

1313 ピエゾケーブルを用いた橋梁の振動特性モニタリング センサ

正〔機〕 ○下井 信浩 (秋田県立大)

西條 雅博 (応用地質)

正〔機〕 間所 洋和 (秋田県立大)

Monitoring Sensor of Vibration Characteristics for the Bridge Using Piezoelectric Cable.

Nobuhiro SHIMOI and Hirokazu MADOKORO, Akita Pref. Univ. 84-4 Ebinokuchi Tsuchiya, Yurihonjo, Akita

Masahiro SAIJO, OYO Corporation,

Bridge pier joints occasionally become unstable due to deterioration after the great earthquake disaster. The purpose of this paper is to report on a measurement of vibration characteristics for the bridge using piezoelectric cable. The cable winds up the piezoelectric film in the surrounding electric wire. It also generate high voltage for amplifiers when the cyclic loading is applied, which does not require instruments because it has a piezoelectric. The output voltage was generated in proportion to the fluctuation of the vibration.

Keywords : Smart sensor, Health monitoring, Vibration characteristic, Piezoelectric sensor

1. 緒言

戦後の復興期に建設された多くの構造物は耐用年数を迎え危険にさらされている。1980年代の高度成長時代に建てられた膨大な建物や橋梁等は、セメントに混ぜられた砂が山砂でなく塩分を多く含んだ海砂を多用したため、鉄筋の腐食が早く構造物の寿命を更に短くしている現状がある¹⁾。

国外における事故事例を述べると、「ミネアポリス高速道路崩落事故(日本時間2007年8月2日)にミネソタ州セントポールと同州最大の都市ミネアポリス間のミシシッピ川に架っていた州間高速道路35W号線(I-35W)ミシシッピ川橋が崩落した事故がある。この事故では少なくとも60台の車が転落して9人死亡100人以上が負傷した報告がされている。

国内においても同様の問題があり、国土交通省の調査発表によると「コンクリートの劣化や鋼材の腐食が想定外に進み、崩落寸前の状態に陥った道路橋が全国に2008年4月の時点で121基ある」と公表している^{1),2)}。今後、大震災が発生すればさらに危険は増し、早急な対応が求められる社会問題であると考えられる。

本研究では、安心・安全のために橋梁等の健全性を知る実用的な計測技術の必要性を重視し、振動特性等を計測することが可能な簡易センサの開発を実施した。本センサは、従来の研究で使用されている高額で高レベルのヘルスマニタリング用センサとは異なる簡易的で安価であり実用的な構成と計測時の敷設が簡単である特徴を有

している。また、ピエゾ効果を利用しているので、計測時におけるセンサ用電源を必要としない利便性もある。安価なセンサは、橋梁と橋脚の接合部位に複数敷設することが可能になるため、センサの故障や計測したデータを比較することや統計処理等にも対応することが可能である。

本報では、このような問題を解決するために実用的な計測技術の必要性から簡易計測センサ開発の検討を実施し、基礎実験によるピエゾケーブルを用いたボルト装着方式の簡易スマートセンサの開発に至った。

2. 簡易スマートセンサの開発

2.1 計測装置の概要

計測システム構成において、Fig.1に示す振動計測ボルトセンサの構造は橋梁等の接合部に貫通してナットで締結するため、Fig.2に示すピエゾケーブル(80mm)を中空のウレタン樹脂(φ15mm×80mm)の中心に挿入後、接着固定してボルト形状(M20)のアダプタを外装とする固定器具を用いた。

ウレタン樹脂を使用することは、微少な振動に対してもピエゾケーブルの動きを大きくしてOFFセットを可能にする為であり、連続的な振動に応じた変形から電圧を出力する事が可能にされている。ピエゾケーブルは簡易マイコンボードに有線で接続可能にするため、φ5.6の被覆リード線4mを接続し絶縁処理を実施した。開発したセンサは、変形に応じて出力された電圧の大きさを測定して、この値に相対した橋梁接合部の変位や振動の大きさを簡易的に測定することが可能なように設計されている。マイコンのプログラムにおいては、計測値にある一

定の閾値を設けて測定データの量的緩和と必要な計測値の判別を可能にしている。計測装置の構成は、サンプリングの周波数と計測データ処理の関係から簡易マイコンボードに外部入力用のポート 4Ch (4 軸計測) として 4 本の簡易ひずみ計測ボルトからの出力を入力可能にしている。本センサの基本特性試験を実施するために、振動試験装置を用いた振幅によるセンサ出力の比較及び周波数応答等の試験を実施した。

