

可変速式 3 点曲げ衝撃試験装置の開発 (第 3 報：き裂進展および巨視的破断面解析)

内田 武*・八児 明範**

Development of Speed-variable-type Three-point-bending Impact Testing Apparatus (PartⅢ : Crack Propagation and Macrofractography) Takeshi UCHIDA* and Akinori YACHIGO**

In this study, compact, cheap three-point-bending machine to examine in a wide speed region was produced. And, it was able to be confirmed to examine it enough operating as a result of doing the performance assessment. Then, the fracture toughness test from low speed to the high speed was done by using two kinds of materials named PC (Polycarbonate) and PMMA (Polymethyl methacrylate). Moreover, the dependency was investigated to the rate of slip in the value of fracture toughness, the crack progress behavior, and the breaking side form. Both rate of slips of PC・PMMA as a result of doing the fracture toughness from 30mm/min to 90000mm/min changed and the value of fracture toughness changed to 1000mm/min almost constantly. Next, the progress behavior of the crack was investigated. As a result, the crack occurred in the vicinity of the maximum load in a low-speed area of PC and PMMA. It has been understood that the crack has occurred immediately after the load's having joined when becoming a high-speed area. Next, the fracture cross section of the test piece was analyzed. The fracture cross section of PC was doing smooth shape overall. Moreover, the craze void area was seen in low speed. A striped type occupied the majority to the fracture cross section of PMMA in a low-speed region. The ratio of a smooth type increases rapidly when becoming a high-speed area. The speed area where craze void decreases and increases a smooth type is the same as the area (about 1000mm/min) where the value of fracture toughness decreased. Therefore, both seem that there is some relativities.

Key Word : Three point bending, Impact testing apparatus, Trial manufacturing, Performance estimation, Fracture toughness, Plastics, PMMA, PC, Crack Propagation, Macrofractography

1. 緒 言

有機高分子材料には天然高分子と合成高分子があり、プラスチックは後者に含まれ、C, H, O および N の元素から成り立っているものが大半である。分子構造的には単純構造化合物（モノマー）が繰返し直線状に連なったものであるが、繰返しの鎖が長くなることで、金属材料に比べて環境温度や負荷速度などの外的な諸条件に対して非常に敏感になり、特有な性質が現れる。また、プラスチックは熱可塑性と熱硬化性に大別され、前者がプラスチック全生産量の 80% を占めており、プラスチックといえば熱可塑性樹脂を示しているのが通例となっている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

プラスチック材料の本格使用は 1950 年代以降であり、産業の高度成長に伴う有機合成化学の発展、既存材料のアロイ化や複合化、エンジニアリングプラスチック（俗称：エンブラ）の開発などにより現在の地位を確立した。これらは、軽量化による燃費改善での環境負荷低減、高性能化、一体成形などによる加工工程削減、その他に高デザイン

性・防錆性・無潤滑・低騒音、高い比強度を持つことから、構造材料や機械部品材料など過酷な環境下でも積極的に使用されるようになった。自動車業界においても、金属やゴムからプラスチックへの材料転換が進んでおり、その利用は拡大傾向にある。具体的には、コックピットモジュール・ワイパーアームなどの内外装部品、フェンダー・リアハッチバックドアなどの外板部品、エアインテークマニホールド・シリンダヘッドカバーなどのエンジンルーム内部品、燃料タンク・フューエルフィルタなどの燃料系部品、ドアモジュールなどの機構部品、エアバックなどの安全対策部品などが挙げられる⁽⁴⁾。

近年では、自動車の衝突に対する安全基準⁽⁵⁾が強化されており、国土交通省の平成 14 年度自動車等安全性能評価実施要領によれば、フルラップ前面衝突では 55km/h、オフセット前面衝突では 64km/h、側面衝突では 55km/h を試験条件としており、衝突試験の際に人体ダミーの頭部・頸部・胸部・下肢部に作用する衝撃や室内の変形をもとに、乗員保護性能の度合いを 5 段階で評価している。独立行政法人の交通安全環境研究所においては、前面衝突試験・側面衝突試験ともに 50km/h での試験を実施している。欧米諸国の自動車衝突安全性能に対する評価においても、同等の条件での試験が実施されている。

* 機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

** 専攻科、生産工学専攻 2 年

(Advanced Production Engineering Course, 2nd grade)

上述のように、自動車部品に占めるプラスチック材料の重量比は増加の傾向にあり、プラスチック材料の衝撃吸収性を積極的に利用したプラスチック製部品ならびに軽量化を積極的に狙ったプラスチック製部品などがある。ところが、金属や合金などの代替材料としての工業用途あるいは構造用途に積極的に使用することを考えた際には、強度や耐久性について心配が残るため、プラスチック材料の強度的特性の評価に関しては、検討の必要が多分に残されている。衝突に対する安全基準が強化されていることを考慮すると、プラスチック材料の強度試験においても、車速にして 50km/h (=13.8m/s) ~ 64km/h (=17.8m/s) に対応した変位速度における、衝撃試験ならびに衝撃破壊挙動の明確化が必要である。

材料の衝撃特性に関する研究は以前からなされておりその中で数多くの試験機が開発されてきた。図1に各種材料試験機の稼動速度を示している。それぞれの試験機の特徴を挙げると以下ようになる。

