

スタビライズド PC 鋼線の諸特性について

土 井 明*
富 岡 敬 之*
田 中 義 人*

1. はじめに

今日の PC 鋼線はほとんどブルーイング処理された鋼線であり、強度、靱性、レラクセーションなどの諸特性においてプレストレス用鋼材として十分な性能を有していることは衆知のことである。しかし、PC 鋼線の諸性質の改良は今もなお進められており、高強度、強靱性および低レラクセーションを目標として、さらに高品質の鋼線を大量に、しかも安価に作る努力がなされている。

PC の実用化が進み、その応用分野が拡大されるにつれて、PC 鋼線に対する要求事項も多岐にわたるようになってきた。特に、PC 部材の高温養生の普及および PC による原子炉圧力容器 (PCPV) および原子炉格納容器 (コンティメント) が実用化されるに至って、高温下でのレラクセーションあるいは数十年後のレラクセーションを保証することが必要となってきて、従来十分満足して使用されてきたブルーイングした PC 鋼線よりさらに高級な鋼材の要望が生じてきている。

このような要請に応じて PC 鋼線のレラクセーションをより少なくするためのいくつかの試みがなされている。その一つは鋼材の成分による方法であって、炭素鋼に Cr, Mn あるいは Si などの合金元素を加える方法^{1), 2), 3)}とか、炭素鋼中の微量ガス (例えば N₂) による方法^{4), 5), 6)} などであるが、いずれも鋼の加工性を悪くする傾向があり、またその効果もまだ十分なものではない。

これに対して、加工面からのアプローチがある。この方法で最も実績をあげているものは、ホットストレッチという処理である^{4), 5), 6)}

* 神鋼鋼線鋼索株式会社

⁷⁾⁻¹³⁾。この処理を工業的にこなう方法を、イギリスの GKN サマーセット社が開発し、スタビライジングと呼んでいる。この サマーセット プロセスは鋼線メーカーのみならず、PC の設計者や施工者からも注目され、各国に技術導入されている。日本では、筆者らの会社がサマーセット社と技術提携し、スタビライズド PC 鋼材 (鋼線およびより線) を製造しているので、ここにその諸性質について紹介する。

2. スタビライズド PC 鋼線の種類と機械的性質

スタビライジングとは、ストレスリービング (応力除去) の一つの方法であり、その目的と効果よりみてブルーイングの改良された方法といえる。スタビライズド PC 鋼材は、JIS G 3536 の「プレストレストコンクリート用 PC 鋼線および鋼より線」と同じく、ピアノ線材を用い、これにパテンティングを施したのち常温で伸線し、単線ではそのまま、また、より線の場合にはより線加工を行なったのち、最終の工程において残留ひずみを

表-1 イギリスの PC 鋼線規格 (BS 2691-1969)

グレード	公称径 (mm)	規格特性強さ ¹⁾		0.2% 降伏点 ²⁾ (min)		繰返し曲げ		1000 時間後のレラクセーション値 % (max)	
		MN/m ² ³⁾	kg/mm ²	MN/m ² ³⁾	kg/mm ²	回数 (min)	半径 (mm)	70%の 初応力	80%の 初応力
普通 レラク セーシ ョン	7	1470	(150)	1250	128	3	20	5	8.5
	7	1570	(160)	1330	136	3	20	5	8.5
	5	1570	(160)	1330	136	3	15	5	8.5
	5	1720	(175)	1460	149	3	15	5	8.5
	4	1720	(175)	1460	149	3	12.5	5	8.5
低レラ クセー シ ョン	7	1470	(150)	1320	135	3	20	2	3
	7	1570	(160)	1410	144	3	20	2	3
	5	1570	(160)	1410	144	3	15	2	3
	5	1720	(175)	1550	157	3	15	2	3
	4	1720	(175)	1550	157	3	12.5	2	3

- 注: 1) 引張強さは、規格特性強さより 5% 下まわってはならず、また、いずれも 230 MN/m² (25 kg/mm²) を上まわってはならない。
2) 規格特性強さに対する 0.2% 降伏点の割合は、普通レラクセーション級で 85%、低レラクセーション鋼で 90% に相当する。
3) 1 MN/m²=0.102 kg/mm²
4) レラクセーション試験の初応力は、規格特性強さの 70% または 80% とする。

表-2 スタビライズド P C 鋼材の試験結果例

種 類	直径 (mm)	断面積 (mm ²)	引張荷重		降 伏 点 ¹⁾		伸び ²⁾ (%)	レラクセーション(%)		直線性 ³⁾ (mm/2 m)
			kg	kg/mm ²	kg	kg/mm ²		20°C ³⁾	80°C ³⁾	
単 線	5.0	19.6	3 510	179	3 280	167	6.5	0.41	1.42	16
	7.0	38.5	6 740	175	5 980	155	8.6	0.51	1.07	20
	8.0	50.3	8 400	167	7 310	146	7.5	0.33	1.44	18
	9.0	63.6	9 740	153	8 320	131	7.8	0.55	1.79	14
2 本 よ り	2.9×2	13.2	2 750	208	2 650	201	5.2	0.41	1.57	8
3 本 よ り	2.9×3	19.8	4 200	212	3 900	197	5.5	0.35	1.65	7
7本より普通強度	9.3	51.6	9 750	189	9 050	175	6.7	0.42	1.55	10
	10.8	70.3	13 400	190	12 200	173	7.0	0.51	1.72	10
	12.4	92.3	17 500	189	16 200	175	6.8	0.54	1.93	20
	15.2	139.0	25 500	184	23 450	169	7.5	0.37	1.37	37
7本より高強度	9.5	54.8	10 900	199	9 910	181	6.9	0.38	1.20	5
	11.1	74.2	14 700	198	13 600	183	6.8	0.30	1.15	12
	12.7	98.7	19 500	198	18 200	185	7.3	0.42	1.51	14
	15.2	139.0	27 200	195	25 300	182	7.4	0.55	1.73	25
19 本 よ り	17.8	208.4	40 200	193	36 400	175	6.5	0.21	1.15	40

