

# 高強度 PC 鋼より線の開発

林 優輔\*1・中野 元裕\*2・白濱 昭二\*3・吉原 直\*4

JIS G 3536に規定されているPC鋼より線に対して、最大試験力が7本より線で20～30%、19本より線で10～15%向上し、かつ、じん延性もJIS規格品と遜色のない高強度PC鋼より線を開発した。また、リラクセーション特性や疲労強度などの特性を調査した結果、従来JIS品と同等以上の特性を有していることを確認した。とくに、材料の高強度化を進めると、遅れ破壊感受性が增大する可能性があるため、高強度PC鋼より線の遅れ破壊特性を詳細に調査したので、その結果についても併せて報告する。

キーワード：高強度PC鋼より線、遅れ破壊、水素、引張疲労特性、曲げ引張特性

## 1. はじめに

材料開発の進展によって、従来よりも強度の高いコンクリートが使用されるようになり、設計施工規準も整備されている<sup>1)</sup>。高強度コンクリートを使用することにより、構造物の軽量化、省スペース化が可能であり、同時に材料の使用量の低減、工期短縮、運搬時の省力化など、多くの面でコストメリットや省エネルギー化が期待できる。

一方、高強度コンクリートを使用したPC部材の場合、部材の断面が減少することによるPC鋼材量の制約、あるいはより多くのプレストレスを導入するためのPC鋼材量の増加やその配置スペースの不足という問題が生じてきた。

これらの問題を解決するためには、PC鋼材を高強度化し、PC鋼材の使用本数・定着具数・マルチケーブル数などを減少させることが有効である。これにより、PC鋼材やマルチケーブルにおいても省資源・省エネルギー化が可

能となり、さらには現場での配置・緊張作業の減少による工期短縮やコスト低減に役立っている。

本報では、新たに開発した高強度PC鋼より線の諸特性に加え、とくに高強度化により懸念される遅れ破壊感受性について詳細に調査したので、その結果を報告する。

## 2. 高強度PC鋼より線の開発

### 2.1 高強度PC鋼より線の種類と機械的特性

PC鋼より線は、パテントニングした高炭素鋼線材を所定の線径まで伸線加工した後、より線・ホットストレッチ処理を施した鋼材である。高強度PC鋼より線ではJIS規格品として一般的に使用されるJIS G 3502 SWRS82Bの材料成分よりも、さらにC、Siなどを添加することで高強度化を図った。また、一般的に鋼材は高強度化に伴ってじん延性が低下する傾向にあるが、材料成分以外にもパテントニング、伸線およびホットストレッチ条件の最適化を図ることにより、JIS規格品と遜色のないじん延性を備えた高

表 - 1 高強度PC鋼より線の種類と規格値（神鋼鋼線規格）

種類	呼び名	最大試験力 kN以上	0.2%永久伸びに 対する試験力 kN以上	伸び %以上	リラクセーション (1000時間) %以下
高強度PC鋼より線	7本より	12.7 mm	220	188	2.5
		15.2 mm	314	267	
		15.7 mm	335	285	
	19本より	21.8 mm	659	570	
		28.6 mm	1 044	888	
エポキシ被覆 高強度PC鋼より線	7本より	12.7 mm	220	188	6.5
		15.2 mm	314	267	
		15.7 mm	335	285	
プレグラウト 高強度PC鋼より線	19本より	21.8 mm	659	570	2.5
		28.6 mm	1 044	888	

\*1 Yusuke HAYASHI：神鋼鋼線工業(株) 開発本部 開発部

\*2 Motohiro NAKANO：神鋼鋼線工業(株) 開発本部 開発部

\*3 Shoji SIRAHAMA：神鋼鋼線工業(株) 開発本部 開発部

\*4 Nao YOSHIHARA：(株) 神戸製鋼所 鉄鋼事業部門 技術開発センター 線材条鋼開発部

強度 PC 鋼より線を開発した。高強度 PC 鋼より線の種類と規格値を表 - 1 に示す。表 - 1 のとおり、同径の JIS 規格品に対して、7 本より線で 20 %、19 本より線で 10 ~ 15 % の強度アップを実現し、そのほかの特性についても JIS G 3536 PC 鋼線および PC 鋼より線に規定されている規格を満足している。

