高周波焼入れの適用による疲労強度向上

牧 野 泰 三^a, 今 西 憲 治^a^a 新日鐵住金(株) 技術開発本部 鉄鋼研究所 (〒 660-0891 兵庫県尼崎市扶桑町 1-8)

Enhancement of Fatigue Strength by Applying Induction Hardening

Taizo MAKINO^a and Kenji IMANISHI^a^a Steel Research Laboratories, Research & Development, Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation(1-8 Fuso-cho, Amagasaki, Hyogo 660-0891)**Keywords** : Induction Hardening, Fatigue Strength, Railway Axle, Press-Fitting, Residual Stress

1. はじめに

鉄鋼をはじめとする金属材料に対し、数回の繰り返しでは全く変化が起らない程度の力であっても、非常に多くの回数を与えるとやがて破壊することがある。このような破壊現象を疲労破壊という。機械・構造物の部品や部材を安全に使用するには疲労破壊が起らないように設計しなくてはならない。その方策の一つとして、疲労破壊に対する強さ、すなわち疲労強度を向上させることが挙げられる。そのために実製品には、様々な表面改質技術が採用されている。代表的なものとしては、高周波焼入れ、浸炭焼入れ、窒化処理、ショットピーニング、ロール加工(表面圧延)などがある。これらの技術にはそれぞれ得意不得意があるが、高周波焼入れには短時間の処理で極めて高い効果が得られる特徴がある。本稿では、金属疲労の基礎について述べた後、高周波焼入れの原理を解説し、鉄鋼製品の一つである鉄道車両用車軸への適用例を紹介する。

2. 金属疲労

金属疲労による破壊は、疲労き裂の発生、進展の段階を経て最終的に破壊に至るプロセスを辿る。以下では図1を用いて、疲労強度の評価指標および主要影響因子について説明する。疲労強度は、評価対象の部材や試験片に、図1(a)に示

す正弦波状の応力を繰り返し作用させて評価される。この時の評価指標は応力振幅(もしくは応力範囲)であり、ある繰返し数に耐える応力振幅を「時間強度」、 1×10^7 回などの疲労試験を打ち切る繰返し数に耐える応力振幅を「疲労限度」と呼ぶ。「疲労強度」は時間強度と疲労限度の総称である。疲労強度を支配する主要因子に材料の硬さと平均応力がある。硬さは、き裂発生前段階の転位の運動やすべり帯の形成を通してき裂発生に影響する。すなわち硬さが高いほど、き裂が発生し難くなり、疲労強度が上昇する。一方、平均応力は、発生したき裂の開口・閉口挙動を通してき裂進展に影響する。すなわちき裂が開口している間の応力の繰り返しがき裂進展に有効であり、平均応力はき裂進展に有効、すなわちき裂が開口している応力の範囲を変化させる。平均応力が引張り側に大きいと有効な応力の範囲が大きくなり、き裂進展を促進する。逆に平均応力が圧縮側に大きいと有効な応力の範囲が減少し、き裂進展を抑止する。なお、残留応力は平均応力と同様の働きをする。図1(b)は、耐久限度線図(もしくは疲労限度線図)と呼ばれ、硬さと平均応力(残留応力)の疲労限度に及ぼす影響を模式的に示したものである。図中の耐久限度線は、応力振幅で表した疲労限度が平均応力によってどのように変化するかを示したものである。図より、硬さが上昇すると、耐久限度線は図中上方にシフトし、残留応力が圧縮側(負の方向)に大きいと耐久限度線に沿って、その縦軸上の成分である疲労限度(応力振幅)が高くなるのがわかる。

3. 高周波焼入れ

高周波焼入れは、高周波誘導加熱による鉄鋼材料の相変態を利用して、硬さ上昇と圧縮残留応力の付与を効率的に実現する表面改質技術である。図2に高周波誘導加熱の原理を示す。高周波電源に接続された加熱コイルの中に鉄鋼材料の被加熱体を設置し、交流電流を流すと、被加熱体に磁界が生じ、そのコイルに近い表面には渦電流が流れる。このように鉄鋼などの金属材料に電流が流れるとジュール熱と呼ばれる発熱が起こる。ここでコイルに流す電流の周波数を高く設定する

