疲労強度精査手法に関する基礎的研究

(その2. 板要素 FEM モデル化における構造的応力集中部の SN 線図について)

正員 川 野 始* 正員 佐 藤 宏 一**
(故)正員 田 口 義 明*

Basic Study on Fatigue Strength Evaluation
(second report: SN diagram to structural details from a viewpoint
of attaining FEM direct strength calculation)

by Hajime Kawano Koichi Satoh
Yosiaki Taguchi

Summary

In these days, direct strength calculation methods has been increasingly and effectively used in ship design for preventing structural members from buckling and yielding. However, regarding to fatigue strength assessment, it is generally known that it is not clear how FEM stress output ought to be used and that how FEM input ought to be prepared for fatigue strength estimation sake.

In order to attain direct strength calculation, in this report, it is emphasized that an adaptation step is needed from a SN curve as a material strength characteristics to equivalently converted SN curve in which the vertical axis value is expressed by a local stress range and is made compatible to stress calculation tool.

This is because that SN curve is the essence of fatigue life and that the vertical index of a conventional SN diagram, that is nominal stress range, is difficult to calculate of an actual ship structural details due to the complexity of stress distribution and the non-flat shape of the actual optimized details.

And also in the study a consideration was made on the limit of FEM modeling, and eventually it is made clear that the plate element FEM, which is not able to allow the plate thickness to change during calculation, may underestimate the stress concentration factor when it is accompanied with large sectional deformation of plate and weld bead. An example of the case was verified by the series fatigue test of T-shaped fillet weld joint by adopting the three point bend loading with small distance of supporting ends compared with the plate thickness.

1. 緒 言

近年の有限要素法の発展は目覚ましいものがあり、10 年程前では考えられなかった 1 万節程度の 3 次元板要素モデル解析が、日常の船体設計業務として EWS 上で行えるようになってきている。

船体構造の信頼性向上に対する要求に的確に答えてゆく

には、この優れた応力解析技術を活用し、荷重推定法・FEM 解析法・応力評価法の整合をとりながら破損限界までの余裕を絶対値として評価してゆく必要がある。この観点から設計評価手法の現状をみると、降伏強度や座屈強度の評価における FEM 解析法の利用に比べて、疲労強度評価においては FEM とのインターフェイス不備が目立つと言わざるをえない。FEM 応力を用いて統一的に評価する authorize された手法がないため、詳細構造間の相対比較や損傷/非損傷実績の積み上げによって破損限界を把握するというアプローチが有効に機能しにくく、損傷の事前防止や効果的な構造合理化を難しくしている面がある。

統一的評価手法の獲得には幾つかの側面すなわち、荷重や応力解析との一貫性という面、多様な疲労現象の支配影

* 三菱重工業(株)長崎研究所

** 三菱重工業(株)長崎造船所

響因子に関する研究的側面、影響因子を踏まえての設計実務に何をもち込むかという視点などであろう。

この様な現状にあつて、且つ損傷の結果生ずる事故の重大性に鑑みて、船体構造の疲労強度評価法に関しSR等共同研究^{1),2),6)}をはじめ最近多くの取組みがある。著者らも船体部材におけるき裂の特徴を踏まえその実用的な精査手法に関して提案してきた^{3),4),5)}。本報告では、冒頭述べたように、船体構造における代表的な応力解析法として定着している板要素FEM解析を念頭におき、これに相応しい材料の疲労特性表現としてのSN線図はどうあるべきか、板要素FEMモデル化の制約など基礎検討の結果について報告する。

尚、本報告では、実船の詳細構造における損傷実績に鑑みて、隅肉溶接部の疲労強度を主対象として扱う。

2. 詳細構造溶接部における応力集中の取り扱いと課題

詳細構造溶接部における応力集中を、模式的にFig.1で示した。特に、隅肉溶接余盛トウにおける応力集中率Ktは、次の2つの成分から成ることが知られている。

$$K_t = K_s \cdot K_w \quad (1)$$

K_s: 周辺構造の幾何学的形状による構造的応力集中率

K_w: 溶接余盛の詳細形状(止端半径, 余盛角など)による溶接部応力集中率

即ち、基礎継手試験片の隅肉余盛トウにおける最大応力S_{peak}は公称応力S_Rを用いて、次式で表わせる。

$$S_{peak} = K_t \cdot S_R \\ = (K_s \cdot S_R) \cdot K_w \quad (2)$$

疲労現象が極く局所的なものを含めて応力集中に極めて敏感でありこれに支配される事実を十分に念頭に置きながら、直接強度計算法(direct strength calculation in fatigue)を指向してゆくには、次の点について基本の判断を明確にしておく必要があろう。

