

高周波熱処理高強度鋼線材

高周波熱錬(株) 製品事業部
製造部 製造部長
高周波熱錬(株) 製品事業部
製造部 赤穂工場次長

川崎一博 Kazuhiro Kawasaki
村山行雄 Yukio Murayama

高周波熱錬(株) 製品事業部
営業部 開発営業課長
高周波熱錬(株)
常務取締役製品事業部長

溝口 茂 Shigeru Mizoguchi
山下英治 Eiji Yamashita

Induction Heating Quenched and Tempered High Strength Steel Wire and Rod

1 はじめに

高周波熱処理といえば「機械部品の表面焼入れ」を思い浮かべる方がほとんどと思われるが、実は長年、PC(Pre-Stressed Concrete)鋼棒や冷間成形用ばね鋼線の全体(ズブ)加熱焼入れ・焼戻しにも用いられている¹⁻³⁾。これらの高強度鋼線材は、素線材が高周波誘導加熱連続ラインを通過する長くても30秒程度の短時間内に高周波焼入れ・高周波焼戻しされ、表面加熱後の放冷により全断面均一な硬さや組織になり、引張強さ(σ_B)がPC鋼棒では930~1420N/mm²級、ばね鋼線では1715~2060N/mm²級に調整されている。

高周波熱処理PC鋼棒は、昭和33(1958)年に製品化されて以来、総生産量が300万トンを超えている。また、高周波熱処理ばね鋼線「ITW®: Induction heating, Quenched & Tempered Wire」^{4,5)}は、昭和58(1983)年に $\sigma_B=1960$ N/mm²級の懸架ばね用鋼線として世界で初めて製品化されて以来、海外も含めた総生産量が15万トンに達している。

本稿では、著者の知る範囲内ではあるが、高周波熱処理高強度鋼線材の開発動向と今後の課題を概説する。

2 高周波熱処理プロセス

高周波熱処理鋼線材の製造プロセスでは、熱間圧延線材が繰返し曲げやショットブラストなどの機械加工により脱スケールされ、所定の線径に冷間引抜された後、図1に模式図を示す高周波連続熱処理ラインを通過する間に、まず秒単位でオーステナイト(γ)域まで急速短時間加熱され、放冷による均一温度化後に水噴射冷却により焼入れされる。図2に焼入状況を示す。続いて、所定の σ_B が得られる条件で急速短時間加熱焼戻しされ、やはり水噴射冷却して製品化される。なお、一部では直接通電加熱も使用されているが、本稿では高周波熱処理を主体に報告する。

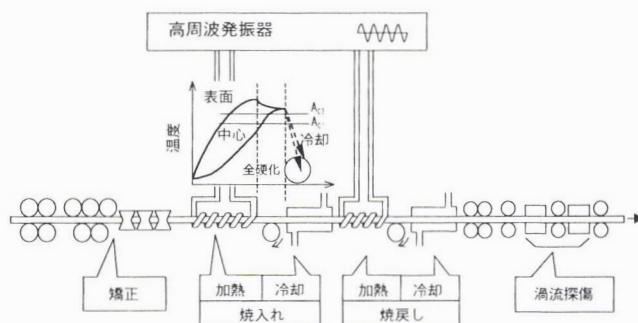


図1 高周波誘導加熱連続熱処理装置の模式図

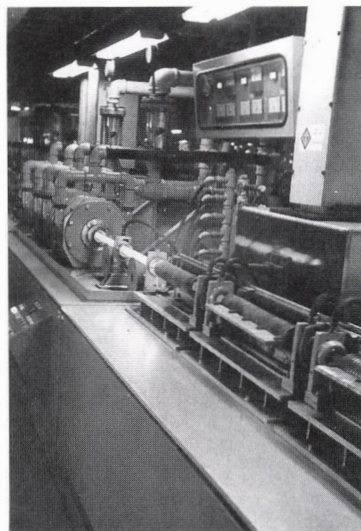


図2 高周波熱処理装置

この高周波熱処理プロセスの特徴は、①全体加熱、②急速短時間加熱、③水噴射冷却にある。

①全体加熱は、前の図1に示したように、表面加熱後の放冷中の熱移動により、焼入冷却前には全断面の温度がほぼ均一になり実現している。なお、高周波加熱の原理につ

いては関連文献を参照いただきたい⁶⁾。

②急速短時間加熱は、加熱コイルに高周波電流を流すことにより非接触で鋼材に電流が流れてジュール熱が発生する直接加熱の効果と、線径に適合した周波数／出力の高周波発振器の使用により実現している。

③水噴射冷却は、ジャケット穴からの水噴射により、無限円柱相当の鋼棒を全外周から均一に連続冷却する方式で行われ、冷却能が大きい割には不均一な熱応力、変態応力の発生が少ないため、焼割れや熱処理変形が極めて生じにくい。著者が知る限り、焼割れ事例は皆無である。



