計装化シャルピー試験機を用いた炭素鋼等に対する材料物性の簡易評価法の開発

坂之上　悦　典*1
服　部　　悟*2
三　田　好　明*3

［要　　旨］

計装化シャルピー衝撃試験機を用いて計測された衝撃波形から得た近似曲線を用いて、計測される変位の２次微分の変化点に注目し各種鋼材の塑性限および弾性限を推定した。形状係数および衝撃係数を用いることにより、引張試験より得られる弾性限応力とシャルピー衝撃試験から得られる弾性限応力が良好な一致を示した。

1　はじめに

日常にある工業製品の強度を評価する上で、材料の破断強度（σ_B）は良く用いられるが、製品設計においては、材料の弾性域を越えた降伏強度（σ_Y）が目安とされることが多い。　これは多くの製品の場合、き裂の発生を引き起こす限界荷重での使用状況を把握し発生するき裂の伝ぱを観察することが、コスト上引き合わないためである。簡単な形状である板材などの強度評価は、CAE 技術が発達した今日、素材メーカが提供する物性値で充分に検討しうるものである。しかし、衝撃荷重が作用する場合や切り欠き等の応力集中が見られる形状においては、平滑材での引張試験で得られる既存データ以外にも衝撃荷重に対する定性的な強さを表しているといわれるシャルピー衝撃試験により得られるデータも用いられる。とりわけ、計装化シャルピー衝撃試験においては、材料が破壊に至るまでの荷重-変位曲線を得ることができるため、計測対象素材が脆性的か延性的かをグラフ形状により判断できる。計装化シャルピー衝撃試験機を用いてき裂の伝ぱについて検討されたものは、小林[1)~5)]らの報告が見られるが、その後の計測機器の進歩にあわした衝撃試験データの報告は少ない。

シャルピー衝撃試験において、き裂場の特性を表す破壊靭性値 K_{IC} (MPa$\sqrt{m}$)、降伏応力 σ_Y (MPa)、シャルピー衝撃試験値 CVN(J) との間に Rolfe-Novak-Bursom の式①[6)] が見出されている。

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_Y}\right)^2 = 0.52\left(\frac{CVN}{\sigma_Y} - 0.02\right) \quad 式①$$

この、K_{IC} と σ_Y の関係については更に、岩館[7) 8)]らが詳細に検討し低合金鋼のシャルピー吸収エネルギーと引張特性から、上部棚温度における破壊靭性を推定する計算式として用いている。　そこで、一試料で衝撃荷重に対する荷重-変位量曲線が得られる計装化シャルピー衝撃試験の特性を生かし、簡便に降伏応力 σ_Y に近い弾性限を推定する手法について検討したので報告する。

＊１　基盤技術課　主任研究員
＊２　基盤技術課　副主査
＊３　中丹技術支援室　主任研究員

2　実験方法

用いた試料は当センターにて相談事例の多いFC250、FCD700、S45C-0、SCM435-0 の４種である。試験片形状は、シャルピー衝撃試験および曲げ試験には、図１に示すように中央部に深さ 2mm、先端半径 0.25mm のｖノッチ形状を有する 10×10×55mmのものを、引張試験には図２に示す試験部がφ12mm の丸棒試験片を用いた。計装化シャルピ衝撃一試験機は㈱米倉製作所製　CHARPAC　50 J（図 3　装置概観）、引張試験は㈱島津製作所製オートグラフ　AG-250KNIS　MO 、伸び測定には㈱島津製作所製　伸び計 SSG25-50H、引張試験曲げ試験は㈱オリエンテック製　UTC-25T を使用した。評価試験片の温度は、シャルピー衝撃試験は 0℃、曲げ試験は 0℃および室温(約 23℃)、引張試験は室温（約 23℃）である。

