

論 文

UDC 669.14.018.295.3 : 621.778.28.016.2 : 539.389.3

PC 鋼線の温間矯直とリラクゼーション特性の改善*

赤城 正**・横田 貞介***・五弓 勇雄****

The Improvement of Stress-Relaxation Properties of PC Wire by "Warm-Straightening"

Tadashi AKAGI, Teisuke YOKOTA, and Isao GOKYU

Synopsis:

Various properties of high-carbon PC wire treated by cold-straightening and bluing ("CS+B") and those by warm-straightening ("WS") were compared and the following results obtained.

It was found that the greater the bending deviation during straightening, the straighter was the processed wire and the more stable was the torsion value. There was an increase in the diameter of the wire in the "CS" process and in the "WS" process at intermediate temperatures, but it was found that at higher temperatures the diameter reached a maximum and then gradually decreased, becoming less than the original diameter above 400°C.

The maximum tensile strength and sectional-hardness were obtained for "CS+B" wire when treated at 200°C and 250°C respectively, while for "WS" wire the maximum values were obtained at 300°C. The "WS" wire had a lower stress-relaxation value than "CS+B" wire, this being particularly evident at high auto-clave temperatures. One reason may be that the "WS" wire has a higher elastic limit than "CS+B" wire.

Minimum relaxation values for both "CS+B" wire and "WS" wire were obtained at a temperature approximately 50°C above that at which $\sigma_{0.2}$ and $\sigma_{0.02}$ showed a maximum and this corresponded with the results of creep tests performed at intermediate temperatures.

It is considered that in the "WS" process the dislocations increase and there are repeated lockings of these dislocations by solute atoms and that the composite effect of aging and process hardening results in a fixed structure of dislocations.

1. 緒 言

PC 鋼線に対しては、引張強さ、耐力、伸び、ストレスリラクゼーション値(以下リラクゼーション値という)などの諸性質が所定の規格数値を満足するとともに、その使用上から直線性のよいことが要求されている。このため、製造工程としては、常温線引きで必要な線径に伸線された鋼線を直線機にかけて矯正直線加工が行なわれるのが普通である。この場合、素材鋼線は直線機の中で繰返し曲げを受けるため、バウシinger効果によつて弾性限界や耐力が低下する¹⁾²⁾。しかし、これに続く低温焼なまし、すなわち、ブルーイング処理によつて耐力弾性限ともに回復向上し、必要な特性を具えた PC 鋼線が製造されるものである。

温間矯直は、あらかじめ加熱した鋼線を直線機に通して、温間域で矯直加工する方法で、引張強さ、耐力が向上し、充分な伸びも具え、PC 鋼線の製造に応用して極

めて効果的なことが報告されている³⁾。

ここでは、常温の矯直および温間での矯直加工の条件と、得られた PC 鋼線の機械的性質との関係について検討し、特に、ブルーイングされた鋼線と、温間矯直された鋼線との、常温、および高温におけるリラクゼーション特性について比較検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材は Table 1 に示す内容の高炭素鋼線で、11.0 mm の線材を、熱処理後 7.0 mm まで常温伸線したものである。

2.2 直線機

直線機は 5 個の矯正駒を内蔵する回転シリンダー方式のもので、駒は 100 mm のピッチで配置されている。シリンダーの回転数は毎分 2500、鋼線の進行速さは毎分 30m である。Fig. 1 に回転シリンダーの断面を示すが、

* 昭和 47 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 51 年 3 月 22 日受付 (Received March 22, 1976)

** 日本コンクリート工業(株) 工博 (Nippon Concrete Ind. Co. Ltd., 1-8-3 Shinbashi Minato-ku Tokyo 105)

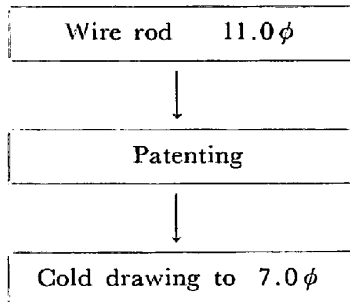
*** 日本コンクリート工業(株) (Nippon Concrete Ind. Co. Ltd.)

**** 日本大学生産工学部 工博 (Faculty of Industrial Technology, Nippon University)

Table 1. The details of specimen.
Chemical composition (%)

C	Si	Mn	P	S	Cu
0.80	0.27	0.86	0.024	0.010	0.08

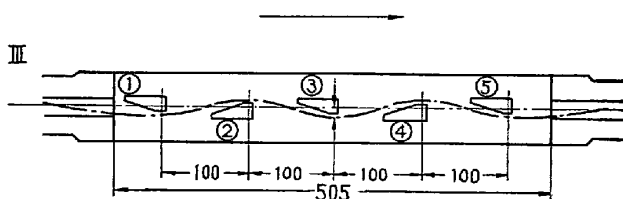
Working process



Mechanical properties

Diameter	Tensile strength kg/mm ²	Proof stress kg/mm ²	Elongation*
6.98 mm	172.8	138.8	4.6%

* G. L. = 100 mm



Deviation of wire (mm)

No. of blade No. of deviation	①	②	③	④	⑤
	I	2.3	2.3	2.3	2.3
II	3.5	3.5	4.6	3.5	3.5
III	4.6	4.6	5.8	4.6	4.6

Fig. 1. Rotary cylinder of wire straightening machine.

