

自動車用薄鋼板の高速引張試験と部材軸圧潰試験

High Speed Tensile Test of Sheet Steels for Automotive Use and Axial Collapse Test of Columns

小嶋啓達/Nobusato Kojima・総合技術研究所 鋼板プロジェクト推進部 副主任研究員

水井直光/Naomitsu Mizui・総合技術研究所 鋼板プロジェクト推進部 主任研究員

福井清之/Kiyoyuki Fukui・総合技術研究所 鋼板プロジェクト推進部 主任研究員

川口喜昭/Yoshiaki Kawaguchi・科学技術庁 金属材料技術研究所 フロンティア構造材料研究センター 特別流動研究員 工博

塚本雅敏/Masatoshi Tsukamoto・住友金属テクノロジー(株) 強度受託研究部 波崎事業所 所長 工博

要 約

自動車の衝突安全性向上には、主要素材である薄鋼板の高強度化が有効と考えられるが、鋼板の強度には歪み速度依存性があるので、衝突に相当する高い歪み速度での引張試験特性を理解する必要がある。また、前面衝突時にはフロントサイドメンバーが軸圧潰してエネルギーを吸収するので、それを模擬した部材試験も必要である。

当社は、 $10^3/\text{s}$ オーダーの歪み速度が得られる高速引張試験機と、50tonfにて4 m/sの载荷速度を持つ大型の動的破壊試験機を保有しており、それらを用いて自動車用鋼板の評価試験および新鋼種の開発を行っている。本報では、試験設備と方法について説明するとともに、各種自動車用冷延鋼板の高速引張特性および部材の軸圧潰特性について報告した。

鋼板の準静的引張強さの増加に伴い、(1)動的引張強さは増加するが、静動比は低下すること、(2)部材の軸圧潰吸収エネルギーは増加すること、が明らかになった。軸圧潰において、残留 γ 鋼板は、同強度レベルの他の鋼板より約10%高い吸収エネルギーを示した。

Synopsis

It seems effective to apply the higher strength sheet steels to automotive structure for improving crashworthiness. Tensile testing properties at high strain rate have to be understood because of the strain-rate dependency of strength. It is also necessary to evaluate the components, such as front side members absorbing energy in frontal collision.

We have the high speed tensile machine, which is capable to obtain the strain rate of order of $10^3/\text{s}$, and the dynamic fracture testing machine, which is capable to apply the load of 50tonf at 4m/s. With these facilities, evaluation and development of sheet steels for automobiles are carried out. The facilities and methods are explained and the results of high speed tensile test and axial collapse test of column for several steels are reported.

It is clarified that dynamic tensile strength increases, dynamic-static ratio decreases and energy absorption of column collapse increases with increasing quasi-static tensile strength. Steel with retained austenite exhibits about 10% higher energy absorption than other steel with same tensile strength.

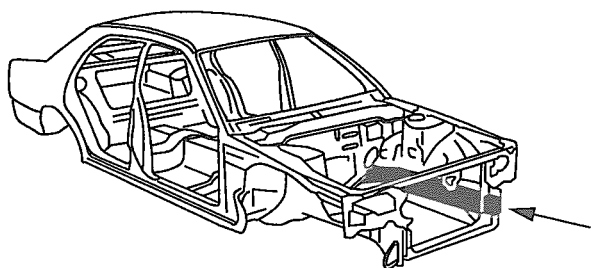
1. 緒 言

近年、自動車衝突時の安全性については、規制強化に加えて、衝突試験結果の一般公開が行われるようになり、社会的関心がますます高まっている。車体の衝突安全性を向上させるためには、板厚増加や補強部品の追加が有効であるが、車体重量増に伴って燃費が低下し、地球環境の観点での課題が生じる。自動車ボディーの主要構造のほとんどは薄鋼板のプレス部品からできているので、薄鋼板自体の強度を上げることにより、重量増を伴わずに安全性を向上

できると期待できる。

鋼板の強度は、通常は準静的引張試験によって測定されているが、変形抵抗は歪み速度に大きく依存し、高歪み速度ほど変形抵抗が増加することが知られている¹⁾。したがって、衝突のような高速変形現象を議論するためには、衝突に相当する高い歪み速度での引張試験特性を理解する必要がある。また、衝突のFEM解析においても、歪み速度を考慮した応力-歪み曲線が入力データとして求められている。

自動車の前面衝突に対しては、第1図に示すフロン



第1図 自動車のホワイトボディとフロントサイドメンバー
(フロントレール)

Fig.1 White body of automobile and front side member
(front rail)

ト・サイド・メンバーあるいはフロント・レールと呼ばれる部品が主要な安全部材であり、衝突時にそれらを蛇腹状に変形させて運動エネルギーを吸収する車体構造が一般に採用されている。これらの部品に用いる鋼板を高強度化した場合に、部材としての特性がどれだけ向上するかを評価するために、モデル化した部材の軸圧潰試験も必要である。

鋼板の高強度化には種々の冶金的手法があるが、高強度化に伴って一般にプレス成形性は低下するので、強度が同じでありながら衝突時の吸収エネルギーが大きい鋼板が好ましい。そのような特性を得るための材料設計について検討がなされているが、複合組織鋼が好ましい^{2),3)}、TRIP鋼が好ましい^{4),5)}、材料組織による差はない^{6),7)}、などの報告があり、まだ材料開発の指導原理は得られていない。

以上のように、自動車の衝突安全性を向上させるためには、薄鋼板の高速引張試験や部材の軸圧潰試験による研究が重要であり、本報告ではそれらの試験方法と、自動車用鋼板についての試験結果について紹介する。

2. 高速引張試験の概要

引張試験において速度を上げることは、駆動機構よりも荷重測定で点で困難さが増してくる。歪み速度が $10^3/s$ 程度になると、弾性波の伝播を考慮しなければ正しい荷重の測定ができなくなる⁹⁾。 $10^3/s$ オーダーの歪み速度における応力-歪み曲線を精密に測定するため、Hopkinsonの応力棒を応用した種々の試験法があり⁹⁾、薄板の試験法も考案されている^{10),11),12)}。

