

I-41

橋梁診断モニタリングにおける遠隔ワイヤレス計測システム

北見工大 正会員	三上修一	北見工大大学院 学生員	M. S. ラーマン
北見工大 フェロー	大島俊之	北見工大 正会員	山崎智之
		北見工大大学院 学生員	高田直幸

1. はじめに

構造物の機能を長年に渡って維持するためには、十分な維持管理体制が必要である。このため、長期間に渡る維持管理体制を考えたライフサイクルコストを考慮したモニタリング技術の確立が重要となっている¹⁾。これまで重要な構造物は完成直後の振動特性を求める振動試験を行い、さらに定期的点検や詳細点検などの際に振動測定が行われ、振動特性の経年変化を断片的に記録に残るデータを用いて構造物の劣化として予測する手法が取られている²⁾。また、地震時の重要な構造物の挙動や動態観測を行うために、加速度計、変位計などのセンサを備えた構造物が増える傾向にある。これらの構造物には GPS による動態観測やさらに維持管理に必要なセンサを取り付けインテリジェント化した構造物の実用化への試みが進められている。

本研究では、国内や諸外国の橋梁診断モニタリングに応用するための測定技術の調査結果をまとめる。さらにモニタリングのために有効な遠隔ワイヤレスシステムについて検討を行い、橋梁診断モニタリングのような長期間測定を継続する場合に重要となる安定した測定を可能にする新材料によるセンサ、特に光ファイバを用いた測定について検討する。最後に測定例として、光ファイバセンサによるひずみ・変位測定システムを用いて疲労亀裂の進展状況をモニタリングを行い、ワイヤレス化の測定上の問題点を検討する。

2. 診断モニタリングの現状

橋梁診断土木学会構造工学委員会では平成8年に「橋梁振動モニタリング研究小委員会」を設置し、「橋梁の健全度診断」、「構造特性の同定」、「橋梁の疲労診断」等のモニタリング技術を検討している。この中では現地振動実験によって固有振動特性を求め、測定結果を経年的に比較するこ

とによって損傷や劣化等による振動特性の変化を比較することをモニタリング技術としている。また橋梁診断モニタリングでは構造物と同程度の長期間にわたる測定が必要となるためセンサの寿命や測定中の雑音等の問題に強い新しいセンサとして光ファイバを用いた測定方法の研究が盛んである⁴⁾⁵⁾⁶⁾。一方光ファイバセンサ以外にも長期間構造物を監視するためのセンサ開発が行われている⁷⁾。しかし、これらのセンサを用いた長期間にわたる測定結果を報告している例はないようである。また、リモートモニタリングに必要なデータ収集方法を含めて報告されている研究は殆どない⁴⁾。

国外における診断モニタリングの現状を文献等によって調査した結果をまとめる²⁾³⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾。現在、診断モニタリングに関する研究は、アメリカ、カナダ、欧州では盛んに行われているが、韓国やタイ、香港等の ASEAN 諸国でも研究が盛んに行われている。ほとんどの研究は加速度計を用い橋梁の振動特性を測定している。また橋梁健全度モニタリングを目的とする橋梁には加速度計の他に光ファイバによる歪み測定のシステムが用いられている。

3. 遠隔ワイヤレス測定システム

1) ワイヤレス測定

本論文ではワイヤレス測定用通信手段の条件として次の2点について検討を行った。第一に距離の離れた観測点からデータを転送し、測定をモニタリングし測定装置の操作も可能な通信手段であること、第二に経済的であること。

ワイヤレス測定方法には無線装置を用いる方法と携帯電話を代表とする情報通信機器を用いる方法がある。前者はすでに述べたように電波法により取扱資格と許可が必要となり本論文で考えている一般的な測定には向かない。また、後者の

Remote Wireless Measurement System for Bridge Diagnosis Monitoring

By Shuichi Mikami, Toshiyuki Oshima, Muhammad Rahman S., Tomoyuki Yamazaki and Naoyuki Takada

