

土木建築用素材としてのPC鋼棒の現状

Present State of Steel Bars for Prestressed Concrete as Civil Engineering and Construction Materials

白神哲夫

Tetsuo Shiraga

溝口 茂

Shigeru Mizoguchi

JFE 条鋼 (株) 仙台製造所
研究主監

高周波熱錬 (株) 製品事業部
取締役製造部長

1 はじめに

コンクリートは土木建築分野で広く用いられている。しかしながら、コンクリートは一般的には圧縮の力には強いものの、引張や曲げの力には弱いと言われている。これを改善するためにコンクリート内に鋼材を通し、両端から締め付けることにより、コンクリートに圧縮の応力を負荷する手法(プレストレストコンクリート(PC))が広まった。この鋼材がPC鋼棒である。一見、いわゆる鉄筋棒鋼と同様に考えがちであるが、表1に示すように鉄筋棒鋼もコンクリートを強化する目的ながら、鋼材には応力の負荷はないため、鋼材の強度は400MPa~700MPaと低い。鉄筋棒鋼の倍以上の強度を有するPC鋼棒には当然ながら、鉄筋棒鋼にはない各種特性を求められる。ここではPC鋼棒の現状を特に鋼材としての必要特性に着目してまとめてみた。

ることになっているが、現状、細径異形PC鋼棒の大半は熱処理による製造である。図1にPC鋼棒の一例(外観)を示す。

PC鋼棒の種類と用途・PC部材としての機能・PC鋼棒としての必要特性を表2に示す。一般的には基礎用コンクリートパイル(図2)、送電や通信用コンクリートポール(図3)、鉄道用コンクリート枕木、下水道・共同溝用ボックスカルバート、LNGタンクなどの土木・建築などに用いられている。特殊用途として、耐塩性や低温用、非磁性などがある。また、特殊仕様では圧縮型や中空型、アンボンド(アスファルト系ポリマーまたはグリース被覆)型などがある。

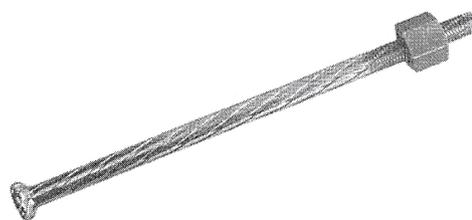


図1 PC鋼棒の一例(外観)¹⁾

2 PC鋼棒の用途・種類

2.1 PC鋼棒とその用途

PC用鋼材としてはPC鋼線、PC鋼より線、PC鋼棒の3種類がある。PC鋼線およびPC鋼より線はJISG3558「PC硬鋼線」、JISG3556「PC鋼線及びPC鋼より線」に規定されているが、いずれも高炭素鋼線を伸線加工して製造される。一方、PC鋼棒はJISG3109「PC鋼棒」と同3137「細径異形PC鋼棒」に規定されており、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って製造す

表2 PC鋼棒の種類・用途と必要特性

PC鋼棒の種類	用途	PC部材としての機能	PC鋼棒としての必要特性 (JIS規格項目除く)
異形PC鋼棒	杭(パイル)	曲げ耐力向上・生産性向上	高温リラクゼーション特性、溶接性、圧造頭部引張特性
	ポール	曲げ耐力向上	ねじ部強度特性、遅れ破壊特性
PC鋼棒(丸)	PC構造物、枕木、スラブ	コンクリートひび割れ制御 曲げ強度向上	ねじ加工性、ねじ部疲労特性 頭部成形、圧造頭部引張特性
耐塩性PC鋼棒	沿岸部PC構造物	海塩飛沫帯でのPC鋼棒錆低減	耐食性、耐遅れ破壊特性
低温用PC鋼棒	LNGタンク	低温時の曲げ耐力向上	低温での強度、延性
圧縮PC鋼棒	バイブレーション	曲げ耐力の更なる向上	圧縮時の強度、リラクゼーション特性
プレストレスト入り中空PC鋼棒ユニット	土木PC構造物	現場緊張不要 グラウト不要	圧縮特性
アンボンドPC鋼棒	ボックスカルバート	グラウト不要 耐食性向上	ねじ部疲労特性
総ねじPC鋼棒	土木PC構造物	施工性向上	付着特性、
非磁性PC鋼棒	リニアモーターカー軌道等	非磁性用途使用	非磁性

表1 鉄筋棒鋼とPC鋼棒の違いの概略

	使用環境	鋼材の強度(MPa)	応力負荷	形状	製造方法
鉄筋棒鋼	コンクリート中	300~700	なし	丸、異形	熱間圧延
PC鋼棒	コンクリート中	1000~1500	あり	丸、異形	後述の3種類の方法があるが、大半は熱処理型

