DP 鋼の切欠感度に及ぼす微視組織の影響*

皮籠石 紀雄^{*1}, 西谷 弘信^{*2}
豊 廣 利 信^{*3}, 上福元 博幸^{*4}

Effect of Microstructure on the Fatigue Notch Sensitivity in DP Steel

Norio KAWAGOISHI, Hironobu NISITANI,
Toshinobu TOYOHRO and Hiroyuki KAMIFUKUMOTO

Rotating bending fatigue tests of three kinds of dual-phase steel were carried out on specimens with a circumferential notch in order to investigate the influence of microstructure on the fatigue strength of notched bars. The results obtained were discussed based on linear notch mechanics. The morphology of the slip observed at the fatigue limit for crack initiation σ_{w1} is of a planar-type, which is due to the cyclic softening behavior in all of the DP steel. On the other hand, the morphology of cracks observed at the fatigue limit for crack propagation σ_{w2} is strongly influenced by microstructure, and the deflection of crack pass is larger in a coarse ferrite grain than in a fine one. The notch sensitivities in the DP steel are high for crack initiation and low for crack propagation.

Key Words: Fatigue, Rotating Bending, Dual-Phase Steel, Notch Sensitivity, Microstructure Nonpropagating Crack, Linear Notch Mechanics, Cyclic Softening

1. 緒 言

フェライトとマルテンサイトからなる DP 鋼のき裂発生過程においては、くしの刃状の直線的な形態を呈するすべり帯が観察され、焼なました材料で観察される幅の広いすべり帯⁽¹⁾とは顕著な相違が認められる⁽²⁾⁽³⁾。そして、このようなすべり挙動の相違は、マルテンサイトの分布形態や構成相間の硬度差などの影響を受け、マルテンサイトによるフェライトの変形拘束が大きくなるほどすべり帯は局所化することが明らかにされている⁽²⁾。また、き裂の伝ば挙動もマルテンサイトの分布形態により影響を受け、マルテンサイトがフェライト中に島状に分布する孤立材⁽²⁾ではき裂はマルテンサイトをさけながらフェライト中をぬって伝ばするのに対し、その逆の組織形態である連結材⁽²⁾ではマルテンサイトを通しながら伝ばする⁽⁴⁾。

以上のように、微視組織が、き裂発生および伝ば挙動のいずれにも影響すること、また疲労限度への影響

が特に顕著である⁽³⁾ことを考慮すると、組織の相違は切欠感度にも敏感に反映されることが予想される。

そこで本研究では、フェライト・マルテンサイト二相鋼 (DP 鋼) の微視組織の分布形態および寸法を変えて、切欠材の疲労強度に及ぼす微視組織の影響を調べ、さらに著者の一人が提案した線形切欠力学⁽⁵⁾に基づき、DP 鋼の切欠感度をこれまでに報告された数種の鉄鋼材料のそれと比較検討した。

2. 材料、試験片および実験方法

用いた材料は、S15C 圧延丸棒である。表 1 に素材の化学成分を示す。

素材に図 1 に示す熱処理を行い、3 種類の組織を有する DP 鋼を作製した。図 2 に、熱処理により得られた材料の微視組織写真を示す。(a)は孤立材、(b)、(c)はフェライト寸法を変えた連結材である。以下では(a)、(b)、(c)の各材料を、それぞれ IM 材、CM

表 1 化学成分

	%				
	C	Si	Mn	P	S
S15C	0.15	0.15	0.41	0.014	0.008

* 平成 4 年 4 月 2 日 第 69 期通常総会講演会において講演、原稿受付 平成 4 年 8 月 17 日。

*¹ 正員、鹿児島大学工学部 (〒890 鹿児島市郡元 1-21-40)。

*² 正員、九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

*³ 正員、都城工業高等専門学校 (〒885 都城市吉尾町 473-1)。

*⁴ 学生員、鹿児島大学大学院 [現在：ソニー(株)]。

(F)材, CM(C)材と呼ぶ。平均フェライト結晶粒径は, IM材で約 $35\ \mu\text{m}$, CM(F)材で約 $11\ \mu\text{m}$, CM

