



# インフラを支えるプレストレスト コンクリート技術と高機能PC鋼材

山田 真人

Highly-Functional Prestressing Steels that Support Infrastructure — by Masato Yamada — Prestressing steels have been widely applied for infrastructure. For the last twenty years, Sumitomo Electric Industries, Ltd. and Sumitomo (SEI) Steel Wire Corp. have been intensively working on the development of highly-functional prestressing steels such as epoxy coated and filled strands and pre-grouted tendons. This paper describes the features of these two products, as well as our 2,230 MPa grade ultra-high-strength strand, anchorage system, and tensile force monitoring device called “SmART cell.” All of them have been in practical use.

Keywords: epoxy coated and filled strand, pre-grouted tendon, ultra-high-strength strand, tensile force monitoring

## 1. 緒 言

現代社会において、我々の生命や財産を守り、身心共に健康で豊かな生活を営む礎となっているものの一つがコンクリート構造物である。中でもプレストレストコンクリートは、圧縮に強いコンクリートと引張に強い鋼の特長を生かした合理的な構造である。プレストレストコンクリート（以下PCと略称する）とは、Pre（予め）Stressed（応力を付与された）コンクリートであり、引張に弱いコンクリートに予め圧縮応力を付与することで、構造物が供用後に常時荷重や地震等の不慮の荷重を受けても、コンクリートに引張応力が作用しない構造である。将来発生する出費（応力）をキャンセルできるように応力面の貯金をする構造といえる。プレストレスの応用例は図1に示すような身近なものにも見られる。図2は通常の鉄筋コンクリート構造とPC構造を対比で示したものである。PC構造はひび割れのない耐久性に優れた大規模コンクリート構造物を可能にし、地震などの大荷重を受けて部材の大変形が生じてもその後に復元し残留変形が小さい、等の優れた特長を有することからその適用範囲を飛躍的に広げてきた。また、PC構造はコンクリートをひび割れなく全断面を有効に活用できることからコンパクトな断面とすることが可能で、省資源、省エネルギーといった今日的な課題にも有効な構造である。用途としては道路橋や鉄道橋、大規模LNGタンクや上水・下水処理タンク、石炭サイロ、原子炉格納容器（PCCV）、電柱や杭、線路のコンクリート製枕木にも多用されている。また、広大な無柱空間を実現できることから体育館やホール、大規模事務所棟、居住空間が広めで間取りの自由度が高いマンション、タワーなどの建築構造物にも適用例が多い。著名な例では代々木体育館、大阪市立体育館、銀座四丁目交差点の三愛ビル、東京スカイツリーの芯柱、シドニーのオペラハウスやパリの新凱旋門、住友電

工伊丹製作所表事務所棟もPC構造である。

PC鋼材は、コンクリートにプレストレスを効率的に与えるために用いられている。ジャッキでPC鋼材を緊張し（引張り）、その反力によりコンクリートを締め上げた状態で金具を用いて固定してコンクリートに圧縮応力を導入する。コンクリートは乾燥によって収縮したり、クリープ変

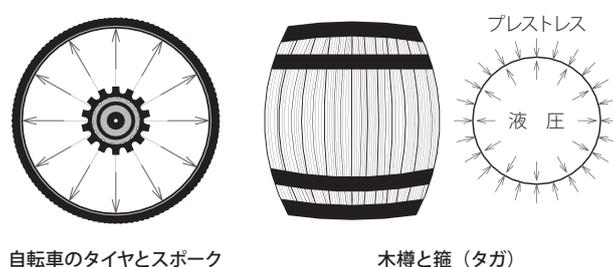


図1 身近なプレストレスの応用例

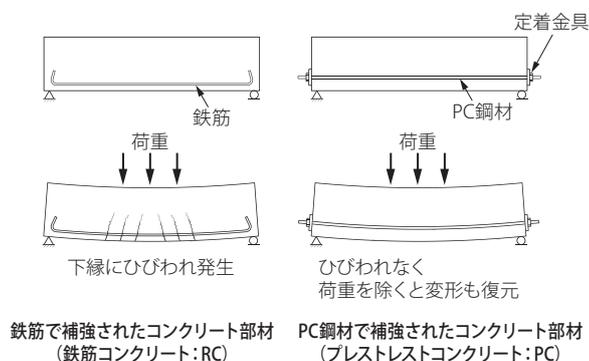


図2 PC構造と鉄筋コンクリート構造

形が進行したりすることから、プレストレスを長期に亘って持続させるためには、初期の製作段階で高い圧縮力が必要であり、結果としてPC鋼材には高い弾性限・降伏強度・引張強度が要求される。また、構造物の終局破壊状態での靱性確保の観点からPC鋼材自体が大きな塑性変形能を有すること、長期間プレストレスを持続させるためにリラクゼーション（ひずみ一定下での応力緩和）が小さいことも重要な特性である。

