

## WPC処理を施したフェライト・パーライト鋼の疲労破壊特性\*

米倉 大介<sup>\*1</sup>, 野田 淳二<sup>\*2</sup>, 小茂鳥 潤<sup>\*3</sup>  
清水 真佐男<sup>\*3</sup>, 清水 博美<sup>\*4</sup>

## The Fatigue Properties of Ferrite-Pearlite Steel Modified by WPC Process

Daisuke YONEKURA<sup>\*5</sup>, Junji NODA, Jun KOMOTORI,  
Masao SHIMIZU and Hiromi SHIMIZU<sup>\*5</sup>Department of Mechanical Engineering, Keio University,  
3-14-1 Hiyoshi, Kouhoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 223-8522 Japan

Rotational bending fatigue tests were carried out using ferrite-pearlite steel modified by the WPC process, which is one of the shotpeening processes. To clarify the high cycle fatigue properties, measurements of residual stress and hardness distribution were performed. Fatigue strength of the specimen with a WPC-treated surface was higher than that of an untreated one. This is because (i) the WPC process forms an extremely shallow hardened layer with high compressive residual stress, and (ii) the compressive residual stress generated by the WPC process was very stable under cyclic loading; after  $10^7$  cycles of stress loading, the reduction of compressive residual stress was very small. A comparison with fatigue properties of the specimen hardened by conventional shotpeening was also conducted with special focus on the difference in fatigue strength and fatigue crack initiation behavior.

**Key Words:** High Cycle Fatigue, Fracture Mechanism, Residual Stress, Crack Propagation, WPC Process, Shot Peening

## 1. 緒 言

機械部品の小形化・軽量化に加え、使用環境の苛酷化が進む中、使用部材に対する表面改質技術が注目されるようになってきている。なかでもショットピーニング処理は、部材の疲労強度を比較的簡便に向上させることができる表面改質法として、すでに歯車やばね等の機械部品に適用され、近年、多くの研究がなされている<sup>(1)-(12)</sup>。

本研究で着目したWPC(Wide Peening Cleaning)処理は、従来のショットピーニングよりも高硬度( $H_v > 900$ )、小粒径( $< 200 \mu\text{m}$ )の球を高速度で材料表面に打ち付ける手法である。処理法そのものは基本的にショットピーニング処理と同様であるが、WPC処理を実際の機械部品に施したところ、とくに浸炭処理が施されている部品に適用した場合には、その使用寿命が大幅に改善されることが明らかになっている。しかしながら、なぜ長寿命化が達成できたかという点に

関してははまだ解明されておらず、その機能発現メカニズムに関しては不明な点が数多く残されている。

WPC処理による高強度化は、ショット粒の高速衝突による強塑性加工、加工時の発熱による自己焼入れ効果<sup>(13)</sup>、浸炭鋼などにおける残留オーステナイトのマルテンサイト変態化<sup>(14)</sup>など複数の要因により、高硬度、高圧縮残留応力の表面改質層が部材表面に形成されるためとこれまで考えられているが、基礎的な研究は数少なく<sup>(10)(15)(16)</sup>、いずれも明確な確証が得られているとは言い難い。

以上のような観点から著者らは、WPC処理を施した部材の疲労強度に注目し、かかる処理により鋼の疲労強度特性が何故上昇するかという点の解明を目的とした一連の基礎研究に着手した。本報はその第一段階であり、とくに塑性加工に伴う残留応力の生起および硬度上昇による疲労強度向上機構に着目し実験的検討を行った。その際、従来のショットピーニング処理を施した材料も準備しWPC処理材との比較を行った。

## 2. 供試材および実験方法

本研究で使用したクロムモリブデン鋼SCM 420 Hの化学成分および機械的性質を表1, 2に示す。この材料は通常、浸炭焼入れ・焼戻し処理を施した後、歯

\* 原稿受付 2000年9月8日。

<sup>\*1</sup> 正員, 慶應義塾大学大学院(☎223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1)。<sup>\*2</sup> 慶應義塾大学大学院。<sup>\*3</sup> 正員, 慶應義塾大学理工学部。<sup>\*4</sup> (有)エヌ・イー(☎228-0821 相模原市相模台4-5-12)。

