# 82 疲労き裂発生寿命に及ぼす荷重履歴の影響の評価法

材料加工部 \*松岡 一祥、高橋 一比古、秋山 繁、牛嶋 通雄 構造強度部 田中 義照、安藤 孝弘

### 1.はじめに

タンカー、バルカーなどの専用貨物船では、荷 付けによる応力状態の変動が大きい。例えば、二 重殻タンカーのビルジナックル部の平水中での応 カ(平水応力=平均応力)は、満載状態では引張、 バラスト状態では圧縮である(Fig.1 参照)。同じよ うに荷付け状態で平均応力に大きな差が生じる箇 所は、バルカーの貨物バラスト兼用船倉の周辺に も存在する。



(a) Full load condition.



(b) Ballast condition

Fig. 1 Mean stress at bilge knuckle corner.

この荷付けによる平均応力の変化は疲労強度に も何らかの影響を与えるはずである。また、航海 中に遭遇した海象の履歴も疲労過程に影響を与え るはずである。しかし、これらの荷重履歴の影響 についての明確な理論が存在しなかったため、疲 労寿命は荷重履歴を考慮せずに評価されてきた。

著者らは、溶接継手の疲労強度に及ぼす荷重履 歴の影響が溶接残留応力を考慮した最大応力の変 化を追跡することで評価可能であることを示し<sup>1)</sup> (いわゆる修正 MIL-HDBK-5 法)、その手法が母材 切欠試験片にも適用でき、溶接構造用の Mn 鋼の ほとんどが1つの等価応力、等価応力寿命関係で 統一的に取り扱えることを示した<sup>2)</sup>。

本報は、大きく平均応力および応力範囲が変動 する場合にも、この修正 MIL-HDBK-5 法が荷重 履歴の影響の評価に有効であることを示すもので ある。

## 2. 修正 MIL-HDBK-5 法

2.1 MIL-HDBK-5 における等価応力<sup>3)</sup>

米軍の航空機用材料規格の手引き書(MIL-HDBK-5)<sup>3)</sup>では、総ての材料のS-N関係を(1)式 の等価応力S<sub>an</sub>と寿命Nの関係(2)式で表している。

$$\mathbf{S}_{\text{eq}} = \mathbf{S}_{\text{max}} \left(1 \cdot \mathbf{R}\right)^{\text{m}} \tag{1}$$

$$\log S_{eq} = \alpha + \beta \log N \tag{2}$$

ここに、S<sub>max</sub> は負荷した最大応力、R=S<sub>min</sub>/S<sub>max</sub> は応力比、m は S<sub>eq</sub>-N 関係を最適化する指数であ る。

2.2 修正 MIL-HDBK-5 法<sup>1)</sup>

MIL-HDBK-5 は航空機用の材料を対象とする ため、溶接継手は取り扱っていない。

船舶等の溶接構造物では、疲労損傷は溶接継手 に生じ、応力集中と溶接残留応力の影響を受ける。 この応力集中と残留応力の影響を考慮した等価応 カで疲労挙動を評価する手法が修正 MIL-HDBK-5法である((3)式参照)。

$$S_{eq} = \Delta S^{m} S_{max}^{1 \cdot m}$$
(3)

$$\Delta S = K_{HS}(S_{n,max} \cdot S_{n,min}) \leq 2 S_{Y}$$
 (3.1)

$$S_{max} = K_{HS} S_{n,max} + S_{R} \leq S_{Y}$$
(3.2)

if 
$$S_{max} \ge S_{Y}$$
 then  $S_{R} = S_{Y} \cdot K_{HS} S_{n,max}$  (3-2-1)

$$S_{\min} = K_{SH} S_{n,\min} + S_R \leq S_Y$$
(3-3)

if  $S_{min} \leq -S_{y}$  then  $S_{R} = -S_{y} - K_{HS} S_{n,min}$  (3-3-1) ここに、 $K_{HS}$  は構造的応力集中係数、 $S_{n,max}$  は負 荷公称最大応力、 $S_{n,min}$  は負荷公称最小応力、 $S_{y}$ は降伏応力、 $S_{R}$  は残留応力である。過大荷重が作 用した場合、(3-2-1)および(3-3-1)式により残留応 力は更新される。

2.3 修正 MIL-HDBK-5 法による累積損傷則

(3)式の等価応力による S<sub>eq</sub>-N 関係((2)式、定数 等は Table 1 参照)<sup>2)</sup> が定まると、マイナー則に より、荷重の1サイクル毎に損傷が計算できる。

# 3. 修正 MIL-HDBK-5 法の適用例

3.1 基礎継手の疲労き裂発生寿命2)

横すみ肉溶接ままの継手の定応力範囲の疲労試 験結果(疲労き裂発生寿命 N<sub>a</sub>、Fig. 2 参照)につい



Fig. 2 Fatigue test results of transverse fillet welded joints



Fig. 3 Seq-Nc relation of transverse fillet welded joints.

