

鋼板の延性切欠破壊

DUCTILE NOTCH FRACTURE OF STEEL PLATES

奥村 敏恵*・堀川 浩甫**

By Toshie Okumura and Kohsuke Horikawa

1.はじめに

構造用鋼板などの材料に、切欠や付加物、あるいは溶接ビードなどがある場合、応力やひずみの分布に攪乱がある場合には、脆性破壊特性や疲労破壊特性が劣化することはよくしられているが¹⁾、これらを材料の延性との関連から考察しようとする基礎として、また切欠や付加物による応力やひずみの攪乱のある場合、あるいは機械的性質の異なる材料の混在している鋼板（たとえば鋼材を溶接した場合の溶着金属、ボンド硬化部、熱影響軟化部、および母材からなる鋼板を含む）の伸び特性²⁾それ自身を調べるために、常温における静的引張りといった材料のもっとも基本的な性質を調べる一連の試験を行なった。

試験片としては、軟鋼から80キロ級高張力鋼までの各種構造用鋼材を用いて、板厚20mm前後、板幅400mm前後といった、橋梁におけるはりのフランジやトラス弦材の板片などの、実際の構造部材に近い寸法の、あるものは母材のまま、あるものはリブや溶接ビードを付け、あるものはその中央に切欠を設け、またあるものは軟鋼と高張力鋼といった性質の異なる鋼材を混在さ

せた広幅試験片を製作した。

この実験的研究により数々の知見を得ることができたが³⁾、とくに、その中央にスリット状の切欠を設けた試験片（図-1(a)）の試験ではその破断の様式に、またその強度に、従来の小型試験では知られなかった性質が認められたので考察を加え以下に報告する。

2. 破面の性状

すなわち、スリット付き試験片の破断の様式は、断面全体としてのくびれが生じないうちに、スリットの先端にきれつを生じ、これが伝播して破断に至っているが、破面は脆性破壊とは異なり、板厚方向に傾斜した面をなし、これがある波長をもって表裏交代しながら、伝播成長している（図-2）。この波長は鋼種によって異なっており、伝播速度も1cmにつき数秒かかるといった程度できわめておそく、試験機のクロスヘッドの動きに支配されているようであり、脆性破壊のようにself-propagateするものではないようである。このような破壊を延性切欠破壊と呼ぶことにする。同じような現象については1966年5月の造船協会大会にも報告されているが⁴⁾、詳細な考察はされていない。

双曲線型偏微分方程式の特性曲線は、一般に不連続性の通過する経路の方向を示し、塑性応力場の問題においては、この特性曲線の表わす不連続性は、すべり面に対応するものと考えられている⁵⁾。上に述べた試験片の鋼種、形片による破面の相違を上記理論により考察しよう。

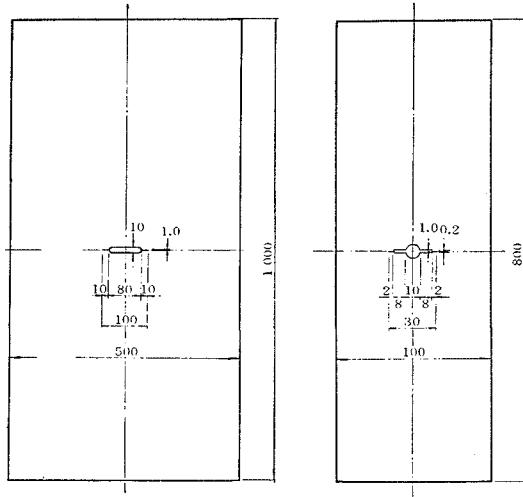
塑性（降伏）条件としてvon Misesのせん断ひずみエネルギー説

$$\begin{aligned} f = & \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - (\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x) \\ & + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) = \sigma_0^2 \end{aligned} \quad (1)$$

を探る。この場合にすべりは直交する3方向のいずれの方向にも広がりをもっているのでこの方向をx, y, z方向とする。塑性条件式(1)の最大値を求めるために、これをx, y, zで偏微分し、力のつりあいの方程式

