印象深い破損例*

宇佐美三郎^{*1}

Memorable Fractures

Saburo USAMI ^{*1}

^{*1} Hitachi, Ltd., Hitachi Research Laboratory
3-1-1 Saiwai, Hitachi, Ibaraki, 317-8511 Japan

Key Words : Failure Analysis, Fracture, Fatigue, Crack Propagation

1. はじめに

製品開発やトラブル対策で強度試験を行い、関連情報も調査していると、文字通り、「事実は小説よりも奇なり。」と感じることがしばしばあります。ここでは、私が感動した破損現象を 10 例紹介したいと思います。研究テーマの宝庫である製品との関わりがこれまで少なかった方も、実際の場面をイメージして、「より役に立つ研究」に向かう契機としていただければ幸いです。なお、文献(1)、(2)には他の例も紹介してありますので、興味がありましたら合わせて参考にしてください。

2. 回転機の破損

2・1 ロータの遠心破壊と品質基準作成

1950 年代に米国で蒸気タービンや発電機ロータの遠心破壊が多発し、大きな塊がはるか遠方まで飛散することがありました。そこで、私たちは堅牢な防護壁を有する回転破壊試験装置を地中に設置して、直径 1400mm の実物ロータの輪切り円板中央に欠陥を設けた試験体を吊下げ、遠心破壊試験を実施しました。材料の靱性が改良されていたので、予定時間を数 10 分過ぎてようやく破壊に至りました。防護壁に衝突して轟音と地響きを発した後も、破断塊がしばらくガラガラと走り回るのは驚きです。さらに、12MN 試験機で疲労き裂進展データも取得して、将来想定される毎日起動停止運転にも耐えられる品質基準が制定されました。現在、我が国のロータシャフト材と発電設備の国際競争力は抜群となるに至っています。

2・2 長大き裂が存在しても稼働した発電機

このようなことから、回転機には微小なき裂も発生させないよう細心の注意を払うのですが、英国には数 100 mm ものき裂がロータに存在していても、安定に稼働した発電機がありました。一つは、不平衡負荷運転で表面部が渦電流加熱されて、イナーシャスロット（コイルスロットの存在しない磁極部の剛性を低下させて全周均一とするために設ける多数の周方向スロット）の各先端に延性き裂が発生したものです。残留応力分布と破壊力学をもとに、それら延性き裂からの疲労き裂進展・停留挙動を検討して、代替シャフトが出来上がるまで 2 年もの間、監視しつつ運転させていました。

もう一つは、コイルの遠心力を支えるウェッジとの間のフレット作用でシャフトにき裂が発生・進展したもので、き裂が直径 1120mm 断面のほぼ 1/3 に至って振動レベルが顕著に増加するまで、稼働していました。両者とも、シャフトの自重による回転曲げ応力が小さいことが幸いしています。

* 原稿受付 2010 年 10 月 28 日

^{*1} 正員、フェロー、(株)日立製作所 日立研究所 (〒317-8511 茨城県日立市幸町 3-1-1)
[著者略歴]1944 年 11 月 30 日生まれ。発電機、超伝導機器、原子力機器、建設機械、
パワーデバイスなど電力、産業製品の強度信頼性向上を担当。
E-mail: saburo.usami.ak@hitachi.com

2・3 ホースの共振疲労破損

大形発電機の固定子には多数のコイル内を水冷する目的で、それぞれに PTFE 製絶縁ホースが接続されています。その中に、電工構造のため固有値にばらつきが生じて、電磁振動に曲げ共振しホースにき裂が入ったものがありました。PTFE の疲労限度ひずみ幅は大きいので、屈曲疲労破壊の再現は困難を極めます。ホース内の水の存在や PTFE の弾性率が温度に依存することによっても固有値は変化するので注意が必要です。

3. 意外な事象

3・1 純水中におけるステンレス鋼の応力腐食割れ

1970 年代に世界中の沸騰水型原子炉配管に多数のき裂が発生しました。純水中でステンレス鋼（不銹鋼）が応力腐食割れを起こすのですから「意外」と受け止める向きもありました。しかし、検討の結果、溶接熱によって結晶粒界の炭素がクロムと結合して近傍にクロム欠乏相を生じ、これに溶接引張残留応力と水中溶存酸素が重畳すると、割れが発生することがわかりました。それぞれの因子について対策がなされ、応力面では、炉内構造物にはウォータージェット・ピーニングを施工し、配管には内部に通水しつつ高周波誘導加熱するなどの方法で、接水面の残留応力を圧縮側に改善する技術が開発され適用されています。

3・2 不溶着部を有する溶接継手の疲労強度における寸法効果

溶接継手では、不溶着スリットはき裂とみなされます。片側重ね継手について、引裂くモードの曲げ疲労試験を行ったところ、板厚 1.5mm の継手では疲労限度の応力幅が板厚 32mm の継手の 5 倍もありました。このように大きい寸法効果が得られたのは初めてです。しかし、破壊力学を用いて考察してみると、疲労限度の値や寸法効果は実験値とぴったり一致しました。学問の有用性を再認識し、この手法を多くの継手設計に適用しています。

