UDC 531. 46 : 669. 14. 018. 295 : 621. 882.6 : 539. 42. 13

摩擦接合用高力ボルトの 遅れ破壊強度に及ぼす形状の影響

齊 藤 誠*

Effect of Shapes on the Delayed Fracture Strength of High Strength Friction Grip Bolts

Makoto Saito

Synopsis

As one of trial improvement of delayed fracture strength of high strength friction grip bolt, the mitigation of stress concentration of each part of bolt was carried out and there obtained the following results.

- (1) By cutting off incomplete thread up to effective diameter, the delayed fracture life can be extended.
- (2) The fine thread with bigger area of core section is more excellent than the coarse thread, but the effect is small in large diameter.
- (3) The delayed fracture strength is better if the thread root radius is larger.
- (4) Larger radius of head-to-shank fillet is desirable.
- (5) The usage of self-aligning nut is effective for the mitigation of the bending stress which grows in tightening and the said usage extends the delayed fracture life.

1. は し が き

摩擦接合用高力ボルトは、高強度化の要求はあるがF13T級の高力ボルトで遅れ破壊による折損が生じたTable 1. Positions of occurrence of delayed fracture observed in F13T high strength bolts.

Position of fracture	① Incomplete thread	② Complete thread	③ Fillet	④ Shank	Total
Number of fractured bolts	66	24	5	6	101
Ratio	65.3	23.8	5.0	5.7	100%

昭和46年12月5日受付

* 大同製鋼株式会社 研究開発本部 中央研究所

ため、現在F11T級までの使用にとどまっている。しかし橋梁に使われる鋼板はますます高強度化する傾向にあり、F13T級以上の遅れ破壊的に安定な高力ボルトの出現が望まれている。この要求に答えるため各方面でボルト材質の開発が鋭意進められている。一方、遅れ破壊を起した約100本のF13

Tボルトをその折損部位別に分離してみるとTable 1の如くになり、安部¹⁾が指摘しているように、応力集中の大きい①不完全ねじ部、および②ナットのかかり始めの第1ねじ山などが破壊発生の大半を占めている。表中で応力集中のない④シャンク部から折損しているものも6本あるが、これらは表面の孔食からクラックが発生したものと考えられ、応力集中が原因にな

っているとみなされる。このように折損が応力集中部に多いのは遅れ破壊現象が応力集中の程度に依存するためであり^{2), 3)}、この点疲労破壊と相通ずるところがある。ボルトの遅れ破壊の場合には降伏点に近い応力で締付られるため、ねじ谷底で一部塑性降伏が起っ

ている可能性があるが、疲労の場合には塑性変形を伴わない低応力の繰返状態で論じられるので、両者を同

Table 2. Chemical composition of material used.

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Ti
0.21	0.75	1.20	0.013	0.020	0.13	0.11	1.50	0.08

Table 3. Mechanical properties of material used.

0.2% Proof stress	Tensile stress	Elongation	Reduction of area	Hardness H_{RC}
123.7kg/mm ²	154.7kg/mm ²	14.0%	53.2%	44.2

Heat treatment : 850°C Oil quenched
300°C Tempered

一視して取扱うわけにはゆかない。しかし応力集中の緩和という面からみれば、ボルトの疲労強度の改善に用いられているいくつかの方法が利用できるのではないと思われる。このような観点にたつてボルトの応力集中の緩和が遅れ破壊強度に及ぼす影響を調べたのでその結果について報告する。

Fig. 1. Sketch of testing apparatus.

2. 供試材および試験方法

供試材としては、Table 2 に示すような低炭素 S_1 -Mn-Cr 鋼を用い、形状変更の効果をはっきりさせるため比較的遅れ破壊感受性の高い状態として、引張強さ約 155kg/mm² に熱処理したものをを用いた。その機械的性質を Table 3 に示す。

Fig. 1 に示すような試験装置に試験片を装着し、0.1N-HCl 水溶液中で引張荷重を負荷し破断までの時間を測定した。引張装置としてはレバー型の 4 ton および 50ton 容量のものをを用いた。

3. 実験結果

3.1 ねじ切上り部の形状

Table 1 からわかるように、ねじ切上りの不完全ねじ部が一番遅れ破壊的に弱い。これは転造ねじであっても不完全ねじ部には Photo. 1 に示すような鋭い切欠が生じ、この高い応力集中が原因で遅れ破壊クラックが発生するためと考えられる。不完全ねじ部に生じるこのような鋭い切欠は、ブランクの絞り方と転造ダイスの端面形状を工夫することによってかなりの程度まで鈍化することができるが、本実験では耐疲労用ボルトでよく採用されている移行溝の効果に着目し、遅れ破壊強度に対するその効果を検討してみた。

