

# 2 000MPa級亜鉛めっき鋼線及び2 300MPa級PCストランド用線材の開発

## Wire Rod for 2,000MPa Galvanized Wire and 2,300MPa PC Strand

樽井敏三<sup>(1)</sup> 西田世紀<sup>(2)</sup> 吉江淳彦<sup>(3)</sup> 大羽浩<sup>(4)</sup>  
 Toshimi TARUI Seiki NISHIDA Atsuhiko YOSHIE Hiroshi OHBA  
 浅野巖之<sup>(5)</sup> 落合征雄<sup>(6)</sup> 高橋稔彦<sup>(7)</sup>  
 Yoshiyuki ASANO Ikuo OCHIAI Toshihiko TAKAHASHI

### 抄録

橋梁用亜鉛めっき鋼線、PC鋼線に対する高強度化のニーズは一層高まっている。高炭素鋼線の高強度化を実現するためには、デラミネーションを防止するとともに熔融亜鉛めっき時あるいはブルーイング工程での強度低下を抑制することが重要である。デラミネーションの防止には、伸線加工量の増加よりもパテティング材強度を増加させる強化手法が有効である。また、熔融亜鉛めっき時の強度低下の抑制には、セメントタイトの球状化速度を遅らせるSi、Crの添加が有効である。この考え方に基づいて、従来鋼線と同等以上の特性を有する2 000MPa級亜鉛めっき鋼線及び2 300MPa級PCストランド用線材を開発した。

### Abstract

There is a steady demand of high strength steel wires for bridge cable and PC strand. To achieve strengthening of high carbon steel wire, it is important to prevent the occurrence of delamination and suppress the loss of strength in galvanizing or blueing process. Strengthening of patented wire is more effective than increasing the total amount of reduction to depress delamination. Si and Cr, elements that enhance the patented wire strength and retard the spheroidization rate of lamellar cementite, are useful in suppressing the loss of strength during galvanizing. Based on these findings, the galvanized steel wire with a tensile strength of 2000MPa and the PC strand featuring a tensile strength of 2300MPa have been developed. The new wires have properties equal to or better than those of the conventional wires.

### 1. 緒言

高炭素のパーライト鋼を伸線加工によって強化した高炭素鋼線は、量産鋼種の中で最も強度が高い材料として知られているが、近年、特にその高強度化が進展している。例えば、細径の代表的品種であるスチールコードの強度は、タイヤの軽量化を目的に4 000MPaに到達している<sup>1)</sup>。また、半世紀以上にわたって1 500~1 600MPa(160kgf/mm<sup>2</sup>級)の強度で推移してきた橋梁用亜鉛めっき鋼線は、世界最大の明石海峡大橋の建設を契機に1 800MPa級(180kgf/mm<sup>2</sup>級)の鋼線が開発され<sup>2-4)</sup>、建設費の低減に貢献している。日本では東京湾口、紀淡海峡などの明石大橋を上回る長大橋が検討されているが、これに対応して2 000MPa級(200kgf/mm<sup>2</sup>級)の強度が実現できるところまで開発が進んでいる<sup>5)</sup>。

更に、PC鋼線(Uncoated stress-relieved steel wire for prestressed concrete)でも高強度化が進展している。1 860MPa級PC鋼線が長年使用されてきたが、高強度コンクリートの実用化

あるいは施工の簡略化に伴いPC鋼線の高強度化が要請され、2 300MPa級鋼線が開発されている<sup>6,7)</sup>。

本稿では、橋梁用亜鉛めっき鋼線、PC鋼線の高強度化の考え方と2 000MPa級橋梁用亜鉛めっき鋼線及び2 300MPa級PCストランド用線材の開発結果について述べる。

### 2. 高炭素鋼線の高強度化手段

鋼線の強度を増加する手法には

- (1) パテティング材強度の増加
- (2) 伸線減面率の増加
- (3) 伸線加工での加工硬化率の増加

があり、更に伸線後に熔融亜鉛めっきやブルーイングが入る橋梁用鋼線及びPC鋼線では、

(4) 熔融亜鉛めっき、ブルーイング時の強度低下の抑制を図ることも重要となる。これらのいずれの方法によっても強度を

\*<sup>(1)</sup> 鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 主任研究員  
千葉県富津市新富20-1 ☎293-8511 ☎(0439)80-3097

