



入門講座

鉄鋼の試験/評価-8

疲労試験

Fatigue Testing

九州大学 大学院工学研究院 機械工学部門
水素材料先端科学研究センター
准教授

松永久生
Hisao Matsunaga

九州大学
水素材料先端科学研究センター

松岡三郎
Saburo Matsuoka

九州大学 水素エネルギー国際研究センター
産業技術総合研究所
エネルギー・環境領域研究戦略部

山辺純一郎
Junichiro Yamabe

1 はじめに

機械・構造物の損傷の約6割が疲労によるものと言われている¹⁾。それらを防止するためには、疲労破壊現象を正しく理解するとともに、適切な疲労試験を行って結果を強度設計に反映させることが重要である。

一口に「疲労試験」と言っても、表1に示すように、用いる試験片の種類、試験方法、負荷条件などによって様々に分類される。実際の疲労試験では、目的に応じてこれらが適宜選択される。本稿では、疲労試験機や試験片、代表的な疲労試験の概要について解説する。

2 疲労試験機

疲労試験における代表的な負荷形式として、曲げと軸荷重(引張圧縮)が挙げられる。

曲げ疲労試験には、回転曲げ疲労試験や平面曲げ疲労試験などがある。図1に、例として、回転曲げ疲労試験機の模式図と曲げモーメント線図を示す。図に示すように、試験片を取り付けた軸の2箇所に重錘で荷重を負荷すると、試験片全体に一律な曲げモーメントが生じる。モーターによって軸が1回転する毎に、試験片表面には両振り(応力比 $R = -1$)の

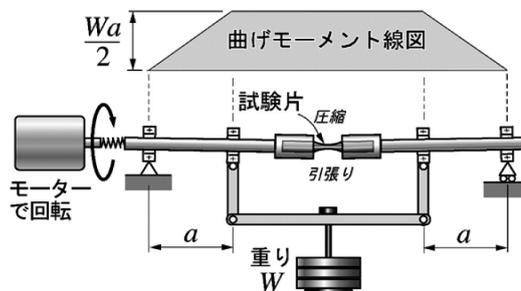


図1 回転曲げ疲労試験の模式図と曲げモーメント線図

表1 疲労試験の分類

負荷形式	軸荷重, 曲げ, ねじり, 組み合わせ荷重(多軸疲労), フレッチング, 転がり接触, など
応力比	引張-圧縮, 引張-引張, 圧縮-圧縮, など
負荷の波形	正弦波, 三角波, 矩形波, など
破断繰返し数	低サイクル疲労, 高サイクル疲労, 超高サイクル(ギガサイクル)疲労
制御方法	応力制御, ひずみ制御, 荷重制御, ΔK 制御など
試験片	平滑材, 切欠き材, 微小欠陥材, CT 試験片, MT 試験片など
試験環境	高温, 腐食環境, ガス環境, など
応力・荷重の変動	一定応力振幅, 一定ひずみ振幅, 応力拡大係数範囲一定, ランダム荷重, など
き裂変形様式, 進展モード	モードI, モードII, モードIII, 混合モード
き裂先端の降伏条件	小規模降伏, 大規模降伏

曲げ応力が正弦波で作用する。応力比 R は、最大応力を σ_{max} 、最小応力を σ_{min} とすると、 $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$ で定義される。回転曲げ疲労試験機は、 $R = -1$ の両振りの試験しか実施できないが、比較的安価で省電力といった特長を有しており、広く用いられている。

一方、軸荷重（引張圧縮）の疲労試験には、油圧サーボ疲労試験機や電磁式疲労試験機などが用いられる。負荷荷重はロードセルにより測定され、制御される。これらの試験機は比較的高価であるが、試験片断面全体に一樣に応力を負荷できること、応力比を任意に設定できること、などの特長を有している。また、油圧サーボ疲労試験機においては、上記に加え、ひずみ制御での低サイクル疲労試験、CT試験片等を用いた破壊力学的試験、多段荷重やランダム荷重のプログラム試験なども実施でき、その応用範囲は広い。

