

変位及び荷重制御下の低サイクルねじり疲労 に及ぼす静的ねじりの影響

須藤, 拓也 / SUDO, Takuya

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

55

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

5

(発行年 / Year)

2014-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00010365>

変位及び荷重制御下の 低サイクルねじり疲労に及ぼす静的ねじりの影響

INFLUENCE OF STATIC TORSION ON LOW CYCLE TORSIONAL FATIGUE UNDER DEFORMATION AND LOAD-CONTROLLED

須藤 拓也

Takuya SUDO

指導教員 大川 功

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

Influence of static load on torsional fatigue strength was investigated on smooth hollow specimens of carbon steel S45C and austenitic stainless SUS316L. Fatigue life under completely reversed cyclic torsion can evaluate without depending on a control system. Addition of static load had a little effect on the torsional fatigue life under deformation-controlled test. However, fatigue life decreases under the load-controlled remarkably. The reason is accumulation of ratcheting and variation of stress-strain relation, difference of fracture surface by addition of static load.

Key Words: Fatigue, Torsion, Low cycle, Static load, Carbon steel, Austenitic stainless steel,

1. 緒言

高サイクルねじり疲労における静的負荷の影響[1]について、疲労寿命が減少するだけでなく延伸する場合があることが報告されている。これは材料や静的負荷により繰返し硬化及び軟化挙動が相違することが影響していると考えられる。このことから動的、静的負荷による変形がより顕著となる低サイクル寿命域では、材料の種類や試験制御方式の相違について、高サイクルとは異なった疲労挙動を示すことや軟化挙動を示す材料に関しては、静的負荷の影響は荷重制御方式の影響を強く受けると予想される[2]。

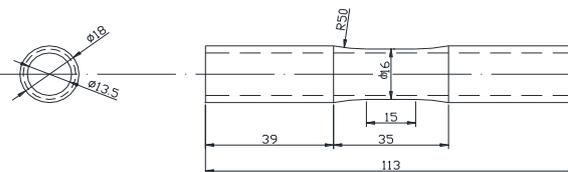
そこで本研究では、中炭素鋼 S45C とステンレス鋼の二種類の材料を用いて、低サイクル寿命域(両振りで $10^3 \sim 10^5$ 回)において、変位及び荷重制御下で両振り繰返しねじりとそれに静的ねじりを負荷した試験を行った。[3-4] 静的負荷がねじり疲労挙動に及ぼす影響について調べるとともに静的ねじりがどのようにして寿命に影響を及ぼすか、変形挙動に着目して説明できるか検討した。

2. 試料及び試験方法

供試料は機械加工後に 850°C1 時間保持後炉冷の処理を行った機械構造用炭素鋼 S45C と容体化処理されたオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L であり、いずれも試験部の長さが 10mm で外径 16mm, 内径 13.5mm の中空試験片に切削加工した。材料の化学成分及び機械的性質を表 1 に、試験片形状を図 1 に示す。サーボモータ制御式ねじり試験機を用いて静的ねじり試験を行い、この時の最大トルク T_{st} の 75~50% のトルクあるいはこれに対応するねじれ角を負荷して繰返しねじり試験を行った。変位制御下では

両振り及び静的ねじれ角を付加した試験(ねじれ角比 $R_\theta = \theta_{min}/\theta_{max} = -1$ 及び -0.5 及び 0) を、荷重制御下は両振り及び静的トルクを付加した試験(トルク比 $R_T = T_{min}/T_{max} = -1$ 及び -0.9 及び -0.85 及び -0.8) を行った。破壊の定義は変位制御では繰返し毎の最大トルクが初期のトルク ($N=1$) の 75% 以下に減少した時点、荷重制御ではねじれ角が急増する時点とした。なお、試験片フィレット部及び試験片取り付けに要する平行部のねじれ角を弾塑性計算により求め、試験片チャック間のねじれ角から減ずることにより、試験部に生ずるせん断ひずみを算出した。

Table.1 Chemical composition and mechanical properties.



