

第5章 残された諸問題

5-3 強度評価法の拠り所と限界

■ 評価因子「応力」には限界がある

当然ではあるが、道具というものは機能上の限界がある。使う上で適用範囲が存在する。秘められた機能を想定外に使うこともあるが、それは極めて稀だ。

例えば、大工道具としての金槌(かなづち)は、時には殺傷の凶器として使われることはあると思うが、切る機能であるノコギリとしては使わないであろう。

その道具を正しく使う為には、利用者がその道具の使うことのできる範囲を知っていることが重要となる。

この技術コラムでは強度評価法について語ってきた。そこで、その重要な役割を演じているのは「応力」であることを述べた。

強度問題での代表的パラメーター(因子)であるその応力も、ある種、強度評価での世界における道具なのである。

従って、実は、一般の道具と同様、応力も使う上での限界が存在する。そして、その限界を把握しておくことが重要となる。

応力に関して何が限界なのか。

それは、**亀裂(クラック, Crack)**が在るその亀裂部の強度評価には無力である、ということだ。

なぜなら、亀裂の先端部は曲率半径が無限小であり、即ち、応力は無限大で**特異(Singularity)**となる、からである。

言葉を換えれば、曲率半径がゼロの切欠きとみなし、応力集中係数で表現すれば無限大となってしまう。

こういう事情で、繰り返すが、応力という物理量は亀裂先端部の観察・評価には使えない。

それでは、亀裂に対しどう扱えば良いだろうか？

考えられる一つは、強度評価の対象範囲を、応力が使える範囲に限定してしまうことである。つまり、亀裂が生じた時点で、評価としてNGと判定しまう、ことだ。

この方法での設計思想としては、その製品に対し「微塵も壊れてはならない」という、より厳しい立場を採ることになる。

2つ目は、応力とは別に亀裂の状態を把握できる他のパラメーターを設定し、これを活用する方法だ。

この設計思想として、亀裂の存在を認め、亀裂が進展するか否かを観察対象とし、それに伴って判定を行う、という考え方を

採る。こちらの方が設計上の自由度はかなり増すことになる。

2つ目のような亀裂に係る強度問題を扱いたい場合、それでは、応力の代わりに何をを使うのか？

以下、それについて言及しよう。

■ 亀裂問題には別の評価因子が必要となる

前述したが、強度問題を扱う前提として、まずは亀裂の存在を容認し、その検討対象として亀裂の進展度合いの把握や進展の評価などに力点が移ることになる。

この際、どのようなパラメーターが使われているのか。

結論的に言えば、**応力拡大係数 (Stress Intensity Factor) K**というものが在り、これが亀裂進展の評価に関する一つの代表的なパラメーターとして使われている。

その応力拡大係数Kは亀裂先端付近の強度を表し、次のように定義されている。

$$K = f(g)\sigma\sqrt{\pi a} \quad (5.3.1)$$

ここで、

σ : 亀裂部位での公称応力

a : 亀裂の長さ

$f(g)$: 試験片や亀裂形状などによる補正係数

$f(g)$ の詳細に関しては、大筋の話から逸れる為、大変恐縮だが省かせて頂きたい。

因みに、応力拡大係数の単位は $\text{Pa}\times\text{m}^{0.5}$ となる。単位系として、多少、違和感があるが、その理由は次のような事情によるようだ。

当初、脆性材料による研究実験において、破壊する際には次式に示されるように亀裂の長さ a と破断応力 σ_1 はほぼ一定Cになることが見出された。

$$\sigma_y\sqrt{a} \approx C \quad (5.3.2)$$

結果的に、この左辺の物理量が基本として踏襲され、単位もそこから来ていると考えられる。

ついでながら、(5.3.2)式の右辺の一定値とは物理的に何を意味しているのだろうか。

それは、ある種のエネルギーを示している。具体的には、亀裂の**表面自由エネルギー**である。表面自由エネルギーとは、新たな表面を作るのに必要なエネルギーで**表面張力**に相当するものだ。

