

機械・設備の経年損傷と非破壊検査

独立行政法人 産業安全研究所 本

1. はじめに

我が国では、昭和30年代から40年代のいわゆる高度成長期に、多数の機械・設備が製造・建設されている。昨今の経済状況の中、高度成長期に製造された機器の中には製造・建設から30年以上経過し、設計時に想定した寿命・使用頻度をはるかに越えてなお使用されているものが少なくない。こうした長期間使用されている機械・設備で問題になるのは、機器の経年劣化であり、腐食・金属疲労といった経年損傷の存在である。これら経年損傷はしばしば天井クレーンやプラントの破壊、

倒壊、爆発といった大規模災害を引き起こすため、工場を安全に操業する上で大きな問題となっている。

経年損傷には、大きく分けて(1)機械的損傷と(2)化学的損傷がある。機械的損傷は天井クレーンのように荷重の変動を受ける機械・設備に多く見られ、代表的な損傷として金属疲労および摩耗が挙げられる。一方化学的損傷は、化学プラント、熱交換機等、化学物質や高温高压に曝されるところに多く存在し、腐食に代表される。また機械的損傷および化学的損傷の混合した例として、応力腐食割れという経年損傷も存在する。これら経年損傷は、塗装の下や、配管の内壁など通常目視での検出が困難な場所に発生することが多く、見落とさ

* 機械システム安全研究グループ

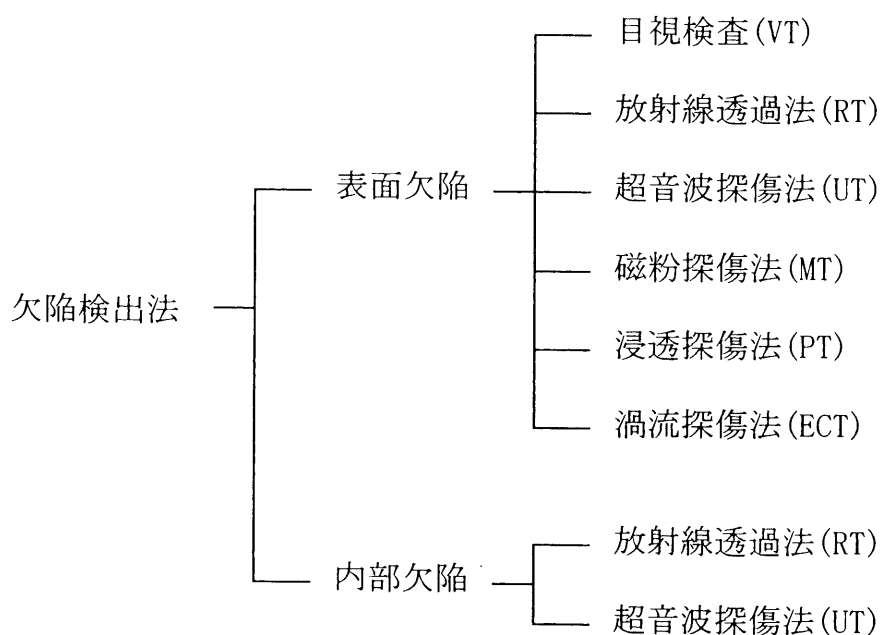


図1 主な非破壊検査法

れやすいのが実情である。このため安全な操業を継続するには、定期点検の際に経年損傷を確実に検出し、適切な保守を図ることが必要である。

2. 経年損傷の検出方法

機械・設備に使用されている部材が経年損傷により劣化していないかを確認する方法として、使用している部材そのものから試験片を作製し、強度試験（破壊試験）を行うという方法がある。この方法は、経年損傷を確認する方法として直接的で最も確実な方法であるが、健全な部材も破壊してしまうため、非常に不経済であり現実的ではない。そこで部材の機械的強度を低下させる損傷を

明確にしておき、これを供用中のままで検出することができれば、強度試験を行うことなく機械的強度を推定することができる。これが非破壊検査である。

現在広く用いられている非破壊検査手法を図1に示す。それぞれ目的に応じて使い分けられており、機械的経年損傷である疲労き裂の検出によく用いられているのは、(a)超音波探傷法(b)磁粉探傷法(c)浸透探傷法(d)渦流探傷法である。以下簡単にこれら探傷法の原理について説明する。

