

高強度プラスチック機械部品の開発

～変形破壊現象の評価～

足立茂寛^{*1)}

Improvement of the machine parts made of plastics.

～ Research on deformation and fracture～

ADACHI Shigehiro ^{*1)}

ポリスチレン、ポリプロピレン、ABS樹脂の破壊現象について破壊力学的な手法を用いた評価を試みた。それぞれの材料について試験速度、試験片形状を変えた試験を行い影響を調べた。PS及びABSは試験速度、試験片厚さによる破壊強度及び形態への影響は少なかった。破壊形態はPSが全て脆性破壊、ABSが延性破壊した。PPは試験速度や試験片厚さによる影響が大きく、試験速度が速く、厚さが大きいほど脆性破壊の要素が強まることがわかった。

1. 緒言

すべての製品は、プラスチックを含めて何らかの材料を用いて作られており、製品を作るときには材料が破壊しないように考慮されている。特に荷重がかかる部品については強度試験を行い、材料の強度を確かめて使用されることが多い。

強度試験は機械の設計に不可欠なものであるが、一方では、強度試験を行い力学的な計算のうえに設計した部品であっても、想定していた強度よりも弱い荷重で破壊し、製品の故障につながることもある。このような現象は、かなり以前から確認されており、その原因についても研究が進められてきた。このような現象に関する研究は、機械部品材料として古くから利用されてきた金属に関しては多く研究されており、成果も蓄積されている。それに対して、プラスチックに関しては研究が遅れており、このことが、プラスチックが機械材料として利用するときの問題のひとつになっている。

遅れている原因としては、プラスチックが金属に比べて新しい材料であること、構造材料として利用される機会が金属に比べて少なかったことなどが考えられる。しかし、最近では、自動車、鉄道や航空機などにもプラスチック製の部品が多く利用されるようになってきている。また、ファイバーや強化繊維を混合した複合材料も含めて、材料開発も進んでいる。新規のプラスチック材料を機械部品に利用するためにも、従来のプラスチックを新しい部品に適用するためにも、材料の適切な評価が必要である。

2. 材料の強さ

強度試験は、製品の設計その中でも特に強い力が作用する機会部品の設計においては必要不可欠なものである。最も一般的に行われている試験としては、引張試験、曲げ試験、圧縮試験などがあげられる。それぞれ引張荷重、曲げ荷重、圧縮荷重が静的に負荷されたときの強度を調べる試験である。それ以外にも、必要に応じて衝撃試験、低温あるいは高温環境下での試験、疲労試験なども行われている。

これらの試験に共通しているのは、材料自体には欠陥がないということを前提とした試験であるということである。当然、その試験結果も材料の欠陥は想定されていない。

しかし、製造中、製造後も含めて、製品に欠陥が存在する可能性あるいは新たな欠陥が発生する可能性は否定できない。材料中に混入した異物や添加物、製造中に発生するボイドやウェルドライン、使用中に発生するキズやクラックなどはすべて材料強度を弱くする要因である。実際にこれらが故障の原因になることも考えられるが、これらの要因のすべてを検査し、排除することは現実的に不可能である。したがって材料の強度を評価するときには、従来の材料力学的な評価だけでなく、欠陥を含むことを前提として、欠陥を含んだ場合の強度を評価することも必要である。

3. 破壊力学

機械材料として必要な性質として、強度が十分であるだけでなく、キズが発生しても強度を持続できることが必要である。欠陥が存在しない理想的な状態での強度が強くて、何らかの原因でクラックが入ると強度が大幅に低下するような材料は、機械材料としては用途が限定される。

