高分子機械材料の衝撃強さ

荒 井 貞 夫*

1. はじめに

高分子材料の機械材料としての用途では、衝撃的に負荷を受けたときの性質は案外重要で、この特性は今後の利用のうえで改めて見直されるべき点である。単純な比較で、静的な破壊強さや降伏強さを比べ、弾性係数のような値で変形に対する抵抗を比べただけでは既存の金属材料に比べて使用できないという結論しか得られないような高分子材料でも、実際に使用してみると意外に問題なく利用できたというような経験はよくあるものである。これは一つには、負荷条件が明らかでないというように、初歩的ではあるけれども案外一般的な事情によることもあるが、同時に高分子材料の衝撃を緩衝する性質が意外に効果的な役割を果たしているからでもある。

しかし、また、この性質はこれまであまり設計のうえで計算の対象としてはとりあげられていなかったことも事実である。これは、測定技術の点や経済的な理由で実際の負荷条件が明確にされていなかったというだけでなく、この性質を表わす方法も実際に即していなかったという理由があるからで、表題に関してなにか資料をまとめようとしても、具体的な数値をあげて示すことができないという現状はたいへん残念なことである。

ここでは、このような点から機械設計に利用できる衝撃強さの内容を検討して、今後の努力の方向を考えてみたいと思う。近時、測定技術が向上して衝撃試験そのものにも改良が加えられている。このような知見が利用できるようになったことは幸いである。

2. 材料試験による衝撃強さ

衝撃試験法については改めてここで繰り返すまでもないが、その結果は一般に吸収したエネルギー量で表わされている。最近、引張性質についての衝撃試験法が一部規格化されたが、多くは衝撃曲げ試験かまたは落体によ

る衝撃を利用したものが行なわれている。当然、温度や吸湿率、その他形状などの多くの因子の影響^{1),2)}を受けることが考えられるが、一定の試験方法に従って得られた結果は多くの材料間の比較選択などに役立っている。第1図³⁾はそのような一例を示したもので（この単位のとおり方は規格どおりではないが、単なる目安として見るのには問題はない）、ここには温度による衝撃強さの変化も示してあり、これで一応の比較ができる。

第1図 各種熱可塑性樹脂のアイゾット
衝撃強さ (単位: ft·lb/in²)

多くの因子の影響についてはいろいろとカタログ類にも示されているが、すべてが十分に調べられているとはいえない。しかし、われわれの経験でも、試験片中心部の巣の存在が衝撃試験結果との間に全然相関をもたないというような例もあって（これは残留応力などの影響であろう）、解析が困難なうえに、以下に述べるように単なる比較値としての意味しかないのであれば試験片形状などに関する吟味はあまり意味がないかもしれない。

衝撃試験の結果から理解される事項は、上述の材料の耐衝撃性の一次的な比較のほかにも、とくに約 3 m/sec、つまり約 100 sec⁻¹ またはそれ以上というような速い変形速度で負荷を受けた場合の材料の挙動を調べるという点では重要で、最近の高速引張試験などの結果と関連し

* Sadao ARAI 東洋レーヨン株式会社プラスチック
研究所研究員
Impact Strength for Designing with Polymeric
Materials

て実際問題に対して大きな意義をもっている。とくに、このような高速の変形の際に材料が延性破壊をするか、ぜい性破壊するかとの区別が明らかにされ、この延性—ぜい性の転移に温度や吸湿率などの因子がどう影響するかわかることも実用的には意義が深い。もっとも、これは WLF の式のような関係を適用すると案外ガラス転移などと関係がつけられてしまって金属ほどの意味はなくなるかもしれないが。

問題はときおりこれが実際的な結果と異なった結論を与えるといわれたり、各種の衝撃試験法による結果が相互に量的な比較ができず、また、設計データとして直接利用されることがほとんどないというような点にある。以下、これについて少し考察してみたい。

3. 衝撃試験における力—変形の解析

衝撃試験の結果が含んでいる内容を考えてみると、まず、この吸収エネルギーには、よく知られているように、弾性変形のひずみエネルギー、塑性流動に対応するエネルギーとさらに試料の破壊に要するエネルギーなどが含まれている。これらは材料や試験法によってそれぞれの大きさを異にしており、その様子は複雑である。

これに対して、ある者はぜい性破壊をきらい用途などを考えてこのうちの塑性流動変形のエネルギーを衝撃強さとするのが適当だと考えたり、また、ある者は弾性変形エネルギーの大きいものこそ衝撃強さの大きいものであると考えたりしている。これらはいずれも意味もっていてその用途の要求に応じて注目するところがちがうだけである。たとえば、機械材料としての用途ではぜい性破壊よりは延性破壊をするほうが望まれるが、強さのうえでは弾性変形に関係する部分が主要であるといった具合である。

