



接触応力下の疲労

目次

1. 接触応力下の疲労とは	1
2. 転動疲労	1
3. フレッシング疲労	3

疲労強度に関連する以下の技術ナビお役立ち資料、コンテンツもあわせてご覧ください。

- [ねじ締結体のトラブル 原因と対策 ー疲労破壊編ー \(技術資料\)](#)
- [組合せ応力下の疲労 \(技術資料\)](#)
- [組合せ応力下の疲労寿命とその予測](#)
- [低サイクル疲労の基礎知識](#)
- [非鉄金属材料の疲労](#)
- [プラスチックおよびセラミックスの疲労](#)
- [変動応力の評価 \(金属疲労\)](#)
- [ねじ締結体の疲労強度 \(軸直角方向外力の場合\)](#)
- [応力評価の方法 \(金属疲労\)](#)
- [S-N曲線の測定 \(金属疲労\)](#)
- [疲労試験の仕方 \(金属疲労\)](#)
- [表面効果の影響 \(金属疲労\)](#)
- [切欠き効果の影響 \(金属疲労\)](#)
- [平均応力の影響 \(金属疲労\)](#)
- [ねじ締結体の疲労強度 \(金属の損傷\)](#)
- [実機材の疲労強度 \(金属の損傷\)](#)
- [疲労破壊 \(金属の損傷\)](#)



ハードロック工業株式会社

1. 接触応力下の疲労とは

機械部品においてころがり接触しながら荷重伝達する接触表面では、摩耗さらにはき裂発生、はく離といった表面損傷が生じることがあり、転動疲労と呼ばれます。一方、車軸などの機械要素のはめ合い部では接触面で荷重が繰返し作用すると接触応力下の疲労現象であるフレットング疲労が起こることがあります。

転動疲労では接触時に圧縮荷重が繰返し作用することで疲労き裂が発生し進展することではく離が発生します。機械部品としてはころがり軸受や歯車、鉄道車輪などが代表的です。はく離の状態に関して形態的に、ピitting、スポーリング、フレーキング、シェリングなどといった名称で呼ばれたりします。ピittingは、表層部が局所的にはがれる疲労現象のこと、スポーリングは材料中にき裂破壊が発生する現象のこと、フレーキングは表層部がうろこ状にはがれる現象のこと、シェリングはレール表層のき裂損傷に特化した現象のことをそれぞれ意味します。このような接触面に生じるはく離を伴う疲労現象が転動疲労であります。

一方、鉄道車両用車軸や発電タービンなどの機械要素のはめ合い部では繰返し荷重が作用すると微細な相対すべりが発生して摩耗が生じ、さらに疲労損傷である微細なき裂が発生して疲労破壊に至ることがあります。この接触面での微細な相対すべり（フレットング）による摩耗を伴う疲労現象がフレットング疲労であります。

これらの転動疲労やフレットング疲労といった接触部における疲労現象には多くの要因が関わっています。表1に各疲労に影響する主な要因を示します。応力状態、接触状態、材料要因による影響が考えられ、応力状態については接触面圧などの力学的要素、接触状態ではすべり率あるいはすべり量などの表面に関わる要素、また材料要因では硬さなどの材料的要素が要因になります。なお、すべり率はころがり接触する両物体間で周速度差を駆動側の周速度で割った値のことで、すべり量ははめあい部で接触する両物体間のすべり距離のことです。

転動疲労およびフレットング疲労は影響する要因が類似していますが、両者は基本的に異なった破壊機構による現象で、したがって、対策となる疲労設計法も異なります。

表1 接触部の疲労現象に関わる主な要因

	転動疲労	フレットング疲労
応力状態	接触面圧, 接線力, 残留応力	接触面圧, 接線力, 残留応力
接触状態	すべり率, 表面粗さ, 摩擦係数, 潤滑	すべり量, 表面粗さ, 摩擦係数, 潤滑
材料要因	硬さ, 組織, 介在物	硬さ, 組織

2. 転動疲労

先に述べましたように転動疲労はころがり接触する機械部品表面に見られる表面層の疲労損傷現象のことです。

図1は転動疲労についてき裂発生の様子を模式的に示した図で、図1(a)は表面き裂、図1(b)は内部き裂に関するものです。表面き裂に関して、金属粉などの異物混入や潤滑不足による金属接触などによる微細な表面突起が高応力接触状態を発生させ、この集中荷重によってき裂が発生し、引張応力域