\*<sup>(2)</sup> 君津技術研究部 主任研究員

\*<sup>(3)</sup> 君津技術研究部 主幹研究員 工博

\*<sup>(4)</sup> 君津製鐵所 条鋼工場 線材管理グループ マネジャー

\*<sup>(5)</sup> 鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 研究員(現 日鐵テクノリサーチ)

\*<sup>(6)</sup> 君津技術研究部 主幹研究員 工博(現 鈴木金属(株))

\*<sup>(7)</sup> 鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 部長 工博(現 金属材料技術研究所)

増加させることが可能であるが、強化手法によって鋼線の延性が異なるため、最も延性劣化を起こさない組み合わせの選択が大切である。

鋼線の延性の評価法として、ねじり試験が通常行われている。鋼線の強度が高くなり延性が低下すると、ねじり変形の初期にデラミネーションと呼ばれる鋼線の伸線方向に沿った縦割れが発生するようになる。デラミネーションの発生を抑えることが鋼線の高強度化に対して重要な要因となる。

パテンティング材強度とデラミネーションが発生する鋼線の強度の関係を図1に示す<sup>3)</sup>。同一強度の鋼線でも、伸線減面率を大きくして強度を確保した鋼線に比べパテンティング材強度を増加させて強化した鋼線ほど、高強度域までデラミネーションが発生しないことがわかる。このことは、鋼線の高強度化とデラミネーションの抑制を両立させる手段として、伸線減面率の増加による高強度化は避け、パテンティング材強度と伸線加工硬化率を増加させる手法を指向すべきであることを示している。

パテンティング材の強化手法として、

- (1)パーライトラメラ間隔の微細化
- (2)フェライトの固溶、析出強化
- (3)セメントイト分率の増加

がある。ラメラ間隔の微細化には、C量の増加<sup>1,8)</sup>、Cr添加が有効であり、フェライトの強度を増加させるためには、Siによる固溶強化及びVによる析出強化が有効であることが知られている。また、強度の高いセメントイトの分率を増加させるためには、C量を増加させる必要がある。

一方、加工硬化率はラメラ間隔の影響が支配的であり、パテンティング処理後の初期ラメラ間隔が微細化するほど加工硬化率が大きくなる。しかし、橋梁用鋼線、PC鋼線のような伸線減面率が低い領域では、ラメラ間隔の微細化による加工硬化率の大幅な増加は期待できない<sup>9)</sup>。

溶融垂鉛めっき、あるいはブルーイング工程での強度低下が起きる主要因は、強加工を受けたセメントイトの一部が分断、球状化し、フェライトとセメントイトの層状組織が崩壊するためである<sup>10)</sup>。図2に溶融垂鉛めっき時(450℃)の強度低下に及ぼすめっき前の鋼線強度とSi、Crの影響を示す<sup>4)</sup>。伸線減面率を増加させて高強度化するほどめっき時の強度低下が増加することがわかる。また、合金

