

PC 鋼材の製造とその取扱いについて (第1回)

—— PC 鋼線および PC 鋼より線 ——

富岡 敬之*

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は、できるだけ大きな有効プレストレス量を与える必要がある。鋼材の弾性範囲や引張強さが高いことが要求される。その他、安全性のため伸びや長期使用のためレラクセーション特性など目的に応じていろいろな特性が要求される。それによって種々の PC 鋼材が市販使用されている。

本号では、PC 鋼線および PC 鋼より線の製造方法とその特性につき述べる。なお、13 巻 3 号に PC 鋼棒 (引抜鋼棒、焼入れ焼もどし鋼棒、圧延鋼棒) および 13 巻 4 号に PC 鋼材全般の使用上の注意事項につき概説する予定である。

2. PC 鋼線、PC 鋼より線の種類

PC 鋼線および PC 鋼より線を製造方法、形状および構造について分類すると 表—1 のようになる。

PC 鋼線および PC 鋼より線の規格の一例として 表—2、3 に JIS G-3536-1971 を示す。

3. 製造方法

PC 鋼線および PC 鋼より線の製造方法のなかで一般的な伸線加工後ブルーイングを施す方法について述べる。その標準的な製造工程の概略を 図—1 に示す。

次に図中のおもな工程を説明する。

(1) 線 材

PC 鋼線、PC 鋼より線用の線材としては、表—4 に示す JIS G-3502 「ピアノ線材」に適合した線材が使用される。これは良質製鋼原料を電気炉、平炉または転炉で精錬して鋼塊を作り、熱間で圧延して適当な直径にしたものである。その化学成分のうち炭素は鋼線の強度を左右する主要成分であって、炭素量が多くなると引張強さが高くなる。ロープ用には 0.6%，引張強さの高い PC 用には 0.7~0.8% が使用される。炭素量が 0.9% 以

* 神鋼鋼線工業(株) 開発部長

表—1 PC 鋼線および PC 鋼より線の種類

1) 製造方法による分類

製 造 方 法	規 格	用 途
冷間加工のままのもの	(i) 伸線 (ii) 圧延 JIS G 3538-1971	プレストレストコンクリートタンクおよび管
加工後残留応力を除去したもの	(i) 低温焼鈍 (ブルーイング) (ii) 予備緊張 (ストレッチング) JIS G 3536-1971	プレストレストコンクリートに用いる。 PC 鋼線および PC 鋼より線
熱処理オイルテンパーなど		日本、アメリカでは使用されない。

2) 形状および構造による分類

	種 類		標準直径の 範囲(mm)	適 用	
PC 鋼線	PC鋼線		2.9~9.0	プレテンション用 および ポストテンション用	
	インデント (丸型) PC 鋼線		2.9~7.0		
	インデント (だ円型) P C鋼線		4.0~7.0		
	デフォームPC鋼線		4.0~7.0		
	亜鉛メッキPC鋼線		5.0~7.0	ポストテンション用	
PC鋼よ り線	PC鋼より線	2本より	2.9	プレテンション用	
		3本より	2.9		
		亜鉛メッキ鋼 より線	7本より	6.2~15.2	プレテンション用 および ポストテンション用
			19本より	17.8~28.6	
	特殊ケーブル		7本より	9.3~15.2	ポストテンション用
			4×7+1 ⁽⁴⁾	25.6	ポストテンション用
		7×7	32.4, 38.4		
		7×19+6+12 ⁽³⁾	54.0		

注：1) 4.0 mm の単線のまわりに 10.8 mm の 7 本よりを 4 本より合わせたもの

2) 10.8 mm または 12.4 mm の 7 本よりを 7 本より合わせたもの

3) 10.8 mm の 7 本よりを 19 本より合わせ、内層のすき間に 4.0 mm の単線 6 本、外層のすき間に 2.4 mm の単線を 12 本入れたもの

上になるとセメントの量が多くなり、通常使用されない。マンガンは脱酸剤として溶鋼中の酸素を除去するために添加される元素であるが、炭素とともに、鋼線の性質に大きく影響し、焼入れの感受性を増す作用を有する。したがって、PC 鋼線に必要なソルバイト組織をうるためにはマンガンが 0.5~0.9% であることが望まし