(C)材で約 $88\ \mu\text{m}$ である。表2に各材の機械的性質を示す。

図3に試験片の形状, 寸法を示す。本実験では, 切欠半径 $\rho=20\ \text{mm}$ ($K_t=1.04$, K_t : 応力集中係数)の結果から, 平滑材 ($K_t=1$) における疲労限度の値の推定および表面状態の評価を行った。試験片は, 機械加工の後すべて直径当たり約 $30\ \mu\text{m}$ 電解研磨してから実験に供した。

き裂等の表面状態の観察は直接あるいはレプリカ法により光学顕微鏡を用いて行い, 疲労限度の決定は, 10^7 回を基準寿命とし, 応力レベルのきざみを, IM材で $5\ \text{MPa}$, CM(F)材, CM(C)材で $10\ \text{MPa}$ として行った。

実験に用いた試験機は, 小野式回転曲げ疲労試験機 (容量 $15\ \text{N}\cdot\text{m}$, 回転数約 $50\ \text{Hz}$) である。

3. 実験結果および考察

3.1 疲労限度における表面状態 図4は各材の $\rho=20\ \text{mm}$ の試験片に疲労限度の応力を 10^7 回負荷した後の表面状態を示すレプリカ写真である。いずれの材料でも, すべり帯およびき裂はフェライト粒内もしくはフェライト粒界近傍で発生し, 焼なまし材でみられる幅の広いすべり帯⁽¹⁾とは異なるくしの刃状を呈しており, すべりが局所化しているのが観察される。このようなすべり帯の特徴は, 時効材⁽⁶⁾や予ひずみ

図1 各材の熱処理条件

(a) IM

(b) CM(F)

(c) CM(C)

図2 各材の組織写真

表2 機械的性質

Material	$\sigma_{0.2}\text{MPa}$	$\sigma_B\text{MPa}$	$\sigma_T\text{MPa}$	$\psi\%$
CM(F)	473	834	1365	50.9
CM(C)	418	761	930	24.0
IM	452	728	1150	46.7

(a) 平滑材

(b) 切欠材

図3 試験片の形状・寸法 (mm)

材^⑦にみられるものであり、繰返し軟化挙動に起因した現象と考えられる。また、発生したき裂はマルテンサイトに成長を阻止されており、疲労限度は数結晶粒程度の微視的停留き裂の伝ば限界で決まることがわかる。

図5に $\rho=0.1\text{ mm}$ の切欠材の切欠底表面で観察した停留き裂の写真を示す。各材ともき裂は切欠底全周に及ぶが、き裂形態は組織の影響を反映し、CM(F)

材、CM(C)材、IM材の順にき裂の屈曲の程度が大きくなる。また、いずれの材料でも破面のこすり合いにより生じたと思われるフレッティング酸化物が表面に多く付着している。

なお、IM材の場合、酸化物の付着が特に多く、破断限界の応力 σ_{w2} を 10^7 回負荷した後の切欠底表面は大部分がこのような酸化物により覆われ、き裂形態の観察が困難であった。そのため、図5に示した写真は、

(a) IM (b) CM(F) (c) CM(C)

図4 疲労限度の応力を 10^7 回繰返した後の表面状態(平滑材, $\leftrightarrow$ 軸方向)

(a) IM (b) CM(F) (c) CM(C)

