

だけ不十分であったというべきでしょう。

駒井らの研究は、残留応力の存在しない母材について、しかも ΔK したがって da/dN のきわめて小さい領域での食塩水中での腐食について ΔK_{cont} を提案したものです。もし ΔK_{eff} が駄目であるとする、Fig. 13 で母材についての ΔK と ΔK_{eff} のプロットが大きく異なることになります。しかし、Fig. 13 の da/dN は 10^{-5} mm/cycle 以上の領域であり、駒井らが扱っている 10^{-5} mm/cycle 以下の領域での議論は必ずしも直接的には適用できないと考えます。

(2) 溶接残留応力の効果がなくなるステージ3では、一律に溶接残留応力の効果を考えている ΔK_{eff} による整理がうまく行かなくなるのは当然で、この場合は Fig. 5 に示した ΔK のデータを見る必要があります。Fig. 5 のサワー原油中のデータは、ステージ3に相当する領域で3者は一致します。また、大気中でもステージ3は Fig. 5 のプロッ

トを見る必要がありますが、母材については ΔK の大きな領域のデータが不足していますが、その延長線は明らかに WM および HAZ に近づきます。

(3) 御指摘のとおり、角回し溶接継手と CT 試験片では溶接残留応力が同じではありません。しかし、Fig. 7 に示すサワー原油中で寿命がきわめて長くなる時の負荷応力は小さく、また Fig. 11 に示すように、深さ約 25 μm の停留亀裂が認められ、かつ破断面に腐食生成物が観察されたことより、Fig. 14 のステージ1に示したように、腐食生成物によるサワー原油の亀裂先端への侵入を妨げる機構が働いたものと考えています。圧縮残留応力は亀裂先端の開口を妨げ、腐食生成物の生成を助長するものであり、たとえ残留応力がなくても、負荷応力が小さいと同じ現象が亀裂先端で生じると考えます。

58 重畳ランダム荷重下におけるアルミニウム合金溶接継手の疲労寿命推定—2次元レインフロウ法の適用—

【討論】瀬戸厚司君 (1) 2次ランダム波形の応力範囲の中には、定振幅疲労試験の RUN-OUT データより小さいものも含まれており、それらの応力範囲に対して修正マイナー則を用いることは、推定寿命に安全側の結果を与えることになると考えられますが、その様な $S-N$ 線図の修正方法の影響はどの様にお考えですか。

(2) GAG 1次波による平均応力の影響が、DC のそれよりも大きくなる原因について、お考えをご教授下さい。

【回答】(1) 例えば DC+Random (Narrow banded) の C-3 (Table 4 参照) に対し、いま仮に疲労限を Fig. 7 より 158.6 MPa としてマイナー則による寿命推定を行うと、次のようになります。

・レンジ法や1次元レインフロウ法を用いた場合、計数されたすべての応力レンジが疲労限以下となり、推定寿命は無限回となってしまふ。

・2次元レインフロウ法を用いた場合、修正グッドマン補正に σ_u を用いるか σ_r を用いるかで補正後の応力レンジが疲労限をはさむような形となり、

σ_u を用いた場合： $D=1.230$

σ_r を用いた場合： $D=0.087$

というような不連続な推定結果となってしまふ。本研究のように比較的大きな平均応力が存在する場合、2次ランダム波の応力レンジが疲労限以下であっても、き裂は常に開口しており、材料に一定の疲労被害をもたらすものと考えられます。従いまして、き裂閉口現象にもとづく $R=0.1$ 試験の疲労限を、重畳ランダム荷重の場合にも当てはめるのは合理的でないと考えております。なお、使用 $S-N$ 線図の外挿法(修正マイナー則では直線外挿)に関しては、さ

らに議論のあるところかと存じます。

(2) はっきりした原因はまだ特定できておりませんが、1次波が GAG の場合と DC の場合とでは、き裂先端部における引張・圧縮の塑性域のでき方やき裂先端の尖鋭化・鈍化挙動に差があるのではないかと考えております。これに関しては、CCD スコープ等によるき裂先端部の動的観察を計画しております。

