

ステンレス鋼の疲労強度に及ぼす平均応力の影響

Influence of Mean stress on Fatigue Strength of Stainless Steel

釜谷 昌幸 (Masayuki Kamaya)*¹ 川久保 政洋 (Masahiro Kawakubo)*²

要約 平均応力がステンレス鋼の疲労寿命に及ぼす影響と、それをもたらす要因を明らかにし、原子力発電プラント構造物の設計に用いられる設計疲労線図における平均応力補正のあり方について検討した。まず、疲労試験中の繰返し硬化・軟化を少なくするため20%の冷間加工を導入した316ステンレス鋼を用いて、室温大気中にて平均応力を負荷した荷重制御の疲労試験を行った。平均応力は、応力振幅に対する疲労寿命を低下させることはなかったが、ひずみ範囲に対する疲労寿命は低下させる傾向を示した。この変化は、き裂の開口挙動の変化にともなう有効ひずみ範囲の変化によってもたらされており、有効ひずみ範囲の変化は、平均応力による開口点の増加のみでなく、試験中のラチェット変形の影響も受けていることが明らかとなった。一方、疲労寿命とひずみ範囲の関係に対する、平均応力の疲労限度に及ぼす影響は小さかった。これらの要因の、設計に対する影響を検討した結果、設計疲労線図における疲労寿命および疲労限度に対して、平均応力の影響を考慮する必要がないと考察された。

キーワード 疲労, 平均応力, ステンレス鋼, 構造設計, 疲労寿命, 疲労限度

Abstract In order to incorporate the mean stress effect in the design fatigue curve for designing nuclear power plant components, change in fatigue strength due to the mean stress and root causes of the change were investigated for Type 316 stainless steel. First, 20% cold work was applied to specimens of Type 316 stainless steel in order to reduce the cyclic strain hardening and softening during fatigue tests, and then, the specimens were subjected to stress controlled fatigue tests under the mean stress in air at room temperature. Although the mean stress tended to show a beneficial effect on the fatigue life under the same stress amplitude, it had a detrimental effect under the same strain range. It was shown that the reduction in fatigue life was brought about by the change in the effective strain, which was caused not only by the rise in the crack opening point but also by ratcheting deformation during the fatigue tests. The mean stress had little influence on the fatigue limit for the strain range. It was concluded that, although the mean stress reduced the fatigue life in the stress controlled fatigue tests, its effect did not need to be considered in the design fatigue curve because no significant change in the effective strain range occur in actual components.

Keywords Fatigue, Mean Stress, Stainless Steel, Structural Design, Fatigue Life, Fatigue Limit

1. 緒 言

原子力発電プラント機器などの構造材料の設計においては、応力振幅（実質的にはひずみ振幅）に対する限界繰返し数を規定する設計疲労線図を用いて疲労損傷の防止が図られている⁽¹⁾。試験片が破断するまでの繰返し数（以後、疲労寿命）や疲労限度は、平均応力により変化することから、設計疲労線図には予めGoodman線図による平均応力補正が行われている。しかし、ステンレス鋼ではGoodman線図による補正が必ずしも妥当でないことが示されている⁽²⁾⁽³⁾。そ

もそも、ステンレス鋼の疲労強度は応力振幅よりもひずみ幅との相関が大きく⁽⁴⁾⁽⁵⁾、設計疲労線図はひずみ制御の試験で得られた疲労寿命、または荷重制御の試験結果をひずみ幅で整理した疲労寿命を基に策定されている⁽⁵⁾。したがって、荷重ベースで考えられるGoodman線図による補正の考え方は、厳密にはステンレス鋼に適用できない。図1に著者らによって取得された⁽⁶⁾、室温大気中における316ステンレス鋼の平均応力下での疲労寿命を示す。応力振幅と疲労寿命の関係においては、とくに大きな平均応力を負荷しない限り、平均応力によって疲労寿命が短くなることは

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

*2 元(株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 現在 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター

なく、逆に疲労寿命は長くなる傾向が見られた。この要因として、荷重制御下で平均応力を負荷すると、最大荷重が増加し、加工硬化が促進されることが考察された。つまり、加工硬化により同じ応力振幅で生じるひずみ幅が減少するため、応力振幅に対する疲労寿命が長くなった⁽⁶⁾。設計疲労線図に対する平均応力の補正方法を検討するためには、ひずみ幅と疲労寿命の関係に対する平均応力の影響を調べる必要がある。

一般に平均応力の影響は、荷重制御の試験によって調べられる。したがって、ひずみ幅と疲労寿命の関係に対する平均応力の影響を明らかにするためには、平均応力によるひずみ幅の変化の影響を分離して考える必要がある。しかし、ステンレス鋼は繰返し硬化・軟化が顕著で、荷重制御下でのひずみ幅は繰返し数とともに複雑に変化する。本報では、疲労試験中の繰返し硬化・軟化を少なくするため、20%の冷間加工を導入したステンレス鋼を用いて平均応力が疲労強度（疲労寿命と疲労限度）に及ぼす影響を調べるとともに、疲

勞強度の変化をもたらす要因について考察した。そして、設計疲労線図に対する平均応力の補正の方法について検討した。

2. 試験方法

2.1 供試材

供試材は、市販のオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316 の棒材（直径 34 mm）を用いた。ミルシート記載の化学組成を表 1 に示す。冷間加工を付与するため、軸方向に平行に、平行部の直径 20 mm の引張試験片を製作した。そして、室温大気中において公称ひずみで 20% まで引張のひずみを付与した後、図 2 に示す、平行部の直径 10 mm、長さ 20 mm の疲労試験片に加工した。このとき、疲労試験片の平行部全体に冷間加工が加わった状態となるようにした。疲労試験片の表面は #1200 のエメリー紙で軸方向に研磨した

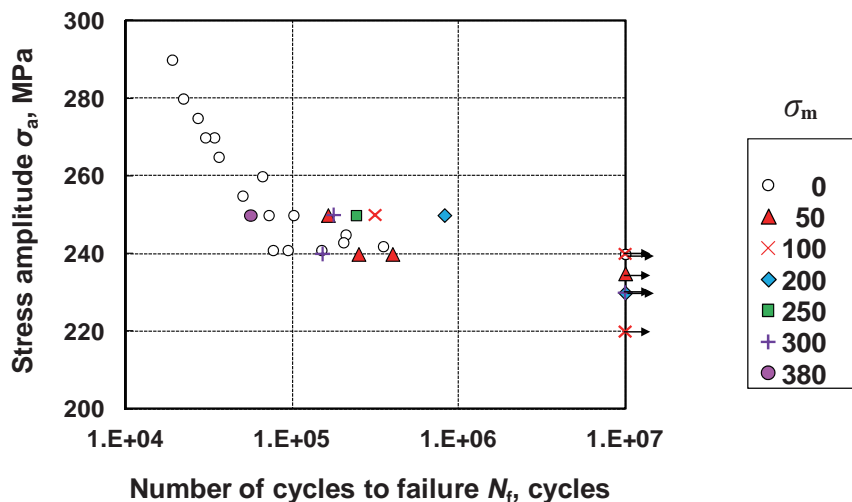


Fig. 1 Fatigue lives with and without mean stress of stainless steel [6].

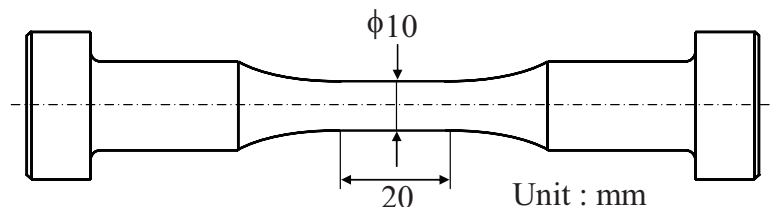


Fig. 2 Geometry of test specimen.

Table 1 Chemical content of test material (wt %).

Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Bal.	0.06	0.5	1.3	0.031	0.027	10.18	16.94	2.02

後、バフ研磨で仕上げた。冷間加工を加えた加工材（以後、CW20と表記する）の他に、供試材からそのまま疲労試験片を加工した無加工材（以後、CW0と表記する）も用いた。

引張試験から同定された両材料の応力・ひずみ曲線、および機械的性質を図3および表2にそれぞれ示す。20%の冷間加工を付与することで、強度が大きくなり、伸びも40%より小さくなっている。冷間加工を加えることでヤング率が減少しているが、これは加工によって集合組織が生じたためと考えられる⁽⁷⁾。

Table 2 Mechanical properties of test material.

Plastic strain (%)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction in area (%)	Young's modulus (GPa)
0	299	612	58.0	79.1	203
20	661	748	33.8	73.2	189

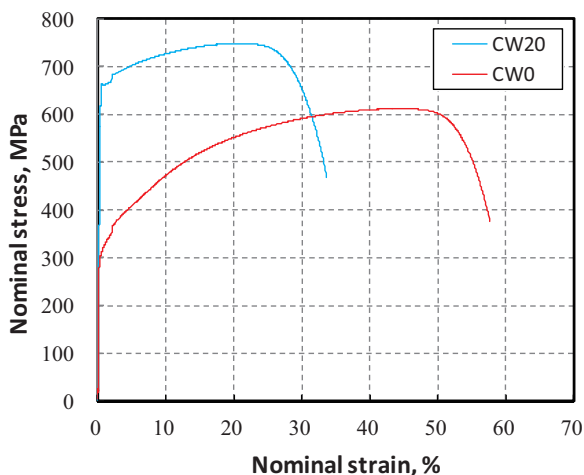


Fig. 3 Stress-strain curves of test material.

2.2 試験方法

疲労試験は、室温大気中で軸方向の荷重制御で実施した。最初の1000サイクルまでは繰返し速度0.2Hzで負荷し、以降は試験片の発熱に注意しながら最大40Hz程度まで速度を上げて試験を行った。試験中のひずみは、評点間距離12.5mmの伸び計を用いて測定した。大きな平均応力を負荷した場合は、1サイクル目の引張負荷時に伸び計の測定範囲である ± 1 mmを超える場合があった。その際は、伸び計をセットしなおしながら荷重を増加させ、合計のひずみを算出した。そして、1サイクル目終了時に伸び計を零とし、き裂の成長により評点間の伸びが0.1mmに到達した時点、または伸び計の評点間以外で発生したき裂によ

り破断した時点の繰返し数を疲労寿命 N_f と定義した。

本供試材（無加工材）の、ひずみ制御試験および荷重制御試験による、平均応力のない場合の室温大気中での疲労寿命（以後、基本特性）は既に取得されており⁽⁸⁾、疲労限度は応力振幅でおおよそ240MPaであった。また、50から380MPaの平均応力を負荷した場合の疲労試験も実施されており⁽⁶⁾、その結果は図1に示した。本報では、加工材に対して、応力振幅が330から450MPa、平均応力を0、100、200そして250MPaとした場合の疲労試験を実施した。また、無加工材に対しても、比較的小さい平均応力のデータを充実させるため、平均応力 σ_m を -50、20、40、50そして100MPaとした場合の試験を、230から270MPaの応力振幅にて実施した。

3. 試験結果

3.1 加工材の疲労強度

加工材の疲労寿命と応力振幅の関係を図4(a)に示す。図には、無加工材の基本特性⁽⁸⁾も示している。加工材の疲労寿命は、無加工材に比べて長くなり、疲労限度も大きくなった。これは、冷間加工によって、同じ応力振幅に対するひずみ幅が小さくなったことによる。加工材の結果同士を比較すると、平均応力を負荷することによって疲労寿命は低下した。図4(b)は、寿命のおおよそ半分の繰返し数におけるひずみ範囲と疲労寿命の関係を示す。疲労限度が加工材で大きくなる傾向が見られるが、平均応力の有無にかかわらず加工材と無加工材の疲労寿命が一致する傾向を示した。ステンレス鋼の疲労寿命に及ぼす冷間加工の影響は、過去にも報告されているが、室温大気中においては、本研究と同じくひずみ範囲との相関が示されている⁽²⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。ただし、疲労寿命が1000回を下回るような大きなひずみでは、加工により疲労寿命が低下するとの報告もある⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。ひずみ制御試験による基本特性を基準に考えると、平均応力が250MPaの場合を除いて、平均応力による疲労寿命の低下は見られず、むしろ寿命が長くなる傾向が見られた。

疲労寿命を代表するパラメータとして、応力やひずみの他、SWTパラメータ⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾などさまざまな指標が用いられてきた⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。図4では、応力振幅が大きく異なる加工材に対しても、ひずみ範囲と疲労寿命の関係は共通の線上にあった。このことは、応力振幅の疲労寿命に対する影響は小さく、ひずみ範囲を駆動力

としてステンレス鋼の疲労寿命を整理することの妥当性を示している。また、平均応力によって最大応力や応力振幅が変化しても、それ自体が疲労損傷（疲労寿命）に及ぼす影響は小さいと推測される。

図5(a)に応力振幅 $\sigma_a = 380$ MPa の試験中のひずみ範囲の変化を示す。参照のため、平均応力 σ_m が零の

場合と近い疲労寿命となった、無加工材の $\sigma_a = 242$ MPa の試験におけるひずみ範囲の変化も示した。加工材ではひずみ範囲はほとんど変化しなかった。したがって、加工材を用いた荷重制御の試験は、実質上はひずみ制御の試験と見なすことができる。そして、同じひずみ範囲下では、200 MPa 以下の平均応力が疲

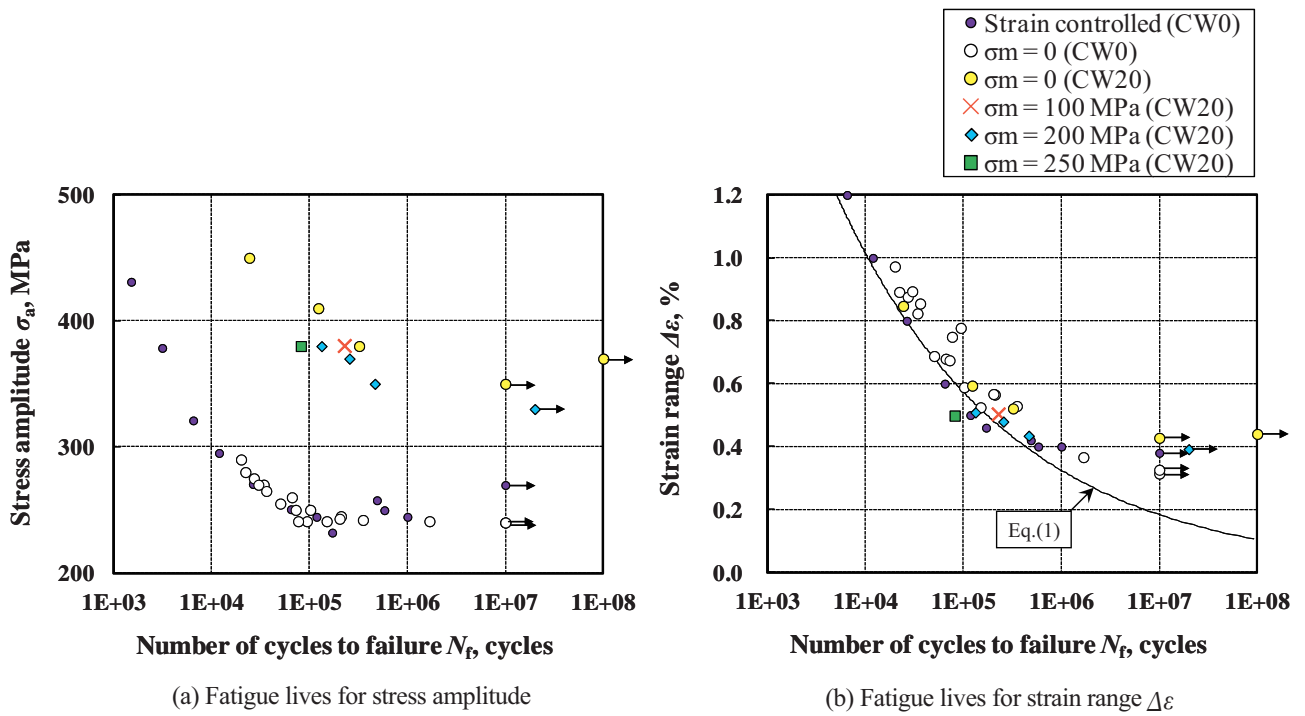


Fig. 4 Fatigue lives of stainless steel with and without mean stress (σ_m : mean stress).

