

I-117 破壊力学による海洋構造物の信頼性疲労設計

九州大学大学院 学生員○中村 聖三
九州大学工学部 正会員 大塚 久哲
九州大学工学部 正会員 彦坂 照

1. まえがき 現在、海洋構造物継手部の設計では、Minerの線形累積損傷則とS-N曲線を用いて、疲労限界状態に対する安全性照査を行うのが一般的である¹⁾。しかし、構造物に実際に発生した破壊は、材料中の微小欠陥を起点として発生進展した疲労亀裂に起因するものも多いので、海洋構造物継手部の疲労設計に、亀裂状の欠陥の存在を前提として破壊強度の評価をするという破壊力学の手法を用いることは有益であると思われる。また、設計変数に存在する種々の不確定要因を合理的に考慮することも重要である。以上のことから、以前、筆者らはHasofer & Lindの安全性指標 β を用いて、破壊力学による信頼性疲労設計規範を提案した²⁾が、安全性指標 β と破壊確率 P_f が直接結びつかない難点があった。本研究では文献2)の成果を踏まえ、対数フォーマットを用いた疲労設計規範を提案する。

2. 設計規範の定式化 線形破壊力学により定式化を行えば、海洋構造物継手部の寿命 T は次のように書ける²⁾。

$$T = \frac{a_B^{1-mn} - a_0^{1-mn}}{C k^n (1-mn) B^m S_m^m f_0 (1-n N_B)^{-a} \Gamma(a+1)} \quad (1)$$

ここに、 C, m =Paris則に関する材料、環境、応力比等によって決まる定数、 k, n =継手部の形状に依存するパラメーター、 N_B =破壊に至るまでの応力繰返し総数、 a_B =終局亀裂深さ、 a_0 =初期亀裂深さ、 S_m =設計寿命中に一度だけ現れる最大の応力振幅、 $\Gamma(\cdot)$ =ガンマ関数、 $a=m/\xi$ (ξ =ワイブル形状パラメータ)、 f_0 =応力サイクルの平均振動数、 B =応力算定におけるモデル化の誤差を定量化するための確率変数である。式(1)中確率変数として取り扱うべき変数として、 a_0, C, k, B の4つが考えられるが、文献2)の結果より初期亀裂深さ a_0 の変動係数の変化は、最大許容応力 S_m にはほとんど影響を及ぼさないことが知られたので、本研究では C, k, B のみを確率変数として解析する。

設計の対象とする継手部が設計寿命 T_s 中に破壊する確率 P_f は、 $P_f = P(T \leq T_s)$ で与えられるが、各確率変数が対数正規分布に従う変数であるとするとき安全性指標 β を用いて破壊確率 P_f は次のように書ける。ただし、 $\phi(\cdot)$ =標準正規分布関数である。

$$P_f = \phi(-\beta) \quad (2)$$

$$\beta = \frac{T - \ln T}{\sigma_{\ln T}} \quad (3)$$

また、式(3)における寿命 T の平均値 $\bar{T}$ 及び $\ln T$ の標準偏差 $\sigma_{\ln T}$ は次式で与えられる。

$$\bar{T} = \ln \frac{a_B^{1-mn} - a_0^{1-mn}}{C B^m k^n \Omega} + \frac{1}{2} \ln (1 + C_c^2) (1 + C_B^2)^m (1 + C_k^2)^m \quad (4)$$

$$\sigma_{\ln T} = [\ln (1 + C_c^2) (1 + C_B^2)^m (1 + C_k^2)^m]^{1/2} \quad (5)$$

アンダーラインはその確率変数の平均値を、 C_i ($i=C, B, k$)は変動係数を示し、 $\Omega = (1-mn) f_0 S_m^m (1-n N_B)^{-a} \Gamma(a+1)$ とおいた。式(3)、(4)、(5)及び Ω の式から最大許容応力振幅 S_m を求める式を誘導すると次のようになる。

$$S_m = [\ln (f_0 T_s)]^{a/m} \left[\frac{(a_B^{1-mn} - a_0^{1-mn}) \{ (1 + C_c^2) (1 + C_B^2)^m (1 + C_k^2)^m \}^{1/2}}{(1-mn) C B^m k^n f_0 T_s \exp(\beta \sigma_{\ln T}) \Gamma(a+1)} \right]^{1/m} \quad (6)$$

ここに、 β_0 は基準作成者側の判断により決定される安全性指標である。ここで、作用荷重による応力比 R ($S_{min}/S_{max} < 0$)を考慮するために、継手の疲労強度或は設計ホットスポット応力 S_0 は次のように低減する。

$$S_0 = S_m / (1 - R) \quad (7)$$

これを用いて継手の疲労限界状態に対する信頼性規範は、結局次のように書ける。

$$S_{max} \leq S_0 \quad (8)$$

ここに、 S_{max} は T_s 年設計波に対するホットスポット応力の最大値である。

3. 各設計変数が最大許容応力振幅 S_m に及ぼす影響 各確率変数の平均値及び変動係数が表1に与えられたような値であるとしたとき、主要な設計変数をパラメータとして変化させると、式(6)によって計算される S_m がどのように推移するかを示したのが図1である。この図において横軸は設計変数によって異なる座標軸としている。

