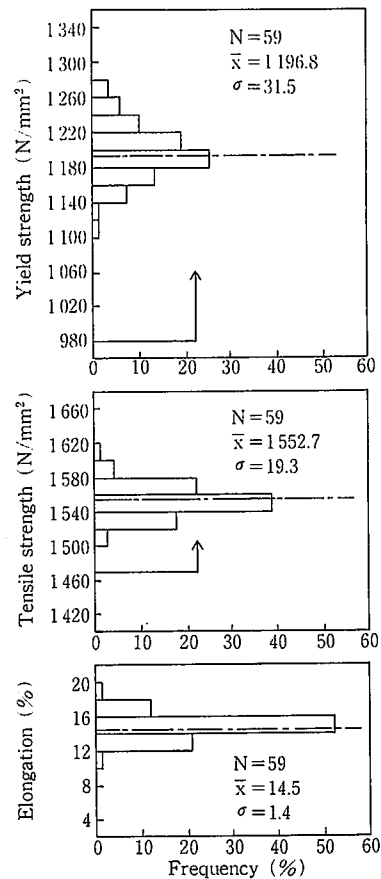
写真 1 高強度鋼管の断面組織例
(STQM18RB, $25.4\text{mm}\phi \times 2.3\text{mm}^t$)図 13 引張試験結果例
(STQM18RB, $31.8\text{mm}\phi \times 2.0\text{mm}^t$)

図14に遅れ破壊特性の評価方法の概略を示す。切欠き付きの引張試験片を5% HCl 溶液に浸漬し腐食させた後、定荷重試験を実施した。図15に試験結果を示す。引張応力から切欠き破断応力に至るいずれの試験片においても遅れ破壊の発生は認められなかった。本電縫鋼管は図14のような環境でも遅れ破壊感受性が低い材料である。インパクトビームは本試験条件のように常時応力を受ける部材でないことから、ドアの補強部材として焼入れままの電縫鋼管を用いることは可能である。

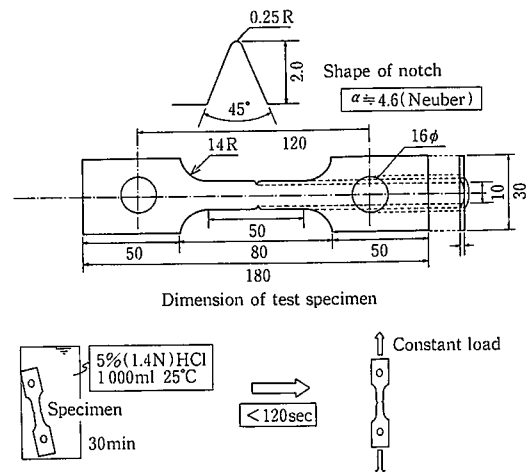


図 14 遅れ破壊特性評価方法

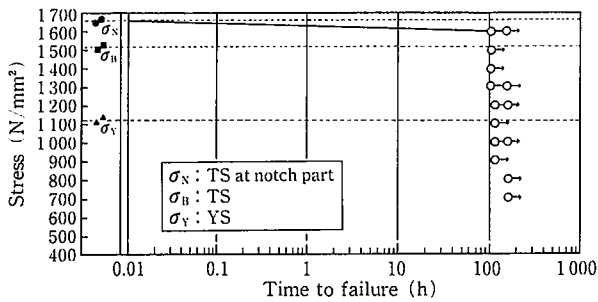


図 15 遅れ破壊特性

4.3 吸収エネルギー特性

ドアの寸法に相当する曲げスパンが変化すると、曲げ剛性及び、楕円化、塑性屈服、周方向座屈発生の変位が変化するため、3点曲げ時の変位-荷重曲線の様相は大きく変化する²⁾。しかし、図16に示すように、周方向の座屈が発生するまでの鋼管の曲げ変形による吸収エネルギー（弾性変形エネルギー+塑性変形エネルギー）については、鋼管の板厚により決定され、塑性変形による吸収エネルギーは曲げスパンの影響をほとんど受けない。これは例えば、図4に見られたように塑性変形が負荷子直下部に集中していることによる。