Table 1 Optimized constants.

α	β	m	σ(α)
3.434	-0.2051	0.6448	0.0473

て溶接残留応力を考慮し、 $K_{HS} = 1 として(2)$ 、(3) 式を適用し、最適な $\alpha$ 、 $\beta$ および m を求めると、 Table 1 が得られる。また、 $S_{eq}$ - $N_{c}$ 関係は Fig. 3 となる。

ここに、疲労き裂発生寿命はいわゆる5%ドロ ップ法により、疲労き裂が深さ1ないし2mm に 成長するまでの荷重の繰り返し数である。以下の 適用例にはこのS<sub>ea</sub>-N<sub>c</sub>関係を用いる。

# 3.2 角回し溶接継手の疲労き裂発生寿命に及ぼ す平均応力の影響<sup>4)</sup>

角回し溶接継手(Fig. 4 参照)を用いて、疲労寿 命に及ぼす平均応力の影響について実験的に検討 した。使用材料の強度を Table 2 に示した。



Fig. 4 Test specimen.

Table 2	Mechanical properties	
S <sub>y</sub> (MPa)	S <sub>B</sub> (MPa)	El. (%)
404	509	26



Fig. 5 Axial stress distribution.



Fig. 6 Weld residual stress distribution.

この試験片の構造的応力集中係数 K<sub>SH</sub> は 1.47 (Fig. 5 参照)で、溶接残留応力 S<sub>R</sub> は降伏応力 S<sub>y</sub> = 404 MPa に等しかった(Fig. 6 参照)。 荷重は軸方向載荷で、負荷条件は以下の3条件 である(Fig.7参照)。

- 公称最小応力を0 MPaとする引張側の定荷重
   範囲試験(UT シリーズ)
- ・ 公称最大応力を4 MPaとする圧縮側の定荷重
   範囲試験(UC シリーズ)
- ・ 公称最大応力を 170 MPa とする引張側の荷 重ブロック(10<sup>4</sup>回)と公称最小応力を・170 MPa とする圧縮側の荷重ブロック(10<sup>4</sup>回)を 交互に負荷する試験(UA シリーズ)





疲労試験結果を Fig. 8 に示す。図中の○印は UT シリーズ、△は UC シリーズ、□は UA シリ ーズで、それぞれ、白抜きは疲労き裂発生寿命(5 % ドロップ法)、黒塗りは破断寿命を示している。 疲労き裂発生寿命のばらつきは大きい。



Fig. 8 Fatigue test result.

 3.3 二重殻 VLCC の溶接型ビルジナックル部 疲労試験<sup>5)</sup>

溶接型のビルジナックル部構造模型(Fig. 9 参 照)を用いて平均応力と応力範囲が共に変動する 疲労試験を行った(Fig. 10 参照)。

模型は二重殻 VLCC の 1/3 縮尺模型であり、疲 労き裂の発生する内底板の機械的性質を Table 3 に示した。

 Table 3
 Mechanical properties of inner



Fig. 9 Bilge knuckle model of double hull tanker.



Fig. 10 Loading pattern.

Table 4 Loading conditions of blocks.

Block	1	2	3	4	5
ΔP/2(kN)	68	136	203	136	68
Pm(kN)	248	248	248	248	248
Block	6	Ø	8	9	10
ΔP/2(kN)	68	136	203	136	68
Pm(kN)	-248	-248	-248	-248	-248

荷重パターンを Fig. 10 と Table 4 に示した。 1 セットに 10 の繰り返し荷重ブロックがあり、 各ブロックの繰り返し数は 10,000 回である。1 セットの荷重繰り返し数は 10<sup>5</sup>回となる。

各セットの①から⑤ブロックはビルジナックル のコーナー部の応力が引張となるように平均荷重 をかけ、⑥から⑩では圧縮となるように負荷した。 各セットの③ブロックで応力比(R = Pmin / Pmax) が 0.1 となるようにし、①と⑤ブロックの荷重範 囲( $\Delta P = P_{max} - P_{min}$ )は③ブロックの 1/3 倍、②と ④は 2/3 倍とした。⑥から⑪ブロックには、それ ぞれ、①から⑤ブロックの正負逆の荷重を負荷し た。

模型には3つのフロアがあり、中央部は溶接ま まで、北側は溶接部をグラインダーで研削した後 アークストライクで人工欠陥を導入、南側はグラ インダーで研削した後100 mmの溶接ビードを置 いて試験した(Fig. 12 参照)。



Fig. 11 Stress distribution (P = 678 kN)



Fig. 12 Details of north and south positions.

