

# 光学ストランドセンサーを用いた構造物モニタリング

## Structural Monitoring using the Optical Strand Sensor

永谷 秀樹\*<sup>1</sup>  
Hideki NAGATANI

### Summary

In the preventive maintenance of structural objects, continuous long-term monitoring is essential for assessing the soundness. The Optical Strand Monitoring System (OSMOS) enables continuous, stable, long-term monitoring of structural objects without influence of severe external environments (electrical noise, temperature, humidity, etc.). The paper introduces structural monitoring with OSMOS and the method of evaluating the results.

キーワード：光ファイバー、モニタリング、予防保全、健全度評

### 1. はじめに

1950年代後半からの高度成長期を中心に大量に建設された道路橋は約15万橋にのぼり、建設後50年以上を経過した橋梁がこれから飛躍的に増大する。このため、老朽化による劣化損傷の増加と維持管理費用の増加が予測され、限られた財源の中では、これらの膨大な橋梁群を予防保全により効率的に維持管理し、延命化を行う必要がある。

そのためには、まず信頼性のある手法により構造物の現状や変化を的確に把握することが重要となると考える。光ストランドセンサーを用いたモニタリング技術は、構造物の外部作用（地震、活荷重等）に対する応答値（変位、ひずみ）を長期間、連続してモニタリングすることが可能であり、上記の構造物の状態、変化の把握に有効な要素技術であると考えられる。

当社では、光ストランドセンサーを用いたモニタリングシステム“OSMOS (Optical Strand Monitoring System)”を10年以上前から導入し、橋梁のモニタリングを実施している。また、OSMOS技術協会（ホームページ：<http://www.osmos.jp/>）のメンバーとしてOSMOSの技術の普及と発展に努めてきた。

本稿では、自社およびOSMOS技術協会として実施した構造物モニタリング実績より、OSMOSの概要および特徴も含めて、モニタリング内容とその結果の評価方法について紹介する。

### 2. 光学ストランドセンサーを用いたモニタリングシステムの概要

光ファイバーセンサーの一つである光学ストランドを用いたモニタリングシステム（OSMOS）の概要と特徴を以下に示す。

#### (1) 測定原理

光ファイバーの中を光が通過する際に、経路の屈曲部で光の一部が外部に漏れ出し、ファイバー内部を通過する光の強度が変化する性質がある。また、OSMOSのセンサー部は光ファイバーを3本よった光学ストランド（より線）により構成されており、変形することにより曲率が変化する。

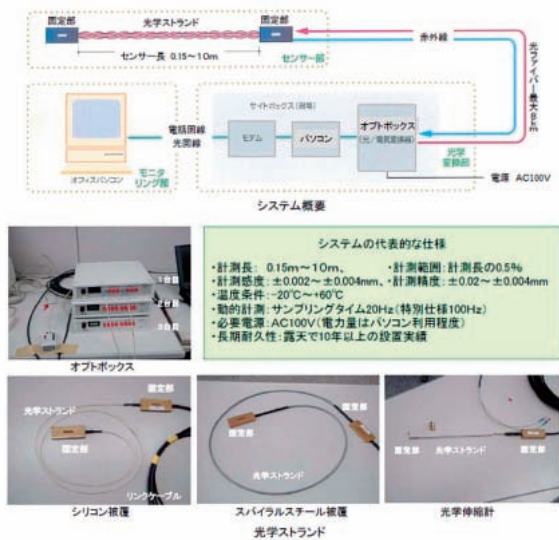
OSMOSの計測原理は、この曲率の変化による通過する光の強度の変化を利用し、構造物の変位（ひずみ）を計測するものである。

#### (2) 機器構成

OSMOSシステムは、対象構造物に設置する光学ストランド（センサー部）とファイバー内を通過する光の強度を検知して変位量に変換する光学変換部、そして計測結果を分析表示するモニタリング部で構成されている。システム構成と代表的な仕様を図-1に示す。

計測結果は①電話回線やNTTなどの通常の電話回線

\*1 (株)宮地鐵工所 千葉工場技術研究所技術開発グループ課長



を利用した通信、②携帯電話やPHSを利用した通信、③専用の光ファイバー網や社内LANを利用した通信、④無線LANや防災無線を利用した通信、⑤インターネットや社内ネットワークシステムを利用した通信により、データの採取やシステムの遠隔制御が行われている。また、光学変換部の出力を従来の計測で使用しているデータロガーに接続し、他のセンサーによる計測結果と合わせて複合的にモニタリングする事例もある。