2・2 計測器の設置と計測方法

従来、橋梁等の計測に用いられるセンサには橋梁の微小変位や微小振動等の計測が求められるため、高分解能で高精度の計測器が用いられていた^{3)~5)}。他方、簡易計測技術では、ピエゾケーブルを用いたひずみを計測するための構造ヘルスマonitoring方式が論文誌等に発表されている。概要は、市販されている鉄製の締結ボルトの中心にピエゾケーブルを挿入し接着固定後、端子コードをロガーに接続してボルトの軸方向ひずみによる電圧の変化を計測している。計測の目的は、ボルト軸方向のせん断応力やボルトのひずみを計測する⁷⁾。

また構造物センサとして、圧電ケーブルを鉄筋入りモルタルの試験体の長さに埋め込み、曲げ荷重を加えたことによる亀裂の検出が可能なセンサとして紹介されている⁸⁾。

使用実績のあるセンサの中に米国製の「トラフィックセンサ」があるが、ピエゾケーブルを道路に埋設して通過した車両の荷重による出力電圧の比較を用いて「通行車両の通過スピード」及び「積載重量の計測」に用いられている事例が存在する⁹⁾。これらのセンサは、本研究の測定目的である振動測定とは異なると考えられる。振動計測ボルトセンサの計測目的は、橋梁等における破断や崩壊が起きる前の極めて危険な振動や変形状態をセンサ自身がウレタンの弾性力から壊れることなく計測し、長期に渡る計測を可能にしている構造である。さらに、マイコンによる設定値から自動的に危険度を判断して警報を発信するセンサを知能化したシステムであることが大きな特徴である。

本センサは、計測時においてセンサ自身が変形することから発電効果が生じるピエゾケーブルを使用しているためセンサ本体の計測用電源を必要としない利点を有している⁶⁾。我々は、この特性に着目して橋梁等の接合部にかかる荷重による変位や振動等の大きさに応じた比例的な電圧出力を得ることが可能であると予想して高分解能センサと比較した検証を試みた。本センサの基本性能を計測する必要から、レーザ計測器を用いた一定振幅におけるひずみ計測ボルトセンサからの出力を比較するために Fig. 3 に示す振動試験器において振動台を一定の振幅で振動させてセンサに一定の荷重を加えた状態での出力特性について測定した。計測時は図中に示す高精度のレーザ変位計測器を用いて振動による変位を同時に測定した結果を Fig. 3(1) に示し、振動計測ボルトセンサからの出力は(2)に示す。簡易マイコンボードにおけるセンサの出力データは Zigbee 無線モジュールにより PC に送信され、データ収録と解析を実施した。

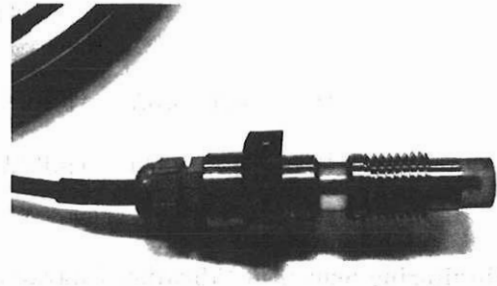


Fig.1 The Simple smart sensing bolt sensor

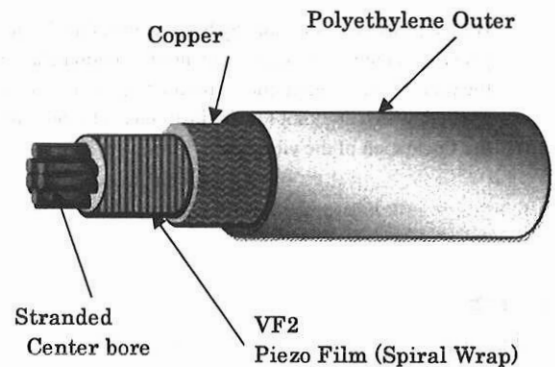


Fig.2 Piezoelectric Sensor⁶⁾

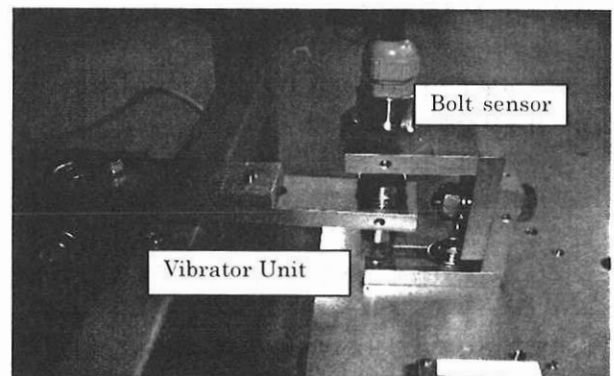
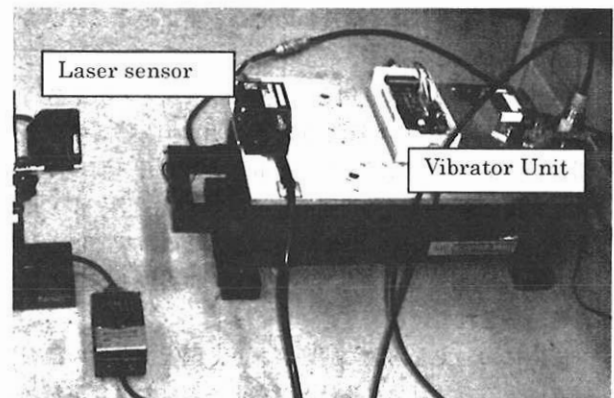