①, ②, ③, ④, ⑤の5個の矯正駒によつて, 鋼線はじぐざく状に曲げられている. 矯正駒の押し込み量によつて, シリンダーの中心軸からの鋼線の中心軸の変位量を変えることができる.

この実験では Fig. 1の表に示すように, I, II, III, と, 3とおりの変位量を与え, 最も大きい変位状態をIIIとした. このような条件で直線機を通つた直後の試料鋼線の表面温度は, 変位量 I, II, III に対して, それぞれ, 80~110°C, 90~120°C, 100~140°C であつた.

2.3 加熱方法

ブルーイングには溶融鉛浴を用い, 矯直後常温まで自然放冷した試料鋼線を, 所定温度に保持した鉛浴中に, 2 min 間浸漬加熱した後, 常温まで自然空冷した.

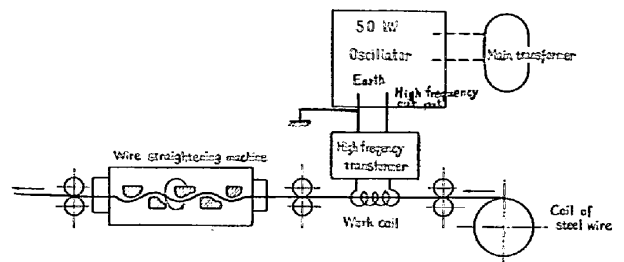


Fig. 2. Experimental apparatus.

温間矯直には, Fig. 2に示すような高周波誘導加熱装置を用いた. 高周波加熱炉の能力は, 出力 50 kW, 周波数 100 kHz, 最大入力 85 kVA である. 走行中の鋼線の温度は, 直線機の出口から約 150 mm の位置に, ローラー付き表面温度計を当て, 直接, 走行中の鋼線に熱電対を接触させて測定した. 以後, 試料鋼線は常温まで自然空冷とした.

2.4 リラクゼーション試験機

リラクゼーション試験機は, 槓杆式, 自動追尾方式のもので, 試験片の長さは 1000 mm である. 試験片のほぼ中央部の, 標点間を含む 300 mm を加熱する熱風循環式小型電気炉をとりつけて, 昇温時のリラクゼーションを測定した. 温度制御は, 加熱冷却サイクルを刻んだカムによるプログラム自動制御であり, 温度測定は, 試験片の標点距離の両端部に近接した 2 点に熱電対を設置して行なつた. この 2 点には全く温度差がなく, 温度制御には下部の測定値をとつた.

初荷重としては, JIS に規定された PC 鋼線 7 mm の 0.2% 耐力の 80% をとり, 4160 kg とした. また, 負荷時間は, 40~50 sec であつた.

なお, この試験機は, 自動追尾サーボ機構の電源を切つて, 一定荷重を負荷させることが可能になつており, 差動変圧器で検出された標点間の伸びの経時変化を記録させることによつて, クリープ試験機としても使用できるものである. このような方法で, 各種試料について, 高温におけるクリープ伸びを測定した.

3. 実験結果

供試鋼線は, 直径約 900 mm のコイルに巻かれていて, これを矯直加工する場合の, 直線機中で鋼線に加えられる曲げ変位の大きさおよび温度と, 矯直加工後の鋼線の残留曲りの半径の大きさとの関係を Fig. 3 に示す. 曲げ変位量が大きいほど, また, 加工温度が高いほど, 残留曲りの半径は大きくなつて直線に近づき, 変位量 III の場合は, 210°C の加工で完全に直線性が得られている.

Fig. 4 は, 矯直加工に伴う供試鋼線の線径の変化を

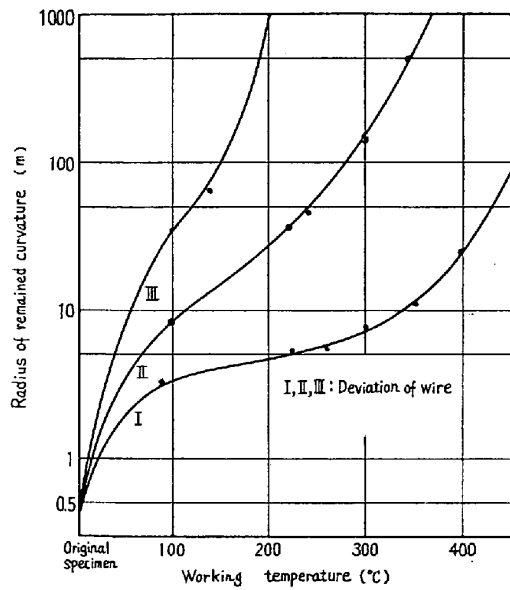


Fig. 3. Relation between remained curvature and deviation of wire and working temperature.