図1 繰返し応力の波形と耐久限度線図

図2 高周波誘導加熱の原理

ことで、渦電流は表皮効果により表面近くに集中して流れ、加熱領域が表層に集中する特徴がある。一方、内部まで一様に加熱するには低い周波数が用いられる。このような原理によって、被加熱体の表層部のみを1000℃近くまで瞬時に加熱し、その後急速冷却することを高周波焼入れと呼ぶ。

図3に鉄鋼材料の温度-伸び線図¹⁾を模式的に示す。これは共析鋼で初期の組織がパーライト組織である場合に、加熱～急冷に至る焼入れ過程における材料の伸び(長さの変化)を示している。まず、温度上昇とともに熱膨張によって伸びは増加するが、 A_{c1} 変態点を超えると、初期の組織からオーステナイトへの変態を開始し、 A_{c3} 変態点を超えると変態終了し、完全なオーステナイトになる。オーステナイトは初期組織より体積収縮するため、 A_{c1} 点から A_{c3} 点の間には変態による伸び増加が鈍化している。次に最高温度を過ぎ、急冷されると熱収縮によって伸びが減少するが、 M_s 点を過ぎるとオーステナイトからマルテンサイトに変態し始め、 M_f 点を過ぎると変態が終了する。マルテンサイトはオーステナイトに対し体積膨張するので、 M_s 点と M_f 点間では伸びが一旦増加している。最終的に、伸びは初期状態に対して焼入れによって大きく膨張する。以上では共析鋼を例に説明したが、高周波焼入れによく用いられる中炭素鋼においても、 A_{c1} 点に対し A_{c3} 点がより高くなるといった差異はあるが、ほぼ同様の挙動を示す。

高周波焼入れの場合は、急速加熱・冷却であるため、 A_{c1} 、 A_{c3} 変態点が状態図に記載されている温度より50℃ほど上方にシフトする。このため、最高温度点の設定ではこれを考

図3 鉄鋼材料(共析鋼)の温度-伸び線図¹⁾

慮した上で、初期状態の組織における炭化物が十分に固溶するようにしなくてはならない。また、高周波焼入れによってマルテンサイト変態するのは被加熱品の表層部であるので、その伸びが、変態していない内部および周囲によって拘束されるために、圧縮残留応力が生じる。マルテンサイト組織は、材料中の炭素(C)量に応じて初期状態より格段に硬さが上昇する。このような機構によって高周波焼入れされた表層部には高硬さと圧縮残留応力が生じ、疲労強度が格段に向上する。なお、高周波焼入れしたままではじん性が低いため、150～200℃程度の低温で焼戻しが行われる。

高周波焼入れの適用例には、車軸²⁾、クランク軸^{3),4)}、駆動軸⁵⁾、歯車⁵⁾、軸受、ボールジョイント、ラックバー⁵⁾など多くの製品がある。以下では上記適用製品の中から鉄道車両用車軸を取り上げ、まず車軸の概要を述べた後、高周波焼入れの適用とその効果を説明する。

4. 鉄道車両用車軸

鉄道車両に用いられる車軸は、その折損が直接車両の脱線につながるため、車両を構成する数多くの部品の中でも、最重要保安部品と位置づけられている。車軸の疲労損傷に関する研究は、19世紀以降、古くからなされており、その強度の信頼性の確保は今日に至るまで機械技術者の重要な課題である。

車軸は、図4⁶⁾に示した左右両側に設けた太径部である輪座に2枚の車輪が圧入された状態(この状態を輪軸と呼ぶ)で使用される。車輪の締め代(車軸輪座径と車輪孔径の差)は、使用中の車輪が抜けることがなく、検査時には荷重をかけて圧抜きと再圧入が可能のように管理されている。車軸の寸法は、用途の車両形式により様々であるが、一般的には直径140～220mm、長さは狭軌の場合1800～2100mm、標準軌の場合2200～2500mm程度である。材料は炭素(C)量0.4%程度の中炭素鋼が一般的であるが、海外ではC量を下げた低合金鋼⁷⁾も使われている。