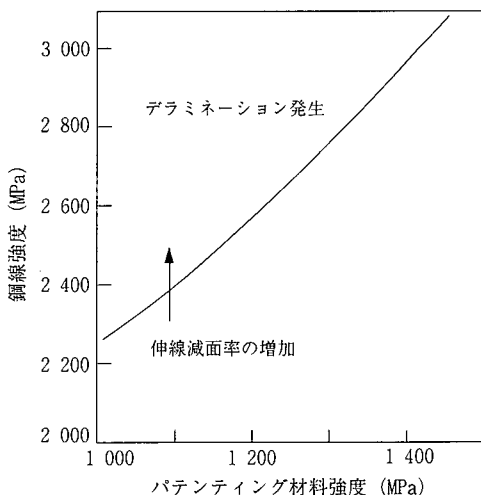


図1 デラミネーションの発生に及ぼすパテンティング材強度の影響

元素の効果が顕著に認められ、高Si鋼線では同一の強度の鋼線でも強度低下量が100MPa程度減少し、Crを添加すると更に強度低下を防ぐことが可能となる。

図3に示すように、Siはセメントイト中への溶解度が低くフェライト/セメントイト界面に濃化し、Crはセメントイトに濃縮する<sup>11)</sup>。セメントイトの球状化が進行するためには、界面のSiの拡散が必要となるため、Si量が増加するほどセメントイトの球状化速度が低下し、強度低下を抑制すると考えられている<sup>10)</sup>。CrはSiよりも拡散速度が遅いため、この結果、セメントイトの球状化速度はSi、Crの拡散律速となり遅くなる。即ち、SiあるいはCrを添加すると、溶融垂鉛めっき後でも層状組織が維持されるため、強度低下が起こりにくいと考えられている。

以上のことから、橋梁用垂鉛めっき鋼線、PC鋼線の高強度化を実現するためには、

- (1)Si添加によるフェライトの固溶強化、Cr添加によるラメラ間隔微細化強化、セメントイト分率の増加による強化手法を採用し、パテンティング材強度を増加させる
- (2)Si、Cr添加によるブルーイング、溶融垂鉛めっき時の強度低下の抑制を図ることが有効になる。

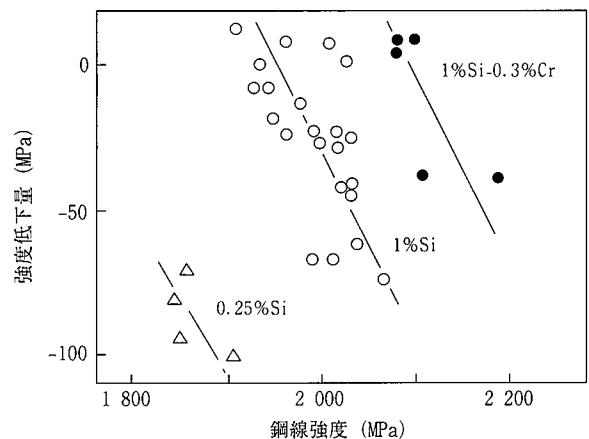


図2 溶融垂鉛めっき時の強度低下量に及ぼすSi、Crの影響

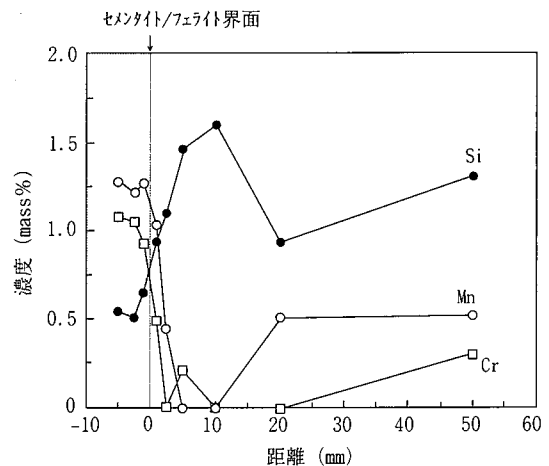


図3 フェライト/セメントイト界面のSi、Mn、Cr濃度分布

### 3. 2 000MPa級橋梁用亜鉛めっき鋼線用線材

#### 3.1 製造条件

前述の高強度化の考え方にに基づき、線径5mm/2 000MPa級橋梁用亜鉛めっき鋼線として、表1に示す化学成分の鋼を設計した。比較のために1 800MPa級鋼線の成分もあわせて示す。ポイントは、パテティング材の強化、亜鉛めっき工程での強度低下の抑制及びデラミネーションの防止を両立させるために、明石海峡大橋のメインケーブルに使用された1 800MPa級鋼線に比べC、Siを増量し、Crを添加したことにある。

新日本製鐵(株)室蘭製鐵所に表1の鋼を実転炉で溶製した後、線径12mmの線材に熱間圧延した。その後、東京製鋼(株)において、パテティング処理、伸線加工(4.9mm径)、溶融亜鉛めっきを行った。2 000MPa級用線材のパテティング処理後の強度は1 450MPaであり、1 800MPa級用線材に比べ125MPaの高強度化が可能である。