住友電工は昭和20年代後半からPC鋼材の製造を開始し、当時として高性能の太径鋼棒の製造に成功したことで、当時西ドイツ・ディビダーク社が開発した大規模PC橋の建設工法（片持ち張り出し架設工法）のライセンスを取得して日本への導入を図り、高度成長期のインフラの整備と共にPC鋼材関連事業を成長させてきた。成熟社会を迎えつつある今日、公共事業に対する厳しい意見が一部にあるものの、PC技術が電力や情報通信技術等と共に社会基盤を支える重要技術であることに変わりはない。本稿では、特に、PC構造の今日的課題の解決のために当社が取り組んできた高機能PC鋼材関連の開発を紹介したい。

## 2. 内部充填型エポキシ樹脂被覆PCストランド

PC鋼材は、従来からコンクリート部材に埋設される形で鋼製ダクトの中に配置され、緊張力が付与された状態で固定され、その後ダクトとの隙間にグラウトと呼ばれるセメントミルクを充填する形で使用されてきた。この方式はPC構造の基本形式として現在も主流で、1940年代後半にPC技術が実現してからこの点には基本的に大きな変化がない。つまり、PC鋼材は引張強度1,860MPaクラスの高強度鋼材を緊張状態で使用するにもかかわらず、鋼材の長期的な防食を工事現場で注入されるグラウトのみに頼ってきたことになる。グラウトによる防食は鋼材表面を強アルカリ環境で保護し空隙を充填する安価な方法であり多くのケースで有効に使用されてきたが、工事現場での熟練技術が必要で、施工時の環境条件やPC鋼材の配置形状によっては空隙が生じやすいといった課題があった。また、新し

い構造形式である斜張橋の登場や、塩害<sup>\*1</sup>問題、不適切なグラウト注入作業によるPC鋼材の腐食・破断問題、さらには英国でのPC橋の落橋問題等で世界的にPC鋼材の防食に対する問題意識が高まることとなり、これらを背景に開発されたのが内部充填型エポキシ樹脂被覆（以下ECF (Epoxy Coated & Filled)）ストランドである（写真1）。

米国で開発された当初はストランド外周面のみの塗装であったが、当社が日本に技術導入する際にストランドを構成する素線内部にもエポキシを充填するタイプに改善された。当社は塗料メーカーとの共同開発によって高強度・高延性のエポキシパウダーを開発し、十分な耐久性を有する静電粉体塗装による安定した長尺品の生産技術、全長の膜厚計測技術等による品質保証システムを確立し、定着性能を考慮して塗膜厚さ0.4mm～1.2mmの独自規格を設定した。同時にECFストランドの端部を固定する定着くさびを含む固定金具（以下定着体と称する）を開発している。これらが最初に本格適用されたのが西湘バイパスの小田原ブルーウェイブリッジの斜張ケーブルである（写真2）。ECFストランドの有する高い耐食性と共に同ストランドを多本数束ねたケーブルの定着体（口絵写真）を含めたケーブル系全体の疲労特性が評価されて採用に至ったものである。

その後、ECFストランドは、外ケーブルと呼ばれる新しい形式のPC構造の出現によってその適用範囲が大きく広がって今日に至っている（写真3）。



写真2 ECFストランドが最初に適用された小田原ブルーウェイブリッジ（写真提供：三井住友建設㈱）と開発された定着くさび

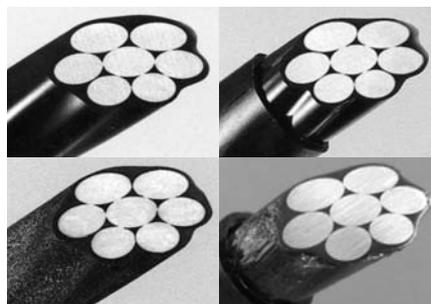


写真1 各種ECFストランド  
左上から時計回りに標準型、HDPE被覆型、  
HDPE被覆wax塗布型、付着型



写真3 橋梁の箱桁内に配置されたECFストランドを用いた外ケーブル

この形式はPC鋼材をコンクリートに埋設せずに、長期的な健全性を点検したり、必要に応じて交換したりすることを可能にしている。この形式での弱点となるケーブルの曲げ配置部でのフレッチング（接触圧力発生下における微動摩擦腐食）に対して内部充填と鋼材表面エポキシ樹脂被覆が有効に作用することを5,000kN級の実大PCケーブル疲労試験（写真4）によって検証したことや、この構造が点検性に優れる点が高く評価されたことで現在に至る迄、日本における外ケーブル形式のデファクトスタンダードとなっている。



