局部ひずみの測定精度と溶接構造物の疲労強度評価*

大 野 啓 充^{*1}

Accuracy of Measured Local Strain and Local Strain Approach to Fatigue Life Prediction of Welded Structures

Hiromitsu OHNO

The local strain approach is a very useful method to evaluate fatigue strength of complicated welded structures. In the local strain approach, the accuracy of measured local strain is very critical. The effects of the radius of toe grinding and the strain gage length on the accuracy of measured local strain and $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\epsilon)-N_c$ curves were examined in this study. An accuracy of 90 % could be obtained for the measured local strain when the length of the strain gage was less than half the toe radius. For the measured local strain, a $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\epsilon)-N_c$ curve for welded structures agreed with that of the small round specimen. However, toe grinding caused a decrease in the local strain, and as a result, $\Delta\sigma$ decreased with a decrease in strain concentration factor. The $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\epsilon)-N_c$ curves modified with toe grinding radius were proposed, and the results agreed with the test data for welded structures.

Key Words: Fatigue strength, Local strain approach Welded structures, Accuracy of Measured Local Strain, Toe grinding, $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\epsilon)-N_c$ curves

1. 緒 言

車両、運搬機、建設機械などの溶接構造物は構造が複雑となりやすく、その結果応力分布が複雑な場合が多い。著者らはこのような溶接構造物の溶接ビード止端部からの疲労破壊を合理的に評価する方法として、ビード止端部の局所ひずみに着目した疲労強度評価法を提案した⁽¹⁾。すなわち、疲労き裂が発生するビード止端部の局所ひずみで評価すれば、溶接構造物の形状に依存せず、1本の $\Delta\epsilon$ (あるいは $\Delta\sigma=E \cdot \Delta\epsilon)-N_c$ 線図でき裂発生寿命を予測できる。前報⁽²⁾では三点曲げを受ける箱形はりブラケット構造物と、引張りを受ける円筒のフランジ構造物を取り上げ、本手法が有効であることを確認した。また、本評価法は、止端部の局所ひずみを0.3 mm長のひずみゲージを用いて直接測定して評価に用いているため、溶接構造物の開発過程で実施される応力測定に適用すると、寿命予測が合理的に行え、確認試験法としても有効である。

一方、このように実測局所ひずみで疲労強度評価を行う場合には、局所ひずみの測定精度が評価精度に大

きく影響することになる。また、0.3 mm長ひずみゲージを用いる方法は技術的にむずかしくばらつきを生じやすいとの指摘もある。そこで、本研究ではゲージてん付のためのビード止端部グラインダ仕上げ(以下G仕上げと呼ぶ)の曲率半径Rおよび用いるひずみゲージ長が局所ひずみの測定精度に及ぼす影響を調べるとともに疲労強度との関係を検討し、G仕上げの結果生じる局所ひずみの低下を考慮した局所ひずみ疲労強度評価法を提案した。

2. 試験片および試験方法

供試材料としては、一般構造用圧延鋼材SS 41(板厚10 mmおよび25 mm)とこれに類似な機械構造用炭素鋼SS 22 C(焼鈍材)を用いた。表1に供試材の化学成分と機械的性質(SS 22 Cは未測定)を示す。

試験片としては図1に示す4種類を使用した。丸棒平滑試験片は基本疲労データ $\Delta\epsilon-N_c$ 線図を求めるために用い、板厚25 mmのSS 41材より削り出した、リブ十字溶接継手は溶接構造物のビード止端の例として用いたものであり、板厚10 mmのSS 41材を使用してCO₂半自動溶接(ワイヤ YGW 11, $\phi 1.2$)で溶接した。リブ十字継手スライス材はビード止端の曲率半径Rの比較的大きな場合の例として用いたものであり、

* 昭和62年8月21日 第65期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和62年2月23日。

*¹ 正員、(株)日立製作所機械研究所(〒300 土浦市神立町502)。

板厚 25 mm の SS 41 材を使用した。溶接法はリブ十字溶接継手の場合と同じである。なお、疲労き裂発生部を 1 箇所にするため止端の 3 箇所については機械加工を行った。段付軸試験片は溶接ビード止端部の拡大モデルとして使用したものであり、リブ十字溶接継手のビード止端部をほぼ 4 倍に拡大したモデル試験片である。ただ、止端曲率半径に相当する R を図 1 に示すごとく、2~40 mm と 5 種類に変化させた。たとえば、リブ十字溶接継手で G 仕上げの曲率半径 R が 1 mm のものは、 $R=4$ mm の段付軸試験片が相当することになる。本試験片は S 22 C 材を用いて製作し、局部ひずみの測定精度および疲労強度の検討に用いた。