(1) 引張試験

開発した高強度 PC 鋼より線 15.2 mm、15.7 mm、28.6 mm を実際に引張試験した結果の一例を表 - 2 に示す。表 - 2 に示すように高強度 PC 鋼より線 15.2 mm、15.7 mm および 28.6 mm のいずれも表 - 1 の規格を満足した。

表 - 2 高強度 PC 鋼より線の引張試験結果 (一例)

線径 (mm)	最大試験力 (kN)	0.2 % 永久伸びに対する試験力 (kN)	伸び (GL=1 000 mm) (%)
15.2	321	301	6.0
15.7	344	336	7.0
28.6	1 095	980	7.2

(2) リラクゼーション試験

リラクゼーション試験では試験機に自動追尾式試験機を用い、初荷重は社内規格最大試験力の 0.7 倍とした。高強度 PC 鋼より線 15.2 mm のリラクゼーション試験結果を図 - 1 に示す。1 000 時間後のリラクゼーションロスは 1.04 % であり、表 - 1 の規格を満足した。

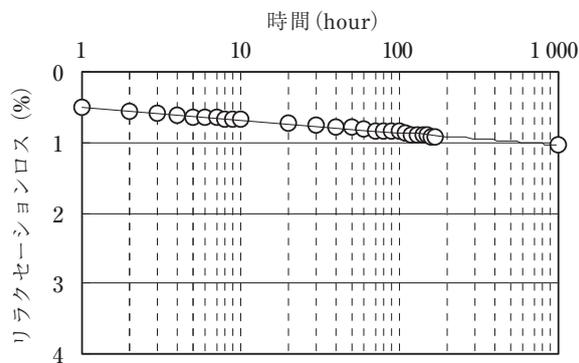


図 - 1 高強度 PC 鋼より線 15.2 mm のリラクゼーション試験結果

2.2 高強度 PC 鋼より線の性能確認

JIS 規格以外に、PC 鋼より線として使用する場合は確認の必要な規格や推奨試験がある。今回開発した高強度 PC 鋼より線を用いて実施した性能確認試験の一覧を表 - 3 に示す。ただし、遅れ破壊については表 - 3 の項目以外にさらに詳細な調査を実施したので、2.3 に別途詳述する。

(1) 引張疲労特性

ISO 6934-4 には、上限荷重を規格引張荷重の 0.7 倍とし、応力の範囲 195 N/mm<sup>2</sup> で 200 万回まで破断なきこととの規定がある。そこで、高強度 PC 鋼より線 15.2 mm および JIS SWPR7BL 15.2 mm を用いて、上限荷重を規格最大試験力の 0.7 倍とし、応力の範囲を変化させて S-N 線図を作

表 - 3 性能確認試験一覧

試験名称	確認事項	規格・推奨試験
引張疲労試験	PC 鋼より線の引張疲労特性	ISO 6934-4 1991 <sup>2)</sup>
曲げ引張試験	局所曲げ感受性	FIP Recommendations : Deflected Tensile Test <sup>3)</sup> (September 1996)
FIP 試験	遅れ破壊感受性	fib bulletin 30 : Acceptance of stay cable systems using prestressing steels <sup>4)</sup>

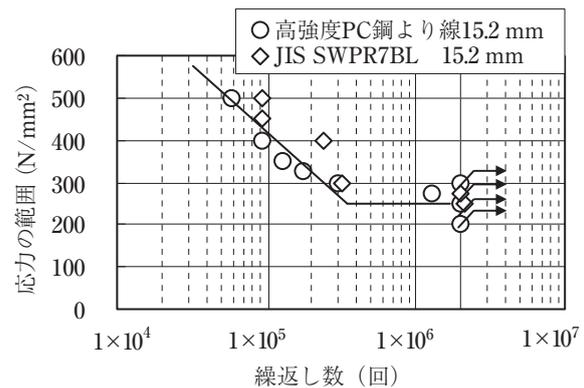


図 - 2 疲労試験結果

成した。その結果を図 - 2 に示す。図 - 2 の矢印は繰返し数 200 万回で破断が無いことを示しており、高強度 PC 鋼より線は ISO 6934-4 の規格を満足し、JIS 規格品と比べて遜色はなかった。

(2) 曲げ引張特性

高強度 PC 鋼より線では、JIS 規格品と比べ使用時の引張応力が増加するため、局所曲げに対する強度の低下が懸念される。そこで、図 - 3 に示すように FIP Recommendations : Deflected Tensile Test に基づき試験を行った。

