

1. 序言

海洋鋼構造物の継手部の設計では、疲労限界状態に対する安全性照査を、式(1)で示される Miner の線形累積損傷則 (linear damage accumulation rule) を用いて行っているようである¹⁾。

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \leq D_r \quad (1)$$

ここに、 D は累積損傷率、 n_i は応力振幅 i における荷重繰り返し総数、 N_i はその応力振幅で材料が破壊に至る荷重繰り返し総数 ($S-N$ 曲線から求める)、 k は一定応力振幅のブロック数、 D_r は限界損傷率である。

もともと、Miner 則は、不規則な応力振幅下での破壊は $D \geq 1$ で生じることを意味しているが、ランダムな疲労実験の結果によれば、もっと一般的に疲労破壊を $D \geq D_r$ と記述するのが適当であると考えられる。

例えば、 $D_n V$ ¹⁾ では当該部材の重要性や、検査・補修の難易によって、0.1, 0.3, 1.0 の3通りの値が用いられている。しかし、この D_r 値がいかなる破壊確率 (或は安全性指標) をもつかは不明である。 D_r はある分布幅をもつ確率変数と見なされるので、試みに、 D_r を平均値1.0、変動係数 0.30 の対数正規分布と仮定して、 D_r の累積分布曲線を求めれば、図1を得る。累積分布曲線の値がその D_r での破壊確率を示すと考えてよいので、代表的な D_r 値に対する値を図から読んでまとめると図中に併記したような値となる。これから、 $D_r=0.1$ は、判定値として厳し過ぎ、一方 $D_r=1.0$ は緩やか過ぎると思われる。ただし、これは D_r のみを確率変数と考えての考察であって、波高から構造物の応力を求める過程でのモデル化の誤差、 $S-N$ 曲線のばらつきなどを考え合わせると、海洋鋼構造物の継手の疲労設計には、これらの設計変数を確率量として取り扱える信頼性設計規範の確立が望まれる。

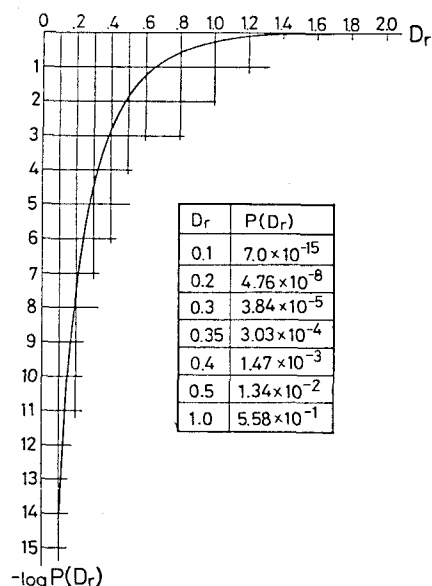


図1 D_r と破壊確率

米国アリゾナ大学の Wirsching, P.H. 教授は最近、信頼性を考慮した海洋構造物の疲労設計規範を提案した^{2), 3)}。これは、API (American Petroleum Institute) の設計標準の "Design Wave Peak Stress Rule" (いわゆる 60 ksi ルール⁴⁾) に替わるものとして、波のスペクトル形状、水深、構造物の動特性、継手位置などを考慮できる新しい設計規範として位置づけられるものであり、前述の議論に対する1つの答えとして、かつ、実用的な設計規範として評価できよう。

本文では、まず同教授の提案した設計規範を2, 3章で概説する。これらの章では、著者の数値計算に基づき、各種設計変数が安全性指標に及ぼす影響の度合の検討と、安全性指標をパラメータとした設計応力決定のための図表の提示を行う。ついで4章では、日本沿岸海域における波高の長期計測結果⁵⁾を用いて計算した応力分布曲線の紹介と、それを用いた設計例を示す。

2. 信頼性疲労解析

2.1 累積疲労損傷の評価方法

一定振幅の荷重による疲労特性曲線は、式(2)のように仮定される。

$$N S^m = K \quad (2)$$

ここに、 S = 応力振幅、 m および K = 実験定数、 N = 応力振幅 S で破壊に至るまでの繰り返し総数。

Miner則を適用すれば、応力振幅 S_i が1サイクル作用したときの疲労損傷 D_i は次のように書ける。

$$D_i = \frac{1}{N_i(S_i)} \quad \therefore D_i = \frac{S_i^m}{K} \quad (3)$$

累積損傷率は応力サイクルごとの損傷を全て加え合わせればよいから、

$$D = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^{N_I} S_i^m \quad (4)$$