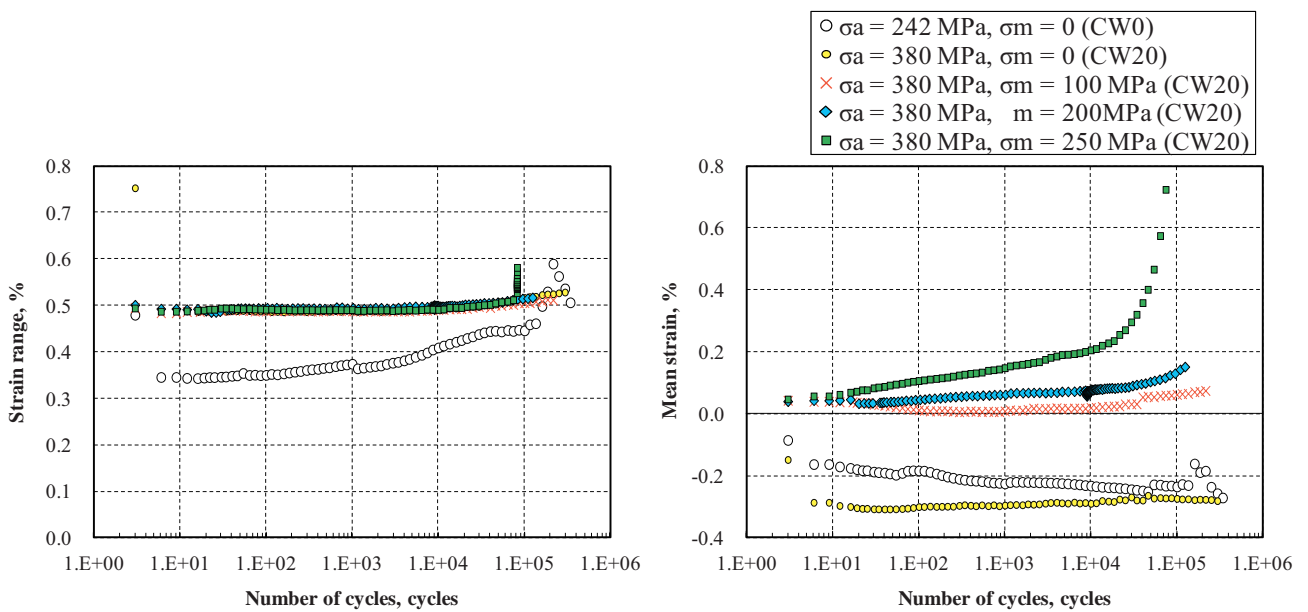


Fig. 5 Change in strain during fatigue tests (σ_a : stress amplitude, σ_m : mean stress).

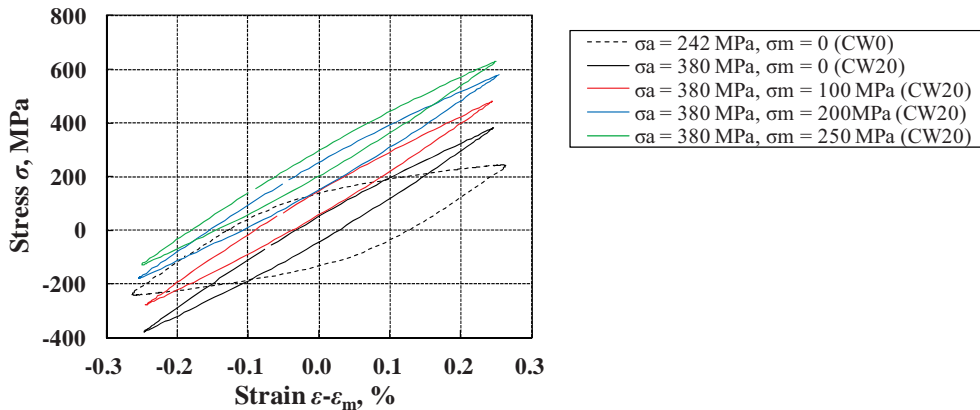


Fig. 6 Stress-strain relation during single cycle at $N_f/2$.

疲労寿命を低下させることはなかった。一方、無加工材は試験中のひずみ範囲がほぼ単調に増加する繰返し軟化が見られた。そのため、図4(b)で用いた寿命の半分の繰返し数におけるひずみ範囲は、必ずしも試験結果を代表する値とはならない可能性がある。

試験中の平均ひずみの変化を図5(b)に示す。平均応力が小さい場合は平均ひずみがほとんど変化しなかったが、平均応力が大きくなると、ラチェット変形する傾向が見られた。無加工材の平均ひずみは低下する傾向を示した。試験中に試験速度を変化させたり試験を中断したりした場合などに、試験片の温度が変化し、図5においてひずみが不連続に変化する場合は見られた。

寿命の半分の繰返し数における1サイクル中の応力・ひずみ関係を図6に示す。この図の横軸は、1サイクル中の平均ひずみ ε_m が図の中心になるように表示している。無加工材は疲労限度である240 MPaに近い242 MPaにおいても顕著なヒステリシスが見られた。平均応力を負荷すると、この比較的大きな非弾性ひずみが加工硬化によって小さくなり、ひずみ範囲の低下をもたらす。一方、加工材のヒステリシスループは相対的に小さく、また、平均応力によってその大きさはほとんど変化しなかった。したがって、図5(a)に示したとおり、同じ応力振幅におけるひずみ範囲は、平均応力の大きさに依存せずほぼ同じとなった。

3.2 無加工材の疲労強度

無加工材の疲労寿命と応力振幅の関係を図7(a)に示す。図には、参照のため無加工材の基本特性⁽⁸⁾も示した。図1の結果と同様に、平均応力を負荷するこ

とによって疲労寿命は長くなっている。ただ、寿命の伸びは加工材ほど大きくなかった。平均応力を -50 MPa 負荷した場合は、疲労限度以上の応力振幅250 MPaを負荷した場合でも繰返し数 10^7 回で未破断のまま試験を終了した。図7(b)は、寿命のおおよそ半分の繰返し数におけるひずみ範囲と疲労寿命の関係を示す。この図には図1に示した結果も併せて示した。平均応力を負荷することによって、ひずみ範囲に対する疲労寿命は低下する傾向を示した。寿命の低下量は平均応力の大きさと明確な相関は見られず、ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon$ が0.34%近傍では、平均応力が100 MPaの場合に寿命の低下が最も大きくなった。

図8は、 $\sigma_a=250$ MPaの試験中のひずみ範囲と平均ひずみの変化を示す。平均応力のない場合は、繰返し軟化が顕著であったが、平均応力を負荷すると試験初期に変動は見られるものの、ひずみ振幅の変化は比較的小さくなっている。平均ひずみは、平均応力によって大きく変化した。とくに、 $\sigma_a=250$ MPa、 $\sigma_m=300$ MPaの条件では、最大応力が引張強さに近い550 MPaとなり、1サイクル目で20%を超えるひずみが発生した。しかし、試験中のひずみはほとんど変化しなかった。逆に、平均応力が小さくなると、試験中に平均ひずみが連続的に増加した。図8(b)の縦軸のスケールは、加工材の平均ひずみを示した図5(b)とは大きく異なっていることに注意されたい。