ところで、ドインパクトビーム用鋼管を、側方衝突時にドアが車室内に折れ曲がるのを抑制するための部材と考えると、一定の変位（例えば6インチまでの変位）までに吸収するエネルギーが大切になる。図17に6インチ変位までの吸収エネルギーを示す。吸収エネルギーは二つの領域に分けられ、吸収エネルギーが周方向座屈に影響される領域と影響されない領域である²⁾。曲げスパン600mmの場合の小さなドア寸法の場合は、板厚の増加が周方向座屈を遅らせる効果を持つ領域で、板厚の増大により高い吸収エネルギーが得られるようになる。一方大きなドアに相当する曲げスパン1250mmの場合は、薄肉でも周方向座屈は発生せず、板厚の増大による吸収エネルギーの増大は、最大荷重を上昇させるのみである。図17の二つ

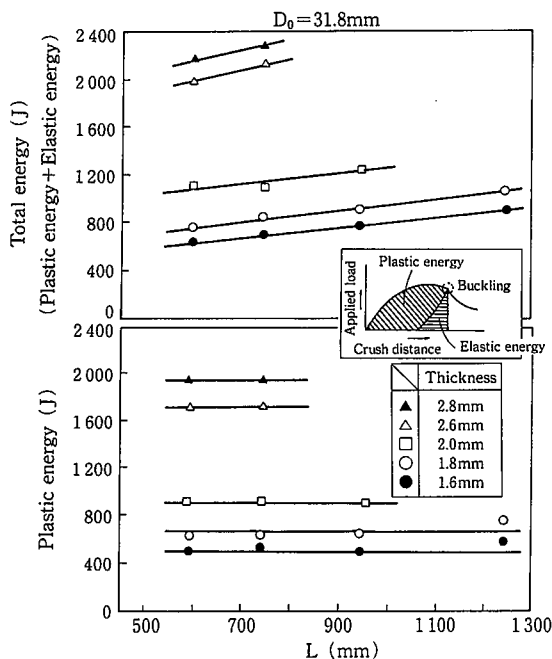


図 16 周方向座屈発生前の吸収エネルギー

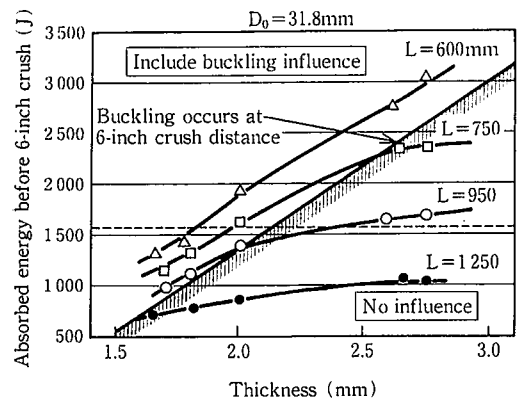


図 17 押込変位6インチに至るまでの吸収エネルギー

の領域の境界は6インチ変位での座屈発生条件に相当する²⁾。効果的に曲げ吸収エネルギーを高められる鋼管形状を求めるため、図17の吸収エネルギーを鋼管の断面積で除して、単位断面積（鋼管重量）当たりの曲げによる吸収エネルギーを求め、図18に示す。図18から、各曲げスパンいわゆるドア寸法ごとに軽量、高吸収エネルギーを達成できる t/D が存在することがわかる。例えば、曲げスパン800mm、鋼管外径31.8mmの場合、重量あたりの吸収エネルギーは板厚2.4mmで極大になる。

これまで低速における曲げ変形時の変形挙動及び吸収エネルギーについて述べてきたが、実際の衝突に相当する高速変形時についても若干述べる。高速にも対応した曲げ試験方法を図19に示す。曲げ吸収エネルギーは、低速の場合は図1の場合と同様に変位-荷重曲線の面積から、高速の場合は落垂の運動エネルギーから求めた。高速変形（負荷子の初速 $V_0=5.0/\text{sec}$ ）の場合と、低速変形（ $V_0=2.0 \times$

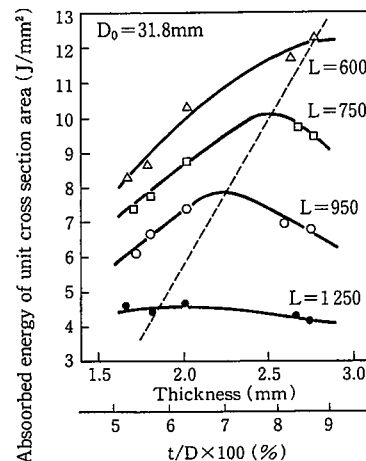


図 18 鋼管単位断面積当りの吸収エネルギー

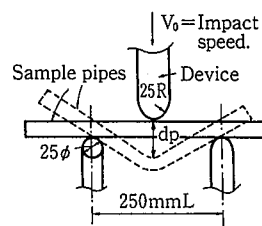


図 19 高速曲げ試験方法

	Absorbed energy
Static	$E_s = \int_0^{\delta_p + \delta_e} P(\delta) d\delta$ δ_p : Plastic crush distance δ_e : Elastic crush distance
Impact	$E_i = m \cdot g \cdot h$ m : Weight of the device h : Height of the drop weight

