

無線センサネットワークによる鋼橋部材の疲労損傷原因の特定を試み

Cause identification of fatigue damage in steel bridge by applying Wireless Sensor Network

三木千壽*, 山口浩**, 判治剛***, 田辺篤史****

Chitoshi Miki, Hiroshi Yamaguchi, Takeshi Hanji, Atsushi Tanabe

* 工博, 東京工業大学教授, 大学院理工学研究科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

** 東京工業大学大学院修士課程, 大学院理工学研究科 (同上)

*** 博(工), 東京工業大学研究員, 大学院理工学研究科 (同上)

**** 博(工), 東京工業大学助教, 大学院理工学研究科 (同上)

In order to guess the behavior of member causing fatigue damage at joint part in a railway truss bridge, experimental measurements in actual bridge was conducted by using wireless acceleration sensor devices and strain gauge. The global behavior of member, causing the fatigue damage when train passed through the target panel point, was verified based on the local strain data from strain gauges and acceleration data from wireless sensors. Finally, from the measurements, a countermeasure for the prospective fatigue crack was suggested.

Key Words: wireless sensor network, field measurement, fatigue damage, steel bridges

キーワード: 無線センサネットワーク, 現場計測, 疲労損傷, 鋼橋

1. はじめに

土木鋼構造物において疲労損傷事例が数多く報告されるようになり, また将来の損傷の増大も予想されることから, 疲労を考慮した鋼構造物の維持管理の必要性がより一層高まっている. すでに発見された疲労損傷に対して適切な対策をとるだけではなく, 疲労損傷の可能性が疑われる部材に対して予防保全的な措置を講じることも求められている.

鋼橋の疲労に対して適切な補修・補強を行うためには, 疲労損傷の発生原因を特定することが必要不可欠である. 道路橋や鉄道橋における疲労損傷は, 設計時には全く予想しなかった変位や振動により生じるケースが多い¹⁾. この損傷に対しては, 橋梁全体や部材ごとの変形挙動から, 損傷の原因となる局所的な応力を引き起こす部材の動きを特定し, それに応じた対策をとることが効果的である.

疲労損傷の要因となる局所的な応力や変形挙動は, 一般にひずみゲージや変位計により計測される. 着目部近傍に計測デバイスを設置して, その応答値より局所的な挙動を特定することができる^{2,5)}. しかしながら, 局部変形を誘起する部材もしくは橋梁全体としての挙動を把握するためには数多くのデバイスを広範囲にわたって配置

して多点計測を行う必要があり, 作業足場や配線に費やす時間を考えると, 必ずしも効率の良い方法とはいえない. 有限要素解析により疲労損傷の原因挙動を解明しようとする試みもみられ⁶⁻⁸⁾, その有効性の高さが示されている. しかし, 境界条件の取り扱いなど, 解析条件において多くの仮定を必要とするため, 解析のみで評価することは難しく, ひずみゲージなどにより高精度に計測された応答値と照らし合わせながら解析モデルを構築しなければならず, 時間と労力を要するものである.

新たな振動計測システムとして, レーザードップラー速度計^{9, 10)}や無線センサネットワーク¹¹⁻¹⁷⁾を利用したモニタリング手法が提案されている. これらの研究は主に構造物の健全度を日常的や定期的にモニタリングすることを目的としているが, 提案したセンサを用いることで実橋の振動モードを十分に同定できることが示されている⁹⁻¹¹⁾. どちらのセンサも従来のものに比べ, 配線などの労力を必要としないため, 現場計測の省力化につながるものといえる.

本研究では, 現場計測の省力化, 効率化を図るために, 計測チャンネルあたりの導入コストが比較的安価な無線加速度センサを用いて, 無線センサネットワークによる広域測定と従来のひずみゲージによる局部測定を組み合わせた計測手法を提案し, それによる疲労損傷原因の特

定を試みた。実橋の例として鋼鉄道トラス橋を取り上げ、疲労損傷の発生が危惧される位置に対して提案した計測手法を適用し、その原因となりうる部材挙動について検討した。

2. 計測システム

本研究で用いた計測システムは、疲労損傷が予想される位置における局所的なひずみの測定と、無線加速度センサによる部材全体の挙動の測定を組み合わせたものである。その詳細を以下に述べる。

2.1 ひずみセンサ

ひずみの計測には市販されている有線の一軸ひずみゲージと動ひずみ測定器を使用した。動ひずみ測定器のサンプリング周波数は200Hzとした。

2.2 無線加速度センサ

本研究では、市販のアドホック型無線センサネットワークデバイスを用いた。無線デバイスの仕様を表-1に示す。この無線デバイスは、環境を計測するセンサボー

ドと、計測されたデータを無線で転送する無線デバイスで構成されており、IEEE 802.15.4 規格 (ZigBee) に準拠した無線モジュールである。また、単三電池二つのみ (DC 3V) で駆動できるという利点がある。

構造物の挙動を測定するセンサボードには二軸の加速度センサを用いた。加速度センサの仕様を表-2に示す。このセンサはMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を利用しているため、コンパクトかつ安価である。

無線センサデバイスはあらかじめインストールされた制御プログラムによって作動する¹⁸⁾。本研究では、静的計測用であったデフォルトの制御プログラムを独自に改良し、動的な計測ができるようにした。サンプリング周波数は100Hzである。なおこの動作環境下では、少なくとも数時間の計測が可能である。