a. 応力集中のどの成分を計算対象とし、どの成分はSN線図に内在させるか、又は実験式化/定数化しておくか、等の仕分け判断

b. 計算対象パラメータは、実用的に使い込まれたコー

Fig. 1 Schematic stress distribution around hot-spot

ドを用いて、コスト面でも精度的にも無理なく得られるものかどうか

c. 用いるFEMモデル化の制約条件はないか、その足らざる部分の対処法が備えられていること

2.1 計算対象パラメータとFEMモデル化

余盛止端半径や余盛角度など溶接ビードの詳細形状は、大きなバラツキを伴い安定した値を示さない。また、脚長寸法や開先形状を除いて溶接部寸法は設計的に規定したとしても実体の確認が容易でないことが多い。従って、FEM計算で捉える対象は(2)式右辺のカッコ内K_sS_Rが適切であり、モデル化範囲としても溶接ビード詳細形状は除く方が实际的であろう。但し、実構造を対象にした場合には、K_sとS_Rに分離することは一般に困難である場合が多く(骨組みモデルならば問題ない)、積K_sS_Rはモデル化された構造における局部応力の代表値として求められる。

板要素FEM計算によるホットスポット応力S_{hot}は、この種のモデル化された局部応力の一つである。その求め方として、SR202研究部会⁶⁾“B”法では2点による直線補間による方法を推奨している。即ち、最小メッシュサイズを板厚t相当とした板要素FEM出力を基に、Fig.2に例示されているように、二つの要素重心位置の応力即ちトウからの距離が0.5tおよび1.5t位置での局部応力から直線外挿によりホットスポット応力(=溶接ビード端での局部応力)を推定する方法である。

2.2 計算可能パラメータによるSN線図への変換

詳細構造の疲労強度評価を行う場合、SN線図の縦軸指標はズーム計算によって求める応力パラメータと本質的に同一のものでなければならない。

他方、従来の膨大な疲労試験の成果として、公称応力範囲で表示された疲労データの体系(SN線図の集積)があり、継手形式や寸法条件による応力集中の大小、SN線図のバラツキ度合などについて一定の共通認識がなされている。これらの集大成として、UK, DOEの継手分類によるSN線図⁷⁾やJSSCの分類⁸⁾が広く知られており、設計ガイドラインとして極めて重要であり評価は高い。しかしなが

Fig. 2 Hot-spot stress by extrapolation

ら、これらスペックでは上流計算作業とのインターフェイス条件が提示されていないため、材料特性としてのSN線図縦軸指標と応力計算による抽出値との整合がとれず、前章で述べた統一的な評価手法としては不足の現状となっている。例えば、UK. DOEのSN線図(B-F2 curve)では、応力集中効果の大小や疲労き裂の発生モードを考慮して、詳細構造をクラス分類しそれぞれに対応する設計SN線図を明示している(溶接ままの連続した隅肉溶接余盛トウからの疲労き裂発生に対して“D”, “E”, “F”, “F2”, “G”クラスの5種類のSN線図がある)。しかし、UK. DOEの継手クラス分類には、次の2つの不十分さが経験されている。

① SN線図の縦軸は公称応力範囲で表示されているが、詳細構造を含む船体構造のFEMモデル計算結果から、公称応力またはこれに相当する応力をどうやって求めるべきか呈示されていない。

② 疲労強度が局所の応力集中に非常に敏感である点を考えると、クラス分けされた基礎継手分類だけでは、船の詳細構造バリエーションとしては分類が荒過ぎる嫌いがある。例えば、十分長い縦リブが連続隅肉溶接された構造部分は“F2”に分類されるが、その端部がスニップされているか否か、どのような角度あるいはソフトRで処理されているが、に拘らず全て一律にクラス“F2”に分類される。