2.2 PC 鋼棒の規格

上記のようにPC 鋼棒はJISG3109と3137によって規定されているが、そこからPC 鋼棒の全容をみる。

まず、種類としては強度や形状で区分されている。強度区分ではA種からD種まであり、A種2号(785 / 1030<規格下限耐力/規格下限引張強さ:単位はいずれもN/mm²>)、B種1号(930 / 1080)、B種2号(930 / 1180)C種1号(1080 / 1230)、D種(1275 / 1420)となっている。1号は熱処理型(焼入れ焼戻し)、2号は圧延・ストレッチ型鋼棒で、一般的には熱処理型の降伏比が高い。C種2号は遅れ破壊を考慮して1994年に廃止され、A種1号は実際に使用されている量が少いため、C種2号廃止に合わせて廃止された。JISG3137「細径異形PC 鋼棒」では表3に示すようにB種からD種まで、

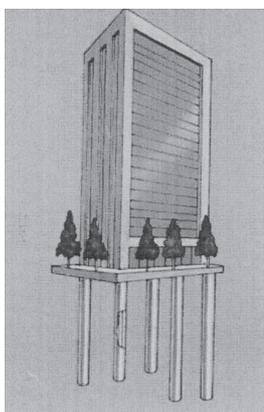


図2 コンクリートパイル¹⁾

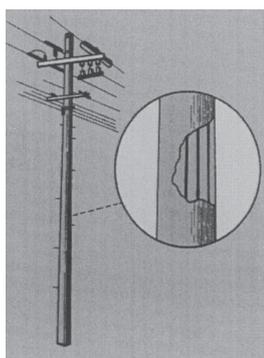


図3 コンクリートポール¹⁾

表3 細径異形PC 鋼棒の機械的性質のJIS規格

記号	耐力 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	伸び %	リラクセーション %
SBPDN 930 / 1080	930以上	1080以上	5以上	4.0以下
SBPDL 930 / 1080				2.5以下
SBPDN 1080 / 1230	1080以上	1230以上	5以上	4.0以下
SBPDL 1080 / 1230				2.5以下
SBPDN 1275 / 1420	1275以上	1420以上	5以上	4.0以下
SBPDL 1275 / 1420				2.5以下

JISG3109ではA種からC種までである。なお、リラクセーションは常温で試験片に規格引張強さの70%の応力を負荷し、伸びを一定となるように1000時間制御したときの荷重の減少を測定し、初期値との比率で評価する。リラクセーションの通常のを記号の末尾にNで示し、低リラクセーション品をLで示す。

ここで強度、延性、リラクセーションが規定されている意味を考えてみる。PC 鋼棒は規格引張強さの70%または規格耐力の80%のいずれか小さい値を許容応力として負荷することによって、コンクリートを強化している。したがって、コンクリートにより強い応力を負荷するには高強度の鋼材を用いる必要がある。コンクリート構造物を考えた場合、コンクリートが破壊することにより構造物が圧壊することを前提としている。したがって、コンクリート中のPC 鋼棒の延性が小さくて、先に破断してしまうと、コンクリート構造物の急激な破壊が生じる。これを防止するために、PC 鋼棒には高い延性が必要となる。一方、PC 鋼棒は常に応力が負荷された状態であり、この応力を保持するためにはリラクセーションが小さいことが必要である。

サイズや形状はG3109では直径9.2mmから40mmで断面が丸形状、G3137では7.1mmから12.6mmで異形である。鋼化学成分としてはP、S、Cuのみの規定であるが、後述のように主として、ボロン添加鋼が用いられている。

3 PC 鋼棒の性能向上の例

3.1 遅れ破壊特性向上

PC 鋼棒に必要な特性はJISに規定された強度、延性、リラクセーション特性が主であるが、C種、D種は強度が1200MPa以上となるため、遅れ破壊特性も重要となってくる²⁾。PC 鋼棒はコンクリート中で使用されるため、pH12の比較マイルドな環境中に存在するので、遅れ破壊は生じにくいはずである。しかし、使用上または施工上の不備によりコンクリート中に塩分を含んだり、pHの低い水が常に供給されるようになった場合、PC 鋼棒にも遅れ破壊が発生する可能性がある。特にコンクリート混和剤にはチオシアン酸塩が含まれる場合があり³⁾、国際プレストレストコンクリート連盟(fib<旧FIP>)のPC 鋼材の遅れ破壊試験方法の規定⁴⁾でも試験溶液を50℃・20%チオシアン酸アンモニウム水溶液を採用している。

