硬質プラスチック切欠き平板の引張りによる
延性およびぜい性破壊の条件*

百 武 秀**, 西 谷 弘 信***

Condition of Ductile and Brittle Fracture in Tension on Notched Plate of Rigid Plastics

by Hiizu HYAKUTAKE and Hironobu NISITANI

The static tensile testing of notched flat bars of polycarbonate, polyvinylchloride and polymethyl methacrylate has been carried out for a wide range of notch radii and notch depths. Sharply notched specimens of PC and PVC failed in brittle manner after the formation of a small crack at the tip of plastic zone. Bluntly notched specimens of PC and PVC failed in fully ductile manner with large shear bands. All specimens of PMMA failed in brittle manner. The predominant factor for determining the fracture mode of ductile to brittle transition is the notch root radius in the case of a constant thickness. Experimental results were discussed in terms of the maximum elastic stress at the notch root from the standpoint of linear notch mechanics. For specimens failed in brittle manner, it is shown that the maximum elastic stress is the one-to-one correspondence to the notch root radius, and is independent of notch depth and plate thickness. The fracture criterion of notched flat bars mentioned above holds commonly for PC, PVC and PMMA.

Key Words: Strength, Polycarbonate, Polyvinylchloride, Polymethyl Methacrylate, Notched Plate, Static Tension, Ductile Fracture, Brittle Fracture, Linear Notch Mechanics

1. 緒 言

高分子材料における切欠き材の静的破壊条件を確立するために、著者らはこれまでに主としてポリカーボネート(PC)を用いて、切欠き平板の引張試験を切欠きの幾何学的形状および板厚の広い範囲にわたって行い、破壊形態の延性・ぜい性遷移限界条件およびぜい性破壊の限界条件について検討を加えた⁽¹⁾⁽²⁾。

本報は、高分子材料の中でも使用量の多いポリ塩化ビニル(PVC)およびポリメタクリル酸メチル(PMMA)について、PCの場合と同じ方法で切欠き平板の引張試験を行い、各種硬質プラスチック切欠き材の静的破壊現象を予測するための手法を提示したものである。

2. 材料、試験片および試験方法

本報で新たに使用した材料はPVC(タキロン)およびPMMA(アクリライト)であり、比較のために、既に報告しているPC(パンライト)の結果⁽²⁾を随時引用する。これら3種の材料はいずれも市販の板(1m×2

m)で、厚さは2mmと5mmである。

図1に、使用材の平滑試験片(板厚5mm)における引張応力-ひずみ線図を示す。PVCには、PCと同じく、最大荷重点を越えたのちに、ほぼ一定荷重の下で伸びが増加する“冷延伸”の過程がある。一方、PMMAは最大荷重点に達した直後に破断するため、もろいプラスチックとみられているが、応力-ひずみ線図は、普通の引張速度のもとでは、図1に示すように最大荷重点付近でほぼ水平状となる。

表1に使用材の引張特性値を示す。 σ_s は最大荷重点の応力、 ϵ_s は同じくひずみであり、 E はひずみが小さい範囲における縦弾性係数である。なお、PCとPVCでは最大荷重点を降伏点とみなす。表1に示すように、使用材は3種とも、板厚2mmと5mmとで引張特性値に大きな差はない。ここでPVCおよびPMMAは受入状態で、PCは130°C、5hの熱処理をして試験を行った。

図2に切欠き試験片の形状と寸法を示す。試験片の幅(=20mm)と標点距離(=70mm)を一定にそろえ、切欠き半径と切欠き深さを広い範囲にわたって変えた。すなわち、切欠き半径 ρ は0.08, 0.15, 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1, 2, 3, 4, 5および10mmの12とおりとし、切欠き深さ a は1, 2, 3, 4および5mmの5と