・ねじ式試験機および油圧サーボ試験機

ねじ式試験機は 500mm/min 以内、一般の油圧サーボ試験機は 1m/s 程度以内の変位速度で稼動する。高精度の変位制御および荷重制御が可能であるが、衝撃試験に見合う変位速度は出ない。

・シャルピー衝撃試験機

一般に 3~5m/s 程度の変位速度での衝撃試験を行うようにハンマーの持ち上げ角度が規格化されている。ハンマーの持ち上げ角の変更により変位速度の変更は多少可能であるが、操作性には難がある。

・ホプキンソン棒式衝撃試験機

10m/s 程度の高速変位速度での衝撃試験が可能だが、試験装置全体が大きくなり占有面積の面で難点がある上に、低速試験ができない。

しかし、これらの試験機には欠点があり、試験可能な速度域が比較的狭く、幅広い速度域での試験を行うことは不可能である。また、低速度から高速度での試験を行う場合、それぞれの変位速度に対応する試験機を使用しなければならず、設置面積やコストの面が問題になってくる。従来から使用されている各種材料試験機の特徴を踏まえた上で、

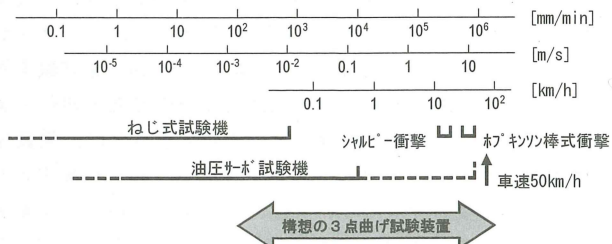


図1 各種材料試験機の稼動速度

今回、可変速式三点曲げ衝撃試験装置を開発した。試作機の主な特徴は次のようになる。

- ・1台の試験機で、低速度から高速度にわたっての材料試験が可能である。
- ・設置面積が約 1m²とコンパクトである。
- ・従来の試験機よりも安価で、操作が簡単である。

この試作機を用いて、低速度から高速度までの破壊じん性試験を行い、破壊じん性値、き裂進展挙動、破断面形態の変位速度依存性調査が本研究の目的である。

2. 可変速式三点曲げ衝撃試験装置の構成と実験方法

図2に示しているのは、可変速式三点曲げ衝撃試験装置の概観である。本試験機の動力は図中Aに示すインバータ駆動専用ACモータ（富士電機製 MVA8107A, 2.2kW）で、ベクトル制御式インバータ（MSテクノ製 MITY-SERVO VEA-22）に所定の周波数を入力することにより、自由にモータの回転を制御できる。モータの回転はプーリーを介して16分の1（1/4の2段）に減速されてから主軸に伝わり、図中Bの打撃刃を矢印方向に回転させ、図中Cの試験片設置部にある試験片を衝撃的に破壊する。図中Dに主軸の回転状況をパルス出力するロータリーエンコーダ（オムロン製 E6C3-CWZ3EH, 分解能 3600P/R, 応答周波数 125kHz, 電圧出力）を取付け、打撃位置の変位に換算する。荷重は、図中Eに示したロードセル（共和電業 LUR-A-2KNSA1, 定格容量：±2kN, 固有振動数：約 20kHz）とシグナルコンディショナー（共和電業製 DPA-700A）により、情報を高感度で計測する。

その後、ロードセルが検出した荷重信号と、ロータリーエンコーダが検出した角度信号をパソコンに取り込むことで、破壊じん性値を算出する。

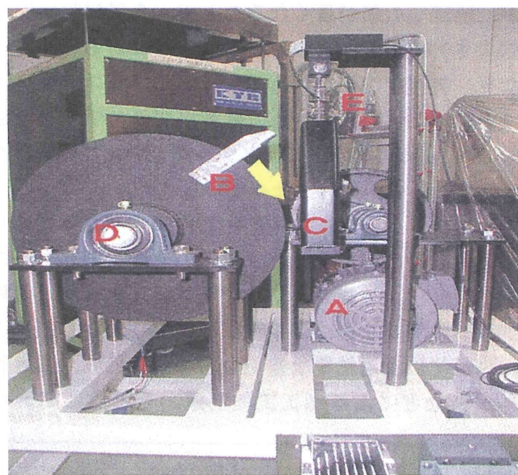


図2 実験装置概観図

3. 可変速式3点曲げ衝撃試験装置の性能評価

本研究で製作した可変速式3点曲げ衝撃試験装置の基本性能評価^{(6),(7)}をまとめると、以下の通りである。

3. 1 インバータ設定周波数と打撃点周速度の関係

図3はインバータ設定周波数と打撃点周速度の関係であり、0.01~100Hz設定の範囲で両者には比例関係が見られる。これにより、 5×10^{-4} m/s (30mm/min) のねじ式試験機が動作する低変位速度から、5m/sのシャルピー衝撃試験機が動作する高変位速度までの試験が可能であること、実施したい試験速度を容易に設定できることがわかる。

3. 2 打撃点周速度収束までに要する回転角度

図4はインバータ設定周波数と打撃点周速度が設定周速度に収束するまでに要した円板回転角度の関係であり、100Hz設定においても320°までには打撃点周速度が収束することがわかる。これにより、打撃刃のスタート位置を適切に設定することで、5m/sの高変位速度までの試験が可能であることが確認された。