このような観点から、PC 鋼棒の遅れ破壊特性向上を目指した例を以下に示す。遅れ破壊は高強度の鋼材に応力が負荷された状態の場合、腐食等によって鋼中に侵入した水素による水素脆化現象である。

(1) 水素の侵入抑制の観点からPC鋼棒(D種:1420MPa級)の成分設計を試みている⁵⁾。PC鋼棒の化学成分(0.3C-0.8Mn-B鋼)にNiを添加することにより、PC鋼棒の表面にNiが濃化し、水素侵入抑制に有効であることを見出して実用化に至っている。図4にNi濃化の状況を示す。PC鋼棒は熱間圧延素材のスケールを機械的に(ベンディングにより)剥離し、その後、高周波加熱による焼入れ焼戻しを行って製造しており、このような処理の結果として、熱処理ままではスケール直下にNi濃化層が存在する。図5に遅れ破壊特性に及ぼすNiの影響を示す。熱処理ままのスケールの付着したPC鋼棒を用いて、上記した遅れ破壊試験方法⁴⁾にて試験を行った。Niの増加に伴い、破断時間は急激に増加し、0.77%以上では破断時間が100h以上となる。これは熱処理ままでも試験を行っているが、表面を研磨して、Ni濃化層を除去した供試材では破断時間は熱処理まま材に比べて短くなっている。Ni無添加のベース鋼では表層にNi濃化層がないため、表面を研磨しても遅れ破壊特性(破断時間)に影響がない。このときの水素の侵入状況を昇温式水素分析法で測定した結果を図6に示す。300℃以下の拡散性水素で整理しているが、Niの増加に伴い、拡散性水素が減少している。一方、

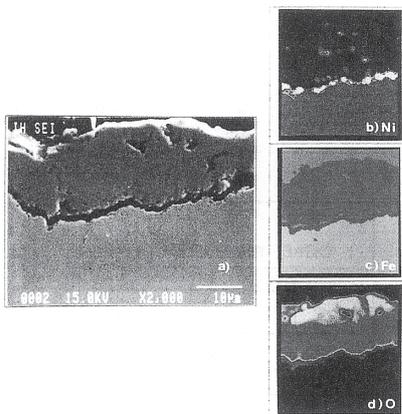


図4 0.7mass% Ni添加鋼のNi濃化層の状況⁵⁾

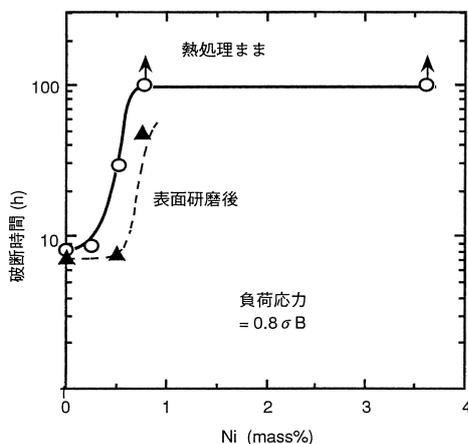


図5 遅れ破壊特性に及ぼすNiの影響⁵⁾

表面を研磨すると拡散性水素が増加する。これによって、表面のNi濃化層が水素侵入抑制に効いていることが分かる。

(2) 加工熱処理による遅れ破壊特性向上の例もある⁶⁾。熱間圧延の仕上げ温度を変化させて、770℃の未再結晶域圧延を行い、直後に焼入れし、その後、高周波加熱焼戻しを行うことによって、遅れ破壊特性(限界拡散性水素量で評価)が向上する(図7)。強度レベルは上記と同一で、通常は粒界破壊を生じるが、未再結晶域圧延-直接焼入れ-高周波焼戻しプロセスでは擬へき開破壊に変化することが認められている。これは旧オーステナイト粒が未再結晶圧延で伸長したことが大きい。

(3) このようなPC鋼棒の腐食(さらには遅れ破壊発生につながる)を防止するために、PC鋼棒の表面にアスファルト系ポリマーを塗布したアンボンドPC鋼棒が製造されるようになった⁷⁾。

