

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)}

The fracture toughness of polystyrene and polypropylene were estimated by the SENB(Single Edged Notched Bend) method based on linear fracture mechanics. Polystyrene is not sensitive to the test speed and the thickness of the test piece. Polypropylene is sensitive to them. The fracture toughness of polypropylene depend on the thickness of test piece and the test speed. The state of fracture depends on the test speed.

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してつくられている。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難点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、製品の設計とくに機械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強度試験としては、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ことになる。

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。

このように、材料の強靭さを測定する方法として破壊力

^{*1)}繊維・高分子技術チーム

学に基づいた破壊靱性試験があり、主に金属材料やセラミックス材料を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や棒状の試験片を使うが、破壊力学の試験では、あらかじめノッチを入れた試験片を用いて、クラックの進展にたい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(SEN B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 NEX110)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、P Sという)およびポリプロピレン(三菱化学㈱製 MA-03 以下、P Pという)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、P S)の写真をFig.1に示す。

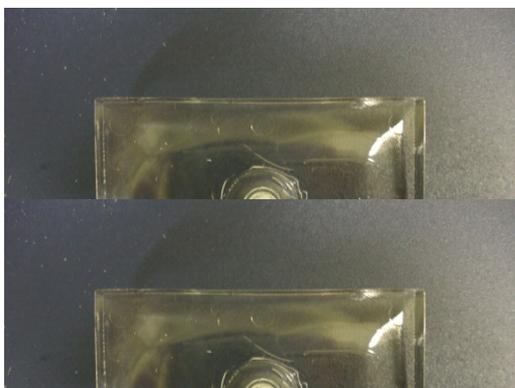


Fig. 1 Photograph of the PS plate.

4.2 試料の作成

4.1 で成形した板材から、NC加工機(Roland DG(株)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(株)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。である。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および曲げ試験の試験速度をTable 1、試験片の写真をFig.2に示す。

Table 1 Test piece and test condition.

Material	Thickness	Test speed
polystyrene	3mm	0.1mm/min
	5mm	0.1mm/min
	7mm	0.1mm/min
	10mm	0.1mm/min
	3mm	10.0mm/min
polypropylene	3mm	0.1mm/min
	5mm	0.1mm/min
	7mm	0.1mm/min
	5mm	10.0mm/min
	7mm	10.0mm/min

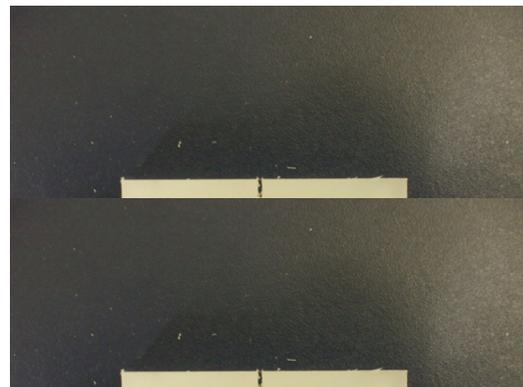


Fig. 2 Photograph of the test piece.

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および10mm/minの2種類、支点間距離は40mmとした。試験状態をFig.3に示す。

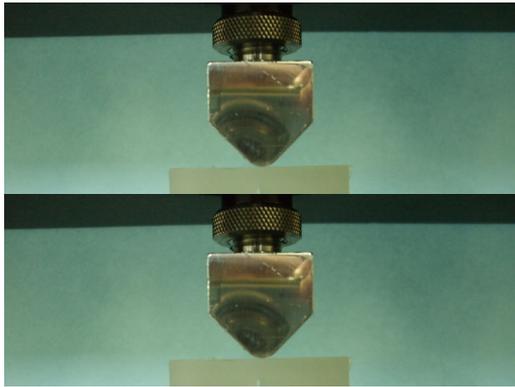


Fig. 3 Photograph of the bending test.

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およ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。

$$K_Q = (F_Q S / BW^{3/2}) \times f(a/W)$$

ここで、

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

- 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。

5. 実験結果

5.1 PSの破壊靱性

PSの曲げ試験における最大荷重を Fig.4 に示す。

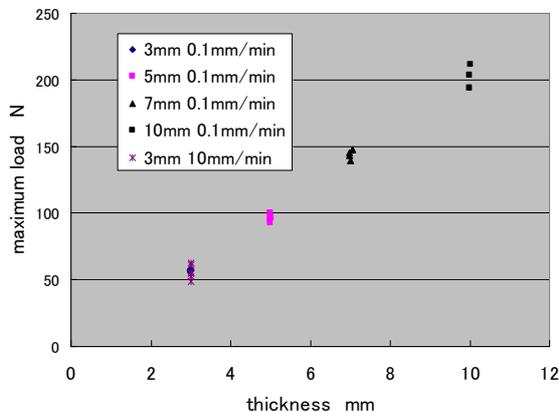


Fig. 4 Relationship between the thickness of the PS test piece and the maximum load.

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。

破壊靱性を計算した結果を Fig.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、試験片厚さおよび試験速度に関係なく全て脆性破壊した。

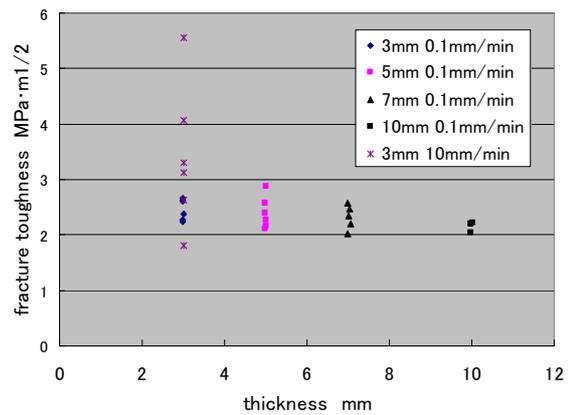


Fig. 5 Relationship between the thickness of the PS test piece and the fracture toughness.

