

裂の場合には該当しないと考えております。

【討論】堀川浩甫君 鉄道吊橋に関連した疲労実験においても部分溶込み溶接のルート部あるいは部材表面、コーナー部など外部に開口した欠陥からの疲労の寿命は内部に存在し外波につながらない欠陥の場合よりはるかに短時間であり、新しい考察が望まれていたところですが、上述の実験においては疲労き裂発生までの寿命の差が少なからぬウェイトを占めているように思われました。

き裂発生という視点でお教えいただけることがあれば幸いです。

【回答】本研究では、内部欠陥の実験は行っていないため、表面欠陥と内部欠陥の場合での寿命の比較はできませんが、御指摘の内容は興味ある問題ですので今後の検討課題にしたいと思います。なお、本実験の場合につい

て申し上げますと、放電加工により作成した初期切欠の長さ(半長) a_0 および深さ b_0 は、一部 $a_0 \approx 15\text{mm}$ 程度のものおよび $b_0 \approx 15\text{mm}$ 程度のものもありますが、多くは $a_0 \approx 2.5 \sim 5.0\text{mm}$ および $b_0 \approx 2.5 \sim 10.0\text{mm}$ 、またその幅は約 0.2mm の平面欠陥(切欠面は負荷方向に対して直交)としております。このような寸法条件ですと、かならずしも実際の溶接欠陥と同一視することはできませんが、本試験条件に対してクラックゲージにより板表面で長さ 1mm 程度の疲労き裂を検知した繰返し回数は約 $5 \times 10^4 \sim 5 \times 10^5$ 回程度の範囲にあり、き裂の全長 $2a$ が板幅の約 80% を越えるまでの寿命に対する比は、平滑平板の場合で約 20% 以下、また形状不連続平板の場合で約 10% 以下となっております。したがって、本実験では大部分の寿命はき裂伝播過程により占められると考えてよいようです。

27 信頼性解析にもとづく船殻構造の疲労設計

【討論】宮成恭慶君 (1) Fig. 12 の各構造要素の K_{tD} はいくらですか。又 Lapped bracket の Damage Percentage は他の要素よりも Stress Range に対する相関が悪くなっていますが、これは Lapped bracket の疲労解析がそれだけ複雑だと考えてよいのですか。

(2) 最近が高張力鋼の使用範囲が内部材まで拡大される傾向にあります。現在の直接計算の許容応力は、疲労基準か崩壊基準か明確でないので従来の延長上で設計するのに不安が残ります。今回の論文をきっかけに従来の許容応力を応力振幅、最大応力の2つの面から見直す作業が SR 等で大々的に行われることを希望します。実船解析では、現状では施工や航路などの詳細な条件の差は無視し得ると云う著者の見解には賛成です。

【回答】(1) Fig. 12 における K_{tD} は $1.5 \sim 4$ 程度の範囲の部材です。 K_{tD} を用いることにより部材の疲労試験の結果は統一的に論じられることは参考文献 10) に述べた通りです。

Lapped bracket が他の部材より相関が悪いのは、対象船が多く、環境航路が異なったものであることと Lap 部の特徴である角まわりの施工の複雑さが原因であると思えます。

現実には他の部材が Damage percentage との相関が良い方を例示したと見た方が正だと思えます。本文には、のせていませんが stress range 25kg/mm^2 程度で損傷してない場合もあります。

(2) 許容応力の考え方は貴見に賛成です。

航路等の条件差については、現実にはたとえば北太平洋のきびしさ等も考慮すべきとの意見もあろうとは思いますが、現状では許容応力も明確ではなく混乱をまねく

と考えます。

【討論】的場正明君 船舶のように、多数の部品、多くの部材で構成されている構造物の信頼性を考える場合、本文にも述べられているように各部材の重要度を評価しながら適正な信頼度、安全率を定めて、全体的にバランスのとれた設計が要求されるものと考えます。次の2点につき御意見を伺いたい。