材料の強靭さを測定する方法として破壊力学に基づいた破壊靭性試験があり、主に金属材料やセラミックス材料を

*1) 繊維・高分子技術チーム

中心に適用されてきた。

通常の強度試験ではクラックなどを含まないダンベル形・棒状・板状の試験片を使うが、破壊力学の試験は、あらかじめノッチを入れた試験片を用いてクラックの進展に対する抵抗値を評価する方法である。本研究では、中央にノッチを入れた3点曲げ試験片を用いて試験（SENB法）を行い、その結果から破壊靱性値を計算し、クラックの進展に対する抵抗力を定量化することを試みた。破壊靱性値の計算は、金属材料では次式で計算できることが分かっており、本研究でも次式を用いた。この数値が大きいほど、破壊しにくいことを示している。

$$K_{Q} = (F_{Q}S/BW^{3/2}) \times f(a/W) \quad (1)$$

ここで、

$$f(a/W) = 3(a/W)^{1/2} \times \frac{1.99 - (a/W)(1-a/W) \{ 2.15 - 3.93(a/W) + 2.7(a/W)^2 \}}{2(1+2a/W)(1-a/W)^{3/2}}$$

F_Q : 最大荷重(kN)

S : 支点間距離(cm)

B : 厚さ(cm)

W : 幅(cm)

a : ノッチ長さ(cm)

である。

4. 実験方法

4.1 板材の作成

射出成形機（日精樹脂工業㈱製 NEX 110）を用いて、板材を成形した。金型は、寸法は縦 60mm×横 90mm、厚さ方向には3mm～20mmの範囲で可変できるものを用いた。材料はポリスチレン（三菱化学㈱製 ダイアレックス HF-77 以下、PS という）、ポリプロピレン（三菱化学㈱製 MA -03 以下、PP という）、ABS 樹脂（三菱化学㈱製 タフレックス TFX -210）を用いた。成形した板材の厚さは、3mm、5mm、7mm、10mm の 4 種類である。成形した板材（厚さ 10mm、PS）の写真を図 1 に示す。

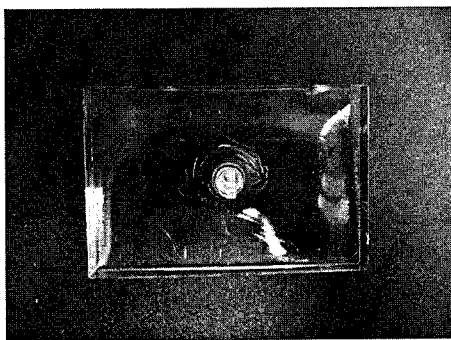


図 1 射出成形した PS 板

4.2 試料の作成

4.1 で成形した板材から、NC 加工機（Roland DG㈱製

MDX-540）を用いて、幅 10mm 長さ 50mm 短冊状の試験片を切り出した。

その後、精密切断機（マルトー㈱製 MX -833 型）を用いて、短冊状試験片の中央に深さ約 4mm の切り込みを入れ、さらに、その先端を剃刀の刃をたたき込んで切り込みの先端を加工し、ノッチを作成した。ノッチの深さは約 5mm を目標とした。正確な長さは、試験後の破面から顕微鏡で測定した。作成した試験片の厚さ及び曲げ試験の試験速度を表 1、試験片の写真を図 2 に示す。

表 1 試験片厚さと試験条件

材料	試験片厚さ	試験速度
P S	3mm	0.1mm/min, 10mm/min
	5mm	0.1mm/min
	7mm	0.1mm/min
	10mm	0.1mm/min
P P	3mm	0.1mm/min
	5mm	0.1mm/min, 10mm/min
	7mm	0.1mm/min, 10mm/min
A B S	3mm	0.1mm/min, 10mm/min
	5mm	0.1mm/min, 10mm/min
	7mm	0.1mm/min, 10mm/min
	10mm	0.1mm/min, 10mm/min

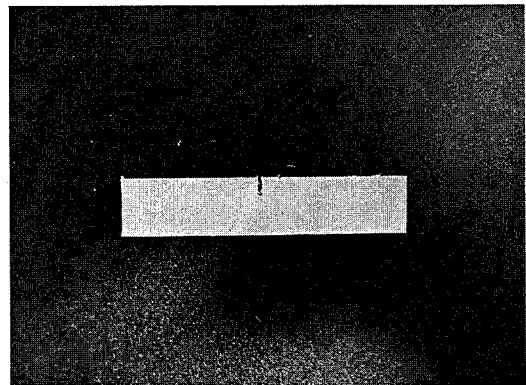


図 2 試験片形状

4.3 破壊靱性試験

4.2 で作成した試験片を用いて、曲げ試験を行った。試験条件は、試験速度は 0.1mm/min 及び 10mm/min の 2 種類、支点間距離は 40mm とした。試験状態を図 3 に示す。