注: 1) 0.2% 永久伸びに対する荷重

2) 単線の伸びは標点距離 100 mm の突合せ伸び, 2本より線および3本より線は標点距離 200 mm, より線は 600 mm の破断時伸びである。

3) 試験温度

4) 試験片の弦の長さ 2 m に対する弧の高さ

除去するために鋼材を緊張しながらブルーイングの温度に加熱—ホットストレッチ—して作る。このホットストレッチング, すなわちスタビライジングによって, P C 鋼材は真直ぐになり, 引張特性は安定し, レラクセーションは非常に小さくなる。

スタビライジングは現在作られているブルーイングした P C 鋼材のどれにでも施すことができるので, レラクセーション値を除いては, 特にスタビライズド P C 鋼材の規格を作る必要はなく, JIS G 3536 (改定案)や, ASTM A-421, A-416 などのブルーイングした P C 鋼材に対する規格をそのまま適用することができる。しかし, イギリスでは, P C 鋼線の規格が 1969 年 9 月に改正されて¹⁴⁾, 表-1 に示すように, normal relaxation wire と low relaxation wire とに区分された。すなわち, normal relaxation wire とは, 従来のブルーイングした P C 鋼線に相当するもので, 1000 時間後のレラクセーション値が, 規格特性強さの 70% に相当する初応力に対して, 5% 以下または 80% に相当する初応力に対して 8.5% 以下のものであるに対し, low relaxation wire とは, スタビライズド P C 鋼線に相当するもので, 1000 時間後のレラクセーション値が 70% および 80% の初応力に対して, それぞれ 2% および 3% 以下のものである。

日常製造しているスタビライズド P C 鋼材から任意に抜き取って試験した結果の一例を示すと, 表-2 のとおりである。図-1 および 図-2 に 7 mm P C 鋼線および 12.4 mm P C 鋼より線の荷重—伸び曲線を示す。こ

図-1 7.0 mm P C 鋼線の荷重—伸び曲線

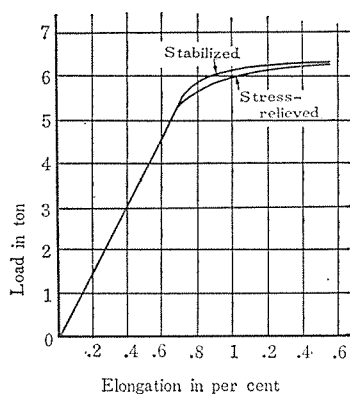
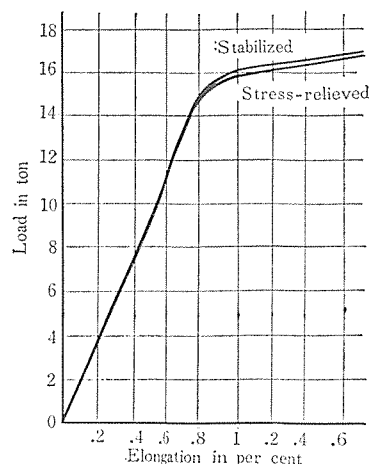


図-2 12.4 mm P C 鋼より線の荷重—伸び曲線



これらのデータからわかるように, スタビライズド P C 鋼材は, ブルーイングした P C 鋼材に比べて静的試験においては, 弾性限がやや高いことを除けば, 大きな差は認められないが, レラクセーション値は非常に小さく大きな差を示している。

3. レラクセーション特性

(1) 10 時間後のレラクセーション値

ブルーイングした P C 鋼材の品質検査として JIS G 3536 に規定されている 10 時間レラクセーション試験は過去十数年にわたって行なわれてきた。図-3(右) はブルーイングした P C 鋼線および鋼より線のレラクセーション値の分布を示すヒストグラムであるが, 平均値 \bar{X} = 1.53%, 標準偏差 σ = 0.43% である。これに対し, スタビライズド P C 鋼材についても過去 3 年にわたって, 多数の測定を行なってきた。図-3(左) はスタビライズド

PC鋼線および鋼より線の10時間後のレラクゼーション値のヒストグラムである。平均値 $\bar{X}=0.43\%$ 、標準偏差 $\sigma=0.15\%$ である。

すなわち、常温における10時間後のレラクゼーションの平均値を比較すると、スタビライズドPC鋼材はブルーイングしたPC鋼材の約1/3であって、ばらつき幅も狭く、安定していることがわかる。

(2) 高温レラクゼーション

レラクゼーション試験機に加熱炉を取付けて高温におけるPC鋼材のレラクゼーション挙動を調べた。図-4にそのグラフを示す。ブルーイングしたPC鋼線は、10時間後20, 40, 60および80°Cにおいてそれぞれ1.5, 3.1, 5.5および8.9%であるが、スタビライズドPC鋼材ではそれぞれ0.4, 0.6, 1.0および1.2%であり前者の1/4~1/5の値である。また1000時間後の値についても、20, 40, 60および80°Cの温度において、ブルーイングしたPC鋼材はそれぞれ3.8, 7.0, 13.0および15.1%であるのに対し、スタビライズドPC鋼材はそれぞれ0.8, 1.2, 1.5および2.5%であって、前者に比べて、レラクゼーションはやはり1/5程度である。各温度においてレラクゼーション曲線の傾き、すな

