海上安全研究領域、材料信頼性研究グループ *田中義久、後藤英信、小林佑規

1.まえがき

タンカー原油タンクの腐食において、上甲板 裏の原油タンク空隙部は、厳しい腐食衰耗環境 にある。タンク空隙部は、防爆用イナートガス システム(IGS)からの IG ガスと原油から放出さ れる H2S の混合したガス腐食環境にある。特に、 IG は O2、SO2 を含み、腐食を加速させている。

著者らは、バラストタンクに対する海水環境、 石炭船倉を模擬する環境での腐食および腐食疲 労について検討してきた。本稿では、原油タン クの空隙部を模擬する腐食環境での腐食疲労試 験結果について報告する。まず、公称応力をベ ースとしたき裂発生寿命の S-N 関係について述 べる。次いで、腐食ピットの観察およびアスペ クト比、腐食ピットの応力拡大係数範囲を用い た疲労き裂発生条件を示す。

2. 実験方法

2.1 供試材および試験片

供試材は、500MPa 級高張力鋼板 KA32 である。 板厚は 10mm、板表面はショットブラストが施 されたのち、無機ジンク・ショッププライマー が塗布されている。

切欠き疲労試験片は、供試鋼板からロール方 向を荷重方向に一致させ、鋸盤により採取した。



切欠きは、平行部中央の両側に機械加工し、その形状および寸法を図 1 に示す。応力集中係数 Kt は、1.2、 2.0、 2.93 および 3.77 である。切 欠き加工部の表面は、エメリーペーパー 400 # 以上の仕上げとした。

2.2 実験方法

疲労試験は、荷重容量 200kN および 300kN の フルデジタル制御油圧サーボ疲労試験機を用い、 繰返し速度 0.17Hz、正弦波の荷重制御、応力比 R=0.1 の部分片振り引張疲労とした。試験片は 油圧チャック部で試験機と電気的絶縁を行い、 試験片のみが独立した腐食系を形成している。

腐食環境は、原油タンク上甲板裏空隙部のガ ス環境を模擬した。すなわち、原油に硫化水素 [2%H2S+N2(Bal)]を吹き込み、原油中から放出 される H2S ガスとイナートガス[5%O2+13%CO2 +0.01%SO2+82%N2(Bal)]の混合ガスが腐食セル に供給されている。試験の概略図を図2に示す。 試験温度は、腐食セルの両端にヒーターを取り 付け、30 に制御した。また、試験セルの底面 に人工海水を満たし、試験セル内の水分を保持 した。



図2 腐食疲労試験の概略図

セル内のガス濃度は、H2S が 3000ppm、CO2 が5%、O2が3%、H2Oが13mg/1であり、SO2 はほとんど検出されなかった。セル内底部の人 工海水は、図3に示すように、pH が8.2から5.8 程度に低下している。



図 3 腐食セル内の pH 変化

3.試験結果および考察

3.1 き裂発生の S-N 線図

疲労き裂の発生は、直流電位差法から求め、 切欠き底に発生する板厚貫通き裂深さが 1mm の ときの繰返し数をき裂発生寿命 Nc とした。Nf は破断寿命を示す。



き裂発生における公称応力の S-N 関係を図 4 にプロットし、実線で示す。破線は、海水環境 の S-N 線図¹⁾である。き裂発生寿命は、Kt が大 きいほど短寿命となるが、空隙部環境の Nc は 海水環境よりさらに短寿命である。その寿命低 下を海水環境と比較すると、Kt が大きい 2.93 と 3.77 の Nc は海水環境のそれと変わらないが、Kt が 2.0 から 1.2 と小さくなるに従い Nc は短寿命 となる。また、空隙部環境の S-N 関係は、希硫 酸 pH4 水溶液の 25 環境 ²⁾にほぼ等しい結果 となった。

き裂発生寿命が上記のように応力集中係数に よって相違するのは、形状による切欠き効果と ともに Kt が大きくなるとき裂の発生と進展に対 する環境依存性が小さくなるためと考えられる。 また、本実験の pH は、5 ~ 6 であるにもかかわ らず、希硫酸 pH4 とほぼ等しい寿命となったの は、酸素濃度と温度の相違が考えられる。すな わち、酸素濃度は、希硫酸 pH4 環境が空気飽和 状態の水溶液中で試験しているのに対し、本実 験の O2 濃度が 3 %の湿潤状態にある。試験温度 の相違は、希硫酸 pH4 環境が 25 であり、本 実験が 30 である。

3.2 腐食ピットの観察

腐食疲労き裂の発生を電子顕微鏡(SEM)によ り観察した。以下、Kt=2.0の切欠き底について、 試験が高応力短寿命の場合と低応力長寿命の場 合を見る。

写真 1 は、高応力短寿命試験(S=320MPa、 Nc=5.75x10⁴)の切欠き底に見られた腐食ピット である。ピットは、荷重方向に直角に発生し、 長いひび割れ状で、先端が鋭く尖っている。写 真の上部は、疲労破面である。



