

330K (2 300N/mm<sup>2</sup>) 級PC鋼より線の開発落合 征雄\*<sup>1</sup>・小森 英樹\*<sup>2</sup>・萩原 昌明\*<sup>3</sup>・市原 哲也\*<sup>4</sup>

## 1. はじめに

PC鋼より線は、長年 ASTM-A 416 および JIS-G 3536 に規定されたいわゆる 270 K (1860 N/mm<sup>2</sup>) 級が主体である。この材料は一般にピアノ線材である SWRS-75~85 A 種または B 種の線材によりパテニング、伸線、より線およびブルーイング（ホットストレッチ）処理を経て製品化される。しかし、最近ではコンクリートの高強度化に伴い、PC鋼より線の高強度化も要請されるようになり、300 K (2060 N/mm<sup>2</sup>) 級および 330 K (2300 N/mm<sup>2</sup>) 級の試作結果も報告されている<sup>1),2),3)</sup>。

著者らは、これまでに過共析鋼線 (0.85% C 鋼以上) が直径 1 mm 以下の細径鋼線の高強度化に有効であることを報告した<sup>4),5)</sup>。しかし PC鋼より線の素線は直径 1 mm 以上の太径である。すなわち 7 本より線の場合、その素線径は 4.2 mm である。素線径の細径と太径では以下の点で相違がある。①伸線加工による総減面率に制約があり、加工硬化増による高強度化に限界があるので、固溶強化元素を添加する必要がある。②伸線加工後に降伏強度、弾性係数、リラクゼーション特性の向上のため、ブルーイング等を施すことが必要である。このため、ブルーイング後の強度低下が少ない元素として Si を添加する必要がある<sup>1),6),7),8)</sup>。

本報告では 0.98% C に 1.2% Si および 0.2% Cr を添加した過共析鋼により試作した 330 K 級高強度 PC鋼より線 (12.7 mm) の試作結果について報告する。

## 2. 試作方法

## 2.1 線材

PC鋼より線の出発材料として、線材の引張強度および伸び、絞り値は極めて重要である。試作した線材 (以下「試験材」と量産品 (以下「比較材」) の化学成分を

表-1 線材の化学成分 (%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr
試験材	0.98	1.20	0.33	0.010	0.005	0.19
比較材	0.81	0.22	0.74	0.011	0.005	-

表-1 に示す。表-1 の化学成分とした理由を以下に述べる。C は高い方がよいが、高すぎると初析セメントが生成し、伸線加工性を低下させるので 0.98% とした。Si は固溶強化元素として、また、ブルーイング時の軟化抵抗元素として有効であり 1.2% 添加した。1.2% を超えると脱炭層が厚くなる。Cr は強化効果、すなわちパーライトの層状化促進効果とラメラ間隔の微細化効果があるが、高炭素鋼では多量に添加するとパテニングにおいて Cr 偏析部にマイクロマルテンサイト生成と断線が懸念されるので 0.2% とした。Mn は B 種に添加すると偏析し易いので 0.3% と低くした。試作材は新日本製鐵 (株) 君津製鐵所の実生産工程で製造した。すなわち、250 t 転炉で溶製後、連続鋳造法で 300 × 500 mm 角ブルームとしたのち、分塊圧延工程を経て 122 mm 角ビレットとした。線材への加工はビレットを 1 100°C に加熱し、通常の圧延条件で直径 10 および 11 mm 線材に圧延した。線材圧延後、ただちに溶融塩パテニング装置により、直接パテニング処理を行った。溶融塩の組成は 50 mol% NaNO<sub>3</sub>+50 mol% KNO<sub>3</sub> である。

## 2.2 PC鋼より線

線材を希塩酸にて酸洗後、磷酸亜鉛による被膜処理を行い、連続伸線機により、4.22 および 4.35 mm まで伸線加工した。ついで、ストランダーにより公称径 12.7 mm の 7 本より PC鋼より線を製造後、引張強さの約 40% に相当する引張応力を負荷させながらホットストレッチ処理を行った。