#### 3.2 2 000MPa級亜鉛めっき鋼線の特性

試作した線径5mmの亜鉛めっき鋼線の機械的特性を表2に示す。強度は2 059MPaであり、伸びも規格をクリアしている。また、ねじり試験においてデラミネーションは発生せず、良好なねじり特性を示している。この試作鋼線を用いて、疲労特性、低温特性、遅れ破壊特性について調査した。

メインケーブルにかかる応力は主に引張応力のため、パイプフォア型疲労試験機を用いて部分片振り引張疲労試験を行った。比較のために1 600MPa級及び1 800MPa級鋼線も調査した。最小応力は、1 600MPa級が490MPa、1 800MPa級が552MPa、2 000MPa級が604MPaと亜鉛めっき鋼線の高強度化に応じて増加

表1 2 000MPa級亜鉛めっき鋼線用線材の化学成分 (mass %)

強度レベル	C	Si	Mn	Cr
1 800MPa級	0.82	0.25	0.50	—
2 000MPa級	0.88	0.25	0.30	0.30

表2 2 000MPa級亜鉛めっき鋼線の機械的性質

0.2% 耐力	1 771MPa
引張強さ	2 059MPa
伸び	6.3%
ねじり回数	24

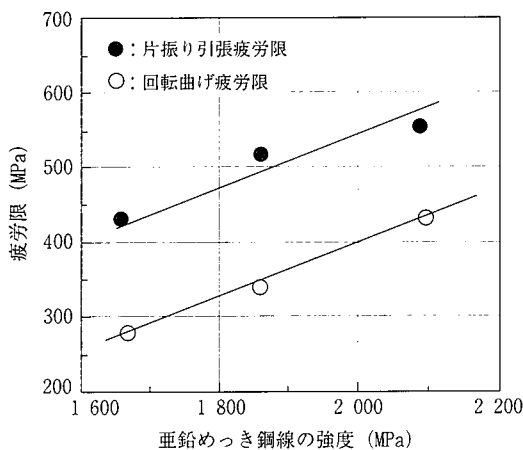


図4 亜鉛めっき鋼線の強度と片振り疲労限及び回転曲げ疲労限の関係

させた。

図4に亜鉛めっき鋼線の強度と疲労限(10<sup>7</sup>サイクル)の関係を示す。高強度化に伴って疲労限は増加し、2 000MPa級鋼線は最小応力が高いにもかかわらず、1 800MPa級鋼線以上の疲労限を有していることが分かる。参考のために調査した中村式回転曲げ疲労試験機による回転曲げ疲労限の結果を図4に併せて示す。回転曲げ疲労限も亜鉛めっき鋼線の強度が高くなるほど増加している。

低温特性は平行部径が4mmの平滑試験片及び曲率半径0.1mm、深さ0.5mm、角度60°の切欠を円周方向に付けた試験片による引張試験で評価した。図5、6に平滑材、切欠材の結果をそれぞれ示す。2 000MPa級の平滑材は、従来鋼線と同様に試験温度の低下とともに強度が上昇している。切欠材も低温での顕著な劣化が無く、優れた特性を有していることがわかる。

鋼材の高強度化を阻害する要因の一つは遅れ破壊である。高炭素鋼線は、焼入れ・焼戻し処理によって製造される焼戻しマルテンサイト鋼に比べ耐遅れ破壊特性が優れていることが知られている。しかし、高強度化に伴って高応力状態で使用されるため、遅れ破壊が発生する可能性を否定できない。

そこで、高温高湿環境及び屋外の暴露試験(富津市の沿岸地帯)によって遅れ破壊特性を評価した。試験片形状はめっきのままの平滑材と切欠材を用い、負荷応力は平滑材が1 256MPa、切欠材が1 472MPaの条件で行った。また、高温高湿試験は、温度60℃、湿度90%以上の環境で6か月間の暴露を行った。高温高湿による暴露