E-mail: yonekura@me.tokushima-u.ac.jp

車のような機械部品として用いられる。WPC 処理は一般に浸炭処理と組合せて施される場合が多い。その場合には、かかる WPC 処理により表面が加工硬化すると同時に、残留オーステナイトのマルテンサイト変態が生じ、これらの相乗効果により、部材表面に圧縮残留応力が生起する。本研究ではこのなかで、加工硬化の影響のみに着目するため、あえて浸炭処理を行わずに、その前処理である 950°C、1.3 h の焼準処理を施したものを供試材として用いることとした。

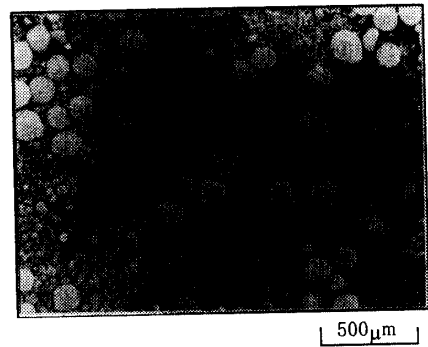
同材を図 1 に示す形状に機械加工した後、最小径部を #100~2000 のエメリー紙により順次研磨し、0.3 μm のアルミナ粉を用いてバフ研磨を行った。研磨後、機械加工、研磨によって生じた加工硬化層および残留応力を除去するため、最小径部を電解研磨し、これを未処理材とした。WPC 処理およびショットピーニング処理は、図 2 に示すショット粒を用いて表 3 に示す条件に従い、未処理材の最小径部に施した(以下 WPC 処理材、SP 処理材)。なお、WPC 処理用のショット粒に関しては、図 2(a) に示したように粒径のばらつきが大きいので、ふるいにより 120~170 μm の粒径を選別し使用した。

疲労試験は、小野式回転曲げ疲れ試験機を用いて行った。破断後の試験片については、走査型電子顕微鏡

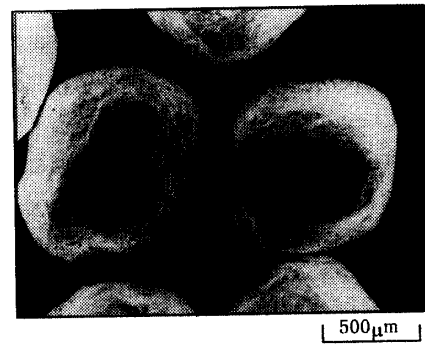
(SEM)を用いて破面観察を行い、破壊起点を特定した。また、残留応力の測定にあたっては X 線回折装置を用い、Cr-K α 線 211 回折線を利用して、 $\sin^2 \psi$  法により残留応力を求めた。なお、深さ方向の残留応力測定は試験片最小径部をウインドウ法でマスキングし、電解研磨法で逐次所定の深さまで研磨することにより行った。

3. 実験結果および考察

3.1 WPC 処理材の疲労寿命特性 図 3 に WPC 処理材および未処理材の疲労試験結果を示す。WPC 処理によって SCM 420 H 鋼の疲労強度は向上し、特に疲労寿命が  $N_f=10^6$  を超えるような長寿命域で



(a) For WPC process



(b) For shotpeening process

Fig. 2 Photograph of shot particle

Table 1 Chemical composition

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	Ni
0.21	0.3	0.74	0.017	0.013	1.04	0.15	0.14	0.09

Table 2 Mechanical properties

	0.2% proof stress (MPa)	Young's module (GPa)	Tensile strength (MPa)
SCM420	298	202	575

Table 3 Condition of WPC and shot peening

	Particle diameter (μm)	Air pressure (MPa)	Shooting time (sec)	Particle material
WPC	120~170	0.4	60	High speed steel
Shot Peening	800	0.4	60	steel

