



安全性確保のための
構造材料寿命評価・予測技術の最前線



頑強な材料も、時間経過や使用環境により破損を迎えることがある。構造材料として何十年もの耐久性を持つ鉄鋼材料において、その寿命を予測することは大変難しい。しかし最近では、材料寿命を精度よく予測し、適切な対策を講じるにより、破壊事故を未然に防ぐ技術が進歩している。材料に見られる様々な挙動を十分に理解することにより、材料の優れた特性を最大限に活用することが可能となる。

PART 1

金属疲労の診断と対策

旅客機のエンジン整備のようす。日本では、大型の旅客機が短距離路線を多頻度で運行することが多く、航空機の使用環境はきわめて過酷である。二重三重の点検を行うことにより、旅客機はつねによりコンディションが保たれている。(写真提供:全日本空輸(株))

知らぬ間に材料内部で進む疲労現象

機械・構造物の事故の約90%は、疲労による破壊が原因といわれる。人命を守り、経済的な損失を防ぐため、疲労の仕組みを明らかにし、疲労破壊を防止することはきわめて重要である。

疲労とは、応力が繰り返しかかることによって発生したごく小さなき裂が次第に伝ばし、最終的に破壊にいたる現象である。疲労の原因は繰り返しかかる応力であり、時間経過に伴い材料が劣化する現象ではない。繰返し応力がかかった結果、材料の内部にき裂が発生し、これが成長することにより破壊が起こる。

疲労に関する研究は、19世紀前半から始まった。19世紀半ばにはドイツの鉄道技師ヴェーラーが鉄道車軸の疲労について本格的に研究を行い、回転曲げを始め力のかかり方の異なる場合の疲労について調べた。その結果、1回の引張力によって破壊する力より、小さい応力で繰返し加えることによって疲労破壊が起こること、また応力がある限界値より小さければ破壊しないことを見出し、疲労限度についての考え方が明らかにされた。

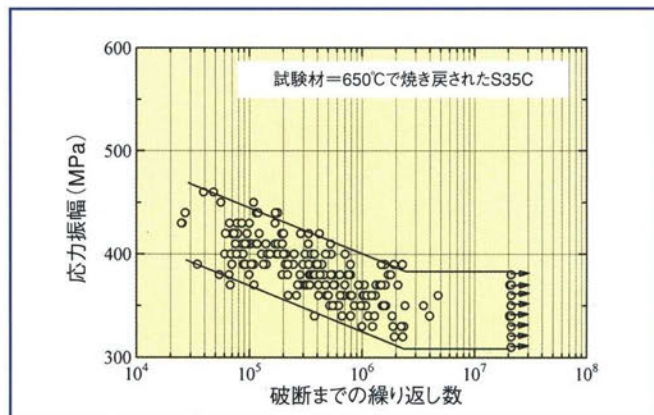
材料の疲労に対する強度を調べるには疲労試験が行われる。その試験では、疲労破壊を起こす応力と繰返し回数を表すS-N線図を求める。一般にS-N線図では、右下がりの直線が続き、あるところから水平な一定値となる。この値が疲労限であり、この

強度を元にして、機械部品などの疲労設計が行われる。

疲労が起りやすい製品には、自動車や鉄道車両のばねのように繰返し応力がかかるもの、直接力を受けなくても気圧や振動によって変形するもの、熱による膨張や収縮による変形があるものなどが挙げられる。これらの製品では、材料の疲労強度を元に、必要な安全率を見込んで設計をすることが重要である。

なお、材料の疲労強度を高めるには、表面硬化によりき裂の発生を防止する、圧縮残留応力により割れの拡大を防ぐなどの方法がある。具体的には浸炭焼き入れ、高周波焼入れ、ショットピーニングなどの技術が適用されている。

■ 機械構造用鋼S35Cの疲労試験結果 (S-N線図)





疲労を診断し、破壊を防ぐ

疲労の発生を検査するには、材料が使用されている状態でき裂の有無を調べる必要があるが、外観だけでは判断が難しい。き裂を検査するには、浸透探傷法、磁粉探傷法、超音波探傷法などの非破壊検査が実施される。