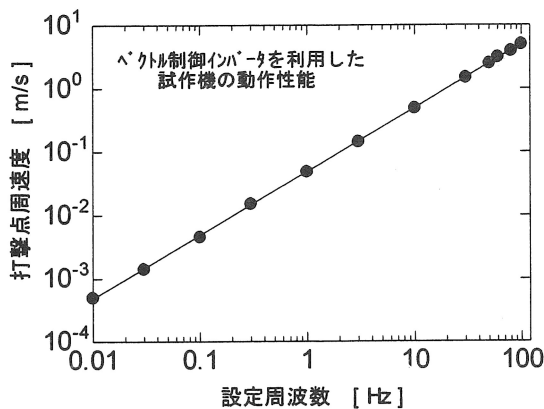


図3 インバータ設定周波数と打撃点周速度の関係

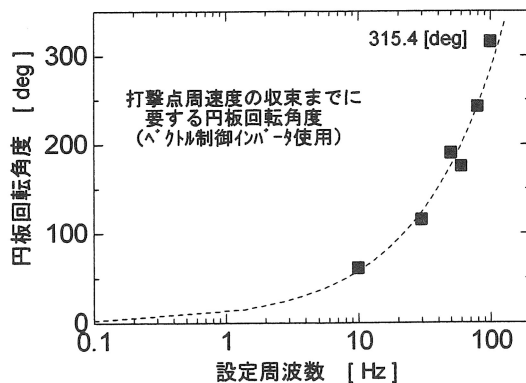


図4 打撃点周速度収束までに要する円板回転角度

3. 3 試験片破壊中の打撃点周速度の変化

図5は負荷過程中的打撃点周速度の挙動を示しており、試験片に接触した直後、多少の速度変化は見られるものの、その後すぐに所定速度まで回復していることがわかる。速度の変化も最大でも10%程度に抑えられていることから、試験を行うには十分な結果であると判断できる。

4. 破壊じん性試験

4. 1 ねじ式万能試験機との比較

今回製作した可変速式3点曲げ衝撃試験装置の基本動作は、十分に試験が可能であると判断されたが、実際に試験を行ったときに算出される破壊じん性値が、信頼のあるもののなかを確認するために、従来から使用しているねじ式万能試験機の結果^{(8)~(10)}と比較し、同等性を調査した。

破壊じん性値とはき裂の一方向静的負荷に対する抵抗値のことであり、破壊じん性値の大きな材料ほどき裂は入りにくい。即ち、破壊しにくい材料であるといえる。今回、破壊じん性値は、荷重-時間線図の最高荷重から次式を用いて算出した。

$$K_{Ic} = \frac{PS \cdot f(a/W)}{BW^{1.5}} \quad (1)$$

ここで、Pは最大荷重、Sはスパン距離、aはき裂長さ、Bは試験片厚さ、Wは試験片高さである。また、 $f(a/W)$ は、試験片の形状・寸法で決まる形状因子であり、 $a/W = X$ として、次式のように表現される。

$$f(X) = X^{0.5} \left\{ \frac{3(1.99 - X(1-X)(2.15 - 3.98X + 2.7X^2))}{2((1+2X)(1-X)^{1.5})} \right\} \quad (2)$$

試験片に使用した材料は、非晶性の熱可塑性プラスチックの中から、延性的な性質を示すPC(タキロン(株)製、PC1600)と、ぜい性的な性質を示すPMMA(三菱レイヨン(株)製、アクリライト)の2種類とした。

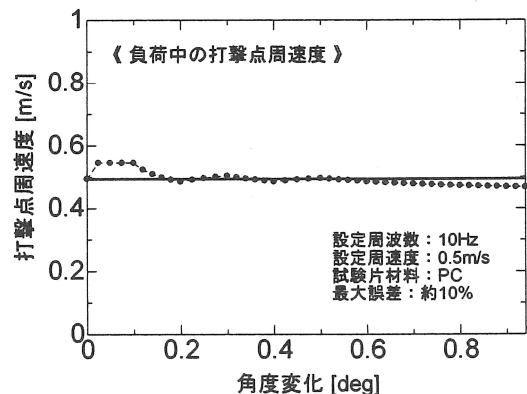


図5 負荷過程中的打撃点周速度変化

図6に、今回の破壊じん性試験で使用した試験片の形状・寸法を示す。試験片は、高さ20mm・長さ100mm・厚さ5mmの角材であり、試験片中央には高さ方向に幅0.5mm・長さ5mmのスリットが1本フライス加工されている。このスリットの先端にカッターナイフの刃を打撃により押し込むことで約3mmの予き裂を導入し、全長で約8mmのき裂を形成した。全ての試験片は、加工時の発熱による影響と残留応力の除去・クレイズの回復を目的に、所定の温度および時間を考慮した昇温・保持・徐冷による熱処理を施した。熱処理の最高温度はPCで124℃(397K)、PMMAで97.3℃(370.3K)^{(6)~(10)}に設定した。

図7は、試作機と卓上型精密万能試験機(株)島津製作所製 AUTOGRAPH AGS-1000A、容量10kN)で得られた破壊じん性値を比較したものである。これによると、万能試験機と試作機との間に破壊じん性値の大きな違いは見られず、同等性があると判断できる。