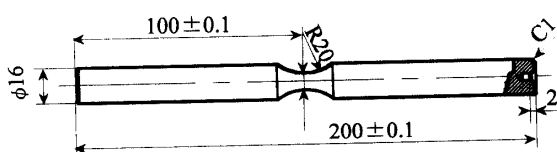


Fig. 1 Specimen configuration

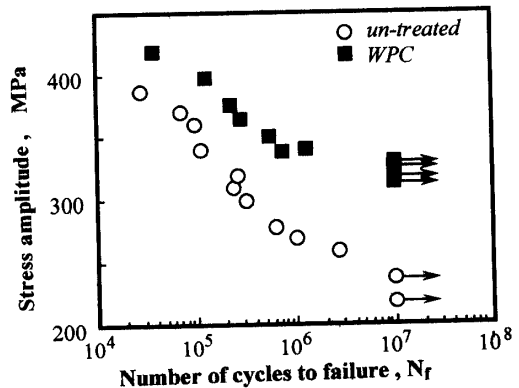


Fig. 3 Results of fatigue tests

WPC 処理による疲労強度の改善効果が顕著となること
 がわかる。かかる疲労強度向上の要因を検討するため、
 WPC 処理材の表面近傍の硬さおよび残留応力分布の
 測定を行った。

図4にWPC 処理材における表面から深さ方向へ、
 マイクロビッカース硬さを測定(荷重 10 gf)した結果
 を示す。図4より、WPC 処理材においては、硬度上
 昇が認められる領域が表面直下 100  $\mu\text{m}$  以内であり、
 WPC 処理によって非常に浅い硬化層が形成されてい
 ることがわかる。また、最表面の硬さは  $H_v$  600 程度
 であり、後述のショットピーニング処理の場合の表面
 硬さ( $H_v$  400 程度)に比べて、高硬さとなっている
 ことがわかる。

深さ方向への残留応力分布(図5)は、最表面付近
 に  $-240$  MPa $\sim$  $-350$  MPa(測定点: 4 点)の圧縮
 残留応力のピークが現れる分布形態となっている。表面
 近傍では、残留応力値にばらつきが生じているが、こ
 れは WPC 処理で使用したショット粒径が 120 $\sim$ 170  $\mu\text{m}$ 
 の範囲を有しており、また、表面へのショット粒の衝
 突が周方向にわたって完全に均一には行われなかつ

め、加工深さおよび深さ方向の塑性ひずみ分布が場所
 によって異なるためと考えられる。WPC 処理材では
 表面層にこのような圧縮残留応力を有する高硬さ領域
 が存在することが、疲労強度の向上をもたらす要因と
 なっているものと考えられる。そこで次に硬さ、残留
 応力分布の観点から、WPC 処理材の疲労強度向上機
 構について、従来のショットピーニング処理材の場合
 とも比較しながら検討をすすめることにする。

**3.2 WPC 処理材とショットピーニング処理材の
 疲労特性の比較** 図6に、今回比較材として準備し
 たショットピーニング処理材の疲労試験結果を先の
 WPC 処理材の結果とともに示す。有限寿命域では両
 材の疲労強度はほぼ同程度であるが、長寿命域、特
 に  $N=10^7$  回の疲労強度付近の応力レベルでは WPC 処
 理材の疲労強度がショットピーニング処理材よりも
 20 MPa 程度高くなり、未処理材の結果とあわせて、
 WPC 処理の効果が疲労強度付近で顕著に現れること
 がわかる。両材の違いを硬さ、および残留応力の観
 点からさらに詳しく調べてみると以下ようになる。

