

技術マニュアル

光学ストランドセンサによる構造物の ひずみ計測・モニタリング技術

2024年3月

日揮株式会社

1 概要

光ファイバーの技術を用いた『光学ストランドセンサ』は、構造物の変位を1 m間の平均ひずみ（分解能 1μ ）として測定する技術である。計測データは、専用クラウドサーバーに自動的に保存され、遠隔地からデータの確認やダウンロードが可能である。

システムの特徴として、1/100 秒間隔（100Hz サンプルング周波数）のひずみ値を常時監視し、構造物に生じた変状をリアルタイムに検知し、担当者に E メールで通知する機能を有している。

本モニタリングシステムには、図-1.1 に示すとおり、以下の 2 種類の装置構成があり、現場の状況や利用者のニーズに応じたモニタリングシステムを選択することができる。

- ① 有線式 EDAS（エダス）システム：センサと EDAS ステーション（データ収集ユニット）を有線接続することで、長期的に大規模なデータが収集できる
- ② 無線式 LIRIS（リリス）システム：電源が確保できない現場でもバッテリーにより動作し、静的データの遠隔取得とリアルタイムに変状を検知する

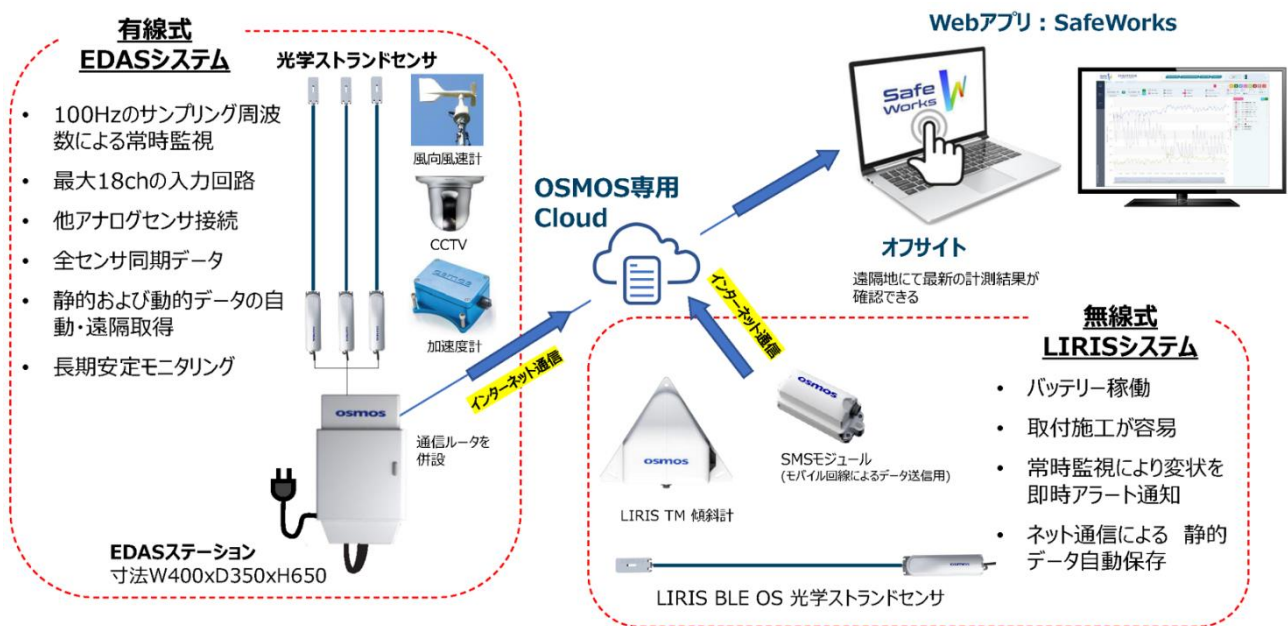


図-1.1 光学ストランドセンサによるひずみ計測システム

2 原理

光学ストランドセンサには光ファイバが使用されており、曲がり部から赤外線が漏洩するマイクロベンディングと呼ばれる原理が利用されている。全長1 mのひも状のセンサ（ストランド）部には、3つ網状に編み込まれた光ファイバが内蔵されており、赤外線の光強度の変化から変位量を計測する。光学ストランドセンサによるひずみ計測の原理の概要を図-2.1 に示す。なお、計測データの出力は、センサ固定部間の相対変位量である1 m間の平均ひずみ（ $\mu \epsilon$ ）となる。

