

## PC 鋼材の現況と展望

森 田 司 郎\*

### 1. はじめに

プレストレスト コンクリート（以下PCと略す）が考案されてから一世紀近く経過し、日本で実用化されてからでも 20 年余りになる。その間プレストレスト コンクリートの利用範囲や量は増加し、その技術も格段の進歩をとげた。それに伴いPC用鋼材の進歩も著しいものがあり、その生産量もパイル用鋼材を除いても、年間 35 000 t~40 000 t にのぼる。このようにPC鋼材が大量に使用されるようになり、その品質も一応の水準に達していると考えられるが、鉄筋コンクリートに使用される鋼材に比べれば、非常に厳しい条件で使用される性質の鋼材であり、まだまだ改良されるべき事項があると同時に、使用する上でさらに十分な検討と配慮を必要とする点が少なくない。ここではPC鋼材の現状と使用上の問題点について述べるとともに、今後さらに改良を加えるべき方向について概観してみたい。

### 2. PC 鋼材の現状

PC鋼材はその形状から次のように分類される。

- ① PC 鋼線および異形PC鋼線
- ② PC 鋼より線および異形PC鋼より線
- ③ PC 鋼棒および異形PC鋼棒

PC鋼材に要求される品質上の特色はRC用鉄筋と比べて次のように高度である。

- 1) 引張強度が大きく（RC用鉄筋の数倍程度）しかも弾性限界および降伏点が引張強度に比べてあまり低下しないこと、
- 2) 伸びと加工性が必要最低限確保されること、
- 3) レラクセーション（応力緩和）が小さいこと、
- 4) 応力腐食に対して抵抗性が高いこと、
- 5) 伸直性のよいこと（巻き取ったものを伸ばすとまっすぐ直線状になること）、
- 6) 疲労強度があまり低下しないこと、
- 7) プレテンション用では特に、コンクリートとの付

\* 工博 京都大学助教授 工学部建築学教室

着がよいこと。

1) の高強度化の要求と、2) 以下の要求は一般に相反する性質のものであり、これらの要求をバランスよく満たす鋼材の製造が可能になったこと自体がPC構造の成立基盤であった。PC鋼材は、したがって、建設用鋼材の中で際立って高級な鋼材であり、高級であるということは、熱的、電気化学的、また力学的条件の変化に対して感受性がより高いことにつながる。

PC鋼材の規格では上記の諸要求を確保するため、最小限の項目についてその品質が規定されている。

#### (1) PC 鋼線およびPC 鋼より線

PC鋼線およびPC鋼より線については昭和 46 年 1 月に JIS が改訂され（JIS G 3536-1971）、製造方法、品質および検査試験方法が制定された。製造方法は図-1 に示すようにピアノ線材を用い、これにパテンチング

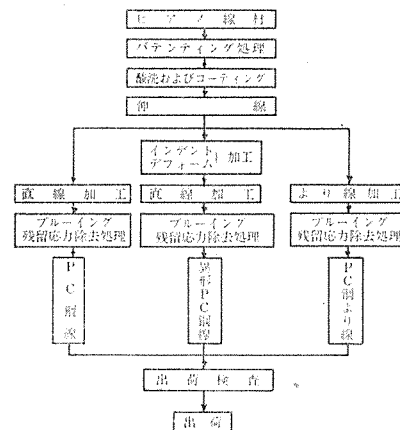


図-1 PC 鋼線、PC 鋼より線の製造工程図

を施したのち冷間加工を行い、最終工程において冷間加工によって生じた残留ひずみ除去のためのブルーイング処理を施すものと規定されている。表-1 にその寸法および機械的性質を示す。表-1 で呼び名に（ ）がついているものは、将来単純化のために削除しようとするもので、できるだけ使用しない方が望ましいものである。

PC鋼線およびPC鋼より線の最近の傾向としては、高強度化、太径化の動向があげられる。また今後の開発

表一 PC 鋼線・PC 鋼より線の寸法および機械的性質 (JIS G 3536-1971)

種類	記号	呼び名	公称断面積 (mm <sup>2</sup> )	単位重量 (kg/km)	引張試験			レラクセーション試験
					0.2%永久伸びに対する荷重 (kg)	引張荷重 (kg)	伸び (%)	レラクセーション値 (%)
P C 鋼 線	SWPR 1 および SWPD 1	(2.9 mm)	6.605	51.8	1 150 以上	1 300 以上	3.5 以上	3.0 以下
		(3.5 mm)	9.621	75.5	1 450 以上	1 650 以上	3.5 以上	3.0 以下
		(4 mm)	12.57	98.7	1 900 以上	2 150 以上	3.5 以上	3.0 以下
		(4.5 mm)	15.90	125	2 300 以上	2 600 以上	4.0 以上	3.0 以下
		5 mm	19.64	154	2 850 以上	3 250 以上	4.0 以上	4.0 以下
		(6 mm)	28.27	222	3 950 以上	4 500 以上	4.0 以上	3.0 以下
		7 mm	38.48	302	5 200 以上	5 950 以上	4.5 以上	3.0 以下
		8 mm	50.27	395	6 550 以上	7 550 以上	4.5 以上	3.0 以下
		9 mm	63.62	499	7 950 以上	9 200 以上	4.5 以上	3.0 以下
P C 鋼 よ り 線	SWPR 2	2.9 mm 2本より	13.21	104	2 300 以上	2 600 以上	3.5 以上	3.0 以下
	SWPR 7A	(7本より 6.2 mm)	23.23	182	3 450 以上	4 100 以上	3.5 以上	3.0 以下
		(7本より 7.9 mm)	37.42	293	5 600 以上	6 600 以上	3.5 以上	3.0 以下
		7本より 9.3 mm	51.61	405	7 700 以上	9 050 以上	3.5 以上	3.0 以下
		7本より 10.8 mm	69.68	546	10 400 以上	12 200 以上	3.5 以上	3.0 以下
		7本より 12.4 mm	92.90	729	13 900 以上	16 300 以上	3.5 以上	3.0 以下
		7本より 15.2 mm	138.7	1 101	19 700 以上	23 100 以上	3.5 以上	3.0 以下
	SWPR 7B	7本より 9.5 mm	54.84	432	8 850 以上	10 400 以上	3.5 以上	3.0 以下
		7本より 11.1 mm	74.19	580	12 000 以上	14 100 以上	3.5 以上	3.0 以下
		7本より 12.7 mm	98.71	774	15 900 以上	18 700 以上	3.5 以上	3.0 以下