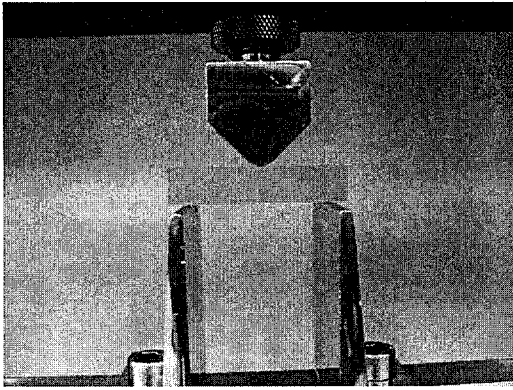


図3 試験状態

破断後の試験片の破面をマイクروسコープで観察し、初期のノッチの深さを測定した。曲げ試験で測定した最大荷重及びノッチの深さ測定の結果から、破壊靱性値 K_Q を(1)式により計算した。

5. 実験結果

5.1 ポリスチレン

PSの曲げ試験における最大荷重を図4に示す。最大荷重については、試験片厚さに比例して最大荷重も増加する傾向が見られた。

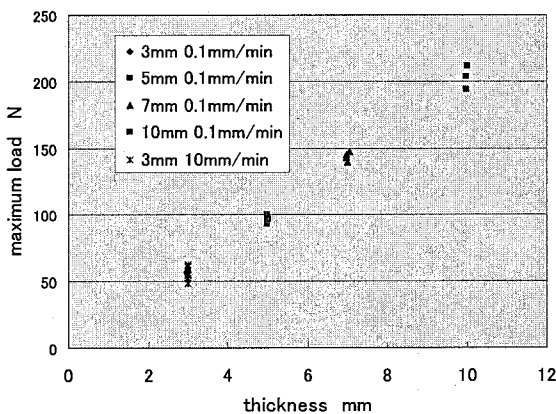


図4 PS試験片の最大荷重と試験片厚さの関係

破壊靱性を計算した結果を図5に示す。破壊靱性値は、試験片厚さによって大きな違いは見られなかった。また、試験片厚さ3mmにおいて試験速度による違いを見てみると、0.1mm/minに比べて10mm/minのほうがバラツキが大きかった。

破壊形態は、試験片厚さ及び試験速度に関係なく全て脆性破壊した。

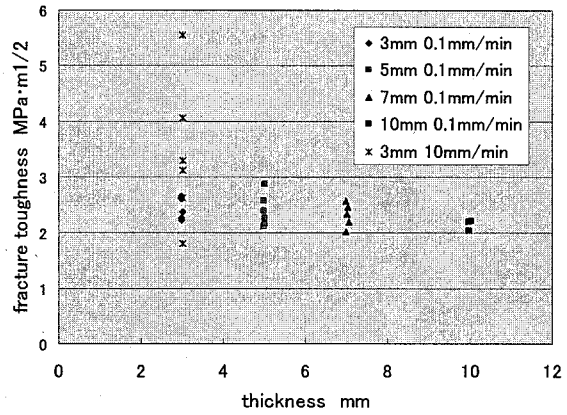


図5 PS試験片の破壊靱性と試験片厚さの関係

5.2 ポリプロピレン

PPの曲げ試験における最大荷重を図6に示す。試験速度が遅いときには、試験片厚さによって最大荷重は変化しなかった。それに対して試験速度が速いときには、試験片厚さが増すと、最大応力も増える傾向が見られた。

