研究論文

プラスチックボルトの衝撃強度特性について*

井上 平治** 齊 当 建 一*** 星 野 悟***

On the Impact Strength of the Plastics Bolt

Heiji INOUE, Ken-ichi SAITO and Satoru HOSHINO

In this paper, the impact strengths of the commercially supplied Polyvinylchloride (PVC) bolt and Polycarbonate (PC) bolt are clarified and these strengths are compared with static strengths of them. For PC bolt which maintains ductile rupture under impact tensile load as well as static tensile load, the proof stress under impact load is newly proposed. As the result, the following conclusions are obtained: (1) Although the rupture mode of PVC bolt is ductile under static tensile load, it changes into brittle under impact tensile load and consequently, the rupture energy extremely decreases as compared with that in static tensile load. (2) PC bolt maintains ductile rupture under impact load and its rupture energy is comparable to that under static load. (3) For the PC bolt, if the maximum stress under impact load is below the "Impact Proof Stress" proposed here, the failure of the bolt does not occurred.

Key words: plastics bolt, impact strength, rupture energy, impact proof stress

1. 緒 言

プラスチック材料は、電気絶縁性及耐食性、さらに軽量であることなどから、機械材料として使用範囲も拡大されつつある。そのような中でプラスチック製のボルトが締結要素として製品化されており、そのうち一部の材質のボルトについて、静荷重下での挙動が研究されている¹⁾が、いまだ不明な点が多く、強度や施工指針を明らかにすることが望まれる。

プラスチックボルトを使用する場合を考えると、締結体に静的荷重や動的荷重が加わるので、静的引張強度特性ばかりでなく動的特性、つまり疲労や衝撃などに関する特性についても明らかにする必要がある。

そこで、本研究では、プラスチックボルトの衝撃荷重下の強度特性を明らかにするための第1歩として、ANSI/ASTMに規定されているプラスチック材料に対する衝撃試験法²⁾に準拠した条件で評価することを考え、プラスチックボルト用の衝撃引張試験機を試作した上で³⁾、市販されているポリ塩化ビニル (PVC) 製およびポリカーボネート (PC) 製のボルトを対象にして、衝撃引張荷重による破断や破損の状況を調べると共に、静的引張荷重下の挙動との比較も試みた。

また静的荷重下の耐力に準じて、新たに衝撃引張荷重下における基準の強度を提案している。

2. プラスチックボルトの静的強度

ここでは、ボルトの基礎的な強度として、静的引張荷重下における耐力および破断に至るまでの最大荷重と破断エネルギーを明らかにする。

実験に使用した、市販のPVCボルト (M12) およびPCボルト (M12) の形状寸法は図1のとおりである。PVCボルトは、ボルト頭付き丸棒に成形された後、ねじ部を冷間転造して作られたものであり、PCボルトはねじ部を含めた全形状を射出成形によって作られている。

はじめに、静的荷重下の耐力を文献4)の方法によ

Fig. 1 Dimensions of test bolt-nuts

* 原稿受付 昭和63年8月17日。昭和61年度精密工学会春季大会学術講演会 (昭和61年3月30日) にて発表

** 正 会 員 北海道教育大学函館分校 (函館市八幡町1-2)

*** 正 会 員 室蘭工業大学 (室蘭市水元町27-1)

Fig. 2 Schematic diagram of testing machine

り測定を行った。

ここで使用した試験機¹⁾を図2に示す。上部チャックの引張速度は20 mm/minで一定とし、ボルト頭部座面と、ナット座面間に引張荷重をかけ、一定の荷重に達したあと同じ速度で除荷をする。これを各荷重のレベルについて行い、荷重-伸び線図をX-Yレコーダに記録する。ボルトとナットの座面間距離 L_t は50 mmで一定とする。

なお、本研究の全体を通して、試験中の温度はANSI/ASTMに準じ、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ に保持した。

この方法によって得られたPVCボルト、およびPCボルトの応力 σ と等価残留ひずみ ϵ_e の関係を図3に示す。ここで、 $\epsilon_e = (w/\sigma) \times 100\%$ である。 w は、引張試験において負荷と除荷を与えることにより、応力-ひずみ線図が描くヒステリシスループの面積である。

同図より、 $\epsilon_e = 0.2\%$ に対応する応力、すなわち耐力は、PVCボルトの場合、約28 MPaであり、PCボルトの場合、約44 MPaであった。

次に、プラスチックボルトが静的引張荷重のもとで、破断に要するエネルギーと破断の状況を調べるための実験を行った。座面間距離および引張速度は耐力測定の場合と同様である。PVCボルトおよびPCボルトの実験データの一例を図4に示す。