表—2 P C 鋼線規格 (JIS G 3536-1971)

呼 び 名 ⁽¹⁾ α (mm)	許 容 差 ⁽²⁾ (mm)	引 張 荷 重 (kg)	降 伏 荷 重 ⁽³⁾ (kg)	破 断 後 伸 び		レ ラ ク セ ー シ ョ ン		
				伸 び (%)	測 定 長 (mm)	レ ラ ク セ ー シ ョ ン 値 (%)	初 荷 重 (kg/mm ²)	測 定 時 間 (h)
(2.9)	±0.03	> 1300	> 1150	>3.5	100	<3.0	$0.80 \times \sigma_y$	10
(3.5)	±0.04	> 1650	> 1450	>3.5				
(4)	±0.04	> 2150	> 1900	>3.5				
(4.5)	±0.05	> 2600	> 2300	>4.0				
5	±0.05	> 3250	> 2850	>4.0				
(6)	±0.05	> 4500	> 3950	>4.0				
7	±0.05	> 5950	> 5200	>4.5				
8	±0.05	> 7550	> 6550	>4.5				
9	±0.05	> 9200	> 7950	>4.5				

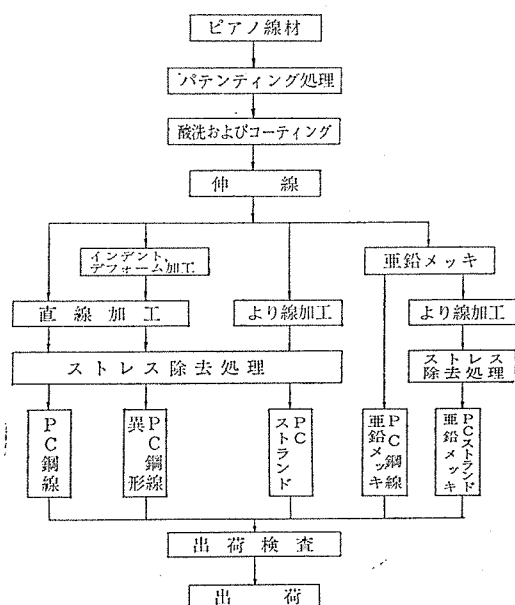
- 注：1. かっこ以外の呼び名のものの適用が望ましい。
 2. 異形線については直径の許容差は規定しない。
 3. 0.2 % 永久伸びに対する荷重を示す。

表—3 P C 鋼より線規格 (JIS G 3536-1971)

呼　　び　　名 ⁽¹⁾		許　容　差 ⁽²⁾ (mm)	引　張　荷　重 (kg)	降　伏　荷　重 ⁽³⁾ (kg)	破　断　時　伸　び		レ　ラ　ク　セ　ー　シ　ョ　ン			
	α (mm)				伸　　び (%)	測　定　長 (mm)	レラクセーション値 (%)	初　荷　重 (kg/mm ²)	測定時間 (h)	
2本より		2.9×2	±0.03	> 2 600	> 2 300	>3.5	200	<3.0	$0.80 \times \sigma_y$	10
7本より (A種)	(6.2)	$\begin{smallmatrix} +0.4 \\ -0.2 \end{smallmatrix}$	> 4 100	> 3 450	600					
	(7.9)	$\begin{smallmatrix} +0.4 \\ -0.2 \end{smallmatrix}$	> 6 600	> 5 600						
	9.3	$\begin{smallmatrix} +0.4 \\ -0.2 \end{smallmatrix}$	> 9 050	> 7 700						
	10.8	$\begin{smallmatrix} +0.4 \\ -0.2 \end{smallmatrix}$	>12 200	>10 400						
	12.4	$\begin{smallmatrix} +0.4 \\ -0.2 \end{smallmatrix}$	>16 300	>13 900						
	15.2	$\begin{smallmatrix} +0.4 \\ -0.2 \end{smallmatrix}$	>23 100	>19 700						
7本より (B種)	9.5	$\begin{smallmatrix} +0.4 \\ -0.2 \end{smallmatrix}$	>10 400	> 8 850	600					
	11.1	$\begin{smallmatrix} +0.4 \\ -0.2 \end{smallmatrix}$	>14 100	>12 000						
	12.7	$\begin{smallmatrix} +0.4 \\ -0.2 \end{smallmatrix}$	>18 700	>15 900						

