

PC 鋼 棒 の 諸 特 性

——新用途・新技術への対応——

末 廣 邦 夫*
 山 下 英 治*
 村 山 行 雄*
 池 上 由 洋*

1. ま え が き

我が国で一般に使用されている PC 鋼材は、PC 鋼棒、PC 鋼線、PC 鋼より線であり、これらの寸法、機械的性質などは JIS や土木学会標準示方書、日本建築学会設計施工規準に規定されている。特に PC 鋼棒については、昭和 46 年に JIS G 3109 が制定されるにおよんで、その後は種々の規格や指針がほぼ JIS で統一され運用の面ですっきりしたものになった。

PC 鋼棒の用途例をみると、一般土木、建築から始まり、昭和 34 年には伊勢湾台風による被災地の復旧に使用された PC 矢板、昭和 37 年には東海道新幹線に敷設された PC まくらぎなどに使用され、その後昭和 40 年頃より PC パイルの生産に対応して異形 PC 鋼棒が大量に使用されるに至り、PC 鋼棒の生産量は飛躍的に増加した。

このように PC 技術の進歩にともない適用分野も著しく拡大され、多用途に適用すべく諸々の特性を有する PC 鋼棒が開発されてきた。今日では、橋梁、構造物、ポール、タンク、ボックスカルバート、ヒューム管、ロックアンカー、バージなどあらゆる分野に使用されている。

最近では、新用途として、LNG、LPG 低温タンク^{1)~5)}、新技術としては、ポストコンプレスト工法^{6)~8)}の実用化、更には耐震性の高い PC 構造物などが検討されており、それぞれの課題に必要な特性を有する PC 鋼棒の開発が要求されている現状にある。

当社は、我が国で PC 鋼棒が製造され始めた昭和 31 年より今日まで一貫して高周波熱処理 PC 鋼棒を生産してきた。これらの生産システムおよび製品について先にあげた新しい課題への適用性を検討した。

2. 高周波熱処理 PC 鋼棒の製造方法

高周波熱処理 PC 鋼棒の製造方法の特色

* 高周波熱練(株)平塚工場

のひとつは、熱処理のための加熱源として高周波電流を利用した誘導加熱方式である。図-1 に示すように、高周波電流を与えたコイルの中へ鋼材を挿入すると、発生する磁束が鋼材に集中するので電磁誘導作用により渦電流が生ずる。この渦電流によって鋼材自身が発熱することを利用して内部まで加熱する方法が誘導加熱方式である。これに確実な制御と冷却系を組み合わせた熱処理方式により、所定の強度をもち、直線性のよい PC 鋼棒を生産している。図-2 には熱処理工程、図-3 には PC 鋼棒全体の製造工程、また写真-1~3 には各工程の状況をそれぞれ示す。

熱間圧延された素材を脱スケールした後、引抜きダイスに通して引き抜くことにより材料の直径は全長にわたって均一なものになる。熱処理は鋼棒を移動させながら連続して行い、焼戻し温度の高低により鋼棒の強度調整

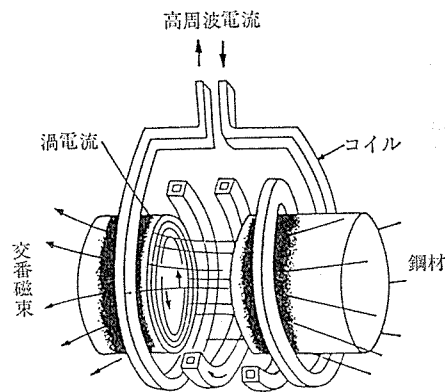


図-1 高周波誘導加熱のモデル

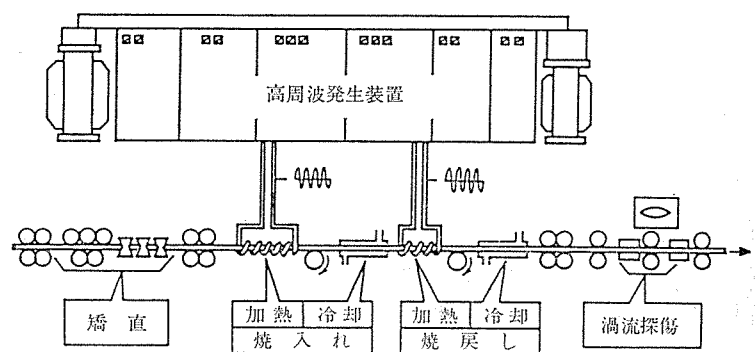


図-2 熱処理工程

が可能である。

このようにして製造された PC 鋼棒は、安定した機械的性質をもち、特に金属結晶粒が細かいために伸びが優れている。また、直径が均一で安定しているために鋼棒のどの位置で切断しても精度のよいねじを転造することができる。更に、このシステムの特徴として、鋼棒を移動させながら焼戻し温度の調整ができるので、例えば、鋼棒の長さ方向に対して部分的に任意に強度を変えるこ