高強度 PC 鋼より線 15.2 mm および JIS SWPR7BL 15.2 mm を各 5 本用いて試験した結果、JIS SWPR7BL 15.2 mm の破断荷重の低下は約 13 %、高強度 PC 鋼より線が約 19 % となり、高強度 PC 鋼より線の方がわずかに荷重低下が大きいものの、FIP Recommendations : Deflected Tensile Test の 28 % 以下という推奨値を満足している。

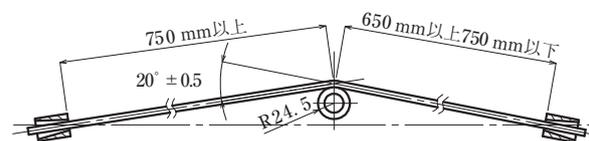


図 - 3 曲げ引張試験概略図

2.3 高強度 PC 鋼より線の遅れ破壊特性

遅れ破壊とは一定荷重下で、ある時間経過後に割れが発生または破断する現象であり、一般に水素脆化割れを示す。これは鋼材が陽極溶解するのに伴い酸性溶液中の H<sup>+</sup> が鋼材表面で陰極還元され、生成された原子状水素 (H) が一

○ 研究報告 ○

部そのまま鋼材中に浸入・拡散することが原因である。

遅れ破壊の原因となる水素は、強加工パーライト中では拡散性水素と非拡散性水素として存在する。水素放出量の測定において、約 250℃ までの比較的低温側で放出され原子空孔などに弱くトラップされた拡散性水素と、約 250℃ 以上の比較的高温側で放出され転位や析出物に強くトラップされた非拡散性水素に分類される。なお、遅れ破壊には拡散性水素が影響しており、非拡散性水素は寄与しないことが知られている<sup>5)</sup>。PC 鋼より線のような強加工パーライト鋼は遅れ破壊特性に優れている<sup>6)</sup>といわれているが、高強度化に伴って遅れ破壊感受性の増大が懸念される。そこで、遅れ破壊特性の評価を行うにあたって、従来より FIP 試験以外の明確な基準が無いため、次に示す各種試験を実施し、高強度 PC 鋼より線と JIS 規格品を相対比較することにより、高強度 PC 鋼より線が JIS 規格品と同様の使用が可能であることを確認した。高強度 PC 鋼より線と JIS 規格品との遅れ破壊感受性を比較するため、表 - 4 に示すような調査を行った。

表 - 4 遅れ破壊特性評価試験一覧

分類	試験項目
水素脆化 促進度大	FIP 試験
	陰極チャージ・定荷重下での破断時間測定 および破断時の水素吸収量測定試験
水素脆化 促進度小	陰極チャージ後での鋼材中の水素拡散係数 測定試験
	塩水噴霧試験による水素吸収量測定と SSRT 試験による塩水噴霧試験前後での材料特性 比較調査
実環境に 近い促進試験	定荷重下での大気暴露試験および荷重下での 塩水滴下による乾湿繰返し試験

(1) FIP 試験

本試験は遅れ破壊特性を調査するため、従来より行われている試験であり、50℃・20%チオシアン酸アンモニウム水溶液中で実破断荷重の 0.8 倍の荷重を負荷し、その破断時間で評価を行っている。この試験方法により、高強度 PC 鋼より線 15.2 mm の芯線および JIS SWPR7BL 15.2 mm の芯線を用いて本試験を行った。試験結果をワイブルプロ

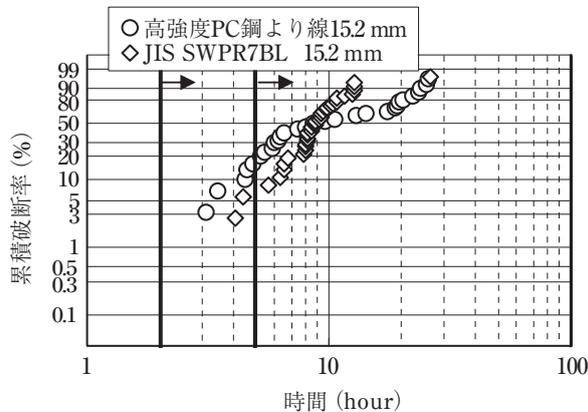


図 - 4 応力腐食試験結果

ットしたものを図 - 4 に示す。図 - 4 から、fib Bullten 30 : Acceptance of stay cable systems using prestressing steels に記載されている最小破断時間が 2 時間以上、中央値が 5 時間以上の推奨値を満足しており、JIS 規格品と比較して遜色はない結果であった。