(1) 部材の重要度を評価する手法と船体における各部材の重度の評価結果の妥当性。

(2) 部材の寿命を Paris 則の C の分数を 0.688 として計算されているが、現実の構造部材の寿命はどの程度の余裕をもって計算値のバラツキ内におさまっているのか。

【回答】(1) 現況での部材毎の重要度は、ルールにおける許容寸法に入っていることになると思いますが、これらは縦強度の方が横強度より、また大骨の方が小骨より重要であるといった定性的なものであると考えます。疲労解析はまだ行われ出してから日も浅く、疲労設計上の重要度評価は、たとえば液化ガス運搬船の破壊機構解析では部材により許容の被害度をかえていますが、その根拠はそれほど明確ではないと考えます。

実船の各部材の現況を把握し、重要度評価手法が完成することがのぞましい、そのためには本論文のような解析もその一環として行う必要があると考えます。

(2) き裂伝ばを考慮する液化ガス運搬船において、造船研究協会 RR 3 M の研究では、伝ば定数として基礎試験の上限値(短寿命側)を用い、初期き裂として検査基準として定められた値より大きなものを用いて検討しています。

RR 3M の計算がどの程度の安全率を有しているかはわかりませんが、少なくとも計算上合格したもので実船で損傷した例はみあたりません。また、参考文献 7) で実船の損傷例は、基礎試験の伝ば定数中央値(本論文の部材試験をもとにした中央値ともほぼ同じ)を用い良く説明出来ます。本論文の伝ば定数の分散を求めたいいくつかの部材試験の模型と実船が同じように施工材料がばらつければ本論文の $\log C$ の分散は妥当であるといえます。実船でも施工管理はきびしく部材試験における模型と同程度であると見なしうと思います。

【討論】 福田 収一 君 (1) 貴論文では FTA を用い疲労現象を整理し確率統計的の評価を行っておられますが、強度分野での定量的評価への FTA の適用はかなり慎重に行うべきであると質問者は考えます。その理由は、①電子機器、機械要素の結合システムの場合は、たとえそのシステムがいかに複雑であっても各要素の関係は論理的にきわめて明快であり、しかも比較的単純であるのに対し、強度の各要因間の関係はきわめて複雑であるので、要素間の論理関係の厳密な定義が要求される FTA はあまり適用が容易ではない、②かりに適用しても、ブール代数等を利用した FT の簡易化は定性的解析にはきわめて有用であっても適切な定量的評価には単純につながらない(文献 1) 等です。

質問者は、したがって、厳密な論理関係を基礎とする FTA よりも、要因(概念)の上下比較を追求する ISM (Interpretive Structural Modeling) の手法や、グラフネットワーク手法の方が問題の構造を明確にするので、結局適切な定量モデルの構築に最も役立つのではないかと考えておりますが、いかがでしょうか。

(文献 1) 福田, 機論 (A) 47, 414 (昭 56-2), 172

【回答】 船体におきます疲労損傷の要素はきわめて単純な一要因によることが多い。簡単にマクロ要因でいえば、外力の見つもら不良、設計ミス、工作不良などです。疲労損傷した場合、一要素の改善で同系船の損傷は十分に防止してきております。また材料、溶接法、塗装、部材寸法等は過去の実績とルールにより比較的狭い範囲に限定されています。見方をかえると古い歴史による実績で各要素は他機種にくらべぜい肉のないいっばいのものになっているので疲労損傷はどれかの要因一つでおきることとなります。本研究におきます FTA 適用は疲労損傷の要因分析として用いておりますし、過去の損傷要因に対する頭の整理のつもりです。

【討論】 富田 康光 君 (1) Demand と Capability の統計量、S-Nc 線図など実際の船体構造部材に関する量を示され、この設計手法で詳細構造の対疲労設計の定量的な指針が明らかにされると思います。さて、著者は許容設計応力を 20 年でのき裂発生確率を 1% として求