4. 考 察

4.1 平均応力の疲労寿命に及ぼす影響

先にも述べたように、ステンレス鋼の疲労寿命はひずみ範囲と相関が大きく、設計疲労線図においてもひ

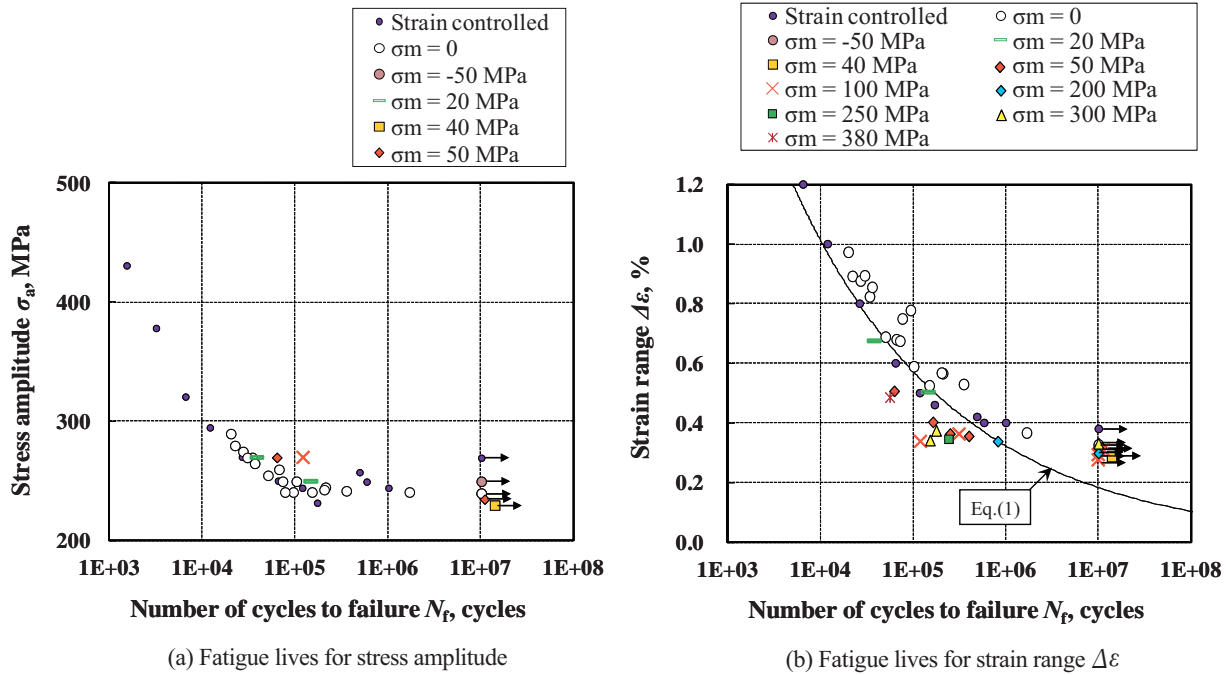


Fig. 7 Fatigue lives of stainless steel with and without mean stress (CW0) (σ_m : mean stress).

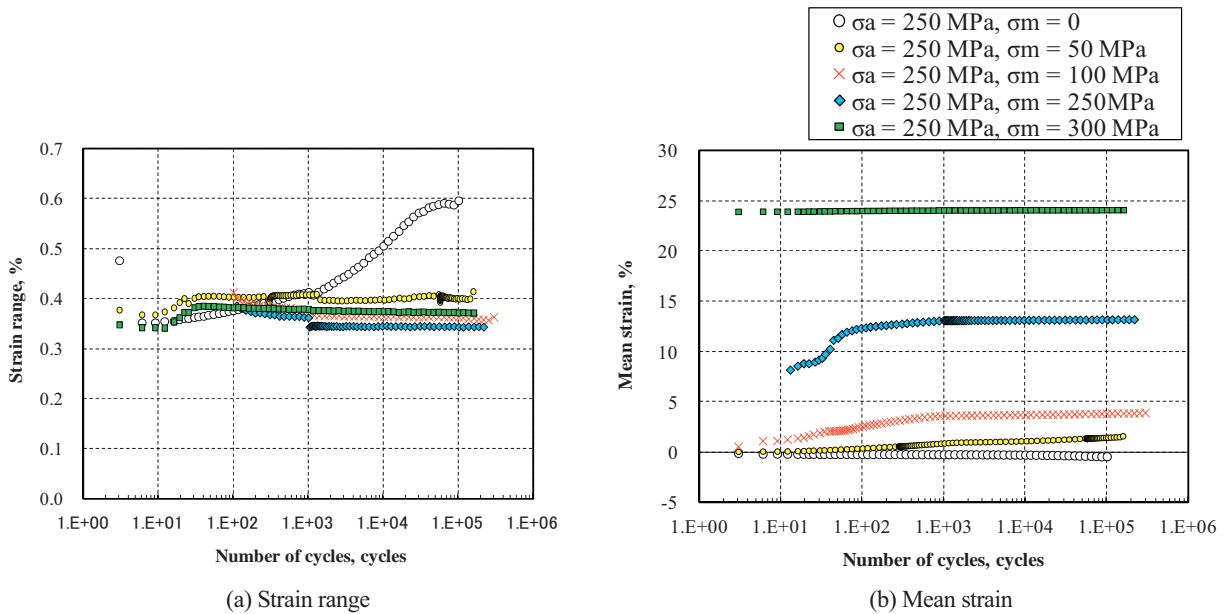


Fig. 8 Change in strain during fatigue tests (CW0) (σ_a : stress amplitude, σ_m : mean stress).

ずみ範囲が用いられているので、ひずみ制御試験による基本特性を基に、平均応力の疲労寿命に及ぼす影響を考察する。ひずみ制御試験による基本特性の最小自乗近似を次式のように得た。

$$N_{f(\Delta\varepsilon)} = 6393(\Delta\varepsilon)^{-3.322} \quad (1)$$

ここで、ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon$ の単位は[%]となる。図 4

(b)および図 7(b)に示した実線が式(1)に対応し、この式により正規化した試験による疲労寿命 $N_f/N_{f(\Delta\varepsilon)}$ と平均応力の関係を図 9 に示す。未破断の試験結果はこの図に示していない。先に考察したように、加工材においては平均応力によって寿命が必ずしも低下しておらず、平均応力の影響は明確でない。一方、無加工材では平均応力によって寿命が低下する傾向が見られ

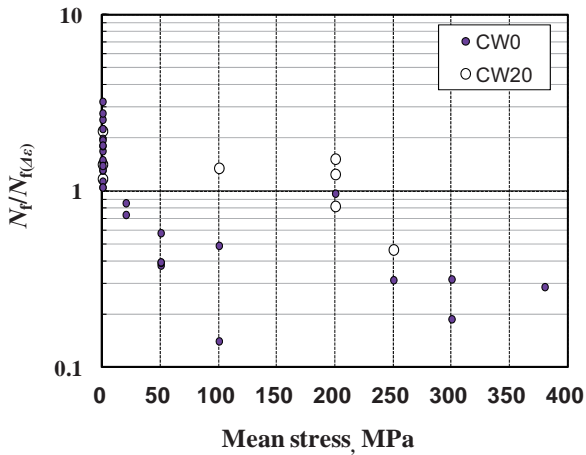


Fig. 9 Change in normalized fatigue life with mean stress.

