



## ボルトの疲れ破壊

ボルトの破断には種々の形態がありますが、破断事故のなかでは、疲れ破壊が最も多いといわれています。ボルトの疲れ破壊は、破断起点に亀裂が発生した後、破断に到るまでに、かなりの時間がかかり、その間外観では破断進行の確認ができないため、とりわけ高強度ボルトでは大きな事故につながる可能性があります。

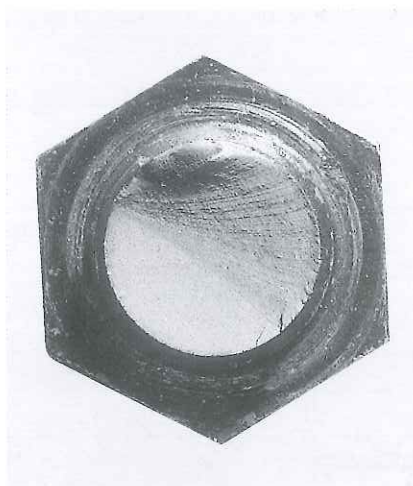
### ボルトの疲れ破壊現象

締結ボルトに変動荷重が繰り返し作用する場合、荷重の大きさがボルトの弾性限界内であっても、ボルトが破断する場合があります、これをボルトの疲れ破壊（疲労破壊）といいます。破断の進行はボルトが変動荷重を受けるうちにボルト表面に起点となるべき亀裂が発生し、荷重が繰り返すことにより亀裂が徐々に拡大してゆき、残りの断面積の部分が全荷重に耐えきれなくなり破断に到ります。この繰り返し荷重により亀裂が進行したり、停滞したりすることにより破断面は特徴のある形態を示します。

図1 ボルトの破断面外観



ねじり破断



疲れ破断

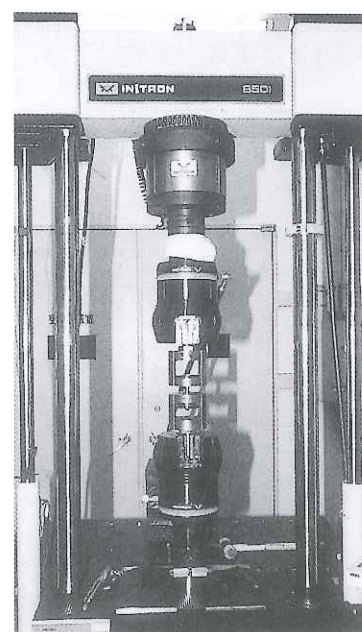


図1は、ねじり破断したボルトと疲れ破壊したボルトの破断面外観写真を示します。

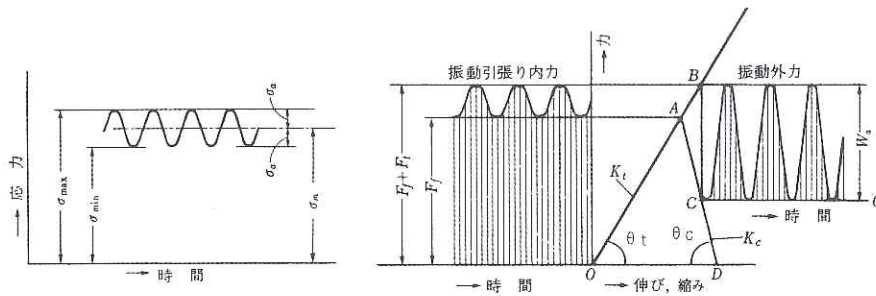
疲れ破壊した破断面は、繰り返し荷重の作用により開いたり閉じたりするため、破断面は貝殻状の縞模様（ビーチマークといいます）が生じます。（但しボルトの場合は、締結物に締付けられているため、ボルト軸には、常に引張り力が働いており、繰り返し荷重により、破断面が開いたり閉じたりする程度は小さく、また繰り返し荷重も複雑な場合が多いため、ビーチマークは認められない場合が多くなります。）

### 疲れ限度

締結ボルトに繰り返し荷重が作用するとき、無限の繰り返しに耐えられる応力の上限值を疲れ限度（疲れ強さともいう）と呼んでいます。

一般に締結ボルトの疲れ限度は、図2に示す平均応（ $\sigma_m$ ）と応力振幅（ $\sigma_a$ ）の関係で実施した疲れ試験より求めますが、実験的には $N = 5 \times 10^6$ 回までの繰り返し荷重が作用しても破壊しなければ、そのときの応力振幅 $\sigma_a$ を疲れ限度といいます。

