

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

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 熙

1. まえがき 海洋構造物の継手部の設計では、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っているようである¹⁾。また、これに関して最近信頼性を考慮した疲労設計規範も提案されている²⁾。本研究では、このような海洋構造物の継手部の設計に破壊力学の手法を用い、信頼性を考慮した設計規範を提案するものである。なお、信頼性解析においてはHasofer・Lindによって提案された2次モーメント法³⁾を用いている。

2. 設計規範の定式化 線形破壊力学によると、クラック進展速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK との間に、Paris則と呼ばれる次のような関係があることが知られている。

$$da/dN = C (\Delta K)^m \quad (1)$$

ここに、 C 、 m は材料、環境、応力比等によって決まる定数である。また、文献1)によると応力拡大係数 K は実用に供する範囲において次のように書ける。

$$K = \sigma k a^n \quad (2)$$

ここに、 k 及び n は継手部の形状に依存するパラメーターである。 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 =初期亀裂深さとおき、式(2)を式(1)に代入して積分すると次式を得る。

$$N_B = \frac{1}{C \Delta \sigma^m k^m (1-mn)} [a_B^{1-mn} - a_0^{1-mn}] \quad (3)$$

応力振幅の長期分布をワイブル分布とすると、式(3)の応力振幅 $\Delta \sigma$ を次式のような有効応力振幅 $\Delta \sigma_{eff}$ に置き換えられる。

$$\Delta \sigma_{eff} = \Delta \sigma_B (\ln N_B)^{-a/m} (\Gamma(a+1))^{1/m} \quad (4)$$

ここに、 $\Delta \sigma_B$ =設計寿命中に一度だけ現れる最大の応力振幅、 $\Gamma(*)$ =ガンマ関数、 $a=m/\xi$ (ξ =ワイブル形状パラメーター)である。応力サイクルの平均振動数を f_0 とすると、継手部の寿命 T は $T=N_B/f_0$ で与えられるので、式(3)及び(4)より次式を得る。

$$T = \frac{a_B^{1-mn} - a_0^{1-mn}}{C k^m (1-mn) f_0 \Delta \sigma_B^m (\ln N_B)^{-a} \Gamma(a+1)} \quad (5)$$

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を B として $\Delta \sigma_B$ を $B S_m$ と置き換え、 C 、 B 、 k 、 a_0 を確率変数として正規化すると次式を得る。

$$T = \frac{a_B^{1-mn} - a_0^{1-mn}}{C B^m k^m \Omega} = \frac{a_B^{1-mn} - \mu_{a_0}^{1-mn} (1 + C_{a_0} Z_4)^{1-mn}}{\mu_C \mu_B^m \mu_k^m \Omega (1 + C_C Z_1) (1 + C_B Z_2) (1 + C_k Z_3)^m} \quad (6)$$

ただし、 $\Omega = (1-mn) f_0 S_m^m (\ln N_B)^{-a} \Gamma(a+1)$ とおいた。また、 μ_i 、 C_i ($i=C, B, k, a_0$)はそれぞれの確率変数の平均値及び変動係数であり、 z_i ($i=1, 2, 3, 4$)は正規化された確率変数である。本研究においては設計寿命を T_s として次のような破壊基準関数を考える。

$$f(z_1, z_2, z_3, z_4) = T - T_s \quad (7)$$

すなわち、式(6)及び(7)を用いて水準2の信頼性解析を文献4)に示された手法により行って、最大許容応力振幅 S_m を求めればよい。

3. 計算例及び考察 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、異なる安全性指標 β に対して ξ をパラメーターに最大許容応力振幅 S_m を計算すると図1を得る。表に与えられない変数の値は $m=2.5$ 、 $n=0.5$ 、 $f_0=0.25\text{Hz}$ 、 $T_s=20$ 年である。また、板厚の85%を終局亀裂深さ⁵⁾とし板厚 $t=20\text{mm}$ と