いずれのボルトも、ねじ部でネッキングを起こし延性破断を示した。図4のような荷重-伸び線図を2種類のボルトについて、それぞれ10回の繰返し実験を行い、静的破断エネルギー E を求めると、PVCボルトは平均値 $\bar{E} = 13.8 \text{ J}$ 、標準偏差 $\sigma_E = 1.5 \text{ J}$ であり、PCボルトは $\bar{E} = 32.1 \text{ J}$ 、 $\sigma_E = 1.5 \text{ J}$ であった。また最大荷重 F_m は、PVCボルトでは $\bar{F}_m = 3.86 \text{ kN}$ 、 $\sigma_{Fm} = 0.10 \text{ kN}$ であり、PCボルトでは $\bar{F}_m = 4.43$

Fig. 3 Result of static yield test

Fig. 4 Examples of static tensile test

kN, $\sigma_{Fm} = 0.07 \text{ kN}$ であった。

これらの結果から、PCボルトはPVCボルトに比べて破断エネルギー、最大荷重ともに大きい、とりわけ破断エネルギーの差異は著しい。

3. プラスチックボルトの衝撃引張試験

ここでは、前節におけるプラスチックボルトの静的強度に対比して、衝撃引張荷重によってプラスチックボルトを破断させたときの最大荷重 F_m と、破断エネルギー E および破断モードを調べるための試験を行った。

Fig. 5 Detail view of bolted joint

Fig. 6 Schematic diagram of tensile impact testing machine

図5は、試料となるプラスチックボルトを取り付けた試験機の主要部を示す。このボルトはクロスヘッドを挟んでハウジング内のロードセルにねじ込み、初期締付け力 F_0 で固定する。ここで、締付け長さ L_f は静的引張試験に対応して 50 mm とする。また、初期締付け力および衝撃引張荷重はロードセルによって測定する。この試料取付部を図6に示す試験機に固定し、ハンドルを回転して、ハンマの衝撃エネルギー（設定エネルギー）が所定の値 E_0 になるように持上げ角 α をセットする。フックを外すとハンマがクロスヘッドを打撃し、その結果プラスチックボルトは衝撃引張荷重を受ける。ボルトが破断し、ハンマが $\alpha=0^\circ$ を過ぎた後の振上がり角 β は、置き針から読み取り、次式から破断エネルギー E を求める。

$$E = WR(\cos \beta - \cos \alpha) \quad (1)$$

ここで、 WR はハンマのひょう量（=74.8 J）を表す。

なお、衝撃速度についても ANSI/ASTM に準じており、 $\alpha=80^\circ$ のとき同規格の衝撃速度 $V=3.4$ m/s に一致する。

一般に、衝撃荷重下における機械的性質は、静的荷重の場合に比べて組織敏感性を呈し、物性値のばらつ

Table 1 Experimental conditions

	Set-up energy E_0 J
PVC	26.2 ($\alpha=50^\circ$)
	32.1 ($\alpha=55^\circ$)
	37.8 ($\alpha=60^\circ$)
PC	61.9 ($\alpha=80^\circ$)
	74.8 ($\alpha=90^\circ$)
	87.8 ($\alpha=100^\circ$)

Fig. 7 Examples of tensile impact test

きが大きくなる傾向を示す。そこで、衝撃引張試験では、試験条件である設定エネルギー E_0 が破断エネルギー E と最大荷重 F_m に及ぼす影響を検討するため、表1に示す条件で実験を行った。

ここで、初期締付け力 F_0 は、締付け時のねじ面の摩擦によるボルトのせん断応力を考慮して、耐力の約 60% に設定する。また、設定エネルギー E_0 は、静的引張試験によって求められたボルトの破断エネルギーの 2 倍、2.3 倍、2.7 倍とした。

図7は、衝撃引張試験によって得られた実験結果の例を示す。現象が早いので、データはいったんデジタルメモリーオシロに取り込んだ後、X-Y レコーダに荷重の時間的变化として記録している。この例にみられるように、ここで行ったすべての条件において、PVC ボルトの場合は静的引張りの場合とは異なり、ぜい性破断となるのに対し、PC ボルトの場合は静的引張りと同様にネッキングを起こして延性破断を示している。

図8には、PVC および PC ボルトについて、設定エネルギー E_0 による最大軸力 F_m と破断エネルギー E の変化を静的引張りの結果と共に示す。PVC ボルトの場合、静的引張りに比べると、最大荷重 F_m はそ