る。 $N_f/N_{f(\Delta\epsilon)}$ は平均応力が 100 MPa のときに最小となり、それ以上の平均応力では疲労寿命の低下は飽和しているようである。ステンレス鋼については、ひずみ範囲に対する疲労寿命の低下が、平均応力が 50 MPa 近傍で大きくなったことが、Vincent ら⁽¹⁷⁾によっても報告されている。

4.2 き裂開閉口の影響

本供試材から加工した疲労試験片の表面をレプリカ

で観察した検討⁽¹⁸⁾では、 $\sigma_a=250$ MPa, $\sigma_m=0$ の条件において、疲労寿命のおおよそ 20% の繰返し数で長さ 21.3 μ m のき裂が観察されている。そして、得られたき裂成長速度を積分することで実験の疲労寿命を予測することができた⁽¹⁹⁾。つまり、疲労寿命は微小なき裂が限界サイズに成長するまでの成長寿命にほぼ等しいと考えることができる⁽²⁰⁾。したがって、平均応力による疲労寿命の変化は、平均応力のき裂成長速度に及ぼす影響として考えることができる。

平均応力が負荷されると、き裂閉口が生じにくくなり、有効応力拡大係数範囲が大きくなることが知られている。そこで、き裂が開いている間のひずみ範囲に相当する有効ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_{eff}$ を次式により算出した。

$$\Delta\epsilon_{eff} = \Delta\epsilon + \frac{\sigma_{min}}{E} \quad (\sigma_{min} < 0) \tag{2}$$

$$\Delta\epsilon_{eff} = \Delta\epsilon \quad (\sigma_{min} \geq 0)$$

σ_{min} は最小のピーク応力で、ひずみ制御試験の場合は、寿命のおおよそ半分の繰返し数の時の値を用いた。E はヤング率で、表 2 の値を用いた。試験片表面に発生した表面き裂の開閉挙動を調べた筆者らによる検討⁽⁶⁾では、応力(ひずみ)が最小のピークから増加するとき、応力がほぼ零となった時点でき裂が開閉したことが確認されている。

有効ひずみ範囲と疲労寿命の関係を図 10 に示す。

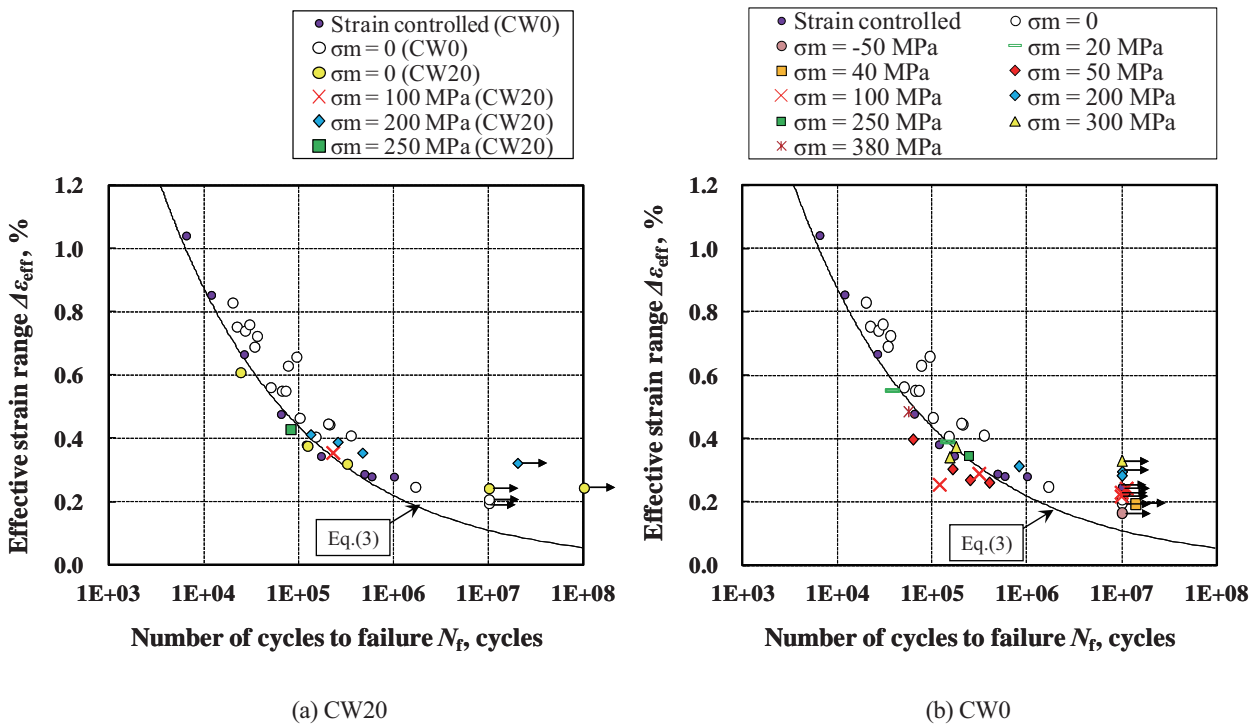


Fig. 10 Relationship between fatigue lives and effective strain range.

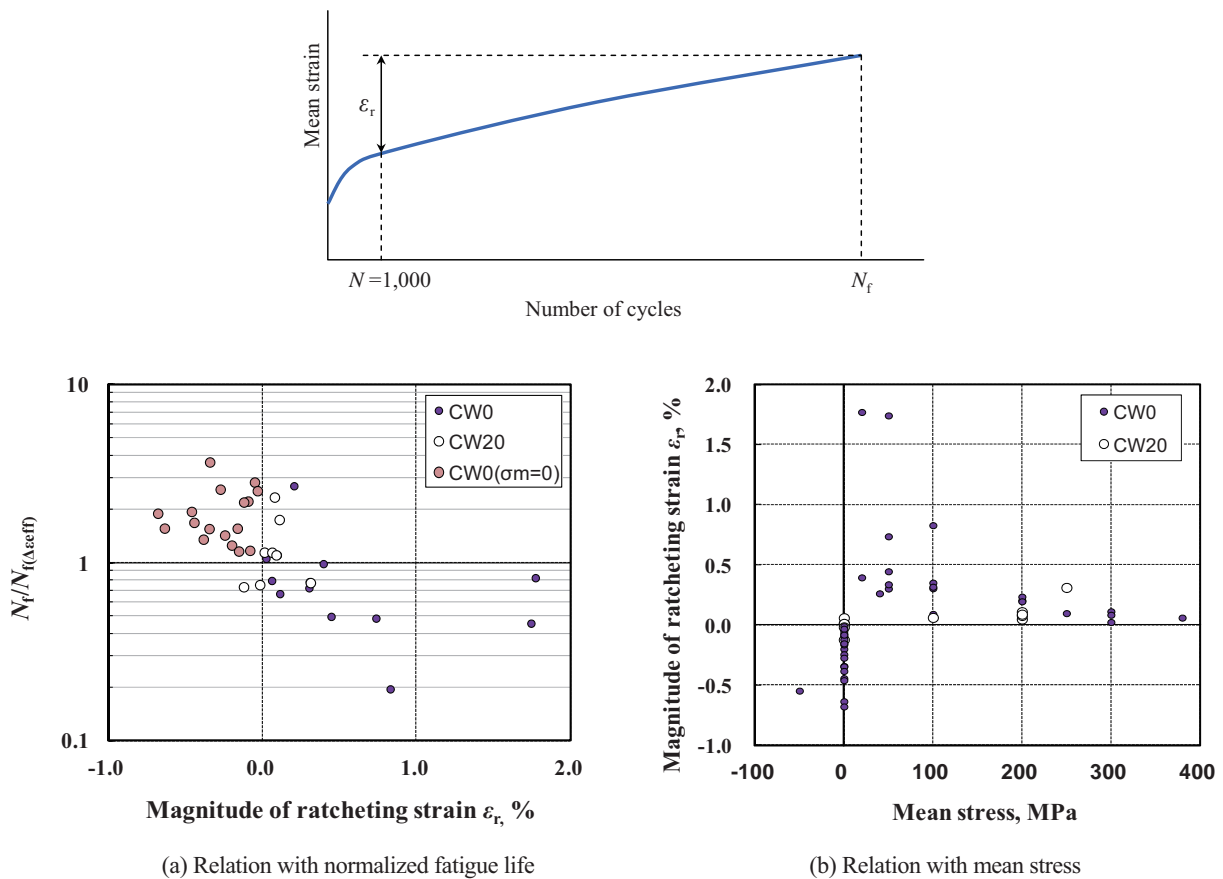


Fig. 11 Ratcheting strain developed during fatigue tests.

