

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)
 内田 武*・寺坂 知幸**・八児 明範***

Development of Speed-variable-type Three-point-bending Impact Testing Apparatus
 (Part II : Apparatus Improvement and Fracture Toughness Testing)
 Takeshi UCHIDA*, Tomoyuki TERASAKA** and Akinori YACHIGO***

The object of this study is to develop a compact testing apparatus which can perform the three-points bending tests under the wide displacement rate range, and to put it to practical use. For the second grade of development, drive system and measurement system were improved mainly and action performance of the testing apparatus was evaluated. Furthermore, the fracture toughness tests of PMMA(Polymethylmethacrylate) and PC(Polycarbonate) were carried out under the displacement rate ranging from 30 to 90000mm/min at room temperature (approximately 23°C). The principal experimental results are as follows. (1) This prototype developing is a testing apparatus of the screw-style universal tester type that can be used in very wide displacement rate range. (2) In a loading process, this testing apparatus works in an approximately stable displacement rate. Equivalence with the universal tester was confirmed. (3) The fracture toughness value of PC is about 3 times of PMMA. The fracture toughness value of PMMA and PC is approximately constant without being influenced by the displacement rate until 3000mm/min. The fracture toughness value suddenly falls in augmentation of the displacement rate with both materials under more than 3000mm/min.

Key Word : Three point bending, Impact testing apparatus, Trial manufacturing, Performance estimation, Fracture toughness, Fracture energy, Plastics, PMMA, PC, Sharpy impact tester

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は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。

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

* 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)

*** 専攻科, 生産工学専攻 1 年
(Advanced Production Engineering Course, 1st grade)

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。

本研究室でのプラスチック材料の静的破壊強度試験においては、非晶性プラスチックであるポリメチルメタクリレート (Polymethylmethacrylate: 以下, PMMA) ならびにポリカーボネート (Polycarbonate: 以下, PC) の透明材料を対象とした、破壊じん性・破壊エネルギー・破断面形態・き裂進展挙動およびき裂開口変位の計測などに関した体系的な実験的研究を進めており、それらの結果は随時報告している^{(6)~(9)}。これらの試験では、0.1mm/min (1.67×10^{-6} m/s) ~ 約 1500mm/min (約 0.03m/s) の変位速度領域、すなわち静的変位速度から準衝撃的な変位速度には対応可能であるが、衝撃荷重に相当する変位速度までの破壊特性を調査する必要があるにも関わらず、対応できないのが現状であった。また、対象となる変位速度毎に試験機を使い分けることは利便性に欠けることから、この点についても検討の必要性を感じていた。

上述内容を考慮して、一台で広範囲の変位速度域での試験が可能で、コンパクトな可変速式 3 点曲げ衝撃試験装置を考案した。先報⁽¹⁰⁾では、試験装置の試作と基本性能評価とともに、シャルピー衝撃試験機との比較試験ならびに破壊じん性試験の予備試験結果について述べた。現在、試験装置開発の第 2 段階として、稼動速度域を低速側へ大幅に拡大させるとともに、計測系の改善に取り組んでいる。

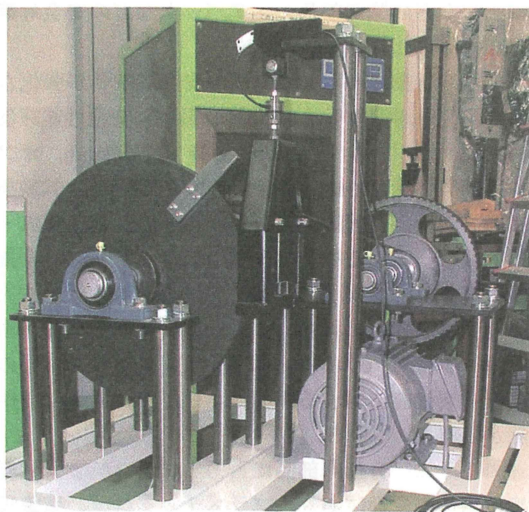


図 1 試験装置の本体 (試作機)

本報告では、万能試験機稼動速度域である 5×10^{-4} m/s (30mm/min) から衝撃試験速度域である 5m/s までの広い変位速度域での基本性能評価、試作機による破壊じん性試験を行うことで万能試験機の結果との同等性確認、低変位速度領域から衝撃速度領域までの破壊じん性値と破壊エネルギー調査についての結果を示す。