【討論】三沢啓志君 (1) 定振幅疲労試験結果の整理で、応力比の影響をどのように取り扱っていますか。

(2) 破断は、溶接止端部から 2mm 溶接金属側に入ったところから始っていますか。たとえばき裂の発生や大変形の起点になっていますか。

(3) き裂の発生を確認していますか。その場合、き裂進展寿命は、破断寿命の何 % 程度でしょうか。

(4) 修正グッドマン線図を有限寿命に適用する場合に、推定線は σ_u や σ_r に集束させるのですか。そうする方法をとる根拠となる研究報告を、ご存知でしたらお教え下さい。

(5) GAG 1次波が平均応力として作用するとき、DC より大きな作用となる理由を、どのようにお考えでしょうか。

(6) 実験中に、たとえばたわみ量の変化を測定するなどして、破断寿命以外の情報をとることを試みられたことがあれば、お教え下さい。

【回答】(1) 2章の最後の部分で述べられております通り、定振幅疲労試験は $R=0.1$ の片振り波形を用いて行いました。従いまして、Fig. 6 および 7 は、 $R=0.1$ の条件下における結果となっております。なお、ランダム疲労寿命

を修正マイナー則で推定するときには、Fig. 9 の各線図を用いて、完全片振り条件への平均応力補正を行っております。

(2) 大部分の試験片において、疲労き裂は、止端部から 2 mm 程度溶接金属側に入ったあたりを（貼付した歪ゲージを切断する形で）通過しております。また、狭帯域の 2 次ランダム波を用いた場合、疲労破面に明瞭なビーチマークが観察されるものがありましたが、このときは当該箇所がき裂発生点となっております。しかし、き裂がさらに溶接金属側を湾曲して進んだり、ジグザグに進んだりするものもありました。

(3) 本研究ではき裂発生を確認しておりませんので、明確に御答えることは出来ません。参考までに御示しますと、Fig. D-1 は、定振幅試験における最大応力集中部歪範囲の繰返しに伴う変化の一例です（破断寿命 $N_f = 471981$ 回）。20 万回を過ぎたあたりに見られる歪範囲の低下は、き裂の発生・成長による応力解放の影響と考えられます。この低下量が歪範囲の初期値の 5% に達したところをき裂発生寿命 N_c とする方法がありますが（例えば日本造船研究協会第 202 研究部会報告書など）、これを同図に適用しますと、 $N_c \approx 27$ 万回となり、き裂進展寿命は破断寿命の約 43% となります。

(4) 疲労限度を対象とした修正グッドマン線図は、元来、設計を意図した一種の便法であり、厳密な理論的根拠があるわけではなく、専ら経験に基づく平均応力補正法であるといえます。これを有限寿命に適用することの是非に関しては議論のあるところですが、例えば参考文献 2) においても σ_r を用いた同様の補正を行い、比較的良好な結果が得られています。また、ASME の Boiler and Pressure Vessel Code Sec. III においても、有限寿命域に関して σ_u を用いた平均応力補正を施すという考え方が採用されています。

(5) はっきりした原因はまだ特定できておりません

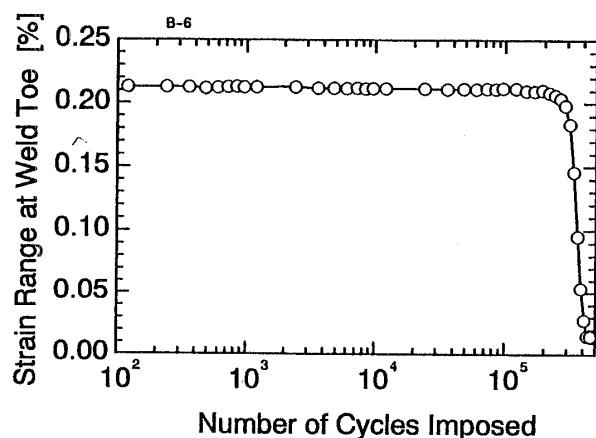


Fig. D-1 定振幅試験における最大応力集中部歪範囲の繰返しに伴う変化

が、1 次波が GAG の場合と DC の場合とでは、き裂先端部における引張・圧縮の塑性域のつき方やき裂先端の尖鋭化・鈍化挙動に差があるのではないかと考えております。これに関しては、CCD スコープ等によるき裂先端部の動的観察を計画しております。

