

無線 LAN およびインターネット技術を活用した 橋梁施工管理のための遠隔計測システム

The telemetry system based on Internet technology with wireless LAN for execution management of bridge construction

岡林隆敏*, 吉村 徹**, 河村進***, 細川雅史****

Takatoshi Okabayashi, Toru Yoshimura, Shin-ichi Kawamura and Masafumi Hosokawa

*工博, 長崎大学教授, 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

**工修, オリエンタル建設, 福岡支店 (〒810-0001 福岡市中央区天神 4-2-31)

***工博, 長崎大学助手, 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

****長崎大学大学院, 生産科学研究科環境システム工学専攻 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

To utilize the measurement results for execution management or maintenance of bridge the measured data needs to be transfer to computers automatically. In this study, we developed the telemetry system with Internet and wireless LAN technology. This system can control remote measurement devices by WWW browser using HTTP and CGI. We apply this system to measure temperature and stress characteristics for execution management of bridge construction.

Key Words: bridge, measurement, monitoring, work control, Internet technology

キーワード: 橋梁, 計測, モニタリング, 施工管理, インターネット技術

1. はじめに

橋梁の動態観測は, 新設橋梁あるいは補修等の施工管理および既設橋梁の維持管理のために行われる。前者の目的は, 設計時に予測した構造特性, 振動特性を満足しているかを確認するものであり, 実験は比較的短期間で行われるが, 供用中の既設橋梁の計測は, 振動の原因となる交通荷重の変動や周辺環境の変動ために, 比較的長期間モニタリングされる場合が多い。橋梁の維持管理に関して行われる計測では, ひずみや変位と共に振動が計測される。近年, 橋梁の健全度評価を橋梁の経常的なひずみ, 変位, 振動等のモニタリングから診断する技術が確立されつつある¹⁾²⁾。また, 吊橋や斜張橋に代表される吊形式橋梁では, ケーブルの温度変化による伸張が桁の出来高や構造部材の応力に大きな影響を与える。そのため, 施工時に部材の温度および応力等の計測を行いその状況を把握し, 設計時の条件と比較し補正を行いながら, 工程を進めていく必要がある。

構造物の施工管理あるいは維持管理において, 計測結果を有効に活用するためには, 計測したデータを効率よく管理することが重要となる。これを実現するためには, 遠隔計測が必要であり, このために, 計測の無人化, 自動化, 実時間計測を実行できる計測システムを構成する必要がある。

近年パーソナルコンピュータの進化と共に計測技術も著しく進歩し, 小型で高性能な計測が行えるシステムの

開発が可能になってきた³⁾⁴⁾。さらに, インターネットの急速な普及により, これまで考えられなかった遠隔の信号転送が実現した⁵⁾。遠隔計測の技術革新は急速な勢いで進展しており, このような技術は数年後には, 日常的な環境になるものと思われる。本研究は, これらの計測技術およびインターネットの通信技術を橋梁の施工管理に応用したものである。

本論文では, 橋梁の施工管理を省力化するために, 計測現場とモニター側をインターネットの通信方式である TCP/IP で接続してイントラネットを構築し, インターネット上で用いられている WWW ブラウザを利用した遠隔計測システムを提案した。また, 橋梁の工事現場における地理的特性を考慮して, 現場内のネットワークとして無線 LAN を活用し, 遠隔計測システムを熊本県で建設中の (仮称) 佐敷大橋の現場計測に適用し, その効果の検証を行った。現場から離れた場所から, 計測結果をモニタリングするためのシステムを構築し, 架橋現場と長崎大学の間でモニタリング実験を行い, WWW ブラウザによる計測結果の表示および計測結果ファイルのファイル転送によるモニタリング結果から, 提案したシステムの有効性について検討した。

