SMF3035HIP 焼結材の回転曲げ疲労 に対する線形切欠力学による評価*

西谷 弘 信^{*1}, 藤 崎 渉^{*2}
田 中 哲 志^{*3}, 田 中 洋 征^{*2}

Examination of Rotating Bending Fatigue of HIP-sintered SMF 3035 by Linear Notch Mechanics

Hironobu NISITANI, Wataru FUJISAKI,
Satoshi TANAKA and Hiroyuki TANAKA

Fatigue tests of HIP'ed SMF3035 were conducted on specimens with a circumferential groove whose diameters were different. As a result, it is successfully confirmed that linear notch mechanics (LNM) is available for the examination of notch effects in the fatigue of HIP'ed SMF3035. The master curves useful for the estimation of notch effects in HIP'ed SMF3035 were also produced by arranging the experimental data, based on the LNM. The main results obtained are as follows: (1) Estimation of σ_{w1} , σ_{w2} of HIP'ed SMF3035 with arbitrary shape is performed well by the LNM by using the master curve of $K_t\sigma_{w1}$, $K_t\sigma_{w2}$ vs. $1/\rho$. (2) There is some relationship between the notch radius of the branch point ρ_0 and the static stress-strain curve. (3) The notch radius of the branch point ρ_0 is almost 0.5 mm, which is larger than that of steel having the same carbon content, and this may be caused by the different features of the pearlite structure in these two materials.

Key Words: Fatigue, Sintered Materials, Notch, Notch Effect, Notch Sensitivity, HIP'ed SMF3035, HIP, Linear Notch Mechanics, Branch Point, Rotating Bending Fatigue

1. 緒 言

HIP 法は、材料中のほとんどの欠陥を消滅させることおよび均質な合金の製造が可能なることにより品質の安定した製品を得ることができるため、高付加価値と高機能化を指向する新素材の開発において有力な製造技術の一つとして注目されている^{(1)~(4)}。

HIP 処理した焼結材料 (HIP 焼結材) の疲労強度特性を知ることは焼結材料を実際に使用する上で重要であるが、一般の溶製鋼材料の疲労に関するデータの蓄積に比べると、HIP 焼結材の疲労強度特性はまだまだ少ないようである⁽²⁾。

そこで著者らは、先に HIP 焼結材の疲労強度特性を明らかにする手始めとして、SMF 3035 HIP 焼結材の平滑試験片および切欠試験片の回転曲げ疲労挙動を調べ、平滑材のき裂の発生および伝ば、ならびに他の材料と本材料の切欠感度の相異点などについて報告した⁽⁵⁾。

本報では、さらに進めて下記の二つの観点から、大形試験片 (直径 10 mm) と小形試験片 (直径 5 mm) による実験を行って、HIP 焼結材の疲労における切欠効果に対する線形切欠力学⁽⁶⁾による評価を試みた。

(1) HIP 焼結材の密度は真密度に近いが、完全な真密度を得ることは難しく、通常微小欠陥を多く含んでいる。この場合の疲労における切欠効果の寸法効果について明らかにすること。

(2) HIP 焼結材ならびに一般の溶製鋼材 (炭素鋼) の分岐点の切欠半径 ρ_0 と静的応力-ひずみ曲線との関係について検討すること。

2. 供試材、試験片および実験方法

本実験に用いた原料粉は、鉄粉 (神戸製鋼所製アトメル 300 M) と、グラファイト (日本黒鉛工業製 ACP) を V ミルで混合したものである。鉄粉の平均粒径は 72 μm 、グラファイトの平均粒径は 15 μm である。原料粉の化学成分と HIP 焼結処理後の機械的性質を表 1 に示す。

試験片製作の手順を表 2 に示す。なお素材を作るための HIP 焼結処理に先立って 294 MPa, 70 S の CIP 処理を行った。供試材は 1150°C, 98 MPa, 3 h の HIP 処理後、これから 25 mm 角の四角柱に切り出し焼な