(6) Fig. 5(a), (b) や Fig. D-1 に御示しましたように、止端部近傍最大応力集中部における歪値を、適当な間隔をおいて動的にサンプリングしております (2.1 節参照)。

【討論】 阿部 允 君 ここで研究されている手法は、鋼橋の実構造物では非常に幅広く現われる現象で、実用性の高いものと思われる。

たとえば、鉄道橋のように、高速運転時の列車荷重による主要な応力の他に、振動による応力が重畳される実働応力波形や、溶接構造における残留応力に活荷重による応力が重畳される場合の疲労評価に用いることが出来れば有効手法となるものと思われる。

そのような場合、振動が重畳される波形の形状や周波数特性の影響はどのように考えたらよいか。また、残留応力場の疲労強度を把握するために、現行では大型の実構造試験体が必要とし、小型試験片の適用が難しい状況にあるが、この手法を用いた場合、実構造物の残留応力さえ把握出来ていれば、小型の試験片でも適用できると考えることはできないか見解をお聞きたい。

【回答】 本研究で用いた GAG 1 次台形波においては、波形の上昇・下降に要する時間が保持時間に比べて相対的に短くなっておりますが、三角波や正弦波などでは、保持時間が無く、常に上昇・下降の繰返しとなりますので、1 次波の 2 次ランダム波に与える平均応力効果が常に増減することになります。このような場合には、計数された応力レンジ毎に平均応力補正をする必要性が更に高まるので、本研究のような寿命推定法（2 次元レインフロー法→平均応力補正→修正→マイナー則）が有効であると考えます。波形の周波数特性に関しましては、1 次波と 2 次波の相対的な関係にもよりますので一概には言えませんが、本研究で用いた 2 次ランダム波の広帯域・狭帯域という違いは、寿命推定上有意な差異を生じませんでした。また、1 次波自体がランダム波となる場合も考えられますが、波形が狭帯域波形であれば、ある程度本研究の結果が適用できると考えております。實際上、1 次波が広帯域ランダム波となることは少ないので、これは対象外としております。

実構造物の引張残留応力場を小型試験片でシミュレートする場合、き裂の開口挙動をそろえる事が最も重要となります。その意味で、本研究の DC 1 次波を用いた重畳ランダム疲労試験はいずれも高平均応力域で行われており、き裂は十分に開口していると考えられ、溶接部の幾何学的形状さえ同じならば、得られた結果は大型構造物にも適用可能であると考えております。一方、GAG 1 次波の場合には、

たとえ残留応力が存在していたとしても大部分が初めの GAG 数サイクルで緩和されてしまうので、影響は小さいと思われます。耐力程度の引張残留応力が存在し、もっと

小振幅の GAG 応力波が作用する場合の重畳ランダム疲労挙動については、目下検討中です。

59 切欠底から発生する微視・微小き裂の疲労き裂寿命評価法について 「発生と伝播の統一理論による寿命予測のアルゴリズム」 ——RPG 規準による疲労き裂伝播挙動の研究（第4報）——

【討論】 寺崎 俊 夫 君 私どもは、SM 400 を熱処理した $H_D=110$ 、結晶粒径 $50\ \mu\text{m}$ 、 $\sigma_{a2}=219\ \text{MPa}$ の材料から、擬似余盛試験片を作成し、アングカットと停留き裂深さを研究しています。応力比 $R=0$ の実験ではアングカット深さが $d_a=0\sim 250\ \mu\text{m}$ と変化しても、常にアングカット先端に2結晶粒以内の停留き裂が存在していました。先生の統一理論により、私の実験値を説明できないでしょうか。