2. 遠隔計測のための通信技術

2.1 遠隔計測におけるデータ通信

近年, 通信技術の発達により, 遠隔データを転送する

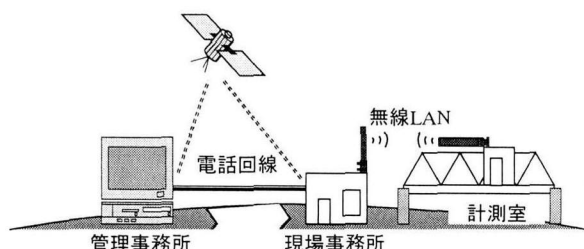


図-1 遠隔計測システムの概要

様々な技術が利用可能になってきた。遠隔モニタリングの概要を図-1 に示した。本論文は橋梁の工事現場における計測業務に、遠隔計測技術を適用するものである。遠隔計測におけるデータ通信は、図-2 に示すように、計測器-コンピュータ間の通信であるデータ集録と、コンピュータ-コンピュータ間の通信である遠隔通信とに分けられる。ここでは、それぞれに用いられる通信技術の特徴について述べ、次に本論文のシステムに採用した通信方式について述べる。

2.2 データ収録

計測器とパーソナルコンピュータとの間でのデータの授受には、RS-232C あるいは GPIB が使用される。RS-232C は、パーソナルコンピュータと周辺機器の通信手段として主に使用されているシリアルインターフェースで、計測機器との通信にも用いられている。しかし転送速度が低いこと、複数の機器の同時取り扱いが困難であるという欠点がある。一方、GPIB (IEEE-488) ⁹⁾ では、各機器に GPIB アドレスを割り当てて識別することにより、複数の計測機器を同時に接続、制御することができる。

2.3 遠隔通信

コンピュータ間の遠隔通信は、RS-232C によるケーブル接続でも実現可能であるが、最近ではインターネットで用いられている TCP/IP^{7),8)} を利用した通信が一般的になってきている。表-1 にコンピュータ間通信に用いられる各種通信方式をまとめている。

(1) LAN

比較的狭い範囲内での通信には LAN を使用することができる。電波を使用する無線 LAN は、通信距離 100m 程度の屋内用と、指向性の鋭い専用アンテナを使用した通信距離 数 km の長距離通信が可能な屋外用の製品がある。無線 LAN の現在の最大伝送速度は 11Mbps である⁹⁾。

(2) 公衆固定電話回線

遠隔地のコンピュータとの通信を行うためには、公衆電話回線が一般的に用いられる。アナログ電話回線とコンピュータとの接続にはモデムを用い、通信速度は最大 56kbps である。ISDN 回線を利用すると 64kbps のデジタル通信ができ、簡単な動画も転送可能である。

(3) 移動体通信

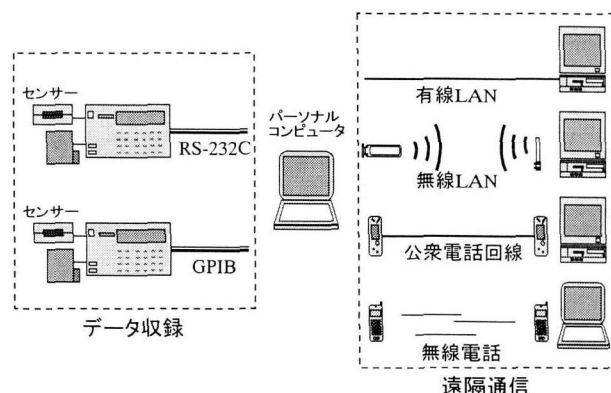


図-2 遠隔計測システムの構成

表-1 各種通信方式の特徴

	通信速度	通信エリア
有線 LAN	10~1000Mbps	数 km
無線 LAN	2~11Mbps	数 km
電話回線 (アナログ)	最大 56kbps	全国
電話回線 (ISDN)	64, 128kbps	全国
携帯電話	9.6, 14.4kbps	全国主要道路沿
PHS	32, 64kbps	都市部に限定
衛星携帯電話	4.8kbps	地球規模

軽量で導入コストの点でも利用しやすく、データ通信における伝送速度についても高速化が進み、遠隔計測における有効な通信手段の一つである。携帯電話、PHS、衛星携帯電話等があり、それぞれの特徴を考慮して使用する必要がある。最大通信速度は PHS の 64kbps である¹⁰⁾。