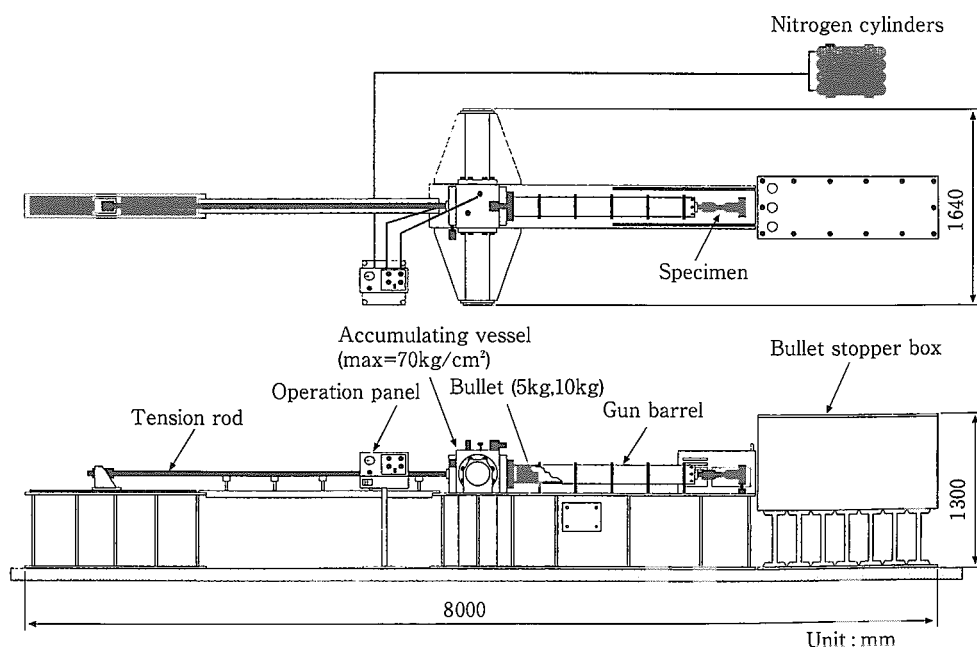
本章では、弊社波崎研究センタに設置した高速衝撃引張試験機について説明する。試験機の外観および試験機構を第2図、第3図に、仕様を第1表に示す。最高100m/sの高速で飛行する弾丸を試験片の一端に当てて引きちぎる仕組みであり、計測原理はOne Bar法¹³⁾と呼ばれる方法である。

試験片の一端にはインパクトブロックと称するフランジを取り付け、もう一端を荷重検出棒の先端に取り付ける。

第1表 高速衝撃引張試験機の仕様

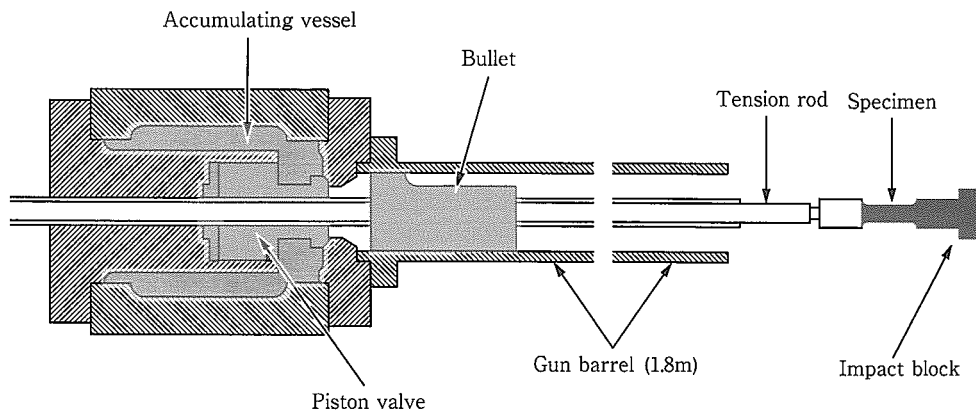
Table 1 Specification of high-speed impact tensile testing machine

Type of launch	Expansion of accumulated nitrogen gas
Launching pressure	1 ~ 70kgf/cm ²
Speed of bullet	Max. 100m/s (360km/h)
Weight of bullet	10kg (Max. speed 70m/s) 5 kg (Max. speed 100m/s)
Load	Max. 5,000kgf (with 10kg bullet at 25m/s)
Safety device	Pressure release valve of accumulating vessel (80kgf/cm ²) 4 Interlock systems for launch



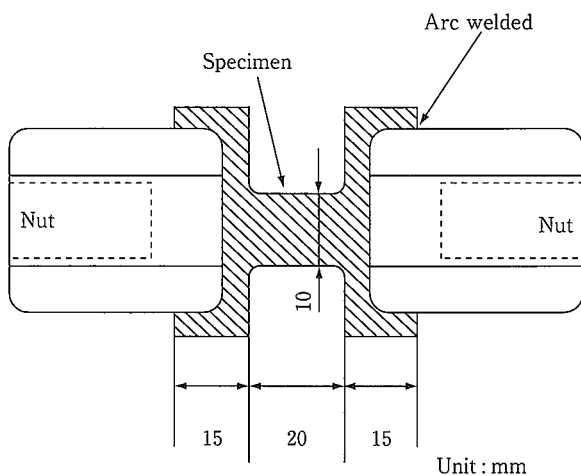
第2図 高速衝撃引張試験機の外観

Fig.2 Appearance of high-speed impact tensile testing machine



第3図 高速衝撃引張試験機の試験機構

Fig.3 Testing mechanism of high-speed impact tensile testing machine

第4図 引張試験片の形状 ($\dot{\epsilon} > 10^3/s$)Fig.4 Dimension of tensile specimen ($\dot{\epsilon} > 10^3/s$)

弾丸は、馬蹄形断面を有しており、荷重検出棒を跨いで飛行するよう設計されている。第2図中央の蓄圧室内の高圧窒素ガスを一瞬に解放すると、弾丸は弾道内で加速されながら右方向へ飛行してインパクトブロックを打撃し、試験片は塑性変形した後破断して飛び去る。インパクトブロックと破断した試験片は、水を満たした弾丸回収箱の隔壁を破って中に進入し、水の抵抗によって停止する。弾丸速度は蓄圧室の窒素ガス圧力によって制御し、弾道内の2ヶ所に設けられた光電センサーを通過する時間差から絶対値を測定している。

インパクトブロックの打撃により試験片に発生する応力は、1次元弾性波として荷重検出棒を左方向に伝播し、中央に貼られた歪みゲージによって検出され、荷重-時刻関係として記録される。歪みゲージを通過した波が荷重検出棒の固定端で反射されて右方向に伝播し、再び歪みゲージの位置まで戻ってくると試験片からの波に重畳するので、歪みゲージから固定端までを弾性波が往復する時間(1 msec強)が有効計測時間となる。

