5.　調和 CSR における疲労強度評価

調和 CSR における疲労強度評価

1. はじめに

IACS によって共通構造規則が制定される以前においては，各船級協会が独自の疲労強度評価規則を定めていた。各船級協会では，基本的に線形累積被害則をベースに疲労被害度を算出する手法をとっていたが，

- 平均応力及び残留応力の影響
- 評価応力（公称応力，ホットスポット応力，ノッチ応力）の取り方
- 荷重の考え方
- 評価応力のレベル
- 使用する S-N 線図

など，様々な点で相違があった。しかしながら，1999 年のエリカ号及び 2002 年のプレステージ号の事故を受け規則強化の動きが高まり，2006 年 4 月に「ばら積貨物船のための共通構造規則（CSR-BC）」及び「二重船殻油タンカーのための共通構造規則（CSR-OT）」が施行されるに至った。これら二つの共通構造規則により，各船級協会の疲労強度評価規則も船種毎ではあるが統一されることとなった。そして，2015 年 7 月に施行を予定されている「調和 CSR」によって前記 2 つの共通構造規則は調和され，疲労強度評価規則も統一されることとなった。

調和 CSR における疲労強度評価法は，CSR-BC 及び CSR-OT の疲労規則を基に最新の知見を取り入れている。その一方で，疲労強度に影響を与える様々な因子を評価するため，詳細な規則となっている。そこで，調和 CSR の疲労強度評価法について主な要件を取り上げ解説を行う。なお，各要件の説明は調和 CSR の技術的背景 [1)]に準拠している。

2. 疲労設計条件

調和 CSR における疲労設計条件を以下に示す。

- 疲労強度評価手法：線形累積被害則
- S-N 線図：HSE（旧 DEn）の B，C 及び D 線図（大気中及び腐食環境下）
- 想定航路：北大西洋
- 設計疲労寿命：25 年以上
- 応力の長期分布：指数分布
- 想定荷重：
  通常の波浪変動により生じる荷重（船体縦曲げモーメント，波浪変動圧，貨物内圧等）を考慮
- 評価対象領域：
  貨物倉区域の全ての構造詳細（評価必須の箇所，スクリーニング対象箇所，詳細設計

標準適用箇所）
・ 対象鋼材：規格降伏応力 390MPa 以下
・ 参照応力：ホットスポット応力
これらの強度評価条件に基づき，疲労強度評価は実施される。

3. 疲労強度評価の手順

調和 CSR における疲労強度評価手順は以下の通りである。
1）評価対象部材におけるホットスポット応力を算出
2）応力の長期分布の算出
3）設計 S-N 線図の選択
4）疲労被害度及び疲労寿命の計算
各項目について順次説明する。

3.1 評価対象部材におけるホットスポット応力の算出

3.1.1 評価対象部材

疲労強度評価対象部材は応力評価手法により以下の通りに定められている。
・ 簡便な応力評価法：縦通防撓材端部
・ 有限要素解析（極詳細メッシュ使用）：
ビルジナックル部，バルクヘッドと下部スツール取り合い部，倉内肋骨端部，ハッチコーナー等，過去の経験から疲労強度評価が必須とされている個所
・ 有限要素解析（スクリーニング：詳細メッシュ使用）：
横肋骨の端部，水平桁の端部等

3.1.2 簡便な応力評価法におけるホットスポット応力算出法

簡便な応力評価法においては，梁理論に基づき公称応力を求め，その公称応力に対しロンジ端部形状に応じた応力集中係数を掛け合わせホットスポット応力を算出する。

3.1.3 有限要素法（極詳細メッシュ使用）におけるホットスポット応力算出法

有限要素モデルの疲労強度評価対象箇所を板厚レベルの大きさでメッシュ分割し，ホットスポット周辺の要素の主応力を用いてホットスポット応力を求める。

3.1.4 有限要素法（スクリーニング：詳細メッシュ使用）

有限要素モデルを 50mm 四方にメッシュ分割し，ホットスポット周辺要素の膜応力に応力倍率係数を掛け合わせてホットスポット応力を求める。

3.2 応力の長期分布の算出

各積付状態に対し，最大応力を与える設計波を求める。そして超過確率 10^{-2} レベルの応力を考慮し，応力の長期分布を求める。また，応力の長期分布は指数分布に従うとしている。

3.3 設計 S-N 線図の選択

UK HSE（旧 DEn）の B，C 及び D 線図を基本とし，大気中及び腐食環境下に対してそれぞれ S-N 線図を用意する。

3.4 疲労被害度及び疲労寿命の計算

大気中及び腐食環境下における疲労被害度をそれぞれ求め，足し合わせる。また，溶接

後処理により疲労強度を改善できる。

4. 各要件の詳細説明

調和 CSR では，疲労強度評価に関し様々な要件があるが，ここでは以下の要件について取り上げ，説明を行う。

1）疲労応力範囲
2）ホットスポット応力算出法
3）応力の長期分布算出法
4）設計 S-N 線図

4.1 疲労応力範囲

疲労応力範囲は，ホットスポット応力に各種修正係数を掛け合わせて求められる。

・ ロンジ端部：

$$\Delta\sigma_{FS,i(j)} = f_{mean,i(j)} \times f_{thick} \times f_{warp} \times \Delta\sigma_{HS,i(j)} \quad (1)$$

・ FE 解析（極詳細メッシュ使用）：

$$\Delta\sigma_{FS1,i(j)} = f_{mean1,i(j)} \times f_{thick} \times f_c \times \Delta\sigma_{HS1,i(j)} \quad (2)$$

・ FE 解析（詳細メッシュ使用（スクリーニング））：

$$\Delta\sigma_{FS,i(j)} = K_{sf} \times f_{material} \times f_{mean,i(j)} \times f_{thick} \times \Delta\sigma_{BS,i(j)} \quad (3)$$

ここで，

$f_{mean,i(j)}$：平均応力修正係数（応力範囲と平均応力の比を考慮）
f_{thick}：板厚影響係数（継手形式，溶接後処理に応じて影響の違いを考慮）
f_{warp}：曲げ捩じり修正係数（ばら積貨物船のハッチコーナー近傍のロンジについて考慮）
f_c：腐食控除量による修正係数（FE モデルにおける腐食控除量（降伏強度評価：0.5tc，疲労強度評価：0.25tc）の違いを考慮）
K_{sf}：表面仕上げの影響係数（母材縁部の仕上げ状態の違いを考慮）
$f_{material}$：材料強度係数（材料強度に応じた疲労強度の向上を考慮（母材のみ））

