



変断面打撃棒を用いたホプキンソン棒法衝撃試験

小林 公一*, 田辺 裕治**

Split-Hopkinson Pressure-Bar Test using Striker Bar With Variable Cross Section

Koichi KOBAYASHI and Yuji TANABE

Split-Hopkinson pressure-bar technique has been widely adopted to evaluate dynamic constitutive relations for various kinds of materials. However, due mainly to a rectangular incident stress pulse with a short rising time, the strain rate becomes considerably higher when a difference in mechanical impedance between a specimen and the pressure bars is large. This tendency may be enhanced when determining strength of specimen because the incident pulse amplitude must be high enough to break a specimen. In this study, stepped and tapered striker bars were proposed to increase the rising time of incident stress pulse. A simple procedure was developed for simulating an incident stress pulse profile generated by a striker bar with variable cross section. Validation was done by comparing predicted incident stress pulse profiles of uniform, 5-stepped and tapered striker bars with those obtained by longitudinal impact experiments. In addition, four kinds of polymer specimens were tested by the three kinds of striker bars. Results showed that the strain rates at failure obtained by the 5-stepped and tapered striker bars were remarkably lower than that obtained by the uniform striker bar regardless of the material properties of specimen.

Key words: Impact Testing, Split-Hopkinson Pressure-Bar Test, Bar with Variable Cross Section, Strain Rate, Polymer

1. 緒 論

高速負荷時における材料の動的構成関係を測定するため、ホプキンソン棒法衝撃試験¹⁾が広く行われている。ホプキンソン棒法衝撃試験装置は2本の弾性応力棒(入力棒と出力棒)と打撃棒より構成され、試験片は入力棒と出力棒の間に設置される。そして、入力棒の他端に打撃棒を衝突させることによって衝撃応力波を発生させ、この応力波の試験片通過前後の波形(入射、反射および透過応力波形)の変化から試験片の応力-ひずみ関係を求めることができる。一般に、ホプキンソン棒法で強度データを求める場合、すなわち、試験片を破壊させるだけの入射応力振幅を得ようとする場合、打撃棒の衝突速度を大きくしなければならないが、これによりひずみ速度も増大してしまう。従って、ある値以下のひずみ速度では試験片が破壊せず、強度データが得られないことになる。特に、高分子材や生体組織など、応力棒として通常用いられる鋼と機械的インピーダンスが大きく異なる材料では透過応力が小さくなる

ことによってこの傾向が顕著となるため、強度データを得ることのできるひずみ速度の下限が 700s^{-1} 以上になる場合^{2,3)}もあり、準静的試験におけるひずみ速度と大きな開きが生じる。

本研究では、打撃棒として通常使用される断面一様の丸棒によって発生する立ち上がりの急な矩形入射応力波がこのひずみ速度増大傾向の一因であると考え、打撃棒として段付き丸棒およびテーパ部を有する丸棒を使用して立ち上がりの緩やかな入射応力波を発生させる手法^{4,5)}を用いる。

まず次章において変断面打撃棒を用いた時の入射応力波形の簡便予測式を提示し、通常断面一様棒を用いた場合との差異を示す。そして、4種類の高分子材(PMMA, ポリアセタール, ナイロンおよびABS樹脂)を対象に、3種類の打撃棒すなわち5段、テーパおよび一様丸棒を用いてホプキンソン棒法衝撃圧縮試験を行ない、圧縮強度とひずみ速度の関係に及ぼす打撃棒形状の影響について検討する。

2. 入射応力波形の簡便予測式

2.1 一次元縦波伝播理論による解析

打撃棒として段数が3で、各段の長さが同一の丸棒を考える。Fig.1はこの打撃棒が入力棒(打撃棒と同質材)の一端に速さ V で衝突した場合の各棒内における応力波伝播の

原稿受付 2002年3月15日

* 正会員 新潟大学医学部 (〒951-8518 新潟県新潟市旭町通2-746)