(2) 陰極チャージ後での鋼材中の水素拡散係数測定

材料の欠陥（キズや腐食など）部への水素の移動速度が速いほど、遅れ破壊が起こりやすいため高強度 PC 鋼より線 15.2 mm と JIS SWPR7BL 15.2 mm の拡散係数を測定し、その結果を表 - 5 に示す。室温 (25℃) において、高強度 PC 鋼より線 15.2 mm 中の水素の拡散係数と JIS SWPR7BL 15.2 mm 中の水素の拡散係数は両者ともほぼ同等であった。

表 - 5 室温 (25℃) での水素拡散係数

高強度 PC 鋼より線 の拡散係数 $D$ cm <sup>2</sup> /s	JIS SWPR7BL 15.2 の拡散係数 $D$ cm <sup>2</sup> /s
$8.9 \times 10^{-8}$	$8.4 \times 10^{-8}$

(3) 陰極チャージ・定荷重下での破断時間測定および破断時の水素吸収量測定

本試験は定荷重下で水素を浸入させて破断時間を評価する試験である。陰極チャージにより、鋼材を腐食させず、チオシアン酸アンモニウムの有無および陰極チャージでの電流密度により水素の浸入速度・浸入量を変化させることができると考えられる。そこで、鋼材中の水素浸入速度・浸入量が異なると予測される各種条件で、遅れ破壊感受性を評価した。

図 - 5 の概略図に示すように pH 3 硫酸水溶液中で高強度 PC 鋼より線 15.2 mm および JIS SWPR7BL 15.2 mm の芯線に実破断荷重の 0.8 倍の荷重をかけ、電流密度を 9, 1, 0.1, 0.01, 0.001,  $1 \times 10^{-6}$  mA/cm<sup>2</sup> と変化させた。添加剤として 0.05 mol/l チオシアン酸アンモニウム水溶液 (NH<sub>4</sub>SCN) を混入し、破断までの時間を計測した。なお、

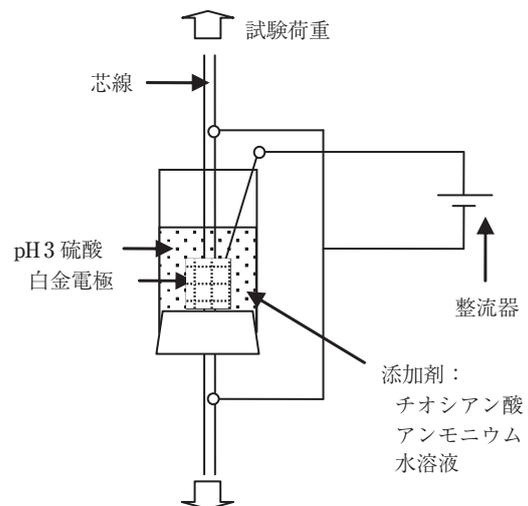


図 - 5 陰極チャージ・定荷重下の破断時間測定試験概略図

NH<sub>4</sub>SCN には水素分子の生成を阻害し、鋼材表面に吸着した水素原子が鋼中に吸収されやすくする効果がある。試験結果を図 - 6 に示す。図 - 6 から、破断に至るまでの時間は電流密度による影響がほとんど無く、NH<sub>4</sub>SCN の有無による影響が非常に大きいことが分かった。なお、各条件において高強度 PC 鋼より線 15.2 mm と JIS SWPR 7BL 15.2 mm の試験体において破断時間に大きな差は見られなかった。また、もっとも水素を侵入させられると考えられる電流密度 9 mA/cm<sup>2</sup>、NH<sub>4</sub>SCN 有りの試験体の水素吸収量測定を実施した結果を図 - 7 に示す。図 - 7 から遅れ破壊に影響を及ぼす拡散性水素については明確な差は認められなかった。