Fig.3 Experiment of vibration

3. 計測結果及び考察

3・1 性能比較

振動試験器において、振動台をレーザ変位計測器で振幅を測定しながら振幅 0.5 mm、周波数 2Hz の一定状態で均一に振動させ、簡易ひずみ計測ボルトセンサは振幅による変形がされる状態で測定した出力結果を Fig. 4 に示す。両センサの計測結果は同時にリアルタイムに記録した。また振動の変位測定は Fig. 3 の図中に示すレーザ変位計を用いて計測した。

計測結果は Fig. 4 の(1)に示すレーザ変位計が測定した振動試験器が一定レベルの振幅状態と(2)に示す振動計測ボルトセンサからの電圧による出力波形は同期した波形と認識された。この結果から、振動や変位の計測に関して振動計測ボルトセンサは、簡易型の計測器として使用が可能であると推察することができる。

次に、振動台をレーザ変位計で測定しながら 0.25mm, 0.5mm, 1mm の振幅を変化させ、各々の振幅における振動周波数 1 ～ 15Hz まで変化させた時の振動計測ボルトセンサからの出力を測定した結果を Fig. 5 に示す。結果から負荷周波数が大きく変化するのに従い振動計測ボルトセンサからの出力電圧も比例的に大きく変化する、振幅の大きさにも比例していることが証明されていると思われる。つまり、振幅の大きさによる周波数とセンサ出力の関係が得られていると認められる。

3・2 考察

これらの Fig. 4, Fig. 5 の測定結果を用いてセンサ出力と振幅の関係を簡易式で求めると以下の(1), (2)式で表すことが出来る。

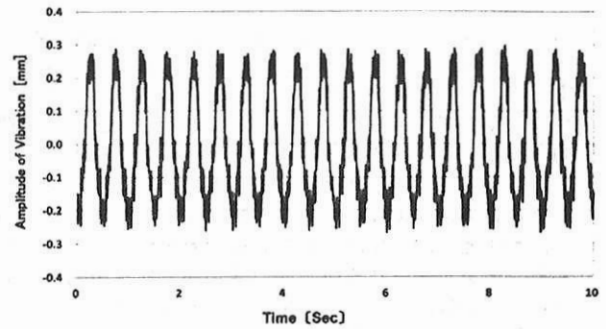
$$V_{out} \div D(K \cdot fn + 4) \quad [\text{mV}] \quad (1)$$

$$D \div \frac{V_{out}}{K \cdot fn + 4} \quad [\text{mm}] \quad (2)$$

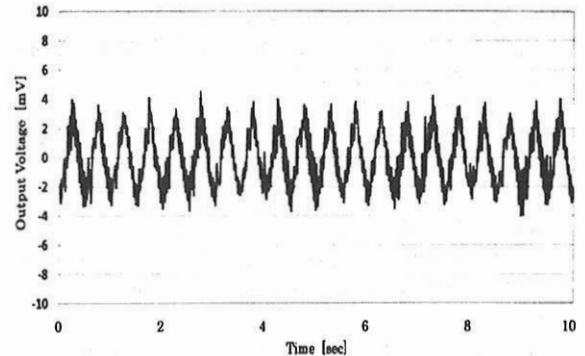
V_{out} : センサ出力 K : 係数 4.5 fn : 負荷

周波数 D : 振幅

この結果、振幅を求めるためには、センサからの出力電圧を負荷周波数の 4.5 倍した値に 4 を加算した数値で除算すれば概算で求めることが出来る。例えば、周波数 8Hz でセンサ出力が 10mV の時、振幅は 0.25mm と求めることが可能であると証明された。橋梁等の安全維持管理を継続的に実施するには、経済的なモニタリングシステムを構築して橋梁等の建設初期の健全状態を計測して記録保管することが重要である。今後、橋梁の老朽化と共に益々重要性を帯びてくる維持管理に関係した計測システムの開発と健全性の評価技術等における検討は、我が国の最先端技術を用いて世界に先駆けた「安全・安心技術」の構築を実施しなければならないと考える。



(1) The laser displacement measuring sensor



(2) The simple smart bolt sensor

Fig.4 Comparison of characteristics of the original simple smart bolt electric sensor and a laser displacement measuring sensor