** 正会員 新潟大学工学部 (〒950-2181 新潟県新潟市五十嵐2-8050)

様子を示す．実際には衝突面や断付き部で3次元的效果が現れるが，ここではそれらを見捨て1次元的に考察を進める． ρ を打撃棒と入力棒の密度， S_0, S_1 をそれぞれ入力棒と打撃棒初段部の断面積， c を弾性波伝播速度とおけば，打撃棒の1段目に発生する衝撃応力と入力棒側の応力⁶⁾は

$$\sigma_{1-1} = -\alpha\rho cV \quad (1)$$

$$\sigma_{0-1} = -\beta\rho cV \quad (2)$$

で与えられる．ここで， $\alpha=S_0/(S_0+S_1)$ と $\beta=S_1/(S_0+S_1)$ は入力棒に対する打撃棒の反射率と透過率である．また，Fig.1において打撃棒中を上向きに進行する応力波に対する i 段目と $i+1$ 段目 ($i>0$)の境界における反射率と透過率は

$$\alpha_{Ui} = (S_i - S_{i-1}) / (S_{i+1} + S_i) \quad (3)$$

$$\beta_{Di} = 2S_{i-1} / (S_{i+1} + S_i) \quad (4)$$

下向きに進行する場合の反射率と透過率は

$$\alpha_{Di} = (S_i - S_{i-1}) / (S_{i+1} + S_i) \quad (5)$$

$$\beta_{Ui} = 2S_i / (S_{i+1} + S_i) \quad (6)$$

で与えられる．これらより σ_{1-1} が2段目との境界に達したときの透過応力と反射応力はそれぞれ

$$\sigma_{2-1} = \alpha_{U1} \sigma_{1-1} \quad (7)$$

$$\sigma_{1-2} = \beta_{U1} \sigma_{1-1} \quad (8)$$

で与えられるので，衝突から $2L/c$ 時間経過後の入力棒内の応力は

$$\sigma_{0-2} = \sigma_{0-1} + \beta\sigma_{1-2} \quad (9)$$

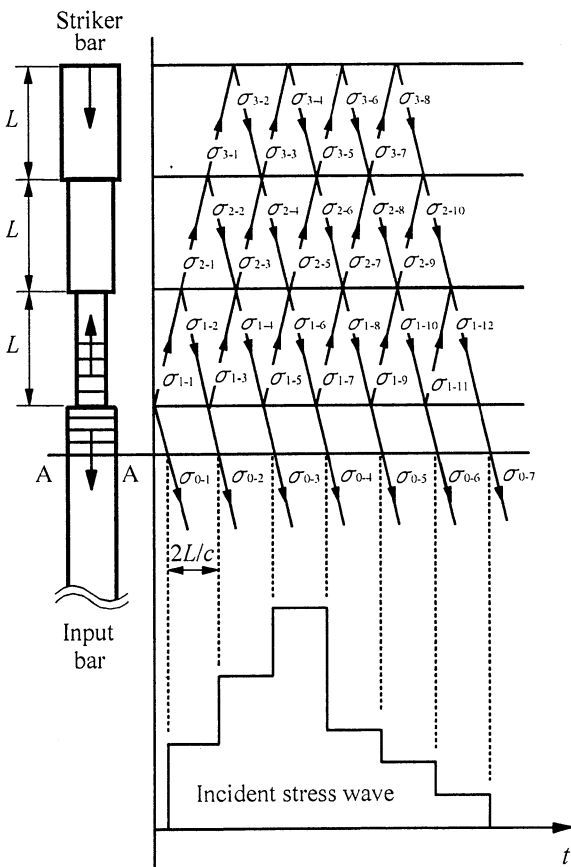


Fig.1 Diagram of stress wave propagation after impingement of striker bar on input bar and profile of incident stress pulse.