写真4 5,000kN級外ケーブルの実大疲労試験  
（於：コベルコ科研尼崎事業所）

メーカー独自規格として使用されてきた本製品の規格については標準化戦略の一貫として、製品としての規格だけではなく設計・施工面も含めた規準化を土木学会に委託し、「エポキシ樹脂を用いた高性能PC鋼材を用いたプレストレストコンクリート設計施工指針（案）（2010年7月）」（写真5）が発行されるに至っている。なお、本製品は公共工事分野での浸透を図ることを目的に国内他メーカーにも製造ライセンス付与するとともに、米国現地法人SWPC社による製造も開始し、当社の専用くさびと共にPenobscot Narrows Bridge（メイン州）等の大規模橋梁にも適用されている（写真5）。

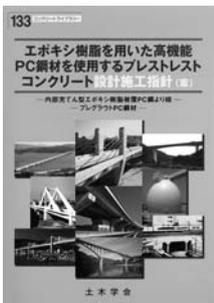


写真5 制定された土木学会指針と米国SWPC社製  
ECFストランドが用いられたPenobscot Narrows橋（メイン州）

### 3. プレグラウトPC鋼材

斜張ケーブルや外ケーブルに多用される工場加工型防食PC鋼材がECFストランドであるのに対し、コンクリートに埋設される形式ながら、グラウトを不要とし、かつ、周辺コンクリートと付着によって一体化できるものがプレグラウトPC鋼材である。

本製品は、未硬化のエポキシ樹脂をPC鋼材表面に塗布し、その外側にHDPEを連続押し出し成型したものである。緊張・定着完了後、エポキシ樹脂硬化後にコンクリートとの付着を高めるために外形を凹凸異形加工したものである（図3）。



図3 プレグラウトPC鋼材の構造

プレグラウトPC鋼材は、図4に示すように工事現場での工程を製品機能に組み込み、工程省略によって急速施工を可能にし、シームレスのHDPEシースとエポキシ樹脂によって防食面での信頼性を高めたところに特長がある。開発当初は熱硬化型のエポキシ樹脂が用いられたことで、コンクリート硬化時の水和熱による温度上昇の程度に応じて硬化剤濃度を調整した複数の樹脂を用いる必要があったことから管理が複雑で、その適用範囲も限定的であった。その後、住友電工研究部門と共同で高温域での硬化特性の温度依存性が低い湿気硬化型エポキシ樹脂を開発したことで広範囲に適用されることとなった。

#### 従来工法



#### プレグラウトPC鋼材を適用した工法



図4 プレグラウトPC鋼材を用いた場合と従来工法との工程比較

この湿気硬化型樹脂の硬化剤ケチミンは微量の水分により加水分解しケトンとアミンに分解される。この第一段階の反応は、温度依存性が低いことでコンクリートの水和反応熱によって高温になる部材への適用も可能となった(図5)。

標準的に使用される製品はストランドであるが、鋼棒タイプも開発され、羽田D滑走路の新設工事に大規模に適用されている。今後はプレグラウトPC鋼材の大容量化が課題であると考えている。

