

疲労およびクリープき裂進展とき裂長さ計測技術

破壊力学の発展にともない、万一き裂が存在した場合にも機器の安全性を保証する損傷許容設計が積極的に取り入れられてきている。損傷許容設計を行うためには、どの程度の期間でき裂がどれだけ進展するかを予測する必要がある。すなわち、き裂の進展速度を把握しておく必要がある。実機に存在するき裂として、①疲労き裂、②クリープき裂、③応力腐食割れなどが考えられる。

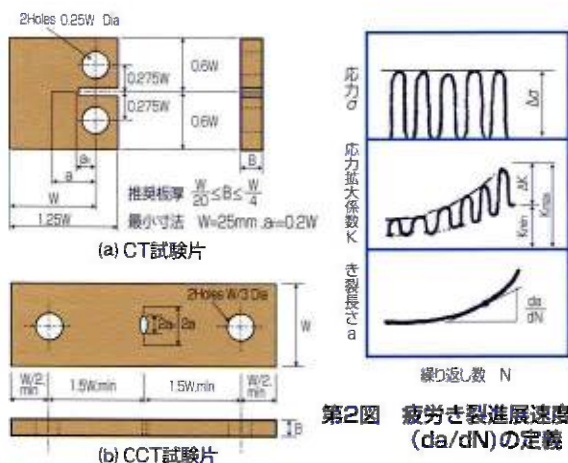
本稿では、機器の損傷原因の80%を占められている疲労および高温機器で問題となるクリープのき裂進展試験の概要とき裂計測方法について概説する。

き裂進展試験の概要

A-1

疲労き裂進展試験

疲労き裂進展速度を求める試験法の規格は、ASTM E647に制定されている。



第1図 ASTM標準試験片

試験片としては、第1図に示すコンパクトテンション試験片(CT試験片)または中央き裂付き平板引張り試験片(CCT試験片)を用いることが推奨されている。疲労き裂進展試験の場合、き裂進展特性を支配するき裂先端近傍の応力・ひずみ場を表すパラメーターとして、応力拡大係数Kが用いられ、例えばCT試験片の場合、(1)式で表される。

$$K = F(a/W) \cdot P / (B \cdot W^{0.5}) \quad (1)$$

ここで、P：荷重、a：き裂長さ、B：試験片厚さ
W：試験片幅（第1図参照）

$F(a/W)$ は a/W の関数で、き裂が長くなると大きくなる。

第2図に示すように、試験片に一定荷重が繰返し負荷されると疲労き裂が進展し、それにともないK値の変動幅 ΔK も増加していく。疲労き裂進展速度は第2図のき裂長さaと繰返し数Nの関係を表す曲線の接線(da/dN)として求められる。

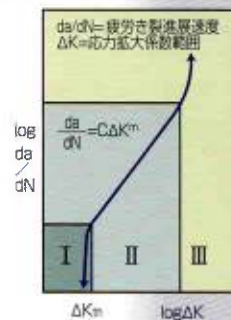
疲労き裂進展特性は、一般に第3図のように表される。縦軸は疲労き裂進展速度(da/dN)、横軸は応力拡大係数の範囲(ΔK)を表し、両方とも対数で表示する。第3図は三つの領域に分けられる。第I領域は進展速度が非常に遅く、ある ΔK 以下では、実用上き裂が進展しないと見なすことがで

きる。このときの ΔK を下限界応力拡大係数範囲と呼び、 ΔK_{th} と表す。第II領域はき裂が安定成長する領域であり、 da/dN と ΔK の間には両対数で表示するとパリス則と呼ばれる直線関係が成り立ち、(2)式で表される。

$$da/dN = C \cdot (\Delta K)^m \quad (2)$$

ここで、C、m：材料定数

第III領域は、へき開破壊や不安定延性破壊により急速進展する領域である。第II領域は、試験片に一定荷重が繰返し負荷される荷重範囲一定試験（第2図参照）で求められる。しかし、第I領域は、以下に示す理由により荷重範囲一定試験で求めるのは困難である。疲労き裂進展試験を行う際には、まず機械ノッチの先端に疲労予き裂を導入する必要があるが、その荷重レベルより本番の疲労き裂進展試験の荷重を大きく下げると、き裂先端に形成される圧縮残留応力場のために疲労き裂が進展しなくなる。また、 ΔK の小さい領域で疲労予き裂を導入すると膨大な時間がかかる。そこで、ASTM E647では、荷重漸減・K値減少試験により疲労き裂進展速度を求める方法が制定されている。荷重漸減・K値減少法とは、前荷重の影響を受けない程度にわずかな荷重を減少させながら、K値がき裂の進展に伴い指数関数的に減少するようにして第I領域の疲労き裂進展速度を求める方法である。

