



PC 鋼材の無線式自動緊張管理システム

Wireless Communication Based Automatic Tension Control System for Prestressing Steel Strands

正川 浩貴*
Hiroki Shokawa

荒木 正
Tadashi Araki

宮代 博文
Hirofumi Miyashiro

松原 喜之
Yoshiyuki Matsubara

西野 元庸
Motonobu Nishino

笠原 玲
Rei Kasahara

PC 鋼材の緊張作業は、コンクリート構造物へ適切なプレストレス力を導入する作業であり、構造物の耐久性に影響を及ぼす重要な工程である。この緊張作業において、従来は PC 鋼材の緊張機器を手動で操作し、アナログ式測定器を目視で読み取って記録するという作業が行われていた。そのため、作業に人手を要する、測定値において人の読み取り誤差が生じる、動作中の緊張機器に人が近づく必要があるといった課題があった。自動緊張管理システムは制御装置やデジタル式測定器を用いてこれらの作業を自動化する緊張機器であり、緊張作業の省人化、測定精度の向上、安全性の向上に寄与する。本稿では無線通信を採用することで通信ケーブルの配線を不要とした無線式自動緊張管理システムの概要ならびにその適用例と適用効果について報告する。

The tensioning process of prestressing steel strands involves introducing the required prestressing force into concrete structures, which is a critical step affecting the structure's durability. Traditionally, this process involved manual operation of tensioning equipment for prestressing steel strands and visual reading of analog gauges for recording, leading to challenges such as manual labor, measurement errors, and the need for proximity to tensioning equipment. The automatic tension control system automates these tasks using control devices and digital measuring instruments, contributing to reduced manual labor, enhanced accuracy, and improved safety. This paper provides an overview of the wireless automatic tension control system that eliminates the need for communication cable wiring, along with its application examples and benefits.

キーワード：PC 鋼材、自動化、無線通信、省人化、精度向上

1. 緒 言

プレストレストコンクリート^{*1}（以下、PC）業界においては、少子高齢化に伴う労働力人口減少への対応が喫緊の課題となっており、省人化が図れる技術が求められている。

PC 構造物がその性能を発揮するためには、緊張材である PC 鋼材に所定の緊張力が導入されることが重要である。そのため、コンクリート構造物への適切なプレストレス力の導入を行う PC 鋼材の緊張作業^{*2}は構造物の耐久性に影響する重要な工程である。しかしながら、この緊張作業において、従来は緊張機器を手動で操作し、アナログ式測定器を目視で読み取って記録するという作業が行われていた（図 1 (a)）。よって、作業に人手を要する、測定値において人の読み取り誤差が生じる、動作中の緊張機器に人が近づく必要があるといった課題があった。

これらの課題を解決し得る技術として、筆者らは PC 鋼材の無線式自動緊張管理システムを開発した（図 1 (b)）。本システムはパソコン、緊張機器の制御装置および測定器が無線通信でリンクし、PC 鋼材の緊張作業における緊張機器の操作、測定値の読み取りと記録を自動化することで省人化、測定精度の向上および安全性の向上が達成される。