図2 振動外力とそれによってボルトに発生する振動引張り内力



$\sigma_m$  : 平均応力

$\sigma_a$  : 応力振幅

$$\sigma_{max} : \frac{F_t + F_t}{A_r}$$

$$\sigma_{min} : \frac{F_t}{A_r}$$

$F_t$  : 締付け力

$F_t$  : 外力が作用したときにボルトに追加される引張り内力

$W_a$  : 軸方向外力

$K_t$  : ボルト接合の引張りばね定数

$K_c$  : 被締付け物の圧縮ばね定数

$A_r$  : ボルトの谷の断面積

図3は、疲労試験によって測定した応力振幅 ( $\sigma_a$ ) と応力の繰返し数 ( $N$ ) の関係を示します。(この関係をS-N線図又は、ウェーラ線図といいます) 本試験結果より、疲れ限度 ( $\sigma_a$ ) は57N/mm<sup>2</sup>が読み取れます。そして各呼び径ごとに試験したS-N線図より読み取った六角穴付きボルト12.9の疲れ限度 ( $\sigma_{wk}$ ) を図4に示します。

ボルトの疲労破壊条件は、ボルトの締付け軸力や繰返し応力条件により異なるため、設計に当たっては実験試験等により、疲労破壊状況を把握しておくことが望まれます。

図3 S-N曲線

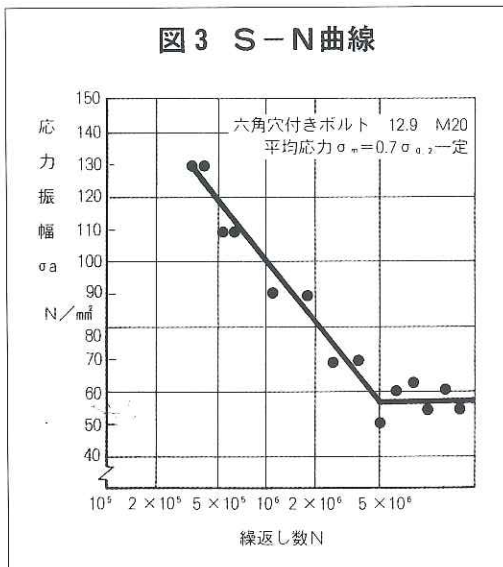
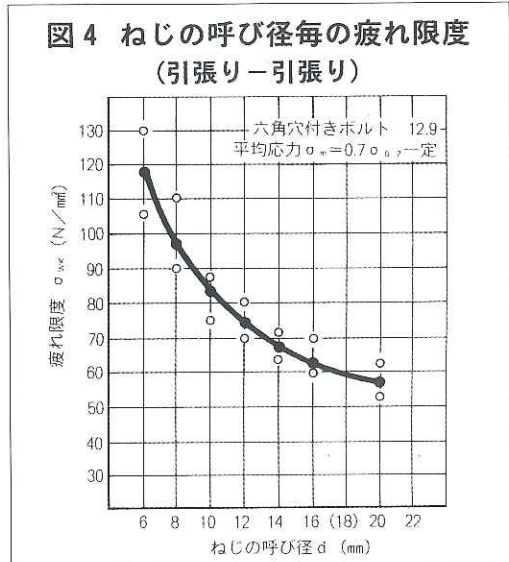


図4 ねじの呼び径毎の疲れ限度 (引張り-引張り)



## 疲れ破壊の向上策

現実的な疲れ破壊向上のためには、例えば下記の方策が考えられます。

### 1) ボルトの内外力比を小さくする

ボルト締結体に作用する外力に対する、ボルトに追加される引張り内力の比 (ボルト内力係数という。図2では  $F_t/W_a$  で表される) を小さくするとよい。

このことは図2において、 $K_t \propto \tan \theta_t$  を小さく、 $K_c \propto \tan \theta_c$  を大きくすればよいことを意味します。簡単にいえば、ボルトが伸び易く被締付け物は縮みにくくすればよいということになります。

