

論文・報告

緊張管理の精度向上・省力化を目指して

～主ケーブル用の全自動緊張管理システムの開発～

Development of Automatic Tensioning Control and Management System

鈴木 聡 ^{*1}
SUZUKI Satoshi安彦 信吾 ^{*2}
ABIKO Shingo富永 貴雄 ^{*3}
TOMINAGA Takao今村 忠毅 ^{*4}
IMAMURA Tadaki

川田建設では、ポストテンション方式 PC 橋を対象に、現場での緊張作業および緊張管理を省力化する全自動緊張管理システムを開発した。このシステムは従来、緊張ジャッキの操作や緊張ジャッキの圧力・PC 鋼材の伸び量の測定、緊張管理グラフの作図など人為作業に頼っていた部分を自動化したシステムである。このシステムでは、緊張ジャッキをタブレットパソコンにより操作し、緊張ジャッキの圧力・PC 鋼材の伸び量を自動測定することができるため、緊張作業の省人化が可能で、緊張作業の安全性が向上する。また、緊張作業から緊張管理までをタブレットパソコンで行うことが可能で緊張管理の効率も向上する。本稿では、全自動緊張管理システムの開発を報告するとともに、実施工へ適用したので報告する。

キーワード：プレストレストコンクリート、プレストレス、緊張管理、省力化

1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下、PC）橋において、プレストレスは構造物の耐荷性能や耐久性能などの要求性能に影響を与える重要な要素であり、緊張管理は PC 構造物の施工において重要なプロセスである。

PC 橋の緊張管理は油圧ポンプの圧力示度および PC 鋼材の伸び量により行われる。油圧ポンプの圧力示度および PC 鋼材の伸び量により緊張管理を行う手法としては、部材に配置された PC 鋼材の本数や配置形状により 2 つの方法を使い分けている。一つは、引張力と伸び量を独立して管理する手法で、床版横締めや横桁横締めケーブル用で PC 鋼材配置が直線的な場合に用いる。もう一つは摩擦係数をパラメータとして管理する手法で、主桁に配置された主ケーブルのように曲げ上げ角度が大きく PC 鋼材とシース間の摩擦によるプレストレス力の損失が大きい場合に用いる。このように、緊張管理を行う手法は確立されているが、人為作業に頼っている部分が多かったため、数年前から PC 建協の各社で、作業時の安全性や測定精度、作業効率の向上を目的に緊張管理の ICT 化に取り組んできている。川田建設においても、油圧ポンプの圧力と PC 鋼材伸び量のデジタル測定や専用ソフトによる緊張管理や、前者の管理手法（床版横締め）

を対象として、ポンプ操作までを自動化した緊張管理システム¹⁾を開発しており、現場での採用実績を増やしている。

今回、新たに摩擦係数をパラメータとして管理する手法に対応した全自動緊張管理システムを開発し、実施工に適用したので報告する。

2. 主ケーブル用の全自動緊張管理システム

(1) 概要

主ケーブル用の全自動緊張管理システムの概要図を図 1 に、全自動緊張管理システムの構成表を表 1 に示す。本システムは、タブレットパソコン、制御装置、油圧ポンプ、緊張ジャッキで構成される。油圧ポンプと緊張ジャッキは定着具メーカー各社の油圧ポンプと緊張ジャッキを使用できるため、本システムは様々な定着工法に対応している。

制御装置には、電磁弁およびデジタル圧力計、無線 LAN ユニットなどが内蔵され、油圧ポンプと緊張ジャッキとは油圧ホースで、デジタル伸び計とは通信ケーブルでそれぞれ接続する。タブレットパソコンには、管理プログラムがインストールされており、制御装置と無線 LAN で通信し、緊張ジャッキの操作、油圧ポンプの圧力と PC 鋼材の伸び量の測定、および緊張管理図の作成を実施する。

