

豊田高専専攻科 ○望月 優, 豊田高専 中島 正貴
LS Industrial Systems 鄭 在雄, 岐阜大工 植松 美彦, 戸梶 恵郎

Effect of Strength Level on Coaxing Effect of High Strength Steels

Yu MOCHIZUKI, Masaki NAKAJIMA,

Jae-Woong Jung, Yoshihiko UEMATSU, Keiro TOKAJI

1 緒 言

前報において、強度レベルの異なる三種類の高強度鋼におけるコーキシング効果について検討した。その結果、SCM435（引張強さ $\sigma_B=991\text{MPa}$ ）とSNCM439（ $\sigma_B=1226\text{MPa}$ ）ではコーキシング効果が見られたが、SUJ2（ $\sigma_B=2316\text{MPa}$ ）では認められなかった。こうした鋼種（強度レベル）によって異なるコーキシング効果の発現の機構について検討した結果、加工硬化やき裂先端の強化はその要因ではないと考えられた。また、他の機構としてひずみ時効が考えられるが、前報ではそれに対する検討は十分ではなかった。

そこで本研究では、高強度鋼のコーキシング効果の発現に及ぼすひずみ時効の影響とSUJ2における応力漸増試験で認められた内部起点型破壊について検討した。

2 実験方法

2.1 供試材および試験片 供試材は高強度鋼SCM435、SNCM439およびSUJ2である。熱処理後の機械的性質をTable 1に示す。引張強さおよびビッカース硬さは、SCM435、SNCM439、SUJ2の順に高い。疲労試験に用いた試験片形状は砂時計型で、最小断面部直径はSCM435では4mm、SNCM439では4.5mmおよびSUJ2では3mmである。また、SCM435およびSUJ2については研削加工による表面のまま試験に供した。SNCM439については、機械加工後エメリー紙で1500番まで研磨し、

バフ仕上げを行い試験に用いた。

2.2 実験方法 応力漸増試験には片持回転曲げ疲労試験機を用いた。実験室大気中において、繰返し速度 $f=53\text{Hz}$ で試験を行った。応力漸増試験における応力増分をSCM435とSNCM439では46MPa、SUJ2では50MPaとした。また、試験開始応力をSCM435とSNCM439ではそれぞれ疲労限度直下の442MPaおよび507MPaとし、SUJ2では疲労限度が現れないため、内部破壊応力域である800MPaと1050MPa、および遷移応力域である1200MPaとした。一段当りの繰返し数はSCN435とSNCM439では $5 \times 10^5 \sim 10^7$ 回、SUJ2では $2 \times 10^6 \sim 10^8$ 回である。

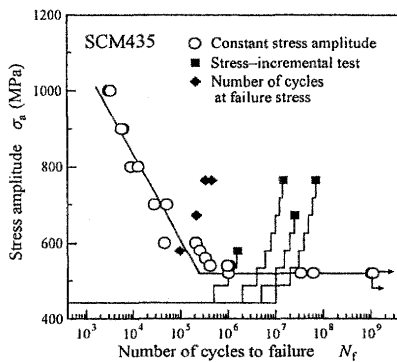
3 実験結果および考察

3.1 応力漸増試験結果 S-N曲線上にプロットされた応力漸増試験結果をSCM435、SNCM439およびSUJ2についてFig.1に示す。SCM435（Fig.1(a)）では、一段当りの繰返し数 N_s にかかわらず破断応力は580MPa~764MPaにそれぞれ上昇した。ただし、 $N_s=5 \times 10^5$ の場合、コーキシング効果はほとんど生じていないと考えられる。SNCM439（Fig.1(b)）においても、 N_s にかかわらず破断応力は737MPa~783MPaに増加した。一方、二段折れ曲がりS-N曲線が認められたSUJ2（Fig.1(c)）の場合、内部破壊の応力域である800MPaから開始した試験では、破断応力は $N_s=10^8$ に対して1100MPa、1050MPaから開始した試験では1100MPa~1300MPa、破壊形態が遷移する応力域である1200MPaから開始した試験では1300MPa~1350MPaであった。

