ホットスポット応力基準による疲労強度評価 (第2報)

——ピーク歪による評価——

正員 町 田 進* 正員 的 場 正 明*
正員 吉 成 仁 志* 西 村 隆 一**

Definition of hot spot Stress in welded structure for fatigue assessment (2nd Report)

by Susumu Machida, *Member* Masaaki Matoba, *Member*
Hitoshi Yoshinari, *Member* Ryuichi Nishimura

Summary

In design of a large structure, the assessment of fatigue strength is one of major design considerations. In evaluation of fatigue strength of welded toes, the development of FE analysis and detailed model tests have enhanced the use of "Hot Spot Stress" or "Peak Strain" concepts.

In the first report, the hot spot stress definition for plate type structures was discussed, using the experimental data of the model tests by SR202.

In this paper, fatigue strength assessment in the use of "Peak Strain" concept is presented. Fatigue strength assessment methods with the peak stress are shown in ASME Boiler and Pressure Code Sec. III and NK rule Part P.

For the short of TMCP steel low cycle fatigue data and the short of application for model tests data in the peak strain concept application, in this research, low cycle fatigue tests of round bars with notch were done and analysis based on the peak strain concept for the model tests by SR202 have been made.

In the analysis, the NK method with some choice of detailed assessment process have been investigated.

Finally, detailed calculation method for the peak strain with the object of assessing low to high cycle fatigue strength of welded structures is proposed, that is the use of Neuber rule for plastic strain concentration and Manson method for stable stress strain relation.

記 号

d : 径方向変位量 (mm)
 d_0 : 直径 (mm)
 ϵ'_e : 軸方向弾性歪
 ϵ'_D : 軸方向塑性歪
 ϵ'_t : 軸方向全歪
 σ_u : 引張強度
 ϵ_0 : 公称歪
 ϵ_h : ホットスポット歪
 ϵ_H : ピーク歪
 σ_0 : 公称応力
 σ_h : ホットスポット応力

σ_H : ピーク応力
 K_{ts} : 構造的応力集中率
 K_{tw} : 局部的応力集中率
 K_t : 本試験における応力集中率
 $K\sigma_1: \sigma_h/\sigma_0$
 $K\sigma_2: \sigma_H/\sigma_h$
 $K\epsilon_1: \epsilon_h/\epsilon_0$
 $K\epsilon_2: \epsilon_H/\epsilon_h$
 $K\sigma$: 本試験における塑性応力集中率
 $K\epsilon$: 本試験における塑性歪集中率

1. 緒 言

溶接構造物の疲労設計を行うに際し、使用する設計 S-N 線図は継手分類 (Joint Classification) による方法とホットスポット応力 (Hot Spot Stress) による方法に分けられる。前者は古い歴史を有しており、分類されたいくつかの

* 東京大学工学部

** 東京大学大学院工学系研究科

継手のグループ毎に設計 S-N 線図を設定する方法である。この場合には構造寸法の違いによる応力集中率や疲労強度の差を配慮しえないことが難点となり、海洋構造物における鋼管継手などでは鋼管寸法の変化に応じ応力集中係数の差ははなはだしく一本の設計 S-N 線図を用いて評価するにはかなり無理がある。このような背景のもと、また近年、解析的な方法や有限要素法の発展により応力集中率を正しく求められるようになり、ホットスポット応力をもとに疲労強度を評価するようになってきた。このホットスポット応力を基準とし一本の S-N 線図によって評価する方法は ASME の Code¹⁾ を始めとし、海洋構造物の鋼管継手を対象とした各種の規格に取り入れられている。いくつかの疲労設計規格ではホットスポット応力もしくはピーク応力を基準とした疲労検討法を示しており原子炉の構造設計を主対象とした ASME の Boiler and Pressure Vessel Code Sec. III¹⁾ などではピーク応力を基準としている。海洋構造物関係の規格では AWS²⁾ や API³⁾、UKDEn⁴⁾ ではホットスポット応力を基準とし、NK 検査要領 P 5.1.5-2 の結考資料ではピーク応力を基準としている。一般にホットスポット応力は、 $\sigma_h = E \varepsilon_0 K_{ts}$ 、ピーク応力は、 $\sigma_H = E \varepsilon_0 K \varepsilon$ で表される。