4.2 破壊じん性値の変位速度依存性

ねじ式万能試験機との間に同等性がみられたことにより、さらに90000mm/min(1.5m/s)までの速い変位速度域までの破壊じん性試験を行った。図8は、これまでの研究^{(8)~(10)}で得られた低変位速度域からの結果とつなぎ合わせ、衝撃速度域までの破壊じん性値を調査した結果である。

これによると、PCおよびPMMAの破壊じん性値は、いずれも約1000mm/minまでは変位速度に依存せず一定に推移しているが、約1000mm/minより速い変位速度域になると低下傾向があるしていることがわかった。これは、遅い変位速度域では試験片のき裂先端部分での塑性変形領域が十分発達してから破壊するのに対し、速い変位速度域では塑性変形領域が十分に発達せず、相対的に遅い変位速度領域よりも減少することで、延性的な破壊からぜい性的な破壊へ遷移しているからであると考えられる。

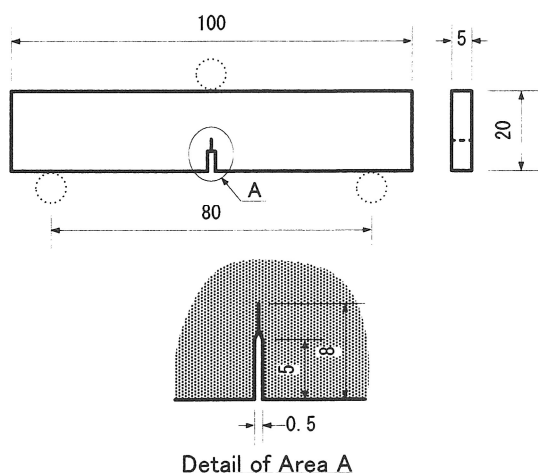


図6 破壊じん性試験片の形状・寸法

5. き裂進展挙動の調査

5.1 クラックゲージを用いた予備試験

破壊じん性試験を行った結果、延性材料であるPC、脆性材料であるPMMAともに、変位速度が約1000mm/min以上の変位速度域で破壊じん性値が低下した。このことから、1000mm/min付近の変位速度域で、破壊形態に何らかの変化が生じたのではないかと推測される。そこで、クラックゲージ(KYOWA製 KV-5C、抵抗値:約1.0Ω、ピッチ0.1mm、グリッド本数46本)を試験片の側面に貼り付けることで、き裂の成長とともにき裂進展速度の挙動を調査した。

図9はクラックゲージを接着剤で試験片に貼り付けたときの概観を示している。試験片の幅は20mm、き裂全長は8mmであることから、き裂は試験片の最終破断までに12mm程度成長することになる。一方、使用したクラックゲージの計測幅は4.6mmで試験片リガメント幅より小さいものを利用したので、今回のき裂進展挙動調査はき裂先端から4.6mm以内の、き裂成長初期段階を対象とした。

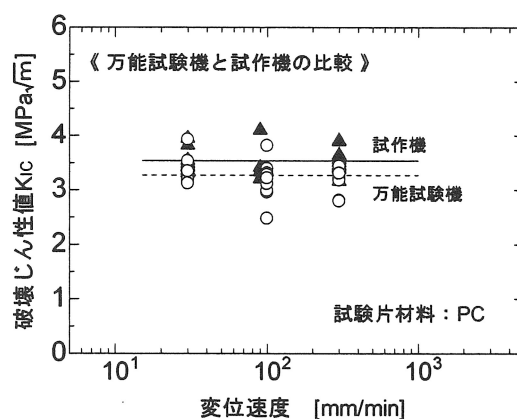


図7 試作機と万能試験機の結果比較

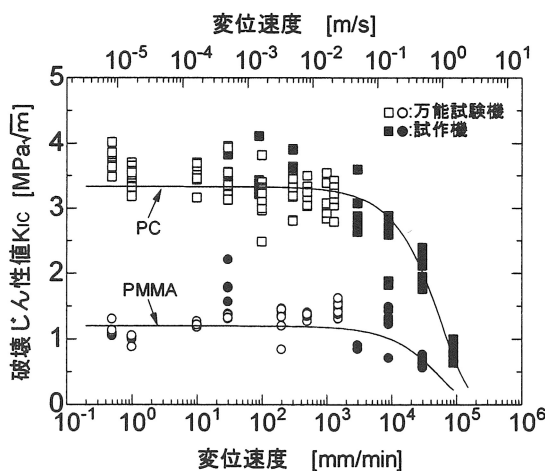


図8 破壊じん性値の変位速度依存性 (PMMA・PC)

以前実施したき裂進展計測^{(8), (10)}では、銀ペーストを試験片側面にピッチ 1.0mm で塗布したペイントゲージならびに、金を試験片側面にピッチ 1.0mm で蒸着したスパッタゲージを使用したが、今回はより正確な観測を行うために、ピッチ 0.1mm のクラックゲージで計測を行うことにした。しかし、これまでの実験結果によると、ピッチを 0.5mm 以下にした際に計測データにムラが生じ、信頼のあるデータが得られなかったとの報告もある。そこで、今回行うピッチ 0.1mm のクラックゲージを使用した場合に、正確なデータが得られるかの調査とともに、ゲージ貼り付けによる試験片への補強効果が現れないかの調査を実施した。