本稿では本システムの概要ならびにその適用例と適用効果について報告する。

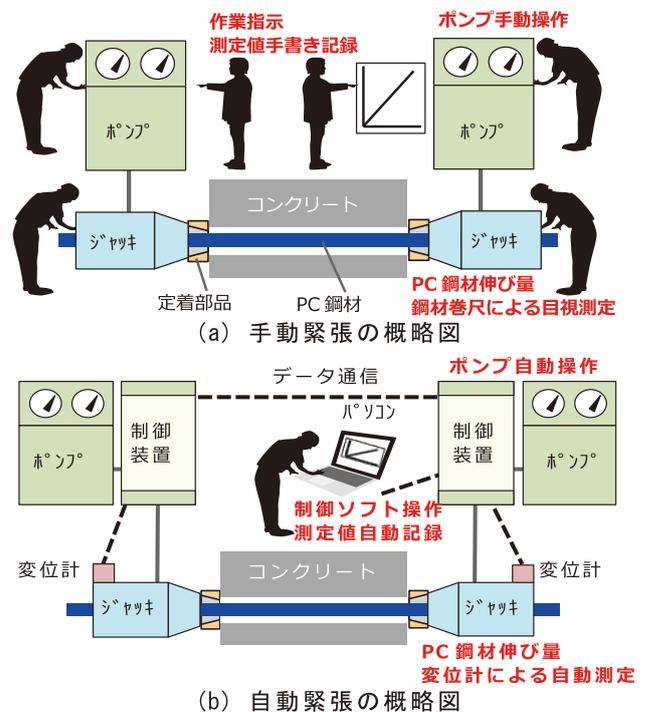


図 1 手動緊張と自動緊張の比較

2. 従来のPC鋼材の緊張管理方法

一般的にPC鋼材の緊張作業は定着部品^{*3}に緊張用の油圧ジャッキ（以下、ジャッキ）を取付けた後、ジャッキと接続される油圧ポンプ（以下、ポンプ）の油圧を手動で制御して行われる。その際、ジャッキ後端のシリンダーに内蔵されたくさびでPC鋼材を把持したままシリンダーが移動することによってPC鋼材が緊張される（図2 (a)）。PC鋼材への適切な緊張力導入を確認するため、①緊張力（ポンプの油圧から換算された荷重）に対する②PC鋼材の伸び量の管理範囲を予め計算し（図2 (b) ⁽¹⁾）、①と②の測定値がその範囲内であることを確認している（図2 (b) ⁽²⁾）。

この際、作業員6名が分担してアナログ油圧計を確認しながらのポンプ操作、数百トンもの高い緊張力が作用しているPC鋼材の端部に鋼製巻尺を近づけての伸び量測定、測定値の手書き記録を行っており、作業に人手を要する、測定値に人の読み取りによる測定誤差が生じる、動作中の緊張機器に人が近づく必要があるといった課題があった。

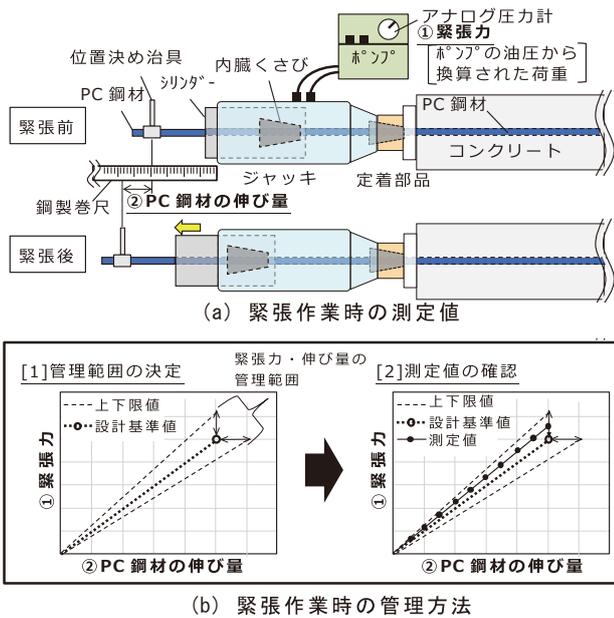


図2 緊張作業と管理の概要

3. PC鋼材の無線式自動緊張管理システム

3-1 システムの構成

本システムの概要図を図3に示す。本システムは、従来の手動緊張でも使用されるジャッキとポンプといった緊張機器に加え、システム操作を行うパソコン、油圧の制御と自動測定を行う制御装置、PC鋼材の伸び量を測定する変位計から構成される。制御装置とポンプおよび制御装置とジャッキは油圧ホースで接続され、パソコンと制御装置、

制御装置と変位計、および制御装置同士は無線通信で接続される。パソコンを操作することでジャッキと接続されるポンプの油圧を制御装置が自動で制御し、PC鋼材が緊張される。その際、制御装置が測定した油圧と変位計が測定した変位データはパソコンへ送信され、自動でパソコンに記録される。各機器の接続が無線であることから、有線接続の場合に必要な配線作業が不要となり、作業の省力化に寄与する。

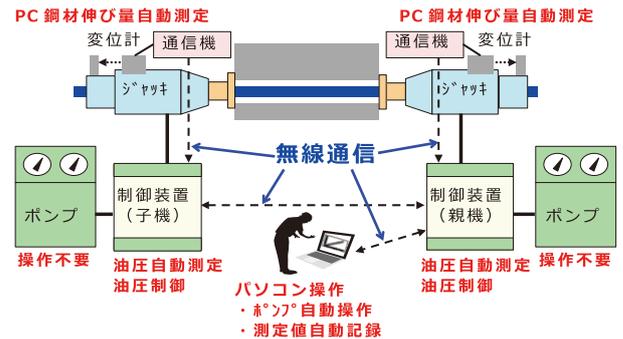


図3 無線式自動緊張管理システムの概要図

3-2 制御装置の概要

制御装置にはパソコンからの指令通りにポンプから送られた油をジャッキへ送りだすための油圧回路や制御ユニット、各機器との無線通信するための通信機器やアンテナが搭載されている。また、制御装置の内部に、制御装置に接続する電源ケーブル、パトランプ、ペンダントスイッチ等の保管が可能である。