高周波熱処理鋼材の基本的特徴^{4,5,7-13)}

$\sigma_B = 1960 \text{ N/mm}^2$ 級の高周波熱処理ばね鋼線 ITW[®] の開発に際し、SUP12 (SAE9254) 鋼を供試鋼として、急速短時間加熱高周波焼入れ (IHQ)・高周波焼戻し (IHT) の特徴を個々に明らかにすべく、炉加熱熱処理 (FHQ・FHT、コイルばね製造方法の主流の熱間成形法を想定) 品と比較しながら、引張試験、衝撃試験、破壊靱性試験、遅れ破壊試験 (後述の FIP 法)、ねじりクリープ試験、回転曲げ疲労試験などの基礎試験と解析を行った。以下に主な結果を紹介する。PC 鋼棒についても、傾向は同様である。

3.1 高周波焼入れ焼戻材の特徴⁹⁾

高周波焼入れ焼戻材の特徴を明らかにするために、平均結晶粒径が約 $22 \mu\text{m}$ (粒度 8) の炉加熱焼入れ焼戻 (FHQT) 材と約 $10 \mu\text{m}$ (粒度 10) と微細な高周波焼入れ焼戻 (IHQT) 材での硬さと引張性質との関係を求めた。その結果、図 3 に示すように、同じ硬さでも IHQT 材がより優れた延性 (伸び、絞り) を示し、同様の傾向は、靱性 (293K、V ノッチシャルピー衝撃値)、破壊靱性値、遅れ破壊破断時間、疲労寿命でも見られた。

3.2 高周波焼入れの強靱化効果

3.2.1 微細結晶粒による強靱化効果^{9,10)}

IHQ 時の γ 化温度を変えて結晶粒径の異なる IHQ 材を作製し、同じ条件で IHT して機械的性質を比較した。その結果、降伏点は Hall-Petch 型の関係を示し、図 4 に示すように、結晶粒が微細なほど高い衝撃値が得られた。同様の微細結晶粒に起因する強靱化効果は、延性、遅れ破壊破断時間、疲労寿命でも見られた。

また、コイルばね負荷時にはねじり応力が生じることからねじり遅れ破壊試験 (FIP 法準拠) を行った¹⁰⁾。その結果、図 5 に示すように、短時間加熱 γ 化による V 添加に相応す