その結果として、構造詳細部の設計的配慮が正当に評価され難いこととなっている。極端なケースでは、詳細なズームING FEMによって局部応力を求めておきながら、評価手法の一貫性が歪められ解析内容でなく解析対象により機械的に当てはめてしまうといったような混乱も皆無ではないようである。

この問題に関して3章で述べるが、与えられた継手分類をベースに、例えば計算可能な指標としてホットスポット応力範囲を用いた基本SN線図に変換することにより、一つの実用的解決が得られる。

2.3 板要素 FEM モデルの制約

大半の場合は板要素 FEM 計算を前提とし、局部応力(ホットスポット応力など)による基本SN線図に焼き直すことが可能と考えられるが、下記のようなケースでは、板要素 FEM モデルの限界ゆえに実際の応力集中を十分に捉えられない可能性がある。

① 公称応力分布が極端に急峻な勾配を有する場合

② 板厚が極端に大きな場合

即ち、Fig. 3 に模式的に示すように、板要素 FEM 計算では板厚内の変形は計算されない(溶接ビードも勿論計算に入らない)という制約があり、この点が無視できなくなる上記のケースでは、非安全側の判定に陥ったり或いは極端に大きな板厚依存性のある基準SN線図や厳し過ぎる基準SN線図を想定してしまう可能性がある。この点を踏まえて、板要素 FEM モデル化を前提に、(2)式右辺の K_w と

Fig. 3 Schematic sectional deformation in T-shaped fillet weld joint

して(3)式を提案したい(詳細は4章にて述べる)。

$$K_w = K_{w1} \cdot K_{w0} \quad (3)$$

K_{w0} : 溶接余盛の止端半径や余盛角度に起因する応力集中率

K_{w1} : 板厚および溶接ビード内の伸縮変形に伴う応力集中率

即ち、溶接部応力集中率 K_w を止端形状による応力集中 K_{w0} と溶接ビードおよび板厚内の変形による応力集中効果 K_{w1} とに分離するものであり、板要素 FEM モデルの場合、前者はSN線図に内在させるものとし、後者は簡易的に実験式化しようとするものである。なお、幾何学的形状のうち溶接余盛以外の周辺形状は、基本的に FEM モデルに組み込むものとして、(2)式右辺の $K_s S_R$ すなわち FEM 計算における局部応力として考慮される。

3. 継手クラス分類されたSN線図から基準SN線図への変換

3.1 基準SN線図の導出アプローチ

継手分類によるSN線図クラス分けは設計ガイドラインとしての有用性は高いが、direct strength calculation in fatigue を指向してゆくには更に改善すべき点があることを前章で触れた。

広く知られた継手分類の考え方を活かしながら、合理的な疲労強度評価を行うためのアプローチとして下記を提案する。

① 公称応力範囲で表示された継手クラス毎のSN線図をもとに、計算可能な指標(例えば、ホットスポット応力範囲)で表したSN線図に変換し、この基準SN線図だけを用いて統一的に評価する。

② 従来の実績ある疲労試験データを用いて、基準SN線図に含まれる安全率を確かめる。

例として、UK. DOEのSN線図に着目し、UK. DOEの継手クラス分類が指し示すSN線図レベルを大枠としては堅持しながら、ホットスポット応力(Fig. 2)で表現した

基準 SN 線図を求めてみる。具体的には次のステップに従う。

ステップ-1: 数種の基礎継手疲労実験データを選定する。試験片の形状寸法, 負荷条件, 疲労寿命データが判明しているデータである。

ステップ-2: 板要素 FEM モデル化により, 選定された各基礎継手試験片のホットスポット応力 S_{hot} と公称応力 S_R の比率 K_s ($=S_{hot}/S_R$; 構造的応力集中度) を計算する。

ステップ-3: 各基礎継手が該当する継手クラスに対して UK DOE がガイドラインとして与えている設計用の SN 線図 (平均-2 [標準偏差]) を用いて, その縦軸の公称応力に K_s を乗じて, ホットスポット応力 S_{hot} で表示した SN 線図に改める。