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

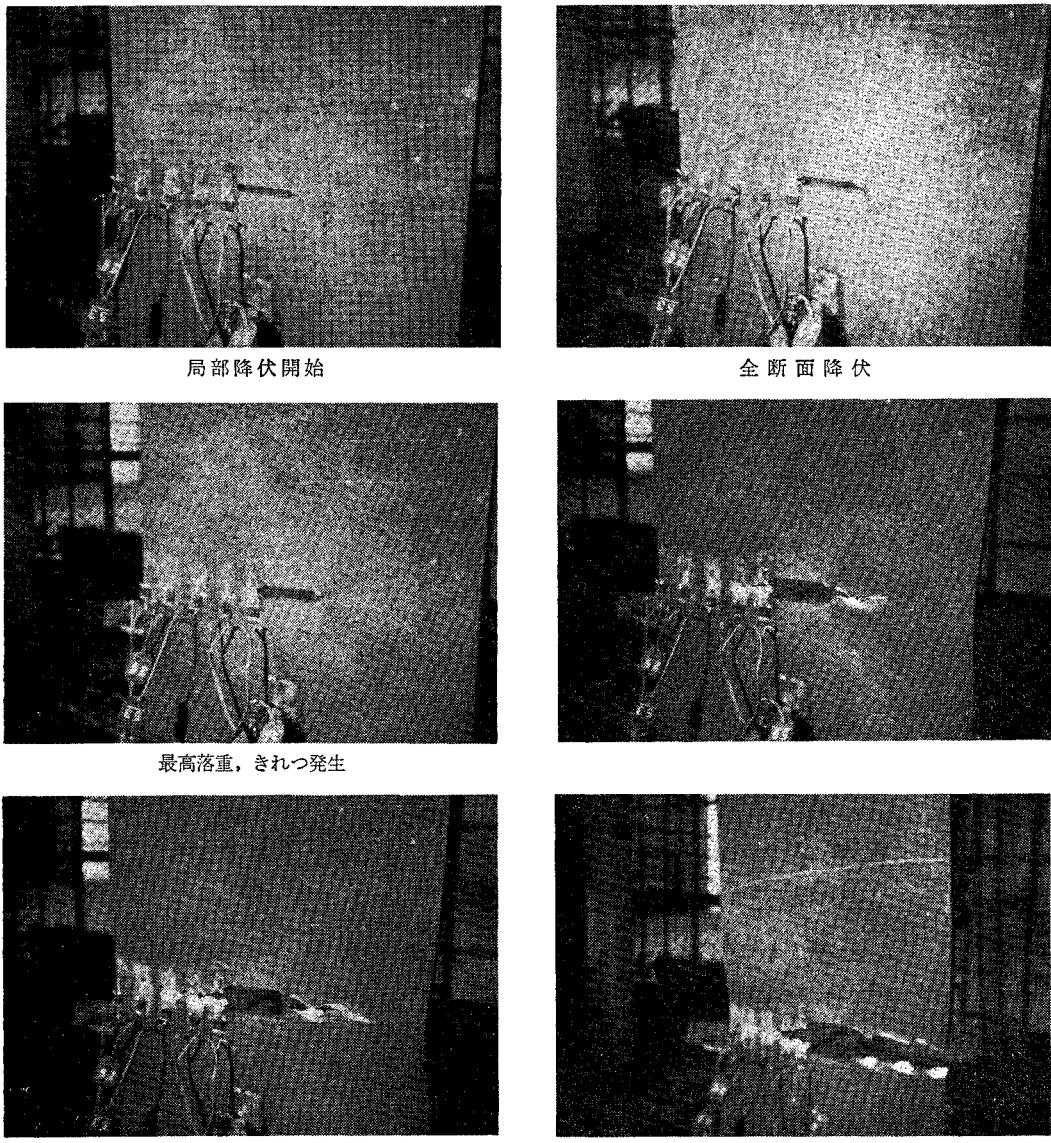
図-1 (a) 広幅スリット試験片 図-1 (b) 標準切欠試験片



* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 東京大学講師 工学部土木工学科

図-2 きれつ進行状況



を代入、整理すれば、塑性応力場を表わす偏微分方程式

$$\begin{aligned} & \left\{ (2\sigma_y - \sigma_z - \sigma_x) \frac{\partial^3 \tau_{xy}}{\partial x^2 \partial z} - 6\tau_{xy} \frac{\partial^3 \tau_{xy}}{\partial x \partial y \partial z} \right. \\ & + (2\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z) \frac{\partial^3 \tau_{xy}}{\partial y^2 \partial z} + \psi_z(\tau_{xy}) \Big\} \\ & + \left\{ (2\sigma_z - \sigma_x - \sigma_y) \frac{\partial^3 \tau_{yz}}{\partial x \partial y^2} - 6\tau_{yz} \frac{\partial^3 \tau_{yz}}{\partial x \partial y \partial z} \right. \\ & + (2\sigma_y - \sigma_z - \sigma_x) \frac{\partial^3 \tau_{yz}}{\partial z^2 \partial x} + \psi_x(\tau_{yz}) \Big\} \\ & + \left\{ (2\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z) \frac{\partial^3 \tau_{zx}}{\partial y \partial z^2} - 6\tau_{zx} \frac{\partial^3 \tau_{zx}}{\partial x \partial y \partial z} \right. \\ & + (2\sigma_z - \sigma_x - \sigma_y) \frac{\partial^3 \tau_{zx}}{\partial x^2 \partial y} + \psi_y(\tau_{zx}) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

を得る。ここに $\psi(\tau)$ は τ の 3 階未満の導関数の関数である。式 (3) の 3 つの $\{\}$ がそれぞれ同時にゼロとなれば式 (3) は成り立つから一つの解としてこの条件を探る。これらの式が

$$\left. \begin{aligned} 9\tau^2_{xy} - (2\sigma_y - \sigma_z - \sigma_x)(2\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z) &\geq 0 \\ 9\tau^2_{yz} - (2\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z)(2\sigma_y - \sigma_z - \sigma_x) &\geq 0 \\ 9\tau^2_{zx} - (2\sigma_z - \sigma_x - \sigma_y)(2\sigma_z - \sigma_x - \sigma_y) &\geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