### 2) 適正締付け力の確保と維持

初期締付け力が低かったり、初期締付け力が適正でも、ゆるみにより締付け力が低下すると、疲れ限度が低下します。

### 3) 細目ねじの使用

細目ねじの方が並目ねじと比較して、ねじ部の有効断面積が大きい分だけ荷重の負担が軽減されます。

### 4) おねじとめねじのはめあい長さを長くする

はめあい長さが増えることにより、ねじ山の荷重の負担が軽減されます。

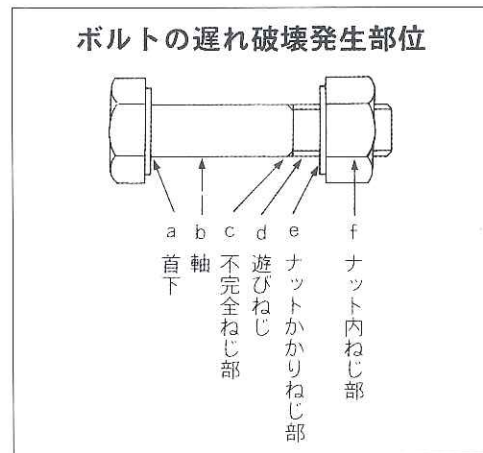




## ボルトの遅れ破壊

遅れ破壊とは、高強度鋼部品が常温で静的な引張りまたは曲げの負荷応力を受けた状態である時間を経過したとき、外見上は殆ど変形を伴うことなく、突然脆性的に破壊する現象をいいます。破壊は短時間に進むのではなく、実際には切欠き部や応力集中部に亀裂が発生し、それが数分から数年にかけて、徐々に進行します。

ボルトの遅れ破壊は、引張りの強さが $1200\text{N}/\text{mm}^2$ 、また、硬さがロックウェル硬さで40HRCを越えると遅れ破壊感受性が高くなるといわれており、その破壊部位は応力集中部である頭部首下部、不完全ねじ部、ナットかかりねじ部に多く発生します。



遅れ破壊の特徴は、前述しました様に伸びや絞りなどの変形のほとんどない脆性破壊であると同時に、破断面を詳細に観察しますと結晶粒界に沿って破壊が進行する粒界破壊が認められます。図1は遅れ破壊による粒界破断面を示します。

図1 破壊破断面

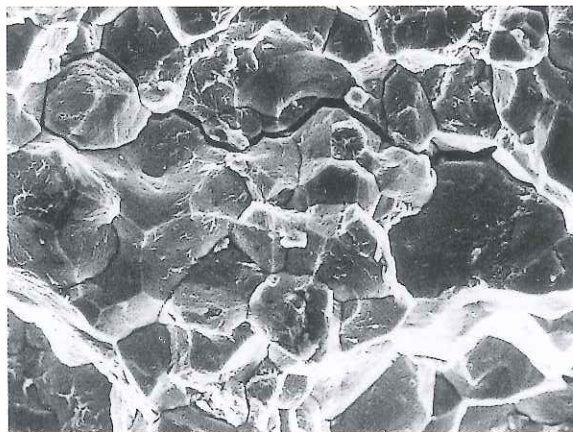
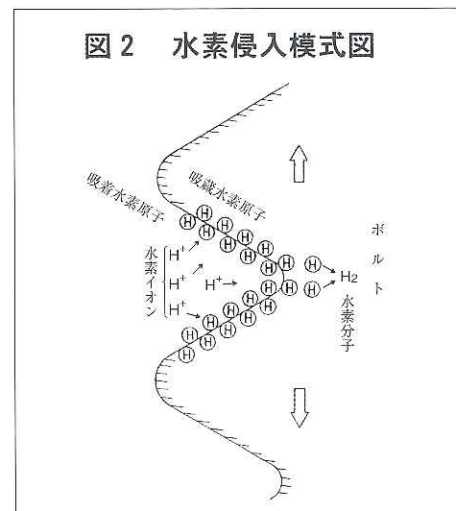


図2 水素侵入模式図



遅れ破壊の発生原因は、水素脆性といわれており、これは、ボルト外部で発生した水素が鋼中（ボルト内部）に侵入し、鋼中の結晶粒界中で水素分子に結合した際、内部圧により粒界破壊が発生するといわれております。ボルト外部で発生した水素は、例えば、雨水とボルトの腐食反応や電気めっき処理工程中のボルトと酸との反応より発生します。

## 遅れ破壊対策

①水素の発生及び侵入を阻止する方法と、②侵入した水素を除去する方法がありますが、前者の方法が有効です。

水素の発生、侵入阻止のためには、塗装や油塗布など十分な防錆管理を実施することが必要です。

侵入水素の除去のためには、一定時間加熱する脱水素処理（ベーキング）が有効です。当社では、電気亜鉛めっき品については、強度区分10.9の製品については脱水素処理を実施しております。また、強度区分12.9を超えるボルトについては、電気亜鉛めっき処理を施しておりません。



ボルトのゆるみとは、ボルトの初期締付け力が時間の経過や外力の作用により低下することをいいます。

ゆるみは、ボルトが戻り回転しないで生じるものと、戻り回転して生じるものに大別されます。ボルトにゆるみが発生しますと、締結体の剛性低下はもちろん疲れ破壊やボルトの脱落等締結部に大きな問題が発生する恐れがあります。

戻り回転なしのゆるみには、初期ゆるみ及び陥没ゆるみが代表的なゆるみとなります。

## (1) 初期ゆるみ

ボルト締結体の接合部は、微視的な凹凸やうねりが締付け後の時間経過により、へたりが発生すればこのゆるみが発生します。また使用中の外力作用により、へたりが進行する場合にも初期ゆるみが発生します。