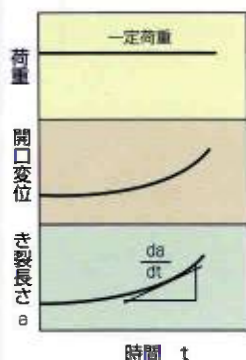


第3図 疲労き裂進展特性の表示(模式図)

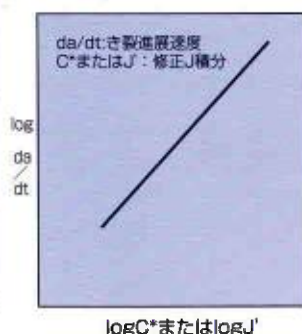
クリープき裂進展試験

クリープき裂進展速度を求める試験法の規格は、ASTM E1457に制定されている。標準試験片としてはCT試験片が規定されており、それ以外にCCT試験片や引張りまたは曲げ負荷を受ける片側ノッチ付き試験片が用いられる。

クリープき裂進展試験では、第4図に示すように荷重を一定に保ち、時間とともにき裂およびノッチ開口変位が増大する。クリープき裂進展速度は第4図のき裂長さaと時間tの関係を表す曲線の接線(da/dt)として求められる。クリープき裂進展特性は、一般に第5図のように表される。縦軸はクリープき裂進展速度(da/dt)、横軸は C^* （修正J積分）と同じ）と呼ばれるパラメーターで、両方



第4図 クリープき裂進展速度の定義



第5図 クリープき裂進展特性の表示(模式図)

とも対数で表示する。第5図の横軸は、疲労き裂進展試験と同様に応力拡大係数 K で整理される場合もあるが、き裂先端での塑性域が無視できないクリープ試験では K 値で整理することは難しく、応力と荷重線での変位速度の積で表す C^* または J を用いて整理される。 C^* または J の記述は、例えばCCT試験片の場合、(3)式の簡便式で表される。

$$C^* \text{または} J = (a-1)/(a+1) \cdot \sigma_{\text{net}} \cdot \dot{V} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 a : クリープ構成式における応力指数

σ_{net} : ノッチ断面での平均応力

$\dot{V}$: ノッチ中央での開口変位速度

A-2

き裂長さの計測方法

第1表 主なき裂長さ計測方法

	き裂計測方法	使用試験片	適用実績	長 所	欠 点
直接測定法	マイクロメータ付き顕微鏡による測定	CT CCT	はんだの疲労き裂進展試験	・き裂長さ計測量との較正が不要	・表面の情報しか得られない ・自動計測ができず、労力がかかる
	レプリカ法	CT CCT SNP	微小き裂のき裂進展試験	・マイクロメータ付き顕微鏡による測定より精度が高い ・記録が残せる	・労力、手間がかかる ・試験を中断する必要がある ・表面の情報しか得られない
	ビーチマーク法	SNP	表面ノッチの疲労き裂進展試験	・試験片内部のき裂形状の情報が得られる	・ビーチマークを入れる時期の予測が困難 ・ビーチマークの状況は試験後でないと不明
間接測定法	コンプライアンス法	CT CCT	金属材料、樹脂、セラミックスの疲労き裂進展試験(低温～高温、水中や食塩水中などの腐食環境)	・ ΔK_{th} を求める K 値漸減試験を含め自動計測が可能 ・低温から高温、大気中から腐食環境での試験も対応可能 ・試験片厚さ方向の平均的なき裂長さが求められる	・荷重一定試験には適用できない ・表面き裂材のような特殊な試験片については較正カーブが必要 ・荷重-開口変位の関係がヒステリシスループを描く領域では適用不可
	ポテンシャル法	CT CCT	鋼材の疲労き裂進展試験 鋼材のクリープき裂進展試験	・荷重一定試験にも適用でき、自動計測が可能 ・試験片厚さ方向の平均的なき裂長さが求められる	・き裂面の接触がある場合はき裂長さを過小評価する ・表面き裂材のような特殊な試験片については較正カーブが必要
	クラックゲージ法	CT CCT	アルミ合金の疲労き裂進展試験	・比較的簡便な方法でき裂長さを自動計測できる	・セラミックスや樹脂には適用できない ・表面の情報しか得られない ・ ΔK_{th} 領域など開口量が小さい場合に適用困難