でき裂が進展するといった過程が考えられています。そして、この表面き裂を起点とするはく離現象では、き裂の進展量と摩耗量の大きさを比較することがはく離に至るかどうを見極め・検証する上で重要と考えられています。また、接触部に接線力（接線方向に働く力）が作用しない場合には、疲労き裂は表面ではなくて少し内部に存在する大きなせん断応力域で発生することがあります。なお、このような表面き裂の発生と成長はく離に至る現象について現在のところ統一的な見解が確立されている訳ではありません。

一方、内部に酸化物などの介在物が存在する場合、介在物を起点としてき裂が発生し、せん断応力によってき裂が進展すると考えられています。き裂発生に関しては、介在物の大きさや介在物と母相との界面の密着状態などが影響するようです。このため、鉄鋼製造プロセスの改善によって介在物の分布状態や母相との密着状態を改質することで転動疲労寿命の向上を図ることが行われています。

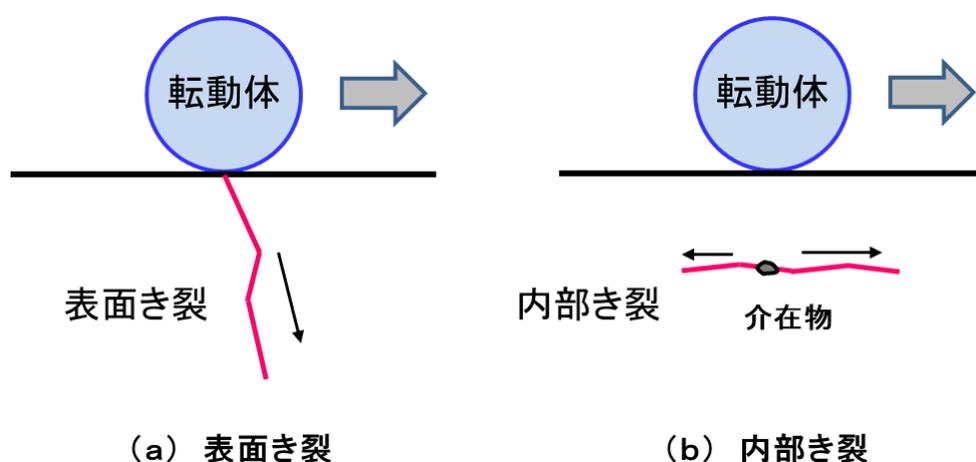


図1 転動疲労のき裂発生の様式図

転動疲労強度に関して、その強度は疲労き裂の発生と成長挙動に依存し、疲労限度が存在します。転動体が移動する毎に相手材には繰返し接触応力（ヘルツ応力）が加わります。転動疲労試験では接触応力とその繰返し数でいわゆる S-N 曲線が求められます。接線力が作用しない場合、転動疲労限度はせん断疲労限度のおよそ 4-5 倍程度の大きさといわれています。転動疲労強度に及ぼす諸因子の影響を簡単に説明します。

接線力が作用する場合、き裂は表面に生じるようになり、また発生応力も高くなって疲労強度が低下します。転動疲労強度は潤滑によって摩擦係数の低下による接線力の低下、潤滑域での金属接触の防止効果によって改善されることが多いです。すべり率については大きくなると摩擦係数も増大して疲労寿命が短くなります。材質面では酸化物系介在物などが存在すると疲労寿命低下の主要因になります。残留応力については圧縮の残留応力が疲労強度を改善します。

図2は鋼の硬さと内部起点型のピitting限度の関係を示した様式図であります。硬さとともに疲労限度が増加し、高強度鋼の使用が転動疲労に対して有効であります。但し、介在物が多いと転動疲労強度も低下するため、高強度鋼の製造プロセスにおいて介在物を低減することが非常に重要であります。