3.1.1 試験片

試験片は、Fig. 2(A)に示すような両端 55mm に M 22(P=2.5) ねじを転造した長さ170mmのねじ棒を基本型とし、この不完全ねじ部を、(B)有効径、(C)谷底径 (d_1)、および(D)アンダーカット ($0.96d_1$) の3種類の深さに削り込んで移行溝を形成したものである。試験片の形状をそれぞれ Fig. 2(A)~(D)に示す。移行溝の巾はねじの呼び径の半分の 11mm に一定とした溝のフィレット半径は、形状 (B)、(C) および (D) についてそれぞれ 0.8、1.4、および 1.8mm とした。

Photo. 1. A sharp notch observed at the incomplete thread. (M22, F11T)

試験片はすべて Fig. 2 の形状に加工後熱処理した。

3. 1. 2 実験結果

0.1N HCl 水溶液中での各形状の試験片の遅れ破壊寿命を Table 4 に示す。基本形のボルト A 型にたいし、不完全ねじ部を有効径まで削込んだ B 型は寿命が 50% 程度長くなっており移行溝の効果認められる。移行溝を谷底径あるいはアンダーカットに深く削込んだ C あるいは D 型も、改善の効果はあるが B 型より劣っている。応力集中の緩和の点からは C あるいは B

Table 4. Effect of the transfer groove shapes on the delayed fracture life.

Series	Shape of transfer groove	Ultimate strength of bolts	Fracture life	
			ton P=30	ton P=20
A	Conventional type	46.1ton	6.1hr	11.0hr
B	Cut off to effective diameter	46.0	10.35	18.7
C	Cut off to minor diameter (d_1)	45.8	9.9	13.3
D	Cut off to $0.96d_1$	45.3	8.2	14.8

P : applied load

Fig. 2. Shapes of transferred grooves.

D 型の方が有利であるが、移行溝を深くすると断面積が減少するため応力が増加し、応力集中の緩和効果が相殺されてしまうためと考えられる。

Photo. 2 に破断したボルトの外観を示すが、A 型は不完全ねじ部から破断しているのにたいし、B 型では完全ねじ部から破断しており移行溝による不完全ねじ部改良の効果が現われている。C 型は移行溝から完全ねじ部へ移るファイレットから、また D 型は移行溝からシャンク部へ移るファイレットからそれぞれ破断している。

以上の結果から、有効径程度の深さまで移行溝を入れることは遅れ破壊寿命を延ばすのに有効であることがわかった。これは移行溝によって不完全ねじ部の応力集中が緩和されるためと考えられる。移行溝を深くすると断面積が減じ、導入力を一定とした場合、引張応力が増して遅れ破壊寿命の増加の程度が減ずる。また実用上にはボルトの締付けトルクによって、振り応力が増加する点にも注意を要する。

3. 2 ピッチおよびねじ谷底半径の影響

細目ねじが並目ねじに比べて疲労強度が優れていることは衆知のことであり、また高力ボルトにおいて細目ねじを使えば高い締付け力を許容できるという報告があり⁴⁾、細目ねじは並目ねじに比べて優れている点が多い。細目ねじは同一呼び径の並目ねじに比べて有効断面積が大きいこと、ねじ溝を一つのクラックと考え

Photo. 2. Fracture positions of tested bolts in 0.1N-HCl (Load=30ton)

れば細目ねじの方がクラックの長さが短いことになり、クラックの伝播に対しても有利になると考えられる。

ねじ谷底半径については、やはり疲労強度の面から多くの文献が谷底半径の大きい方が優れているとしており、円弧ねじ、75%ねじ⁵⁾、($r=0.180P$, r :谷底半径, P :ねじピッチ)などが提案あるいは規格化されており、さらにベリリウムのように切欠感受性の高い材料では55%ねじ ($r=0.267P$) が有効であることも報告されている⁶⁾。このようなピッチや谷底半径の影響について遅れ破壊の面から検討された例がみあたらないので、疲労強度におけるのと同様な効果が期待できるか否かを検討してみた。

3. 2. 1 試 験 片

ピッチの影響の検討は、M6ねじ棒(ピッチ0.5および1.0mm)ならびにM22ねじ棒(ピッチ1.5および2.5mm)の2種類の寸法で行なった。

谷底半径の影響をみるため、Photo. 3に示す形状のねじ山をM22ねじ棒に加工して実験に供した。A型は改正前のJISの比較的谷底半径の鋭いもの、B型は新JIS型(1965年改訂、谷底半径の規定が外されているが谷底径が大きくなっている)ので必然的に谷底半径が大きくなる、C型はStripping strength

Photo. 3. Profiles of threads (M22)

が低下しない限界のねじ山の強度をとった55%ねじである。D型はねじ山形状をB型と相似にし、ピッチのみを1.5mmと細目にしたものである。各ねじの寸法をTable 5に示す。

Table 5. Dimension of test threads.