図 1 試験片形状

図 2 は 2 種類の供試溶接継手のビード止端部の形状について、試験片端面を投影器で拡大してスケッチした例である。図 2 に示すごとく、止端部形状は不規則であるが、止端曲率半径 R を求めると、リブ十字溶接継手では約 0.5 mm、リブ十字溶接継手スライス材では約 1.5 mm となっている。

局部ひずみの測定はひずみゲージを用いて行った。丸棒平滑試験片ではゲージ長 2 mm のひずみゲージを使用した。リブ十字溶接継手では、曲率半径 1 および 3 mm となるよう G 仕上げを行って測定した。1 mm の G 仕上げには半径 1 mm のカッタを用い、3 mm の G 仕上げには半径 3 mm の砥石を用いて、径になじむよう仕上げた。これらに対するひずみゲージは R 1 G 仕上げには 0.3 mm、R 3 G 以上に対しては 1 mm のひずみゲージを使用した。リブ十字溶接継手スライス材では、図 2 に示したごとく、止端曲率半径が比較的大きいため、グラインディング以上は行わず、サンドペーパー仕上げのみを行って 0.3 mm 長のひずみゲージを直接に付した。段付軸試験片ではゲージ長と測定精度の関係を調べる目的で、0.3~20 mm 長のひずみゲージを曲率半径に応じて使用した。

疲労試験は小形試験片では ±98 kN の電気-油圧疲

表 1 供試材料の化学成分および機械的性質

	Chemical compositions (%)						Mechanical properties	
	C	Si	Mn	P	S		Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
SS41(25t)	0.14	0.23	0.69	0.016	0.006		330	490
SS41(10t)	0.16	0.06	0.54	0.020	0.026		294	453
S22C	0.21	0.23	0.43	0.020	0.018		—	—

図 2 供試溶接継手のビード止端部形状

劣試験機を用い、段付軸試験片は±2940 kNの電気-油圧式疲労試験機を用いて荷重制御で行った。応力比は丸棒平滑試験片および段付軸試験片が完全両振り ($R=-1$) であり、両溶接継手は完全片振引張り ($R=0$) である。

疲労き裂の検出はルーペなどを用いて目視で行い、表面き裂長さが3~5 mmとなった繰返し数あるいは深さ方向への進展が認められた繰返し数をもってき裂発生までの繰返し数 N_e とした。ただし、丸棒平滑試験片についてはき裂発生寿命を求めず、破断までの繰返し数 N_f を求めた。

3. 局部ひずみの測定精度の検討

図3に段付軸試験片での局部ひずみの測定結果を示す。縦軸には応力集中部の局部ひずみ ϵ と公称ひずみ e の比 ϵ/e すなわちひずみ集中係数 K_ϵ 。またはリブ十字継手について有限要素法によって求めた理論応力集中係数 K_σ をとって示してある。図3をみると、各曲率半径 R においても、ゲージ長が短いほど高いひずみ集中係数 K_ϵ を示している。すなわち曲率半径 R の半分以下のゲージ長を用いた場合は、 K_ϵ は理論応力集中係数 K_σ のほぼ90%以上の値を示している。しかし、ゲージ長が長くなると精度は低下し、曲率半径 R と等しいゲージ長を用いた場合は解析値に対して75~80%の値と精度が低下している。

一方、図4はリブ十字溶接継手についての局部ひずみの測定結果を併記したものである。図4をみると段付軸試験片に比較してばらつきが大きくなっている。しかし、全体的にはリブ十字溶接継手においても、90%程度の測定精度を確保できるとみることができる。また、G仕上げを行っていないリブ十字溶接継手スライス材での K_ϵ の測定値は平均的には2.5となり、 K_ϵ の解析値にほぼ一致した。したがって、これらの結果を総合