方向として低レラクセーション化が要望されている。今回の JIS 改訂にあたっては、これらの動きが採択され、

表二 高強度 PC 鋼線の機械的性質 (JIS G 3536-1971 解説)

呼び名	引張荷重 (kg)	0.2% 永久 伸びに対する 荷重 (kg)	伸び (%)	レラクセー ション値 (%)
5 mm	3 450 以上 (175 以上)	3 050 以上 (155 以上)	4.0 以上	3.0 以下
7 mm	6 350 以上 (165 以上)	5 600 以上 (145 以上)	4.5 以上	3.0 以下
8 mm	8 050 以上 (160 以上)	7 050 以上 (140 以上)	4.5 以上	3.0 以下

備考：( )内の数字は応力 (kg/mm<sup>2</sup>) を示す。

表三 PC 鋼より線の機械的性質 (ASTM A 416-68)

より線径 (in)	切断荷重 lb (kg)	1%伸びに対 する荷重 lb (kg)	伸び (GL=24in) (%)
250 級			
1/4 (0.255)	9 000 (4 088)	7 650 (3 470)	3.5 以上
5/16(0.313)	14 500 (6 578)	12 300 (5 580)	"
3/8 (0.375)	20 000 (9 072)	17 000 (7 712)	"
7/16(0.438)	27 000 (12 250)	23 000 (10 440)	"
1/2 (0.500)	36 000 (16 330)	30 600 (13 880)	"
270 級			
3/8 (0.375)	23 000 (10 440)	19 550 (8 868)	"
7/16(0.438)	31 000 (14 070)	26 350 (11 960)	"
1/2 (0.500)	41 300 (18 740)	35 100 (15 930)	"

注：切断荷重および 1% 伸びに対する荷重の ( ) で示した値は便宜上 kg 単位に換算した値である。

高強度 PC 鋼より線として、アメリカなどにおいて広く用いられている引張強度 190 kg/mm<sup>2</sup> 級の 7 本より 9.5 mm, 11.1 mm, 12.7 mm PC 鋼より線が SWPR 7 B として規格に含まれた。また、当時は開発使用の目安として JIS 解説中に取り上げられた表二に示す高強度 PC 鋼線も、最近では JIS 製品に準ずるものとして使用量が増大しているようであり、近い将来に規格に取り入れられるものと思われる。

外国における規格の例として表三にアメリカの ASTM A 416-68 PC 鋼より線の規格を、表四にはイギ

表四 PC 鋼線の機械的性質 (BS 2691-1969)

直 径 (mm)	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	0.2%耐力 (kg/mm <sup>2</sup> )	屈曲回数		1000時間後のレラク セーション値 (%)	
			回数 (回)	曲げ 半径 (mm)	引張強さ の70%の 初期応力	引張強さ の80%の 初期応力
普通レラクセーション級						
7	150	128	3	20	5	8.5
7	160	136	3	20	5	8.5
5	160	136	3	15	5	8.5
5	175	149	3	15	5	8.5
4	175	149	3	12.5	5	8.5
低レラクセーション級						
7	150	135	3	20	2	3
7	160	144	3	20	2	3
5	160	144	3	15	2	3
5	175	158	3	15	2	3
4	175	158	3	12.5	2	3

注：引張強さおよび 0.2% 耐力は MN/m<sup>2</sup> を換算した値で示した。

リスの BS 2691-1969 PC鋼線の規格を示す。ASTM では 250 kpsi(175 kg/mm<sup>2</sup>)級と 270 kpsi (190 kg/mm<sup>2</sup>) 級と 2段階に規格されており、JIS のA種、B種に対応するものである。BS でも 7 mm, 5 mm については 2段階の引張強さのものが規定されている。また BS では、PC鋼線、PC鋼より線とも普通レラクセーション級と低レラクセーション級に分けて規定されてい

ることが一つの特徴である。わが国でも、すでに低レラクセーション鋼材の製造方法が開発され、実用化されており、今後の使用量の増加に伴って JIS 化されるものと予想される。

太径化の具体的な現われとしては、8 mm, 9 mm 径のものが JIS 化され、8 mm 径の PC鋼線は今後のポストテンション方式用緊張材の主流をなすものと目されており、現に使用量は急増しているようである。PC鋼より線についても 15.2 mm (0.6 in) 径のものが JIS 化されている。規格化はされなかったが、太径、高強度製品としては次のような品質のものが実用化されている。

- 15.2 mm (0.6 in) 径 7本より……190 kg/mm<sup>2</sup> 級
- 17.8 mm (0.7 in) 径 7本より……175, 190 kg/mm<sup>2</sup> 級
- 17.8 mm (0.7 in) 径 19本より……190 kg/mm<sup>2</sup> 級
- 多層よりケーブル (7本より線をさらに 4本, 7本, 19本より合わせたもの)

これらは一般の土木建築用緊張材として、とくにアースアンカー用の緊張材としてかなり使用されるようになっている。このほかイギリスなどにおいては、図-2 の

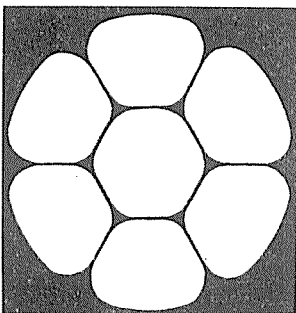


図-2 ダイフォームストランド (7本より)

