

製品開発とシミュレーション

CAE シミュレーションにおける樹脂用材料構成則とその検証事例

竹越 邦夫*・丹羽 一邦*

A Constitutive Model for Polymers in CAE Simulations, and Its Examples of the Validation

Kunio Takekoshi* and Kazukuni Niwa*

1. はじめに

樹脂材料は軽量性、加工の容易さ、コスト面などの理由から我々の生活に欠かせない材料となっている。辺りを見渡せば、必ずと言って良いほど樹脂製品が目に見え飛び込んでくるであろう。また、日常生活用品だけでなく、自動車のような安全基準の厳しい製品においても樹脂材料は積極的に利用されている。コスト削減の面からだけでなく、環境問題に配慮するため、車体の軽量化が急務であることが理由の1つである。現在、樹脂の使用量は車体重量の9～15wt%に達しているとの報告がある¹⁾。バンパー、内装部品だけでなく、窓ガラスの代替、ボディ外板の樹脂化への検討が進められており、今後も樹脂の利用が増えていくことは想像に難くない。

本稿では、樹脂材料特性およびシミュレーションにおける樹脂製品・部材の取り扱いについて概観し、材料試験と試験シミュレーション結果を比較することで樹脂用材料構成則を検証した事例を紹介する。

2. シミュレーションにおける樹脂材料特性

樹脂材料はいくつかの点で金属と異なる機械特性を示す事が知られている。例えば、引張と圧縮の「応力－ひずみ(以下、SS)」関係は異なり(降伏応力の静水圧依存性)、塑性変形に伴って体積は変化することが挙げられる。一方、シミュレーションでは材料モデルの取り扱いの容易さから、金属材料構成則であるMises構成則(以下、Mises)を用いて樹脂部材は模擬されることが多い。しかし、曲げ変形ひとつとっても、引張・圧縮状態が同時に生じるため、Misesでは樹脂の曲げ変形挙動を正確に模擬できない。

製品・部材に占める樹脂の割合が増加することは、製品・部材の変形挙動において樹脂材料特性・挙動が支

配的となる場面が多くなることを意味する。このため、シミュレーションによる設計検討において、樹脂用材料構成則の適用が必要となる。

3. 樹脂材料構成則 SAMP-1 について

本稿で扱う樹脂用材料構成則SAMP-1(Semi-Analytical Model for Polymers with C¹-differentiable yield surface)はS. Kolling(当時、Daimler Chryslerに所属)らによって開発された材料モデルである²⁾。汎用非線形解析ソフトLS-DYNAに組み込まれている。2章で触れた樹脂特性に加え、ひずみ速度に依存する降伏応力、ひずみ速度・静水圧に依存する破壊基準、塑性に伴う損傷・弾性率低減挙動を考慮することが可能である。

本稿では主要機能の1つ「降伏応力の静水圧依存性」について説明する。式(1)にSAMP-1で定義される降伏関数 f を示す。降伏関数とは塑性変形が始まる応力レベル(降伏応力)を決定する関数であり、弾性状態は $f < 0$ 、塑性状態は $f = 0$ と規定する。

$$f = \sigma_{vm}^2 - A_0 - A_1 p - A_2 p^2 \leq 0 \quad (1)$$

ここで p は圧力、 σ_{vm} は相当応力である。係数 A_0, A_1, A_2 は引張・圧縮・純せん断などの材料試験によって得られるSS曲線から決定される未知数である。

図1に (p, σ_{vm}) 平面におけるSAMP-1とMisesの降伏曲面を示す。図中の比例直線は左から2軸引張、1軸引張(本稿では、「引張」と表記)、純せん断、1軸圧縮(本稿では、「圧縮」と表記)、2軸圧縮応力状態における「圧力－相当応力」関係を示している。比例直線と降伏曲面の交点が各応力状態における降伏応力となる。SAMP-1では降伏曲面を楕円形状とすることで、樹脂材料の降伏応力－静水圧依存性を表現している。以上の取り扱いによって、SAMP-1では樹脂材料の弾塑性挙動・荷重応答を精度よく再現することが可能となっている。

一方、Misesの降伏曲面は圧力に対して一定である。

* 株式会社テラバイト 技術部
Engineering Technology Div., Terrabyte Co., Ltd.