### (3) 特徴

OSMOSシステムは、以下の特徴を有しており、構造物の長期連続モニタリングに有効である。

- ①測定レンジが広くマイクロからマクロまでの計測が可能
- ②電気・電磁波・落雷などの外部環境の影響を受けない
- ③動的計測が可能で、リアルタイムでのモニタリングが可能
- ④センサー、システムに温度依存性がほとんど無い(温度影響を除去可能)
- ⑤水中など厳しい使用環境において使用可能
- ⑥長期耐久性に優れている

## 3. モニタリング事例1：既設鋼道路橋における長期連続モニタリング

産・学(京都大学)・官(近畿地整)による共同研究プロジェクト新都市社会技術融合創造研究会「既設構造物の延命化技術に関する研究」において、OSMOSを

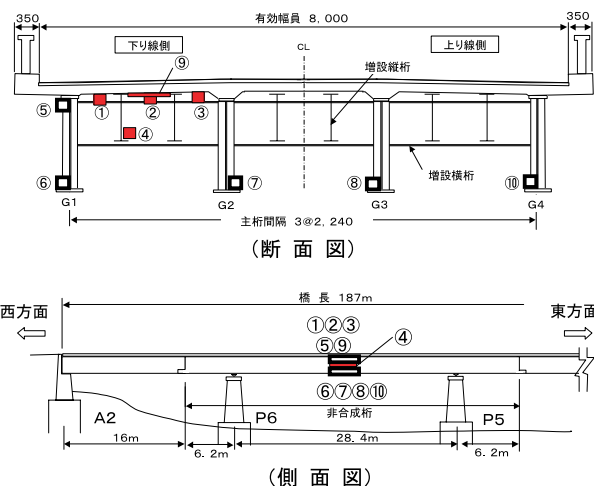


図-2 橋梁概要とセンサー配置

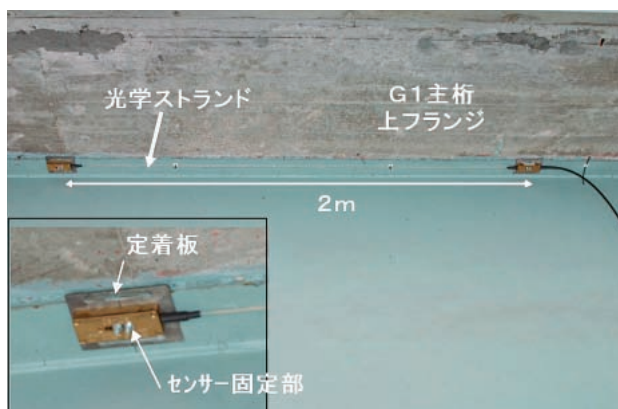


写真-1 橋梁概要とセンサー配置

用いた既設鋼道路橋梁の動的計測を2年間以上継続して行っている。

### (1) 計測概要

計測対象橋梁は、橋長187mの7径間連続ゲルバー鋼鈹桁の道路橋で、供用開始から45年が経過しており、既に縦桁増設、床版増厚などの補強工事が施されている。橋梁の概要を図-2に示す。

計測に用いたOSMOSは、部材に取り付けたセンサー固定点間(1m、2m)の相対変位を精密に測定するものである。OSMOSセンサーの設置位置は主桁上下フランジ、床版下面、増設縦桁下フランジとした。ここで、主桁の中立軸位置を確認するためG1主桁上下フランジに、車両の走行車線による各主桁への影響等を確認するため全主桁下フランジにセンサーを設置した。図-2にセンサー設置箇所、写真-1に主桁フランジにおけるセンサー設置状況を示す。

なお、動的モニタリングは、車重が判明している試験車

両 (27.7tf) を走行させた状態のほか、一般車両の自由な走行状態において、サンプリングタイム 20Hz で実施している。

## (2) 計測結果と評価検討

### 1) 着目計測結果の選定

着目する測定結果は、以下の理由から、橋梁全体の健全性と通行車両重量の評価を同時に可能と考えられる主桁上下フランジの橋軸方向変位とした。

- ・荷重と主桁のたわみは一定の相関関係が成立し、主桁径間中央では、主桁のたわみと橋軸方向変位の間にほぼ線形関係が成り立つ。
- ・主桁中立軸位置は鋼部材とコンクリート床版の剛性から決定されており、その変化は各部材の健全度の評価指標となると考えられ、中立軸位置は上下フランジの変位を用いて評価可能である。