超音波疲労試験は、試験片の一端に超音波振動を加えて共振させ、試験部に引張－圧縮の応力を発生させる試験である。試験周波数は20kHz（20,000Hz）で使用される場合が多く、近年注目されている超高サイクル（ギガサイクル）域での疲労強度特性の調査に広く用いられている²⁴⁾。ただし、多くの場合、試験片が試験中に内部発熱を起こすので、試験片自体の冷却や、試験片への加振と休止を繰り返す間欠運転が行われる。また、ミクロな塑性変形挙動がひずみ速度の影響を受け、通常の引張圧縮疲労試験とは異なる結果が得られる場合もあり⁴⁾、試験結果の取り扱いには注意が必要である。

なお、一般に、通常の疲労試験で使用される0.01Hz～100Hzの試験周波数においては、ほとんどの金属材料の疲労試験結果は室温・大気中の試験で試験周波数の影響を受けない⁵⁾。ただし、比較的大きな繰返し塑性変形を伴う低サイクル域での負荷においては、材料や試験周波数によって試験片が発熱し、試験結果に影響が出る場合がある。また、例えば水素ガス環境中で材料中への水素拡散が問題になる場合や、高温環境試験で材料のクリープが問題になる場合など、疲労破壊メカニズムに時間因子が絡む場合には、試験結果も試験周波数によって変化する。

表2に、代表的な試験機の特徴をまとめる。また、表3に、試験に要する時間の計算例をまとめる。各試験機の特徴を十分に把握し、目的や試験に要するコストを考慮して使い分けが必要である。

表3 疲労試験に要する時間

繰返し速度	10 ⁶ cycles	10 ⁷ cycles	10 ⁸ cycles	10 ⁹ cycles
1 Hz	12 日	116 日	3.2 年	32 年
10 Hz	1.2 日	12 日	116 日	3.2 年
100 Hz	2.8 時間	1.2 日	12 日	116 日
1 kHz	17 分	2.8 時間	1.2 日	12 日
10 kHz	100 秒	17 分	2.8 時間	1.2 日

表2 曲げ疲労試験および引張圧縮疲労試験で使用される疲労試験機の例

試験機	長所	短所
回転曲げ疲労試験機	<ul style="list-style-type: none"> 比較的低コスト 省電力、低ランニングコスト 比較的大きな繰返し速度で試験可能 	<ul style="list-style-type: none"> 応力比は$R=-1$に固定 応力勾配があり危険体積を大きくとることができない
油圧サーボ疲労試験機	<ul style="list-style-type: none"> 試験片断面全体に一樣な応力を負荷可能 応力比を調節可能 ひずみ制御での低サイクル疲労試験が可能 CT試験片等を用いた破壊力学的試験が可能 多段荷重やランダム荷重のプログラム試験が可能 	<ul style="list-style-type: none"> 比較的高価 高ランニングコスト
電磁式疲労試験機	<ul style="list-style-type: none"> 試験片断面全体に一樣な応力を負荷可能 応力比を調節可能 	<ul style="list-style-type: none"> 比較的高価 低繰返し速度の試験には不向き 共振式のため試験片のばね定数が変化するき裂進展試験には不向き
超音波疲労試験機	<ul style="list-style-type: none"> 高繰返し速度（～20kHz）で試験可能 	<ul style="list-style-type: none"> 試験結果が高ひずみ速度の影響を受ける場合がある 試験片が発熱する（冷却の必要有り）

3 疲労試験片

疲労試験片には、平滑試験片、切欠き試験片、微小欠陥試験片などの棒状または板状の試験片に加えて、CT (Compact Tension) 試験片、MT (Middle Tension) 試験片、SENT (Single Edge Notched Tension) 試験片などの破壊力学試験 (疲労き裂進展試験) に使用される試験片がある。図2に、種々の試験片の写真を示す⁶⁾。

棒状平滑試験片の曲げや引張圧縮の疲労試験には、一般に試験部が丸棒状のものが使用される。素材形状や試験治具に制限がある場合には、四角形断面の試験片も使用できる。例えば、応力振幅一定・荷重制御の試験片についてはASTM