図4には輪軸に作用する外力も示している。このように輪軸には、車両の重量およびその上下振動に起因して、車軸両端付近に軸受を介して垂直力が作用し、車輪のレールとの接

図4 輪軸の構成と外力⁶⁾

図5 フレッシングの模式図とフレッシング・コロージョン⁹⁾

触部にその反力(これも垂直方向)が作用する。そして曲線通過時に車輪とレールとの接触によって水平力が作用する。この時、輪軸は典型的な回転曲げの応力状態となる。すなわち、車輪一回転分の距離を車両が走行する間に、車軸の表面には引張と圧縮の応力のピークがそれぞれ1回ずつ現れる。これが疲労強度の評価における繰返し数1回に相当する。ここで仮に車輪の直径を860mmとすると、繰返し数 1×10^7 回に相当する走行距離は約2.7万kmである。新幹線車両では3万km走行または30日おきに交番検査と呼ばれる検査が行われてきたこと⁸⁾を考え合わせると、使用期間中の極めて早い段階で疲労損傷が生じてもおかしくない繰返し数に到達することが予想される。このような意味で車軸には疲労損傷が生じないような設計・製作上の配慮を行う必要がある。

車軸の疲労損傷において、フレッシングと呼ばれる特徴的な事象がある。フレッシングとは、接触部において微小なすべりが繰り返し生じる状態を指す。フレッシングが長期間にわたり持続すると、ココアと呼ばれる茶褐色の摩耗粉が接触面に堆積し、一部が接触部から排出された状態が観察される。このような状態をフレッシング・コロージョンと呼ぶ。フレッシングによってフレッシング・コロージョンとともに摩耗の進行や疲労強度低下が生じるが、このような損傷をフレッシング損傷と呼ぶ。

車軸のはめ合い部では、無負荷状態では車輪などの被圧入物と完全に一体化されているように見える。しかしながら、上記した回転曲げ負荷を受けると、図5⁹⁾に示すように車軸が曲げ変形するのに対し、車輪の変形が完全には追従せず、はめ合い端部近傍で変形差に起因した微小な相対すべりが生じる。このため、同部近傍はフレッシングが避けられない構造であるといえる。図5には同部に生じたフレッシング・コロージョンの光学顕微鏡写真も示している。これは実物大車軸の疲労試験後にフレッシング・コロージョンをバ

フ研磨で除去して観察したもので、微小な凹凸・ピット、摩耗粉の堆積、および微細な疲労き裂が認められる。

5. 車軸への高周波焼入れの適用とその効果

5.1 車軸への高周波焼入れの適用

車軸への高周波焼入れの適用は、より高負荷に耐えるために、新幹線開業前の1960年代前半に旧国鉄と旧住友金属(現新日鐵住金)の共同研究によって検討され、高周波焼入車軸として開発された。同車軸はまず電気機関車に採用され、その後、1964年に開業した新幹線車両に量産採用された。しかし、開業時点において疲労強度に及ぼすはめ合い形状や高周波焼入条件の影響が完全に明らかになっていない訳ではなく、その後の精力的な研究によって高周波焼入条件やはめ合い形状の改良が継続的に行われ、現在の仕様に至っている。

日本国内で使用される車軸は、JIS E4502^{10),11)}およびJRIS J0401¹²⁾によって、その種類、材料の化学成分、機械的性質、製造方法、さらには代表的形状などが規定されている。中でもJRIS J0401は高速車両用高周波焼入車軸を規定しており、以下でその内容を紹介する。素材にはJIS S38C鋼が用いられ、連続鍛造で得られた鋳片を熱間鍛伸、焼入焼戻しによる調質、粗機械加工した後、高周波焼入れ、低温焼戻し、仕上げ加工を経て、製品となる。JRIS J0401では調質後(高周波焼入前)の機械的性質が規定されている。高周波焼入れの条件は、高周波加熱に用いる電源周波数、高周波焼入れ後の焼戻し温度など開発当初より種々改良がなされてきた。その結果、現在では電源周波数3kHz、焼戻し温度200℃の条件が採用されている¹³⁾。

図6に車軸における高周波焼入領域^{12),14)}を示す。このように車軸の表面は、車輪とのはめ合い部である輪座の中央部と軸端を除く全面にて高周波焼入れされている。特に図中のA点とB点ではJRIS J0401で、仕上げ加工前における有効硬化層深さ(HV400超の領域)が、それぞれ2.5mm以上、4.0mm以上と規定されている¹²⁾。輪座中央部に高周波焼入れされていない領域が存在するのは、輪座の軸端側では固定焼き、平行部側では移動焼きと高周波焼入れの方式が異なるためであるが、当部位の発生応力は、車輪が圧入されていることから非常に低いので強度上の問題はない。