となる．これ以降の入力棒内の応力は以下の手順で求めることができる．まず，打撃棒内を最初に進行する上向きの応力 σ_{i-1} と，その段付き部での反射波 σ_{i-2} を算出する．

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{i-1} &= \beta_{Ui} \sigma_{(i-1)-1} \\ \sigma_{i-2} &= \alpha_{Di} \sigma_{i-1} \end{aligned} \right\} \quad (i = 2, 3) \quad (10)$$

1段目における σ_{1-3} 以降の応力は

$$\sigma_{1-j} = \begin{cases} \alpha\sigma_{1-(j-1)} & (j = 3, 5, 7 \dots) \\ \beta_{D1}\sigma_{2-(j-2)} + \alpha_{U1}\sigma_{1-(j-1)} & (j = 4, 6, 8 \dots) \end{cases} \quad (11)$$

2段目および3段目の $\sigma_{2-3}, \sigma_{3-3}$ 以降の応力は

$$\sigma_{i-j} = \begin{cases} \beta_{U(i-1)}\sigma_{(i-1)-j} + \alpha_{D(i-1)}\sigma_{i-(j-1)} & (j = 3, 5, 7 \dots) \\ \beta_{Di}\sigma_{(i+1)-(j-2)} + \alpha_{Ui}\sigma_{i-(j-1)} & (j = 4, 6, 8 \dots) \end{cases} \quad (12)$$

ここで， $i=2,3$ である．また，3段目で自由端に達するので $\alpha_{U3} = -1, \beta_{D3} = 0$ となる． σ_{0-2} 以降の入力棒内の応力は

$$\sigma_{0-j} = \sigma_{0-(j-1)} + \beta\sigma_{1-j} \quad (j = 2, 3, 4 \dots) \quad (13)$$

で与えられる．一般に段数を $N (>2)$ とすれば式(12)の添え字 i の範囲は $i=2, \dots, N$ となり， N 段目に自由端が存在するので反射率 $\alpha_{UN} = -1$ ，透過率 $\beta_{DN} = 0$ となる．

2. 2 縦衝撃試験との比較

前節で導いた予測式の妥当性について検討するため，Fig.2に示す5段，テーパ付きおよび一様打撃棒を作製し，入力棒との縦衝撃試験を行なった．いずれの棒も材質はSUS304である．Fig.3は実験装置の概略である．打撃棒をプラスチック板とバalsa材で作製した台車に乗せ，この台車をスロープ上に設置したレール上で滑らせて入力棒に衝突させた．台車の質量は打撃棒の質量の1パーセント以下であり，両者の機械的インピーダンスも大きく異なるので，台車が入射応力波形に及ぼす影響は無視できる．打撃棒が

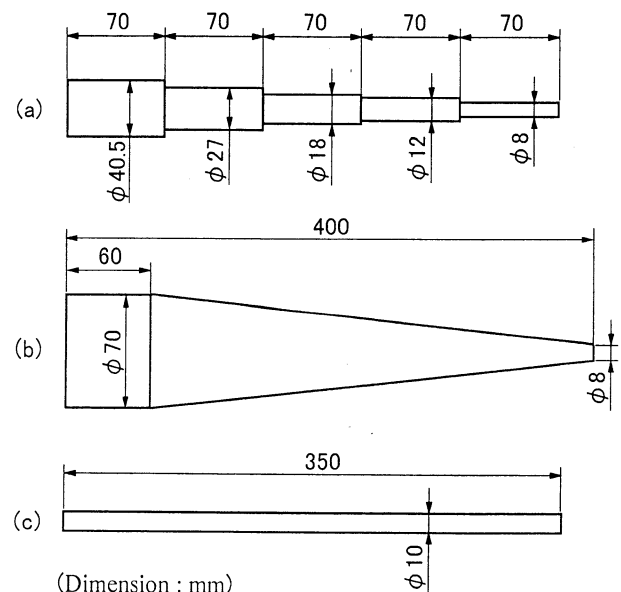


Fig.2 Shapes and dimensions for 5-stepped (a), tapered (b) and uniform (c) striker bar.