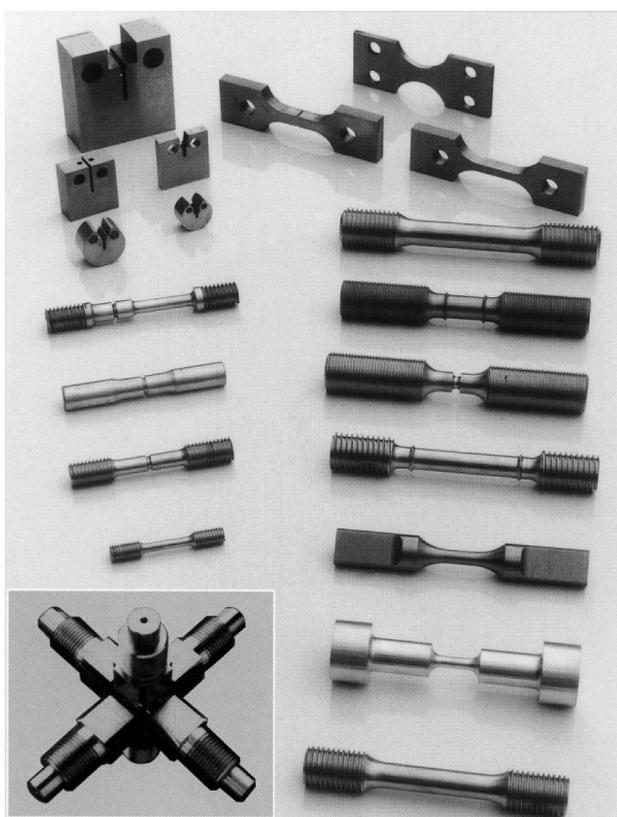


図2 いろいろな試験片⁶⁾

E466⁵⁾、ひずみ制御の試験片についてはASTM E606⁷⁾ に指定されている。また、疲労き裂進展試験に用いるCT試験片、MT試験片、SENT試験片、および試験治具の詳細については、ASTM E647⁸⁾ に指定されている。

試験片を切削する際の切込み量や送り速度、表面の仕上げ方法は試験結果に重大な影響を及ぼす場合がある。よって、加工・仕上げの方法についても、各規格で細かく指定されている^{5,7,8)}。ただし、規格に指定された方法の範囲内で加工・仕上げを行っても、一定の試験結果が得られるとは限らない。すなわち、試験片表面の加工硬化層、残留応力、表面粗さの影響は規格の範囲内であるからといって一定となる保証はない。したがって、一旦、適切な加工方法や仕上げ方法を決定したら、特別な理由がない限り、加工・仕上げを変更しないことが肝要である。なお、試験部に電解研磨を施すと、加工硬化層や残留応力の影響を極力排除した試験結果を得ることができるので、特に学術研究において多く用いられている。

また、試験片の加工精度も試験結果に影響を及ぼす。特に、軸荷重 (引張圧縮) 疲労試験においては、試験片を試験機に取り付けて荷重を负荷した際に生じる曲げ応力を極力小さくする必要がある。そのために、軸心振れが小さく荷重支持面の平行度の高い試験片を製作することが、後述する試験片の正確な取付けおよび試験機のアラインメント (軸心のずれ、平行度など) の管理とともに極めて重要となる。

4 疲労試験

本章では、代表的な疲労試験として、疲労寿命試験および疲労き裂進展試験について紹介する。表4に、疲労試験の種類と強度設計の関連をまとめる。

4.1 棒状または板状試験片の疲労寿命試験

切欠きや人工欠陥を有さない平滑試験片の疲労試験は、最も基本的な試験であり、その結果は材料の疲労強度を代表するものとして取り扱われる。金属材料の疲労寿命特性は、前述のように試験周波数の影響を受けにくいので、破断までに

表4 疲労試験の種類と強度設計との関連

	試験の分類	得られるデータ	設計
疲労寿命試験	低サイクル試験	$\epsilon_a - N_f$ 関係	有限寿命
	高サイクル試験	$\sigma_a - N_f$ 関係	
		疲労限度 σ_w	無限寿命
疲労き裂進展試験	ΔK 漸増	$da/dN - \Delta K$ 関係	有限寿命
	ΔK 漸減	下限界応力拡大係数幅 ΔK_{th}	限界欠陥評価など