Basic size	Pitch mm	Minor dia. mm	Root radius mm	Kt *
M 6	0.5	5.46	0.054	3.51
	1.0	4.92	0.108	3.51
M22	2.5	18.75	0.24	3.50
	2.5	19.29	0.54	2.78
	2.5	19.55	0.67	2.61
	1.5	20.38	0.32	2.91

* Kt : by Neuber (for multiple notches)

3. 2. 2 実 験 結 果

Fig. 3にM6ねじ棒の遅れ破壊曲線を示す。図にみられるように並目ねじに比して細目ねじの強度は明らかに高く、100時間で破断しない限界の荷重(以下遅れ破壊限界荷重とよぶ)を比較すると70%高い値となっている。M6細目ねじの谷底断面積は並目ねじのそれに比べ31%大きい、谷底断面積で遅れ破壊限

Fig. 3. Effect of thread pitch on the delayed fracture life in 0.1N-HCl.

界荷重を除いた値（以下遅れ破壊限界応力とよぶ）の
上昇率は断面積の増加率を上回っている。

Fig. 4. Effect of pitch and root radius on the delayed fracture life in 0.1N-HCl.

Fig. 4 は M22 ねじ棒の遅れ破壊曲線を示す。負荷重が高く曲線の勾配が急なところではネジ山形状による遅れ破壊寿命の差異は明瞭ではないが、低荷重域では谷底半径の大きなものほど優れており、限界荷重にははっきりした差が認められる。Fig. 5 はねじ谷底の応力集中係数 (Neuber の多重切欠で近似) に対する遅れ破壊限界応力をプロットしたものであるが、明らかに応力集中の小さなねじ山形状のものは遅れ破壊限界応力が高い。D 型の細目ねじのものは、A, B, C の 3 つの並目ねじの遅れ破壊限界応力に比べて低い値となっており、M6 の小径ねじで得られたような強度上昇効果は現われておらず、むしろ谷底断面積増加の効果を下回っている。

以上の結果から、ねじ山形状、特に谷底半径の影響が大きく、谷底半径の大きいものほど遅れ破壊強度は優れているといえる。ピッチを細かくする効果が、ボルト小径と大径ボルトとで逆な結果となったが、この原因については明らかでない。

3.3 首下半径の影響

橋桁の下フランジではボルトの頭が下方になるよう

Fig. 5. Effect of stress concentration by thread root radius on the delayed fracture strength.

に締付けられるので首下に水分がたまりやすく首トビが生じやすいといわれる⁷⁾。低強度の炭素鋼ボルトに比べ熱処理された合金鋼ボルトは首下半径を大きくしなければならぬことは疲労強度の面でも強調されているが、応力集中の緩和の点からみると、これが遅れ破壊強度の改善にも役に立つであろうことは容易に類推できる。そこで首下の応力集中度と遅れ破壊強度との関係を見るため次のような実験を行なった。

3.3.1 試験片

首下半径の影響をみるためには実体ボルトの首下半径をいろいろ変化させて試験するのが望ましいが、座金を介して引張るため首下への液のまわりが悪く実験の完全が期し難い。そこで Fig. 6 に示す小型の段付丸棒試験片をもって代用した。図中の①, ②, ③の試験片は 6φ と 12φ の段違い部分に、それぞれフィレット半径 (ρ) 0.25, 0.6 および 1.7mm の丸味を付けたもので、このうち ② ρ=0.6mm のものは J I S 摩擦接合用ボルトの首下の応力集中度 (約 2.0) 合せたものである。④, ⑥はフィレット半径を 0.6mm に固定し肩の直径を 7.2mmφ および 18mmφ に変え応力集中度を変化させたものである。⑥は応力集中の小さい条件を得るため、特に半径を 10mm と大きくしテーバー接続したもので応力集中係数は 1.13 である。

Fig. 6. Test specimen with shoulder fillet.