CT:コンパクトテンション試験片, CCT:中央貫通き裂付引き張り試験片, SNP:表面ノッチ付き平板試験片

疲労き裂進展試験やクリープき裂進展試験では、試験中のき裂長さを正確に測定する必要がある。

き裂長さの計測方法は種々提案されているが、その代表的な方法を適用例や特徴を含めて第1表に示す。

直接測定法

1) マイクロメータ付き顕微鏡による測定

光学的手法の代表例として、マイクロメータ付き顕微鏡を用いてき裂長さを計測する方法がある。この方法では、後述の間接測定の場合に必要なき裂長さ計測量との較正曲線を求める必要はないが、き裂の口開きが小さい場合、き裂先端が正確に読み取れない。また、試験片表面のき裂長さしか測定できないので、き裂が試験片厚さ方向に湾曲している場合は補正が必要となる。この方法の一番の欠点は、自動計測ができず、労力を要することである。

2) レプリカ法

試験途中で、試験片き裂位置表面のレプリカを採取し、それを光学顕微鏡で観察する方法である。マイクロメータ付き顕微鏡による計測より、測定精度は高くなるが、試験を中断する必要がある。また、測定技術が要求される。労力や手間はマイクロメータ付き顕微鏡の場合よりさらにかかる。

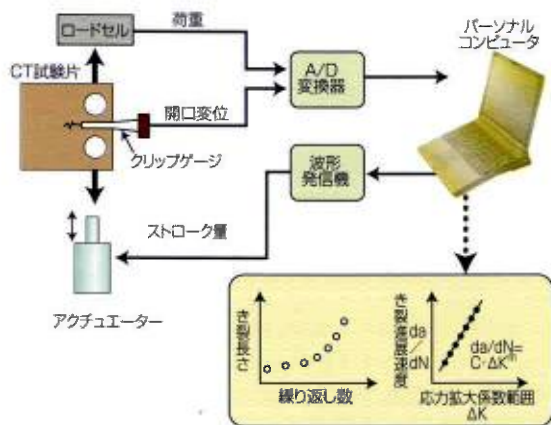
3) ビーチマーク法

ビーチマークは、急激な荷重の変動などにより、疲労破面上に残されるき裂前縁の痕跡である。この現象を活用したのが、ビーチマーク法である。最大荷重を変化させると、その後のき裂進展速度に大きな影響を与えてしまうので、最大荷重は一定に保ち、変動幅を半分程度に下げる。ビーチマークを付けるための回数は荷重レベルにより異なるが、通常、 $10^4 \sim 10^5$ 回程度である。この手法は、変動荷重をプログラミングしておけば人手はかからず、試験片内部のき裂の情報も得られるため、表面き裂の進展状況の把握にも適用できる。いっぽう、欠点としては、どの段階でビーチマークを付ければよいのか予測が難しく、ビーチマークが付いているか否かは試験後破面を出してみないとわからない。

間接測定

1) コンプライアンス法

コンプライアンスとは、弾性域でのき裂開口変位の変化量を荷重の変動量で除した値で、バネ定数の逆数である。コンプライアンスはき裂が進展するに伴い大きくなる。第1図に示したCT試験片やCCT試験片ではコンプライアンスとき裂長さの