本システムを用いて緊張作業を行う場合、ポンプ付近に作業員が不在となる。そのため、緊張作業中であることを



写真1 制御装置とポンプの外観

気づかずにジャッキ周辺に人が近づくリスクがある。そこで、制御装置とパトランプを接続し、ランプとブザーで緊張作業中であることを周囲に知らせる機能を設け、安全性の向上を図った（写真1）。

3-3 変位ユニットの概要

(1) 構成

変位ユニットは緊張によるPC鋼材の伸び量を測定し、制御装置に送信する装置で、PC鋼材を緊張するジャッキの近傍で使用する。緊張作業では多数のPC鋼材を緊張するため、容易に持ち運べる装置が必要で、通信、電源共にワイヤレスの小型軽量なものが望ましい。この要求に適合する電池で動作し、変位データを無線で送信する可搬型変位ユニットを開発した。現場でのトラブルに対応できるよう、バックアップ機能として有線通信および外部からの電源供給にも対応している。変位ユニットの構成図を図4に示す。

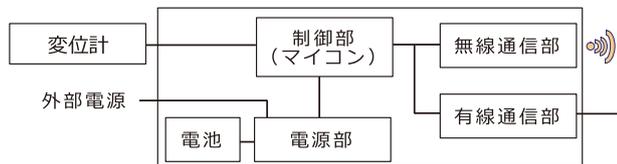


図4 変位ユニットの構成図

(2) 詳細

変位計には様々な種類があるが、ワイヤー型等の機械式は施工現場では砂塵や雨による動作不良の懸念があるため、非接触型を選択した。0.1mmの測定分解能があり、制御部との接続性が良いデジタル出力のレーザー型変位計を使用することとした。現場環境を考慮し、直射日光下での動

作試験で問題のない機種を選定した。制御部、無線通信部には当社グループ工場で多くの実績のあるものを用いた。変位計は電池動作が必須であるが、レーザー型変位計、無線通信は比較的消費電流が多く、長期間の動作は難しい。終業後に充電することを最低の条件とし、可搬性を損わないサイズと電池寿命のバランスを考慮した充電式電池を使用することとした。外部電源と電池の切替え、変位計との通信や有線通信部は本システムの仕様に合わせて新たに開発した。筐体は雨天時の使用にも支障がない防水型で、機械的に強靱な樹脂製のものとした。

3-4 無線通信の概要

パソコンと制御装置の無線通信には、広く普及しパソコンに標準搭載されている無線LANを、その他の無線通信には920MHz帯データ伝送用特定小電力規格に準拠したものを使用している。本規格のデータ伝送速度は無線LANに比べて遅いが、障害物による信号減衰が比較的少ない周波数帯である。変位データの通信量は少なく、施工現場には重機など様々な障害物があるため、本システムに適した方式である。本規格を使用した無線システムは図5のような構成で、親子制御装置間および変位ユニット-制御装置間通信の2系統がある。親子制御装置間は装置間の連携に必要なデータを送受信するものであり、変位ユニット-制御装置間通信では、変位データや変位ユニットの電池残量、内部温度等を変位ユニットから制御装置へ送信する。

制御装置は変位ユニットの対向となる受信機と装置間通信用の送受信機を有する。各無線装置はイーサネットで制御コンピュータに接続される。接続インターフェースは、工

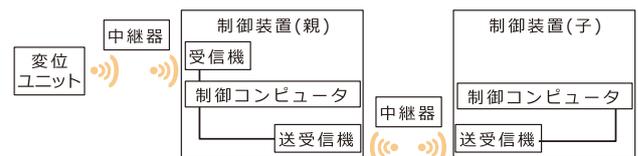


図5 無線システムの構成図

表1 変位ユニットの主な仕様

変位計	レーザー型(測定分解能0.1mm)
通信	920MHz帯特定小電力無線
電源	充電式電池、外部DC12V
サイズ	155 × 135 × 85 (mm) 約920g



