

技術報告

オーステナイト系ステンレス PC 鋼線および
鋼より線の開発

© 1986 ISIJ

坪野 秀良*・川端 義則*・山岡 幸男*

Development of Austenitic Stainless Steel PC Wire and Strand

Hideyoshi TSUBONO, Yoshinori KAWABATA and Yukio YAMAOKA

Synopsis :

The effects of aging and stress-aging (called hot stretching) at the temperatures from 120°C to 700°C on the mechanical properties, relaxation values, Charpy impact values and SCC behavior of hard drawn SUS 304, SUS 316 stainless steel wires have been studied.

The main results obtained are as follows:

(1) Yield and tensile strength of the wires increased by aging at 230°C and 530°C as well as by hot stretching. The strengthening after 230°C treatment may be due to the strain aging by C and the increase of strength after 530°C treatment results from precipitation of $Cr_{23}C_6$ on dislocations.

(2) Stress relaxation values up to 250°C are low due to precipitation of $Cr_{23}C_6$. Almost no difference can be observed between aging and hot stretching.

(3) Impact value at -196°C of SUS 304 stainless steel wire which was measured with 1 mm V-notched specimen was found to be about the same as that of 9% Ni steel.

(4) It is considered that in comparison with high carbon PC wire SUS 304 stainless steel showing high tensile strength is insensitive to SCC in NH_4SCN and NH_4NO_3 solutions.

(5) In practice, tension member of the austenitic stainless steel wire and strand which were produced by aging at 500°C may be useful in special industrial field, for example, (a) SUS 304, in cryogenic field use (b) SUS 316, in intensive magnetic field use as a nonmagnetic material.

1. 緒 言

近年、核融合部材や磁気浮上列車などの磁気に関連した分野の開発が活発になつており、これらの部材では非磁性高 Mn 鋼が実用化されつつある¹⁾。そして、これらの構造物は耐久性、破壊に対する安全性、経済性の点でプレストレストコンクリート製が最適と言われている。また、最近ではコンクリート製 LPG タンク (内張は低温用鋼で -164°C 常用) においても非常時の安全性の点で外筒コンテナ、周囲の防液堤としてのプレストレストコンクリートが考えられており、この場合、緊張材は 9%Ni 鋼に匹敵する低温特性が必要とされているが、報告は少なく、わずかに高 Mn 鋼緊張材の検討²⁾があるにすぎない。ところで著者の 1 人は以前に SUS 304 ステンレス鋼線を伸線加工ののち、時効すると 200°C と 530°C の処理で硬化のピークが現れることを報告したが³⁾、コンクリート緊張材として重要なリラクゼーション特性や応力腐食、衝撃値、磁性の強さなどについては未検討であつた。そこで本研究では伸線加工した 304 と 316 オーステナイト系ステンレス鋼線に 120°C~700

°C までの時効処理および応力下の時効処理 (以下ホットストレッチングという) を与え、緊張材として必要な上述の特性を調べるとともに、5 mm と 15.2 mm 径のステンレス PC 鋼線および鋼より線を工場規模で試作し、非磁性または低磁性で 9%Ni 鋼に匹敵する低温特性を備えたステンレス製緊張材の実用化が可能かどうかを検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材

Table 1 に化学成分を示す。記号 A, B は SUS 304, C は SUS 316 で、A の Ni% は JIS 規格の下限、B は上限に近い。母線は 5 mm と 9 mm で疵取りのため皮削りを行い、1150°C で水靱処理したものである。

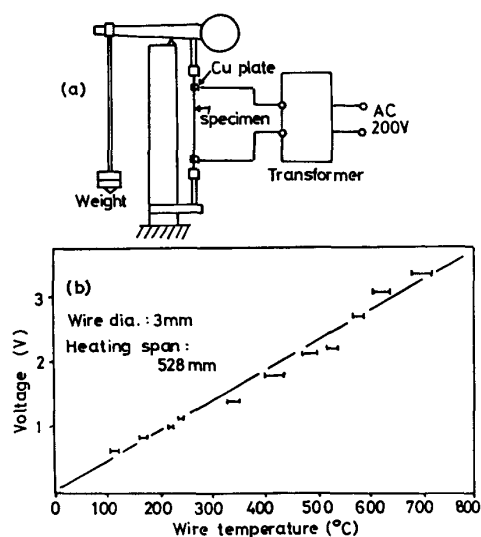
Table 1. Chemical composition of austenitic stainless steel wires used.