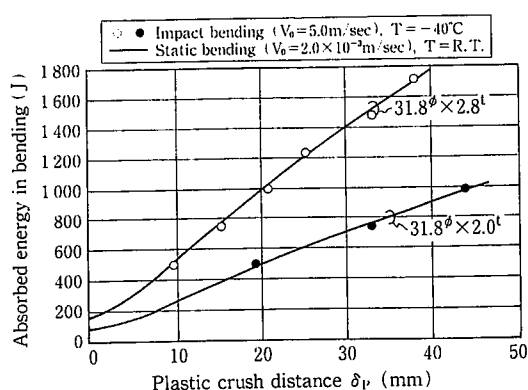


図 20 静的及び高速曲げ試験時の吸収エネルギー特性の比較
(31.8mm ϕ ×2.8mm t , 2.0mm t)

10⁻³m/sec)の場合の吸収エネルギーを比較して図20に示す。実線にて示す低速の曲げ変形時の吸収エネルギーに対して、○、●印にて示す高速変形時の吸収エネルギーは良く一致する。

一般に、BCC 金属は変形応力の歪速度($\dot{\epsilon}$)依存性があり、純鉄で m 値($m = \partial \ln \sigma / \partial \ln \dot{\epsilon}$)はおおよそ0.02~0.04とされている¹¹⁾。本開発鋼について10⁻³~10⁰sec⁻¹の広い範囲の歪速度で引張試験を行った結果では、 m 値は小さく($m < 0.001$)、歪速度依存性は認められなかった²⁾。そこで本開発材は、衝突のような高速変形の際の変形応力も、静的な変形で得られた挙動からの推定が可能と考えられる。

又、高速の曲げ変形を233K で実施した場合の鋼管外観を写真2に示す。いずれも2kJ 前後[乗用車平均車両重量×6インチ]のエネルギーを吸収しており、本試験温度にても脆性割れ等は観察されていない。

5. 結 言

3点曲げ試験により、インパクトビーム用鋼管の主な変形挙動の

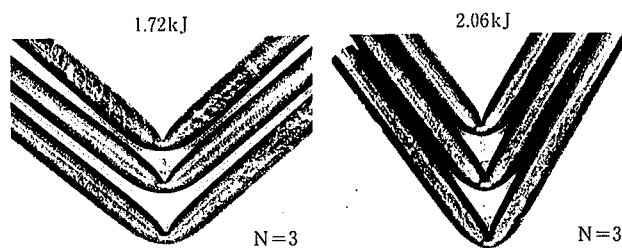


写真 2 高速曲げ変形(233K)後のサンプル外観
(25.4mm ϕ ×2.3mm t)

検討を実施し、その変形過程を明らかにした。そして、インパクトビーム用鋼管として必要な延性を満たす高強度、高延性、高靱性の電縫鋼管を開発した。この高強度電縫鋼管は、想定されるインパクトビームの使用環境下にて、高い吸収エネルギー特性が得られることを示した。

参 照 文 献

- 1) 田邊弘人, 山崎一正: 材料とプロセス. 4, p543 (1991)
- 2) 田邊弘人, 山崎一正ほか: Tubing for the Automobile Industry. Detroit, 1991 ITA p95
- 3) 遠藤順一, 室田忠雄: 塑性と加工. 23(258), p708 (1982)
- 4) 室田忠雄, 遠藤順一: 塑性と加工. 23(255), p343 (1982)
- 5) 遠藤順一, 室田忠雄: 塑性と加工. 27(301), p314 (1986)
- 6) 須藤正俊, 橋本俊一, 神戸章史: 鉄と鋼. 68, p1211 (1982)
- 7) 橋本俊一, 三村和弘, 細田卓夫, 須藤正俊: 鉄と鋼. 72, p1736 (1986)
- 8) Pickering, F. B. et al: JISI. (9), p66 (1960)
- 9) Hodge, J. M. et al: Trans. Metall. Soc. AIME. 167, p627 (1946)
- 10) 上野正勝, 伊藤亀太郎: 鉄と鋼. 74, p910 (1988)
- 11) 作井誠太, 酒井拓: 鉄と鋼. 58, p1438 (1972)