今回用いた無線センサシステムは、図-1に示すように、無線デバイスにより転送されたデータをパソコンに接続されたベースステーションにて収集し、集めたデータをインタフェースにより処理する仕組みになっている。この無線デバイスの制御プログラムは、センサノード同士が互いにデータを転送し合い、自律的に通信ネットワークを構成するメッシュ型ネットワークをサポートして

表-1 無線デバイスの仕様

CPU Speed	7.4 MHz
Program Flash memory	128 KB
Data Flash memory	512 KB
ADCResolution	10 bit
WirelessFrequency	2.4 GHz
Method	802.15.4
Power supply	DC 3V
Electric current	40 mA
Data rate	250 kbps

表-2 加速度センサの仕様

Sensor	Analog Devices ADXL202JE
Channel	X(ADC1), Y(ADC2)
Range	±2G (1G=9.81 m/s ²)
Sensitivity	167 mV/G, ±17%
Offset	VBATTERY/2±0.4V
Operating Range	3.6 to 3.0 V
Interface	Analog interface

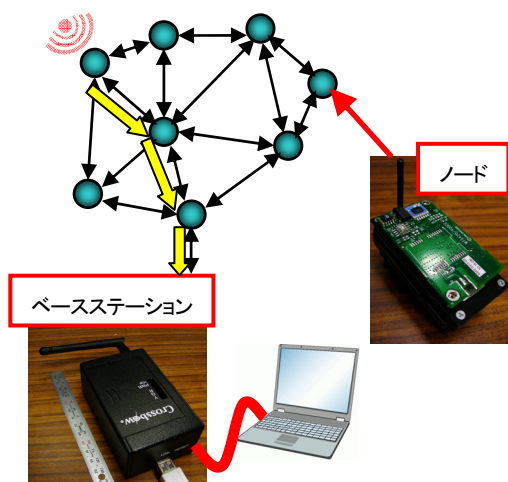


図-1 無線センサシステムの概略

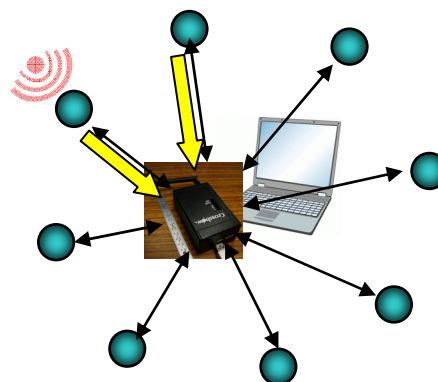


図-2 スター型ネットワーク

いる。しかし、事前実験¹⁹⁾においてメッシュ型ネットワークを利用するとデータ欠損を生じるケースがあることが判明した。よって今回の計測においてはデータを確実に収集することを優先し、それぞれのノードが直接ベースステーションにデータを転送するスター型ネットワーク(図-2)を採用した。

計測に先立ち、無線加速度センサと動ひずみ測定器に接続した有線の加速度計を同一平板上に固定し、その平板に衝撃を与えて両者に同時にパルスを導入した。計測後、このパルス波を基準として無線センサネットワーク内およびそれとひずみ計測システムの同期をとった。

2.3 疲労損傷原因の特定システム

本研究にて用いた計測システムは、無線センサを用いた測定とひずみセンサを用いた測定の二つの要素から構成されている。具体的には、疲労損傷の直接的な要因である局部応力をひずみゲージにより、その局部応力を引き起こす部材もしくは橋梁全体の挙動を無線センサにより計測し、それらを関連付けて分析することにより、疲労損傷の原因を特定するというものである。無線センサを用いることにより、配線などの作業に要するコストや時間を削減できるだけでなく、ケーブルの長さにとらわれることなく配置できるため、必要に応じて容易に配置の変更ができ、部材単位から橋梁全体までその時々に応じた計測が可能になる。本計測システムにより、従来の手法²⁻⁸⁾に比べて効率的に疲労損傷原因を特定できるようになると考えている。

3. 実橋梁における計測

対象橋梁を図-3に示す。支間 67m、高さ 9m の三径間連続の開閉式下路トラス橋であり、着目位置は三連目四番目の格点部とした。

計測したトラス格点部の詳細を図-4と図-5に示す。対象とする位置は格点のガセットプレートと腕材の接合部であり、想定する疲労損傷を図-5中に示す。腕材とガセットプレートの接合部における腕材側の溶接止端部から疲労損傷が生じたと仮定して計測を行った。腕材は検査路を支える目的で取り付けられており、列車が通過する際にトラス主構造と検査路の影響を受けて、複雑な挙動をする可能性が予想される。例えば、トラス主構造と検査路の間の挙動のずれにより、腕材に曲げやねじりが生じる可能性が考えられる。今回は列車が通過する際の腕材の挙動を計測対象とし、ガセットプレートと腕材接合部のひずみ挙動をひずみゲージにて、腕材全体の挙動を無線センサにて測定した。得られた結果から、疲労損傷の発生原因となる腕材挙動の特定を試みた。