* 昭和60年4月2日 第62期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和59年9月17日。

** 正員、福岡大学工学部 (〒814 福岡市城南区七隈 8-19-1)。

*** 正員、九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

おりとした。切欠きの形状はすべて U 形で、その加工法については前報⁽¹⁾で述べた。

引張試験にはオートグラフ DCS-2000 を用いた。クロスヘッド速度 0.5 mm/min, 試験温度 $22 \pm 0.5^\circ\text{C}$ とした。

3. 実験結果および考察

図 3 は PVC 切欠き平板の引張荷重-伸び線図である。板厚 $t=2\text{ mm}$ および切欠き深さ $a=3\text{ mm}$ は同じにして、切欠き半径 $\rho=4\text{ mm}$ および 0.2 mm の場合を示す。 $\rho=4\text{ mm}$ の試験片は最大荷重点 A で切欠き底断面全体が降伏したが、 $\rho=0.2\text{ mm}$ の試験片は B 点でぜい性的に破断した。このように PVC においても、PC の場合と同様に⁽¹⁾⁽²⁾、破壊の形態は延性形とぜい性形の二つがある。

図 4 に、PVC の板厚 2 mm および 5 mm のそれぞれについて、切欠き深さ a を一定 (3 mm) にして切欠き半径 ρ を種々変えた場合の破壊の形態を示す。板厚

がいずれの場合も、 ρ が大きくなるに従って破壊の形態はぜい性形から延性形に移行することは明らかであり、ぜい性-延性遷移点における切欠き半径 ρ の値 ρ_c は、図 4 より板厚 $t=2\text{ mm}$ では 1 mm, $t=5\text{ mm}$ では 2 mm と考えられる。このように PVC においても、PC の場合と同様に⁽²⁾、 ρ_c の値は板厚が増加するにつれて増加する傾向がみられる。

図 4 に示すぜい性形で破断した PVC 試験片の破壊形態を詳しく観察すれば、切欠き底付近に切欠き半径にほぼ等しい塑性域が生じており、その先端からき裂が発生し、それは枝分かれしていることが認められる。ぜい性形の破壊にみられるこのような特長は PC の場合⁽¹⁾⁽²⁾にも同じように観察される。

図 5 に、PMMA の破壊の形態を示す。この材料では、板厚 $t=2\text{ mm}$ (図 5) およびここには示していないが $t=5\text{ mm}$ の場合とも、切欠き半径 $\rho=0.08\text{ mm}$ から平滑試験片に至るまですべてぜい性形で破断した。したがって本実験の範囲では、PMMA には破壊

表 1 使用材の引張特性値

Material	Thickness mm	σ_s MPa	ϵ_s %	E GPa
PVC	2	69.8	2.71	3.52
	5	72.1	2.68	3.43
PMMA	2	68.5	4.14	2.76
	5	70.5	5.12	2.47
PC ⁽²⁾	2	68.9	5.62	2.25
	5	69.5	5.29	2.25

図 1 使用材の引張応力-ひずみ線図
(平滑試験片, 板厚 5 mm)

図 2 試験片の形状と寸法

(鋭い切欠きをもつ板ではぜい性形の、鈍い切欠きをもつ板では延性形の破壊が起こる。)

図 3 PVC 切欠き平板の荷重-伸び線図
(標点距離 70 mm, 板厚 2 mm)

形態のぜい性-延性遷移点は存在しない。なお、PMMA では破壊に先立ち切欠き底付近に微小なクレースの密集域が観察された。

図6は、破損時における最小断面の公称応力 σ_n と切欠き半径 ρ との関係を、切欠き深さ a が一定 (3 mm) の場合について求めたものである。破損時として、延性形破壊では最小断面全体が降伏する最大荷重点 (図3のA点) を、ぜい性形破壊では破断点 (図3のB点) をとった。