の条件を満たすとき、式 (3) の 3 つの $\{\}=0$ は双曲線型の偏微分方程式であって、特性方程式

$$\left. \begin{aligned} (2\sigma_y - \sigma_z - \sigma_x)dy^2 + 6\tau_{xy}dxdy \\ + (2\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z)dx^2 = 0 \\ (2\sigma_z - \sigma_x - \sigma_y)dz^2 + 6\tau_{yz}dydz \end{aligned} \right\}$$

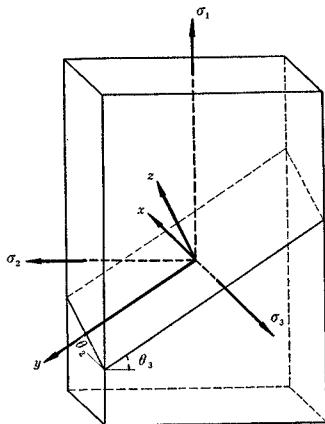
$$\left. \begin{aligned} & + (2\sigma_y - \sigma_z - \sigma_x) dy^2 = 0 \\ & (2\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z) dx^2 + 6\tau_{zx} dz dx \\ & + (2\sigma_z - \sigma_x - \sigma_y) dz^2 = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

は実根をもち、特性曲線の方向を表わす。すなわち

$$\left. \begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= \frac{-3\tau_{xy} \pm \sqrt{9\tau^2_{xy} - (2\sigma_y - \sigma_z - \sigma_x)(2\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z)}}{2(\sigma_y - \sigma_z)\sigma_x} \\ \frac{dy}{dz} &= \frac{-3\tau_{yz} \pm \sqrt{9\tau^2_{yz} - (2\sigma_z - \sigma_x - \sigma_y)(2\sigma_y - \sigma_z - \sigma_x)}}{2(\sigma_y - \sigma_z)\sigma_x} \\ \frac{dx}{dz} &= \frac{-3\tau_{zx} \pm \sqrt{9\tau^2_{zx} - (2\sigma_z - \sigma_x - \sigma_y)(2\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z)}}{2(\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(6)$$

いま図-3のように座標軸を取り、z面(x-y面)

図-3 座標系



とすべり面とが一致しているとすると

$$\frac{dx}{dz} = \infty \quad \frac{dy}{dz} = \infty \quad \dots\dots\dots(7)$$

でなければならず、式(6)の第2, 3式より

$$\left. \begin{aligned} 2\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z &= 0 \\ 2\sigma_y - \sigma_z - \sigma_x &= 0 \end{aligned} \right\} \therefore \sigma_x = \sigma_y = \sigma_z \quad \dots\dots\dots(8)$$