2. 開発第 2 段階での装置改善および性能評価

2. 1 開発第 1 段階での試験装置の特徴

図 1 は開発中の可変速式 3 点曲げ衝撃試験装置の本体で、図 2 は本試験装置の試験ブロック図である。駆動部はインバータ駆動専用 AC モータ (富士電機製 MVA8107A, 2.2kW) で、インバータにより回転速度を任意に設定できる。モータと打撃刃を有する円板主軸間は、プーリーで 1/16 (1/4 の 2 段) に減速させ、円板主軸には電磁クラッチ (小倉クラッチ製 MSC-20T, 静摩擦トルク: 200Nm, トルク立上り時間: 0.18s) を配置している。円板主軸の端部には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、円板回転角度から打撃点の周速度と変位を算出した。負荷荷重は、破壊試験部の吊り下げ部にボールジョイントを介して取付けた、比較的応答性が高い引張圧縮両用の小型ロードセル (共和電業製 LUR-A-2KNSA1, 定格容量: ± 2 kN, 固有振動数: 約 20kHz) により計測する。荷重と角度の信号は、各種記録計によりパソコンに取り込み、データ処理を行う。

開発第 1 段階での基本性能評価は先報⁽¹⁰⁾の通りで、AC モータをインバータ (富士電機製 FRN2.2E1S-2J) で制御することで、打撃点周速度は約 0.3~3m/s (円板回転数では約 11~110rpm) の間で任意設定できること、モータ回転が落ちついた後に電磁クラッチを連結することで、その速度域での実験が問題なく実施できることを確認した。

図 3 は、シャルピー衝撃試験機および試作機より得られた PMMA と PC の比吸収エネルギー (破壊に要した全エネ

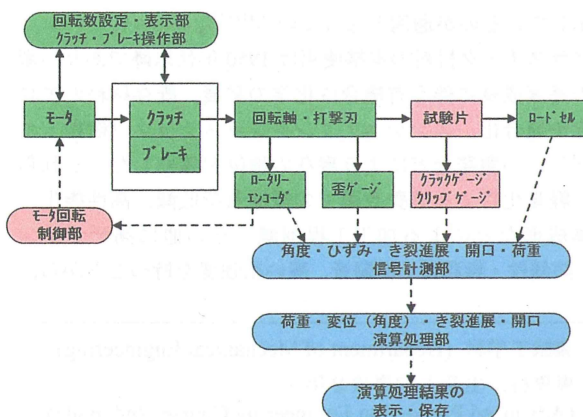


図 2 試験ブロック図 (構想)

ルギーをリガメント面積で除した値で、シャルピー衝撃値と同等)である。打撃点周速度が約 0.3m/s でほとんど同じで両試験機の同等性があり、周速度が大きくなると挙動が異なり両試験機の同等性が得られず、この原因を本試験装置の荷重計測系の応答性に問題であると考えていた。

元来、シャルピー衝撃試験法とは、規定された持ち上げ角度にあるハンマー(打撃刃)の自由落下(正確には、ハンマーの回転軸周りで自由回転)による慣性力を利用し、ハンマーの持ち上げ角度と反対側への振り上げ角度との角度差から、試料破壊に要するエネルギーを算出するものである。この試験法の場合、ハンマー運動中に外部からのエネルギー供給がなく、初期の位置エネルギーの一部は試料破壊段階で試料に吸収されるため、ハンマーが試料に到達したときの速度は試料破壊過程で減少することになる。これに対し、ねじ式万能試験機は変位速度が小さい領域において、変位制御による負荷中の変位速度一定試験あるいは荷重制御による負荷中の荷重速度一定試験を高精度で実施することが可能で、試料破壊過程の速度に注目するとシャルピー衝撃試験機とは異なる試験法である。

従って、図3に見られた本試験装置とシャルピー衝撃試験機の比較においては、試験片破壊時(負荷中)に両者の違いがあるため、両者から得られる結果の直接比較には無理があるものと判断される。

本試験装置は試料破壊過程の打撃点周速度一定の試験実現を目指しているが、後述する装置改善後の性能評価として詳説しているように、設定した打撃点周速度(設定したインバータ周波数)に対して、負荷中もある程度一定の速度を保つことができることがわかった。即ち、本試験装置は非常に広い変位速度域で利用できる、ねじ式万能試験機タイプの3点曲げ試験装置ということになる。