### 2) 主桁橋軸方向変位と通行車両重量

図-6 に G1 桁における橋軸方向変位の測定結果の一部を示す。さらに、試験車両が下り車線を通して G1 桁の変位がピークに達した時点での各主桁下フランジの橋軸方向変位を図-3 に示す。この図から、車両重量が同一であれば、車両速度と車線内の通行位置によらずほぼ同様な変位量となることが確認できた。なお、試験車走行 3 回目における変位量が若干小さくなっており、図-4 に示す G4 主桁下フランジ変位測定結果から、上り線側の通行車両の影響であることが分かる。

この結果より、主桁橋軸方向変位より概ねの車両重量と発生頻度の推定が可能であると考えられる。また、車線毎の車両通行および主桁配置による着目変位への影響を考慮することにより評価精度の向上が期待できる。

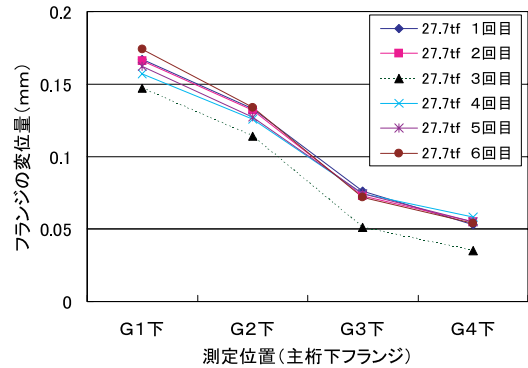


図-3 主桁の変位 (下り車線、27.7tf 試験車走行)

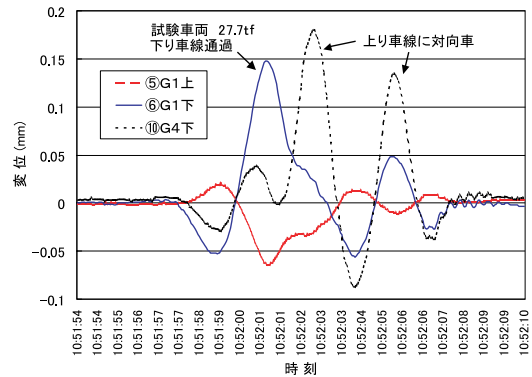


図-4 下り車線 27.7tf 試験車走行 3 回目の変位

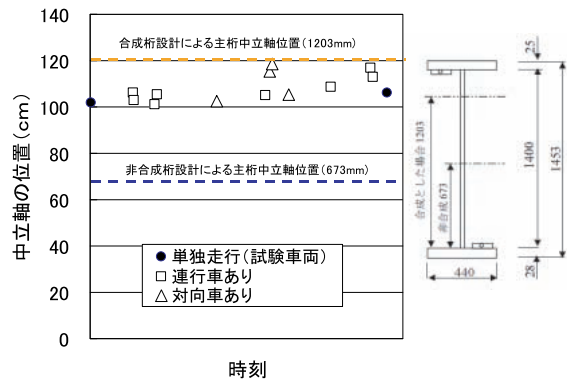


図-5 計測結果による主桁中立軸位置

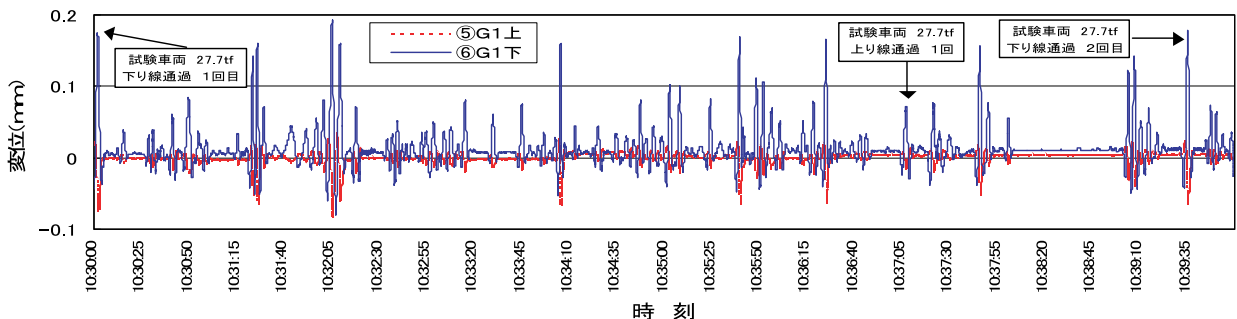


図-6 G1 主桁上下フランジの変位計測結果 (10 分間)