試験片の平行部はペンキで塗り分けられており、光学的に標線間距離を計測している。計測された荷重-時刻、変位-時刻関係から、弾性波が試験片から歪みゲージまで伝

播する時間差を考慮して時間項を消去すると、試験片の荷重-変位関係が求められる。

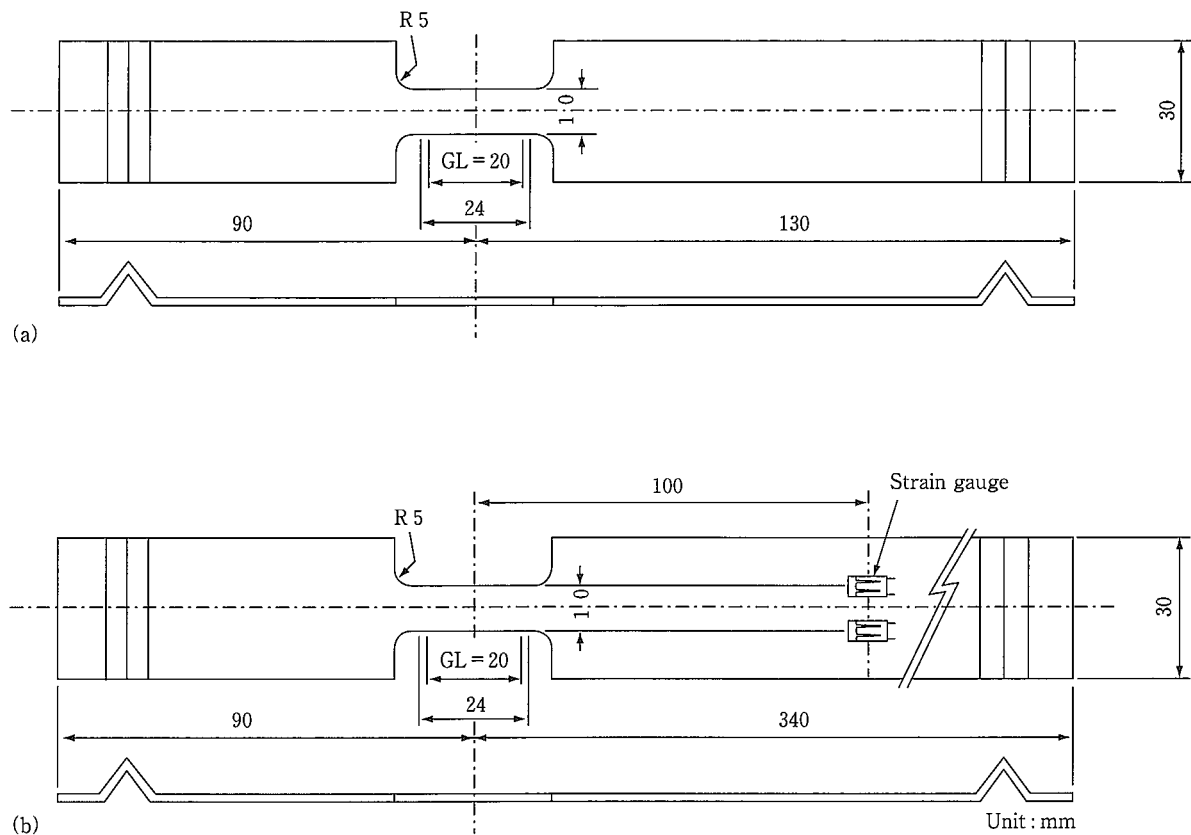
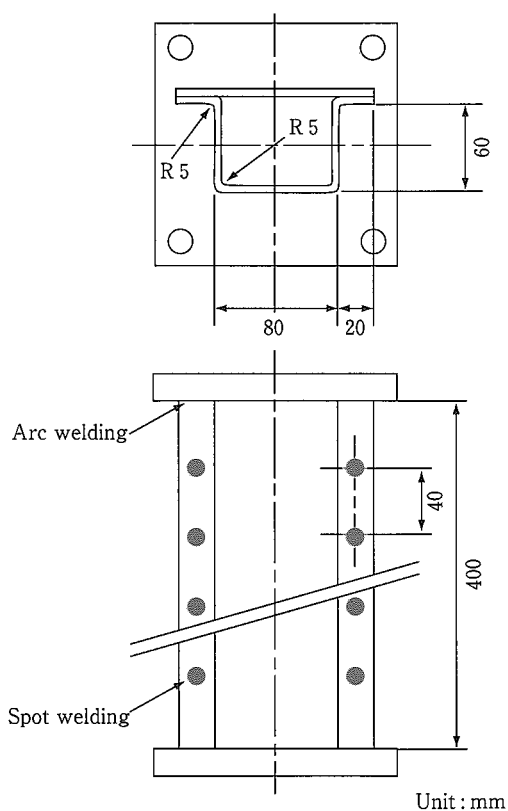
なお、試験片は第4図に示すような10mm幅、20mm長さの平行部を有する形状であり、両端はアーク溶接によりナットを取り付けた。このナットは、荷重検出棒およびインパクトブロックにネジ止めされる。歪み速度は弾丸速度と試験片の平行部長さで決まるはずであるが、実際にはインパクトブロックの塑性変形によって弾丸が減速される影響があり、予備試験を行って弾丸速度、すなわちガスの圧力を決定している。この試験片形状で、 $2 \times 10^3/s$ 程度の歪み速度が得られる。

なお、 $10^3/s$ 未満の歪み速度については、第5図に示すように長いつかみ部を有する形状の試験片を用い、次章で説明する動的破壊試験機を用いて引張試験した。歪み速度200/s、50/sについては、つかみ部に貼付した歪みゲージ出力から荷重を測定したが、それ以下の歪み速度では通常のロードセルの出力を利用した。

3. 部材軸圧潰試験の概要

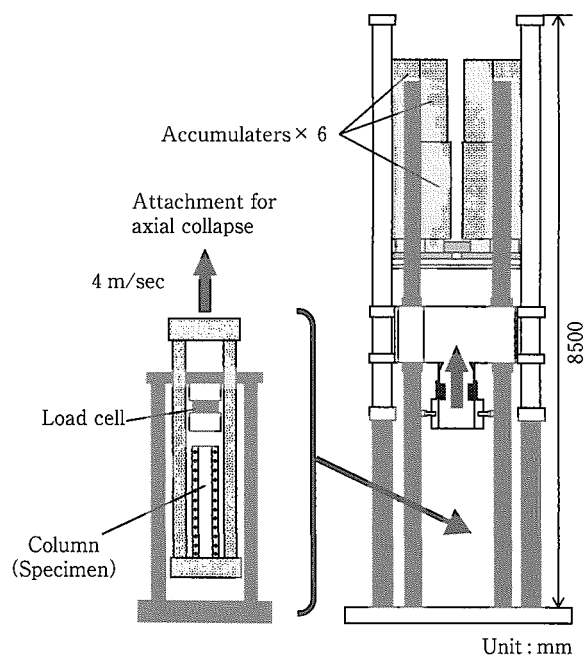
軸圧潰試験の供試体は、第6図に示す片ハット部材とした。プレスブレーキで曲げ成形したハット部材と背板をスポット溶接で接合し、両端には板厚6mmの鋼板をアーク溶接で取り付けた。このフランジは、試験体の治具への固定のためと、衝撃荷重が部材断面に均等に作用するために取り付けられている。