Fig. 8 Influence of set-up energy on the maximum axial force and the rupture energy

れほど低下しないが、破断エネルギー E は著しく低下している。この破断エネルギーは設定エネルギーと共に増加しており、これは最大荷重 F_m の増加に対応している。これに対して PC ボルトの破断エネルギーは、静的引張りの場合よりも高い値を示す。PC 材料は一般に、耐衝撃性の優れた材料として評価されているが、ボルトのように連続した切欠きをもつ形状の場合にも、このような高いじん性を維持していることが特徴である。また、PC ボルトの場合、設定エネルギーによる、破断エネルギーの変化の割合は PVC ボルトに比べて小さく、このことは F_m がほぼ一定であることと対応している。

4. 衝撃荷重下のボルトの荷重-伸び関係

ここでは、衝撃荷重下でも延性を示した PC ボルトの変形過程をさらに詳しく調べるため、衝撃荷重下

Fig. 9 Experimental set-up for measurement of bolt elongation

の、荷重-伸び関係を明らかにし、静的引張試験の場合と比較する。

しかし、衝撃引張試験においては、衝撃中のボルトの伸びを直接測定することは困難であるため、以下のような考え方のもとに伸びの測定装置を考案し作製した。図 9 はボルトの伸び測定のための概略図を示す。ハンマがクロスヘッドに接触してから試料を破断するまでの間、ハンマウェイト ① に固定した突起 ② にはアーム ③ の先端が接触しつづける。このアームは回転型ポテンシオメータの軸に固定されているので、ポテンシオメータの回転角 θ_p から間接的にボルトの伸び δ を求めることができる。すなわち、 l 、 l_M 、 l_P に比べて、 L 、 δ が小さいことを考慮すれば、 θ_p と δ の関係は近似的に次式で表される。

$$\delta = \frac{l}{l_M} \{L + l_P(\theta_p - \theta_{PL})\} \quad (2)$$

ここで、 l ：ハンマ回転軸中心から打撃点までの距離、 l_M ：ハンマ回転軸中心から測定点までの距離、 l_P ：ポテンシオメータの回転腕の長さを表す。

この装置を用いて、荷重-時間曲線に同時に伸びを加えて測定したものが図 10 (a) である。同図から荷重-伸び線図に変換したものに、静的実験結果を重ね合わせた結果が図 10 (b) である。

同図から、衝撃荷重下の変形挙動を静的荷重下の場合と比べると、初期の傾きがほぼ同一であるが、最大

Fig. 10 Load-time (a), load-elongation (b) diagram of tensile impact test

荷重 F_m ばかりでなく伸び δ の増加も認められる。しかし、荷重-伸び関係は定性的に静的引張りの場合と同様の傾向を示すことが明らかである。

5. プラスチックボルトの破損と衝撃耐力

これまででは、プラスチックボルトの基礎的な強度特性として、破断に至るまでの強度試験を静的および衝撃荷重について行い、破断形式の変化の有無を示した。しかし、ねじ締結体の使用状態では、ボルトの伸びが大きく、破損⁹⁾に至ると、締付け力を重視した締結体の場合には、その機能を果たさなくなる。したがって、設計指針としては、破断時の特性のみならず、ボルトの破損という点からの検討が必要である。

一般に、延性材料の場合、強度設計の基準となる強度としては静的引張荷重下での降伏点または耐力が定義されている。この基準の強度については、先に PC ボルトに対して、除荷後の残留ひずみが時間依存性を示すことを考慮して、等価残留ひずみという概念を用いて耐力を定義した⁴⁾。

そこで、衝撃荷重下でも延性を維持し、静的荷重下と同様の変形挙動を示す PC ボルトを対象にして、上記の概念を用いて衝

Fig. 11 Load-elongation diagram of tensile test

撃荷重下の耐力（以下、衝撃耐力と呼ぶ）を検討する。

図 11 は PC ボルトの衝撃荷重下の荷重-伸び線図を模式的に示す。一定の設定エネルギーを负荷したときにボルトに吸収されるエネルギー E_{Ab} は、同図のヒステリシスループ OAC で表され、このときの最大荷重は F_m となる。ここで、締付長さを L_f とすれば、衝撃引張荷重の場合の等価残留ひずみ ϵ_e は次式により求められる。

$$\epsilon_e = \frac{E_{Ab}}{F_m \cdot L_f} \times 100\% \quad (3)$$

ここで、 E_{Ab} は、図 6 に示すハンマのはね返り角 γ を測定し、式 (1) の β の代わりに γ を代入して求める。式 (3) を用いるため、初期締付け力は、クロスヘッドが正常な位置を保つ程度 ($F_0 \approx 0$ kN) に設定し、持上げ角 α を 10° から 45° の範囲 ($E_0 = 1 \sim 22$ J) で実験を行った。また締付け長さ L_f は 50 mm である。実験の結果を静的荷重下での測定結果とあわせて図 12 に示す。