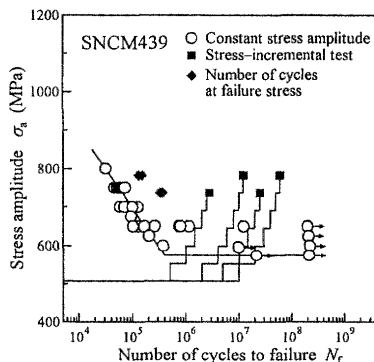
以上の結果から、SCM435とSNCM439では、破断応力は疲労限度よりも明らかに高い応力レベルであり、またそれぞれの破断応力における繰返し数も一定応力下の破断繰返し数よりも長寿命側である。それに対して、SUJ2では破断応力の上昇は認められないことから、コーキシング効果は生じていないと判断される。なお、応力漸増試験における破壊はSCM435およびSNCM439

Table 1 Mechanical properties.

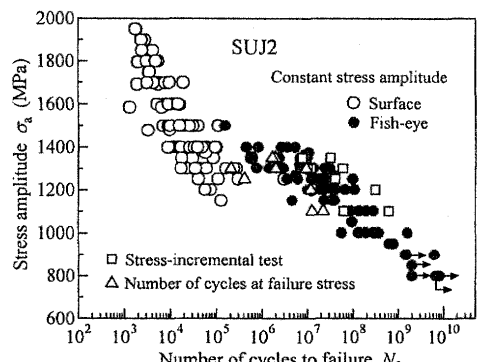
Material	0.2% proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile strength σ_B (MPa)	Elongation δ (%)	Vickers hardness HV
SCM435	902	991	17	326
SNCM439	1158	1226	10	379
SUJ2	-	2316	2	778



(a) SCM435



(b) SNCM439



(c) SUJ2

Fig.1 Stress-incremental test results plotted on S-N curves.

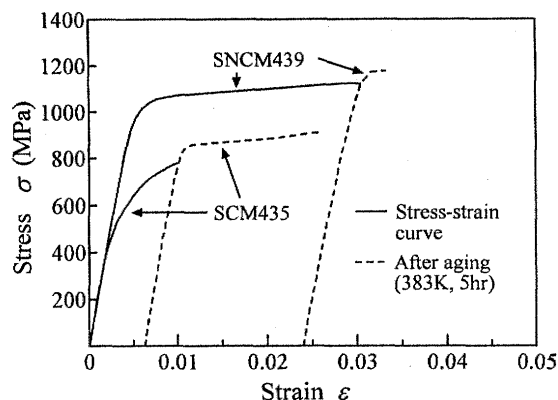


Fig.2 Strain aging ability in SCM435 and SNCM439.

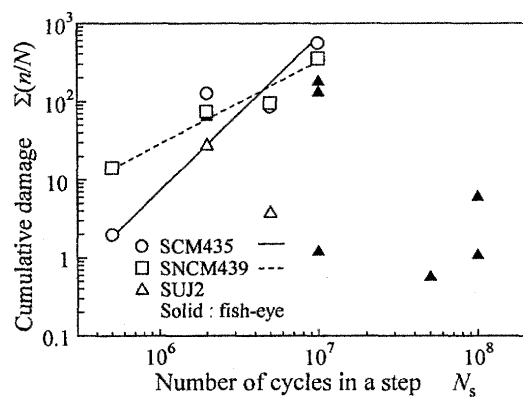


Fig.3 Cumulative damage as a function of number of cycles in a step, N_s .

では例外なく表面より発生した。SUJ2では1050MPaから開始した $N_s=2 \times 10^6$ および1200MPaから開始した $N_s=5 \times 10^6$ の場合を除いて、すべてfish-eyeを伴う内部起点型破壊であった。

3.2 ひずみ時効 応力漸増試験で破断した試験片について破断部近傍の硬さを測定した結果、試験前後の硬さに変化は認められなかった。このことから、SCM435およびSNCM439におけるコーキシング効果の発現は、加工硬化とは別の要因に起因することが示唆された。Sinclairは、本研究におけるSCM435とSNCM439の中間の強度レベルのSAE2340鋼 ($\sigma_B=1071\text{MPa}$) について、コーキシング効果の発現とその機構としてひずみ時効の寄与を示唆している。そこで、SCM435およびSNCM439について引張試験を行い、それぞれ1%および3%のひずみを付与した後、110℃で5時間時効を施した。その後、再び引張試験を行ったところ、Fig.2に示すように、SCM435では耐力が789MPaから858MPaに約8.7%上昇し、SNCM439では1133MPaから1173MPaに3.5%の上昇が見られた。これより両鋼についてひずみ時効能があることが認められ、コーキシング効果に対する寄与が示唆される。

