

疲労亀裂進展解析による疲労設計曲線の検討

FATIGUE CRACK PROPAGATION ANALYSIS ON FATIGUE DESIGN CURVES

三木千壽^{*}・坂野昌弘^{**}

By Chitoshi MIKI and Masahiro SAKANO

Fatigue crack propagation analysis of 6 types of welded joints under constant amplitude and variable amplitude stresses was performed applying the fracture mechanics concept in order to set the variable amplitude cut-off limit of fatigue design curves. The variable amplitude cut-off limit could be obtained as the stress range at which the Miner's summation calculated from the high stress side of the stress range histogram reached one, and the number of stress cycles where the cut-off limit was defined varied with the type of welded joints.

1. はじめに

現在、各国の鋼橋や繰返し荷重を受ける鋼構造物に適用される疲労設計基準^{1)~4)}では、変動応力下の疲労寿命評価法として線形累積被害則を適用する方法が推奨されている。実際に構造部材に生じる変動応力はその大部分が疲労限よりも小さい応力成分で占められる場合が多く、その場合にはマイナー和を求める際に基準とする疲労設計曲線の長寿命域における形状が寿命評価結果に大きく影響することから、BS5400⁵⁾やECCS疲労設計指針⁶⁾では、より正確に疲労寿命を評価する場合には長寿命域において傾きを変化させた疲労設計曲線を用いる方法を勧めている。1985年に作成されたECCS指針では、最近の研究成果を取り入れて一定振幅応力下の疲労限の他に新たに変動応力に対する打ち切り限界を設定している。しかし、それらの限界値は全ての継手分類について一律にそれぞれ応力繰返し数が500万回および1億回で設定されており、同指針中にも記述されているように継手の種類によっては設計曲線が疲労試験結果に適合しない場合もあって必ずしも合理的なものとはなっていない。このような疲労限や打ち切り限界を規定する応力繰返し数は、各種の継手の長寿命域でのS-N関係を十分に反映して設定する必要がある。

従来、溶接継手の変動荷重疲労試験はいくつか行われているが、1000万回以上の長寿命域の疲労試験結果は非常に少ない^{5),6)}。数多くの種類の継手について応力繰返し数が1億回以上にも及ぶ長寿命疲労試験を実施するには多大の時間、設備、労力を必要とするため、疲労試験結果から疲労設計曲線を設定することは

* 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

** 工博 群馬大学助手 工学部建設工学科 (〒376 群馬県桐生市天神町1-5-1)

実際には不可能と考えられる。

本研究では、疲労試験に代わって破壊力学の手法を用いた疲労亀裂進展解析を行うことにより、疲労設計曲線の一定振幅応力に対する疲労限と変動応力に対する打ち切り限界の設定を試みた。亀裂進展解析は代表的な数種類の溶接継手に対して実施した。変動応力の頻度分布は対数目盛りで表わした累積頻度曲線の形状が、直線、上向きに凸および凹の3種類とし、変動応力下の亀裂進展寿命計算方法は著者らが疲労亀裂進展試験⁷⁾および溶接継手の疲労試験⁶⁾により妥当性を確認済みのものを用いた。

2. 疲労亀裂進展解析方法

(1) 変動応力頻度分布

変動応力下のより正確な疲労寿命評価は、個々の部材に生じる応力範囲の頻度分布に対してマイナー則を適用することにより行われる^{3),4)}。対象とする構造物あるいは構造部材が異なれば、当然、その応力範囲頻度分布形状は異なったものとなる。本研究では、2パラメータWeibull分布から導かれる、応力範囲累積頻度曲線の形状が対数紙上で、直線、上に凸および凹となる3種類の分布形状に対して疲労寿命解析を実施した。それらの分布は式(1)で表わされる⁵⁾。

$$P(Sr/Srmax)=\exp\{-(Sr/Srmax)^k\cdot\ln N_0\} \tag{1}$$

ここに、 $P(Sr/Srmax)$ は応力範囲 Sr の超過累積確率、 k はWeibullパラメータ、 N_0 は最大応力範囲 $Srmax$ が1回だけ発生するような応力繰返しのブロック長さである。図-1に示すように、 k の値を1, 2, 1/2ととることにより、直線、上向きに凸および凹の頻度分布とした。 $k=1$ の場合は指数分布、 $k=2$ の場合はRayleigh分布となる。