* 平成元年 11 月 8 日 材料力学講演会において講演、原稿受付 平成 2 年 5 月 22 日。

^{*1} 正員、九州大学工学部 (〒813 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

^{*2} 正員、福岡県工業技術センター機械電子研究所 (〒807 北九州市八幡西区則松 3-6-1)。

^{*3} 正員、九州産業大学工学部 (〒813 福岡市東区松香台 2-3-1)。

らしを行ったのち、各試験片を製作した。焼結密度は 7.82 g/cm^3 である。

図1に大形試験片の形状寸法を示す。平滑試験片(a)の切欠係数は約1.05であり実質上平滑試験片とみなすことができる。切欠試験片(b)の切欠きは 60° V形で、切欠半径 $\rho=1.0, 0.3, 0.1 \text{ mm}$ 、切欠深さ $t=0.5 \text{ mm}$ である。小形試験片では、最小断面の直径はすべて 5 mm であり、切欠材の切欠深さ t 、切欠半径 ρ は大形試験片と同じである⁽⁵⁾。試験片は製作後、すべて電解研磨で表面層を $20 \mu\text{m}$ 程度取り除いたのち疲労試験に供した ($\rho=0.1 \text{ mm}$ のみは $5 \mu\text{m}$ 程度除去)。電解研磨液はりん酸 2600 cc にゼラチン 50 g 、しゅう酸 50 g を溶かしたものである。切欠試験片の σ_{w1} の確認は $N=1 \times 10^7$ 後の切欠底表面を光学顕微鏡 ($\times 400$) で観察することにより行った。疲労試験機は容量 15 および $98 \text{ N}\cdot\text{m}$ の小野式回転曲げ試験機を用いた。繰返し速度はいずれも約 3000 rpm である。

表 1 化学成分、機械的性質

Chemical composition								Mechanical properties				
%								MPa			%	
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	σ_{B}	σ_{S}	σ_{T}	δ	ψ
0.80	<0.01	0.21	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	330	507	717	19	34

表 2 試験片製作手順

CIP (294MPa, 70s)	→	HIP (1150°C, 98MPa, 3h)	→	Cutting →
Normalizing (820°C, 2h)	→	Machining	→	Annealing in vacuum (600°C, 1h)

図 1 大形試験片の形状寸法

3. 実験結果および考察

3.1 各試験片での σ_{w1} , σ_{w2} 大形試験片、小形試験片の実験結果から本材料の σ_{w1} , σ_{w2} と応力集中係数 K_t の関係を図2に示す。ここで、 σ_{w1} は平滑材の疲労限度で認められるのと同じ程度の疲労被害が生ずる応力を意味する⁽⁷⁾。 σ_{w2} はいわゆる停留き裂が存在する範囲における破断限界応力である⁽⁷⁾。

この図によると直径 5 および 10 mm の試験片の分岐点の切欠半径 ρ_0 ⁽⁸⁾はともに約 0.5 mm である。分岐点で ρ が一定となる事実は、切欠材の疲労限度を推定する根拠を与えるものである。 σ_{w2} の値は ρ_0 が小さいほど応力集中係数 K_t に依存して大幅に低下するので、 ρ_0 の値は材料の切欠感度を検討する際に重要な意味をもっている。炭素量が同程度の炭素鋼 S50C 焼なまし材の ρ_0 は約 0.25 mm ⁽⁸⁾であり本材料の ρ_0 はこれに比べて大きくなっている。すなわち SMF 3035 HIP 焼結材の疲労限度 (特に σ_{w2}) は炭素量が同程度の炭素鋼に比べて切欠きに対して鈍感である。このことは HIP 焼結材の大きな特徴と言える。