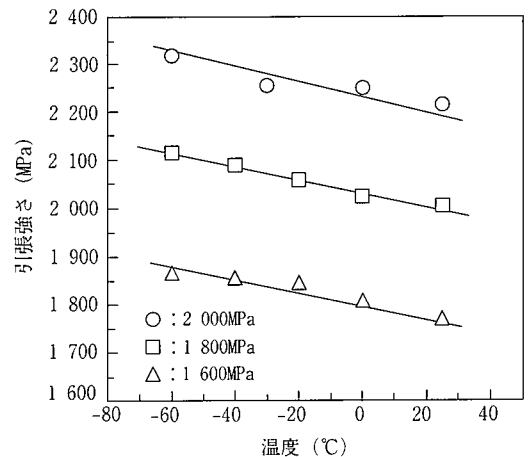


図5 平滑材の低温強度

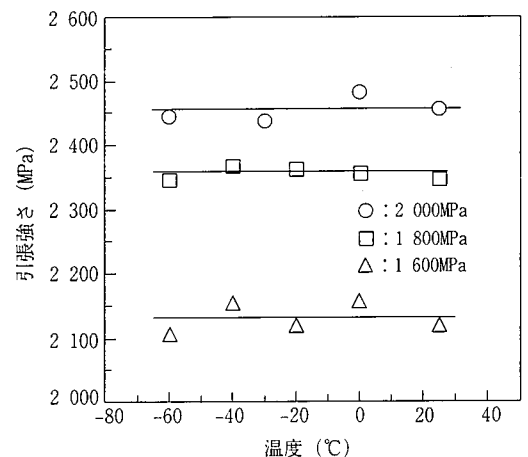


図6 切欠材の低温試験

表3 高温高湿暴露試験前後の破断荷重

	平滑試験片	切欠試験片
暴露前	40.5kN	29.5kN
暴露後	40.3kN	29.9kN

表4 7mm径1 800MPa級亜鉛めっき鋼線の機械的性質

引張強さ	1 832MPa
伸び	7.1%
ねじり回数	23

では、平滑材及び切欠材ともに破断は生じなかった。表3に暴露前後の破断荷重を示す。平滑材、切欠材いずれの亜鉛めっき鋼線も破断荷重は低下していない。また、屋外の大気暴露は試験開始後3年以上経過しているが、現段階で平滑材、切欠材ともに遅れ破壊は発生していない。なお、屋外暴露試験は今後も継続する予定である。

以上の結果から明らかなように、試作した線径5mm/2 000MPa級鋼線は1 800MPa級鋼線と同等以上の機械的性質、疲労特性、低温特性及び耐遅れ破壊特性を有しており、橋梁用鋼線として実用化に耐えられると考えられる。

また、表1に示した2 000MPa級用線材を用いて、線径7mm/1 800 MPa級亜鉛めっき鋼線を試作した。線径13mmのパテンティング材を6.91mmに伸線した後、熔融亜鉛めっきを行った。表4に亜鉛めっき鋼線の機械的性質を示す。強度は1 832MPaであり、デラミネーションの発生もなく優れたねじり特性を有していることがわかる。更に7mm径/1 800MPa級鋼線の疲労特性、低温特性、耐遅れ破壊特性は、従来の7mm径/1 600MPa鋼線と同等以上の特性を有していることを確認している。

#### 4. 2 300MPa級超高強度PCストランド用線材

PCストランドが使用されているプレストレス工法<sup>12)</sup>は、PCストランドを用いてコンクリートに圧縮応力を与え、コンクリートの耐引張荷重特性を向上する工法であり、鉄筋コンクリートに比べコンクリートの断面積が小さくできる特徴がある。

PCストランド用鋼線は、長年ASTM A416及びJIS G 3536に規定された270K(1 860MPa)級が主体で、SWRS82B(0.82C-0.2Si-0.75Mn)を用いて製造されている。高強度コンクリートの実用化に伴いPC鋼線の高強度化が要請され、300K(2 060MPa)級<sup>13)</sup>更には330K(2 300MPa)の試作が報告されている<sup>6,14,15)</sup>。そこで、新たに開発された98ASiCrを用い300K級PCストランド用の鋼線並びにPCストランドの試作を行った。