このエネルギーのそれぞれの大きさは、衝撃試験における衝撃力や変形の様子を調べればこれを明らかにすることができる。最近電氣的な測定法が十分利用できるようになり、この種の解析結果がいろいろと報告されているが、第2図はわれわれの測定した一例で、力はストレーンゲージ、変形は電気容量型の変換器を用いてこれを2現象オシロスコープへ入れて引張衝撃試験の様子を調べたものである。これでわかるように、衝撃の初めの方は力—時間、変形—時間の関係は一応直線的である。衝撃曲げの場合についても同様のことが報告されている⁴⁾。もっとも、変形の方はハンマの運動エネルギーの大部分が試料によって吸収されてしまうと、速度が急激に低下するので直線にならなくなることは注意すべきである。

この力—時間の直線の勾配は衝撃速度および材料の弾性係数に比例することが推論されるが、後者については、Kelly らの報告値⁵⁾にもそれを見ることができる。

第2図 引張衝撃試験における力・変形の時間的变化の一例

この弾性変形につづいて塑性流動が起こり、これらのかこむ面積がそれぞれのエネルギーにあたるわけである。このような力—変形（または時間）の線図は典型的な二、三の型に分類にすることができるが^{4), 5)}、ほとんど塑性変形部分を含まずぜい性破壊をするものと、塑性流動のある延性破壊との区別は重要である。

4. 各種の衝撃強さについて

このように力—時間、力—変形の関係が理解され、吸収エネルギーとこれらの線図の囲む面積（つまり変形エネルギー）との間に当然のことながら比例関係のあることが確かめられる⁴⁾と、このような複雑な材料の挙動を単純にエネルギーの総量で表わしていることに問題のあることは容易に理解される。つまり、第3図の A, B のように全くちがった力—変形の関係をもった材料が同じ値で表わされることになるからである。

第3図 衝撃エネルギーと力・変形の関係

曲げ衝撃試験ではこれらのエネルギーの総和を、試験片寸法のちがいを考慮してアイゾット式の場合はノッチ幅単位 (1 in) あたりの値で、シャルピー式ではノッチ部の断面積で割った値で示している。前者は衝撃エネルギー U 、ノッチ幅 b 、ノッチから背面までの高さ h について得られた実験式 $U=c \cdot b h^n$ のうちで、材料による定数 c 、 n を含む部分を分けて $U/b=c \cdot h^n$ で表わそうというものである。しかし、これは成形品の配向などの影響を含めて考えると決して正しい式とはいえない

し、後者も一見合理的のようではあるが衝撃時の各部の変形が一樣でないことを考えると、物理的にはさほど意味ありとは思われない²⁾。これらは単に指標にすぎないと考えればこのような値は Späth²⁾ のいうように一定の試験法に対応した“硬さ”のような指数と同様に扱われるべきかもしれない。そうすると、用語も“衝撃強さ”というよりはむしろ金属で行なわれているように“衝撃値”とした方がより正しい印象を与えることになると思われる。

これに対して、落下式衝撃試験は運動量を試料のぜい性破壊で吸収させる方法であり、この場合の応力と変形の関係は第4図のようになる。この図から容易に理解されるようにこの結果として示されるエネルギーの値はだいたい衝撃時の最大力に対応することになる。実際の破壊は内部に生ずる応力がその限界値に達するかどうかできまると考えられるから、この力の最大値の実際的な意味は大きく、この結果の方が曲げ衝撃試験の結果よりもしばしばより实际的であるといわれる理由も理解できるわけである。

第4図 ぜい性破壊する材料の力-変形の関係

このようなことから、強さを表すにはむしろ力の最大値を示す必要のあることが考えられる²⁾が、破壊原理として最大ひずみエネルギー説をとるというのでないならば、これを応力の形で与える方がより实际的であろう。そうするとノッチ付きの衝撃曲げ試験よりは単純な引張衝撃試験の方が便利であるのはいうまでもない。現状では、まだ力を試料の断面積で割って応力の値で表わすことには形状の影響などの問題が残されているが、これはいずれ解決されよう。また、引張衝撃試験によって破壊応力が求められれば、複雑な落下式衝撃試験の手間を省くことができるかもしれない。

5. 設計資料としての衝撃強さ

すでに述べたとおり、衝撃試験の結果は高いひずみ速度の変形に対応した材料の挙動を示すものとして非常に意義の大きいものであるが、これを設計の検討の資料と

第5図 衝撃疲れ試験法

第6図 歯車衝撃疲れ試験結果

して役立たせるためには、強さは応力の値で破壊応力、または降伏応力にあたる値を示す必要がある。ひずみの方は、まだしばらく測定もむずかしいであろうから、弾性ひずみエネルギーを参考にしたりして強度限界をきめることができるかもしれないが、機械部品の材料としては塑性変形は多少存在すればよく、その大きさを問題にすることはまずあるまい。このような強さの点からみると、第1図の中では変形の小さいガラス繊維入り熱可塑性樹脂は大いに有望である。

さらに、機械材料として使用される場合にはくり返して衝撃を受けるようなことが多く、この点では高分子材料はかなり効果的であるのでこのような性質についても調べておく必要がある。この場合には、ただ一撃での衝撃強さだけでなく疲労の性質も重要になってくる。歯車の歯を第5図のような形でくり返し衝撃して調べた結果の一部を第6図に示したが、第1図の単純な衝撃強さの結果とは異なった結果になっていることに注意すべきであろう。