基礎継手データ毎に同様の操作を行ない, ホットスポット応力 S_{hot} で表した複数の SN 線図の平均値として基準 SN 線図を定める。

なお, UK DOE による SN 線図が (4) 式で表示される

ことから, 応力軸をホットスポット応力範囲に改めるには, 下記のように定数項を改めるだけで良い。

$$[\text{DOE の SN 線図}] N_f(S_R)^m = C_2 \quad (4)$$

$$[\text{基準 SN 線図}] N_f(S_{hot})^m = C_2^* \\ \rightarrow C_2^* = C_2(K_s)^m \quad (5)$$

尚, 本アプローチは隅肉継手と突合せ継手のいずれの基準 SN 線図の導出に対しても有効と考えられるが, 以下では隅肉継手での検討例を示す。

3.2 試算例

検討に用いた基礎隅肉継手疲労試験データは 4 種^{5),9)}であり, その一覧を Table 1 に示した。選定した継手データは, 疲労寿命データや形状寸法等が明確であることを条件に選定した。

疲労試験片の構造的応力集中度を求める為, 基礎継手試験片を板要素にモデル化して応力計算を行なった。メッシュ分割の一例を Fig. 4 に, および得られた局部応力分布の例を Fig. 5 に示した。

これら板要素 FEM 計算によって得られた構造的応力集中度 K_s の値やホットスポット応力範囲で表現した SN 線図の係数が Table 2 に纏められている。即ち, 基準 SN 線図として次式を得た [単位系: MPa, cycles]。

$$N_f < 1 \times 10^7 \text{ の時: } m = 3.0$$

$$C_2^* = 1.22 \times 10^{12} \quad (6a)$$

Table 1 List of fatigue data analyzed

	type of weld joint	specimen configuration
Model-1 [5]	plate with longitudinal rib (100mmL)	
Model-2 [9]	plate with out-of-plane gusset (200mmL)	
Model-3 [9]	plate with in-plane gusset (100mmL)	
Model-4 [9]	plate with in-plane gusset (200mmL)

Fig. 4 Calculation result of deformation on fatigue test specimen (Model-2)

Fig. 5 Calculated local stress distribution (Model-2)

Table 2 Proposed SN curve (mean-2 [standard deviation])

	Structural stress concentration factor by FEM K_s	UK.DOE's classified SN curve* C_2	SN curve expressed by hot spot stress* C_2^*	
Model-1	1.14	"F"	6.315×10^4	0.936×10^{12}
Model-2	1.87	"G"	2.477×10^{11}	1.620×10^{13}
Model-3	1.42	"F ₂ "	4.307×10^{11}	1.233×10^{13}
Model-4	1.69	"G"	2.477×10^{11}	1.196×10^{13}

* --- SN curve gradient is commonly set as $m=3$ in $N_f S^m = C_2$ ($N_f < 1 \times 10^7$).

The average is:
 $C_2^* = 1.23 \times 10^{12}$
 [unit: MPa, cycles]
 $\approx 1.30 \times 10^{12}$
 [unit: kgf/mm², cycles]

$N_f \geq 1 \times 10^7$ の時: $m=5.0$,

$$C_2^* = 3.00 \times 10^{15} \quad (6b)$$

上記の提案 SN 線図から (平均-2 [標準偏差]) に相当する安全率を見込んで推定される疲労寿命と基礎継手の寿命データを比較した。その結果を Fig. 6 に掲げるが、提案 SN 線図にホットスポット応力範囲を代入して求めた寿命以上の寿命を有する実験データ点が、全 31 点中の 26 点 (84%) であり、データ出典の相違や疲労データに特有なバラツキを考えると、概ね妥当なものと判断した。

また、上記の提案 SN 線図と DOE specification によるクラス分けされた SN 線図との関係を明確にするため Fig. 7 を示した。縦軸は、SN 線図の定数項の比率 (の 1/3 乗) と構造的応力集中度 K_s を表し、継手分類された SN 線図がどの範囲の構造的応力集中度 K_s に対応しているか逆算することができる。Fig. 7 から判るように、概ね次のように分類されていると逆算できる。

$$\text{"D" class: } K_s \approx 1.0 \quad (7a)$$

$$\text{"E" class: } 1.0 < K_s \leq 1.15 \quad (7b)$$

$$\text{"F" class: } 1.15 < K_s \leq 1.33 \quad (7c)$$

$$\text{"F}_2 \text{ class: } 1.33 < K_s \leq 1.56 \quad (7d)$$

$$\text{"G" class: } 1.56 < K_s \quad (7e)$$

Fig. 6 Comparison between experimental life and estimated life by proposed SN curve