図-6に無線加速度センサの配置を示す。無線センサデバイスは腕材の挙動を計測するために腕材上フランジの四隅に、また、主構造の挙動を計測するために格点を

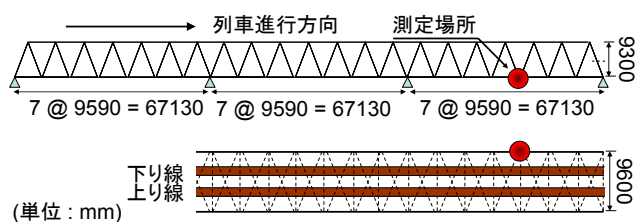


図-3 計測対象橋梁

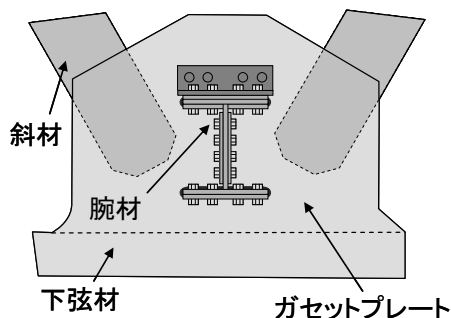


図-4 格点部詳細(橋軸直角方向)

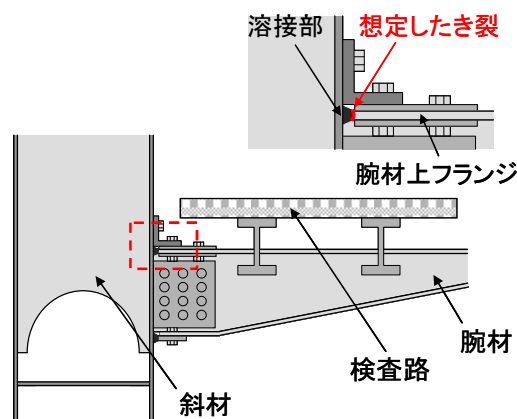


図-5 格点部詳細(橋軸方向)

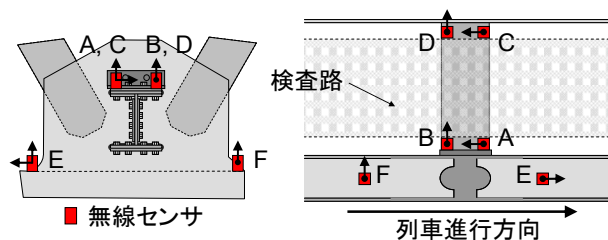


図-6 無線加速度センサの配置図

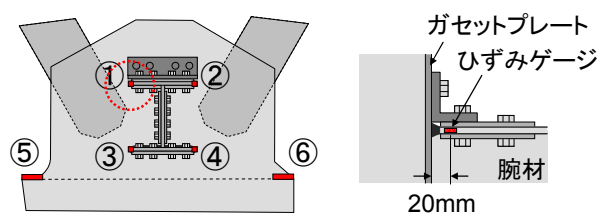


図-7 ひずみゲージの配置図

挟んだ下弦材上に配置した。図-6 における A～F は無線センサデバイスを表しており、矢印の向きは計測した加速度の向きを示している。

ひずみゲージの配置を図-7 に示す。ひずみゲージは腕材上下フランジ側面に貼付し、腕材の局部的なひずみ挙動を計測した。また主構造のひずみ挙動を把握するために、無線センサと同じように、格点を挟んだ両側の下弦材上面にも貼付した。図における①～⑥の番号はひずみゲージの番号を表しており、ゲージ位置⑤は加速度センサ E に、ゲージ⑥は加速度センサ F に対応している。腕材においては腕材の長手方向のひずみを、下弦材においては橋軸方向のひずみを計測した。疲労損傷原因を特定するために行われてきた過去の現場計測²⁵⁾に比べて、今回の計測手法では測定デバイス数を減らすことができ、例えばこれまでの計測²⁵⁾と比較すると、その数は4割から7割程度に低減できている。

4. 計測結果

4.1 車軸位置の推定

計測した挙動の発生メカニズムを考察するためには、列車の車軸位置を把握し、それと計測結果を関連付けて分析することが重要であると考えられる。計測した列車の車軸位置の推定には、従来、応力測定と同時にレールの輪重測定を実施し、その輪重波形より求める方法が用いられている²⁰⁾。しかし、輪重ゲージの貼付やその検定の作業に要する時間を勘案し、今回はトラス下弦材から得られたひずみ波形より車軸位置を推定した。図-8 に車両編成を、図-9 に例としてゲージ位置⑥における計測結果を示す。計測した列車は16両編成であり、車両間にある近接する二つのボギーを1セットとみなすと、全ボギーセット数は17台である。図-9の⑥のひずみ波形より、約1.7秒時にひずみが引張方向にシフトし始め、その後、ほぼ等間隔で振動していることから、この時間に最初のボギー車が着目格点上に差し掛かったと推定できる。また、対象とした列車の最大車軸間距離 $(21.25\text{m} \times 2 + 25\text{m} \times 14 = 392.5\text{m})$ と走行速度(約270km/h)の関係より、着目格点を全てのボギー車が通過するのに約5.2秒 $(= 392.5\text{m} / 270\text{km/h})$ かかることから、約6.9秒付近にて最後のボギー車が着目点を通過したと推測できる。よって、ボギー車が着目格点を通過することにより生じる波形は約1.7秒から約6.9秒までであり、その後は橋梁の自由振動であると考えることができる。

4.2 ひずみの時刻暦波形

図-10 に列車が対象橋梁を通過したときのゲージ位置①～④におけるひずみの時刻暦を示す。ここでは、ひずみの値が引張もしくは圧縮方向にシフトし始めた時間、その後ひずみ値が逆方向(引張から圧縮方向、もしくは圧縮から引張方向)に変化し始めた時間、さらにほぼ等