となる。

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ と $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ の間の関係から、 $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$ となるz面の方向を求める、板面に表われるすべり面の方向角 θ を計算すると

$$\tan \theta = \sqrt{\frac{\sigma_1 - 2\sigma_2 + \sigma_3}{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}} \quad \dots\dots\dots(9)$$

となる。種々の場合についての数値を表-1に掲げる。

これよりつぎのこと

がいえよう。板の単純引張の場合のすべりの方向角 $\theta = 35^\circ$

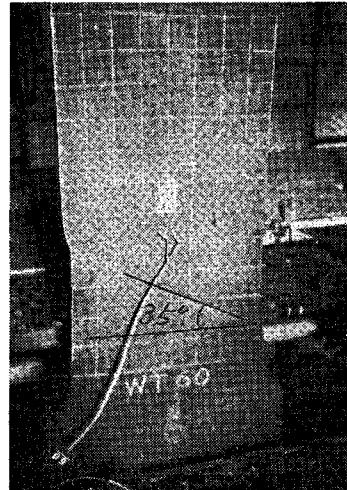
は実験とよく一致している(図-4)。一方丸棒試験片の中心部にあっては σ_2/σ_1 ,

σ_3/σ_1 とも相当な値を

表-1 すべりの方向

	板厚方向の応力比 (σ_3/σ_1)			
	0.1	0	-0.1	
板	0.6 0.55 0.5 0.45 0.4 0.3 0.2 0.1 0 -0.1 -0.2 -0.3 σ_2/σ_1	虚 0° 15° 20° 24° 29° 33° 35° 37° 39° 40° 41° 42° 43°	虚 0° 0° 14° 19° 26° 30° 33° 35° 37° 39° 40° 41° 42°	虚 虚 虚 0° 14° 14° 22° 27° 31° 35° 37° 38° 40° 41°

図-4 板状試験片のすべりの方向



もつ^{6),7)}(山ノ内⁶⁾によれば 0.4) ので θ の値は虚となり破断は壁開型となるので Cup を形成する。また切欠先端よりきれつが進行すると、応力集中により σ_2 の値が大きくなつて、すべり面の方向角はゼロとなり、ついには虚となつて、壁開型の破面となり、また新しい応力集中場を作り、つぎのすべり面へ移行する。このとき材料の絞り性によって、板厚方向の応力 σ_3 の値が異なるのですべり面の角度が虚となる条件としてのきれつ長さが影響を受け、これが破面の波長となると推定される。

表-2 スリット付試験片の強度

No.	切欠試験		素材試験 ($\phi=14 \text{ mm}$)			$ZVERT$ (kg·m)	鋼種
	切欠強さ* (kg/mm ²)	切欠強度比	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	降伏比		
1	37.0	0.85	26.8	43.3	0.62	69.3	SM 41 A
2	36.4	0.71	30.0	50.9	0.59	55.8	SM 50 A
3	47.0	0.87	41.4	54.0	0.78	67.4	SM 50 YA
4	52.0	0.84	47.6	62.6	0.76	69.0	非調質 60 キロ鋼
5	62.6	0.95	59.8	66.0	0.91	72.6	調質 60 キロ鋼
6	76.0	0.94	74.0	81.3	0.91	62.0	調質 80 キロ鋼

* 図-1 (a) の試験片各 2 本の平均

3. 強度特性

(1) 切欠強度

つぎに強度について述べる。延性破壊する材料にあっては、部材に切欠があるとそれが塑性流動を拘束するので、純断面に対する強度は素材のそれよりも大きくなると古くからいわれているが⁸⁾、今回の実験に用いたスリット付き試験片では、これらの説とは逆に純断面に対する強度が素材のそれに対して5~30%の低下を呈した(表-2)(なお、同時に用いたスリット付き試験片と断面積の等しい広幅母材試験片と、断面が14 mmφの素材試験片とでは、その強度の差は2~3%程度であった)。大変興味深いことにこの低下率が絞り率やシャルピー衝撃吸収エネルギーで表わされるじん性との間に相関関係が認められた(図-8、図-9参照)。また低下した強度が素材の降伏点に達しない可能性もあって、これは構造物の設計において考えている安全性の根本にも触れる問題でもあるので、純断面に対する切欠材の強度と、素材の強度との比である切欠強度比と、素材の伸び、絞り率、衝撃吸収エネルギーまたは降伏比などの鋼材の機械的諸特性との関連性を明らかにし、切欠強度の低下ができるだけ少なくするための条件について考察する。

