

PC鋼材の製造とその取扱いについて (第2回)

— PC 鋼 棒 —

山 崎 隆 雄*
富 岡 敬 之**
坂 村 晃***

1. ま え が き

プレストレスト コンクリートに用いられる緊張用鋼材のうち PC 鋼線および PC 鋼より線はすでに前号に詳細に解説されている。

本解説では、PC 鋼棒についてその製造法を概説する。

PC 鋼棒はその弾性範囲や引張強さの高いことが要求されるのは周知であり、それを実現する方法は次の3つに大別される。

- 1) 鋼の焼入れ焼もどし
- 2) 鋼を冷間で高度に加工 (主として引抜き)
- 3) 鋼に合金元素を添加した低合金鋼を圧延しストレッチ

本解説においては 1) を山崎が、2) を富岡が、3) を坂村がそれぞれ執筆した。

2. PC 鋼棒の種類と機械的性質

JIS G 3109-1971 PC 鋼棒によれば、PC 鋼棒の種類および記号は表-1 に、機械的性質は表-2 に示すとおりである。

表-1 種類および記号

種 類		記 号		種 類		記 号	
丸	A種	1号	SBPR 80/95	異形棒	B種	1号	SBPD 95/110
		2号	SBPR 80/105		C種	1号	SBPD 110/125
	B種	1号	SBPR 95/110		D種	1号	SBPD 130/145
		2号	SBPR 95/120				
棒	C種	1号	SBPR 110/125				
		2号	SBPR 110/135				

3. PC 鋼棒の素材

PC 鋼棒に用いられる素材鋼材は、高純度の銑鉄を転炉もしくは電気炉で精錬し、目標成分に調整された溶鋼は 5~6 t の大形キルドインゴットあるいは連続铸造

* 高周波熱錬 (株) 開発技術部
** 神鋼鋼線工業 (株) 開発部
*** 住友電気工業 (株) 特殊線事業部

表-2 機械的性質

記 号	引 張 試 験			レラクセーション試験**
	降 伏 点 または耐力* (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	レラクセーション値 (%)
SBPR 80/95	80 以上	95 以上	5 以上	1.5 以下
SBPR 80/105	80 以上	105 以上	5 以上	1.5 以下
SBPR 95/110	95 以上	110 以上	5 以上	1.5 以下
SBPR 95/120	95 以上	120 以上	5 以上	1.5 以下
SBPR 110/125	110 以上	125 以上	5 以上	1.5 以下
SBPR 110/135	110 以上	135 以上	5 以上	1.5 以下
SBPD 95/110	95 以上	110 以上	5 以上	1.5 以下
SBPD 110/125	110 以上	125 以上	5 以上	1.5 以下
SBPD 130/145	130 以上	145 以上	5 以上	1.5 以下

* 耐力とは 0.2% 永久伸びに対する応力をいう

** 室温 10 hr, 初期応力: 降伏点または耐力の 80% 相当応力

法ですぐに圧延できる小形キルドインゴット (ビレットという) に作られる。大形インゴットはさらに小さく分塊されて 200~2000 kg のビレットになり、1100~1200°C の温度で連続的に所要寸法 (5.5 mm φ~50 mm φ) まで圧延され、コイル状に巻き取られたり、直棒のまま仕上げられたりする。PC 鋼棒に用いられる鋼はキルド鋼と呼ばれ、十分脱酸の行なわれた偏析の少ない良質の鋼であり、しかも PC 鋼棒製造法のちがいにより化学成分も大幅に異なるので、JIS でも不純物として P, S および Cu を規制するのみで、その他の合金元素については製造法にもっとも適したものを適宜選択できる。

PC 鋼材素材は受入れに先立って前号に記載されたのと同様のきびしい受入れ試験 (試験項目は前号参照) が行なわれた後、製造工程に移される。

4. 焼入れ焼もどし PC 鋼棒

(1) 形状および寸法

焼入れ焼もどし PC 鋼棒には丸形と異形とがあり、異形には連続する条痕がラセン状についたもの、インデント状のものあるいは普通鉄筋鋼棒に近い形のものなどがある。寸法は呼び径 8 mm から 33 mm までのものが製造されている。呼び径 12 mm φ までのものはコイル状に巻かれたものが納入され、使用時必要長さに切断

される場合も多い。

(2) 製造方法

a) 基本原理 写真—1 にその顕微鏡組織を示す。

C:0.35% の熱間圧延材は、白くみえるところがフェライト (α)、黒くしま状にみえるところがパーライトと呼ばれる組織からなっている。鋼中のC量が増すとパーライトが増し、C:0.765% の鋼では全体がパーライト組織になる。フェライトとパーライトの混合組織はパーライト量の増加につれて強度も増加するが、P C 鋼棒 3, 4 種にひびてくる強度は得られない。一例として図—1 曲線 1 に C:0.35% の熱間圧延材 (10 mm ϕ) を 9.1 mm ϕ まで冷間引抜きしたものの荷重—伸び曲線を示すが、弾性限が非常に低いことがわかる。