\*<sup>1</sup> Ikuro OCHIAI : 鈴木金属工業 (株) 研究部\*<sup>2</sup> Hideki KOMORI : 鈴木金属工業 (株) 研究部\*<sup>3</sup> Masaaki HAGIWARA : 鈴木金属工業 (株) PC エンジニアリング部\*<sup>4</sup> Tetsuya ICHIHARA : 鈴木金属工業 (株) PC エンジニアリング部

### 3. 試作結果および考察

#### 3.1 線材

線材の機械的性質を表-2に示す。試験材の引張強さは比較材に比べ約 300 N/mm<sup>2</sup> 高い。この内訳は C% 差で約 160 N/mm<sup>2</sup>, Si% 差で 110 N/mm<sup>2</sup>, Cr% 差で 50 N/mm<sup>2</sup>, Mn% 差で -20 N/mm<sup>2</sup> と考えられる。伸びおよび絞りは比較材より若干低い。伸線加工により線加工上特に問題となるレベルではない。11 mm 線材の電顕組織を図-1に示す。パーライトの1相組織であり、初析セメントは検出されなかった<sup>4)</sup>。

表-2 線材の機械的性質

	線材直径 (mm)	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	絞り (%)
試験材	10.0	1 570	9.6	38.1
	11.0	1 526	9.7	39.4
比較材	10.5	1 248	11.0	47.5

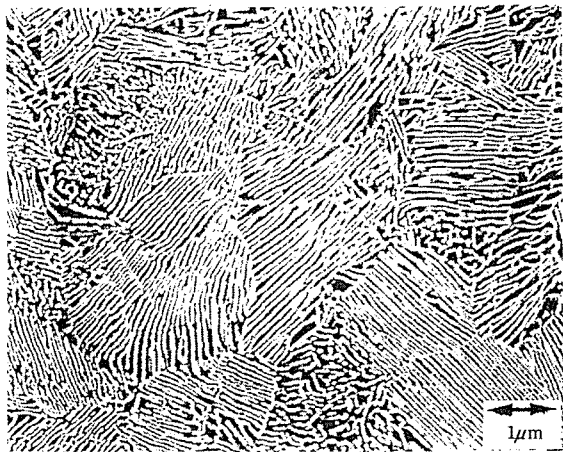


図-1

#### 3.2 伸線後の特性

連続伸線機による伸線後の機械的性質の変化を図-2に示す。試験材と比較材との加工硬化率はほぼ同等である。これは、総減面率が 11 mm から 4.22 mm でも 85.3% ( $\epsilon=1.92$ ) と低いため、ちなみに過共析鋼のラメラ間隔微細化効果が加工硬化率に明瞭に現れるのは  $\epsilon \geq 2$  の高減面率領域である。試験材の絞りは線材では比較材より若干低いものの伸線後はほぼ同等であり、4.22 mm の伸線完了品で行った自径 (1 d) 巻きつけ試験でも表面クラックの発生や折損はなく、より線加工には十分耐えられることを確認した。

#### 3.3 ブルーイング特性

伸線完了品 4.22 mm について 250~500℃ の各温度で 10 分間のブルーイング (熱風) 処理を施した。図-3に機械的性質を示す。試験材は比較材に比べ軟化抵抗性が高く Si の軟化抵抗性が認められる。伸びの回復温度

