切欠きを有するポリカーボネートの動的応力集中解析

Dynamic Stress Concentration Analysis for Notched Polycarbonate

○篠崎 貴宏(九工大) 大塚 駿(九州工大) 菅 文海(九工大)
安藤 誠人(出光興産) 黒島 義人(九州工大) 野田 尚昭(九州工大)

Takahiro SHINOZAKI Kyushu Institute of Technology Hayato O-TUKA Kyushu Institute of Technology
Wenhai GUAN Kyushu Institute of Technology Makoto ANDO Idemitsu Kosan co., Ltd
Yoshihito KUROSHIMA Kyushu Institute of Technology Nao-Aki NODA Kyushu Institute of Technology

Key Words: Stress Concentration, Notch, Dynamic Stress, Dynamic Strain, Finite Element Method

1. 緒言

ポリカーボネート等の高分子材料は通常、静的に引張荷重を与えることで延性破壊を起こすが、瞬間的に引張荷重を与えると、切欠き部で脆性破壊が起こる。破壊力学の発展に伴い脆性破壊の破壊メカニズムは解明されつつあり、低温下で脆性破壊し易くなるのと同様にひずみ速度が速いほど加工硬化が顕著になり脆性破壊が起こりやすくなることが知られている。最近では、引張試験に負荷引張速度を設定することで実験データの採取が行われ始めている。

このように高分子材料では、動的応力やひずみ速度はその強度を評価する上で重要な要素であり、負荷する引張速度や引張量、切欠き形状・材料定数などによって支配される数値と考えられる。しかし、それらは実験的に得られたデータがほとんどで、解析的に計算しとめたものはほとんど見当たらない。

そこで本研究では有限要素法を用い、まず弾性体を中心に解析を行い、引張速度や引張量が切欠きを有する板材の端面や切欠き周辺の最大動的応力・最大ひずみ速度にどのように影響するか検討を行う。

2. 解析条件

解析に用いた切欠き材の形状は図1に示す $\rho=0.2\text{mm}$ 、深さ5mm、開口角度 90° の両側切欠きの1/2平面モデルを使用する。解析方法としては、図2に示すように切欠き材の一方の端部を強制変位させる。記号として分かりやすいよう端部をA、切欠き底をBと表記する。また、解析に用いた条件を表2に示すように、変位量を0.1mm、引張速度100mm/sの場合をCase①、変位量を0.1mm、引張速度350mm/sの場合をCase②、変位量を1.5mm、引張速度350mm/sの場合をCase③と定義しそれぞれの条件で解析を行い耐衝撃特性に最も重要な切欠き底の応力・ひずみ速度の挙動を明らかにする。

3. 動的応力集中について

表2に端部と切欠き底での静的・最大動的応力の値を示す。また、図3(a)(b)に端部と切欠き底の応力と時間の関係を示す。切欠き底での応力は、変位量にともなって増加し、ほぼ最大

変位を与えたときに切欠き部で最大応力が発生する。その後、弾性波の影響により応力が振動し、最終的には静的な応力に収束する。①では切欠き底での最大動的応力は静的な応力の1.29倍、②では2.19倍、③では1.06倍発生する。また、図3(b)の切欠き底での応力において、①と②の比較より変位量が同じでも引張速度が速ければ高い動的応力が発生することがわかる。②と③の比較より、最大荷重は15倍の違いが