ここに、 N_T は寿命Tに対する応力振幅の繰返し総数であり、大きな N_T に対しては、次の近似が成り立つ。

$$E(S_m) = \frac{1}{N_T} \sum_{i=1}^{N_T} S_i^m \quad (5)$$

ここに、 $E(S_m)$ は S_m の期待値(平均値)、 S は疲労応力振幅を示す確率変数である。式(5)を式(4)に代入して式(6)を得る。

$$D = \frac{N_T}{K} E(S_m) \quad (6)$$

ここで、 S を新たに $S_a = B \cdot S$ と置く。ここに、 S_a =部材の実際の応力振幅、 S =計算上の応力振幅、 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。また、応力サイクルの平均振動数を f_0 とすると、 $f_0 = N_T / T$ と書ける。これらを式(6)に代入すれば、

$$D = \frac{f_0 T}{K} E(B^m \cdot S_m) = \frac{T B^m}{K} \Omega \quad (7)$$

ここに、 $\Omega = f_0 E(S_m)$ は応力パラメータと呼ばれ、現在までに幾つかの評価方法が提案されている。ここでは、文献3)にならい、応力振幅の長期分布をワイブル分布と仮定すると、 Ω は次のように書ける。

$$\Omega = \lambda(m) f_0 S_m^m [\ln N_T]^{-a} \Gamma(a+1) \quad (8)$$

ここに、 S_m =設計寿命中に一度だけ現れる最大の応力振幅、 $a = m/\xi$ (ξ はワイブル形状パラメータであるが、ここでは応力振幅パラメータと呼ぶ)、 $\Gamma(\cdot)$ =ガンマ関数、 $\lambda(m)$ =レインフロー修正係数(波の周波数スペクトルが実際には広帯域であることによる修正係数、 m の関数であることが数値実験により知られている³⁾)。

任意の応力振幅 S_r を超える繰返し回数 N と、無次元応力比 S_r/S_m との関係式は、次式で与えられる⁵⁾。

$$\frac{S_r}{S_m} = \left[1 - \frac{\ln N}{\ln N_T} \right]^{1/\xi} \quad (9)$$

$N_T = 1.58 \times 10^8$ として、種々の ξ に対して $S_r/S_m - N$ 曲線を描けば図2をうる。海洋構造物の設置海域における波高データから応力分布曲線を描き、妥当な ξ を決定すればよいが、一般に ξ の値は、おおよそ0.5(平穏な浅海域)から1.4(環境条件の厳しい外洋)程度であるといわれている⁵⁾(4章参照)。

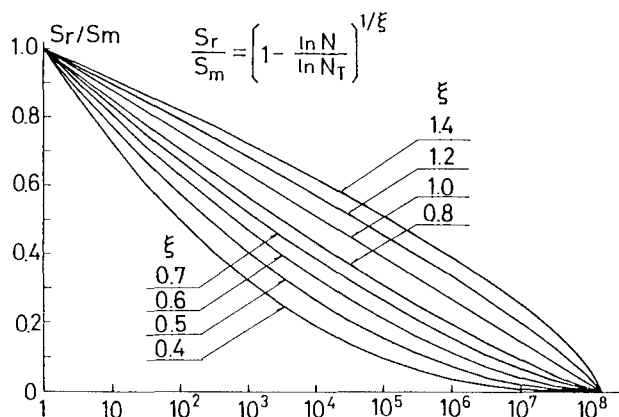


図2 $S_r/S_m - N$ 曲線

2.2 対数フォーマット

Miner 則の採用により生じる誤差を定量化するため、 $D = \Delta$ と置いて、式(7)をTについて解けば、

$$T = \frac{\Delta K}{B^m \Omega} \quad (10)$$

を得る。ここに、 Δ は破壊時の累積損傷率を示す確率変数である。また、 $S-N$ 曲線のばらつきに見られる疲労強度決定に含まれる不確かさは、実験定数の K を確率変数と見なすことによって考慮することができる(m は定数とする)。式(10)中、 Δ 、 K 、 B が確率変数であり、したがって、 T も確率変数となる。