加工材では、有効ひずみ範囲を用いることで、若干ではあるが、ひずみ制御試験による基本特性に近づいている。とくに平均応力のない場合には、基本特性とほぼ一致した。一方、平均応力が 200 MPa の場合は、疲労寿命が相対的に大きくなり、疲労限度も大きくなった。

無加工材についても、 $\Delta\epsilon_{eff}$ を用いることで、ひずみ制御試験による疲労寿命に近づいた。とくに、平均応力が 200 MPa を超えるような大きな平均応力の場合の疲労寿命は、基本特性とほぼ一致している。平均応力が大きくなるほど、有効ひずみ範囲が大きくなるので、図 7(b)で見られた式 (1)からの逸脱は小さくなる方向に変化する。一方、平均応力が比較的小さい 100 MPa の場合などは、基本特性より明らかに寿命が短くなった。また、荷重制御試験による基本特性は、ひずみ制御試験のそれより大きくなっている。

4.3 ラチェット変形の影響

平均応力による疲労寿命の変化を有効ひずみ範囲の

みで説明することは困難であった。とくに、無加工材の場合は、有効ひずみ範囲に対する疲労寿命のばらつきは顕著であった。有効ひずみ範囲とひずみ制御の疲労寿命の関係を基準に考えると、無加工材では、平均応力のない場合の疲労寿命が長くなり、平均応力の小さい場合の疲労寿命が短くなる傾向が見られた。この要因として、試験中のラチェット変形の影響が考えられる。

閉口したき裂の存在する試験片に引張の塑性ひずみを加えるとき裂は開口する。このことから、試験中の平均ひずみの増加は、き裂開口を促進する方向に作用すると考えられる。図 8(b)に示したように、無加工材に 50 MPa または 100 MPa の平均応力を負荷すると、ラチェット変形により、平均ひずみが連続的に増加した。これにより、き裂開口が促進され、実質の有効ひずみ範囲が増加し、見かけの有効ひずみ範囲である $\Delta\epsilon_{eff}$ に対する疲労寿命を低下させた可能性がある。逆に、平均応力を負荷しない無加工材の場合は、試験中の平均ひずみが低下した。圧縮の平均ひずみはき裂を開口しにくくするので、実質の有効ひずみ範囲が

$\Delta\epsilon_{\text{eff}}$ より小さくなり、疲労寿命が長くなったと考えられる。一方、無加工材に 300 MPa の平均応力を負荷した場合は 1 サイクル目に大きな平均ひずみが発生するものの、試験中のひずみは変化しなかった。き裂の発生していない 1 サイクル目に生じた塑性ひずみは、き裂開口に寄与しない。また、加工材の疲労寿命でも明らかなように、塑性変形自体は、疲労寿命に影響を及ぼさなかった。したがって、1 サイクル目の塑性ひずみは、表面粗さの変化の影響を除けば、疲労寿命に影響しないと考えられる。

試験中の平均ひずみの増加量（ラチェット変形量）と疲労寿命の変化の関係を図 11(a)に示す。ラチェット変形量 ϵ_r は、1000 サイクル目の平均ひずみと疲労寿命相当繰返し数での平均ひずみの差と定義した（図 11 参照）。この定義によると、1 サイクル目で大きな塑性ひずみの発生する平均応力が 300 MPa の無加工材の場合は、 ϵ_r がほぼ零となる。疲労寿命の変化は、ひずみ制御試験における $\Delta\epsilon_{\text{eff}}$ に対する疲労寿命の最小自乗近似である次式で正規化した。

$$N_{f(\Delta\epsilon_{\text{eff}})} = 1.060 \times 10^4 (\Delta\epsilon_{\text{eff}})^{-4.032} \quad (3)$$

ここで、有効ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_{\text{eff}}$ の単位は [%] となる。式(3)は図 10 において実線で示している。ひずみ制御試験の結果に対する疲労寿命の変化 ($N_f/N_{f(\Delta\epsilon_{\text{eff}})}$) と ϵ_r には負の相関が見られる。とくに、無加工材に平均応力を負荷した場合、 ϵ_r は加工材に比べて大きくなり、それに対応して $N_f/N_{f(\Delta\epsilon_{\text{eff}})}$ も小さくなった。無加工材の平均応力のない場合は圧縮の ϵ_r となり、寿命が相対的に長くなった。図 11(b) は平均応力と ϵ_r の関係を示すが、無加工材の平均応力がおおよそ 50 MPa のときに ϵ_r が最大となっており、図 7(b) や図 10(b) において平均応力が比較的小さい場合に、疲労寿命が短くなる傾向と一致している。試験では、繰り返し 1 サイクル毎にひずみ範囲を記録しておらず、試験によっては破断直前に大きなひずみが検出され、 ϵ_r が大きくなる場合もあった。また、1000 サイクルまでの平均ひずみは ϵ_r には考慮されていない。そのため、本報の試験結果から導かれる ϵ_r には誤差が含まれ、図 11 にばらつきをもたらす要因になった可能性がある。

図 12 は、破断した試験結果の内、 ϵ_r の絶対値が 0.2% 未満となった結果のみをプロットしている。ラチェット変形が小さい場合は、平均応力下での疲労寿命が $\Delta\epsilon_{\text{eff}}$ から推測できることがわかる。以上のように、見かけ上の有効ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_{\text{eff}}$ と、試験中のラ

チェット変形を考えることによって、平均応力のない場合を含めて、ひずみ制御試験の基本特性に対する疲労寿命の変化を矛盾なく説明できた。つまり、平均応力による疲労寿命の変化は、ラチェット変形の影響を考慮した有効ひずみ範囲を用いて評価することができると考えられる。

4.4 平均応力の疲労限度に及ぼす影響

これまで示した試験結果では、 10^7 回以上の繰返し数で破断した試験片はなかった。そこで、 10^7 回を超えた場合の試験を未破断とし、その試験条件を疲労限度以下と判断した。図 13 は平均応力とひずみ範囲の関係を示す。無加工材では 100 MPa の平均応力を負荷した場合に疲労限度が小さくなる傾向が見られたが、その変化は小さかった。また、加工材の疲労限度は、無加工材のそれより大きくなっている。平均応力を負荷すると、最大応力の増加によって塑性ひずみが大きくなる。それによって、表面粗さが大きくなり、疲労限度を低下させる要因になり得る。加工材では、平均応力による塑性ひずみが小さいので、無加工材より疲労限度が増加する可能性がある。

本供試材のき裂成長速度とひずみ拡大係数の関係は、疲労限度に近い応力振幅 250 MPa の条件においても、ひずみ拡大係数に対するき裂成長速度が低下する（き裂成長の下限界ひずみ拡大係数が出現する）傾向は見られず⁽¹⁹⁾、停留き裂も観察されていない⁽⁶⁾。したがって、疲労限度は、き裂の発生の有無、または数十マイクロメートルを下回るような極微小なき裂の停留の有無に依存すると推測される。そのため、き裂成長の駆動力として考えてきた $\Delta\epsilon$ や $\Delta\epsilon_{\text{eff}}$ と、疲労限度は必ずしも相関を有しなかったと考えられる。

4.5 設計疲労線図に対する平均応力補正

本報で考察された平均応力によって疲労寿命が変化する要因は、現在設計疲労線図に適用されている Goodman 線図の考え方とは異なる。本報の考え方を設計疲労線図に考慮する場合、図 7(b) に示した無加工材の $\Delta\epsilon$ と N_f の関係に及ぼす平均応力の影響を反映させる必要がある。

図 4(a) および図 7(a) に示したように、疲労損傷をもたらす荷重変動が一次応力（荷重制御）による場合は、平均応力は疲労寿命を長くする方向に作用するので、その影響を考慮する必要はない。二次応力（変位

