

論文

アルミニウムボルトの実用化における耐疲労性の検討

舟山義弘^{*1)} 大久保富彦^{*1)} 田中貴浩^{*1)} 池田 弘^{*2)}

Research on fatigue resistance in practical application of aluminum alloy bolts

Yoshihiro FUNAYAMA, Tomihiko OOKUBO, Takahiro TANAKA and Hiroshi IKEDA

Abstract The fatigue resistance of aluminum alloy bolts having both high joint strength and resistance to stress corrosion cracking was evaluated under conditions of low temperature (273K), normal temperature (293K), and high temperature (393K). As a result of the research, the following were found: The fatigue strength of the bolt was the largest at low temperature and decreased in the order of normal and high temperatures. The fatigue strength at high temperature sharply decreased as the number of cycles was increased, and neared zero under high mean stress (360MPa). The fractured surface of the bolt was supposed to be intergranular fracture due to stress corrosion cracking. The maximum fatigue strength was 24.7MPa at low temperature and under low mean stress (stress ratio : 0.1), and also, it was found that the fatigue strength at normal temperature was slightly inferior than the fatigue strength of the bolt with steel and stainless steel having the equivalent static strength to the aluminium alloy bolts.

Keywords Aluminium alloy bolt, Fatigue strength, Joint strength, Stress corrosion cracking, Intergranular fracture

1. はじめに

近年、自動車、鉄道車両等の各分野で、軽量化を図りながら、リサイクルが可能な環境負荷の小さいアルミニウム合金（以下アルミ）による部品が増えている。この部品締結には、鋼製ボルトを使用する機会が多く、軽量化やアルミ部品の座面陥没等の問題がある。これはアルミに比べ鉄の比重が約3倍で軽量化に不向きなことや、両者が接触する座面ではアルミ部品が電食を起こす等物性値の違いによるものである。

この対策として、締結部品をアルミニウム合金ボルト（以下アルミボルト）に替える必要がある。アルミボルトは鋼製ボルトに比べ軽量であることや同質材料なので電食を生じない等アルミ部品締結には最も適している。しかしながら、アルミボルトは一般の鋼製ボルトに比べまだ実用化段階には至っていない。この理由として、鋼

*1) 製品科学技術グループ

*2) 技術評価室

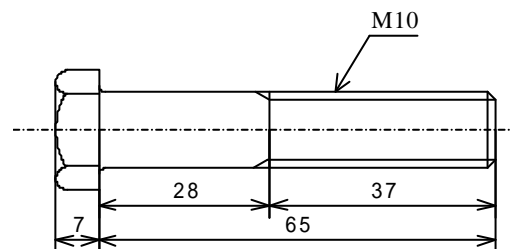


図1 試料の形状

製ボルトの強度区分6.8¹⁾あるいはステンレス鋼ボルトの強度区分A2-70¹⁾と同等の静的強度を有するアルミ合金材料は、現状A7075-T6²⁾だけである。この材料によるボルトの実用化の可能性は最も高いが、引張応力が負荷された状態で腐食環境下に曝された場合、大きな機械的性質の劣化を生じ破壊に至る応力腐食割れ（以下SCC）の感受性が高く³⁾締結体の安全性に問題が生じる。このように、締結強度と耐応力腐食割れ性を同時に両立できないことが、アルミボルトの実用化を阻んできた。しかし、最近製造方法の改善により、高い締結強度と

ボルトとして安全なレベルの耐S C C性の両立を図ることができるアルミボルトの開発が進められており、各分野では早急にこのボルトの導入を望んでいる。そこで本研究は、このアルミボルトの実用化を図ることを目的に、温度条件を変えた耐疲労性について評価・検討を行った。

2. 実験試料及び実験方法

2.1 実験試料

試料は、図1に示す呼び径10の六角並目ボルトで、静的強度は、鋼製ボルトの強度区分6.8相当であり、この降伏締付け軸力は400MPa程度である。材質は、A7050合金でこの化学組成を表1に示す。A7050合金は焼入れ感受性を劣化させないCrを、同等の添加効果があるZrに置き換えた7000系合金⁴⁾で、A7075合金より低く規制されている不純物の効果と相まって、後述するT771熱処理後の性質も安定する。