写真2 変位ユニット



(a) 受信機



(b) 中継器

写真3 通信機

場設備で一般的なMODBUS方式である。変位ユニットとの通信では、制御コンピュータはマスター機器として、受信機から定期的に変位データや変位ユニットの状態情報を取得し、操作パソコンの画面に表示している。変位ユニットと受信機のペアリング等の各種設定は、グラフィカルなWEBインターフェースにより操作パソコンから実施することができる。無線通信状態が悪い場合は、オプションとして無線中継器が利用できる。この中継器は、通信チャンネルを設定するだけで、途中の通信経路を自動で探索して設定するため、施工現場でも容易に使用できる。例えば、通信距離が長い場合や複数のコンクリート壁がある橋梁内部で使用する場合でも中継器を用いることで無線通信が可能となる。

3-5 自動緊張管理

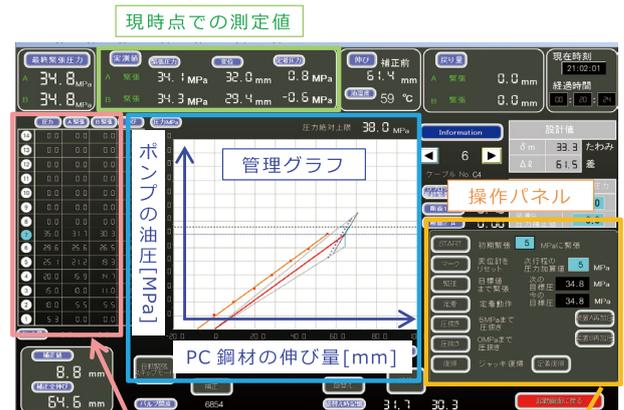
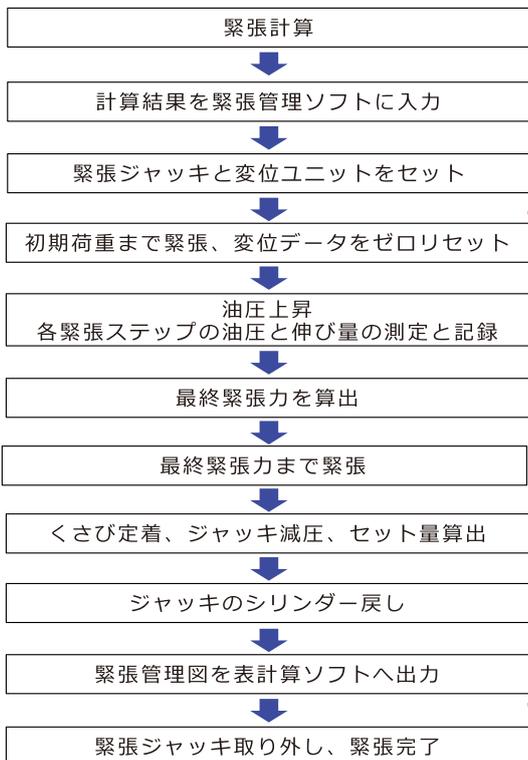
(1) 作業フロー

本システムを使用する場合の緊張管理の作業フローを図6に示す。事前に行った緊張計算の結果をパソコン内の緊張管理ソフトに入力し、ソフトで管理基準を設定することで管理範囲がソフト上のグラフに表示される。本システムを使用することでジャッキセット後の作業、すなわち初期荷重、伸び量の初期値設定、各緊張ステップでのポンプの油圧とPC鋼材の伸び量の測定と記録、最終緊張力の算出と最終緊張、くさびの定着、ジャッキの減圧、セット量の算出、ジャッキのシリンダー戻し等全てをパソコン操作のみで自動で行うことができる。緊張作業完了後、ソフト

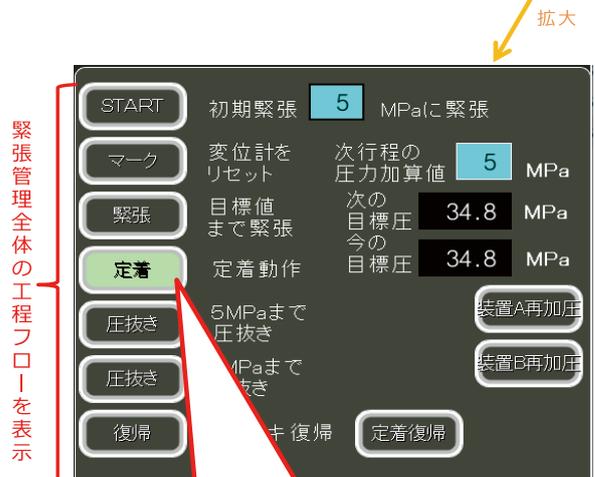
上に自動で作成された緊張管理図を表計算ソフトへ出力することで本システムの操作パソコン以外の端末でも閲覧可能である。