まず、図7は、ショットピーニング処理材における
 深さ方向へのマイクロビッカース硬さ分布の測定結果

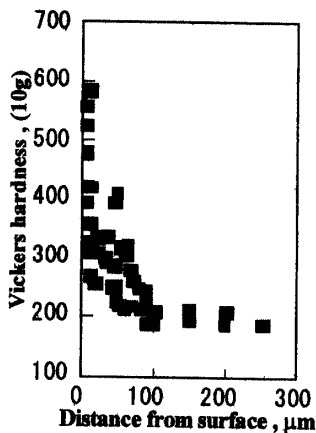


Fig. 4 Hardness distribution

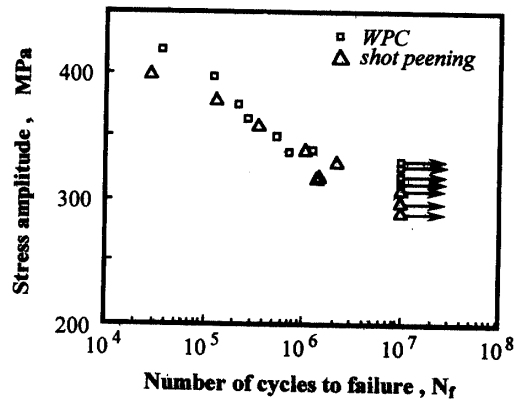


Fig. 6 Results of fatigue tests

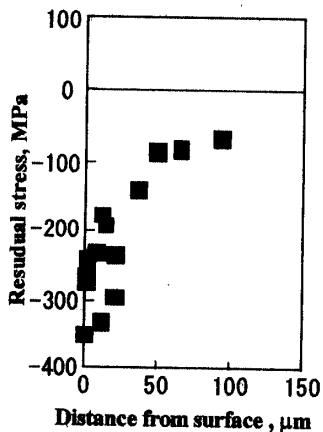


Fig. 5 Residual stress distribution

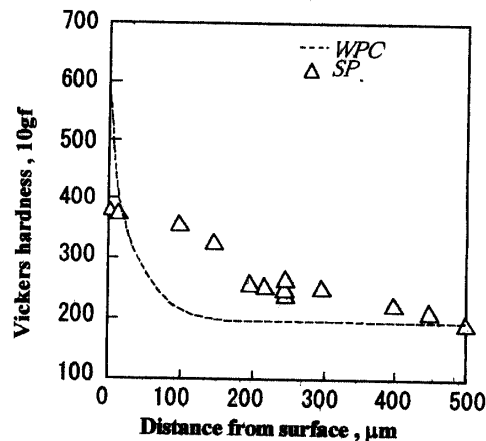


Fig. 7 Hardness distribution

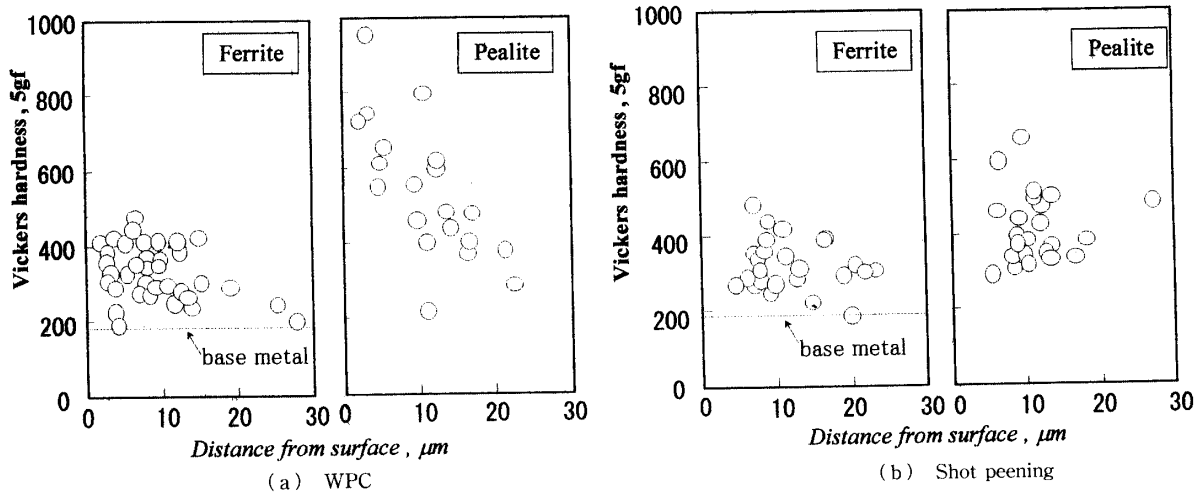
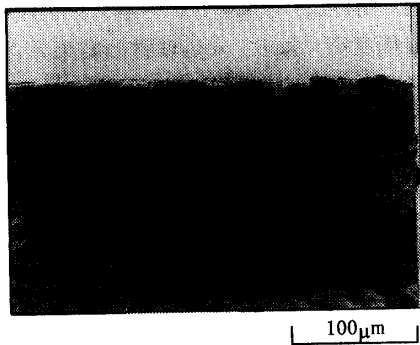
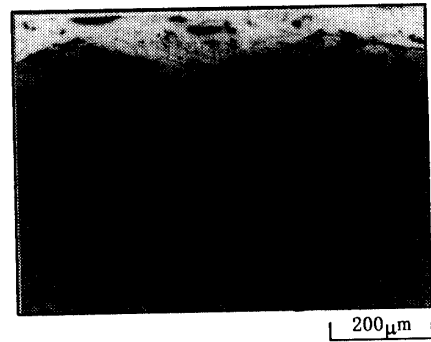