橋梁では、道路橋の主桁フランジで直線状、対傾構取付部の垂直補剛材などで上に凹状の応力範囲頻度分布が実測されている⁶⁾。海洋構造物の場合には、海表面近くの部材に対して上に凸、海面下の部材に対しては直線状のものが疲労試験での標準的な荷重頻度分布曲線として提案されており、船舶の場合には直線状のものがしばしば用いられている⁷⁾。

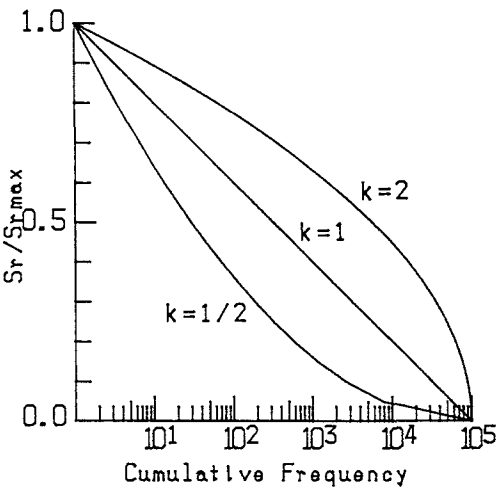


図-1 変動応力範囲累積頻度分布

(2) 解析対象および解析方法

疲労亀裂進展解析の対象として図-2に示すような代表的な溶接継手を選定した。それらは、横方向突合せ継手(BT)、面内ガセット継手(FG)、荷重非伝達型十字(リブ十字)継手(RB)、および面外ガセット継手(WG)である。これらのうち、BT継手は余盛を削除したもの、RB継手とWG継手は溶接ままで仕上げなしのものである。FG継手については、フィレットをつけたガセットを開先溶接しフィレット部を仕上げたものを2種類($R=40\text{mm}$, 20mm 、すなわち $R/D=1/5$, $1/10$)、およびフィレットなしのガセットを開先溶接したままで仕上げなしのもの($R=0\text{mm}$)1種類を含む。したがって、継手は全部で6種類となる。なお、各継手とも、板厚は25mm、板幅は200mmで同一とした。