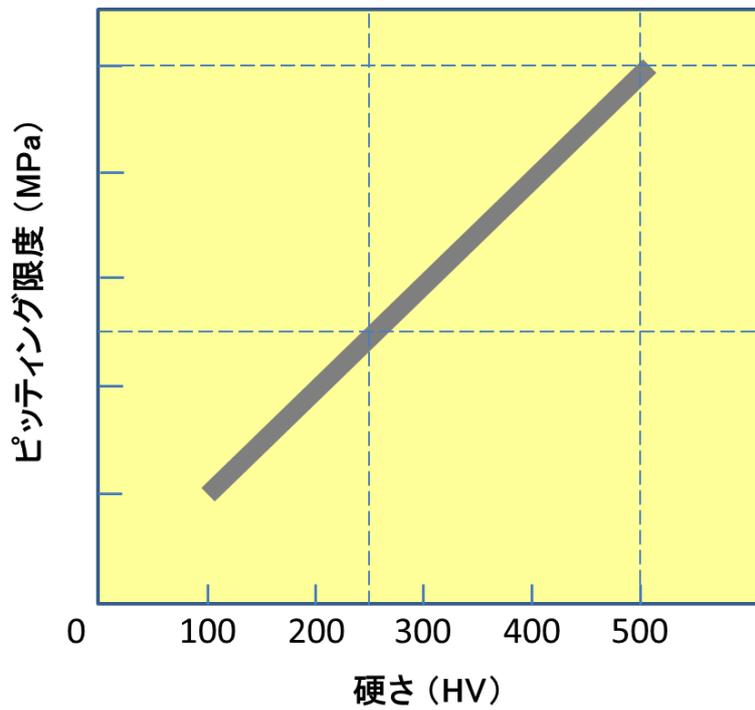


図2 鋼の硬さと内部起点型ピitting限度の関係模式図

3. フレッシング疲労

図3は、フレッシング疲労における接触面でのき裂発生過程を模式的に示した図です。フレッシング疲労は部材の締結や組合せ部の接触面間において、面圧が加わって微細な相対すべりが生じる場合に接触面で起こる疲労現象のことです。疲労強度が大きく減少することから実機の疲労破壊の主要な要因の一つになっています。

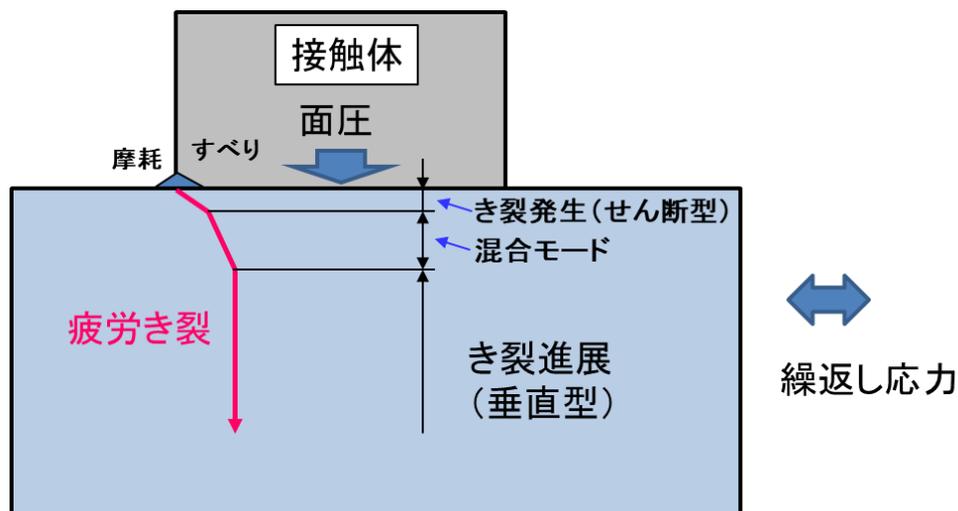


図3 フレッシング疲労におけるき裂発生過程の模式図

図3の接触物において繰返し応力が作用しますと互いに弾性変形の相違があることから微小な相対

すべりが発生し、この接触部に生じる大きな接線力がき裂の発生とき裂進展を起こして疲労強度の大きな低下をもたらします。フレット疲労き裂は接線方向に作用する力である接線力の最大位置において、組合せ応力（接線力、繰返し応力、面圧）下での最大せん断応力範囲の方向に生じ、き裂進展すると考えられています。図中の混合モードではき裂は傾斜方向に加速度的に進展し、表面から離れると接線力の影響も低下して繰返し応力に対して垂直方向に進展するようになります。

図4は、フレット疲労についてS-N曲線のイメージを表した図です。フレット疲労では、疲労限度が大きく低下し、通常の疲労限度に対して例えば二分の一程度まで減少することも多いです。さらに条件によっては疲労限度が二分の一以下に低下する場合もあって実用上注意が必要です。