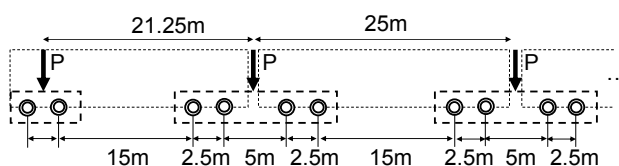


図-8 車両編成

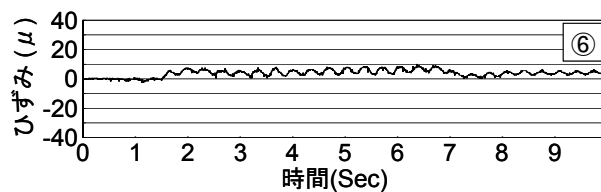


図-9 ゲージ位置⑥のひずみの時刻暦波形

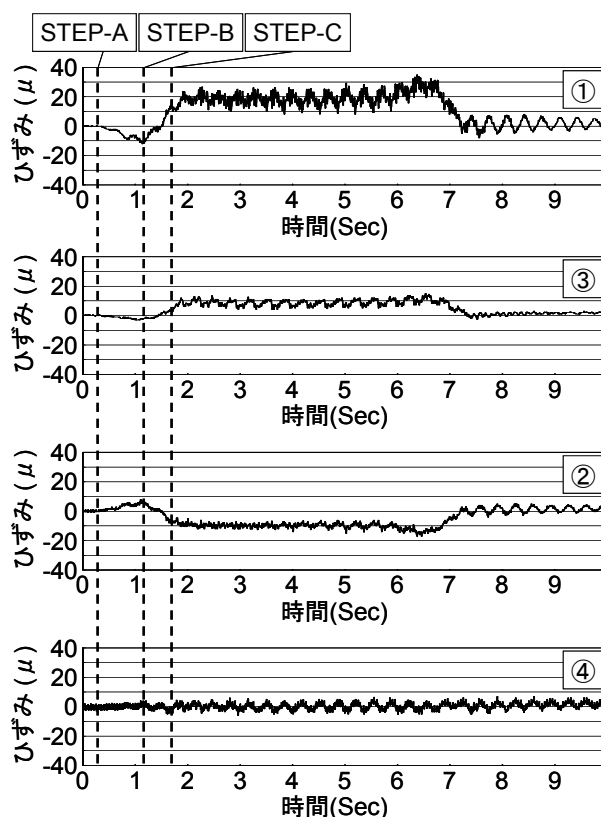


図-10 ひずみの時刻暦波形

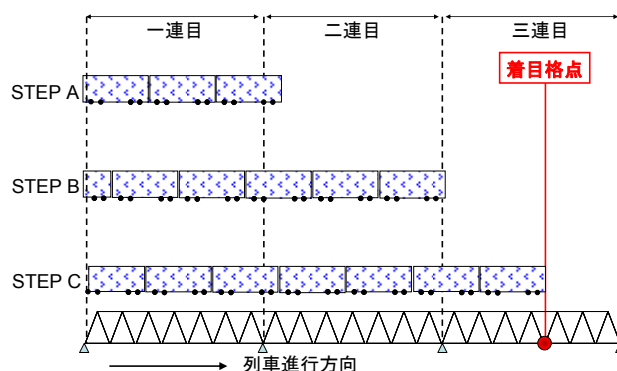


図-11 車軸位置

間隔で振動し始めた時間をそれぞれSTEP-A, B, Cと呼ぶこととする。また、列車速度やボギー車間隔、橋梁支間長からSTEP-A～Cにおける列車の車軸位置を推定した。その結果を図-11にまとめる。図-10, 11より、最初のボギー車が二連目に差し掛かったときにひずみゲージが反応し始め（STEP-A）、三連目に乗り始めたときにひずみが逆向きに変化し（STEP-B）、着目した格点上にきたときにひずみが断続的に動き始める（STEP-C）ことがわかる。STEP-Cの後には、ほぼ同間隔でひずみが繰り返されており、4.1で述べたように、最後のボギー車が着目格点を通過する約6.9秒までの波形の繰り返し回数をみると、それはボギー車数と一致している。よってSTEP-A～Cまでのひずみの変化は、列車荷重による橋梁の鉛直方向のたわみに伴い検査路が橋軸方向に動いたため生じるものであり、STEP-C以降（約6.9秒まで）の変化は、着目格点上をボギー車が通過することによる格点の上下変位に起因するものと推測できる。