図-3 10時間後のレラクゼーション値のヒストグラム

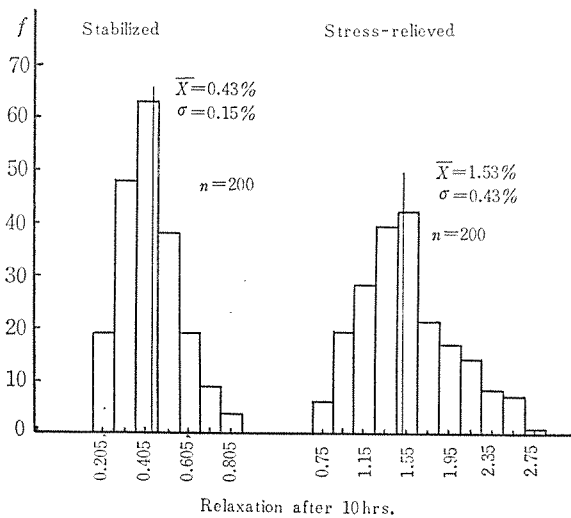
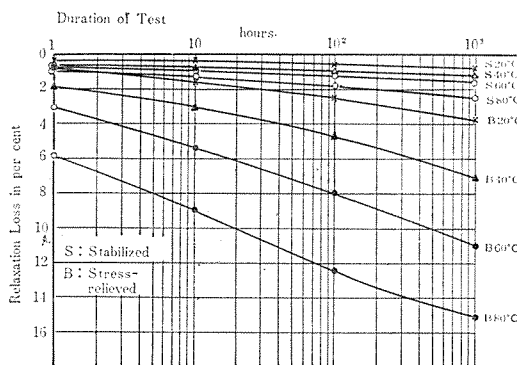


図-4 PC鋼線の高温・長時間レラクゼーション曲線



わち、レクラゼーション速度もスタビライズドPC鋼材の方がブルーイングした鋼材よりはるかに小さく、特に高温では、さらに長時間後には両者の差がますます大きくなり、スタビライズドPC鋼材が非常に有利なることを示しているといえる。

たとえば、PC部材にオートクレーブ処理を行なう場合にはプレストレスを導入し、その後約200°Cに昇温し、その温度を5~6時間維持するといわれる。こうした加熱・冷却による膨張・収縮を繰返すコンクリート中のPC鋼材のレラクゼーション挙動は非常に複雑であって、正確には測定できないが、7mmのPC鋼線について、このような熱サイクルだけを近似的に再現させてレラクゼーション試験をすると、図-5のようになる。すなわち、こうした実験室的な熱サイクルを受けることによって失われる鋼線の応力は、ブルーイングしたPC鋼線で約15.5%であったが、スタビライズドPC鋼線で6%程度であった。

(3) 初応力の影響

PC鋼材に与える初応力を大きくすると、レラクゼーション値は大きくなるのが普通である¹⁵⁾。図-6は初応力を規格引張強さの70および80%として試験した7mm PC鋼線のレラクゼーション曲線である。ブルーイングした鋼線はこの2つの初応力に対して1000時間で

図-5 7mm PC鋼線の高温レラクゼーション曲線

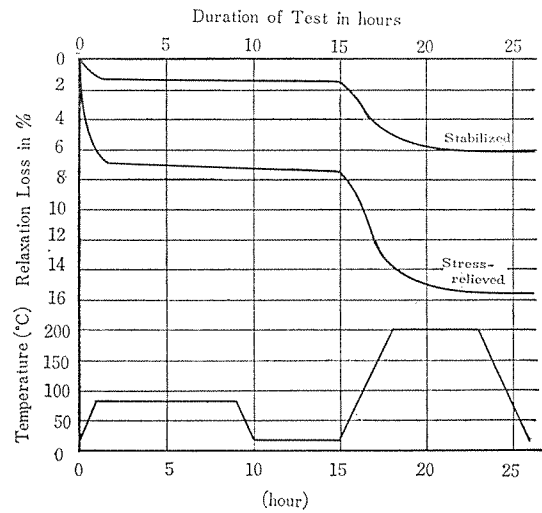
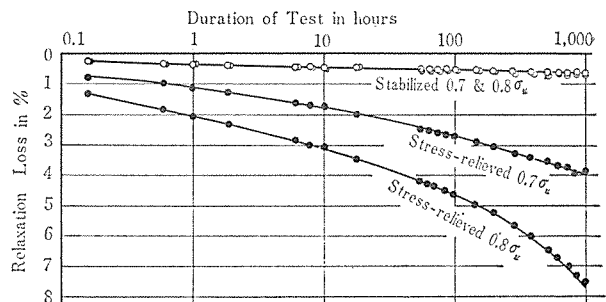


図-6 7mm PC鋼線の長時間レラクゼーション試験結果



それぞれ 3.8 および 7.5% であって、わずかな初応力に対してレラクセーションは約 2 倍になっているが、スタビライジングした鋼線はそれぞれ 0.60 および 0.65% であって、初応力が多少大きくなっても、レラクセーションにはほとんど影響を及ぼさないことを示している。

4. その他の特性

(1) 靱 性

PC 鋼材の引張試験における伸びは、PC 構造物の終局破壊時の安定性を確保するために必要な特性であるばかりでなく、PC 鋼材のねばさを示す指標でもある。図-7 は 7 mm PC 鋼線の破断後突合せ伸び (標点距離 100 mm) および 12.4 mm PC 鋼より線の破断時伸び (標点距離 610 mm) の統計値を示すヒストグラムであるが、スタビライジングしたものの伸びはブルーイングしたものと同等である。絞りにも差はなく、例えば 7 mm PC 鋼棒では両者とも 45% 程度であった。

図-7 PC 鋼線および PC 鋼より線の伸びのヒストグラム

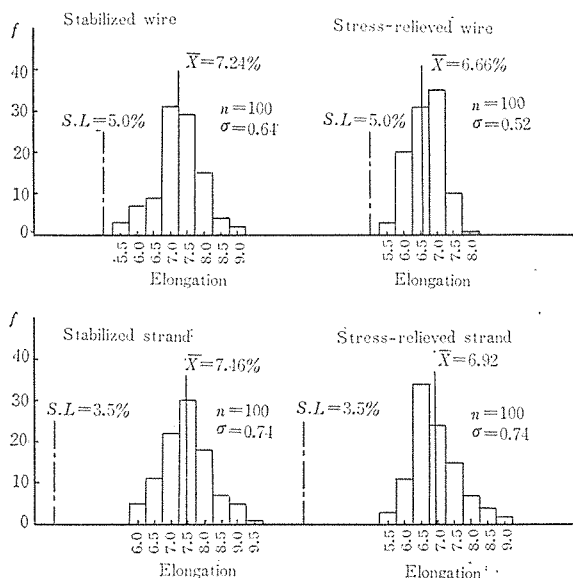


表-3 は PC 鋼線の硬度の測定結果の 1 例である。ブルーイングおよびスタビライジングした 7 mm の PC 鋼線をその中心軸を通る面についての縦断面および軸に垂直な面についての横断面について研磨した各 6 個の試料につき、マイクロビッカース硬度計で測定した。測定点は各試料の表面より 0.01 mm の所で 6 点、中心部で 6 点とした。縦断面、横断面とも硬度のばらつきはあるが、ブルーイングしたものとスタビライジングしたものとの間には、有意差は認められず、両者同等の硬さである。