(wt%)

Alloy	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SUS 304	A	0.06	0.53	1.79	0.033	0.019	8.51	—
	B	0.05	0.45	1.29	0.036	0.011	10.01	—
SUS 316	C	0.06	0.67	1.74	0.030	0.010	13.01	2.36

昭和 50 年 4 月本会講演大会にて一部発表 昭和 59 年 12 月 3 日受付 (Received Dec. 3, 1984)

* 神鋼鋼線工業(株)研究開発部 (Development Department, Shinko Wire Company, Ltd., 7-2 Doi-cho Amagasaki 660)



(a) Apparatus for aging and stress-aging (hot stretching) treatment.
 (b) Figure for temperature control of wire by voltage change.

Fig. 1. Method of hot stretching and wire temperature control.

2.2 ホットストレッチング方法

5 mm から 3 mm まで 64% の伸線加工を施した 304 (記号 B) と 316 (記号 C) を用いた。装置の概略を Fig. 1 (a) に示す。加熱は通電によつて行い、通電後 3 min で発熱と放熱が平衡して一定温度に保持できたので、8 min 間通電し、処理時間は 5 min 間とした。温度は Fig. 1 (b) の電圧の増減によつて変化させた。ストレッチング応力は室温から 530°C までの処理では処理温度での引張強さの 85%、700°C では 70% とした。ストレッチングにより線径は 1/100~3/100 mm 減径した。比較のため同じ加熱方法で無負荷時効も行った。

2.3 試験方法

2.3.1 リラクセーション試験

方法は JIS Z 2276 に準じた。試験機は自動平衡式のもので、全歪み一定となるように試験片の微小塑性伸びに対応して弾性伸びを減少させる機構を備えている。初荷重は室温の引張強さの 70% で载荷後 60 s より測定を始め、全試験時間は 5 h または 10 h で、温度は 20 ± 1°C としたが、304 については 50~250°C の昇温リラクセーションも行った。この場合の初荷重は室温の引張強さの 70% のほかに、その温度での引張強さの 70% の条件についても測定した。

2.3.2 衝撃試験

後述する 15.2 mm 径のステンレス PC 鋼より線の試作時に製造した 304 (記号 A)、5.28 mm 径の 500°C 5 min 時効処理材を用い、室温、-78°C、-196°C でのシャルピー衝撃値を求めた。切欠形状は U および V 型

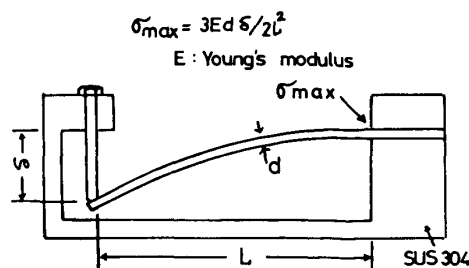


Fig. 2. Apparatus for long duration stress corrosion cracking test.

で、深さは線径の 1/10 および 2/10 である。-78°C は液体窒素とアルコール、-196°C は液体窒素を使用した。用いた 304 の引張強さは 164 kgf/mm²、比較材の高炭素鋼線 (5.20 φ mm、以下 PC 鋼線という) は 196 kgf/mm² である。