S45C				
Chemical composition %	C	Si	Mn	P
	0.45	0.18	0.67	0.03
	Si	Ni	Cr	Cu
Mechanical properties	0.18	0.05	0.12	0.06
	Tensile strength			MPa
	Yield stress in tension			MPa
	Elongation			%
Contraction of area			%	
SUS316L				
Chemical composition %	C	Si	Mn	P
	0.01	0.51	1.55	0.03
	Si	Ni	Cr	Cu
Mechanical properties	0.03	12	17.2	2.34
	Tensile strength			MPa
	Yield stress in tension			MPa
	Elongation			%
Contraction of area			%	

Fig.1 Shape of specimens.

3. 試験結果及び考察

3.1 両振りねじり試験結果

3.1.1 変位制御下での両振りねじり

低サイクルにおけるねじり疲労特性を把握するためにまず、ねじれ角を一定とした変位制御下で両振りねじり試験を行った。

図2は両振りの疲労寿命 N_f を塑性せん断ひずみ振幅 γ_{pa} で整理した。図中の実線は両振りの結果(○印)に対する回帰直線であり、静的ねじり試験結果を1/4サイクルのねじり試験結果としてプロットした。変位制御下ではSUS316Lの方が若干疲労強度は高い。

3.1.2 荷重制御下での両振りねじり

次にトルクを一定とした荷重制御下で両振り繰返しねじり試験を行った。

図4は両振りの疲労寿命 N_f をせん断応力 τ_a で整理した図である。図中の実線は両振りの結果(○印)に対する回帰直線を示している。荷重制御下も同様にSUS316Lの方が若干高強度となっている。

3.1.3 繰返しに伴う硬化及び軟化

図4は静的及び繰返しの場合の応力-ひずみ応答を比較したものである。繰返し(1/2Nf)の結果は寿命の半分の時点での値を用いている。

S45Cはどの制御方式でも変位制御では応力が、荷重制御ではひずみがそれぞれ減少し、繰返し硬化を示している。これはどの負荷ねじれ角及びトルクに対しても同じ傾向である。一方SUS316Lは高負荷域では繰返し硬化するものの、低負荷域では繰返し軟化を示すため、静的試験と交差する。