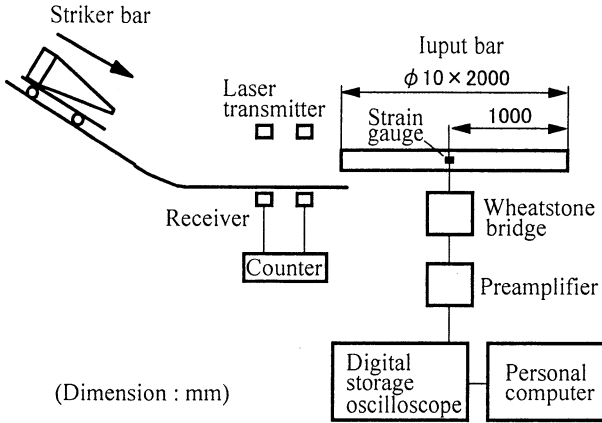


Fig.3 Experimental set-up for longitudinal impact test.

入力棒に衝突する直前の速度はレーザカウンタで、入射応力波形は入力棒上に貼ったひずみゲージでそれぞれ測定した。打撃棒の衝突速度は各入射応力波の振幅がほぼ等しくなるように設定し、5段棒とテーパ付き棒が約1.0m/s、一様棒が約2.0m/sとなった。

Fig.4は入射応力波の実測値と理論値を比較した結果である。ここでテーパ付き打撃棒の理論値はテーパ部分を50段の段付き棒と見なして求めた。なお、テーパ部分をこれ以上細かく分割しても理論値に殆ど変化はなかった。5段打撃棒については、実測値と理論値は比較的良く対応しているが、理論値に現れる階段状の応力変化は実測値では明瞭ではない。これは段付き部での3次元効果によると思われる。テーパ付き打撃棒については実測値と理論値は比較的良く対応しているが、理論値の方が立ち上がり時間をやや短めに予測する事がわかった。一様打撃棒において立ち上がり部分で実測値と理論値に差異が見られるのは衝突面における3次元効果によるものと思われる。なお、各打撃棒の立ち上がり時間を比較すると実測値、理論値とも一様、テーパ付き、5段の順に大きくなる事が分る。

以上の結果から、打撃棒の機械的インピーダンス、寸法・形状(段付き棒では各段の長さが整数比でなければならない)および衝突速度が既知であれば、本予測式により入射応力波形を算出することができ、予め衝突速度と入射応力振幅との関係を把握することが可能であることがわかる。

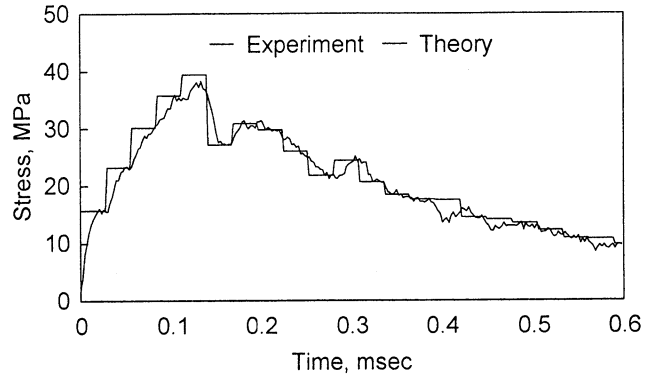
3. 高分子材料の衝撃圧縮強度

弾性応力棒と機械的インピーダンス差の大きい高分子材を対象に、前章で示した3種類の打撃棒を用いてホプキンソン棒法衝撃圧縮試験を行ない、打撃棒の種類によるひずみ速度-時間関係の差異と圧縮強度測定時のひずみ速度の変化を調べた。