疲労が発生する要因は、荷重、振動、圧力などさまざまなものがある。例えば航空機機体や鉄道車両では、振動による疲労だけが発生することが多い。橋梁やビル建築などの大型構造物では、風圧による振動や、溶接部の残留応力に振動の力が加わることによって疲労が発生する。一方、疲労が問題となるような用途では、まず腐食が発生しそこを起点として疲労き裂が発生する、というように複合的に損傷が発生する場合も多い。

例えば航空機の設計では、フェイル・セーフ設計という考え方を取り入れている。これは、もし構造の一部に疲労き裂などの部分的な破壊が生じて、すぐには構造全体の致命的な破壊に進まず、またこれを発見、修理するまでの間、安全に飛行を続けていられるような構造のことを指す。さらに現在、フェイル・セーフ設計の信頼性をより高めるため、「従来のフェイル・セーフ設計に加えてき裂の発見しやすい構造様式や、き裂の進展が遅くなるか滞るような構造様式にする」という損傷許容設計が取り入れられている。

また新しく設計・製造された時には、航空機本体において荷重試験や疲労試験などが実施される。疲労試験では、与圧胴体にかかる客室内圧力や、エンジン排気による疲労などが試験されており、このような試験を経て安全性が確保されている。

ギガサイクル疲労の解明に役立つ超音波疲労試験

鉄鋼材料の疲労限を調べる場合、従来は 10^7 回までの疲労試験で求められていた。これは 10^7 回以降は疲労強度が低下することがなかったためである。

しかし、引張強度1200MPa以上の高強度鋼では、 10^7 回より後に疲労強度が極端に低下したり、発生するき裂が材料内部の小さな欠陥や介在物の存在を起点とすることが明らかになった。この現象はギガサイクル疲労と呼ばれ、近年盛んに研究が行われている。このような高強度鋼は、ばねや軸受などに多用されており、疲労特性を把握することが重要な意味を持つ。

しかし、ギガサイクル域までの疲労試験をするには、従来の疲労試験機(100Hz)では少なくとも数カ月から数年という長い時間が必要となる問題があった。

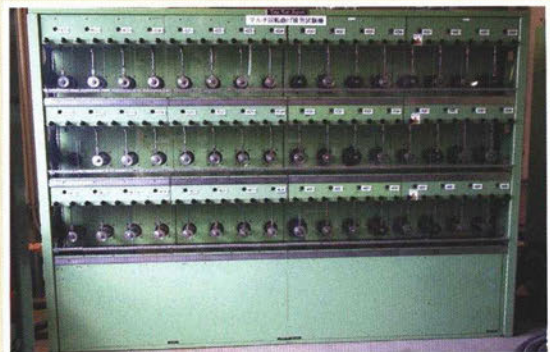
世界を驚かせたコメット機の空中分解事故

1954年、与圧客室を持つ世界最初のジェット旅客機であるコメット機が、地中海で高度約8,000mに達したところで、空中分解事故を起こした。

事故の原因は、与圧の繰り返しによる疲労破壊であった。旅客機が航行する高度では、機体の内外の圧力差が大きく、地上とは比較にならないほどの荷重が機体に加わる。コメット機を開発したデハビランド社では圧力差を考慮した内圧疲労試験を実施しており、検知可能な疲労き裂が発生するのは18,000回のフライト時であることが確認されていた。しかし事故機は、就航後わずか1,290回のフライト時に破壊した。

事故後の調査の結果、直接原因は客室内与圧による天井切り欠き、窓のコーナー部からの疲労き裂の発生であった。また内圧疲労試験の途中で耐圧試験も挟んで行ったことにより、き裂の進展が抑制され、疲労寿命の予測を誤った可能性があることが明らかになった。

この事故は、その後航空機の耐疲労設計と耐久性評価試験を抜本的に見直す原因となった。例えば、航空機の開発においては、完全な機体を製作したうえで静強度試験や耐久性評価試験を実施すること、疲労寿命の予測においては荷重の大きさや繰り返し数に加え、荷重順序の影響も十分に考慮されるようになった。



マルチ回転曲げ試験機。1秒当たり100回(100Hz)の繰り返しサイクルで疲労試験を行う。



20kHz超音波試験機。1秒当たり2万回(20kHz)の繰り返しサイクルが可能で、極めて高速でギガサイクル疲労試験を行うことができる。

(写真提供: (独)物質・材料研究機構)