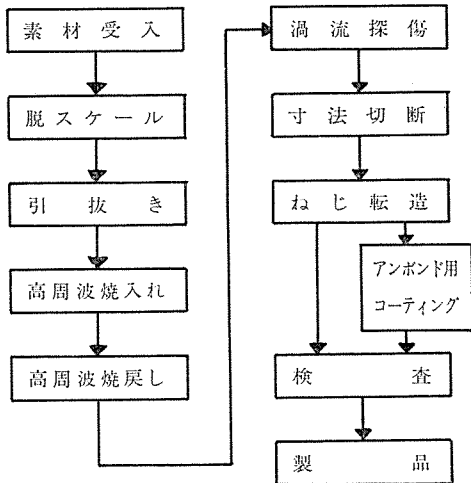


図-3 製造工程

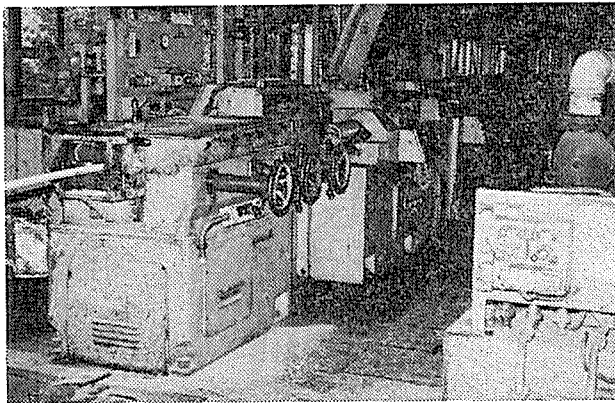


写真-1 引抜き

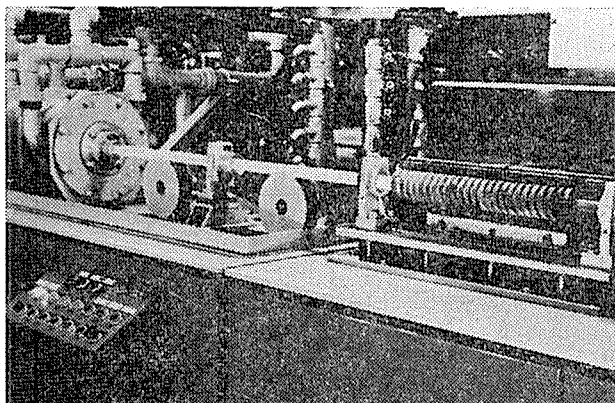


写真-2 熱処理

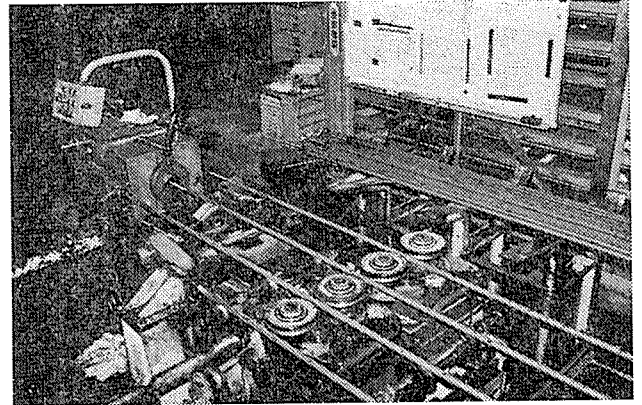


写真-3 ねじ転造

ともできる。

3. 高周波熱処理 PC 鋼棒の低温特性

高周波熱処理 PC 鋼棒の母材部とねじ部について、低温での挙動を引張試験および衝撃試験により調査した。

従来から細径鋼棒やワイヤーにおける低温での引張試験は、チャック部を含めた系全体を冷却して試験を行う方法が一般的である。しかしながら、太径鋼棒の場合にこの方法を採用すると非常に大がかりな試験装置となり、経済的な問題もあることから通常は試験片のチャック間部分のみを冷却して試験する方法がとられている。この場合、冷却部分で試験片が破断するように低温での強度上昇を見込んで、冷却部分の鋼棒直径を切削により細くしなければならない。しかし、実際の使用状態と同じ条件下での試験結果を要求される場合には問題が残る。