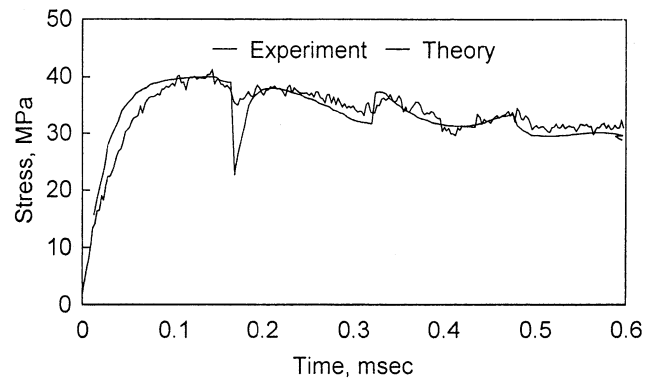
3. 1 実験方法

使用した高分子材はPMMA、ポリアセタール、ナイロンおよびABS樹脂の4種類である。これら材料を直径5mm、長さ5mmの円柱状に加工し、実験に供した。

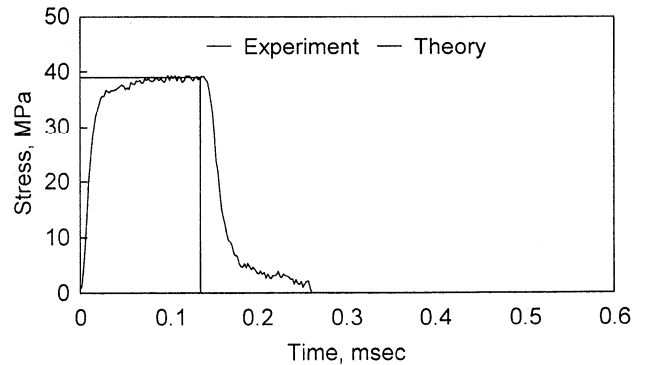
実験は室温中(約20℃)で行い、試験片が破壊するまで



(a) 5-stepped



(b) Tapered



(c) Uniform

Fig.4 Profiles of incident stress pulse were compared with the theory.

打撃棒の衝突速度を上昇させた。

3. 2 ひずみ速度の時間変化

Fig.5(a)~(d)に高分子材のひずみ速度の時間変化を示す。いずれの材料でもテーパ付き、5段、一様打撃棒の順にひずみ速度の最大値が大きくなっている。また、ナイロンの場合を除きテーパ付き打撃棒で最もひずみ速度の立ち上がりが緩やかである。さらに、PMMAの場合、一様打撃棒においてひずみ速度の時間変化は最初にピークを迎え、その