2.4 遠隔計測システムで採用した通信方式

本論文の遠隔計測システムでは、データロガーを使用して検出器の出力を記録し、データロガー内の計測データは GPIB で接続したパーソナルコンピュータによって、集録を行った。また計測現場と事務所のコンピュータ間の通信には、長距離用無線 LAN アンテナを利用して、現場内イントラネットを構築した。

3. WWW ブラウザによる遠隔計測システム

3.1 計測システムのプログラミング

本研究で構築した遠隔計測システムは、計測用コンピュータとしてノート型パソコン (OS : MS-Windows98) を用い、プログラミングはすべて、仮想計測器ソフトウェア LabVIEW (National Instruments 社製) を使用した。LabVIEW では、各種データ入力カード、GPIB カード等をサポートし、データ集録およびその後処理を行うためのプログラム群が豊富に用意されている^{11),12)}。さらに、LabVIEW でのインターネットアプリケーション開発のための追加ソフトウェアが Internet Developers Toolkit¹³⁾として提供されており、これを組み込むことで、特に WWW 関連アプリケーションを容易にプログラミング

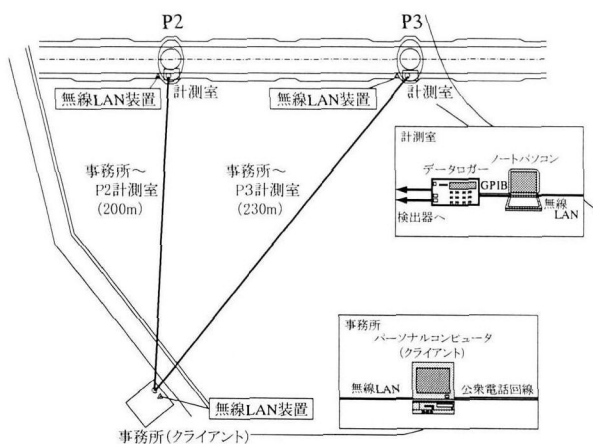


図-7 計測システムの配置

枠セット高を補正していく。また、斜材の緊張管理はPC桁橋のPC鋼材の張力管理と同様な方法で行うが、張力の経時変化量が大きいことから、安全性の確認のために、その経時挙動を把握しておく必要がある。

4.2 佐敷大橋の計測システム

(1) 計測システムの配置

主桁や斜材について温度及び張力の経時変化量を的確に把握するため、表-2のような項目の計測を行う。計測したデータは、コンピュータに取り込んで分析し、施工段階ごとの管理に反映させる。

佐敷大橋で構築した遠隔計測システムは、図-7に示す構成である。P2橋脚とP3橋脚上にそれぞれ計測室を設け、現場内イントラネットを構築するために、P2およびP3計測室と事務所の間に無線LANを設置した。計測室と事務所との間は約200m離れているが、見通しが良く無線LANを使用する環境としては良好である。図-8に使用した機器の写真を示す。

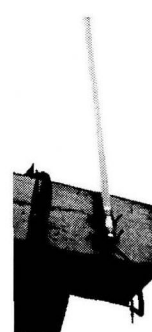
(2) 無線LANによる現場内ネットワーク

現場に設置した無線LANは、2.4GHzの周波数を使用し、直接スペクトラム拡散方式の無線LANユニットBR-200（アイコム製）を使用している。BR-200には、指向性アンテナと無指向性アンテナのシステムがあり、通信速度は2Mbps、通信距離は指向性アンテナ同士で約2km、無指向性アンテナ-指向性アンテナ間で約1km、無指向性アンテナ同士では約0.5kmである。

佐敷大橋の現場では、事務所に無指向性アンテナを設置し、P2、P3計測室に指向性アンテナを事務所の無指向性アンテナに向けて設置し、事務所と計測室との通信を確立している。現場内イントラネットにおける通信ではTCP/IPを使用した。また、計測データの漏洩を防ぐため、インターネットに接続可能な事務所内の他のコンピュータネットワークとは隔離している。