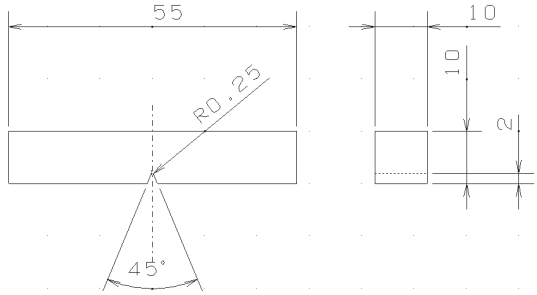

図1　シャルピー衝撃試験に用いた試料形状

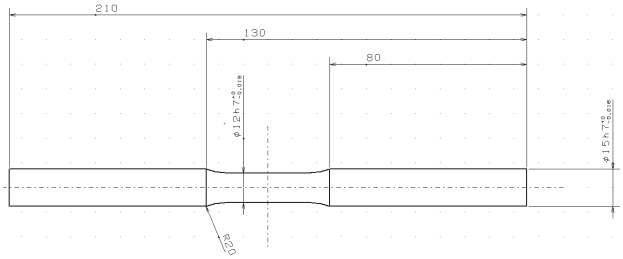

図2　引張試験に用いた試料形状

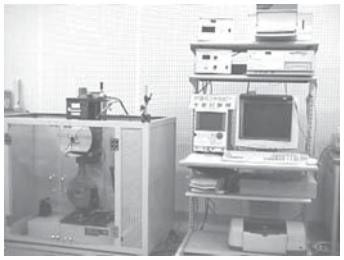

図3　計装化シャルピー衝撃試験機の概観

3　結果

4 種材料の引張試験における応力-歪曲線結果を、図 4、5、6、7 に示す。0℃における曲げ試験結果を図８、室温における曲げ試験結果を図 9、シャルピー衝撃試験においては各種材料２本ずつ実施し荷重-変位曲線を図 10(a)(b)、図 11(a)(b)、図 12(a)(b)、図 13(a)(b)に示す。得られたデータの材料と試験の対応をまとめると、表 1 となる。

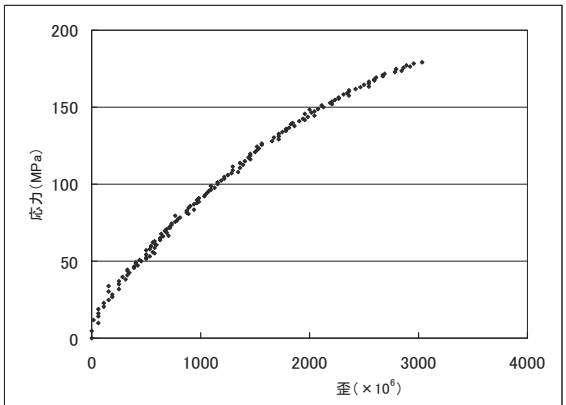

図4　応力-歪曲線(FC250)

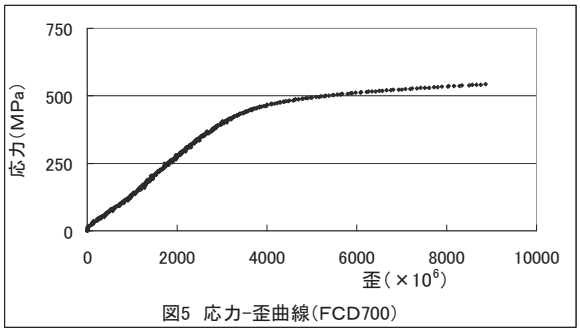

図5　応力-歪曲線(FCD700)

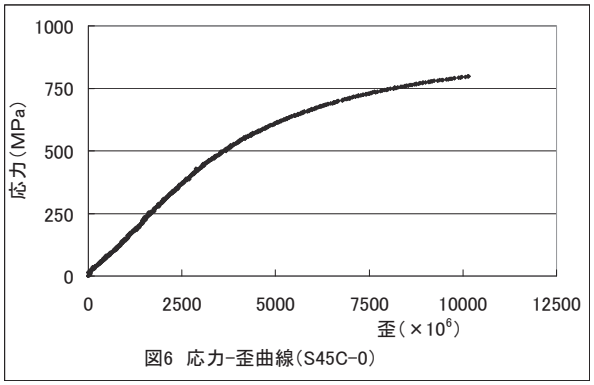

図6　応力-歪曲線(S45C-0)