PC 鋼線の加工性は破断後の突合せ伸び、破断部の絞り、あるいは繰返し曲げ回数などの代用特性でもある程

表-3 PC 鋼線の硬度測定結果例 (マイクロビッカース)

		縦断面		横断面		
測定点						
試料	表面部	ブルーイング	スタビライジング	ブルーイング	スタビライジング	
	中心部	ブルーイング	スタビライジング	ブルーイング	スタビライジング	
硬度		\bar{X}	441	431.2	435.1	444.2
		σ	9.9	14.7	13.3	10.1
		\bar{X}	439	439	440	442
		σ	14.5	12.4	11.8	13.0

度判断できるが、さらに実用的な方法は実際に行なわれるヘッディングやクリンピング加工を行なうことと思われる。筆者らは、ブルーイングした PC 鋼線およびスタビライズド PC 鋼線について今日までに数万本にのぼるヘッディング加工を行ってきたが、1つの異常もなく、きれいな頭を作ることができ、引張効率も十分出ており何ら不都合な点は見出してない。

図-8 ヘッディングの形状

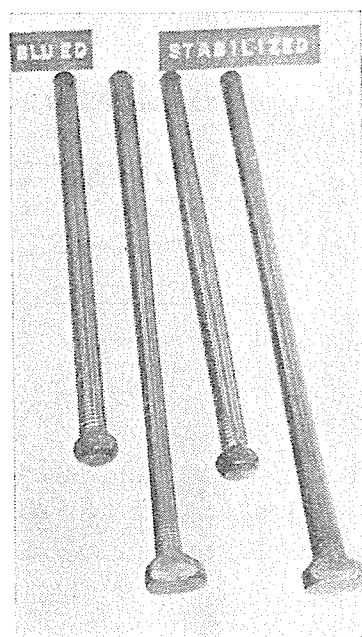


図-8 はヘッディングの形状の例を示す。また、8 mm のスタビライズド PC 鋼線についてクリンピング加工を行なったが、ブルーイングしたものと同等以上の成績であった。

(2) 疲労特性

PC 鋼材が、PC 部材中で受ける変動応力は部分片振り、すなわち、ある引張応力を中心に数 kg/mm² の応力が変動するものであるが、PC 鋼材の繰返し引張疲労試験はチャックがむずかしく、真の疲労強度は出しにくい。

回転曲げ疲労試験では、試験片の受ける応力状態は繰返し引張疲労試験の場合とは異なるが、これは疲労強度の比較には有効な方法と考えられる。図-9 はヘイ・ロバートソン式の回転曲げ疲労試験機で測定した 7 mm PC 鋼線の S-N 曲線である。200 万回時間疲労強度はブルーイングした PC 鋼線で 36 kg/mm² であり、スタビライズド PC 鋼線で 39 kg/mm² であった。

図-10 はむしろ定着部の疲労試験ともいえるもので

図-9 7.0 mm PC 鋼線の S-N 曲線
(回転曲げ疲労試験結果)

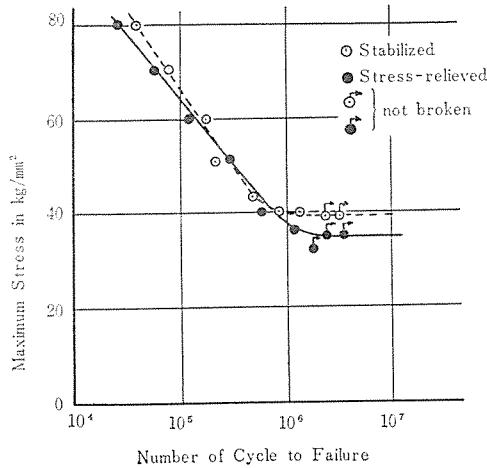
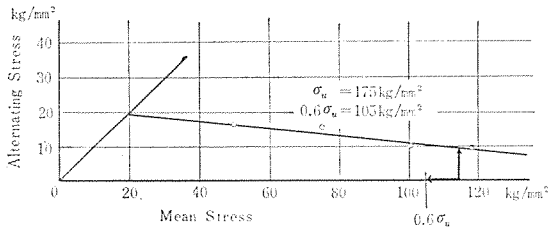


図-10 12.4 mm PC 鋼より線の疲労耐久線図



あるが、ウェッジ式のチャックで 12.4 mm スタビライズド PC 鋼より線をつかんで、ボールドウィン疲労試験機で測定した S-N 曲線をもとに描いた疲労耐久線図である。横軸はより線に与えた平均応力を示し、縦軸は振幅応力を示している。この図は、チャックでつかんだ場合でも、114 kg/mm² を平均応力として ±9 kg/mm² の振幅あるいは最低応力を規格引張強さの 60% (103 kg/mm²) として +18 kg/mm² の変動応力を与えても耐えうることを示している。

(4) 腐 食

スタビライズド PC 鋼材は、化学処理や特殊な熱処理によらないブルーイングした PC 鋼材とまったく同じ素材から同じ方法で作られるので、その耐腐食性もまったく同一と考えられたが、念のため、次の条件で比較試験を行なった。

