

材料破壊研究室

当研究室では、構造材料の損傷、劣化、経年変化を力学的に評価しています。原子炉をはじめとする大型構造物では時々き裂が発見され、また破断し事故にいたるケースが報告されています。車両や橋梁、船舶、ガスタンクも例外ではありません。どんな材料も環境負荷によって、製造時とは異なる特性に変化、老朽化し、場合によってき裂が発生し、進展します。そのため構造物は弱くなります。き裂の発生前の材料損傷や発生後の材料の強度劣化を実験を通じて調査することによって、構造物を安全に使用し、材料損傷劣化を考慮した設計に役立てることを念頭において研究を進めています。

■材料損傷を評価する電磁センサーの開発

3連コイルによる測定 (ECT)

振動型磁力計

マルテンサイトの出現

伸び=6mm
伸び=2mm

検出電圧 [mV]
磁化 [emu/g]

中央からの距離 [mm]

引張り ← → 引張り

オーステナイト相 → マルテンサイト相

外力

外力を受けるステンレス鋼の組織変化

概要

ステンレス鋼は身近な商品から大型構造物にまで錆びにくい金属として幅広く使われています。また、液体ヘリウム温度(−296℃)から高温(600℃程度)まで力学的に安定しています。そのうち、オーステナイト系ステンレス鋼は最も使用頻度、使用範囲が広く、準安定な非磁性のオーステナイト組織からなります。ところが大きな外力を受けると、特に低温ではこの組織は硬いマルテンサイト相に変化します。この組織は強磁性体であるため、この変化を電磁気的な方法で検出すれば材料の力学的変化、すなわち材料劣化損傷を調べることができます。3連コイルは中央が励磁コイルで両側が検出コイルとなっています。励磁コイルに交流電流を流すと交流磁束密度が発生するため両側の検出コイルに誘導起電力が発生しますが、逆巻きしてあるので事実上検出電圧はゼロです。この3連コイルを導体に近づけると、導体に流れる渦電流による起電力のみを検知します。もしも材料に組織上の変化やき裂が発生していれば渦電流に乱れが生じ、それを検知できると考えます。

概要

左のグラフのようなステンレス鋼の試験片を用意し、室温や極低温下(液体窒素中)で引張負荷を与えます。室温の試験では、試験片中央にコイルを近づけます。外部から電磁気の影響を受けないようにアクリル樹脂や木を使います。試験片は中央を細くしてひずみが集中しやすくしています。つまり試験片全体でひずみが分布します。負荷後、試験片中央から両端部に向かって電圧を検出します。

伸び=2mm 伸び=6mm

塑性ひずみの分布(FEM解析)

検出電圧 [mV]
弾性ひずみ [%]

中央からの距離 [mm]

伸び=6mm
伸び=2mm

検出電圧 [mV]
硬さ [HV]

中央からの距離 [mm]

検出電圧 [mV]
硬さ [HV]

−196℃
20℃

ヒックス硬さ [HV]

検出電圧 [mV]

概要

右上のグラフは検出電圧と磁化を比較したのですが傾向は良くあっています。磁化は磁石になりやすさの尺度であり、マルテンサイトの出現を意味します。右中のグラフは塑性ひずみ分布と比較したものです。これは有限要素法の解析結果です。右下のグラフは検出電圧と硬さとの関係を表します。3連コイルによって材料の硬さを予測できています。

■き裂を含む材料の強度評価

<<接着層の破壊特性>>

ひずみゲージ

接着剤層

エポキシ系接着剤で室温下接合

接着剤層の製作

破壊時のJ積分 [kJ/m²]

接着層の厚さ [mm]

● ステンレス鋼
● 超ジュラルミン

概要

接着継手は施工が簡単で、軽量化に貢献するため航空機や自動車などに幅広く使われます。他方、接着剤で接合した構造部材の信頼性は接着層の強度とともに、接着層内に潜在するき裂の破壊強度に大きく影響されます。また、接着層の厚みは接着構造の重要な設計パラメータであるため、その破壊じん性を正確に把握する必要があります。当研究室では厚さが0.1mmから1mmまでの接着層をもつ継手に長さ5mmの片側き裂をテフロンシートで導入し、破壊実験を行っています。左上のグラフはステンレス鋼および超ジュラルミンをそれぞれ接着接合した場合の破断時のJ積分、すなわち破壊じん性を表しています。ピークの厚さは若干異なりますが、最適な接着層の厚さが予測できます。

上左のグラフは厚さ0.1mmの接着層の中央付近に、また上右のグラフは接着層と被接着材のステンレス鋼の界面にき裂が存在する場合の塑性ひずみの分布の数値解析を表しています。界面き裂の形状がゆがみ、ひずみが偏っています。

<<超ジュラルミンの高速破壊特性>>

ひずみゲージ

エポキシ系接着剤で室温下接合

接着剤層の製作

概要

超ジュラルミンは主として宇宙・航空機材料に使われますが最近では、環境負荷低減のため新幹線、自動車、建設材料、機械構造材料にも用途が拡大しています。このためには鉄鋼に匹敵する材料保証のための豊富なデータの蓄積が必要です。当研究室では高速引張、破壊じん性試験を行い、低速時の機械的性質、破壊特性との違いを実験及び解析的に調べています。衝撃を受ける材料の破壊じん性を正確に推定するためにはひずみ速度の影響を受けて変化する材料の機械的性質や塑性ひずみの蓄積による内部発熱を考慮する必要があります。これらの影響は有限要素法ANSYSを用いて確認します。右上のグラフは引張速度と破壊じん性であるJ積分の関係を表しています。実験値はライスが提唱している簡便法によって求めたものです。それに対して解析値は降伏点のひずみ速度依存性およびき裂先端で生じた熱による温度上昇に基づく熱応力を考慮したものです。簡便式によるJ積分が高いひずみ速度まで有効であることが示されています。右下のグラフは高速破壊した試験片の破面をSEM観察したものです。点線は初期き裂の前縁で、き裂は上に進んでいます。高速破壊においても鉄鋼と異なり、延性破壊を示す小さなディンプルが支配しています。超ジュラルミンでは低速破面との違いは乏しく、ただディンプル径が小さめです。

グラフのような試験片をRCT試験片と呼びます。上下の穴にピンを差し込んで引っ張るときは引張と曲げを受けて容易に開口します。1mm/minの低速から4m/sの高速まで負荷速度を変えて試験片を破断させます。右の写真には試験片表面に4箇所ひずみゲージを貼り、き裂の発生時刻の推定や動的荷重の推定に役立てています。

破壊の係数: J積分 [kJ/m²]

引張速度 [mm/sec]

● 実験
● 解析

小さなディンプルの集合体

SEM破面