め、その妥当性を検討しておられます。その根拠のポイントは Fig. 12 にあると思いますが、今後ある部材の設計を実際に行うとき仮に Fig. 12 のような資料が無いとき、設定き裂発生確率をいくりにすればよいですか。あるいは 1% でよいのですか。

【回答】 本論文で試設計した桁橋構造は、現状では疲労解析を行わず寸法をきめていますが、20 年での発生確率 1% よりは、ちいさな安全率をもつように設計されていると考えています。

船がメンテナンスフリーを目指すのであれば本論文で示した程度の許容設計応力を有すべきでしょう。さらに日置氏質問とも関連し部材の重要度を考慮して許容値を定めるべきと考えます。

実際の設計では非損傷実績船との相対比較により、たとえば新船の詳細構造と公称応力を実績船と同じにすることにより実績船と同じ安全性が得られるという考えで設計すれば詳細な解析は必要なくなるでしょう。また非損傷実績をつみ重ねることにより、ベイズの方法等により理論諸仮定を修正していくことが可能であると考えます。

【討論】 朝田 洋雄 君 (1) 本文中 (p.262 右, 24~25 行目) では簡単に述べておいてですが、付録の表、式から A 船の損傷の標準偏差 0.17 (p.264, 左, 1 行目) を得る手順を、簡単に結構ですので御教示下さい。尚、確率変数は Damage factor (寿命) と考えて宜しいですか。

(2) 付録 Table A は計算から得た Damage factor を Interval 1~5 に分けていますが、例えば Interval 5 の損傷確率 2.8% は、 $N_{calmean}$ で基準化した設計寿命以下の確率と考えて宜しいですか。もしそうならば、何故そのようにして良いかお教え下さい。

(3) 損傷確率 50% の $N_{calmean}$ の求め方、また b と $N_{cal}/N_{calmean}$ との関係について御教示下さい。

【回答】 (1) 付録の例は A 船の本文で示した部材ではない部材の例であり手法を示したものです。確率変数は、寿命の対数であり付録の Z は、統計量 (平均一母平均) / $\sqrt{\text{分散}} / \sqrt{\text{個数}}$ です。

分散係数を求める手順は、区間内データを 1 グループのデータとみなし、Damage % に応じ Z だけ、位置を (たとえば Fig. 8 横軸) 移動することにより σ すべての区間データを 50% データとみなし、各区間のデータを同一レベルのものとする。以後は通常の方法で ((1), (2) 式) 分散と平均を求めます。この際前記した移動により (1), (2) 式は若干複雑なものとなります。

(2) Table A の Damage % は実船の実績です。

(3) 損傷確率 50% の $N_{calmean}$ は、たとえば Fig. 8 において、最初 N_{cal} を横軸として計算し、確率 50% になる位置の N_{cal} を $N_{calmean}$ としました。

b は、横軸は適当なスケール(.384, .544...)として付録における例題での平均であります。

28 設計寿命に近付いた構造物の安全性維持

【討論】久田俊明君 (1) 3.1 節末, 項目 6, で ΔN が本来確率変数であると述べられているが, これは式 (3) との関連で, 理論的にどのような確率分布になると考えられるか。またそのことと, ΔN 一定または指数分布と見做すことの妥当性について御教示下さい。

(2) 破損率 $\lambda(N)$ を厳密に与えるとすれば, 式 (7) のかわりにいかなる表示となりますか。

(3) 数値計算の諸条件が複雑で, 討論者には Figs. 4, 5 を洞察することができないが, Figs. 4, 5 の傾向, 或いは構造安全性を大きく支配するものは何かにつき, 点検の精度・間隔の要因を考慮してコメントを頂きたい。