継手の疲労破壊の確率は、 T_0 を設計寿命とすると、式(11)で表される。

$$p_f = P(T \leq T_0) \quad (11)$$

海洋構造物の疲労信頼性解析では、各確率変数を対数分布とした対数フォーマットを使用することが推奨されている。これは、ここで取り扱う確率変数のうち、 Δ と K は対数正規分布であることが知られていること、および対数正規分布を用いれば比較的単純な表現で、破壊確率 p_f の正確な記述が出来るからである。対数フォーマットによれば、式(11)は次のようになる。

$$p_f = \phi(-\beta) \quad (12)$$

$$\beta = \frac{\ln(T/T_s)}{\sigma_{\ln T}} \quad (13)$$

ここに、 $\phi(\cdot)$ は標準正規分布の関数、 β は安全性指標である。

$$T = \frac{\Delta K}{B^m \Omega} \quad (14)$$

$$\sigma_{\ln T} = [\ln(1 + C_\Delta^2)(1 + C_K^2)(1 + C_B^2)^{m^2}]^{1/2} \quad (15)$$

アンダーラインはその確率変数の平均値であることを示し、 C_i ($i = \Delta, K, B$) は各確率変数の変動係数を示す。確率変数の統計量として文献3)には、6 セットのデータが示されているが、ここではAPI 規準のX 曲線 ($m=4.38$) と溶接継手に用いられる一般的な値 ($m=3.00$) の2つのデータを用いる。確率変数の具体的な諸量を表1 に示す。

2.3 設計変数が安全性指標に及ぼす影響

式(13)より、主要な設計変数をパラメータにしたときの β の推移状況を見てみよう。図3の曲線1から5はそれぞれ f_0 、 T_s 、 m 、 S_m 、 ξ をパラメータとしたときの β の値の変化である。曲線1の横軸は、 f_0 (Hz)と書かれた一番上の横軸であり、他の曲線も対応する横軸により読むものとする。パラメータではないときの設計変数の数値は、 $f_0=0.25$ Hz、 $T_s=20$ 年、 $m=4.38$ 、 $S_m=42$ kg/mm²、 $\xi=0.7$ (ただし曲線C₃については0.4も) としている。

この図から、(1) 波の振動数や設計寿命はさほど安全性指標には影響を与えないこと、(2) S-N 曲線の傾き m の影響もさほど大きいものとは言えないが、 ξ の大きさによって、曲線の勾配が逆転すること (曲線3)、(3) 最大応力振幅 S_m の影響は顕著であり、これが大きいほど β が小さくなること (曲線4)、(4) 波の長期分布の形状 ξ は、 β に最も大きな影響を及ぼすことなどがわかる (曲線5)。

同図の曲線5と比較するために、 $S_m=28$ kg/mm²として ξ をパラメータとする同様の曲線を描けば、曲線5'をうる。これから同一の β を保つためには、 ξ の増加に対応して S_m を小さくする必要があることが知られる。

表1 確率変数の値			API X曲線	一般溶接継手
S-N曲線 (kis)	m		4.38	3.00
	K		4.6E12	5.25E10
	C _k		0.73	0.73
レインフロー修正係数	λ		0.79	0.86
損傷率	Δ		1.00	
	C _{Δ}		0.30	
応力モデル化の誤差	B		0.70	
	C _B		0.50	
平均振動数 (Hz)	f_0		0.25	

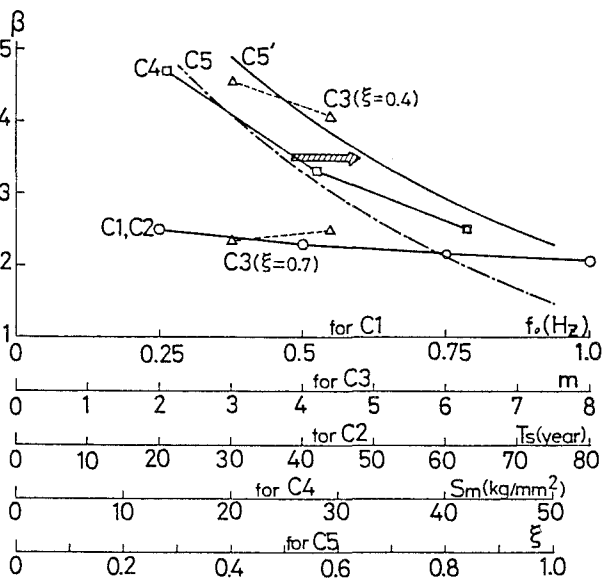


図3 設計変数の変化による β の推移

3. 疲労限界状態に対する設計規範

式(8)、(13)、(14)、(15)から最大応力振幅 S_m を求める式を誘導し、 S_m を S_R と書き改めると次のようになる。

$$S_R = [\ln(f_0 T_s)]^{1/\xi} \left[\frac{\Delta K}{\lambda f_0 T_s B^m \exp(\beta_0 \sigma_{\ln T}) \Gamma(a+1)} \right]^{1/m} \quad (16)$$

