橋梁の危険予知用簡易スマートセンサの開発

下 井 信 浩*・西 條 雅 博**

Development of Simple Sensor for Foretell Danger of the Bridge

Nobuhiro SHIMOI* and Masahiro SAIJO**

Bridge pier joints occasionally become unstable due to deterioration and after the great earthquake disaster. This paper is the outline of smart sensor study executed on upgrading of function and principal specifications of the developed sensor for monitoring stability of bridge pier joints. We have proposed in this system is able to a prototype of monitoring system that easily evaluates the integrity of bridge pier joints quantitatively and easily by vibration analyzing.

Key Words: smart sensor, health monitoring, vibration characteristic, piezo sensor

1. はじめに

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。また、1980年代の高度成長時代に建てられた膨大な建物や橋梁などは、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さら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）」は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か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。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」と報告している^{2),3)}。

本研究では、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、基礎実験により piezo 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。

本論文においては、振動試験器を用いた基本特性評価試験

と秋田県由利本荘市の子吉川に架けられた由利仮設橋における実装試験結果の両面から本センサの性能について評価を実施した。

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** に示す簡易ひずみ計測ボルトセンサの構造は、**Fig. 2**⁴⁾ に示す piezo ケーブル (80 mm) を中空のウレタン樹脂 ($\phi 15 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$) の中心に挿入後接

Fig. 1 The simple smart bolt sensor

Fig. 2 Piezo cable sensor⁴⁾

* 秋田県立大学システム科学技術学部

由利本荘市土谷字海老の口 84-4

** 応用地質(株)計測システム事業部

つくば市御幸が丘 43 番地

* Faculty of System Science and Technology, Akita Prefectural University, 84-4 Aza Ebinokuchi, Tsuchiya, Yurihonjo

** Department of Development Planning, OYO Corporation, 43 Miyukigaoka, Tsukuba

(Received February 20, 2012)

(Revised August 22, 2012)

Fig. 3 Block diagram of the experimental system

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。ピエゾケーブルは簡易マイコンボードに有線で接続を可能にするため、 $\phi 5.6\text{ mm}$ の被覆リード線 4m を接続し絶縁処理を実施した。開発した簡易ひずみ計測ボルトセンサは、ピエゾケーブルの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のように設計されている。また、計測装置の構成においては、サンプリングの周波数と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とした。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や周波数応答などの試験を実施した。

また、野外における実装試験として、所定の場所にオリジナルの簡易ひずみ計測ボルトセンサと東京計器 (株) の 3 軸加速度センサを 1 セットとして設置後、橋梁の各計測部位におけるひずみ計測ボルトセンサからの出力を有線接続で簡易マイコンボードに接続した。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。システムの電源は、センサ情報を認識する簡易マイコンボードとデータ送信用に用いている Zigbee 無線モジュールだけに電源用のリチウム電池パック (Lipo 2000 mAh) を使用した。ノートパソコンによるデータ処理のためには別の外部電源を用いた。Fig. 3 に実装試験で使用した簡易スマートセンシングシステムの基本構成を示す。

2.2 計測器の設置と計測方法

従来、橋梁など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など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^{5)~7)}。その計測機器には、加速度計測器、レーザ変位計測器、光ファイバーによるひずみ計測方法などが用いられ、その計測精度は約 $5\text{ }\mu\text{m}$ の誤差で高精度の計測が可能とされている^{8), 9)}。簡易計測手法においては、本研究と類似するピエゾケーブルを用いた構造ヘルスマニタリング方式が論文誌などに発表されている。その事例として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軸方向のひずみによる電圧の出力変化を計測している。このボルトセンサは、構造物の締結用穴にそのまま挿入してナット

の締結トルクを一定にしたほかの締結ボルト同様の固定を実施している。このセンサによる計測の目的は、ボルト軸方向のせん断応力やボルトのひずみを測定することである¹⁰⁾。他方、構造物の亀裂を計測するために、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んだものが、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¹¹⁾。しかし、これらのセンサは、締結ボルト自体が受ける荷重に対して計測しているか、鉄筋入りのモルタルなどが破断または変形するような衝撃をセンサ自身が受けて検出しなければならないのでセンサ本体が疲労変形または破壊される可能性から長期的な測定を必要とするスマートセンシングには適していないように思われる。また、微小の変形においてはセンサ出力の計測値を S/N 比の関係から分離することは非常に難しい問題が存在する。実際に販売実績のあるセンサの中に Measurement Specialties 社製の「トラフィックセンサ」があるが、このセンサは、ピエゾケーブルを道路に埋設して出力電圧の比較による「通行車両の通過状態」や「積載重量の計測」に用いられている¹²⁾。このセンサも本論文の測定目的とは異なるといえる。