軸圧潰試験は、150tonf動的破壊試験機に治具を取り付けて行った。軸圧潰試験の模式図を第7図に、試験機と治具の外観写真を第8図に示す。試験機の仕様を第2表に示すが、4 m/secの速度で50tonfの荷重容量があり、自動車用部材の圧潰には十分過ぎる荷重容量が確保されている。本試験機のアクチュエータは引張方向に動く仕様のため、2重かご型の治具を用いて軸圧潰を可能としている。外側の治具は基礎に固定されており、上面の下側には圧電式ロードセルが取り付けられている。試験体の下側の

第5図 引張試験片の形状 (a) $\dot{\epsilon} < 10/s$ (b) $10 < \dot{\epsilon} < 10^3/s$ Fig.5 Dimension of tensile specimen (a) $\dot{\epsilon} < 10/s$ (b) $10 < \dot{\epsilon} < 10^3/s$ 

第6図 軸圧潰試験の供試体形状

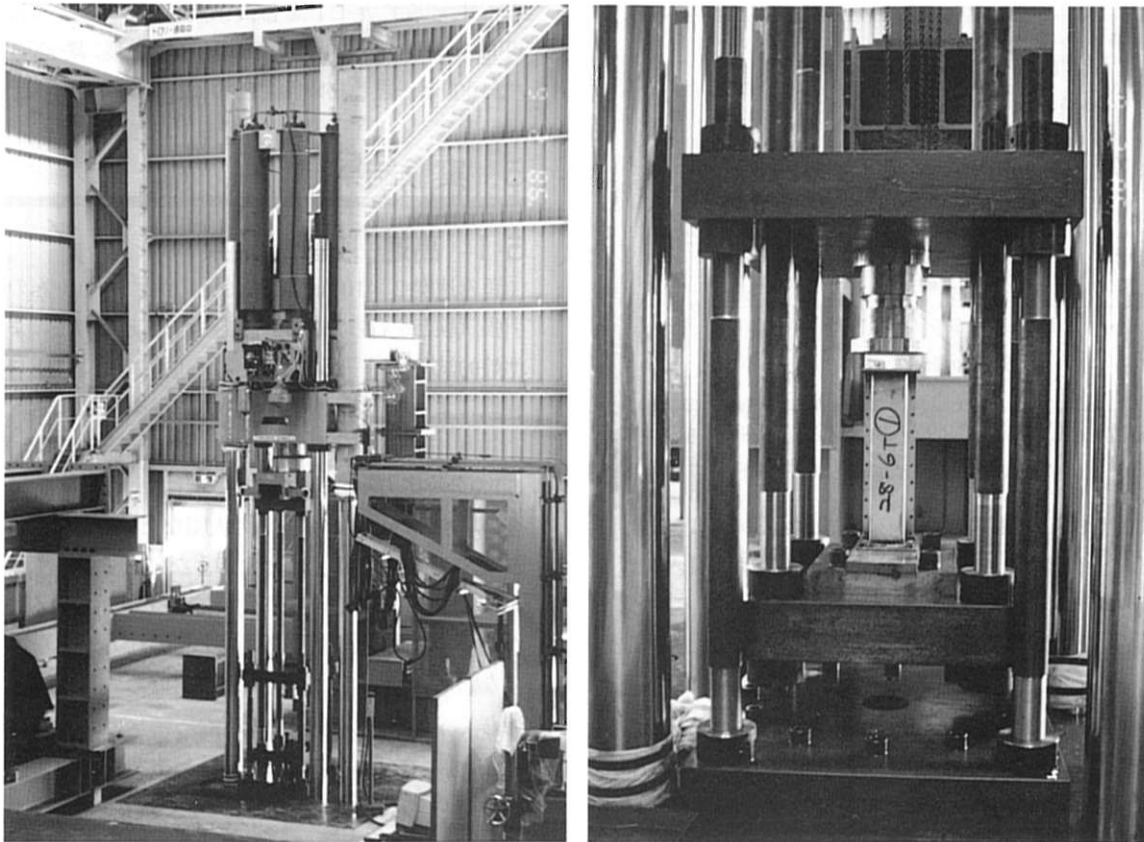
Fig.6 Dimension of column for axial collapse test



第7図 軸圧潰試験の模式図

Fig.7 Schematic illustration of axial collapse test

フランジは内側の治具にボルトで固定されており、アクチュエータにより内側の治具を引き上げると、部材の上側のフランジがロードセルに衝突して部材が軸圧潰される。荷重および変位は、分解能12ビット、サンプリング間隔 $5 \mu s$ の波形記憶装置にAD変換されて記録され、部材の変



第8図 動的破壊試験機と軸圧潰治具の外観

Fig.8 Appearance of the dynamic fracture testing machine and the device for collapse test

第2表 動的破壊試験機の仕様

Table 2 Specification of dynamic fracture testing machine

Load capacity	150ton at 2 000mm/sec 50ton at 4 000mm/sec
Actuator stroke	250mm
Actuator speed	0.01~100mm/sec (Closed loop control) 100~4 000mm/sec (Open loop control)

形状況は、500フレーム/sの高速ビデオにより記録される。

試験速度は、4 m/sの動的条件および200mm/minの準静的条件の2水準とし、200mmのストロークを一定速度

で潰した後に停止させた。アクチュエータの加速のため、試験体をロードセルから50mm離してセットして助走距離とした。

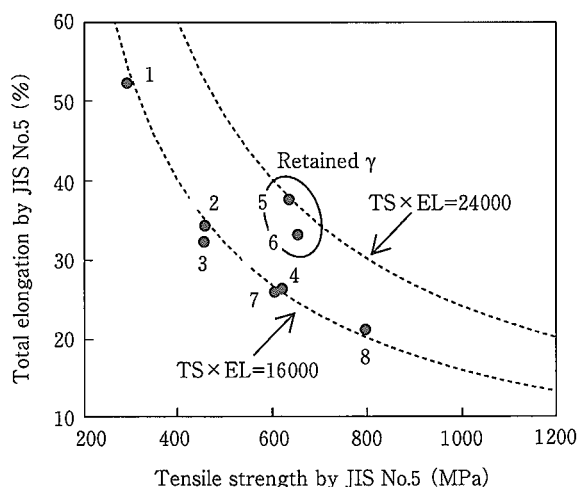
4. 供試材

引張強さが軟鋼レベルから780MPa級までの広範囲にわたり、組織も様々な8種の冷延鋼板を供試鋼とした。それらの成分とJIS 5号試験片で測定した機械的性質を第3表に示す。供試鋼の強度-延性バランスは、第9図に示すように、多くの鋼はTS×EL=16000の曲線上にあるが、

第3表 供試材の組織、化学組成および機械的性質(L方向)