そこで今回の試験では、それらの切削試験片に加え、高周波熱処理の特色を生かして実際に使用される場合と同じ形状で、かつ低温部分で破断するようにした試験片を作成し、低温での引張試験における試験片形状の影響も調査した。

3.1 試験

3.1.1 試験片

試験片は JIS G 3109 に規定する A, B, C 種(1号) 23 mmφ を用いた。化学成分および常温での機械的性質を表-1, 2 に、また、試験片形状を図-4~7 に示す。引張試験片は図-8 に示すように全体的な冷却が不可能なため、母材部の試験では冷却部分を切削したものと、高周波熱処理により非冷却部分の強度を調節した切削部

表-1 供試材の化学成分 (%)

成分 種類	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
A	0.50	0.23	1.50	0.026	0.011	0.01	0.02	—
B	0.50	0.23	1.56	0.028	0.011	0.01	0.02	—
C	0.50	1.57	0.72	0.020	0.004	0.01	0.02	0.48

分のないものを用いた。これらの形状はそれぞれ JIS Z 2201 の 14 号（切削部分の長さを変更したため「切削試験片」と表示する）および 2 号試験片に準じた。なお、ねじ部は転造加工を行い、衝撃試験片は JIS Z 2204 の 4 号試験片を用いた。

表-2 常温での機械的性質

種類	形状	降伏点 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	ヤング率 (kgf/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)
A	2号 切削	(>80)	(>95)	—	(>5)	—
		90.1	100.2	20 500	9.2	50.8
B	2号 切削	(>95)	(>110)	—	(>5)	—
		114.8	117.9	20 600	10.7	50.5
C	2号 切削	(>110)	(>125)	—	(>5)	—
		123.6	131.0	20 700	11.8	46.5
		126.1	135.7	20 600	11.1	45.0

* () 内は JIS G 3109 の規格値を示す。

** 伸びの測定はすべて標点間距離を 8D とした (D=鋼棒直径)。

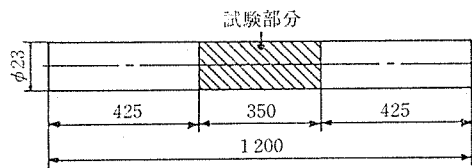


図-4 2号試験片

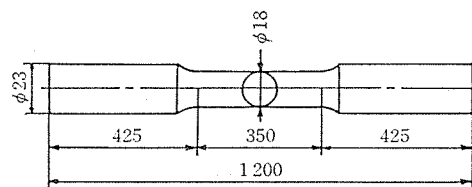


図-5 切削試験片

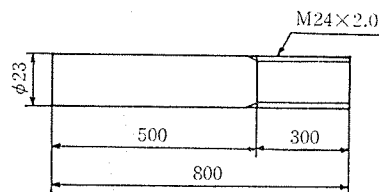


図-6 ねじ部試験片

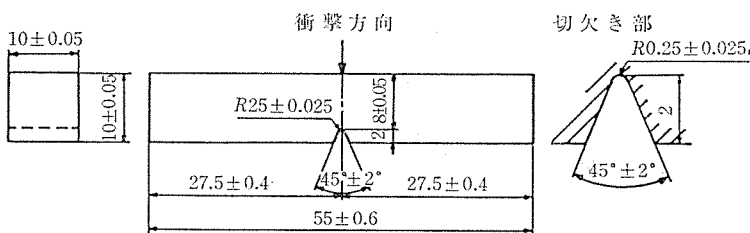


図-7 シャルピー衝撃試験片

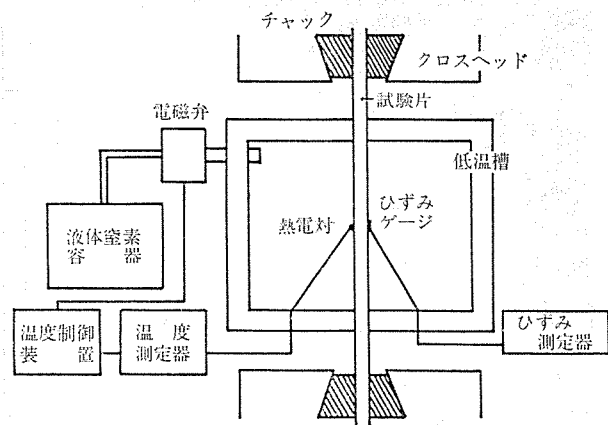


図-8 低温引張試験装置

3.1.2 試験方法

試験は各種類の母材部とねじ部の引張試験およびシャルピー衝撃試験を実施し、特に母材部では前述した2つのタイプの試験片比較も行った。温度範囲は引張試験では常温から -160°C 、衝撃試験では常温から -196°C までとし、冷却には液体窒素を使用した。

