508 ゴム変性 PMMA のノッチ先端部における損傷発生モデリング

Finite Element Modeling of Damage Formation in Notch-Tip Region of Rubber Modified PMMA

○ 福屋 好泰 (九大院) 正 東藤 貢 (九大応力研)
正 新川 和夫 (九大応力研)

Yoshihiro FUKUYA, Grad. School, Kyushu University, 6-1 Kasuga-koen, Kasuga, Fukuoka
Mitsugu TODO, RIAM, Kyushu University, 6-1 Kasuga-koen, Kasuga, Fukuoka
Kazuo ARAKAWA, RIAM, Kyushu University

Key Words: Polymer blend, Rubber Toughening, Crazeing, Finite Element Method

1. 緒言

PMMA は透明性に優れた高分子材料で、自動車、航空機、光学部品、建築用建材などに広く用いられているが、脆性的な破壊挙動を示す欠点がある。そのため、破壊靱性の向上を目的として PMMA のマトリックス中に微細なゴム粒子を分散させたゴム変性 PMMA (RT-PMMA) が実用化されている。しかし、RT-PMMA における高靱化メカニズムについては、いまだ不明な点が多い。筆者らの研究グループは、ノッチ先端部におけるダメージゾーン生成によるエネルギー散逸が主な高靱化メカニズムであることを明らかにしている。しかし、荷重の増加にともなうノッチ先端部でのダメージゾーンの成長過程やダメージゾーン生成からクラックの発生と進展に移行する過程については、いまだ未知の部分が多い。本報では、小型試験機と光学顕微鏡によるダメージゾーンのその場観察の結果、ならびに、有限要素法によるノッチ付試験片のマクロ解析と微小なゴム粒子の分散を考慮したミクロ解析の結果について報告する。

2. ダメージゾーン観察

供試材の RT-PMMA (住友化学工業製) は、押し出し加工により成形され、20wt% のブチルアクリレート/スチレン共重合体が、直径約 300nm のコア・シェル構造のゴム粒子として分散しているポリマーブレンドである。厚さ 1.6mm の板材を、ホットプレスを用いて加熱・加圧することで 0.21mm のシート状に加工し、その後、Fig.1 に示す試験片を切り出した。各試験片には V 字ノッチが機械加工により導入してある。作製した試験片のモード I 破壊試験を小型試験機を用いて行った。この時、偏光顕微鏡のステージ上に小型試験機をセットし、ノッチ先端部で形成されるダメージゾーンをデジタルカメラで撮影した。また、荷重と変位の経時変化をデジタルレコーダで記録した。

最大荷重点付近でのダメージゾーンの偏光顕微鏡写真を Fig.2 に示す。ノッチ先端で雲状に広がるダメージゾーンが観察される。このダメージゾーンは、Fig.3 に示すように、ゴム粒子を起点としてマトリックスに形成されるマイクロレーズの集合体である。Fig.3 に示した TEM 写真より、これらのマイクロレーズは最大主応力 (あるいは最大主ひずみ) に対して垂直な方向に形成されることが予測される。

3. 有限要素解析

3.1 マクロモデル Fig.2 に示したダメージゾーン形成を計算力学的手法を用いて再現するため、有限要素法による解析を試みた。要素分割には FEMAP、解析には汎用コード MSC/Marc、ポスト処理には MENTAT を用いた。平面応力状態を仮定し、Fig.1 に示した試験片の 1/2 をモデル化した。境界条件と要素分割図を Fig.4 に示す。2126 個の 6 節点平面応力要素を用いている。ノッチ先端部でのダメージゾーン形成

をモデル化するために、マイクロクラックの発生を考慮するモデル (低張力材料モデル) を利用した。このモデルでは、最大主応力がある臨界値に達すると、主応力方向に対して垂直な方向にき裂が発生すると仮定し、引張応力やせん断応力の伝達を減少させる。圧縮に対してはクラック発生は影響しない。実験結果からヤング率、ポアソン比をそれぞれ $E=2.6\text{GPa}$ 、 $\nu=0.35$ 、クラック発生応力を $\sigma_{cr}=50\text{MPa}$ 、クラック発生後の引張応力に対するソフトニング係数を $E_s=25\text{MPa}$ 、せん断保持率を 60% とした。

Fig.1 Specimen geometry.