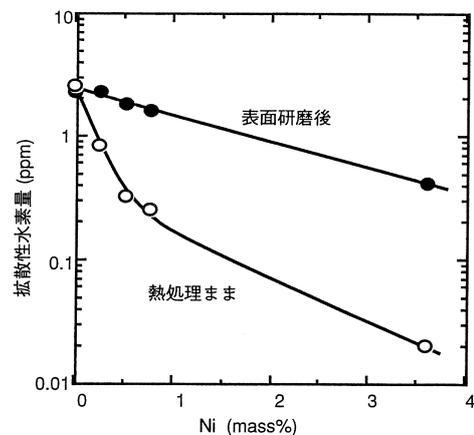


図6 拡散性水素量に及ぼすNiの影響⁵⁾

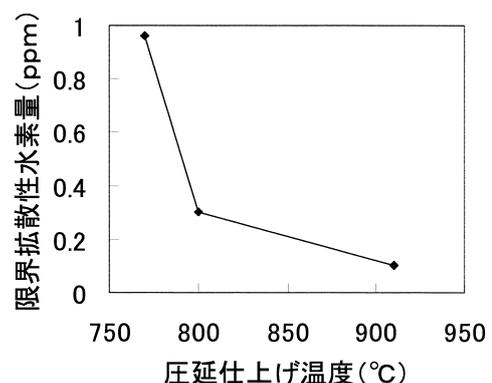


図7 限界拡散性水素量に及ぼす圧延仕上げ温度の影響⁶⁾

3.2 耐塩性向上

東北・北海道の日本海側や沖縄など飛来塩分の多い地域でのPC構造物でコンクリートのひび割れ、剥離の報告がなされている⁸⁾。コンクリート用細骨材として使用されつつある海砂や飛来塩分粒子に含まれる塩素イオンにより、不働態皮膜が破壊され、コンクリート中のPC鋼棒が腐食され、錆による体積膨張でコンクリートにクラックが生じる。これを鋼材の改善で対応しようという動きもある⁹⁾。細骨材重量の0.5%の塩分を含有させたコンクリート中にPC鋼棒を入れて、オートクレーブ養生—自然放冷—水中放置を4サイクル行い、耐塩性(腐食減量)を評価した。ここでもNiの多量添加で非常に良好な耐塩性を示し(図8)、他のPC鋼棒特性も現行材並を示している。

3.3 延性向上

近年の耐震設計では、巨大地震の入力エネルギーを構造物の塑性変形で吸収することを狙いとする終局限界状態設計がある。このような観点から、構造物の杭体に対しても、その曲げ変形特性を向上させることが重要である。杭体の曲げ変形特性を考えた場合、その主な支配因子の一つは杭体中に用いられているPC鋼棒の一樣伸びであることから、高一様伸びを有するPC鋼棒の必要性が述べられている。しかしながら、一樣伸びに関しては規格化されておらず、現行D種(引張強さ1420MPa以上)のPC鋼棒では3%程度である。

従来、鋼材の高強度・高延性化はフェライト+マルテンサイトのDual Phase鋼や残留オーステナイト活用のTRIP鋼がよく知られているものの、強度が低いこととマルテンサイト単相組織鋼ではないことなどから、1420MPa級PC鋼棒での高延性化の検討が行われている。Siの多量添加の影響¹⁰⁾、合金元素の影響¹¹⁾が調べられている。図9に示すように、Si多量添加により、熱処理時にフェライトが少量残存し、一樣伸び向上に寄与する。また、表4に示すように、高C—高Siにすることによって、高延性化が図れる。セメンタイトの微

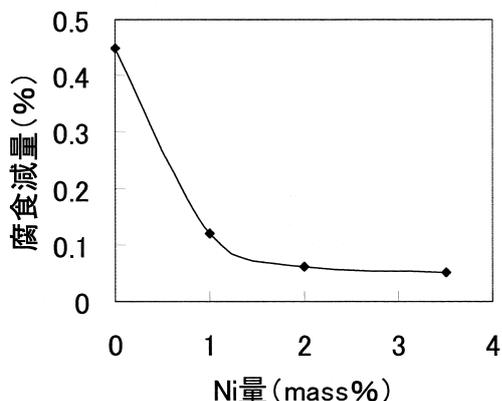


図8 耐塩性に及ぼすNi添加量の影響⁹⁾

細粒状化と焼戻し温度上昇による転位密度低減が効いたものと考えられる。

4 今後の動向等

PC鋼棒だけでなく、現在、あらゆる部材で高強度化が求められている。しかし、ここで最大の課題が遅れ破壊である。水素という非常に軽く、鋼中でも動きやすい元素が原因となっているだけに難しさがある。現在も本協会で「水素脆化研究の基盤構築フォーラム」、腐食防食協会で「FIP試験分科会」などの委員会が試験方法の標準化も視野に入れて、活動を行っている。PC鋼棒についてはFIP遅れ破壊試験方法が規定されているものの、近年はよりマイルドな環境での試験が必要との認識がされつつある。