図7に、高周波焼入れによって硬化層が生じたはめ合い端部付近のビッカース硬さ¹⁴⁾と軸方向残留応力^{13),15)}の分布を示す。図(a)より、表面硬さはHV500～550であり、有効硬化層深さは4～5mmであることがわかる。硬さ分布の測定位置は図6のB点に対応しており、上記規格値(B点の4.0mm以上)を満足している。また、図(b)によると、表面

図6 車軸における高周波焼入領域^{12),14)}

の残留応力は -600 MPa 程度の圧縮であり、残留応力が圧縮から引張に反転する深さは $10\sim 20\text{ mm}$ である。

5. 2 高周波焼入れの効果

前節で新幹線車両用車軸には、使用中に大きな負荷を受けるために、高周波焼入れが採用されていることを説明した。高周波焼入れされた領域では、硬さの上昇と大きな圧縮残留応力が生じているために、疲労信頼性確保ならびに耐フレッティング損傷という意味で極めて良好な特性が得られる。特に、圧縮残留応力は、発生したフレッティング疲労き裂を開口させないため、その進展を抑止する効果が大きいといえる。

ここではフレッティング疲労強度の観点から、直径 $38\sim 40\text{ mm}$ の小型圧入軸¹⁶⁾および直径 $160\sim 200\text{ mm}$ の実物大車軸¹⁴⁾を対象に高周波焼入れの効果を検証した。小型圧入軸には、高周波焼入れ前の調質処理のみを行ったQT軸、高周波焼入れ後硬化層深さが 0.04 mm と浅めのIH04軸、硬化層深さが 2.0 mm と深めのIH20軸の3種類がある。一方、実物大車軸には、高周波焼入れ前の調質処理と同様の焼入焼戻し処理を行った実物大QT軸、高周波焼入れ焼戻しを行った実物大IH軸の2種類がある。疲労試験は、小型圧入軸については軸長手方向中央部に車輪に相当するボスを圧入し、軸両端を支持しつつ、中央のボスに曲げ荷重を与えて回転させる、すなわち回転曲げの方式とした。一方、実物大車軸については、車軸片側端の輪座に車輪相当の部材を圧入し、同部材の外周部を固定、車軸のもう片側の端部に偏心マス付きのモー

ターを取り付ける。そして偏心マスのみを回転させることで、共振させて回転曲げの負荷を与える方式とした。

疲労試験では打ち切り繰返し数を 2×10^7 回とし、この繰返し数まで破断しなかった場合、試験後にボスまたは車輪部材を軸から抜き出し、き裂の有無を調査した。疲労限度については、小型圧入軸では光学顕微鏡にて検出可能な微細き裂の発生限界($\sigma_{w1,mic}$)、破断しない限界(σ_{w2})の2段階、実物大車軸では、 $\sigma_{w1,mic}$ と σ_{w2} に加え、磁粉探傷で検出可能なきず(き裂)の発生限界($\sigma_{w1,mag}$)の3段階で評価した。ただし、必ずしも全ての種類の車軸について上記3種類の疲労限度を評価できていない。こうして得られた疲労限度を、図8に小型圧入軸および実物大車軸に分けて示す。図中の実物大IH軸では、疲労試験機の最大容量である 220 MPa (輪座における公称応力)で 2×10^7 回まで疲労試験を継続しても未破断であった。試験終了後車輪部材を抜き出し、車軸表面を光学顕微鏡で観察したところ、図9¹⁴⁾に示すようにフレッティング・コロージョンとともにフレッティング疲労き裂が観察された。ただし、磁粉探傷ではきず(き裂)は検出されなかった。このため、図8では実物大IH軸の $\sigma_{w1,mag}$ および σ_{w2} は 220 MPa 以上とし、上向きの矢印を付記した。実物大IH軸の $\sigma_{w1,mic}$ については、過去に本松らによって得られた結果¹⁷⁾を記した。図8より、小型圧入軸では、高周波焼入れによって $\sigma_{w1,mic}$ 、 σ_{w2} とも向上しているが、その向上代は $\sigma_{w1,mic}$ よりも σ_{w2} の方がはるかに大きい。これは、フレッティング疲労では高周波焼入れ、特に圧縮残留応力によってき裂進展に対する抵抗が大きくなり、疲労強度が向上していることを意味している。実物