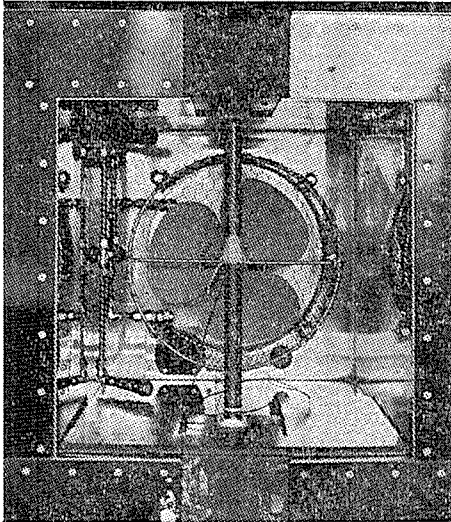
引張試験装置を図-8 に示す。低温槽内の雰囲気温度は温度制御装置を用いて $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内に保った。なお、低温槽内における試験片の装着および -160°C における温度分布状況を写真-4 と図-9 に示す。また、降伏点荷重はひずみゲージを用いて荷重-伸び線図を求めて測定し、伸びは試験片にケガキ線を入れて、破断後常温で測定した。衝撃試験はすべて JIS Z 2242 に従って実施し、各試験温度における PC 鋼棒の衝撃特性を他の PC 鋼材と比較するため、市販の PC 鋼線 (JIS G 3536, SWPD 1) 9 mm から図-7 に示す試験片のサブサイズ (幅 5 mm, JIS Z 2202 に規定) を採取して同試験に供した。この際、同一材料における試験片寸法の相違が衝撃特性に及ぼす影響を確認すべく PC 鋼棒を用いて予備試験を行ったが、その特性値に差異は認められなかったため、サブサイズより求めた PC 鋼線の衝撃特性を用いて PC 鋼棒のものと比較した。

3.2 試験結果

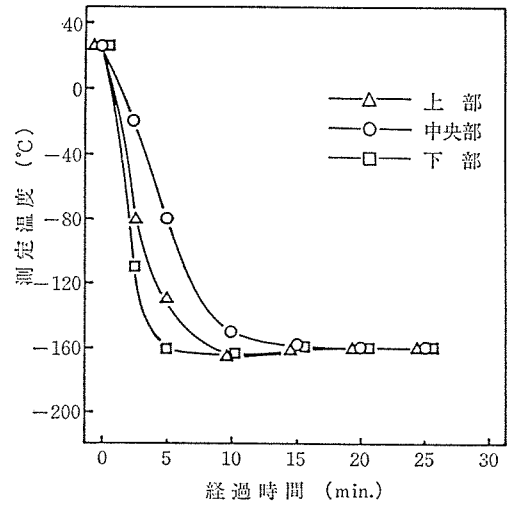
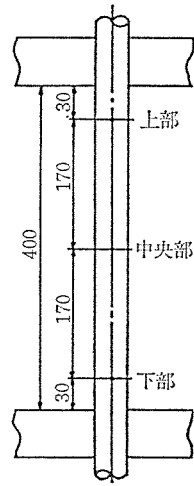
各試験片における母材部およびねじ部の引張試験結果を図-10~13 にそれぞれ示す。また、シャルピー衝撃試験結果を図-14 に示す。それぞれの試験結果から以下のことがわかった。

(1) 母材部の引張特性

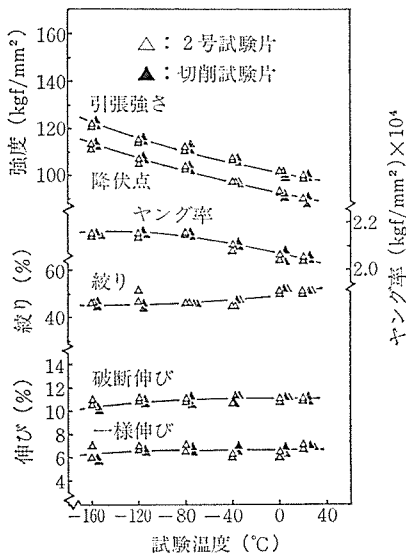
A, B, C 種とも引張強さ、降伏点は温度低下とともに上昇し、 -160°C での値は常温値の約 1.2 倍であった。ヤング率も同じ傾向を示し、 -160°C で常温値の約 1.05 倍であった。伸びは各種類とも温度が低下してもほとんど変化がなく、絞りも温度低下とともに若干低下し、 -160°C では常温