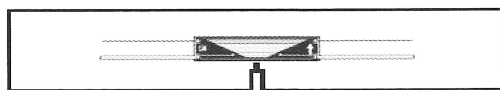


図9 クラックゲージを貼付した試験片の概観

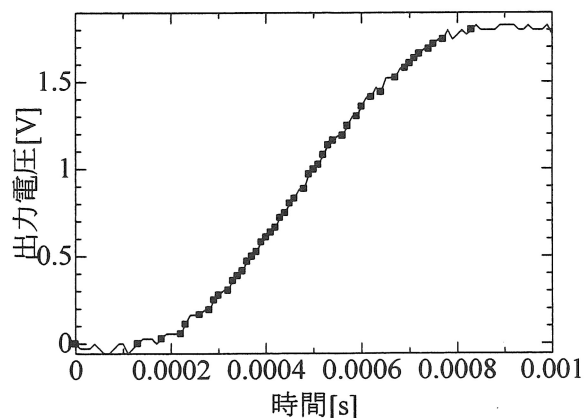


図10 クラックゲージ出力と時間の関係

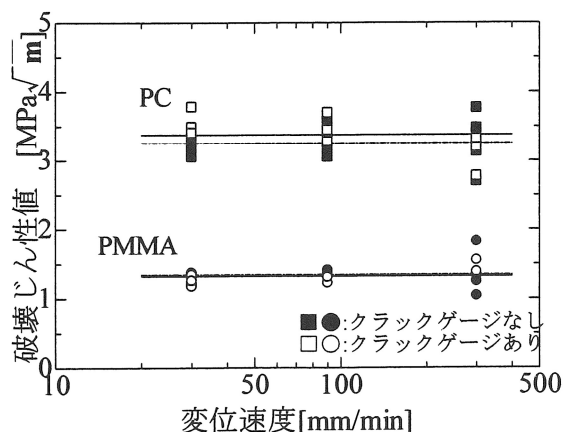


図11 クラックゲージ貼付の強度への影響

図10は、ピッチ 0.1mm のクラックゲージを貼り付けた試験片を予備的に破壊させた際に得られた出力電圧を示している。図中の■印は、出力電圧が変化した地点を示している。この■印の合計は46個で、グリッド本数と一致することから、0.1mm ピッチのクラックゲージを使用することで、より正確な計測ができるものと判断できる。

図11は、クラックゲージを貼り付けた試験片を予備的に破壊させることで、ゲージ貼り付けの有無による破壊じん性値を比較したものである。これによると、両材料とも破壊じん性値には差がほとんどないことが伺え、クラックゲージを貼り付けたことによる試験片への補強効果はないことを確認することができた。

5. 2 き裂進展挙動の変位速度依存性

試験片側面に先述したピッチ 0.1mm のクラックゲージを貼り付け、破壊じん性試験を行った。図12・図13はPCの場合、図15・図16・図17はPMMAの場合に得られた、荷重およびクラックゲージ出力と時間の関係を示したもので、図14と図18は、PCとPMMAにおけるき裂進展速度とき裂長さの関係を示したものである。

PCの場合、0.01Hz 設定の低変位速度域では図12のように最大荷重付近からき裂が成長を開始し、荷重が0になる

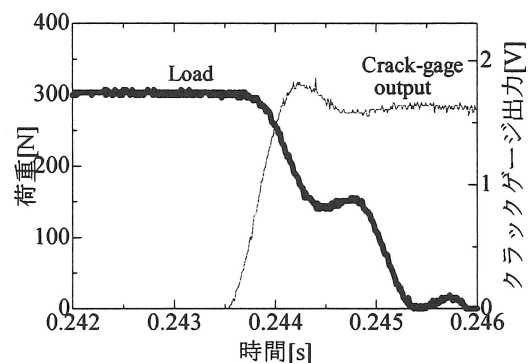


図12 PCの荷重・クラックゲージ出力 (0.01Hz)

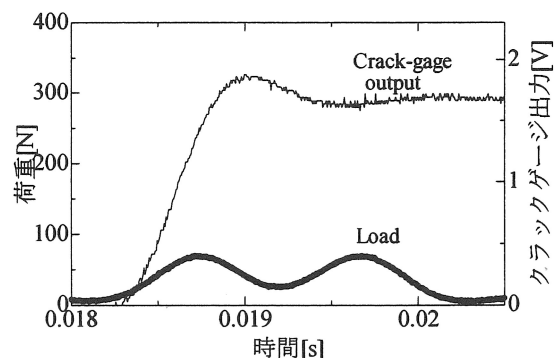


図13 PCの荷重・クラックゲージ出力 (30Hz)