3・3 過負荷による強度向上

部材に過負荷を与えると、その後の負荷による塑性変形やクリープ変形は抑制されます。き裂材に対して、靱性の高い高温で予荷重を与え、き裂先端を塑性変形させておくと、低温での強度が 3.5 倍に上昇したこともあります。また、予荷重が疲労き裂の進展速度を低下させることは、旅客機コメットの開発試験で過大な予測寿命を与えたことでも知られています。マルエージング鋼ではき裂疲労限度が 8 倍にまで上昇しました。なお、予荷重は高い応力比の繰返し負荷に対しては効果がありませんでした。しかし、あるとき手間を省いて、予荷重後に荷重をゼロにまで下げないでそのまま負荷を繰り返したところ、疲労限度は大きく上昇しました。この現象には、除荷で生じるき裂先端の圧縮塑性域と再負荷で生じる引張り塑性域との静的関係が影響しているようで、その「比」が大きい場合にはき裂は進展しませんでした。また、き裂疲労限度は、室温大気中に比して乾燥ガス中では低下し、高温では上昇します。どうもこれらは酸化物誘起き裂閉口の仕業のようです。なお、停留き裂は微妙な平衡状態で進展を阻止されていますので、条件が変わればそれが解除されて進展を再開することもありますから、注意が必要です。

3・4 超伝導機器における遅れクエンチ

超伝導機器の世界では、「極低温で使用する樹脂は耐熱性の高いものが良い。」とされています。この意味が長い間理解できませんでしたが、「遅れクエンチ」現象を検討しているうちに納得できました。遅れクエンチは、永久電流モードの一定負荷状態で突然超伝導状態が破壊するものです。4K での比熱は室温の 1/1000 程度に低下し、超伝導状態維持に対する導体の温度裕度は 2K 程度しかありません。そのため、含浸樹脂などが割れるかコイルが微小すべりを生じて、室温で温度を 0.002 K 上昇させる程度の微小擾乱を導体に与えると、クエンチが発生することになります。極低温の一定負荷状態で変化する可能性があるのは、樹脂のクリープ（粘弾性）変形で、これが樹脂割れやスティック・スリップ発生の原因となることが考えられます。樹脂の低温クリープ変形は、そのガラス転移温度すなわち耐熱性が大きく影響し、それが高いほど小さくなります。

3・5 熱座屈による撓み変形

超伝導機器の中には磁場の精度を ppm オーダで制御するものがあり、高精度に組み立てられます。あるとき、長さ 1500mm の直管が他の部材の熱収縮によってわずか 0.2mm 圧縮されただけで、その 60 倍の 12mm も弓なりに座屈変形しました。冷却になって計算すれば当然のことではあります。レールが熱膨張で座屈変形して列車が脱線する例も見られますが、レール間の間隙が設けられていなかったからではなく、若干不足していたためと考えられます。

3・6 セラミックの金属接合部における割れ

セラミックは金属と接合されて構造体となります。アルミナにアルミニウムを高温で接合したところ、冷却過程でアルミナに割れが生じたことがあります。これは、引張り強さ 300MPa のアルミナが降伏応力がわずか 30MPa のアルミニウムによって割られたことを意味します。熱弾塑性解析を行ってみると、接合端部のアルミニウムが三軸引張状態となって降伏応力の数倍の応力が発生し、それに対応してアルミナにも高い引張応力が発生していることがわかりました。このアルミナの表面に加工傷などが存在すると、割れの可能性があります。なお、セラミックの加工傷は、高温の大気酸化を利用して治癒することもできます。

3・7 三軸応力状態の功罪

三軸応力状態は、ゴムを密閉容器に入れると弾性変形しなくなるなどの不具合も生じます。しかし、スラスト軸受の柔らかいホワイトメタルも、より強度の高い裏金に接合して使用すると、面圧による厚さ方向のクリープ変形をほとんど生じなくなることや、T 形に配置した 2 部材を突合せ面の裏側から貫通ビームで溶接すると、溶着断面積と降伏応力の積から得られる値に比して著しく高い接合強度が得られることなどは、結果的に三軸拘束状態を利用していた例と言えます。

4. 破 損 原 因 究 明 法 に つ い て

技術者の中には、製品や部品を擬人化して、「このひとはこのあたりが辛そうだからこうしてあげよう。」と言いながら設計し、試作品に過大な負荷を与えて破壊試験を行うときも、わが子が痛めつけられているような気持ちになる人がいます。そのように愛情を注いで製作しても、想定外の事象で破損することはあり得ます。そのとき、これを「技術力向上の好機」と捉えて幅広く検討することが大切で、他に先駆けた高信頼性製品の開発にもつながります。その場にニコニコしながらやって来て、途方もない可能性を多数列挙する人は貴重な存在です。また、原因究明と対策には、破損品を回収して分析することと、破損を定量的に再現することが不可欠となります。さらに、模型試験においても、運用条件での健全性を確認した後に、さらに負荷を上昇して強制破壊させ、破壊モードと裕度を見ておけば、次の設計に役立ちます。

5. お わ り に

このように、機器の破損に対してもマーフィーの法則 “If anything can go wrong, it will.” は常に成り立つと考えるべきで、ダーウィンの進化論「生き残るのは最も強いものや最も賢いものではなく、変化に対応できるものだけである。」は、動植物に対してだけでなく、私たち自身や製品に対しても当てはまります。

文 献

- (1) 宇佐美三郎, “著名な破壊事例”, 最新 フラクトグラフィ: 各種材料の破面解析とその事例 (2010), pp. 443-467, テクノシステム.
- (2) 宇佐美三郎, “設計者のための実用破壊力学, Part 4 事例に見る破壊力学強度の意外な特徴”, 機械設計, Vol. 48, No. 13 (2004), pp. 46-56.