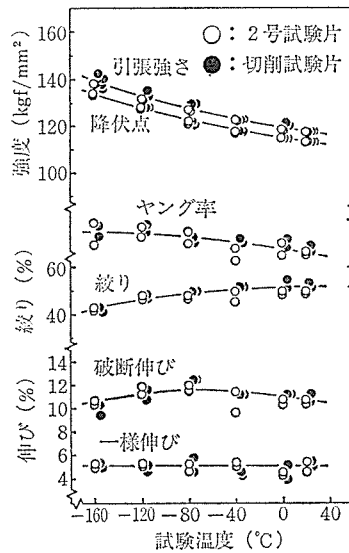
写真—4 試験片の装着状況



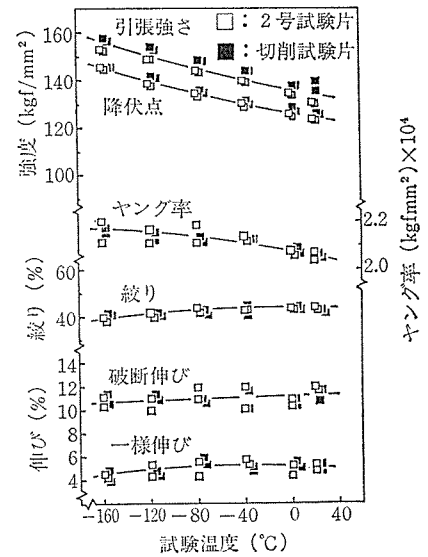
図—9 低温槽内の温度分布状況 (-160°C の場合)



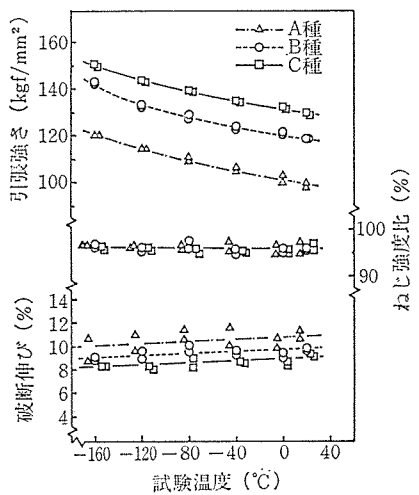
図—10 A種引張試験結果



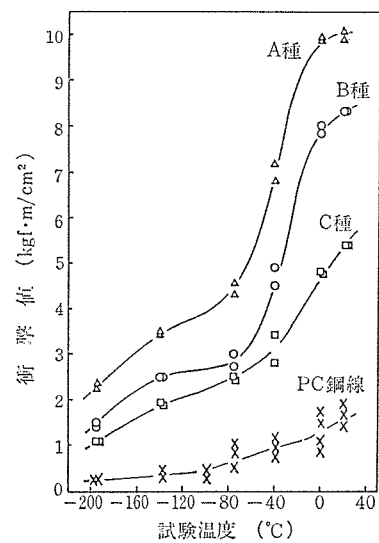
図—11 B種引張試験結果



図—12 C種引張試験結果



図—13 ねじ部引張試験結果



図—14 シャルピー衝撃試験結果

値の 0.8~0.9 倍を示した。

(2) ねじ部の引張特性

各種類とも母材部と同様に、低温になるほど引張強さは上昇し、-160°C では常温値の約 1.2 倍であったが、ねじ強度比 $\left(\frac{\text{ねじ部引張強度}}{\text{母材部引張強度}} \times 100\right)$ 、伸びの低下はほとんどなく高いじん性を示した。

(3) 衝撃特性

A, B, C 種いずれの試験片も、-40°C 付近で衝撃値に大きな低下がみられたが、値そのものは非常に高く、-200°C 付近でも従来の PC 鋼線と比較して著しく良好であった。

(4) 試験片形状の影響

高周波熱処理によって作製した新しい方式の 2 号試験片では、一般に用いられる切削試験片と比較して低温での引張特性に大差はなく試験評価は十分可能であった。

4. ねじ部高強度 PC 鋼棒の特性

PC 鋼棒にねじ加工を行った場合、ねじ部強度は母材部強度よりも低くなるのが一般的であるが、高周波熱処理方式の特色を生かせば母材部強度よりも高いねじ部強度をもつ「ねじ部高強度 PC 鋼棒」の製造が可能である。このタイプの PC 鋼棒では、従来のものに比較してねじ部での破断が避けられるために、PC 鋼棒のもつじん性を有効に生かすことができる。