本論文に用いられている簡易ひずみ計測ボルトセンサは、 $\phi 15\text{ mm}$ 、全長 80 mm のウレタン丸棒の中心部に $\phi 3.5\text{ mm}$ 穴をキリ加工後、同じ長さのピエゾケーブルを挿入して接着固定しているので、前項に説明されているセンサとは材質も形態も異なる。さらに計測目的は、橋梁などにおける破断や崩壊が起きる前のきわめて危険な振動や変形状態をウレタンの弾性力によりセンサ自身が壊れることなく計測し、長期にわたる計測が可能である。また、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ための知能センサシステムであることが大きな違いであると考えている。簡易ひずみ計測ボルトセンサ (簡易スマートセンサ) は、設計段階から橋梁などの接合部におけるある特殊な振動や振幅の大きさから求めた変位を自動的に認識して警告するためのリミットセンサとしての役割を果たす目的で製作されている。使用においては簡単に操作でき多数のセンサ装着が可能な実用重視の設計がされている。さらに、計測時においてセンサ自身が変形することにより発電効果を生じるピエゾケーブルを使用しているので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⁴⁾。われわれは、この特性に着目して本センサが接合部にかかる荷重により起こる変位や振動など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のセンサと比較した検証を試みた。基本計測性能を計測する必要から Fig. 4 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。また計測時は、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ている。

計測においては、由利本荘市建設部建設管理課の試験協力を得て、実際に使用されている子吉川に架かる全長約 175 m の由利仮設橋で実装試験による性能評価を実施した。橋梁の接

Fig. 5 Setting sensor on the bridge

Fig. 4 Experiment of vibration

合部に簡易ひずみ計測ボルトセンサと高分解能の加速度計を3日間固定した状態で測定を実施し、計測時間はAM9:00～PM4:00まで振動や通行車両の荷重による出力電圧の変化量を測定した。さらに、測定機器の計測データと橋梁を通過する車両の種類や走行状態を同時間で撮影したビデオ画像と共に記録した。Fig. 5に計測試験を実施した橋梁の外観とセンサの設置部位を示す。計測試験において、橋梁の丸印で示す部位に動態計測に使用するセンサとして開発した簡易ひずみ計測ボルトを設置後、同じ部位に計測値の精度や信頼性を確認するための東京計器(株)3軸加速度計(VSAS-2)を用いた測定ユニットを1setとして実施した。また、橋梁上部に

おける計測箇所を通過する車両などの通過状況を記録できるようにビデオカメラを橋梁の川上に設置した。計測機器と近距離に固定したノートパソコン(VAIO VGN-G3)は外部電源を使用して記録装置および解析装置として使用した。

性能評価は、(1)振動試験器における簡易ひずみ計測ボルトセンサの出力値と変位測定結果による特性比較、(2)振幅の変化による、振動周波数変化と簡易ひずみ計測ボルトセンサの出力関係、(3)由利仮設橋における通過車両の変化による高性能加速度計と簡易ひずみ計測ボルトセンサの出力比較の、3項目について実施した。

3. 計測結果および考察

3.1 高精度3軸加速度計を用いた性能比較

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0.5mm、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. 6に示す。両センサから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図に示すレーザ変位計を用いて計測した。計測結果は、(1)に示すレーザ変位計が測定した振動試験器の一定レベルの振幅状態、(2)に示す簡易ひずみ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簡易ひずみ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定することができた。

つぎに、振動台をレーザ変位計で測定しながら0.25, 0.5, 1mmの順に振幅を変化させ、おのおのの振幅における振動周波数を1～15Hzまで変化させたときの簡易ひずみ計測ボルトセンサからの出力を測定した結果をFig. 7に示す。結果から負荷周波数が大きく変化するのに従い簡易ひずみ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した、また振幅の大きさにも比例していることが理解できる。

これらのFig. 6, Fig. 7の測定結果を用いてセンサ出力と

(1) Result of vibration by laser displacement measuring sensor

(2) Result of vibration by simple smart bolt

Fig. 6 Comparison of characteristics of a original simple smart bolt sensor and laser displacement measuring sensor

Fig. 7 Relationship frequency and output voltage of sensor by amplitude

振幅の関係を簡易式で求めると以下の (1), (2) 式で表わすことができる。

$$V_{out} \doteq D(K \cdot f_n + 4) \quad [\text{mv}] \quad (1)$$

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

V_{out} : センサ出力, K : 係数 4.5, f_n : 負荷周波数, D : 振幅。

つまり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できる。たとえば、周波数 8 Hz でセンサ出力が 10 mV のとき、振幅は 0.25 mm と求めることが可能である。