*1 川田建設(株)技術本部技術部技術開発課 課長
*2 川田建設(株)東京支店工事事務課 総括工事長
*3 川田建設(株)東北支店工事事務課

*4 川田建設(株)技術本部技術部技術課 係長

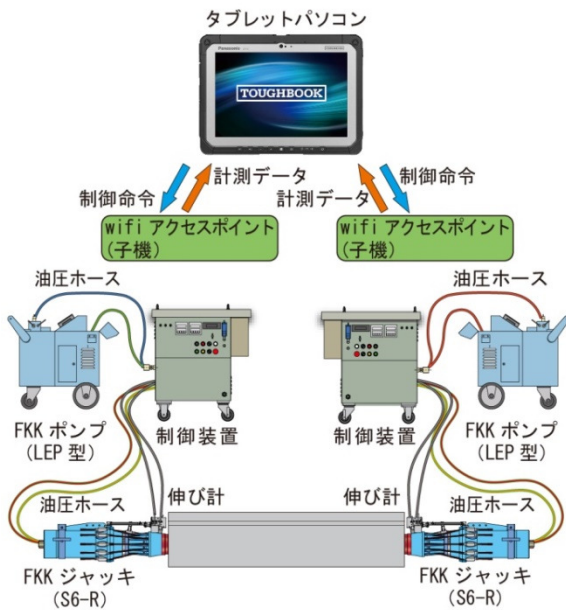


図 1 全自動緊張管理システムの概要図

表 1 全自動緊張管理システムの構成表

1 ユニット (両引き)	数量
1. 制御装置&制御システム	1 式
・ 制御装置 (790×550×920mm, 160kg) (消費電力: 4.0kW, 200V, 20A)	2 台
・ 無線LANユニット	1 式
・ 伸び計 (ジャッキ取付用)	2 台
・ 圧力計 (制御装置内蔵)	2 台
・ 戻りセンサー	2 台
2. 接続油圧ホース, 接続用コネクタ	2 式
3. タブレットパソコン (管理プログラム)	1 台
4. 伸び計ケーブル	2 本
5. 戻りセンサーケーブル	2 本

本システムでは、従来、人為作業に頼っていた緊張ジャッキ操作と油圧ポンプの圧力や PC 鋼材の伸び量測定をタブレットパソコンにより自動で行えるため、緊張ジャッキの操作や PC 鋼材伸び量測定のための要員が不要となり緊張作業の省人化が可能である。また、緊張中の緊張ジャッキに近づく必要がなく緊張作業の安全性も向上する。さらに、緊張作業から緊張管理、管理限界の修正も自動で行えるため緊張作業の効率化も可能である。

本システムの開発にあたり、はじめに橋長 40 m 程度の橋梁を対象として、動作確認や計測機器の確認を行った。定着工法および鋼材種類は、実績の多い、FKK フレシナー工法および 12S12.7 とした。

(2) 緊張管理および緊張作業プログラム

本緊張管理システムでは、摩擦係数をパラメータとした管理手法の緊張計算から緊張作業、管理限界の修正までを実施することが可能である(図 2)。本システムでは、緊張計算プログラム、緊張管理プログラムと緊張作業プログラムの 3 つのプログラムを使用する。