また、衝撃的負荷に対しては、その変位によって生ずる応力の値が小さいことが望ましい。先の力-時間の実測例を参考にして、一応ばねと質量だけの系の衝撃問題として最大応力を求めてみると、この値は弾性係数の平

(890 ページにつづく)

4-3. 各種材料試験法の精度

4-2 の結果を考察する前に、衝撃強さに関する各種材料試験法の精度を調査した。この結果を第4表に示す。

第4表 各種衝撃試験法のバラツキ

試験法の種類	推定値 (σ_e)	偏動係数 ($C=\sigma_e/\bar{x}$)
アイゾット法衝撃試験	0.54 (kg-cm/cm ²)	0.19
シャルピー法衝撃試験	2.31 (kg-cm/cm ²)	0.23
落錘法衝撃試験	0.94 (kg-cm)	0.11

4-4. 結果の考察

(1) 電話機用ハンドセットの落下試験による最低破壊高さと各種材料試験法の衝撃強さとの関係についてまず考えてみると、つぎのようになる。

i) シャルピー法は全く関連がないように思われる。しいて求めるならば衝撃強さが小さい方でのみ相関があると思われるが、良い尺度とは思われない。

ii) アイゾット法はほぼ直線関係があり、良い関連を示しているが、これも衝撃強さが大きくなるほどばらついてくることがわかる。しかし、一つの尺度として使用することができるものと思われる。

iii) 落錘法は二次曲線の関係で強度に関連を有していることがわかる。したがって、三つの試験法の中では最も良い尺度と思われる。

(2) 各種材料試験法の精度について検討するとつぎのようになる。

i) バラツキについてはアイゾット法が最も小さく、シャルピー法が最も大きいことがわかった。

ii) 各種試験法の絶対値が異なるので、バラツキを直

接比較することは間違いであると思われるので、変動係数について比較すると、落錘法が最も小さく、シャルピー法が最も大きいことがわかった。

iii) 以上の結果から、精度については落錘法が最も良い試験法となる。

(3) 適切な尺度として、また最も良い精度を有する試験法としては、上記の結果から、落錘法が最も良いことがわかる。また、この落錘法試験片は射出成形を必要としないため、試験片の必要枚数は若干他の試験法よりも多くなるが、プレスシートから切り出すため、最も簡便で、かつコストも安価である特徴を有している。

5. むすび

電気通信機器用高分子材料の衝撃強さに関する一例として、電話機用成形品について述べた。この結果、電話機用ハンドセットは 90 cm の高さから鉄製定盤に落下させても破損しない成形品を実用化することができた。(一般に机から床までの距離は普通約 75 cm である。したがって、90 cm からではほぼ破損しないことがわかるであろう。) また、この電話機用成形品の高分子材料としての衝撃強さは落錘法で 22 kg-cm という規格を有すれば十分であることがわかった。このように、電話機用成形品も、使用者の立場に立ってサービスの向上を考えると非常にむずかしい問題があり、材料の選定のみならず構造・形状とも関連するので、肉厚の決定・リブの設定とその構造など、あらゆる面から検討を加える必要がある。

以上にその考え方とその設定条件の概要を記載したが、諸兄のご高目を賜わらば幸甚の至りです。(ここに記した新しい電話機は 600 形電話機と呼びます。カット写真参照)

6. あとがき

うえのような議論に対して、実際の値をは今後の測定 of 努力によって集積されていくべきものである。緩衝の問題についても今後解析をすすめるべき点が多い。

文 献

- 1) J. M. Lessells: "Strength and Resistance of Metals", *Inst. Sci.*, (1954)
- 2) W. Späth: "Impact Testing of Materials." (Thames and Hudson) (1961)
- 3) T. P. Murphy, W. H. Chadbourne, R. C. Petersburg: *J. SEA*, **72**, (6), 84 (1964)
- 4) W. E. Wolstenholmes: *J. Appl. Polymer Sci.*, **4**, (21), 332 (1962)
- 5) P. P. Kelly, T. J. Dunn: *Mat. Res. and Standards*, **3**, 545 (1963)
- 6) Hermann Oberst: *Kunststoffe*, **53**, 4 (1963)
- 7) A. Gemant: "Frictional Phenomena", 327. (Chem. Publ. Co.) (1950)

(荒井貞夫:「高分子機械材料の衝撃強さ」の 886 ページよりの続き)

方根に比例するが、これによって金属よりも軟質な高分子材料が有効である度合を推定できる。さらに、内部に生じた振動を吸収することでは力学的 $\tan \delta$ の周波数による変化などが問題になるであろう⁶⁾が、Gemant⁷⁾の示した弾性係数 E と対数減衰率 δ との関係、 $[E\delta \approx \text{一定}]$ からさらに弾性係数の小さいものが有利なことが考えられる。高分子機械材料のなかでは、大気中での平衡吸湿状態で弾性係数が 10,000 kg/cm² 程度を示すナイロンは耐摩耗性にすぐれているうえに、このような点でもとくに優秀な材料であるといえよう。

なお、他方使用条件の方も、これまでのように簡単な加速度などからの推算だけでなく、実測によってその資料を充実していかなければならないのはいうまでもない。