これらの実用化にとまぬ、その特性調査を行った。

4.1 PC 鋼棒の変形能

コンクリート部材のじん性と密接な関係にある PC 鋼棒の変形能を知るには、その荷重-伸び線図を検討する

のが最も簡便な方法である。一例として、B 種 1 号 23 mm 丸棒について検討してみた。

母材部とねじ部のそれぞれの荷重-伸び線図をまとめて図-15 に、また、それらの機械的性質を表-3 に示す。この時、伸びの検出にはゲージ長 100 mm の差動トランス型伸び計を使用した。PC 鋼棒の変形能のひとつの指標である最大荷重時の全伸びは、母材部 (A 点)、ねじ部 (B 点) とともに 6% 以上を示し、それぞれ単独では大きな変形能を所有していることがわかる。しかしながら、母材部とねじ部から成る PC 鋼棒全体としてみると次の理由から十分な変形能が期待できない。すなわち、PC 鋼棒が実際に使用されるような状況下において過大荷重を受けた場合、強度の低いねじ部が母材部に先行して最大荷重に達する。この時、ねじ部は単独引張りの場合と同じ B 点で示す全伸びが得られるものの、PC 鋼棒の大部分を占める母材部の全伸びは C 点で示す 2% 程度になっているにすぎない。

確認のために図-16 に示す実体試験片を用いて引張試験を行い、クロスヘッド間距離から PC 鋼棒全体の荷重-伸び線図を求めてみたところ、図-17 の D 点で示すように予想された数値に近く、低い全伸びしか得られなかった。

4.2 製造方法と特性

(1) 製造方法

ねじ部のみに母材部よりも高い強度をもたせる方法は幾通りかあるが、今回は次に述べる 2 段焼戻し法によった。その製造工程を図-18 に示す。熱処理は通常の PC 鋼棒と同じ高周波誘導加熱によるもので、高周波焼入れにより全断面均一で微細な焼入れ組織とした後、ねじ部

表-3 機械的性質 (B 種 1 号 : 23 mm)

	母材部	ねじ部
引張荷重 (kgf)	47 800	45 600
破断伸び (%)	12.8	11.4
最大荷重時の全伸び (%)	6.6	6.0

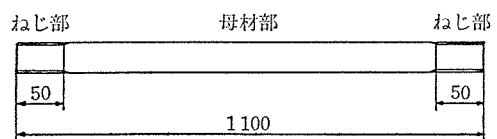


図-16 実体試験片 (B 種 1 号 23 mm)

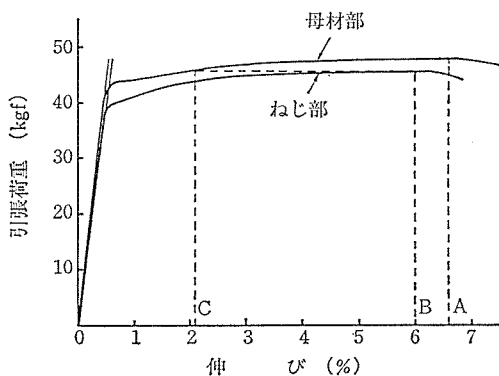


図-15 荷重-伸び線図 (B 種 1 号 23 mm)

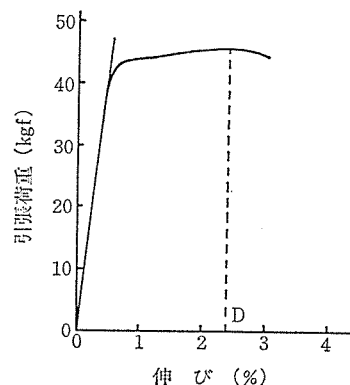


図-17 荷重-伸び線図 (実体試験片)

◇報 告◇

と母材部に異なった強度をもたせるために2度の焼戻し操作を行っている。一次焼戻しはねじ部の強度を決定するためのもので、ねじ加工により強度が低下してもなお母材部強度を上回る条件が選ばれる。二次焼戻しは母材部のみを対象にして、所定の母材部強度が得られる条件で焼戻しを行う。これらの状況を図-19 に示す。

(2) 特 性

本方法により製造されたねじ部高強度 PC 鋼棒 B種1号 23mm の特性は次のとおりであった。表-4 に示す機械的性質をもつ実体試験片の荷重-伸び線図を 図-20 に示すが、期待されたとおり母材部のもつ変形能が十分