ホットスポットの定義においても鋼管継手を対象としたホットスポットの定義は一部の規格で明確に示されており、平板構造を対象としたものも本研究第一報⁵⁾ で一案を示した。このように、ホットスポット応力またはピーク応力を基準とした疲労設計はかなり発達してきた。前報で述べたホットスポット応力的な考え方は構造的応力集中率のみを考慮し、局部的応力集中率を加味しないというものである。

しかし、全てホットスポット応力による整理を試みることは若干問題がある。疲労強度を弾性応力が支配するような高サイクル域においては、時間強度に対するホットスポット応力による整理が合理的な評価となると推定される。しかし、低サイクル疲労においては塑性の影響が著しく亀裂発生部のピーク応力よりもピーク歪が部材の疲労強度を支配し、弾性応力による整理ではあいまいな設計 S-N 線図を与えかねない。本報では、ピーク応力として弾塑性応力解析結果もしくは Neuber, Stowell の式による応力を用い、ピーク歪も同様な計算により求まる歪を使用する。ピーク歪を論じるにあたり問題となるのは、溶接止端形状による局部的応力集中率である。局部的応力集中率を考慮にいたれたピーク歪の推定法は飯田ら⁶⁾ により提案されており、NK でも、NK 検査要領 P 編付録の参考資料で推定法及び基本疲労設計線図を与えている。尚、NK ではピーク歪の事をホットスポット歪、ホットスポット応力の事をホットスポット公称応力と称している。

本報は、ピーク歪による疲労概念のうらづけをし、より合理的な疲労設計を行うための基礎とすることを目的とし

ている。切欠付き試験片の破断寿命がその切欠底での歪によりおもに支配される⁷⁾ という実験事実をふまえて、切欠付き丸棒の疲労試験とその FEM 解析を行い、それを基にピーク歪による溶接構造物に対しての疲労評価法を検討した。その際、NK の提案する手法を基に検討した。また前報では、日本造船研究協会第 202 部会 (SR 202) で行われた構造モデル実験のデータを用いて、ホットスポット応力基準による疲労強度評価の検討を行ったが、本報では同データを用いてピーク歪による疲労強度解析を行った。NK の推奨する基本疲労設計線図およびピーク歪導出手法の妥当性を検証し、整理すると共に種々の構造物の溶接止端切欠部等の応力集中部を、ピーク歪により評価するための手法の詳細を提案する。

2. 切欠付丸棒疲労試験

近年、実船に良く利用されている TMCP 鋼は、破断応力 σ_B /降伏応力 σ_Y の比が他の軟鋼や高張力鋼と比べ大きいのが特徴としてあげられる。従って、低サイクル疲労におけるヒステリシスループの形状が他の鋼材と異なり、低サイクル疲労強度も他の鋼材と異なるという懸念があるので改めて以下の実験を行った。供試材は、板厚 30 mm の船級協会規格 KE 36 (TMCP 鋼板) であり、試験片は、疲労、引張りいずれも TMCP 鋼板の板厚中央部から機械加工によりロール方向に採取した。

疲労試験の試験片形状は、切欠き丸棒である。溶接止端部を想定して Fig. 1 の (a), (b), (c), (d) の 4 通りとした。(a) は $K_t=1.0$ の平滑材、(b) は as weld にみたとタイプであり溶接止端半径を模擬した形状として $\rho=0.2, 0.4, 0.8$ mm の 3 種類とした。(c) は、止端処理 (グラインダー仕上げなど) されたタイプとして $\rho=6$ mm とした。(d) は、亀裂が母材からではなく溶着金属から生じるタイプを考慮するため、溶着金属に $\rho=0.2, 0.4, 0.8$ mm の 3 種類の切欠をつけたものである。溶接部の亀裂発生は、ボンドや HAZ で生じる場合が多いが、切欠底の円周全体をボンドや HAZ で仕上げるのは加工上困難であり、また止端処理されたものについては溶着金属上に亀裂が生じる事もある等の理由から、本報では溶着金属に切欠をいれその動向を調べることにした。各試験片の応力集中係数 K_t は、切欠を有する丸棒が軸力をうける場合の切欠部断面の平均応力を基準応力としたときの切欠底の円周における応力の最大値との比を意味する。各 K_t の値は、西田の式⁸⁾ を参照して、決定した。