ここに、 S_R は設計寿命 T_s に対する最大許容応力振幅であり、 β_0 は規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。

$$S_0 = \frac{S_R}{1 - R} \quad (17)$$

結局、継手の疲労限界状態に対する信頼性規範は、次式のように書ける。

$$S_{\max} \leq S_0 \quad (18)$$

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。

いま、設計の便に供するため、異なる m 、 T_s 、 β_0 に対して、 ξ をパラメータに S_R を計算すると図4を得る。

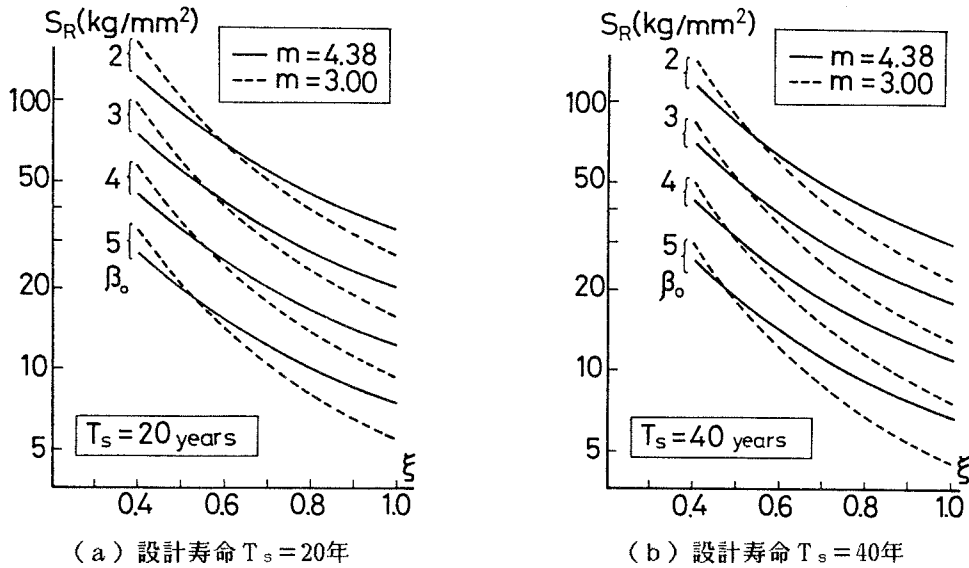


図4 最大許容応力振幅 S_R

4. 波高データによる応力分布曲線と設計例

日本の沿岸海域における4つの地点を例に取り、文献6)に示されている波高周期頻度表をもとに、応力振幅の長期分布を描けば図5を得る。ただし、頻度表に示されている有義波高から実際の波高分布を求めるにあたってはレーリー分布と仮定した⁷⁾。また、波による応力は波高の自乗に比例すると考えた。図5には、ワイブル分布と仮定したときの応力分布曲線(図2参照)を破線で併記したが、これらの分布曲線と比較すれば、苫小牧、浜金谷、那覇の ξ はそれぞれ、0.5、0.6、0.65程度と考えてよいように思われる。留萌のデータから ξ を決定することは少し難しいが、0.6程度と考えられよう。

【設計例】 苫小牧沖に海洋鋼構造物を設置したい。 $m = 4.38$ 、 $T_s = 20$ 年、 $\beta_0 = 3$ として、最大許容応力振幅 S_R を求めよ。

【解答】 図5から苫小牧沖の ξ は0.5と考えてよい。これと設計条件とから、図4(a)を用いて最大許容応力振幅 $S_R = 53.5 \text{ kg/mm}^2$ を得る。