Fig. 7 Comparison between proposed SN curve and DOE classified curve

4. 板要素 FEM モデルの制約

(板厚内変形による応力集中効果)

4.1 三点曲げ疲労試験データの紹介

内底板ホッパー曲り部における応力状態を模擬する狙いから T 字隅肉溶接継手の三点曲げ疲労試験を行なった。負荷はスパン中央の付加物を引張ることで主板に曲げ荷重を与え、両端はローラーによる単純支持とした三点曲げ方式である。内底板曲り部とフロアーとの交差線に沿って発生する公称曲げ応力の急峻な勾配を模擬するため、主板の板厚 25 mm に対してスパンを精一杯短くしたスパン 70 mm シリーズと穏やかな応力勾配のスパン 200 mm シリーズの 2 系統の T 字隅肉試験を行なった。但し、試験片は同寸法であり (供試材: 船体用軟鋼, 主板: 25 mm × 450 mm × 100 mm, 付加物: 21 mm × 300 mm × 100 mm), 溶接施工も同じ溶接パスで製作した上で幅方向に切断したものであり、試験時の設定スパンと荷重レベル以外は全く同一条件である。

得られた疲労寿命を公称応力範囲との関係で表わし Fig. 8 に示した。

Fig. 8 から判るように、スパン 70 mm の白抜き印のデータの方が約 2 割低い疲労強度を示している。SN 線図の縦軸値はスパン中央に集中力が作用する場合の三角形の曲げ応力分布から、丁度隅肉溶接トウ位置の値として求めた (三点曲げ方式では、付加物の左右余盛トウ間における分布荷重としても、トウから支点までの距離および支点反力 [=スパン中央負荷の半分] から決まるトウ位置の曲げモーメントは変わらない)。

即ち、板要素 FEM モデル化に従えば、曲げスパンと荷重荷重範囲の積が同じであれば局部応力も同じ筈であり、Fig. 8 のスパン影響を解釈することが出来ない。

4.2 板厚・溶接ビート内変形の簡易評価モデル

余盛トウ付近での局部応力を調べるため、両シリーズ試験片の面内 FEM 計算を実施した (NASTRAN/4 節点四辺形要素)。FEM メッシュ分割要領、拘束条件などを Fig.

Fig. 8 Experimental data of SN curve (T-shaped fillet weld joint subject to three points bending)

9に示している。板表面には応力ゲージ要素(断面積微小の棒要素)を配し、余盛トウを含むスパン中央付近のメッシュ分割は両シリーズ試験片で同じものを用いた。

計算により得られた応力ゲージ要素出力を、梁理論による曲げ応力 σ_b と併せてFig. 10に掲げた。Fig. 10から判るように、FEMによる板表面応力は、スパン200 mmでは余盛トウ近傍を除いて梁理論応力 σ_b と一致しているがスパン70 mmでは余盛トウ近傍以外でも梁理論応力 σ_b より約2割程度大きくなっている。

この原因を明らかにすべく、Fig. 3で模式的に示した効果を考えた。即ち、主板と付加物の境界線 A_1OA_2 (以下、記号はFig. 3参照)に沿って作用する剪断力 $\tau^*(x)$ および境界線に垂直に作用する直応力 $\sigma^*(x)$ の効果について考えた。Fig. 11に示す半無限体表面の集中力問題の楔理論解から判るように、 $\sigma^*(x)$ は板表面 A_1B_1 上には応力を発生させることはなく、剪断力 $\tau^*(x)$ が板表面応力を生ずる。そこで、境界線に沿って分布する剪断力 $\tau^*(x)$ を、ここでは簡易評価モデルとして左右逆対称であって且つ直線分布(1自由度)であると仮定し、点 A_1 すなわち余盛先端トウにおける水平変位 U_A が付加物側と主板側で共有される条件からその値を決定することとした。即ち、Fig. 12に図解しているように、下記二つの代表的負荷モードに応じて剪断力 $\tau^*(x)$ が決められる訳であり、簡易モデルではあるが板厚・溶接ビード内変形を捉えて板要素FEMを補完する目的からは有効と判断した。