引張試験には、島津製作所製のオートグラフ (容量 25 ton) を用い、電気デジタルサーボシステムにより 1 mm/min の一定引張速度で引張荷重を負荷した。この際、試験片の伸びは作動トランスにより、荷重はロードセルにより各々検出しともに連続記録した。これより得られた試験片の機械的性質及びミルシートによる供試材の化学成分を

(a)

$$\begin{cases} \rho = 0.8 \\ K_t = 1.7 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \rho = 0.4 \\ K_t = 2.5 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \rho = 0.2 \\ K_t = 3.4 \end{cases}$$

(b)

$$\rho = 6$$

$$K_t = 1.14$$

(c)

 Fig. 2 An example of Hysteresis Loop ($K_t=1$)

試験としての歪は(1)式より厳密には応力により変化する。それ故、Fig. 3における歪は、応力が一定となる $1/2N_f$ あたりのヒステリシスループの安定時の値で代表されるものとし、疲労寿命は破断寿命 N_f にした。以後、断わりが無い限り、歪および応力は全て安定時の値とし疲労寿命は全て N_f に統一して用いる事とした。

つぎにそれらの値をピーク歪に変換する。NK の提案するフローチャートを Fig. 4 に示す。一般的構造物では、ホットスポット部で Fig. 5(a) に示すよう、構造的応力集中度と溶接ビード形状による局部的応力集中度という二つの応力集中の要因を持っている。ピーク歪(NK ではホットスポット歪と称している) の推定手順はまず、部材の公称応

 Fig. 3 ϵ_t vs. N_f curve

Fig. 4 Flow Chart, by NK method

力・公称歪 (σ_o, ϵ_o) を基準とし、構造的応力集中係数 K_{ts} を乗じたホットスポット応力 σ_h (NK ではホットスポット公称応力と称している) を求め、その値にさらに局部的応力集中係数 K_{tw} を乗じて仮想弾性的な局部的歪を求め、それをもとに Neuber もしくは Stowell の式を用いてピーク歪 ϵ_H を導き出すというものである。今回の試験は、Fig. 5 (b) のようにホットスポット部の公称応力をすでに構造的応力集中を含んだものと考えこれを基準応力とし、これを基に局部的応力集中率を含んだピーク歪を推定する。ホットスポット歪 (NK の表現によるホットスポット公称歪) は、切欠断面を基準とした公称歪であり切欠底の歪がピーク歪である事に相当する。

(a) General Model

4. 応力-歪関係における n 乗硬化則の定数

ピーク歪推定に際し、材料の応力歪関係が必要となる。ホットスポット部での繰り返し中の、安定時の応力歪関係を表す近似式として n 乗硬化特性式を導入する。 a, n の算出法として以下のようなものが考えられる。

① NK の簡便式からの a, n の算出

NK 検査要領 P 編付録の参考資料によると $1/n, a, \sigma_u$ のあいだには、良い相関関係があり (2) のような簡便式が提案されている。

$$1/n = 0.0086\sigma_u + 0.036$$

$$\log a = -0.238 + 2.24(1/n) \quad (2)$$

② Manson-Coffin の式からの a, n の算出

Manson-Coffin の式は

$$\epsilon_f' = C_D N^{-K_D} + C_e N^{-K_e} \quad (3)$$

で表される。平滑材の疲労試験結果により得られた ϵ_f', ϵ_b' の関係を Fig. 6 に示す。 $\epsilon_f' = \epsilon_a' + \epsilon_b'$ とし (3) 式と n 乗硬化特性式との関係を恒等的に解くことにより (4) 式が得られる。

$$a = C_D C_e^{-1/n}$$

$$n = K_e / K_D \quad (4)$$

Fig. 6 より (3) 式の定数を求め、(4) に代入すれば良い。

③ ヒステリシスループの上昇枝曲線からの a, n の算出

平滑材の疲労試験結果から $1/2N_f$ 付近の安定時の上昇枝曲線を取り出し n 乗硬化特性式の形で近似する。歪の大きさにより a, n の値には多少の差があるがその平均値を求める。

