

1 目的

鉄鋼材料の変動荷重下での疲労被害は一般に応力を基準とした修正マイナー則により評価が行われている。しかし修正マイナー則では、損傷値のバラツキが大きいと言われている。一方、変動荷重下の塑性ひずみ範囲に着目したバラツキの小さい評価法が提案されている^{1),2)}。そこで本研究では非荷重伝達型十字溶接継手を対象に、有限要素法による弾塑性解析を行い、応力集中部に生じる塑性ひずみを推定した。ついで、これを基にした線形累積損傷則を用いて実働荷重下の溶接継手の疲労強度を評価した。

2 評価方法

塑性ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_p$ と破断繰返し数 N_f の関係が(1)式で示されるManson-Coffin則で与えられるとき、 $\Delta \epsilon_p$ が1回負荷された時の疲労被害 ΔD は(1)式を変形して(2)式となる。

$$\Delta \epsilon_p \cdot N_f^a = C \quad \cdots (1)$$

$$\Delta D = (\Delta \epsilon_p / C)^{1/a} \quad \cdots (2)$$

この ΔD を(3)式により、線形に加算することにより塑性ひずみ範囲を基準とした累積損傷値を求めることができる。

$$D = \sum \Delta D \quad \cdots (3)$$

本研究では実働荷重試験中に計測された応力をRainFlow法により波形分解し、抽出された小波の応力範囲 ΔS を解析結果から得られた公称応力 S と局部塑性ひずみ ϵ_p の関係式に代入し、塑性ひずみ $\Delta \epsilon_p$ を推定した。この $\Delta \epsilon_p$ を用いて疲労被害の計算を行った。また D と N_f を与える等価塑性ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{peq}$ を(4)式から算出し、母材の $\Delta \epsilon_p$ - N_f 線図上に記し、十字継手試験の結果がManson-Coffin則を満たすかどうか検討した。

$$\Delta \epsilon_{peq} = C (D / N_f)^{1/a} \quad \cdots (4)$$

3 解析方法

溶接継手の応力集中部における局部塑性ひずみ ϵ_p と公称応力 S の関係を数式化するため、十字継手試験片を模擬した解析モデルを用いて弾塑性解析を行った。解析結果から S とひずみ集中計数 $K_t(S)$ 、応力集中係数 $K_\sigma(S)$ の関係を求めた。応力集中部の ϵ_p は(5)式で表される(但し E :ヤング率)。

$$\epsilon_p = \{K_t(S) - K_\sigma(S)\} \times S/E \quad \cdots (5)$$

なお解析モデルは単位厚さとし、平面ひずみ条件で計算した。計算に必要な材料の応力ひずみ関係は、母材の定振幅疲労試験の実験結果から得られたCyclic Stress Strain線図(以下CSS線図と略称)と母材の実働荷重試験から得られたCSS線図の2種類を用いた。2種類の応力ひずみ関係の違いが疲労被害にどのように影響するかを調べた。

4 実験方法

(1)母材の疲労特性試験

溶接用構造鋼JIS SM-400Bの母材試験片(図1(A)参照)を

用いて定振幅試験と実働荷重試験を行った。定振幅試験は両振の試験と継手の溶接部を評価するため、残留応力を模擬して予ひずみを与えた疲労試験(以下、予ひずみ定振幅試験と略称)を行い、 $\Delta \epsilon_p$ - N_f 線図を作成した⁴⁾。

(2)溶接継手の疲労試験

図1(B)に示す十字継手試験片を用いて定振幅試験と実働荷重試験を行った。実働荷重試験は実働荷重試験システム⁴⁾を用いて荷重制御により実施した。継手の疲労試験結果について、解析結果から推定した塑性ひずみを用いた線形累積損傷値を算定し、本研究で提案した疲労強度評価法の適用性について検討した。

