(昭和 53 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

表面型の浅い切欠をもつ低強度鋼材の 高ひずみ不安定破壊挙動

正員 佐藤 邦彦* 正員 豊田 政男*
正員 伊藤 義康*

General Yielding Fracture of Low Strength Steels with Surface Type Shallow Notch

by Kunihiro Satoh, *Member* Masao Toyoda, *Member*
Yoshiyasu Itoh, *Member*

Summary

For the purpose of clarifying assessment of large strain unstable brittle fracture, studies have been made of the effect of specimen geometry, such as notch depth and plate width on general yielding deformation behaviors and fracture criterion of notched steels. Tension test have been done by the use of surface type through width notched specimen of mild steels mainly at temperature range at which large strain fracture occurs. In the range of $2a/t \leq 0.25$ (a : notch depth, t : plate thickness) the gross section yielding of surface type notch specimen occurs preceding to net section yielding, because of the increase in plastic constraint at notch section due to both side notch.

For shallow notched specimen, three different stage possibilities in plastic deformation behaviors can be considered; (1) small scale yielding, (2) general yielding (I) at which gross section yielding prior to net section yielding occurs, (3) general yielding (II) at which whole section yielding occurs, that is, full yielding stage observed in through-thickness type notched wide plates cannot be found. The critical COD of specimens with surface type shallow notch becomes almost constant value regardless of plate width in large strain fracture range. A linear correlation can be observed between non-dimensional COD, δ/a , and overall strain, e_{∞} . Although the proportional factor of $\delta/a-e_{\infty}$ relation decreases with increasing notch depth and plate width, the value of the factor obtained by through-thickness type notched wide plates is given as a maximum value.

1 ま え が き

構造物に伸び性能を要求するという観点から構造物の材質評価に関連し、前報^{1),2)}において板厚貫通切欠を有する低強度鋼材を対象に全面降伏後の塑性変形挙動について考察を加えるとともに¹⁾、破壊 overall strain についての定量的な取り扱いを示してきた²⁾。

ところで、欠陥の限界評価を行なうような場合には対象となる欠陥は板厚貫通のものとは限らずむしろ非貫通欠陥が対象となる場合の方が一般的であるかも知れない。しかし板厚非貫通欠陥をもつ鋼材の全面降伏後の破壊挙動に関する研究はほとんど行なわれていないのが現状である。そこで、本報では深さに比べて比較的長い表面欠陥が存在する場合に注目し、板幅方向には貫通する比較的浅い表面型切欠材を用いて破壊実験を行なう。そ

れにより高ひずみ不安定破壊挙動や亀裂開口変位と overall strain の関係に及ぼす切欠深さ、板幅の影響などについてとくに全面降伏後に注目して明らかにすることを試みるとともに、これまでに示してきた strain criterion²⁾に基づく材質評価手法の考え方を表面型切欠材に適用する場合の考え方を示す。ここで扱うような板幅方向貫通の表面型切欠材で板厚、切欠深さに比べて板幅が十分大きい場合にはその変形挙動が平面ひずみ状態に近づくことが予想される。従来から破壊発生時の限界亀裂開口変位は平面応力的か平面ひずみのかというような応力状態の影響を受けることが報告されており^{3),4)} COD 仮説の適用における一つの重要な問題として指摘されている。本報では表面型切欠材の塑性拘束に関する考察を基にして高ひずみ破壊域における不安定破壊開始条件としての COD 仮説の適用性についても検討を加える。

* 大阪大学工学部

2 実 験

供試材は軟鋼材であり、その化学組成と機械的性質を Table 1 に示す。試験片形状は Fig. 1 に示すような板表面に両側から機械加工された切欠をもつものである。試験片は変形挙動、破壊挙動に及ぼす板幅 (W)、切欠深さ ($2a$)、板厚 (t) の影響を検討するため、Table 2 に示す4つのシリーズを作製した。実験に際して亀裂開口変位はクリップゲージを用いて板幅中央部で測定し、Dugdale 模型により初期切欠先端へ換算している。(換算手法の妥当性や切欠の開 口 形 状 については文献 (5) を参照) また伸びはダイヤルゲージを用いて切欠をはさみ標点距離 60mm で測定した。この標点距離は $2a=2\text{mm}$ の試験片について無限遠標点距離での伸び率、すなわち overall strain が十分な精度で測定できることを確め決定している⁵⁾。また切欠深さ $2a=3, 6,$