試験片の両端に切った M20 のねじ部をチャックにねじ込み、Fig. 1 に示す装置に組込んで 0.1N-HCl 水溶液中に浸漬し破断までの時間を測定した。

3. 3. 2 実験結果

Fig. 7 に各段付丸棒の 0.1N-HCl 水溶液中での

Fig. 7. S-T curves of the test specimen with various shoulder fillet radii in 0.1N-HCl.

遅れ破壊曲線を示す。フィレット半径の大きいものは高い強度を示しており、またフィレット半径が一定の場合には平行部と肩部の直径差の小さいものほど遅れ破壊強度は高い。各形状の応力集中係数を横軸に、100hr 遅れ破壊限界応力を縦軸にとって整理した結果が Fig. 8 である。図にみられるように応力集中係数にたいして比較的良好な直線関係を示しており、応力集中係数の小さいものほど高い強度を示している。

遅れ破壊強度に及ぼす応力集中の影響についての Troiano²⁾ 等、山本・藤田³⁾の報告でもやはり応力集

Fig. 8. Effect of stress concentration by shoulder fillet radius on the delayed fracture strength.

中の高いものは遅れ破壊強度が低下すると論じているが、彼等の実験では比較的遅れ破壊を促進する環境の作用が弱くかつ材料の延性が高い場合には、いわゆる切欠強化が生じるため応力集中係数 1~4 の範囲でむしろ平滑丸棒より高い遅れ破壊強度を示しており当実験結果と相異している。これは、当実験に使用した材料が遅れ破壊感受性の高い材料であり、かつ環境の遅れ破壊促進作用も 0.1N-HCl と苛酷なため切欠強化が起らず応力集中が増すとともに単調に遅れ破壊強度が低下したためと考えられる。ボルト首下について考えてみても、機械加工によって生じる鋭い疵が形状的な応力集中と重って 2 重切欠を形成しきわめて高い応力集中を引起すことは容易に想像されるので、首下半径を大きくし応力集中を低く抑えることは遅れ破壊強度の向上に有効なことといえる。

3. 4 球面座金の効果

ボルトの締付施行にあたっては、ボルト穴の食違い、鋼板の段違い、曲りなどのために、ボルトが板にたいして直角に締付られず、首下面あるいはナット下面が板に対してある角度をもって締付られることが少なくない。またボルト自身の曲り、ボルトの首下面およびナット座面の軸心にたいする傾きなどもこれらの傾向を助長し局部的な応力の上昇をもたらす。特に摩擦接合用ボルトは太く短いので締付によって大きな曲げ応力を生じやすく、これが断面曲げ剛性の小さなねじ部に集中し、この部分の折損率を更に高める原因になっていると思われる。

板の表面とナット座面との傾斜を解消するには、球面座ナットとワッシャーの組合せが有効と考えられる。ジグ用六角ナット (JIS B5226) には球面座付きナットが制定されており、R. Ollis⁸⁾ も表面のくさび角による導入力の低下および疲労寿命の低下が球面座ナットの採用によって著しく緩和されることを紹介している。また英国では橋梁用ボルトとして、球面座ナットとワッシャーの組合せ、および首下座面の球面化したものなどが一部使われており、その効果が期待できるものと思われる。そこで以下表面くさび角に対する球面座金の効果を検討してみた。

3. 4. 1 試験片および試験方法

試験に用いたボルトは、市販の $W\frac{7}{8}$ " の F11T ボルトで材質は SCM3 である。これに Fig. 9 に示

Fig. 9. Self-aligning nut and washer.
(for $W\frac{7}{8}$ ")

す球形の球面座ナット・ワッシャーを組合せ実験に供した。また比較のため通常の六角ナット・平ワッシャーの組合せも同装実験した。

遅れ破壊試験としては Fig. 10 に示す寸法の締付体

Fig. 10. Plain and wedged plates for testing the conventional and self-aligning nuts.

にボルトを 21ton の標準導入力で締付けた後、0.1N-HCl 水溶液を入れた液槽に浸漬し破断までの時間を測定した。液は 24hr 毎に新しいものを入換えた。締付状況を Photo. 4 に示す。

Photo. 4. Photographs of bolts tightened to various wedge angle plate with self-aligning nuts.

Fig. 11. Torque-strain curves of bolts tightened with conventional and self-aligning nuts.