衝撃荷重の場合に、応力が約 54 MPa を越えると、等価残留ひずみは急激に増加する。この応力に対応す

Fig. 12 Relation between maximum tensile stress and equivalent residual strain

る等価残留ひずみは約 0.9% である。

ここで、衝撃荷重下の等価残留ひずみについては、静的耐力で求められた 0.2% に比べてかなり大きい値になっている。この現象については、試験装置に散逸するエネルギーを分離し得ていないため、ボルトに吸収されるエネルギー E_{Ab} を実際よりも大きく評価していることが原因の一つと考えられる。なお、試験直後の残留伸び δ_r をマイクロメータによって計測した結果は図 12 に示すとおりであり、少なくとも応力が 54 MPa 以下の場合、残留伸びは検出されなかった。

したがって、この応力は衝撃荷重下の基準の強度として妥当なものと考えられるので、この等価残留ひずみ曲線の折れ点 (ϵ_e が急増する点) に対応する応力を新たに衝撃耐力と定義する。この衝撃耐力は、PC ボルトをはじめとして衝撃荷重下でも延性を維持するプラスチックボルトに対して、一般に有効な指標と考えられる。なお、PC ボルトにおけるこの衝撃耐力は、静的引張りにおける耐力の約 1.2 倍であり、破断実験における最大応力値も、衝撃時には、ほぼこの程度の増加となっている。

6. 結 言

市販されているプラスチックボルトの衝撃引張強度

特性を、静的引張強度との対応に留意して検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) PVC ボルトは、静的引張りにおいて延性破断を示すが、衝撃引張りになると、ぜい性破断に移行し、破断エネルギーが著しく低下する。
- (2) PC ボルトは衝撃引張りにおいても延性破断モードを維持し、破断エネルギーは幾分上昇し、最大荷重も増加する。
- (3) 負荷様式の違いによっても破断モードが変わらない PC ボルトについて、衝撃負荷を受ける際の強度設計の基準となる強度として衝撃耐力を定義した。

文 献

- 1) 齊当建一、大川明宏、丸山一男：プラスチックねじの強度に関する研究——組合せ荷重下におけるプラスチックねじの挙動、精密機械、50, 2 (1984) 365.
- 2) ANSI/ASTM D 1822-68 (1973): Standard Test Method for Tensile-Impact Energy to Break Plastics and Electrical Insulating Materials.
- 3) 齊当建一、星野 悟、井上平治：プラスチックボルトの引張衝撃試験法に関する研究——試験機の試作と特性の評価方法について、精密工学会誌、53, 6 (1987) 886.
- 4) 齊当建一、丸山一男：プラスチックねじの強度に関する基礎的研究、精密機械、49, 3 (1983) 348.
- 5) 山本 晃：ねじ締結の理論と計算、養賢堂 (1972) 41.

編集後記

たまたま、バイオテクノロジー支援のための精密工学に関する調査研究分科会の主査をしていることもあり、今回の小特集「人間をまねる——ヒューマンミメティックス最前線」の企画に微力ながら協力させていただきました。冒頭でも述べましたように、ヒューマンミメティックスは河合理事（同分科会幹事）による造語です。その趣旨は、座談会の中で明確にされているのではないかと思います。この座談会は大変盛り上がり、その生の声を誌面で再現できないのが残念です。人間性とか人間らしさなど哲学、心理学で扱うような問題に対して、工学研究者や技術者は敬遠しがちですが、そろそろ真正面から取り組まねばならない時代になってきたようです。その場合、この問題は今までの科学の枠組みの中、あるいはその延長線上ではもうとらえきれないであろう、というのが私の実感です。これは、座談会の後に続く、人間の諸機能を真似る場合にもあてはまるように思います。これら諸機能はそれぞれ一つでも特集になる

ような内容を含んでますが、今回は、全体像を把握するために広範囲にまとめて紹介することにしました。誌面にご登場いただいた方は総勢 25 名で、皆さん、第一線でご活躍されています。ここに改めてお礼申し上げる次第です。なお、本企画編集にあたり、河合理事より多大なるご協力を賜りました。今回の小特集が会員諸兄への問題提起になれば幸いです。

(三輪 敬之)