成形法は、一般的な鋼製ボルトの冷間加工と同様であるが、アルミ合金の場合、加工ひずみが熱処理による再結晶時に結晶粒を著しく粗大化し、機械的性質や耐S C C性の劣化に結びつき、ボルトの安全性を損なうことから、熱処理により結晶が粗大化しない範囲の加工ひずみとしている。

熱処理は、溶体化処理をしてから、続けて時効処理、復元処理、時効処理を行うT771熱処理³⁾で、復元現象を介在させることによって粒内と粒界の析出組織を独立に制御し、強度の維持と耐S C C性の向上を両立させている。

表面処理は、アルマイト処理を施しているが、ねじ部品にアルマイト処理を行うと摩擦係数のばらつきが大きくなることから、摩擦安定剤をこの上に施している。

2.2 実験方法

実験方法は、JIS B 1081「ねじ部品の引張疲れ試験方法」の規格を主に準用し、温度条件を低温(273K)、常温(約293K)及び高温(393K)とし、各温度条件のS-N線図及びヘイ線図を求めた。規格のS-N線図は図2に示すように、破断した応力振幅(σa)と繰返し数(N)のばらつきを、4応力振幅段階2個ずつ8個の試料を、最小最大応力比(Rs)又は平均応力(σm)を一定とし、応力振幅を段階的に変えて実験し、傾斜部の一回帰直線を次式で求め作成する。

表1 化学組成 (wt%)

合金	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr	Ti
A7050	<0.12	<0.15	2.0 ~2.6	<0.10	1.9 ~2.6	<0.04	5.7 ~6.7	0.08 ~0.15	<0.0
A7075	<0.40	<0.50	1.2 ~2.0	<0.30	2.1 ~2.9	0.18 ~0.28	5.1 ~6.1	(Zr+Ti) <0.25	<0.2

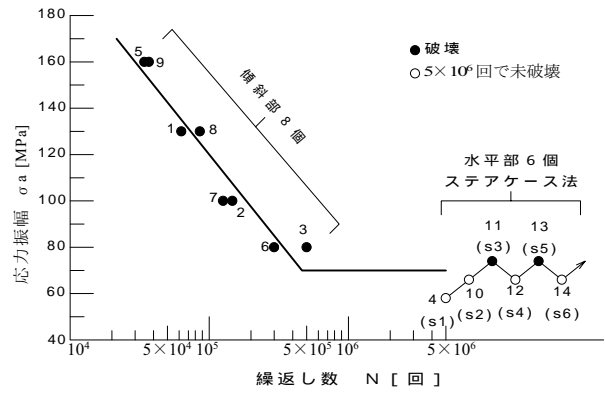


図2 14S-N試験方法 (図中の番号は、試験の順序を示す。)

$$\log N = \hat{\alpha} + \hat{\beta} \sigma_a \dots (1)$$

ここに、 $\hat{\alpha} = \overline{\log N} - \hat{\beta} \overline{\sigma_a}$ $\dots (2)$

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n [\sigma_a(i) - \overline{\sigma_a}] [\log N(i) - \overline{\log N}]}{\sum_{i=1}^n [\sigma_a(i) - \overline{\sigma_a}]^2} \dots (3)$$

$$\overline{\log N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log N(i) \dots (4)$$

$$\overline{\sigma_a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_a(i) \dots (5)$$

しかし、試料はアルミ合金と同様曲線的になることから、べき乗回帰の次式を用いてS-N線図を作成した。

$$\log N = \hat{\alpha} \sigma_a^{\hat{\beta}} \dots (6)$$

また、規格のヘイ線図は平均応力が疲れ強さに及ぼす影響を、次の3平均応力について、統計的手法を用いて求める。

- ① 一定平均応力 $\sigma_m = 0.7R_m$ という高い平均応力 (R_m = 試料の引張強さ)
- ② 一定平均応力 $\sigma_m = 0.4R_m$ という中間の平均応力
- ③ 一定応力比 $R_s = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 0.1$ から導かれる低い平均応力