Surface type notch specimen

Fig. 1 Specimen design

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties

Material	Chemical compositions (%)					Mechanical properties				
	C	Si	Mn	P	S	σ_y (kg/mm ²)	σ_u (kg/mm ²)	R.A. (%)	E.L. (%)	vTs (°C)
Mild steel	0.15	0.20	0.66	0.019	0.024	23.6	42.2	62.7	38.0	-9.0

σ_y , Yield stress
 σ_u , Ultimate tensile strength
 R.A. , Reduction of area
 E.L. , Elongation (G.L.30mm)
 vTs , Fracture transition temperature

Table 2 Specimen size

	I	II	III	IV
Notch depth $2a$ (mm)	2	10	2, 3, 6, 10, 20	2
Plate width W (mm)	3, 10, 24.5, 40 60, 75, 100	5, 20, 40, 100	75	75
Plate thickness t (mm)	24.5	24.5	24.5	15, 20

10mm の試験片の overall strain に関する実験結果の整理においては、 $2a=2\text{mm}$ の試験片で得られた負荷応力-overall strain の関係を用いて負荷応力から overall strain を算定して示した。

3 表面型切欠材の降伏挙動

前報¹⁾で示したように板厚、切欠長さに比べて十分板幅の大きい板厚貫通型切欠材の降伏挙動は、(1) small scale yielding 域 (塑性域が切欠先端近傍に限られている状態) (2) 切欠 net 断面が塑性変形 (full yield) した状態。さらに高負荷段階において、(3) gross 断面も塑性変形 (general yield) した状態に分けられる。しかし本報で注目している板厚に比べて板幅の十分大きな表面型切欠材においては切欠の塑性拘束の影響により切欠 net 断面降伏に先行して gross 断面降伏を生じる場合のあることが、以下に示す実験結果より明らかになっ

Fig. 2 Typical examples of load-elongation curves of notched plate under tension

た。Fig. 2 は実験において有限長さの標点距離で伸びを測定した場合の荷重-伸び曲線の代表的な 2 例を模式的に示したものである。Type I に示す棚状の降伏荷重は、迂り模様の観察や負荷応力から考えて gross 断面が降伏した時に対応し、図中に示す Type II のようにして得られる降伏荷重は切欠 net 断面が降伏したときの荷重にほぼ等しい。Fig. 3(a), (b) にこのようにして求めた降伏応力の実験値を示す。

Fig. 3(a) は塑性拘束係数 (切欠材の降伏時の net 応力 (σ_{NY}) をその温度における丸棒の降伏応力 (σ_Y) で割ったものと定義される値) に及ぼす切欠深さの影響を示したもので、板幅が十分大きな表面型切欠材 (両側切欠) の塑性拘束係数は切欠が深くなるほど高くなる傾向がうかがえる。一方、板幅が板厚などに比べて小さい、いわゆる平面応力型の場合には高々 $2/\sqrt{3}$ 程度である。

Fig. 3(a) Effect of notch depth, $2a/t$, on constraint factor

Fig. 3(b) Effect of plate width, W , on constraint factor

図中には次式で近似的に示されるような剛塑性体を仮定し Mises の降伏条件による平面ひずみ状態における迂り線場の解を示す。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{NY}/\sigma_Y &= \frac{2}{\sqrt{3}} \left\{ 1 + \ln \left(\frac{1 + 1/(1 - 2a/t)}{2} \right) \right\} \quad (2a/t < 0.884) \\ &\quad \text{—Ewing, Hill slip line (upper bound}^{6))} \\ \sigma_{NY}/\sigma_Y &= \frac{2}{\sqrt{3}} (1 + \pi/2) \quad (2a/t \geq 0.884) \\ &\quad \text{—Prandtl slip line}^{7))} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

また gross 断面降伏時の net 応力は

$$\sigma_{NY}/\sigma_Y = 1/(1 - 2a/t) \quad (2)$$

ただし $2a$: 切欠深さ, t : 板厚

以上の解析によれば $2a/t \lesssim 0.25$ の範囲の切欠材では塑性拘束により net 断面降伏応力が見かけ上上昇し, gross 断面が先に降伏する (Type I) こと, また $2a/t > 0.25$ の範囲の切欠材では逆に net 断面降伏が先行する (Type II) ことがわかる。図中の実験点はこのような考察と比較的良好一致を示している。

Fig. 3(b) は表面型切欠材の塑性拘束係数に及ぼす板幅の影響を示したものである。板幅が大きくなるほど塑性拘束係数は上昇し, 切欠深さ, 板厚に比べて板幅がある程度大きくなると切欠深さによって定まる一定値に漸近する様子がわかる。