要する時間ではなく、破断までの繰返し数 N_f により表される。疲労寿命 N_f が 10^5 回程度未満の疲労現象は低サイクル疲労、 N_f が 10^5 回程度より大きいものは高サイクル疲労と呼ばれる⁹⁾。また、 N_f が 10^7 を超える領域で疲労破壊が起こる現象は、超高サイクル疲労（ギガサイクル疲労）と呼ばれる。

試験片に種々の切欠きや微小欠陥を導入して試験を行う場合もある。目的としては、(1) 切欠きや微小欠陥の寸法・形状が疲労強度に及ぼす影響（切欠き効果）を調べること、(2) き裂発生起点を限定することにより疲労き裂進展の観察を容易にすること、などが挙げられる。

試験方法は、応力制御（荷重制御）とひずみ制御に分けられる。応力制御の試験は、低サイクル域～高サイクル域～超高サイクル域まで広く用いられ、軸荷重（引張圧縮）・曲げの両方で実施可能である。図3に応力負荷波形の一例を示す。応力振幅一定の試験での負荷条件は、応力振幅 σ_a と応力比 R 、または最大応力 σ_{max} と最小応力 σ_{min} で指定される。これに対し、ひずみ制御の試験は、主に低サイクル疲労に対して用いられ、

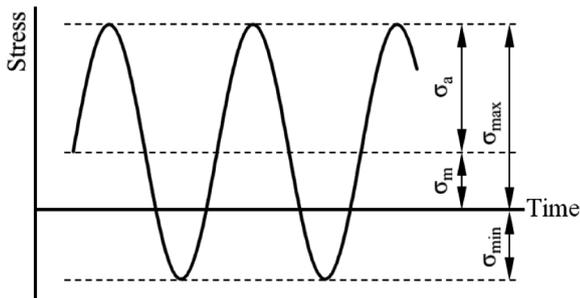


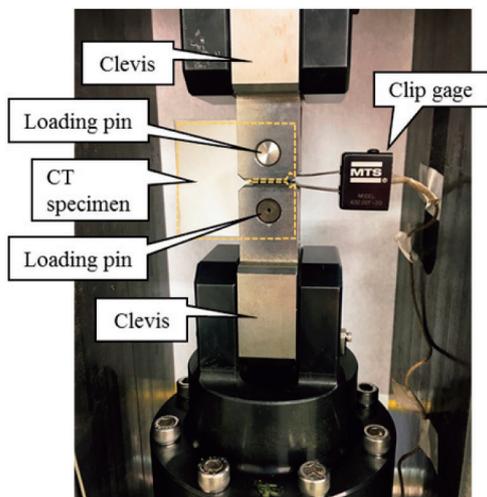
図3 負荷応力条件の定義(応力比 $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$)

実施可能な試験機は油圧サーボ疲労試験機などの一部の試験機に限られる。

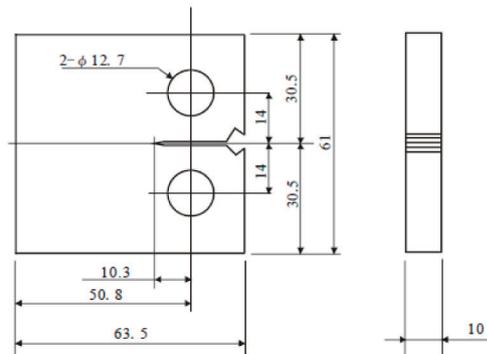
特に、引張圧縮疲労試験においては、疲労試験片を試験機に取り付ける際に細心の注意を要する。取り付け方法には、ボルト締めを伴う治具による取り付け、油圧チャックによる取り付けなどがあるが、いずれの場合にも、試験片に荷重を負荷した際に曲げ応力が発生しないようにアラインメントの調整を行う必要がある。曲げ応力の存在は試験結果のばらつき増大や疲労強度の過小評価に繋がる。なお、各試験片のアラインメントの調整方法については、ASTM E1012¹⁰⁾で指定されている。また、回転曲げ疲労試験においても、軸心の振れは正確なデータ取得の妨げとなるので、加工精度と試験機への取付けには十分な配慮が必要である。