Fig. 8 に橋梁実装試験における高精度 3 軸加速度センサと簡易ひずみ計測ボルトセンサによる測定比較を示す。計測において、通過車両の車重の違いから生じる仮設橋の接合部に加わる振動の大きさを比較するため車種ごとに測定した。上段に示した簡易ひずみ計測ボルトセンサの結果を見ると、通過車両の荷重を受けて橋梁が大きく振動してボルトセンサから大きな出力をしている箇所が数カ所ある。つまりこれは車両の通過で生じた振動に応じ出力したことを示している。つぎに同時刻に記録したビデオ画像から車種を選定して出力の大きさを比較すると測定結果中一番大きな値を示しているのは、車重が最も重いゴミ回収車である。さらに画像から重量が最も軽い乗用車が通過したときの値を見ると、3 カ所のセンサ出力も同様の波形であり、画像からも乗用車が通過したことを証明している。小型トラックの通過に関してはほかの車種とは異なるセンサ出力を示している。

同時に計測した下段に示す高性能 3 軸加速度計の測定結果を見ると、ビデオ画像から通過車両の順番は乗用車、小型トラック、乗用車、乗用車、ゴミ回収車の順序である。記録された波形も小、中、小、小、大であることから車重に比例した仮設橋の振動状態が示されていると考えられる。これらの結果から両センサにおける測定波形の特徴を見ると、仮設橋の振動状態が出力値に差はあるが同様の効果が得られていることが証明されている。

新しい計測手法による橋梁など接合部の振幅や振動の大きさから震災および老朽化などによる橋梁の崩落や崩壊の危険を予知することが可能であると考えている。橋梁など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など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などにおける検討は、わ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。

4. ま と め

橋梁など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などから検出するためには、高精度に構造物の変化を計測して、定量的・定性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、現状の橋梁など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持続しながら 1~2 年の長期的にわた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¹³⁾。

Fig. 8 Relationship simple smart bolt sensor and high efficiency 3D acceleration

このような問題を解決するために、本論文においては、震災直後や老朽化などによって起きることが予想される橋梁など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。

(1) 橋梁接合部などの簡易ひずみ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した。(3) 荷重の違いによる接合部の振動計測において、簡易ひずみ計測ボルトセンサからの出力電圧と高性能3軸加速度計の出力はきわめて類似した計測結果を得ることができた。

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、ほか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などの設定についても考慮する必要がある。また、簡易ひずみ計測ボルトセンサを用いた橋梁など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などに関する検討も重要であると認識した。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などの簡易のリミットセンサとしての用途に大きく貢献できることを希望したい。

謝辞 由利本荘市役所建設部建設管理課のご協力に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省報告書：PC 道路橋の健全度評価の高度化に関する共同研究報告書，国土技術政策総合研究所，**623**，6/14 (2010)
- 2) 朝日新聞：記事「国土交通省発表 121 橋が崩落寸前」から引用 (2009.11.04)
- 3) 土木工学構造委員会：FRP 橋梁設計技術小委員会報告書，FRP 橋梁設計技術小委員会 (2004)
- 4) (株)東京センサ：ピエゾケーブル，PIEZO FILM TECHNICAL MANUAL, V1.0, R1, 17/18 (2001)
- 5) 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)
- 6) 中村 充：建築構造物のヘルスマニタリング，計測と制御，**41-11**，819/824 (2002)
- 7) F. Chang: The Demands and Challenges, Proc. 3rd International Workshop on Structural Health Monitoring, 1/8 (2001)
- 8) 中村，安井：微動計測に基づく地震震災鉄骨建物の層損傷評価，日本建築学会論文集，**517**，61/68 (1999)

- 9) 岡林, 奥松, 中宮: 高精度自動振幅数推定システムによる構造物損傷の検知に関する実験的研究, 構造工学論文集, **51A**, 479/490 (2005)
- 10) 黒崎, 佐々木, 和泉: 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, **56-3**, 149/151 (2007)
- 11) 仁田, 今本, 西谷: 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)
- 12) (株)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)
- 13) 三上隆男: 光ファイバーによる動的変位計測システム, *IIC review*, **34**, 54/58 (2005)

[著者紹介]

下井 信 浩 (正会員)

1982 年職業能力開発総合大学校卒。東芝生産技術研究所研究員を経て、87 年防衛庁入省、95 年信州大学博士（工学）、国立東京工業高等専門学校准教授、現職は秋田県立大学システム科学技術学部教授。スマートセンシング、地中探査技術の研究、自律移動ロボット技術の研究に従事。

西 條 雅 博

1969年6月25日生。90年神戸市立工業高等専門学校機械工学科卒業。応用地質(株)入社。フィールドモニタリングに関する計測機器の設計開発に従事。傾斜計自動計測システムの開発、携帯電話通信網を用いた遠隔監視モニタリングシステムの開発などを行う。