(2) ソフトウェアの特徴

本システムのソフトウェア画面を図7に示す。画面の上部に油圧や伸び量の現時点での測定値、画面中央に緊張管理グラフ、管理グラフの左に各緊張ステップでの油圧と伸び量の測定値の記録、管理グラフの右には操作パネル等が表示されている(図7(a))。自動緊張作業においては基本的にパソコン上で次に押すべきボタンは黄色点滅しているため、点滅しているボタンを順番に押ししていくことで初期荷重の緊張からジャッキのシリンダー戻しまでの一連の緊張作業が行える。そのため、特に数十本のPC鋼材を連続して緊張している場合、黄色点滅しているボタンを押すだけの流れ作業になり、パソコン操作者が緊張管理の一連の工程において現在どの作業を行っているかの意識が希薄になってしまうことで、周囲へ適切な情報伝達ができなくなるリスクが懸念される。この対策として、操作パネルの中で緊



(a) 自動緊張管理中の画面



(b) 操作パネル

図6 自動緊張管理システムの作業フロー

図7 ソフトウェアの画面

張作業の作業フロー順に操作ボタンを並べて全体のフローチャートを見える化し、現在どの工程を行っているの一目でわかるようにした (図7 (b))。これにより緊張作業全体の流れを俯瞰して緊張管理を行えるようになり、ヒューマンエラーの防止を図っている。

4. 実橋での適用

4-1 無線通信

実PC構造物 (箱桁橋、図8) の施工において、長さ100mのPC鋼材を緊張する際に本システムを使用した。制御装置2台は橋面に設置し、制御装置同士が約80m離れていたが、通信不良やデータの送受信の遅延はなかった。同距離でも制御装置間にクレーン等の障害物がある場合は通信が届かない場合もあったが、クレーンを迂回するように中継器を設置すると通信可能になり、通信不良やデータの送受信の遅延はなかった。また、変位ユニットは携帯電話の電波が届かない箱桁内に置いたが、制御装置と変位ユニット間の通信は問題なく行われ、通信不良やデータ送受信の遅延がなかった。無線通信を用いることで、配線作業を必要とせずに本システムを使用可能であることが実証された。

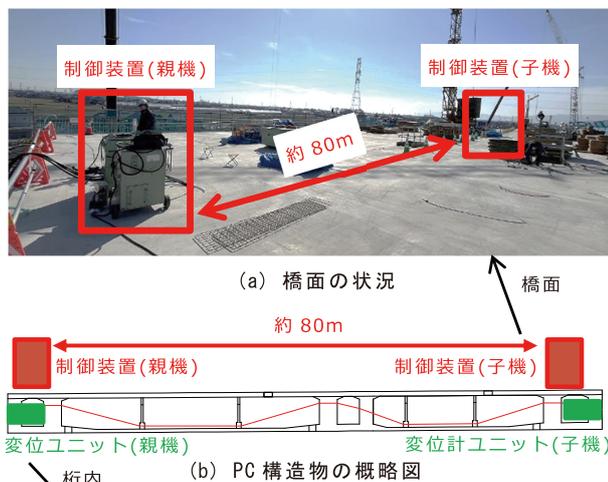


図8 実PC構造物の環境

4-2 省人化と安全性の向上

本システムを用いた緊張作業の状況を写真4に示す。従来の緊張作業では、管理者2名、ポンプの操作で作業員2名、ジャッキセットとPC鋼材の伸び量の測定で作業員2名の合計6名の人員が必要であったが、本システムを用いた場合は、パソコン操作の管理者1名、ジャッキセットの作業員2名の合計3名で作業が可能であり、3名の省人化が達成された。また、ジャッキセットの作業員2名が緊張作業中にPC鋼材の伸び量を測定する必要がなくなり、緊張作業中に作業員がジャッキに近づく必要がなくなったため、安全性の向上に繋がった。