更にその後、脆性材料から鋼のような延性材料への適用を考えた際、このエネルギー的観点は別の要因が加味・拡張された。

延性材料では亀裂先端に塑性域が生成され、その際の**塑性散逸エネルギー**が大きく影響していると見なされている。

それらの要因が考慮されて(5.3.1)式が導かれてきたわけだが、いずれにしても、応力拡大係数Kは亀裂進展を駆動させるエネルギー量と解釈できよう。

次に、応力拡大係数の用途を幾つか示しておこう。

最も代表的な使い道は、亀裂破壊の判断ができることだ。

応力拡大係数はある臨界値に達すると破壊が生じる、という特質を持っている。亀裂材破壊のこの臨界値を**破壊靱性値**(Fracture Toughness) K_c といい、以下の式が破壊に関する評価式だ。

$$K \geq K_c \quad (5.3.3)$$

又、応力拡大係数を活用することで亀裂の成長度合いを検討・評価できる点も捨てがたい。

詳細は省くが、応力拡大係数と**亀裂成長比**(繰返し数に対する亀裂長さの変化率)の関係が明らかになっており、それらの関係式も見出されている。

更に、応力拡大係数の効用として見逃せない点は、応力拡大係数によって亀裂先端近傍の応力状態も推定できることにある。

亀裂先端近傍の位置を図5.8のように円筒座標系(r, θ)で表現すると、局所応力は以下の式より得られる。

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (5.3.4)$$

ここで、

σ_{ij} : 応力テンソル

K : 応力拡大係数

f_{ij} : 荷重モードごとに亀裂先端との相対位置、応力成分によって定まる既知の関数 (詳細は割愛)

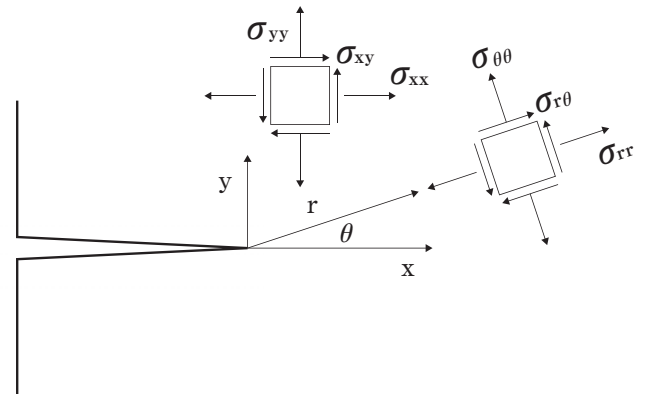


図5.8 亀裂先端付近の応力状態

ついでに指摘しておこう。

この式は単に亀裂先端近傍の応力状態が分かるというだけではない。新たに生み出されたこの応力拡大係数は、従来の材料力学という分野の「応力」と結び付いている点にも留意すべきである。ある意味、エネルギー理論と応力理論の橋渡しが出来上がったと言えるだろう。

ともあれ、応力拡大係数という概念は、過去蓄積されてきた体系と離れて孤立しているわけではなく、従来の力学分野に立脚して構築されている。この点でも(5.3.4)式は大いに意義があると思う。

■ 「破壊力学」の分野を探ろう

ところで、先述した応力拡大係数は使う上で制約条件がある。

それは、適用には弾性体理論が拠り所となっているという点だ。即ち、微小変形の状態で、且つ、応力とひずみの関係は線形性が保たれている、という条件が必要となる。

又、亀裂先端には塑性域が発生するわけだが、その塑性域は亀裂や亀裂体の寸法に比べて極めて小さい、ということも条件となる。

それでは、これらの条件を満たさない、例えば、亀裂廻りの割と広い領域の塑性変形部を対象としたい場合、どう対処すべきだろうか？

実は、このような場合に扱うことのできる幾つかのパラメーターが既に存在する。

代表的なものに絞って紹介しておこう。

1つが**亀裂先端開口変位**(CTOD, Crack Tip Opening Displacement) δ である。

亀裂先端部が塑性変形する際、先端部は開口する。その開口幅 δ を亀裂の応力・ひずみの代替パラメータとして使用しようというわけだ。

δ についても応力拡大係数 K の場合と同じように、脆性破壊の限界値 δ_c を測定することができ、判断基準として活用できる。

もう一つ挙げれば、それは**J積分**(J integral)というパラメータだ。

このパラメータは亀裂廻りの大規模・広めの塑性領域を対象としており、亀裂近傍の領域に存在するポテンシャルエネルギーに着目している。**ポテンシャルエネルギー開放率**を計算臨界値と比較することで破壊の判断が可能である。