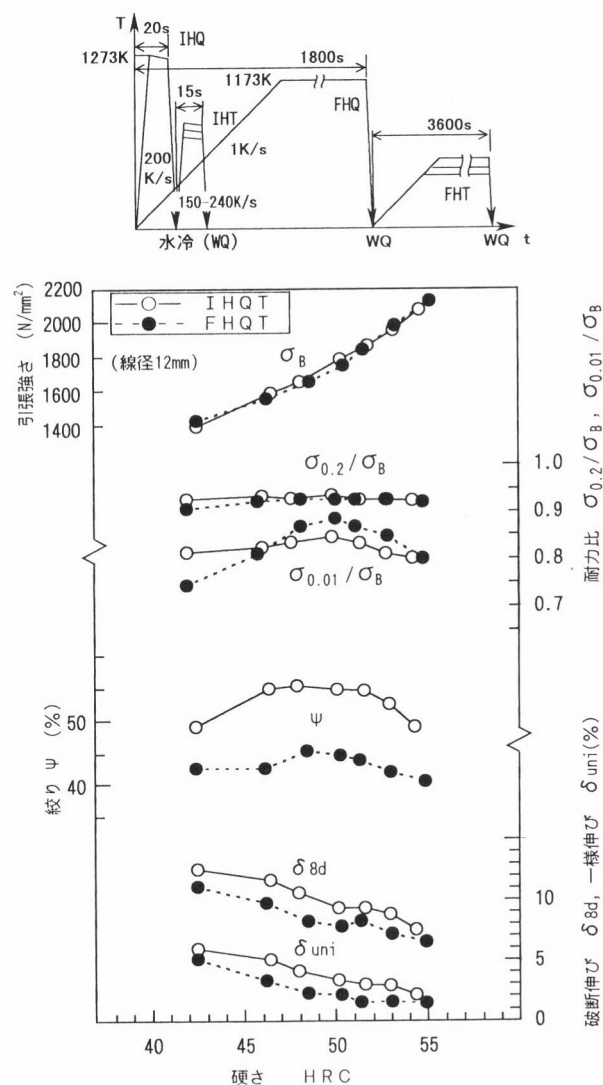


図3 SUP12の高周波焼入れ焼戻 (IHQT) 材と炉加熱焼入れ焼戻 (FHQT) 材の引張性質

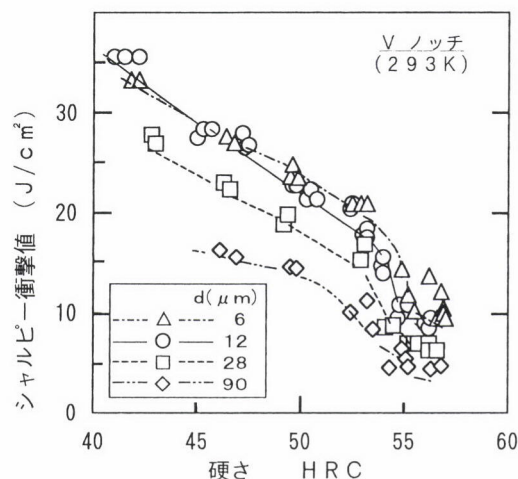


図4 SUP12の高周波焼入れ焼戻材の硬さと衝撃値におよぼす結晶粒径の影響

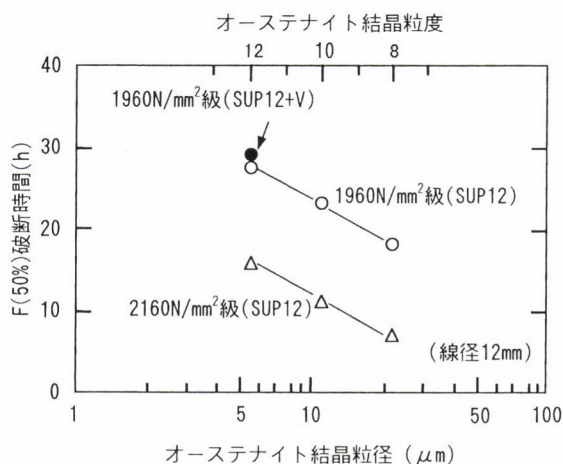


図5 SUP12のねじり遅れ破壊特性(FIP法準拠)におよぼす引張強さと結晶粒径の影響

る結晶粒微細化が有効なことがわかった。

3.2.2 脱炭抑制効果¹¹⁾

図6に示すように、SUP12(SAE9254)はじめSi-Mn系のSUP6、SUP7およびSUP7のSi増量鋼、V添加鋼において、FHQ材では、 γ 化温度が高くなるにつれて脱炭層深さが増加するが、IHQ材では、高温(1543K)域加熱でも脱炭は見られなかった。このことも、ITW[®]を用いたコイルばねが安定した疲労強度を確保するのに重要な特徴と考える。

3.3 短時間加熱焼戻し単独の強靱化効果^{12,13)}

同じIHQ材をIHTまたはFHTした場合、同じ硬さでは、IHT材がより優れた延性、靱性、破壊靱性値、遅れ破壊破断時間、疲労寿命を示した¹²⁾。

図7は低温焼戻脆性域での脆化の軽減効果を示したもの

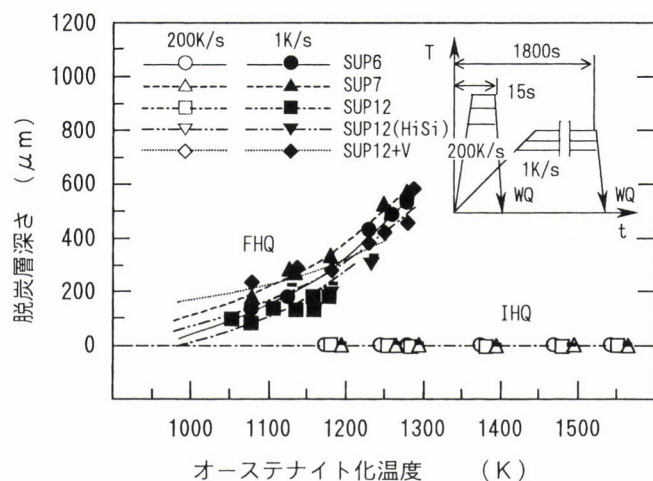


図6 種々のばね鋼での高周波短時間加熱オーステナイト化による脱炭抑制効果

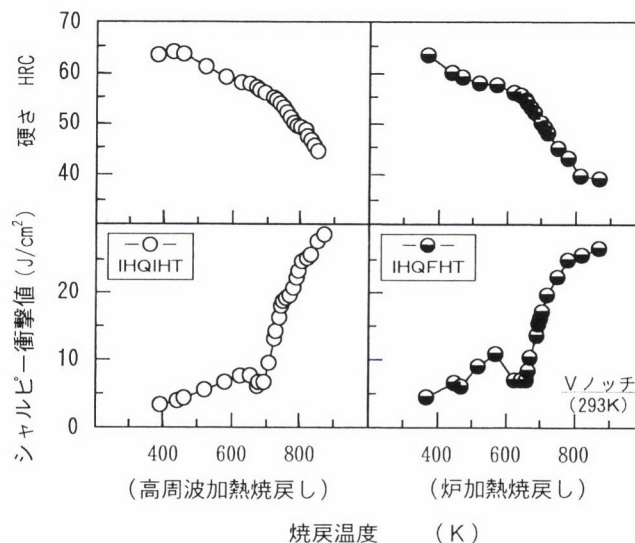


図7 SUP12での高周波短時間加熱焼戻しによる低温焼戻脆性の軽減効果

で、短時間加熱を特徴とするIHT単独でも優れた強靱化効果が得られることがわかった。その理由としては、電解抽出したセメンタイトの高倍率のSEM観察結果、粒径測定結果、計算による炭化物の析出挙動の推定などから、FHT材と比べて、セメンタイトが粒内に均一・微細に分散析出し、粒界での析出量が少ないことが考えられ¹³⁾、ミクロ観察などの解析研究を続けている。

