

川崎製鉄 正員 小池 武 正員 嶋 文雄

1. まえがき 本研究は潜在欠陥(クラック)を有する鋼構造物が長期・短期の動的荷重下で避けることのできない低サイクル疲労破壊に対する信頼性評価に関するものである。従来の設計疲労曲線がたとえば、ひずみ制御疲労試験結果に基づく破壊確率5%の設計曲線の形で作成されているが、一実構造物の部材の疲労寿命は疲労破壊の持つ本質的な不確定性のみならず、非破壊検査後も潜在的に残る溶接クラックの分布性状、寸法効果、使用条件、作用応力の予測誤差、板厚寸法精度のばらつきの影響を受けることから、ここではこれらの不確定要素を疲労寿命を支配するパラメータとして信頼性解析を実施することにより、実構造物に関する不確定要素も考慮した設計疲労曲線を誘導し、従来の設計疲労曲線を再検討する。

2. 低サイクル疲労破壊の解析 溶接止端部に発生が予想される切欠状クラックを1つのモデルとして、ここではFig.1に示す長さ a_0 の半円形クラックを対象モデルとする。任意形状のクラックについては同図中の等価半径 a_0 のクラックを想定する。

低サイクル疲労寿命は、Manson-Coffinの関係、Neuberger則、Paris則に従うところから、次の関係式を得る。

$$\Delta \epsilon N_f^{\frac{1}{m}} = C \quad \text{--- (1)}, \quad \sqrt{E \Delta \epsilon \Delta \sigma} = K_f \Delta \sigma \quad \text{--- (2)}, \quad \frac{da}{dn} = C_f (\Delta K)^m \quad \text{--- (3)}$$

ここで、 $\Delta \epsilon$ =全ひずみ振幅、 N_f =疲労寿命、 C =材料定数、 K_f =切欠係数、 a =クラック長、 n =載荷回数、 C_f , m =材料定数、 ΔK =応力拡大係数、 $\Delta \sigma$ =実応力振幅、 $\Delta \epsilon$ =ひまけの応力振幅。

寸法 a_0 の潜在クラックが板厚 W の大きさに達するまでに要する載荷回数 $n(a_0)$ は、

$$n(a_0) = \int_{a_0}^W \frac{da}{C_f (\Delta K)^m} = \frac{2W(1 - \frac{a_0}{W})^{\frac{2-m}{2}}}{(2-m)C_f (\Delta \sigma \sqrt{\pi W})^m} \quad (m \neq 2) \quad \text{--- (4)}$$

で与えられる。そのときの応力拡大係数 $\Delta \sigma \sqrt{\pi W}$ が破壊靱性 K_{IC} を上回れば全面破壊となり、下回れば非破壊漏洩状態ととまることになる。

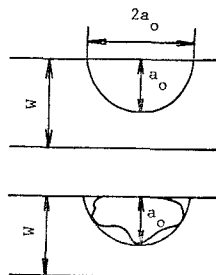


Fig.1 Illustration of crack.

3. 潜在クラックの確率分布 潜在クラックの大きさは非破壊検査の性能によらず支配される。最小クラックの大きさは非破壊検査手法や測定限界設計レベルに依存するが、機器の性能、検査員の錯誤などが原因となすすべてのクラックを検出できるとは限らず、したがってクラックの検出精度は確率的とならざるを得ない。Fig.2は非破壊検査の検出確率を模式化したものである。いま、初期クラックの存在確率を $(0, 1)$ 区間のBeta分布として与えれば、潜在クラックは不検出確率とBayesの定理を用いて決定することができる。

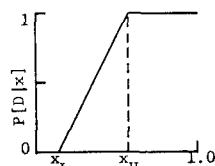


Fig.2 crack size ratio.

4. 設計疲労曲線

4.1 疲労寿命に関する確率統計量 従来の設計疲労曲線はひずみ制御疲労試験結果に基づいており、その $S-N$ 曲線から得られる疲労寿命の平均値と変動係数は次式となる。

$$\mu_{N_f} = \left(\frac{\mu_c}{\mu_e} \right)^{\frac{1}{m}} \mu_f \quad \text{--- (5)}, \quad \delta_{N_f}^2 = \frac{1}{\mu_f^2} \left\{ \delta_c^2 + \delta_e^2 \left(\ln \frac{\mu_c}{\mu_e} \right)^2 \right\} \quad \text{--- (6)}$$

一、実構造物に用いられる部材の疲労寿命を求めるため、先ず、式(4)の $n(a_0)$ を用いて貫通クラックの発生

に必要な載荷回数 N の平均値および変動係数を求めると、

$$\mu_N = \left(\frac{E \mu_c \mu_{\Delta\sigma}}{\mu_{k_f}^2 \mu_{\Delta S}^2} \right)^{1/\mu_f} \cdot \left(\frac{\mu_{Kcr}}{\mu_{\Delta S} \sqrt{\pi} \mu_N} \right)^{\mu_m - 2} \cdot \int_0^1 \frac{1-x}{1-s} \frac{2-\mu_m}{2} f_X(x|\bar{D}) dx \quad \text{----- (7)}$$

$$\delta_N^2 = \frac{E_X [E[N|x]^2]}{E_X [E[N|x]]^2} (E_X [\text{Cov}[N|x]^2 + 1) - 1 \quad \text{----- (8)}$$