- 注：1. かっこ以外の呼び名のものの適用が望ましい。
 2. 7本より線についてはより線の直径に対する許容差を示す。
 3. 0.2 % 永久伸びに対する荷重を示す。

図—1 P C 鋼線, P C 鋼より線の製造工程図



い。また、線材表面のきず、脱炭および炭素その他の添加元素の偏析防止に留意しなければならない。したがって、P C用ピアノ線材は以後の工程に流されるに先だって外観、寸法、重量、化学成分、表面脱炭、偏析、非金属介在物および顕微鏡組織について厳重な試験が行なわれる。

(2) パテンティング

熱間圧延により製造された線材は粗大な層状組織であって、伸線加工に適さない。鋼の A₃ 変態点以上の温度 (850~950°C) に加熱後、溶融鉛中 (500~600°C) に急冷される。この操作をパテンティングといい、これにより強度とじん性を兼ね備え、伸線加工に最適なソルバイト組織になる。パテンティング後の線材の機械的性質は化学成分やパテンティング処理の条件 (加熱温度、加熱時間、鉛温度、冷却速度など) によって定まる。

パテンティング処理は、P C 鋼線や P C 鋼より線の基本的性質とそれらの均一性を左右する最も重要な工程のひとつであって、この作業における性能のばらつきは極

表—4 ピアノ線材の化学成分 (JIS G 3502)

種 類	記 号	化 学 成 分					
		C	Mn	Si	P	S	Cu
1 種	甲	0.65~0.75	0.30~0.60	0.12~0.32	0.025 以下	0.030 以下	0.20 以下
	乙	0.65~0.75	0.60~0.90	0.12~0.32	0.025 以下	0.030 以下	0.20 以下
2 種	甲	0.75~0.85	0.30~0.60	0.12~0.32	0.025 以下	0.030 以下	0.20 以下
	乙	0.75~0.85	0.60~0.90	0.12~0.32	0.025 以下	0.030 以下	0.20 以下

写真—1 パテンティング工場



力防止しなければならない。写真—1 にパテンティング工場の概観の一例を示す。

(3) デスケーリング

パテンティングされた線材の表面にはスケールが生成する。このスケールは鉄の酸化物で非常に硬く展延性にとぼしく、次の工程である伸線作業の妨げとなるので酸洗あるいは機械的な方法でこれを除去するが、一般には酸洗によって除去される。酸洗によるスケール除去方法は約 60°C に加熱された稀硫酸または常温の稀塩酸に一定時間浸漬したのち高圧水を噴射して付着した酸分や他の不要物を除き、さらに完全に水洗する操作である。それからボラックス、石灰水あるいは適当な燐酸塩に浸して中和を行なうとともに、伸線加工のさいに必要な潤滑剤のコーティングをほどこしたのちロッドベーカーで乾燥する。