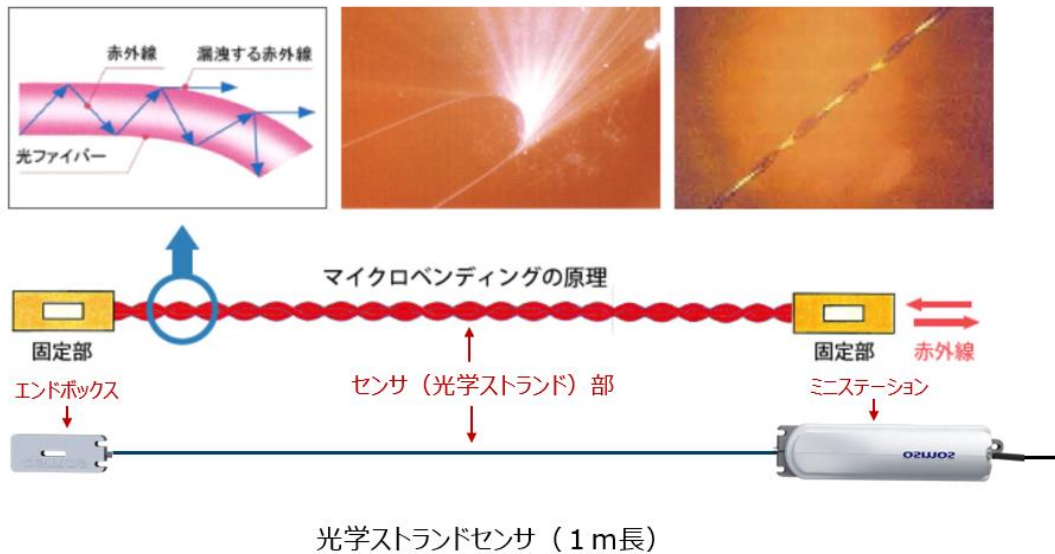


図-2.1 光学ストランドセンサによるひずみ計測の原理

3 適用条件

(1) 採否の検討のための条件

光学ストランドセンサを用いたひずみ計測・モニタリングを採用するための条件を以下に列記する。

- 光学ストランドセンサを構造物に設置するためには計測部位に近接できる必要がある。
- センサの全長は約 1.4m であるため、構造物にはフラットなスペースが必要である。ただし、トンネル断面のような円弧状平面への設置は可能である。
- 有線式 EDAS (エダス) システムを採用する場合は、センサと EDAS ステーションの間をケーブルで接続するため (最大延長 200m)、配線ルートを確保する必要がある。また、EDAS ステーションには電源供給 (100V AC) が必要となる。
- 無線式 LIRIS (リリス) システムを採用する場合は、光学ストランドセンサ本体とデータ通信の SMS モジュールのバッテリーを定期的に交換する必要がある。標準的な使用方法 (1 時間に 1 つの静的データをアップロード) で約 1 年間のバッテリー寿命となる。
- システムを設置する場所は、携帯電話の電波が届く場所である必要がある。

(2) 精度と信頼性に関する留意点

光学ストランドセンサを用いたひずみ計測・モニタリングを実施するにあたり、精度と信頼性に関して留意すべき点を以下に列記する。

- 光学ストランドセンサは、構造物への設置時にプレテンション (引張力: 約 5kgf) を掛けた状態で固定することで、 $\pm 1500 \mu$ のひずみ範囲を計測することができる。センサの固定部にゆらみやズレが生じることで、計測値に影響を及ぼす恐れがある。
- 構造物とは直接接触していないセンサ (光学ストランド) 部に物理的な接触等があった場合、計測値に影響を及ぼす可能性がある。
- センサの使用温度範囲は、 $-30^{\circ} \text{C} \sim 50^{\circ} \text{C}$ である。