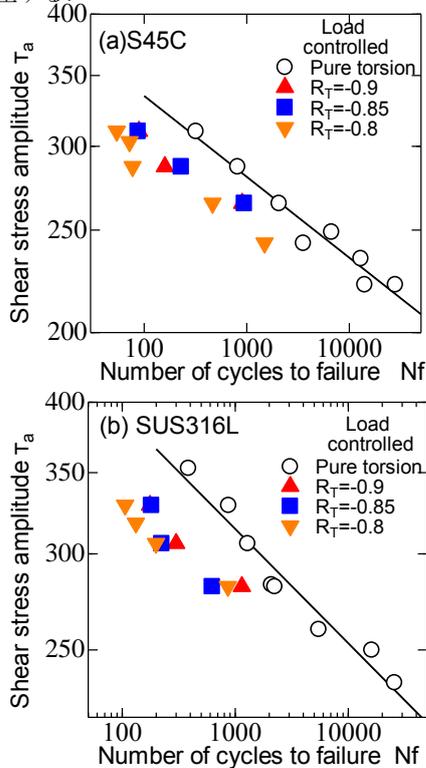


Fig3. Relation between shear stress amplitude and fatigue life

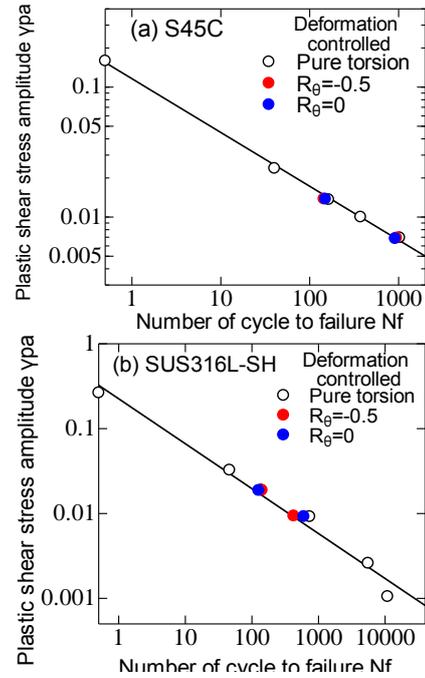


Fig2. Relation between shear strain and fatigue life

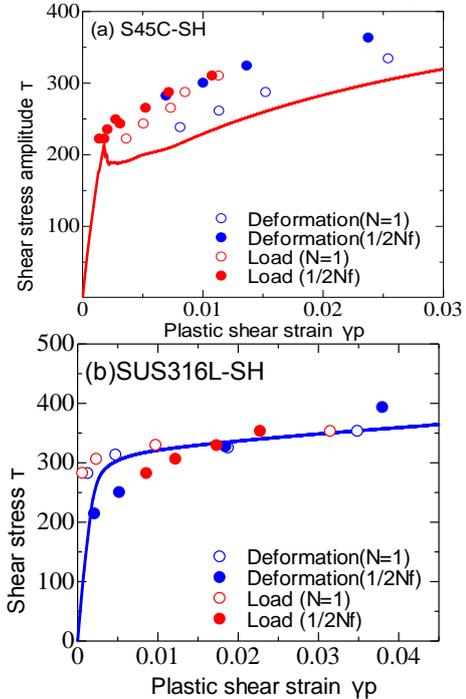


Fig4. Shear stress-strain diagram

3.1.4 両振りねじりにおける寿命評価

図5は両振りでの試験結果を塑性せん断ひずみ振幅によって整理した図である。変位制御では負荷ひずみに対する寿命で、荷重制御では寿命の半分の時点での塑性せん断ひずみ振幅と寿命との関係をプロットし、それぞれ回帰線で示した。(a)S45Cと(b)SUS316Lのともに両制御方式の結果は近接している。

一方、図6はせん断応力によって整理した図である。変位制御では寿命の半分の時点でのせん断応力とその寿命との関係で、荷重制御では負荷応力に対する寿命をプロットし、それぞれ回帰線で示した。此方も両制御方式の結果は近接している。以上のことから、制御方式に依