各継手の溶接部表面に生じた半楕円形状の亀裂に対する応力拡大係数範囲は、式(2)で表わされる。

$$\Delta K=Fe\cdot Fs\cdot Ft\cdot Fg\cdot Sr\sqrt{\pi a} \tag{2}$$

ここに、 Sr は最小断面での公称応力範囲、 a は亀裂深さ、 Fe 、 Fs 、 Ft 、 Fg は、それぞれ、亀裂形状、表面亀

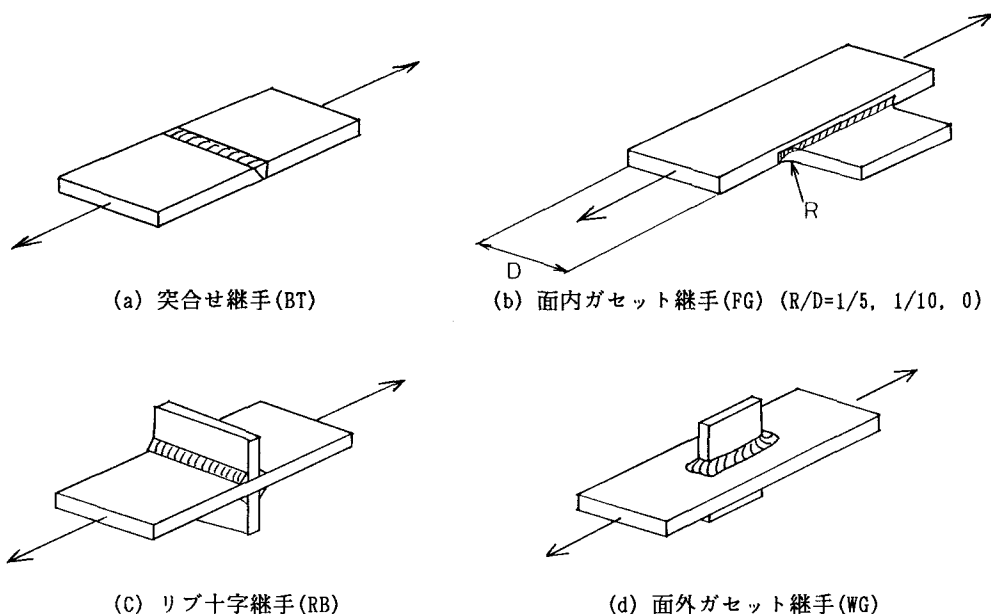


図-2 解析対象継手

裂、有限板幅あるいは板厚、および継手形状による応力集中に対する補正係数である。これらの補正係数の内、 F_e 、 F_s 、 F_t は式(3)～式(5)で表わされる^{3)~4)}。

$$F_e = 1 / \sqrt{1 + 1.464(a/b)^{1.65}} \quad (3)$$

$$F_s = 1.12 - 0.12(a/b) \quad (4)$$

$$F_t = (1 - 0.025\lambda^2 + 0.06\lambda^4) \sqrt{\sec(\pi\lambda/2)} \quad (5)$$

ここに、 b は亀裂表面長さ、 λ は、FG継手では a/D (D は板幅)、それ以外のBT、RB、WG継手では a/T (T は板厚)である。亀裂形状比 a/b は、RB、WG、FG継手に対してはリブ十字継手¹²⁾およびガセット継手¹³⁾の疲労破面で測定された a/b の分布を参考にし、安全側をとって $a/b=1/5$ と仮定した。BT継手に対しては、表面の応力集中がないために $a/b=1$ と仮定した。

F_g については、BT継手では応力集中が生じないため1とし、フィレットをもつFG継手に対してZettlemoyerとFisher¹⁴⁾によって示された式(6)を用いた。

$$F_g = \frac{-1.115 \log(R/W_f) + 0.537 \log(L/W_f) + 0.1384 \log(W_g/W_f) + 0.6801}{1 + 1/1.158 \cdot (a/W_f)^{0.6051}} \quad (6)$$

ここに、 R はフィレット部の曲率半径、 L はガセット板の長さ+ $2R$ 、 W_f はフランジ(主板)の幅、 W_g はガセット板の幅である。また、フィレットなしのFG継手、RB継手およびWG継手の F_g は、亀裂が無い場合の応力分布をFEM解析で求め、それを亀裂面に作用させたときの応力拡大係数の解から求めた。それらの3種類の継手の F_g を図-3に示す。なお、FEM解析では亀裂が発生する溶接止端の開き角を 120° 、曲率半径を 0.5mm と仮定した。

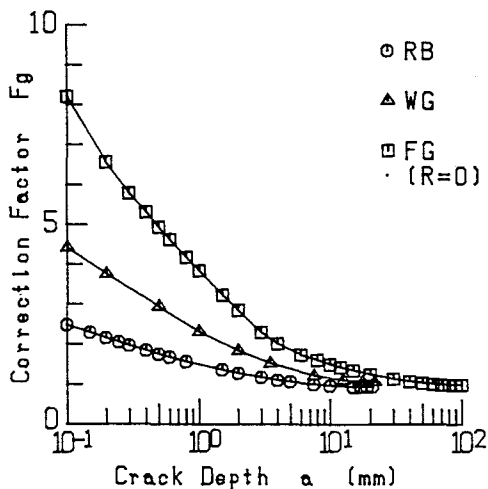


図-3 応力集中に対する補正係数 F_g

疲労亀裂進展速度 da/dN と ΔK の関係は、溶接部に対して最も安全側に設定された式(7)¹⁵⁾を用いた。

$$da/dN = \begin{cases} 2.7 \times 10^{-11} \cdot \Delta K^{2.75} & (\Delta K > \Delta K_{th}) \\ 0 & (\Delta K \leq \Delta K_{th}) \end{cases} \quad (7)$$