現在、PC鋼棒関連のJIS(G3109、G3137、G3536)の改正作業が行われている¹²⁾。これは2007年6月20日に改正された建築基準法でJIS製品以外は使用できなくなったことに端を発している。主にはG3109で異形鋼棒を追加(それまで丸形状のみ)とG3137でサイズの追加が行われることである。いずれも現在、使用されており、今後、JIS材しか使用できなくなるための追加規定である。

また、近年は超鉄鋼の研究を中心にマイクロ組織の超微細化による高強度化や高靱性化の研究開発が行われている。PC鋼

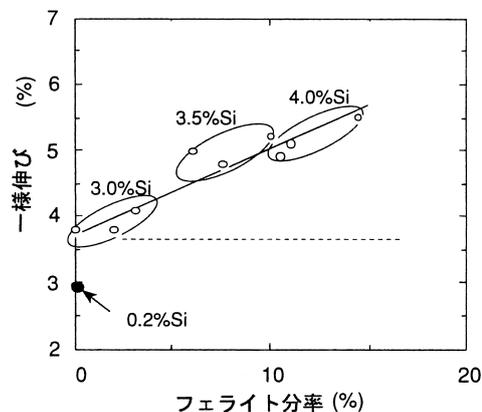


図9 一樣伸びに及ぼすフェライト分率の影響¹⁰⁾

表4 セメンタイトの形態と分率¹¹⁾

鋼	主な化学成分 mass%	セメンタイトの形態		セメンタイト 分率計算値 (vol%)	一樣伸び (%)
		平均粒径 ($\times 10^{-3} \mu m^2$)	平均アスペ クト比		
A	0.6C-3Si	4.30	1.96	9.2	6.7
B	0.6C-3Cr	5.09	2.35	9.2	4.2
C	0.6C-1Mo	5.86	2.40	9.2	4.4
D	0.6C-3Ni	6.73	2.62	9.2	3.1
E	0.3C-3Si	2.11	2.03	4.6	2.3
F	0.3C-3Cr	3.59	2.60	4.6	2.8
G	0.3C-3Ni	6.99	2.98	4.6	2.4

棒は高周波焼入れによる急速加熱焼入れ・焼戻しを行うため、元々、組織微細化による高靱性化は報告もされてきた^{13,14)}。しかし、加熱速度の更なる増大もなされ、特に、歯車関連での疲労強度向上に関する研究が進んできている¹⁵⁾。PC鋼棒においても、今後はこのような超急速加熱による組織の超微細化と焼戻し時の炭化物微細分散の相乗効果による特性向上の研究開発も行われるであろう¹⁶⁾。

5 おわりに

熱処理型のPC鋼棒の現状を鋼材側からの観点で整理した。PC鋼棒は鉄鋼における現時点での研究課題である「高強度化」「遅れ破壊」「超微細化」などの凝縮した非常に興味のわく製品である。今後はPC鋼棒の特性向上に限定せず、他分野への応用も含めた広い視野での検討も必要と考える。

参考文献

- 1) 高周波熱錬(株)技術資料
- 2) 松山晋作：遅れ破壊, 日刊工業新聞, (1989), 17.
- 3) 村山八洲雄, 今立文雄, 三上泰治, 西村良文, 山下健一：プレストレストコンクリート, 37 (1995), 70.
- 4) Federation Internationale de la Precontrainte : Report on Prestressing Steels 5, (1980), 1.
- 5) 白神哲夫, 石川信行, 石黒守幸, 山下英治, 溝口茂：まてりあ, 36 (1997), 499.
- 6) 樽井敏三, 平上大輔, 山崎真吾, 丸山直紀, 久保田学：CAMP-ISIJ, 15 (2002), 1045.
- 7) 山田真人：プレストレストコンクリート, 41 (1999), 86.
- 8) 建設省：コンクリートの耐久性向上技術の開発報告書, (1988)
- 9) 白神哲夫, 清水義明, 浅田司, 笹島保敏, 山下英治, 平尾正：NKK技報, 137 (1991), 33.
- 10) 横田智之, 白神哲夫, 山下英治, 溝口茂：鉄と鋼, 85 (1999), 59.
- 11) 横田智之, 白神哲夫, 山下英治, 溝口茂：鉄と鋼, 86 (2000), 57.
- 12) 線材とその製品, 46 (2008), 6.
- 13) 川寄一博, 千葉貴世, 古賀久喜, 山崎隆雄：鉄と鋼, 73 (1987), 2298.
- 14) 末廣邦夫, 山下英治, 池上由洋, 松原安宏：熱処理, 28 (1988), 293.
- 15) 川寄一博：ふえらむ, 10 (2005), 601.
- 16) 越智達朗：ふえらむ, 12 (2007), 776.

(2008年5月16日受付)