Fig.2 Damage zone formation in notch-tip region.

Fig.3 TEM micrograph of micro-crazing in notch-tip region.

Fig.4 Finite element model of the specimen shown in Fig.1.

Fig.5 Equivalent crack strain distribution in the notch-tip region.

マイクロクラックの発生領域は、クラックが発生することにより生じるひずみの分布領域として表すことができる。Fig.5にノッチ先端部近傍での相当クラックひずみの分布図を示す。マイクロクラックの発生領域として表されるダメージゾーンは、ノッチ先端部からノッチ方向に真直ぐに伸びており、観察されたダメージゾーンの形状に類似している。この結果は、マイクロクラック発生モデルを使用することで、マイクロクレース生成によるダメージゾーン形成のモデル化が可能であることを示唆している。

3.2 ミクロモデル 次に、RT-PMMA のミクロ構造、すなわち PMMA マトリックス中に分散するゴム粒子を考慮した解析を試みた。ゴム粒子のコア・シェル構造を考慮したミクロモデル（5804 個の 3 節点平面ひずみ要素）を、FE-SEM で撮影したミクロ構造写真を基に構築した。ミクロモデルを境界条件とともに Fig.6 に示す。モデルの一边の長さは 210 μm である。ヤング率とポアソン比は、PMMA が $E=3.34\text{GPa}$, $\nu=0.35$, ゴム粒子が $E=1\text{MPa}$, $\nu=0.49$ とした。ゴム粒子を起点として発生するマイクロクレースをモデル化するため、前述のマイクロクラック発生モデルの適用をマトリックスに対して試みた。クラックの発生応力を $\sigma_{cr}=70\text{MPa}$ とし、クラック発生後、引張応力とせん断応力は伝達しないと仮定した。なお、マクロ的な変位挙動を想定し、X,Y 方向の変位が一樣になるような拘束条件を与えた。また、比較のため、マトリックスを弾塑性体と仮定し、応力-ひずみ曲線を多直線近似により与え、初期降伏応力を 40MPa とした弾塑性解析もあわせて行った。

Fig.7 にミクロモデルの中央部における相当クラックひずみ分布図を示す。矢印で示したダメージ領域に着目すると、ゴム粒子を起点として引張り方向に対してほぼ垂直にダメージが生じていることが確認できる。このことは、Fig.3 の TEM 写真に示したマイクロクレースの発生形態に類似している。Fig.8 に、弾塑性解析より得られた Fig.7 と同じ領域の相当塑性ひずみ分布図を示す。矢印で示した塑性変形領域に着目すると、塑性ひずみはゴム粒子間をつなぐように、引張り方向に対して約 45° に傾いた方向に発生しており、ゴム変性エポキシ樹脂で観察されているシアバンドの発生形態に類似している。

4. 結言

ゴム変性 PMMA におけるダメージゾーン生成過程のその場観察を行い、有限要素法によるモデル化を試みた。得られ

た結果は以下の通りである。

(1) ノッチ先端部の応力集中部で、ゴム粒子を起点としてマイクロクレースが発生・成長し、その集合体としてダメージゾーンが形成される。

(2) 有限要素解析にマイクロクラック発生モデルを導入することで、ダメージゾーン生成過程のモデル化が可能となる。

(3) マトリックス中に分散するゴム粒子を考慮したミクロモデルに、マイクロクラック発生モデルを用いることで、マイクロクレース形成のモデル化の可能性が示唆された。

(参考文献省略)

Fig.6 Micro-model of rubber/matrix structure for FEA.

Fig.7 Equivalent crack strain distribution in micro-cracking model.

Fig.8 Equivalent plastic strain distribution in elastic-plastic model.