4 調査要領

(1) 調査に必要な機器・仮設備

ひずみ計測・モニタリングに必要な機器や設備の例を、①有線式 EDAS(エダス)システムについて表-4.1 および図-4.1 に、②無線式 LIRIS(リリス)システムについて、表-4.2 および図-4.2 に示す。

表-4.1 有線式 EDAS(エダス)システムに必要な機器・設備

種別	機器名	規格等	備考
計測用機材	・ EDAS ステーション		100V AC 電源供給
	・ アナログケーブル	4-20mA 出力	
	・ 光学ストランドセンサ		
附属機材	・ 通信用ルーター		SIM カード内蔵
	・ 安定化電源装置		現場環境により必要に応じて設置
	・ 無停電電源装置(UPS)		
その他 架設設備など	・ センサ設置治具		構造部や現場環境により選定
	・ EDAS ステーション用の設置架台・収納ケース		
	・ 設定用 PC・タブレット	Windows・Android	

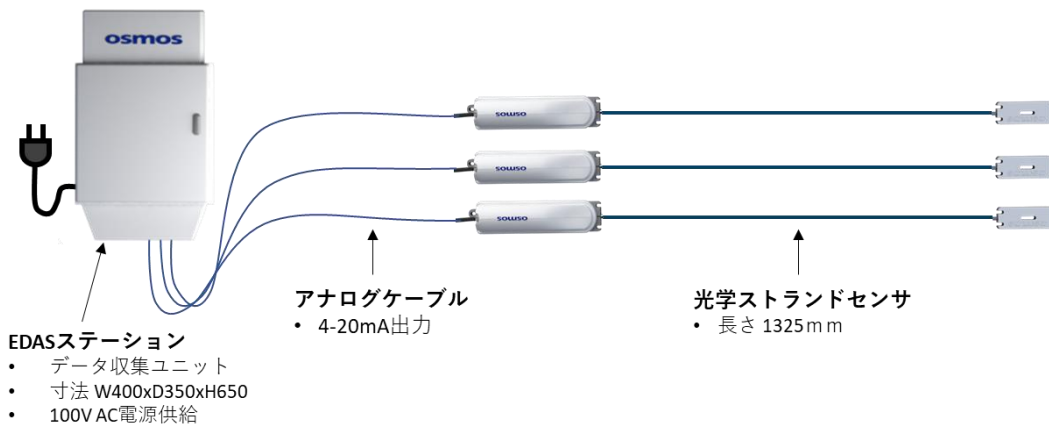


図-4.1 EDAS(エダス)システム装置概要

表-4.2 無線式 LIRIS(リリス)システムに必要な機器・設備

種別	機器名	規格等	備考
計測用機材	・ 光学ストランドセンサ		SIM カード内蔵
	・ SMS モジュール		
附属機材	・ バッテリー	リチウム電池 3.6V	センサおよびSMS モジュール用それぞれ
	・ 通信ケーブル		
その他 架設設備など	・ センサ設置治具		構造部や現場環境により選定
	・ 設定用 PC・タブレット	Windows・Android	