2.3.3 応力腐食試験

PC 鋼材の分野では FIP (国際 PC 技術協会) で推奨され、水素脆性が起こると言われている 20% NH₄SCN²⁾ と国内で多用されている 20% NH₄NO₃ の試験液があるが、本研究ではステンレスが対象であるため、42% MgCl₂ 液についても調べた。装置は Fig. 1 (a) の片持梁式のもので、温度は 50, 70, 100°C または沸騰状態である。供試材は 304, 316 の時効材と線径 3 mm、引張強さ 180 kgf/mm² の PC 鋼線である。さらに 304 については長期間の応力腐食特性を調べるため、Fig. 2 の応力負荷治具を用い、最大表皮応力 σ_{max} が引張強さの 70% になるようにセットし、室温で 11 年間にわたり割れ発生の有無を調査した。治具は液の蒸発を防ぐため全体をプラスチックシートでカバーし密封した。

2.3.4 その他の調査

引張試験はインストロン型試験機を用いた。初歪み速度は $1.7 \times 10^{-3} s^{-1}$ である。時効組織を調べるため 304 を 64% 加工後、530°C でホットストレッチングしたものについて、100 kV 電子顕微鏡により薄膜の直接観察を行った。また、加工誘発マルテンサイトの定量は Co_{Kα} 40 kV 20 mA の条件で X 線回折を行い、(110)_{a'}、(111)_r、(200)_r の積分強度より DURNIN らの方法⁴⁾ によつて求めた。磁化の強さはソレノイド型透磁率計により 200 エルステッドの磁場中での透磁率 μ を測定し、非磁性であるかどうかを評価した。

2.4 5 mm と 15.2 mm ステンレス PC 鋼線および鋼より線の試作

304 (記号 A) と 316 (記号 C) の 9 mm 母線を用い単線とより線を工場規模で試作した。まず、母線を酸洗い、皮膜コーティングののち、7 頭連続伸線機で 100

m/min の速度で単線用は 5.0 mm, より線用は 5.02 mm と 5.28 mm に製線した. つづいて単線は直線加工後, 500°C 5 min, より線は 5.28 mm を芯, 5.02 mm を側線として7本撚りのストランドに成形後, 500°C 10 min 間の時効を行い, 緊張材としての各種特性を測定した. 試作量は単線で 1300 m, より線で 550 m までである.

3. 実験結果

3.1 時効硬化とリラクゼーション挙動におよぼす

ホットストレッチングの影響

Fig. 3, Fig. 4 に機械的性質とマルテンサイト量におよぼす時効とホットストレッチング温度の影響を示す. 304, 316 ともに 230°C と 530°C の処理で, 室温での強度にピークが現れており, 著者の1人による既報の結果³⁾と同じである. ホットストレッチングを行うとこの傾向が更に強まり, 時効のままのものより 5 kgf/mm²ほど強度上昇がみとめられる. しかし, 700°C ホットストレッチングでは軟化は促進されているようである. 両成分材とも伸び, 絞りについては処理の差は現れず, 530°C までは変化はなく, 軟化が始まる 700°C 処理で上昇するのがわかる. 304 のマルテンサイト量は 700°C 処理で半減するが, この傾向は渡辺ら⁶⁾によっても報告されている. 316 ではマルテンサイトの発生は見られない. ところで強加工したステンレス鋼が2段に硬化する

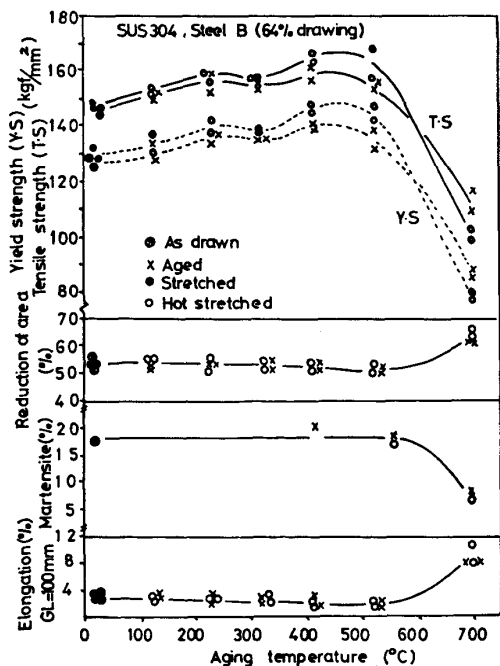


Fig. 3. Effects of aging and hot stretching treatment on the mechanical properties at room temperature and martensite percent of 304 stainless steel wire cold drawn.