図5 切欠材($\rho=0.1\text{ mm}$)における停留き裂

(a) CM(C)平滑材

(b) IM切欠材

(c) CM(F)切欠材

(d) CM(C)切欠材

図6 停留き裂のSEM写真

表 3 疲労試験結果

Material	$\sigma_{e,2}$ MPa	σ_e MPa	d mm	t mm	ρ mm	Kt	σ_{w1} MPa	σ_{w2} MPa	$Kt\sigma_{w1}/\sigma_{we}$	$Kt\sigma_{w2}/\sigma_{we}$
CM(F)	473	834	5	2.5	20	1.04	410	-	1	-
				0.1	1.0	1.41	310	-	1.03	-
					0.3	1.89	240	290	1.06	1.29
CM(C)	418	761	5	2.5	20	1.04	320	-	1	-
				0.1	1.0	1.41	270	-	1.14	-
					0.3	1.89	210	260	1.19	1.48
IM	452	728	5	2.5	20	1.04	245	-	1	-
				0.1	1.0	1.41	215	-	1.19	-
					0.3	1.89	165	210	1.22	1.55
S10C(A)	218	388	5	0.2	100	1.01	191	-	1	-
				0.1	1.0	1.41	157	-	1.15	-
					0.3	1.89	137	142	1.34	1.39
S10C(P)	225	444	5	0.2	100	1.01	240	-	1	-
				0.1	1.0	1.41	181	-	1.06	-
					0.3	1.89	157	162	1.22	1.26
S50C (Q.T.)	1132	1246	5	0.2	10	1.07	578	-	1	-
				0.1	0.3	1.89	363	-	1.11	-
					0.1	2.72	284	-	1.25	-
					0.05	3.54	235	284	1.35	1.65

CM(F)材とCM(C)材では σ_{w2} の応力を、またIM材では σ_{w2} の応力より50 MPa低い応力を、それぞれ 10^7 回繰返した場合に観察された停留き裂である。

図6に停留き裂の破面写真(液体窒素で脆性破壊させたもの)を示す。(a)はCM(C)材の平滑材の疲労限度 σ_{w0} で生じた停留き裂、(b)、(c)、(d)はそれぞれ各材の切欠材の σ_{w2} の応力下で生じた停留き裂の結果である。表面観察の結果と同様に、組織を反映して各材ごとに異なるき裂形態を呈している。

3・2 各材の切欠強度 表3に各材の疲労試験結果を示す。表中、 σ_{w1} は、平滑材(本実験では $\rho=20$ mmの試験片で評価)の疲労限度で認められる微視的停留き裂(図4)と同程度の停留き裂が発生する限界の応力を、 σ_{w2} は、切欠底全周に及ぶ停留き裂(図5)の伝ば限界の応力を意味している。同表には、比較のため、幅の広いすべり帯を生じるS10C焼なまし材[S10C(A)、今回の素材と化学成分がほぼ等しい炭素鋼(0.13%C)焼なまし材]と、それに予ひずみを付与したもので、DP鋼と同様のくしの刃状のすべり特性を示すS10C予ひずみ材[S10C(P)]⁽⁸⁾、さらに、硬い材料の例としてS50C焼入れ焼戻し材[S50C(Q.T.)]⁽⁹⁾の結果も示してある。

図7に各材の σ_{w1} 、 σ_{w2} と K_t の関係を示す。図4、5に示したように、いずれの材料でも、フェライト粒内

図 7 σ_{w1} 、 σ_{w2} - K_t

もしくは粒界近傍に発生したき裂は抵抗の大きいマルテンサイトで阻止され、 σ_{w1} 、 σ_{w2} はき裂伝ば限界で決まる。しかし、孤立材の場合、き裂はマルテンサイトをう回して、フェライト中を伝ばするのに対し、連結材ではマルテンサイトを貫通しながら成長する⁽⁹⁾。この

ことを反映して、 σ_{w1} , σ_{w2} は連結材より孤立材のほうが低い。IM 材と S 10 C 予ひずみ材の引張強度 σ_B はかなり異なるにもかかわらず両材の σ_{w1} はほぼ等しい。これは、両材で、耐力 $\sigma_{0.2}$ はほぼ等しくしかもすべり帯はくしの刃状に局所化しき裂発生はフェライト中であるなど、き裂発生過程が類似していることと関係しているものと考えられる。DP 鋼の分岐点 ρ_0 は 0.7 mm 強であり、焼なまし材のそれよりやや大きい。そこで、線形切欠力学⁽⁵⁾に基づき、DP 鋼の切欠感度について検討する。