これらの修正係数のうち，平均応力修正，板厚影響及び曲げ捩じり修正について説明する。

4.1.1 平均応力修正

ここでは，代表例として溶接継手における平均応力修正について説明する。なお，調和 CSR では溶接継手に存在する溶接残留応力の影響を直接取り扱わず，平均応力の修正係数に含めている。平均応力修正係数は下記算式により求められる。調和 CSR の疲労強度評価では超過確率 10^{-2} レベルの小さな応力を用いているが，超過確率 10^{-2} レベルの応力を用いて修正係数を求めると，平均応力の変化による影響が大きく出てしまうため，応力を 2 倍して超過確率 10^{-4} レベルの応力に換算している。

$$f_{mean,i(j)} = \begin{cases} min\left[1.0,\ 0.9 + 0.2\frac{\sigma_{mCor,i(j)}}{2\Delta\sigma_{HS,i(j)}}\right] for\ \sigma_{mCor,i(j)} \geq 0 \\ max\left[0.3,\ 0.9 + 0.8\frac{\sigma_{mCor,i(j)}}{2\Delta\sigma_{HS,i(j)}}\right] for\ \sigma_{mCor,i(j)} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

ここで，

$$\sigma_{mCor,i(j)} = \begin{cases} \sigma_{mean,i(j)} & for\ \sigma_{max} \leq R_{eEq} \\ R_{eEq} - \sigma_{max} + \sigma_{mean,i(j)} & for\ \sigma_{max} > R_{eEq} \end{cases}$$

$$\sigma_{max} = max_{i,(j)}\left(\Delta\sigma_{HS,i(j)} + \sigma_{mean,i(j)}\right)$$

$$R_{eEq} = max(315;\ R_{eH})$$

軟鋼の規格降伏応力は 235MPa であるが，ISSC 等の調査により実際には 300MPa 程度であるといわれている。そこで，実態に合わせて降伏応力R_{eEq}は 315MPa 以下とならないようにしている。そして，最大応力が降伏応力を超える場合には，シェイクダウン効果を考慮して平均応力を低下させている。また，平均応力が圧縮側の場合でも修正係数の下限値は 0.3 であり 0 にならないが，これは実構造への適用を考慮した安全側の設定となっている。

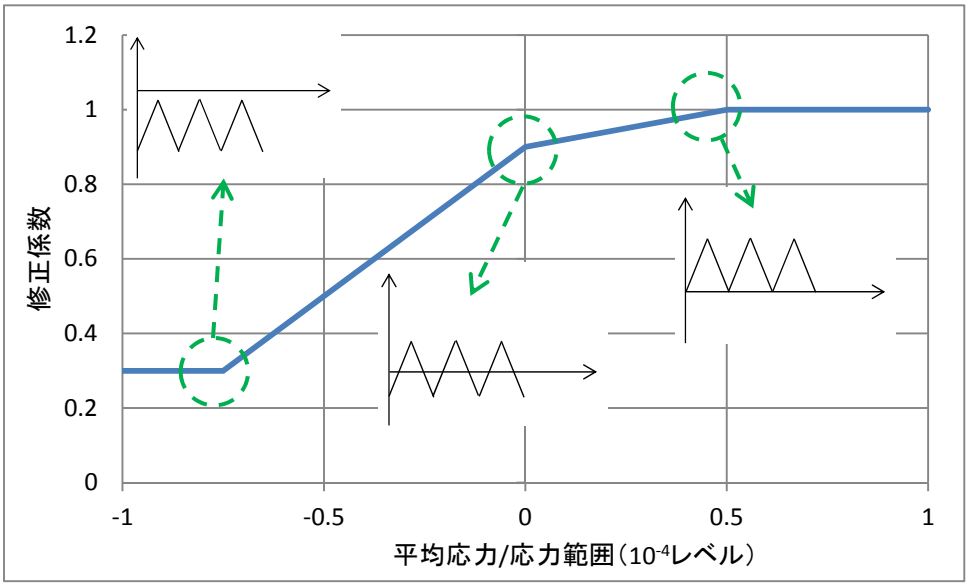


図 1　溶接継手に対する平均応力修正係数

4.1.2　板厚影響

一般に板厚が大きくなると疲労強度が低下するといわれているが，疲労強度は単純に板厚の大きさに依存しているわけではなく，付板の板厚で決まる溶接部の大きさに依存する切欠き底の応力集中と板厚方向の応力勾配が支配的要因となっている [2)]。例として，溶接継手において主板の板厚が大きくなるに従い，付板の板厚及び溶接脚長も対応して大きくなる場合について考える。このとき，溶接止端部の止端半径は付板や溶接脚長の大きさに

ほとんど影響を受けない。その結果，溶接脚長が大きくなるにつれ溶接止端部は相対的に先鋭になり，応力集中及び応力勾配が増すことになる。この影響のため，主板の板厚が大きくなると，結果として疲労強度が低下することになる。

4.1.3　曲げ捩じり修正

3 ホールドモデルに曲げ捩じりモーメントを負荷し，有限要素解析を実施した。その結果，ハッチコーナー直近のロンジの疲労寿命が約 24%低下することが分かった。疲労強度の低下は応力の 3 乗に比例するので，$(1.24)^{1/3}$　1.07 とした。

また，ハッチコーナー直近のロンジに隣接する評価箇所においては，疲労寿命は半分の 12%低下するとみなし，$(1.12)^{1/3}$　1.04 とした。

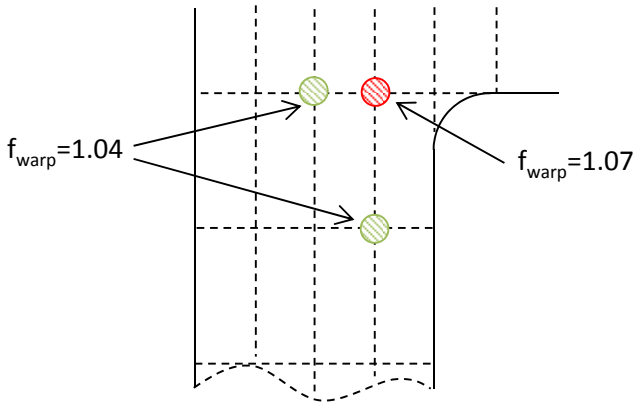


図 2　ハッチコーナー部における曲げ捩じり修正

4.2　ホットスポット応力算出法

4.2.1　補強ウェブ付十字継手以外の溶接継手

造船業界においては，ホットスポットから板厚の 0.5 倍（0.5t）及び 1.5 倍（1.5t）離れた位置における応力をホットスポットに外挿する，という手法を長年用いてきた [3)]。しかしながら，調和 CSR においてはなるべく簡便な手法を用いるため，外挿を行わずに一点でホットスポット応力を求めることにした。