STEP-A～Cにおけるひずみ応答の変化の傾向をみると、上下フランジの同じ側の側面に貼付したゲージ①と③にて同様の挙動となっている。①と③では、

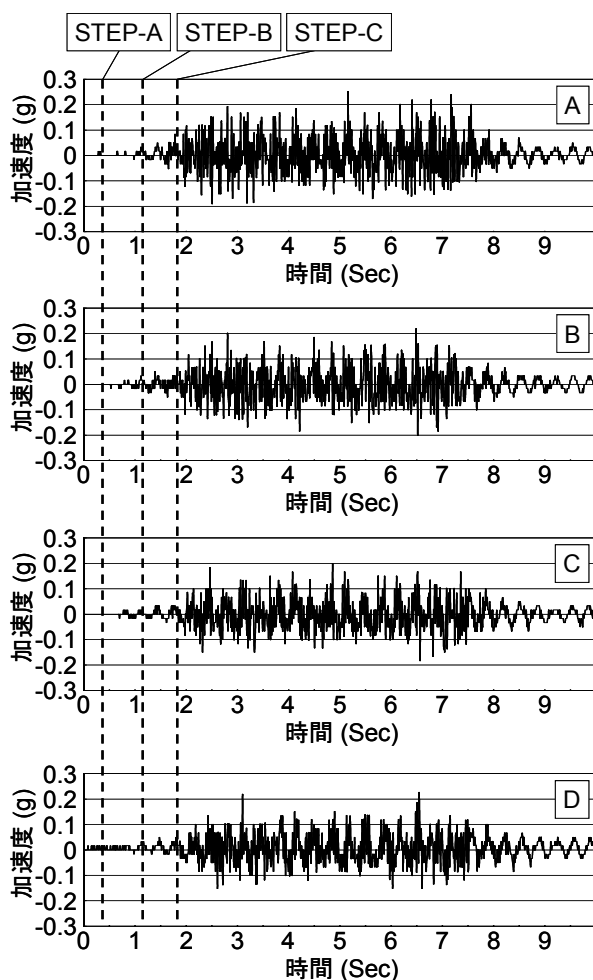


図-12 加速度の時系列波形（鉛直成分）

STEP-A から STEP-B の間で圧縮側にシフトし、STEP-B を境に引張側へと変化している。一方、①と逆側のフランジ側面に貼付したゲージ②では①、③と逆の傾向を示しており、STEP-A から STEP-B の間は引張側、STEP-B 以降は圧縮側となっている。このひずみの時刻歴波形より、STEP-A から STEP-C において腕材は主に橋軸方向に変形しており、さらに STEP-C 以降（約6.9秒まで）は、橋軸方向に変形しつつ、ボギー車の通過により鉛直方向にも繰り返し変位していると考えられる。

もし腕材が片持ち梁のように主構造に接合されているだけであれば、図-10のようなひずみ挙動は生じないと考えられる。しかし、実際には腕材に検査路が取り付けられており、検査路による拘束が腕材の複雑な挙動を引き起こしたものと予想される。

4.3 無線センサによる加速度の時系列波形

図-12に無線加速度センサによって得られた腕材の鉛直方向の加速度成分の時系列を示す。図-10のひずみの時刻歴と同じようにSTEP-A～Cにおける応答をみると、二連目に列車が入り始めるSTEP-Aでは加速度

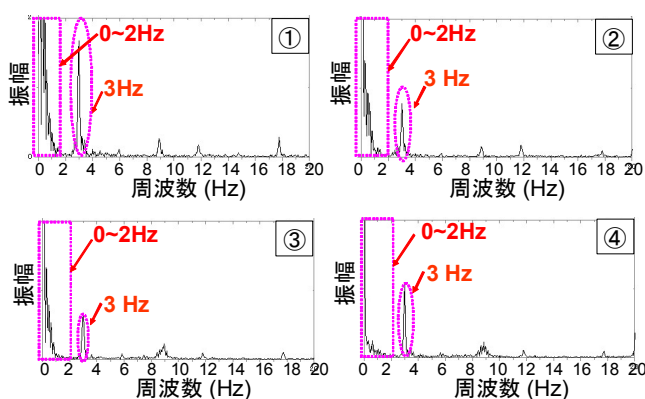


図-13 ひずみデータの周波数解析結果

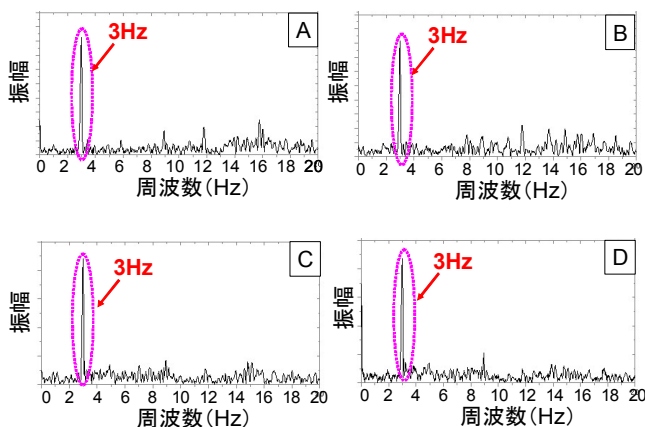


図-14 加速度データ（鉛直成分）の周波数解析結果

はほとんど生じておらず、三連目に差し掛かったSTEP-Bでセンサが反応し始め、その後、ボギー車が格点上を通過するSTEP-Cを境に大きく変化し出していることがわかる。これは前節で示したように、STEP-AからSTEP-Bにおいて腕材は主に水平方向に変形しており、鉛直方向の加速度が小さかったためであると考えられる。またSTEP-B以降は着目格点を含む径間にボギー車が乗っているため、センサが反応していることがわかる。

4.4 周波数解析

図-13 にひずみデータの周波数解析結果を示す。図中にはゲージ貼付位置番号も示している。どの位置の結果においても共通した二つの卓越周波数がみられる。一つは0~2Hzの低周波数領域にみられ、もう一つは3Hz付近の領域にみられる。今回計測した列車の速度は約270km/h、ボギー車間隔は25mであることから、1秒間にボギー車が着目格点を通過する回数は約3回と計算され、3Hz付近の卓越周波数はボギー車による強制変位に起因するものであるといえる。一方0~2Hzの低周波数領域における卓越周波数は、ひずみの時刻歴波形から、列車が着目格点に差し掛かる前の橋梁全体の動きに起因するものと予想される。最初のボギー車が二連目に差し掛かってから着目格点に到達するまでの時間は約1.4秒(=9.59m×11/270km/h)であり、その間(図-10のSTEP-AからSTEP-Cの間)に橋梁全体の変形により約1回のひずみの変動が生じていることから、その波の周波数は約0.71Hzと求められ、周波数解析結果とほぼ一致する。