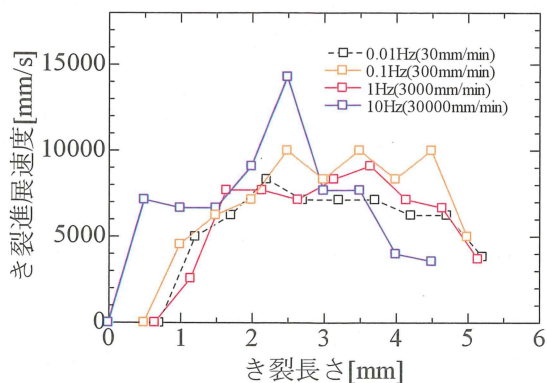


図 14 PC のき裂進展速度とき裂長さの関係

までにはき裂成長は終了している。一方、図 13 のような 30Hz 設定の高変位速度域では、き裂の成長開始地点は、荷重を加えた直後になっており、低変位速度よりかなり早い段階からき裂の成長が起きているといえる。また、図 14 に示した PC のき裂進展速度を見ると、変位速度が速くなるに伴って、き裂進展速度は増大する傾向が伺える。さらに、どの変位速度においても、き裂成長 5mm までの間で巨視的に見て山型を呈しており、き裂成長が 2.5mm 付近でき裂進展速度は最高に達し、その後は減速する傾向にあることも伺える。

PMMA の場合、図 15 を見てみると、0.01Hz 設定の低変位速度域では、最大荷重に達する前にき裂がゆっくりと成長開始し、き裂長さが 2.5mm 程度までは緩やかな速度でき裂が成長しているが、最大荷重付近で急激に成長し、破断に至っていることがわかる。図 16 に示す 1Hz 設定の中変位速度域では、き裂は最大荷重付近から発生しており、PC での低変位速度域 (0.01Hz 設定) の挙動と類似していた。一方、0.1Hz 設定の速度域では、0.01Hz と 1Hz に設定した低変位速度域と中変位速度域で確認された挙動が混在していることから、0.1Hz 設定という変位速度域 (300mm/min 程度の変位速度域) で、破壊形態に何らかの変化が起きているのではないかと考えられる。図 17 に示す 10Hz 設定の高変位速度域になると、PC での高変位速度域での挙動と同様に、き裂成長が早まることが確認された。また、図 18 に示した PMMA のき裂進展速度を見ると、変位速度が速くなるにつれて、き裂進展速度は増大し、同時に増大の時期も早まることが伺える。図 14 および図 18 より、PC と PMMA のき裂進展速度のオーダーは同程度であることがわかった。

PC と PMMA の両材料とも、低変位速度域では最大荷重付近からき裂が成長していたが、高変位速度域になると荷重が加わった直後からき裂が成長していることがわかった。この変化が生じた変位速度域は、図 8 に示した破壊じん性値の低下現象が見られた 1000mm/min 以上の変位速度域とも重なることから、き裂の成長開始と破壊じん性値の間には、深い関連性があると考えられる。

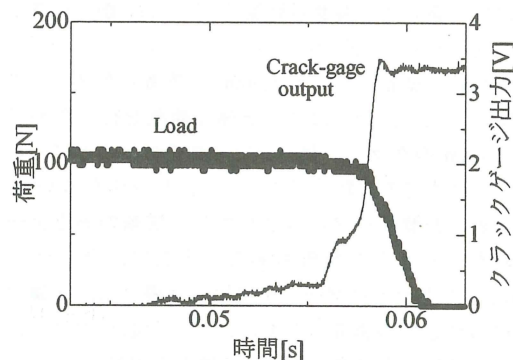


図 15 PMMA の荷重・クラックゲージ出力 (0.01Hz)

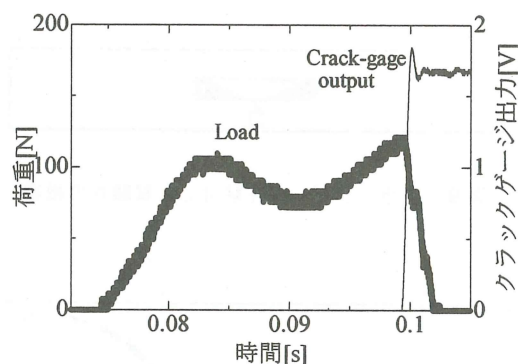


図 16 PMMA の荷重・クラックゲージ出力 (1Hz)

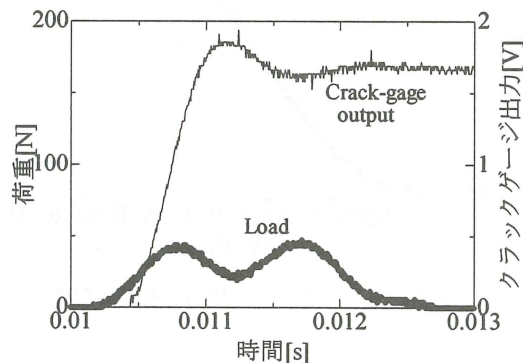


図 17 PMMA の荷重・クラックゲージ出力 (10Hz)

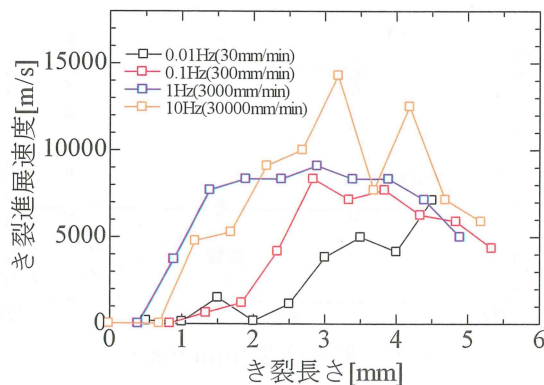


図 18 PMMA のき裂進展速度とき裂長さの関係

6. 巨視的破断面解析

き裂進展の調査結果により、破壊形態に何らかの変化が生じている変位速度域が存在することが確認された。そこで、これらの変位速度域において、具体的にどのような変化が生じていたのかを明らかにするために、破壊じん性試験で得られた試験片破断面を巨視的に観察し、その破断面形態を調査した。