Fig. 8 Hardness distributions of micro structure



(a) WPC ( $\sigma_a=300$  MPa,  $N_f=6.7 \times 10^6$ )



(b) Shot peening ( $\sigma_a=320$  MPa,  $N_f=1.4 \times 10^6$ )

Fig. 9 Fracture surfaces of specimen treated with WPC and shot peening

(荷重 10 gf)を, 先の WPC 処理材の結果(破線)とともに示したものである。また図 8 は, ナイタル腐食によって組織を現出させた試験片を用いて, フェライト, パーライトの各組織ごとにマイクロ硬さ(荷重 5 gf)を行った結果を示している。

これらの結果より, 最表面層における硬さ上昇は WPC 処理材において著しく, 特にパーライト組織部分に硬さが HV 800 を超える硬さ値がみとめられるなど通常の加工硬化では説明できないような著しい硬化が WPC 処理ではみとめられる。一方, フェライト部分に注目すると, 両材とも最低硬さ値は HV 200 程度となっており, 組織中の最弱箇所としてのフェライト部分の強度は両材ともほぼ同程度と考えられ, 硬さによる WPC 処理材とショットピーニング処理材の疲労強度に及ぼす影響の相違は小さいと考えられる。さらに, 図 9 に示す破壊起点近傍の破面写真から, 両材ともかかるフェライト部に衝突したショット粒によって形成されたと考えられる試験片表面の凹部を起点として疲労破壊が発生することがわかる。以上のことより, 両材の疲労強度の相違は, 表面近傍の残留応力の

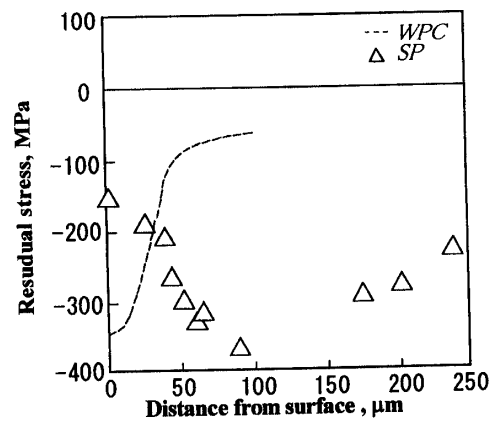


Fig. 10 Residual stress distribution

生起状態とその疲労過程中的の振る舞いの違いに関係するものと考えられる。

図 10 はショットピーニング処理材について深さ方向への残留応力分布を測定した結果(△印)を, 先の図 5 の WPC 処理材の結果(破線)とともに示したものである。WPC 処理材では圧縮残留応力のピーク位置は前述のとおり最表面層にあるのに対して, ショットピ