表1 確率変数の統計値

$\underline{C}$	5.0E-11
C_c	0.70
$\underline{B}$	0.70
C_B	0.50
$\underline{k}$	2.00
C_k	0.50

パラメータでないときの各設計変数の値は、 $m=2.5$ 、 $n=0.5$ 、 $f_0=0.25\text{Hz}$ 、 $a_0=0.1\text{mm}$ 、 $T_s=20\text{年}$ 、 $\beta_0=3.0$ 、 $\xi=0.6$ 、板厚 $t=20\text{mm}$ とし、終局亀裂深さは板厚の85%とした²⁾。この図から次のことが知られる。すなわち、(1) 波の平均振動数 f_0 や設計寿命 T_s は、最大許容応力振幅 S_m にはさほど影響を与えないこと、(2) 初期亀裂深さ a_0 及び板厚 t も S_m にはさほど影響を与えないこと、(3) 設計安全性指標 β_0 の影響は顕著であり、 β_0 の値が大きくなると当然のことながら S_m の値が小さくなること、(4) 波の長期分布の形状(ワイブル形状パラメータ) ξ は S_m に最も影響を及ぼすこと、(5) 応力算定のモデル化の誤差を定量化する変数の平均値 $\underline{B}$ の影響も非常に大きく、 S_m とほぼ反比例の関係にあることである。なお、板厚 t が変化することにより k の値も変化するが、文献1)に与えられた図2($e/t=0$ 、 $\alpha=0$)によりそれぞれの t に対する k を読み取って板厚の影響を評価した。

4. あとがき 海洋構造物の信頼性疲労解析では、各確率変数が対数正規分布に従う変数であるとする対数フォーマットを使用することが推奨されている³⁾。本研究でもこれに従うことにより、比較的単純な表現で破壊確率 P_f を正確に記述することができた。本法を実際の設計に適用する場合、式(2)により安全性指標 β と破壊確率 P_f が関係づけられるので、設計安全性指標 β_0 を定めることが比較的容易であろう(例えば、破壊確率を0.1%程度にする必要があれば、式(2)より $\beta_0=3.0$ 程度にすればよいことがわかる)。ただし、確率変数の統計値及びワイブル形状パラメータ ξ の値を適切に評価することが必要であり、この点に関しては今後ともなお一層のデータの蓄積が望まれる。

4. あとがき 海洋構造物の信頼性疲労解析では、各確率変数が対数正規分布に従う変数であるとする対数フォーマットを使用することが推奨されている³⁾。本研究でもこれに従うことにより、比較的単純な表現で破壊確率 P_f を正確に記述することができた。本法を実際の設計に適用する場合、式(2)により安全性指標 β と破壊確率 P_f が関係づけられるので、設計安全性指標 β_0 を定めることが比較的容易であろう(例えば、破壊確率を0.1%程度にする必要があれば、式(2)より $\beta_0=3.0$ 程度にすればよいことがわかる)。ただし、確率変数の統計値及びワイブル形状パラメータ ξ の値を適切に評価することが必要であり、この点に関しては今後ともなお一層のデータの蓄積が望まれる。

<参考文献>

- 1) Rules for Design, Construction and Inspection of Offshore Structures, 1977, Det Norske Veritas
- 2) 大塚久哲他: 破壊力学を用いた定式化による海洋構造物の信頼性疲労設計, 昭和61年度土木学会西部支部講演概要集 pp30-31
- 3) 大塚久哲: 海洋鋼構造物継手部の信頼性疲労設計, 第11回海洋開発シンポジウム論文集, 1986.6

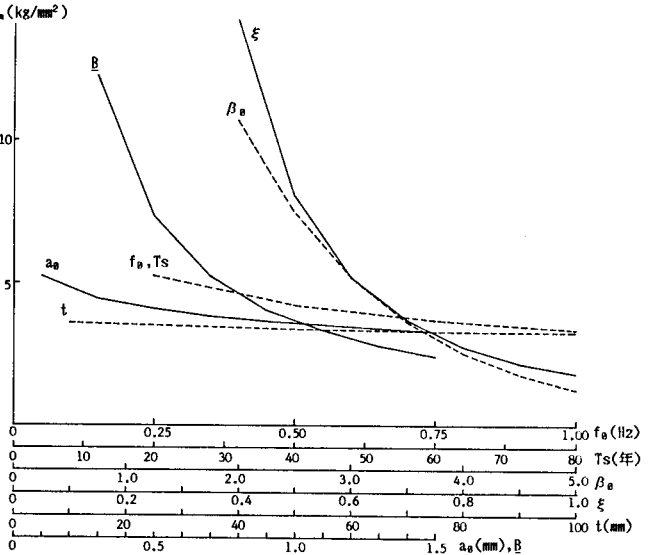


図1 設計変数の変化による S_m の推移

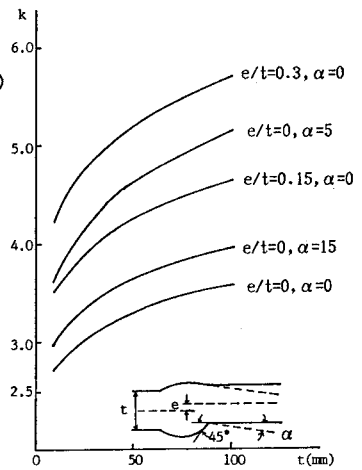


図2 板厚 t による k の変化