

学位論文 博士（工学）

結晶性ポリマにおける
クレーズ進展挙動のモデル化
およびそれを用いた
破壊予測シミュレーション

2013 年度

慶應義塾大学大学院理工学研究科

高橋 順一

主 論 文 要 旨

報告番号	甲 第 号	氏 名	高橋 順一
主論文題目： 結晶性ポリマにおけるクレーズ進展挙動のモデル化 およびそれを用いた破壊予測シミュレーション			
(内容の要旨) 乗用車におけるポリマの使用比率は重量比で8~10%を占め、現在増加傾向にあるとともに、その役割は年々増大している。近年、乗用車の設計では商用 FEM プログラムによる衝突シミュレーションが広く活用されており、ポリマ製品の大変形挙動の再現ならびに破壊部位予測の精度を高めることが産業界で強く求められている。しかしながら、金属とは異なるポリマ特有の破壊機構に基づいて実用的に破断予測を実施できる材料モデルは存在しないのが現状である。そこで本研究では、ポリマに特徴的な変形挙動であるくびれの伝ばを再現できる弾・粘塑性非共軸構成式にポリマの損傷であるクレーズの影響を導入するとともに、クレーズ進展挙動のモデリングを行う。次に、本モデルを商用 FEM プログラムに組み込んで結晶性ポリマの延性破壊に関する数値シミュレーションを実施し、実応力がフィブリル強度を超えることに基づいてポリマの破壊を評価することで、ポリマの破断予測を可能とする実用的なスキームを構築する。 第1章は緒言であり、本研究の背景、従来の問題点および本研究の目的について述べる。 第2章では損傷配置と擬似無損傷配置を導入し、クレーズの影響を材料モデルに反映する。 第3章では、全自由エネルギーの引数に内部変数として、塑性変形速度とクレーズ密度を導入するとともに、各引数に共役な熱力学的力を定義する。 第4章では、クレーズの影響を考慮した非共軸弾粘塑性構成式を導出する。 第5章では、静水圧依存形に拡張したひずみ速度硬化則を提案する。 第6章では、クレーズの進展が塑性ひずみおよび平均塑性垂直ひずみの増加に伴って生じるとしてクレーズ発展式を提案するとともに、塑性ひずみの増加に対するクレーズ密度の増加率を塑性ひずみ速度および塑性ひずみの関数として具体化し、クレーズ伝ばのひずみ速度依存性と分子鎖配向領域におけるクレーズの停止を表現する。さらに、平均塑性垂直ひずみの発展式を球形ボイドを有するポリプロピレン(PP: polypropylene)ブロックモデルに対する数値実験により同定したうえで、クレーズ発生条件式をひずみ速度依存形に一般化する。加えて、クレーズの発生と成長に対して、ひずみ速度が異なる影響を及ぼすことを考慮することにより、クレーズ発展式を広ひずみ速度域において対応可能な形に拡張する。 第7章では、PPの単軸引張試験を実施し、次章で行う数値解析の検証用に供する。 第8章では、上述の材料モデルを商用 FEM プログラム(LS-DYNA)にユーザーサブルーチンを介して組み込んだうえで単軸引張シミュレーションを実施する。まず、クレーズ進展の定性的傾向を再現するため、ひずみ速度 1 s^{-1} の条件でシミュレーションを行い、くびれの発生・伝ばが表現できること、高クレーズ領域が引張方向に伝ばするとともにくびれ進行端部でクレーズ密度および実応力の値が高くなることを示す。次に、ひずみ速度 $0.01 \sim 100 \text{ s}^{-1}$ の条件でシミュレーションを実施し、上記に加えて高ひずみ速度および低ひずみ速度では高クレーズ領域が降伏直後に X 形せん断帯状に集中して発生すること、および破断ひずみのひずみ速度依存性が一般的な熱可塑性ポリマの特徴を再現していることを示す。加えて、いずれのひずみ速度においてもフィブリル強度に基づいて予測された破断部位が実験におけるそれと一致することを確認する。さらに、ここで構築した破断予測スキームの実用性について検討するため、第7章の実験を模擬した数値シミュレーションを実施して実験結果と定量的に整合する結果が得られることを示す。また、PPの単軸圧縮実験結果との比較を通じて静水圧依存性を考慮できることも合わせて確認する。 第9章は結言であり、本研究により得られた知見を要約する。			

以上

SUMMARY OF Ph.D. DISSERTATION

School Integrated Design Engineering	Student Identification Number	First name Surname Junichi Takahashi
<p>Title</p> <p style="text-align: center;">Modeling of Craze Evolution Behavior for Crystalline Polymer and Its Application to FE Simulation for Fracture Prediction</p>		
<p>Abstract</p> <p>Recently, polymer has occupied approximately 10% as weigh percentage in an automobile and polymeric products are developed through some crash simulations using a commercial FEM solver in the design process of automobiles. Although it is strongly required in the industrial stage to improve numerical accuracy for fracture prediction, there is no material model that can precisely reproduce failure behavior on the basis of fracture mechanism peculiar to polymer. In this thesis, a material model is newly proposed introducing the effect of craze that is a particular microscopic damage of polymer into non-coaxial constitutive equation and modeling craze evolution and then it is installed on the commercial FEM solver. Showing a new approach for evaluation based on a value of effective stress exceeding the fibril strength in fracture prediction simulation of crystalline polymer, a new scheme that can practically predict fracture of polymer is developed.</p> <p>Chapter 1 describes a background, problems of previous studies and aims of this study.</p> <p>In chapter 2, craze effect is introduced into the material model taking account of both damaged and pseudo-undamaged configurations.</p> <p>In chapter 3, internal variables and thermodynamically conjugate forces are defined.</p> <p>Chapter 4 derives a non-coaxial elastoviscoplastic constitutive equation with craze effect.</p> <p>In chapter 5, hardening rule is extended to hydrostatic stress dependent type.</p> <p>In chapter 6, a craze evolution equation with strain rate dependency of craze propagation and craze cessation in the oriented molecular chain region is proposed so that craze evolves with increase of plastic strain and mean normal plastic strain to be identified by the numerical experiments. Moreover, considering that strain rate gives different influences for generation and growth of craze, the craze evolution equation is extended to the enhanced type suitable for a wide range of strain rate.</p> <p>In chapter 7, experimental uni-axial tensile test for polypropylene is conducted and its result is used in the verification of the numerical analysis shown in the next chapter.</p> <p>Chapter 8 devotes a uni-axial tensile simulation demonstrated by LS-DYNA in which the above material model is installed through the user subroutine program. In the calculation under the condition with strain rate 1 s^{-1}, it is shown that craze density and effective stress are highly concentrated at the front edge region of propagating neck. Next, another simulation is carried out under strain rate conditions $0.01\text{-}100 \text{ s}^{-1}$, then it is shown that a high craze density region occurs in the shear band shape just after initial yielding under both high and low strain rates, and the strain rate dependency of fracture strain in general ductile polymers is well reproduced. In addition, it is confirmed that the fracture position predicted on the basis of fibril strength is consistent with the experimental one. Furthermore, in order to investigate the practical utility of this fracture prediction scheme, a numerical simulation corresponding the experimental test mentioned in chapter 7 is carried out and it is found that the numerical result coincides quantitatively with the experimental result. Finally, the hydrostatic stress dependency of this model is also confirmed comparing it with a result of uniaxial compression test.</p> <p>Chapter 9 summarizes the conclusions obtained in this study.</p>		