【回答】(1) 検査で損傷を発見した場合, 他機の同構造部位は必ず点検を受け, また損傷を発見するという事もしばしば経験します。これは損傷発見に何機かが寄与する事を意味します。そしてこの効果を取り込む為に Boeing は ΔN を考え, 更に ΔN は確率変数と思われませんが, 近似的に一定値として取り扱っています。疲労き裂の発生時期は多くの調査からワイブル分布がよく一致するといわれ, もし Fleet 中の各機体が全く同じに使われれば, ΔN はこの分布に支配されると思います。しかし実際には運用に差がありますので, どのような分布になるか全く判りません。そこで Boeing の計算結果の適否も検討する為と同じ値を用いました。また確率過程との比較をする為に Poisson 過程としたので, それ以上の意味は全くありません。今回はこのようにしましたが, 問題の取扱いを複雑にしますので適切かどうか判りません。今後更に検討したいと考えています。

(2) 厳密な $\lambda(N)$ は以下になると思います。但し本文中にも述べましたように, 修理後は再び損傷は発生しないと仮定しております。

$$\lambda(N) = \frac{P_{\infty} f_D(N)}{1 - \int_0^N P_{\infty} f_D(N) dN} \doteq P_{\infty} f_D(N), P_{\infty} \ll 1 \quad (7)$$

ここで $f_D(N)$ の代わりに a_c に到達する寿命分布 $f_c(N)$ を使用する事も考えたのですが, 安全側とする為に本文のようにしました。なお $f_c(N)$ は次のようになります。

$$f_c(N) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{N - N^*}{\beta} \right)^{\alpha-1} \exp \left\{ - \left(\frac{N - N^*}{\beta} \right)^{\alpha} \right\} \quad (3')$$

(3) 本解析で考慮している事は現実に沿う為に複雑となっていますが(複雑にするのが良いとは考えていません), 基本的に扱っている要因は, 久田さんの信頼性解析と同じであると考えて頂いて結構です。影響度評価はまだ行ってませんので, どの要因が検査欠陥非発見率にとって重要であるかの詳細は判りません。しかし久田さんの影響度評価結果と大同小異と推察します。例えば疲労き裂進展が重要である等です。解析方法の簡潔化も含め今後更に検討し, 別の機会に御検討頂ければ幸いです。

【討論】福田収一君 (1) 航空機を始め一般的に構造物は設計寿命末期に近づくと必ずしも設計当初考えていた条件下で用いられず, 場合によっては使用条件の大きな変更のため危険部位の移動や, 破損モードの変化を生じ, それが点検や補修に影響を及ぼすことが予想されます。このような問題にはどのように対処してゆけばよいのか。

【回答】(1) 就航に先立つ種々の検討及び試験にも拘わらず, 運用が設計寿命内であっても, 予期できなかった破損は多々生じているようです。そして順次修理・交換等を行いながら安全を維持しています。しかし御指摘のように, 設計寿命内では勿論の事, 設計寿命を超えても危険部位の移動, 破損モードの変化する運用変更は原則として許可されません。しかしそのような事が予想される変更を行う場合には, 計算結果に基づき必ず構造を補強し, 更に当面は検査を強化するようです。一般に変更は運用条件を緩和する方向で行われます。

29 薄い軟鋼板の突合せ溶接時の過渡応力と開先の 変位挙動に関する研究 (第3報)

【討論】前田豊生君 (1) 弾性解析解 (3) では $l \rightarrow \infty$ で発散する $(F/h)_{\max}$ の評価式を, 長さ 8m に及ぶ突合せ溶接継手について FEM 計算を実行して修正し, そこから多くの有益な結論を導いておられることは, この論文の大きな功績であると思います。 $(F/h)_{\max}$ が, l とともに発散しないことは, Table 1, B シリー

ズの計算値, Fig. 5 のプロットによって明らかにされており, 現場体験の直観と一致する。この点にもっと言及してもよかったですのではないですか。

(2) Fig. 10 で, $(F/h)_{\max}$ に極値があることが示されていますが, 現場の片面自動溶接はひょっとしたら極値に近いところで溶接しているのではないですか。