このように両側表面型切欠材における $2a/t \approx 0.25$ という切欠深さは構造物に十分な伸び性能を要求するという考え方に立つ場合 gross 断面降伏 (general yield 状態) を保証する目安となる値であることがうかがえる。また通常の構造物を考慮した場合 $2a/t \approx 0.25$ という欠陥深さは非現実的であるともいえ, これからの考察では主に $2a/t < 0.25$ なる亀裂深さを有する表面型切欠材に注目する。

4 切欠先端部の変形挙動と overall strain

Fig. 4 は 0°C で行なった表面型切欠材の引張試験の結果で, (a) は負荷応力と overall strain の関係, (b) は無次元化した亀裂開口変位と overall strain の関係を示している。前項でも示したように表面型切欠材 ($2a/t \lesssim 0.25$) の変形挙動は塑性域の広がり方から次の 3 つの変形段階に大きく分類できる。(1) small scale yielding 域 (塑性変形が切欠先端近傍に限られている状態), (2) general yielding I 域 (切欠の gross 断面が先行して全面降伏した状態), (3) general yielding II 域 (切欠材の全断面が塑性変形した状態), 切欠先端近傍に注目すると general yielding I の領域において overall strain ϵ_∞ は荷重増加に伴い急激に増大するが切欠開口変位 δ は切欠前方に残された弾性域により変形が拘束され開口し

(a) Relation between σ_g/σ_y and e_∞/e_y (b) Relation between $\delta/2\pi a e_y$ and e_∞/e_y

Fig. 4 A typical example of deformation behaviors of surface type notch specimen

にくく、 $\delta-e_\infty$ 関係の傾きが小さくなる。general yielding II の領域に到ると全断面降伏に伴い塑性拘束が急激に減少し、 $\delta-e_\infty$ 関係の傾きは領域 I よりも大きくなり一定の勾配をもつ直線関係を示すようになる。

Fig. 5(a) Effect of notch depth on non-dimensional COD vs. overall strain curves

Fig. 5(a) は亀裂開口変位と overall strain の関係に及ぼす切欠深さ ($2a$) の影響を示したもので general yielding II の領域において $\delta-e_\infty$ 関係はいずれもほぼ直線関係を示している。その勾配は切欠が深くなるほど小さくなる傾向にあり、従来の平面応力状態と考えられる板厚貫通切欠材の場合に示された $\delta/2\pi a e_y - e_\infty/e_y$ なる無次元化表示を行なっても一つに整理することができない。これは切欠が深くなると塑性拘束が大きくなり、無限遠標点距離で測定されるような overall strain はその影響をほとんど受けないのに対し、亀裂は著しくそ

Fig. 5(b) Effect of plate width on non-dimensional COD vs. overall strain curves

Fig. 5(c) Gradient between non-dimensional COD and overall strain

の影響を受けて開口しにくくなるためと考えられる。Fig. 5(b) は亀裂開口変位と overall strain の関係に及ぼす板幅 (W) の影響を示したもので, general yielding II の領域においてはどの板幅も $\delta - e_{\infty}$ 関係にはほぼ直線関係が認められる。また板幅が大きくなるほどその勾配は小さくなり, 板幅 24.5 mm (ほぼ板厚程度) 以上では板幅に関係なくほぼ同じ勾配を示す。

Fig. 5(c) は実験より得られた general yielding II の領域における $\delta/2\pi a e_Y - e_{\infty}/e_Y$ 関係の勾配に及ぼす切欠深さ, 板幅の影響をまとめたものである。切欠が深いほどまた板幅が大きくなるほど, すなわち切欠による塑性拘束が大きくなるほどその勾配は小さくなる傾向にある。これより $\delta - e_{\infty}$ 関係の勾配は材料が一定ならば平面応力型 (すなわち塑性拘束係数 ≈ 1.0) と考えられる切欠材で得られた勾配を上限と考えてよいものと思われる。

5 不安定破壊開始条件としての COD 仮説について

Fig. 6(a) は限界亀裂開口変位 δ_c と温度の関係を示したもので図中にはそれぞれの試験片の塑性変形段階も示してある。まず切欠深さ $2a=2$ mm で板幅 $W=75$ mm, 3 mm の結果を比較してみると, -130°C 以下の温度域では板幅 $W=75$ mm の δ_c は $W=3$ mm に比べて多少低目になっている。これは $W=3$ mm の試験片が full yielding 状態で破壊しているのに対し $W=75$ mm の試験片は small scale yielding あるいは亀裂前方に弾性域が残った general yielding I の状態で破壊しており塑性拘束が $W=75$ mm の方が大きいためと考えられる。 $W=75$ mm の試験片が全断面降伏 (general yielding II の状態) して塑性拘束が緩和されるような温