Fricke[4)]は様々な形状の溶接継手に対し応力分布を計測するとともに，4 節点シェル要素，8 節点シェル要素及び 20 節点ソリッド要素等を用いた有限要素解析結果と比較を行った。そして，ホットスポット応力を以下の 3 通りの手法で求めている。

- 0.5t 及び 1.5t の応力をホットスポットに外挿
- 0.4t 及び 1.0t の応力をホットスポットに外挿
- 0.5t の一点

その結果，0.5t の一点でホットスポット応力を求めた場合，UK HSE の E 線図を用いれば従来の手法による結果と良く一致することが分かった。しかしながら，船舶分野ではホットスポット応力を 0.5t - 1.5t の外挿応力で求め UK HSE の D 線図で評価する手法を用いている。そこで，D 線図と E 線図の差を考慮し，0.5t の一点で求めた応力を 1.12 倍することで，D 線図を用いて評価できるようにした。

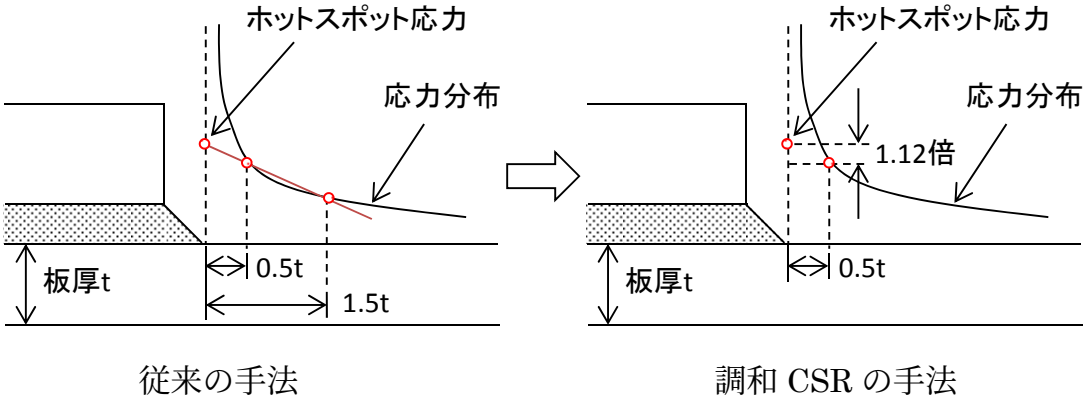


図 3　ホットスポット応力算出位置

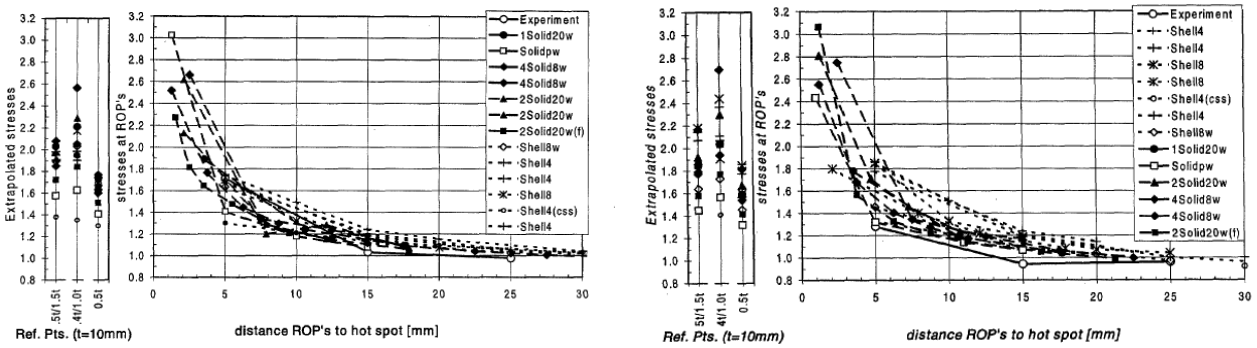


図 4　各種要素を用いた有限要素解析及び実験計測から得られた
応力分布及びホットスポット応力

（出典：Fricke , W. :“ Recommended Hot Spot Analysis Procedure for Structural Details of FPSOs and Ships Based on Round-Robin FE Analyses ”, Proceedings of the Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference, 2001.）

4.2.2　補強ウェブ付十字継手

補強ウェブ付十字継手におけるホットスポット応力は，以下の算式により求められる。

$$\sigma_{HS} = 1.12\sigma_{shift} \qquad (5)$$

ここで，

$$\sigma_{shift} = \left[\sigma_{membrane}(X_{shift}) + 0.60\sigma_{bending}(X_{shift})\right]\beta$$

$$X_{shift} = \frac{t_{1-n50}}{2} + X_{wt}$$

β：主板と付板の角度により決まる修正係数

Lotsberg[5]らはシェル要素及びソリッド要素（溶接ビードの有無を考慮）で補強ウェブ付十字継手をモデル化し，付板の角度を 90°，120°及び 135°の 3 通りに変化させ，有限要素解析を実施した（図 5 参照）。