### 3) 主桁の中立軸

図一5に、一般車両の自由な走行状態における、上下フランジの変位計測結果による主桁中立軸位置（腹板下端からの距離、腹板高140cm）を示す。この図より、本橋梁は非合成桁として設計されているが、中立軸位置は合成桁に近い値を示しており、多少の幅はあるものの、車両重量の大小や車両通行状態に関わらずほぼ一定となっている。

このことから、交通状況に関わらず計測結果から主桁中立軸位置に対する一定の評価が可能と考えられる。さらに、その位置の変化から構造特性の変化（≒健全性）の評価も可能と考えられる。

### (3) モニタリングの活用

OSMOSシステムによる主桁橋軸方向変位の動的モニタリング結果から、通行車両の重量と頻度について概ね推定できると考えられる。また、主桁上下フランジの変位測定結果から算定される主桁中立軸位置より、橋梁の健全性の評価に対しても有効な情報が得られることが確認された。

したがって、発生ひずみ以外にも既設橋梁の維持管理の指標となる交通荷重および構造特性である剛性変化の評価に、この動的モニタリング結果が活用可能であると考えられる。

なお、現在も、上記の評価精度向上と健全性評価方法の確立を目指し、継続して連続モニタリングを実施している。今後は、他のセンサーとの複合的なモニタリングによる健全性評価なども課題としてさらなる検討を行いたいと考えている。

## 4. モニタリング事例2：走行車両モニタリング

物流の中心となるトラックなどの大型車両の混入率が高い道路において、鉄鋼・金属・機械・造船などの大工場が集中している場合には、これらの大型車両の中には過積載をした車両が多くなる傾向がある。

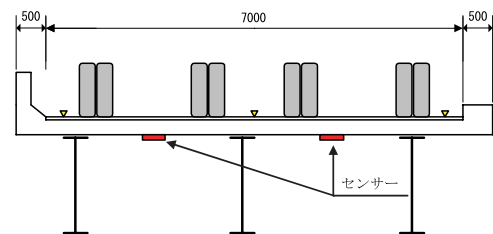
この過積載車両は橋や舗装など道路施設に著しい負担をかけることとなり、損傷の大きな原因となっている。また、過積載による車両への過度な負担から、排出されるガスや発生する騒音・振動による沿道環境の悪化、重大事故の誘発にもつながる危険性が高いが、限られた時間の中で実施される取締りだけでは、その実態を把握できないのが現状である。

このため、道路を快適で安全に通行できるように、適正な維持管理や物流の健全な発展のため、走行する車両の正確な実態把握が必要となる。この走行車両のモニタリングはその第一歩として、OSMOS技術協会のメンバーにより実施されたものであり、以下に概要を示す。

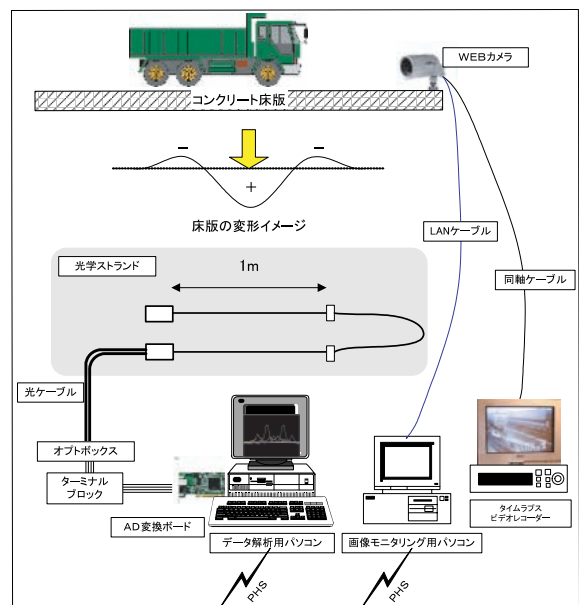
### (1) モニタリングシステム

走行車両重量を計測するシステムには、橋を『はかり』として橋の挙動から重量を推定する簡易的なものから、路面に載荷板を埋め込んだ重量計と車両番号読取装置を組み合わせた本格的なものまであり、費用も数百万円～数億円と様々である。