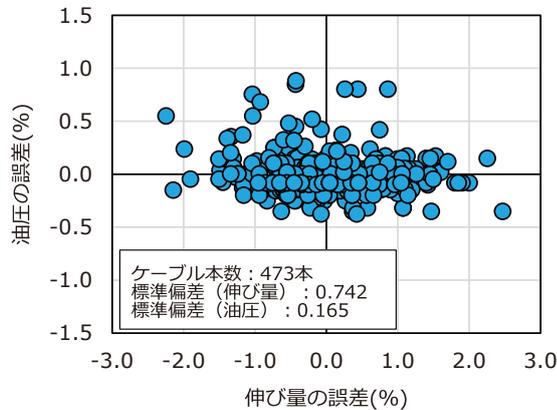


写真4 自動緊張作業の状況

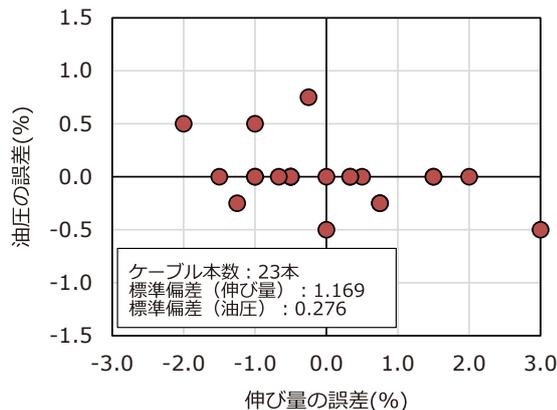
4-3 測定精度の向上

実PC構造物の施工において、本システムを使用し得られた緊張管理の結果と、別橋ではあるが同構造のPC橋にて従来の方法で緊張管理を行った結果を図9に示す。緊張管理は、ポンプの油圧とPC鋼材の伸び量の2つの指標で管理され、それぞれの指標の測定値の平均値に対する誤差を%で表示してグラフにプロットし、その分布からばらつきの大小を評価した。本システムを用いた場合は、伸び量の標準偏差が0.742、油圧の標準偏差が0.165であったのに対し、従来の手動緊張の場合は伸び量の標準偏差が1.169、油圧の標準偏差が0.276となり、いずれの指標の標準偏差

も本システムを用いた場合の方が小さくなった。この結果から、本システムを用いることで緊張管理の精度向上の効果が期待される。



(a) 自動緊張管理システムによる測定結果



(b) 手動緊張による測定結果

図9 測定値の分布比較

5. 結 言

PC鋼材の無線式自動緊張管理システムを開発し、PC橋梁工事へ適用され、その有効性を確認した。

無線式を開発したことで有線接続の場合に必要な配線作業が不要となり、作業の省力化に寄与した。自動化により緊張作業に要する人員を6名から3名に省人化できるとともに、測定精度や安全性の向上にもつながった。

6. 謝 辞

本システムの共同開発を行った(株)日本ピーエスの関係者の方々には緊張管理に関する情報提供ならびにフィールドテストの実施やフィードバック等において多大なご協力を頂いた。ここに深甚の謝意を表す。

用語集

※1 プレストレストコンクリート (PC)

PC鋼材を緊張材として用い、その緊張力によりコンクリートを予め圧縮させる（プレストレスを与える）ことで、ひび割れ発生やひび割れ幅を抑制するコンクリート構造である、道路橋や鉄道橋、円筒形タンク、建築構造物などに広く用いられている。

※2 PC鋼材の緊張作業

コンクリート内に配置されたPC鋼材を、ジャッキを使って緊張する作業。例えばJIS規格の汎用28.6mmPC鋼材の場合、約74トン緊張される。本作業時にはPC鋼材の緊張力と伸び量の測定により、適切なプレストレス力が導入されていることを確認する。

※3 定着部品

コンクリートに圧縮力を与えるための部品。緊張した状態のPC鋼材をくさびで固定（定着）し、PC鋼材が縮もうとする力をコンクリートに伝える機能を有する。

参考文献

- (1) 野上真彦、菅原外士男、桐原匠、岩崎真二郎、「全自動緊張管理システムによる緊張作業の省力化と緊張管理の精度向上」、第32回プレストレスとコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp.245-248 (2023)
- (2) 天谷公彦、久世右近、正川浩貴、笠原玲、「自動緊張管理システムの試験施工報告-無線通信を用いた自動緊張管理システム-」、プレレストコンクリート Vol.66 No.1、pp.30-33 (2024)

執 筆 者

正川 浩貴* : 特殊線事業部



荒木 正 : IoT 研究開発センター 主幹



宮代 博文 : 特殊線事業部 主査



松原 喜之 : 特殊線事業部 部長



西野 元庸 : 特殊線事業部 部長補佐



笠原 玲 : 特殊線事業部 グループ長



*主執筆者