(a) 超音波探傷法

図2に超音波探傷法の測定原理を示す。この測定法は、超音波が物質を透過する際にき裂などが

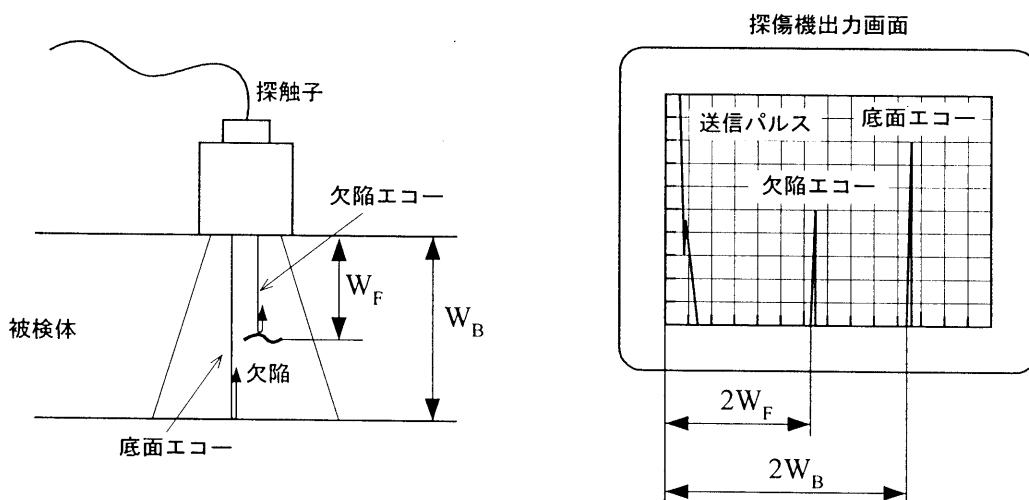


図2 超音波探傷法の測定原理

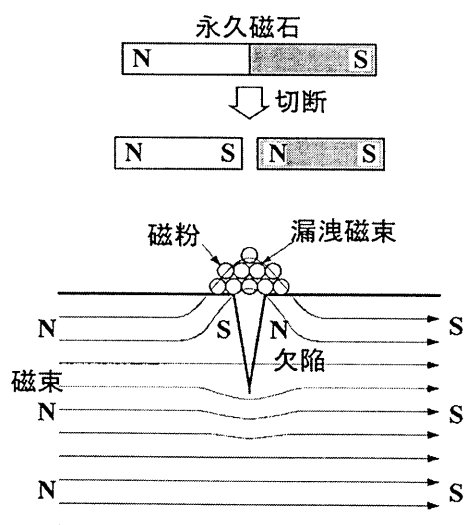


図3 磁粉探傷法の原理

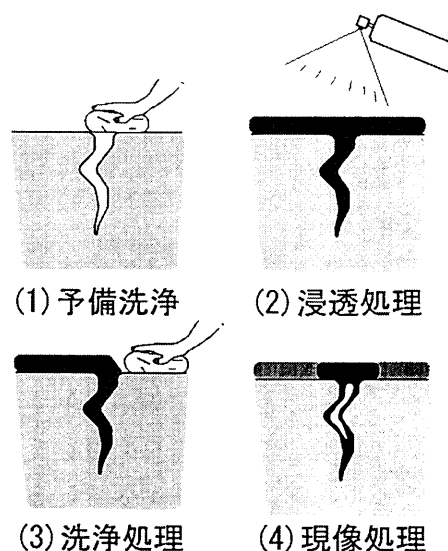


図4 浸透探傷法の試験手順

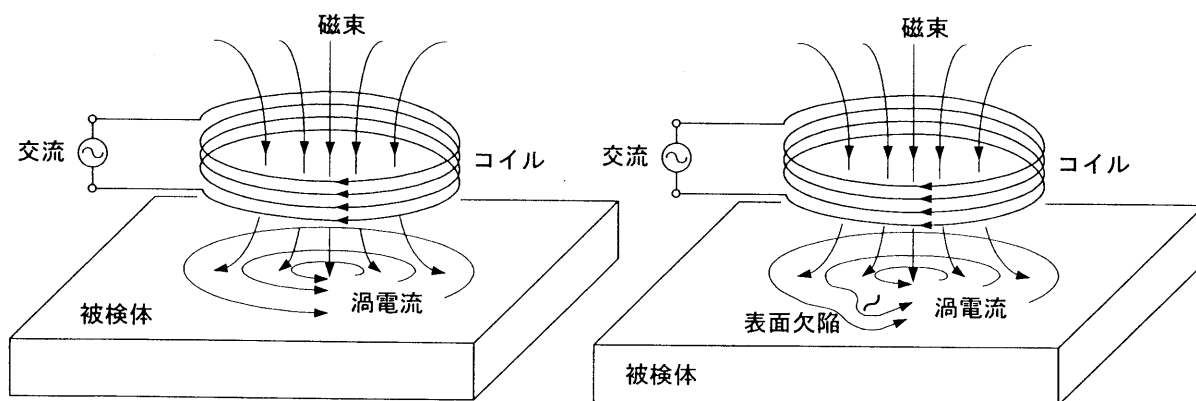


図5 渦流探傷法の原理

あると、そこで超音波が反射される現象を利用している。この方法は表面欠陥にも内部欠陥にも適用することができる上、検査装置もコンパクトで持ち運びが容易であることから、現場計測に多く用いられている。

疲労き裂のような欠陥がない場合は探触子から送信された超音波パルスは底面から反射されて戻り、探触子に受信されて底面エコーとなる。探傷面と底面の間に欠陥があると、欠陥で超音波が反射され戻ってくるために、送信パルスと底面エコーの間に欠陥エコーが生じる。このとき欠陥エコーが受信されるまでの時間とエコーの大きさから、欠陥までの距離とその大きさを推定することができる。