表-5 19本より PC鋼より線の機械的性質 (BS 4757-1971)

(A) ブルーイング処理なしの 19本より PC鋼より線

より線径 (mm)	直径の公差 (mm)	断面積 (mm <sup>2</sup> )	重量 (kg/1000m)	切断荷重 (kg)	1000時間後のレラクセーション値 (%)	
					切断荷重の 70% の初期荷重	切断荷重の 80% の初期荷重
25.4	+0.6 -0.25	423	3 350	67 200	9	14
28.6		535	4 240	83 920		
31.8		660	5 240	99 830		

(B) ブルーイング処理した 19本より PC鋼より線 18 mm

種別	切断荷重 (kg)	0.2% 耐力 (kg)	伸び (%)	1000時間後のレラクセーション値 (%)	
				切断荷重の 70% の初期荷重	切断荷重の 80% の初期荷重
普通レラクセーション級	37 730	32 000	3.5	7	12
低レラクセーション級		34 000	3.5	2.5	3.5

注：切断荷重および 0.2% 耐力の値は kN 単位の値より換算した。

(2) PC鋼棒

PC鋼棒については昭和 46 年 1 月にはじめて JIS 規格が制定された。PC鋼棒の製造方法としてはキルド鋼を熱間圧延し、そのちストレッチング、引抜き、熱処理のうち、いずれかの方法またはこれらの組合せにより製造するものと規定されている。これらの製造工程を図-3 に示す。また、種類、品質としては表-6, 7 に示すように普通 PC鋼棒として棒径で 11 種類、強度レベルで 6 種類、異形 PC鋼棒として棒径で 4 種類、強度レベルで 3 種類のものが規格化されている。異形 PC鋼棒は、PCパイル用の緊張材として急速に普及したもので、製頭またはねじ転造によって端部支圧板に定着するとともに、コンクリートとの付着効果をあげるために、らせん状または波形の連続した溝をつけたものである。

図-3 ですでに述べたように、JIS G 3109 の特徴は、その製造工程を単一のものに限定していない点にある。そのため炭素量その他の成分を限定し得ないので、単に

ような 17.8 mm 径までのダイフォームストランドや、表-5 に示す 31.8 mm 径までの 19 本より線が実用化されている。これらの太径ストランドは、原子炉圧力容器など大規模な特殊構造物用の緊張材として、ますます広く使用されるようになるだろう。

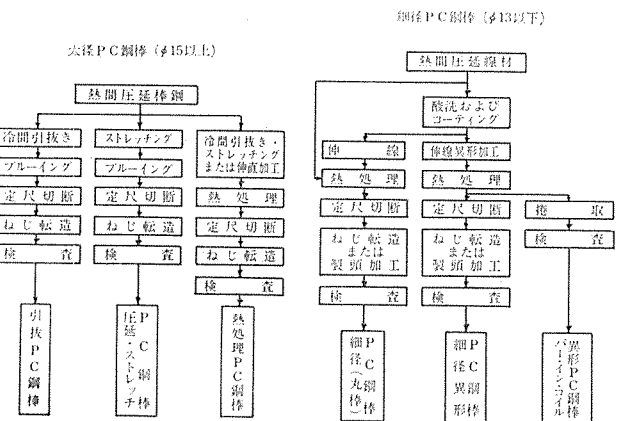


図-3 PC鋼棒の製造工程図

表-6 PC鋼棒の機械的性質 (JIS G 3109-1971)

種	類	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 <sup>2</sup> )	引張強度 (kg/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	レラクセーション値 (%)	
丸棒	A種	1号	SBPR 80/95	80以上	95以上	5以上	1.5以下
		2号	SBPR 80/105	80以上	105以上	5以上	1.5以下
	B種	1号	SBPR 95/110	95以上	110以上	5以上	1.5以下
		2号	SBPR 95/120	95以上	120以上	5以上	1.5以下
	C種	1号	SBPR 110/125	110以上	125以上	5以上	1.5以下
		2号	SBPR 110/135	110以上	135以上	5以上	1.5以下
異形棒	B種	1号	SBPD 95/110	95以上	110以上	5以上	1.5以下
	C種	1号	SBPD 110/125	110以上	125以上	5以上	1.5以下
	D種	1号	SBPD 130/145	130以上	145以上	5以上	1.5以下

備考：耐力とは 0.2% 永久伸びに対する応力をいう。

表-7 PC鋼棒の寸法および公差 (JIS G 3109-1971)

呼び名	基本径 (mm)	許容差 (mm)	公称断面積 (mm <sup>2</sup> )
9.2 mm	8.2	-0.2 プラス側は規定しない	66.48
11 mm	11.0		95.03
13 mm	13.0		132.7
(15 mm)	15.0		176.7
17 mm	17.0		227.0
(19 mm)	19.0		283.5
(21 mm)	21.0	-0.6 プラス側は規定しない	346.4
23 mm	23.0		415.5
26 mm	26.0		530.9
(29 mm)	29.0		660.5
32 mm	32.0		804.2

不純物の許容量のみが規定されている。同じ引張強さ、降伏点のものであっても、製造工程の差によって他の力学的性質に微妙な特徴がある。例えば疲労強度、遅れ破壊、応力腐食などに対して、それぞれ本質的な感受性の差異があるといわれているが、現状ではその差異を客観的に定量的に表現しうるような判定法が確立されていない。この点については FIP の鋼材委員会において応力腐食試験方法の標準化が検討されているようであり、各国共通の課題である。

PC鋼棒をさらに高強度のものとする場合の制約の一つは、高強度化に伴う遅れ破壊感受性の増大である。また太径化については現場における作業性、応力の一様性などの点から 36 mm 径程度が限度と考えられている。したがって、この方面の要求は多層よりケーブルの利用によって満たされるものと思われる。PC鋼棒の新しい傾向の一つをあげると、図-4 に示す西ドイツで開発された異形PC鋼棒（ゲビンデスタブ）は、熱間圧延時に鋼棒全長にねじ状のリップを成形したもので、転造ねじ加工を必要とせず、所有長さに切断さえすれば、どの部分