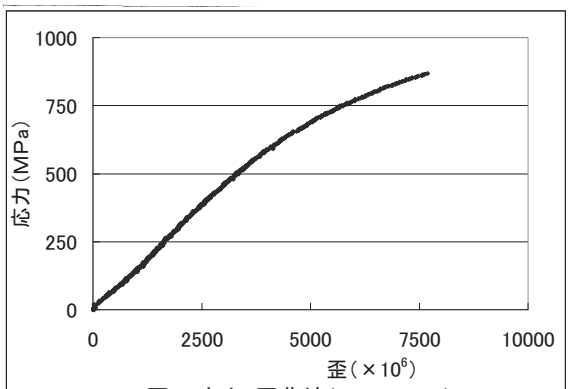

図7　応力−歪曲線（SCM435−0）

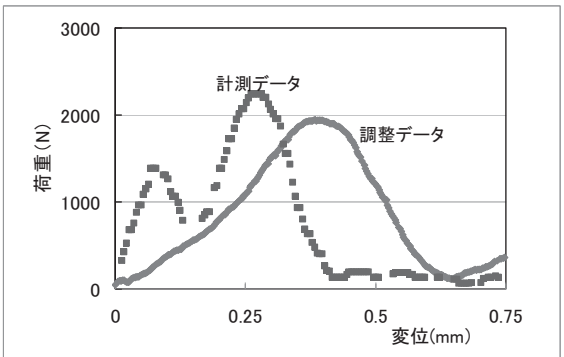

図10(b)　荷重−変位曲線（材質：FC250）

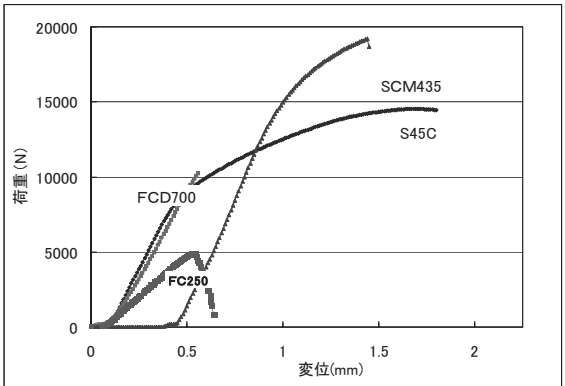

図8　各種材料の曲げ試験結果（荷重−変位関係、0℃）

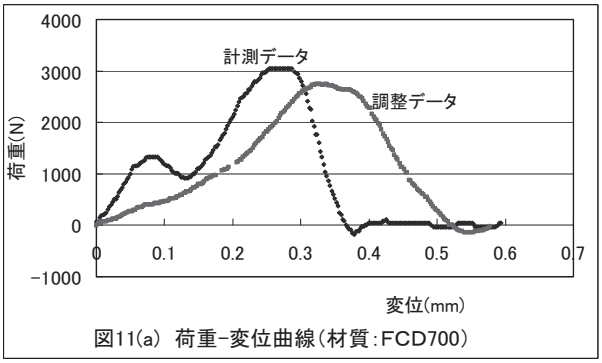

図11(a)　荷重−変位曲線（材質：FCD700）

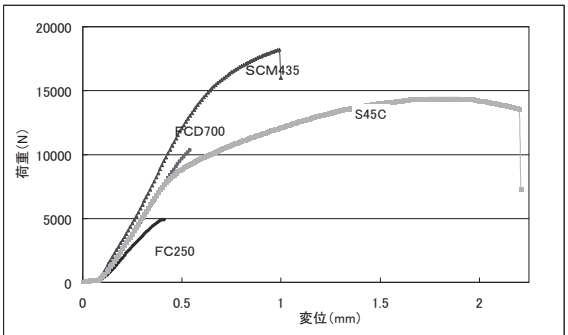

図9　各種材料の曲げ試験結果（荷重−変位関係、室温）

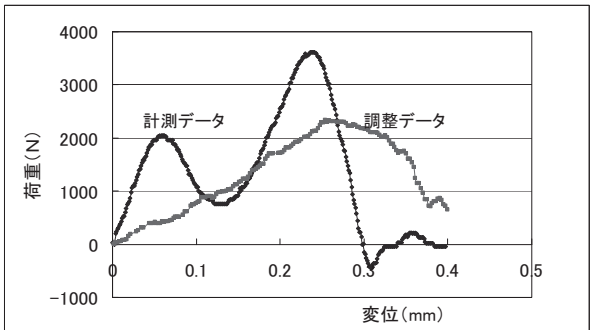

図11(b)　荷重−変位曲線（材質：FCD700）

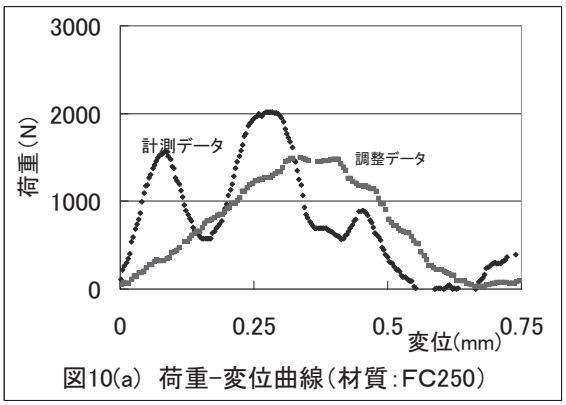

図10(a)　荷重−変位曲線（材質：FC250）