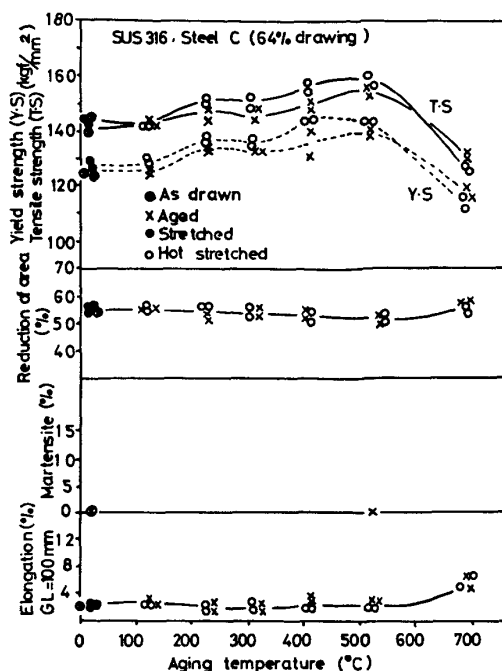
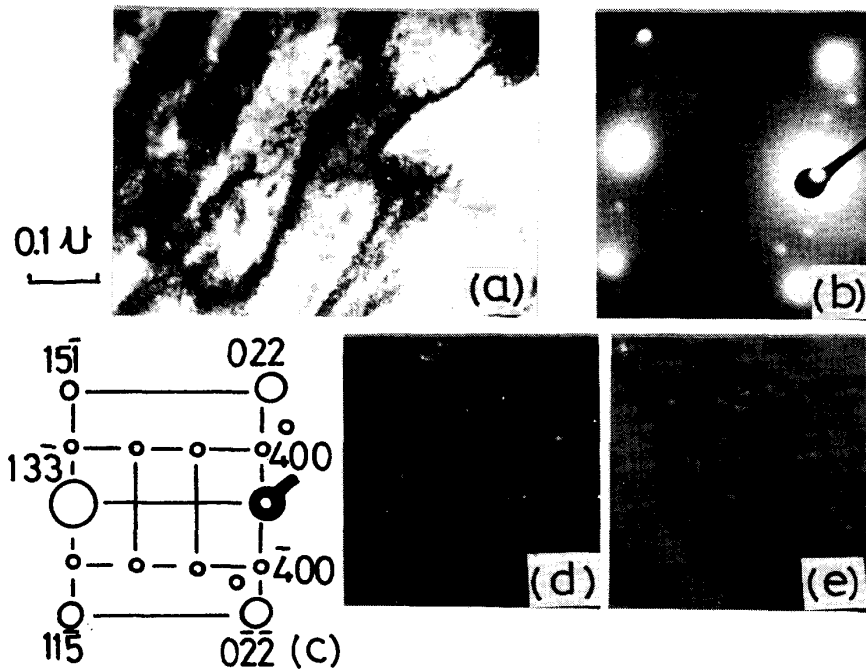


Fig. 4. Effects of aging and hot stretching treatment on the mechanical properties at room temperature and martensite percent of 316 stainless steel wire cold drawn.

ことについては報告があり^{5)~8)} 230°C 処理の硬化はCによる歪み時効と考えられている⁷⁾. 530°C 処理については不明であつたが⁵⁾, 著者の1人により, これは転位線上への $Cr_{23}C_6$ の析出に原因していることが明らかにされていた³⁾. Photo. 1 は 530°C 処理の時効材³⁾ とホットストレッチング材の比較で, 回折条件も違うのですが析出物が見えているわけではなく, 断定はできないが, ホットストレッチングの方が析出密度が高いような印象を与える. 応力下の時効については不明な点も多いが, 自己拡散の促進⁹⁾, 歪み時効硬化量の上昇¹⁰⁾, と硬化ピークの短時間側への移動¹¹⁾などの報告があり, Fig. 3, Fig. 4 の 230°C と 700°C に見られた硬化量の増大および軟化の促進は上述と同じ現象と思われるが, 置換型元素の拡散が律速する 530°C でも応力下の時効のほうが硬化は大きく, この点については析出状況に差が出ているのであろうと推定されるが, 詳細は明らかではない.