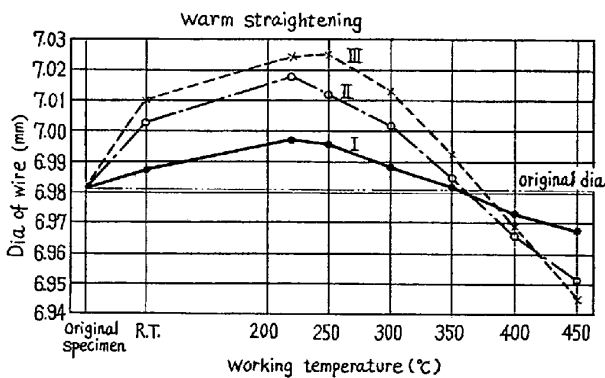
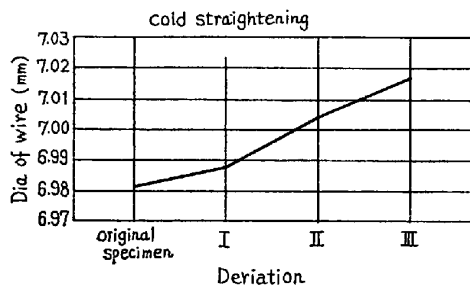


Fig. 4. Relation between dia of specimens and deviation and working temperature.

示す。常温矯正の場合は、変位量が大きいほど、線径の太りが大きく、変位量 I, II, III に対して、それぞれの場合の原線径に対する太り率は、0.10, 0.33, 0.50% となっている。

一方、温間矯正の場合は、加工の温度によつて太り率の極大値があり、変位量 I の場合には、220°C で最大となり、0.25% の太り率を示しており、変位量 II では 220°C で 0.55%、変位量 III では 250°C で 0.65% となつて

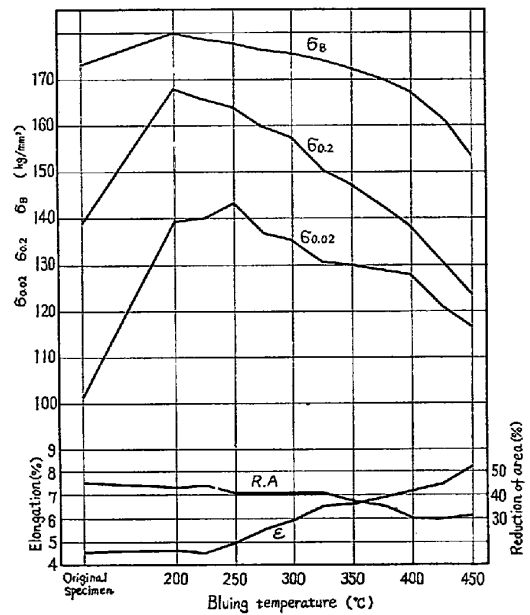


Fig. 5. Mechanical properties of blueed specimens.

いる。いずれも、この温度を越えると線径は減少し、400°C では、すべての変位量において、矯正後の線径は、供試材の原線径よりも小さくなっている。

Fig. 5 は、供試材鋼線をそのまま焼きなまし、すなわちブルーイングした時の、機械的性質の変化を示すもので、鉛浴炉中で、各温度に 2 min 間保持したものである。引張試験は、20 t のアムスラー型試験機により、100 kg/sec の負荷速度で行なつた。引張強さ σ_B 、0.2% 耐力 $\sigma_{0.2}$ は、200°C ブルーイング材で最大、弾性限 $\sigma_{0.02}$ は、250°C でブルーイングした時最大となつている。伸び ϵ は 220°C まで変化なく、それ以上の温度への上昇につれて徐々に増大し、絞り R. A. は 250°C 以上になると次第に減少している。

Fig. 6 は常温矯正 (以下 CS と略称) 後ブルーイング (以下 B と略称) した時の機械的性質の変化を示す。変位量が大きい程 CS に伴う強度低下が大きいのが、B によつて回復し σ_B 、 $\sigma_{0.2}$ 、 $\sigma_{0.02}$ とともに 200°C で最大となつている。 σ_B 、 $\sigma_{0.2}$ については 350°C までは変位量の影響がみられるが、 $\sigma_{0.02}$ では 200°C 以後、その影響は全然みられない。伸び、絞りについては加熱温度の影響はあるが、変位量の影響は B 材にはみられない。

Fig. 7 は温間矯正 (以下 WS と略称) 後の機械的性質の変化を示すものである。変位量との関係は、I の場合で σ_B 、 $\sigma_{0.2}$ の最大値は 250°C に、 $\sigma_{0.02}$ は 300°C に最大値がみられ、II, III の場合は σ_B 、 $\sigma_{0.2}$ 、 $\sigma_{0.02}$ とともに 300°C で最大となつている。300°C 以上の温度では次第に強度が低下してゆくとともに、変位量の影響もみられなくなつている。

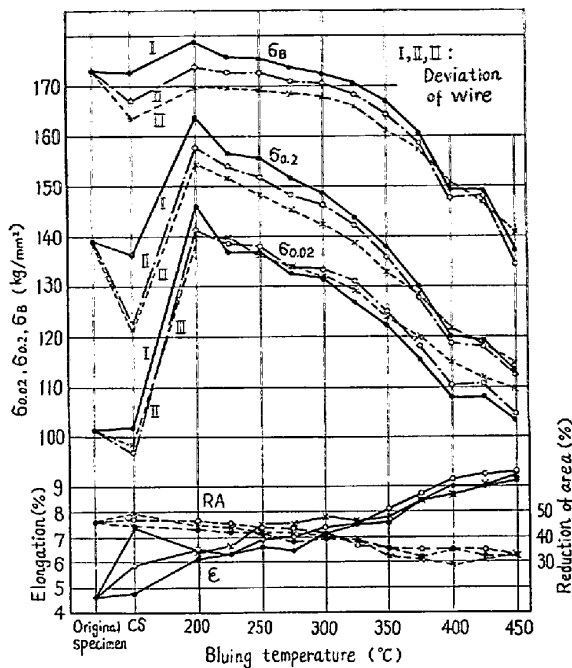


Fig. 6. Mechanical properties of CS+B specimens.