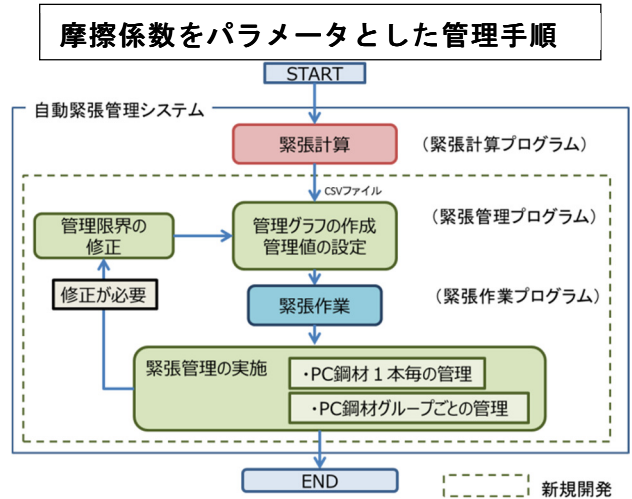
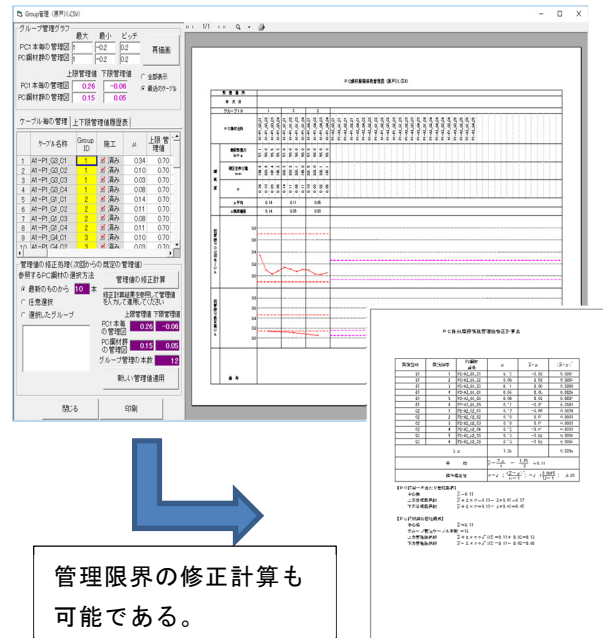


図 2 管理プログラムの概念図



管理限界の修正計算も可能である。

図 3 緊張管理プログラム

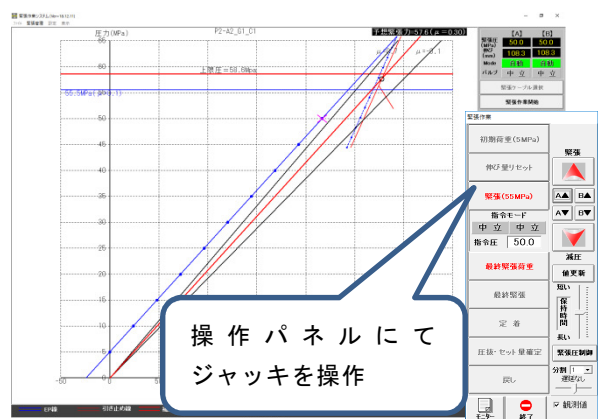


図 4 緊張作業プログラム

緊張計算プログラムは、従来からのプログラムを使用する。緊張管理プログラムは、緊張計算プログラムと連動し、緊張作業から管理グラフの作成、緊張管理、管理限界の修正まで一括管理できる（図3）。緊張作業プログラムは、現場での緊張作業を実施するプログラムである。緊張作業プログラムでは、ジャッキポンプの操作、伸びと圧力の測定を行い、1本ごとの緊張管理グラフを自動で作成することができる（図4）。なお、3つのプログラムは、データ打ち込みなどで生じるヒューマンエラーが生じないように、CSVファイルにてデータを共有している。

(3) 使用機材

本緊張管理システムに使用する制御装置は、表1に示すような機材で構成される。制御装置は寸法 790×550×920 mm であり、重量 160 kg である。制御装置は 200 V の電源を必要とし、油圧ポンプと同程度の消費電力（4.0 kW，200 V，20 A）である。

緊張作業時には、制御装置と油圧ポンプおよび緊張ジャッキを接続し、緊張ジャッキに伸び計と戻りセンサーを取り付ける。伸び計は PC 鋼材とワニ型クリップにて接続され、PC 鋼材の伸び量を測定する。戻りセン