ここに、 $\Delta K_{th} = 2.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ 、 da/dN の単位は m/cycle である。変動応力に対しては、各応力範囲成分から計算した ΔK が ΔK_{th} を越える場合にのみ亀裂が進展すると仮定して式(7)を適用した。この仮定の妥当性は、著者らが実施した亀裂進展試験⁷⁾およびすみ肉溶接継手の疲労試験⁶⁾により確認されている。なお、変動応力下の疲労寿命は、応力頻度分布の高低両側から計算したものの平均値として求めた。

寿命計算を行う際の初期亀裂深さは、著者らが疲労破面の亀裂発生位置で観察したファセット状破面の深さ^{13), 16)}を参考に、安全側として 0.1 mm を仮定した。また、限界亀裂深さは、BT, RB, WG継手では板厚の80%、FG継手では板幅の80%に仮定した。

3. 解析結果および考察

(1) 各継手の疲労寿命曲線

図-4に一定振幅応力下で求めた各継手の疲労寿命曲線を示す。BT継手は約100万回で 180 MPa 、 $R=40 \text{ mm}$ と $R=20 \text{ mm}$ のフィレット付のFG継手は150万回でそれぞれ 70 MPa と 60 MPa 、RB継手は約500万回で 40 MPa 、WG継手は約800万回で 25 MPa 、フィレットなしのFG継手は約3000万回で 15 MPa と、継手の種類によって異なる応力繰返し数で疲労限を生じており、疲労限が小さいほど疲労限を生じる応力繰返し数は大きくなっている。

図-5には、各継手ごとに3種類の変動応力頻度分布に対して求めた疲労寿命曲線を示す。縦軸の S_{req} は2.75乗平均値として

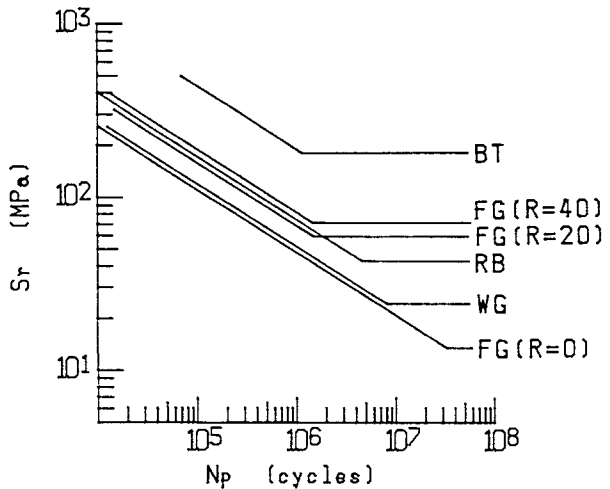
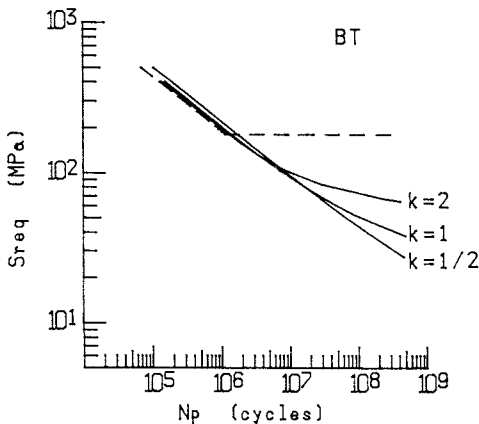
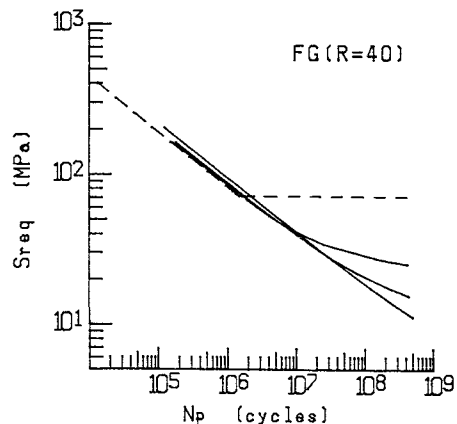