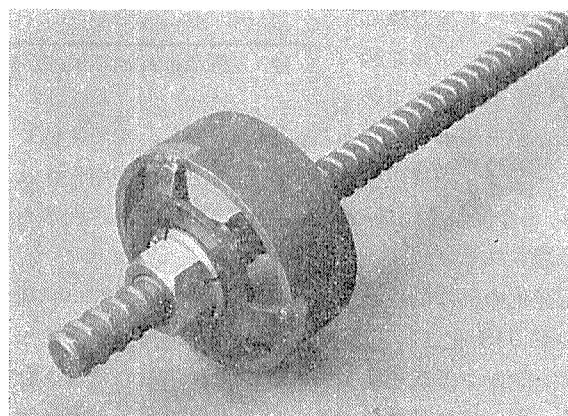


図-4 異形PC鋼棒（ゲビンデスタブ）

でも定着および接合が可能であり、コンクリートとの付着性能が良好であるなど種々の利点を有している。

### (3) PC硬鋼線

タンクやパイプの類の外周にダイスを通して冷間加工を与えながら巻きつけてリングテンションを負担させる目的のみに用いる硬鋼線をPC硬鋼線 JIS G 3538-1971 として規格化している。これは普通のPC鋼線がピアノ線を原材料とするのに対して、硬鋼線を用いる点、普通のPC鋼線ではブルーイングを用いるのに対して、この工程を全く行わない点で、PC鋼線とは同列には扱えない。同じ引張強度を持つ通常の鋼線に比べて比例限界、降伏点がかかなり低く、伸びは小さく、レラクセーションは大きいのは当然である。また、施工時の冷間加工を受けた後の性質は線材としての性質と異なったものになっている。

### 3. PC鋼材の特性と使用上の問題点

国産PC鋼材の品質水準は、すでに本誌に紹介されているように、規格を十分満足し品質管理も十分に行われた高度のものであるといえよう。日本より諸外国へ輸

出される PC 鋼材も増加の一途をたどり、わが国は量質とも世界で一流の PC 鋼材生産国である。しかし、このような優秀な PC 鋼材もその使用に際して適切な取り扱い、施工がなされなければ、その性能を十分発揮できないばかりか、かえって危険なものとなる。すでに述べてきたように、PC 鋼材は RC 用鋼材と比べて格段と高級な鋼材であるから、その優れた品質を発揮させ、保持するための条件も、より厳格を期すべきである。PC 構造でいったん鋼材破壊というような事故を生じた場合の損害も RC の場合より一段と大きくなるのが普通である。

ここでは、PC 鋼材の各種の特性面から見た鋼材使用上の問題点と、それに関連して PC 鋼材としてさらに研究、開発が望まれる事項について述べて見たい。

(1) 強度特性

PC 鋼材は熱に対する感受性が、RC 用鋼材などと比べて高い。例えば、PC 鋼線が高温にさらされた場合、その温度での機械的性質は 図-5 に示すように変化し、引張荷重や降伏荷重の低下が著しい<sup>2)</sup>。また、図-6 に PC 鋼材をガス切断した場合の切断部付近の硬度変化を示す。PC 鋼線、PC 鋼棒とも切断位置から 20 mm 程度まで熱影響をうけており、特に細い鋼線および鋼棒では、端部で硬度が極端に上がっている部分がある。すなわち、端部では一種の焼入状態に、また端部より少し離れたところでは焼戻し状態になるもので、この部分は強度、じん性の面で欠点となる。これと同様の現象が切断部以外でもガスの炎が当たったり、電気スパークや電気溶接などの火花によっても生じる可能性がある。PC 施工指針、仕様書の類では必ずガス切断や溶接などの熱が PC 鋼材に加わるのを禁じてはいるが、施工現場の末端まで徹底していない場合があり注意を要する。

PC 鋼材は常時、その規格降伏点の 80% 近くの引張力で緊張されている。しかも緊張応力は断面内に一様に分布しているという仮定で設計している。もし曲げなどの作用が加わると、鋼材応力はきわめて過酷になることは自明である。はり材の設計では設計モーメントの分布に従って緊張材を曲線状に配置するのが有利な場合が多い。プレテンションでは折線状の配置になる。このような急激に曲げた部分では引張応力、曲げ応力、横方向応力が重なるため、強度上の弱点となりやすい<sup>4)</sup>。例えばプレテンション PC 橋桁の JIS では、曲げ径を PC 鋼材直径の 20 倍以上と規定しているのはこのためである。ポストテンション方式の定着部では、鋼材を曲げてくさび定着する装置があるが、このようなものでは、曲げ部分が必ず耐力上の欠点となっている。ねじ定着の場合では、耐圧板が鋼棒の軸と正確に直角に配置されていないと、その部分で急激な曲げを与えることになり危険であ