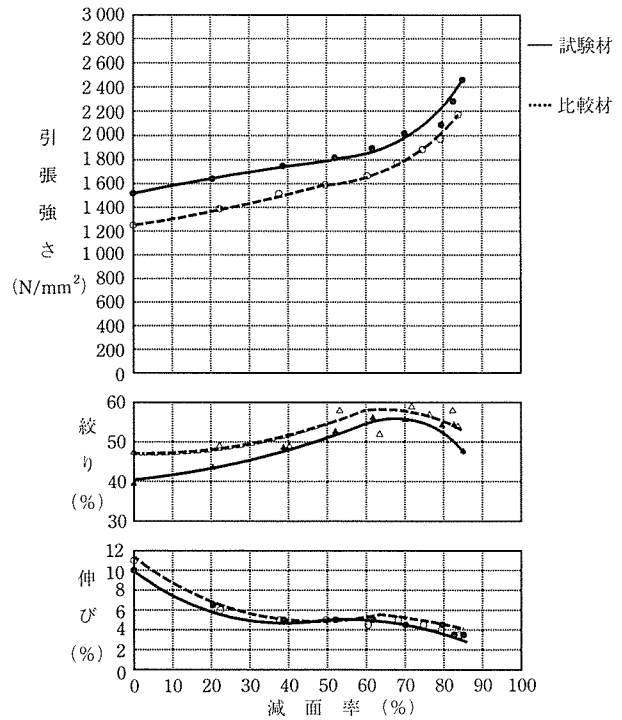


図-2

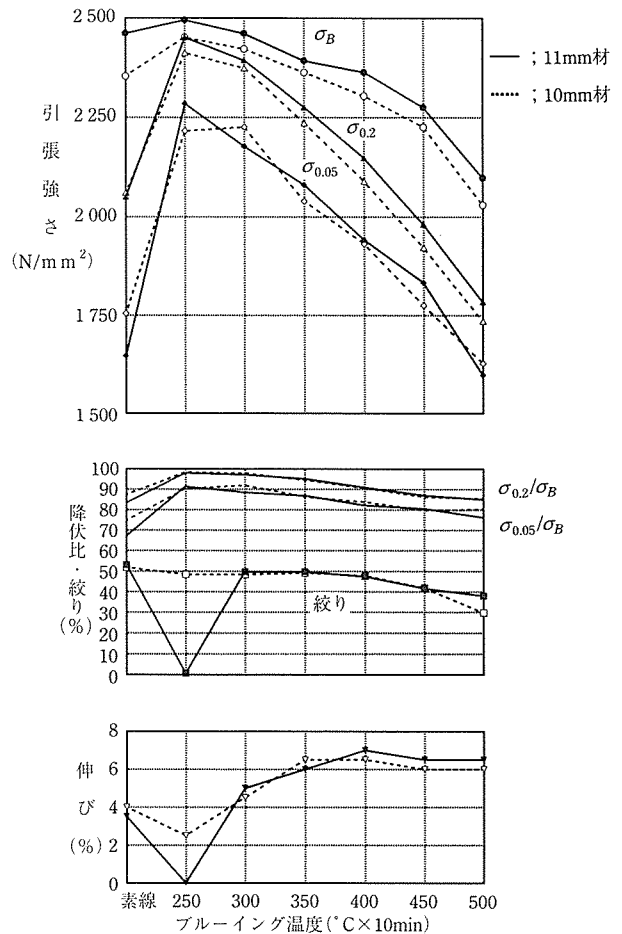


図-3

表-3 PC鋼より線の引張試験結果

鋼種	線材径 (mm)	引張荷重 (kN)	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	降伏強さ (N/mm <sup>2</sup> )	降伏比 (%)	ヤング率 (kN/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
試験材	10	231	2343	2144	91.5	202	8.2
	11	235	2383	2233	93.8	198	7.0
比較材	10.5	189	1913	1775	92.7	201	8.0

は約 400℃ で、比較材より 30~50℃ 高温側にずれる。引張強さ ( $\sigma_B$ ) は 300℃ 以上では伸線加工品より低下するので最適ブルーイング温度を 350~400℃ とする。この場合、10 mm 材から製造した素線は 2360 N/mm<sup>2</sup>、11 mm 材から製造したものは 2400 N/mm<sup>2</sup> であり、330 K には十分な強度である。