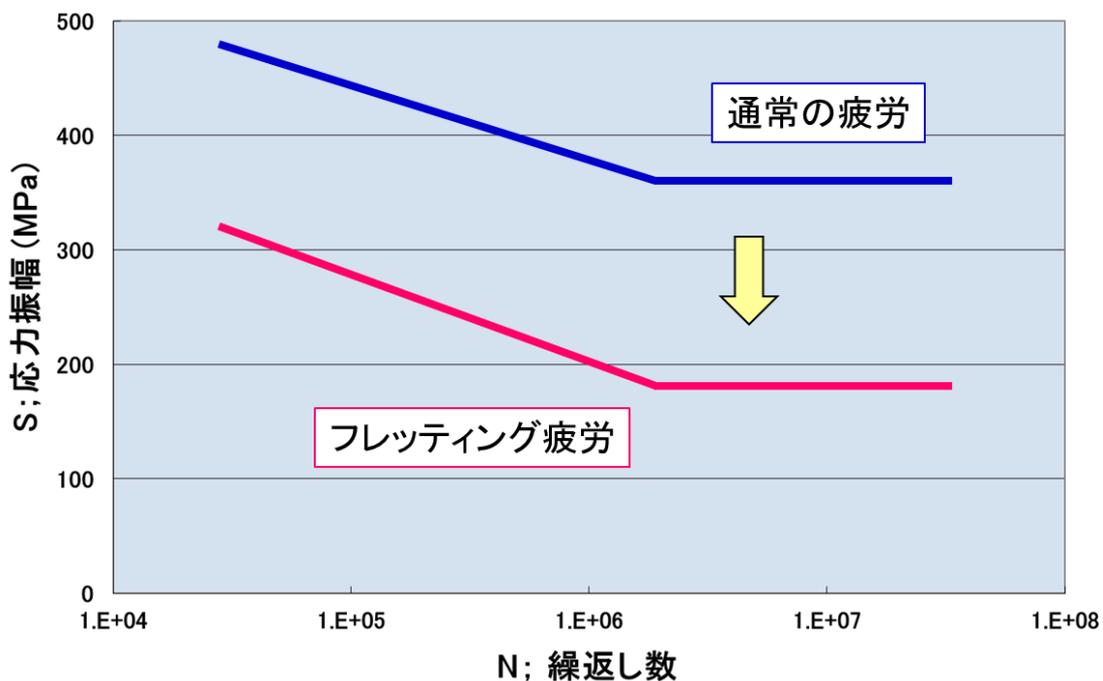


図4 フレット疲労におけるS-N曲線のイメージ

表2にフレット疲労強度に及ぼす各種要因の影響を示します。要因としては、材質、相対すべり量、接触面圧、平均応力、寸法効果などが挙げられます。材質面で特徴的なことは、通常の疲労強度が引張強さとともにある程度まで高強度化するのに対して、フレット疲労では引張強さの影響をあまり受けずに材料ごとにほぼ決まった値になることが多いことです。相対すべり量の影響は、すべり量が大きくなると疲労限度はある程度まで減少しますが、ある値以上になるとほぼ一定値を示すようになります。これは、相対すべり量の増加に伴い接線力も大きくなりますが、全面すべりが起こり始めると接線力がほぼ一定値を示すようになるためであります。接触面圧についても面圧の増加は疲労強度を減少させますが、ある値を超えるとほぼ一定値を示すようになります。平均応力と寸法効果の影響に関しては、通常の疲労の場合の挙動と同じです。

表2 フレッシング疲労強度に及ぼす各種要因の影響

	フレッシング疲労強度に及ぼす影響
材質	疲労強度は引張強さに対してあまり影響を受けず、材質ごとにほぼ決まった値になることが多い
相対すべり量	疲労強度は相対すべり量の大きさによってかなり変化する
接触面圧	疲労強度は小さな面圧で大きく低下し、それ以上の面圧で殆ど低下しなくなる
平均応力	引張側の平均応力は疲労強度を低下させる。圧縮側の平均応力(残留応力)は疲労破断防止に有効である
寸法効果	寸法の増大とともに疲労強度は低下する。特に小寸法において寸法効果が大きい

フレッシングにより接触部に生じる応力状態は複雑であるため、フレッシング疲労に対して知見に基づく定量的な寿命評価は困難な状況のようです。実機を模擬した疲労試験を実施し、得られたS-N曲線を基に寿命評価するのが最も安全であります。

フレッシング疲労を防止する観点からは、相対すべり量を小さくし、接触面圧を減少することが有効です。しかし、一般的には接触面圧を減少すれば相対すべり量が大きくなりますので両者を同時に満足することは困難です。実際的には以下の方法を適切に選んで対策するのが好ましいと考えられています。

- ① 接触部の形状変更で接触面圧の集中を緩和したり、接触部の間に弾性体を設けたり、相手材の硬さを低くするなどして、接触面圧の低下を図る
- ② 逆に接触面圧を集中させ相対すべり量の低下を図る
- ③ 適切な潤滑剤あるいは形成膜によって摩擦係数の低下を図る
- ④ 焼入れ、浸炭、窒化、ショットピーニングなどの方法で圧縮残留応力の付加を図る

以上の手法を適切に組み合わせることがフレッシング疲労対策に有効と考えられます。