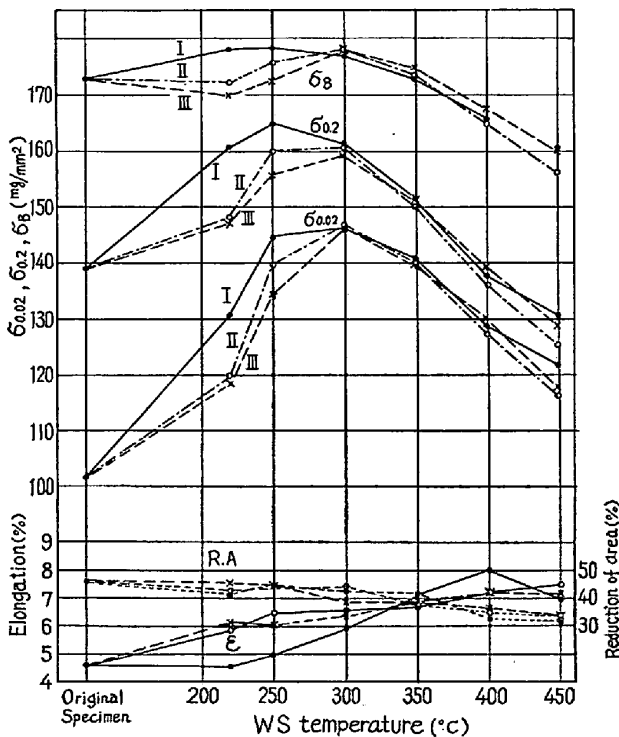


Fig. 7. The tensile properties of WS specimens.

Fig. 8はCS+B材のねじり試験結果である。試験は掴み間隔500mmで行ない、700mmに換算した値を図に示す。II、IIIについては異常はないが、Iと供試材そのままのB材では200~300°Cに捻回値が低下して脆化している。

Fig. 9はWS材のねじり試験結果で、各変位量とも300°Cを中心に捻回値の低い脆性領域がみられるが、変

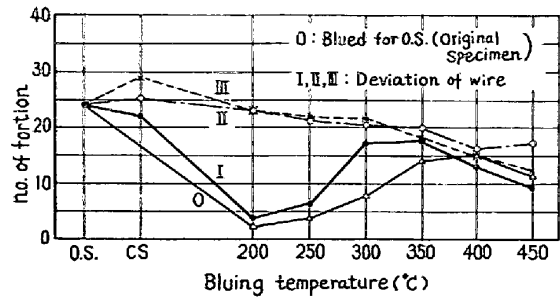


Fig. 8. Torsion test results of CS+B specimens.

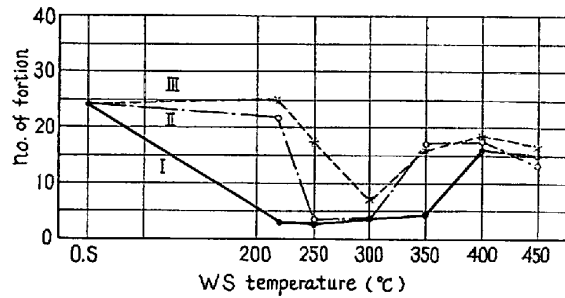


Fig. 9. Torsion test results of WS specimens.

位量が小さい程この温度範囲がひろい。

このように十分な変位量を与えて矯正加工することは、素材に直線性を与えるために必要であるとともに、青熱域におけるねじり特性の劣化を改善するのに効果的なことが示されている。

Fig. 10はB材とWS材との断面硬度の測定結果である。測定位置は表面から0.5mm内部の点で、縦軸にビッカース硬度Hv、横軸に加工温度を示す。実線が、CS+B、および、矯正なしの供試鋼線ブルーイング材の測定値であり、250°Cに最大値がみられる。点線はWS材で、変位量II、IIIの場合、300°CでCS+B材よりも高い最大値がみられる。

Fig. 11は供試材およびCS+B材の軸に垂直な断面内の直径上の硬度測定の結果で、各変位量ごとにブルーイング温度と硬さ分布の関係を示すものである。縦軸にHv、横軸に測定位置、すなわち、中心、直径の1/4相当点、および表面から0.5mm内部の点をそれぞれ示す。200~300°Cでは中心の硬さが低く表面層が高く分布していて、線引き加工の影響が残っているが、350°C以上になると硬さの絶対値が低くなるとともに、内外層の高低差が少なくなり平らな分布になっている。