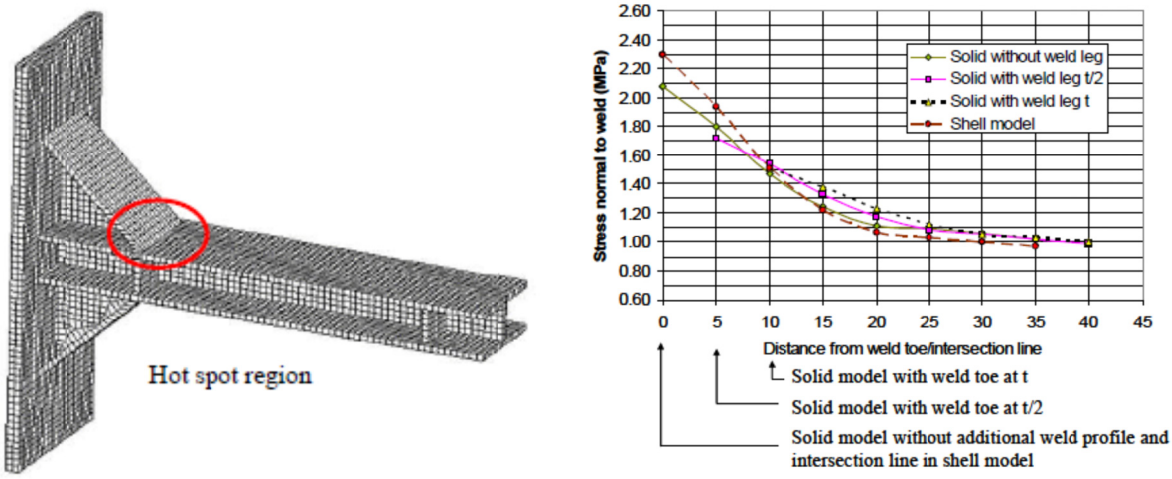


図 5　解析モデル及び応力分布図

（出典：Lotsbaerg, I., et al：”Fatigue Design of web Stiffened Cruciform Connections”, 10th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, 2007.）

その結果，板交差部におけるシェル要素モデルとソリッド要素モデルの変形挙動の相違（板厚方向への変形，主板の局所的な曲げ変形に対する拘束）により，シェル要素モデルにおいて従来の 0.5t 及び 1.5t の応力を外挿する方法を用いた場合, ホットスポット応力は過大となることが判明した。そこで，シェル要素モデルにおいてはホットスポット（板交差部）より 0.5t+X_{wt} 離れた位置でホットスポット応力を評価する手法が提案された（X_{wt}：板表面交差部から溶接止端部までの距離）。調和 CSR においてもこの手法を取り入れ，補強ウェブ付十字継手においてはホットスポット応力を 0.5t からさらに X_{wt} 離れた位置で評価している。

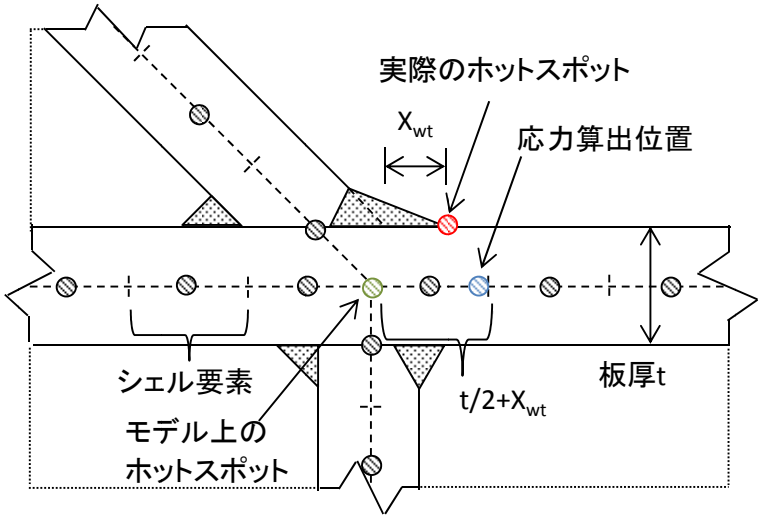


図 6　補強ウェブ付十字継手板交差部における応力算出位置

また，ビルジホッパーナックル部のように大きな曲げ応力が作用する部材については，例え大きな曲げ応力が作用しない部材と表面応力が同じでも板厚内の応力分布が異なるた

め，き裂進展寿命に差が生じる。そこで，Kang ら[6]が実施した単純引張荷重と純曲げ荷重の疲労試験結果を基に，補強ウェブ付十字継手においては応力を膜応力と曲げ応力に分離し，曲げ応力についてはその 60%を考慮するようにした。

主板と付板の角度により決まる修正係数βについては，有限要素解析の結果及びき裂伝播解析を基に算出している。

4.3　応力の長期分布

応力の長期分布は，船舶が運航期間中にどのような海象状態（短期海象）に遭遇するかによって決まる。一般に，短期海象の持続時間は 2 時間程度とされており，単純に計算すると船舶は一生の間に 10^5 個の短期海象に遭遇することになる。しかしながら，これらの短期海象に対して応力分布を求め，それを足し合わせて応力の長期分布を求めるのは非常に煩雑である。それゆえ，船舶の疲労設計においては，これまでの経験から応力の長期分布はワイブル分布または指数分布に従うとみなしている。

応力の長期分布を求めるにあたり，各積付状態と設計波の組み合わせにより，超過確率 10^{-2} レベルの応力を求めている。このとき，選択された設計波が例えば横波であったとしても，25 年間横波を受け続けるという訳ではない。あくまで，応力の長期分布形状を求めるために最も厳しくなる設計波を選択しているだけであり，得られた応力の長期分布には様々な波向き，波周期による応力が含まれている。

2 変数ワイブル分布の確率密度関数は以下の算式で与えられる。

$$f(\Delta\sigma) = \frac{\xi}{k}\left(\frac{\Delta\sigma}{k}\right)^{\xi-1} exp\left(-\frac{\Delta\sigma}{k}\right)^{\xi} \quad （6）$$

ここで，

Δσ：応力範囲

ξ：形状変数

k：尺度変数

$$k = \frac{\Delta\sigma_R}{(lnN_R)^{1/\xi}}$$

N_R：超過確率 1/ N_R に相当する応力の発生回数

$\Delta\sigma_R$：超過確率 1/ N_R に相当する応力範囲

調和 CSR では形状変数を 1 としている（指数分布と仮定している）。また，尺度変数については最も疲労被害度への寄与率が大きい超過確率 10^{-2} の応力を参照している。