98ASiCrの鋼成分は以下のように設計した。C量は多い方が高強度化しやすいが、初析セメントの生成を避けるために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1.2%添加した。Crを添加する理由は、Crのパーライト層状化促進効果並びにラメラ間隔微細化効果を利用するためである。しかし、高炭素鋼ではCrの偏析度が高く、パテンティング材の中心偏析部にマイクロマルテンサイトが生成する懸念があるため添加量を約0.2%とした。Mnは偏析し易く、かつ、Crと同様に変態を遅延させるため約0.3%と低く抑えた。

##### 4.1 製造条件

表5に試料の取鋼分析値を示す。98ASiCrが開発鋼で、

表5 供試鋼の化学成分 (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr
98ASiCr	0.98	1.20	0.30	0.010	0.005	0.19
SWRS82B	0.81	0.22	0.74	0.011	0.005	-

SWRS82B(以下、82B)は比較に用いた従来鋼である。表5の2鋼種を新日本製鐵(株)君津製鐵所の実生産工程で製造した。即ち、250t転炉で溶製後、連続鋳造で300mm×500mm断面のブルームとしたのち、分塊圧延工程を経て122mm角ピレットとした。線材圧延はピレットを1 100℃に加熱し、通常の圧延条件で10mm並びに11mm径の線材に圧延した。線材圧延後、直ちに熔融塩パテンティング装置(DLP)により直接パテンティングを行った。得られた線材(DLP線材)を供試材として用いた。

線材を塩酸洗浄後、磷酸亜鉛被膜処理を行い、鈴木金属工業(株)において連続伸線機で4.22mm径と4.35mm径まで伸線した。これらの鋼線より、公称径12.7mmの7本燃りPCストランドを製造した。上記4.22mm径の鋼線に矯正のため行われるブルーイング条件を定めるため、大気中250~500℃の各温度で600秒間のブルーイング処理を施し機械的性質の変化を調査した。線材のマイクロ組織観察には走査型電子顕微鏡を使用した。エッチング液は飽和ピクラルである。初析セメントの観察は、JIS G 0551に規定のピクリン酸ソーダ法でエッチング後、光学顕微鏡(500倍)を用いて行った。

##### 4.2 2 300MPa級超高強度PCストランドの特性

DLP線材の機械的性質を表6に示す。98ASiCrの引張強さは82Bに比較して約300MPa高い。伸び及び絞りは若干低下するが、その後の伸線加工において問題とならなかった。

98ASiCrの11mm線材の組織を図7に示す。正常なパーライト組織であり上部ベイナイトは認められない。なお、DLPの冷却速度は11mm線材の中心部で約25℃/sと十分大きいので、初析セメントは検出されなかった<sup>16)</sup>。

伸線加工のままの鋼線の機械的性質の変化を図8に示す。98ASiCrの加工硬化率は82Bとほぼ同等である。これは、総減面率が85.3%以下(新ひずみ $\epsilon \leq 1.92$ )と低いため、因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表れるのは $\epsilon \geq 2$ の高減面率領域である。98ASiCrの絞りは線材では82Bより若干低いものの、伸線後はほぼ同等である。

ブルーイング処理後の鋼線の機械的性質を図9に示す。98ASiCrはSi添加によりブルーイング温度400℃以下で軟化抵抗性が認められる。98ASiCrの伸びの回復温度は約400℃であり、82Bより30~50℃高い温度となる。従って、98ASiCrの最適ブルーイング温度は380~400℃である。

温間ストレッチング後の7本燃り(12.7mm)PCストランドの引張試験結果を表7に示す。強度は目標とする330K(2 300MPa)級を満足する。98ASiCrは高強度化されているが、降伏比の上昇は小さ

表6 DLP線材の機械的性質

	線径 (mm)	引張強さ (MPa)	絞り値 (%)	伸び (%)
98ASiCr	10.0	1 570	38.1	9.6
98ASiCr	11.0	1 526	39.4	9.7
SWRS82B	10.5	1 248	47.5	11.0