2. 2 駆動系および信号計測系の改善

開発第1段階では、ACモータの制御にインバータ(富士電機製FRN2.2E1S-2J)を利用し、周波数を6~60Hzの間で

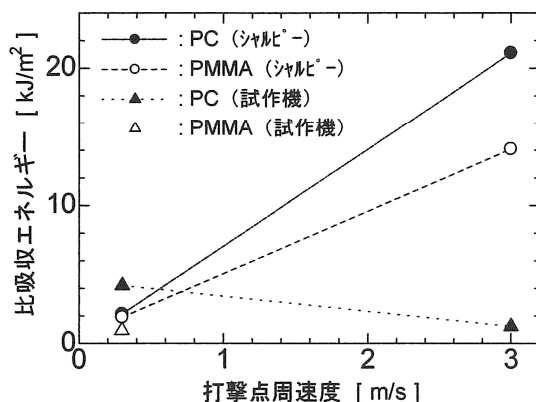


図3 シャルピー衝撃試験機との比較試験結果

変化させることで、約 0.3~3m/s ($1.8 \times 10^4 \sim 1.8 \times 10^5$ mm/min)の打撃点周速度で任意設定できた。この速度は、ねじ式万能試験機との比較を考えるに当たっては大きすぎるため、より低速度での運転を可能にする必要がある。そこで、モータ制御周波数が 0.01~100Hz で変化させることのできるベクトル制御方式インバータ (MS テクノ製 MITY-SERVO VEA-22) へ変更した。

このインバータは、一般のインダクションモータが持つ能力を最大限に引き出すために、モータ主軸に取り付けたエンコーダ情報をフィードバックし、正弦波デジタル方式ベクトル制御を行うことで、0.01Hz の極低周波数においてもモータ定格トルクを保持できる能力を持っている。今回使用したエンコーダは1回転当たり 2000 パルスを出力するものであるが、エンコーダ出力の A・B 相両方の立ち上がり立ち下がりを利用しているため、モータの 1 回転を 8000 分割で制御していることになる。

モータ運転は、これまでの周波数入力だけでなく細かな

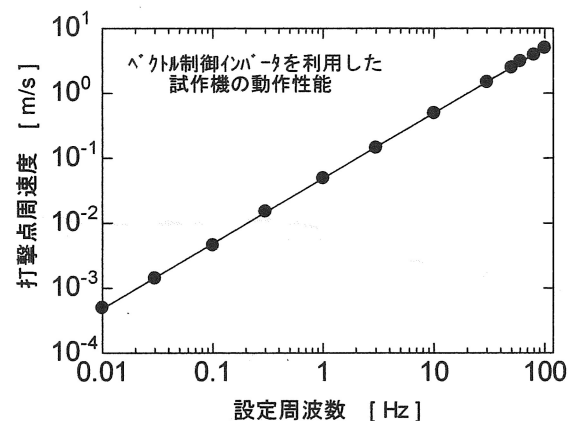


図4 駆動系改善後の試作機動作性能(無負荷)

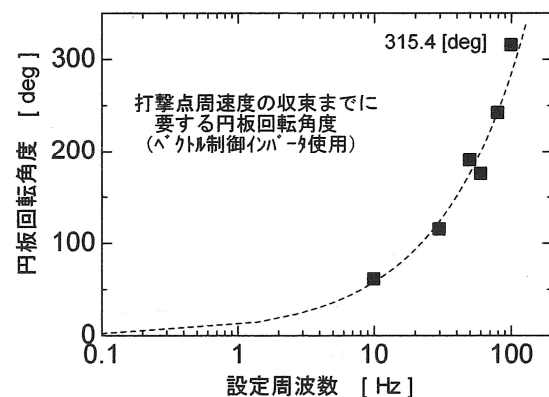


図5 打撃点周速度収束までに要する円板回転角度
(駆動系改善後、無負荷)

設定を精度よく動作させるために、モータ回転の加速・一定速度保持・減速・総回転数などをインバータ側で設定した。また、開発第1段階ではモータ回転安定後に電磁クラッチを連結させていたが、駆動系改善後は電磁クラッチを打撃刃のスタート位置調整に利用し、電磁クラッチ連結の状態でモータ始動させることにした。

図4は、駆動系改善後の無負荷運転における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の範囲で両者には比例関係があることがわかる。これにより、開発第1段階よりも打撃点周速度を2桁以上低下させられることになり、30mm/min (5×10^{-4} m/s) からの低変位速度での試験、即ちねじ式万能試験機の稼動速度域まで試験機の周速度を拡大させることが可能となった。

図5は、駆動系改善後の無負荷運転において電磁クラッチ連結状態で実施した、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必要とした円板回転角度を示している。設定周波数10Hz以上を描いているが、これによると100Hzにおいても、円板回転が320°までには打撃点周速度が収束していることがわかる。これにより、