6.1 PC 破断面の巨視的解析

図19はPCの代表的破断面の例で、試験片作成時のスリットと予き裂は右側に位置しており、き裂は左に向かって進展している。図19(a)は、9000mm/min以下の低・中変位速度域で見られる破断面で、破断面全体は滑らかな形状をしているが、き裂進展初期段階で気泡がはじけたような痕跡が存在するタイプである。図19(b)は、9000mm/minを超える高変位速度域で見られる破断面で、破断面全体は低速度域のものとあまり変わりはないが、気泡がはじけたような痕跡が存在しない全体がぜい性型タイプである。図20は、今回の実験で観察された気泡の発生頻度を変位速度毎に示したものである。

今回の低・中変位速度域で多く見られた気泡のはじけたような痕跡は、クレイズボイドの発生を伺わせるものと考えられる。これまでの研究結果⁹⁾より、100～1300mm/min

の変位速度領域でクレイズボイドの発生を確認している。今回実施した0.01Hz～3Hz設定の変位速度領域(30～9000mm/min)での発生は、この結果と良く対応している。クレイズボイドは、生成されるクレイズの大きさと生成速度、負荷荷重の大きさと荷重速度ならびに温度などの相互作用により出現するものであるが、この速度域はクレイズボイド生成に適した条件であった可能性が高い。

また、PCの破断面を見ると、き裂は発生してからき裂長さが約8mmに成長するまでは、予き裂延長面に沿って進んでいるが、それ以降は若干斜め方向に進んでいる。図12に示した荷重曲線を見ると、荷重の低下が一時的に落ち着いている領域が存在している。今回使用したクラックゲージでは、予き裂先端から4.6mmまでしかき裂進展挙動が計測できないため、き裂の進む方向が途中から変化した正確な原因は分からないが、荷重の変化との関連性もあると考えられるので、今後詳しく調査していく予定である。

6.2 PMMA 破断面の巨視的解析

図21はPMMAの代表的破断面の例で、図19と同様に、き裂は左に向かって進展している。図21(a)は、9000mm/min以下の低・中変位速度域で見られる破断面で、き裂先端部につやのない滑らかな領域があり、その先にはき裂が断続的に進展した跡と思われる横縞模様を示すタイプである。図21(b)は、9000mm/min程度以上の高変位速度域でよく見

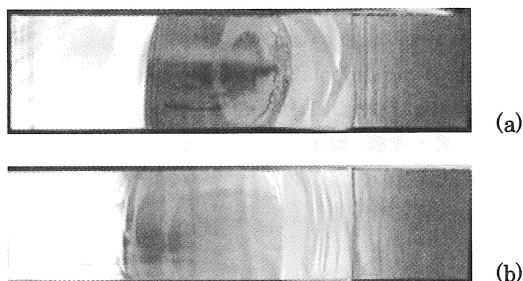


図19 PCの代表的な破断面形態

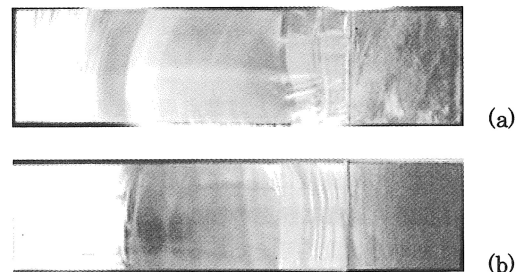


図21 PMMAの代表的な破断面形態

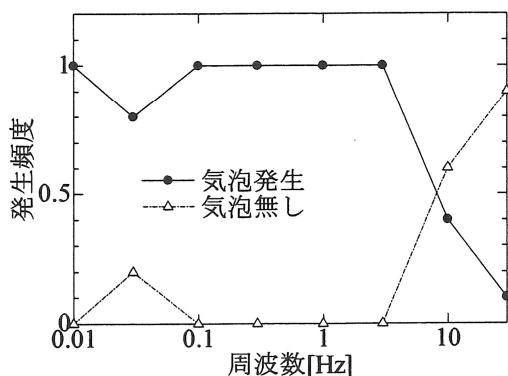


図20 PC 破断面のクレイズボイド発生頻度

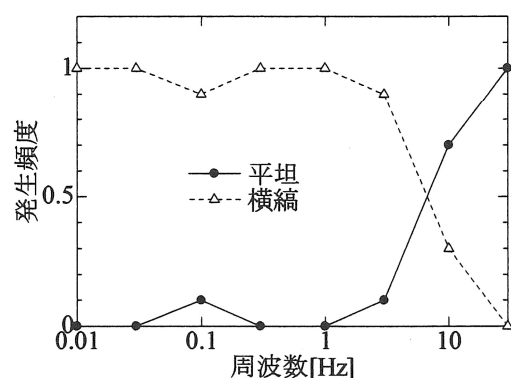


図22 PMMA の特徴的破断面の発生頻度

られる破断面で、破断面全体が非常に滑らかで平坦な特徴を示すタイプである。図 22 は、これら 2 タイプの破断面形態の発生頻度を変位速度毎に示したものである。

図 22 を見ると、低変位速度域では横縞型が大半を占めているが、高変位速度域に入ると平坦型の割合が急激に増加している。平坦型が増加した領域は、破壊じん性値が低下している領域と重なることから、両者には何らかの関連性があるものと思われる。