4 高周波熱処理PC鋼棒

4.1 PC鋼棒の役割

コンクリートは、コスト的にも作業性の点でも使いやすく耐久性も優れた工業資材で、土木建築分野で幅広く使用されている。しかし、コンクリート構造物は、圧縮力には強いが引張力(曲げ)には弱い。その強化方法の中に、コンクリート構造物内に鉄鋼線材を入れて引張り(緊張し)、コンクリートが硬化後に引張力を開放することによりコンクリート構造物に圧縮力を導入して、使用中に作用する引張力に対抗させて強化するPC工法がある。このPC工法に使用される鉄鋼線材がPC鋼材である。

PC鋼材には、主に熱処理(焼入れ・焼戻し)および引抜等の加工硬化により強化されるPC鋼棒と、引抜加工硬化により強化されるPC鋼線(PC鋼より線)があり、以下では、高周波熱処理PC鋼棒について概説する。

4.2 PC鋼棒の用途

PC鋼棒が使用される主なコンクリート構造物には、コンクリート製品工場でPC鋼棒を入れて製造(大半は緊張)さ

れるパイル(基礎杭)、ポール(電信柱)、鉄道用まくら木・スラブ軌道用床板、地下溝(ボックスカルバート)や、工事現場でできたコンクリート構造物内にその場でPC鋼棒を入れて緊張される橋梁、橋脚などがある。他に、高強度を生かした非緊張用途では、高層ビルなどの柱鉄筋補強用のスパイラル形状および1ターンで溶接接合した高強度せん断補強筋(フープ筋・溶接フープ筋)にも用いられている。

これらの種々の用途に向け、線径が7.1~12.6mm、 $\sigma_B=1080\sim1420\text{N/mm}^2$ 級で荷姿がコイル状(巻戻すと直線化)の細径のPC鋼棒「(JIS G3137)細径異形PC鋼棒」と、線径が9.2~40mm、 $\sigma_B=1030(930)\sim1230\text{N/mm}^2$ 級で荷姿が定尺材の高周波熱処理PC鋼棒「(JIS G3109)PC鋼棒」が製造されている。他に、表面コーティング(アスファルトポリマ)品、中空品、総ねじ品、高温用品・極低温用品、非磁性品などの種々の製品が製造されている。

さらに、土木建築分野での使用技術開発も行っている。たとえば、プレキャスト部材を圧着工法により接合する耐震補強用の「アクティブコンファイン工法」、パイプを高周波熱処理した中空PC鋼棒を予め緊張した状態のNAPP(Non Abutment Pre-tensioning & Pre-compressing)ユニットを型枠内の所定位置に配置し、コンクリート硬化後に緊張力を開放してコンクリート構造物にプレストレスを導入する「NAPP工法」、高周波熱処理鋼棒では引張・圧縮負荷時の荷重-変位特性が同等なことを活用し、引張用とそれに対抗する圧縮用のPC鋼棒を組合わせて橋梁の桁高を低くスマートにできる「バイプレストレストコンクリート工法」、建築物の張弦梁や吊り構造・ガラス張り造などの「テンションシステム」などが実用化されている。

4.3 PC鋼棒の基本特性

PC鋼棒は、様々な使用環境、応力負荷状態で使用されるため、高強度ながら、優れた延性(伸び、絞り)、靱性(衝撃値)、応力緩和(ストレスリラクセーション)特性、遅れ破壊特性、まくら木では疲労特性が要求される。

以下では、パイル、ポールに使用される異形PC鋼棒「ウルボン(JIS G3137)」のストレスリラクセーション特性と遅れ破壊特性を中心に話を進める。なお、ウルボンには、他にコンクリート打設前の籠編成時に補助筋をラセン状に溶接することから、安定したスポット溶接性と溶接部の強度、延性の維持が要求される。また、端部を温間圧造により膨らませたり、転造によりネジ加工することから優れた温間および冷間加工性も要求される。