- 1) PC 鋼材倉庫内
- 2) 工場地帯屋外
- 3) 恒温恒湿槽内
- 4) 露点サイクル槽内
- 5) 塩水噴霧槽内

しかし、いずれの環境でも時々刻々の表面の変化には両者に差はまったく認められなかった。

次に、応力腐食に対する感受性については、100°C の 20 wt% NH₄NO₃ 水溶液中に浸漬して、引張強さの 50% の応力でブルーイングした PC 鋼線とスタビライズ

ド PC 鋼線とを試験したが、1000 時間経過後も破断せず、両者とも応力腐食にはきわめて鈍感であることを確認した¹⁶⁾。なお、このような条件では、熱処理で強度を上げたオイルテンパー線を試験した場合は 5~6 時間で破断する。

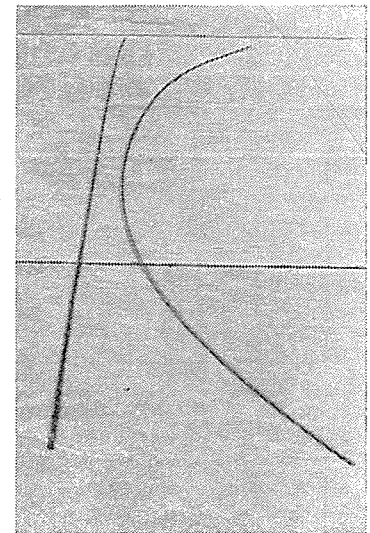
(5) 直線性と型づけ

PC 鋼材は現場における配筋作業を容易にするために真直ぐであることが要求されるので、ブルーイング前に矯正ローラーまたはコマによって直線加工が施される。また、より線はより加工およびブルーイング処理において真直ぐにするのがむずかしく、2 m のカットサンプルで弧の高さが 100~300 mm である。

スタビライズド PC 鋼材は特に直線加工機による矯正は行なわず加熱中に緊張するだけであるが、真直性は非常に良くなり、表面に加工きずなどがつくこともない。図-11 は長さ 10 m の 12.4 mm の PC 鋼より線を並べて置いたものである。右側が通常のブルーイングしたもの、左側がスタビライジングしたものである。スタビライジングしたものは、2 m のカットサンプルの弧の高さは、10~30

図-11 12.4 mm PC 鋼より線の直線性

(左:スタビライジング)
(右:ブルーイング)



mm であり、型付けも良く、クリッパーで切断してもばらけない。特に 19 本より線でもシージングなしでグラインダー カッターで切断しても素線がばらけることはなく、ばらしても、簡単に元の位置にもどすことができる。

5. 考 察

(1) 緊張材としての安定性

スタビライズド PC 鋼材は、レラクセーションが少ないほか、種々の利点をもっている。その第 1 は製造方法であって、ブルーイングした PC 鋼材と同じく、炭素鋼材を冷間引抜きによって強度を高める方法であって、オイルテンパー線のような応力腐食や遅れ破壊に対する心配がない。ことに、スタビライズド PC 鋼材の素材には加工性を悪くする合金元素や微量ガスをできる限り少なくした炭素鋼を使って、低レラクセーションが得られる

ので、製造時の加工性、あるいは破断時の伸びなども良好である。

第2にスタビライジングのとき、高温においてPC鋼材の全長にわたってその破断近くまで均一な応力がかけられることは、PC鋼材全長にわたる引張試験を行なうのと同じ結果となり、全長にわたる保証ができる。このことは緊張作業の安全性確保の上で意義がある。

第3にスタビライジング処理の結果として、PC鋼材の荷重—伸び特性が安定化するので、プレストレス導入時に緊張力と伸びの関係が安定し、プレストレスの管理が容易に行なわれることも利点である。

第4は直線性が良好なことおよび、より線のばらげがないことであって、これは配筋作業上大いに有益であると考えられる。

このように、スタビライズドPC鋼材は安定した特性を示し、PC緊張材として最も有望な材料といえるであろう。

(2) レラクセーションについて

前に示した 図—4 および その他の試験データから、試験温度とレラクセーション値の関係をまとめると、図—12 のようになる。すなわち、ブルーイングしたPC鋼線のレラクセーションは、温度に対して非常に敏感であり、約 100°C までは温度に比例してレラクセーションが大きくなっている。一方、スタビライズドPC鋼線のレラクセーションは常温～150°C までは温度上昇とともに多少増加しているが、その増加率は非常に小さく、温度に対して鈍感であると同時に、ブルーイングしたPC鋼線に比べてレラクセーションが著しく小さいことがわかる。

レラクセーションは微視的な塑性ひずみにより生じると考えられ、したがって、レラクセーションを小さくするには微視的な塑性ひずみを小さくすればよい。換言すれば塑性ひずみの原因となる可動転位数を少なくすると

同時に転位の移動距離を小さくすればレラクセーションは小さくなるといえる。ブルーイング処理は静的ひずみ時効 (static strain ageing) であるので、加工後の既存の転位へ炭素および窒素原子が偏析してこれを固着し可動転位数が減少すると同時に、微細析出した炭化物により転位の移動距離が小さくなるが、一方、スタビライジング処理は高応力のかかった動的ひずみ時効 (dynamic strain ageing) であり、この処理中に転位の移動、増殖と炭素および窒素原子および析出物による固着作用が同時におこるため、かなりの高応力まで転位分布が非常に安定化していると考えられる。すなわち、スタビライジング処理によりブルーイング処理以上に可動転位が減少し、転位の移動距離も小さくなるために、微視的塑性ひずみが小さくなり、したがって、レラクセーションが小さくになると考えられる。

次に、長時間のレラクセーションについて考察する。PC構造物の設計においては、初期に与えられたプレストレスがその構造物の寿命中にどれほどになるかを把握しなければならないが、これはPC鋼材自体のレラクセーション、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮などが相互に関連し合って進行するので、正確な測定はむずかしい。すなわち、実際のPC部材あるいは構造物中の鋼材のひずみはコンクリートのクリープおよび乾燥収縮にともなって変化しているので、そのレラクセーションは一定ひずみ下で行なわれるレラクセーション試験における挙動とも異なっている¹⁷⁾。