図-4 一定振幅応力下の疲労寿命曲線

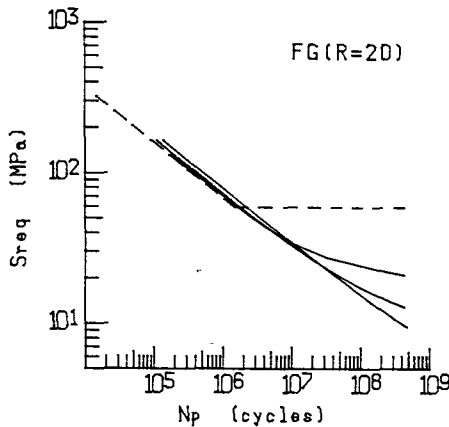


(a) 突合せ継手(BT)

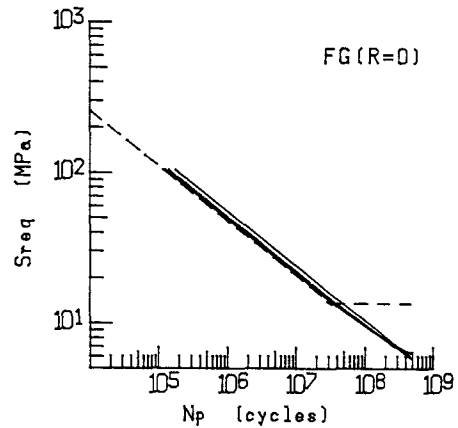


(b) 面内ガセット継手(FG, R=40)

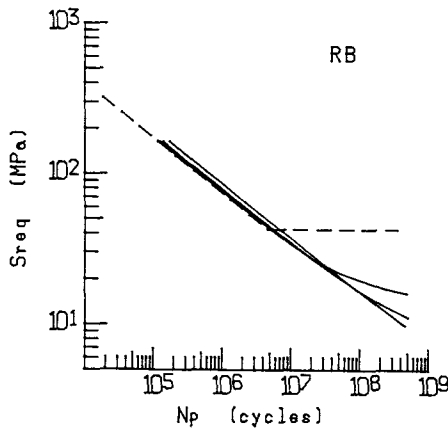
図-5 変動応力下の疲労寿命曲線



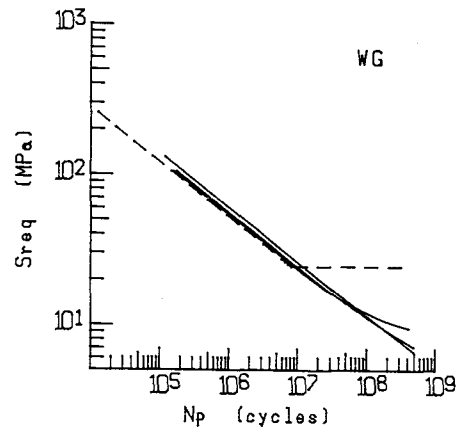
(c) 面内ガセット継手 (FG, R=20)



(d) 面内ガセット継手 (FG, R=0)



(e) リブ十字継手 (RB)



(f) 面外ガセット継手 (WG)

図-5 変動応力下の疲労寿命曲線 (続き)

計算した等価応力範囲である (S_{req}/S_{rmax} は、 $k=2, 1, 1/2$ について、それぞれ、0.135, 0.297, 0.052)。べき指数の2.75は、図-4に示した一定振幅応力下の疲労寿命曲線の傾きの逆数、すなわち式(7)の $da/dN \sim \Delta K$ 関係のべき指数と同じものである。図-5中の破線は一定振幅応力下の疲労限を示している。変動応力下の疲労寿命曲線は一定振幅応力下の疲労限以下の低応力域においても低下し続けるが、長寿命域での曲線形状は応力範囲頻度分布により大きく異なっており、小さい応力範囲成分の割合が多いほど (すなわち、 $k=2 \rightarrow 1 \rightarrow 1/2$ の順に) 寿命曲線は直線に近くなる。このように長寿命域における疲労寿命曲線の形状が変動応力の種類によって変化することが、疲労設計曲線を設定する上で一つの問題点となる。