図3に大形試験片 ($\rho=0.1 \text{ mm}$) の σ_{w1} 近傍で見られる切欠底の停留き裂の例を示す。

3.2 線形切欠力学による整理 著者の一人は線形切欠力学⁽⁶⁾の概念を用いることにより、炭素量や熱処理の異なる多くの炭素鋼やアルミ合金その他の材料で、 σ_{w1} および σ_{w2} が切欠底の弾性最大応力 σ_{max} と切欠半径 ρ のみによって規定されることを示した。図4に線形切欠力学の論理の流れを略記し、以下に概説す

図 2 σ_{w1} , σ_{w2} - K_t 曲線

る。

(1) ρ と $\sigma_{\max}$ が等しい二つの切欠き（直径や切欠深さは互いに異なってよい）があれば、 ρ が等しいことにより応力こう配 χ もほぼ等しくなり、さらに $\sigma_{\max}$ が等しいことにより切欠底の弾性体と仮定したときの応力場はほぼ等しくなる⁽¹²⁾。

(2) したがって Responce の等価性により塑性域寸法が $\rho/2$ 程度以下ならば切欠底近傍の弾塑性応力場も同様にほぼ等しくなる⁽¹³⁾。

(3) 物理的現象（例えば、き裂の発生、き裂の停留、脆性・延性破壊の遷移等）に寄与する領域（プロセス・ゾーン）が同一の弾塑性応力場のなかにあれば同一の物理的現象が起こるはずである⁽⁹⁾⁽¹⁴⁾。

表 3 は直径 5 および 10 mm の試験片の切欠形状と σ_{w1} , σ_{w2} , ならびに切欠底の弾性最大応力 $K_t\sigma_{w1}$, $K_t\sigma_{w2}$ の実験結果をまとめたものである。 K_t は体積力法によ

る値を用いた⁽⁹⁾⁽¹¹⁾。

表 3 の結果を線形切欠力学により整理すれば図 5 のようになる。 σ_{w1} , σ_{w2} と K_t の関係は図 2 のように直径依存性を示すが、 $K_t\sigma_{w1}-1/\rho$ 関係および $K_t\sigma_{w2}-1/\rho$ 関係は直径に無関係となる（図 5）。

SMF 3035 HIP 焼結材の相対密度は 99.7 % で、組織中に直径 1 μm 程度以下の空孔を無数に含んでいるが、図 5 からわかるようにそれらの欠陥（空孔）は上記の線形切欠力学の流れに影響していない。これはまた、HIP 焼結材が一般の炭素鋼のように健全材として同等に取扱えることを意味している。すなわち、HIP 焼結材においても線形切欠力学が適用でき、図 5 を用いれば任意の寸法形状の疲労限度を実用上、十分精度よく評価することができる。

3・3 切欠感度の比較 本材料と一般の炭素鋼および一般の焼結材料の $K_t\sigma_{w2}/\sigma_{w0}-1/\rho$ 関係を図 6 に示

図 3 切欠底の微視的および巨視的停留き裂

表 3 切欠材の σ_{w1} , σ_{w2} , $K_t\sigma_{w1}$ および $K_t\sigma_{w2}$

t mm	ρ mm	d mm	K_t	σ_{w1} MPa	σ_{w2} MPa	$K_t\sigma_{w1}$ MPa	$K_t\sigma_{w2}$ MPa
—	2.0	5	1.04	220	—	229	—
0.5	1.0	5	1.59	150	—	239	—
		10	1.87	125	—	234	—
	0.3	5	2.39	105	130	251	311
		10	2.90	85	105	247	305
	0.1	5	3.80	65	125	247	475
		10	4.50	60	100	270	450

図 4 線形切欠力学の論理の流れ図

す。これによると、S10CからS50Cまでの焼なまし材およびS50C焼入れ材の傾向は引張強さが大きいほど $K_t\sigma_{w2}/\sigma_{w0}$ は小さい、すなわち切欠きに対して敏感になっている⁽⁹⁾。図6中の斜線は岸本らによる一般の焼結材料SMF4種 ($\sigma_B=216\sim 480$ MPa, 焼結密度 $5.94\sim 6.68$ g/cm³, データ数6) の結果⁽¹⁵⁾ (σ_{w2}) をまとめたものである。これが他の材料より上側にきている理由は、欠陥の影響が σ_{w0} に対して大きく σ_{w2} に対して小さいためである⁽⁵⁾。本材料では一般の焼結材料SMF4種とは異なり欠陥の影響がほとんど認められ