5.1 PPの破壊靱性

PSの曲げ試験における最大荷重を Fig.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。

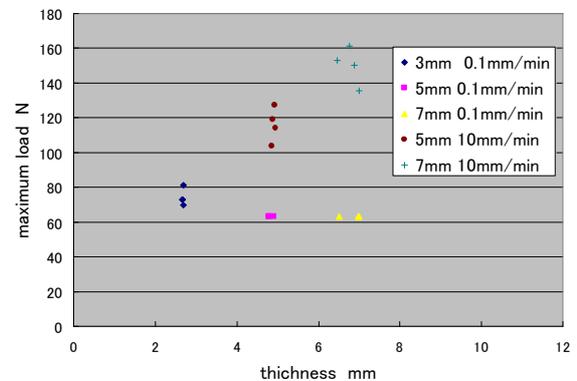


Fig. 6 Relationship between the thickness of the PP test piece and the maximum load.

破壊靱性を計算した結果を Fig.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現象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。

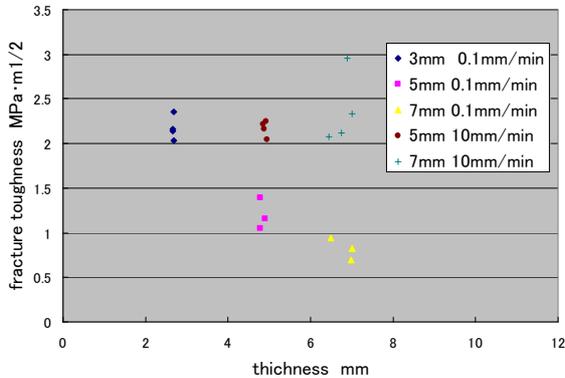


Fig. 7 Relationship between the thickness of the PP test piece and the fracture toughness.

6. 考察

6.1 試験片厚さの影響

試験速度 0.1mm/min のときの破壊靱性について P S と P P を比較すると、P S では試験片厚さの影響が少ないのに対して、P P では試験片厚さが厚くなると破壊靱性値が小さくなる傾向が見られた。このことから、試験片厚さを増したときの変形や破壊に関する挙動の変化は、P S と P P で異なることも考えられる。

最大荷重を見ると、P S では、試験片厚さが増すと、それに比例して強度が増しているが、P P では異なった結果が見られる。P P の速度 0.1mm/min の試験では、最大強度と試験片厚さの間に比例関係はみられない。速度 10mm/min 試験片では比例関係が見られることから、速度によってクラック進展の機構・メカニズムが異なっている可能性がある。

6.2 試験速度の影響

速度 0.1mm/min と 10mm/min を比較すると P S、P P とともに速度が速いほうが、破壊靱性値が大きくなるのが分かった。しかし、その変化は P P のほうが大きい。

P P の試験を見ると、速度 0.1mm/min の試験では、厚さが増しても最大荷重は変化せず、破壊靱性値は低下している。それに対して、速度 10mm/min の試験では、厚さが増すと最大荷重は増加し、破壊靱性値はあまり変化していない。このことから、速度によって内部の応力状態が異なることが推測できる。

速度 0.1mm/min の試験において、試験片厚さが増しても

最大荷重が増えない原因としては、試験片内部での応力緩和が考えられる。応力緩和が発生しているのであれば、P P 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

P S では、試験片厚さ、試験速度にかかわらず全て脆性破壊した。本研究で試験した試験速度の範囲では、P S は P P に比べて形状や負荷速度の影響を受けにくいと考えられる。

プラスチックは粘弾性体であり、荷重が長時間にわたって負荷されることにより応力緩和などの現象が起きると考えられる。P S においては、試験速度 0.1mm/min と 10mm/min で破壊靱性値に大きな違いが見られないことから、応力緩和の影響もすくないと考えられる。P P では試験速度によって破壊形態に違いが見られ、試験速度が速いほうが、脆性破壊が起りやすい傾向が見られる。このことは、試験速度が遅いときには、クラック先端近傍でクリープや応力緩和が発生し、クラックの急激な進展を妨げられていることが原因と考えられる。

7. 結言

P S、P P を用いて厚さを変化させたノッチ付試験片を作成し、3点曲げ試験を行うことで、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) P S では試験片厚さによる破壊靱性値への影響は少なかった。それに対して P P は、試験速度が遅い場合は、試験片厚さが増すと、破壊靱性値が小さくなる傾向が見られた。このことから、P P は形状が太くなくても必ずしも強度が高まるとは限らないと考えられる。
- (2) P S、P P とともに、試験速度が速いほうが破壊靱性値は上昇した。しかし、P P の変化の方が大きいことから、P P のほうが負荷速度による影響を受けやすいことがわかった。
- (3) 破壊形態は、P S は速度によらず全て脆性破壊した。それに対して、P P 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、P P は負荷速度によって破壊形態が変化することがわかった。クラック先端近傍での応力緩和が影響している可能性がある。

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・フェアラク東京(株)
(1984).

なお、本研究において板材の成型、試料片の切り出しおよび曲げ試験に使用した装置は、競輪収益の一部を財源とした、財団法人JKA（旧日本自転車振興会）「機械工業振興補助事業」の補助金助成により設置したものである。