サーはジャッキストロークの戻し終了を感知する。制御装置と油圧ポンプ、緊張ジャッキの接続を図5に示す。制御装置と油圧ポンプ、緊張ジャッキの接続をスムーズに行えるように、ホースカプラーと油圧ホースを色分けし接続箇所をわかりやすくした。次に、伸び計および戻りセンサーの取り付け状況を図6、図7に示す。伸び計は、ワンタッチで取り付けられるようにマグネット式の治具とし、狭隘な切り欠きにも取り付けられるように高さを抑えた。また、PC 鋼材と伸び計のワイヤーが平行になるように取り付け治具を工夫した（図6）。

(4) 通信機器

全自動緊張管理システムの通信距離は 60 m 程度であるが、通信機器間に障害物などがあると通信障害を起こす可能性がある。ここでは通信距離の設置上の注意点について述べる。Wi-Fi 親機と制御装置のアンテナ、Wi-Fi 親機とタブレットパソコンは見通せる位置に配置する必要がある（図8）。また、Wi-Fi 親機と制御装置のアンテナは、鉄製品上に直置きせず、栈木などに固定し高い位置に設置する必要がある。緊張作業前には、タブレットとの通信状態や動作を確認する。

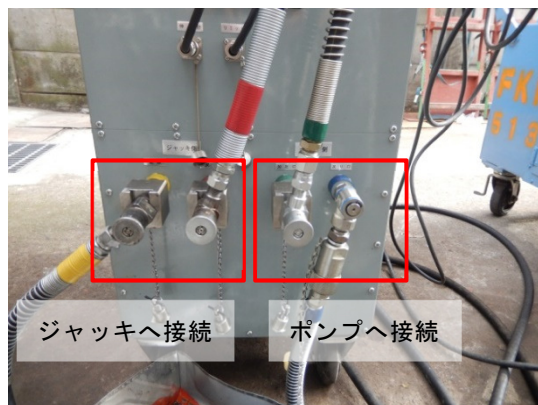


図5 制御装置と油圧機器の接続

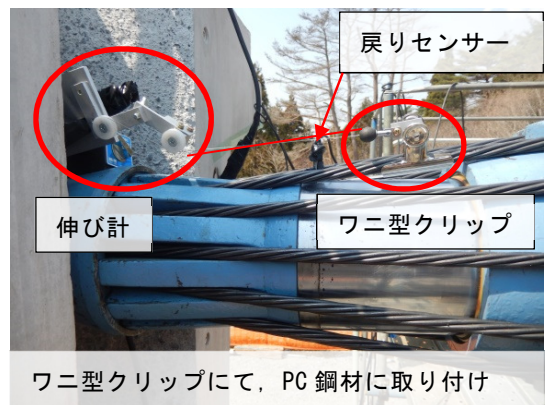


図7 伸び計の取り付け状況（側面）

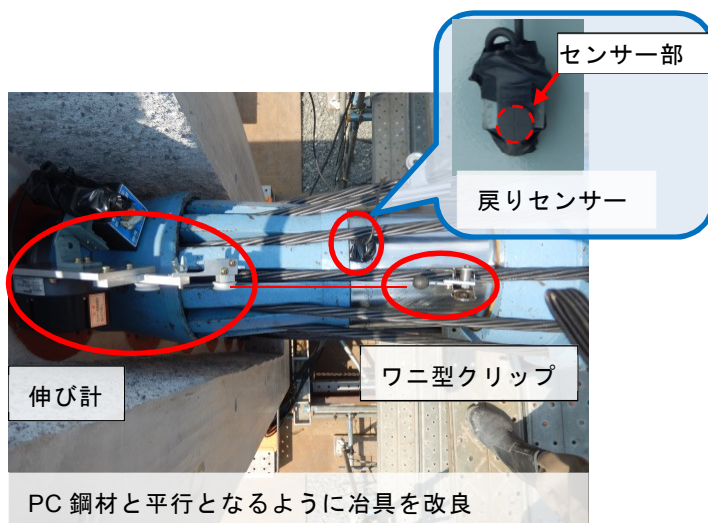


図6 伸び計の取り付け状況（上面）



図8 Wi-Fi アンテナの配置

3. 緊張試験

(1) 測定タイミングとジャッキの内部摩擦損失

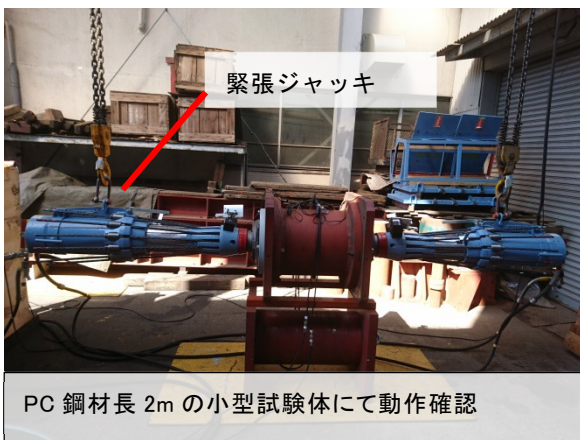