4.2 疲労き裂進展試験

材料の疲労破壊は、き裂の発生と進展の2つの過程に分けられる。後者のうち、小規模降伏条件を満足する長い疲労き裂の進展特性は、疲労き裂進展試験によって評価される。ASTM E647⁸⁾ではCT試験片やMT試験片の使用が推奨されており、指定の方法で疲労予き裂を導入した後、疲労き裂進展試験が実施される。1サイクル当たりのき裂進展量（＝き裂進展速度） da/dN を得るためには、繰り返し荷重に対するき裂長さの変化を測定する必要がある。き裂長さの測定には、光学顕微鏡など用いてき裂を直接観察する方法、き裂開口部に取り付けた変位計を用いる方法⁸⁾や試験片の背面部に取付けたひずみゲージを用いる方法^{8,11)}などがある。図4に、例として、CT試験片を用いた疲労き裂進展試験の様子を試験片形状とともに示す。



(a) 試験の様子



(b) CT 試験片の形状・寸法の例(単位 mm)

図4 CT 試験片を用いた疲労き裂進展試験

疲労き裂進展試験には、主に油圧サーボ試験機が用いられ、試験は荷重制御で行われる。MT試験片を用いた試験では、片振り荷重（引張・引張）の試験に加えて両振り荷重（引張・圧縮）の試験を実施可能である。これに対し、CT試験片を用いた試験では片振り荷重（引張・引張）のみの試験が可能である。実験結果の整理には、一般に線形破壊力学のパラメータである応力拡大係数 K が用いられ、試験は通常、小規模降伏条件を満たす範囲⁸⁾で実施される。

最も一般的な疲労き裂進展試験は、一定荷重振幅を繰り返す試験である。荷重の繰返しとともに進展する疲労き裂の長さ a と繰返し数 N の関係から、セカント法や増分多項式法によって疲労き裂進展速度 da/dN と応力拡大係数幅 ΔK の関係が得られる。各試験片中を進展するき裂の応力拡大係数 K の計算についても、ASTM E647⁸⁾に方法が示されている。一定荷重振幅の試験は、き裂の進展に伴って ΔK が増加していくことから、 ΔK 漸増試験と呼ばれる。この他、疲労き裂進展の下限界応力拡大係数幅 ΔK_{th} を評価するために、荷重を徐々に減少させて ΔK を漸減させていく ΔK 漸減試験や、き裂進展とともに荷重を漸減させながら ΔK を一定に保つ ΔK 一定試験などがある。

5 おわりに

疲労試験には様々な種類があり、試験結果とその信頼性は、試験片の加工状態や寸法、試験機の種類、実施者の練度、等に左右される。したがって、得られた試験結果はあくまで個別の試験についてのものであり、材料固有のものではないことに注意が必要である。適切な疲労試験を実施して結果を正しく解釈するためには、試験片加工や試験方法についての

知識・技術に加えて、疲労破壊現象や各種因子の影響を正しく理解しておくことが不可欠である。

参考文献

- 1) 西田新一：機械機器破損の原因と対策，日刊工業新聞社（1986）
- 2) Y.Furuya, S.Matsuoka, T.Abe and K.Yamaguchi：Scripta Materialia, 46 (2002), 157.
- 3) 古谷佳之：鉄と鋼, 102 (2016), 415.
- 4) N.Schneider, J.Bödecker, C.Berger and M.Oechsner：International Journal of Fatigue, 93 (2016), 224.
- 5) ASTM E466-07：Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials, (2007)
- 6) (株) 神戸工業試験場パンフレット
- 7) ASTM E606-12：Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing, (2012)
- 8) ASTM E647-13^{e1}, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, (2013)
- 9) 陳玳こう：金属疲労強度学 疲労き裂の発生と伝ば，内田老鶴圃，(2015)
- 10) ASTM E1012-12^{e1}, Standard Practice for Verification of Testing Frame and Specimen Alignment under Tensile and Compressive Axial Force Application, (2012)
- 11) 城野政弘，宋智浩：疲労き裂 き裂開口と進展速度推定法，大阪大学出版会，(2005)

(2017年1月16日受付)