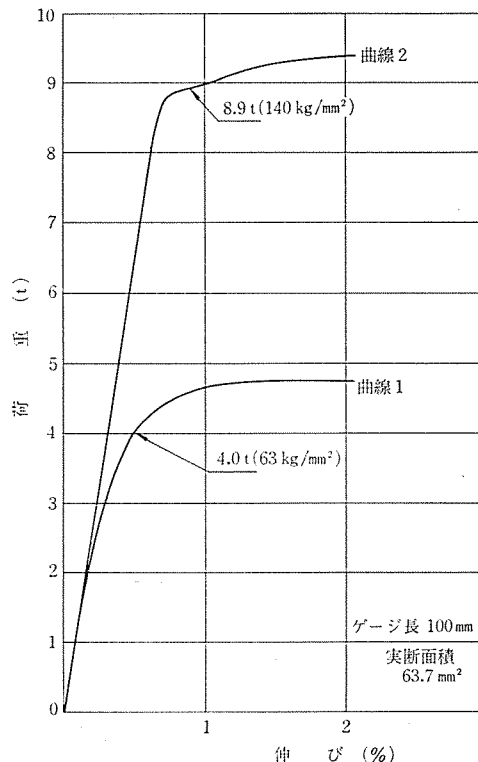
これを強化する方法として焼入れ焼もどし処理を行なうことになる。図—2 の Fe-C 系平衡状態図¹⁾ に示したように、体心立方晶のフェライトのC溶解度は最大で約 0.02% 程度で、残りのCはセメンタイトというきわめてかたくかつもろい化合物となる。上記のパーライトという組織はこのセメンタイトとフェライトが交互に微小間隔で層状にならんだものである。

鋼を加熱するとそのC量に応じた特定温度以上で面心立方晶のオーステナイト (γ) と呼ばれる相に変態する。オーステナイトの最大C溶解度は 1147°C で約 2.1% にも達する。このオーステナイトを徐冷するとまたもとのフェライトとセメンタイトにもどるが、ある冷却速度 (臨界冷却速度) 以上で急冷すると写真—2 に示すようなマルテンサイトと呼ばれるかたい組織になる。マルテンサイトの結晶は体心正方晶でC軸の長さはC量が多いほど大きくなる。マルテンサイトのかたさとC量の関係を図—3²⁾ に示す。マルテンサイトがかたいのは焼入れ処理によってオーステナイト状態から室温まで急冷され

るため Fe の結晶は本来の溶解度よりはるかに多量のCを含まなければならない (過飽和状態)。余分に入ったCのために本来立方であるべき格子は正方にならざるを得ず、そのために、内部ひずみは著しくかたさが増大する。マルテンサイトの結晶格子におけるC原子と Fe 原子の関係の模形図を図—4³⁾ に示す。ただこの場合もC量が少ない (例えば 0.2~0.25% 以下) とマルテンサイトといえどもある程度の変形能があるので、塑性加工も可能である。

一般にはこのCを過飽和に含むマルテンサイトを 200

図—1 荷重—伸び曲線



写真—1 C:0.35% 熱間圧延材顕微鏡組織 (左×100, 右×400)

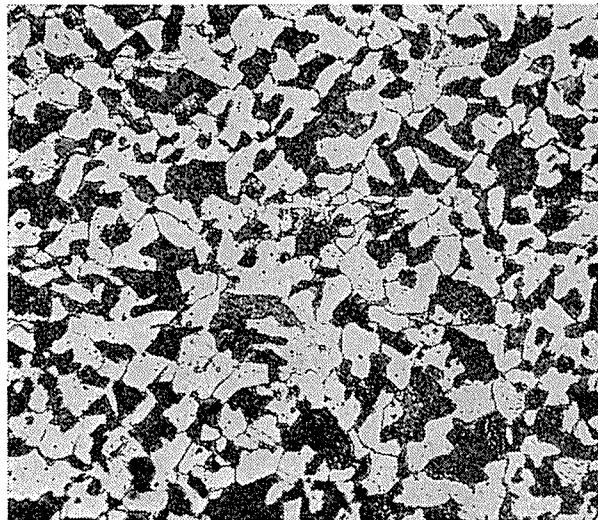
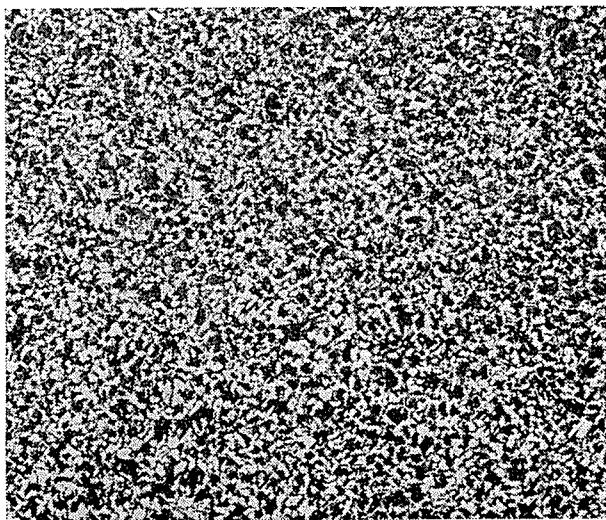