全自動緊張管理システムの油圧測定タイミングと内部ジャッキおよび定着具内部の摩擦損失²⁾を確認するため、小型試験体（図 9）にて緊張試験を実施した。緊張試験では 5.0 MPa から 5.0 MPa 刻みで 50 MPa まで加圧した。制御装置側の油圧とジャッキ側の油圧を測定した結果を図 10 に示す。制御装置側の油圧はいずれの圧力でも若干高い値で停止し、50 MPa では 1.0 MPa 程度高い値となった。また、制御装置側の油圧は加圧停止直後にジャッキ側の油圧よりも高くなるものの、停止数秒後には概ね等しくなった。この圧力変動は従来の目視による圧力測定の個人差の原因とも考えられ、PC 鋼材の長さ、ジャッキの受圧面積によっても異なると考えられる。そのため、油圧の測定タイミングを圧力一定となる測定タイミングに設定することとし、測定タイミングを加圧停止 3 秒後とした。ジャッキの内部摩擦損失は従来のジャッキや定着具を用いることや適切な測定タイミングとすることで制御装置からジャッキまでの油圧損失がなくなるため定着具メーカーの値を用いても問題ないと考えた。

(2) 実物大試験体による動作確認

次に、全自動緊張管理システムの動作確認および計測タイミングを確認するため、実物大試験体を実施した。実物大試験体は 500 mm×650 mm×20 m のコンクリート試験体であり（図 11）、PE シースを同心位置に直線配置されている。緊張試験は摩擦係数をパラメータとして管理する手法にて実施した。従来のスケールによる PC 鋼材の伸び量測定を行い、伸び計の動作確認を行った。

実物大緊張試験の圧力推移と確定圧力の結果を図 12 に示す。なお、圧力と伸びの測定タイミングは加圧終了後 3 秒とした。圧力は加圧停止後 0.1 から 0.5 MPa 程度変動したが、PC 鋼材の伸びは変動しなかった。また、緊張管理に用いる圧力は、圧力一定となったタイミングで測定できていることを確認できた（図 12）。また、測定圧力は、タブレットの指令圧力に対して、0.1 から 0.3 MPa 程度高い圧力であった。

ここで、全自動緊張管理システムでは摩擦係数や PC 鋼材の見かけのヤング係数を求める試験緊張を自動化していない。そのため、実物大実験にてタブレットの加圧ボタンを操作し、タブレットに表示される伸びを読み取り記録することで試験緊張にも使用できることを確認した。