①付加物の引張り S_0 による境界線 A_1OA_2 の収縮

②主板の引張り(または曲げ) S_R による境界線 A_1OA_2 の伸び

Fig. 12に図示されている考え方に従い、前説で示したスパン70 mmの三点曲げ試験片について計算したところ、境界線上の最大剪断力 $\tau_0(=\tau^*(x=h))$ が約5 kgf/mm²弱で

Fig. 9 FEM mesh-division of T-shaped fillet weld joint specimen

あってFig. 10に示されているFEM応力と梁理論による応力の差に概ね対応する約3 kgf/mm²程度の板表面応力を生むことが判った(溶接トウから5~10 mm位置にて)。

なお、この簡易評価モデルの考え方に従えば、Fig. 8においてスパン70 mmの三点曲げ試験片に強度低下が認められた原因は、直接的には付加物を介して主板に加えられた

Fig. 10 Calculated results on surface stress distribution

$$\begin{aligned}\sigma_r(R, \Theta) &= 2 / (\pi R) \cdot (F \cos \Theta + W \sin \Theta) \\ \sigma_\theta(R, \Theta) &= 0 \\ \tau_{r\theta}(R, \Theta) &= 0\end{aligned}$$

Fig. 11 Wedge theory solution on semi-infinite body subject to concentrated surface force

Fig. 12 Simplified FEM model to determine interactive shear stress

垂直力が大きかった点にあり、スパンが短いことは直接的な理由ではない。また T 字隅肉継手の三点曲げ試験であっても、付加物を介して垂直力を作用させるか付加物の付いていない側の主版面を押すかでも板厚・溶接ビード内の変形はかなり違ってくものと推測できる。

5. 結 言

船体構造の信頼性向上要求に的確に応えてゆくには、特に疲労強度評価においては FEM 応力解析技術との整合を高めること、統一的な評価手法の獲得による損傷/非損傷実績を真に血肉化する基盤の構築、等が強く求められている。

本報告では、その為の一つのステップとして疲労強度精査手法について基礎的検討を行ない、次の成果を得た。

(1) 内外の疲労設計指針などで示されている、公称応力ベースによる継手分類の考え方や各等級継手の SN 線図情報から、局部応力ベースの基準 SN 線図を導出する一つの手順を生み出すことが可能となった。

(2) 板要素 FEM による応力計算には、板厚内変形が考慮されないために、これに係わる応力集中効果を過小評価する場合が有ることが判った。

なお本報告では、現状における応力計算の実務レベルを考慮して、板要素 FEM 計算を前提に述べた。電算機の利用環境(ハードとソフト)は急速に進歩しており、solid FEM 計算をベースとする手法などの実用化も可能性として否定はできない。

今後とも、FEM 応力解析技術と材料の疲労強度の知見を融合した、直接強度計算法 fatigue 版の具体化に尽力の所存である。

参 考 文 献

- 1) SR 207 研究部会, 船殻構造の強度評価と管理目標の定量化の調査研究, 総合報告書, 平 5.3
- 2) SR 216 研究部会, 大型船縦通肋骨材の強度に関する研究, 総合報告書, 平 6.3
- 3) 川野始, 井上克明, 橋本州史, 伏見彬: 疲労強度精査手法に関する基礎的研究(船殻構造へのき裂伝播アプローチの適用), 西部造船会会報, 第 88 号, 平 6.5
- 4) H. Kawano and K. Inoue: A local approach for the fatigue strength evaluation of ship structures, Fatigue Design. ESIS 16, Edited by J. Solin, 1993, Mechanical Engineering Publications, London.
- 5) 川野始, 川崎哲郎, 阪井大輔ほか: 疲労強度精査における reference 応力に関する一考察, 西部造船会会報, 第 83 号, 平 4.3
- 6) SR 202 研究部会, 海洋構造物の疲労設計法及び溶接部の品質に関する研究, 研究資料 No. 395, 平 3.3
- 7) UK. DOE, Offshore installations: Guidance on design and construction, 1984
- 8) 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, (社)日本鋼構造物協会編, 技報堂出版
- 9) 山田健太郎, 酒井吉永, 菊地洋一: ガセットを溶接した引張部材の疲れ強さとストップホールの効果, 土木学会論文報告集, 第 341 号, 1984 年 1 月