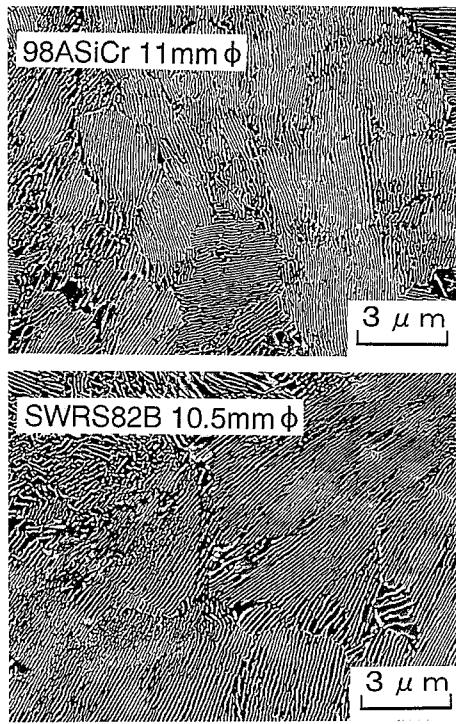


図7 DLP線材のSEM組織

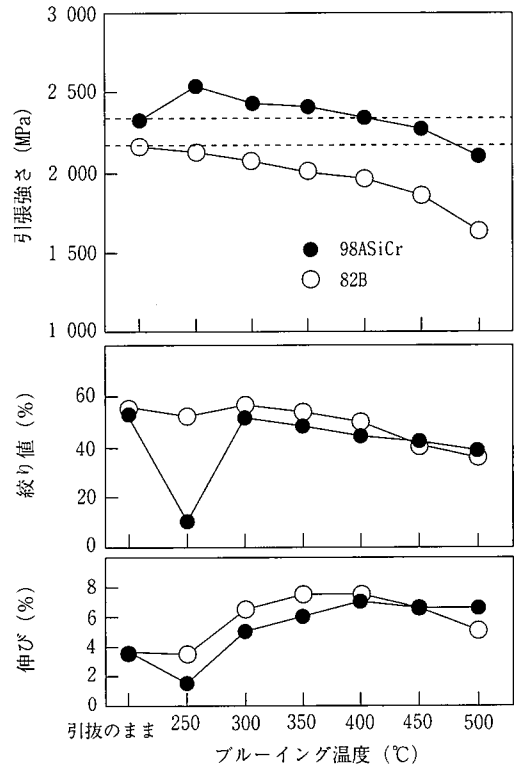


図9 ブルーイング材の機械的性質

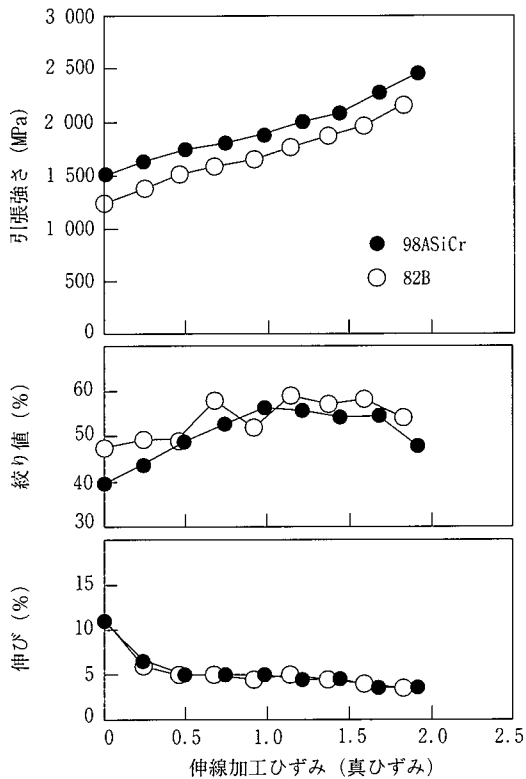


図8 伸線材の機械的性質

い。これは伸線加工による総減面率が82Bと同等であるためと考えられる。また、98ASiCrの伸びは82Bとほとんど変わらず、現状270K級に劣らない良好な延性を示す。