図-2 Fe-C 系復平衡状態図

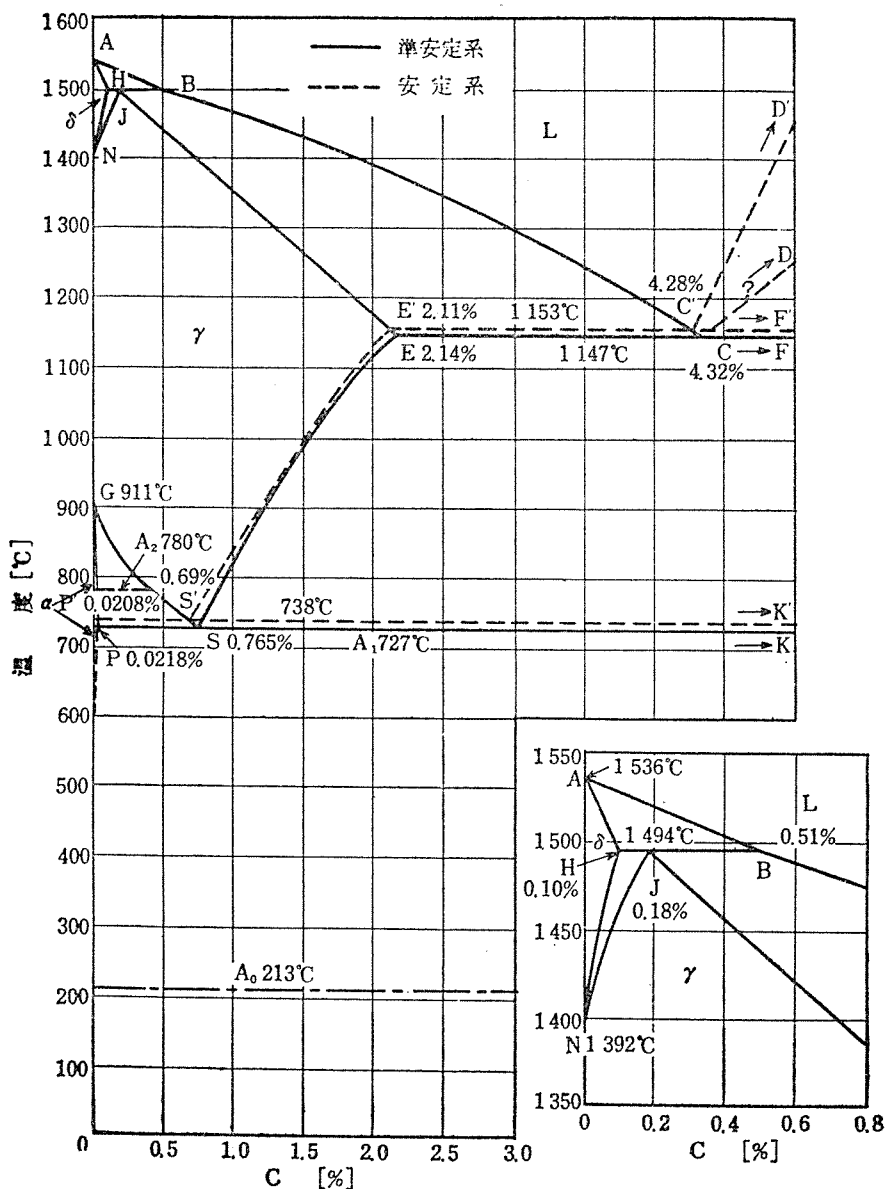
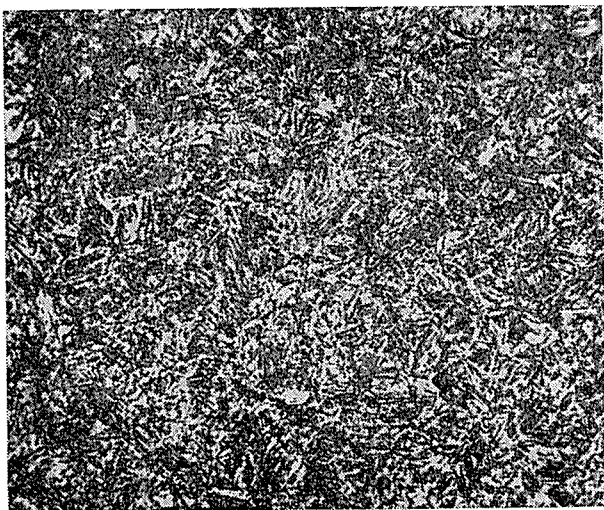
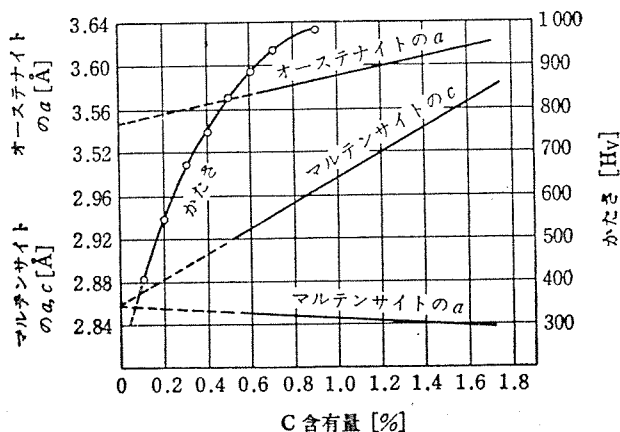