PC 鋼材長 2m の小型試験体にて動作確認



20m の実物大試験体にて緊張試験を実施

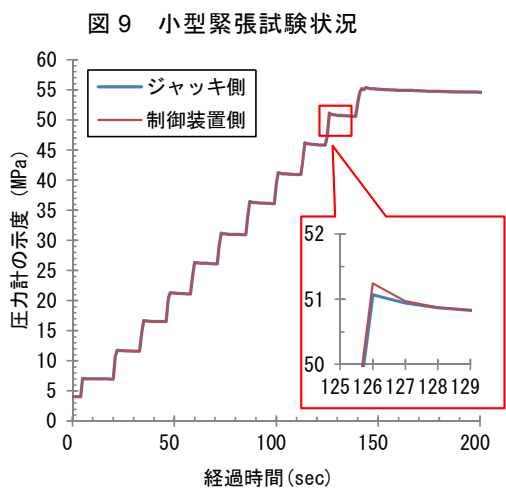


図 10 小型緊張試験結果

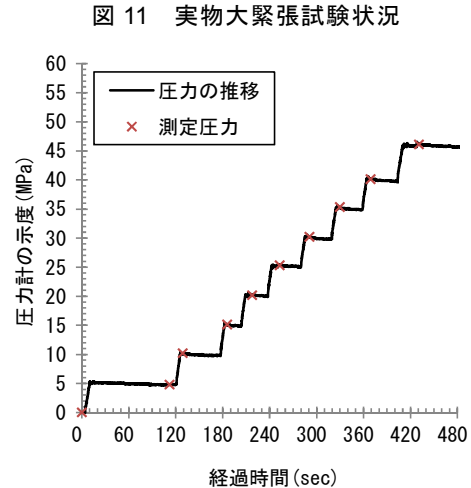


図 12 実物大の緊張試験結果

4. 登米沢橋上部工工事

(1) 橋梁概要

全自動緊張管理システムを登米沢橋上部工工事に採用した。登米沢橋の橋梁概要を以下に示す(図 13)。

(橋梁概要)

工事箇所:宮城県気仙沼市本吉町登米沢～風越地内

工期:2018年1月19日～2019年11月30日

発注者:国土交通省東北地方整備局仙台河川国道事務所

型式:PC3径間連結コンポT桁橋(4主桁)

橋長:115.000 m (36.800 m+37.000 m+36.800 m)

総幅員:12.680 m(有効幅員:左 5.565 m 右 5.565 m)

1径間の主桁は4本で、主桁には主ケーブル6本が配置されている。主ケーブル形状は、側径間では支間方向非対称、中央径間では支間方向対称である。

登米沢橋の施工ステップを図 14 に示す。登米沢橋では、セグメント桁の取卸し、セグメント桁調整・接合、PC鋼材挿入、PC鋼材緊張の順に主桁を組み立て、架設を行った。主桁の架設は、セグメント桁の取卸しから緊張まで1日、架設を1日の2日サイクルであった。

(2) キャリブレーション

緊張作業に先立ち、全自動緊張管理システムの圧力計および伸び計のキャリブレーションを行った。

制御装置の圧力計のキャリブレーションは、制御装置の圧力計(パソコンの表示)と制御装置外部に取り付けた検定器を比較することで行った(図 15)。検定器の圧力を正とし、制御装置の圧力計示度との差が許容差以内であることを確認した。なお、精度等級は従来のキャリブレーション同様に1.6級とした。伸び計の動作確認は測定点距離(200 mm)からジャッキストローク分まで移動し、移動量とデジタル指示の増分が一致していることを確認した(図 16)。

(3) 主桁組立ておよび緊張管理

登米沢橋の緊張状況を図 17 に示す。登米沢橋の緊張時は、全自動緊張管理システムでの緊張管理に加えて、従来の方法でPC鋼材伸び量を測定し、手書きによる緊張管理を実施した。プレキャストセグメント桁の緊張管理では、セグメントとセグメント間の短縮量をPC鋼材の伸び量より減じて緊張管理図を作成する。登米沢橋で