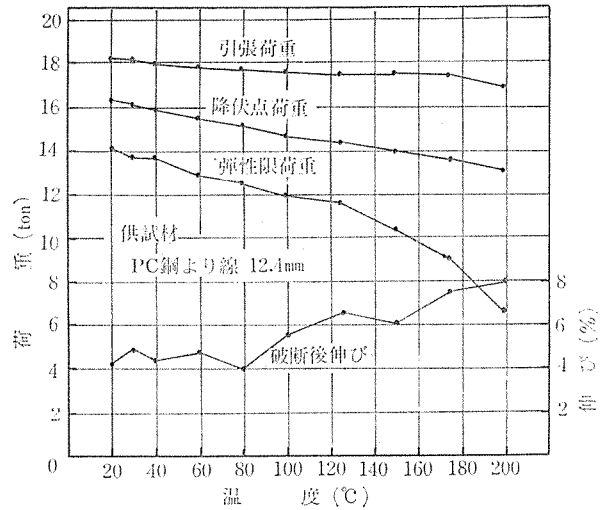


図-5 PC 鋼より線の温度による機械的性質の変化

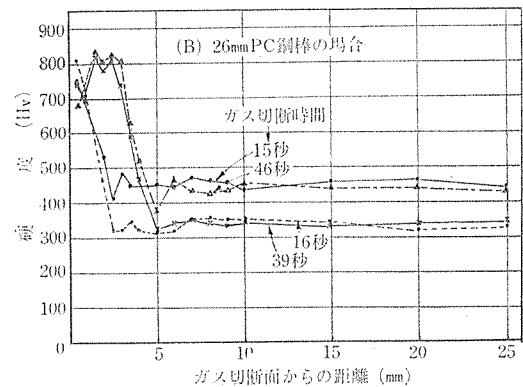
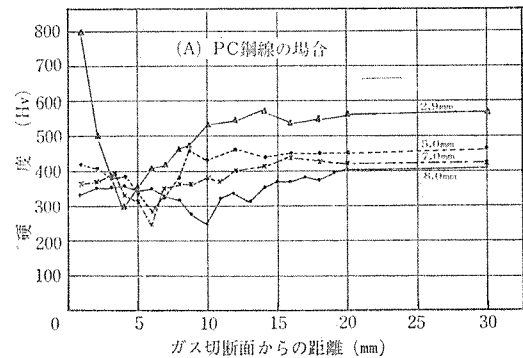
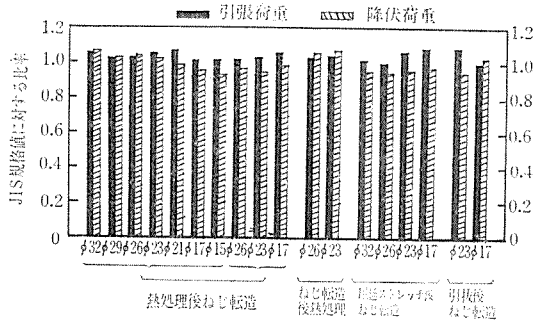


図-6 ガス切断による PC 鋼材の硬度変化

る。このように PC 鋼材が過酷に曲げられる要因に対して、設計施工上の配慮をさらに確実にしなければならない。高強度の鋼材の利用が拡大するに従って、この問題は重要性を増す。

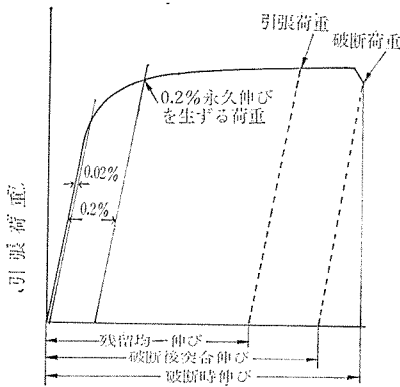
PC 鋼材においては鋼材自体の機械的品質と同時に、端部定着部での品質も重要である。図-7 は PC 鋼棒メーカー各社の製品について製造方法別にねじ部の引張荷重および降伏荷重を JIS の規格値に対する比率で示したものである。もちろん母材部はいずれも規格値を上まわっているもので試験されている。ねじ部で引張荷重の規



図一七 PC鋼棒のねじ部特性 (JIS 規格値に対する比率)

格値を下まわるものはないが、降伏荷重は製法方法によっては規格値を満たさないものが多い。同様の現象はPC鋼線、鋼より線についても定着方法によっては発現する可能性がある。現に広く実用に供されている定着装置でも、実際に試験してみるとPC鋼材の母材強度を100%発揮するとは限らず、見かけ上PC鋼材の規格強度を満足させることによって表面的に逃がっている場合が少なくない。これでは強度的には要求を満たしても、構造物の破壊時に要求される塑性変形能が得られない心配がある。PC鋼材そのものの引張強さや伸びが規格値を満足すべきことは当然であるが、それと同時に鋼材の性能を十分発揮させるような定着装置の改良も必要である。

上にもふれたようにPC部材または構造物の破壊時のじん性は、RC構造と同様に鋼材の塑性変形によってもたらされるといっても過言でない。PC鋼材の破断時伸びは鉄筋に比べると極端には小さくなるが、構造物の破壊時に予想される2~3%ほどの伸びは確保されている。ここに注意を要するのは現行の諸規格で保証している伸びは破断時伸びあるいは破断後の突合せ伸びである点である。この伸びは絞り部の局部変形を含んだものであり、構造物中で期待される塑性伸びは一様な伸びであり、両者では大いに意味合いが異なる。突合せ伸び、破断時伸び、および均一伸びの関係は図一八に示すとおりであり、PC鋼線について三者の測定値を比較した結果は、



図一八 荷重-伸び曲線と各種伸びの関係

表一八 PC鋼線の各種伸び値の関係

線径 (mm)	破断時伸び GL=200 mm	突合せ伸び GL=100 mm	残留均一伸び GL=100 mm
2.9	6.5 %	6.0 %	3.0 %
5.0	7.0 %	6.7 %	3.9 %
7.0	7.5 %	8.0 %	4.4 %
8.0	7.0 %	8.0 %	4.0 %

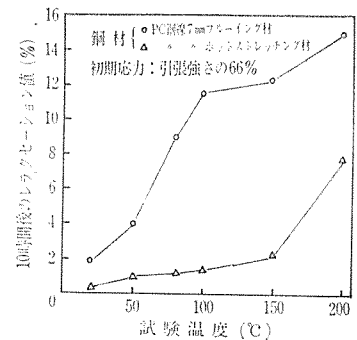
表一八のとおりである。この例でもわかるように、均一伸びは突合せ伸びの50~60%程度であり、規格でいう伸びが構造物の力学的挙動の上から予想される値を上まわるからといって安心できない。高強度鋼材であるほど突合せ伸びの中で均一伸びが占める割合は低下する場合もありうるので、将来のPC鋼材の開発に際しては、この均一伸びの確保に着目しなければなるまい。