(2) 試験片の形状の影響

切欠の形状が切欠強度比におよぼす影響は大きいと考えられるので、まず、種々の形状の試験片につき試験を行なった。用いた供試材はいずれも非調質60キロ鋼であるが、試験片No.1~12は板厚12.5mmのもの、No.13~16は板厚18mmのもので、これらの機械的性質の詳細は表-3に示す。その結果を図-5に示す。

図-5 切欠強度比におよぼす形状の影響

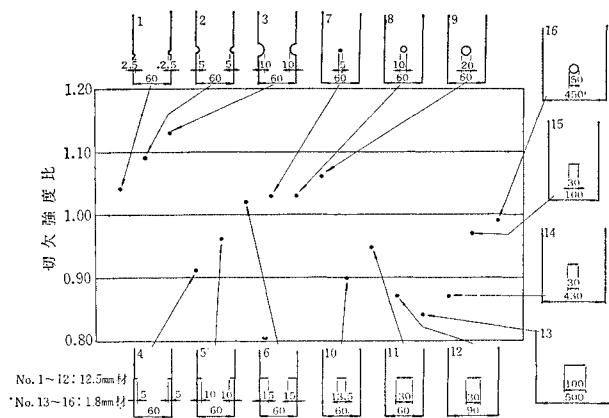


表-3 供試材の機械的性質

鋼種	板厚 (mm)	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	一様伸び率 (%)	局部伸び (mm)	絞り率 (%)	引張試験片の形状	$\Sigma VERT$ (kg·m)
非調質60キロ鋼	12.5	49.6	71.0	15.2	—	—	JIS 1号	9.0
"	18.0	47.4	62.6	16.3	9.2	69.0	14 mmφ	19.0

破断はすべて延性破壊であった。試験片No.12とNo.15をくらべてわかるように鋼板の違いによる差(このつぎに述べるように板厚の違いによる差は少ないので、もっぱらじん性の違いによる差と考えられる)は大きいが、その他にもつぎのようなことが指摘できる。

(1) 円弧程度の切欠では切欠強度比はすべて上昇するが、スリットのような大きな応力集中の場合には、切欠強度比が1以下に低下する場合もある。

(2) 側面切欠より中央切欠の方が、その切欠強度比の低下に与える影響が大きい。

(3) スリットの長さに対して試験片の幅の広い方が(試験片の幅に対してスリットの深さが浅い方が)スリットの与える影響は大きい。

つぎに切欠強度比におよぼす板厚の影響を調べるために、板厚28mmのSM50A材を切削して、厚さ9mm、18mmおよび27mmの切欠試験片を作り試験した。試験片の形状はのちに標準切欠試験片とした図-1(b)のものである。

試験結果を表-4に示すが、この板厚の範囲においては、板厚の影響を認められなかった。

なお、上記の結果は、同一の鋼材から切削したじん性の等しい試験片の場合であって、一般の圧延によって板

表-4 切欠強度化におよぼす板厚の影響

板厚 (mm)	素材の引張強さ (kg/mm ²)	切欠強さ*	切欠膜度比
9	53.8	48.8	0.90
18	"	49.6	0.92
27	"	48.3	0.89

* 図-1(b)の試験片各2本の平均

厚を変える場合には、じん性が板厚によって変わるので、切欠強度比も変化することが予想される。

(3) 標準切欠試験片の設定

以上の予備的考察にもとづき図-1(b)に示す試験片を標準切欠試験片とした。

切欠の影響のもっとも大きい形状として中央スリット型とした。中央のスリットの形状は主として加工の都合で決まったもので、中央の円孔は作業のためのものであり、先端のスリットは特殊鋼のカッターで切削した。スリットの長さは中央の円孔による応力集中の影響を避けるためにこの長さとし、試験片の総幅は普通の100t程度の試験機でも実験できるように、この値におさえた。