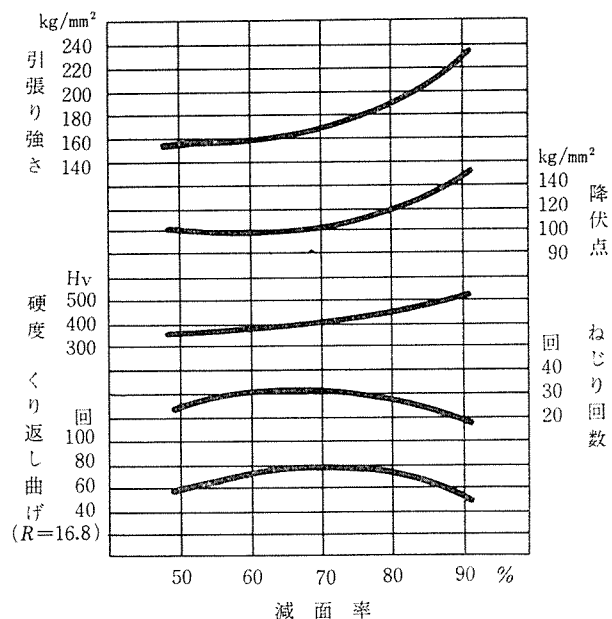
(4) 伸 線

コーティングされた線材は、伸線機を用いて円錐形の

穴を有するダイス中を冷間で数回引抜くことにより目的の直径と必要な強度を有する線に加工される。パテンティングによって得られた微細な層状組織は適当な潤滑剤を使用して伸線することによって繊維状に発達し、強度やじん性が増加する。写真—2 にワイヤーロッド、パテンティング後および伸線後の組織を示す。伸線加工の程度は要求される品質や材料の品質によって異なるが、1 回あたりの断面積減少率 15~20%，伸線回数（ダイス回数）5~10 回で、最終的な断面積減少率 70~80% 程度である。図—2 に伸線加工による断面積減少率と機械的性質の関係を示す。

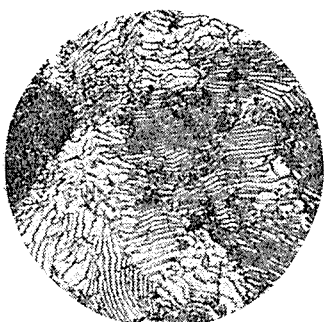
伸線機には 1 個のダイスを有する単独伸線機と数個の

図—2 0.8 % C の減面率と機械的性質



写真—2

ワイヤーロッドの組織



パテンティング後のソルバイト組織



伸線後のファイバー組織



ダイスを有する連続伸線機があるが、P C鋼線は一般には連続伸線機を用いて線材の供給から仕上がり径に至るまで連続して伸線される。

伸線用ダイスにはタングステンを焼結して作った超硬質の合金に適当な形状の円錐形の孔をあけたものが一般に使われる。多量の鋼線を伸線するとダイスが摩耗して変形および増径するので、伸線のさいには随時中間および仕上がりの線径を測定し、あらかじめ定めた減面率になっているかどうか、また、必要な真円度を有するかどうかをチェックする必要がある。

(5) 直線加工

P C鋼線は原則として直線性が要求されるので、伸線中に生じた曲りぐせを除くため直線機にかけられる。直線機は普通回転するローラーによって鋼線を連続的に屈曲し、曲りぐせを除去するものが使われる。

直線加工をほどこしたP C鋼線はコイルから解いた場合、直線状態になる。しかし、直線加工は鋼線に塑性曲げを与えて行なうので、曲げ応力によって線は降伏した状態になっている。このため直線加工をほどこした鋼線の引張強さ、降伏応力などは伸線のままの線より劣化しており、このままではP C用としては不適当であるからあとで述べるブルーイング処理がほどこされる。

(6) より線加工

より線加工は構成に応じて必要な数の素線をより合わせる作業で、伸線された鋼線をボビンに巻き取り、より線機（ストランダー）にかける。P C鋼より線の場合、中心線のまわりに6本の素線をより合わせた7本よりが普通であるが、さらにその上に線をより合わせた多層より、あるいはストランドをより合わせたものなどがある。

P C鋼より線では側線が心線の周囲に完全に密着してよられるように側線より少し太目の心線を使用することが規定されている。また、より長さ（ピッチ）はJISではより線の直径の12～16倍に規定され、均一なピッチでよること、素線を適当に型付けすることなどが不可欠な作業となる。そしてこれらの操作を適当に行なうことによって伸直性がよく、素線のばらけない良好なより線をうることができる。