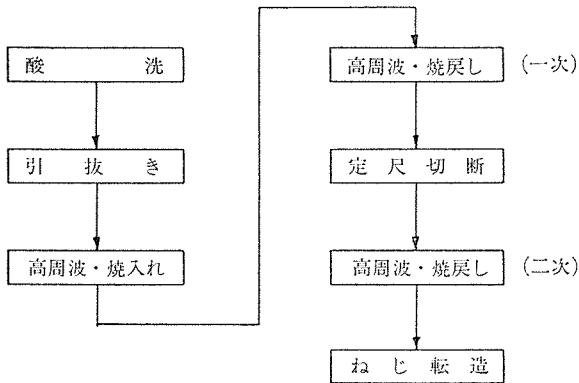


図-18 製造工程

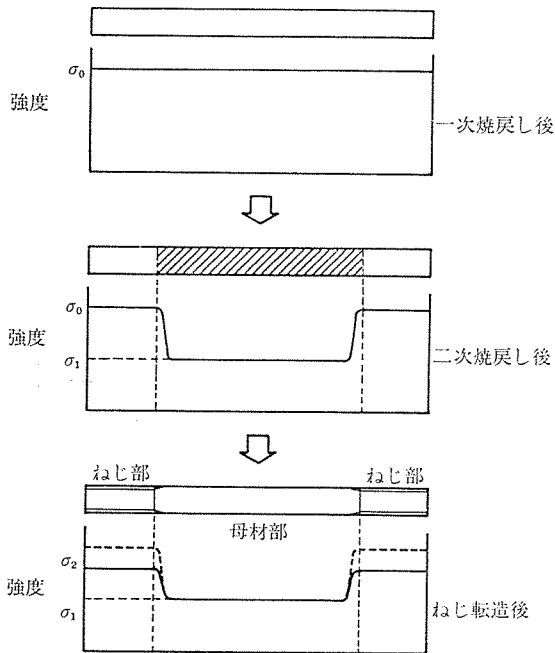


図-19 2段焼戻し工程

表-4 機械的性質 (ねじ部高強度 PC 鋼棒)

	母材部	高強度ねじ部
引張荷重 (kgf)	47 500	48 500
破断伸び (%)	12.3	11.0
最大荷重時の全伸び (%)	6.5	5.6

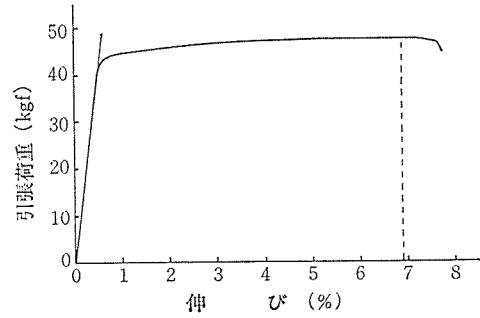


図-20 荷重-伸び線図 (ねじ部高強度 PC 鋼棒)

に発揮されることがわかった。写真-5 は引張試験後の外観であるが、ねじ部強度を高めた結果、母材部にて破断していることがわかる。



写真-5 引張試験後の外観

5. PC 鋼棒の圧縮特性

ポストコンプレスト工法に用いられる PC 鋼棒には引張力に対して示す特性が、圧縮力に対しても低下しないことが要求される。そこで試みとして、製造方法の異なる3種類の PC 鋼棒について圧縮試験を行い、引張試験の特性値と比較することによって同工法に最適な PC 鋼棒の製造方法を検討してみた。

5.1 試験片

試験片は JIS G 3109 に規定するものを用いた。試験片の種類と形状を表-5 に示す。試験片は加工することなくそのまま試験に供した。圧縮試験の状況を 図-21 に示す。

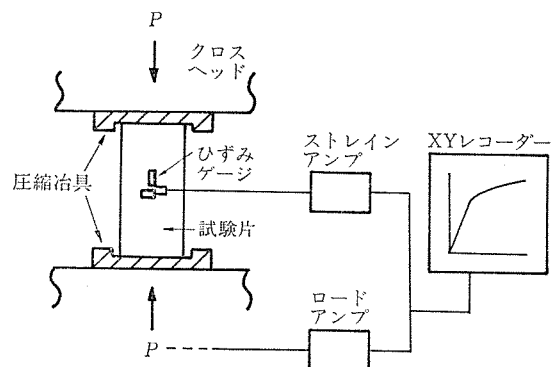


図-21 圧縮試験の状況

5.2 試験結果

試験結果を表-6 に、また、荷重-伸び(縮み)線図の代表例を 図-22 および 図-23 に示す。

熱処理 PC 鋼棒の圧縮特性は引張特性と同等であっ

表—5 試験片の種類と形状

種 類		強度区分	形 状
製 造 方 法	呼 び 名 (mm)		
高周波熱処理	23	C種1号 (110/125)	引張試験片 (長さ: 800 mm)
	32	B種1号 (95/110)	
引抜き+ブルーイング	23	A種1号 (80/95)	圧縮試験片 (長さ: 100 mm)
ストレッチング + ブルーイング	32	A種2号 (80/105)	
		B種2号 (95/120)	