日本では、プレストレス損失のうち、PC鋼線のレラクセーションによるものを導入応力の 5% として設計^{18), 19)}されているが、特に問題となることはないようである。PC鋼材のレラクセーションをさらに正確に求めるためには数十年に及ぶ試験を実施するよりほか方法はないわけであるが、試験機の長期間の信頼性、データの実用性などに疑念があり、長年月の測定は不可能である。そこで、比較的短時間の試験結果から、長時間後のレラクセーション値を推定する方法が二、三提案されている。いずれも一定ひずみ下のレラクセーション値の推定であって、前述のように実際のPC構造物中のPC鋼線のレラクセーション値とは異なるが、一定ひずみ下の値は起こりうる最大値であると解釈すべきである。

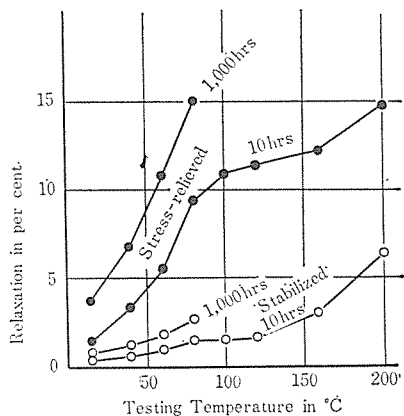
ここでは推定方法のうち Larson-Miller Parameter 法^{20), 21)}について述べる。この方法では Arrhenius の速度論の式から出発する。すなわち、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は

$$\dot{\epsilon} = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \dots\dots\dots (1)$$

とする。

ここで、

図—12 7.0 mm PC 鋼線の高温レラクセーション試験結果



- A : 定数
- Q : 活性化エネルギー
- R : ガス定数
- T : 試験温度 (°K)

また $\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt$ であるから、式(1)を書き直すと、

$$d\epsilon = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) dt \dots\dots\dots(2)$$

両辺積分して

$$\epsilon = A' \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) t \dots\dots\dots(3)$$

となる。レラクセーション試験の場合は一定ひずみであり、 ϵ は定数となる。 $\epsilon = B$ とし、式(3)の両辺を Bt ($\neq 0$) で割ると、

$$\frac{1}{t} = \frac{A'}{B} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \dots\dots\dots(4)$$

両辺対数を取って、 $\log A'/B = C$, $Q/2.3R = P$ とおくと、

$$T(\log t + C) = p \dots\dots\dots(5)$$

の関係が成立する。 C は金属によって異なる値を取る定数とされているが、PC鋼線では $C=20$ とすると、 p とレラクセーション値の対数とが1本の曲線に乗るようである²⁰⁾。

図-4 に示した高温レラクセーション曲線より、各温度について 10, 100 および 1000 時間におけるレラクセーション値を読み、式(5)から算出される p に対してプロットすると、Larson-Miller Parameter Master Curve 図-13 が得られる。この図から、レラクセーションに関する限り、スタビライズドPC鋼材とブルーイングしたPC鋼材とは全く別々の傾向を示すことがわかる。次に、推定の方法であるが、 p の値をいちいち計算する

図-13 LMP マスターカーブ

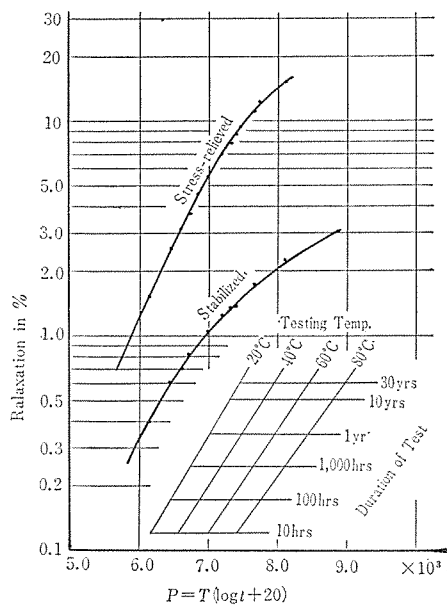


図-14 LMP 法により推定したレラクセーション曲線

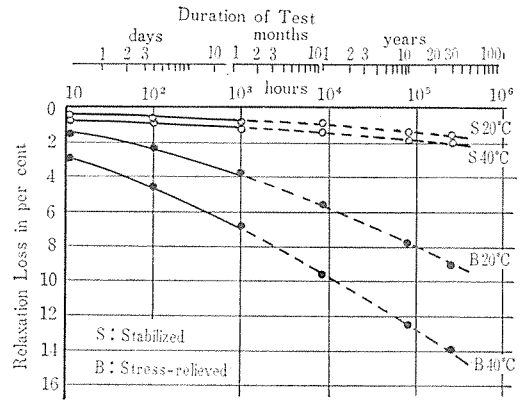


表-4 レラクセーションの測定値および推定値 (%)

試料	ブルーイング		スタビライジング	
	20°C	40°C	20°C	40°C
10 時間の値	1.5	3.1	0.4	0.6
1000 時間の値	3.8	7.0	0.8	1.2
1年後の推定値	5.5	9.6	1.0	1.5
10年後の推定値	7.8	12.4	1.3	1.9
30年後の推定値	9.2	13.8	1.4	2.0

のは面倒であるから、試験温度と試験時間の補助線図を描き、両直線の交点より上に垂線を引くと、曲線との交わる点の縦軸がその条件における推定レラクセーション値となる。図-14 はこのようにして描いた 20°C および 40°C における推定長時間レラクセーション曲線である。表-4 に数値で示すように、20°C および 40°C における 30 年後のレラクセーションはブルーイングした PC 鋼材で 9.2% および 13.8% と推定されるのに対して、スタビライズド PC 鋼材ではそれぞれ 1.4% および 2.0% と推定され、前者の 1/6~1/7 の値である。