写真-2 マルテンサイト (C : 0.35%)
(×400)

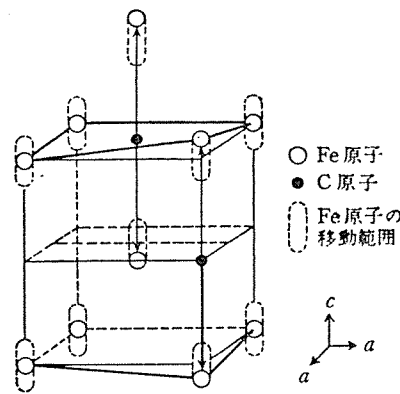


~600°C の適当な温度まで加熱する。この処理を焼もどしと呼んでいる。加熱することによってマルテンサイト中に含まれる過飽和のC原子は熱エネルギーを与えられ、活発に拡散を開始すると同時にFeと中間段階の化合物を形成しはじめる(この中間段階の化合物の組成は決定がむずかしく、研究者によりFeとCの比はまちまちなのでここでは化合物とのみ記す)。こうした焼入れ時に内蔵していた高いひずみが解放されはじめ、それにとまって少しずつかたさを減ずるとともに韌性を増すようになってくる。しかも放出されたCから生成するFeの炭化物は非常に微細である。金属学的にいうと微細な析出物が均一に分散した組織は機械的性質の向上にきわめて好都合な状態である。焼入れした鋼を焼もどした場合の組織はちょうどこの状態にあたるために、マルテンサイトを焼もどして多少かたさを低下させても韌性をもたせて強度を高めていることと、微細炭化物の均等な分布という二つの効果が合まって鋼の機械的性質の改善向上に非常によい結果をもたらすことになる。

図-3 鋼のC量と焼入れかたさ、オーステナイトおよびマルテンサイトの格子定数の関係、(a および c は格子定数)



図—4 マルテンサイト結晶格子における C 原子による Fe 原子の変位状況の模型図



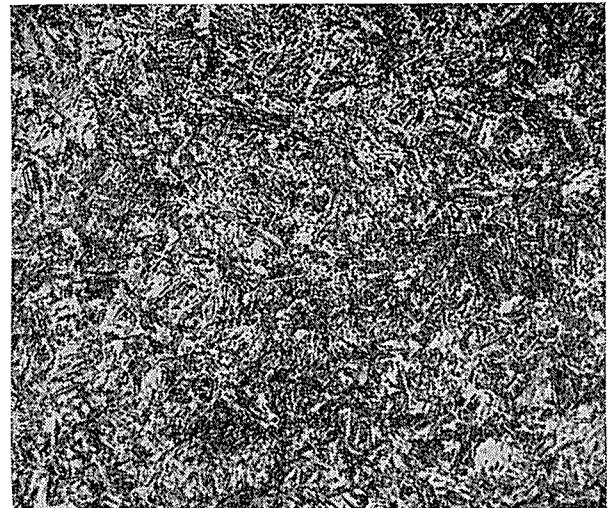
b) 製造工程

1) 素材：キルド鋼を熱間圧延した鋼棒あるいはパーインコイルが使用される。

2) 酸洗い、引抜き：必要に応じその直径を調整したり、偏径差を少なくしたりするために素材を酸洗いした後軽度の引抜き加工を行ったり、あるいは異形加工が行なわれる。また、引抜き加工によって P C 鋼棒の直径をあらかじめねじ転造する場合の有効径に仕上げておくことにより、P C 鋼棒使用時のねじ転造作業が容易になる利点がある。

3) 焼入れ焼もどし：焼入れ焼もどし処理は連続で一工程として行なわれるのがほとんどである。焼入れのための加熱は大別して、①鋼材の外部からの加熱と、②鋼材自体の発熱による加熱にわけられる。前者は高炭素鋼線のパテンティングの場合とほぼ同様で、重油、軽油あるいはガス炉などのなかもしくは何らかの方法で加熱した塩浴中を鋼材を連続的に移動せしめながら加熱する。

写真—3 焼もどしマルテンサイト (C : 0.35%)
(×400)