加速度データの周波数解析結果を図-14に示す。図中には腕材上に配置した無線加速度センサの測定位置(A~D)も示している。図より、ボギー車の通過による振動である3Hz付近の周波数が卓越していることがわかる。

5. 列車の通過に伴う腕材の挙動の推定

これまでの検討をもとに、今回はボギー車が格点上を通過することにより生じる腕材の挙動に着目する。加速度の計測結果にフィルタ処理を施して3Hz付近の周波数のものだけを抽出し、腕材の挙動をひずみ波形、および着目格点とボギーの位置関係と合わせて検討する。

図-15に示すように、ひずみデータの時刻歴において、八番目のボギー車が注目格点を通過する時間帯を区間Iとし、その区間Iを九等分してそれぞれの時間をSTEP-D~Lと表すこととする。図中の下側のグラフは、区間Iにおけるひずみ波形をわかりやすくするために拡大したものであり、その中にSTEP-D~Lを示している。また、STEP-D~Lの時間における車軸位置を図-16にまとめる。着目した格点をボギーが通過するのはSTEP-H付近である。

フィルタ処理後の加速度データを三次元ベクトルの形

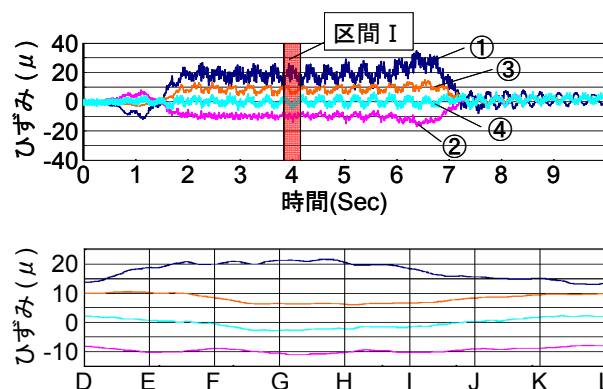


図-15 区間Iにおけるひずみの時刻歴波形

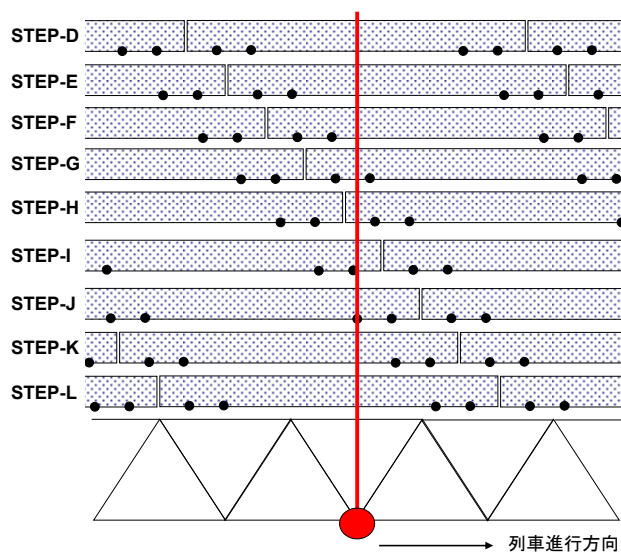
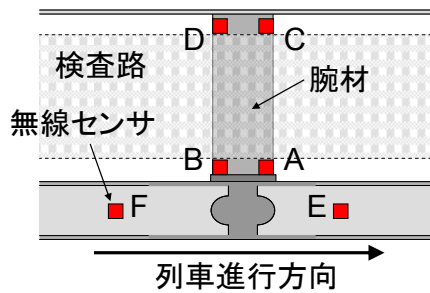


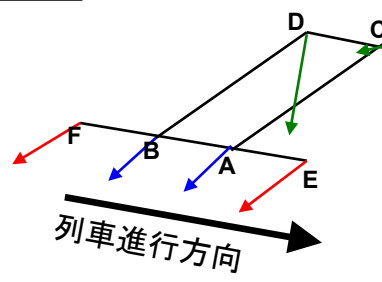
図-16 区間Iにおける車軸位置

で空間表示したものを図-17に示す。図中のA~Fは無線加速度センサの位置を表している。用いた加速度センサは二軸計測用のものであるため、センサAとB、CとD、EとFにおいて鉛直方向以外の加速度は位置的にあまり差異がないものと考え、これらの位置では鉛直方向以外の加速度データを共有することとした。