最近では、探触子を走査するか、もしくは探触子を並列に多数配列した電子走査型探触子を用いることで、欠陥をレントゲン写真のように2次元的に表示する方法が開発されている。また超音波探傷法は、底面エコーを利用して腐食が問題となるパイプなどの肉厚を精密に測ることに利用されている。

(b) 磁粉探傷法

永久磁石を切断すると、図3に示すように切断面に磁極が発生する。同様に鉄鋼材料のような磁性体を磁化すると、ちょうど永久磁石を切断した時のように、欠陥の両側に磁極が発生する。このため磁化した材料の表面に磁石の粉をまくと、欠陥のあるところにだけに磁粉が吸着し磁粉模様が現れるため、欠陥を検出することができる。この探傷法は、表面に開いているき裂の検出に優れて

おり、表面が滑らかな場合は幅数 μm 、深さ0.1 mm程度の微小なき裂から検出することが可能である。

(C) 浸透探傷法

この方法は、浸透液を用いて被検体表面に開口したき裂を毛細管現象により拡大した像にし、肉眼により検出する方法である。図4にこの手法の手順を示すが、予備洗浄・浸透・洗浄・現像の4工程からなっている。この方法は非常に簡便なため、広く普及しているが、浸透液が欠陥内部に浸透する必要があるため、表面欠陥にしか適用することができない。また金属以外の材料にも適用できるが、セラミックのような多孔質のものや極端に表面の粗いものは難しい。なお、この方法では、長さ2～3 mm程度の表面き裂から検出するこ