Fig. 5 はリラクゼーション値におよぼす時効とホットストレッチングの影響である. 時効温度の上昇とともにリラクゼーション値は低下し, 530°C 時効で最小値を示す. ホットストレッチングの影響は 320°C 処理より低温の処理で現れており, $Cr_{23}C_6$ の析出する温度域の処理では炭化物による転位の固着が強いため差は現れない. 304 と 316 の比較では 316 の方が少し低いリラク



(a) Bright field image (b) Diffraction pattern (c) Key diagram (d) Dark field image of (400) Cr₂₃C₆ spot (e) Dark field image of (151) Cr₂₃C₆ spot obtained by previous experiment³⁾.

Photo. 1. Chromium carbides precipitated in 304 stainless steel wire hot stretched for 5 min at 530°C.

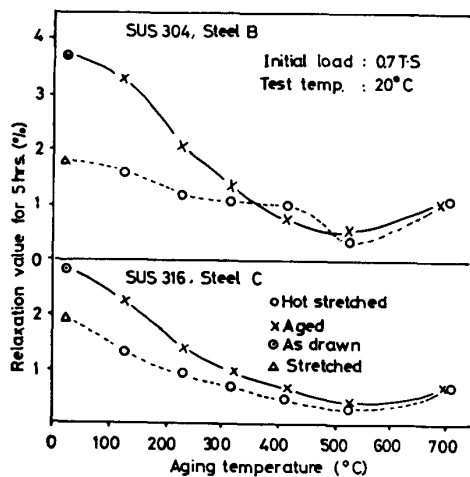


Fig. 5. Relationship between relaxation value and treatment temperature of 304 and 316 stainless steel wires treated by various conditions.

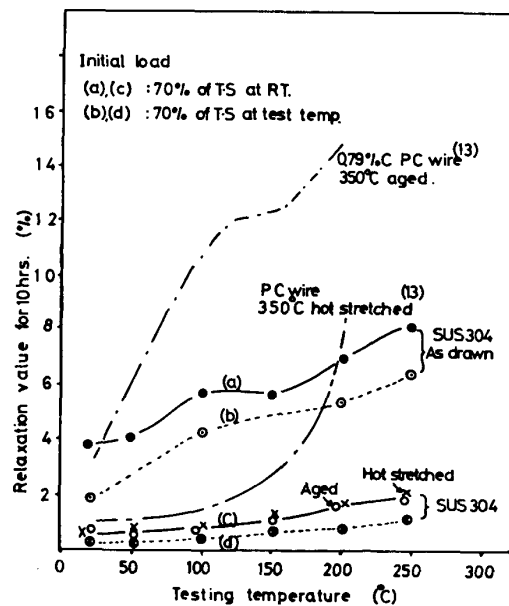


Fig. 6. Effects of testing temperatures on the relaxation value of 304 stainless steel wire (compared with PC wire).

セーション値を示している。

ところで、PC 鋼線分野では、強度による品質の区分以外にリラクセーション値の大小による分類もなされており JIS G 3536 の普通グレード (10 h 後 3% 以下) に対して、イギリスの PC 鋼線規格 BS 5896-1980 で決められている低リラクセーショングレード (1000 h で 2.5% 以下) のものは 10 h の値は 1% 以下を示すものが多い¹²⁾。そのため PC 鋼線ではホットストレッチング (またはスタビライジング) という特別の処理を行って低リラクセーショングレードを製造しているが¹³⁾、Fig. 5 の結果より、ステンレス PC 鋼線では 500