(3) 原子炉関係への利用について

一般の PC 構造物の設計においては、各種原因によるプレストレス損失を実際より大き目にとっても、経済性あるいは施工性にそれほど大きい影響は及ぼさないが、1基で数万 m³ のコンクリートと数千 t の PC 鋼材を使用する PCPV や PC コンテイメントでは、例え数% のレラクセーションでも無視できない。これらの構造物はコンクリート断面に比し、PC 鋼材量の割合が大きいので PC 緊張材および定着具の配置に非常に苦心するといわれ^{22), 23)}、PC 鋼材を少なくできればそれだけ設計や施工が容易になり、それに付随して、資材や労力も少なくなると、経済性はいっそう向上することになることは明らかである。

スタビライズド PC 鋼材は弾性限が高く、常温および高温におけるレラクセーションが小さく、また取扱性もすぐれているなど、PC 鋼材としての信頼性が高く評価されるに至り、従来採用されていたブルーイングした P

表—5 原子炉用スタビライズド鋼材の規格例

直 径 (mm)		6.35	7.01	7.01	12.4	15.2	17.8	17.8
構 成		単 線	単 線	単 線	7 本	7 本	19 本	7 本
機 械 的 性 質	断 面 積 mm ²	31.6	38.6	38.6	92.9	138.7	203.4	229.3
	引張荷重 kg	5 340	6 175	6 520	16 330	23 133	37 650	37 800
	” kg/mm ²	168.7	160	168.7	175.7	166.7	185	164.7
	0.2%耐力 kg	—	5 250	—	—	19 650	33 884	—
	” kg/mm ²	—	136	—	—	141.6	166.5	—
	1%耐力 kg	4 280	—	5 200	13 870	—	—	—
	” kg/mm ²	135	—	135	149.4	—	—	—
伸 び (G.L.)	%	4	—	4	3.5	3.5	4 以上	—
	mm	(254)	—	(254)	(610)	(610)	(610)	—
レラクセーション	1000時間後 %	—	2 以下	—	—	2 以下	2 以下	—
	30 年後 %	8 以下	—	8 以下	8 以下	—	—	—
使 用 例 (予定を含む)	① 国 名	① USA	① イギリス	① USA	① USA	① イギリス	① イギリス	① イギリス
	② 炉 名	② Millstone	② Dungeness B	② Ft. St. V.	② Three M.I.	② Wylfa	② Hunterstone	② Hinkley Pt.
	③ 炉タイプ	③ PWR	③ AGR	③ HTGR	③ PWR	③ AGR	③ AGR	③ Hartle Pool
	④ PC使用箇所	④ コンテイメント	④ PCPV	④ PCPV	④ コンテイメント	④ PCPV	④ PCPV	④ PCPV
	⑤ PC工法名	⑤ BBRV	⑤ BBRV	⑤ BBRV	⑤ Stressteel	⑤ プレシノー	⑤ CCL	⑤ CCL
			① USA	① USA				
			② Crystal R	② Rancho S.				
			③ PWR	③ PWR				
			④ コンテイメント	④ コンテイメント				
			⑤ BBRV	⑤ VSL				

C鋼材に代わって、現在計画中の炉を含めて、ほとんどすべてスタビライズドPC鋼材が指定されつつある。

表—5 に原子炉に採用されたスタビライズドPC鋼材の規格の例を示す。これらの規格でPC鋼材の一般的な機械的性質、ブルーイングしたPC鋼材でも十分可能であるが、レラクセーションが1000時間で2%以下、また30年後で8%以下ということはスタビライズドPC鋼材でなければ満足しえないものである。

6. おわりに

スタビライズドPC鋼材について筆者らが行った種々の試験結果について述べ、その特徴について考察を加えてきたが、その特性はあらゆる点において、従来のブルーイングしたPC鋼材と同等またはそれ以上であることが証明できたとする。筆者らが実施しているスタビライジングはイギリスで開発された技術と、以前から独自で開発してきた技術とを最も有効に組合せたユニークな方法であり、均一な品質の製品を工業生産ベースで作ることが特徴である。

筆者らは鋼材メーカーとして、つねにより安全で、より経済的な材料の開発に努めており、PC鋼材の素材より加工に至るまで諸外国とそん色のない技術を有していることを自負するものである。

ブルーイングしたPC鋼材よりさらに進んだスタビライズドPC鋼材が供給できるようになったのを機会に、

これを大いに活用することにより、鉄とのほげしい競争の中にあるプレストレストコンクリートがいっそう優位に立てることを願ってやまない次第である。

参 考 文 献

- 1) 土井, 他: 「1% Mn, 0.5% Cr を添加した炭素鋼線のパテンティングについて」, 鉄と鋼 55 (1969), No. 3, p. 298
- 2) 岡本, 他: 「PC鋼線のレラクセーションに及ぼす Si の影響」, 鉄と鋼 55 (1969), No. 3, p. 296
- 3) Honda, et al.: "Improved Properties of Stress-Relieved Low Alloy Steel Wires", PCI Journal, Vol. 14, April 1969, p. 40
- 4) 土井, 他: 「炭素鋼線のレラクセーションにおよぼす鋼中窒素の影響」, 鉄と鋼 53 (1967), No. 7, p. 915
- 5) Doi, et al.: "The influence of nitrogen on the stress relaxation of high carbon steel wire", Wire and Wire Products, October 1967
- 6) 岡本, 他: 「冷間伸線した高炭素鋼線の再加熱に伴う機械的性質に及ぼす N と Al の影響」, 鉄と鋼 54 (1968), No. 3, p. 329
- 7) T. Cahill: "The effect of the somerset stabilizing process", GKN Research Laboratory, 1962
- 8) T. Cahill: "The development of stabilized wire and strand", Wire and Wire Products, October 1964 p. 1535
- 9) R. Martin: "Improved wire and strand for prestressed concrete", Wire and Wire Products, October 1964, p. 1529
- 10) 土井, 他: 「高炭素鋼線のストレス・レラクセーションにおよぼす鋼中窒素の影響について」, 水曜会誌, Vol. 16, No. 7, p. 444
- 11) 阿部, 他: 「鋼線のレラクセーション値におよぼす 2, 3