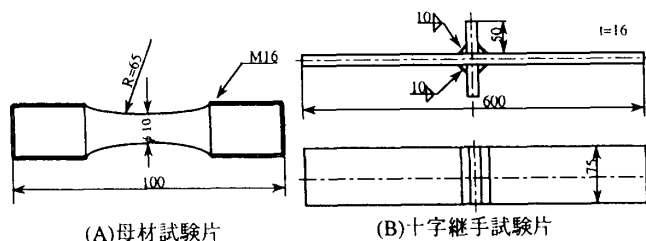


図1 試験片

(3)実働荷重試験の負荷データと荷重条件

実働波形としてコンテナ船が航行中に受けた波浪の実測データを用いた。試験条件は波高1mあたりSunit (MPa/m)の引張応力を設定した。十字継手の荷重条件一覧を表1に示す

5 実験と解析の結果、考察

(1)繰返し応力下の応力ひずみ関係

母材の疲労試験から得たCSS線図を図2に示す。◇は両振定振幅試験、△は実働荷重試験の結果を示す。弾性限を越えた後の実働荷重の結果は定振幅の結果に比べて、急激に塑性ひずみが生じている。この挙動の差が荷重履歴による疲労特性の違いとして現れるものと考えられる。

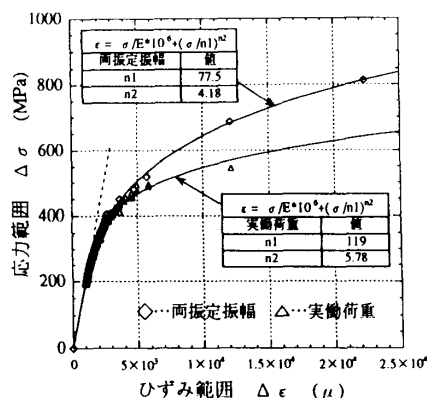


図2 繰返し応力下の応力ひずみ関係

(2)応力集中係数 K_σ 、ひずみ集中係数 K_ϵ と公称応力 S の関係
 実働荷重のCSS線図を与えた解析結果の例を図3に示す。
 解析により得られた K_σ と K_ϵ を(6)、(7)式の形に置き、定数の $m_1 \sim m_4$ を最小二乗法近似により求めた。

$$K_\sigma/K_t = m_1 \cdot (S/\sigma_{ly})^{m_2} \quad (1.2 \leq S/\sigma_{ly} \leq K_t) \quad \cdots(6)$$

$$K_\epsilon/K_t = m_3 \cdot (S/\sigma_{ly}) + m_4 \quad \cdots(7)$$

(ただし局部降伏応力 σ_{ly} は繰返し応力下の降伏応力を K_t で除したものとする。)

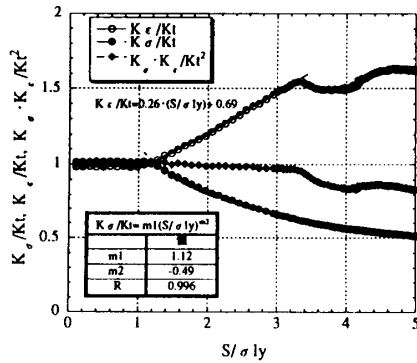


図3 K_σ 、 K_ϵ と公称応力 S の関係

(3)母材の疲労試験結果

母材の定振幅試験で得られた $\Delta \epsilon_p - N_f$ 線図を図4に示す。両振定振幅試験結果を◇、予ひずみ定振幅試験結果を◆で示す。両試験結果を(1)式で定式化し、図中に示す。また母材の実働荷重試験を行い、塑性ひずみを基準にした累積損傷則から求めた D と N_f から、(5)式を用いて $\Delta \epsilon_{peq}$ を求めた。その結果を図4中の△で示す。実働荷重試験の結果は両振試験の線上的にのっていることがわかる。

(4)溶接継手の疲労試験結果

十字継手試験片を用いた疲労試験を行い、疲労被害を算定した。結果を表1中に示す。損傷値のAは塑性ひずみを基準にした損傷値(定振幅のCSS線図を与えた解析結果を使用)、Bは塑性ひずみを基準にした損傷値(実働荷重のCSS線図を与えた解析結果を使用)、Cは修正マイナー則による損傷値を示す。なおA,Bの疲労被害の算定には予ひずみ定振幅試験の $\Delta \epsilon_p$ と N_f の関係を用いた。表1から実働荷重のCSS線図を与えた解析結果と塑性ひずみを基準にした線形累積損傷則を用いた結果が最も1に近い値をとっていることがわかった。また各試験片毎の K_t はSR202⁵⁾で提案されている溶接ビード形状による応力集中係数算定法を用いて求めた。