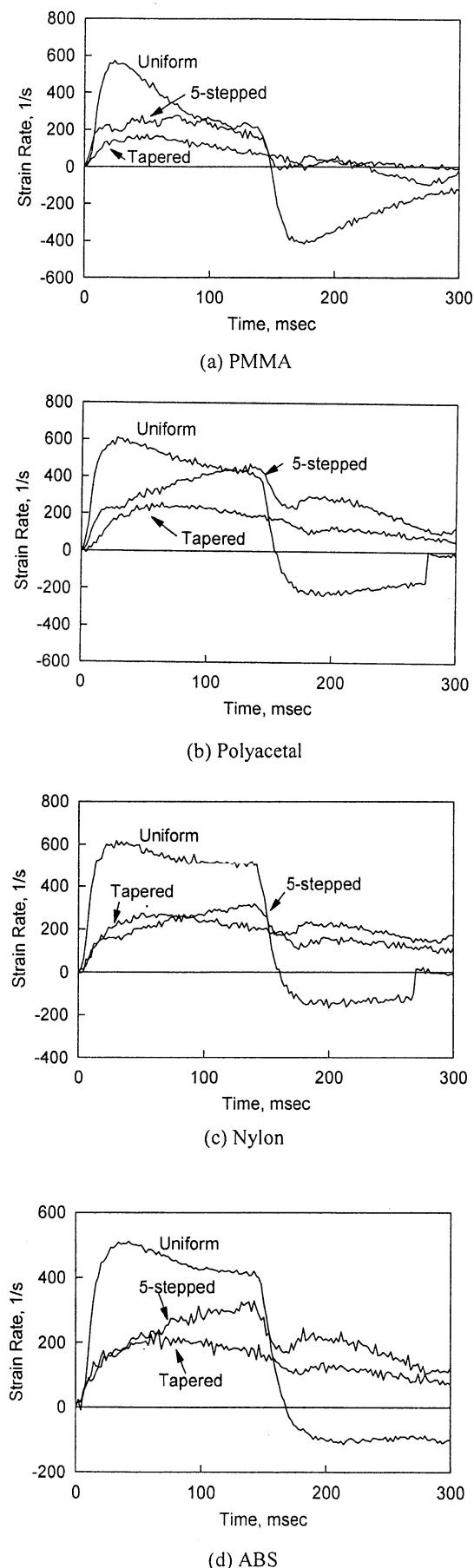


Fig.5 Variations of strain rate with time.

後急激に減少して平坦部分は見られないが、5段棒とテーパ付き棒ではひずみ速度の時間変化は比較的平坦である。他の材料においてもテーパ付き棒において同様の傾向が見られる。これより、打撃棒形状を工夫することによってホプキンソン棒法においてひずみ速度一定の衝撃試験が実施可能であることが分る。このことは、通常ひずみ速度一定で行なわれる準静的試験の結果と、衝撃試験のそれとの比較が容易になることを意味する。

3. 3 衝撃圧縮強度とひずみ速度の関係

Fig.6(a)~(d)に各高分子材の圧縮強度と前節で示したひずみ速度の最大値との関係を示す。ここで圧縮強度とは、降伏現象を示したポリアセタール、ナイロンおよびABS樹脂については1%ひずみにおけるオフセット線と応力-ひずみ曲線との交点での応力値(1%耐力)を指している。一方、PMMAについては降伏現象を示さず破壊したので、応力-ひずみ曲線上の最大応力値を圧縮強度とした。

Fig.6(a)~(d)より、いずれの材料においても同様、5段、テーパ付き打撃棒の順にひずみ速度が大きくなっており、同様打撃棒の場合に比べテーパ付き打撃棒を使用した場合がひずみ速度が50%程度、5段棒の場合が40%程度減少していることがわかる。圧縮強度に及ぼすひずみ速度の影響はPMMAにおいて最も大きく、ひずみ速度 550s^{-1} 付近の圧縮強度は 200s^{-1} 付近のそれの約2倍であった。一方、他の3種類の高分子材では圧縮強度に及ぼすひずみ速度の影響は顕著ではなかった。

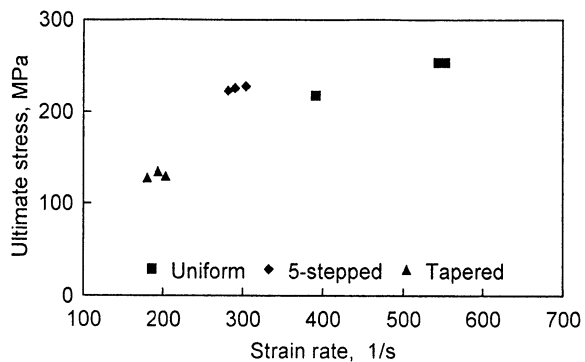
4. 結論

ホプキンソン棒法衝撃試験により機械的インピーダンスが弾性応力棒より大幅に低い材料の衝撃強度を測定する際のひずみ速度を低くするため、変断面打撃棒を用いる手法を提案するとともに、同手法を4種類の高分子材料(PMMA, ポリアセタール, ナイロンおよびABS樹脂)に適用した。得られた結果を要約すると以下ようになる。