写真-1 高応力短寿命の切欠き底腐食ピット



写真2 低応力長寿命の切欠き底腐食ピット

写真2は、低応力長寿命試験(S=160MPa、 Nc=4.65x10⁵)の切欠き底に見られた腐食ピット である。腐食ピットの先端が丸みをもち、また 深さが浅い比較的若いピットも見られる。これ らのピットは、疲労き裂が進展している期間に 発生したものと考えられる。一方、低応力長寿 命試験では、ピットから疲労き裂の発生起点と なる過程で、写真3に見られるように、ピット の先端が湾曲する。この湾曲したピットが近接 したピットと合体し、疲労き裂の進展につなが っていくものと考えられる。このような、ピッ トの先端が湾曲してピットが合体していく様子 は、海水環境の腐食疲労試験でも観察している。



写真3 ピット先端の湾曲

写真4および5は、疲労破面のSEM 観察写真 であり、疲労き裂の発生起点と見なされる。写 真4の高応力低寿命の破面に見られるピットは、



写真4 高応力短寿命の破面



写真5 低応力長寿命の破面

比較的浅いが、写真 5 の低応力長寿命のぴっと は、比較的深く、丸みを持っている。

3.3 疲労き裂の発生条件

前述の腐食ピットの観察から、疲労き裂の発 生条件を検討する。

(1) ピットのアスペクト比

破面で観察されるピットの深さを ap、表面ピットの半幅を Cp とし、ピットのアスペクト比を =ap/Cp とする。ap と Cp をプロットして図 5 に 示す。ap と Cp にはかなりよい相関がある。すな わち、プロット点は、 が 0.4 ~ 0.8 の間に分散 しており、平均値は =0.6 程度と推定される。 一方、希硫酸 pH4 および pH2 環境のき裂発生起 点のアスペクト比²⁾は、 =0.2 ~ 0.8 に分散し、 平均 0.4 であった。この結果は、H2S とイナート



ガスの原油タンク空隙部環境では、腐食ピット の深さが希硫酸環境の場合より、深く成長する ことを意味している。

(2)疲労き裂の発生条件

切欠き底の腐食ピットを表面き裂と見なした ときのき裂発生条件、すなわち、疲労き裂発生 の腐食ピットに対する応力拡大係数範囲 ΔKCF を求める。ΔKCF は、村上ら³⁾が解析した応力集 中部に存在する半楕円形状の表面き裂を腐食ピ ットと見なして求めた。この応力拡大係数範囲 は、軸力と曲げ成分の和として求められるが、 切欠き底の負荷応力が大きくき裂深さが小さい ことから、ほとんどが軸力成分である。



△KCFとapとの関係を図6に示す。△KCFは、ap に対して Kt による相違が若干見られるものの、3 6.5 の範囲にある。ここに、原油タンク空隙
部の腐食環境における腐食疲労のき裂発生条件
として平均値を採用すると、 *Δ*KCF は 4.70MPa・m^{1/2}
m^{1/2} となる。この値は、希硫酸 pH4 環境の
3.60MPa・m^{1/2} と希硫酸 pH2 環境の 5.39MPa・m^{1/2}
の中間にある。また、 *Δ*KCF は、き裂が進展する
か、腐食衰耗に移行するかの境界値である。こ
のことを図 4 の S-N 線図に適用すると、低応力
範囲の腐食疲労では、疲労き裂の発生および進
展に腐食衰耗が大きく影響してくる。

4.まとめ

タンカー原油タンクの上甲板裏空隙部の腐食 環境を模擬し、H2S ガスおよびイナートガスの 混在する腐食環境において、KA32 鋼材の疲労 試験を行った。疲労き裂発生に関して、海水お よび希硫酸環境の腐食疲労と比較し、次の点を まとめとする。

(1)疲労き裂発生の S-N 線図は、希硫酸 pH4 環 境のそれとほぼ等しい。き裂発生寿命が海水環 境より低下するのは、応力集中係数 Kt が小さい ときであり、Kt が大きくなると変わらない。

(2)腐食環境にある人工海水の pH は、5 ~ 6 を 維持している。

(3)疲労き裂に発展した腐食ピットのアスペクト 比は、0.4 ~ 0.8 の範囲にあり、平均 0.6 程度と 見られる。この値は、希硫酸 pH4 および pH2 環 境の平均値 0.4 より大きい。

(4)疲労き裂発生条件は、腐食ピットの形状から 応力拡大係数範囲 ⊿KCF が 4.70MPa・m^{1/2} である。

参考文献

小林佑規・田中義久・後藤英信・松岡一祥・本橋嘉信:造船用鋼板切欠き材の腐食疲労強度、日本造船学会論文集、第182号、平成9年。
小林佑規・田中義久・後藤英信・松岡一祥:ばら積石炭船倉内の腐食を模擬した希硫酸環境における造船用鋼の腐食および腐食疲労、日本造船学会論文集、第185号、平成11年。
村上敬宣・鶴秀登・坂本幸治:応力集中部に

3) 利工敬重・鶴旁豆・坂本辛冶・心力集中部に おける微小表面き裂の応力拡大係数範囲,材料, Vol.35, No.396, 1985。