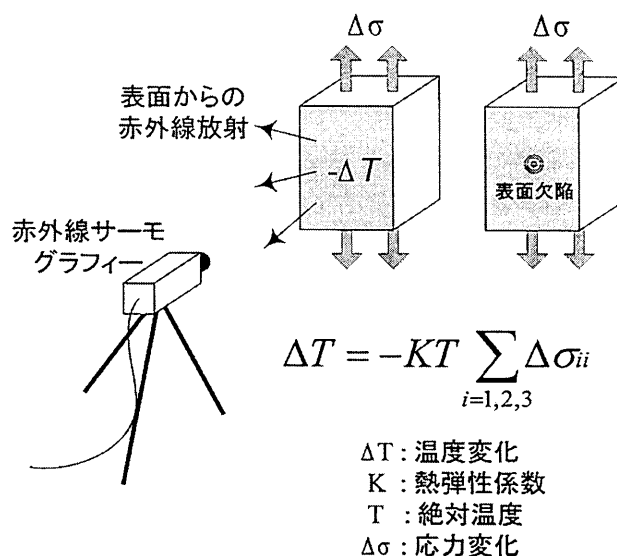


図6 赤外線サーモグラフィーによる欠陥検出原理

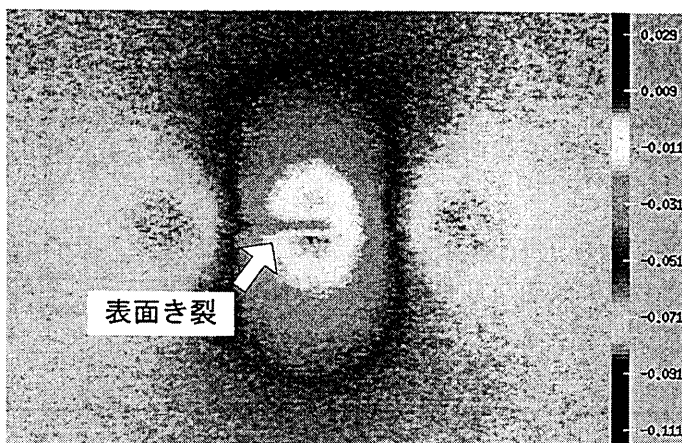
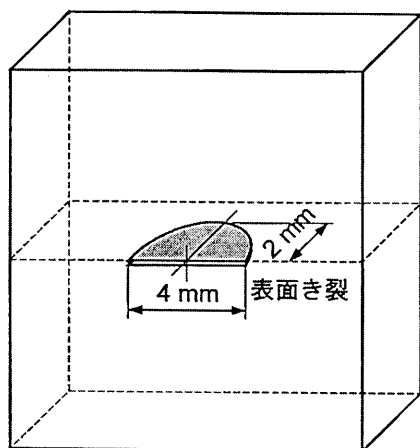


図7 内部発熱による赤外線 NDT で半円状表面き裂を検出した例

とが可能である。

(d) 渦流探傷法

交流電流を流したコイルを金属に近づけると、金属中に渦電流が誘導される。図5に示すように、金属中に欠陥が存在すると、誘導された渦電流は欠陥を迂回しなければならない。このため結果として磁界が変化し、コイルのインピーダンス（交流抵抗）が変化する。このコイルのインピーダンスの変化を測定することにより、金属中の欠陥を検出する方法が渦流探傷法である。交流磁界は、表皮効果といって金属表面から内部に向かって指数関数的に減衰するために、渦電流は金属表面に集中的に誘導される。このため、この探傷法では内部欠陥の検出は難しく、板材やパイプなどの表面欠陥の検出や、ワイヤロープの素線断線検出などに用いられている。

3. 赤外線を利用した新しい非破壊検査法

最近盛んに研究されている非破壊検査法の一つに、赤外線サーモグラフィック NDT (Non-Destructive Testing) がある。赤外線サーモグラフィとは、物体表面から発せられる赤外線を検出し、二次元の温度像として表示する装置で、これまで主として医学、気象、土木といった分野で活用されてきた。この装置を欠陥検出に用いたのが赤外線サーモグラフィック NDT である。

赤外線は波長が約 $0.75\mu\text{m}$ ～ 1mm の電磁波で、

波長が長いために減衰しにくいことから、例えば人工衛星から海水の温度を測るなど、非接触でかつ遠距離から測定することが可能である。そこでこういった赤外線の特徴を利用し、サーモグラフィック NDT では、高温プラントや原子力発電所など、人間が近づきにくい機械・設備への適用が期待されている。

赤外線 NDT の原理は非常にシンプルで、均一な材料の中にき裂や介在物などの欠陥が存在すると、欠陥近傍の温度分布が不均一になることを利用している。このため、この検査法では、被測定物に何らかの方法で温度変化を生じさせる必要があり、したがって加熱方式により、外部熱源を利

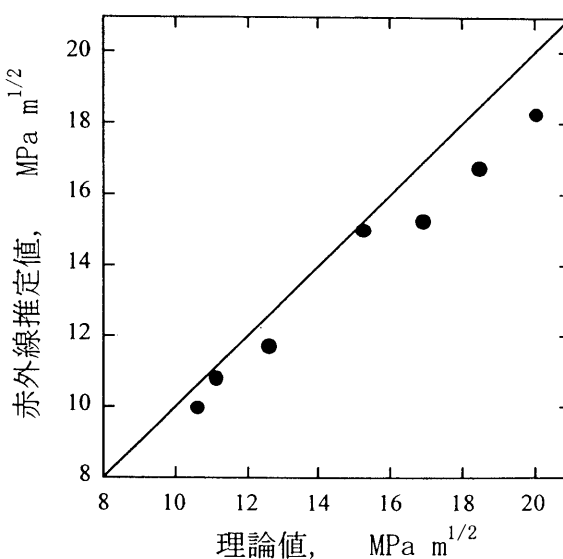


図8 赤外線 NDT から求めた応力拡大係数と理論解の比較

用して加熱（冷却）する方法と材料そのものを発熱させる方法の2つに大別されている。ここでは後者の材料そのものを発熱させる方法の一つである、熱弾性効果を利用した非破壊検査法について紹介する。