4.4 ストレスリラクセーションの低減

PC鋼棒の緊張力は、使用中に徐々にではあるが低下し、

これをストレスリラクセーション(リラクと略す)という。

また、PCパイルの製造時には高温(453K)高压容器内で養生する場合があるため、常温(293K)だけでなく高温リラクも重要特性となっている。

4.4.1 化学成分の影響

C量を0.3~0.4%、Si量を0.25~1.7%に変化させ、Mn量を0.75~0.8%でほぼ一定とし、一部、Cr、Mo、Vを微量添加した15鋼種を $\sigma_B=1420\text{N/mm}^2$ 級に高周波焼入焼戻しし、高温リラク値(初期応力 $=\sigma_B\times0.7$)を求めた。その結果、高温リラク値におよぼす各合金元素の影響の度合いについて、(1)式に示す回帰式が得られた¹⁴⁾。回帰係数としてはVやMoが大きいものの、添加量の絶対値から見てCとSiの増量が有効なことが明らかになった。

リラク値R(%)

$$=32.2+(-4.3\times C)+(-4.9\times Si)+(-0.3\times Cr) \\ +(-18.1\times V)+(-5.3\times Mo) \dots\dots\dots (1)$$

このようなC、Siの低リラク化効果は、その増量に伴い耐力比(0.2%耐力/ σ_B)が高くなるためと考えられ、その理由としては、Cの場合は焼戻時の析出炭化物量の増加による析出強化、Siの場合はフェライト強化と同一強度を得るにはSi量が多いほど焼戻温度が高くなり転位の固着が進む効果が考えられている。

Siの低リラク化効果は、後述の遅れ破壊特性向上効果と合わせて、すでに30年以上も前からデータとして明らかにされており、低リラクが必要な用途には、高Si鋼PC鋼棒が適用されている。

4.4.2 焼戻し中の加工の影響

高周波焼戻し中に鋼棒を加工(ストレインテンパ=ST)すると、ひずみ時効の効果により特に高温リラク値が小さ

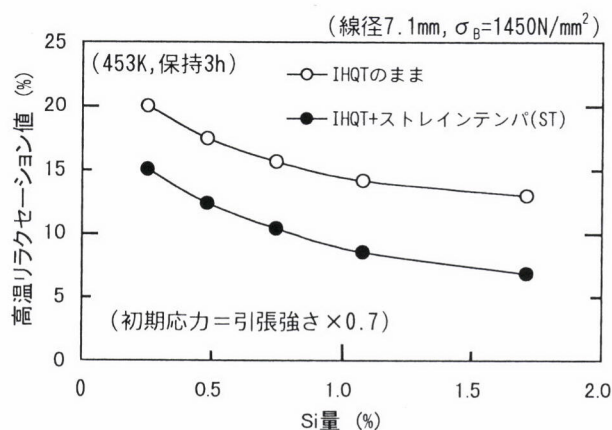


図8 高温リラクセーション値におよぼすSi量およびストレインテンパ(ST)の影響

くなる。図8は高温リラク値におよぼすS30C相当鋼、 $\sigma_B=1420\text{N/mm}^2$ 級のPC鋼棒のSi添加とSTの効果を示したもので、Siの増量、およびSTの有効性がわかる¹⁴⁾。

なお、低リラク性と溶接性の両立および直接通電時の電極との接触性改善のために、Si鋼にMoを0.1~0.2%程度添加したPC鋼棒も製品化されている。

4.5 遅れ破壊特性の向上

高強度鋼材で遅れ破壊が問題になることはよく知られているが、PC鋼棒は、通常、強アルカリ環境のコンクリート中で使用され鋼材表面が不動態化されて腐食されないために、実績的にも長期間使用されても問題は無い。しかし、コンクリートにクラックが発生するなどの何らかの異常により、水分や、場合によっては塩分がコンクリート内に浸入すると、PC鋼棒表面の不動態が破壊されてしまい遅れ破壊を招くことがありうる。そこで、万一を考えて、遅れ破壊特性の改善のために種々の研究開発が行われている。

なお、高強度鋼材の遅れ破壊試験には種々の方法があるが、PC鋼棒では、一般に、323Kの20%チオシアン酸アンモニウム(NH_4SCN 、 $\text{PH}=4$ 程度)液を腐食液とするFIP(Fédération Internationale de la Précontrainte: PC工法の国際学会)方式の試験方法が用いられている。