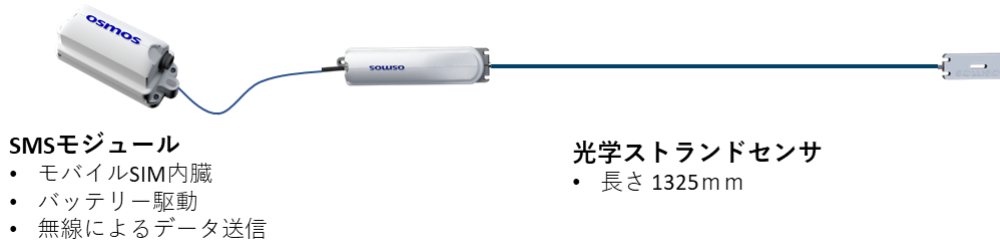


図-4.2 LIRIS（リリス）システム装置概要

(2) 事前準備から調査全体の流れ（調査フロー）

光学ストランドセンサを使用したひずみの調査フローを図-4.3 に示す。

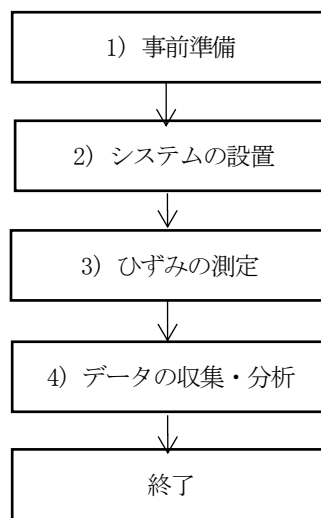


図-4.3 調査フロー

(3) 調査要領

光学ストランドセンサを使用した調査の手順を以下に示す。（前記調査フロー参照）

1) 事前準備

現地調査結果やひずみ測定の目的、橋梁構造物、システム設置環境などを考慮し、応力（ひずみ）調査施工計画書を作成する。計画書には、使用する機器・資材の仕様、システム・センサの施工方法および設置個所、調査項目、データの取得例、工程・安全管理の方法などを記載する。なお、調査に必要となるモニタリング機器の在庫が不足している場合、1～2 ヶ月程度の調達期間を要する。

2) システムの設置

コンクリート構造に光学ストランドセンサを設置する場合は、**写真-4.1**に示されているように、センサの両端をオールインアンカー（削孔孔 30mm）で固定する。また、センサの中間部については、ノンプラグビス（削孔孔 25mm）を使用して固定具を取り付け、結束バンドで固定する。

鋼構造物の場合は、**写真-4.2**に示されているように、センサの両端をネオジム磁石と M5 ボルトを使って固定する。センサの中間部の固定にも同様にネオジム磁石 2 か所と SUS サドルを使用し

て固定する。

コンクリート構造と鋼構造の両方について、構造物設置面の状態に応じて上記の方法で固定力を確保できない場合、樹脂接着剤等を併用して取り付け治具を固定する。センサ取り付け治具の写真を写真-4.3に示す。

光学ストランドセンサは、固定治具にM5 ボルトとゆるみ止めナットで固定する。手順としては、まずミニステーション側のボルトから固定し、次にセンサ部にプレテンション（引張力：約 5kgf）をかけながらエンドボックス側の長孔で調整しボルトで固定する。