疲労を未然に防ぐ航空機の点検

航空機の定時整備には、飛行の都度行う飛行前点検、飛行時間が375～600時間ごとに行うA整備、3,000～6,000飛行時間ごとに行うC整備、4～5年ごとに行うHMV (Heavy Maintenance Visit) のような種類がある(時間は航空機によって異なる)。このような点検・整備の中で、金属疲労は早期に発見するという観点から、非破壊検査を実施している。適用部位としては、胴体や主翼の金属接合部、エンジン内の構造部材などが代表的なものである。

エンジン内には様々な部位にセンサーが取り付けられており、内部温度、圧力、回転数、振動等のデータを蓄積している。このデータを元に、必要に応じて部品交換を行うこともある。

またエンジンを機体から降ろした状態での検査では、部品の分解、洗浄の後に非破壊検査、寸法計測などを行う。なかでも高温部分を構成するタービンローター、タービンブレードなどは、離陸時に高温にさらされることで熱膨張し、着陸後エンジンが停止することで収縮する。この膨張と収縮のサイクルが疲労を引き起す原因となるため、エンジンの整備に関してはサイクル数(1回の飛行を1サイクルとカウントする)で整備期間を決める場合がある。



機体の各部はセンサーによってモニターされているほか、内視鏡(ボアスコープ)などによる目視検査も行われている。

■ 定時整備の分類

運航整備	始発便前、毎飛行間、最終便後。
A整備	375～600時間ごと。一晩かけて行う。
C整備	3,000～6,000時間ごと。1～2週間かけて行う。
HMV	4～5年ごと。約1箇月かけて行う。

* 飛行時間は機種によって異なる。

(資料提供:全日本空輸(株))

このような問題を解決するため、20kHz超音波疲労試験機が導入された。従来の100Hzに比べ200倍も速い繰返し速度を実現でき、100Hz試験機で3年かかっていたものを20kHzでは1週間で試験できることになる。

とはいえ、20kHzという繰返し速度が通常の100Hzに比べあまりにも速いため、当初は正しい試験結果が得られるかどうかが危惧された。最近では、高強度鋼で内部破壊が生じる条件では、通常の疲労試験結果とよく一致する結果が得られることが明らかになっている。高強度鋼における長寿命域での疲労破壊は内部破壊によって起るため、ギガサイクル疲労試験においては超音波疲労試験の適用が可能と考えられる。

超音波疲労試験機を用いた介在物検査への可能性

超音波疲労試験機は、疲労試験だけでなく介在物検査においても新しい可能性が広がっている。超音波疲労試験機を使うことによって、これまで検出するのが難しかった鉄鋼材料の組織中に混入する介在物が、簡単に見つかることがわかっている。

疲労破壊は、材料の最も弱い部分を起点として発生するため、組織の内部破壊が生じた場合はその箇所に最大の介在物が存在することになる。このように、最大の介在物を探すことができ、しかも介在物の種類を限定しなくてもよいというメリットがある。しかし、従来は内部破壊を生じさせるためには 10^7 回程度の疲労試



通常の疲労破壊の起点。1箇所の微細な起点から塑性変形によって次第にき裂が成長する。



ギガサイクル疲労破壊の起点。内部にある介在物が起点(フィッシュアイと呼ばれる)となりき裂になっていく。破面は材料内部のため黒く見える。

(写真提供:(独)物質・材料研究機構)

験が必要であり、このために100Hzでは1日程度の時間が必要だった。20kHz超音波疲労試験機を使えば10分程度ですみ、大幅な時間の短縮が可能となる。

超音波疲労試験の有効性が確認されるようになり、従来は困難だったギガサイクル疲労特性の評価が簡単に行えるようになった。しかし金属材料の疲労特性は、成分や組織だけでなく、製品の形状や寸法、使用環境(温度や圧力、湿度)など、多くの条件によって異なってくる。そのため必要な材料の疲労試験をすべて行うことは、実際には不可能に近い。そのような意味から、疲労試験結果のデータベース化などの基盤整備も重要である。鉄鋼材料にとって避けて通れない疲労という現象には、まだまだ解明すべき点は多く残っている。

●取材協力 (独)物質・材料研究機構、全日本空輸(株)
 ●文 杉山香里