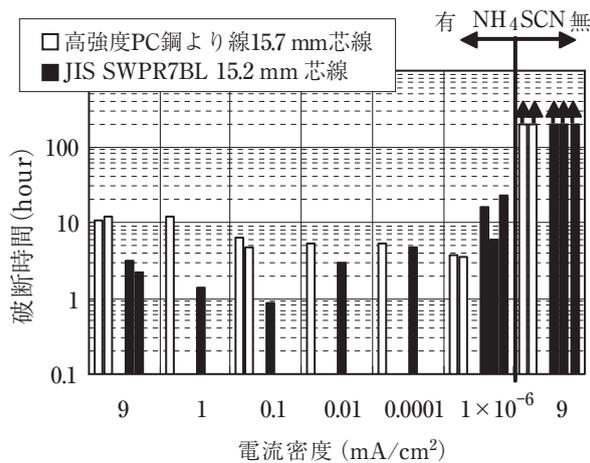


図 - 6 陰極チャージ・定荷重下の破断時間測定試験結果

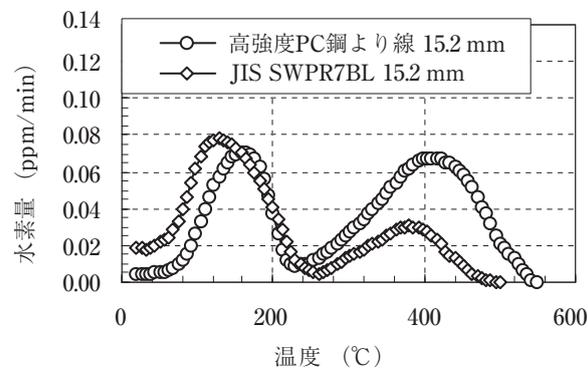


図 - 7 電流密度 9 mA/cm<sup>2</sup>、NH<sub>4</sub>SCN 有りの試験体の水素吸収量測定試験

(4) 塩水噴霧試験による水素吸収量測定と SSRT 試験による塩水噴霧試験前後での材料特性比較調査

高強度 PC 鋼より線 15.2 mm および JIS SWPR 7BL 15.2 mm の芯線を用いて JIS Z 2371 塩水噴霧試験を 96 時間実施し、水素吸収量測定を行った結果を図 - 8 に示す。図 - 8 の水素脆化に影響する拡散性水素において、現在、実使用されている JIS SWPR 7BL 15.2 mm では 0.02 ppm 程度の水素が検出され、高強度 PC 鋼より線 15.2 mm では水素がほとんど検出されなかった。

さらに、JIS Z 2371 塩水噴霧試験を 100 時間実施した高

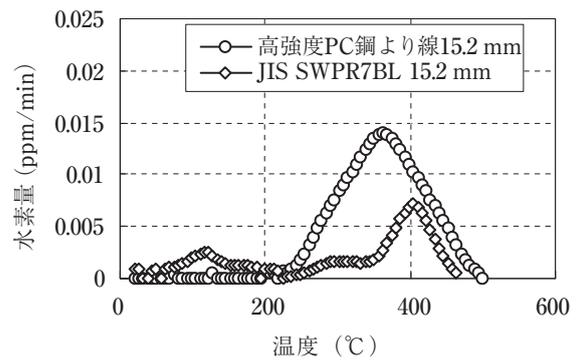


図 - 8 96 時間後の塩水噴霧試験後の水素吸収量測定結果

強度 PC 鋼より線 15.2 mm および JIS SWPR 7BL 15.2 mm の芯線で SSRT (Slow Strain Rate Technique: 低歪速度引張) 試験を実施し、塩水噴霧試験前の試験体と比較調査を行った。塩水噴霧試験のような実環境に近い水素脆化の促進度が小さい試験では、鋼中へ侵入する水素量が少ないため、定荷重による試験では破断に至るまでに長時間を要し、場合によっては破断に至らないことがある。SSRT 試験では、微量拡散性水素による脆化でも強制的に破断させるため、どのような環境においても迅速に遅れ破壊特性の評価が可能である<sup>7)</sup>。

SSRT 試験の結果一覧を表 - 6 に示す。表 - 6 より、最大試験力比・破断伸び比・破断絞り比とも、高強度 PC 鋼より線 15.2 mm は JIS SWPR 7BL 15.2 mm と同等以上であり、塩水噴霧試験による材料特性の低下は認められなかった。

表 - 6 塩水噴霧試験前後での SSRT 試験結果

試験体	最大試験力 (kN)	破断伸び (mm)	破断絞り (%)
高強度 PC 鋼より線 15.2 mm	49.0 (1.00)	7.50 (1.03)	42.1 (0.96)
JIS SWPR 7BL 15.2 mm	42.5 (1.01)	6.81 (0.96)	41.0 (0.95)

(括弧内は塩水噴霧試験前との比)