らず、硬化及び軟化挙動を含むパラメータである塑性せん断ひずみ、せん断応力どちらを用いても統一的な評価ができることがわかった。

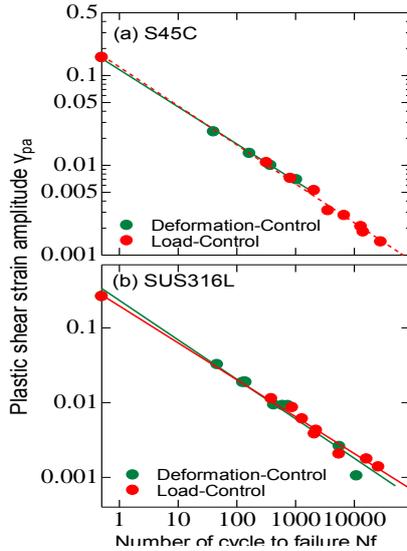


Fig5. Relation between plastic shear strain amplitude and fatigue life

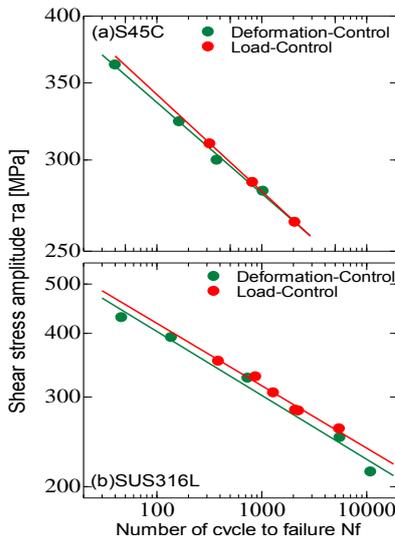


Fig6. Relation between shear stress amplitude and fatigue life

3.2 静的ねじりを伴う繰返しねじり疲労

3.2.1 変位制御下における静的ねじりの影響

図2にねじれ角比 $R_\theta = -0.5$ 及び 0 での寿命試験結果を示す。これらのプロットはねじれ角比や材料問わず、両振り ($R_\theta = -1$) の回帰線付近に位置し、静的ねじりの影響は小さいと評価した。図8は静的ねじりを伴う $R_\theta = -0.5$ 及び 0 と両振り ($R_\theta = -1$) での繰返しにおける最大応力値と最小応力値の平均を用いて、寿命で整理した図である。(a), (b)ともに繰返しの初期で応力差が見られその後、繰返しによる応力緩和によって両振りの値に急速に接近し、最終的に 0 に漸近する。このため、変位制御における静的ねじりは、繰返し初期において応力差が生じ、それが寿命に少なからず影響したが、その後の繰返し過程による応力緩和で寿命に及ぼす静的ねじりの影響は小さくなると考えられる。両材では静的ねじりを負荷した

場合 S45C と比較して SUS316L は両振りとの平均応力の差が小さく、静的ねじりの影響は小さい。

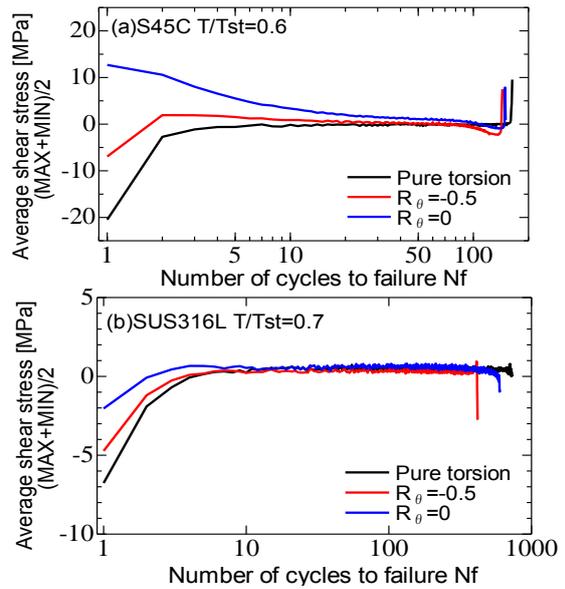


Fig7. Variation of average shear stress with cyclic

3.2.2 荷重制御における静的ねじりの影響

図3にトルク比 $R_T = -0.8$ 及び -0.85 , -0.9 での寿命試験結果を示す。これらのプロットは材料を問わず、両振り ($R_T = -1$) の回帰線より短寿命側に位置し、静的ねじりの大きい $R_T = -0.8$ の場合は $R_T = -0.85$ 及び 0.9 より短寿命となった。図9は両振り及び静的ねじり負荷時の繰返し過程での塑性ひずみ振幅の変化を比較した。S45Cでは繰返し初期から振幅値は小さく、静的ねじりにより両振りよりも硬化する一方、SUS316Lにおいても繰返し初期から中期にかけて振幅値は両振りに対して硬化して、その後は軟化を示す。このことから、両材料とも静的ねじりを付加すると両振りに比べて硬化するが、図3のような寿命減少を説明できない。