ここで紹介するシステムは、長期間のモニタリングに適した光ファイバーセンサーを使用し、橋を『はかり』として利用する簡単なものであるが、通行している車両重量の実態の概要を把握することが可能である（図一7参照）。



(センサー設置位置)



(システム構成)

図一7 走行車両モニタリングシステム

## (2) モニタリング内容

### 1) 荷重車載荷試験

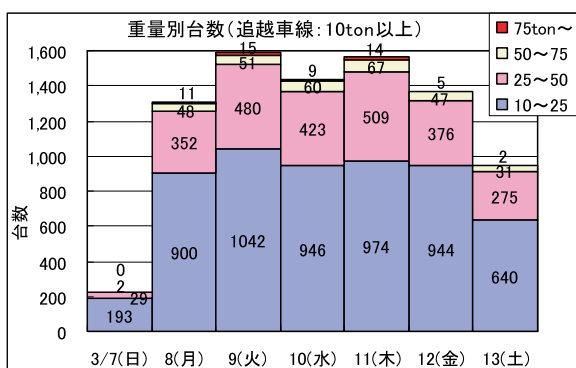
荷重車（総重量が20tonの3軸貨物車：写真－2）によりセンサーの応答を計測し、荷重推定の基本となる基礎データを取得する。試験は、交通規制は行わず一般交通状況下にて、1車線あたり5回以上実施した。



写真－2 荷重車（総重量が20tonの3軸貨物車）

### 2) 車両重量モニタリング

一般大型車両（総重量10ton程度以上）を対象として、センサーの応答の計測結果から、荷重車載荷試験により得られた荷重推定の基本データを用いて、橋梁上を通過する車両の重量推定を行う。図－8に推定結果の一例を示す。



図－8 推定された重量別通過車両台数

### (3) モニタリングの活用

過積載車両は、道路構造物損傷の大きな要因となっているため、過積載車両の交通実態把握は、道路構造物の維持管理において重要なデータとなり、モニタリングにより主要な路線の主要な地点における活荷重実態を把握することは有用である。

把握した荷重実態をもとに、各架設年代ごとの代表的な構造形式について、負荷が大きい部位の抽出や負荷の程度の検討が可能となる。また、過去の損傷事例と荷重実態の関係を検討することにより、点検の頻度や重点的に点検すべき箇所・橋梁や、荷重実態に応じた補修・補強の計画など、橋梁形式や路線ごとの管理方針の設定にも利用可能であると考えられる。

## 5. モニタリング事例3：コンクリート構造物の健全度評価

コンクリート構造物について、OSMOSによるひずみ計測結果を用いて、その劣化進行の定性的・定量的な評価方法の提案をOSMOSO技術協会と芝浦工業大学との共同研究において行っており、以下にその内容を紹介する。

### (1) 健全度評価法の概要

#### 1) 中立軸の変動による劣化進行評価

図－9に示すように、主桁上下面2箇所に設置した光学センサーより得られるひずみ値より、構造体の中立軸位置が算出できる。コンクリートの劣化に伴い、この中立軸位置が変動する。この変動量から、劣化進行の評価を行う。

この手法は、劣化進行の有無という定性的な判断に有効である。

#### 2) 固有周期による剛性の低減率評価

一般に計測で得られた自由振動部分のひずみ波形に対するフーリエ変換解析より、その構造物の固有周期が評価可能である。さらに、長期連続モニタリングにより、経年変化に対する固有周期の変動を確認可能と考えられる（図－10参照）。

この実構造物の固有周期の変動から、剛性劣化の変動が評価可能となり、劣化レベルの判定が可能と考えられる。

### (2) OSMOSのひずみ計測結果による構造物の劣化進行評価

#### 1) 中立軸変動による橋梁劣化判定

写真－3に示すS橋において、20tf検測車両を用いた載荷試験により平成17年2月（冬期）と平成17年6月（春期）にOSMOSによるひずみ計測を実施した。

図-11に、光ストランドセンサーの設置位置（主桁側面の上下部）と、このひずみ計測結果より算定される中立軸位置変動を示している。この図から、中立軸は冬期では上面より414.5（mm）、春期では上面より418.2（mm）の位置にあり、その変動はほとんど無い結果が得られ、劣化進行も無いものと判断された。