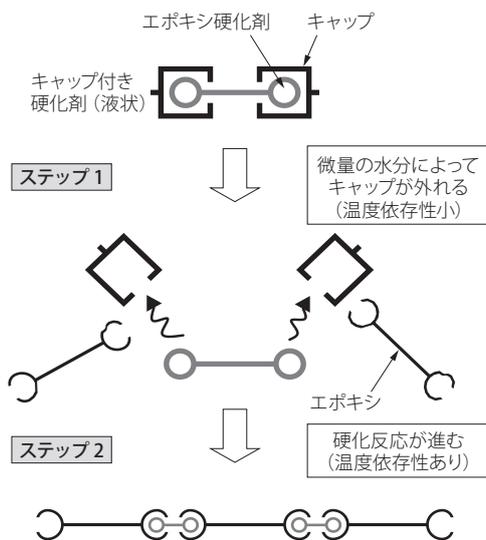


図5 湿気硬化型プレグラウトPC鋼材用樹脂の硬化反応の模式図

#### 4. 2,230MPa級高強度PCストランド

ECFストランドやプレグラウトPC鋼材等の信頼性の高い工場加工型防食PC鋼材がある程度浸透したと考えられた時点からは、現行のJIS規格に規定される強度を20%高めた2,230MPa級高強度ストランドの実用化に取り組んできました。高強度PCストランドは常時作用荷重も20%増となることで従来製品に比較して遅れ破壊感受性が高まることから、信頼性の高い工場加工型防食PC鋼材として適用されることが望ましいと考えられる。この開発は、当社が電気炉を保有していた時代に既に開発に目途をつけていたものの、 $\phi 12.7\text{mm}$ 細径ストランドまでの開発にとどまり、 $\phi 15.2\text{mm}$ までの太径化が図られていなかったことや、信頼性の高い工場加工型の防食PC鋼材が浸透していなかったことで製品化を見送っていた経緯がある。当社の保有する電気炉を停止した2002年に改めて新日本製鐵(株)(現新日鐵住金(株))と共同で本格的な実用化検討を進めてきたものである。

炭素量を1.0%前後まで高め、微量元素を添加する等の化学成分系の変更を行い、DLP処理<sup>※2</sup>によって圧延後の金属組織の微細化を図るとともに(写真6)、伸線・より線工

程を最適化して、従来製品と同等の伸び性能を確保しながら2,230MPa超の強度とした $\phi 15.2\text{mm}$ の超高強度PCストランドを実現している。これは実用化されたPCストランドとしては現在に至るまで世界最高強度のものである。この製品の最初の適用例は秋葉原のAKIBA Bridgeである(写真7)。ケーブル本数削減によって桁断面を薄く保ち、PC構造ながら鋼構造と同等のスレンダーな外観を呈している。専用の定着体の開発を同時に進めたことで早期の実用化につなげている。その後この製品はさらに太径化を進めて断面積が8%大きい $\phi 15.7\text{mm}$ PCストランドが実用化され、 $\phi 15.2\text{mm}$ JIS規格品比でPCストランド1本当たりの引張荷重を28%増加した製品が主流となっている。

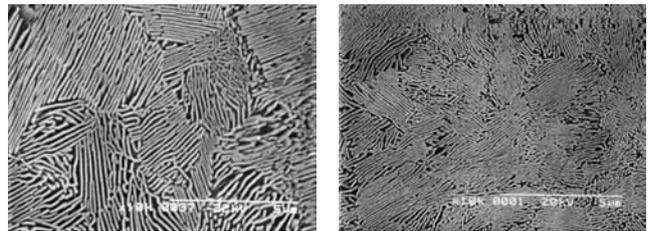


写真6 圧延後線材の金属組織の比較  
従来材(左)と2,230MPa級高強度ストランド用線材(右)

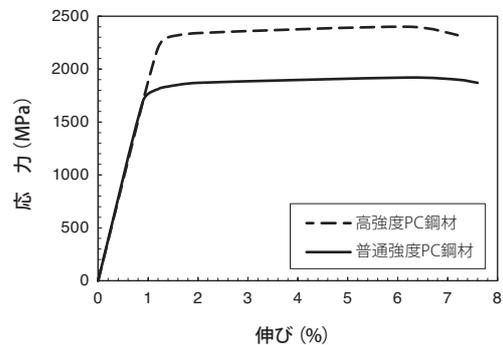


図6 高強度PCストランドとJIS規格B種ストランドの応力～ひずみ曲線の比較



写真7 AKIBA Bridge (秋葉原; 写真提供: 鹿島建設(株))

高強度PCストランドは鋼材の製造や運搬の過程では省資源・省エネルギーに、構造部材として用いられた場合には、桁断面のコンクリートボリュームの削減・軽量化（例えば図7）、さらには基礎、橋脚の断面減少につながることで、省資源、環境への負荷低減にも寄与する。また、現場作業の省力化にもなることで総合的にコスト削減を可能にするものである。ケーブル本数が減ることで維持点検の際の省力化、コスト削減も可能である。高強度PCストランドが桁内部の外ケーブルとして配置された例を写真8に示す。ケーブル本数が3割削減され、ケーブル配置が錯綜しないことで桁内の点検通路の確保が容易となり、点検性向上に寄与している。本製品についても、製品規格と設計・施工面を含めた規準制定をPC工学会に委託し、「高強度PC鋼材を用いたPC構造物の設計施工指針（2011年6月）」として発刊されている。