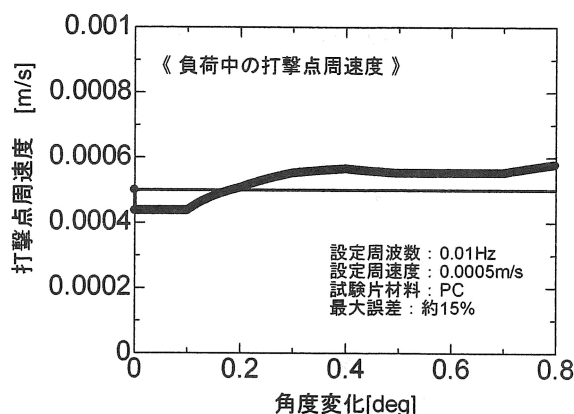


図6 負荷過程での打撃点周速度挙動 (0.01Hz)

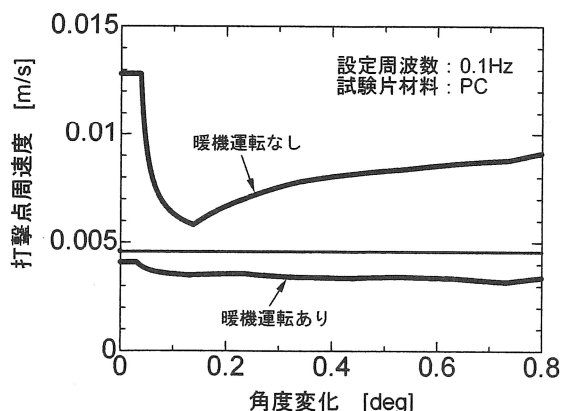


図7 負荷過程での打撃点周速度挙動 (0.1Hz)

打撃刃のスタート位置を電磁クラッチで適切に設定することで、シャルピー衝撃試験機の標準速度に相当する5m/sの高変位速度までの試験が可能となった。

また、開発第1段階の計測系として、荷重検出に比較的応答性が高い引張圧縮両用の小型ロードセルと動ひずみ計（共和電業製 DPM-613, 応答周波数 DC~10kHz, 非直線性 $\pm 0.1\%$ FS), 打撃刃回転角度検出にロータリーエンコーダ, 信号計測に記録計（コンディショニングキャッチャー, 九州共販製 MDL-10A-64, 最高サンプリング: 2チャンネル計測で 20 μ s) を利用していた。

今回の信号計測系改善に当たって、ロードセルそのものの検出感度を高める目的で、直径16mmのステンレス丸棒の一部分を板状に加工し、2枚の半導体ひずみゲージ（共和電業製 KSP-2-120-E4）を貼り付けたロードセルを自作したが、ノイズ対策が不十分で検定結果に安定性が得られなかったために、ロードセルは変更していない。また、高変位速度領域での荷重と角度信号の確実な計測が必要になるため、動ひずみ計をシグナルコンディショナー（共和電業製 DPA-700A, 応答周波数 DC~500kHz, 非直線性 $\pm 0.01\%$ FS) に変更し、検定結果は良好であることを確認した。記録計はUSBデジタルストレージオシロスコープ（ポケオシ, 日本データシステム製 UDS-5204S, 最高サンプリング: 2チャンネル計測で 10ns) に変更し、パソコンからの計測系の操作性を向上させた。

2. 3 負荷過程での打撃点周速度挙動

試験装置開発の第2段階として駆動系と計測系を改善した後の動作性能を無負荷運転で評価した結果、インバータ設定で0.01~100Hz, 打撃点周速度で0.0005~5m/sの広い変位速度域で、十分に試験できる可能性が得られた。ここでは、負荷が作用している状態で、打撃刃が設定した周速度で動作するかどうかを確認した。

図6~図8は、それぞれインバータ設定の低速度0.01Hz（周速度で0.0005m/s, 30mm/min）、中速度0.1Hz

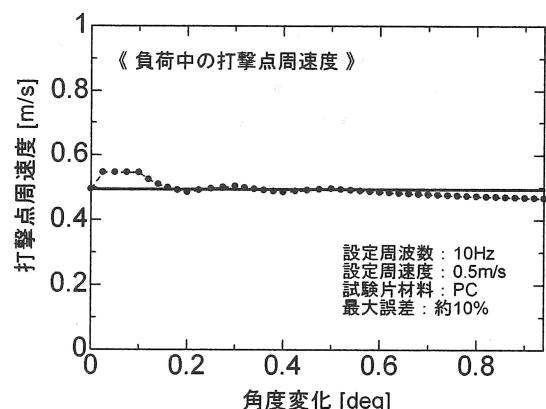


図8 負荷過程での打撃点周速度挙動 (10Hz)

(0.005m/s, 300mm/min) ならびに高速度 10Hz (0.5m/s, 30000mm/min) における負荷過程中的打撃点周速度の挙動を示しており、図中の実線は設定周速度である。図 7 には、検査実施前に駆動系・計測系の暖機運転の有無による挙動を示している。