4.5.1 強度と強化方法の影響¹⁵⁾

図9は、PC鋼線も含めた種々のPC鋼材での σ_B と遅れ破壊破断時間との関係を示したもので、破断時間が σ_B に依存

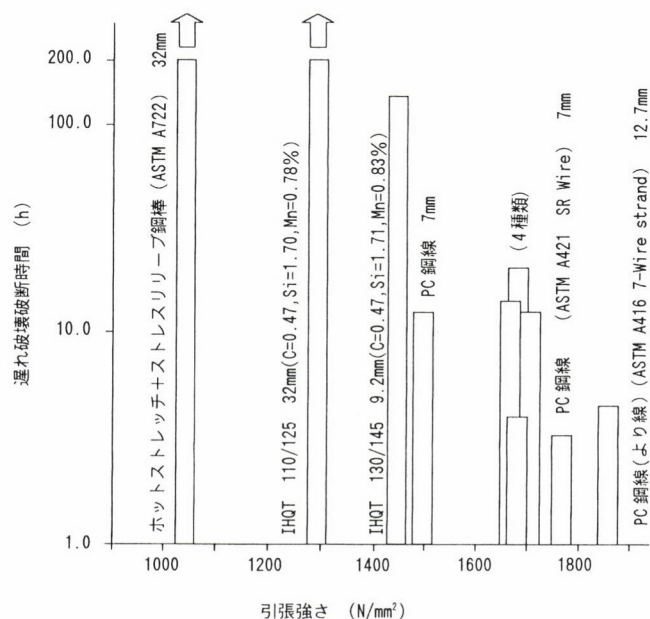


図9 各種PC鋼材のFIP法遅れ破壊試験結果

することと、PC鋼棒(高周波熱処理)とPC鋼線(引抜)ではほぼ同等なことから強化方法には依存しないことが示されている。

4.5.2 高周波焼入焼戻しの影響¹⁶⁾

PC鋼棒が優れた耐遅れ破壊特性を示すのは、基本的には、短時間加熱焼入れによる微細結晶粒と短時間加熱焼戻しによる微細分散析出炭化物の効果と考えられる。

また、焼入時には、微細結晶粒の効果に加えて、 γ 化加熱時間が短いことにより、遅れ破壊に悪影響をおよぼすとされているP、Sなどの不純物元素の γ 結晶粒界への偏析が少なくなり、粒界の結合力低下や外部環境からの浸入水素の粒界拡散が抑制されることが期待される。

焼戻時には、やはり加熱時間が短いことにより、水素のトラップサイトのひとつと考えられるセメントイトなどの炭化物の結晶粒界への析出が軽減され、遅れ破壊特性の向上が期待される。さらに、同じ強度を得るには、炉加熱のような長時間加熱に比べて加熱時間が短い分、低温焼戻脆化域をより高温側に離れた高温焼戻しが可能なため、セメントイトが、遅れ破壊や靱性には不利なフィルム状ではなく、粒状に微細分散析出する効果も考えられる。

4.5.3 化学成分の影響

このような高周波熱処理の基本的な特徴にボルトなどを対象とした一般的な遅れ破壊対策を複合すれば、さらに有効な遅れ破壊特性向上効果が期待される。

たとえば、①結晶粒微細化のためのNb、Ti、Vの添加、②P、S量の減量、③焼戻温度上昇のためのSi、Mo、V、Nbなどの焼戻軟化抵抗を示す元素の添加、④鋼材表面に濃化

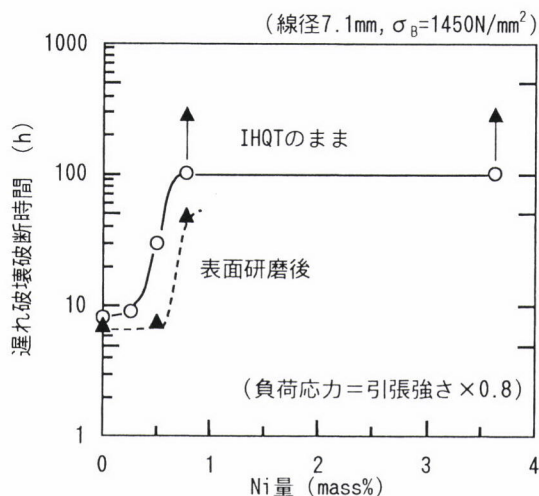


図10 PC鋼棒のFIP法遅れ破壊試験での破断時間におよぼすNiと表面研磨の影響

して水素の浸入量と拡散係数を減少させるNiの添加、⑤表面の軽脱炭などが有効とされている¹⁶⁾。

図10は、 $\sigma_B=1420\text{N/mm}^2$ 級のPC鋼棒の遅れ破壊破断時間におよぼすNi添加と表面研磨の影響を示したもので、Ni添加と増量により破断時間は長くなった。そして、拡散性水素量におよぼすNi量と表面研磨の効果およびEPMA(電子線マイクロアナリシス)による面分析結果から、鋼棒表面でのNiの濃化による水素の浸入と拡散抑止効果が確認されている¹⁷⁾。

これらの結果から、より優れた耐遅れ破壊特性が必要な用途には、SiやNiを添加したPC鋼棒が用いられている。

Siの遅れ破壊特性向上効果については古くから活用されているが¹⁸⁾、低リラク化効果も含めてその機構は必ずしも定かではない。そこで、近年、遅れ破壊挙動におよぼす水素の影響の分析・解析技術が発展し、単なる水素量だけでなく、拡散性、非拡散性などの水素の存在形態や動き易さに関する解析が急速に発展していることから¹⁶⁾、Si添加時のマルテンサイト組織や炭化物の析出形態・分布および水素の挙動について、詳細な解析を予定している。