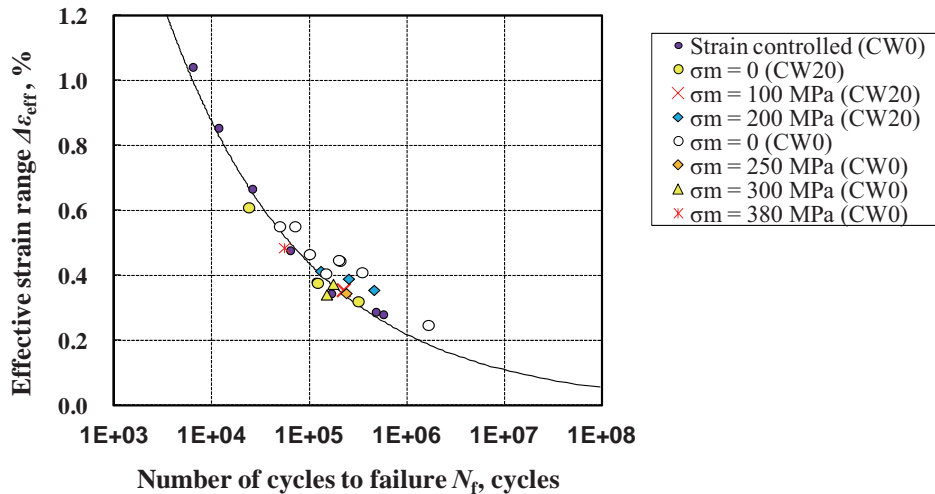


Fig. 12 Change in fatigue lives with effective strain range for un-ratcheted specimen ($|\epsilon_r| < 0.2\%$).

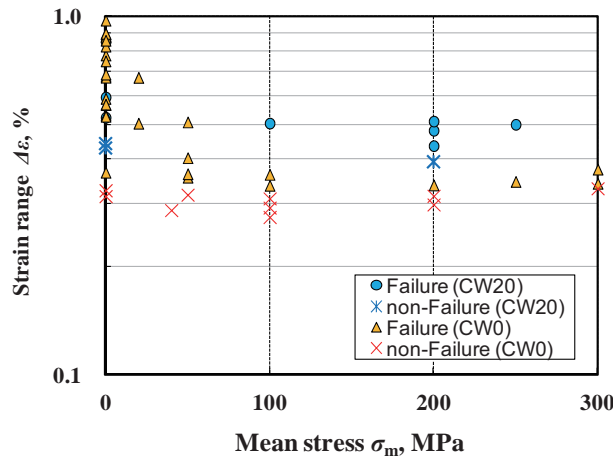


Fig. 13 Influence of mean stress on fatigue limit.

制御) による場合は、有効ひずみ範囲とラチェット変形による疲労寿命の低下を考える必要がある。しかし、設計においては、ラチェット変形が発生しないように考慮されており、疲労評価の対象となるような応力集中部などでは、変形が拘束されている。したがって、ラチェット変形によるき裂開口の変化は無視でき、 $\Delta\epsilon_{eff}$ を実質の有効ひずみ範囲と見なすことができる。

平均応力をもたらす荷重も一次応力と二次応力に分類できる。たとえば、溶接残留応力などの二次応力の場合、比較的大きな平均応力が作用する可能性があるが、変位制御による平均応力は、塑性シェイクダウンによって繰返し数とともに減少すると考えられる。とくに、ステンレス鋼の場合、疲労限度に近い条件でも応力・ひずみ曲線にヒステリシスが出現するため (図6参照)、塑性シェイクダウンが生じやすい。この傾

向は、図11(b)からも確認できる。無加工材では、50 MPa という比較的小さい平均応力を負荷してもラチェット変形が生じている。このことは、ラチェット変形が生じないように拘束した場合は、塑性シェイクダウンによって平均応力が緩和されることを示している。

内圧などの一次応力で平均応力が負荷された場合は、き裂が開き、 $\Delta\epsilon_{eff}$ の増加により疲労寿命が低下する可能性がある。図14に、図9に示した疲労寿命 $N_f/N_{f(\Delta\epsilon)}$ と平均応力の関係のうち、ラチェット変形が生じない ($|\epsilon_r| < 0.2\%$) 条件のみを示した。本供試材は、平均応力がない場合は ϵ_r が負となり、き裂開口によって $N_f/N_{f(\Delta\epsilon)}$ が1以上となった。平均応力を負荷すると、 $N_f/N_{f(\Delta\epsilon)}$ が低下しているのは、 $\Delta\epsilon_{eff}$ の増加に起因している。この図では、平均応力が200 MPaを超えると、 $N_f/N_{f(\Delta\epsilon)}$ が1以下となり、平均応

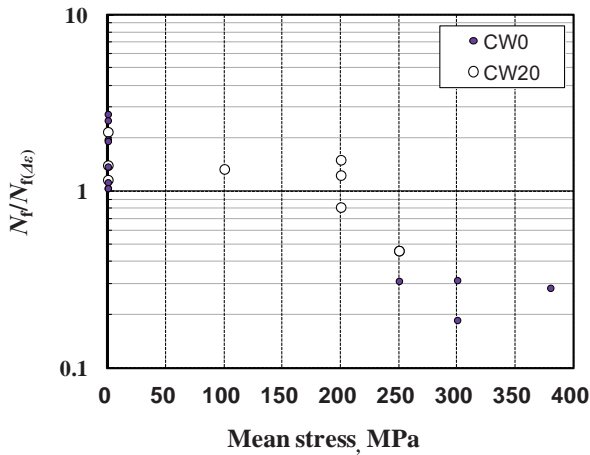


Fig. 14 Normalized fatigue life for un-ratcheted specimen.

力に対する $N_f/N_{f(\Delta\epsilon)}$ の変化も大きくなった. 一方, 平均応力が 200 MPa より小さい場合, 平均応力に対する $N_f/N_{f(\Delta\epsilon)}$ の変化は相対的に小さかった. この要因として応力・ひずみ曲線におけるヒステリシスが考えられる. 図 15 は, 平均応力を負荷することによる $\Delta\epsilon_{\text{eff}}$ の変化を模式的に示している. 応力振幅 σ_a 相当の平均応力を負荷することによって, $\Delta\epsilon_{\text{eff}}$ は $\Delta\epsilon_{\text{eff}}(\sigma_m = 0)$ から $\Delta\epsilon_{\text{eff}}(\sigma_m = \sigma_a)$ に変化する. 応力・ひずみ曲線にヒステリシスがない場合は, $\Delta\epsilon_{\text{eff}}$ の変化量は平均

応力に比例することになる. 一方, 平均応力が小さく, ヒステリシスループが比較的大きい場合, 平均応力を負荷することによる $\Delta\epsilon_{\text{eff}}$ の変化は相対的に小さくなる. 非弾性ひずみが極端に大きくなりヒステリシスループの形状が長方形になると, 平均応力は $\Delta\epsilon_{\text{eff}}$ の変化に寄与しなくなる. 図 14 では, 平均応力が 200 MPa 以上となると $N_f/N_{f(\Delta\epsilon)}$ が 1 以下となったため, 設計においては $N_f/N_{f(\Delta\epsilon)}$ の低下を考慮することが求められる. しかし, 設計では, 降伏強度を超えるような一次応力が平均応力として作用することは考えられないので, 一次応力による平均応力が作用する場合においても, 平均応力による疲労寿命の低下は考慮する必要がないと考えられる.

以上のことから, いずれの場合においても, 実機の設計において, 平均応力が疲労寿命に及ぼす影響はないか, 無視できるくらい小さいと考えられる. また, 疲労限度については, 図 13(a) に示したとおり, 平均応力によって $\Delta\epsilon$ に対する疲労限度の低下は見られなかった. したがって, 設計疲労線図において平均応力の影響を考慮する必要はないと判断できる.