これによると、暖機運転を行うことで明らかに打撃点周速度は設定値に近づき安定すること、いずれの場合も打撃点周速度は設定値からのズレは小さいことが理解できる。設定周波数 0.01Hz の極低変位速度においても最大誤差は 15% 程度と比較的小さいことから、ねじ式万能試験機タイプの動作を行う試験装置であることが確認できた。

3. 破壊じん性試験の結果および考察

3. 1 試験片および試験方法

使用材料は透明 PMMA (三菱レイヨン(株)製, アクリライト) ならびに透明 PC (タキロン(株)製, PC1600) とし、いずれも厚さ 5mm の市場供給板材である。この材料はいずれも非晶性の熱可塑性プラスチックで、PMMA はぜい性的挙動を示す汎用性プラスチック、PC は高延性挙動を示すエンジニアリングプラスチックである。

試験片は図 9 に示すように、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、全長約 8mm のき裂とした。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、PMMA で 97.3℃ (370.3K)、PC で 124℃ (397K) に設定した⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾。

破壊じん性試験は、開発第 2 段階の試作機ならびに卓上

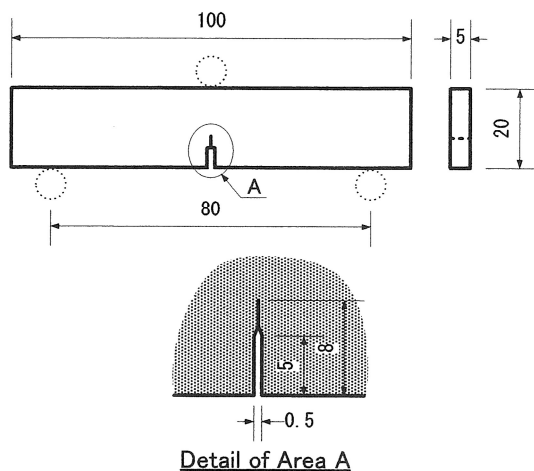


図 9 破壊じん性試験片の形状・寸法

型精密万能試験機 (株式会社津製作所製 AUTOGRAPH AGS-1000A, 容量 10kN) を使用し、室温 (23℃) のもとで実施した。試作機の打撃点周速度は 30mm/min (5×10^{-4} m/s) ~ 90000mm/min (1.5m/s) の広範囲で変化させ、30 ~ 300mm/min の変位速度領域で万能試験機との同等性評価を行った。また、これまでの懸案事項の一つであった、万能試験機の稼動速度を超える変位速度領域での試験を実施して、その結果を検討した。

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。

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

なお、破壊エネルギー値は、荷重-変位線図の面積を台形公式により算出しており、今回は破壊に要した全エネルギー値 (リガメント面積で除算) で比較・評価した。

3. 2 試作機と万能試験機の試験結果の同等性確認

図 10 は、これまで実施してきた万能試験機を利用した破壊じん性試験結果⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾ である。これによると、PMMA・PC いずれの試験片も変位速度が約 100mm/min 以下においては破壊じん性値は変位速度の影響はほとんど受けず一定であること、PC の破壊じん性値は PMMA の値に比べて 3 倍程度大きいことがわかっている。また、今回取組んだ開発第 2 段階での駆動系改善において、インバータ設定が 0.01Hz (周

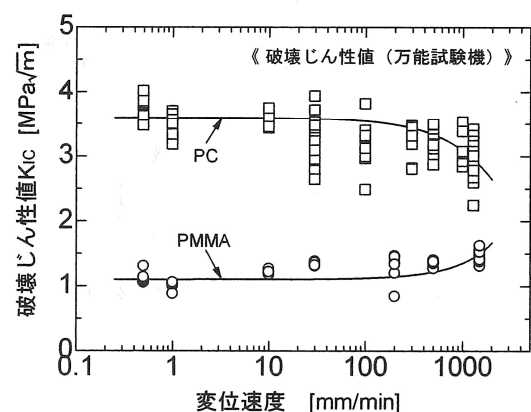


図 10 PMMA と PC の破壊じん性値 (万能試験機)

速度で 0.0005m/s , 30mm/min) の極低変位速度から正確なモータ稼働ができることを確認した。ここでは、万能試験機の結果でほとんど変位速度の影響が現れない領域から、 $30 \cdot 100 \cdot 300\text{mm/min}$ の3つの変位速度を対象にして、試作機で得られる破壊じん性値と万能試験機での結果との比較を行うことで同等性を調べた。