°C で時効するだけで容易に低リラクセーショングレードのものを製造できることがわかり、ホットストレッチングという特別の処理は必要ではないことが明らかとなった。

3.2 昇温下でのリラクセーション挙動

Fig. 6 は 250°C までの昇温下でのリラクセーション特性を示したもので、比較のため PC 鋼線の値¹³⁾ も併記した。304 の場合、初荷重条件、炭化物析出の有無にかかわらずリラクセーションの温度公配は PC 鋼線よ

り非常にゆるやかであり、そのために、304の伸線加工のままのワイヤーでさえも、20°CにおいてはPC鋼線ホットストレッチング材より4倍もリラクゼーション値は大きいけれども、200°Cにおいては逆に低い値になっていることが分かる。すなわち、このように、ステンレス鋼線の温度依存性が小さいのは、オーステナイト系の本来の性質であるつぎのような特性の相乗効果に起因していると考えられる。すなわち(1)すべり面が{111}<110>系に限定され、積層欠陥エネルギーが低く¹⁵⁾¹⁶⁾、転位は拡張しているため交差すべりが起こりにくい。(2)積層欠陥には溶質原子が偏析し(鈴木効果)¹⁷⁾そのため、熱揺動の助けをかりても転位は脱出しがたい、などである。さらにCr₂₃C₆は530°Cあたりの処理で析出するので、250°Cでは全く安定であり、成長粗大化もしないので転位の固差力に大きな変化はないと思われ、この点も昇温リラクゼーションを小さくしている理由の一つになっている。

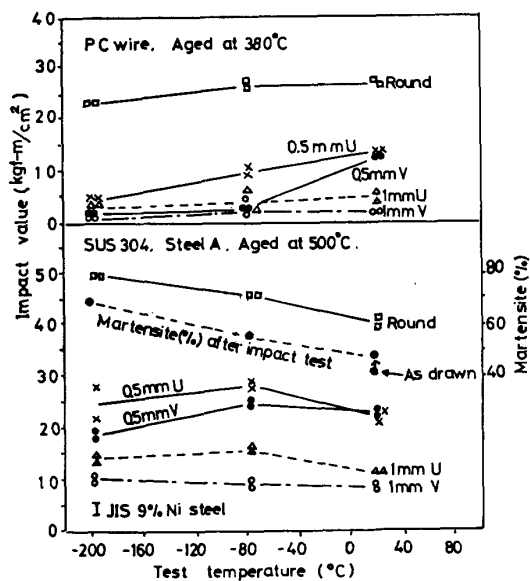


Fig. 7. Effects of various kinds of notching pattern on the Charpy impact value of 304 stainless steel and PC wires after aging.

3.3 低温衝撃特性

Fig. 7に衝撃試験結果を示す。PC鋼線では温度が下がり、切り欠きが鋭くなると衝撃値は小さくなるが、304では低温になるほど上昇する傾向を示し、もつとも切り欠きが鋭い1mmVノッチでも-196°Cで約10 kgf-m/cm²の高い値を示している。強度160 kgf/mm²級のステンレス鋼線の衝撃値については全く報告はないが、坂村ら²⁾は2mmVノッチの7mm PC鋼線で-196°Cの値として0.51 kgf-m/cm²、非磁性高強度高Mn鋼線で1.87 kgf-m/cm²を示している。Fig. 7にも示すように、JIS G 3127によると9%Ni鋼の衝撃値は板厚にもよるが-196°Cの値として2.25~5.25 kgf-m/cm²を規定しており、これらの結果を総合すると、9%Ni鋼に匹敵する低温特性をもつたプレレストコンクリート用緊張材は強加工と時効処理を与えた304のようなオーステナイト系ステンレス鋼線以外には見あたらないことが明らかとなった。なお、Fig. 7の結果より、衝撃変形によつて発生したマルテンサイトは衝撃値には悪影響を与えていないと言える。