遅れ破壊試験にさきだちボルトの軸部に4枚の塑性歪ゲージを貼付け、締付トルクと各ゲージの歪量との関係を求めるとともに、4枚のゲージの算術平均歪を基準に所要締付トルクを求めた。

3. 4. 2 実験結果

Fig. 11 に一般ナットと球面座ナットの $0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 8^\circ$ 各くさび板に締付けた場合の軸歪を示す。一般ナットでは板のくさび角が増すにつれて著しく4つの軸歪間に差を生じ大きな曲げが発生しているのがわかる。これにたいし球面座ナットを用いた場合は一般ナットに比べて著しく曲げが緩和されている。なおくさび角 8° のものは球面座の効果も失われている結果になっているが、これはくさび角が 8° にもなると座金の内面とボルト表面が接触し、球面座では追従できなくなってくるためである（遅れ破壊試験の場合には座金の内面を削り取って実験した）一般ナットを使ってくさび角 0° すなわち平板を締付けた場合には、板による曲げが生じないため本来4枚のゲージの歪は同大でなければならないが、図にみられるように相当量の違いが生じている。これは前述したようにボルト自体の曲げおよび首下座面の傾きに起因しているものと考えられる。球面座ナットを使った場合には平板締付の場合にも歪は4枚ともに良く揃っており、ボルト自体に原因する曲げの緩和にも有効であることがうかがえる。

Fig. 12 に一般ナットと球面座ナットの $0.1N-HCl$ 中での遅れ破壊寿命を示す。縦軸が破断時間、横軸がくさび角である。一般ナットを使って締付けたものは、くさび角 0° でも4本中3本破断しており、 $2 \sim 8^\circ$

Fig. 12. Effect of self-aligning nuts on the delayed fracture of bolts tightened to wedged plate in $0.1N-HCl$.

のくさび角のものはそれぞれ4本とも破断するかクラックが検出されている。これにたいし球面座ナットを使って締付けたものは、くさび角 $0 \sim 8^\circ$ 全範囲にわたって一本の破断も認められずきわめて良い成績を示している。なお破断時間を比較した場合、くさび角 $4^\circ, 8^\circ$ のものの方が $0^\circ, 2^\circ$ のものより長寿命となっているが、高くさび角締付では高応力側で発生したクラックが断面の低応力側に進むにつれ伝播速度が鈍るためと考えられる。

以上の結果から、球面座ナット・ワッシャーによる曲げ応力の緩和は遅れ破壊寿命改善にきわめて有効であるといえる。

摩擦接合ボルトは、首下座面およびナット座面の傾きがそれぞれ 1° まで許容されていること、ボルト穴とボルト径にクリアランスがあるので主板と点接板とが食違った場合にボルトが斜めに装入されることがあるなど、実際の施行にあたっては、 $0^\circ \sim 3^\circ$ 程度のくさび角を持って締付られる可能性が十分ある。このような場合に球面座ナット・ワッシャーの効果はきわめて大きいものと考えられる。

● 4. ま と め

摩擦接合用高力ボルトの遅れ破壊強度改善の試みとして、ボルト各部の応力集中を緩和するような二、三の方法について実験的に検討したところ、次の結論が得られた。

- (1) ねじ切上りの不完全ねじ部は、この部分を有効径まで除去することによって遅れ破壊寿命を延ばす

ことが可能である。

- (2) ねじピッチは、谷底断面積の大きい細目ねじの方が並目ねじより優れているが、太径ボルトでは小径ボルトに比べ効果が小さい。
- (3) ねじ谷底半径を大きくすると遅れ破壊強度の改善が著しい。
- (4) ボルト首下の隅肉半径は大きい方が望ましい。
- (5) 球面座ナット・ワッシャーの採用は、ボルト締付時に発生する曲げ応力緩和に有効であり遅れ破壊寿命を延ばす。

上記(1)~(5)は、一定鋼種、一定促進環境下での遅れ破壊特性について得られた結果なので、他の鋼種あるいは異なった環境下での遅れ破壊強度特性の改善にそのまま適用できるか否かはさらに検討の要があるが、簡単な形状変更でかなりの効果が期待できるので、今後の応用を考えてゆきたい。

(文 献)

- 1) 安部：ねじと技術 7 (1966) 5, 19
- 2) H. H. Johnson, J. G. Morlet and A. R. Troiano : Trans. of The Metallurgical Society of AIME, 212 (1958) 8, 528
- 3) 山本, 藤田：神戸製鋼技報 18 (1968) 3, 93
- 4) 安部：ねじと技術 7 (1966) 2, 4
- 5) M I L—S8879
- 6) N. P. Chironis : Product Engineering, Nov. 14, 1960
- 7) 松山：鉄道技術研究所速報 No. 70—119, (1970)
- 8) R. Ollis : Machine Design June 21, 1962