PVCの場合 [図6(a)], 延性形破壊では、板厚 $t=2$ mm および 5 mm の場合とも、最大荷重点で最小断面全体に平面応力形のすべりによる塑性域が生じた。したがって延性形で破損した PVC 試験片の σ_n の値は板厚 t および切欠き半径 ρ と無関係に、平滑材の降伏応力 σ_s にほぼ等しい1本の直線上にほとんどのることになる。これに対してぜい性形の破壊では、 σ_n と $1/\rho$ の関係は板厚と無関係にほぼ1本の曲線で表され

る。この曲線から延性形の破壊を表す $\sigma_n \approx \sigma_s$ の直線へ不連続的に移行するときの ρ の値が ρ_c であり、前述したように ρ_c の値は板厚 t とともに増加する。PVC の σ_n-1/ρ 関係におけるこのような特性は PC の場合にも共通してみられることを図6(c)⁽²⁾に示す。

PMMA には、前述したように破壊形態のぜい性-延性遷移点が存在しなかった。このため PMMA の σ_n と $1/\rho$ の関係は板厚と無関係に1本の曲線のみで表される [図6(b)]。

ぜい性形で破壊したときの σ_n の値は、図6に示すように PVC, PMMA および PC いずれの場合も、 ρ の減少とともに低下し、 $1/\rho$ が10以上ではほぼ一定の値に達する。

表2に、破壊形態のぜい性-延性遷移点における ρ の値 ρ_c を示す。この値は、図4および5に示すように切欠き半径 ρ を種々変えて行った引張試験および図6に示した σ_n-1/ρ 線図から判定して求めたものであ

(破壊形態のぜい性-延性遷移は、板厚一定のもとでは切欠き半径によって支配される.)
図4 PVC 切欠き平板の破壊の形態：切欠き深さを一定 (3 mm) にして切欠き半径 ρ を変えた場合

(すべてぜい性形で破断し、この場合、破壊形態のぜい性-延性遷移は存在しない.)
図5 PMMA 切欠き平板の破壊の形態：切欠き深さを一定 (3 mm) にして切欠き半径 ρ を変えた場合 (板厚 2 mm)

る。切欠き半径 ρ が、表2に示した ρ_c よりも小さい場合はぜい性形の、大きい場合は延性形の破壊が生ずる。 ρ_c の値は板厚とともに増加することは前述したとおりである。

(a) PVC ($t=2$ および 5 mm, $a=3$ mm)

(b) PMMA ($t=2$ および 5 mm, $a=3$ mm)

(c) PC ($t=2$ および 5 mm, $a=3$ mm⁽²⁾)

(切欠き半径 $\rho=0.1$ mm 以下で σ_n の値は
ほぼ一定値となる。)

図6 破壊時における最小断面の公称応力 σ_n と切欠き半径 ρ との関係

以上に示したとおり、PVC および PMMA 切欠き平板の引張りによる破壊挙動には PC のそれとの共通性が認められる。このことは直ちに PVC および PMMA 切欠き材の破壊もまた、PC の場合と同様に、「線形切欠き力学」の概念⁽³⁾で説明できることを意味する。

線形切欠き力学の概念は、切欠き底付近の力学的状態の厳しさが切欠き底の最大応力 $\sigma_{\max}$ (弾性計算値) と切欠き半径 ρ によって一意的に決まるとするもので、それは次の二つの事実に基づいている。

(1) ρ と $\sigma_{\max}$ が同じなら、切欠き底付近の応力分布は切欠き深さや他の寸法と無関係に、互いにほぼ等しい⁽⁴⁾。

(2) ρ が等しければ、切欠き底付近に一定の塑性変形が生じたことによって付加される応力場は互いにほぼ等しい⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

この概念によれば、切欠き材の小規模降伏の条件下におけるぜい性形破壊の限界条件は次のようになる。

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\max c}(\rho) \quad \dots\dots\dots (1)$$

この式の右辺 $\sigma_{\max c}(\rho)$ は材質によって決まる量で、それは切欠き半径 ρ の関数でもある。式(1)が成立することは後に示す図7から明らかである。式(1)で左辺の $\sigma_{\max}$ は弾性計算による値である。すなわち、

$$\sigma_{\max} = K_t \cdot \sigma_n \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで σ_n は最小断面の公称応力、 K_t は応力集中係数である。