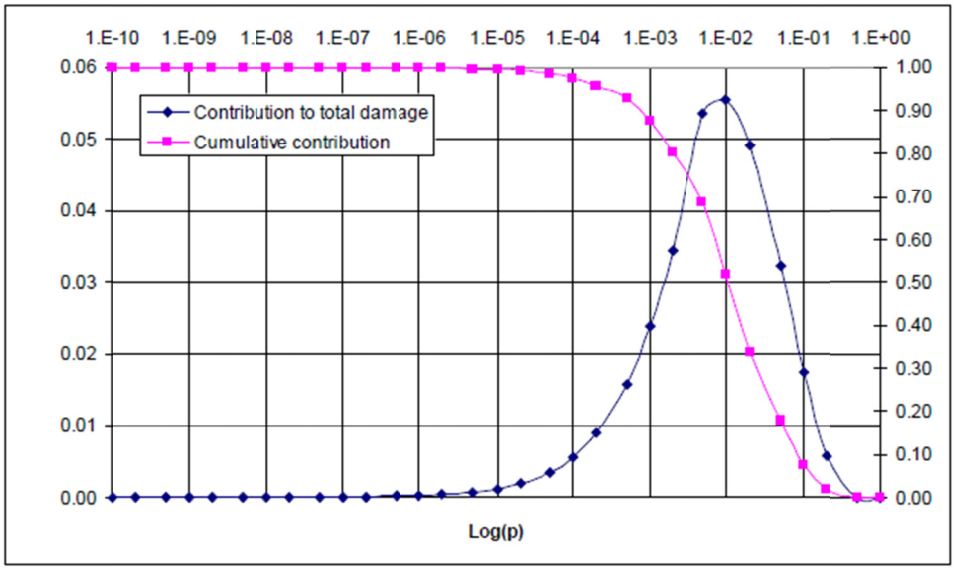


図 7　各超過確率の応力の疲労被害度への寄与
（出典：“Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers Technical Background Rule Reference”, IACS, 2014.）

本来，形状変数が正しく選ばれていれば，尺度変数をどの応力レベルを参照にして求めても問題はない。しかしながら，船舶のサイズや疲労強度評価対象位置の相違により，形状変数には本来ばらつきが存在する。よって，尺度変数をどの応力レベルで求めたかにより応力分布が変化する。図 8 に形状変数を 0.8～1.2 の間で変化させて，尺度変数を超過確率 10^{-1} から 10^{-8} までの応力を参照して求めた場合の疲労被害度（形状変数を 1 としたとき 100%とする）を示す。図 8 より，尺度変数を超過確率 10^{-2} の応力を参照して求めた場合に一番形状変数の変化の影響を受けないことが分かる。

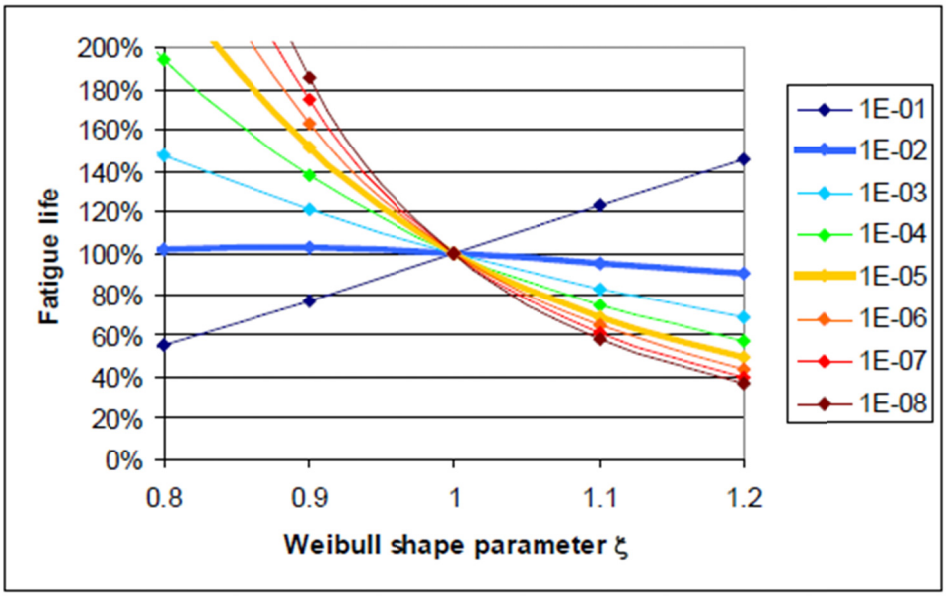


図 8　形状変数及び尺度変数を変えた場合の疲労被害度の変化
（但し，形状変数が 1 のときの値を 100%とする）
（出典：“Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers Technical Background Rule Reference”, IACS, 2014.）

4.4　設計 S-N 線図

調和 CSR では大気中と腐食環境下の 2 種類の S-N 線図を使用している。それぞれ HSE（旧 DEn）の B 線図，C 線図及び D 線図に基づいている。なお，腐食による鋼板の衰耗は腐食予備厚により担保し，腐食環境下におけるき裂の発生，進展への影響は腐食環境下の S-N 線図により担保する。また，腐食環境下においてはピット底からき裂が発生，伝播するため疲労限は存在しないため，S-N 線図の傾きを一定としている。

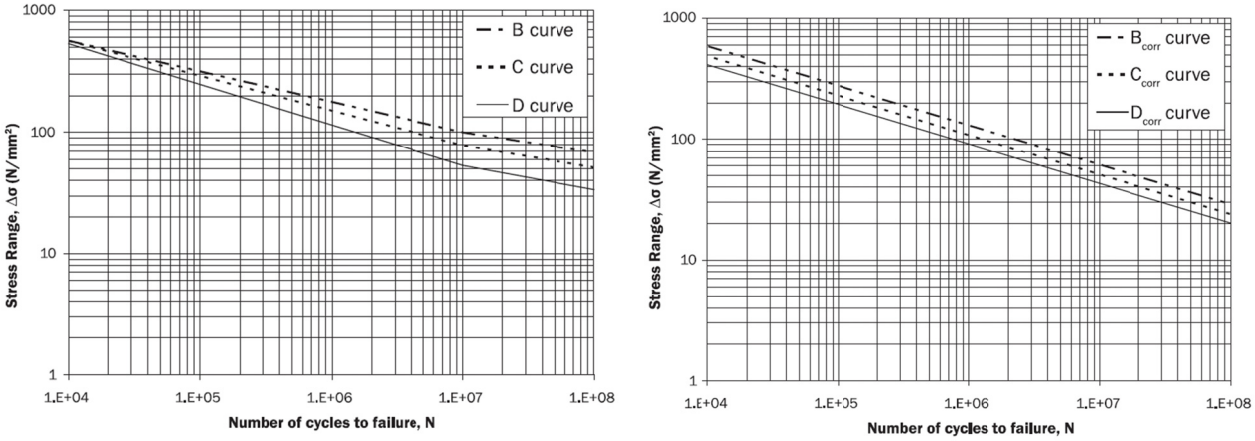


図 9　大気中（左）及び腐食環境下（右）における S-N 線図
（出典：”Common Structural Rules for Bulk Carriers and oil Tankers”, IACS, 2014）