図 11 は、万能試験機と試作機における破壊じん性試験の最高荷重をもとに算出した破壊じん性値を示しており、それぞれのデータの回帰直線も描いている。これによると、試作機の結果は万能試験機の結果より若干大きくなっているが、両者の差はほとんどないことがわかる。先述した負荷過程での打撃点周速度挙動ならびに図 11 の結果から判断して、開発中の可変速式 3 点曲げ衝撃試験装置は、万能試験機の動作に加え試験結果においても同等性があることを確認することができた。

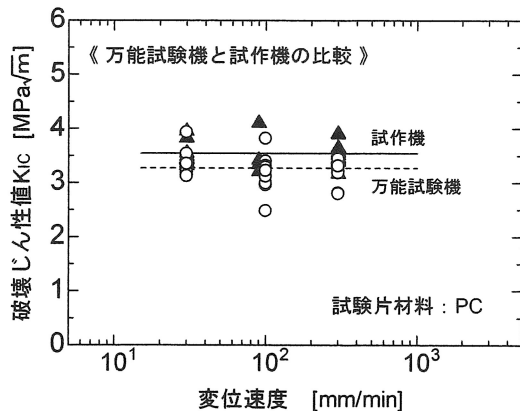


図 11 試作機と万能試験機の同等性確認

3. 3 破壊じん性値の変位速度依存性

これまで実施してきた破壊じん性試験の結果によると、 1500mm/min 程度までの領域においても大きな変位速度の影響はないが、変位速度が高くなるにつれて、PMMA の破壊じん性値は緩やかに上昇するのに対し、PC のそれは逆に緩やかに下降する傾向が伺えていた。高変位速度領域での破壊じん性値の挙動が懸案事項であるにもかかわらず、万能試験機の稼働能力を超えた速度域であるため実験できなかったが、可変速式 3 点曲げ衝撃試験装置を利用することで実現することが可能となった。

図 12 は、PMMA と PC の両材料について、万能試験機と試作機で得られた破壊じん性値を記号を変えて示しており、両試験機の結果についての回帰曲線も描いている。これにより、万能試験機の稼働速度よりも 2 桁以上大きな衝撃速度域までの試験実施ができるようになり、約 $0.5 \sim 1 \times 10^5\text{mm/min}$ の超広域変位速度での試験が実現した。

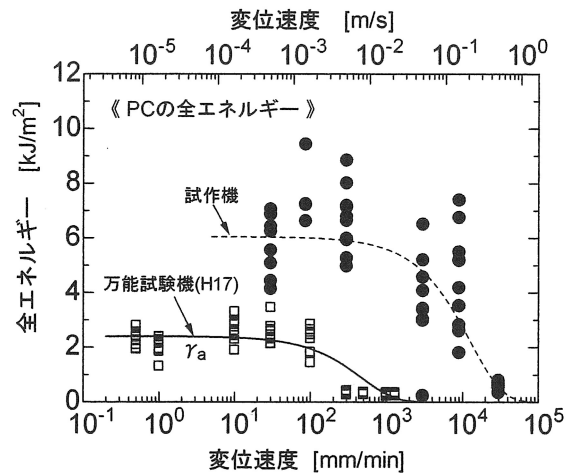


図 13 全エネルギーの変位速度依存性 (PC)

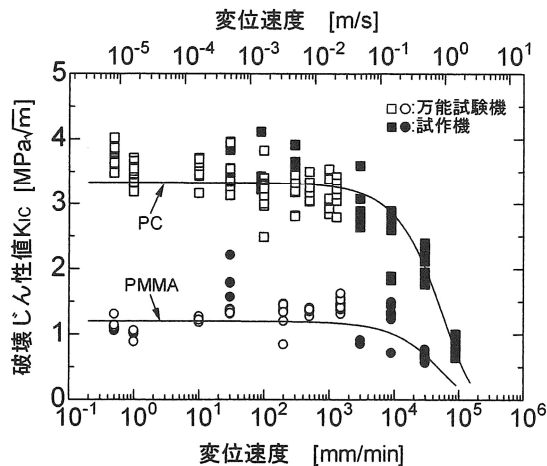


図 12 破壊じん性値の変位速度依存性 (PMMA・PC)

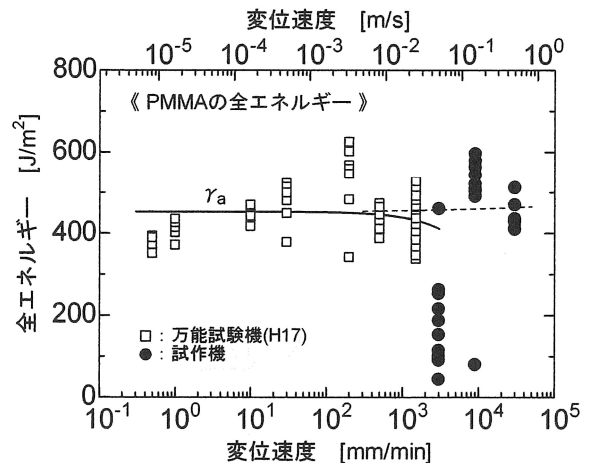


図 14 全エネルギーの変位速度依存性 (PMMA)