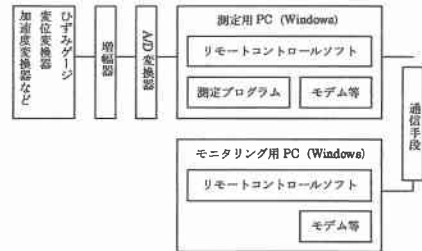
内、PHSは首都圏を中心にデータ通信速度の高速化が進み 64kbps の高速通信が可能となっているが、これまでのところサービスエリアが限定されている。次に通常のデジタル携帯電話の通信速度は 11200bps でデジタル圧縮した信号を送っているが、音声信号を精度良く伝達するために、9600bps で実データを送り残りはデータの訂正符号として使われている。このためこれ以上の通信速度は現在のところ実用化されていない。デジタル携帯電話サービスのなかにパケット送信に対応したサービスが 1997 年頃から開始している。これまでにデータ通信専用の方式としてサービスエリアを拡大している。また、最近 DoPa の通信速度が改善されて 64Kbps に対応することも報じられており有効な通信手段となりうる。この方式の特徴には次のようなことがある。

- 従量課金制：送受信したデータの量で利用料金を計算する料金は接続時間や距離に関係せず 1 パケット (128 バイト) 0.1 円～0.3 円である。
- インターネット経由の接続が簡単：インターネットに常時接続して測定を行うことが出来るため、簡単に測定器械との再接続が可能となる。
- 高速：最高 28.8kbps の通信速度である。

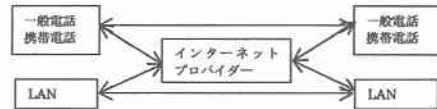
3) インターネットを利用した測定システム
インターネットを利用した測定にはインターネット網を利用してデータ転送や測定を効率よく行う方法と Web を使ってリアルタイムに測定結果を通報する方法がある。本論文前者のような利用を前提にシステム開発する。図 1 (a) は測定システムのブロック図である。測定用のパソコンで変位、加速度等のデータを収集し、測定機器の制御を行う。モニタリング用パソコンでは LAN や携帯電話を使った情報伝達方法を使って測定用パソコンからデータを取得するだけでなく、測定器の制御も可能にするためにリモートコントロールソフト (LAPLINK) を用いる。本論文で用いたワイヤレスシステムには測定用パソコンに携帯電話を接続してプロバイダを介してインターネットに接続し、プロバイダから IP アドレスを取得して LAN 接続の経路を確立している。

4. モニタリングのための新素材センサ

長期間安定した測定結果を得るためにセンサ



(a)測定システムブロック図



(b)情報伝達の関係

図1 モニタリングシステム

自体の耐久性と周辺環境の影響を受けづらいたことが必要である。長期間測定を続ける場合には耐久性以外にセンサの取り付け方法が問題となる。センサの設置方法については疲労試験のような繰り返し载荷を受ける条件でその性能について検討する必要がある。

1) 光ファイバセンサ

新素材として注目される材料のなかでも光ファイバ中を伝播するレーザ光線の性質を利用して幾つかの測定方法が提案されている。構造物の歪みを測定する方法として損失統合型 OTDR 法⁹⁾、FBG 法、EFPI 法がある。

EFPI (Extrinsic Fabry-Perot Interferometric) 法は図 2 に示すようなセンサ先端のギャップ (s) がある構造をしており、白色光が光ファイバ中を伝播しセンサ先端で特定波長 R1 だけが反射する。この時センサ部分が伸縮すると先端のギャップ長が変化して、図 2 のように反射波 R1 と R2 が反射し強度や到達時間の変化を周波数領域で測定してセンサ張付け位置の変位を測定する。この原理を使った測定機 AFSS-PC (F&S 社) の仕様は変位測定範囲 30～300 μm 、ひずみ測定範囲 10%、仕様は変位測定範囲 30～300 μm 、ひずみ測定範囲 10%、変位測定解像度 5nm、ひずみ解像度 1 μStrain で、最大 5Hz のサンプリング周期を持つ。使用した EFPI センサの測定範囲は歪みで 5000 μStrain まで測定可能である。