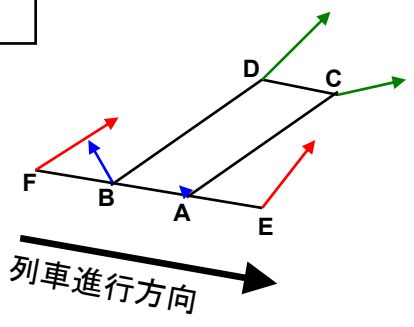
まず、加速度のベクトル図(図-17)とひずみ履歴(図-15)の関係について検討する。今回はゲージ位置①と③のひずみ波形に着目する。図-7に示すとおり、ゲージ①は腕材の上フランジに、ゲージ③は下フランジに貼付したものである。STEP-DからSTEP-Gにおけるひずみ履歴をみると、ゲージ①では引張方向に、ゲージ③では圧縮方向に変化しており、腕材が鉛直下方向に変形していると考えられる。STEP-Gのときの加速度センサA、B、C、Dをみると、若干の違いはみられるが、概ね鉛直下向きのベクトルとなっており、ひずみ履歴から推測される腕材の挙動とほぼ対応している。一方、下弦材上の加速度センサE、Fにおいてはひずみ履歴との対応はみられない。よって、腕材取付部のひずみ挙動は腕材の全体的な挙動と相関が高いといえる。



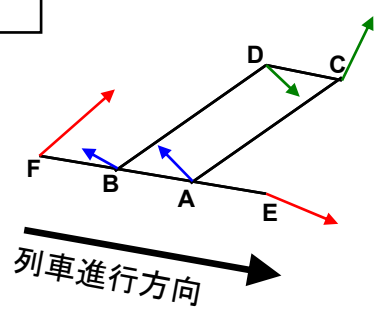
STEP-H



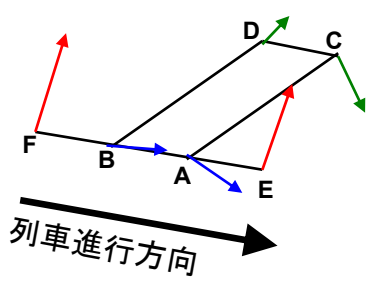
STEP-D



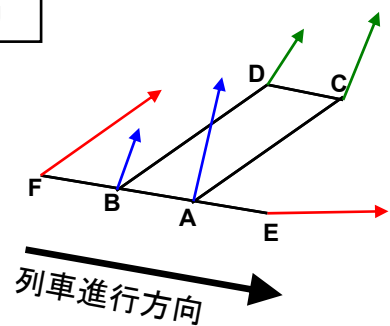
STEP-I



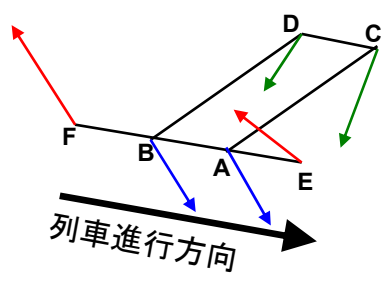
STEP-E



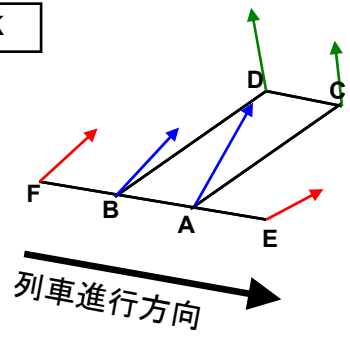
STEP-J



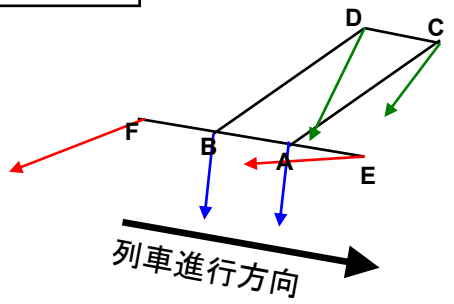
STEP-F



STEP-K



STEP-G



STEP-L

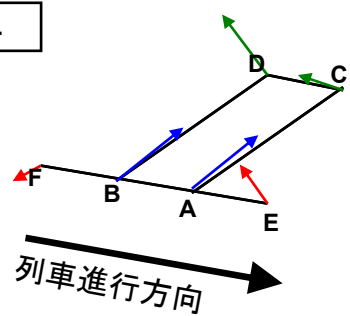


図-17 無線センサにより計測した加速度ベクトル

次に図-17のベクトル図をSTEPごとに考察する。まず、下弦材上面に設置した加速度センサEとFに関しては、ボギー車が近づくにつれて(STEP-D~F)、ボギー車が迫っている方向(進行方向と逆)に引張られるように変化していることがわかる。さらに、列車が着目格点上に差し掛かったSTEP-Gにおいてベクトルが下方に変化し、列車が通り抜けたSTEP-Jにおいてベクトルが再び上方に戻っている。これらの動きは円を描くように変化しており、ボギー車が通過するごとにSTEP-D~Lの一連の挙動が繰り返される。

これに対して腕材に配置した加速度センサA、B、C、Dは下弦材と全く異なる挙動を示していることがわかる。円を描くように加速度ベクトルが変化しているのは同じであるが、腕材側と下弦材側で位相差が生じている。また、検査路を挟んで両側に設置したA、BとC、Dの間でも位相が異なっており、この挙動のずれが損傷を生じさせるような局所的な応力の発生原因となる可能性があると考えられる。

以上の検討より、腕材取付部の疲労損傷に対する予防保全的な措置としては、まず検査路と腕材を切り離すことが効果的であると考えられる。もし検査路が取り付けられていなければ、腕材(加速度センサA、B、C、D)は主構造(加速度センサE、F)と同じような挙動を示し、計測結果のような腕材と主構造の振動のずれは小さくなるものと予想される。しかしながら、その検証実験は行えておらず、今後の課題である。