(a) ビッカース硬さ分布¹⁴⁾

(b) 軸方向残留応力の分布^{13),15)}

図7 高周波焼入れ後の車軸の輪座におけるビッカース硬さ¹⁴⁾と軸方向残留応力^{13),15)}の分布

図8 小型圧入軸および実物大車軸の高周波焼入れ有無による疲労限度の比較

図9 車軸のはめ合い部に生じたフレッティング・コロージョン発生部の光学顕微鏡写真¹⁴⁾

大車軸では、実物大QT軸の $\sigma_{w1,mic}$ が得られていないため、単純な比較ができないが、実物大IH軸の $\sigma_{w1,mic}$ がかなり低いことから、小型圧入軸と同様、高周波焼入れによる疲労限度向上代は、 $\sigma_{w1,mic}$ より $\sigma_{w1,mag}$ や σ_{w2} の方が大きいことが容易に推定される。これより、実物大車軸でも高周波焼入れによるき裂進展抑制の効果が現れているといえる。

6. おわりに

本稿では、金属疲労の基礎について述べた後、高周波焼入れの原理を解説し、鉄鋼製品の一つである鉄道車両用車軸への適用例を紹介した。高周波焼入れは短時間の処理で、硬さの上昇と圧縮残留応力の付与を同時に実現できることから、疲労強度向上の面で極めて高い効果がある。また、本稿では触れなかったが、疲労の他に耐磨耗性向上にも効果があることが知られている。さらに過去から現在に至るまで、高周波焼入れ技術の改良や高周波焼入れ用鋼の開発などが継続的に行われ、これらの成果を反映した製品も日々生み出されている。このような製品が使われることは、疲労や摩耗に対する特性向上によって、機械や構造物の長寿命化、軽量化が実現されることから、省エネルギー、ライフサイクルコスト低減、二酸化炭素排出量減による地球温暖化対策など社会的ニーズに大いに貢献している。したがって高周波焼入れは、表面改質技術の一手法として、今後も重要な地位を占めるといえる。

(Received November 4, 2015)

文 献

- 1) 日本鉄鋼協会編；鋼の熱処理, p.63 (丸善株式会社, 1992).
- 2) K. Nishioka, T.Kunitake, K. Hirakawa, H.Komatsu ; *The Sumitomo Search*, **3** (May), 1 (1970).
- 3) 中村宏, 星野次郎, 新井淳一, 高橋秀雄 ; 日本機械学会論文集, **33**, (250), 883 (1967).
- 4) 恩田勇人, 浅井鉄也, 藤木賢治, 工藤洋嗣, 室伏和昌 ; *Honda R&D Technical Review*, **15**, (2), 175 (2003).
- 5) 川崎一博 ; ふえらむ, **10**, (7), 601 (2005).
- 6) 日本工業規格JIS E 4501 -1995 ; 鉄道車両－車軸強度設計法.
- 7) BSEN13261-2009 ; “Railway applications - Wheelsets and bogies - Axles Product requirements”.
- 8) K. Tezuka, S. Tanaka ; *9th International Wheelset Congress*, 3-4-1 (1988).
- 9) 牧野泰三, 加藤孝憲 ; トライボロジスト, **58**, (7), 455 (2013).
- 10) 日本工業規格JIS E 4502-1-2001 ; 鉄道車両用車軸－品質要求.
- 11) 日本工業規格JIS E 4502-2-2001 ; 鉄道車両用車軸－寸法要求.
- 12) 日本鉄道車輛工業会規格JRIS J 0401-2007 ; 鉄道車両－高速車両用高周波焼入車軸.
- 13) S. Isomura, K. Yomoda ; *11th International Wheelset Congress*, **2**, 51 (1995).
- 14) 牧野泰三, 酒井宏樹 ; 新日鉄住金技報, **395**, 56 (2013).
- 15) K. Hirakawa, K. Toyama, M. Kubota ; *International Journal of Fatigue*, **20**, (2), 135 (1998).
- 16) T. Makino, M. Yamamoto, K. Hirakawa ; *ASTM STP 1367 Fretting Fatigue: Current Technology and Practices*. D. W. Hoepner, V. Chandrasekaran, C. B. Elliot, Eds., Baltimore MD, ASTM, 509 (2000).
- 17) 本松啓美, 手塚和彦, 前橋栄一 ; 鉄道総研報告, **6**, (3), 29 (1992).