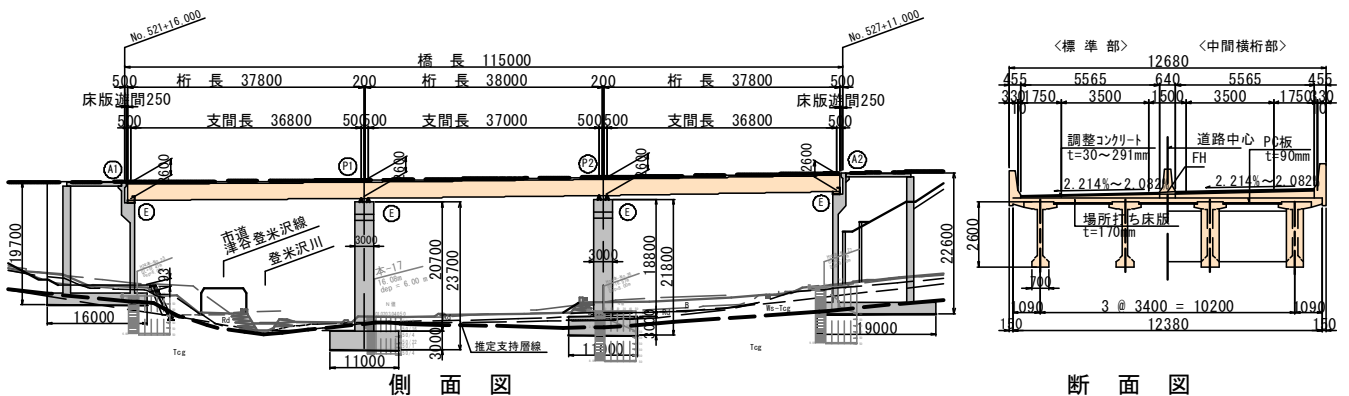


図 13 橋梁一般図

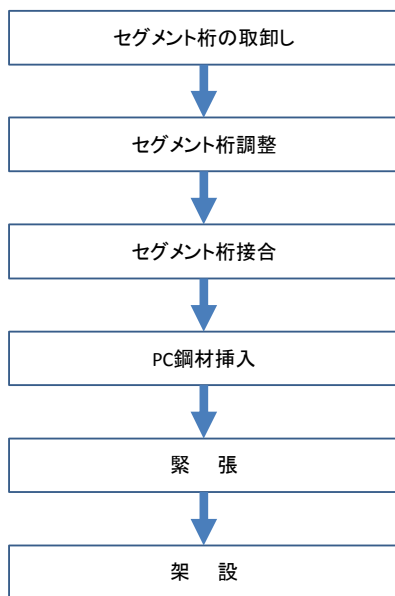


図 14 架設フロー図

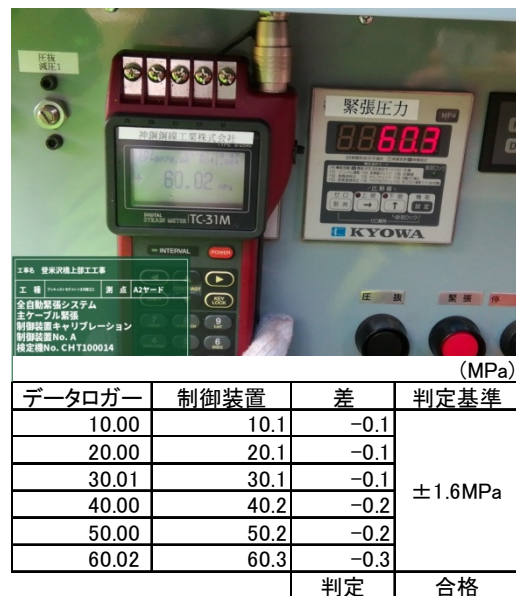


図 15 圧力計のキャリブレーション結果



移動量 (スケール)	伸び計 表示	増分	差
-	153.8	-	-
100	253.4	99.6	0.4
200	353.3	199.5	0.5
300	453.4	299.6	0.4

(mm)