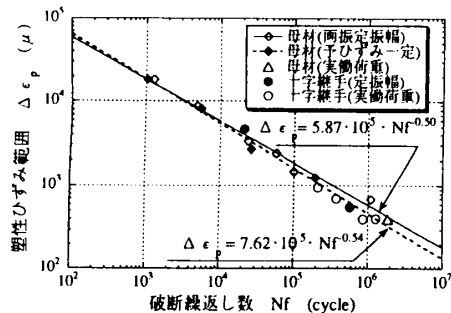


図4 $\Delta \epsilon_p - N_f$ 線図

それぞれの継手試験を塑性ひずみを基準とする累積損傷則から求めた D と N_f から、(7)式を用いて $\Delta \epsilon_{peq}$ を求め、母材の $\Delta \epsilon_p - N_f$ 線図上にプロットした。●は定振幅試験、○は実働荷重試験の結果を示しており、ほぼManson-Coffin則を満たしていることが分かった。

また実働荷重試験において、 $\Delta \epsilon_p - S$ の関係((5)式)に等価塑性ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{peq}$ を代入して、等価公称応力範囲 ΔS_{eq} を算定した。この結果を図5の $S - N$ 線図上に示す。●は定振幅試験(公称応力)、○は実働荷重試験(ΔS_{eq})を示している。図5中に示す線はJSSCの十字継手の設計曲線⁶⁾であり、実験結果は設計指針を満足している。

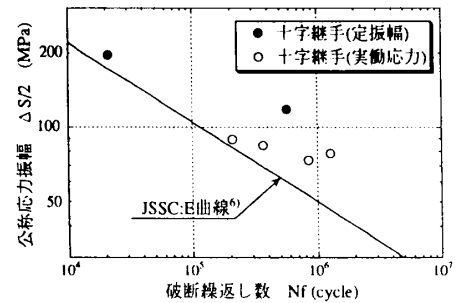


図5 $S - N$ 線図

表1 実働荷重試験条件一覧

TP No	Sunit (MPa/m)	Nf (cycle)	Kt	損傷値			$\Delta \epsilon_{peq}$ (μ)	$\Delta S_{eq}/2$ (MPa)
				A	B	C		
1	196*	2.1×10^4	2.90	1.69**	—	—	4669	196*
2	118*	5.7×10^5	1.98	0.87	—	—	550	118*
3	34.3	2.1×10^5	3.10	0.60	0.87	0.14	946	89.4
4	31.9	3.7×10^5	2.76	0.83	1.08	0.35	699	84.3
5	29.4	1.3×10^6	3.02	0.63	0.87	0.16	402	78.4
6	27	8.5×10^5	3.09	0.53	0.72	0.12	400	73.5

*公称応力振幅 $\Delta S/2$ (MPa)

** $S/\sigma_{ly} > K_t$ のため、塑性ひずみを過大に推定

6 結論

実働荷重を受ける溶接継手の疲労強度を応力集中部の塑性ひずみ範囲に着目して評価する方法について提案した。溶接継手の応力集中部の局部ひずみと公称応力の関係式を実働荷重を考慮した継手の弾塑性解析から導いた。この式を用いて、継手の疲労強度を評価した。その結果、従来の応力を基準とした修正マイナー則に比べて、本評価法の方が線形累積損傷則を良く満たすことがわかった。

参考文献

- 1) 菊川ら: 材料 第17巻第173号、1968年 pp135-144
- 2) 菊川ら: 日本機械学会論文集(第1部) 第35巻第278号1969年 pp2020-2031
- 3) 遠藤ら: 材料 第30巻第328号、1981年 pp89-93
- 4) 毛利、上村: NDI 第27回SSMシンポジウム講演論文集 1996年1月 pp.49-54
- 5) 日本造船研究協会第202研究部会: 「報告書、データ集(1),(2)」平成3年3月
- 6) JSSC編: 鋼構造物の疲労設計指針 pp6、pp34