(7) 異形加工

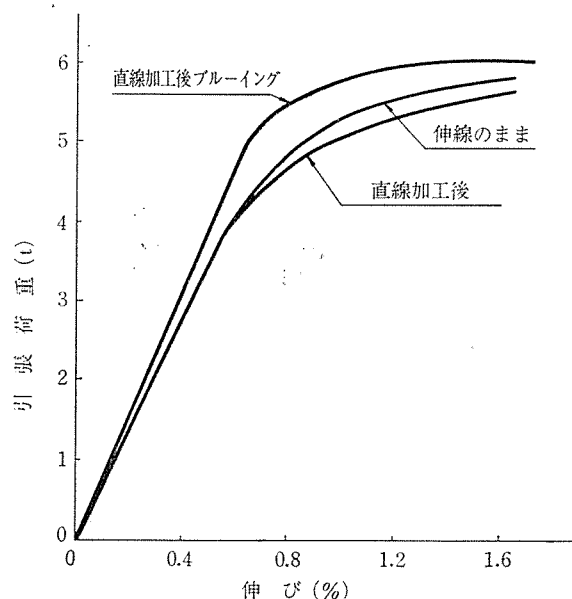
P C鋼線のコンクリートに対するボンド性を改善し、あるいはポストテンションのくさび定着のさいの定着を確実にするために、鋼線の表面に凹型（インデント型）や凸型（デフォーム型）の圧痕をつけることがある。圧痕の形は種々のものがあるが、JISには「異形線はほぼ丸い断面を有し、一様な突起またはくぼみを連続あるいは一定間隔でつけたものとする」と規定されている。一

般に圧痕は伸線加工後、異形ロールによって圧痕をつけられる。

(8) ブルーイング

伸線加工やより線加工を受けたP C鋼線およびP C鋼より線は加工ひずみを残留しているため降伏点が低く、伸びも小さいため、そのままではP C鋼線およびP C鋼より線としては適さない。したがって、その残留応力を除去して降伏点を高くし、伸びを大きくするために鋼線および鋼より線を熔融塩浴炉、熔融鉛浴炉または熱風炉

図—3 P C 鋼線の荷重—伸び曲線の例 (7 mm)

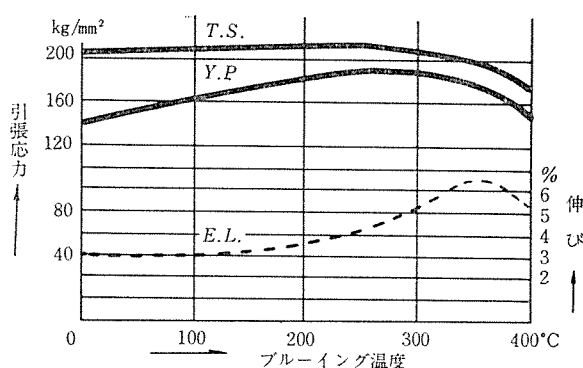


を通過させて 300～400°C に加熱し低温焼鈍する。これをブルーイングという。図—4 にブルーイング温度と機械的性質の関係を示す。ブルーイングには単に加熱させるだけのものと緊張力を加えながら加熱するものがある。後者の緊張力を加えながら加熱する方法は Hot Stretch あるいは Stabilize と呼ばれ、レラクセーション特性が非常に向上する。