(3) データロガーによる自動計測

計測室内には、データロガーTDS-302（東京測器研究所製）を設置し、データロガーの内部タイマを使用して2時間間隔で自動的に計測を行った。計測データは、デ



a) 無線LAN装置(計測室) b) 無線LAN装置(事務所)



c) データロガーおよびデータ収録用ノートパソコン

図-8 計測システム写真

ータロガーの内部メモリに記録し、データロガーに蓄積された計測データは、GPIBを介してノート型パーソナルコンピュータに転送する。

4.3 遠隔計測プログラムの概要

計測室のノート型パソコンでは、LANカード及びGPIBカードを搭載し、LabVIEWにより作成した3種類のプログラムを使用して遠隔計測を可能にしている。

(1) データ表示プログラム

収録したデータを閲覧するためのフロントパネルを作成した。図-9のように画面の左側には、最新のデータを数値と桁の温度分布図として表示している。画面右側には橋梁の温度変化の影響を知るために、床版と斜材の温度グラフを、また斜材の張力とプレストレス導入量を確認するために、斜材端部に設置したロードセルと床版のひずみ計測結果のグラフを配置した。各グラフでは、過去24回分の計測結果の時間変化を示している。

(2) データ収録プログラム

GPIBで接続したデータロガーから計測データを取り込むプログラムの流れを図-10 a)に示す。データは1日ごとにデータをまとめたファイルを作成し、ハードディスクに保存する。また、事務所のコンピュータにそのコピーを保存する。

(3) データ表示用CGIプログラム

計測結果をブラウザに表示させるために使用するプログラムの流れを図-10 b)に示す。CGIプログラムはLabVIEWの追加ソフトウェアであるInternet

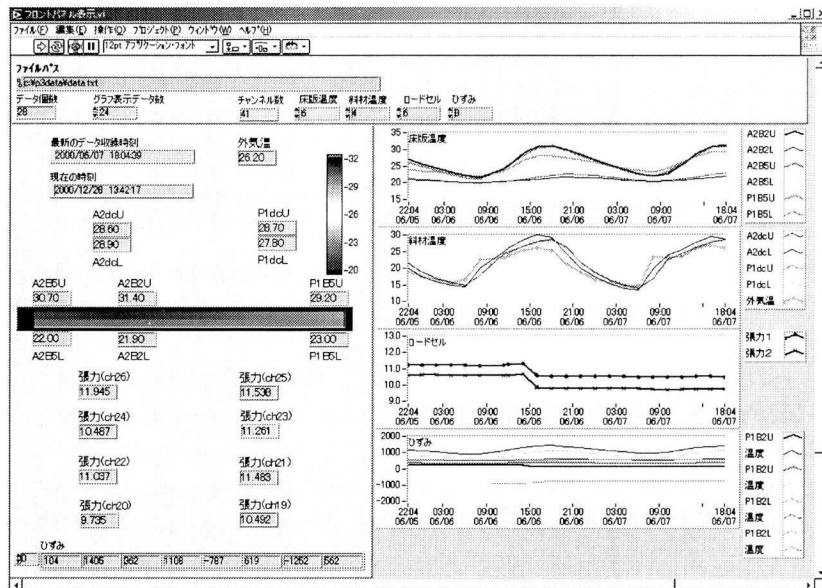
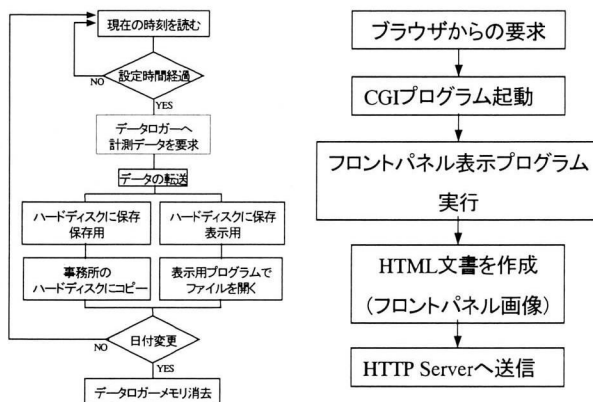