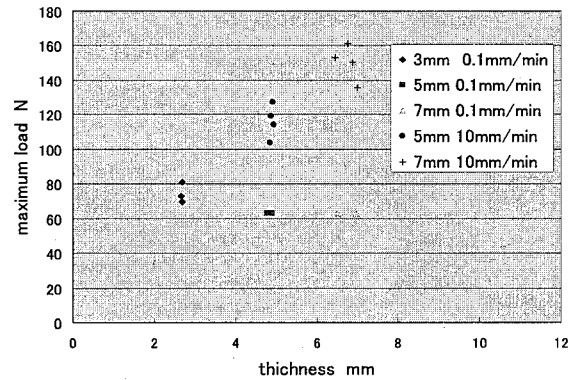


図6 PP試験片の最大荷重と試験片厚さの関係

破壊靱性を計算した結果を図7に示す。速度0.1mm/minの試験では、試験片厚さが増すと破壊靱性値は減少する傾向が見られた。速度10mm/minの試験では、試験片厚さによって破壊靱性値はあまり変化しなかった。

破壊形態は速度0.1mm/minでは全て延性破壊したが、速度10mm/minでは全て脆性破壊した。

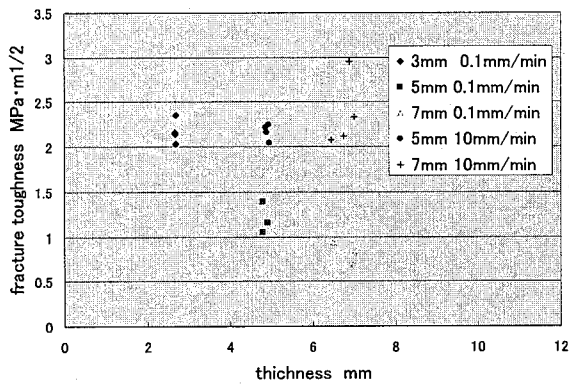


図7 PP試験片の破壊靱性と試験片厚さの関係

5.3 ABS

ABSの曲げ試験における最大荷重を図8に示す。最大荷重については、試験片厚さに比例して最大荷重も増加する傾向が見られた。

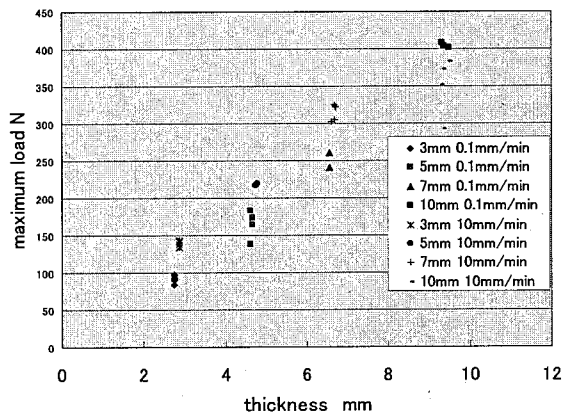


図8 ABS試験片の最大荷重と試験片厚さの関係

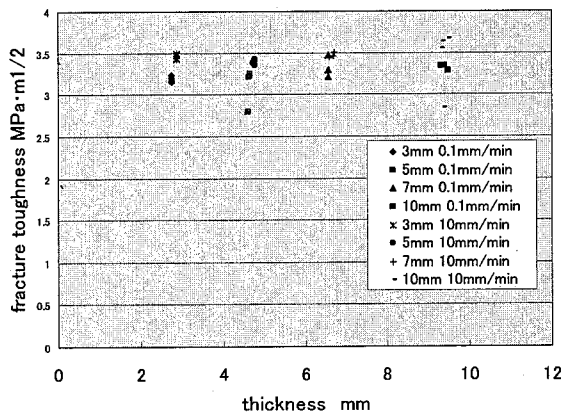


図9 ABS試験片の破壊靱性と試験片厚さの関係

破壊靱性を計算した結果を図9に示す。破壊靱性値は、試験片厚さ及び試験速度による影響は見られなかった。

6. 考察

6.1 破壊靱性

ABSとPSでは似た傾向が見られる。試験片厚さによる破壊靱性値の変化は少なく、厚さによる影響は少ない。また、試験速度についても0.1mm/minと10mm/minで比較しても大きな違いはなく、変形速度が破壊靱性に与える影響は少ない。このことから、ABS及びPSでは形状に関係なく、断面積に比例した強度を持つと考えられる。PPでは、試験速度によって破壊靱性に違いが見られた。さらに、試験速度0.1mm/minの試験においては、試験片厚さが厚いほど破壊靱性値が小さくなる傾向が見られた。このことから、PPは変形速度や形状によって、強度や破壊形態が影響を受けることがわかる。試験速度は速くなるほど、また試験片厚さは厚くなるほど脆性破壊の要素が強くなると考えられる。