Fig. 6(a) Critical COD vs. temperature curves

度域 (-130°C 以上) において限界亀裂開口変位 δ_c はほぼ一致しており, 本実験の範囲では $W=75$ mm の δ_c の方が多少大きく測定されてさえている。また板幅 $W=75$ mm で切欠深さ $2a=2$ mm と $2a=10$ mm の結果を比較すると全温度範囲において切欠深さ $2a=10$ mm の試験片の δ_c は著しく低い値を示している。これは $2a=2$ mm の試験片が全断面降伏 (general yielding II の状態) して破壊しているのに対し $2a=10$ mm の試験片は net 断面のみの降伏 (full yielding 状態) で破壊しており $2a=2$ mm の試験片に比べて切欠部の受ける塑性拘束が大きいためと考えられる。Fig. 6(b), (c) は -65°C 近傍にのみ注目して限界亀裂開口変位 δ_c の切欠深さ, また板幅の依存性について示したものである。Fig. 6(b) は切欠深さ一定の場合の板幅の影響を示したものであるが, 全断面降伏後に破壊するような温度域において δ_c は板幅に依存せずばらつきの範囲内ではほぼ一定とみられる。Fig. 6(c) は板幅一定で切欠深さが δ_c に及ぼす影響を示しているが, 全断面降伏後に破壊し塑性拘束の影響がそれほど著しくない切欠の浅い範囲で δ_c はほぼ一定と考えられるが切欠が長く塑性拘束が大きくなると δ_c は著しく低下している。

このように限界亀裂開口変位 δ_c は塑性拘束が大きくなると著しく低下するが, 本研究で主として注目している比較的切欠の浅い表面型切欠材の塑性拘束は本来低く, また全断面降伏 (general yielding II) 状態においては塑性拘束はさらに緩和される傾向にあり従来から一般に行なわれている板幅, 切欠長さに比べて比較的板

Fig. 6(b) Effect of plate width on critical COD

Fig. 6(c) Effect of notch depth on critical COD

厚の薄い板厚貫通切欠材で得られた δ_c を不安定破壊開始条件として適用しても十分妥当なことが明らかになった。

6 表面型切欠をもつ鋼材の破壊挙動と破壊延性

破壊 net 応力、脆性破面率と温度との関係を Fig. 7 に示す。図中には板厚、切欠深さに比べて十分板幅の大きい表面型切欠材の破壊遷移挙動を明らかにするため、板厚、切欠深さは同じで板幅が板厚に比べて小さくて形状的には従来から一般に用いられている平面応力型の板厚貫通切欠材と見なせる試験片の結果と比較して示してある。板幅によって破壊強度、破面遷移温度は異なるが破壊様式の変化は板幅に関係なく低温側から低応力脆性破壊域、高ひずみ脆性破壊域、延性亀裂を伴う高ひずみ脆性破壊域、完全延性破壊域に分類できる。低温側においては板幅 $W=3\text{mm}$ の試験片の方が $W=75\text{mm}$ に比べて破壊応力は大きい、高ひずみ破壊域では $W=75\text{mm}$ の試験片が $W=3\text{mm}$ よりも破壊応力は大きくなっている。また脆性破面率からわかるように T_i 温度(安定延性亀裂発生温度)、 T_s 温度(脆性破面率 0% となる温度)ともに $W=75\text{mm}$ の方が $W=3\text{mm}$ に比べてかなり高温側へ移行し、 $W=75\text{mm}$ 試験片には素材であるにもかかわらず 0°C 付近においても脆性破面が見られる。ただし高温側においては最高荷重を呈して後に脆性破壊している。Fig. 8(a), (b) は最高荷重点以前に高ひずみ不安定破壊を生じる温度として -65°C を選び破壊 overall strain に及ぼす板幅、切欠深さの影響を示した結果である。Fig. 8(a) に示すように板幅が大きくなるほど破壊 overall strain は大きくなり板幅 20mm 以上になるとほぼ一定値になるようである。Fig. 6(b) で示したように限界亀裂開口変位 δ_c は板幅によってほと