図-9 データ表示フロントパネル



a)データ収録プログラム b)CGI プログラム

図-10 計測及びCGIプログラムの流れ

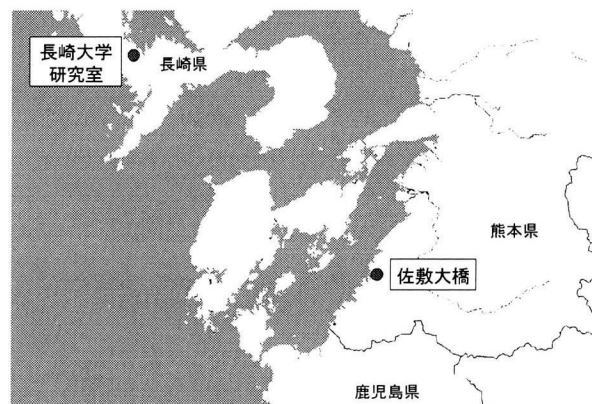


図-11 計測現場と監視位置

Developers Toolkitに含まれるCGI関連のプログラムを使って作成する。これはHTTPサーバー(G Web Server)と連動して動作し、ブラウザからの要求があった場合に実行される。

4.4 計測システム導入の効果

計測されたデータは、データ集録プログラムにより、自動的にファイルに保存される。ファイルのフォーマットは、計測日時と計測結果を含むタブ区切りテキスト形式であるため、Microsoft Excelなどの表計算ソフトを使用して容易に処理することができる。なお、自動作成されるファイルのサイズは、50チャンネル、2時間間隔の計測において1日当たり約6KBである。

WWWブラウザによる計測結果の表示は、特別な操作を必要とせず、現場内でイントラネット上のコンピュータから計測結果を簡単にチェックすることができる。このシステムの導入により、これまで計測室でデータ集録した後、計測データを持ち帰り、管理値と比較するとい

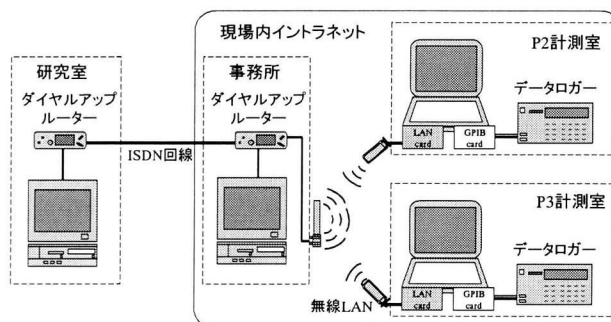


図-12 監視ネットワーク接続

った管理作業を大幅に低減し、施工管理業務の効率化を図ることができるようになった。また、計測データの管理作業の低減によって、より多くのデータ集録が可能になると考えられる。

5. 現場外からの遠隔モニタリングシステム

5.1 遠隔モニタリングシステムの構成

4章では現場イントラネット内部で、計測室から離れ

た場所から計測を行い、ネットワーク共有による計測データの活用を施工管理に利用するためのシステムを確立した。これを発展させ、現場から離れた場所から、計測結果をモニタリングするためのシステムを構築し、佐敷大橋現場と長崎大学の間でモニタリング実験を行った。図-11 に計測現場と監視場所の位置を示すように、直線距離にして約80km 離れている。

監視側として、長崎大学内に既存のネットワークから独立した新規のネットワークを構築した。図-12 に示すように、現場事務所と長崎大学の両方にダイヤルアップルーターを設置し、ISDN 回線 (INS ネット 64) を利用して、大学側、現場側双方からダイヤルアップによる LAN 間接続ができるようにした。使用したダイヤルアップルーターは、大学側 MN-128 SOHO PAL, 現場側 MN-128 SOHO SL11 (いずれも NTT-ME 製) である。双方のルーターに接続相手先の電話番号を登録しておき、発信者番号通知を利用してルーターに登録されていない電話からは接続を拒否するよう設定を行った。また、大学側、現場側双方のネットワークに接続されている全ての機器において、TCP/IP による通信ができるよう、デフォルト・ゲートウェイとして、それぞれのネットワーク上のダイヤルアップルーターを指定した。