また、両材料とも低変位速度域では破壊じん性値は高い値を示し、き裂発生には大きなエネルギーを必要としている。対照的に、高変位速度域になると破壊じん性値は低下し、き裂発生に要するエネルギーの割合は小さくなり、逆にき裂進展に使用されるエネルギーの割合が大きくなる。エネルギーが大きくなると、試験片は大きなき裂進展の減速をすることなく一気に破断するため、高変位速度域での破断面は平坦になるものと考えられる。さらに、き裂進展エネルギーの割合の低い低変位速度域では、き裂は減速・加速を繰り返しながら断続的に伝播していくと考えられ、破断面には横縞模様が形成されると思われる。

7. 結 言

1 台で広範囲の速度域で試験可能な可変速式三点曲げ衝撃試験装置の開発を行い、その試作機を用いた低変位速度から高変位速度までの破壊じん性試験を行い、破壊じん性値、き裂進展挙動、破断面形態の変位速度に対する依存性を調べた。それらの結果を以下に示す。

1. インバータ設定周波数と打撃点周速度の間には、比例関係が認められた。また、100Hz 設定の場合でも 320° 以内で所定の周速度に達していることから、打撃刃スタート位置を適切に設定することで、5m/s 程度の高変位速度までの試験が可能である。
2. 打撃刃が試験片に接触した直後は、多少の速度変化があるものの直ちに所定速度に回復し、誤差も小さいことから、十分に試験実施が可能である。
3. 低変位速度域において、試作機とねじ式万能試験機で得られた破壊じん性値には同等性が確認された。
4. PC と PMMA の 2 種類の材料で破壊じん性試験を行ったところ、破壊じん性値は両材料とも約 1000mm/min までは変位速度に依存せず一定に推移するが、それより速い変位速度域になると低下傾向がある。
5. PC は、低変位速度域では最大荷重付近でき裂が成長開始し、高変位速度域では荷重負荷直後からき裂が成長している。また、PMMA は、低変位速度域では最大荷重に達する前にき裂が成長開始し、中変位速度域では最大荷重付近でき裂の成長開始が確認された。高変位速度域になると、PC の場合と同様にき裂の成長開始は、荷重負荷直後になっていた。

6. PC の破断面は、全体的に滑らかな形状をしているが、低変位速度域ではクレイズボイド領域が観察された。PMMA の破断面は、低変位速度域では横縞型が大半を占めているが、高変位速度域になると平坦型の割合が急激に増加している。クレイズボイドが減少したり平坦型が増加したりする変位速度域は、破壊じん性値が低下した変位速度域と重なることから、両者には何らかの関連性があるものと思われる。

最後に、これまでの装置充実・改善には、北九州高専校長裁量の平成 18～21 年度教育・研究プロジェクト経費による助成金を利用させて頂いた。また、本試験装置の PR 活動には、(財)北九州産業学術推進機構および北九州 TLO による暖かいご支援を頂いた。ここに、関係諸氏のご指導・ご配慮へ感謝するとともに、心より厚くお礼申し上げる。

参考文献

- (1) 小川 俊夫；工業技術者の高分子材料入門，(1993)，共立出版。
- (2) 成澤 郁夫；プラスチックの機械的性質，(1994)，シグマ出版。
- (3) 佐藤 功；はじめてのプラスチック，(1999)，工業調査会。
- (4) 例えば 岩野 昌夫；写真で分かるプラスチックのすべて「自動車編」，プラスチックス，Vol57，No.4，pp.19-24，(2006)，工業調査会。
- (5) 例えば，
<http://www.nasva.go.jp/mamoru/car/clash/method.html>
<http://www.ntscl.go.jp/intro/sinsa.html>
<http://www.jama.or.jp/lib/jamagazine/200611/01.html>
<http://www1.harenet.ne.jp/~noriaki/link65-2.html>
- (6) 内田 武・寺坂 知幸・濱田 大樹；可変速式 3 点曲げ衝撃試験装置の開発（第 1 報：試作および基本性能評価），北九州工業高等専門学校研究報告，No.41，(2008)，pp.1-8。
- (7) 内田 武・寺坂 知幸・八児 明範；可変速式 3 点曲げ衝撃試験装置の開発（第 2 報：装置改善および破壊じん性試験），北九州工業高等専門学校研究報告，No.42，(2009)，pp.1-8。
- (8) 内田 武・池田 哲朗；PMMA の破壊じん性値およびき裂進展挙動に及ぼす変位速度の影響，北九州工業高等専門学校研究報告，No.33，(2000)，pp.17-27。
- (9) 内田 武・呉 奉春；PMMA ならびに PC の破壊じん性値および破壊エネルギーに及ぼす変位速度の影響，北九州工業高等専門学校研究報告，No.35，(2002)，pp.9-18。
- (10) 内田 武・清水 敬；PMMA ならびに PC の破壊じん性，破壊エネルギー，き裂進展，き裂開口変位および破断面形態について，北九州工業高等専門学校研究報告，No.39，(2006)，pp.11-18。

(2009年10月9日 受理)