3.4 応力腐食特性

結果をTable 2に示す。ステンレス鋼線の場合、42% MgCl₂溶液の沸騰状態において、引張強さの70%という負荷応力は非常に苛酷なため短時間で破断するが、PC鋼線では腐食によつて線径が細くなり延性破断する。NH₄SCNとNH₄NO₃溶液においてはPC鋼線の場合、前者に対しては短い、後者に対しては長寿命を示し、304、316では両種の液に対しても寿命は長い。Fig. 2の治具を用いた11年間の応力腐食では304ステンレスPC鋼線の表面に赤錆が発生したが、破断は全く起こらなかった。ところで、実環境での応力腐食は実験室的な促進テストに比べて多くの要因が交絡していると思われるので、促進テストから直ちに実環境での寿命の長短は論じられないが、現在多用されているPC鋼線との比較などから考えて、特にオーステナイト系ステンレスPC鋼線が緊張材として応力腐食に対して敏感

Table 2. Laboratory test results of stress corrosion cracking in the various kinds of solution.

Material	Tensile strength (kgf/mm ²)	Test solution	Test temp. (°C)	Applied stress	Fracture time (h)
SUS 304 Steel B Aged at 500°C	156	42% MgCl ₂ 20% NH ₄ SCN 20% NH ₄ NO ₃	Boil	70% of T · S	0.8
			70	"	300
			100	"	1000 h no fracture
SUS 316 Steel C Aged at 500°C	155	42% MgCl ₂ 20% NH ₄ SCN 20% NH ₄ NO ₃	Boil	"	1.2
			70	"	450
			100	"	1000 h no fracture
PC Wire	180	42% MgCl ₂ 20% NH ₄ SCN 20% NH ₄ NO ₃	Boil	"	350
			70	"	(ductile fracture)
			100	"	40 300

Table 3. Mechanical properties of stainless single PC Wire having 5mm dia. produced by using industrial facility.

Material	Drawing (%)	Treat.	Straight. y^* (mm/2m)	Yield strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	YOUNG's modulus (kgf/mm ²)	Elong. (%) GL=100 mm	Red. of area (%)	Relaxation (%) 10 h	Permeability μ (200 Oe)
SUS304	69	As drawn	—	140.5	155.0	15 800	3.0	50.6	2.81	3.35
Steel A		Aged at 500°C	30	151.0	162.2	17 050	3.5	51.2	0.72	3.40

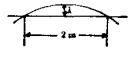


Table 4. Mechanical properties of seven ply stainless PC strand having 15.2mm dia. produced by using industrial facility.

Material	Treat.	Yield strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	YOUNG's modulus (kgf/mm ²)	Elongation (%) GL=600 mm	Relaxation (%) 10 h	Permeability μ (200 Oe)
SUS 304 Steel A	As stranded Aged at 500°C	119	148	—	4.9	4.38	3.49
		137	157	16 250	4.9	0.98	3.64
SUS 316 Steel C	As stranded Aged at 500°C	110	131	—	5.0	3.80	1.00
		134	143	16 850	4.3	0.55	1.01

であるとは考えられない。

3.5 ステンレス PC 鋼線および鋼より線の試作

3.5.1 5 mm ステンレス PC 鋼線

Table 3 に結果を示す。500°C 時効処理後は引張強さ 162 kgf/mm² の高強度となっており、リラクセーション値も 0.72% であり低リラクセーショングレードとして十分な値である。磁性も低い。JIS G 3536 SWPR1 によると 5 mm PC 鋼線は引張強さ 165 kgf/mm² 以上、伸び 4% 以上であり、Table 3 の値は少し低めではあるが、実用上問題は無いと判断される。ヤング率は 17 050 kgf/mm² と低い。オーステナイト系ステンレス鋼線を伸線加工するとヤング率が低下することについてはすでに著者らによつて報告されている¹⁸⁾。