5. 光ファイバセンサを用いた疲労実験の モニタリング

1) 実験概要

モニタリングシステムは図3に示すとおりで、疲労载荷実験を行うサイトとモニタリングを行うサイトは大学内の専用ケーブルで LAN 接続されている。これとは別に、携帯電話によるワイヤレス接続を行ってリモートモニタリングを行った。疲労試験供試体は、図4に示すようなノッチを有する供試体で、ノッチ先端の角度 $\alpha=60^\circ$ の供試体 8-2 と $\alpha=45^\circ$ の供試体 7-2 の疲労試験を行い、長時間繰返し荷重を受けた場合のリモートモニタリング測定上の問題を検討することにする。モニタリング用に埋込型 FOS ゲージ (F&S 社: S-E-AFSS-01-T) をノッチ先端直下の 2mm の位置に歪みゲージ用の瞬間接着剤で固定した。また裏面の同じ位置に歪みゲージ (共和電業: KFG-5-120-C1) を貼り付けて FOS との比較を行う。ゲージの接着方法が測定精度に影響を与えるので、FOS センサヘッド部分全体を覆うように接着した。疲労試験の荷重振幅は 5kN~1kN、140000 サイクルまで载荷周期は 2Hz で、140000 サイクル以後は 1Hz で行った。この時の光ファイバを用いた絶対変位測定装置 (F&S 社製 AFSS-PC) のサンプリング間隔は 5Hz である。FOS と SGS の時間当たりの最大歪みをモニタリングするためにモニタリング監視プログラム Labasist をサイト側コンピュータで起動させておく、このプログラムでは設定された監視開始時刻と終了時刻内を一定間隔で最大値歪み、最小値歪み、測定時間をファイルに保存する。実験では载荷周期が 1Hz の時には 1 分間隔、2Hz の場合には 2 分間隔に設定している。この間にモニタリングしている歪みが管理値を超えるとアラームを出す設定になっている。ここで測定された最大歪みの変化をモニタリングサイトで観察する。またモニタリングサイトのディスプレイには FOS や SGS の歪みの時間変化が表示されているので、アラームが出た場合でもその内容をモニタリングサイトに居ながら表示を切り替えて目視で確認し次の措置を決定することが出来る。

2) 測定結果

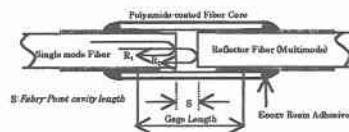


図2 EFPI センサの構造

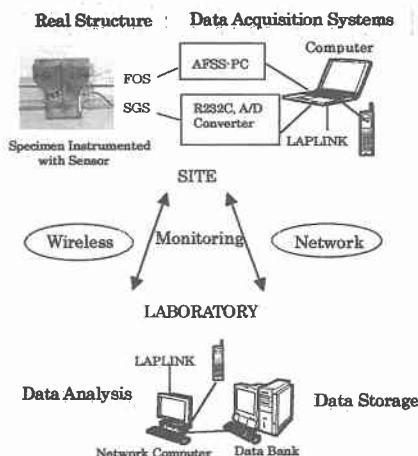


図3 リモートモニタリングシステム

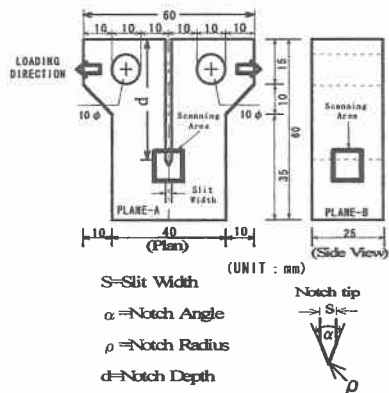


図4 Y型Vノッチ供試体

図5は供試体 7-2 の歪みのモニタリング結果である。疲労亀裂が進展してセンサに近づくにつれて歪みは大きくなる。歪みが $1500 \mu \varepsilon$ に達してからほぼ 10000 サイクルで疲労亀裂が進展してどちらのセンサも測定できなくなっている。その能力は