6. まとめ

本研究では、疲労損傷の原因となる局所的な応力を引き起こすような部材全体としての挙動を把握する手法として、無線センサネットワークによる加速度計測と局所的なひずみ計測を組み合わせた計測システムを考案し、そのシステムの鋼トラス鉄道橋への適用を試みた。トラス格点における腕材の取付部の疲労損傷を想定して、その損傷の原因となりうる腕材の挙動を計測した。その結果、疲労損傷の可能性となる腕材と主構造の挙動のずれを特定することができた。

今後、本計測システムをさまざまな部材へ適用し、その有効性を検討していく必要があるが、本研究は、無線センサネットワークを援用した疲労損傷原因の特定手法の構築に向けて一つの足がかりになったといえる。無線センサネットワークによる広域計測とひずみゲージによる局所計測を組み合わせることにより、疲労損傷の原因となる挙動を特定できる可能性を示すことができ、適切な補修・補強を行うにあたって、有益な情報を提供できると考えている。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金基盤研究(S)

(課題番号18106010、代表者：三木千壽)によるものであります。研究を進めるにあたり、東海旅客鉄道株式会社 関雅樹氏、鍛冶英樹氏にご協力いただきました。ここに記して深謝いたします。

参考文献

- 1) 三木千壽, 伊藤裕一, 後藤清彦: 疲労損傷に対する補修事例のインターネット上データベースの構築とその利用, 土木学会論文集, No.668/I-54, pp.271-281, 2001.
- 2) Kato S., Yoshikawa O., Terada H. and Matsumoto Y.: Studies on fatigue damages based on strain measurements of a highway bridge, Proc. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.2 No.2, pp.199-208, 1985.
- 3) 竹之内博行, 谷倉泉, 高倉敏, 三木千壽: 実交通荷重による鋼桁橋の応力変形挙動, 構造工学論文集, Vol.33A, pp.361-371, 1987.
- 4) 杉本一朗, 三木千壽, 市川篤司, 伊藤裕一: 高速走行下での鋼鉄道箱桁の動的挙動と補剛材下端部の応力, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.1003-1012, 1997.
- 5) Connor R. J. and Fisher J. W.: Identifying effective and ineffective retrofits for distortion fatigue cracking in steel bridges using field instrumentation, Journal of Bridge Engineering, ASCE, Vol.11 No.6, pp.745-752, 2006.
- 6) 増田陳紀, 赤井紀文, 中本啓介: 主桁・対傾構取合部の局部応力解析のためのモデル化に関する研究, 構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, Vol.16, pp.9-14, 1992.
- 7) 館石和雄, 竹之内博行, 三木千壽: 鋼橋部材交差部に生じる局部応力の発生メカニズムと要因分析, 土木学会論文集, No.507/I-30, pp.109-119, 1995.
- 8) 高橋和也, 内藤繁, 関雅樹, 市川篤司, 三木千壽: 鋼鉄道トラス橋縦桁横桁連結部の疲労き裂の原因解明, 土木学会論文集 A, Vol.64 No.2, pp.235-247, 2008.
- 9) 宮下剛, 石井博典, 藤野陽三, 庄司朋宏, 関雅樹: レーザー計測を用いた鋼鉄道橋の高速走行により発生する局部振動の把握と列車速度の影響, 土木学会論文集 A, Vol.63 No.2, pp.277-296, 2007.
- 10) 宮下剛, 藤野陽三: レーザードップラー速度計を用いた三次元多点振動計測システムの開発, 土木学会論文集 A, Vol.63 No.4, pp.561-575, 2007.
- 11) Kim S., Pakzad S., Culler D., Demmel J., Fenves G., Glaser S. and Turon M.: Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks, International Conference on Information Processing in Sensor Networks, 2007.
- 12) 長井望, 三田彰, 矢向高弘, 佐藤忠信: 構造ヘルスマニタリング用ワイヤレスセンサに関する研究, 日本地震工学会論文集, Vol.3 No.4, pp.1-13, 2003.
- 13) 高田知典, 石間計夫: 無線センサネットワークの建

- 設分野への利用と課題，第 60 回土木学会年次学術講演会講演概要集，部門 CS，pp.423-424，2005.
- 14)三田彰，岩澤脩：建築空間の生命化のためのスマートセンサネットワーク，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.67-68，2007.
- 15)李浩，余梯榕，山内規義，大貝晴俊，千鐘仁：無線センサーネットワークを用いた橋梁の健康診断技術に関する研究，電子情報通信学会総合大会講演論文集，A-21-33，p.424，2007.
- 16)牛田満士，長山智則，藤野陽三：スマートセンサを用いた自律分散型の構造物アクティブセンシングシステムの開発，第 63 回土木学会年次学術講演会講演概要集，部門 I，pp.633-634，2008.
- 17)川谷充郎，金哲佑，藤本達貴，塚本昌彦，藤田直生，南靖彦：橋梁振動モニタリング用 MEMS 無線センサノードの開発と実橋適用性検討，第 63 回土木学会年次学術講演会講演概要集，部門 I，pp.1141-1142，2008.
- 18)安藤繁，田村陽介，戸辺義人，南正輝：センサネットワーク技術—ユビキタス情報環境に向けて，東京電機大学出版社，2005.
- 19)田辺篤史，山口浩，三木千壽：無線センサネットワークを用いた鋼橋部材の疲労損傷原因の特定方法の研究，第 64 回土木学会年次学術講演会講演概要集，部門 I，pp.853-854，2009.
- 20)鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）鋼・合成構造物，丸善，2007.
(2009 年 9 月 24 日受付)