試験片の表面は、同一の鋼板であれば、板厚によって切欠強度比に差を生じないことを考えて、

黒皮付きのままとした。また試験機に取付けるに際しては、その影響が切欠に

およびないようにするため、切欠から 100 mm 以上離れて、チャックに噛ませることにした。

図-6 溫度による特性値の変化

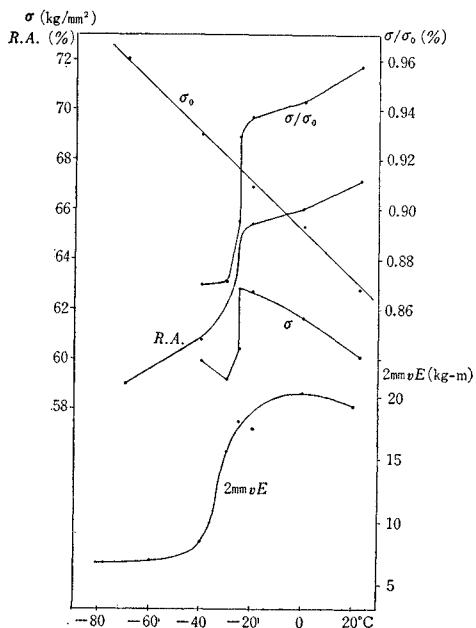
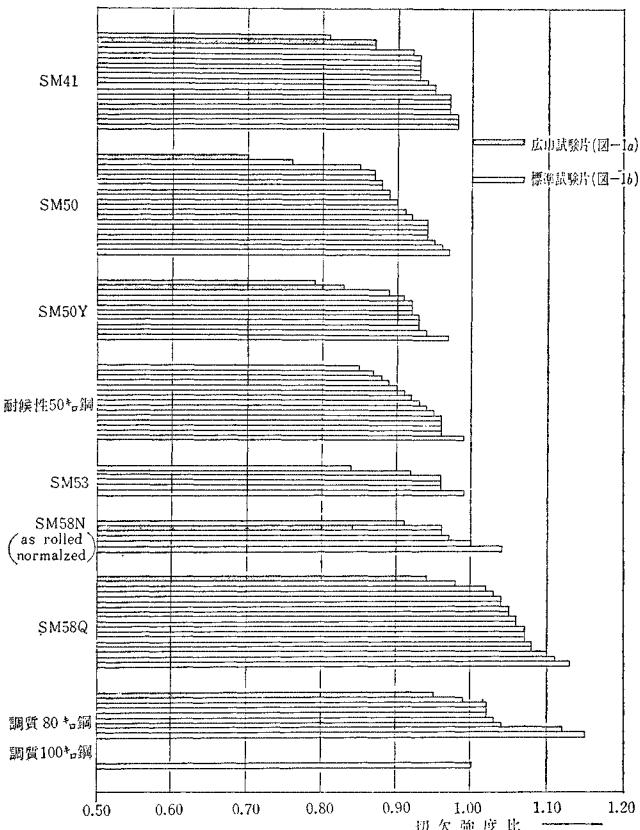


図-7 各種構造用鋼材の切欠強度比の現況



(4) 温度による切欠強度比の変化

切欠材の強度の問題は脆性破壊とも密接な関係があるので一連の低温試験を行なった。

このうち、素材の引張試験は、ドライアイス・アルコール浴槽を試験片に取付けて行なったが、切欠試験片は素材試験にくらべて熱容量が大きいので、試験片をドライアイス・アルコール浴槽中に浸し、十分冷却してからこれを取り出して試験した。試験片の切欠近傍に熱電対を付けて温度上昇を監視したが、試験片が降伏し塑性変形により発熱をはじめるまでの間（この間約 100 秒）の温度上昇はいずれも $1^\circ \sim 2^\circ\text{C}$ 程度であった。このため試験片はあらかじめ 2°C ぐらい過冷しておいて実験を行なった。

なお、供試鋼材は 18 mm の非調質 60 キロ鋼（表-3 参照）で、試験片の形状は前述の標準切欠試験片（図-1 (b)）である。

この結果を切欠強度比と関係あると思われるものとともにグラフに示したのが図-6 である。この図を見てまず気がつくことは、素材の引張強さが温度の降下とともに上昇しており、これがいわゆる遷移温度に関係なく、きわめて良い直線性をもっていることである。

これに対し切欠材の強度は、延性破壊をしている間は、温度の降下とともに上昇しているが、この上昇率は素材のそれと比べると少なく、すなわち切欠強度比はだんだん低下しながら遷移温度に至り、脆性破壊へと移行している。脆性破壊になると切欠強度は、したがって切欠強度比も急激に低下するがその後はまた切欠強度は上昇しあじめ、切欠強度比はほぼ一定の値となるよう見られる。この切欠強度比の曲線形状は、素材の引張試験における絞り率、シャルピー衝撃吸収エネルギーと類似しており、とくに絞り率の曲線とよく似ている。これより切欠先端の局部的な伸び量がその限界量である無限小標点距離に対する伸び能力（これは絞り率から求められる）を越えることによって、この破壊が生じたと考えられることを示している。