4.6 さらなる高延性(一様伸び)化

阪神大震災を契機に、建物の耐震設計が見直されており、巨大な地震エネルギーを建物の塑性変形で吸収することがねらいの終局限界状態設計が検討されている。それにより、建物のくい(杭)体には曲げ特性の向上が求められ、その構成部材であるPC鋼棒にもさらに高一様伸び化(現行の $\sigma_B=1420\text{N/mm}^2$ 級で約3%→5%以上)を求める動きがある。

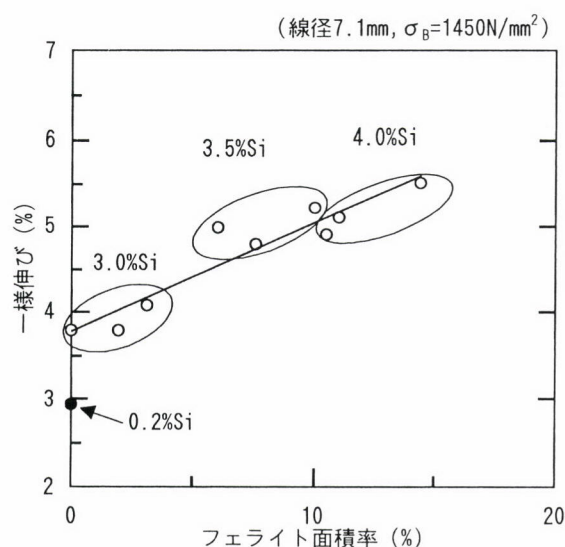


図11 PC鋼棒の一様伸びにおよぼすSi量とフェライト面積率の影響

そこで、焼戻しマルテンサイト中に第二相としてフェライトを生成させることをねらいに、Cが0.30%、Mnが0.70%のTi、B添加鋼にSiを2.0~4.0%と多量に添加した供試鋼を $\sigma_B=1420\text{N/mm}^2$ 級に高周波焼入焼戻しして引張特性を調べた¹⁹⁾。その結果、図11に示すように、Siが3.5%以上、フェライト面積率が10%以上の場合に5%以上の高一様伸びが得られた。これは、高延性フェライトの存在とSiの多量添加によるセメンタイトの微細粒状化、および高温焼戻しゆえのマトリックスの転位密度減少により高変形域でのひずみ硬化率が増加した効果と考えられている。

他に、C量の影響や加工熱処理の効果なども研究されているが、一方では、くいの設計自体も見直されており、その中で一様伸びの目標値が変化する可能性もあることから、関連技術の開発状況も見ながら研究が続けられている。

5 高周波熱処理ばね鋼線「ITW®」^{5,20)}

ばね鋼線「ITW®」はPC鋼棒と同様の高周波焼入焼戻し連続ラインを使用して熱処理される。主な鋼種はSi-Cr鋼SUP12(SAE9254)、線径は6~15mm、 $\sigma_B=1715\sim2060\text{N/mm}^2$ 級で「(JIS G3560)ばね用オイルテンパー線」に含まれる。

ITW®は、優れた高強靱性を生かして高強度のままコイルばね形状に冷間成形され、低温焼鈍(応力除去)、ショットピーニング(表面圧縮残留応力の付与)、セッティング(使用前に予めひずみを与え負荷使用中のクリープ変形を抑制)、塗装などの工程を経てコイルばねに加工される。そして、主に2輪、4輪自動車の懸架装置用(競技用を含む)、トラックの非常ブレーキ用、プレス装置の緩衝用、シャッタ開閉用(ねじりコイルばね)などに使用されている。

現在、日本だけでなくドイツやアメリカでも生産されており、コイルばねでの腐食耐久性の向上、線径範囲の拡大(4~17mm)、 $\sigma_B=2160\text{N/mm}^2$ 級への超高強度化、高周波熱処理適用鋼種の拡大などが課題とされている。

6 高周波熱処理特殊鋼鋼線「ES線」

ES(EdelStahl)線は、グイス鋼(SKD61)、高速度鋼(SKH51)、軸受鋼(SUJ2)、マルテンサイト系ステンレス鋼(SUS420J2)などの高合金鋼線材を高周波焼入焼戻した線径1.65~33mmの特殊鋼鋼線で、やはりPC鋼棒と同様の高周波熱処理連続ラインを用いて30~55HRCに調整されている。