しかし、高い平均応力は、 R_m 約600MPaの0.7倍で約420MPaであるが、これは試料の降伏締付け軸力400MPaを超える値で、塑性変形を生じる恐れがあることから、これより低い360MPaとした。また、中間の平均応力も若干低い200MPaとした。一方、一般的なアルミ合金の疲労強度(以下疲れ強さ)は繰返し数 10^8 回で求めるが、実験が長時間かかるために、規格の疲れ強さを求める繰返し数 5×10^6 回より多い 10^7 回における少数サンプルステアケース法により疲れ強さを求めた。

実験装置は、50kNの疲労試験機で、低温及び高温は

恒温槽内において実験を行った。この繰返し速度は5～20Hzとした。

なお、実験データから求めたS-N線図、ヘイ線図、時間強さ、及び疲れ強さ等は破壊確率50%値とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 S-N線図の時間強さによる実用化の評価

各平均応力における各温度条件のS-N線図を図3から図5に示す。低温の各平均応力の繰返し数における時間強度（以下時間強さ）は他の温度条件に比べ大きい値を示した。これは、低温において常温及び高温より時効による硬化が保持されて時間強さが大きくなったものと考えられる。また、常温の各平均応力の時間強さは、低温の各平均応力の時間強さより若干小さく、ほぼ同じ傾きであった。

この低温及び常温の中間の平均応力では、 5×10^5 回程度までの破断繰返し数は、比較的ばらつきが小さく、両温度条件での破断面は応力腐食割れに観られる粒界破面⁵⁾と異なる疲労破面であった。したがって、この両温度条件の中間の平均応力程度に実際の締付けを行った場合、締結体に加わる繰返し応力を予測し、これに対する安全なレベルの繰返し期間において定期的にボルトを交換することにより、実用化は可能であると考えられる。

一方、各平均応力の高温の時間強さは、3平均応力とも他の温度条件に比べ小さい値を示した。この中間及び高い平均応力では、常温の 10^5 回の時間強さとほぼ同じであるが、 10^6 回の時間強さで常温より約60%低く、繰返し数が多くなるにしたがい時間強さが急激に低下した。特に、高い平均応力の時間強さは、 10^5 回を過ぎると急に落ち、2.0MPaの応力振幅でも破断し、この 10^7 回の疲れ強さは0に近く、S-N線図に示すことができなかった。これは、高温において破断した低い平均応力の破面は、粒界と疲労が混じった破面、中間及び高い平均応力の破面は、粒界破面（図6）が観られたことから、高温と平均応力の影響が重なり、時効によりある程度高められている延性や靱性が低下し応力腐食割れを生じ、これにより時間強さが小さくなったものと考えられる。したがって、この温度条件では締結体の安全性から実用化は難しいと考えられる。

3.2 ヘイ線図の疲れ強さによる実用化の評価

各温度条件のヘイ線図を図7に示す。低温及び常温の低い平均応力から中間の平均応力では、疲れ強さに対する平均応力の影響が大きく約40%低い値になった。しかし、中間の平均応力から高い平均応力では、疲れ強さは一定となりこの影響は小さかった。