ーニング処理材のピークは表面から 100  $\mu\text{m}$  の深さの位置にあって、その値は WPC 処理材の最大値とほぼ同じ -380 MPa である。また、ショットピーニング処理材の表面における残留応力は -150 MPa 程度と WPC 処理材の表面残留応力の半分以下の値となっている。

以上は繰返し応力をうけていない処女材に関する結果であるが、さらに、繰返しに伴う残留応力の減衰挙動を両材について検討を行う。図 11 は  $\sigma_a = 350$  MPa の繰返し負荷を与え、WPC 処理材とショットピーニング処理材の最小径部表面の残留応力(4箇所平均)を比較したものである。WPC 処理材では  $10^4$  回程度の応力繰返しを加えても表面に -200 MPa 程度の圧縮残留応力が残存しているのに対して、ショットピーニング処理材では 100 回程度の応力繰返しで表面の圧縮残留応力はほぼ消失することがわかる。一般に圧縮残留応力の減衰は、主として圧縮負荷時に試験片表面の負荷応力と残留応力の和が圧縮降伏応力を超過し、塑性変形を生じることによってもたらされる。WPC 処理材ではパーライトの硬度が著しく上昇し、局所的な

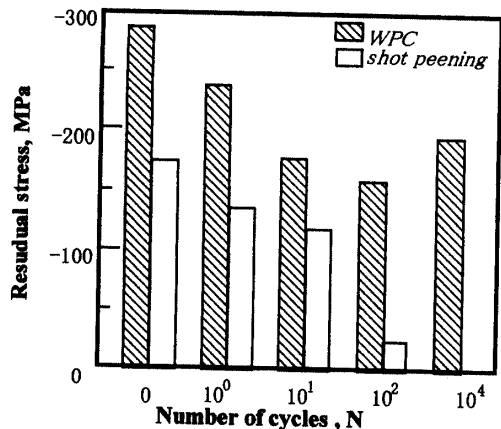


Fig. 11 Release behavior of residual stress

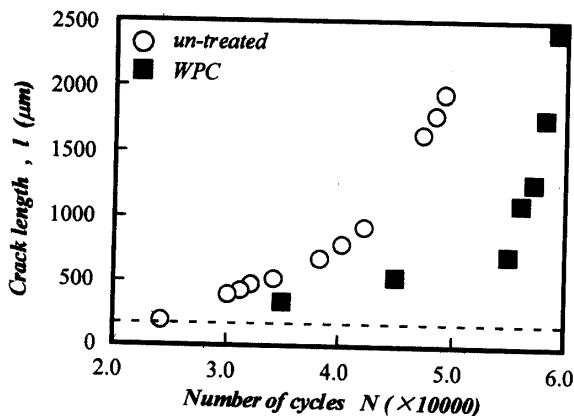


Fig. 12 Relationship between crack length and number of cycles

圧縮降伏応力が増加しているため、残留応力の開放量がショットピーニング処理材よりも小さくなったものと考えられる。

疲労強度に顕著な差が現れた  $10^7$  回の疲労強度付近の応力レベル(WPC:  $\sigma_a = 330$  MPa, SP:  $\sigma_a = 310$  MPa)においても同様で、WPC 処理材では -220 MPa 程度の圧縮残留応力が  $10^7$  回の応力繰返しの後も存在しているのに対して、ショットピーニング処理材では表面に圧縮残留応力の残存はほとんど認められない。以上のことにより、WPC 処理材では、ショットピーニング処理材に比べ、繰返し応力のもとでも減衰しにくい圧縮残留応力が表面層に形成されていることがわかる。次に、かかる効果が WPC 処理材の疲労強度に対していかなる影響を及ぼしているか検討を加える。