また、Fig. 12はWS材の同じような断面硬さの分布で、350°C以下では中心部と外層部の硬度差がかなり大きい、400°C以上になると均等化の傾向がみられる。

つぎにFig. 13は20±1°Cの常温におけるリラクセーション曲線である。試料は、変位量II、加工温度300

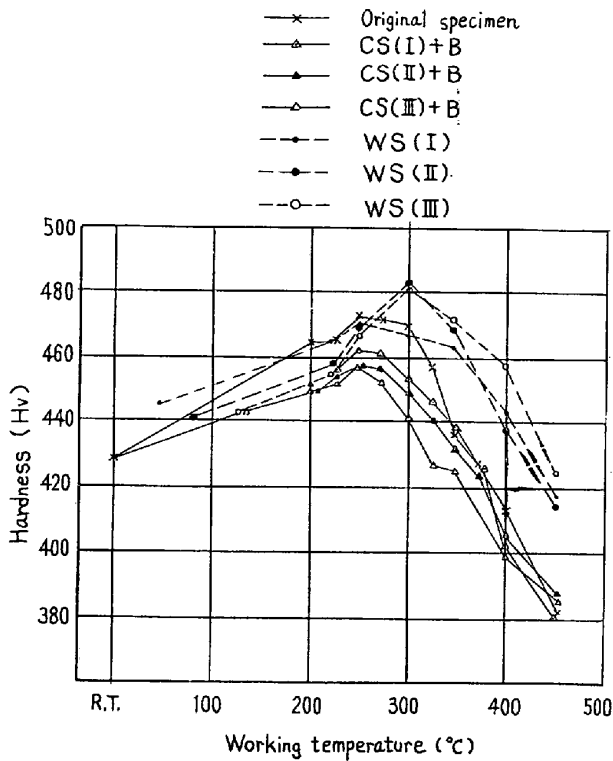


Fig. 10. Sectional hardness of B, CS+B, and WS specimens.

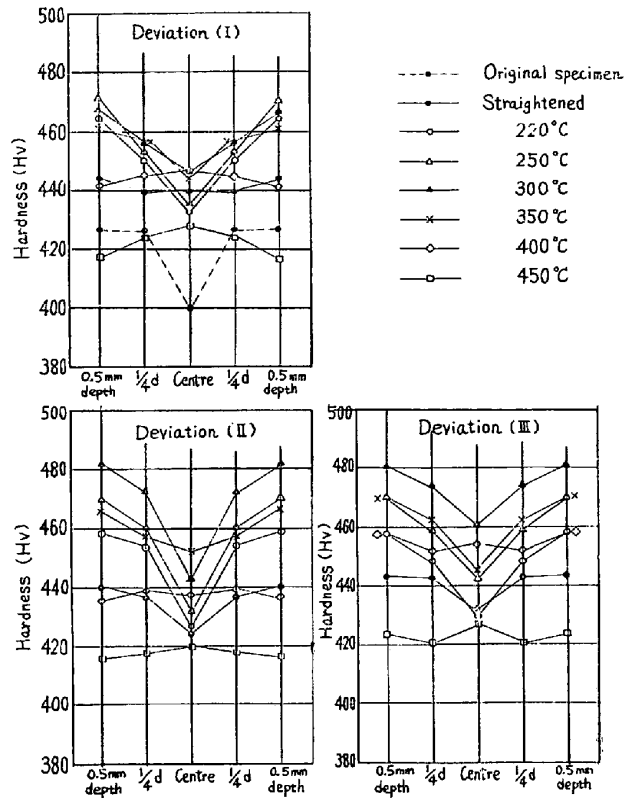


Fig. 12. Sectional hardness of WS specimens.

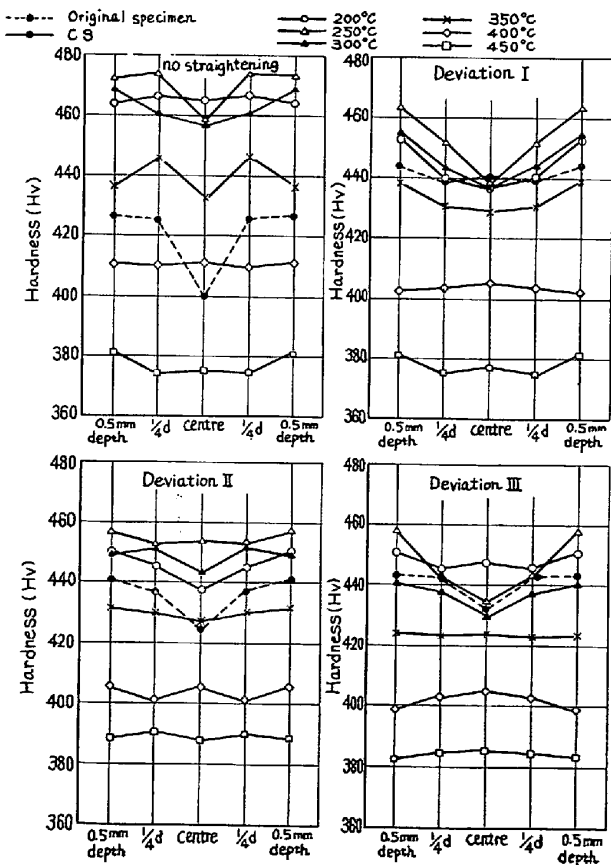


Fig. 11. Sectional hardness of blued specimens for original and after CS.