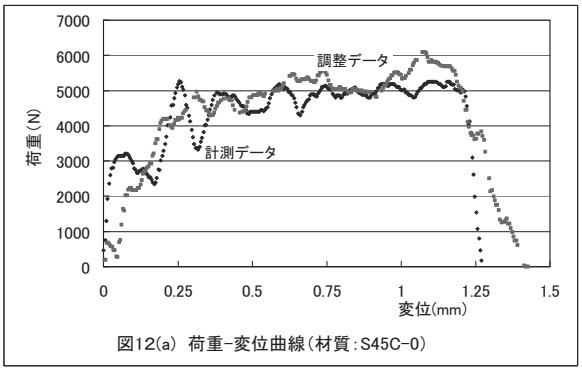

図12(a)　荷重−変位曲線（材質：S45C−0）

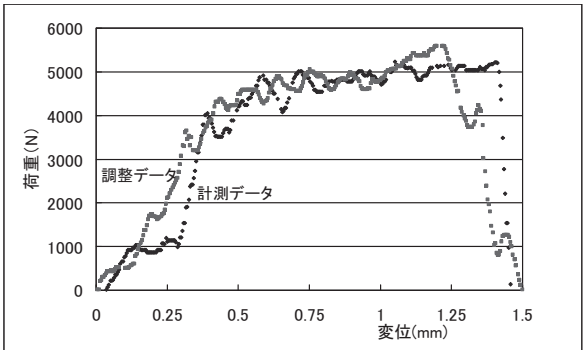

図12(b) 荷重-変位曲線（材質：S45C-0）

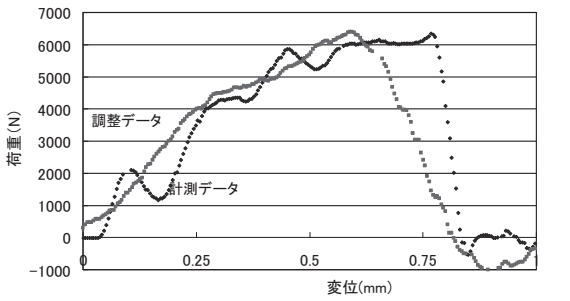

図13(a) 荷重-変位曲線（材質：S4CM435-0）

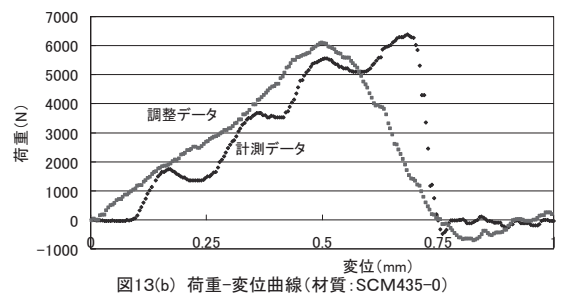

図13(b) 荷重-変位曲線（材質：SCM435-0）

表１　各種材料と試験結果（図）との対応について

		素材			
対応試験		FC250	FCD700	S45C-0	SCM435-0
応力-歪曲線		図4	図5	図6	図7
曲げ試験	0℃	図8			
	室温	図9			
荷重—変位曲線		図10(a)	図11(a)	図12(a)	図13(a)
		図10(b)	図11(b)	図12(b)	図13(b)