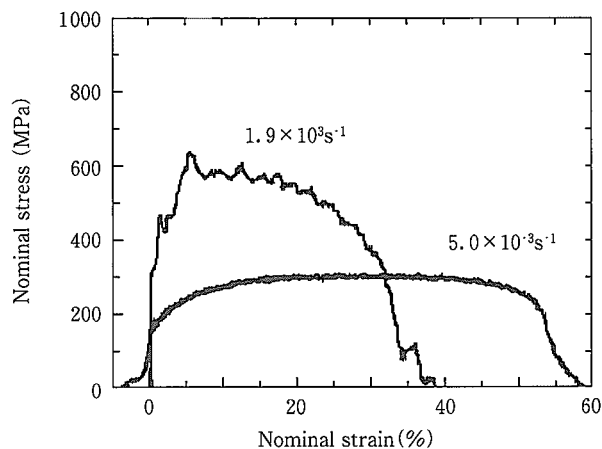
Table 3 Microstructure, chemical composition and mechanical properties of steels (L-direction)

	Microstructure	Chemical compositions (wt%)					YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)
		C	Si	Mn	P	Others			
1	Ferrite(α)	0.003	0.01	0.11	0.008	Ti	150	295	52.1
2	α +Cementite	0.093	0.01	0.48	0.110		275	445	37.4
3	α +Cementite+NbC	0.071	0.14	0.36	0.029	Nb	366	458	34.2
4	α +Pearlite+NbC	0.10	1.25	1.25	0.013	Nb	462	620	26.3
5	α +Bainite+Austenite	0.12	1.28	1.57	0.006	Al	400	636	37.5
6	α +Bainite+Austenite	0.13	1.00	1.50	0.020	Al	460	645	33.1
7	α +Martensite	0.06	0.06	1.72	0.032		450	611	26.6
8	α +Martensite	0.08	0.99	1.73	0.014		582	795	21.1



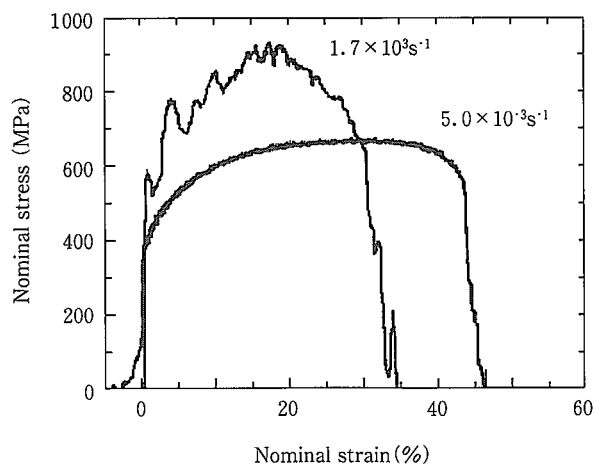
第9図 供試鋼の強度-延性バランス

Fig.9 Strength-ductility balance of steels



第10図 異なる歪み速度における極低炭素IF鋼板(鋼1)の応力-歪み曲線の比較

Fig.10 Stress-strain curves of ULC-IF steel (steel1) at various strain rates



第11図 異なる歪み速度における590MPa級残留γ鋼板(鋼5)の応力-歪み曲線

Fig.11 Stress-strain curves of 590MPa grade steel with retained austenite (steel 5) at various strain rates

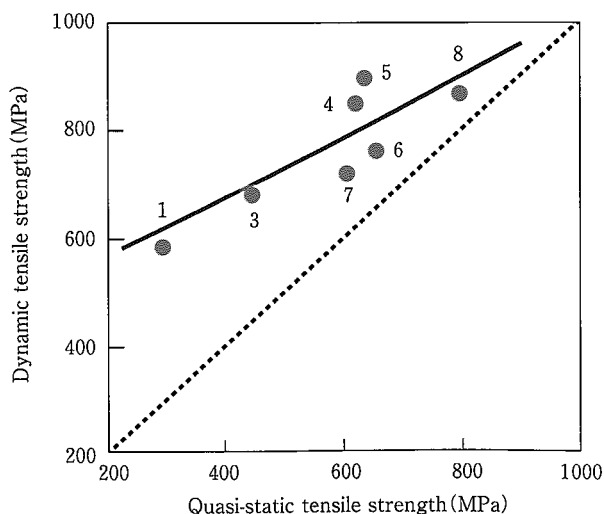
残留オーステナイトを含む鋼板(鋼5, 6)は, TRIP効果 (Transformation Induced Plasticity)によってTS×EL=24000と一段と高い延性を示している。

5. 実験結果

5-1 高速引張試験結果

歪み速度 $2 \times 10^3/s$ の動的引張試験と $5 \times 10^{-3}/s$ の準静的引張試験を行った。動的試験は前述した方法によって、準静的試験は同一形状の試験片を用いてインストロン型試験機によって行った。第10図および第11図に、極低炭素Ti添加IF軟鋼板(鋼1)および590MPa級の残留γ鋼板(鋼5)の公称応力-公称歪み曲線を比較した。鋼1は歪み速度の増加に伴い、引張強さの大幅な上昇が認められるが、鋼5での上昇は鋼1ほど大きくない。また、すべての歪み量において変形抵抗が同じ割合で上昇しているわけではなく、また鋼1と鋼5ではの上昇の仕方が異なっている。すなわち、鋼1では低歪み域における変形抵抗の上昇が著しく全伸びは大幅に小さくなっている。一方、鋼5では、全伸びが鋼1よりも小さいにもかかわらず、より高歪み域での変形抵抗の上昇が大きい。

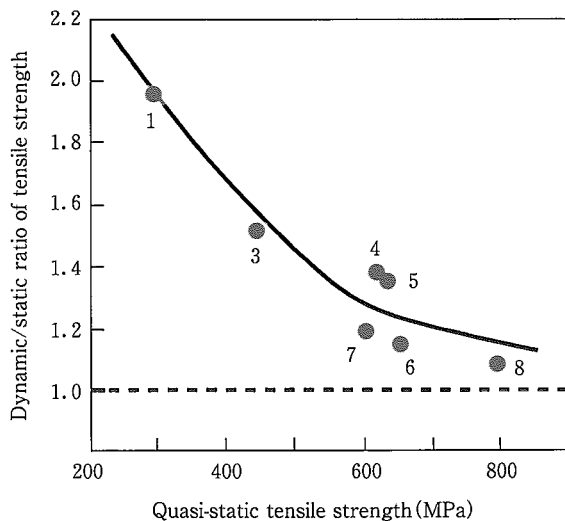
動的引張強さと準静的引張強さの関係を第12図に示す。準静的引張強さの増加に伴い、動的引張強さも上昇している。軟鋼板と高張力鋼板の強度の差は、高歪み速度になると小さくなるものの、同じになったり逆転することはない、衝突安全に対して高張力化は有効であると推察される。動的引張強さと準静的引張強さの比(以下静動比と呼ぶ)と静的引張強さの関係を第13図に示す。準静的引張強さの上昇に伴い、静動比は単調に低下しており、準静的引張強さが同じであれば材料組織の違いは現れていない。なお、以上の傾向は、同じ供試材をSplit Hopkinson Bar法で試験した結果¹⁴⁾においても確認されている。