3.3 マイナー則による解析 SCM435およびSNCM439の疲労限度に対する破断応力の比をとると、SCM435では疲労限度520MPaに対して破断応力は672~764MPaとなり、29~47%の増加となる。一方、SNCM439では、疲労限度575MPaに対して破断応力は737~783MPaとなり、その比は28~36%である。SinclairのSAE2340では、疲労限度586MPaに対する破断応力641~676MPaの比は9~15%であった。SAE2340鋼と比較してSCM435とSNCM439のコーキシング効果による破断応力の増加は

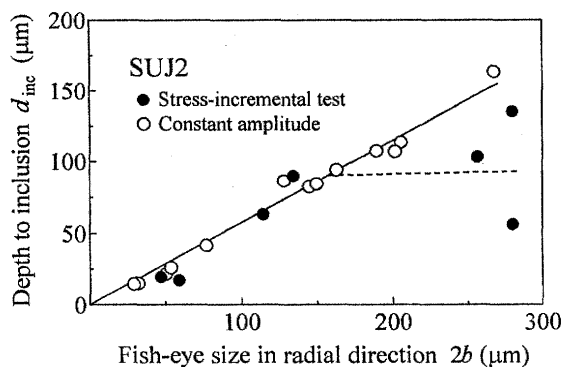


Fig.4 Relationship between d_{inc} and $2b$.

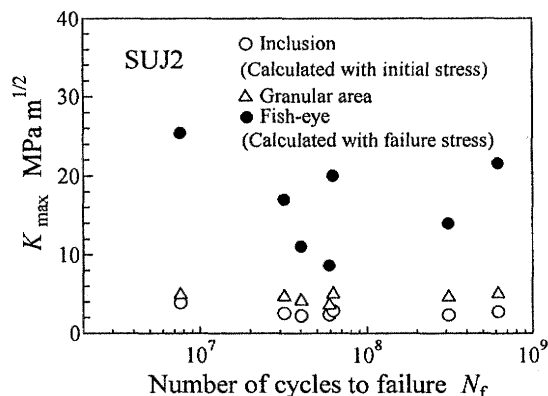


Fig.5 K_{max} for inclusion, granular area and fish-eye as a function of fatigue life, N_f .

より著しい。これらの応力漸増試験結果について、マイナー則を用いて強化の傾向を調べた。Fig.3は一段当りの繰返し数 N_s に対して累積損傷値をプロットした結果である。ひずみ時効による強化は繰返し数に依存しており、 N_s の増加に伴い促進されると考えられる。Fig.3より、SCM435およびSNCM439において累積損傷値はすべて1を超えており、さらに N_s の増加に伴い、累積損傷値は直線的に大きくなる傾向が認められた。これは、応力漸増試験を行ったことによって疲労強度が改善されていること、また N_s が大きくなるにしたがって、ひずみ時効が促進されていることを示唆している。一方、SUJ2では累積損傷値に大きなばらつきが見られるが、累積損傷値は N_s の大きい領域でも小さい値をとっており、強化の傾向は見られず、繰返しに伴うひずみ時効が発現していないことを示している。

3.4 応力漸増試験における内部破壊の定量的解析

SUJ2の破面に見られたfish-eyeの半径方向寸法 $2b$ と介在物深さ d_{inc} との関係を求めた。Fig.4に一定応力下の結果と併せて示す。一定応力下における寸法比はfish-eyeの大きさに依存せず一定である。一方、応力漸増試験で認められたfish-eyeでは、特にfish-eye寸法が大きい場合、介在物深さに対してfish-eyeが著しく半径方向に成長している。

Fig.5に介在物、粒状領域およびfish-eyeの応力拡大係数 K_{max} と破断繰返し数 N_f との関係を示す。fish-eyeの K_{max} は大きくばらつくが、介在物および粒状領域の K_{max} は破断繰返し数に依存せずほぼ一定である。その値はそれぞれ $K_{max}=2.21\sim3.88\text{MPa m}^{1/2}$ および $K_{max}=3.54\sim5.04\text{MPa m}^{1/2}$ となっている。これらの値は一定応力下のそれとほぼ同様である。(結言および参考文献は省略)