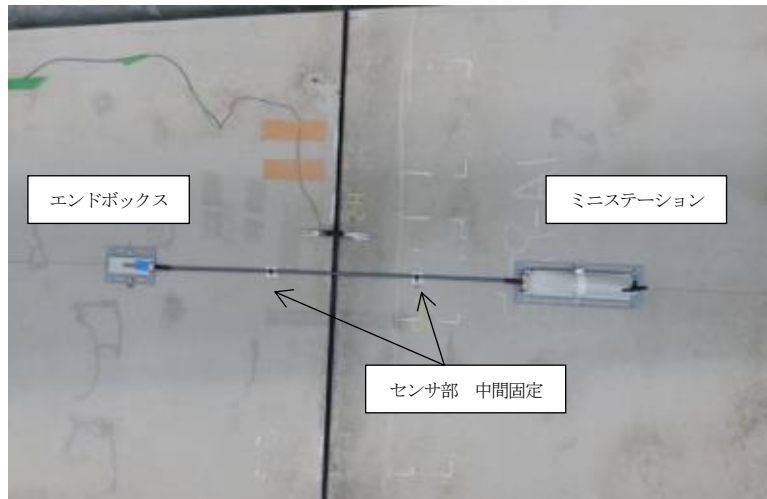


写真-4.1 コンクリート構造物へのセンサ設置仕様

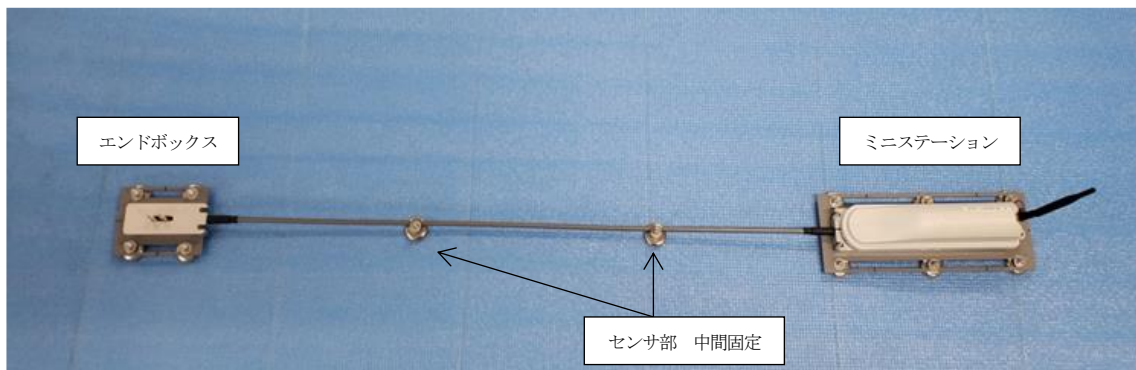


写真-4.2 鋼構造物へのセンサ設置仕様



(1) エンドボックス側 (L120xD90x3. 2t)



(2) ミニステーション側 (L300xD104x3. 2t)

写真-4.3 光学ストランドセンサの取付治具

有線式EDAS（エダス）システムの場合、センサとEDASステーション(データ収集ユニット)をアナログケーブルを用いて接続する（最大延長 200m）。EDASステーションの設置方法は、写真-4.4に示すとおり、設置環境によって適切な方法を採用する。



室内：壁掛け



橋梁箱桁内部：ラック掛け



屋外：収納ボックス



写真-4.4 EDASステーションの設置例

3) ひずみの測定

本システムによるひずみの測定として、表-4.3 に示すとおり、静的データ、リアルタイムデータ、ダイナミックデータの3通りのデータ取得が可能である。図-4.4~4.6 にそれぞれの取得データの例を示す。

表-4.3 光学ストランドセンサにより測定可能なひずみデータ

ひずみデータ	有線式 EDAS(エダス) システム	無線式 LIRIS(リリス) システム
静的データ (静的インターバルデータ)	<ul style="list-style-type: none"> 1~60 分間隔 (設定により変更可能) の静的ひずみデータがクラウドに自動アップロードされる 	<ul style="list-style-type: none"> 最小 60 分間隔の静的ひずみデータがクラウドに自動アップロードされる
リアルタイムデータ (100Hz サンプリング周波数の動的ひずみデータ)	<ul style="list-style-type: none"> インターネットを介して遠隔操作により指定した時間帯における動的データが測定可能 計測データはクラウドアップロードされる 	<ul style="list-style-type: none"> 現地にて PC もしくはタブレットからの無線通信により接続したセンサの動的データが取得できる
ダイナミックデータ (しきい値/トリガーを超えた際の短時間の動的データ)	<ul style="list-style-type: none"> 事前に設定したひずみのしきい値を超えた際に、その事象が発生した前後 10 秒間程度データが自動でクラウドアップロードされる しきい値を超えた際に登録した担当者に自動でアラートメールが送付される 	<ul style="list-style-type: none"> 事象発生時の動的データはセンサメモリ内に保存されるため、現地にて無線通信によりマニュアル操作によるアップロードが必要となる しきい値を超えた際に登録した担当者に自動でアラートメールが送付される

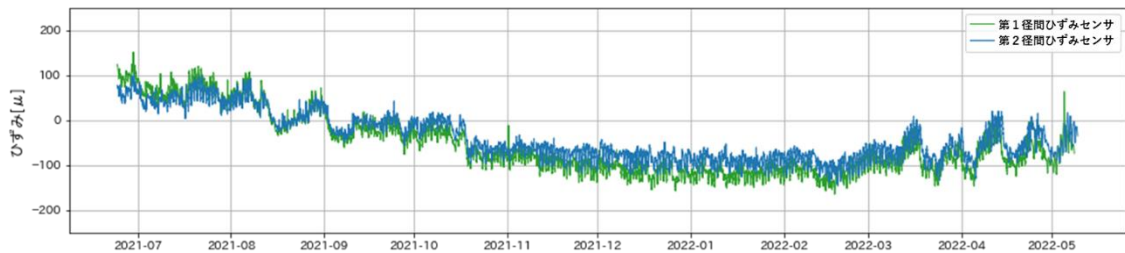


図-4.4 静的ひずみデータの計測例
PC桁下フランジ (1時間ごと約1年分)