均質で直線性が優れることから、OA機器用の小型モータ軸、CDプレイヤーのガイドピン、プラスチック金型の

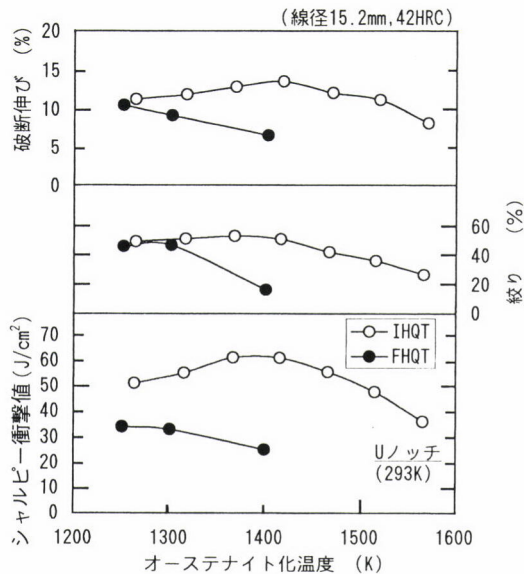


図12 SKD61鋼での高周波焼入焼戻しの強靱化効果

エジェクタピンなどに利用されている。

図12は、SKD61を42HRC級にIHQT、FHQTした場合の γ 化温度と破断伸び、絞り、衝撃値(Uノッチ)との関係を示したもので²¹⁾、微細組織を持つIHQT材がより優れた強靱性を持つことがわかった。このことは、衝撃試験片の破面が、IHQT材では延性破面を、FHQT材では粒界破面を呈することからも裏付けられた。

7 おわりに

近年、国内外で、種々の高強度鋼線材への高周波熱処理の適用例が増加しつつあることから、これまでの先人達の地道な努力と実績の蓄積が高く評価されていることが読み取れる。また、「急速短時間加熱」という、いわば非平衡状態での熱処理により得られる組織や機械的性質への興味が拡がりつつあり、金属材料技術研究所が進められている「超鉄鋼材料PJ(プロジェクト)」の中でも高強靱化手法のひとつとして検討されている²²⁾。さらにクリーンでスピーディなエネルギー変換が可能な電気加熱ゆえ、地球環境に優しいW-Eco(Ecological & Economical)熱処理としても注目されている。

「高周波熱処理技術は21世紀に生き残るユニークな技術である」との思いから高周波熱処理高強度鋼線材とその特徴を紹介したが、もちろん課題も少なくない。ご一読ご指導いただければ幸いです。

参考文献

- 1) 水馬克久, 川崎一博: 熱処理, 27, 3 (1987), 162.
- 2) 山崎隆雄, 山下英治: 熱処理, 20, 4 (1980), 181.
- 3) 末廣邦夫, 山下英治, 村山行雄, 池上由洋: 熱処理, 27, 3 (1985), 19.
- 4) 瀬戸芳樹, 曾我栄市, 内野勝芳, 川崎一博: ばね論文集, 27 (1982), 28.
- 5) K. Kawasaki, Y. Seto, T. Yamazaki, T. Hijikata: SAE Technical Paper, (1983), 830656.
- 6) 熱処理技術入門, 日本熱処理技術協会, 大河出版, (1997), 272.
- 7) 川崎一博: 京都大学学位論文, (1988)
- 8) 川崎一博, 千葉貴世, 高岡憲久, 山崎隆雄: 鉄と鋼, 73, 16 (1987), 136.
- 9) 川崎一博, 千葉貴世, 古賀久喜, 山崎隆雄: 鉄と鋼, 73, 16 (1987), 144.
- 10) 村山行雄, 岡村 司, 川崎一博, 山下英治: 1999年度春季講演会講演論文集, ばね技術研究会, (1999), 1.
- 11) 川崎一博, 千葉貴世, 古賀久喜, 山崎隆雄: 第24回學術講演会予稿集, 日本熱処理技術協会, (1987), 13.
- 12) 川崎一博, 千葉貴世, 山崎隆雄: 鉄と鋼, 74, 2(1988), 128.
- 13) 川崎一博, 千葉貴世, 山崎隆雄: 鉄と鋼, 74, 2(1988), 136.
- 14) 溝口 茂, 山下英治, 新田 一, 池上由洋, 川崎一博: 第2回機械・構造物の強度設計, 安全性評価シンポジウム, (1989), 60.
- 15) 末廣邦夫, 山下英治, 溝口 茂, 谷村昌幸, 島田 透: 材料, 32, 353 (1983), 94.
- 16) 遅れ破壊解明の新展開シンポジウム, 日本鉄鋼協会, (1997), 230.
- 17) 白神哲夫, 石川信行, 石黒守幸, 山下英治, 溝口 茂: 鉄と鋼, 82, 9 (1996), 59.
- 18) 山崎隆雄ほか: Japanese Report, STRESS CORROSION, for Proceedings of FIP Congress, DELFT/Holland, (1971)
- 19) 横田智之, 白神哲夫, 溝口 茂, 山下英治: NKK技報, 164 (1998), 32.
- 20) 川崎一博, 瀬戸芳樹, 山崎隆雄: 鉄と鋼, 71, 1(1985), 100.
- 21) 池上由洋, 三阪佳孝, 川崎一博, 山下英治: 第32回學術講演会予稿集, 日本熱処理技術協会, (1991-5), 5.
- 22) 遊佐 覚, 原 徹, 津崎兼彰, 高橋稔彦, 野口幸雄, 川崎一博: CAMP-ISIJ, 12 (1999), 565.

(1999年8月23日受付)