(2) 変動応力に対する打ち切り限界の設定

著者らは、道路橋で生じるような変動応力範囲の頻度分布に対して高応力側から計算したマイナー和が1に達したときの応力範囲を変動応力に対する打ち切り限界として設定する方法を提案した⁴⁷⁾ (図-6参照)。ここでは、その方法を用いて変動応力に対する打ち切り限界を設定する。図-7に、各継手ごとに、3種類の変動応力頻度分布に対して一定振幅応力下の疲労限以下の適当な S_{req} で計算した打ち切り限界を示す。微小な応力範囲成分の多い変動応力 ($k=1/2$) に対する打ち切り限界が小さい傾向がみられるが、 S_{req} に依らずほ

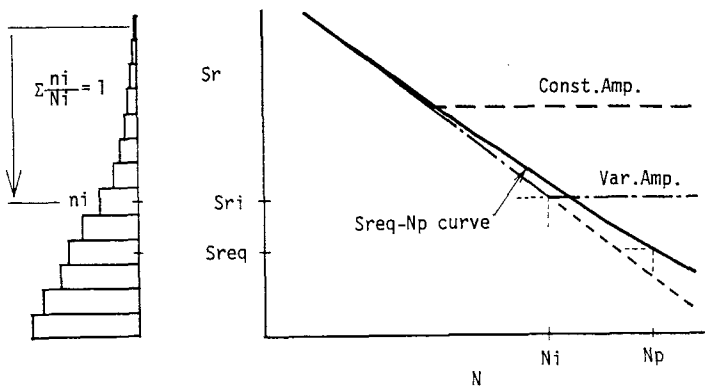
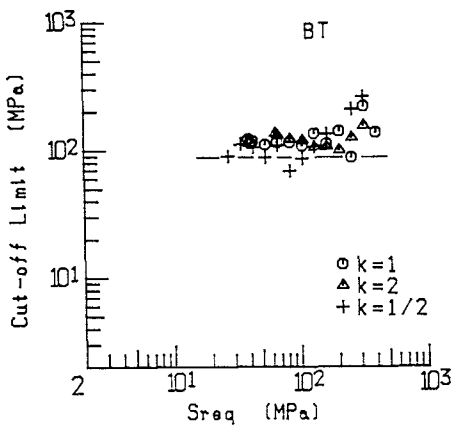
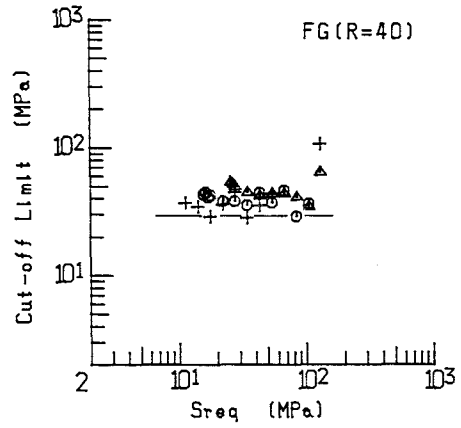


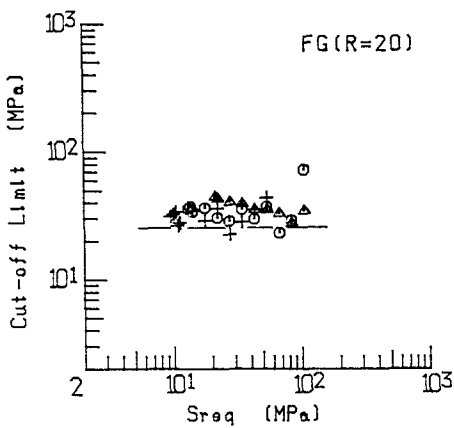
図-6 変動応力に対する打ち切り限界の設定法



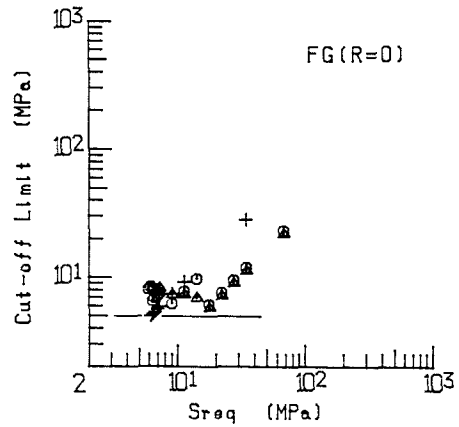
(a) 突合せ継手(BT)