10, 11 mm 材のいずれも、降伏比 ( $\sigma_{0.2}/\sigma_B$ ) は 93%、弾性限比 ( $\sigma_{0.05}/\sigma_B$ ) は 85% で、通常品とほとんど差異はない。伸び、絞りも良好であった。

### 3.4 PC鋼より線の特性

#### (1) 引張特性

ブルーイング (ホットストレッチ処理) 後の 7 本より線 12.7 mm PC 鋼より線の引張試験結果を表-3 に示す。引張強度は目標とする 330 K (2300 N/mm<sup>2</sup>) を満足している。試験材は高強度化されているにもかかわらず、降伏比は比較材とほぼ同等である。これは総減面率が比較材とほぼ同等であるためと考えられる。伸びも差異がなく、比較材の 270 K 級に劣らない良好な延性を有している。

#### (2) リラクゼーション特性

リラクゼーション試験の初荷重はいずれも実引張荷重の 70% で、20℃ で 1000 時間まで測定した。表-4 に測定結果を示す。規格値である 2.5% 以下を十分満足している。

表-4 PC鋼より線のリラクゼーション値

	線材径 (mm)	時間 (h)				
		1	10	100	200	1000
試験材	10	0.41	0.56	0.73	0.80	1.1
	11	0.28	0.42	0.60	0.70	1.0
比較材	10.5	0.25	0.44	0.65	0.80	1.2

#### (3) 引張疲労試験

PC 鋼より線の両端を樹脂により固定して、PC 鋼より線本体を部分片振りにより引張疲労試験を行った。下限応力は実引張強さの 35% とした。目標は 200 N/mm<sup>2</sup> で、 $2 \times 10^6$  回以上である。振幅 ( $\Delta\sigma$ ) と繰返し数 (サイクル) の関係 (S-N 曲線) を図-4 に示す。これより、試験材は比較材とほぼ同等の疲労強度を有していることがわかる。

また、定着具 (くさび型、コンプレッション型) のみ

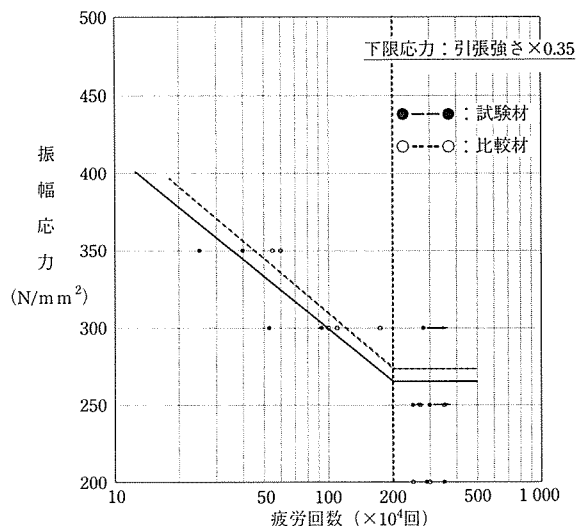


図-4

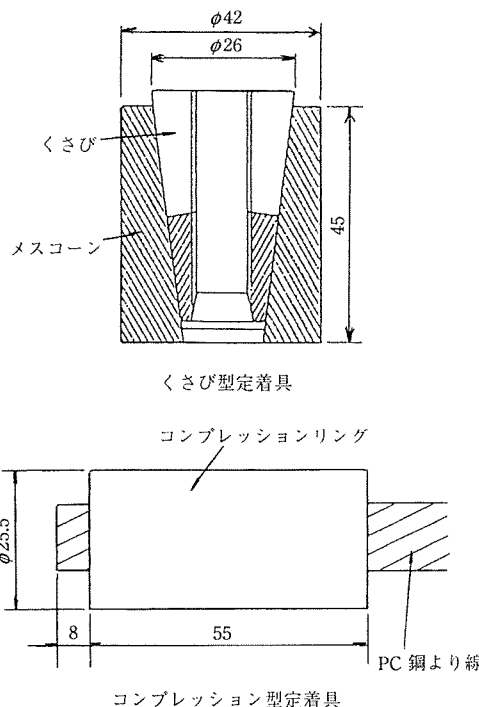


図-5

による疲労試験では、引張強さの 60%+100 N/mm<sup>2</sup> でも破断は生じなかった。この際に使用した定着具は 250 K および 270 K 用に一般に使用されているもので、その形状を図-5 に示す。