6.2 最大荷重

最大荷重についても、ABSとPSでは似た傾向が見られる。最大荷重は試験片厚さと比例関係にある、つまり断面積とも比例していることがわかる。ABSとPSの試験においては、試験速度の影響も少ない。それに対して、PPでは試験速度10mm/minでは最大荷重と試験片厚さは比例しているが、試験速度0.1mm/minでは比例関係は見られず、試験片厚さに関係なく一定となる傾向が見られる。このことは、変形速度が遅いときには、PPがPS・ABSに比べて延性破壊の要素が強いことを示していると考えられる。PPでは内部で塑性変形が発生し、応力緩和が起きていると考えられる。応力緩和が発生しているのであれば、PPは荷重が長時間にわたって荷重が負荷される環境では、厚さを増しても強度向上の効果は少なくなると考えられる。

6.3 破壊形態

試験中には破壊形態の観察も行った。PSは、速度0.1mm/minと10mm/minともに脆性破壊した。PSは非結晶性樹脂であり、分子が運動しにくいいため変形が難しく、強度の限界を超えると瞬時に破壊するためと考えられる。

PPは、10mm/minでは脆性破壊したのに対して、速度0.1mm/minでは脆性破壊せずに屈曲し、破断しなかった。PPはPSに比べると分子が運動しやすく、遅い変形であれば、材料内部で変形と応力緩和が発生し、延性破壊すると考えられる。ただし、変形が早くなり、応力緩和の作用を上回るようになると、脆性破壊に近くなると考えられる。

ABSは全ての試験片で延性破壊した。破壊靱性や最大強度ではPSと似た傾向であったが、破壊形態はPSとは異なる

っており脆性破壊はしなかった。ABSはアクリロニトリル／ブタジエン／スチレンの共重合体であり、スチレン硬い性質を残しながら、アクリロニトリルとブタジエンにより材料の脆さも改善されているためと考えられる。

7. 結言

PS, PP, ABSを用いて厚さを変化させたノッチ付試験片を作成し、3点曲げ試験を行い、破壊靱性の算出を試みた。試験速度や試験片厚さの違いによる破壊形態の違いも観察した。主な結果は次のとおりである。

- (1) PSとABSでは試験片厚さ及び試験速度による破壊靱性値への影響は少なかった。PPでは試験速度及び試験片厚さによる影響が見られた。試験片厚さが大きいほうが破壊靱性値が小さくなる傾向が見られた。
- (2) 最大荷重は、PSとABSでは最大荷重と試験片厚さは比例しており、似た傾向が見られた。PPでは試験速度によって傾向が異なっており、試験速度が遅いときには厚さにかかわらず最大荷重はほぼ一定となった。
- (3) 破壊形態は、PSは速度によらず全て脆性破壊し、ABSは全て延性破壊した。PPでは試験速度10mm/minでは脆性破壊したが、試験速度0.1mm/minでは脆性破壊せずに屈曲し、破断しなかった。このことから、PPは負荷速度が破壊形態に与える影響が大きいことがわかった。

参考文献

- 1) 成澤郁夫；プラスチックの破壊靱性，(株)シグマ出版(1993)。
- 2) 矢川元基；破壊力学，培風館(株)(1984)。
- 3) JIS G0564 金属材料—平面ひずみ破壊靱性試験方法
- 4) G.R.Strobl；高分子の物理，シュブリンガー・フェアラーク東京(株)(1984)。

なお、本研究で使用した電動式射出圧縮成形機及び試験片作成装置は、財団法人JKAの「機械工業振興補助事業」により導入、設置した。

KEIRIN 00