Position		
North	Center	South
0.6902	0.6088	0.5620
0.8689		0.7617

Table 5Hot spot stress (MPa/kN)

Fig. 11 にビルジナックルの注目箇所の計測応 カと FEM の結果(実線)を比較して示した。図中の 記号は、〇が北側のフロア、●が中央、◎が南側 のフロアの計測値である。測定値と計算値はよく 一致している。

各断面におけるビルジコーナーのホットスポッ ト応力の荷重に対する割合を Table 5 に示した。 表中の下から2段目は、初期状態での応力応答で ある。試験体の南北の2カ所については、中央部 の試験終了後、追加試験として実験を行ったため、 応力応答が初期状態と異なった。表中の最下段の 値は追加試験時の応答である。

試験後、破面を観察し、き裂深さが1mm以上、 2mm以下となった回数を疲労き裂発生寿命とし た。結果をまとめてTable6に示した。

Table 6 Crack initiation life	etime
-------------------------------	-------

Position		
North	Center	South
$13 \times 10^4$	$43 \times 10^4$	$11-13 \times 10^4$

### 3.4 修正 MIL·HDBK·5 法による評価

修正 MIL-HDBK-5 法によれば、どのような履 歴の荷重であっても、荷重サイクル毎に(2)、(3) 式で累積損傷を求めて行くことができる。このよ うにして推定した疲労寿命と、疲労試験結果を比 較すると Fig. 13 が得られる。



Fig. 13 Relation between calculated and experimental lifetimes.

図中の○印は角回し溶接継手の UT シリーズ、 △は UC シリーズ、□は UA シリーズで、それぞ れ、白抜きは疲労き裂発生寿命(5%ドロップ法)、 黒塗りは破断寿命を示している。その他の3つの 記号は二重殻タンカー模型の疲労き裂発生寿命で ある。

図中の破線は Table 1 に示した S<sub>eq</sub>-N<sub>c</sub>関係の誤 差の範囲(2標準偏差)を表している。

図を見ると、疲労き裂発生寿命のばらつきは大 きい。しかし、荷重パターン別に見ると、定荷重 振幅の UT および UC シリーズのばらつきが最も 大きく、2種類の荷重ブロックを持つ UA シリー ズのばらつきはそれに比べると小さい。さらに複 雑な荷重履歴となる二重殻タンカービルジナック ル部模型の結果はばらつきも小さく、実験結果と 推定値はよい一致を示している。

以上のように、荷重パターンにより疲労寿命の ばらつきは異なる。しかし、基礎継手から得られ た基本 S<sub>eq</sub>-N<sub>c</sub>関係のばらつきの範囲(2標準偏差) を越える結果は少なく(Fig. 13 では2例)、修正 MIL-HDBK-5 法の有効性が確認される。

Fig. 8 と Fig. 13 を比べると、Fig. 8 では UA シリーズの寿命が UT シリーズに比べて長かった のに対し、Fig. 13 ではその差が少なくなっている。 これは、修正 MIL-HDBK-5 法による評価では引 張側、圧縮側共に負荷される荷重パターンの場合、 圧縮側での損傷が無いか、有ってもきわめて少な いからである。すなわち、引張側で、(3-2-1)式に より残留応力が緩和すると、それに続く圧縮側の 負荷では(3-2)式の最大応力 S<sub>max</sub> が小さくなり、(2) 式の等価応力も減少するからである。

## 4. 結論

角回し溶接継手および二重殻タンカーのビルジ ナックル部構造模型を用いて、タンカー、バルカ ー等の専用貨物船の満載状態とバラスト状態の交 代を考慮した疲労試験を行った。それらの結果を 修正 MIL-HDBK-5 法で評価し、以下の結論を得た。

- 修正 MIL·HDBK-5 法は平均応力の大きな変 動を含む荷重履歴での損傷予測に有効であ る。
- 2)特に、荷重パターンが複雑なほど適用性はよ い。
- 3)専用貨物船のように、荷付け状態で平均応力が正負大きく変動する場合、平均応力が圧縮の荷付け状態での疲労損傷は無視できるほど小さい。
- 4)上述は、疲労き裂発生箇所である溶接部の残 留応力変化および修正 MIL-HDBK-5 法の最 大応力の効果で説明できる。

### 参考文献

- 1)松岡、藤井:鋼溶接継手の疲労き裂発生寿命の一評価法,日本造船学会論文集,No. 178, 513 (1995).
- 2) Matsuoka, K. and Kobayashi, Y. : Influence of maximum stress on fatigue crack initiation life of welded steel joints and notched steel plates, Welding in the World, Vol. 42, No. 6, 18 (1999).
- 3) US Military Standard, MIL-HDBK-5D, (1983).
- 4) 松岡、高橋、植松、牛嶋:溶接継手の疲労寿 命に及ぼす荷重履歴の影響,日本造船学会論 文集, No. 188, 617 (2000).
- 第245研究部会:二重殻タンカーの船体構造 寿命に関する研究、平成12年度報告書、日 本造船研究協会, (2001).