以上の設定により、大学の研究室のコンピュータから現場内のコンピュータと同様に、P2 および P3 計測室のコンピュータと通信できるようになる。なお、監視場所のコンピュータから、計測結果ファイルを取得するために FTP を使うこととし、計測結果のファイルを一括管理している現場事務所のコンピュータには FTP サーバーを導入している。データが必要であれば研究室から現場にダイヤルアップ接続し、FTP により取り寄せることができる。

5.2 遠隔モニタリング結果

(1)データ転送速度

INS ネット 64 の回線速度は1チャンネル当り 64kbps であるが、1 契約で 2 チャンネル使うことができ最大 128kbps となる。しかし、現場内のイントラネットは、2Mbps の無線 LAN で構築されているので、LAN 間の回線速度は、現場内の速度の 1/16 である。そこで、FTP によるファイルの転送速度を測定した。

現場事務所のFTPサーバー上にある1MBのファイルを、監視側の長崎大学のコンピュータに転送するために要する時間は約2分であった。佐敷大橋のP2, P3 両計測室で計測される1ヶ月間の計測結果データのファイル容量は約370KB であり、不便を感じない転送速度を確保している。

図-13 に大学側からモニタリングした結果の一例を示している。現場事務所から計測を行った場合と同じく、WWW ブラウザ上に図-9 と同じ計測結果画面を表示できている。WWW ブラウザ上に表示するために送信されるファイルの総容量は、パネルの画像を含めて約40KB であり、計測状況の表示もストレス無く行われた。

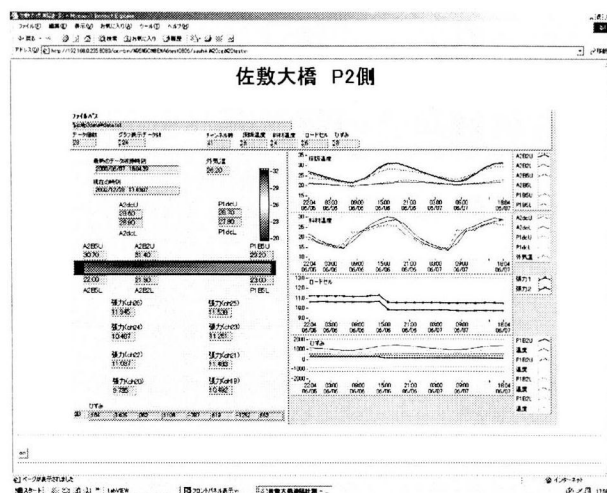


図-13 WWW ブラウザによる遠隔計測結果の表示

(2)遠隔モニタリングによる工事状況の確認

モニタリング結果から遠隔地の工事状況を把握するために、計測結果を FTP により現場事務所から取り寄せ検討した。図-14 は、2000 年 6 月の計測結果を用いて表計算ソフトで作成したグラフである。コンクリート床版上面、下面、斜材の温度変化を示したものが図-14 a) である。床版の上側と下側では温度の変化量が異なっていること、また、斜材の温度変化が床版の温度変化に比べて大きいことがわかる。図-14 b) は 8 ブロックの斜材張力の経時変化を示したものである。図中には、張出しブロックのコンクリート打設および斜材緊張の作業日を作業日報から記入している。この斜材の緊張作業は 6 月 6 日に行われ、約 12tf の張力が導入されている。その後、9 ブロックの型枠設置を経て、6 月 13 日にコンクリートの打設、6 月 20 日に 9 ブロックの斜材緊張が行われている。コンクリートの打設によって 8 ブロックの斜材の張力が増し、他の斜材の緊張作業によって、8 ブロックの斜材張力が減少していることがわかり、遠隔地の作業の進捗状況を把握することができる。これは WWW ブラウザで表示した図-13 の画面からも確認できる。