した。種々のパラメーターに対して図1のような図表を用意しておけば、海洋構造物設置域におけるワイブル形状パラメーター ξ と設計安全性指標 β を決めることにより、最大許容応力振幅 S_m を簡単に求められる。例えば、海洋構造物設置域における波高周期頻度表等を用いて、応力振幅の長期分布を描くことにより $\xi=0.6$ であると判断される場合、設計安全性指標を $\beta=3.0$ に定めるとすると図1より $S_m=55.7\text{kg/mm}^2$ を得るといった具合である。次に、これまで考えてきた4つの確率変数の変動係数をパラメーターとして変化させることにより、最大許容応力振幅 S_m がどのように変わるかを調べてみると図2を得る。ただし、パラメーターでない場合の変動係数の値は表1の通りであるとし、その他の諸量は図1を求めた場合と同様である。なお、ワイブル形状パラメーターは $\xi=0.6$ としている。

表1 確率変数の統計値

Paris則	μ_c C_c	5.0E-11 0.70
応力モデル化 の誤差	μ_a C_a	0.70 0.50
式(2)中の パラメーター	μ_k C_k	2.00 0.50
初期亀裂深さ (mm)	μ_{a_0} C_{a_0}	0.10 0.01

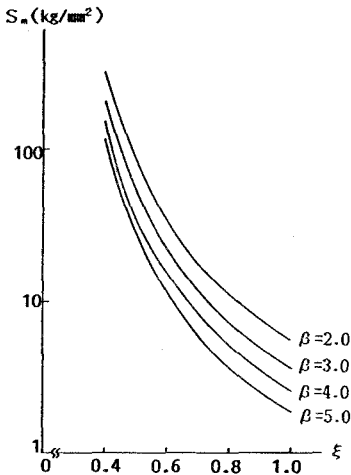


図1 最大許容応力振幅

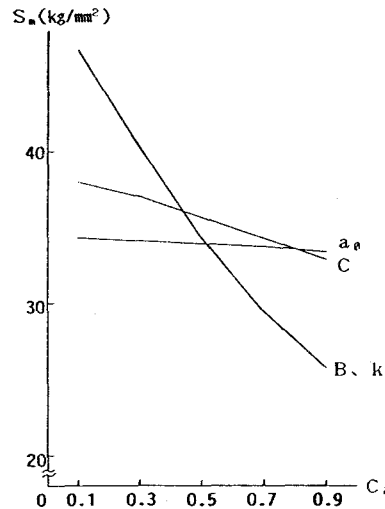


図2 変動係数の影響

図2より、B及びkの変動係数は S_m に大きな影響を及ぼすが、 a_0 の変動係数はほとんど影響しないことがわかる。また、Cの変動係数の影響は両者の中間程度である。このことより、B及びkの変動係数の適切な評価がこのような破壊力学的手法を用いた設計に際して重要な課題であるといえ、逆に a_0 の変動係数の値はさほど重要でないといえる。すなわち、初期亀裂深さ a_0 は確率変数として取り扱う必要はなく、確定量として取り扱ってもよいと思われる。

4. あとがき 応力拡大係数Kを与える式はいくつか提案されているが、文献1)による式(2)を用いることにより、破壊力学的手法を用いた海洋構造物の疲労設計に信頼性の概念を導入することができた。この研究に対して、次の2点が今後の課題として挙げられよう。まず、信頼性解析の側面から確率変数の統計値を適切に評価すること、次にワイブル形状パラメーター ξ の値を適切に評価することである。これらの点については、今のところ評価に必要なデータが十分に揃っているとは言えず、今後これらのデータが多面で蓄積されることを期待したい。

<参考文献>

- 1) Rules for the Design, Construction and Inspections of Offshore Structures, 1977, Det Norske Veritas
- 2) 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
- 3) Hasofer, A.M. & Lind, N.C.: Exact and Invariant 2nd-moment Code Format, ASCE, Vol. 100, No. EM1, 1974
- 4) P. トフクリステンセン他著, 室津監訳: 構造信頼性(理論と応用), 1986.5, pp.93-99
- 5) 山田健太郎他: 横リブ十字隅肉溶接止端部に発生する疲労亀裂の解析, 土木学会論文報告集, 1979.12