(5) 定荷重下での大気暴露および塩水滴下による乾湿繰返し試験

高強度 PC 鋼より線 15.2 mm と JIS SWPR 7BL 15.2 mm に規格最大試験力の 0.7 倍の定荷重をかけた後、長期間屋外に曝す大気暴露試験、および 3 ~ 4 wt % の塩水を滴下による乾湿繰返し試験を実施した。なお、乾湿繰返し試験では 3 時間の塩水滴下と 21 時間の乾燥を繰り返した。写真 - 1 に 440 日後の暴露試験の様子を、写真 - 2 に 440 日後の塩水滴下による乾湿繰返し試験の様子を示す。

また、440 日後の残留強度と伸びを調査するため、試験体を解体し、引張試験した結果を表 - 7 に示す。高強度 PC 鋼より線 15.2 mm と JIS SWPR 7BL 15.2 mm はともに試験前と比較して大気暴露試験では最大試験力は約 99 %、伸びは約 100 % であり、写真 - 1 (b), (c) に示すように全

○ 研究報告 ○

面に錆が発生しているにもかかわらず、大気暴露による機械的特性の低下は認められなかった。しかし、塩水滴下による乾湿繰返し試験では写真 - 2 (b) に示すように錆の発生が多く、腐食による減肉により、高強度 PC 鋼より線 15.2 mm および JIS SWPR7BL 15.2 mm は最大試験力は約 90 %、伸びは約 95 % となり、ともに若干の機械的特性の低下が見られた。

さらに、440 日後の大気暴露試験および塩水滴下による乾湿繰返し試験の供試体の水素吸収量測定を行った。その結果を図 - 9、10 にそれぞれ示す。図 - 8 から大気暴露試験ではほとんど水素量が測定されなかった。また、図 - 9 から塩水滴下による乾湿繰返し試験では 0.5 ppm 程度

表 - 7 試験後の引張試験結果

試験項目	試験体	最大試験力 (kN)	伸び (%)
大気暴露試験	高強度 PC 鋼より線 15.2 mm	320 (0.993)	8.3 (1.03)
	JIS SWPR7BL 15.2 mm	271 (0.996)	8.1 (1.00)
塩水滴下による乾湿繰返し試験	高強度 PC 鋼より線 15.2 mm	295 (0.916)	7.6 (0.95)
	JIS SWPR7BL 15.2 mm	238 (0.875)	7.5 (0.93)

(括弧内は各試験前の最大試験力、伸びとの比)