第12図 動的引張強さと準静的引張強さの関係

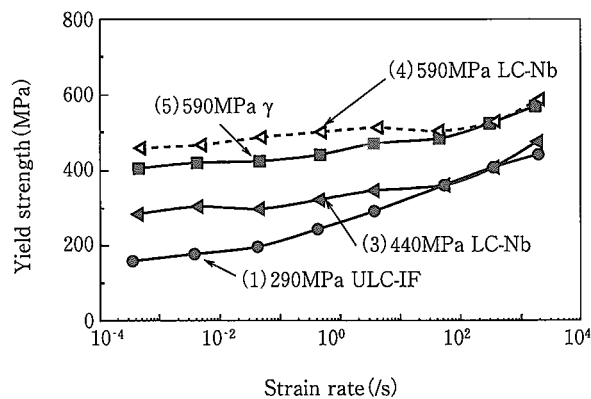
Fig.12 Relation between quasi-static and dynamic tensile strength

歪み速度を連続的に変えて測定したときの降伏点と引張強さの変化を、第14図、第15図に示す。降伏点は、歪み速度の上昇に伴い上昇し、低強度の鋼板ほど上昇量が大きい。降伏点は



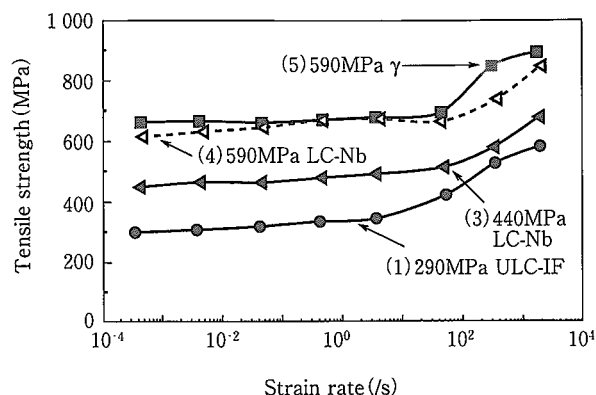
第13図 静的引張強さと静動比の関係

Fig.13 Relation between quasi-static tensile strength and dynamic/static ratio of tensile strength



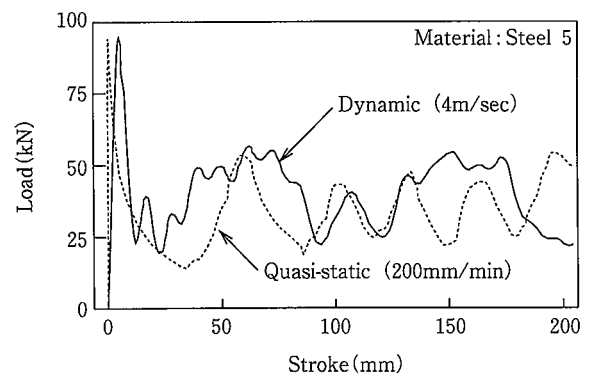
第14図 降伏点に及ぼす歪み速度の影響

Fig.14 Effect of strain rate on yield strength



第15図 引張強さに及ぼす歪み速度の影響

Fig.15 Effect of strain rate on tensile strength



第16図 軸圧潰の荷重-変位曲線の例

Fig.16 Example of load-stroke curve in axial collapse of column

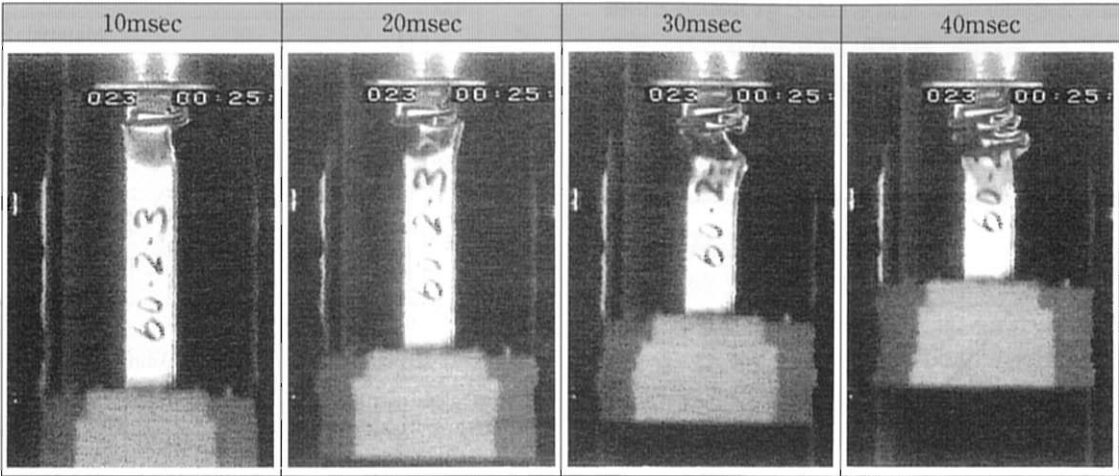
10^{-2} /s以上から徐々に上昇し始めるのに対して、引張強さは 10 /s以下ではあまり変化せず、それ以上の歪み速度で急激に上昇している。

5-2 部材軸圧潰試験結果

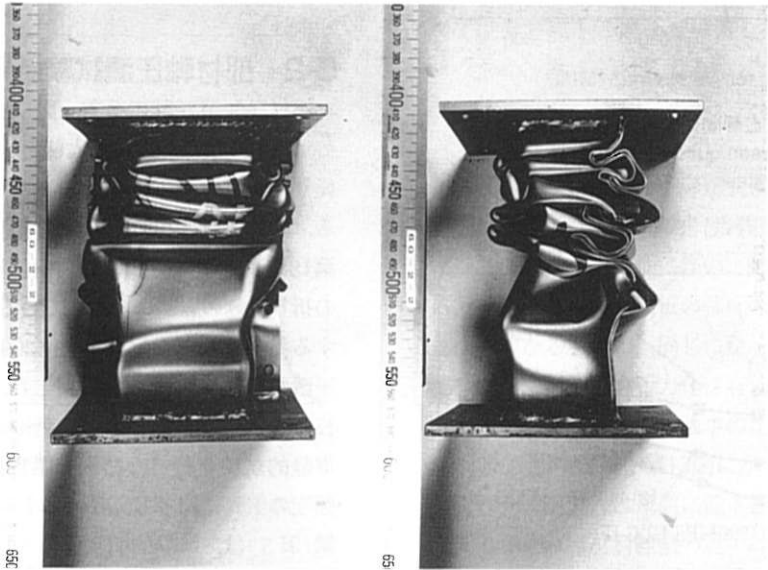
部材軸圧潰試験の荷重-変位曲線の例を第16図に示す。荷重は、圧潰開始時に最大値を示して急減した後、増減を繰り返すが、平均的には変位に関わらずほぼ一定荷重となる。動的試験中の変形状況を第17図に、試験後の外観を第18図に示す。荷重に周期的に現れているピークは部材の折り畳みの周期に一致している。衝突時の安全性を評価する指標として、荷重を変位200mmまで積分して求めた圧潰吸収エネルギーを採用した。第3表の中から板厚が1.2mmの5鋼種について4 m/sの動的と200mm/minの準静的試験を行った結果を第19図に示す。鋼板の準静的強度の上昇に伴って、吸収エネルギーは上昇する。残留 γ 鋼(鋼5)は、準静的引張強さが同レベルの他鋼種より約10%高い吸収エネルギーを示した。動的と準静的の吸収エネルギーを比較した結果を第20図に示す。動的圧潰吸収エネルギーは静的圧潰吸収エネルギーの増加に伴って増加し、両者の比は1.2から1.4の範囲にある。