(3)計算値と実測値の比較検討

施工管理のために床版温度、斜材張力の計算値と実測値の比較検討を行った。図-14 c) には、コンクリート上床版、下床版および斜材の温度変化を示している。また、図中には、同時刻の気温データもプロットしている。本橋の設計では、上下床版の相対温度差を 5℃ と仮定している。上下床版に 3℃ の相対温度差が確認できており、計算条件の妥当性がある程度確認できる。また、床版に比べて変化の程度が大きい斜材は、気温の変化とほぼ同じ推移を示している。この傾向は、計測した全データにおいて同じであり、斜材の温度変化と気温変化は、相関性が高いことが確認できた。図-14 d) に、斜材張力の経時変化を示す。図は、主要施工段階における 8 ブロックの斜材張力の変化の推移を示したものである。図において、自重はコンクリート打設、プレストレスは桁内 P C 鋼材の緊張、ワーゲンはワーゲンの移動をそれぞれ示

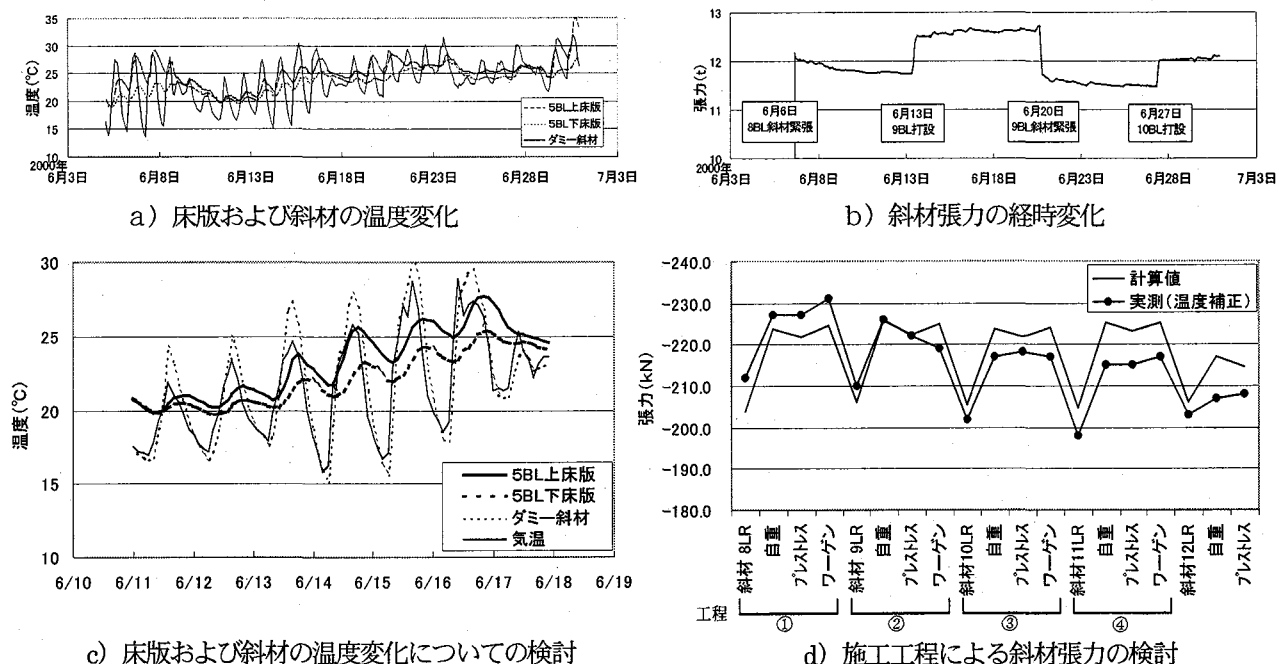


図-14 遠隔計測結果

しており、サイクル化された作業が進む毎に初期張力が減少していくのがわかる。また、実測値はほぼ計算値通りの経時挙動を示しており、設計条件および計算モデルの妥当性が確認できた。

6. まとめ

構造物の維持管理や施工管理を行う上で、計測の自動化、遠隔地の計測現場からの計測データの転送が重要となる。本論文では、橋梁の動態観測に焦点を絞り、遠隔計測システムを設計した。ここで提案した遠隔計測システムの特徴は、① GPIB による自動計測、② データ転送における無線 LAN の利用、③ 計測結果表示のための WWW ブラウザの使用、④ 外部接続のための ISDN 回線の設置である。