(9) 亜鉛メッキ

空气中にさらされるとか腐食の激しい条件で使用され

図—4 ブルーイング温度と機械的性質の関係



解 説

るP C鋼線およびP C鋼より線では、耐食性を増すために亜鉛メッキが施されることがある。

メッキP C鋼線またはP C鋼より線では、伸線後ただちにメッキを施される。メッキ方法としては熱式熔融亜鉛メッキが一般的である。

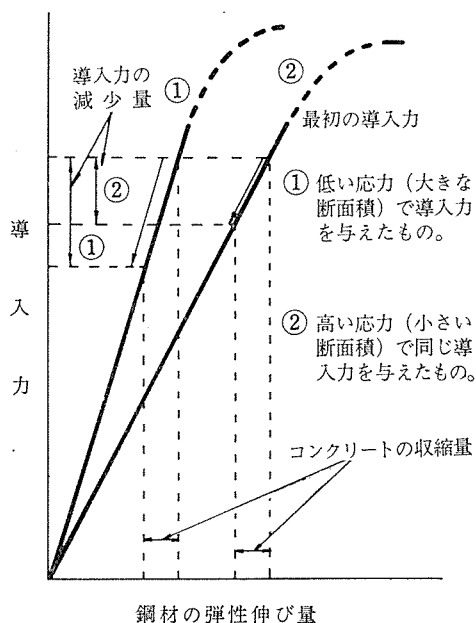
4. 性 質

P C鋼線およびP C鋼より線は次のような特性を備えている。

(1) 機械的性質

a) 弾性限、降伏点、引張強さが高い プレストレスト コンクリートに緊張力を与える P C 鋼線およびP C 鋼より線はコンクリートの弾性変形、乾燥収縮、クリープなどによって生ずるプレストレスの損失をできるだけ少なくして導入した緊張力を有効に働かせるために、引張強さ、降伏点、弾性限の高いことが必要である。すなわち、緊張材のひずみの量が多いので、コンクリートの収縮などによってプレストレスの損失があっても引張り強さが大きければこれによる応力損失の割合は少なく、残留応力の割合が多いので、導入した緊張力が有効に働くことになる。図—5 にコンクリートの収縮と導入力減少の関係を示す。

図—5 コンクリートの収縮と導入力減少の関係



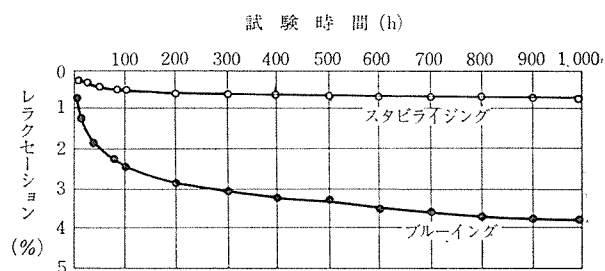
b) 破断時伸びが大きい P C構造物にオーバーロードが作用して破壊する場合構造物が一時に破壊するのを防ぐために緊張材で強度を保つ必要があり、P C鋼線およびP C鋼より線は破断時の伸びが大きいことが必要である。

c) じん性が良い くさび式の定着具で定着された

り曲線状あるいは屈曲して緊張される場合、破断しないためにじん性が良くなければならない。またボタンヘッド、ループあるいは波形で定着される場合もあり、適度の屈曲性や加工性を有することが要求される。

d) レラクセーション（応力緩和）が少ない 材料に張力を加えて長さを一定に保っておくと張力は時間とともに減少する。この現象をストレスレラクセーション（応力緩和）または単にレラクセーションという。P C鋼線のレラクセーションの一例を 図—6 に示す。

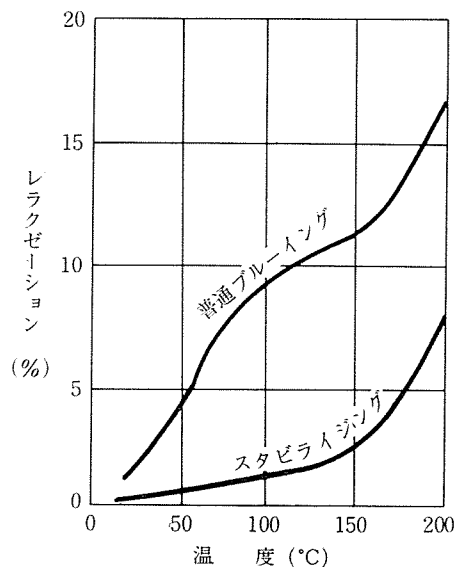
図—6 P C 鋼線のレラクセーション曲線の例 (φ7 mm)



P C部材において緊張材のレラクセーションが大きければ、最初に与えたプレストレスがいかに大きくてもある期間後にはプレストレスの効果が失われるので、P C鋼線およびP C鋼より線はレラクセーションが少ないことが必要である。実際のコンクリート中では、コンクリートの乾燥収縮やクリープが起こるためにP C鋼線およびP C鋼より線のレラクセーションがそのままコンクリート中でのレラクセーションになりえないけれども、P C鋼線およびP C鋼より線のレラクセーションが少なくなければならないことには変わりはない。そのため従来よりレラクセーションの低いP C鋼線およびP C鋼より線の研究が進められてきたが、そのひとつとして先に述べた Hot Stretch という処理方法がある。この処理によると、レラクセーション値は通常のブルーイング処理材の 1/3 程度に減少する。