このように亀裂の進展・成長などの過程を応力以外のパラメータで扱うことができるわけだが、これらの研究・実用化を行う為の対象分野は**破壊力学**(Fracture Mechanics)と名付けられている。

参考までに言えば、この破壊力学の分野は1920代にグリフィス(Griffith)が脆性破壊の研究で先鞭を付けた。その後1940年代、アーウィン(G.R.Irwin)が延性材料へ適用、展開を図った。

応力拡大係数の提案、そして、材料力学との橋渡しとなった(5.3.4)式の導出は、このアーウィンが行ったことだ。

いずれにしても、亀裂の問題を扱う場合には、破壊力学の知識が必要となる。

この節では、破壊力学の入り口を覗いただけだ。満たされない読者もいよう。

突き放すようで大変恐縮だが、必要に応じて読者自身でこの分野を探って活用されたい。

■ 考え方の根幹は「実証的経験則」である

さて、ここで話題を強度評価に関する全般的・包括的なモノに戻そう。そして、これをこの技術コラムの納めとしたい。

ここまで強度評価に係る種々の手法・技法を通覧してきたわけだが、そもそも、その手法を支えている根幹の考え方は何であろうか？

まず言える事は、強度問題は全てが頭の中だけの「思弁的理論」で構築されているわけではない、ということだ。

否、むしろ、「経験則」がベースにあり、その個々の事実や認識を統一的に説明する為に数理理論が補強している、と解釈したい。

つまり、強度評価の判断やそこへのプロセスは、実際のデータを整理して、系統的に組み上げモデル化され成り立っている、と観ることができる。

例えば、ヴェーラー線図、ひずみ-寿命線図、そして疲労限度線図など。これらは、表面上は凶化・数理処理が施されており論理的・理論的には観えるが、その基盤は実測データである。

又、弾性破損での最大主応力説、最大せん断応力説(トレスカ応力)、せん断ひずみエネルギー説(ミーゼス応力)なども経験則以外の何物でもない。

一見、理論的には扱われてはいるが、「破壊するは否か」という究極の実現象と比べて矛盾なく対応が取れているので生き残ってきた、と言える。そうでなければ、とうに駆逐される運命だったに違いない。

更に言えば、最終評価である評価判定式そのものも、極めて実際の・実証的な思考法で成り立っている。

静的強度にしる、疲労強度にしる、実際に破損した際の応力なり繰返し数を臨界値として採用しており、そして、判定の拠り所はその臨界値との相対比較で判定している。

これが、実際の・実証的であると思う所以である。

このように、強度評価の論理の枠組みは、まさしく経験・体験から裏付けされた実証論で組みあがっている、と観ることができる。

こういう意味で、強度評価の考え方の根幹は、「実証的経験則」である、と言えよう。

ところで、論理、即ち説得の論法を経験則にせざるを得ない理由は何であろうか？

それは、金属材料の物理的性質に対する表現方法に限界が在るからだ。そう解釈している。

巨視的因子である応力・ひずみの存在。そして、繰返し数。これらのパラメータによって金属材料の物理的性質を浮き彫りにするには、実際の金属からデータを採り、そこから何らかの規則性を見出すしか術が無いからであろう。

「金属材料のことは金属材料に聞け、そうすれば金属材料が応えてくれるはずだ」、というわけである。

最後に指摘しておきたい。

「実証的経験則」で成り立っている手法は、上手く当て嵌め使えば大変有益で役に立とう。但し、基本的には適用範囲を逸脱して使わないよう、配慮願いたい。物事には適用できる範囲・条件というものが存在するからだ。

そして、その手法を活用する際には、製品の台上試験や市場での実績評価などに対応を取りながら、即ち、実証しながら使っていくことが肝要となる。