その他、リラクゼーション試験、引張疲労試験、定着試験を行った結果、従来の270K級とほぼ同等の特性が得られることを確認している<sup>17)</sup>。

表7 PCストランドの機械的性質

鋼種	線材径 (mm)	引張強さ (MPa)	降伏応力 (MPa)	降伏比 (%)	ヤング率 (GPa)	伸び (%)
98ASiCr	10.0	2 343	2 144	91.5	2.02	8.2
98ASiCr	11.0	2 383	2 233	93.8	1.98	7.0
SWRS82B	10.5	1 913	1 775	92.7	2.01	8.0

### 4.3 まとめ

330K(2 300MPa)級PCストランドの開発を目的に、高Si過共析鋼の98ASiCr(0.98% C-1.20% Si-0.33% Mn-0.19% Cr)を実炉溶製し、通常の線材並びにPC鋼線の製造工程により7本撚り(12.7mm) PCストランドの試作を行った。

- (1) 現状270K(1860MPa)級とほぼ同一の製造工程で330K(2 300MPa)級の製造が可能である。
- (2) 2 300MPa級PCストランドの伸び、リラクゼーション値、疲労強度はいずれも現状270K級とほぼ同等である。

### 5. 結論

橋梁用亜鉛めっき鋼線及びPCストランドの高強度化手段として、パテンティング材の強度増加と亜鉛めっき、ブルーイング工程での強度低下の抑制に有効なSi、Crの利用に着目して検討した結果、2 000MPa級亜鉛めっき鋼線及び2 300MPa級PCストランド用線材の開発に成功した。開発鋼線は延性の低下もなく、疲労特性、遅れ破壊特性等は従来鋼線と同等以上であることを確認した。

### 参考文献

- 1) Ochiai, I., Nishida, S., Tashiro, H.: Wire J. Int. 26, 50(1993)
- 2) Yamaoka, Y., Hamada, K., Tsubono, H., Kawasaki, H., Oki, Y., Kawaguchi, Y.: Trans. I.S.I.J. 26, 1059(1986)

- 3) 高橋稔彦, 今野信一, 佐藤洋, 落合征雄, 野口義哉, 芹川修道, 俵矢与文: 製鉄研究, (332), 53(1989)
- 4) 高橋稔彦, 樽井敏三, 今野信一: 鋼構造論文集, 1, 119(1994)
- 5) 高橋稔彦, 大橋章一, 樽井敏三, 植森龍治, 丸山直紀: CAMP-ISIJ, 7, 777 (1994)
- 6) 西田世紀, 吉江淳彦, 落合征雄, 浅野徹之, 富永治朗, 小森英樹: 材料とプロセス, 8, 1371(1996)
- 7) 茨木信彦, 鹿磯正人, 横井浩一, 方蘇春, 児玉勝: R&D 神戸製鋼技報, 46 (3), 13(1996)
- 8) Kanetsuki, Y., Ibaraki, N., Ashida, S.: ISIJ Int. 31, 304(1991)
- 9) Tarui, T., Takahashi, T., Tashiro, H., Nishida, S.: Metallurgy, Processing and Applications of Metal Wires. TMS, 1996, p.87
- 10) Tarui, T., Ohashi, S., Takahashi, T., Uemori, R.: Iron & Steelmaker, (Sep.), 25(1994)
- 11) 丸山直紀, 植森龍治, 森川博文: 新日鉄技報, 359, 6(1996)
- 12) 会田俊夫 ほか編: ワイヤロープ便覧, 白亜書房
- 13) 川端義則, 坪野秀良, 山岡幸男, 浜田和一, 川口康信, 高橋宏幸: 鉄と鋼, 71, s1524(1985)
- 14) 児玉勝, 材寄勉, 山岡幸男, 茨木信彦: プレストレストコンクリートの発展に関する論文集, 1995, p.561
- 15) 落合征雄, 小森英樹, 富永治朗, 吉江淳彦, 西田世紀, 浅野徹之: 日本塑性加工学会第40回伸線技術分科会資料, 1995
- 16) 落合征雄, 西田世紀, 大羽浩, 芹川修道, 高橋宏美: までりあ, 33, 2061 (1994)
- 17) 落合征雄, 小森英樹, 萩原昌明, 市原哲也: プレストレスコンクリート, 39, 79(1997)