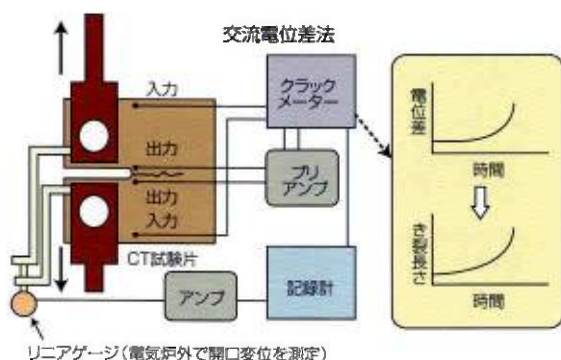


第6図 コンプライアンス法による疲労き裂進展自動計測システム概念図

関係は定式化されている。疲労き裂進展試験では、この手法が一番普及しており、ASTM E647に規定されている。コンプライアンスとき裂長さの関係をパソコンにプログラミングしておけば、第3図の ΔK_{th} を求めるための荷重漸減・K値減少試験も含めて自動計測できる。その計測システムの概念図を第6図に示す。荷重漸減・K値減少試験では、計測されたき裂長さの情報をもとに荷重漸減量を逐次パソコンで計算し、波形発信器を介して試験機を制御している。この手法は、試験片厚さ方向の平均的なき裂長さを計測することができる。また、次に示すポテンシャル法では測定が難しい腐食疲労き裂進展試験や荷重漸減・K値減少試験にも有効である。このように自動化されたコンプライアンス法は利点の多い計測法であるが、表面き裂材のようにコンプライアンスとき裂深さの関係が明らかでない場合は、その校正曲線を事前に求める必要があり、また、荷重が一定に保持される場合や荷重と開口変位の関係がヒステリシスループを描く非線形領域には適用できないなどの短所もある。

2) ポテンシャル法(電位差法)

試験片の電気抵抗は、き裂の進展に伴う断面積の減少に応じて変化する。したがって、試験片に一定の電流を流し、き裂をはさんで電位差を測定すれば、き裂長さの変化量を電位差の変化量から求めることができる。この手法をポテンシャル法と呼び、ASTM E647およびASTM E1457に規定されている。コンプライアンス法と同様、比較的広く活用されており、特に、荷重が一定値に保持



第7図 ポテンシャル法によるき裂進展計測システム概念図

されるクリープき裂進展やクリープと疲労が重畳するクリープ疲労き裂進展試験に適用されることが多い。ポテンシャル法には直流電位差法と交流電位差法があるが、測定精度に大きな差はない。

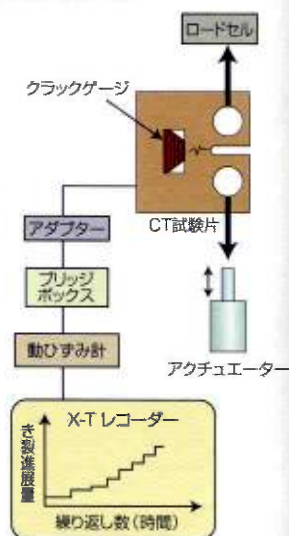
ASTM E647に示されているCT試験片やCCT試験片では、ポテンシャル値とき裂長さの関係は定式化されており、プログラミングしておけば、比較的簡便な装置でき裂長さを自動計測することができる。その計測の概念図を第7図に示す。一方、短所としては、き裂の進展がき裂先端での電気化学的反応に依存する腐食疲労き裂進展試験や応力腐食割れ試験では、電圧を与えることは、進展特性に影響を及ぼす可能性があるため取り扱いには注意が必要である。また、 ΔK_{th} を求める荷重漸減・K値減少試験のようにき裂開口量が小さく、き裂面の接触がある場合にはき裂長さを過小評価する。同様に、腐食疲労き裂進展や応力腐食割れ試験の場合のように、き裂が屈曲して進む場合や腐食生成物がき裂面に詰まる場合も、き裂長さを過小評価する危険性があり注意が必要である。

3) クラックゲージ法

クラックゲージとはひずみゲージを0.1mm程度のピッチで連続的に配線した特殊なゲージである。第8図に示すように、それを試験片表面のき裂延長線上に貼付して疲労試験を行うと、き裂進展に伴いゲージが切断されて、電気抵抗が断続的に変化する。この変化の記録からき裂長さを求めるのがクラックゲージ法である。

比較的簡便な方法であるが、セラミックスのような開口量が小さい材料

では、き裂が進展してもゲージが切断しない、樹脂材料のような低強度・低剛性材ではゲージを貼付したことによる補強効果が生じるなどの問題がある。また、金属材料でも、 ΔK_{th} を求める荷重漸減・K値減少試験では、開口変位が小さくなるとゲージが切断しなかったり、切断されたゲージが接触し、き裂長さを過小評価する危険性がある。



第8図 クラックゲージを用いたき裂進展計測手法の概念図

疲労き裂進展試験とクリープき裂進展試験を対象に、当社で実績のあるき裂長さ計測手法について、その適用例や特徴を記述した。紙面の都合で概略の説明になってしまったが、詳細は専門書¹⁾を参照されたい。なお、疲労とクリープが重畳するクリープ疲労き裂進展試験や応力腐食割れ試験も本報告で示したき裂計測手法が適用できるが、その説明は紙面の都合で割愛した。

[エンジニアリングメカニクス事業部 強度技術部 木内 見]

1) たとえば、国尾武ほか、破壊力学実験法、朝倉書店(2000)