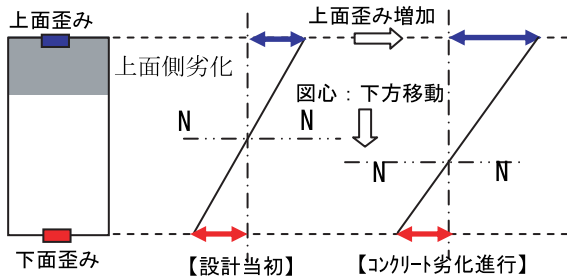


図-9 劣化による中立軸位置の変動

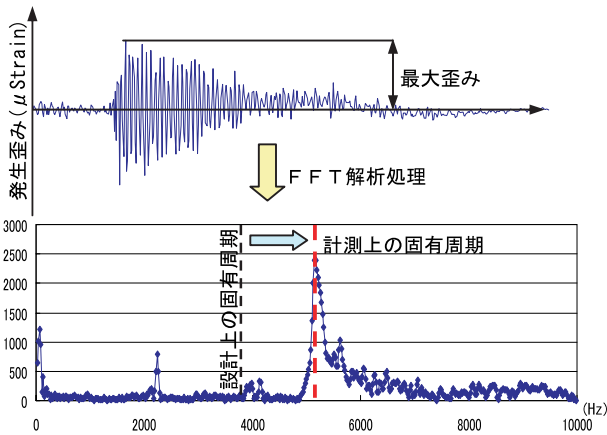


図-10 劣化による固有周期の変動

## 2) 固有周期による構造物の剛性低下評価

図-12 (a) に示すように、上面にひび割れが発生したP C梁の動載荷試験において、支間中央下面ひずみの動的計測を実施している。図-12 (b)、(c) にひずみの応答波形とその波形のフーリエ変換解析結果を示しており、(b) が平成15年8月に、(c) が平成20年2月に実施した結果である。ひずみの応答波形は、平成20年の計測結果において衝撃の影響を示す細かい波形の振幅と間隔が大きくなっており、ひび割れ進行に伴う衝撃の影響が大きくなったことが判断できる。またフーリエ変換解析結果より、卓越振動数について5.814（Hz）から3.945（Hz）への長周期化傾向が確認できた。振動数と剛性は比例関係にありひび割れ発生による剛性低下を定量的に評価することが可能と推測される。