４　考察

4．1　弾性率の計測

各種材料の応力-歪曲線から得られる弾性率は、FC250：94.6×10^3（MPa）、FCD700：161.7×10^3（MPa）、S45C-0：133.6×10^3（MPa）、SCM435-0：153.3×10^3（MPa）となった。

図 8、9 より各種材料に対する温度の影響による弾性率の変化を検討したところ、装置の初期ガタを除いた荷重-変位曲線の傾きは、ほとんど影響を受けないことが解った。そのため、常温で計測した弾性率を変位計算時での数値とする。

４．２　装化シャルピー衝撃試験により得られた波形について

図 10 から図 13 中の計測データが示すとおり、材種によらず一定周期のうねり（約 9.8HZ から 48.8HZ が主たるもの）が含まれている。これは、試験機ハンマーと試験片との衝撃衝突によるハンマーの振動と考えられる。そのため、当該周波数帯域を除いた波形を各種計測結果に調整データとして記す。以後、各波形の調整データについて検討を行う。

得られた荷重-変位曲線について初荷重から最大荷重近傍までのデータについて 5 次の近似曲線と比較したところ、表 2 に示すとおりデータと近似曲線の相関係数 R^2 は概ね 0.99 近傍と非常に良好な近似曲線となった。

表２　シャルピー衝撃試験により得られた荷重-変位データと近似曲線の相関について

試験片種類		近似式（荷重(y)-変位(x)）	相関係数R^2
FC250	(a)	$y=208631x^5-351770x^4+143987x^3-18775x^2+5097x$	0.997
	(b)	$y=-812924x^5+543364x^4-94182x^3+6484x^2+3415x$	0.999
FCD700	(a)	$y=-5235042x^5+3456751x^4-6755505x^3+47590x^2+4071x$	0.999
	(b)	$y=-4580042x^5+2037570x^4-222922x^3+5736x^2+7451x$	0.997
S45C-0	(a)	$y=-608594x^5+1055339x^4-599026x^3+99173x^2+15696x$	0.979
	(b)	$y=-40503x^5+137957x^4-161985x^3+69721x^2+249x$	0.988
SCM435-0	(a)	$y=-1080472x^5+1798461x^4-1066633x^3+253366x^2-69097x+493$	0.996
	(b)	$y=-1842601x^5+2142940x^4-830126x^3+122454x^2+5666x$	0.999

シャルピー試験片のノッチ底からのき裂発生、伝ぱを考えた場合、1）荷重が加わることで、ノッチ底近傍で弾性限まで変形、２）荷重増加に伴い、ノッチ底では塑性変形が始まり、塑性変形域の外側では弾性限まで変形が増大、３）塑性限を越えたノッチ底からき裂が発生、伝ぱが始まる、以上の現象が順次起こると考えられる。

1）の過程では、荷重が平滑材に作用するときよりノッチ底ではローカルな範囲でより大きな荷重が作用すると考えられる。衝撃試験片(板厚10mm)を中央部に集中荷重を受ける両端支持はりと考え、同一変位を与える平滑材（板厚8mm=10mm−2mm（ノッチ深さ））の集中荷重と比較し、その荷重比を形状係数とする。曲げ試験において材料毎に得られた形状係数を表 3 に示す。1.7 から 1.9 の値となり、概ね 1.8 であった。