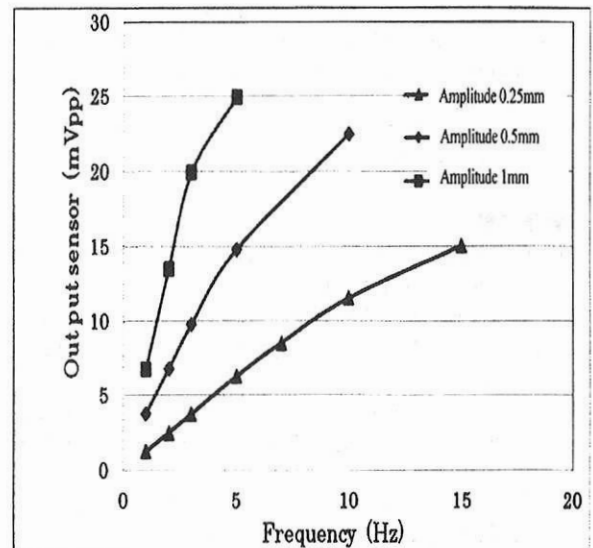


Fig.5 Relationship Frequency and Output voltage of sensor by Amplitude

4. まとめ

橋梁等のダメージを接合部の振動数の変化や締結のゆるみ具合等から検出するためには、高精度に構造物の変形を計測して、定量的に分析する必要があるため、効率

的な計測機器の開発が必要である。しかし、現状の橋梁等のヘルスマニタリング用計測機器は、精度や分解能に優れているため価格も高価であることから、センサの使用個数や性能の維持管理を継続しながら 1~2 年の長期的に渡るリアルタイムのスマートセンシングを実施することは難しく、測定結果による解析結果や健全性を評価した報告事例は少ない¹⁰⁾。このような問題を解決するために、本研究においては、震災直後や老朽化等によって起きることが予想される橋梁等の接合部の異常振動や変位から崩落の危険やダメージを推定することが可能な簡易計測センサの開発と自動計測を可能にする計測システムの構築を実施した。その結果、

(1) 橋梁接合部等の振動計測ボルトセンサからの出力電圧を計測することにより振動の大きさや周波数を簡易的に推定することを可能にした。

(2) 本システムを用いた計測手法により簡易的で実用的なスマートセンシングを可能にする基礎技術が構築できた。

(3) マイコンにある一定の閾値を設定することにより危険度に応じた警報を発するプログラム作成が可能である。マイコンを使用した閾値の設定により、データ量の制限と解析に要する時間を短縮することが可能である見通しを得た。

以上の点から本システムは、長期的な計測を実施することにより振動変化や構造物の異常変位の状況から橋梁全体の健全性を推測することが可能であると検証された。しかし、正確な解析を実施して安全性を求めるためには、他のセンサを用いた性能評価技術や温度変化による補正值等の設定についても考慮する必要がある。また、振動計測ボルトセンサを用いた橋梁等の健全性をより正確に評価するためには、現状の測定精度や性能を補うための解析技術と多数のセンサを同時に使用したフェイルセーフ計測技術等に関する検討も重要であると認識している。本簡易計測システムが、災害モニタリングシステムにおける橋梁等の簡易的なリミットセンサとしての用途に大きく貢献出来る事を希望したい。

参考文献

- 1) 朝日新聞：記事「国土交通書発表 121 橋が崩落寸前」から引用(2009. 11. 04)
- 2) 土木工学 構造委員会:FRP 橋梁設計技術小委員会, FRP 橋梁設計技術小委員会報告書, 東京大学出版会(2004),
- 3) 小野紘一:既存構造物の延命化技術に関する研究, 新都市社会技術融合創造研究会, 第 2 回新都市社会技術セミナー(2003)
- 4) 中村充: 建築構造物のヘルスマニタリング, 計測と制御, 第 41 巻, 第 11 号, 819/824
- 5) Fu-kou Chang:The Demands and Challenges, Proceeding of the 3rd International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, Stanford, CA, (2001)
- 6) 東京センサ㈱, ピエゾケーブル:「PIEZO FILM TECHNICAL MANUAL, V1.0, R1, 17/18(2001)
- 7) 黒崎茂, 佐々木祐樹, 和泉亨: ピエゾケーブルを用いたボルト軸力検出の試み, 非破壊検査, 第 56 巻 3 号, 149/151 (2007)
- 8) 仁田佳宏, 今本啓一, 西谷章: 圧電ケーブルを利用した損傷検知システムの開発, 日本建築学会学術講演梗概集, B2, 891/892, (2006)
- 9) 東京センサ㈱, ピエゾケーブル:「トラフィックセンサ」, カタログ 18/19(2010)