(b) 面内ガセット継手(FG, R=40)

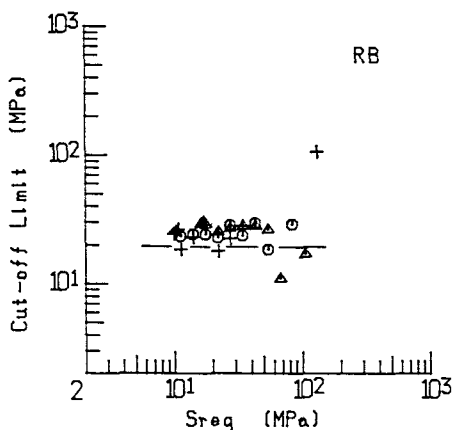


(c) 面内ガセット継手(FG, R=20)

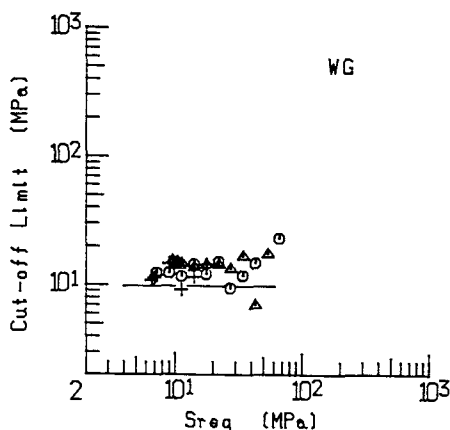


(d) 面内ガセット継手(FG, R=0)

図-7 変動応力に対する打ち切り限界



(e) リブ十字継手 (RB)



(f) 面外ガセット継手 (WG)

図-7 変動応力に対する打ち切り限界 (続き)

ば一定の範囲に収まっている。継手ごとの打ち切り限界は、図-7 中の実線で示すように、BT, FG(R=40), FG(R=20), RB, WG, FG(R=0)の各継手に対して、それぞれ、90MPa, 30MPa, 25MPa, 20MPa, 10MPa, 5MPaに設定した。

このようにして求めた各継手の変動応力に対する打ち切り限界を一定振幅応力下の疲労限とともに図-8に示す。変動応力に対する打ち切り限界は一定振幅応力下の疲労限と同様に継手の種類によって異なる応力繰返し数で生じており、打ち切り限界が小さいほど折れ曲がり位置は長寿命側となっている。

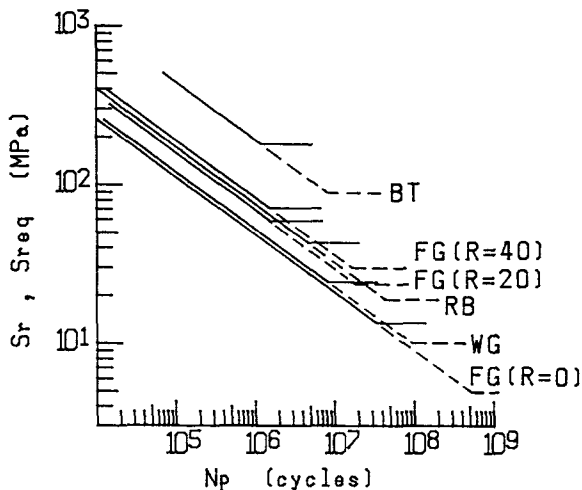


図-8 打ち切り限界を設定した疲労設計曲線

4. おわりに

代表的な数種類の溶接継手を対象とし、一定

振幅応力および対数目盛りで表わした応力範囲累積頻度曲線の形状が直線、上向きに凸および凹の3種類の変動応力に対して破壊力学の手法を用いた疲労亀裂進展解析を行い、疲労設計曲線の一定振幅応力下の疲労限と変動応力に対する打ち切り限界が生じる位置について検討した。得られた主な結果は以下の通りである。