後者は鋼材に直接電流を流して加熱する方法（これには品物が静止した状態で通電する場合と品物が移動しながら給電される場合とがある）。と鋼自体に渦電流を誘導させて加熱する方法があり、これは容易に連続的に行ない得る。これらのいずれかの方法で加熱された鋼材は続いて急冷される。急冷する媒体には水または油が用いられ、媒体中に鋼材を浸漬したりあるいは鋼材に媒体を吹きつけたりして十分な臨界冷却速度を得るように考慮している。こうしてマルテンサイト組織になった鋼材は引続いて焼もどしされるが、それには鋼材を塩浴、油浴あるいは金属浴中に浸漬して加熱するか、または焼入れのための加熱の①と同様な方法で加熱される。写真—3 に C : 0.35% の鋼の焼もどしマルテンサイト組織の一例を示す。図—5⁴⁾ は油焼入れ、鉛浴焼もどしによるオイ

図—5

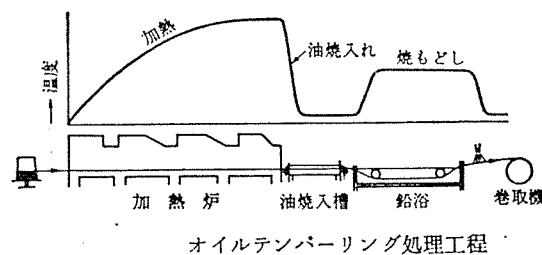
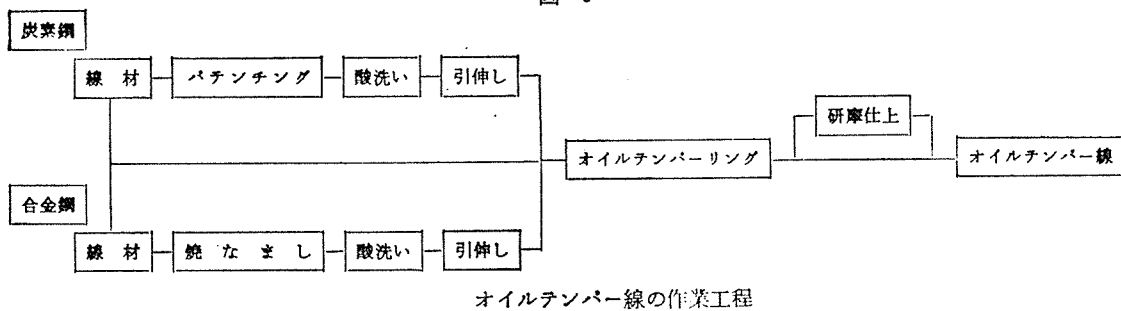


図-6 鉄筋の電気加熱焼入れ焼もどし装置略図

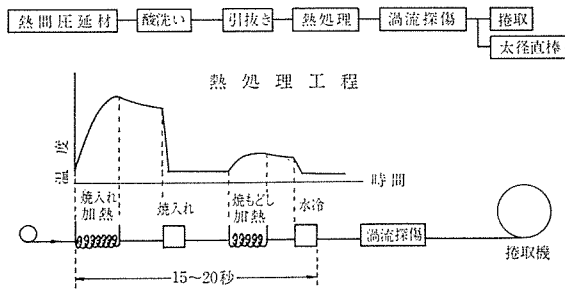
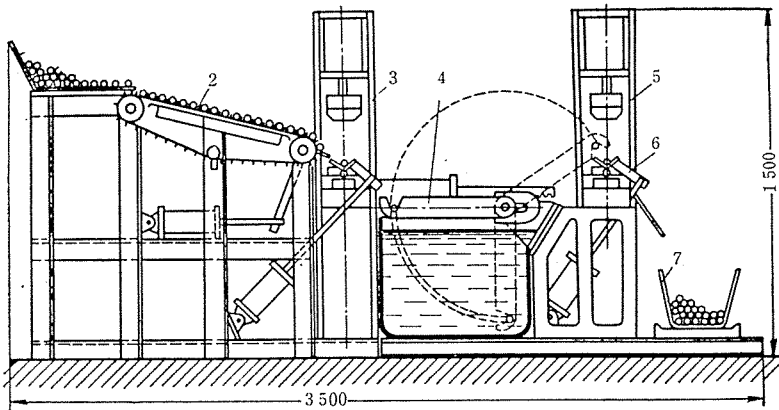


図-7 誘導加熱による P C 鋼材製造工程

ルテンパー線の熱処理工程を示す。直接通電による抵抗加熱の例としてソ連⁶⁾では定尺の棒の両端で給電し、長さ方向の熱膨張による伸びで温度管理(精度 $\pm 5^{\circ}\text{C}$)をして焼入れ焼もどしをしている。図-6にこの装置の略図を示す。図中左側から送られた鋼棒はわく3のところまで端子に接続され通電された後その右側の水槽中で急冷して焼入れされる。冷却後わく5のところまで再度通電され焼もどしされる。誘導加熱あるいは直接通電による加熱のように、炉加熱にくらべて加熱速度が大きい場合は、品物の機械的性質に好影響を及ぼしているようである。急速加熱した場合の鋼の機械的性質は普通に加熱したものよりすぐれていることが報告^{6),7)}されている。図-7に誘導加熱による P C 鋼材の製造工程の略図を示す。

連続的に焼入れ焼もどしされた長い鋼材はコイル状に巻きとられるが、そのときの巻き径は鋼材の強度および直径に応じて調整され、外周表面応力が弾性限以下になるように巻き取られる。したがって、使用時アンコイルしたとき P C 鋼材は原則的に直線となる。