(5) 各種構造用鋼材の切欠強度比の現況

各種国産構造用鋼材の切欠強度比の測定値を図示すると図-7 のごとくなる。この図においてハッチを施したものが広幅試験片の切欠強度比を表わし、ハッチを施していないものが標準試験片の切欠強度比を表わしているが、広幅試験片の切欠強度比が一般に小さく、標準試験片の切欠強度比が 1.0 を上回った調質 60 キロ鋼、80 キロ鋼においても広幅試験片の切欠強度比は 0.95 であった。標準試験片の切欠強度比は SM 50 で 0.75、SM 50 Y で 0.79 と各一例ず

図-8 切欠強度比と絞りの関係

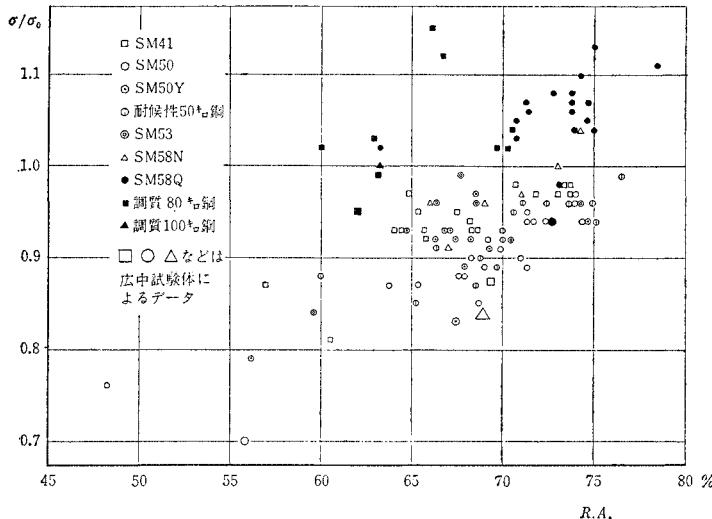


図-9 切欠強度比とシャルピー吸収エネルギーの関係

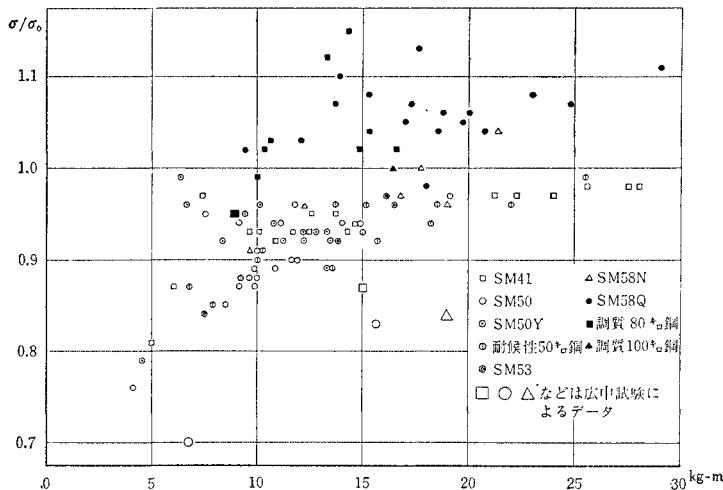
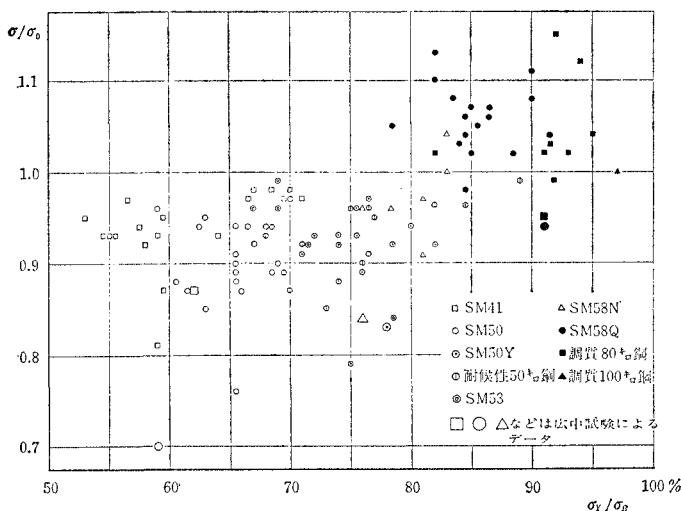