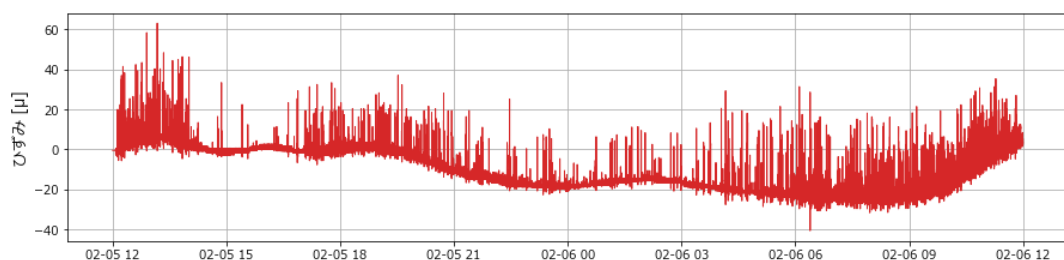


図-4.5 リアルタイムデータの計測例
100Hz 動的ひずみデータ 24時間分

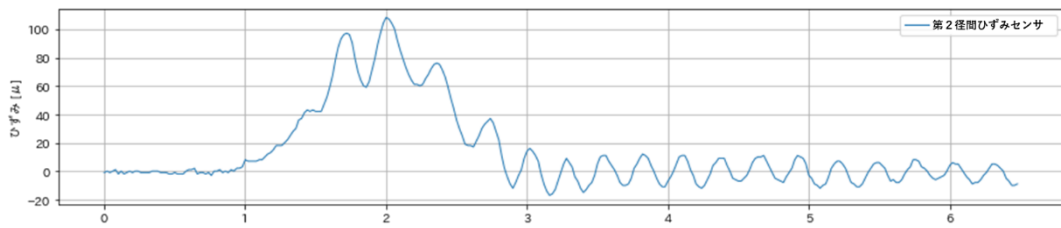


図-4.6 ダイナミックデータの計測例
ひずみ閾値 100μ を超えた際の動的ひずみデータ（重車両通行時）

5 結果の活用に関する技術情報

(1) 重車両通行時の動的ひずみ

車両走行試験時や重車両通行時の動的ひずみ挙動を計測することで、橋梁を維持管理するための目安となるひずみ値を知ることができる。図-5.1 には車両通行時の動的ひずみ計測結果の例を示す。これにより、動的ひずみを管理するためのしきい値の決定や長期的な構造上の劣化進行の検証に役立てることができる。

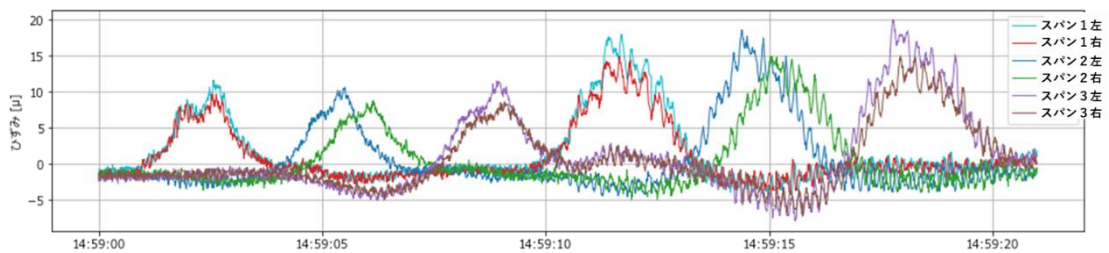
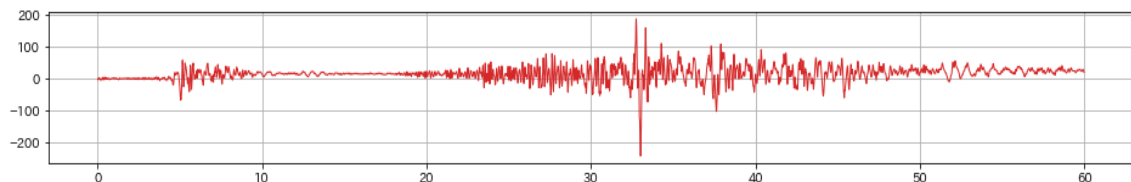