報 告

- の要因について」, 鉄と鋼 53 (1967), No. 10, p. 181
- 12) 岡本, 他: 「ピアノ線の応力弛緩と時効に及ぼす 二, 三の要因について」, 鉄と鋼 53 (1967), No. 10, p. 187
- 13) 石黒, 他: 「鋼線のリラクゼーション値におよぼす 伸線後の各処理の影響について」, 鉄と鋼 54 (1968), No. 10, p. 187
- 14) British Standards : BS 2691 | 1969
- 15) F. Leonhardt : "Prestressed Concrete", 1964, p. 33
- 16) 富岡, 他: 「PC鋼線の応力腐食に関する 二, 三の実験結果」, PC技協第8回研究発表講演概要集, 1968, p. 3
- 17) M. Dumas : "Pertes de relaxation dans l'acier de precontrainte", Symposium International sur les Aciers de Précontrainte FIP Madrid 1968, p. 11
- 18) 日本建築学会: 「プレストレスト コンクリート設計施工規準・同解説」1961, p. 100
- 19) 土木学会: 「プレストレスト コンクリート設計施工指針」1961, p. 56
- 20) T. Cahill, et al. : "Long-term relaxation behaviour of stabilized prestressing wires and strand", Conference on PCPV, London 1967, p. 219
- 21) 日本鉄鋼協会: 「鋼の高温強度特性」第11回技術講座, 1967, p. 35
- 22) R. Burrow : "Prestressing tendon systems", Conference on PCPV, London, 1967, p. 251
- 23) F. Kulka, et al. : "American Practices in the design of prestressed concrete containment structures", PCI Journal, June 1968, p. 40

(1970.5.9・受付)

会員名簿についてお願い

先に会員各位にご送付致しました当協会会員名簿の件ですが、記載事項に誤りがございましたならば、お手数でございますが、当協会までご一報頂きたく、今後の名簿作成等の資料に致したく、よろしくお願い申し上げます。

御 寄 稿 の お 願 い

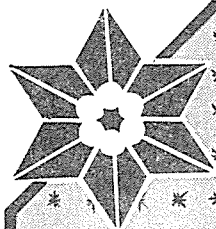
この雑誌は、プレストレストコンクリートのわが国でただ一つの総合技術雑誌です。会員諸兄の技術向上にいささかでも役立つよう日夜苦心して編集に当たっておりますが、多くの問題を広くとりあげるのはこれでなかなか大変なことです。一方的になっても困りますし、とにかく皆様の素直な声をお聞かせ願えませんか。自由に気楽に意見を述べて頂く会員欄、疑問点を相談していただきたい質疑応答欄、工事の状況、施工の苦心点を、現場から速報してほしい工事ニュース欄、口絵写真欄、その他報告、質問など、お気軽にどしどし原稿をお寄せ下さい。また、新設してほしい欄とか、もっと充実してほしい欄、雑誌に対する建設的な御意見なども募ります。少しでも多く皆様の声を反映した親しみやすい雑誌に育て上げたいと念じておりますので御協力願います。以上の原稿、御意見などはすべて下記へお送り下さい。

東京都中央区銀座2の12の4 銀鹿ビル3階

プレストレストコンクリート技術協会 会誌編集委員会宛

TEL (541) 3595

東京製鋼製品



PPC

JIS G 3536

鋼線・鋼より線
BBR工法鋼線
多層鋼より線 (19~127本より)

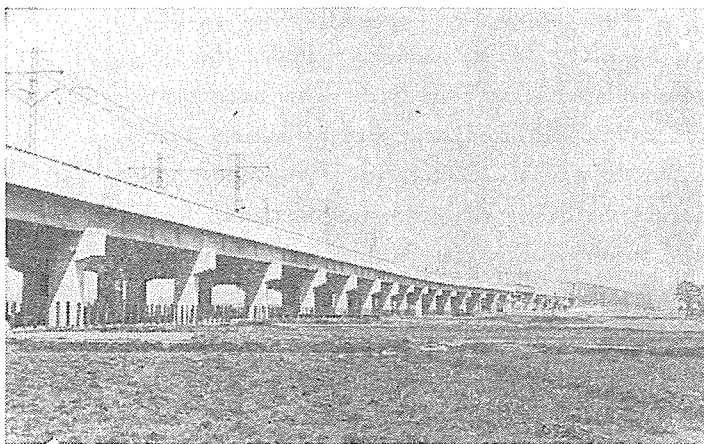
製造元 東京製鋼
発売元

東京都中央区日本橋室町2丁目8番地 古河ビル四階
電話 (211) 2851 (大代表)



鋼弦コンクリート

設計
施工
製造



地下鉄5号線(上妙典工区) 鉄道橋

九州鋼弦コンクリート株式会社

取締役社長 山崎 劔 秋

本社	福岡市天神2丁目12番1号(天神ビル)	TEL 大代表(75)6031
本社営業部	福岡市天神2丁目14番2号(福岡証券ビル)	TEL 代表(74)7963
大阪事務所	大阪市北区芝田町9-7(新梅田ビル)	TEL 代表(372)0384
東京営業所	東京都港区新橋4丁目24番8号(第2東洋海事ビル)	TEL 代表(432)6877
大分出張所	大分市府内町2の3(吉良ビル)	TEL 大分(2)9850
宮崎営業所	宮崎市二葉町1	TEL 宮崎(3)3429
広島出張所	広島市大手町2丁目11番15号(新大手町ビル)	TEL 広島(47)9733
福岡山家工場	福岡県筑紫郡筑紫野町山家	TEL 代表(二日市)2733
大阪大東工場	大阪府大東市新田境町1	TEL 大東(72)1010
工場	夜須・甘木・大村	