P C鋼線およびP C鋼より線のレラクセーションに及ぼす諸因子の影響について簡単に触れてみる。初荷重が大きくなるとレラクセーションも増大する。降伏点強度の 60% 以上から急に大きくなる傾向にあり、レラクセーション量はその材料の組織や応力—ひずみ曲線などに関係していると考えられ、弾性限の高い材料ほどレラクセーションは少ない、応力導入の時に緊張荷重以上に数分間ストレッチを行ない、その後所定の荷重にもどす、いわゆるプレストレッチを行なうとレラクセーションは小さくなる効果がある。また、コンクリートの蒸気養生や温度が数十度まで上る原子炉圧力容器などのように高温で使用される場合があるので、高温でのレ

図-7 高温におけるレラクゼーション
(10 時間後)



クゼーションも非常に重要である。レラクゼーションは温度に非常に敏感で常温近くで 20°C 異なると 2 倍の値になる場合があるほどである。高温でのレラクゼーションの結果を図-7 に示す。

(2) 腐 食

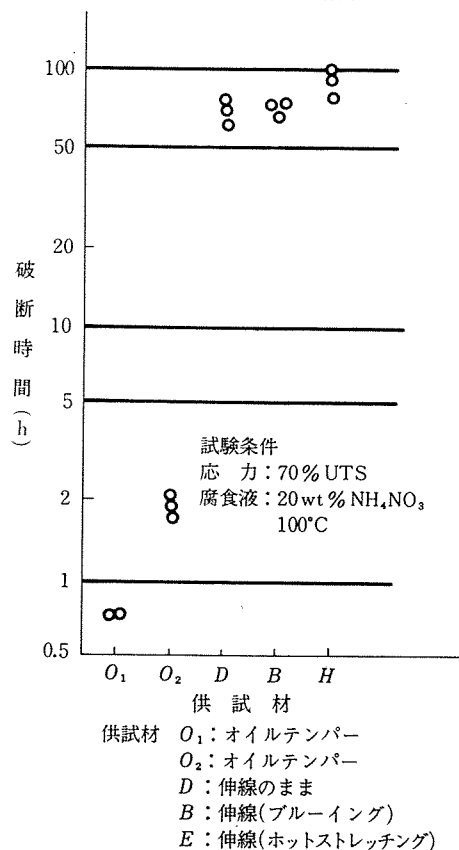
P C 鋼線の腐食には使用前の腐食と緊張中の腐食に大別できるが、使用前の腐食についてはコンクリートとのボンディング性を向上させるために腐食させて使用することもあるが、点食を起こすほどさびさせると強度低下を起こすので、保管中の防錆には十分気をつける必要がある。

緊張中の腐食について問題となるのは、引張応力がかかっているときに、腐食媒が存在して、いわゆる応力腐食が起こり、著しいときには突然破断することである。したがって、P C 鋼線および P C 鋼より線は応力腐食に強いことが必要である。図-8 に P C 鋼線および P C 鋼より線の応力腐食促進試験の一例を示す。この図から明らかなように、冷間加工材のブルーイング処理材は応力腐食に非常に鈍感である。

(3) 取 扱 性

P C 鋼線や P C 鋼より線はコイルやリールに巻いて運

図-8 応力腐食試験結果



搬されるが、使用される時に直線にされるのでコイルやリールから解いたときも曲がりくせがなく、直線状になることが要求される。特にポストテンション方式の場合には長いシースに通すので曲がりくせがあっては作業性が悪くなる。したがって、P C 鋼線および P C 鋼より線は直線性が良好なことが必要である。

(4) ボ ン ド 性

プレテンション方式において P C 鋼線や P C 鋼より線のコンクリートに対するボンディングが悪ければ、コンクリートの内部ですべりを起こして伝達長が長くなり、プレストレスの効果がなくなる。ポストテンション方式においてはグラウトの効果が減じるので、線の表面に油その他の有害な被膜があってはならない。

<つづく>