Fig.2 Boundary Condition

Table2 Dynamic stress concentration and strain rate

Case		①	②	③
Given maximum displacement at fixed end	$u_{\max A}$	0.1 mm $t \geq 0.0001\text{s}$	0.1 mm $t \geq 0.00029\text{s}$	1.5 mm $t \geq 0.0043\text{s}$
Given tension speed at fixed end	u/t	100 mm/s $t < 0.0001\text{s}$	350 mm/s $t < 0.00029\text{s}$	350 mm/s $t < 0.0043\text{s}$
Static stress at A (See Fig.3(a))	σ_{stA}	4.06 MPa $t > 0.015\text{s}$	4.06 MPa $t > 0.015\text{s}$	61.41 MPa $t > 0.015\text{s}$
Dynamic max.stress at A (See Fig.3(a))	$\sigma_{\max A}$	12.51 MPa $t=0.0028\text{s}$	31.08 MPa $t=0.00015\text{s}$	109.6 MPa $t=0.00549\text{s}$
Dynamic gross stress at fixed end	σ_{gross}	8.23 MPa $t=0.0028\text{s}$	26.91 MPa $t=0.00015\text{s}$	66.87 MPa $t=0.00549\text{s}$
Strain rate at A (See Fig.4(a))	$\dot{\epsilon}_{\max A}$	22.24 s^{-1} $t=0.00015\text{s}$	77.85 s^{-1} $t=0.00015\text{s}$	77.85 s^{-1} $t=0.00015\text{s}$
Gross strain rate at fixed end	$\dot{\epsilon}_{\text{gross}}$	14.26 s^{-1} $t=0.00015\text{s}$	67.23 s^{-1} $t=0.00015\text{s}$	67.42 s^{-1} $t=0.00015\text{s}$
Static stress at notch root B	σ_{stB}	49.68 MPa $t > 0.015\text{s}$	49.68 MPa $t > 0.015\text{s}$	745.2 MPa $t > 0.015\text{s}$
Dynamic max.stress at notch root B (See Fig.4(b))	$\sigma_{\max B}$	64.26 MPa $t=0.0013\text{s}$	109.0 MPa $t=0.00077\text{s}$	790 MPa $t=0.00474\text{s}$
Dynamic nominal stress at minimum section	σ_{nom}	10.13 MPa $t=0.0013\text{s}$	16.13 MPa $t=0.00077\text{s}$	123.8 MPa $t=0.00474\text{s}$
Strain rate at notch root B (See Fig.3(b))	$\dot{\epsilon}_{\max B}$	49.46 s^{-1} $t=0.00075\text{s}$	147.9 s^{-1} $t=0.00057\text{s}$	173.1 s^{-1} $t=0.00075\text{s}$
Nominal Strain rate at minimum section	$\dot{\epsilon}_{\text{nom}}$	6.17 s^{-1} $t=0.00075\text{s}$	18.35 s^{-1} $t=0.00057\text{s}$	21.59 s^{-1} $t=0.00075\text{s}$

Fig. 1 Geometry of specimen.

あるが最大動的応力の違いは約 8 倍の違いにしかない。すなわち、引張り速度が同じでも最大変位が大きくなると動的応力集中は小さくなる。

4. ひずみ速度集中について

ポリカーボネートではひずみ速度が速いほど加工硬化が顕著になり脆性破壊が起こりやすくなることが知られており、切欠きによってどのくらいのひずみ速度が生じるか調べる必要がある。表 2 に端部と切欠き底での静的・最大動的ひずみ速度の値を示す。また、図 4(a)(b) に端部と切欠き底のひずみ速度と時間の関係を示す。強制変位開始時に飛躍的に増加しその後応力と同様に振動し最終的には 0 に収束する。

図 4(a) で示す端部のひずみ速度では、①～③を比べると引張速度が同じ②と③では端部にほぼ同じ最大ひずみ速度が生じることがわかる。その最大ひずみ速度は変位を与える初期に生じるので最大変位量が 15 倍の違いがあるにもかかわらず端部でのひずみはほぼ同じことになる。図 4(b) で示す切欠き底のひずみ速度は、①と②の比較では変位量が 0.1mm の同条件にもかかわらず約 3 倍の最大動的ひずみ速度の違いがある。②と③の比較では変位量が 15 倍の違いがあるにもかかわらず、ひずみ速度にはあまり変化がない。ひずみ速度は最大変位量より引張速度の影響によってほぼ決まる。

5. 応力・ひずみ速度分布について

図 5(a)(b) に①・②・③のそれぞれの場合において最大動的応力・最大動的ひずみ速度が発生したときの端部、切欠き底周辺の動的応力・最大ひずみ速度の分布を示す。図 5(a) で示す①・②・③の動的応力分布では、それぞれ切欠き底の最大動的応力が、最小断面の平均応力 (σ_{net}) の 6.34

倍・6.76 倍・6.39 倍となっている。この値は静的な場合と比較すると、それぞれ 0.99 倍・1.05 倍・0.99 倍となっており、切欠き底の応力と最小断面の平均応力の比は静的な場合と動的な場合では変わらない。図 5(b) で示す①・②・③の最大ひずみ速度分布では、それぞれ切欠き底の最大動的ひずみ速度が、最小断面の平均ひずみ速度の 8.02 倍・8.06 倍・8.02 倍となっている。

(a) Strain rate at point A

(b) Strain rate at notch root B
Fig.4 Time history of strain rate

(a) Dynamic stress at point A

(b) Dynamic stress at notch root B
Fig.3 Time history of stress

Fig.5 Stress and strain rate distribution around minimum section