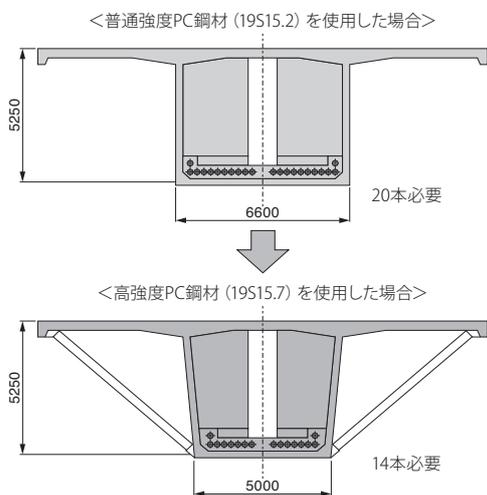


図7 高強度PCストランドを用いた橋梁の断面比較の一例



写真8 ECF高強度PCストランドによる外ケーブルを用いた橋梁の桁内状況とその適用指針（PC工学会）

## 5. システム部品・機器とアクセサリ製品群

PC鋼材は、通常それ単体ではその機能を発揮せず、定着体と呼ばれる端部固定金具と組み合わせ、専用の緊張装置（ジャッキやポンプ）が用意されて初めてプレストレスを導入するという本来の機能を発揮する。当社はDywidag-Systems International（以下DSI）社のライセンサーであることから、定着体のようなシステム製品については基本技術として同社のものを採用しているが国内の諸規準に合わせた仕様変更や改善、性能検証試験を実施している。定着体を装着した状態でのPCケーブルシステムの健全性については実大での引張試験（写真9）や定着体の耐力試験（写真10）の実施が土木学会や建築学会、PC技術に関する国際学会（fib）によって定められている。一例として2,230MPa級高強度PCストランド19本で構成される19S15.7、6,365kN級ケーブルの引張試験結果を図8に示す。これにより、本ケーブルシステムはPC鋼材本来の強度と共に十分な塑性変形能を発揮することが確認され実用に供されている。



写真9 実大引張試験（於：住友電工伊丹製作所）

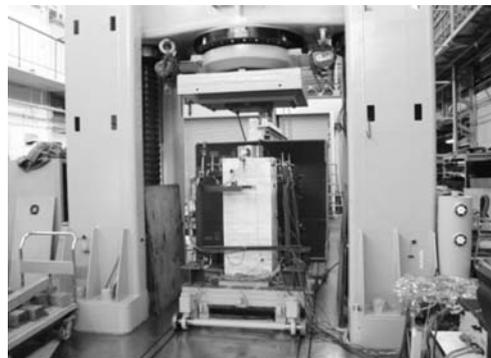


写真10 定着体の実大耐力試験（於：日本建築総合試験所）

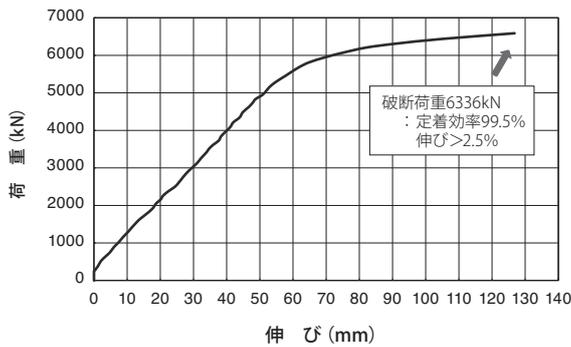


図8 19S15.7 (6,365kN級) ケーブルの実大引張試験の荷重～伸び曲線の一つ

PCケーブルに関する今日的なニーズとして、新設、既設を問わず、PC鋼材に導入された張力をモニタリングすることが挙げられる。この目的のために開発されたのが張力センサースマートセルである。スマートセルはネオジム系永久磁石を用い、PC鋼材の磁気特性が張力によって変化することを利用して張力の増減を検知するセンサーである(図9)。これを用いて構造物補強用PC鋼材の張力をモニターすることで構造物そのものの健全性を判断しようとする試みも始まっている。このようなシステム部品・機器とアクセサリ製品群の充実がPC技術のより広範な適用と信頼性向上を可能にするものである。