④ ヒステリシスループの最高点からの a, n の算出

平滑材の疲労試験結果から $1/2N_f$ 付近の安定時のヒステリシスループの最高点を取り出しそれらを結んだ曲線を n 乗硬化特性式の形で近似する。

①～④で①②は簡易法により間接的に a, n を推定するものであり、③④はヒステリシスループの実測の値から直

(b) Experimental Model

Fig. 5 Definition of Hot Spot Strain

Fig. 6 Comparison of strain component by Manson's equation

接的に求めるものである。これらにより求められた a, n の値を使用して n 乗硬化特性式としたときの曲線の形状および実験点のプロットを Fig. 7 に示す。これらを比較すると②③④により求めた応力歪線図は実験点とも良く一致するということがわかる。①の手法は低歪では実験点と合うが、高歪では材料の性質 (特に TMCP 鋼の性質) を表しき

れないようである。①は非常に簡便性はあるものの、材料の性質を引張強度だけにより推定することにはやや問題があるという結果を得た。②は平滑材の疲労試験を行うという面倒さはあるが、精度的には TMCP 鋼のような特殊な性質を持った材料にも適用でき本報ではこれを推奨する。

Fig. 7 Stress-Strain Curve

Fig. 8 ε_H vs. N_f curve (Manson/Neuber)

4. 切欠き丸棒試験結果の解析

2章で述べた試験片においては切欠半径がごく小さく直接 $K\sigma$, $K\varepsilon$ を計測出来なかったため、各種 K_t の疲労試験結果をピーク歪により統一的に評価出来る塑性応力、歪推定算式を検討する。その際、 K_t , $K\sigma$, $K\varepsilon$ を結び付ける近似式として Neuber の式、Stowell の式などがあるが、両者の比較を行った。

ホットスポット部の公称応力、公称歪（本報で言うホットスポット応力、歪）のヒステリシスループから得られる実測データを用いて NK の手法によりピーク歪を推定した。このときの n 乗硬化特性式の定数は、3章で述べたように実験点に割と近い値である Manson-Coffin の式から求められた値を使用する事とする。そして、それをもとに Neuber の式、Stowell の式を用いて疲労試験結果をピーク歪で整理したものを Fig. 8, 9 に示す。同図には各データの

Fig. 9 ε_H vs. N_f curve (Manson/Stowell)

最小自乗法近似による平均線、及び標準偏差を合わせて示す。これによると多少のばらつきはあるものの **Neuber** の式使用によるものの方が、**Stowell** の式使用によって整理したもの比べ標準偏差がかなり小さくなっている。**Stowell** の式を用いた場合に実験結果と良く合うという報告¹⁰⁾もあるが、本研究では **Stowell** の式を使用した場合は、ピーク歪による $\epsilon-N$ 線図は、 K_t のいかんに関わらず一本の疲労強度線図にまとまる、というホットスポット概念からはずれる結果となる。

そこで **Neuber** の式の妥当性を検証するために、有限要素解析プログラム **MARC** を使って試験モデルの対称条件を考慮した軸対称弾塑性解析を行った。**MARC** プログラムは広範囲の要素ライブラリを有しているがここでは要素タイプ 28 の 8 節点軸対称要素を使用し荷重増分理論にて

計算を行った。有限要素モデルの応力集中部における、最小メッシュサイズは少なくとも $\rho/2$ より小さいものとした。有限要素モデルおよび歪分布状況の一例を Fig. 10 に示す。