(2) レラクセーション特性

PC鋼材のレラクセーション特性はコンクリートの乾燥収縮およびクリープ特性とともにPC部材の強度、寿命を左右する重要な性質である。PC鋼材のレラクセーション特性については種々の面から検討され<sup>5)~6)</sup>、またレラクセーションの生じる機構についても金属学的な立場からの研究が行われている<sup>9)</sup>。

レラクセーション値の小さい鋼材の開発についても研究が進捗し、実用に供されるようになってきている。中でもPC鋼線、PC鋼より線では製造時に緊張力を与えながらブルーイングを施すホットストレッチングによる方法で製造されたスタビライズド鋼材が多く使用されるようになった。図一九に示すようにスタビライズされたPC鋼線のレラクセーション値は、常温で通常のブルーイングを行った鋼線に比べて1/3~1/5と小さく、

また温度が上昇してもレラクセーション値の増加はわずかで、温度が上ると急激にレラクセーション値が増大するブルーイング材と比べて大きな差がある。この種の低レラクセーションPC鋼材は、すでに述べたようにイギリスでは規格化されており、アメリカでも最近規格化されるはずである。



図一九 PC鋼線のレラクセーション値と温度の関係

このようなレラクセーション特性が実用上とくに問題となるのは、プレテンション部材の工場生産において、コンクリート強度の早期発現を得るために蒸気養生やオ

オートクレーブ養生を行う場合である。また原子炉圧力容器のように持続した高温にさらされる構造物でも問題となる。

一般にプレテンション部材の蒸気養生では、PC鋼材がうける温度は60~70°C程度で8時間程度この温度を保持したのち常温にもどされる。この温度履歴によって、PC鋼材のレラクセーションは増大するが、図-10はこのような条件下のレラクセーション値を実測した例であ

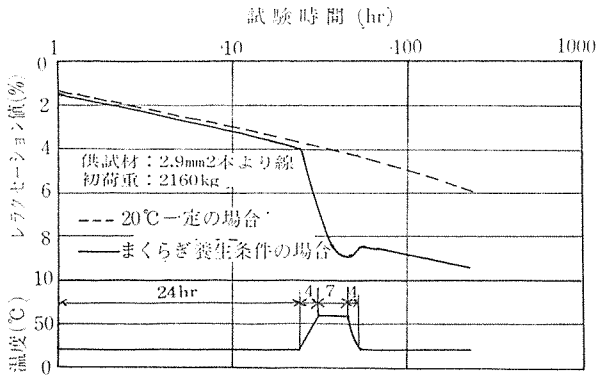


図-10 蒸気養生時のレラクセーション (PCまくらぎ養生条件の場合)

る。図-10 に示されるように20°Cの温度下における値より数%大きくなる。一方、オートクレーブ養生の場合には180~200°Cの高温をうけ、かつ鋼材はプレテンションベッド中と異なって、コンクリートとともに自由に熱膨張、収縮を行うという条件にある。このような条件に基づいてPC鋼材の緊張力の変化を測定した結果の一例を図-11に示す。このような条件ではスタビライズ

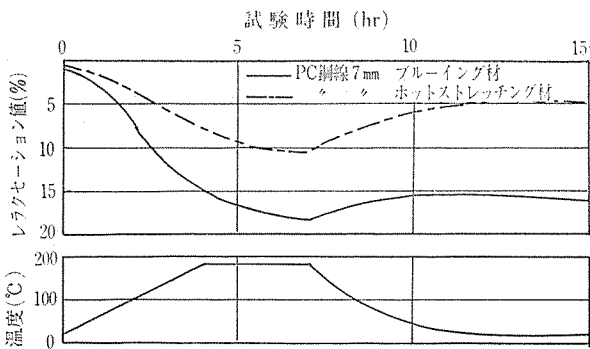


図-11 オートクレーブ養生時のレラクセーション

された鋼材を用いると、きわめて有効であろうことが理解される。

上記の蒸気養生やオートクレーブの場合を例にとると、部材中のPC鋼棒はきわめて複雑な熱履歴と応力推移を受けていることがわかる。すなわち、コンクリートと鋼材の熱容量と熱伝導率の差によって、部材端の裸部分の鋼材とコンクリート中の鋼材では温度上昇下降の速度が異なるし、コンクリート自体と鋼材とでも異なる。

したがって、実際にはコンクリートと鋼材との間に熱応力のやりとりが生じ、極端な場合には、蒸気養生終了時に裸部分の鋼材が先に冷却し、その後生じるコンクリートの温度収縮によって端部の鋼材が破断にいたる場合さえある。このような条件下での鋼材の緊張力の減退を鋼材自身について求められたレラクセーション特性に基づいて推定することは容易ではない。また、もっと一般的な問題として、コンクリートのクリープや乾燥収縮によって緊張力自体が徐々に減退する、いわば変動拘束下での見かけのレラクセーションを鋼材で求めた純レラクセーションから求めるといった基本的な問題がある。この問題に対して猪股は、近似計算によって見かけのレラクセーション値は純レラクセーション値の78.7%とかなり小さくなることを指摘しており<sup>10)</sup>、Armco SteelのR.J. Glodowskiも、長期のプレストレス損失を計算するにあたり全期間をレラクセーション、クリープ、乾燥収縮の量が互いに独立して計算できる程度の短時間区分に分割して段階的に計算する方法を発表している<sup>11)</sup>。またその結果から、プレストレス損失を考える場合には鋼材の純レラクセーションとコンクリートのクリープ特性を密接に結びつけて考える必要があることを指摘している。このようにPC鋼材のレラクセーション特性だけでなく、コンクリートの特性と結びつけた研究が今後ますます重要である。