### 3.3 き裂進展挙動に及ぼす浅い残留応力層の影響

図 12 は WPC 処理材と未処理材の疲労き裂進展挙動を比較したものである。き裂進展挙動の観察に際しては、き裂の起点部を限定するために未処理材および WPC 処理材の最小径部表面に半球状ピット( $\phi 180 \mu\text{m}$ )を放電加工により加工し、所定の回数の応力繰返しごとに表面レプリカを採取することによって、ピットを起点とするき裂進展過程を観察した。図 12 より、WPC 処理材ではき裂長さが 600  $\mu\text{m}$  程度以下の初期き裂の段階において未処理材に比べて進展速度が遅く、その後、未処理材と同程度の進展速度でき裂成長がおこることがわかる。

従来、表面からのき裂進展の抑制に有効な残留応力分布として、(i)最表面近傍の圧縮残留応力が大きいこと、(ii)表面近傍に圧縮残留応力の最大値があること、(iii)圧縮残留応力分布が表面下深い位置まで分布していること、が指摘されている<sup>(17)-(20)</sup>。本研究にお

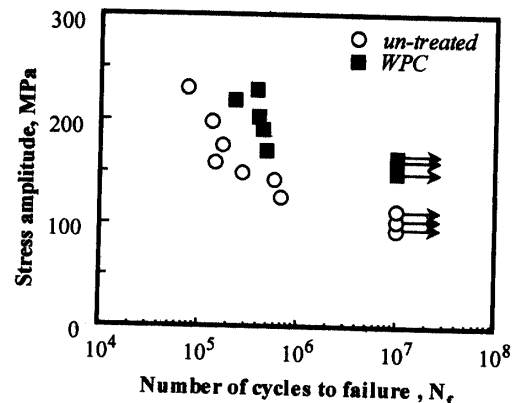


Fig. 13 Results of fatigue tests of notched specimens ( $\alpha = 4$ )

ける WPC 処理材の場合、最表面付近に圧縮残留応力の最大値が存在し、また、繰返し負荷後も表面に圧縮残留応力が残存することから、図 12 にみられるような WPC 処理材における初期き裂の進展の抑制は、かかる圧縮残留応力の作用によるものと考えられる。また、き裂進展過程においてき裂深さが残留応力分布のピーク位置を超えると、圧縮残留応力によるき裂進展抑制効果が急激に小さくなるため、WPC 処理材のような浅い位置にピークを持つ残留応力分布のもとでは、長いき裂に対する抑制効果が小さくなるものと考えられる。

以上が、図 12 にみられるような WPC 処理材と未処理材における疲労き裂進展挙動の相違の原因と考えられ、かかる要因が WPC 処理材の疲労特性を特徴づけているものと思われる。すなわち、WPC 処理材では疲労強度の向上に有効な表面近傍の圧縮残留応力が繰返し負荷後も大きく残存し、それがき裂発生直後の短いき裂の成長を抑制するため、疲労強度付近の応力レベルでの大きな疲労強度向上をもたらすものと考えられる。これに対して、ショットピーニング処理材においては、表面近傍の残留応力が減衰しやすく、また、表面き裂の進展に対して抑制効果の小さい、内部にピーク位置を有する圧縮残留応力が疲労強度を支配すると考えられる。

このような繰返し負荷後の残留応力分布状態の相違に依存したき裂進展抑制効果の違いが、図 6 にみられるような WPC 処理材とショットピーニング処理材の疲労強度の相違をもたらしたものと考えられる。

これまで述べてきたように、WPC 処理材では疲労過程で減衰し難い表面圧縮残留応力が材料の疲労強度の向上に著しく寄与していることが明らかとなったが、かかる強化機構のもとでは、表面に大きな応力集中部を有する切欠材においては WPC 処理によるさらに大きな疲労強度の改善が期待される。図 13 は本研究における SCM 420 H 鋼を母材として、 $a=4$  の応力集中率を有する切欠材を作成し、これに対して同様な WPC 処理を施した際の疲労強度の改善効果を調べた結果である。予想どおり、WPC 処理は切欠材の疲労強度を 50%改善しており、図 3 の平滑材の場合に比べてその改善効果が著しいことがわかる。