したがって破壊時の公称応力 σ_n の値は次の式によって与えられる。

$$\sigma_n = \frac{\sigma_{\max c}(\rho)}{K_t} \quad \dots\dots\dots (3)$$

上述した破壊条件は、切欠き底付近の弾塑性の計算をしなくても、したがって応力分布は不明ながらも、 $\sigma_{\max}$ (弾性計算値) と ρ のみによって切欠き材の強さを予測できることを意味する。

表2 破壊形態のぜい性-延性遷移点における切欠き半径 ρ_c の値

Material	Thickness mm	ρ_c mm
PVC	2	1
	5	2
PMMA	2	-
	5	-
PC ⁽²⁾	2	0.3
	5	1.5

図7に、ぜい性形の破壊をした試験片の破断点における切欠き底の最大応力 $\sigma_{\max}(=K_t \cdot \sigma_n)$ と切欠き半径 ρ との関係を示す。図7には板厚 $t=2$ mm および 5 mm, 切欠き深さは 1 mm から 5 mm までのすべての試験片のデータをプロットしている。PVC, PMMA および PC とも, $\sigma_{\max}$ は ρ と一対一に対応し, 板厚 t および切欠き深さとは無関係である。図7中の縦線はぜい性形の破壊が起こる限界の ρ を示す。この限界値 ρ_c が板厚 t によって異なることは前述したとおりである。なお, K_t の値はノイバーの三角則より求めた。

4. 結 言

硬質プラスチックの PVC および PMMA 切欠き平板の引張試験を, 前に報告した PC の場合⁽¹⁾⁽²⁾と同様に, 切欠きの形状および板厚を種々変えて行い, これらが降伏および破壊に及ぼす影響を調べ次の結論を得た。

(1) PVC では, 切欠き半径の増加に伴って破壊の形態はぜい性形から延性形へ移行する。破壊のぜい性-延性遷移点における切欠き半径は, 板厚一定のもとでは一定の値をとり, 板厚とともに増加する。ぜい性形の破壊では, 切欠き底に小規模な塑性域が生じ, その先端部に発生した微小なき裂が成長して破断に至る。PVC におけるこのような破壊挙動は, PC のそれ⁽¹⁾⁽²⁾と全く共通している。

(2) PMMA は, 本実験の範囲では切欠き半径と無関係に破壊はすべてぜい性形である。

(3) PVC, PMMA および PC のぜい性形破壊では, 破断時における切欠き底の最大応力(弾性計算値)は切欠き半径によって一意的に決まり, 切欠き深さおよび板厚と無関係である。このことは, これら3種の硬質プラスチックにおける破壊挙動がいずれも線形切欠き力学の概念で統一的に説明できることを意味する。

(4) 上記の諸結果は各種硬質プラスチック切欠き材の静的破壊現象を予測するための根拠を与えるものである。

文 献

- (1) 西谷・百武, 機論, 49-445, A(昭58), 1071.
- (2) 百武・西谷, 機論, 50-453, A(昭59), 888.

(a) PVC (板厚 $t=2$ mm および 5 mm)

(b) PMMA (板厚 $t=2$ mm および 5 mm)

(c) PC (板厚 $t=2$ mm および 5 mm⁽²⁾)

($\sigma_{\max}$ は ρ と 1 対 1 に対応し, 板厚 t および切欠き深さと無関係である。)

図7 ぜい性形破壊の破断点における切欠き底の最大応力 $\sigma_{\max}$ と切欠き半径 ρ との関係

- (3) 西谷, 機論, 49-447, A(昭58), 1353.
- (4) 西谷, 機論, 34-259(昭43), 371.
- (5) 西谷, 材料, 26-282(昭52), 296.
- (6) 西谷・ほか2名, 機講論, No. 830-1(昭58-3), 88.