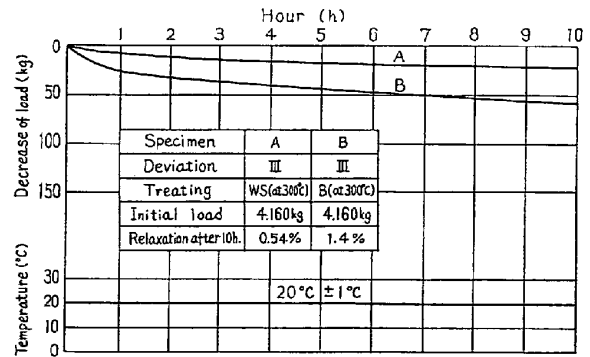


Fig. 13. The relaxation curves at room temperature of WS and B specimens.

°C の WS 材 A と、変位量 III の CS+B (300°C) 材 B との 2 本について示すものである。初荷重は、PC 鋼線 7.0 mm の規格 $\sigma_{0.2}$ の 80% をとり、4 160 kg とした。10 hr 後のリラクゼーション値はそれぞれ 0.54% および 1.4% で A 試料の方が少ない。

各種試料のこのような常温リラクゼーション値を Fig. 14 に示す。WS 材は変位量を変えてもリラクゼーション値への影響はほとんどみられない。

CS+B 材は、実用的な直線性の得られる条件のものとして変位量 III だけをとった。

この WS 材と CS+B 材のリラクゼーション値を比較すると、加工温度 250°C までは両者にほとんど差がみ

られないが、300°C 以上になると CS+B 材のリラクセーション値が大きくなり、WS 材のリラクセーション特性の優れていることが顕著になっている。その値を次の Table 2 に示す。

Fig. 15 はオートクレーブ養生条件における昇温時のリラクセーション曲線で、試料は Fig. 13 と同じ A と B である。オートクレーブ養生条件は図に示すような温度履歴を与えるもので、180°C に 3 hr 保持後、常温まで徐冷するものである。常温まで冷却された時点、すなわち、昇温開始から 20 hr 後におけるリラクセーション値

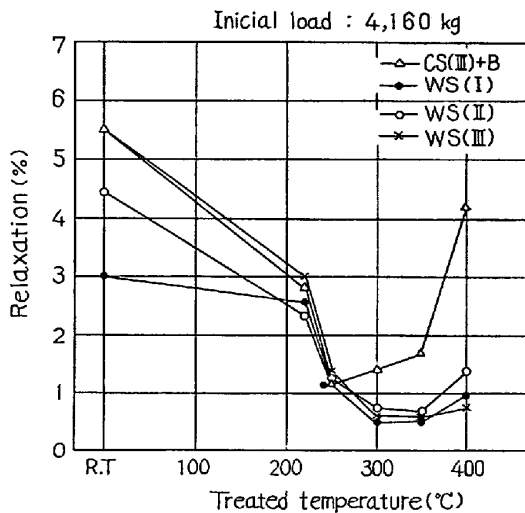


Fig. 14. The relaxation values at room temperature of CS+B and WS specimens.

Table 2. The relaxation values of each specimen. After 10 hours at room temperature (%)

The mark of specimen	Initial load (kg)	Treated temperature (°C)				
		220	250	300	350	400
CS(III)+B	4 160	2.9	1.1	1.4	1.7	4.2
WS(I)	4 160	2.9	1.3	0.5	0.5	1.0
WS(II)	4 160	2.3	1.2	0.7	0.6	1.3
WS(III)	4 160	3.0	1.3	0.5	0.5	0.7

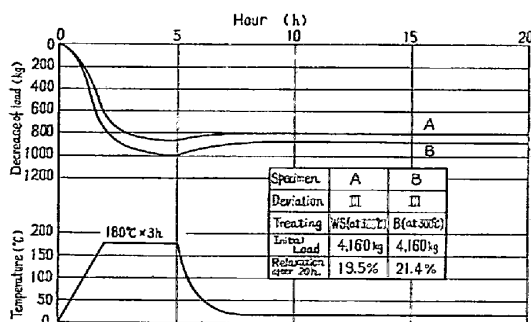


Fig. 15. The relaxation curves at elevated temperature of WS and B specimens.

は試料 A が 19.5%、試料 B が 21.4% で試料 A の方がリラクセーションが少ないのは Fig. 13 と同様である。

Fig. 16 は試料の加工温度と、前図に示したオートクレーブ養生条件の温度履歴を経過した時の各試料のリラクセーション値を示すもので、試料は Table 2 と同様である。

CS+B 材のリラクセーション値はブルーイング温度の上昇とともに小さくなり、300°C で 21.4% と最小値になっている。350°C では僅かに増大しているが、220~350°C 間でのリラクセーション値の変動は少ない。しかし、ブルーイング温度が 400°C になると 24% と急増している。

WS 材は変位量の影響はあまり顕著でないが、加工温度の上昇につれてリラクセーション値は急速に減少し、350°C の加工で最小値となり、CS+B 材よりも小さく、変位量 III で、17.6% である。

4. 考 察

4.1 リラクセーションの機構

リラクセーションは材料に応力を加えて生じた歪の大きさを歪えずに一定に保つとき、時間の経過とともに成長する塑性歪のため、初めに加えた応力が減少していく現象である。すなわち、全歪を ϵ とすると、次のように表わされる。