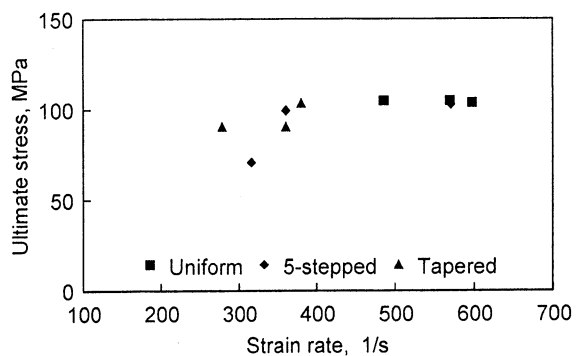
1. 変断面打撃棒を使用した場合の入射応力波形の簡便予測式を提示し、5段およびテーパ付き打撃棒を用いた場合の実測値と予測値は良く一致することを示した。
2. いずれの材料においても、ホプキンソン棒法で通常用いられる一様断面打撃棒に比べ、衝撃圧縮強度を測定した場合のひずみ速度はテーパ付き打撃棒で50%程度、5段打撃棒で40%程度減少した。
3. いずれの材料においても、ひずみ速度の時間変化はテーパ付き打撃棒を用いた場合、比較的平坦となった。
4. 圧縮強度に及ぼすひずみ速度の影響はPMMAにおいて大きかったが、他の3種類の高分子材では顕著ではなかった。

謝辞

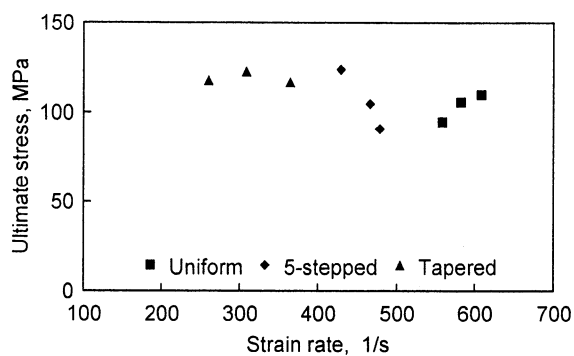
本研究の遂行に際し、実験に協力頂いた平成12年度千葉工業大学工学部卒研究生下山大吾君および小菌竜司君に謝意を表す。



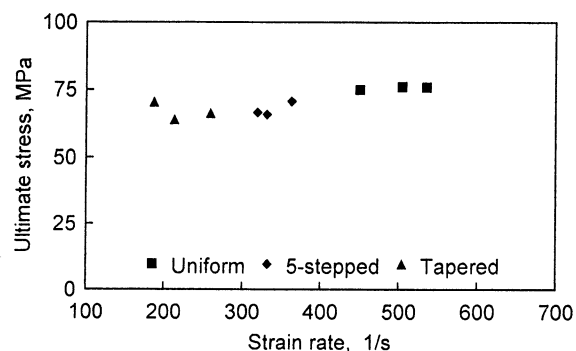
(a) PMMA



(c) Nylon



(b) Polyacetal



(d) ABS

Fig.6 Relationships between compressive strength and strain rate.

参考文献

(1) Lindholm, U.S.: Some experiments with the split Hopkinson pressure bar, *J. Mech. Phys. Solids*, **12**(1964), 317-335.
 (2) 小林公一, 田辺裕治, 原利昭: 衝撃圧縮荷重下におけるウシ海綿骨の力学的挙動, 日本機械学会論文集 A 編, **63-616**(1997), 2624-2630.
 (3) 小林公一, 田辺裕治, 原利昭: 関節軟骨の衝撃圧縮試

験, 第3回バイオエンジニアリングシンポジウム講演論文集, **940-5**(1994), 142-143.
 (4) 田中吉之助, 黒川知明: 変断面棒における応力波伝ば, 日本機械学会論文集, **38-311**(1972), 1715-1720.
 (5) 佐藤裕久, 竹山壽夫: 一定高ひずみ速度試験用の変断面打撃棒, 塑性と加工, **24-270**(1983), 744-750.
 (6) 中原一郎: 応用弾性学, 実教出版(1977), 194.