表3　材料毎の形状係数

材料	係数
FC250	1.83
FCD700	1.71
S45C-0	1.81
SCM435-0	1.92

単純はりの中央部で集中荷重(F)を受けるときの中央部の変位(δ)

$$\delta = \frac{FL^3}{48EI}$$

F：荷重
L：はりのスパン長
E: 縦弾性係数
I：断面2 次モーメント

材料力学において、衝撃荷重を受ける物体の変形量は、カスチリアノの定理より静的に変形させたときより計算上 2 倍となる。シャルピー衝撃試験において、荷重は短時間で作用するが、材種によりその作用時間は異なり、荷重-変位曲線に示すとおり、より長い時間のハンマーの作用を受けるものは、時間あたりの衝撃荷重を緩和していることになる。この点を考慮して、衝撃に伴う同一変位を与える増加仮想荷重と実際の荷重との比を衝撃係数とする。算出には、試験片破断にいたるまでの変位をパラメータとし、最小の変位（0.4mm）を与える FCD700(b)の場合の係数を 2、最大の変位（1.5mm）を与える S45C(b)に対する係数を 1 として、算出式は、式②で与えた。

$$(\text{衝撃係数}) = \frac{26 - 10 \times \text{破断時の変位(mm)}}{11} \quad \text{式②}$$

2）の塑性変形がローカルに発生する点および、3）のき裂発生位置については、小林らがコンプライアンスの急変点であると指摘している。そこで、荷重-変位曲線について、2次微分、3次微分をとり、傾きの変化を表す点について検討をする。2次微分が 0 となる近傍では傾きの傾向が変化し符号が変わる。これは、変形モードが変化する点と考えられこの点における変位を塑性限（P_0）とした。例として、FC250(b)の場合の 2 次微分曲線を図 14 に示す。なお、FC250(a)の場合のみ、図 15 に示すとおり測定された 2 次微分が単調に変化したため、き裂の発生に伴う変位の変化が変わる点として 2 次微分の変曲点（3 次微分が 0 となる点）を塑性限（P_1）とした。

塑性限を与える変位以下で弾性限を与える変位について検討する。この場合、傾きの変化をあわす 2 次微分の変曲点が直接の変化点（E_0）である。例として FC250(b)の場合を図 16 中に示す。一方、弾性域においては変位に対する変化の割合が一定もしくは一様に変化すると考えられるのに対し、塑性域では変位に対する変化の割合は、引張試験時における荷重-変位曲線が一様でなく、また一定範囲の弾性域に対し塑性域が増加するため、2 次微分は複雑に変化する。この点に注目して 2 次微分において変位開始時における接線と、塑性限における接線との交点を弾性限（E_1）とした。例として、S45C(a)の場合を図 17 に示す。

以上の仮定により得られた弾性限、塑性限、形状係数、衝撃係数およびこれらに基づく計算弾性応力限と引張試験により得られた弾性応力限（FC250 に関しては素材特性より 0.1%耐力を採用)、シャルピー衝撃値を表 4 に示す。表より、