計算を簡単化するためにここでは材料の繰り返しの影響を無視して引張応力のみを与える形をとった。その際、塑性応力歪関係として a, n の値は 3 章で述べた四種類の中から、実測値である切欠断面部の応力及び変位の関係に最も良く対応しているものを選択することとした。3 章で述べた各 a, n について計算を行った結果、②, ③, ④ともさほど変化はないものの、その中でも③のヒステリシスループの上昇枝曲線から求めた a, n の値を使用したときに、計算結果が各 K_t による試験片とも (1) 式から得られる実測データと最も良く合うという結果となった。そこで解析に

Fig. 10 FE analysis Model ($K_t=1.7$)

はこの値を取入れる事とした。FEMにより求められたピーク歪による ϵ_H - N_f 線図を Fig. 11 に示す。これより各試験片とも一本の線にまとまっており、精度の良い計算が行えたものと思われる。

次に、ホットスポット応力を基準とした Neuber の式に対する実験データのばらつきを FEM により求めた。その結果を Fig. 12 に示す。各 K_t ともホットスポット応力が大きくなるにつれ Neuber の式からはずれ推定歪に誤差を生

じやすくなるが、応力が小さくなるにつれ精度がますますという結果となった。

ここで、ホットスポット応力、歪の関係を調べてみる。Fig. 13 の各線図は、 K_t ごとに径方向変位を軸方向歪に変換した実測値のヒステリシス上昇枝曲線であり、それを n 乗硬化特性式の形に近似したものである。これは、言うなれば最小断面における平均的な応力、歪の関係である。同図には、試験荷重を与えたときの FEM 計算によるホット

Fig. 11 ϵ_H vs. N_f curve (FEM)

Fig. 12 $K\sigma \cdot K\epsilon / K_t^2$ vs. σ_n curve

 Fig. 13 Stress-Strain Curve ($K_t=1, 1.14, 1.7, 2.5, 3.4$)

スポット応力、歪の計算点も載せた。この計算に用いた定数 a, n は、前述した通りヒステリシス上昇枝曲線から得られたものである。この点は実測値の各線図と同じ意味をもたせるために、ホットスポット部断面における応力、歪の面積計算を行い平均値を求める事により得たものであり、その値を一次近似的に FEM 計算による平均的な応力、歪として代表させる事とする。

n 乗硬化特性式の定数 a, n は、一種の材料定数であり形状に関わらず常に一定であるべきである。しかし、切欠断面における材料特性は Fig. 13 に示したように試験片形状により異なっている。これは、本来の材料定数とは意味が違い、切欠断面部の幾何形状による影響を含んだ、見かけ上の a, n である。ホットスポット部断面におけるこの見かけ上の a, n が各試験片の応力歪関係を表すものとし、この値を K_t ごとに対応させ用い、再度 Neuber の式を使用してピーク歪を推定し、 $\epsilon-N$ データを整理することを試みる。その結果を Fig. 14 に示す。Fig. 8 と比べるとそのばらつきの割合はさらに小さくなった。つまり、切欠底の応力-歪関係というものは、この見かけ上の a, n が支配しているものと推定される。

これらのことより、ホットスポット部断面の形状が急激に変化し、断面積の減少が著しい Fig. 5(b) の様なタイプでは、FEM によれば良い推定が行えるが、簡易算式により精度良くピーク歪の推定を行うには K_t により変化するホットスポット部断面での見かけ上の a, n を求める必要があると思われる。この見かけ上の定数 a, n の特徴を考察する。今回の試験でホットスポット部断面の a, n が切欠形状

により異なる値をとった理由の一つとして、部材の公称応力を基準とした時のホットスポット部の幾何形状の変化による材料特性の変化とすることが考えられる。Fig. 13 において FEM 計算による平均応力、歪の関係と、実測値のそれとが等しいものと仮定し、FEM 計算結果による整理を試みる。FEM 計算結果による平均応力と歪の関係を Fig. 15 に示す。同図には、データ数を増やす意味で $\rho=3\text{ mm}$ ($K_t=1.27$) についての計算を追加した。これによると K_t が増すにつれ曲線の傾きは大きくなっていくが、ある K_t 以上になると飽和する傾向にありそうである。また、 K_t のレベルにより応力、歪の関係が急激に異なっており、やはりピーク歪の推定過程で応力、歪関係を平滑材の疲労試験から求まる一つの式で近似することには今回のタイプでは若干問題がありそうである。材料定数としての a, n がホットスポット部における応力-歪関係を一律に近似できない場合、見かけ上の a, n を用いてピーク歪を推定するには、適当な方法で Fig. 15 の様な応力-歪関係を見出さねばならない。そしてその結果を利用して K_t がある値以上のものは a, n の値はほぼ等しいとみなしそれ以下の K_t については図式的に a, n の値を求めれば良い。しかピーク歪を推定するにあたりこのような関係を持ち込むには非常に手間がかかり、現状ではあまり推奨できないが、FEM 計算を行えば簡単に良いピーク歪推定が行える。