図-10 切欠強度と降伏比の関係



つとくに小さいものがあるが、これを除くと非調質鋼材の切欠強度比は鋼種に関係なく 0.85 ないし 0.95 であった。これに対して調質 60 キロ鋼、80 キロ鋼の切欠強度比は、0.95 程度のものを各一例ずつはあるが、一般には 1.00 を上回っており、構造物にとって安全性が大きいともいえるが、調質鋼と非調質鋼との相違は、鉄鋼材料それ自身の問題として興味深い。しかし、調質鋼といえども広幅の試験片では 0.95 程度の切欠強度比を示しており、强度上、全く問題がないわけではない。SM 50 の広幅試験は切欠強度比 0.70 となっているが、この試験片はきれつが約半分進んだところで脆性破壊へ移っており材料のじん性がとくに低いものであった ($\nu E_{RT} = 6.7 \text{ kg}\cdot\text{m}$)。

(6) 切欠強度比に影響をおよぼす要素

切欠強度比におよぼす影響の大きさと推定される要素として絞り率、シャルピー衝撃吸収エネルギーおよび降伏比を取り上げこれらとの関連性を検討するために、図-8 に切欠強度比と絞り率、図-9 に切欠強度比とシャルピー衝撃吸収エネルギー、図-10 に切欠強度比と降伏比、との相関性を図示する。

図-8、図-9 によれば、切欠強度比は絞り率および衝撃吸収エネルギーときわめて密接な関係にあり、切欠強度はじん性の問題であると考えられる。また、これらの図によれば、標準試験片で 0.85、広幅試験片で 0.80 の切欠強度比を確保するためには、丸棒の絞り率で 60%，2 mmV シャルピーの常温における衝撃吸収エネルギーで 6 kg·m 程度は必要ではないかと感ぜられた。図-10においては、先に述べた調質材と非調質との差を明瞭に示している。

4. まとめ

延性材料においても鋸い切欠が存在する場合には、伝播型の破断をし、その破面は板厚方向に傾斜した面をなし、これがある波長をもって表裏交代

すること、その強度は純断面積に対して計算しても素材の強度に達しない場合があることを指摘した。ついで、塑性応力場の特性曲線の考察により、破面の形状の説明を試みた。

また、切欠強度比に影響をおよぼす因子について実験的考察を行ない、切欠強度比は材料の絞り率、衝撃吸収エネルギーと密接な関係にあり、100 mm 幅の鋼板の中央に 30 mm のスリットを設けた試題片の切欠強度比が 0.85 以下にならないためには、丸棒の絞り率で 60% 2 mmV シャルピー試験の同じ温度における衝撃吸収エネルギーが 6 kg·m 程度以上のじん性が必要であることを述べた。このことは、溶接部における予期しがたいミクロわれや、その他の構造上避けられない切欠を考慮しなければならない場合に、その影響が局部的な応力やひずみの搅乱だけに止まり、部材全体の強度を低下させるために必要な材料の選択の条件に一つの目安を与えるもの

であると考える。

この研究は鉄道建設公団からの受託研究に関連して行なわれたものであり、各種鋼材の切欠強度比の調査にあたっては、土木学会本州四国連絡橋技術調査委員会の材料調査幹事会を通じて、そのメンバーである製鉄メーカー各社の協力を得た。ここに記して謝意を表わす。

参考文献

- 1) たとえば、横堀武夫：材料強度学、1955、技報堂。
- 2) 奥村・堀川：土木学会論文集、第 152 号、1968.4.
- 3) 奥村・堀川：東京大学総合試験所年報に発表予定。
- 4) 井上・飯田：造船協会論文集、第 119 号、1966.
- 5) Aronofsky, J.F. : Proc. 1st U.S. National Congress on Applied Mechanics, 1951.
- 6) 山ノ内 弘：機械学会誌、第 165 号、1931.
- 7) Parker, Davis, Flanigan : Proc. ASTM, Vol. 46, 1946.
- 8) たとえば Nadai : Theory of Flow and Fracture of Solids 1959, McCrow-Hill.
- 9) Wessel, Hays : Welding Journal Vol. 42 1963.

(1967. 10. 3・受付)