ないので、本材料の σ_{w2} は引張強さが同程度の一般の炭素鋼の σ_{w2} ⁽⁹⁾ と同様の傾向を示している。

本材料と一般の炭素鋼の $K_t\sigma_{w1}/\sigma_{w0}-1/\rho$ 関係を図7に示す。本材料は σ_{w1} に関しては一般の炭素鋼のそれより多少切欠きに敏感である。このことはき裂発生に関係する領域が他の材料より小さいことに起因していると思われる。

3.4 ρ_0 と静的応力-ひずみ曲線の関係 図8に

図5 σ_{w1} , σ_{w2} の線形切欠力学による表示

図6 本材料と一般炭素鋼の $K_t\sigma_{w2}/\sigma_{w0}$ と $1/\rho$

図7 本材料と一般炭素鋼の $K_t\sigma_{w1}/\sigma_{w0}$ と $1/\rho$ の関係

図8 本材料とS50C焼なまし材の σ_{w1} , σ_{w2} と応力集中係数

本材料と S 50 C における σ_{w1} , σ_{w2} と K_t の関係を比較して示す。 σ_{w1} は切欠底にき裂が発生する条件により決まり、一結晶粒程度の領域が関係するものと思われる。 σ_{w2} は、切欠底に発生したき裂の先端にさらにき裂が成長して行くための条件により決まり、ストライエーションの存在からも推定できるように幅が結晶粒よりはるかに小さい線状領域の平均的性質に關係するものと思われる。 ρ_0 はこのように異なる寸法の領域が關係する σ_{w1} と σ_{w2} によって決まるので、原理的には疲労実験により決定することが必要である⁽¹⁶⁾。

しかしながら、 ρ_0 が静的応力-ひずみ曲線の關係からどの程度推定できるか⁽¹⁷⁾を検討しておくことは実用上有意義であると思われる。同一の材料においては、上記の σ_{w1} と σ_{w2} に關係する領域が ρ と σ_{max} により規定されている弾塑性応力場の領域より小さければ切欠底の塑性変形挙動もほぼ同一であるので、その他の形状寸法にほぼ無關係に同一の現象を示す。一方、 ρ が同一ではあるが異なる材料間では、当然のことながら σ_{max} を同一にしても現象は同一とはならない。しかし、弾性最大応力 σ_{max} を下降伏応力 σ_{sl} で除した相対応力により比較すると、 σ_n が多少異なる材料であっても疲労現象がそうすることがある。後藤らは S Cr 440, SCM 435, S 45 C のき裂伝ば抵抗と相対応力-ひずみ曲線に良い相關關係があることを報告している⁽¹⁸⁾。

図 9 は本材料と S 20 C, S 50 C 焼なまし材の相対応力-ひずみ曲線である。これによると、本材料と S 20 C でほぼ同様な傾向を示すことがわかる。本材料と S 20 C の ρ_0 は 0.5 mm, S 50 C のそれは 0.25 mm である。

図 9 本材料と S 20 C, S 50 C 焼なまし材の相対応力-ひずみ曲線

このことから判断すると分岐点の切欠半径 ρ_0 と相対応力-ひずみ曲線とが関連しているものと思われる。

次に、図 9 に見られるように本材料と S 50 C とで相対加工硬化が異なる理由を、互いの組織を比較して検討する。図 10(a) は HIP 材と S 50 C 材の組織写真である。熱処理はともに 820°C, 2 h 保持の焼ならしである。この写真から、HIP 材のほうが炭素量が同程度の炭素鋼 S 50 C に比較してフェライト地がより多いことがわかる。さらに、この写真中央部を拡大した図 10(b) から、本材料は S 50 C に比較してパーライト中のセメンタイトの間隔は粗で、方向性は不規則に乱れがちとなっていることがわかる。また、パーライトとフェライトの境界が不明確で入り乱れた形になっている。図 11 は本材料と S 50 C において観察したなかで最も密なパーライトの SEM 写真である。本材料のパーライト中のセメンタイトの長さは短く、間隔は粗