Fig. 7 Temperature dependency of fracture net stress and crystallinity

Fig. 8(a) Effect of plate width on fracture overall strain

Fig. 8(b) Effect of notch depth on fracture overall strain

んど影響を受けないことから、このような破壊 overall strain の板幅依存性は Fig. 5(b) に示した亀裂開口変位 δ と overall strain e_∞ の関係に及ぼす板幅の影響によるものであることがうかがえる。図中に $\delta-e_\infty$ 関係の勾配のほぼ上限と考えられる板幅 $W=3\text{mm}$ 、切欠深さ $2a=2\text{mm}$ の試験片、すなわち平面応力型と考えられる試験片で得られた $\delta-e_\infty$ 関係を用いて破壊 overall strain を推定した結果を一点鎖線で示してある。当然実

験値よりは低目の e_F が推定されている。Fig. 8(b)に示すように破壊 overall strain に及ぼす切欠深さの影響は切欠が深くなるほど急激に小さくなっており、切欠深さ $2a=10\text{mm}$ の試験片は切欠 net 断面降伏 (full yielding 状態) で破壊しているため破壊 overall strain は弾性ひずみ程度で著しく小さくなっている。図中には Fig. 8(a) と同様に板幅 $W=3\text{mm}$ 、切欠深さ $2a=2\text{mm}$ の試験片、すなわち平面応力型と考えられる試験片で得られた $\delta-e_\infty$ 関係と δ_c (Fig. 6(b)) を用い破壊 overall strain を推定した結果を示す。図のように full yielding 状態で破壊した点を除き e_F を低目の値として評価できることがわかる。

7 結 論

1) 両側表面型切欠をもつ軟鋼材の降伏挙動に及ぼす切欠深さ、板幅の影響を明らかにした。その結果、 $2a/t \leq 0.25$ ($2a$: 切欠深さ, t : 板厚) の切欠深さの範囲では切欠による塑性拘束のため切欠 net 断面の降伏応力が見かけ上上昇し, gross 断面が先に降伏することがわかり構造物に十分な伸びを保證する切欠寸法の目安になると考えられる。

2) $2a/t \leq 0.25$ なる切欠深さの範囲内では塑性変形状態は small scale yielding, general yielding I (gross 断面が先行降伏), general yielding II (全断面降伏) の3段階に分けられる。general yielding II の状態において亀裂開口変位と overall strain の関係にはほぼ直線関係が認められ, その勾配は $\delta/2\pi\sigma_{eY} - e_{\infty}/e_Y$ なる無次元化表示を行なっても切欠深さ、板幅が大きくなるほどすなわち塑性拘束が大きくなるほど低下する傾向にある。

3) 高ひずみ破壊域の限界亀裂開口変位は切欠部が受ける塑性拘束により著しく影響されることが明らかになった。しかし表面型切欠材でも全断面降伏が生じるような高ひずみ域では切欠が板厚に比べてそれほど深くなければ板幅に関係なくほぼ一定の限界亀裂開口変位となり, 不安定破壊開始条件として工学的に妥当である。

4) 表面型切欠材において安定延性亀裂発生温度 T_b , 脆性-延性遷移温度 T_S は板幅が大きくなるとかな

り高温側へ移行する。また破壊 overall strain は同一温度で比較すると板幅が大きくなるほど上昇し, 切欠が深くなると著しい低下を示す。

おわりに、卒業研究として実験に際し助力を惜しまれなかった岡本充君 (現: 本田技研) に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) 佐藤, 豊田, 伊藤: 切欠材の全面降伏後の切欠先端近傍の変形挙動と overall strain, 日本造船学会論文集, Vol. 142 (1977), p. 141.
- 2) 佐藤, 豊田, 伊藤, 川口, 有持, 鈴木, 多々良: 切欠をもつ鋼材の破壊遷移現象と破壊 overall strain に及ぼす諸因子の影響, 日本造船学会論文集, Vol. 142 (1977), p. 148.
- 3) 佐藤, 豊田, 阪野, 豊貞: 塑性拘束が脆性破壊発生に及ぼす影響と軟質溶接継手の脆性破壊強度に関する研究, 日本造船学会論文集, Vol. 132 (1972), p. 371.
- 4) 大塚, 宮田, 西村: 破壊発生における延性-脆性遷移とき裂端の変形挙動との関連について, 日本造船学会論文集, Vol. 142 (1977), p. 135.
- 5) 岡本: 表面切欠を有する鋼材の破壊延性に関する研究, 大阪大学卒業論文 (1978).
- 6) D. J. F. Ewing: The plastic constraint of V-notch tension, Journal of Mechanical Physics and Solids, Vol. 15 (1967), p. 115.
- 7) R. Hill: The Mathematical Theory of Plasticity.