図3 段付軸試験片の局部ひずみの測定結果

すると、対象とするG仕上げ曲率半径 R の半分以下のゲージ長のひずみゲージを用いれば、その R における局部ひずみを約90%の精度で測定できると考えられる。

4. 局部ひずみの測定精度と疲労強度の検討

図5は前報で報告した溶接構造物の疲労強度の局部ひずみによる整理結果であり、縦軸は局部ひずみ範囲 $\Delta\epsilon$ に縦弾性係数 E を乗じて応力の次元を与え、局部応力範囲 $\Delta\sigma$ として整理したものである。図5に示されるごとく、各種溶接構造物について、あるばらつき範囲をもった1本の $\Delta\sigma-N_e$ 線図で表され、局部ひずみ評価法の有効性を示している。

図6は本研究で取り上げた丸棒平滑試験片および段付軸試験片の疲労試験結果を同様な整理法によって先に行った溶接構造物の結果と比較して示したものである。まず、丸棒平滑試験片について着目すると、溶接構造物に比較して高い疲労強度を示している。丸棒平滑試験片ではひずみ測定誤差は小さいはずであるから、溶接構造物の $\Delta\sigma-N_e$ 線図が低くなる原因は、溶接構造物では局部ひずみ測定のためのG仕上げによって局部ひずみを実際より低めに測定したためと考えられ

図4 リブ十字溶接継手の局部ひずみ測定結果

図5 溶接構造物の $\Delta\sigma (=E \cdot \Delta\epsilon) - N_e$ 線図⁽²⁾

る。そこで、局部ひずみの測定精度が90%以上確保できる段付軸試験片の疲労試験結果に着目すると、図6中に示されるように、段付軸試験片の $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\varepsilon) - N_c$ 線図はばらつきはあるが、丸棒平滑試験片の $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\varepsilon) - N_c$ 線図のばらつき範囲とほぼ一致した高い疲労強度を示している。したがって、溶接構造物でも局部ひずみを正確に測定すれば、丸棒平滑試験片で求めた $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\varepsilon) - N_c$ 線図と一致してこれによって溶接構造物の疲労強度評価が理論的には可能といえる。

図7は溶接継手についての同様な疲労試験結果を示したものである。まず、ビード止端の曲率半径 R が約1.5 mmと比較的大きく、G仕上げなしで局部ひずみを測定したリブ十字溶接継手スライス材の結果をみると、段付軸試験片と同様に丸棒平滑試験片の $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\varepsilon) - N_c$ 線図のばらつき範囲とほぼ一致しており、溶接ビード止端部においても局部ひずみを正確に測定できれば、丸棒平滑材の $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\varepsilon) - N_c$ 線図と一致することが確認された。

止端G仕上げを行って局部ひずみを測定したリブ十字溶接継手の疲労試験結果についてみると、R1G仕上げで局部ひずみを測定した結果は、一部丸棒平滑試験片の $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\varepsilon) - N_c$ 線図のばらつきの下限にはいるものもあるが、多くは若干低い疲労強度を示している。しかし、溶接構造物の $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\varepsilon) - N_c$ 線図と比較すると高い疲労強度となっている。一方、R3G仕上げで局部ひずみを測定した疲労試験結果は、R1G仕上げの場合よりさらに低い疲労強度を示し、ほぼ溶接構造物での $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\varepsilon) - N_c$ 線図と一致している。溶接構造物では直径4 mmの砥石で止端G仕上げを行っており、結果的に同程度の止端G仕上げになったため同程度の疲労強度を示していると考えられ、溶接構造物の $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\varepsilon) - N_c$ 線図が丸棒平滑材などのそれより低くなるのはG仕上げの影響といえよう。リブ

十字溶接継手の溶接のままの止端曲率半径には図2に示したごとく約0.5 mmである。この場合の応力集中係数 K_t は約2.7である。また、R1、R3にG仕上げした場合の応力集中係数はそれぞれ約2.2、1.6である。他方、溶接構造物の溶接ビード止端部では $K_t \approx K_f$ として取扱える⁽³⁾。そこで、溶接のままの K_t とG仕上げした場合の K_t の比でG仕上げを行った疲労試験結果を補正すると丸棒平滑材などで求めた $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\varepsilon) - N_c$ 線図にほぼ一致する。また、溶接構造物の結果についても、R3G仕上げの応力集中係数の関係が使用できるとすると、リブ十字溶接継手同様に丸棒平滑材の結果とほぼ一致し、真の局部ひずみを求めれば小形丸棒平滑材での $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\varepsilon) - N_c$ 線図によってき裂発生寿命 N_c の評価ができることが確認された。