また，降伏応力が 390MPa を超える鋼材については疲労強度に対する電気防食の有効性がまだ証明されていないためである。よって，降伏応力が 390MPa を超える鋼材や耐疲労鋼に対する S-N 線図については，各船級協会で個別に対応することになる。

5.　まとめ

調和 CSR の疲労強度評価法の主な要件について，技術的背景を含めて説明を行った。調和 CSR の疲労強度評価法には最新の知見が取り入れられているため，ホットスポット応力評価法など従来の疲労設計法とは大きく異なる点もある。

今後は，低サイクル疲労や弾性振動による疲労など明確にされていない事項について，さらなる研究を行う予定である。

参考文献

1)　“Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers Technical Background Rule Reference”, IACS, 2014.
2)　山本規雄，他：疲労強度に及ぼす板厚効果に関する研究，日本船舶海洋工学会講演論文集第 15 号，2012
3)　第 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，1990
4)　Fricke, W. ： “Recommended Hot Spot Analysis Procedure for Structural Details

of FPSOs and Ships Based on Round-Robin FE Analyses", Proceedings of the Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference, 2001.

5) Lotsbaerg, I., et al："Fatigue Design of web Stiffened Cruciform Connections", 10th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, 2007.

6) Kang, S. W.,："Fatigue strength of fillet welded steel structure under out-of-plane bending", International Welding Conference, 2002.

ClassNK

2014 ClassNK 春季技術セミナー

調和CSRにおける
疲労強度評価

目次

ClassNK

1. 調和CSRの背景
2. 疲労設計条件
3. 疲労強度評価の手順
4. 各要件の詳細説明
5. まとめ

2

調和CSRの背景

ClassNK

- CSR制定以前： 各船級協会が独自の疲労強度規則を制定
- エリカ号（1999年）やプレステージ号（2002年）の事故を機に、規則強化の動きが高まる
- 2006年4月： CSR-BC及びCSR-OTが施行される
- 2015年7月： 調和CSR施行予定

	評価手法	対象航路	疲労寿命
CSR以前	船級協会毎に異なる	World Wide	20年
CSR-BC,OT及び調和CSR	各船級協会で共通	北大西洋	25年

- 調和CSRでは、疲労強度に影響を与える様々な因子を評価手法に取り入れたため、詳細な規則となっている。

調和CSRの疲労強度評価法のうち、主な要件を取り上げ解説する。

疲労設計条件

ClassNK

- 疲労強度評価法：線形累積被害則
- S-N線図：UK HSE（旧DEn）のB、C及びD線図
  （大気中と腐食環境下）
- 想定航路：北大西洋
- 設計疲労寿命：25年以上
- 応力の長期分布：指数分布
- 想定荷重：通常の波浪変動により生じる荷重
- 評価対象領域：貨物倉区域の全ての構造詳細
  （評価必須箇所、スクリーニング対象箇所、詳細設計標準適用箇所）
- 対象鋼材：規格降伏応力390MPa以下
- 参照応力：ホットスポット応力

疲労強度評価の手順（1）

ClassNK

1. ホットスポット応力の算出
   - 簡便な応力評価法
     対象部材：ロンジ端部
     梁理論による公称応力×応力集中係数
   - FE解析（極詳細メッシュ（板厚程度））
     対象部材：ビルジナックル部、倉内肋骨端部等
     解析結果から直接ホットスポット応力を求める。
   - FE解析（詳細メッシュ（50mm程度）：Screening）
     対象部材：水平桁の端部等
     膜応力に応力倍率係数を掛ける。
     （疲労被害度が許容値を超えた場合は、極詳細メッシュを用いて再評価）

5

疲労強度評価の手順（2）

ClassNK

2. 応力の長期分布の算出
   - 各積付状態に対し、最大応力を与える設計波を求める
   - 超過確率10^{-2}レベルの応力を考慮
   - 応力長期分布は指数分布に従う

3. 設計S-N線図の選択
   - UK HSE（旧DEn）のB、C及びD線図を基本とし、大気中及び腐食環境下に対してそれぞれS-N線図を用意

4. 疲労被害度及び疲労寿命の計算
   - 大気中及び腐食環境下で疲労被害度をそれぞれ算出
   - 溶接後処理による疲労強度向上を考慮

6

目次

ClassNK

1. 調和CSRの背景
2. 調和CSRにおける疲労強度評価条件
3. 疲労強度評価の手順
4. 各要件の詳細説明
   - ・疲労応力範囲
   - ・ホットスポット応力算出法
   - ・応力長期分布算出法
   - ・設計S-N線図
5. まとめ

7

疲労応力範囲について

ClassNK

➢ 疲労応力範囲はホットスポット応力に各種修正係数を掛け合わせて求める

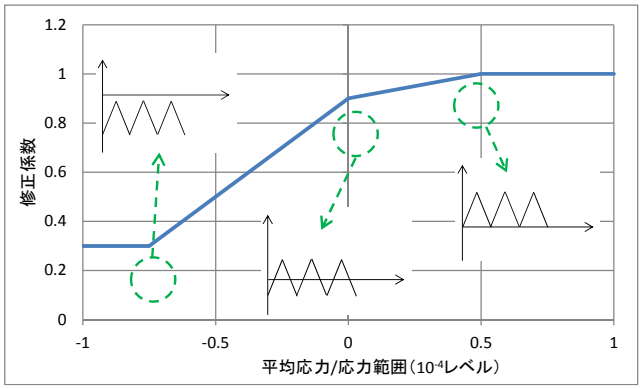
$f_{mean,i(j)}$	；平均応力（応力範囲と平均応力の比を考慮）
f_{thick}	；板厚影響（継手形式、溶接後処理に応じて影響の違いを考慮）
f_{warp}	；曲げ捩じり（BCのハッチコーナー近傍の小骨について考慮）
f_c	；腐食控除量（FEモデルにおける腐食控除量（降伏強度評価：0.5tc、疲労強度評価：0.25tc）の違いを考慮）
K_{sf}	；表面仕上げ（母材縁部の仕上げ状態の違いを考慮）
$f_{material}$	；材料強度（材料強度に応じた疲労強度の向上を考慮（母材のみ））