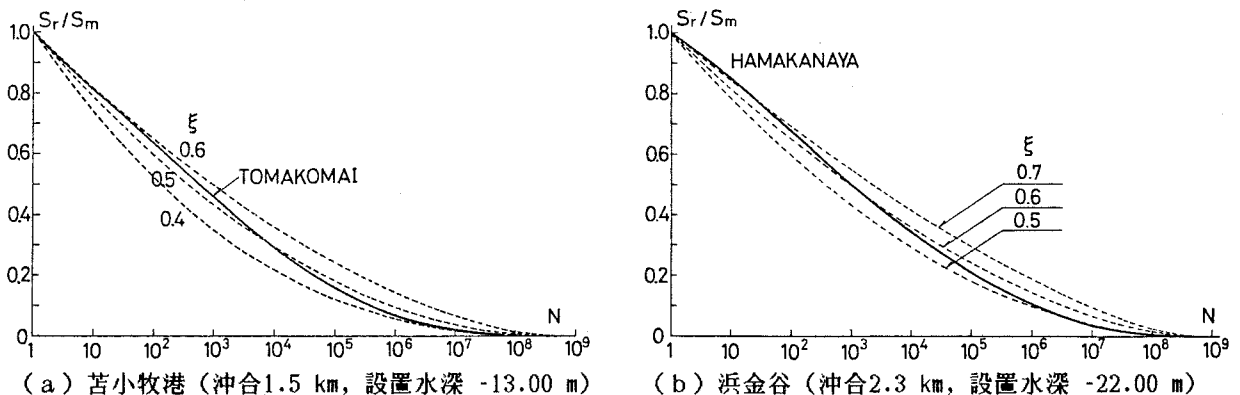


図5 各測点における $S_r/S_m - N$ 曲線 (その1)

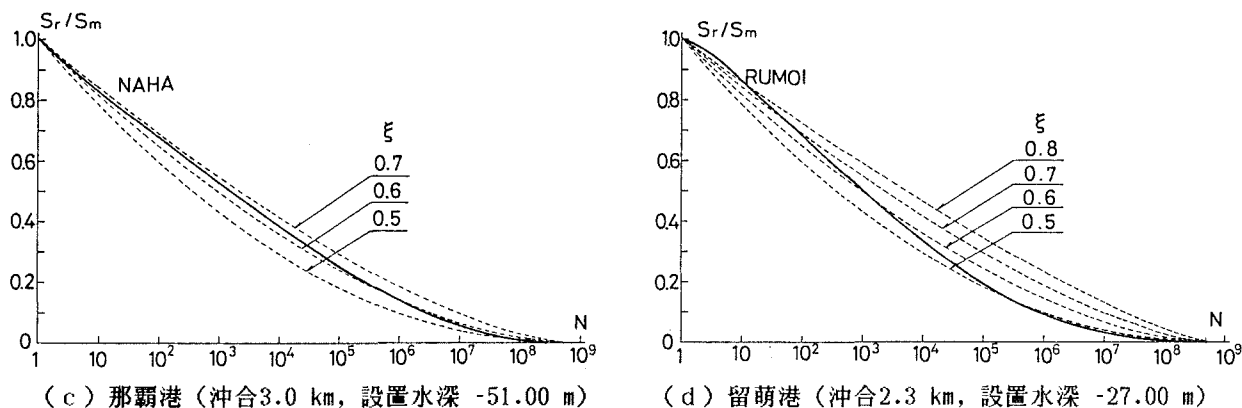


図5 各測点における $S_r/S_m - N$ 曲線 (その2)

5. 結語

Wirsching教授の提案では過去の実績をもとに安全性指標 β を決定しているが、本文では β をパラメーターとして S_R を算出した。いずれにしても、ここで述べた信頼性設計規範による設計法は限界損傷率のばらつき、 $S-N$ 曲線のばらつき、応力算定時のモデル化の誤差、波のスペクトル形状などを定量的に取り入れることができ、従来の許容応力度設計法あるいは線形累積損傷則を用いた確定論的設計法と比べて信頼性の高い合理的な設計法と言えよう。ただし、本設計法では、海洋構造物設置域における応力振幅パラメータ ξ の決定が不可欠であり、今後、広範な海域の観測データの蓄積を期待したい。

【参考文献】

- 1) Rules for the Design, Construction and Inspections of Offshore Structures, 1977, Det Norske Veritas
- 2) Wirsching, P. H.: Probability Based Fatigue Design Criteria for Offshore Structures, Final Report, American Petroleum Institute, PRAC Project 81-15, 1983.
- 3) Wirsching, P. H.: Fatigue Reliability for Offshore Structures, Journal of Structural Engineering, Proc. of ASCE, Vol.110, No.10, October, 1984, pp.2340-2356.
- 4) Recommended Practices for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms, API RP2A, Section 2.5.3a, 15th edition, Oct, 1984.
- 5) Wirsching, P. H.: Fatigue Damage Assessment Models for Offshore Structures: Earthquake Behavior and Safety of Oil and Gas Storage Facilities, PVP-Vol.77, ASME, 1983, pp.113-123.
- 6) 高橋知晴他: 波浪に関する拠点観測年報 (昭和53年), 運輸省港湾技術研究所資料, No.332, 1980.3.
- 7) 合田良実: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 昭和52年10月