提案した遠隔計測システムを現在施工中の佐敷大橋の現場計測に適用した。計測項目は、床版および斜材の温度、床版のひずみ、斜材の張力であり、PC エクストラード橋の主要な施工管理項目である上げ越し管理と斜材の張力管理に利用した。さらに、現場から離れた場所から、計測結果をモニタリングするためのシステムを構築し、佐敷大橋現場と長崎大学の間でモニタリング実験を行った。

本論文で得られた成果を列挙すると、以下のようになる。

- (1) 橋梁の施工管理のための遠隔計測システムとして、計測現場内で長距離無線 LAN を使用してネットワークを構築することを提案した。
- (2) パーソナルコンピュータによる計測制御を行うた

めに、仮想計測器ソフトウェア LabVIEW を使用して GPIB による計測器制御プログラムを作成し、データロガーからのデータ収録を自動化するシステムを構築した。また、計測データは、市販の表計算ソフトで容易に処理することができるようにした。

- (3) LabVIEW の追加ソフトウェアである Internet Developers Toolkit の HTTP サーバー機能と CGI プログラムを使用し、WWW ベースの遠隔計測システムを構築した。これにより、現場内イントラネット上の WWW ブラウザで手軽に計測結果の表示が可能となった。特に、現場事務所から計測が可能になったことで作業が大幅に低減され、施工管理業務の効率化を図ることができるようになった。

- (4) ISDN 回線を利用して、遠隔地から橋梁工事現場の計測機器を操作し、計測結果を WWW ブラウザ上で表示することができる。さらに、必要に応じて計測結果ファイルを取り寄せ、遠隔地から工事の進捗状況を監視できるシステムが実現可能であることが確認された。

本遠隔計測システムの導入により、現場内での施工管理業務の効率化のみならず、施工会社の本社あるいは支店単位での、管轄する工事現場の施工状況の把握が可能である。これにより、本社側からの技術支援を適切にかつ円滑に行えるようになると考えられる。また、本計測システムは、橋梁の施工管理を主目的として設計しているが、維持管理システムにも適用可能であると考えている。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、鴻池・オリエンタル・佐藤建設工事共同事業体、(仮称)佐敷大橋橋梁工事事務所

所長松田英夫氏をはじめ職員の皆様に多大なるご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山本鎮男：ヘルスモニタリング，共立出版，1999.8.
- 2) 安部允，杉舘政雄，小芝明弘：鋼橋の点検・診断用システムと機器，橋梁と基礎，31巻8号，pp.173-179，1997.8.
- 3) 岡林隆敏，山森和博，田丸康博，吉村徹：可搬型振動計測システムによる構造物の振動特性推定，土木学会論文集，No.591/I-43，pp.327-337，1998.4.
- 4) 岡林隆敏，山森和博，讃岐康博，田村太郎：近接固有値を有する構造物の振動特性推定，土木学会論文集，No.633/I-49，pp.93-102，1999.10.
- 5) 河村進一，岡林隆敏，高木真一郎：移動体通信による橋梁振動の遠隔計測システムの開発，構造工学論文集 Vol.46A，pp.539-546，2000.3.
- 6) 岡村勉夫：IEEE-488(GPIB)とその応用，CQ 出版，1988.
- 7) 若林宏：TCP/IP ハンドブック，秀和システム，1999.1
- 8) 都丸敬介：ネットワークエンジニアのためのTCP/IP入門，東京電機大学出版局，1996.
- 9) 安井健治郎：自分でできる無線LAN入門，ディー・アート，1999.
- 10) 山内雪路：モバイルコンピュータのデータ通信，東京電機大学出版局，1998.
- 11) LabVIEW ユーザマニュアル，National Instruments，1998.
- 12) G プログラミングリファレンスマニュアル，National Instruments，1998.
- 13) Internet Developers Toolkit for G Reference Manual，National Instruments，1998.
- 14) 井上泰典：計測制御のためのLabVIEW グラフィックプログラミング入門，森北出版，1995.
- 15) 今田久仁生，松田英夫，永久信雄，吉村徹：(仮称)佐敷大橋の設計・施工，プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，Vol.9，pp.609～614，1999.10.

(2000年9月14日 受付)