8

平均応力について

ClassNK

➢ 溶接継手における平均応力修正



- 疲労強度評価では超過確率10^{-2}レベルの応力を用いているが、修正係数を算出する際には超過確率10^{-4}レベルの応力を用いている。
- 応力サイクル全体が圧縮領域に存在しても疲労は蓄積すると考えているが、これは実構造への適用を考慮した安全側の設定となっているためである。
- 軟鋼の降伏応力は実態に合わせ315MPaとみなす。
- シェイクダウン効果を考慮して平均応力を修正している。

板厚影響について

ClassNK

➢ 板厚影響は主板の板厚ではなく、付板の板厚で決まる溶接部の大きさに依存する切欠き底の応力集中と板厚方向の応力勾配が支配的要因となっている。

- 主板の板厚が大きくなる

↓

- 付板の板厚、溶接脚長が大きくなる
- 溶接止端部の止端半径は大きく変化せず

↓

- 溶接止端部は相対的に先鋭化する
- 溶接止端部における応力集中、応力勾配が大きくなる

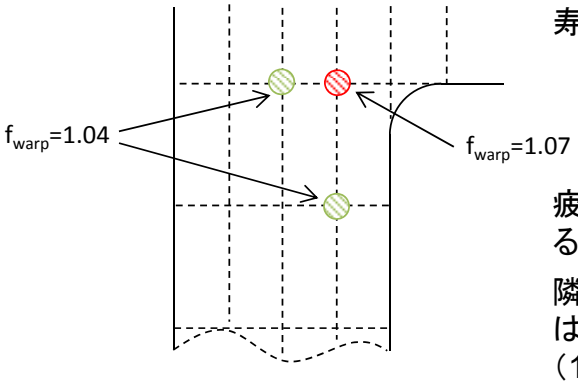
↓

- 疲労強度が低下する

曲げ捩じりの影響について

ClassNK

➢ ばら積貨物船が対象



貨物倉モデルに捩じりモーメントを負荷して有限要素解析を実施したところ、最も曲げ捩じりの影響を受けるロンジの疲労寿命は24%低下することが判明した。

疲労強度の低下は応力の3乗に比例するので、$(1.24)^{1/3}=1.07$

隣接する評価箇所においては疲労寿命は半分の12%低下するとみなし、$(1.12)^{1/3}=1.04$

目次

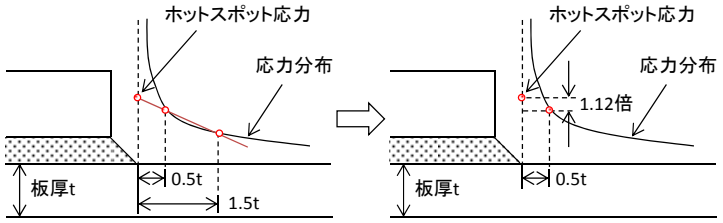
ClassNK

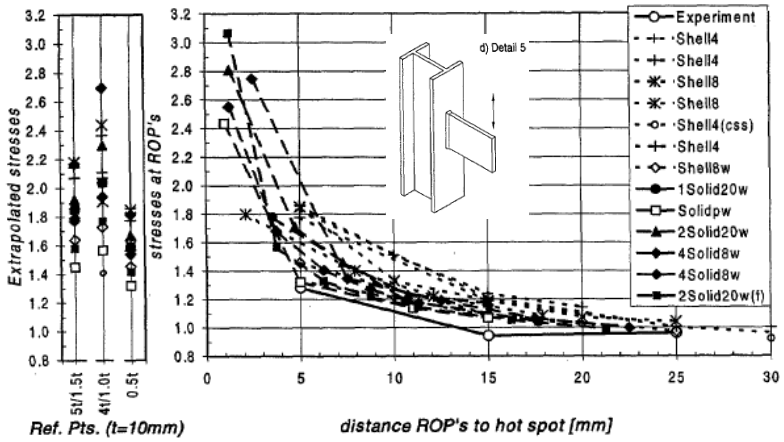
1. 調和CSRの背景
2. 調和CSRにおける疲労強度評価条件
3. 疲労強度評価の手順
4. 各要件の詳細説明
   ・疲労応力範囲
   ・ホットスポット応力算出法
   ・応力長期分布算出法
   ・設計S-N線図
5. まとめ