計算弾性応力限は測定弾性応力限と良好な一致を得た。

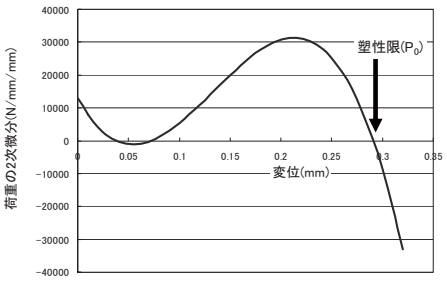

図14　変位の2次微分曲線（計測データ：FC250(b)、材質：FC250）

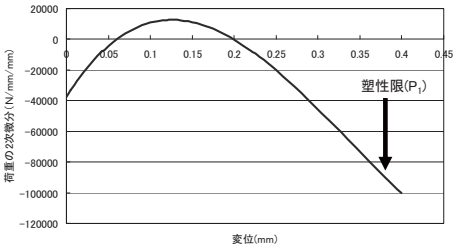

図15　変位の2次微分曲線（計測データ：FC250(a)、材質：FC250）

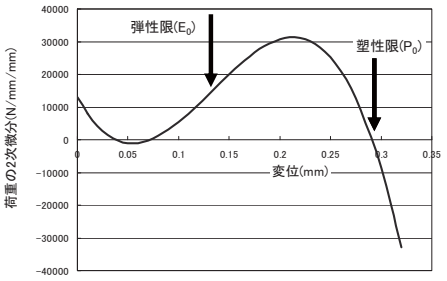

図16　変位の2次微分曲線（計測データ：FC250(b)、材質：FC250）

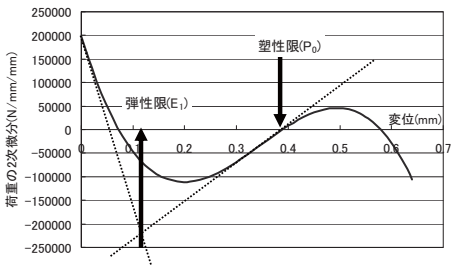

図17　変位の2次微分曲線（計測データ：S45C(a)、材質：S45C-0）

5　まとめ

4 種の鋼材（FC250、FCD700、S45C-0、SCM435-0 の）に対し計装化シャルピー試験機を用いて衝撃試験を実施し、衝撃波形から弾性限を得る手法について検討した。以下に得られた結論をまとめる。

1)　測定対象とした鋼材において 0℃と室温（約 23℃）における弾性率に大きな相違はない。

2)　計測された衝撃波形からうねり成分を除いた波形に対し、初荷重から最大荷重までを 5 次の曲線で近似したところ良好な一致を見た。

3)　シャルピー試験片におけるノッチを起因とする応力集中係数は、概ね 1.8 である。

4)　衝撃試験における荷重に関する見かけ上の荷重加算率を破断に至までの変位を考慮することにより、最大 2 最小 1 の衝撃係数として与えた。

表4　シャルピー衝撃試験波形より計算される弾性限と引張試験より測定された弾性限の比較

種類	番号	シャルピー塑性限（N）	塑性限パターン	シャルピー弾性限(N)	弾性限パターン	形状係数	衝撃係数	最大変位量（mm）	計算弾性限応力（Mpa）	測定弾性限応力（Mpa）	割合（%）	シャルピー衝撃値（J）
FC250	(a)	1466	P_1	488	E_1	1.8	1.7	0.7	142	170	84	2.243
	(b)	1422	P_0	486	E_0	1.8	1.7	0.7	142	170	83	2.349
FCD700	(a)	1995	P_0	1163	E_0	1.7	1.9	0.5	354	370	96	9.936
	(b)	1684	P_0	1121	E_0	1.7	2.0	0.4	357	370	97	2.172
SCM435	(a)	4819	P_0	1643	E_1	1.8	1.6	0.8	454	500	91	9.892
	(b)	4798	P_0	1364	E_1	1.8	1.6	0.8	377	500	75	7.113
S45C	(a)	4596	P_0	2390	E_1	1.9	1.0	1.5	426	420	101	19.754
	(b)	4733	P_0	1984	E_1	1.9	1.1	1.4	386	420	92	17.844

5)　荷重-変位関係において、2 次微分における変曲点および符号が変化する点を考慮することにより、塑性限を推定できる。

6)　荷重-変位関係において、2 次微分における塑性限以下の変曲点または推定された塑性限および変位初期点における接線の交点が弾性限となる可能性を見出した。

7)　衝撃波形から 1）から 6）の結論に基づいて推定される計算弾性限は、引張試験より計測される測定弾性限と良好な一致を見た。

（参考文献）

1）小林俊郎、材料、Vol.51、No.7,pp.771-779（2002）

2）小林俊郎、鉄と鋼、第 71 年、第 6 号、pp.654-660（1985）

3）小林俊郎、鉄と鋼、第 71 年、第 16 号、pp.1934-1940（1985）

4）小林、山本、新家、鉄と鋼、第 72 年、第 15 号、pp.2133-3140（1986）

5）小林、山本、上村、鉄と鋼、第 74 年、第 5 号、pp.903-909（1988）

6）R.Roberts and C.Newton 、WRC Bulletin、265(1981)

7）岩舘、竹俣、材料、Vol.41、No.467,pp.1241-1247（1992）

8）岩舘、田中、竹俣、寺島、材料、Vol.35、No.395,pp.873-879（1986）