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p$$

ここで、 ϵ_e : 弾性歪

ϵ_q : 塑性歪

時間とともに ϵ_p が増大するため、 ϵ_e は減少する。この ϵ_e の減少分 $\Delta\epsilon_e$ に対応する応力の変化量は

$$\Delta\epsilon_e = -\Delta\epsilon_p \text{ より}$$

$$\Delta\sigma = E \cdot \Delta\epsilon_e = E \cdot (-\Delta\epsilon_p)$$

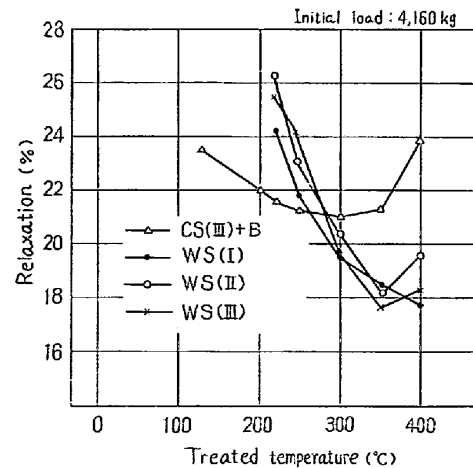


Fig. 16. The relaxation values at elevated temperature of CS+B and WS specimens.

Table 3. The relation of the maximum tensile properties and the minimum relaxation values to treated temperatures.

Specimen	The tensile properties		The relaxation at room temperature
	The treated temperature at which $\sigma_{0.2}$ indicates the maximum value. (°C)	The treated temperature at which $\sigma_{0.02}$ indicates the maximum value. (°C)	The treated temperature at which relaxation indicates the minimum value. (°C)
WS	250(I), 300(II, III)	300(I, II, III)	300(I), 350(II, III)
CS+B	200(I, II, III)	200(I, II, III)	250(III)

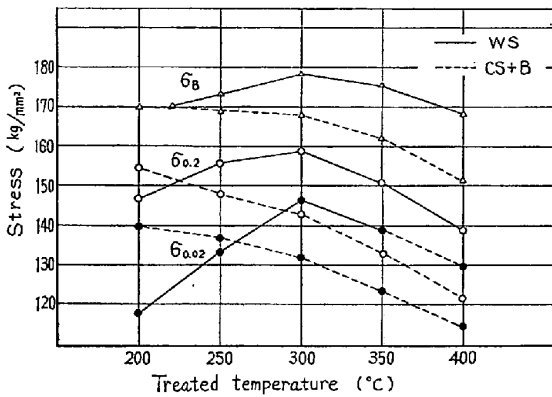


Fig. 17. The tensile properties of WS and CS+B specimens.

したがって

$$-\Delta\sigma = E \cdot \Delta\epsilon_p$$

となり、これがリラクゼーション値であり、微小塑性歪 $\Delta\epsilon_p$ に比例する量である。

4.2 常温リラクゼーション

Fig. 6 と 7 から変位量 III の WS と CS+B 材について引張特性値を比較図示すると Fig. 17 のようになる。加工温度 300°C 以上では、全特性値について、WS 材の方が CS+B 材よりも高い値になっている。すなわち、WS 材の方が外力に対する変形抵抗が大きいということであり、当然、塑性歪 $\Delta\epsilon_p$ が生じ難く、常温リラクゼーション値は CS+B 材よりも WS 材の方が小さくなり、Fig. 14 に示すとおりである。

次に、Fig. 6 および 7 と、Fig. 14 とを対比して、引張特性値が最大になる加工温度および常温のリラクゼーション値が最小になるような加工温度をえらんでまとめると、Table 3 のようになる。

引張特性値が最大になる加工温度と、リラクゼーション値が最小となる加工温度とは一致せず、 $\sigma_{0.2}$ 、 $\sigma_{0.02}$ が最大になるような加工温度よりも、50°C 高温側で加工した方がリラクゼーション値は最小となっている。

リラクゼーションは、前述のように微小塑性歪 $\Delta\epsilon_p$ によつて生ずるもので、 $\sigma_{0.2}$ や $\sigma_{0.02}$ に比べてはるかに微小な歪の発生機構に関連することのため、このような引

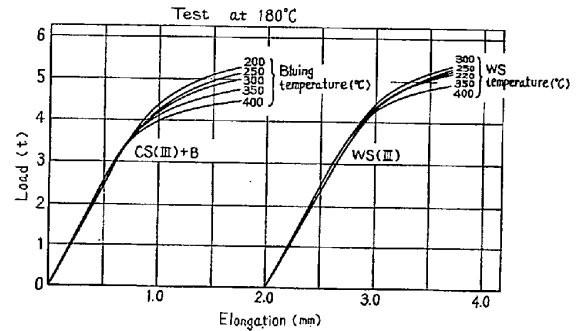


Fig. 18. The load-elongation curves of CS+B and WS specimens at elevated temperatures.