(1) 一定振幅応力下では継手の種類によって異なる応力繰返し数で疲労限を生じており、疲労限が小さいほど疲労限を生じる応力繰返し数は大きくなっている。変動応力下の疲労寿命曲線は一定振幅応力下の疲労限以下の低応力域においても低下し続けるが、長寿命域での曲線形状は応力範囲頻度分布により大きく異なっており、小さい応力範囲成分の割合が多いほど寿命曲線は直線に近くなる。

(2) 高応力側から計算したマイナー和が1に達したときの応力範囲として設定した変動応力に対する打ち切り限界は、一定振幅応力下の疲労限と同様に継手の種類によって異なる応力繰返し数で生じている。より合理的な疲労設計曲線を設定するためには、継手の種類によって一定振幅応力下の疲労限および変動応力に対する打ち切り限界が生じる位置が異なることを反映させる必要がある。

謝辞：本研究を行うにあたり多大なご協力をいただいた東京工業大学森猛助手および群馬大学大学院生吉沢努君に感謝いたします。なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金（一般研究(C)、課題番号：01550362、代表：三木千壽）によるものである。また、応力解析には群馬大学計算センターを利用した。

参考文献

- 1) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説（鋼鉄道橋編），1983.
- 2) American Association of State Highway and Transportation Officials：Standard Specifications for Highway Bridges, 1977.
- 3) British Standards Institution：BS5400, Steel, Concrete and Composite Bridges, Part 10. Code of Practice for Fatigue, 1980.
- 4) European Convention for Constructional Steelwork -Technical Committee 6- Fatigue：Recommendations for the Fatigue Design of Steel Structures, 1985.
- 5) Fisher, J.W., Mertz, D.R. and Zhong, A.：Steel Bridge Members under Variable Amplitude Long Life Fatigue Loading, National Cooperative Highway Research Program Report 267, 1983.
- 6) Miki, C., Murakoshi, J., Toyoda, Y. and Sakano, M.：Long Life Fatigue Behavior of Fillet Welded Joints under Computer Simulated Highway and Railroad Loading, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol. 6, No. 1, pp. 41s-48s, 1989.
- 7) Miki, C., Murakoshi, J. and Sakano, M.：Fatigue Crack Growth in Highway Bridges, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol. 4, No. 2, pp. 371s-380s, 1987.
- 8) 岩崎紀夫・加藤昭彦・川原正言：ランダム荷重下での疲労き裂伝播に及ぼす荷重頻度分布形状の影響，日本造船学会論文集，第156号，pp. 523-532, 1985.
- 9) Newman, J.C. Jr.：A Review and Assessment of the Stress-Intensity Factors for Surface Cracks, ASTM STP687, pp. 16-42, 1979.
- 10) Paris, P.C. and Sih, G.C.：Stress Analysis of Cracks, ASTM STP381, pp. 30-83, 1965.
- 11) 石田誠：亀裂の弾性解析と応力拡大係数，培風館，1976.
- 12) 山田健太郎・左高茂樹：リブ十字隅肉溶接継手の塩水中での疲れ試験と寿命解析，土木学会論文集，第398号／I-10, pp. 377-384, 1988.
- 13) Sakano, M., Arai, H. and Nishimura, T.：Long Life Fatigue Behavior of Fillet Welded Joint in Corrosive Environment, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol. 6, No. 2, pp. 365s-373s, 1989.
- 14) Zettlemoyer, N. and Fisher, J.W.：Stress Gradient Correction Factor for Stress Intensity at Welded Gusset Plates, Welding Journal 57, pp. 57s-62s, 1978.
- 15) 日本鋼構造協会疲労設計指針改定小委員会：日本鋼構造協会疲労設計指針（案），1989.
- 16) 三木千壽・坂野昌弘・豊田幸宏：隅肉溶接止端からの疲労亀裂の発生と初期進展挙動，構造工学論文集，Vol. 35A, pp. 321-328, 1989.
- 17) Miki, C., Sakano, M. and Murakoshi, J.：A Parametric Study on Fatigue Design Curves of Steel Highway Bridges, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol. 5, No. 2, pp. 235s-243s, 1988.
- 18) 建設省土木研究所：既設橋梁の耐久性評価・向上技術に関する調査研究，土木研究所資料第2420号，1986.
(1989年10月2日受付)