## 3) 考察

以上より、コンクリート構造物におけるOSMOSによるひずみ計測結果を用いた劣化進行の定性的・定量的な評価に対して、次の事項が考察される。

- ①主桁上下に設置した2センサーから得られるひずみ値より中立軸を算定することで、劣化の有無が定性的に判断可能である。



写真-3 S橋下面状況

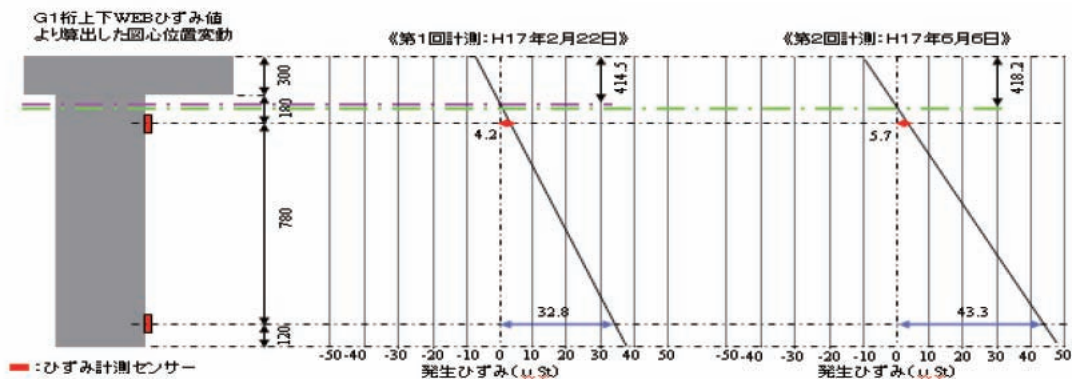


図-11 G1主桁上下フランジ部のひずみ値より算定された中立軸位置

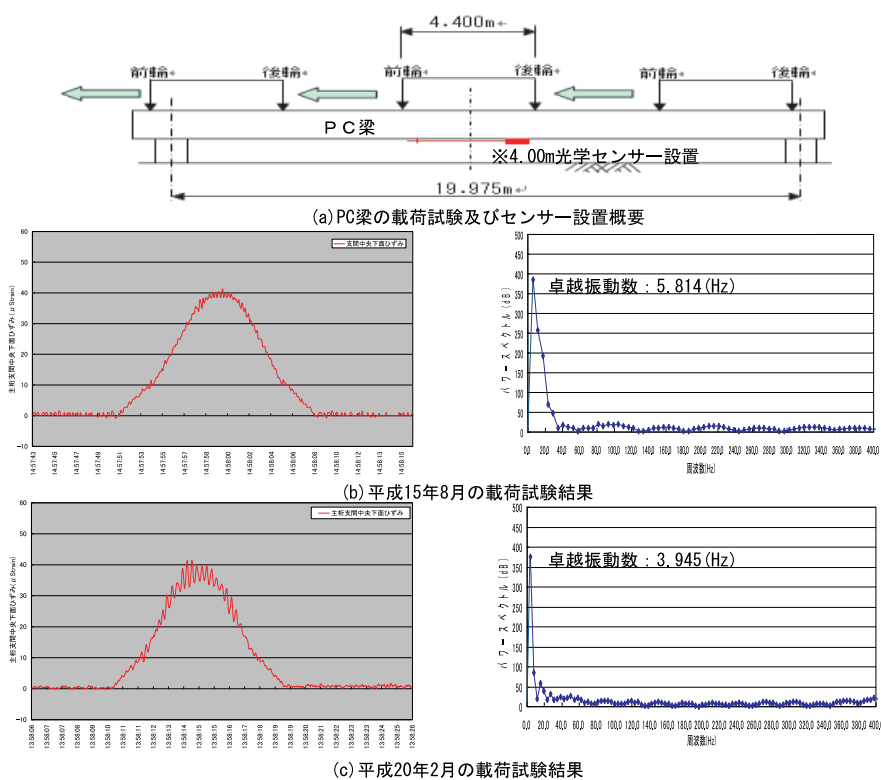


図-12 PC梁上面のひび割れ進行に伴う固有周期の変化

②ひずみの応答波形による固有周期から、構造物の剛性低下を定量的に評価することが可能と推測された。

## 6. おわりに

OSMOSによるモニタリングにより、構造物の維持管理の指標となる交通量、構造特性（中立軸の位置、剛性低下（固有周期変化））が評価可能であることを示した。

今後は、これらモニタリングから評価された指標を実際の構造物の維持管理指標として利用するための精度向上および閾値の設定方法を課題として検討を進めたい。また、構造物固有の損傷評価に最適なOSMOSセンサー設置位置、他のセンサーによる計測結果との複合評価も検討を進めたい。

最後になりましたが、本稿を執筆するにあたり、技術資料の提供を含め、ご指導・ご協力頂いたOSMOS技術協会の関係各位に深く感謝申し上げます。

## <参考文献>

- 1) 能登宥愿, 中島一浩, 澁谷 敦: 光センサーによるモニタリングシステム(OSMOS)の特徴と有効性, 宮地技報 No.16, pp.80-82, 2000.12.
- 2) 能登宥愿: OSMOSの使用法とその特徴, 宮地技報No.17, pp.127-130, 2001.12.
- 3) 若下 宏, 山下久生, 能登宥愿: OSMOSシステムによる実橋モニタリング報告, 宮地技報 No.20, pp.90-99, 2005.3.
- 4) 山下久生, 能登宥愿, 蓮井昭則, 大島義信: 光学ストランドによる既設橋梁の動的モニタリング, 土木学会第60回年次学術講演会概要集, 1-428, pp.853-854, 2005.9.
- 5) 蓮井昭則, 永谷秀樹, 大島義信: 光学ストランドによる既設橋梁の動的モニタリングとその利用, 土木学会第62回年次学術講演会概要集, 1-117, pp.233-234, 2007.9.
- 6) 門 万寿男, 村坂宗信, 勝木 太, 魚本健人: 光学センサーを用いたコンクリート構造物の健全度評価法の提案, 土木学会第63回年次学術講演会概要集, 5-517, pp.1033-1034, 2008.9.

2010.3.19 受付