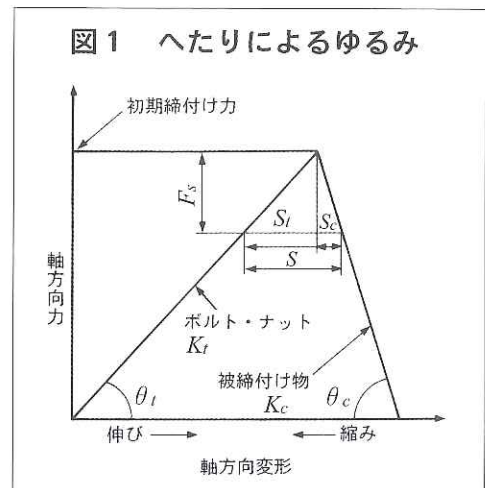
へたりは、締付け中に大部分生じてしまうのが普通で、使用中の外力作用によるへたりは小さいという傾向があります。いま、ボルト締結部におけるへたり量Sによる初期締付け力の低下をFsとすると、

$$F_s = \frac{F_t}{\tan \theta_t} + \frac{F_c}{\tan \theta_c} \quad (1)$$

となり、ボルト・ナット系のばね定数を $K_t$ 、被締付け物のばね定数を $K_c$ とすると、図1より、 $K_t = \tan \theta_t$ 、 $K_c = \tan \theta_c$ であるから、(1)式より

$$F_s = \frac{K_t K_c}{K_t + K_c} \cdot S = Z \cdot S \quad (2)$$

となり $Z = \frac{K_t K_c}{K_t + K_c}$ をユンカーのへたり係数といいます。



へたり量は、通常の締結では $10 \mu\text{m}$ 程度以下といわれておりますが、ボルトの呼び径(d)に対する締付け長さ(lf)の比(lf/d)が小さい程、へたり係数(Z)が大きくなり、初期ゆるみが発生しやすくなります。

## (2) 陥没ゆるみ

ボルト締結体の座面部における面圧(座面圧力)が高すぎると、小さな表面の凹凸が多少平坦化する程度を超えて、被締付け物の接触部表面が塑性変形します。これが締付けの際にだけ生じるものであれば特に問題ありませんが、締付け後に時間経過するクリープや外力の作用のために更に進行する場合は重大です。

このゆるみは、ボルトの最大軸力から計算される座面の面圧 $P_w$ が被締付け物の面圧許容値(限界面圧という)PLより小さければ発生しません。

$$P_w \leq P_L \quad (1)$$

いまボルトの最大負担応力をボルトの耐力 $\sigma_{0.2}$ とすれば、(1)式は

$$\sigma_{0.2} \cdot A_w \leq P_L \quad (2)$$

となり、座面設計が可能です。ここで $A_w$ はボルト座面の面積を示します。各種材料の限界面圧を表1に示します。



表1 各種材料の限界面圧

(ユンカー)

材 料			引張り強さ (N/mm <sup>2</sup> )	限界面圧 (N/mm <sup>2</sup> )
種 類	ドイツ規格	相当 JIS		
低炭素鋼	St37	S10C	370	260
中炭素鋼	St50	S30C	500	420
熱処理炭素鋼	C45	S45C	800	700
CrMo鋼	42CrMo4	SCM440	1000	850
ステンレス鋼	×5CrNiMo1810	SUS316	500~700	210
鑄 鉄	GG15	FC150	150	600
	GG25	FC250	250	800
	GG35	FC350	350	900
	GG40	—	400	1100
Mg合金鑄物	GDMgA19	MC2	300 (200)	220 (140)
	GKMgA19		200 (300)	140 (220)
Al合金鑄物	GKAISi6Cu4	AC2B	—	200
Al合金	A199	A1200	160	140
	AlZnMgCu1.5	A7075	450	370
FRP	—	—	—	120~140

備考 動力締付けの場合には、限界面圧は25%低下することがある。

### (3) 戻り回転によるゆるみ

ボルト締結体に振動や衝撃の外力が作用する場合、ボルトまたはナットが戻り回転してゆるみが発生することがあります。外力の作用方向は軸直角方向と軸回り方向及び軸方向の3種類があります。

ボルトの戻り回転は現実には外力の作用が複合的に作用することが多く、試験ではその再現が難しいため、その原因や機構が完全に解明されていないのが現状です。

### ゆるみ防止の考え方

ゆるみ防止に関しては確実な方法はありませんが、ゆるみ防止に効果があるものとして、

- ①初期締付け力の増大
- ②外力の作用を小さくする配慮
- ③ボルトの弾性変形能力の増大
- ④適切なゆるみ止め部品の併用

などが考えられます。