従って、本報では、 K_t による見かけ上の a, n を考慮する事なく材料定数としての a, n のみを考慮すれば良いという FEM 解析によるピーク歪推定法を第一に推奨する。そして、簡易算式を用いた推定法として、見かけ上の a, n を無

Fig. 14 ϵ_H vs. N_f curve (Modified curve/Neuber)

Fig. 15 Stress-Strain Curve by FEM

視できない特殊な試験片の場合には見かけ上の a, n を使わずとも程良い推定を行える Manson-Coffin の式から、 K_t の値に無関係の材料定数としての a, n を求め Neuber の式を適用してピーク歪を推定するという方法を推奨する。これにより K_t が如何なる値をとろうと、つまり鋭い切欠であろうと滑らかな切欠であろうと疲労設計線図は一本の線にまとまるという結果となる。

次に溶接部の疲労試験結果をまとめる。溶接部については平滑材の疲労試験を行えなかったため、 a, n は前述の各 K_t による見かけ上の値を用いる。Neuber の式を使用してピーク歪を推定し整理したものを Fig. 16 に示す。図中、点線は同手法によって整理した母材の平均線である。両者を比較すると、歪で整理した場合溶接部の疲労強度の方がかなり小さいということがわかる。これは、溶接部はもろい

Fig. 16 Relationship between ϵ_H vs. N_f at welded metal and ϵ_H vs. N_f at Base metal.

という結果である。実際の構造物では、疲労亀裂が生じるような溶接部には適当な処理が施されており、今回の試験のように溶接部に鋭い切欠が存在するような場合は稀である。溶接部のもろさを考えると十分な処理をしなければならないと思う。

5. SR 202 構造モデル実験とそのピーク歪による解析

前報では、SR 202 で行った 3 種の構造モデル(ブラケット、スティフナ、ダブルパッド)の疲労試験結果を基にホットスポット応力による疲労強度評価の検討を行った。本章では、同データを用いてピーク歪による高サイクル域での疲労強度評価の検討を行う。実験結果の詳細については SR 202 総合報告書¹¹⁾に譲ることとし、ここでは簡単にモデルの概要を示し、続いて前章までで述べた手法を用いてピーク歪の推定を行いそれによる疲労強度線図の検討を行う。なお各モデルは前章までと同様、降伏応力 36 kgf/mm² 級の TMCP 鋼を使用している。

(1) ブラケットモデル

ブラケットは角形のプレースの端部とコラムの結合部に用いられる他、船体の桁の端部などでよく使用されている。Fig. 17 にモデルの種類と形状を示したが、直交する I 形の梁の交差部にブラケットを設けている。A は通常の船体に用いられる形である。B は A の亀裂発生点であるブラケットの端部を応力流れをスムーズにしたソフトトウの形状にしている。

(2) スティフナモデル

スティフナは板のたわみを防ぐために用いる他局部的な軸力に対する断面積の補償に用いられる。特に、後者はスティフナの端部で構造が不連続になる。Fig. 18 に示すスティフナのモデルの端部形状は海洋構造物や船体で用いる標

Fig. 17 Bracket Model for Fatigue Tests (SR 202)

 Fig. 21 ϵ_H vs. N_f Curve (NK/Neuber)

 Fig. 22 ϵ_H vs. N_f Curve (Manson/Stowell)