Normalized: 820°C, 2 h, air cooled

図 10 本材料と S 50 C 焼ならし材の組織写真

図 11 本材料と S 50 C 焼ならし材の組織写真 (SEM)

であり、このことが加工硬化率の低下に関係していると考えられる。

このような両者の組織の差異による事情が本材料の σ_B や σ_{w1} が炭素量が同程度のS 50 Cのそれより低下している原因となっていると考えられる。一方、 σ_{w2} は本材料とS 50 Cでほぼ等しくなる。このことにより本材料の ρ_0 は0.5 mmと、S 50 Cの $\rho_0 \cong 0.25$ mmより大きくなっていると考えられる。

4. 結 論

試験片の形状寸法を変えたSMF 3035 HIP焼結材の回転曲げ疲労における切欠効果を、線形切欠力学の立場から検討した結果、次の結果が得られた。

(1) HIP焼結材においても線形切欠力学によって σ_{w1} , σ_{w2} がよく整理される。 $K_t\sigma_{w1}$, $K_t\sigma_{w2}$ と $1/\rho$ の関係のマスタカーブによって任意の形状寸法のHIP焼結材の疲労限度を評価することができる。

(2) SMF 3035 HIP焼結材, S 20 C焼なまし材, S 50 C焼なまし材を比較した結果によれば、相対応力-ひずみ曲線が似ていると分岐点の切欠半径 ρ_0 も似ている。すなわち相対応力-ひずみ曲線により異なる材料での ρ_0 をある程度推定できる可能性がある。

(3) 本材料の ρ_0 が炭素量が同程度の一般の炭素

鋼の ρ_0 より大きいのは、パーライトの特徴と加工硬化の関係によると推定される。

終わりに、実験に協力された(株)神戸製鋼所、九産大卒研究生の湯浅、木村、永田、吉村君に感謝する。なお、この研究は平成元年度通産省地域技術活性化事業の一環として行われたものである。

文 献

- (1) 滝川、塑性と加工, 27-309 (1986), 1138.
- (2) 萩原・ほか2名, 鉄と鋼, 72 (1986), 685.
- (3) 脇平・森本, 機械技術, 31-11 (1988), 61.
- (4) 真島・ほか4名, 金属学会誌, 52-11 (1988), 1113.
- (5) 西谷・ほか3名, 機論, 55-520, A (1989), 2382.
- (6) 西谷, 機論, 49-447, A (1983), 1353.
- (7) 西谷・田中, 機論, 50-451, A (1984), 301.
- (8) 西谷編, 疲労強度学, (1985), 48, オーム社.
- (9) 西谷・ほか3名, 機論, 54-503, A (1989), 1293.
- (10) 西谷・遠藤, 機論, 50-463, A (1985), 784.
- (11) Nisitani, H., Noda, N., *Eng. Fract. Mech.*, 20 (1984), 743.
- (12) 西谷, 機論, 34-259 (1968), 371.
- (13) 西谷・野口, 機論, 51-467, A (1985), 1717.
- (14) 西谷・百武, 機論, 51-465, A (1985), 1494.
- (15) 岸本・ほか2名, 材料, 21-220 (1972), 230.
- (16) 西谷・高尾, 機論, 40-338 (1974), 2725.
- (17) 西谷・千代, 機論, 40-329 (1974), 41.
- (18) 後藤・ほか3名, 機論, 56-524, A (1990), 1011.