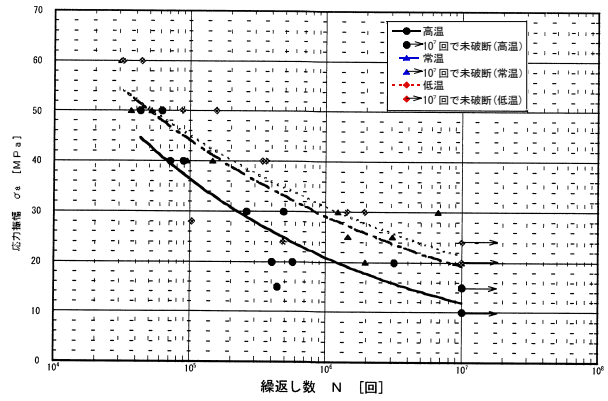


図3 低い平均応力 (Rs=0.1) における各温度条件のS-N線図

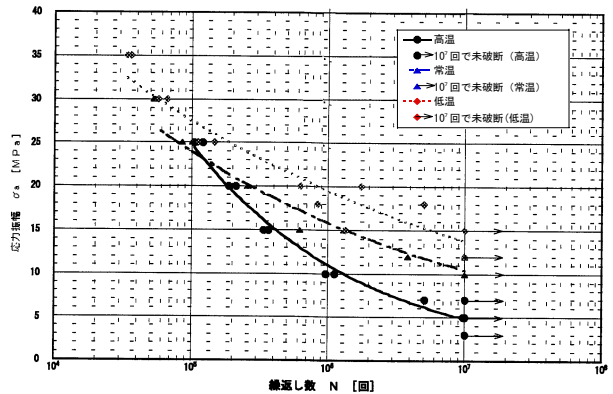


図4 中間の平均応力(200MPa)における各温度条件のS-N線図

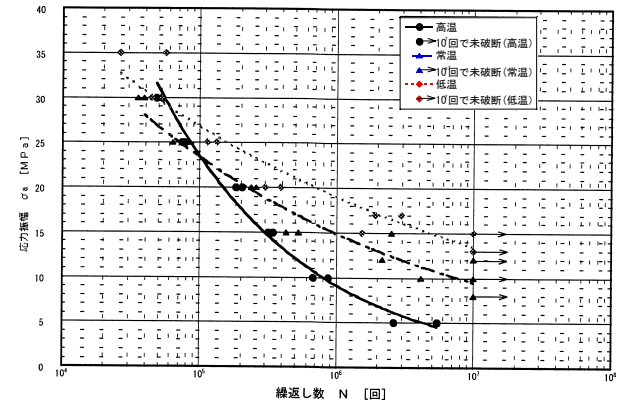


図5 高い平均応力(360MPa)における各温度条件のS-N線図

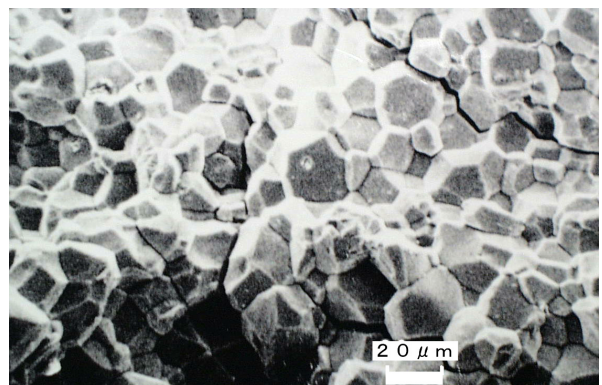


図6 高温の高い平均応力で破断した試料の粒界破面

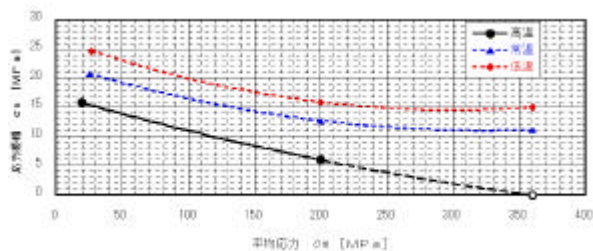


図7 各温度条件のヘイ線図

また、低温での疲れ強さは、各平均応力において時間強さと同様に、他の温度条件より大きく、最大疲れ強さは低い平均応力における24.7MPaであった。一般的に鋼製ボルト単体の疲れ強さは常温で40～50MPa^{6,7)}であり、試料の常温での低い平均応力の疲れ強さは20.8MPaでこれを下回る結果であった。また、鋼製ボルトの常温における平均応力235MPaの疲れ強さは34.3MPa⁸⁾、比較のために行ったステンレス鋼ボルトの常温における平均応力310MPaの疲れ強さは32.5MPaであり、試料はこれも下回る結果であった。