エネルギー吸収に部材のどの部位が寄与しているかは、実際の部材設計の上では、大変興味がある情報である。圧潰後の鋼板の硬度から歪み量を推定し、そこにおける吸収エネルギーを評価することは可能であるが、部材全体にわたって分布を求めることは多大な労力を要する。部材は塑性変形に伴って発熱するが、その分布は定性的にはエネルギー吸収の分布と考えられるので、赤外線カメラによる部材の温度分布測定を行った。赤外線カメラの時間応答性の制約から、準静的試験のみに適用した。板厚1.6mmの440MPa級鋼板を用いた部材の結果を第21図に示す。赤外線画像は、可視画像と同期しているが、画角は異なっている(赤外線画像は正面斜め左側から撮影)ため、両者の形状は完全には一致していない。100s経過までは、ハットのコーナー部の発熱が明瞭であり、そこに歪みが集中してい

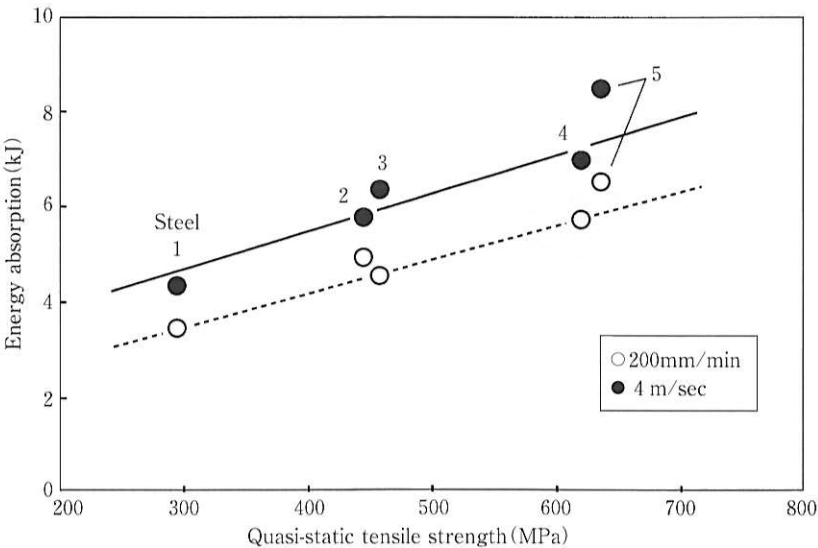
技術報文



第17図 動的軸圧潰中の試験体の変形挙動
Fig.17 Deformation behaviour of column during dynamic axial collapse test



第18図 軸圧潰後の試験体の外観
Fig.18 Appearance of column after collapse test

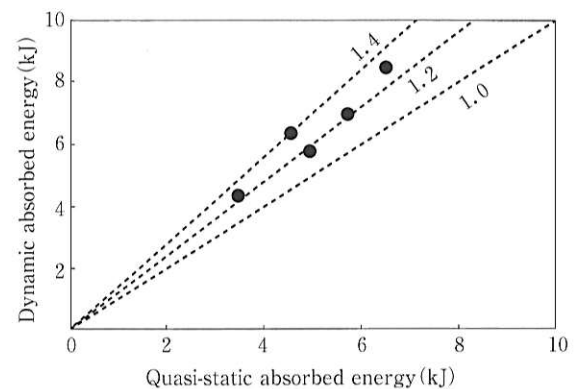


第19図 軸圧壊吸収エネルギーに及ぼす鋼板の準静的引張強さの影響
Fig.19 Effect of quasi-static tensile strength of steels on energy absorption of axial collapse