(3) 疲労特性

PC鋼材はコンクリート部材中で長期にわたり種々の変動応力が作用する状態にさらされるものであり、疲労特性も重要な特性の一つである。またPC鋼材の場合、鋼材自体の疲労特性とともに実用上は定着部での耐久限が問題になることが多い。いままでに行われた疲労試験も、定着装置を含めた試験が多いようである。表-9にPC鋼材の疲労試験結果の例を示す。これでもわかるように定着部はその方法のいかんにかかわらず母材部の疲労強度より低い値を示している。すなわち、PC鋼材の疲労強度を向上させることも必要であるが、各種定着具の形状、寸法などの改良により定着部での疲労破断を防ぐことが先決のように思われる。また疲労特性で見逃すことのできないことは、地震時応力を想定した低サイクル疲労に対して鋼材あるいは定着部の性状を把握することであろう。すなわち、地震によってPC部材中の鋼材に、その降伏荷重以上の荷重が繰り返して作用した場合の耐力と変形が問題となる。この場合もPC鋼材自体よりも定着部の性能が重要である。例えば図-7に示したようにPC鋼棒の場合、ねじ部は母材部より降伏強度が低く、低サイクル疲労に対しても欠点となりやすい。しかし残念ながら現在までのところPC鋼材の低サイクル

表-9 PC鋼材の疲労試験結果の例

PC鋼材の種類		定着具の種類	$\sigma_b$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{min}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\Delta\sigma$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\Delta\sigma/\sigma_b$	備考
PC鋼線	5 mm	—	165	104	25	0.151	鉄道技術研究所
デフォームPC鋼線	5 mm	—	165	103	27.8	0.168	"
デフォームPC鋼線	4 mm	—	200	100	28	0.140	F. Leonhardt
PC鋼より線	9 mm	—	180	90	25	0.138	"
PC鋼より線	12.4	ウェッジ式	176	101.7	17.2	0.098	神鋼鋼線工業
"	"	"	190	113	14.5	0.078	鉄道技術研究所
"	"	ローブソケット	190	106	11.5	0.061	関
PCケーブル	5 mm×12本	フレシナー	160	90	13	0.081	F. Leonhardt
"	5.2 mm×31本	圧着スリーブ	160	90	12	0.075	"
"	5.2 mm×12本	レオバ	160	90	14	0.087	"
PC鋼線	7 mm	ボタンヘッド	177	93	10.8	0.061	神鋼鋼線工業
PC鋼棒	26 mm	非対称転造ねじ	122	62.7	11.4	0.093	鉄道技術研究所
"	10 mm	転造ねじ	145.9	80.8	13	0.089	"

注： $\sigma_b$ ；鋼材の引張強さ， $\sigma_{min}$ ；疲労試験下限応力， $\Delta\sigma$ ； $2 \times 10^6$  回耐久応力振幅

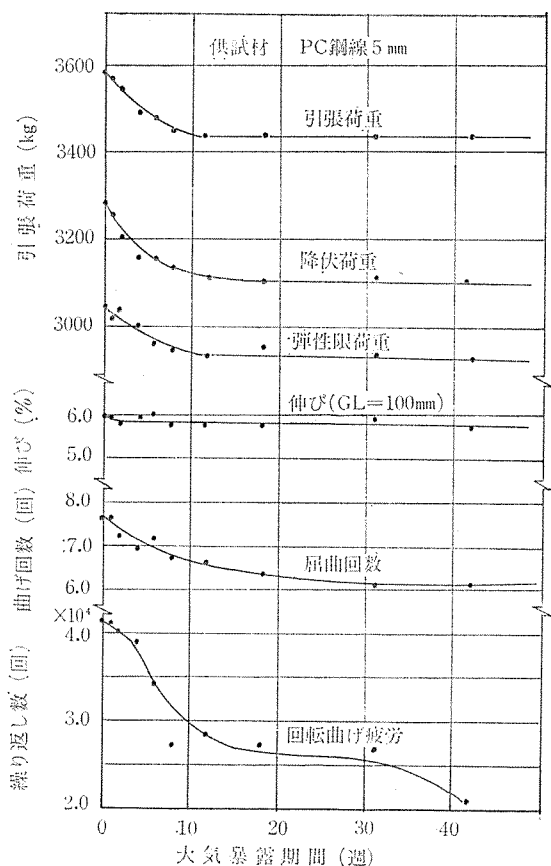
疲労に関する研究はあまりないようであり、今後この種の研究が活発に行われ、実用上有益なデータが蓄積されることが望まれる。

(4) 腐食および応力腐食特性

PC鋼材は特殊なものを除いて鋼材自体は腐食に対しては鉄筋と同様比較的敏感な材料である。しかし鉄筋との使用上の大きな相異点は、PC鋼材はその破断荷重の

70%近くの荷重が負荷されて使用されることで、腐食によりその機械的性質が低下すると耐久性の上で大きな問題になる場合が考えられる。図-12 は直径 5 mm のPC鋼線を屋外に放置し経過時間とともに腐食が進行したときの機械的性質の変化を測定した結果である。プレテンション工法に使用される鋼材でボンド性を向上させるために、あらかじめ適度の錆を発生させて使用することが行われているが、腐食した鋼材を使用することは程度を誤れば耐力上問題があることは明らかである。この面で実際の工事現場でのPC鋼材の取扱いを見ると、その保管や運搬方法などに問題があると同時に、場合によっては相当腐食の進行した鋼材が無神経に使用されていることもあるようである。管理上の観点からして、PC鋼材はいかなる場合も錆の発生しているものの使用を許さないとする立場をとるべきではなかろうか。