この理由として、試料の引張強さは鋼製ボルトの強度区分6.8と同程度であるが、伸びが鋼製ボルトの強度区分8.8に比べ約30%、同等のステンレス鋼ボルトに比べ約65%下回っており、延性や韌性に劣り脆い傾向があり、疲れ強さが小さくなったものと考えられる。

一方、高温の低い平均応力の疲れ強さは常温より24%、中間の平均応力では常温より50%低く、高い平均応力では疲れ強さは0に近く、疲れ強さは平均応力が大きくなるにつれて急激に低下する。この温度条件の疲れ強さは、先にも述べたように高温と平均応力の影響が重なり小さくなったものと考えられる。

これらの結果から、低温及び常温においては、鋼製ボルトやステンレス鋼ボルトに比べ疲れ強さは若干低い値であるが、 10^7 回と比較的繰返し数が多い厳しい条件で中間から高い平均応力において、急激な疲れ強さの低下はなかった。したがって、両温度条件において中間から高い平均応力程度の締付けでは、大きな繰返し外力が加わる締結体での実用化は難しいが、大きな繰返し外力が加わらない場合、主に次のような慎重な締付けを行うことにより、実用化は可能であると考えられる。第1に座面とボルト面の摩擦を予め読み込んだ目標トルクを設定し、トルクレンチの精度の高いものを用いてばつきを小さくして正確に管理し締付けを行う。第2にめねじの山数を多くしねじ山の荷重分担を均等化させ、ボルト第1ねじ山の応力集中を減少させることなどである。

4. まとめ

ボルトとして安全性の高い締結強度と耐応力腐食割れ

性の両立を図ることができるアルミニウムボルトの開発が進められ、この実用化を図ることを目的に低温(273K)、常温(293K)及び高温(393K)における耐疲労性について評価し、次のようなことが明らかになった。

各温度条件の時間強さ及び疲れ強さは、低温が一番大きく、次に常温、高温の順であった。

低温及び常温での中間の平均応力では、 5×10^5 回程度までの破断繰返し数は、比較的ばつきは小さく、この破断面は疲労破面であった。

低温及び常温の低い平均応力から中間の平均応力では、疲れ強さに対する平均応力の影響が大きく約40%低い値になった。しかし、中間の平均応力から高い平均応力では、疲れ強さは一定となりこの影響は小さかった。

最大疲れ強さは、低温の低い平均応力における24.7MPaであった。また、常温の疲れ強さは20.8MPaで、静的強度が同等の鋼製ボルトやステンレス鋼ボルトに比べ耐疲労性が若干劣ることが分かった。

高温での時間強さ及び疲れ強さは、平均応力が高く、繰返し数が多くなるにしたがい急激に低下し、高い平均応力では疲れ強さは0に近くなった。また、この破断面には応力腐食割れと観られる粒界破面があった。

最後に、本研究の遂行に当たり、多大な御協力を頂いた有限会社トリテクノ社長松木啓介氏、元東京電機大学生里島祐也氏、福田和雄氏には、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) JISハンドブックねじ：日本規格協会
- 2) JISハンドブック非鉄：日本規格協会
- 3) 大西忠一：熱処理，32巻，2号，83，(1992).
- 4) 松木啓介：日本ねじ研究協会誌，26巻，1号，12-13(1995).
- 5) 北川英夫ほか：破壊力学と材料強度講座15フラクトグラフィ，132，(株)培風館(1977).
- 6) 山本晃：ねじ締結の理論と計算，108，(株)養賢堂(1972).
- 7) 松木啓介：ねじ締結“新”常識のうそ，46，日経BP社(1996).
- 8) 日本ねじ研究協会：ねじ締結ガイドブック強度編，68，(1992).

(原稿受付 平成12年8月1日)