図 8 に各材の $K_t\sigma_{w1}/\sigma_{w0}$, $K_t\sigma_{w2}/\sigma_{w0}$ と $1/\rho$ の関係を示す。き裂発生に対する切欠感度は、すべての DP 鋼ではほぼ等しく高強度材と同程度に敏感である。これは、前述のように、いずれの材料でもき裂はフェライト部に発生し、しかも局所化していることからわかるように、繰返し軟化特性が関係しているものと考えられる。このことは、これらの結果が、繰返し軟化によって、すべりが局所化する S 10 C 予ひずみ材の結果とほぼ等しいことから言える。

一方、破断に対する切欠感度は、軟かい材料と同程度で、かなり鈍感である。特に IM 材と CM(C) 材は S 10 C 焼なまし材よりさらに鈍感である。これは、き裂の成長経路に、き裂伝ばに対する抵抗の大きいマルテンサイトが存在することや、き裂の屈曲に関連したき裂の閉口が大きいこと⁽¹⁰⁾と関係しているものと考えられる。

このように、 σ_{w1} はすべりが局所化するフェライト部の強度を反映して静強度の割に上昇しないのに対し、 σ_{w2} は組織の分布形態およびき裂の形態に起因した閉口応力の上昇を反映して大きくなるのが DP 鋼の ρ_0 が焼なまし材のそれより大きくなった背景だと考えられる。

4. 結 論

フェライトとマルテンサイトの分布形態および組織寸法を変えた 3 種類の DP 鋼を用いて、回転曲げ疲労試験を行い、切欠感度に及ぼす微視組織の影響を検討した。そして DP 鋼の切欠感度を線形切欠力学により数種の鉄鋼材料における切欠感度と比較した。

図 8 $K_t\sigma_{w1}/\sigma_{w0}$, $K_t\sigma_{w2}/\sigma_{w0}$ - $1/\rho$

得られた結果を要約すると次のようになる。

(1) DP 鋼のき裂発生に基づく疲労限度 σ_{w1} (平滑材の疲労限度で認められる微視的停留き裂と同程度の停留き裂が発生する限界応力) で観察されるすべり帯は、すべての材料で繰返し軟化特性を反映してくしの刃状の直線的形態である。一方、鋭い切欠材における停留き裂の伝ば限界応力 σ_{w2} で観察されるき裂の形態は組織の影響を大きく受け、連結材ではマルテンサイトを貫通し、孤立材ではマルテンサイトをさけながらフェライト中を伝ばする。そして、き裂の屈曲は、連結材より孤立材において、さらに細粒材より粗粒材において大きい。

(2) DP 鋼の場合、き裂発生に対してはすべりの局所化に起因して、切欠きに敏感である。すなわち、 σ_{w1} における切欠感度は DP 鋼と同じき裂発生過程をもつ炭素鋼予ひずみ材のそれとほぼ等しい。一方、き裂伝ば限界に対してはかなり鈍感である。

文 献

- (1) 西谷・高尾, 機論, 40-340 (1974), 3254.
- (2) 続木・ほか 3 名, 機論, 46-408, A (1980), 870.
- (3) 皮籠石・ほか 2 名, 機論, 57-537, A (1991), 1043.
- (4) 皮籠石・ほか 2 名, 機論, 57-544, A (1991), 2866.
- (5) 西谷, 機論, 49-447, A (1983), 1353.
- (6) 西谷・田中, 機論, 46-403, A (1980), 266.
- (7) 西谷・西田, 機論, 39-319 (1973), 798.
- (8) 西谷・野村, 機論, 41-350 (1975), 2761.
- (9) 西谷・千代, 機論, 40-329 (1974), 41.
- (10) Ramage, R. M., ほか 3 名, Met. Trans., A, 18 (1987), 1291.