ピーク歪振幅が0.01より小さい範囲においてはNKの簡便式によるものとMansonの式によるものとで応力、歪関係に大差はない事があげられる。高サイクル疲労においては、NKの簡便式は良い近似を与える結果となる。またNeuberの式、Stowellの式においても応力レベルがさがるにつれ精度の良いものとなり、さほど変わらず共により結

果を得る事になる。Fig. 24に各手法による 2σ 下限線図とNKの推奨する基本疲労設計線図を示す。これよりNKの推奨する基本疲労設計線図はかなり安全側な線図であると推定できる。

最後に、切欠付き丸棒の低サイクル疲労試験結果と、SR 202の実験結果とを4章で推奨したManson/Neuber

Fig. 23 ϵ_H vs. N_f Curve (NK/Stowell) Fig. 24 Comparison between ϵ_H - N_f Curve between mean- 2σ and NK's design Curve

によるピーク歪で整理した結果を Fig. 25 に示す。この図における 2σ 下限線図を (6) で表す。

$$\epsilon_H = 0.110 * N_f^{-0.372}$$

(6)

NK の推奨する基本疲労設計線図と比べてやや高強度側ではある。標準偏差はさほど小さくなくまた切欠付き試験片、溶接構造物を統一して同等の評価を与える線図として、こ

の線を持って TMCP 鋼の疲労設計線図とすることを提案する。

6. 結 言

切欠付き丸棒を用いた低サイクル歪制御疲労試験結果と、SR 202 で実施された 3 種の構造モデル疲労試験の結果

Fig. 25 Design Curve of TMCP Steel

を基にピーク歪基準による疲労強度評価法を検討した。

ピーク歪推定手法としては、平滑材のヒステリシスループから得られる実験点の応力歪関係を導入した FEM 計算による評価を推奨する。また簡易算定式によりピーク歪を推定する場合は、本報の様な幾何形状が急激に変化する試験片の場合には n 乗硬化特性式の定数は Manson-Coffin の式から求め、塑性応力と塑性歪を求める近似式としては、Neuber の式を選択する事を提案する。

Manson/Neuber 法による本研究での切欠付丸棒と構造モデルの全データの整理から求まる 2σ 下限線を TMCP 鋼のピーク疲労設計線図として提案する。この線図は NK による設計線図より高強度側である。

本研究の成果の有効性については引続き研究中であり、多くの過去の部材の模型疲労試験結果に対する証明を行う予定である。

また本研究の実施にあたり、東京大学船舶海洋工学科の応用力学研究室の皆様には実験をはじめとして多大な協力をいただいたことを附記し謝意を表します。なお本研究は文部省科研“疲労設計理念の実現”の一部として実施したものである。

参 考 文 献

- 1) ASME: Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. III Rules for Construction of Nuclear Vessels, (1963).

- 2) American Welding Society: Structural Welding Code, (1983).
- 3) American Petroleum Institute: Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms, API RP 2R, (1982).
- 4) United Kingdom Department of Energy: Offshore Installations Guidance on Design and Constructions, (1981).
- 5) 八木順吉, 町田進, 富田康光, 的場正明, 川寄哲朗: ホットスポット応力基準による平板構造の疲労強度評価 (第一報), 日本造船学会論文集 189 号 (1991).
- 6) 飯田国広, 浅野浩三, 頭福正継, 石川邦照: 海洋構造物鋼管継手疲労設計法の一試案, 日本造船学会論文集 148 号 (1980).
- 7) 安藤良夫: 低サイクル疲労き裂の伝播と歪の繰り返し挙動一切欠平板試験片と小型丸棒試験片の相関について, 日本造船学会論文集 128 号 (1970).
- 8) 西田正孝: 応力集中, 森北出版 (1967), 648/653.
- 9) 飯田国広: 80 キロハイテンの歪制御低サイクル疲労における切欠効果, 造船協会論文集 119 号 (1966).
- 10) 飯田国広, 高 充宝: 軟鋼および高張力鋼の切欠疲労強度に関する一考察: 日本造船学会論文集 141 号 (1977).
- 11) 造船研究協会第 202 研究部会: 海洋構造物の疲労設計法および溶接部の品質に関する研究, (平成 3 年度発行予定).