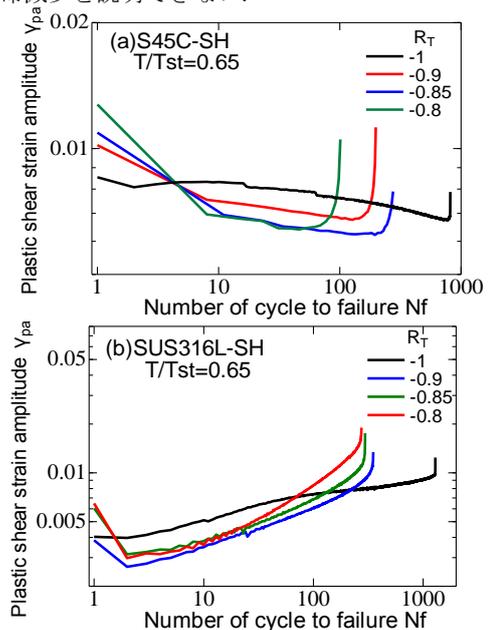


Fig.8 Variation of shear strain with fatigue life.

3.3 ラチェットひずみが疲労寿命に及ぼす影響

3.3.1 ラチェットひずみの蓄積

図9は両振り及び静的ねじりを加えた場合の繰返し過程におけるラチェットひずみを示したものである。どの材料においても両振り $R_T = -1$ に対して静的ねじりの $R_T = -0.8$ 及び -0.85 , -0.9 ではラチェットひずみが大きく、定常的に塑性ひずみが蓄積される。特に $R_T = -0.8$ におけるラチェットの蓄積は大きい。したがってラチェットひずみの蓄積が寿命減少の原因の一つと考えられる。

3.3.2 ラチェットひずみの累積速度

図10は、ラチェットひずみとその累積速度 ($d\gamma c/dN$) の関係をトルク比ごとに整理した。いずれのパラメータも寿命の半分の時点での値を用いている。(a)(b)共にトルク比 R_T の増加に伴って、繰返し過程におけるラチェットひずみと累積速度は増加していることがわかる。ラチェットひずみが寿命にどう影響するのかを調べるために図11では静的ねじりを付加した場合の疲労寿命をラチェットひずみの累積速度で整理した。ひずみ累積速度が増加するほど材料の疲労寿命は両材料とも短寿命となる傾向があり、特に $R_T = -0.8$ においてはプロットの大部分が $R_T = -0.85$, -0.9 よりも短寿命側に位置することがわかる。

以上のことから、静的ねじり付加でひずみ振幅の減少による硬化挙動が見られるものの、ラチェットひずみの累積に伴って、静的ねじりのような破断延性の低下を招き、両振りよりも短寿命で破断する。ラチェットひずみは、静的トルクの増加と共に、繰返し過程におけるラチェットひずみ量とその累積速度が増加し、これらの要因により破断延性の低下をさらに促進させ、トルク比 $R_T = -0.8$ の疲労寿命は他のトルク比よりも短寿命で破断すると考えられる。両材では、S45Cと比較してSUS316Lの方がひずみ累積速度に対するラチェットひずみの量が少なく疲労寿命に与える影響も比較的小さい。これは図8のように材料が軟化することで、破断延性の低下が抑えられたことが考えられる。

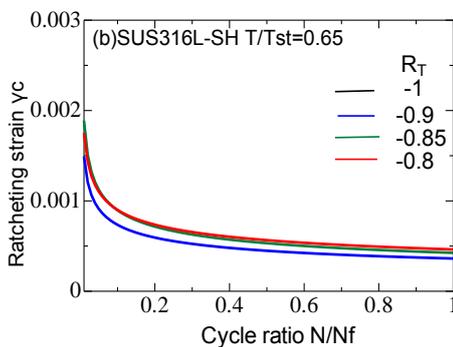
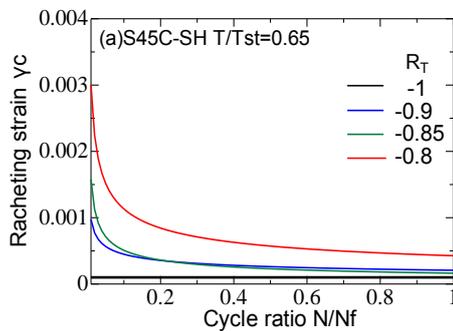