◇研究報告◇

(4) 遅れ破壊特性

20% チオシアン酸アンモニウム溶液 (NH<sub>4</sub>SCN) を 50℃ に加熱し、0.7σ<sub>B</sub> の定荷重により遅れ破壊試験を行った。この結果、破断時間は 70~80 時間であり、比較材との差異はなく良好といえる。

(5) 定着試験

図-5 に示した一般に使用されている定着具を用いて破断時の定着効率試験を実施した。その結果を表-5 に示す。試験中にスリップ等の発生はなかったが、定着効率は比較材の 270 K に比べやや低い。これは定着具が高強度品用に製作されたものではなかったためと考えられる。今後 330 K 用に合致する定着具を開発する必要があるが、実用上は従来的一般用定着具で差しつかえないと考える。

表-5 PC 鋼より線の定着効率 (%)

	く さ び 式				コンプレッション式			
試験材	96.6	96.8	96.7	Ave=96.7	95.9	96.6	96.8	Ave=96.4
比較材	98.9	98.5	99.0	Ave=98.8	99.0	98.9	98.5	Ave=98.8

(6) セットロスの試験

約 5 m のアバットにより、実引張強さの 80% 相当の緊張荷重を載荷し、その際のすべり込み荷重をロードセルにより測定した。結果は表-6 に示すように約 3 mm で両者間で差はなく、良好といえる。なお、定着具は図-5 に示したものと同一である。

表-6 セットロス試験結果

	セットロス (mm)			緊張荷重 (kN)
試験材	3.1	3.2	3.0	188
比較材	3.2	3.3	3.0	146

4. ま と め

330 K (2300 N/mm<sup>2</sup>) 級 PC 鋼より線の開発を目的に、試作材として高 Si 過共析鋼 (98 ASi Cr 鋼) を実炉溶製し、通常の製造工程により、7 本より PC 鋼より線の試作を行った。その結果、

- ① 現状 270 K (1860 N/mm<sup>2</sup>) 級とほぼ同等の製造工程で 330 K (2300 N/mm<sup>2</sup>) 級の製造が可能である。
- ② 伸び、リラクセーション、疲労強度、遅れ破壊特性等はいずれも現状 270 K 級と同等である。
- ③ 現状の定着具を使用した場合、試作材の定着性能は若干低いが、実用上差しつかえないといえる。セットロスは全く問題ない。

本線材の開発にあたり、線材および資料の提供等についてご協力をいただきました。新日本製鐵株式会社君津製鐵所の各位に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 川端, 坪野, 山岡, 浜田, 川口, 高橋: 鉄と鋼, 71 (1985), s 1524
- 2) 鈴木金属工業(株): プレストレストコンクリート, Vol. 32, 特別号, 1990
- 3) 児玉, 材寄, 山岡, 茨木: プレストレストコンクリートの発展に関する論文集,
- 4) 落合, 西田, 大羽, 川名: 鉄と鋼, 79 (1993), p. 1101
- 5) 落合, 西田, 大羽, 芹川, 高橋: までりあ (日本金属学会報), 33 (1994), p. 2061
- 6) 山腰, 中村, 金田: 神戸製鋼技報, 23 (1973), No. 3, p. 20
- 7) Ochiai, Nagumo, Amakawa and Takahashi: Wire Journal, 16 (1983). No. 7, p. 72
- 8) 村上, 中沢, 田代, 高橋, 小椋: 鉄と鋼, 69 (1983), s 1303

【1996年6月10日受付】