図 16 伸び計の確認結果

はセグメント間の短縮量を、従来どおりスケールにより測定した。

緊張作業に先立ち、機材準備や通信機器の動作確認を行った。この作業はセグメント桁接合および PC 鋼材挿入時に行い、所要時間は 3 名で約 1 時間程度を要した。

緊張作業は 1 径間目に軽微な通信障害や伸び計の誤差を生じたが、通信確認の実施および伸び計の治具を改良することで、3 径間桁 12 本、PC 鋼材 72 本の緊張を無事に完了した。主桁 1 本 (PC 鋼材 6 本) の緊張作業時間は従来の緊張作業と同程度の約 90 分程度を要した。全自動緊張管理システムの緊張作業は、手書きによる管理図との確認を行いながらの緊張管理であったこともあ

るが、従来と同程度または若干早くなる。また、両引き緊張の場合、緊張作業に要する人員は従来、緊張ポンプ操作 2 名とジャッキセット・伸び量測定 4 名、計 6 名必要であるのに対して、全自動緊張管理システムでは緊張ジャッキセットの 4 名のみで、省人化可能である。その人員はジャッキセット後、接着剤の処理やサポートの点検などの作業にあたることができると考えられる。

次に、登米沢の摩擦係数の度数分布図を図 18 に示す。全自動緊張管理システムにて算出した摩擦係数の平均は 0.11 (標準偏差 0.05)、従来の手書きにより算出した摩擦係数の平均 0.13 (標準偏差 0.05) や参考文献 3) に示される摩擦係数と同程度であるが、従来法の方が若干大きい値であった(図 18)。摩擦係数のばらつきは自動緊張管理システムの方が若干よい結果であった。全自動緊張管理システムの精度については、今後の実績を積み重ね、さらに検証する予定である。また、図 18 のハッチング部は、セグメント間の短縮量調整を行った結果である。接合目地の測定はスケールによる測定であり、測定精度が劣ったものと推察される。なお、試算では、接合目地



図 17 登米沢橋の緊張状況

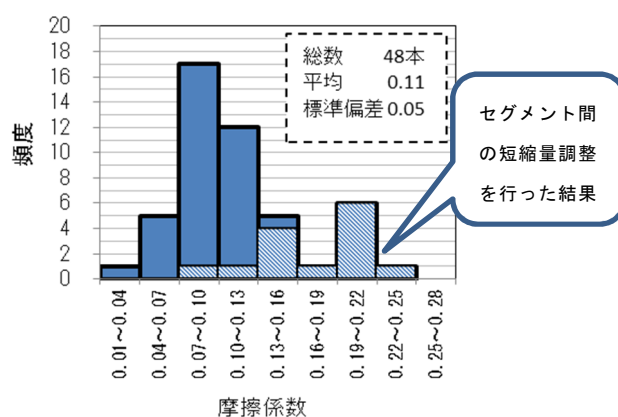


図 18 登米沢橋の摩擦係数分布 (P1-P2 径間, P2-A2 径間)

1 mm の違いで、摩擦係数 0.01~0.02 の違いが生じた。今後、緊張管理の精度をさらに高めるためには、セグメント間の短縮量のデジタル測定や引き寄せ鋼材によるセグメントの接合が必要と考えられる。

5.おわりに

全自動緊張管理システムの開発と実施工への適用について報告し、実現現場での省人化や効率化できることを示した。今回の検証は、FKK フレシネー工法 12S12.7 であったが、PC 鋼材種別や定着工法など、全自動緊張管理システムの適用範囲を拡げ、現場における緊張管理の省力化に努めたいと考える。

参考文献

- 1)今井平佳, 法貴裕, 鹿嶋圭介: プレストレス導入の精度向上と緊張管理の効率化~無線 LAN を用いた自動 PC 緊張管理システムの開発~, 川田技報, Vol.32, 2013.
- 2)プレストレスト・コンクリート建設業協会: プレストレストと緊張管理, p76, 2011.
- 3)プレストレストコンクリート工学会: PE シースを用いた PC 橋の設計施工指針 (案), IV-1, 2015.