(3) 性 質

焼入れ焼もどしによって製造された P C 鋼棒には次のような特長がある。

1) 直線性がよいこと：コイル状に巻きとられた P C 鋼棒の場合、その表面にかかる曲げ引張応力は弾性限の約 70% 以下であるため、使用時アンコイルしたとき P C 鋼棒はほとんどもとの直線状態にもどる。

2) 降伏比が高いこと：図-1 曲線 2 の荷重-伸び曲線に示すように曲線にくらべて弾性限の増大は著しく、降伏比は 0.93~0.94 に達している。この値は CEB-FIP の推奨値⁸⁾ともほぼ一致している。また、一樣伸びも約 4.5% 程度あるので破断伸びの大きいことと合まって構造物破壊時の鋼材による強度保持に対しても有効である。

3) レラクセーションが少ないこと：そもそもレラクセーションは鋼にクリープ現象があるから起こることである。

クリープするということは本来なら弾性変形のみにとどまるべき応力でも、それを長時間負荷すると鋼が徐々に塑性変形することである。これは鋼の原子配列のうちにある転位の移動にもとづいているので、基本的には何らかの方法で転位を動きにくくすればそれだけ塑性変形しにくくなる。

焼入れ焼もどしによる鋼の強化は、転位の増殖とマルテンサイトの焼もどしによる微細炭化物の析出、侵入型固溶原子 (C, N, B など) による転位とのコットレル雰囲気形成による転位固着効果などが相乗し合って塑性変形抵抗が大きくなり、弾性限が高まりそれにともなってクリープしにくくなるためにレラクセーションも少なくなる。焼入れ焼もどし P C 鋼棒の室温 10 hr レラクセーション値は、規格降伏点荷重の 80% の初期荷重の下で 0.5~1% である。最近では長時間のレラクセーションが問題になってきているが、室温 1000 hr 値で普通成分の鋼で 3~3.5%、ある種の合金元素を添加した鋼では 1.5~1.8% の値であり、スタビライズド鋼線の値 (1% 以下) に近いものも開発されている。

4) 応力腐食破壊あるいはおくれ破壊に対する耐性：焼入れ焼もどした P C 鋼材は冷間引抜き鋼線にくらべてその結晶配列に方向性がほとんどないことと、金属組織的に若干異なるために、応力腐食割れあるいはおくれ破壊感受性が高いといわれた。1950 年代、P S コンクリート構造物に使用されたオイルテンパー線に破断事故がいくつか発生し、実験的にもオイルテンパー線は応力腐食割れを起こしやすいといわれるようになっていたが、1965 年位までの間に、焼入れ焼もどした P C 鋼材の応力腐食割れ感受性改善の研究が精力的に進められた結果、冷間引抜き P C 鋼線となんら変わらないオイルテンパー線が開発され使用されるに至っている⁹⁾。プレテンション工法のように P C 鋼材のコンクリートによる被覆が十分になされる場合には、普通成分の鋼を焼入れ焼もどした P C 鋼材であっても応力腐食割れある

いはおくれ破壊に対する心配はほとんどないといつてよい。しかし、ポストテンション工法の場合のようにPC鋼材をグラウトによって保護するときには、モルタルが十分まわりきらない場合などにはPSコンクリートとして使用中シース内に水がたまったりして鋼材が破断に至る事故¹⁰⁾も発生しているので、このような場合には工事そのものの施工にも十分の注意をはらうとともに、新しい成分の応力腐食割れ感受性の低い鋼材を使用するなどの配慮が必要と考えられる。

ただ現時点では、たとえ冷間引抜きPC鋼線であろうとも応力腐食割れあるいはおくれ破壊によって破断している事故例が報告¹¹⁾されているので、PC鋼材の使用に際してはこの点を十分考慮し慎重な使用施工が望まれる。

5. 引抜き鋼棒

(1) 材 料

引抜き鋼棒も含めPC鋼棒用材料は、現在各メーカーが独自に開発したものが使われており、一般に中炭素鋼、高炭素鋼、低合金鋼などがある。したがって、JIS G 3109-1971では化学成分を全面的に規定せず、不純物のみ規定している。

表-3は、引抜き鋼棒の使用鋼種と化学成分の一例を表わしたものである。

表-3 引抜き鋼棒の成分例

鋼 種 名	C	Si	Mn	P	S	Cu	備 考
SWRH5B	0.65~0.15~ 0.75 0.35	0.60~ 0.90	0.030 以下	0.030 以下	0.30 以下	JIS G 3506	