Fig.9. Variation of ratcheting strain with cycle ratio

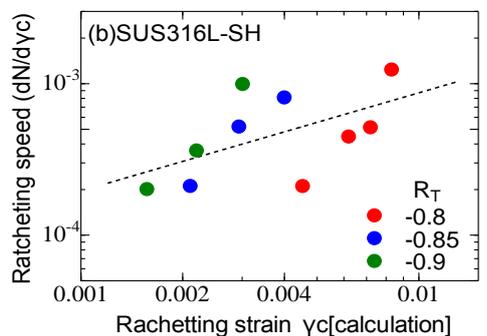
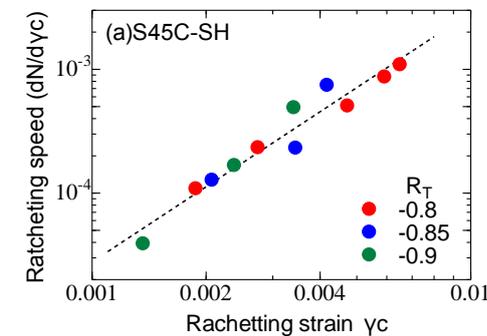


Fig.10 Relation between ratcheting speed and ratcheting strain

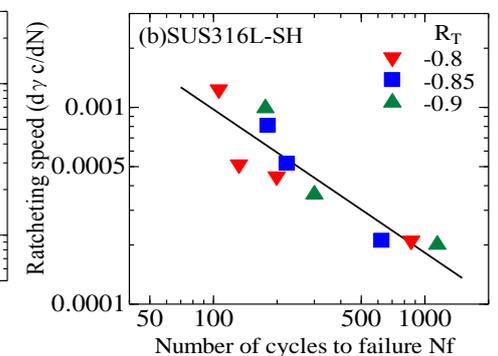
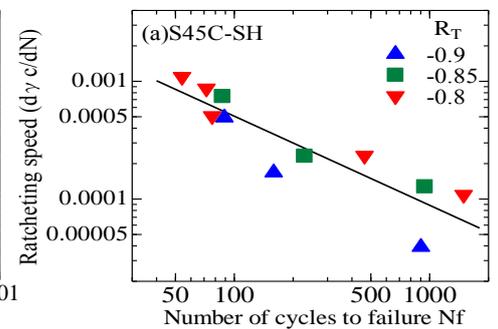


Fig.11 Relation between ratcheting speed and fatigue life

4. 結論

中炭素鋼 S45C とステンレス鋼 SUS316L を用い、荷重及び変位制御下で両振り及び静的ねじりをともなう低サイクルねじり疲労試験を行い、以下の結論を得た。

両振りねじり試験では寿命の大部分において S45C では繰返し硬化、SUS316L では高負荷では硬化挙動、低負荷では軟化挙動となり材料によって応力-ひずみ挙動は異なる。また、試験制御方式の相違は硬化、軟化挙動のパラメータを含む応力-ひずみ応答を用いることで、せん断応力、せん断ひずみのどちらを用いても統一的に評価可能である。

変位制御下において静的ねじりを付加した場合、その影響は平均応力のパラメータを用いて説明することができる。繰返し初期で応力差が生じ疲労寿命に少なからず影響を与えるが、その後の繰返し過程における応力緩和で平均応力が 0 に漸近するため、疲労寿命に対する影響は小さくなった。

一方、荷重制御下で静的ねじりを付加した場合、塑性ひずみの減少で両振りよりも硬化挙動となるものの、繰返し過程におけるラチェット変形の累積により静的ねじりのような破断延性の低下を招き、両振りよりも疲労寿命が短寿命となった。

参考文献

- [1] 程序,大川功,三角正明『中炭素鋼のねじり疲労における平均応力効果』
- [2] V.kliman et al., *Material science of engineering*,44,p73-79,(1980)
- [3] 桑田侑典,大川功,日本学術会議材料工学連合講演会講演論文集
- [4] 塚越光祐,大川功,日本材料学会第 61 期学術講演会論文集