張特性値の領域とは直接に対応が見られないものと考えられる。

4.3 温間リラクゼーション

次に高温高圧蒸気によるオートクレーブ処理のような 180°C の温間におけるリラクゼーション値は、Fig. 15 および 16 に見るように CS+B 材よりも WS 材の方が小さい。Fig. 18 に、各種の温度で加工した WS 材と CS+B 材の 180°C における荷重-伸び曲線を示す。この図でみると CS+B 材の比例部分は荷重 3 t 以下まででありそれ以上の荷重に対しては明らかに永久伸びが生ずる形である。300°C プルーイング材では、4 160 kg の荷重に対して 0.2% 近い永久伸びを生ずることが推定される。これに対して WS 材では比例部分はもつと長く、350°C 加工材で 4 160 kg の荷重に対して生ずる永久伸びは 0.08% 程度である。

このように一定の荷重に対して生ずる塑性歪は CS+B 材よりも WS 材の方がはるかに小さく、このため 180°C における温間リラクゼーション値は WS 材の方が小さいものと考えられる。

Fig. 19 は、CS+B 材と WS 材の 180°C におけるクリープ伸び測定結果で荷重 4 160 kg で 1 hr 後の永久伸びを示すものである。

両供試材とも 350°C で処理したものがクリープ伸び最小で、Fig. 16 との対応性を見ることができる。

4.4 温間矯正の効果

以上のようにリラクゼーション特性としては、常温、

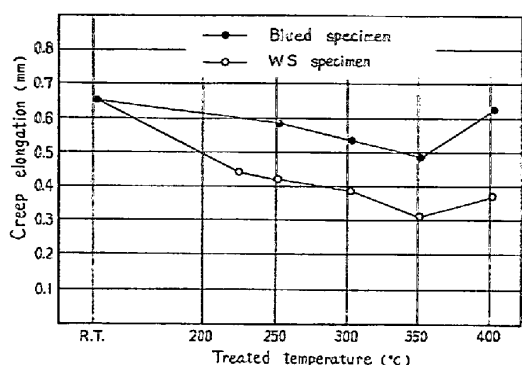


Fig. 19. The creep test results of PC Wire at 180°C in relation to their treated temperature.

温間ともにブルーイング材よりも温間矯直材の方が優れている。これは温間矯直の過程で、転位の増殖と、C、N原子による転位の固着が重複、反復して行なわれ、転位密度が増大し、加工硬化と時効⁴⁾が複合して効果を与え、転位の強固な不動化構造が形成⁵⁾されているためと考えられる。しかもこの構造は、加工温度近くまで安定なため、オートクレーブ処理のような温間においても、加工材の弾性限は高くリラクゼーション特性が優れているものと考えられる。

5. 結 言

高炭素鋼線における常温および温間での矯直加工の条件と、製品 PC 鋼線の諸特性値との関係を比較検討して次のような結果を得た。

1) 温間矯直における素材鋼線の変位量は、製品の引張り特性やリラクゼーション特性には影響しないが、変位量が小さいと捻回値が低下する。

2) 変位量が多い程直線性はよくなり、わずかに線径が太る傾向がある。しかし温間矯直の加工温度が高くなるにつれてこの傾向は弱くなる。したがって、素材鋼線に与える変位量としては、ブルーイングするもの、温間矯直するものともに、実用的な直線性が得られる程度にとれば充分である。

3) ブルーイング材では 200°C 処理のものが引張強

さは最大となり、250°C で硬さは最高となる。温間矯直材では 300°C で加工した時、引張強さ、硬さともに最高値となる。温間矯直材の断面の硬さ分布では、矯直加工の内容が、ねじりを伴った繰返し曲げであることから、中心部より表面層の硬さが高く、大きな加工硬化が見られる。

4) リラクゼーション値は、ブルーイング材よりも温間矯直材の値が小さく、優れている。特にオートクレーブ養生のような温間のリラクゼーション値は、温間矯直材が安定している。

5) オートクレーブ養生温度 180°C における試料鋼線の荷重-伸び線図で見ると、同一荷重によつて生ずる塑性伸びは、ブルーイング材は温間矯直材より大きい。この温度における温間矯直材のリラクゼーションが小さいのは、このためと考えられる。

6) ブルーイング材、温間矯直材ともに、リラクゼーション値が最小になる加工温度は、 $\sigma_{0.2}$ あるいは $\sigma_{0.02}$ のような引張特性値が最高になるような温度よりも約 50°C 高温側にある。

リラクゼーションは極めて微小な塑性歪の発生に関連するもので、 $\sigma_{0.2}$ や $\sigma_{0.02}$ とは直接に対応しないことが考えられ、高温クリープの値に対してはある程度の対応性を見ることができる。

7) 温間矯直は、転位の増殖による転移密度の増大と、溶質原子の拡散による転位の固着との複合効果によつて、転位に対する強固な不動化構造を形成するものと考えられる。この構造は加工温度の近くまで安定であり、このために、温間矯直した PC 鋼線は引張特性値が高く、特に温間リラクゼーション値が小さく安定している。

文 献

- 1) 熊倉: 日本機械学会誌, 70(1969)9, p. 1287
- 2) 五弓, 岸: 日本金属学会誌, 34(1970)2, p. 154
- 3) 岸: 日本機械学会誌, 75(1972)4, p. 547
- 4) 木村訳: コットレルの金属学(下), (1970), p. 109, 178. アグネ
- 5) 横堀: 材料強度学, (1958), p. 51, [技報堂]