図 12 によると、破壊じん性値に対する 1000mm/min 以上での変位速度依存性が明確になり、PC の場合は万能試験機で得られた傾向のように低下しており、特に 3000mm/min 以上の変位速度で急激な低下が認められた。PMMA の場合は万能試験機で得られた変位速度依存性が曖昧であったが、PC 同様に変位速度増大で低下する傾向にあることが認められた。

ここで示した破壊じん性値は、高変位速度領域においては動的破壊じん性値による評価も必要だとは考えられるが、静的結果とシームレスな比較を行うために、便宜的に負荷の最高荷重を利用して整理した。

3. 4 破壊エネルギーの変位速度依存性

図 13 および図 14 は、それぞれ PC と PMMA について、万能試験機と試作機で得られた破壊に要した全エネルギー（破壊に要したエネルギーをリガメント面積で除した値）を記号を変えて示しており、図中には回帰曲線も描いている。万能試験機を用いた破壊じん性試験で得られた破壊エネルギーは、き裂発生とき裂進展に要するエネルギーに分

け、それぞれの変位速度依存性を調査した^{(8),(9)}が、ここではその 2 つのエネルギー和（全エネルギー）でまとめた。

図 13 によると、試作機で得られた PC の全エネルギーは約 1000mm/min までは一定で、その後は急激な低下が見られ、万能試験機での結果と類似した傾向は認められる。ところが、先述の破壊じん性値による比較において試験機同等性が認められた 30~300mm/min の変位速度においても、両者の全エネルギーには大きな隔たりがある。図 14 に示した PMMA においては、試作機では 3000mm/min 以上の変位速度での試験結果であるが、1000mm/min で全エネルギーが急激に低下するのか、あるいはほとんど変化しないのかを見極めることができない。

このままでは、破壊エネルギーにおいては万能試験機と試作機での試験機同等性が認められないことになり、大きな問題が残る。破壊エネルギーは各試験片の試験中に得られる荷重-変位をもとに、その面積として算出しており、変位の大きさは破壊エネルギーに直接関与するので、荷重-変位の挙動について調べてみた。

図 15 および図 16 は、PC について万能試験機ならびに試作機を用いて行った、破壊じん性試験で計測した荷重-変位線図の例を示している。それぞれ、30mm/min の低変位速度域ならびに 300mm/min 以上の中変位速度域の場合であるが、両試験機での差異が極端な例を示している。ここに示した例では、試作機を用いた破壊までの変位は、万能試験機の場合より 6 倍以上も大きくなっており、この結果が全エネルギーの大きな差に現れている。

今回、試作機での変位計測は試験片変位の直接測定ではなく、打撃刃を取り付けた円板主軸の回転角度をもとに打撃位置での移動量を算出し、その値を利用している。角度計測に使用しているロータリーエンコーダは 3600P/R の分解能で、0.1° の回転毎にパルスを電圧出力し、その角度は打撃位置での移動量に換算すると約 0.44mm に相当する。回転角度 0.1° の間は等速回転しているものと仮定し、記録計のデータサンプリング個数をもとに内挿補間することで角度評価の精度を高めているので、計測処理上は角度 0.1° ならびに打撃位置移動量約 0.44mm に対して、その数十分の一で変化を捉えている。

ここで述べた PC における相違については、万能試験機での結果の再確認、試作機での変位計測系の再確認などが必要と考えている。PMMA についても、同様の比較を試みたが試作機でのデータ処理に疑問もあることから、今後慎重な検討を要する。併せて、破壊挙動明確化のために、き裂発生とき裂進展に要するエネルギーの分離・き裂進展挙動・破断面形態などの調査を行う予定である。

4. 結 言

1 台で静的試験から衝撃試験に相当する超広域の変位速度での試験を実現する、コンパクトな可変速式 3 点曲げ衝撃試験装置を開発している。今回は開発の第 2 段階として、