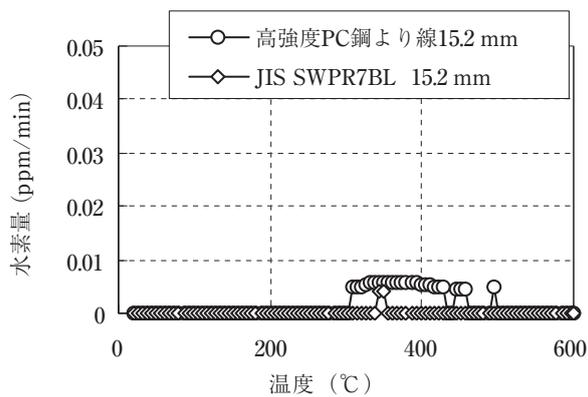


図 - 9 大気暴露試験 440 日後の水素吸収量測定結果

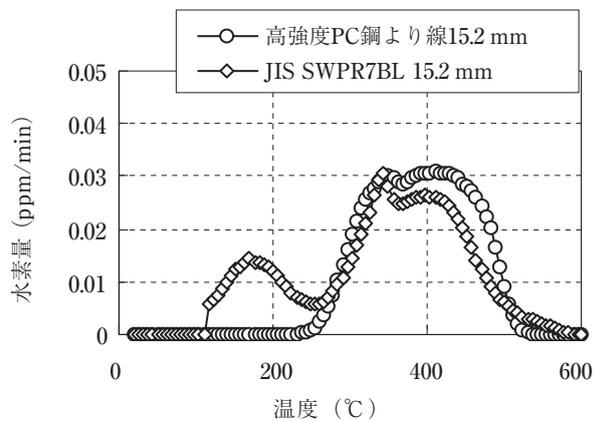


図 - 10 塩水滴下による乾湿繰返し試験 440 日後の水素吸収量測定結果



(a) 試験の様子



(b) 高強度 PC 鋼より線 15.2 mm (c) JIS SWPR7BL 15.2 mm

写真 - 1 大気暴露試験 440 日後



(a) 試験の様子



(b) 左：高強度 PC 鋼より線 15.2 mm, 右：JIS SWPR7BL 15.2 mm

写真 - 2 塩水滴下による乾湿繰返し試験 440 日後

の水素量を測定したが、遅れ破壊に影響を及ぼさない非拡散性水素<sup>6)</sup>として存在していた。

### 3. 考 察

高強度 PC 鋼より線 15.2 mm・JIS SWPR7BL 15.2 mm とも、FIP 試験、陰極チャージ・定荷重下での破断時間測定および破断時の水素吸収量測定の水素を積極的に浸入させる条件（水素浸入促進剤 NH<sub>3</sub>SCN 有りの促進度大の試験）では、高強度 PC 鋼より線 15.2 mm, JIS SWPR7BL 15.2 mm とも破断し、破断時間や破断後の水素量は差は認められなかった。また、常温での水素拡散係数（腐食ピットなどの高応力場や亀裂先端などへの水素集積に影響）に差異は認められなかった。

さらに、大気暴露試験および塩水滴下による乾湿繰返し試験、塩水噴霧試験による水素吸収量測定と SSRT 試験による塩水噴霧試験のように、水素浸入が少ない条件では高強度 PC 鋼より線 15.2 mm, JIS SWPR7BL 15.2 mm とも定荷重では破断せず、引張試験および SSRT 試験による評価でも差は見られなかった。これは水素浸入速度が遅いため、浸入してきた水素の一部は放出され、残りは強加工により導入された高密度転位などに強くトラップ<sup>5)</sup>されて随時遅れ破壊に寄与しない非拡散性水素になっているからと考えられる。

高強度 PC より線 15.2 mm と JIS SWPR7BL 15.2 mm の拡散性水素量や常温での水素拡散係数が同程度であること、また暴露試験・塩水滴下による乾湿繰返し試験結果でかなり腐食されているにも関わらず破断していないことから、高強度 PC 鋼より線の遅れ破壊感受性は JIS 規格品と同程度であると考えられる。

### 4. おわりに

高強度 PC 鋼より線は JIS 規格品に対して、7 本より線で 20～30%、19 本より線で 10～15% の強度アップを実現したうえで、そのほかの特性についても JIS G 3536 PC 鋼線および PC 鋼より線に規定されている規格を満足した。引張疲労試験、曲げ引張試験の JIS 規格以外の性能においても JIS 規格品と同等の性能を有していた。

さらに、高強度化により懸念されていた遅れ破壊特性において高強度化により使用荷重が 8.5 pt 増加しても、高強度 PC 鋼より線と JIS 規格品との遅れ破壊感受性に差は認められず、実使用環境においても問題ないと考える。

したがって、新たに開発した高強度 PC 鋼より線は高強度化が図れるとともに、使用環境面でも JIS 規格品と同様の取扱いが可能である。

#### 参考文献

- 1) 睦好宏史, 大塚一雄, 一宮利通, 桜田道博: 高強度コンクリートを用いた PC 構造物の設計施工規準—高強度コンクリート PC 構造物研究委員会報告—, プレストレストコンクリート, Vol.51, No.1, pp.111-124, 2009
- 2) ISO 6934-4 Steel for the prestressing of concrete 1991
- 3) FIP Recommendations: Deflected tensile test, September 1996
- 4) fib bulletin 30: Acceptance of stay cable systems using prestressing steels, January 2005
- 5) 高井健一: 強加工パーライト鋼と焼戻しマルテンサイト鋼の耐水素脆性の比較, 日本鉄鋼協会編 pp.194-198, 1997
- 6) 高井健一: 強化組織および強度レベルで整理した環境強度, 日本鉄鋼協会編 p.183-193, 1997
- 7) 漆原亘, 湯瀬文雄, 中山武典, 並村裕一, 茨木信彦: SSRT による高強度鋼の遅れ破壊評価, Reserch and Development 神戸製鋼技報 Vol.52, No.3, pp.57-61, 2002

【2010年10月29日受付】



図書案内

PC 技術規準シリーズ

## PC 斜張橋・エクストラローズド橋設計施工規準

定 価 4,725 円/送料 500 円

会員特価 4,000 円/送料 500 円

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会 編  
技報堂出版