しかしながら、実際の溶接構造物において、ビード止端部の真の局部ひずみを測定することは困難である。そこで、実測局部ひずみを基にして疲労強度評価を行う場合、局部ひずみの測定法つまり止端G仕上げの曲率半径 R に応じて評価線図である $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\varepsilon) - N_c$ 線図を補正するのが合理的と考えられる。図8は丸棒平滑材で求めた $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\varepsilon) - N_c$ 線図を基準として、板厚10 mm程度の比較的薄板溶接構造物を対象に、ビード止端部の曲率半径をR1およびR3にG仕上げして局部ひずみを測定する場合の評価線図を求めてみた結果である。また、本研究で実施した局部ひずみ測定データのばらつきが正規分布するとして取扱った場合の局部ひずみ測定の信頼度を考慮した $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\varepsilon) - N_c$ 線図も合わせて示した。図8をみると、標準偏差を11%として求めたR1G仕上げに対する $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\varepsilon) - N_c$ 線図は、信頼度50%ではR1G仕上げリブ十字溶接継手の平均的疲労強度を、信頼度95%ではほぼ下限の $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\varepsilon) - N_c$ 線図を示している。また、標準偏差を8%としたR3G仕上げに対する補正 $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\varepsilon) - N_c$ 線図も同様な結果を示している。さらに、標準偏差を11%としてR3G仕上げに対

図6 丸棒平滑試験片および段付軸試験片の $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\varepsilon) - N_c$

図7 溶接継手の $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\varepsilon) - N_c$ 線図

図 8 グラインダ仕上げの曲率半径を考慮した $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\epsilon) - N_c$ 線図

して求めた信頼度の 95 % の $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\epsilon) - N_c$ 線図は図 5 などにした溶接構造物の疲労試験結果のばらつきの下限をほぼ示している。したがって、適当な止端 G 仕上げ曲率半径 R を選定して、その半分以下のゲージ長のひずみゲージを用いるとともに、局部ひずみ測定のため標準偏差が 11 % 程度と考えると、 $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\epsilon) - N_c$ 線図を補正して評価すれば、溶接構造物のき裂発生寿命に対して、合理的な疲労強度評価が行えらる。

5. 結 言

複雑な溶接構造物のビード止端からの疲労破壊の評価に有効な局部ひずみ疲労強度評価法に関連して、局部ひずみ測定のためのビード止端グラインダ仕上げや

用いるひずみゲージ長が局部ひずみの測定精度に及ぼす影響を調べるとともに、疲労強度特性との関係を検討した。得られた結果を以下に示す。

(1) 測定対象グラインダ仕上げの曲率半径の半分以下のゲージ長のひずみゲージを用いれば、約 90 % 以上の精度で局部ひずみの測定ができる。

(2) グラインダ仕上げなしで局部ひずみを正確に求めれば、 $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\epsilon) - N_c$ 線図は丸棒平滑試験片のそれと一致する。

(3) 局部ひずみ測定のための、止端グラインダ仕上げの曲率半径 R に応じて、応力集中係数で $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\epsilon) - N_c$ 線図を補正すれば丸棒平滑試験片のそれと一致する。

(4) 局部ひずみ測定のため止端グラインダ仕上げによる測定ひずみの低下を考慮して、丸棒平滑試験片の $\Delta\sigma(=E \cdot \Delta\epsilon) - N_c$ 線図を補正した評価線図を用いれば、溶接構造物のき裂発生寿命に対する疲労強度評価を合理的に行うことができる。

文 献

- (1) 大野・森下, ブラケットを有する箱形梁構造物の応力と疲労強度, 圧力技術, 21-1 (昭 58), 2.
- (2) 大野・鯉淵, 局部ひずみアプローチによる溶接構造物の疲労強度評価, 機論, 53-485 (昭 62), 1.
- (3) 大野・鯉淵・泉山, 油圧ショベル鋼構造部分の実働荷重と寿命予測, 日立評論, 56-6 (昭 43), 47.