図6に内部発熱を利用した赤外線サーモグラフィーによる欠陥検出原理を示す。気体を断熱的に圧縮すると温度は上昇し、逆に膨張させると温度は低下する。同様の現象が金属材料のような固体にも起こり、その温度変化量は体積ひずみの大きさに比例している。被測定物中に疲労き裂のような欠陥が存在すると、外力を掛けたとき、き裂のまわりにはき裂の大きさに比例した大きなひずみが生じる。その結果、き裂のない部分に比べて発熱量が多くなり、き裂近傍の温度は周囲温度に比べて上昇する。したがって赤外線画像に温度不均一場が現れ、欠陥を検出することが出来る。

図7に、この方法により検出した表面き裂とその周囲の温度分布を示す。き裂の周囲は温度分布が不均一になっているのがわかる。また、この方

法で測定したき裂周囲の温度分布は、応力分布と一対一に対応していることから、測定した温度分布からき裂の有害度を判定する重要な指標である応力拡大係数を求めることが出来る。そこで、図8に測定画像から応力拡大係数を求め、理論解と比較したものを示す。両者の誤差は最大でも10%程度と非常によい一致を見せており、この方法による非破壊検査が非常に有効であることがわかる。

次にこの手法をより実際の構造部材に近い試験片に適用した例を紹介する。機械・設備には必ずといってよいほど溶接部が存在するが、これら溶接部は初期欠陥を含んでいることが多く、疲労き裂の起点となることが知られている。しかしながら、溶接部は形状が複雑なために、目視や従来の非破壊検査法による疲労き裂検出は難しいとされている。

そこで、図9に示すような面外ガセット試験片を作製し、赤外線 NDT を溶接部に発生する疲労き裂の検出に適用してみた。図9(1)は、溶接部の初期温度分布である。図中の三日月状の部分が、