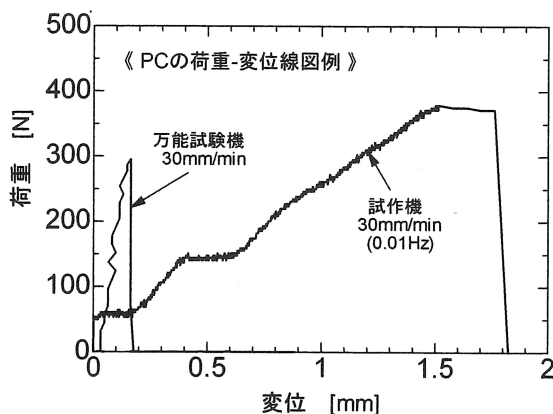


図 15 荷重-変位線図の例 (PC, 低変位速度)

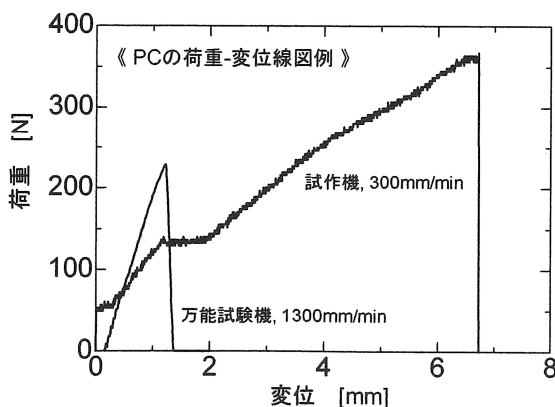


図 16 荷重-変位線図の例 (PC, 中変位速度)

主に駆動系および計測系の改善を行い、動作性能を評価した。また、試作機の打撃点周速度を $30 \sim 90000 \text{ mm/min}$ ($5 \times 10^{-4} \sim 1.5 \text{ m/s}$) の広範囲で変化させることで、PMMA と PC の破壊じん性試験を実施した。これにより、万能試験機との同等性評価、万能試験機の稼動速度を超える変位速度領域での破壊じん性値および破壊エネルギーの変遷を調べた。以下に、得られた結果ならびに検討事項を示す。

1. 動作特徴ならびに予備試験結果などを再吟味することで、開発中の試験装置はシャルピー衝撃試験機の動作機構とは根本的に違いがあり試験結果の直接比較には無理があること、非常に広い変位速度域で利用できるねじ式万能試験機タイプの 3 点曲げ試験装置であることを明確にした。
2. 駆動系の改善により、これまでの稼動変位速度を低速側へ 2 桁以上拡大することができた。動作確認の結果、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あり、 $30 \sim 300000 \text{ mm/min}$ ($5 \times 10^{-4} \sim 5 \text{ m/s}$) の超広域の変位速度域での試験が可能である。また、計測系の改善により、高速現象への対応とともに、パソコンからの操作性が向上した。
3. 負荷中の打撃点周速度挙動を評価したところ、事前の暖機運転を行うことで駆動系動作が安定すること、インバータ設定周波数が 0.01 Hz (30 mm/min) および 10 Hz (30000 mm/min) においても、設定値との誤差は 10 数%で、ほぼ安定した試験が可能である。
4. 試作機と万能試験機で共通に試験できる変位速度の $30 \cdot 100 \cdot 300 \text{ mm/min}$ の 3 速度で破壊じん性試験を実施したところ、両者の差はほとんどなく、試作機の結果と万能試験機での結果との同等性を確認した。
5. 試作機と万能試験機の結果を連結した、変位速度 $0.5 \sim 90000 \text{ mm/min}$ の広範囲での試験によると、PC の破壊じん性値の方が PMMA より 3 倍程度大きいこと、両材料とも 3000 mm/min 程度までは変位速度の影響はほとんどなく一定で、それ以上では変位速度増大とともに低下することが明らかとなった。
6. 破壊に要した全エネルギーを比較したところ、PC では試作機と万能試験機との結果は類似した傾向があるものの大きな差があり、PMMA では変位速度依存性が見極めができなかった。

現在、打撃点変位の直接測定などを行うことで、破壊エネルギーの結果に差異が認められた原因を検討中である。今後は、破壊挙動評価のためのクリップゲージおよびスリットゲージの開発に着手することで、できるだけ早い時期に可変速式 3 点曲げ衝撃試験装置の実用化に向けた開発を行う予定である。

最後に、可変速式 3 点曲げ衝撃試験装置の開発には、(財)北九州産業学術推進機構の平成 17 年度試作品づくり推進事

業の補助を受け、試作機は平成 20 年度に譲渡された。装置充実および改善に当たっては、北九州高専校長裁量の平成 18～20 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ならびに北九州 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・江藤 友昭; ポリメチルメタクリレート (PMMA) の破壊強度に及ぼす負荷速度の影響, 北九州工業高等専門学校研究報告, No.31, (1998), pp.15-22.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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.

(2008年10月10日 受理)