ホットスポット応力について（1）

ClassNK

➢ 補強ウェブ付十字継手以外の溶接継手のホットスポット応力



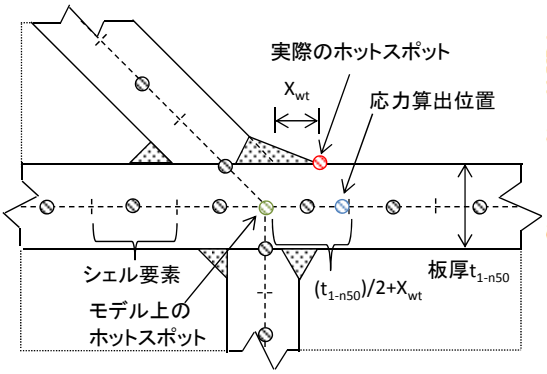


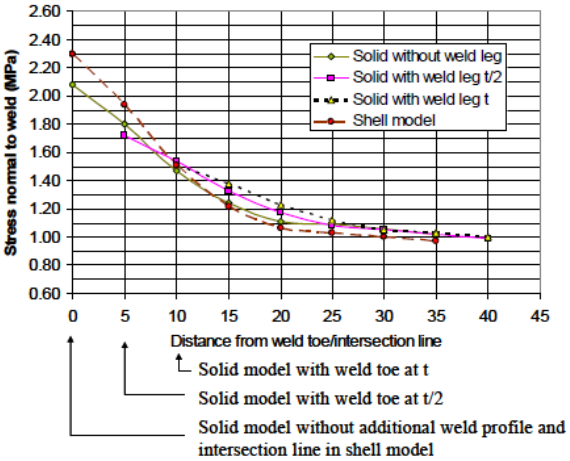
ホットスポット応力について（2）

ClassNK

➢ 補強ウェブ付十字継手のホットスポット応力
（ホッパーナックル部等）

$$X_{shift} = \frac{t_{1-n50}}{2} + X_{wt}$$ ホットスポット応力評価位置をずらす





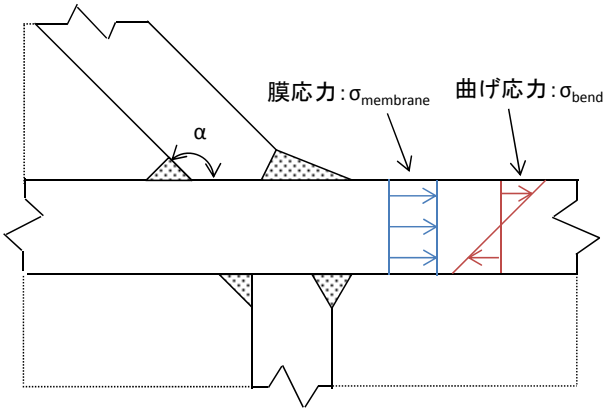
ホットスポット応力について（3）

ClassNK

➢ 補強ウェブ付十字継手のホットスポット応力
（ホッパーナックル部等）

$$\sigma_{shift} = \left[\sigma_{membrane}(X_{shift}) + 0.60 \times \sigma_{bending}(X_{shift})\right] \times \beta$$

β：主板と付板のなす角度によって決まる係数



大きな曲げ応力が作用する場合と作用しない場合では、表面応力が同じでも板厚内の応力分布は異なる。

単純引張荷重と純曲げ荷重の疲労試験結果を基に決定。

目次

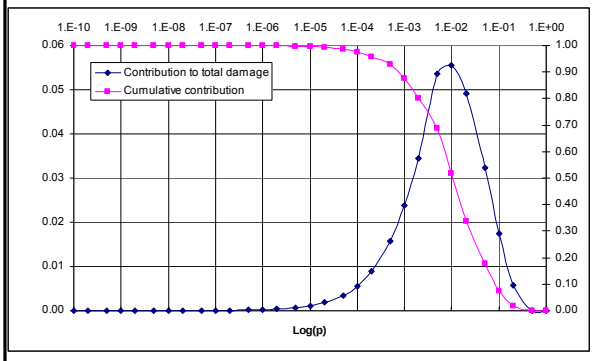
ClassNK

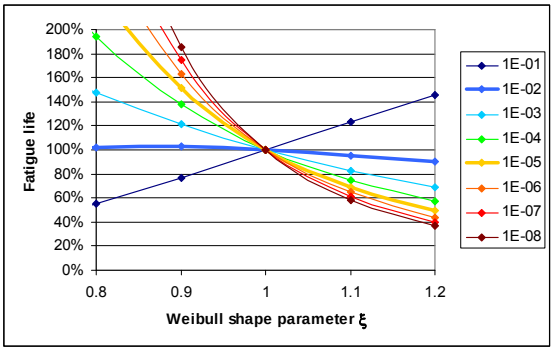
1. 調和CSRの背景
2. 調和CSRにおける疲労強度評価条件
3. 疲労強度評価の手順
4. 各要件の詳細説明
   ・ホットスポット応力評価法
   ・平均応力修正法
   ・応力長期分布算出法
   ・設計S-N線図
5. まとめ

応力の長期分布について

ClassNK

➢ 応力の長期分布：指数分布
（2変数ワイブル分布の形状変数が1のとき、指数分布となる）





船のサイズ、評価対象箇所の相違により、形状係数には本来ばらつきが存在するが、超過確率10^{-2}レベルの応力を参照して尺度変数を求めることにより、疲労被害度への影響は最小化される。

目次

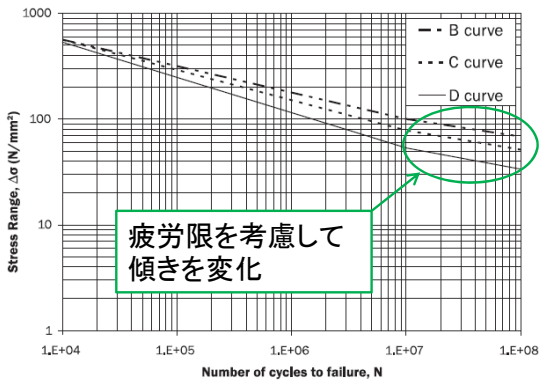
ClassNK

1. 調和CSRの背景
2. 調和CSRにおける疲労強度評価条件
3. 疲労強度評価の手順
4. 各要件の詳細説明
   - ホットスポット応力評価法
   - 平均応力修正法
   - 応力長期分布算出法
   - 設計S-N線図
5. まとめ

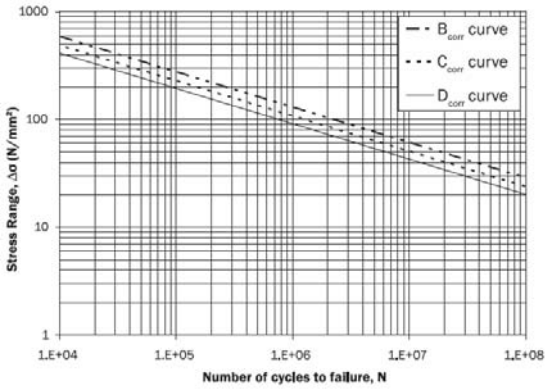
設計S-N線図について

ClassNK

➢ 大気中と腐食環境下の2種類のS-N線図を使用



大気中



腐食環境下

- 腐食による鋼板の衰耗は腐食予備厚より担保し、腐食環境下におけるき裂の発生、進展への影響は腐食環境下のS-N線図で担保する。
- 腐食環境下においてはピット底からき裂が発生、伝播するため疲労限は存在しない。よって、S-N線図の傾きを一定としている。

目次

ClassNK

1. 調和CSRの背景
2. 調和CSRにおける疲労強度評価条件
3. 疲労強度評価の手順
4. 各要件の詳細説明
   ・ホットスポット応力評価法
   ・平均応力修正法
   ・応力長期分布算出法
   ・設計S-N線図
5. まとめ

まとめ

ClassNK

- 調和CSRの疲労強度評価法の主な要件について、技術的背景を含めて説明を行った。
- 調和CSRの疲労強度評価法には最新の知見が取り入れられているため、ホットスポット応力評価法など従来の疲労設計法とは大きく異なる点もある。
- 低サイクル疲労や弾性振動による疲労など明確にされていない事項について、さらなる研究を行う予定である。

21