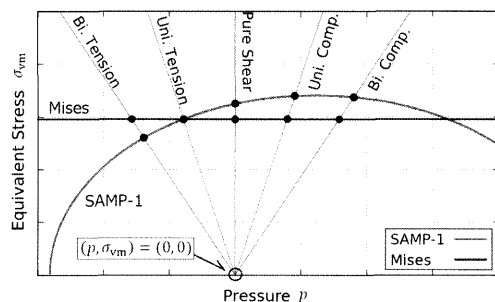


図1 圧力-相当応力平面における降伏曲面の比較

したがって、単一応力条件下(図1では引張応力を基準に降伏曲面を設定)に限り、Misesは樹脂材料のシミュレーションに有効である。しかし製品開発においては、一般に多軸応力場の問題を扱わねばならず、Misesでは十分精度の高い評価は難しい。

4. 材料試験シミュレーションによる検証

SAMP-1を熱可塑性樹脂ポリカーボネート(以下、PC)に適用し、圧縮試験JIS K7181によって、「降伏応力の静水圧依存性」を検証した事例を示す。試験では試験片端面にグリスを塗布したが、摩擦力の拘束によって試験片はタル形状となった。変形状態を再現するため、解析では摩擦係数を0.1に設定した。また、SAMP-1では引張・圧縮・純せん断特性SS曲線を考慮している。図2は圧縮試験の「変位-荷重」関係について、試験結果と圧縮試験シミュレーション結果を比較したグラフである。図2左上に示す試験と解析における変形状態は概ね一致している事がわかる。「変位-荷重」関係については、Misesの場合、変位0.5～1.0(mm)および2.5(mm)以降において、計算結果は試験結果から外れている。一方、SAMP-1の場合、試験結果と一致している。

次に、シャルピー衝撃試験JIS K7111を利用した検証事例を示す³⁾。使用材料はPCである。静的(引張・圧縮・せん断・3点曲げ)および高速引張に関する試験シミュレーションを実施し、「変位-荷重」関係や試験片変形量などを試験結果と比較することで、入力パラメータが妥当であることを確認している。

図3にノッチなしシャルピー試験結果と解析によって得られた試験片変形状態を示す。試験では試験片(10本)は全て破壊しない結果となり、解析においても破壊挙動は見られなかった。また、試験片の開き角は平均131度となった。この開き角は塑性変形に伴う残留ひずみ量に依存し、SAMP-1では「損傷特性²⁾」を入力することで、樹脂材料特性が反映された残留ひずみ量を表

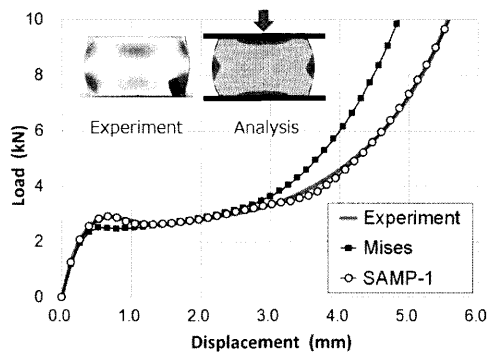


図2 圧縮試験 変位-荷重関係 比較結果

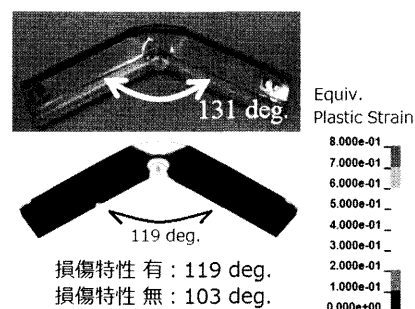


図3 シャルピー試験(ノッチなし)変形状態比較 (上)試験結果、(下)解析結果

現することが可能である。この損傷特性の考慮によって、SAMP-1解析結果における開き角は119度(誤差9.2%)となった。一方、損傷特性を考慮しない場合、解析結果における試験片の開き角は103度(誤差21%)となった。損傷特性の考慮によって、試験結果に近い変形状態が得られていることから、製品開発において、損傷特性考慮は変形量の精密予測に有用と言える。

5. まとめ

本稿では樹脂用材料構成則 SAMP-1 について、従来から広く利用されている金属材料構成則 Mises と比較しつつ、その特徴について説明した。また、材料試験結果と試験シミュレーション結果の比較によって、SAMP-1 は樹脂特性を表現出来る事、および製品開発において有用である事を示した。

参考文献

- 1) 岩野昌夫: プラスチック自動車部品, p4, 工業調査会 (2010)
- 2) S. Kolling, A. Haufe, M. Feucht, P.A. Du Bois: A Semi-Analytical Model for the Simulation of Polymers, Conference Proceedings in LS-DYNA Forum Germany, A-II-27/57 (2005)
- 3) 竹越, 丹羽: 樹脂材料構成則を適用したポリカーボネート部材の衝撃破壊解析, 第23回計算力学講演会 講演論文集, 433/434 (2010)