(2) 製造方法

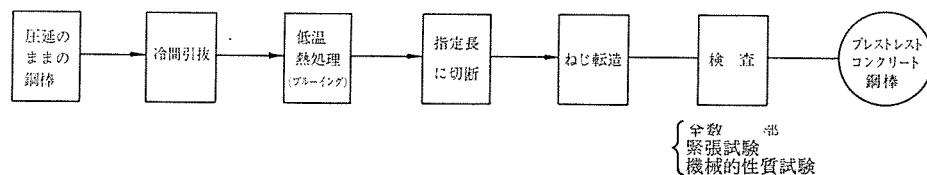
熱間圧延された炭素鋼または低合金鋼をドローベンチまたは大型伸線機を使用した引抜きによる冷間加工で強度を高め、その後300~450°Cのブルーイング処理を施して降伏比と破断伸びを上昇させるとともにレラクセーション量も減少させている。

図-8に引抜き鋼棒の製造工程を示す。

(3) 引抜き鋼棒の特長

引抜き鋼棒は、A種(引張強さ105kg/mm²級)では寸法9.2~26mmφ、B種(引張強さ110kg/mm²級)以上では寸法9.2~13mmφの鋼棒が使用されるのが普

図-8 引抜き鋼棒の製造工程



通である。

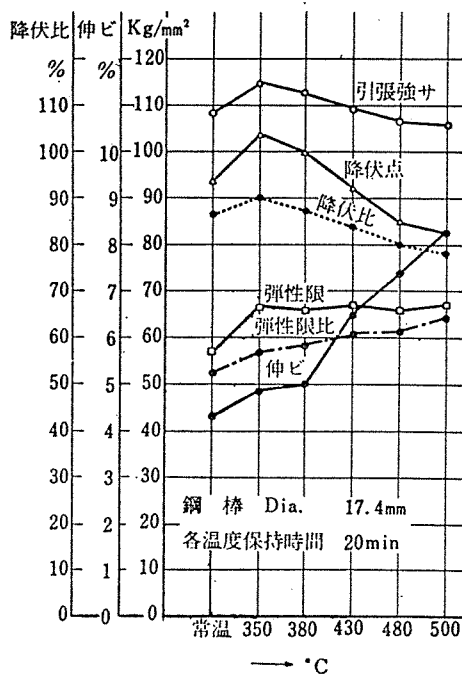
冷間引抜き鋼棒として特記すべき事項は、引抜き後の寸法を両端ねじ部有効径に仕上げてあるため、ねじ転造時他種鋼棒のようにねじ部のみ有効径切削加工する必要がなく、また、母材部も最も経済的な寸法および重量となることである。また、炭素鋼では最も安定したパーライト組織をさらに引抜き加工でファイバー状に加工してあるので、冷間引抜き加工で強度を上げた鋼棒は、応力腐食に対して強く、特殊な環境で使用しない限り心配はない。

(4) 引抜き鋼棒の機械的性質

圧延のままの鋼棒は冷間引抜きにより、降伏点、引張強さは増加するが、さらにブルーイング処理により弾性限、降伏点は著しく上昇して、プレストレストコンクリート用鋼棒としての適切なる機械的性質を保持する。

図-9はブルーイングによる機械的性質の変化を示す。

図-9 ブルーイングによる機械的性質の変化の一例



6. 圧延鋼棒

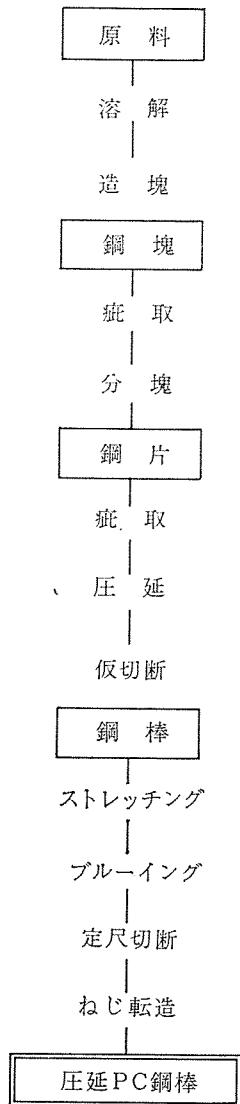
圧延PC鋼棒は、熱間圧延された圧延鋼棒を降伏点を高めるためにストレッチングし、ストレッチングによる加工ひずみを除去するために低温ひずみ取り処理を行なった後定尺切断、ねじ転造を行なって製品化される。この製造工程を図-10に示す。

熱間圧延により所定の鋼棒径に仕上げたとき、そのままでは所要の引張強さを出すために一般にC量が0.70%の低合金鋼が使用されている。熱間圧延で仕上げられた状態においては引張強さに対する降伏点の比は通常60%位で、そのままではPC鋼棒として規定されている降伏点がえられない。したがって、圧延鋼棒においてはPC鋼棒として要求される値まで降伏点を高めるために圧延材の降伏点の110%から120%程度の引張荷重、すなわち、規格降伏点荷重まで鋼棒を緊張する。この緊張工程をストレッチングと呼んでいるが、これによって圧延材の降伏点が規格値を満足する値まで高められるとともに鋼棒の伸直性が向上する。しかし、ストレッチングされた鋼棒は塑性域まで引張られているので、そのまま再度緊張する場合には弾性係数は低下し、降伏点に対する弾性限（比例限）の比も小さくなり、伸びもわずかながら低下する傾向を示すので、ストレッチングによる加工ひずみを除去し、これらの性能を回復させるために300°C程度の温度