3.5.2 15.2 mm PC 鋼より線

Table 4 に結果を示す。時効後の引張強さは JIS G 3536 SWPR7A の 15.2 mm 7 本より PC 鋼より線の値 (166 kgf/mm² 以上) と比べて、304 で 9 kgf/mm²、316 で 23 kgf/mm² ほど低いが、リラクセーション値は 1% 以下と小さく、316 では透磁率 μ も 1.01 を示し完全に非磁性と言えるので、特殊用途での実用性は十分あると考えられる。

以上のように 304 または 316 ステンレス鋼線を加工し、500°C 5 min の時効処理を行うことによつて、140 ~ 160 kgf/mm² の高強度をもち、低または非磁性で、さらに 9%Ni 鋼並の低温衝撃特性を示す低リラクセーショングレードのステンレス PC 鋼線または鋼より線を工業的規模で製造できることが明らかとなつた。

4. 結 論

伸線加工を施した 304、316 ステンレス鋼線に種々の

温度で時効とホットストレッチングを行い、緊張材として必要な特性を求め、さらに 5 mm と 15.2 mm のステンレス PC 鋼線および鋼より線を試作し、特性確認を行い実用性を検討した。結果は次のように要約される。

(1) 時効とホットストレッチングいずれの処理でも、230°C で C の歪み時効、530°C で Cr₂₃C₆ の析出により、室温での強度に二つのピークが現れる。

(2) ステンレス PC 鋼線は炭素鋼 PC 鋼線に比べてリラクセーションの温度依存性が小さい。

(3) 304 時効材の -196°C での衝撃値は 10 kgf-m/cm² を示し、9%Ni 鋼に匹敵する。応力腐食特性も特に敏感な傾向はみられない。

(4) 単線とより線の量産試作材は非磁性、極低温などの特殊分野で十分実用性があることがわかつた。

(5) 低または非磁性で、低温衝撃特性の秀れた低リラクセーショングレードの高強度ステンレス PC 鋼線または鋼より線を工業的規模で製造できることが明らかとなつた。

終わりに本研究をまとめるにあたり助言を賜りました京都大学金属加工学教室田村今男教授に感謝いたします。

文 献

- 1) 例えば、佐々木晃史、渡辺健次、野原清彦、近藤信行、小野 寛、佐野周三、一瀬 功: 鉄と鋼, 6 (1981), A81
- 2) 坂村果臈, 三上泰治, 西村良文, 小北英夫, 藤田照夫, 水原 誠: 住友電気 (1981) 115, p. 71
- 3) 西村 強, 若宮辰也, 林田 博, 山岡幸男: 鉄と鋼, 60 (1974), p. 682
- 4) J. DURIN and K. A. RIDAL: JISI, 206 (1968), p. 60
- 5) 渡辺統市, 佐賀二郎: 日本金属学会誌, 21 (1957),

- p. 583
- 6) 作井誠太, 武井英雄: 同上, 25 (1961), p. 30
 - 7) 荒川基彦, 平松博之, 住友秀彦: 鉄と鋼, 66 (1980), S 442
 - 8) 西畑三樹男: 特殊鋼, 18 (1969), p. 40
 - 9) M. COHEN: 日本金属学会会報, 9 (1970), p. 271
 - 10) 桜井忠一, 川崎 正, 泉 久司: 同上, 19(1955), p. 711
 - 11) 川崎 正: 材料, 13 (1964), p. 445
 - 12) 土井 明, 富岡敬之, 田中義人: プレストレストコンクリート, 12 (1970), p. 34
 - 13) 土井 明: 第 17 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1972), p. 176
 - 14) 土井 明, 富岡敬之, 倉内 実: R & D, 22 (1972), p. 75
 - 15) 田村今男: 鉄鋼材料強度学 (1969), p. 11 [日刊工業新聞社]
 - 16) 川端義則, 西村 強, 若宮辰也, 山岡幸男: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 30
 - 17) 橋口隆吉編: 材料科学講座 3, 「結晶の強度」 (1968), p. 16 [朝倉書店]
 - 18) 川端義則, 若宮辰也, 山岡幸男, 山下茂喜: ばね論文集 (1978) 23, p. 1