表—6 試験結果

製 造 方 法	種 類	引 張 特 性		圧縮特性
		降伏点 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	降伏点 (kgf/mm ²)
高周波熱処理	C種1号 23 mm	119.1	129.5	120.8
	B種1号 32 mm	105.1	115.1	105.8
引抜き+ブルーイング	A種1号 23 mm	89.1	99.2	75.8
ストレッチング + ブルーイング	A種2号 32 mm	93.3	114.8	41.8
	B種2号 32 mm	111.8	128.3	60.9

た。しかし、引抜きあるいはストレッチによって製造した PC 鋼棒の場合は圧縮特性との間に明らかな差異が認められ、圧縮力に対しては PC 鋼棒として重要な特性である弾性的な性能が低下することが明らかとなった。なお、この現象はパウジンガー効果として知られている。

以上の結果から、圧縮 PC 鋼棒としては熱処理により製造したものが最も適当であり、圧縮特性値としては引張試験によって得られた数値がそのまま適用できることがわかった。

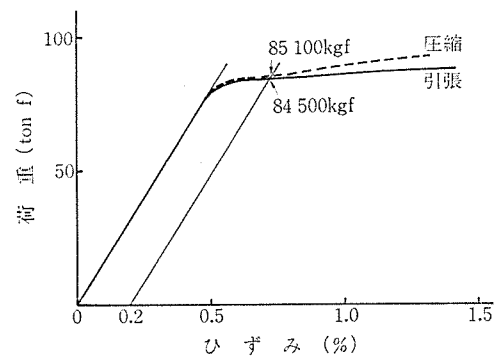
6. ま と め

高周波熱処理 PC 鋼棒の諸特性について調査した結果、次のことがわかった。

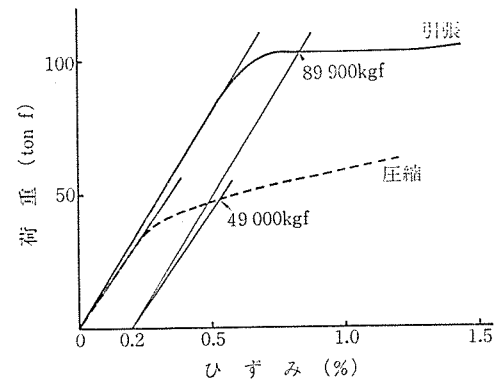
- 1) 極低温において十分なじん性を有し、PC 低温タンク用として適している。
- 2) 高周波熱処理方式の利用により、ねじ部が母材部より高い強度をもつ PC 鋼棒の製造が可能であり、この方法による PC 鋼棒ではねじ部が母材部に優先して破断することが避けられ、母材部のもつじん性を十分に発揮させることができる。
- 3) 機械的性質のうち、圧縮降伏点が引張降伏点に等しく、かつ、ストレッチ、ブルーイングにより製造された PC 鋼棒の圧縮降伏点よりも優れており、ポストコンプレスト工法用に適している。

参 考 文 献

- 1) 山本勝郎：液化天然ガス (LNG) の貯蔵へのプレストレストコンクリートの応用，プレストレストコンクリート，Vol. 15, No. 2, 1973
- 2) 井畔瑞人：プレストレストコンクリートの新分野への応用と研究—LNG タンク—，コンクリート工学，Vol. 16, No. 6, June 1978
- 3) 通商産業省 鉱山石炭局液化天然ガス研究委員会，プレストレストコンクリート，LNG タンカーの試設計について，プレストレストコンクリート，Vol. 15, No. 6, Dec. 1973
- 4) Mahmoud Z. Arafat : Design and construction of Giant precast prestressed LNG storage tanks at Staten



図—22 荷重-伸び (縮み) 線図 (B種1号 32 mm : 高周波熱処理)



図—23 荷重-伸び (縮み) 線図 (B種2号 32 mm : ストレッチブルーイング)

Island, PCI Journal/May-June 1975

- 5) FIP, State of the Art Report, Cryogenic Behavior of Material for Prestressed Concrete
- 6) Slawomir DREWNOWSKI, Wojciech MARKS : Les structures precontraintes par des câbles tendus et des barres comprimées, Ann INST TECH. BATIM TRAV PUBLICS, 1982
- 7) 田島 武ほか：パイプレストレッシング方式 PC 桁の実用化試験と試設計，橋梁と基礎 84-2
- 8) Hans Reiffenstahl : Vorsepannen von Bewehrungen auf Druck; Grundsätzliches und Anwendungsmöglichkeiten, BETON UND STAHLBETONBAU 3/1982

【昭和 59 年 12 月 10 日受付】