ここで、 $f_X(x|\bar{D})$ は潜在クラックの確率密度であり、 $\text{Cov}[N|x]$ は潜在クラック長さ x をもつ部材の貫通寿命の変動係数である。

4.2 S-N-P_f 曲線 疲労破壊現象に関しては Weibull 分布がよく適合することが知られているが、式(7)に含まれる各ランダムパラメーターがすべて Weibull 分布に従う訳ではなく、むしろ正規分布等の極値的でない分布特性をもつパラメーターも含まれている。したがって、ここでは貫通寿命 N の確率分布として Weibull 分布と対数正規分布を採用し、極値分布特性の影響度を比較することにする。

(i) Weibull 分布の場合

$$n = \mu_N \cdot \frac{(\ln 1/(1-P_f))^{1/\alpha}}{\Gamma(1+1/\alpha)} \quad \text{---- (9)} \quad , \quad \delta_N^2 = \frac{\Gamma(1+2/\alpha)}{\Gamma^2(1+1/\alpha)} - 1 \quad \text{---- (10)}$$

(ii) 対数正規分布の場合

$$n = \mu_N \cdot \frac{\exp[-\sqrt{\ln(1+\delta_N^2)} \cdot \Phi^{-1}(1-P_f)]}{\sqrt{1+\delta_N^2}} \quad \text{---- (11)} \quad \text{ただし、}\Phi^{-1}(\cdot)\text{は標準正規分布関数の逆関数。}$$

以上より、従来の設計疲労曲線は、式(5)、(6)を式(9)、(10)、(11)へ代入することにより、得られ、本研究で提案する設計曲線は式(7)、(8)を式(9)、(10)、(11)へ代入することにより、得られる。

5. 数値計算例 長大橋梁などに使用される高張力鋼HT80を例に、その溶接止端部に発生が予想されるクラックを対象として数値計算を行った。用いた数値は、切欠底半径 1 mm 、理論的応力集中係数 $K_t=1.57$ 、材料定数 $\nu=0.53$ 、 $C=0.11$ 、 $m=3.2$ 。板厚 $W=12\text{ mm}$ 、破壊基準 $K_{cr}=200\text{ kg/mm}^2$ を用いた。上記数値を平均値とし、その変動係数を求めるように仮定した。 $\delta_W=0.02$ 、 $\delta_C=0.20$ 、 $\delta_\nu=0.05$ 、 $\delta_{K_t}=0.04$ 、 $\delta_{K_f}=0.01$ 、 $\delta_m=0.1$ 、 $\delta_{\Delta\sigma}=0.05$ 、 $\delta_{\Delta S}=0.05$ 。

Fig. 3, 4は潜在クラックの存在と非破壊検査の実施を考慮した場合のS-N-P_f曲線(実線)であり、各々 Weibull 分布、対数正規分布の場合を示している。同図に示されている一点鎖線は標準材料試験片から得られるS-N曲線であり、二点鎖線は現行の設計疲労曲線である。

提案する設計疲労曲線の $P_f=0.5$ の実線が、標準材料試験片のS-N曲線の15%程度の値を示しているのは、潜在クラックを考慮したことによる寿命短縮化の結果である。また、従来の設計疲労曲線と提案する設計疲労曲線とを比較すると、Weibull 分布を仮定する限り両者はほぼ同程度の信頼性を示しており、一方、対数正規分布を仮定した場合は、従来の曲線がかなり危険側の寿命を与えることが判、た。

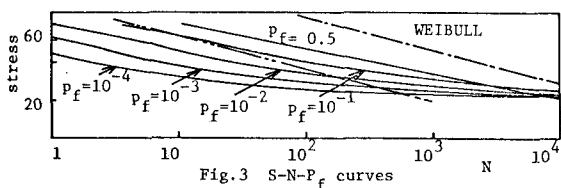


Fig.3 S-N-P_f curves

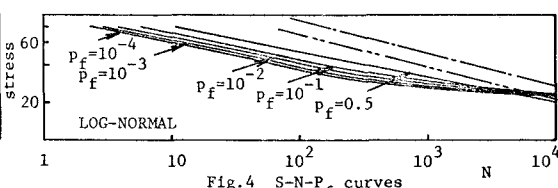


Fig.4 S-N-P_f curves

参考文献 1) 構造物の安全性・信頼性 土木学会編，昭和54年。

2) 飯田・井上：歪制御性サイクル疲労寿命の分布と設計曲線の考察，日本溶接協会，昭和46年。