ることがわかる。時間の経過に伴い、熱伝導によって温度分布が一様化されるので、真の発熱と区別がつかなくなっていく。

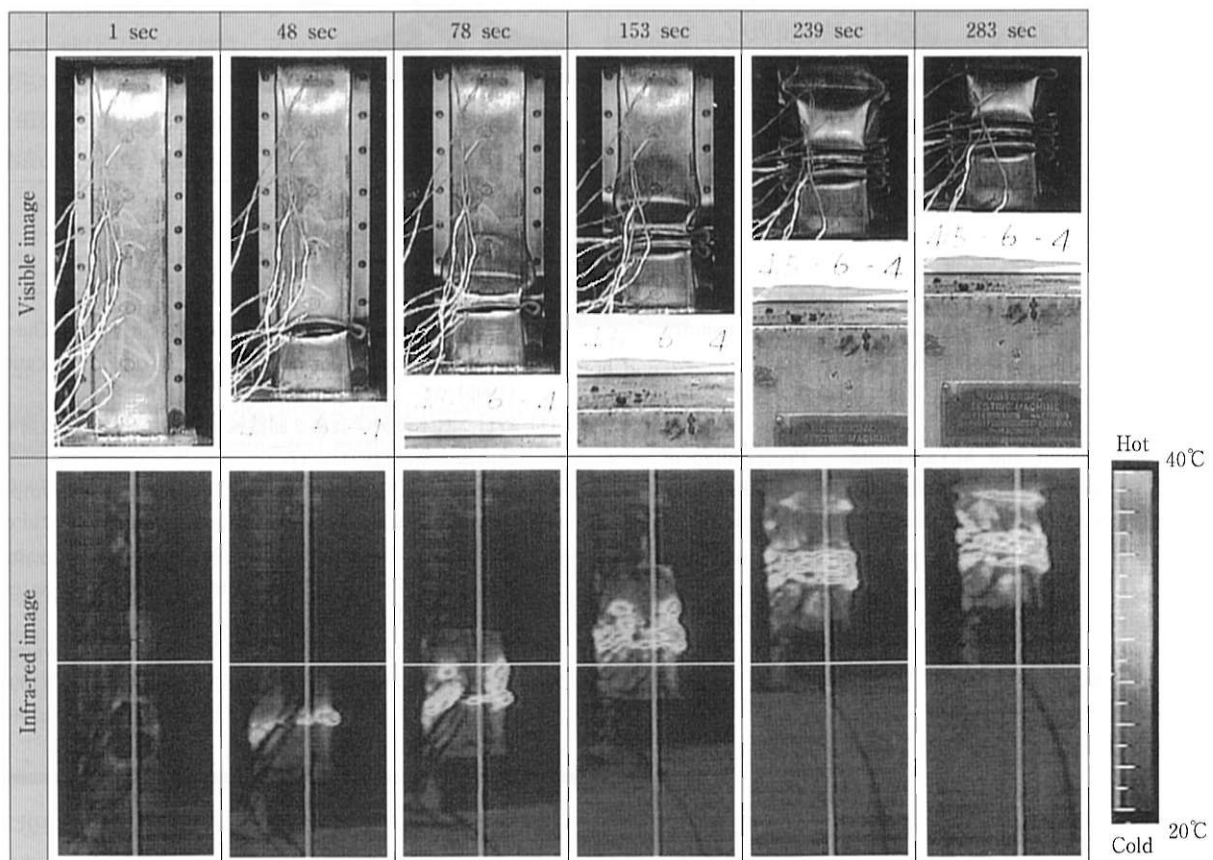
6. 考 察

残留 γ 鋼(鋼5)は、部材圧壊試験において大きな吸収エネルギーを示した。これは、第9図にも示したように、応力誘起変態塑性(TRIP)による大きな伸びに起因するものと考えられる。そこで、引張試験の応力-歪み曲線と部材の吸収エネルギーの関係を、 n 乗硬化則を用いて考察した。式(1)の n 乗硬化則を仮定すると、式(2)のように一様伸び(uEI)の真歪みが n 値と等しくなるときに、公称応力が最大、すなわち引張強さ(TS)となるので、式(3)が得られる。式(2, 3)より定数 C を消去すると、式(4)のよ



第20図 軸圧潰における動的吸収エネルギーと準静的吸収エネルギーの関係

Fig.20 Relation between dynamic and quasi-static energy absorption in axial collapse



第21図 赤外線カメラで測定した準静的軸圧潰試験中の部材の温度分布

Fig.21 Temperature distribution measured with infra-red camera on the surface of column during quasi-static axial collapse

うに書き直すことができる。ただし、 e は自然対数の底である。

$$\sigma = C \cdot \epsilon^n \quad (1), \quad n = \ln(1 + uEI) \quad (2)$$

$$\sigma_{atTS} = TS \cdot (1 + uEI) = C \cdot n^n \quad (3)$$

$$\sigma = TS \cdot (e/n)^n \cdot \epsilon^n \quad (4)$$

鋼板が、歪み ϵ_m まで塑性変形したとすると、単位体積あたりのエネルギー吸収 E_m は式(5)で与えられる。

$$E_m = \int_0^{\epsilon_m} \sigma d\epsilon = TS \cdot (e/n)^n / (n+1) \cdot \epsilon_m^{n+1} \quad (5)$$

E_m に及ぼす n 値の影響は ϵ_m の絶対値によって異なるが、高歪み域($\epsilon_m > 0.7$)では n 値の増加に伴い E_m は単調に増加する。PAM-CRASHによるシュミレーション結果では、軸圧潰した部材のハットコーナー部の歪み量は0.95に達するので¹⁵⁾、 n 値が高いほど部材の吸収エネルギーが向上すると推測される。したがって、残留 γ 鋼板のように

TRIP効果によって高い n 値が大歪み域まで持続する鋼板は、部材の吸収エネルギーが高くなると考えられる。

また、式(5)からは、動的引張強さが高いほど動的圧壊吸収エネルギーが高くなることが明らかなので、鋼板の静動比が高いことは好ましい。本実験の範囲では、静動比は準静的引張強さの増加に伴って低下し、特異的に静動比が高い鋼板はなかったが、高静動比鋼板の探索は今後の課題である。

7. 結 言

自動車の衝突安全性の向上の観点から、主要素材である薄鋼板の高速変形挙動の解明は重要である。その評価試験として、高速引張および部材軸圧潰の試験設備と試験方法について紹介した。各種の冷延鋼板について試験した結果、準静的引張強さの増加に伴い、(1)動的引張強さも増加するが、静動比は低下すること、(2)部材の軸圧潰吸収エネルギーは増加すること、が明らかになった。

軸圧潰において、残留 γ 鋼板は、同強度レベルの他の鋼板より約10%高い吸収エネルギーを示した。部材吸収エネルギーを高めるためには、動的な引張強さを高める他にも、 n 値が大ききことが重要であると考えられる。



小嶋啓達/Nobusato Kojima

総合技術研究所
鋼板プロジェクト推進部
副主任研究員
(問合せ先：06(489)5722)

参考文献

- 1) J.D.Campbell and W.G.Ferguson : Phil. Mag., **21**(1970), 63
- 2) K.Miura, S.Takagi, O.Furukimi, T.Obara and S.Tanimura : SAE Paper No. 960019, (1996)
- 3) 高木, 三浦, 古君, 谷村 : CAMP-ISIJ, **9**(1996), 1108-1111
- 4) K.Fukui, N.Mizui and M.Yamamoto : Proceedings of IBEC-96, Body Design & Engineering, (1996), 135-139
- 5) 水井, 福井, 小嶋, 山本, 川口, 岡本 : CAMP-ISIJ, **9**(1996), 1100-1103
- 6) 佐藤, 吉武, 沖田 : CAMP-ISIJ, **8**(1995), 1625
- 7) A.Yoshitake, K.Sato and T.Okita : SAE Paper No. 960020, (1996)
- 8) U.S.Lindholm : Behavior of Materials under Dynamic Loading, ASME, (1965), 42
- 9) T.Nicholas and S.J.Bless : ASM Handbook Vol.8, (1985), 208
- 10) M.Itabashi and K.Kawata : Proc.of Plasticity '95, The 5th Int. Symp. on Plasticity and Its Current Applications, (1995), 52
- 11) 谷村 : 日本機械学会第2回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集, (1994), 17
- 12) T.Yokoyama : Proc.of Plasticity '95, The 5th Int. Symp. on Plasticity and Its Current Applications, (1995), 207
- 13) K.Kawata, S.Hashimoto, K.Kurokawa and N.Kanayama : Proc. Conf. Mechanical Properties at High Strain Rates of Strain 1979, Inst. of Phys., (1979), 71
- 14) N.Mizui, K.Fukui, N.Kojima, M.Yamamoto, Y.Kawaguchi, A.Okamoto and Y.Nakazawa : SAE Paper 970156, (1997)
- 15) 山本, 水井, 福井 : 日本機械学会講演論文集, No.96-15 (1996), 451