【回答】 7 節(2)で論じたように、切欠半径が小さくなるとある荷重範囲で停留き裂が生じるものと考えられます。ただアングカット深さが異なっても停留き裂の深さは1結晶粒と2結晶粒の間に存在するとのことですが、このことに関する定量的な検討は現在のところ出来ません。ただ切欠半径が小さい（アングカットも小さいと考えられる）場合、RPG 荷重はき裂発生後上昇していき、有効荷重比 U_{RP} はき裂の成長につれて小さくなります。一方 ΔK_{eq} は1結晶粒内まではき裂成長とともに小さくなりますので1結晶粒より大きなところで $U_{RP}\Delta K_{eq}$ は最小になると考えられます。また微視的には結晶粒界はマトリックスよりも高強度のため、結晶粒界に達する直前に RPG 荷重が上昇し、 U_{RP} が小さくなり伝播しにくくなることはシミュレーションで得ております。したがって今後の詳細は検討で、2結晶粒以内で停留き裂が生じるという推定結果が得られる可能性は存在します。今後この事についても検討したいと思っております。

【討論】 原田 昭 治 君 (1)結晶粒程度のき裂発生から破断までのき裂伝ばを切欠き材について評価されていますが、本知見を実用上重要な平滑材（応力集中部を持たず、かつすべり帯型き裂が発生し、それがモード II から I に遷移して成長するという想定条件の下で）の寿命予測へ適応する際の可能性と問題点について御教示下さい。

(2)微小き裂の寸法が小さくなると ΔK_{th} が低下することから、 ΔK_{th} の物理的意味付けが不明瞭で、既論文の主張点である、 P_{RPG} の考えを導入され、極初期のき裂伝ばから統一的に説明できると主張されています。しかし、 ΔK_{th} に対しては ΔK_{theff} の考えもあります。 P_{RPG} と ΔK_{theff} の関係について御教示下さい。

(3)切り欠底に発生する初期の分布き裂は必ずしも同一面上にある等軸分布き裂ではありません。事実 Fig. 5 中のビーチマークをみると、異なる面上に発生した分布き裂が合体したときに生じたと思われる段差のような痕が見えま

す。いわゆる食違いき裂の場合にどのような取り扱いをすればよいか、御教示下さい。

(4)平滑材、切欠き材を問わず、すべり帯型き裂または結晶粒寸法の微小き裂が発生するまでの段階では結晶粒界や結晶方位等、組織の影響を強く受けます。これらの点をどのように取り込まれたのか、御教示下さい。

(5)せん断モードも引張モードもき裂伝ば速度は同じであることを Williams の論文を引用して述べておられますが、混合モード型またはせん断型き裂の伝ばを取り扱った従来の研究報告では、せん断型き裂の方が引張型き裂に比べ、伝ば速度が高速側になるとする報告例が多いように思われます。また、せん断モードの場合にはき裂面の接触による摩擦の影響があつて純粋のせん断モードのき裂伝ばのデータは収集し難いと考えられます。き裂のモードによらずき裂伝ば速度が一義的に表示できる根拠をもう少し詳しく御教示下さい。

(6)7 節、(1)の説明および Fig. 23 と関連して、微小き裂発生直後の伝ばの加速減速を論じておられますが、この段階ではデータがばらつき、大略一端減速し、そのまま停留するか、または極小値を示した後、加速に転じて巨視き裂の伝ば速度に漸近していくとするのが一般的解釈かと思われれます。一端減速する理由についてもいくつかの説明がなされています。増減速を繰り返すという解釈は必ずしも一般的でないように思われますがいかがですか。

(7)7 節、(2)の切欠き底の停留き裂の記述と関連して、Fig. 1 の切欠き半径が $1\ \text{mm}$ の場合に停留き裂が存在しないのは西谷の結果と一致すると述べておられます。論文引用間違いではありませんが、西谷らの停留き裂に関する研究では停留き裂が生じるか否かは分岐点の切欠き半径によって決定され、その半径は同じ炭素鋼でも軟鋼と硬鋼では異なると述べています。また、正、負の平均応力を加えた場合、平均応力の増加とともに停留き裂が生じ難くなることを明らかにしています。貴研究が彼らの結果と材料、力学条件でどのような対応関係にあるから停留き裂が生じなかったという条件を明確にされた方が良いと判断されます。

【回答】 (1)切欠をもたない平板では、き裂発生直後き裂閉口が生じないため、 P_{RPG} は一担低下し、有効荷重比は1結晶粒進む間はき裂成長に対して大きくなっていくものと考えられます。一方結晶粒界に近づきますと P_{RPG} は粒界の