一方、PC鋼材が高応力下で使用される特異な鋼材であり、コンクリート中で腐食を防止する十分な方策がとられなければ、応力腐食や水素脆性による破断が生じる可能性があることは従来から周知のことであり、これらについての研究もかなり多い<sup>12)</sup>。特に熱処理で製造されるPC鋼棒が引抜加工により製造されるPC鋼線やPC鋼より線に比べて応力腐食に対する感受性が強い。また高応力の場合や塩化カルシウムが存在する場合などにはPC鋼線でも応力腐食は生じ得るといわれている。これらに対して現在は鋼材を完全にグラウトで被覆保護することによって腐食を防止することが基本的な考え方である。しかしながら、過去のPC鋼材の緊張後の破断事故の中にはグラウトが不完全であったり、場合によってはモルタルの注入忘れがあつて、事故につながつた例もあるようである。またPCパイプのように外周にモルタル



(大気暴露期間と各種特性値の関係)  
図-12 PC鋼線の腐食による各種特性の変化



を吹き付けて、巻き付けられたPC鋼線を保護しようとするものはモルタル自体のひびわれにより水その他の浸入が生じ、鋼線の応力腐食につながる可能性は十分に考えられる。PCグラウトについては本シリーズで以前にとり上げられ、将来の方向としてグラウトをできるだけ廃し、アンボンド工法などを採用していくべきことが述べられている<sup>13)</sup>。特に今後構造物が大型化したり、PC道路舗装のように長スパンの施工を要するものが増加すること、あるいは海洋構造物などにPCが取り入れられる傾向にあることを考えれば、グラウトによる鋼材の保護には施工上および管理上おのずと限界があると思われる。これに対してPC鋼材としてはめっきを施したもの、あるいはアスファルトやグリースを塗布したアンボンド用鋼材などの研究開発が盛んになるであろう。特にアンボンド工法はアメリカを中心に外国ではすでにかなり普及しており、日本でも次第に利用されるようになって考えられ、それに対する鋼材の研究、特にアスファルトやグリースの防食効果については、十分な検討が必要である。また、それらの防食材料として広く一般的に使用できる材料が利用できるようにすることもこの種の新しいものの普及には重要なことである。

#### 4. PC鋼材についての今後の課題

前節で述べた問題点に基づいてPC鋼材の研究上、利用上の今後の課題についてまとめてみる。

##### (1) 高強度化

高強度化をはかるほど、応力腐食に対する解決をせまられる。現時点では、現在得られている強度レベルの性能を各種環境下で100%維持できるための条件の確立が望まれる。すなわち、JIS規格品のように、規格品を市場に出せば、その後はどのような方面に、どのように応用されるかは関知しないという流儀では不可であって、ユーザーと密接にコンタクトして、その使用方法を見とどけるシステムの開発があって、はじめてさらに高強度化へと進展しよう。

##### (2) 太径化

鋼棒の太径化は取扱い、施工上の制約から限度があるろう。太径化の傾向は、多層より線ケーブル形式の方向に向けられよう。この場合、定着法の多角的な開発が必要である。

##### (3) 定着装置

PC構造の歴史の大きな一面は定着装置の開発の歴史であるといえる。現在開発されているものは完全とはいええず、鋼材の性能を100%発揮させる定着法の改善が望まれる。また定着部に生じる応力状態によって適当な定着法を選定することが重要である。

##### (4) レラクセーション特性

ホットストレッチの発達によって大きく改善されたが材質を調質して低リラクセーション化する方法の開発が望まれる。短時間のリラクセーション特性から長期間後のそれを推定する方法を確立する必要がある。また構造物中での見かけのリラクセーション値との関係づけも課題の一つである。

##### (5) 応力腐食

応力腐食のメカニズムの解明が待たれる。また、応力腐食を生じさせない鋼材の保護法の開発が急務であり、セメントペーストによる完全なグラウトを期待するより他の方策を実用化するのが良策と思われる。

##### (6) 低温下での品質

低温貯蔵容器などへの応用を広げるため、低温下での性状を明確にする必要がある<sup>3)</sup>。低温から常温へと温度サイクルをうける場合についても検討を要する。低温時の特性のすぐれた鋼材の開発が要求されるようになりうる。

##### (7) 特殊用途のためのPC鋼材

磁性化しないことを要求される場合のステンレスPC鋼材などの特殊な用途にのみ用いるPC鋼材の開発がますます要求されよう。弾性係数をコントロールできるような緊張材が出現すれば、有効に使用されよう。この場合は、特殊な合金鋼や複合材の分野など広範囲の研究成果を必要としよう。

〔謝辞〕 本稿の作成に当っては、鈴木計夫氏(阪大)、坂村泉氏(住友電工)、山崎隆雄氏(高岡波熱練)、田中義人氏(神鋼鋼線)、倉内実氏(同)の各氏、特に田中、倉内両氏に多大な助力を得た。付記して感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 山崎隆雄：プレストレスト コンクリート，13-5，(1971)
- 2) 藤田亀太郎・吉野政次・武尾敬之助：プレストレスト コンクリート，7-6 (1965)
- 3) 富岡敬之・田中義人・松原光治：プレストレスト コンクリート技術協会第8回研究発表会講演概要
- 4) 坂村 泉：プレストレスト コンクリート，13-4，(1971)
- 5) V.W. Papsdorf, F. Schwier : Stahl und Eisen, 78-4 (1958)
- 6) 平 修二・鈴木房幸 : Proc. 5th Japan Cong. Test Mat. 65 (1962)
- 7) W.O. Everling : World Conference on Prestressed Concrete, S.F. (1957)
- 8) W. Podolny, T. Mellville : PCI Journal, 14-4 (1969)
- 9) 富岡敬之・倉内 実 : 材料, 22-232 (1973)
- 10) 猪股俊司 : プレストレスト コンクリート, 14-3 (1972)
- 11) R.J. Glodowski, J.J. Lorenzetti : PCI Journal 17-2 (1972)
- 12) I. Cornet, T. Ishikawa, B. Bresler : Material Protection 7-3 (1968)
- 13) 樋口芳郎 : プレストレスト コンクリート, 15-1 (1973)

1974.1.19・受付