で加熱処理する必要がある。この低温ひずみ除去の処理は通常ブルーイングと呼ばれているが、この処理によって弾性限は降伏点の90~95%程度に、弾性係数はほぼ2050000 kg/cm²に回復するとともに伸びも回復し、降伏点もストレッチングによってえられた値よりさらに上昇する。ただしこのような機械的性能の向上はブルーイングのみではえられない。ストレッチングとブルーイングの組合せによって始めてえられるもので、この辺の状況を図-11に示す。

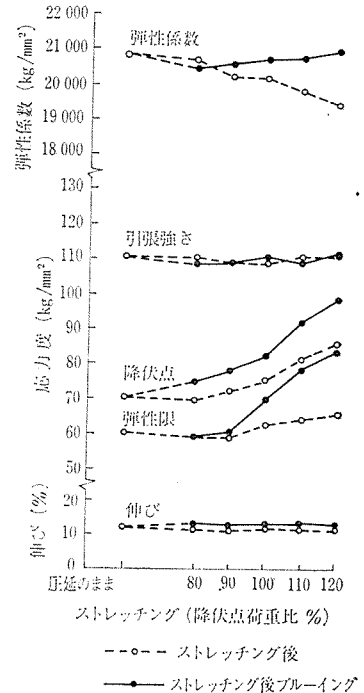
圧延鋼棒はφ11mmからφ32mm直径のものが製造されているが、原理的にはさらに太径のものも鋼種を

図-10 圧延PC鋼棒の製造工程



選定して行なえば製造可能であり、現に西ドイツにおいてはSBPR 80/105級のものでφ36mmのPC鋼棒が実用に供されている。圧延鋼棒としては、現在のところSBPR 95/120までが製造されており、SBPR 110/125またはSBPR 110/135は熱処理によって製造されている。圧延PC鋼棒の特長は、伸びが大きく降伏点に対する引張強さの比が大きいので、実用緊張力が降伏点によって規制を受ける場合には破断に対する安全率が高くなること、およびストレッチングによって鋼棒の全長が均質化され、かつ全数がその製造工程中において降伏点まで緊張されていて性能が確認されている点にある。

図-11 ストレッチングおよびストレッチング後ブルーイングによる性能の変化



参考文献

- 1) 田中：鉄と鋼，53 (1967) 1601
- 2) 日本鉄鋼協会編：鋼の熱処理第5版 (1969) p. 51 [丸善]
- 3) Cohen, M.: Jour Iron and Steel Inst., 201 (1963) 833
- 4) 前出 2) p. 543
- 5) А.П. ГУЛЯЕВ, А.В. ТЮРИН, И.М. ВЫЦВАНЮК; МЕТАЛЛОВОЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ (1969) No. 9, 45
- 6) Peter, W., Finkler, H.; Härtereitechn. Mitt. 24(1969) 210
- 7) 中村：高周波焼入れと疲労強度 (1963) p. 54 [日刊工業新聞社]
- 8) CEB-FIP: International recommendations for the design and construction of concrete structures(1970) p.24, [Cement and Concrete Association], London
- 9) A. Bukowiecki: Schweizerische Techn. Zeitschrift Nr. 45 (1969) Nov. 929
- 10) 久富，藤盛：清水建設研究所報 (1968) No. 12, 27
- 11) Xercavins, P.: Steel for prestressing, Proceedings of the Symposium held at Madrid in 1968, (1969), p. 51 [F.I.P], London

<つづく>

プレストレスト

コンクリート

建設工事 — 設計施工

製 品 — 製造販売



建設省 西湘バイパス道路



日本鋼弦コンクリート株式会社

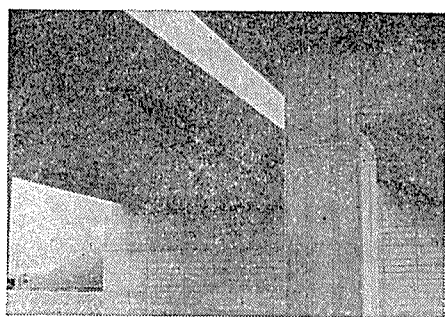
取締役社長 仙波 隆

本社 東京都新宿区西新宿1丁目21番1号 電話 (343) 5281 (代表)
 営業所 東京 Tel 03(343)5271 工場 多摩工場 Tel 0423(64)2681~3
 大阪 Tel 06(371)7804~5 滋賀工場 Tel 07487(2)1212
 中部 Tel 07487(2)1212 相模原工場 Tel 0427(78)1351
 仙台 Tel 0222(23)3842



最高の技術を誇る

鋼弦コンクリート用



是政第1橋

PC

ワイヤ
 インデントワイヤ
 スtrand
 2本ヨリ，7本ヨリ

日本工業規格表示工場 B.B.R.V.工法用鋼線認定工場 P.C.I. (アメリカPC協会) 会員

興國鋼線索株式会社

本社 東京都中央区宝町2丁目3番地 電話 東京 (561) 代表 2171
 工場 東京・大阪・新潟