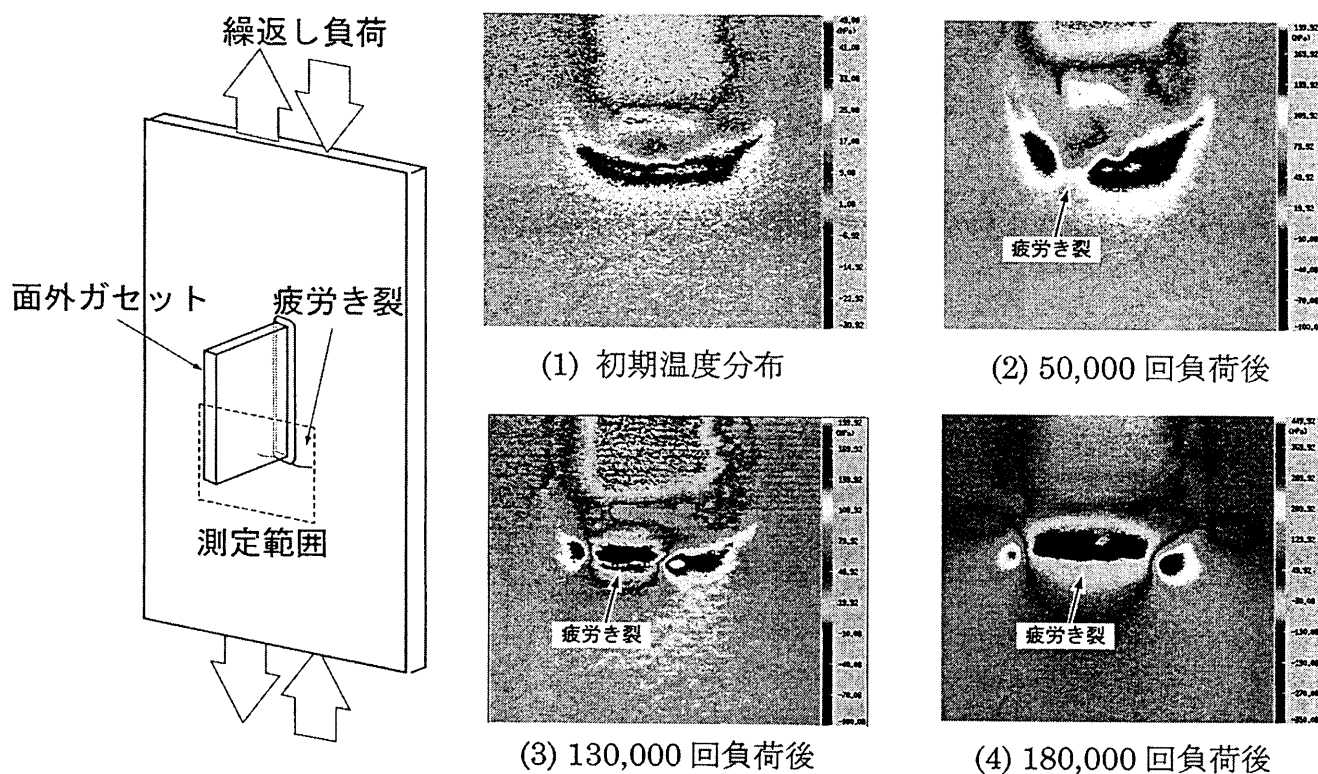


図9 赤外線 NDT による面外ガセット溶接継手に発生する疲労き裂の検出例

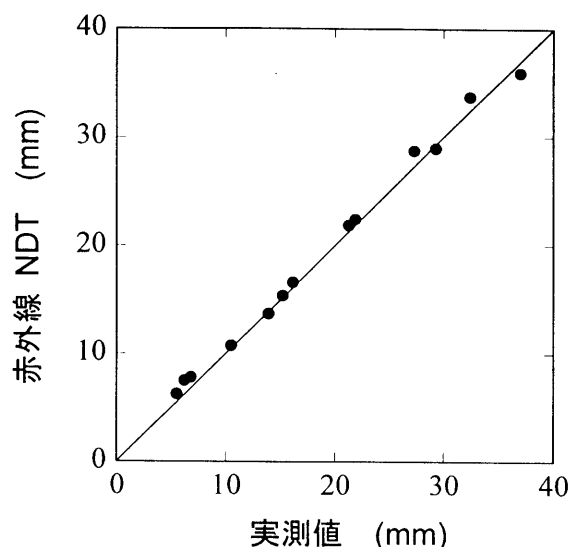


図10 赤外線 NDT によるき裂長さ推定値と実測値の比較

溶接止端と呼ばれる疲労き裂の発生しやすい場所である。この試験片に繰り返しの荷重を負荷し、人工的に経年損傷を導入したところ、図9(2)に示すように5万回程度負荷したところで画像に変化が現れ、疲労き裂が発生したことが分かった。なお、この時点で浸透深傷法を試みたが、き裂を検出することは出来なかった。また図9(3)、(4)を見ると、負荷回数が増えるにつれ、疲労き裂が成長していく様子がよく分かる。そこで、測定画像から画像処理によりき裂長さを推定し、実測値との比較を図った。図10に実測値との比較を示すが、赤外線画像から推定した値と実測値は非常によく一致しており、この方法が溶接止端部に発生する

疲労き裂検出にも非常に有用であることがわかった。

これまで赤外線 NDT の優れたところを紹介してきたが、自己発熱を利用した赤外線 NDT では、被測定物が一定振幅で振動している必要があり、適用範囲に限られるという欠点がある。したがって、自由振動のような変動荷重にも対応するなど、適用範囲を広げることが今後のこの手法の課題である。

4. お わ り に

人間同様、機械・設備等にも寿命が存在する。これまでは設計時に寿命を設定し、その期間内には「壊れない」設計（安全寿命設計）を行ってきた。しかしながら設計・製造時だけで機器・設備の安全性を確保することは困難なうえ、経済上の理由からも「損傷許容設計」、すなわち初期欠陥やそれによる経年損傷が起きることを前提に、これら損傷を監視・管理することによって機械・設備の安全性および余寿命を制御しようという考え方が導入されつつある。またもう一步進んで、積極的にこれら損傷の成長を制御することによって機械・設備の安全および寿命延伸を図る「破壊制御設計」も提案されている。このような新しい設計法では、損傷を確実に検出し、その位置と大きさを正確に評価することが最も必要とされる。このことから、今後精度の良い非破壊検査法がますます求められることが予想される。

労働安全・衛生コンサルタント表示運動

本会では、平成11年度からの新しい運動として、「労働安全・衛生コンサルタント表示運動」を実施しています。

会員コンサルタントが、出版物等にその職・氏名を表示する際には、「労働安全又は労働衛生コンサルタント」の肩書を必ず表示しましょう。