5. 結 言

本報では, ステンレス鋼を用いた疲労試験により,

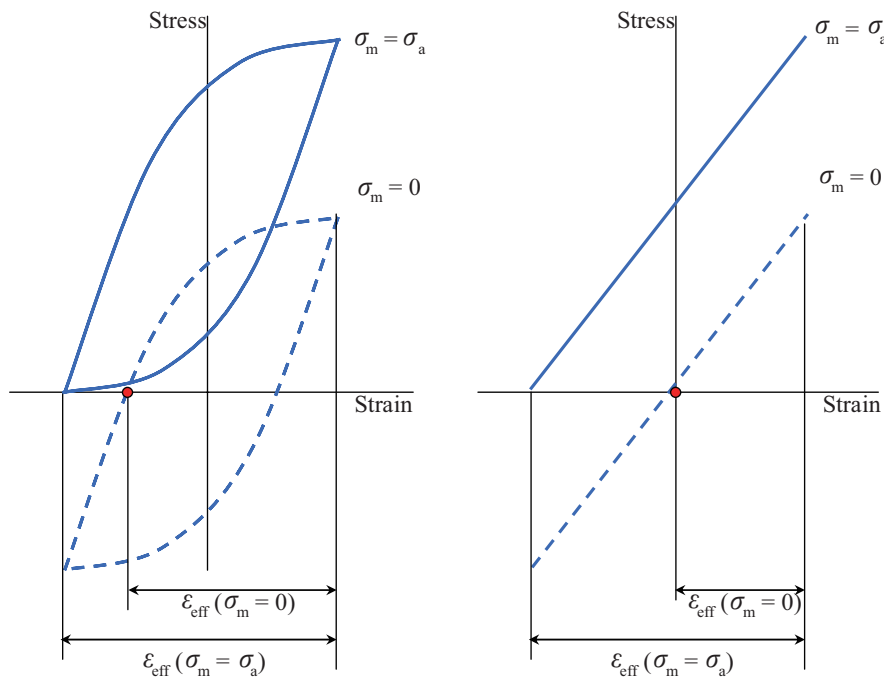


Fig. 15 Schematic drawing for representing the change in effective strain range due to mean stress under constant strain amplitude of σ_a .

疲労寿命と疲労限度に及ぼす平均応力の影響を示すとともに、それをもたらす要因を考察した。結果は以下のように要約できる。

- (1) 繰返し硬化・軟化の顕著なステンレス鋼では、20%の冷間加工を導入した試験片を用いることで、荷重制御試験によって、ひずみ幅の変動の小さいひずみ制御試験と同等の試験を行うことができた。
- (2) 加工材を含め、ステンレス鋼の疲労寿命はひずみ範囲によって整理でき、最大応力や応力振幅の影響は見られなかった。また、ひずみ範囲と疲労寿命の関係に対しては、冷間加工（平均ひずみ）は疲労限度を増加させる方向に作用するものの、疲労寿命に対する影響は見られなかった。
- (3) 平均応力による疲労寿命の変化は、き裂の開口挙動の変化にともなう有効ひずみ範囲の変化によってもたらされていると推測された。
- (4) 有効ひずみ範囲の変化は、平均応力による開口点の増加のみでなく、試験中のラチェット変形によってき裂開口が促進される影響も受ける。逆に、平均応力のない場合は、繰返し軟化による平均ひずみ減少によって、き裂閉口が促進され、寿命が長くなった。
- (5) 疲労寿命とひずみ範囲の関係における疲労限度は、平均応力によってほとんど変化しなかった。
- (6) 設計疲労線図における疲労寿命および疲労限度に対して、平均応力の影響を考慮する必要はないと考察された。

謝 辞

本報の疲労試験は、原子力安全・保安院の平成22年度高経年化対策強化基盤整備事業と平成23年度高経年化技術評価高度化事業の助成を受けて行われた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) 日本機械学会, 発電用原子力設備規格設計・建設規格, JSME S NC1-2012 (2012), 日本機械学会.
- (2) Colin, J., Fatemi, A. and Taheri, S., "Fatigue behavior of stainless steel 304L including strain hardening, prestraining, and mean stress effects", *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol.132 (2010), no.021008.
- (3) Miura, N. and Takahashi, Y., "High-cycle fatigue behavior of type 316 stainless steel at 288 °C including mean stress effect", *International Journal of Fatigue*, Vol. 28 (2006), pp.1618-1625.
- (4) Colin, J. and Fatemi, A., "Variable amplitude cyclic deformation and fatigue behavior of stainless steel 304L including step, periodic, and random loading", *Fatigue Fract. Engng Mater. struct.*, Vol. 33 (2010), pp.205-220.
- (5) Jaske, C. E. and O'Donnell, W. J., "Fatigue design criteria for pressure vessel alloys", *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol.99 (1977), pp.584-592.
- (6) 川久保政洋, 釜谷昌幸, "316 ステンレス鋼の疲労強度に対する平均応力効果", *材料*, Vol. 61 (2012), pp.635-641.
- (7) Kamaya, M., "A procedure for estimating Young's modulus of textured polycrystalline materials", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 46 (2009) pp.2642-2649.
- (8) 川久保政洋, 釜谷昌幸, "変動荷重下における 316 ステンレス鋼の疲労寿命予測 (寿命の支配因子と 2 段 2 重試験における損傷評価)", *材料*, Vol. 60 (2011), pp.871-878.
- (9) Plumbridge, W. J., Dalski, M. E. and Castle, P. J., "High strain fatigue of a type 316 stainless steel", *Fatigue Fract. Engng Mater. struct.*, Vol. 3 (1980), pp.177-188.
- (10) 蓮沼将太, 宮田陽平, 小川武史, 坂上賢一, "オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316NG の低サイクル疲労強度に及ぼす予ひずみの影響", *日本機械学会論文集 A 編*, Vol. 77, No. 777 (2011), pp. 843-851.
- (11) Bhanu Sankara Rao, K., Valsan, M., Sandhya, R., Mannan, S. L. and Rodriguez, P., "An assessment of cold work effects on strain-controlled low-cycle fatigue behavior of type 304 stainless steel", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 24 (1993), pp.913-924.
- (12) Ganesh Sundara Raman, S. and Padmanabhan, K. A., "Effect of prior cold work on the room-temperature low-cycle fatigue behaviour of AISI 304LN stainless steel", *International Journal of Fatigue*, Vol. 18 (1996), pp.71-79.
- (13) Smith, K. N., Watson, P. and Topper, T. H., "A

- stress-strain function for the fatigue of metals", *Journal of Materials*, Vol. 5, No. 4 (1970), pp. 767-778.
- (14) Le Roux, J. C., Taheri, S., Sermage, J. M., Colin, J. and Fatemi, A., "Cyclic deformation and fatigue behaviors of stainless steel 304L including mean stress and pre-straining effects", *Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Conference* (2008), PVP2008-61789.
- (15) Fatemi, A. and Yang, L., "Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials", *International Journal of Fatigue*, Vol. 20 (1998), pp.9-34.
- (16) Paul, S. K., Sivaprasad, S., Dhar, S. and Tarafder, S., "Cyclic plastic deformation and cyclic hardening/softening behavior in 304LN stainless steel", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 54 (2010), pp.63-70.
- (17) Vincent, L., Le Roux, J. C. and Taheri, S., "On the high cycle fatigue behavior of a type 304L stainless steel at room temperature", *International Journal of Fatigue*, Vol. 38 (2012), pp. 84-91.
- (18) Kamaya, M. and Kawakubo, M., "Strain-based modeling of fatigue crack growth - An experimental approach for stainless steel", *International Journal of Fatigue*, Vol. 44 (2012), pp. 131-140.
- (19) 釜谷昌幸, 川久保政洋, "き裂成長予測による低サイクル疲労の損傷評価 (成長予測モデルの構築とその適用例)", *日本機械学会論文集A編*, Vol. 78, No. 795 (2012), pp.1518-1533.
- (20) Murakami, Y. and Miller, K.J. "What is fatigue damage? A view point from the observation of low cycle fatigue process", *International Journal of Fatigue*, Vol. 27 (2005), pp.991-1005.