#### 4. 結 論

本研究では WPC 処理による材料強化機構のなかで塑性加工によるものに着目し、鋼の疲労特性に及ぼす WPC 処理の影響について検討を行った。その際、従来のショットピーニング処理を施した材料も準備し

WPC 処理材との比較を行った。以下に得られた結論を示す。

(1) WPC 処理をフェライト・パーライト組織を有する SCM 420 H 鋼に施すことにより、その疲労強度は向上する。またその度合いは  $10^6$  回を超えるような高繰返し数領域で顕著である。

(2) WPC 処理により、表面に最大値を有する極めて浅い圧縮残留応力層が部材表面に形成される。かかる圧縮残留応力は繰返し負荷に対して極めて安定であり、 $10^7$  回の繰返し負荷を与えた後にも残存している。一方、ショットピーニング処理を施した場合にも、硬化層には圧縮残留応力が生起するが、かかる圧縮残留応力は、 $10^7$  回における疲労強度以上の応力振幅が負荷された場合、繰返しのごく初期段階でほぼ消失する。

(3) WPC 処理材では、発生直後の短いき裂進展が抑制され、長寿命域において顕著な疲労強度の向上をもたらす。かかる効果は、繰返し負荷後に残存する極めて浅い圧縮残留応力層によるものである。これに対して、ショットピーニング処理材においては、表面近傍の残留応力が減衰するため表面き裂の進展に対して抑制効果の小さく、内部にピーク位置を有する圧縮残留応力が疲労強度を支配する。かかる残留応力によるき裂進展抑制効果の相違が WPC 処理材とショットピーニング処理材の疲労強度の相違をもたらす。

終わりに、本研究の一部は運輸施設事業団「高速化時代における鉄道車軸の安全性確保と耐久性向上に関する研究(研究代表者 清水真佐男)」により行われたことを記し、感謝の意を表す。

#### 文 献

- (1) 柳辰基・ほか 4 名, 機論, 60-572, C(1994), 1391-1396.
- (2) 井上克己・ほか 3 名, 機論, 62-593, C(1996), 306-311.
- (3) 村上敬宜・ほか 6 名, ばね論文集, 第 39 号(1994), 7-16.
- (4) 小曾根敏夫, ほか 1 名, ばね論文集, 第 33 号(1987), 53-58.
- (5) Kim, H. J., *Met. Trans.*, A, 27(1996), 2557-2564.
- (6) 政木清孝・ほか 3 名, 機論, 65-630, A(1999), 334-339.
- (7) 井上克己・ほか 3 名, 機論, 60-578, C(1994), 3504-3509.
- (8) 藤村顕世・ほか 1 名, 機論, 66-642, A(2000), 347-354.
- (9) 小川一義・ほか 1 名, 機論, 66-641, A(2000), 92-97.
- (10) 松井勝幸・ほか 4 名, 機論, 65-637, A(1999), 1942-1947.
- (11) Al-Obaid, Y. F., *J. Appl. Mech.*, 57(1990), 307-312.
- (12) 広瀬正吉・ほか 31 名, ばね論文集, 第 27 号(1982), 73-108.
- (13) 伊藤健一・ほか 4 名, ショットピーニング技術, 11-2(1999), 52-53.
- (14) 加賀谷忠治・ほか 2 名, ショットピーニング技術, 9-2(1997), 73-74.
- (15) 加賀谷忠治・ほか 3 名, ショットピーニング技術, 9-2

WPC 処理を施したフェライト・パーライト鋼の疲労破壊特性

1161

- (1997), 75-76.
- (16) 加賀谷忠治・ほか3名, ショットピーニング技術, 9-2 (1992), 77-78.
- (17) 丹下彰・ほか2名, ばね論文集, 第36号(1990), 47-53.
- (18) 俊野英男・ほか2名, ばね論文集, 第32号(1987), 31-34.
- (19) 久松定興・ほか2名, ショットピーニング技術, 4-2 (1992), 39-43.
- (20) 成田俊宏, ショットピーニング技術, 4-2(1992), 45-49.
-