FOS も SGS のほぼ同程度である。SGS が早く測定できなくなったのは SGS のグリット幅が 1.3mm あり、FOS より早く疲労亀裂が到達するためであると考えられる。また、FOS の歪みが $1500 \mu \epsilon$ を超えて疲労亀裂が近づいたときの最大歪みが大きく変化するの、AFSS の測定画面に現れる絶対変位の測定値が大きく変化しているためである。もともとこの絶対変位測定装置は静的変形を測定する装置であるため、動的変形にあまり適していないことによる結果と考えられる。センサが測定限界を超えて切断する時までの傾きが、ノッチ先端の角度によって違いが見られる。つまり供試体 8-2 は供試体 7-2 に比べて疲労亀裂が急激にセンサに近づいている事を表している。これらの情報をモニタリングすることによって疲労亀裂発生箇所を管理することが可能であることが確認できた。

結 論

本論文では橋梁診断モニタリングの調査より橋梁のインテリジェント化の傾向が明らかになった。また、EFPI 光ファイバセンサは電気式歪みゲージとほぼ同程度の測定精度のあがることが確認されたが、長期間モニタリングを行う場合に接着方法の検討が必要であることがわかった。

情報通信機器の発展とインターネットの拡大を背景にした新しい遠隔測定システムを構築しその実用化に向けての幾つかのテストを行い検討した。以下にその結果をまとめることにする。

1. パケット通信による携帯電話をワイヤレス計測システムに使用した結果、画面操作性の面で若干問題があるがリモートでの測定装置コントロールが可能であることがわかった。
2. パケット通信が一定時間とぎれた場合に通信が自動的に切断されるので、擬似的にパケットを送って接続を維持する方法をとった。
3. 100 時間にわたる連続測定によってワイヤレス測定システムには傷害は発生しなかった。

本研究の一部は文部省科学研究補助金（代表山崎智之）の補助を受けて行ったものです。また、

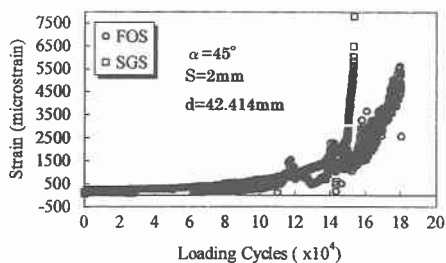


図5 FOS と SGS の歪み履歴の比較 (供試体 7-2)

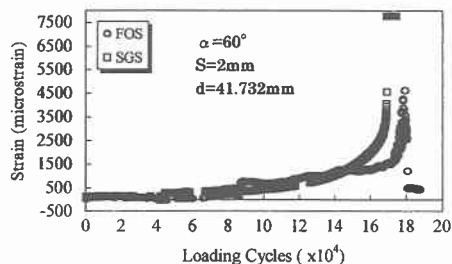


図6 FOS と SGS の歪み履歴の比較 (供試体 8-2)

ワイヤレスシステムの構築に専門的なアドバイスをいただいた北海道電子機器の柏谷昇氏、NTT DoCoMo の平間和夫氏にこの場を借りて感謝いたします。本研究の実験、解析には平野妙子君（現神出設計事務所）の多大なる協力がありましたここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 松本正信：モニタリング技術、橋梁振動コロキウム'97 論文集、土木学会、1997.10、pp.35-44.
- 2) Structural Health Monitoring 2000, Technomic Printing co., inc., 1999.
- 3) Structural Control Past, Present, and Future, Journal of Engineering Mechanics, ASCE Eng. Mech. Division, Vol.123, No.9, 1997.
- 4) 平間、氏平、今野、佐藤：連続衝撃測定センサー用データ転送システムの開発、土木学会北海道支部論文報告集、第 55 号(A)、1999.2、pp58-61.
- 5) Raphael, B. and Smith, I., Finding Right Model for Bridge Diagnosis, Artificial Intelligence in Structural Engineering, Computer Science, LNAI 1454, Springer, Heidelberg, pp. 308-319, 1998.
- 6) Prine, D. W., An Overview of Remote Monitoring, ASNT Spring Conference, March 1997, Texas, USA.
- 7) Chong, K. P., Health Monitoring of Civil Structures, Structural Health Monitoring, Technomic Publishing Co., pp. 339-350, 1998.
- 8) 倉島、佐藤：光ファイバを用いた構造物のひずみ分布計測、土木学会誌、Vol.82、1997.12、pp.18-20.