PC鋼材で応えていくことでインフラの信頼性向上・長寿命化につなげたいと考えている。

2007年米国ミネアポリスの大規模橋梁の崩壊や2012年の中央高速道笹子トンネル天井の崩落事故は、交通インフラの重要性和共に構造物の初期欠陥・経年劣化を察知するためのモニタリングの重要性を我々関係技術者に改めて突き付けたともいえる。過去に蓄積された社会基盤を、最新の成果を用いてより健全な状態で延命化を図ることは我々技術者の社会的使命でもある。高強度極細繊維(写真11)を用いた超高強度繊維補強コンクリート「サクセム®」<sup>※3</sup>の実用化もその取組みの一つで、PC技術の重要製品と位置づけている。今後、より多くの顧客や企業者、DSI社とのパートナーシップを深め、同僚や多くの後輩諸氏と共に普遍的な価値を有する製品・技術をより早く、より多く実用化することができれば技術者としてこれに勝る喜びはない。

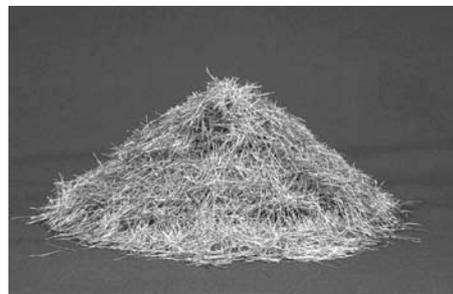


写真11 サクセム用高強度極細鋼繊維

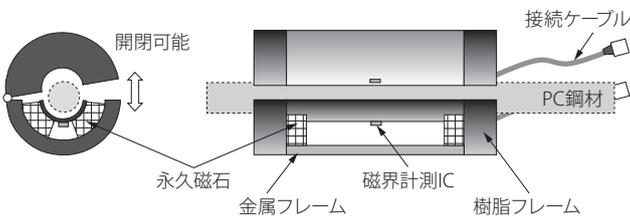


図9 張力センサー (SmART Cell®) の構造

## 6. 結 言

本稿では、インフラを支えるPC鋼材とそのシステム製品に関する取組みを振り返った。建設分野、特に公共工事に用いられる技術は実績が重視され、新技術が実用化されるまでに時間がかかることが多い。その中であって、新しい高機能PC鋼材の技術が近年急速にその比重を高めつつあることは、我々メーカーの努力のみならず、企業者、施工者(当社の直接的な顧客)側の良き理解者に恵まれたことによるところも大きく、感謝に耐えない。今後、国内ばかりではなく新興国での旺盛な新設需要に対しても高機能

## 用語集

### ※1 塩害

コンクリート中の塩化物イオンの作用により鉄筋やPC鋼材等が腐食し、コンクリート構造物に損傷を与える現象。沿岸部や融雪剤を撒く地域に多い。

### ※2 DLP

Direct in-line Patenting : 冷却媒体に鉛ではなく溶融塩を用いてパテント処理を行う直接熱処理法。

### ※3 サクセム

Super Quality Cementitious Material : 鹿島建設(株)、電気化学工業(株)、三井住友建設(株)、住友電工スチールワイヤー(株)の共同開発による超高強度繊維補強コンクリート。高い引張特性とじん性により鉄筋を不要にし、高い耐久性を有する。

参 考 文 献 -----

- (1) Y. Hoshino, M. Yamada, M. Nishino, "External Cable using Epoxy Coated Strands", fib Congress Osaka (2002)
- (2) Y. Hoshino, T. Kido et al., "Recent development of external tendon system using ultra high strength prestressing steel with epoxy coatings", fib Congress Washington (2010)
- (3) 山田真人、「PC鋼材技術の現状」、コンクリート工学、pp.3-8 (2009.11)
- (4) 白濱昭二、大西睦雄、名取耕一朗、「プレグラウトPC鋼材の開発」、プレストレストコンクリート、vol.48、No.2、pp.68-72 (2006)
- (5) 木戸俊朗、及川雅司、塚田和彦、「応力磁気効果を利用したPC鋼材用張力測定装置の開発と適用に向けた取り組み」、pp.355-356、資源・素材2010 (福岡)

-----  
執 筆 者

山田 真人 : シニアスペシャリスト  
住友電工スチールワイヤー(株)  
取締役PC技術部長



\* 主執筆者