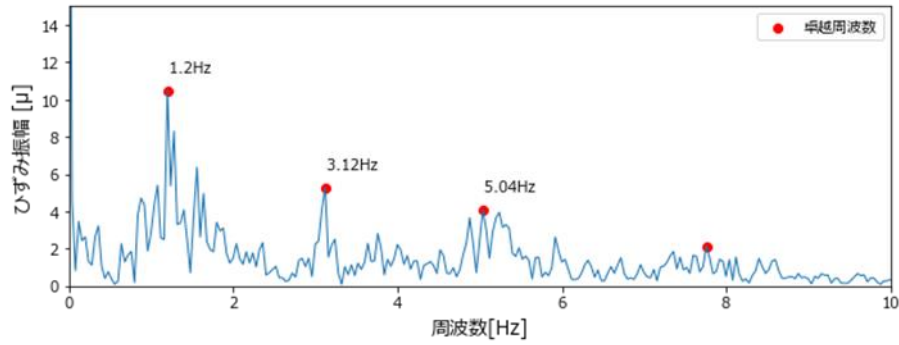
図-5.1 車両通行時のひずみ計測例（3径間連続スパン橋梁の2台連続走行時）

(2) 周波数分析による固有振動特性の把握

橋梁の常時微動による動的ひずみを計測し、周波数分析を行うことで固有振動特性を把握することができる。固有周波数の定量的な管理は、橋梁の損傷や劣化の進行を把握するうえで有益な情報となる。図-5.2 に地震時に計測した動的ひずみとFFT分析結果の例を示す。



(1) 地震時のダイナミックデータ



(2) F F T分析結果

図-5.2 P C箱桁橋の地震時の動的ひずみ計測および周波数分析例

(3) 断面特性の把握中立軸位置

橋梁桁の同一断面の上縁と下縁にセンサを設置することで、中立軸位置や断面特性を把握することができる。計測結果から得られた中立軸位置と設計値を比較検証することで、橋梁断面の実際の剛性を定量的に把握することができる。図-5.3 にP C桁橋梁におけるひずみ計測結果に基づく、中立軸位置の算出例を示す。

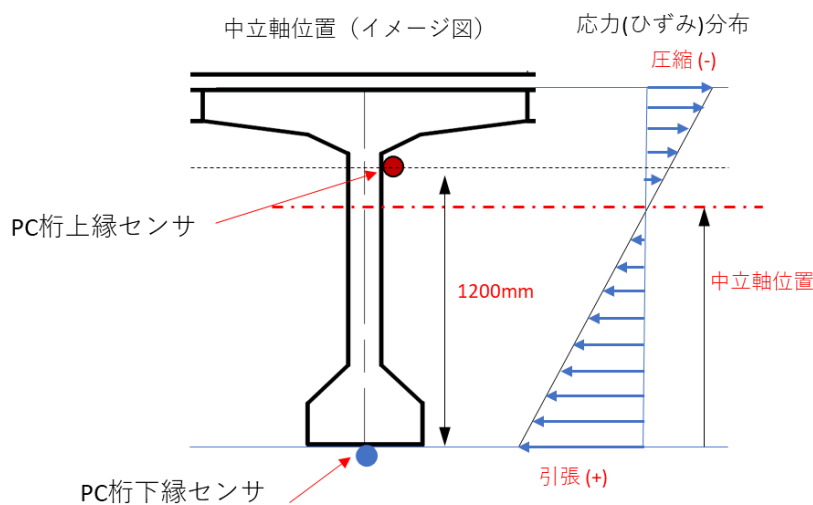
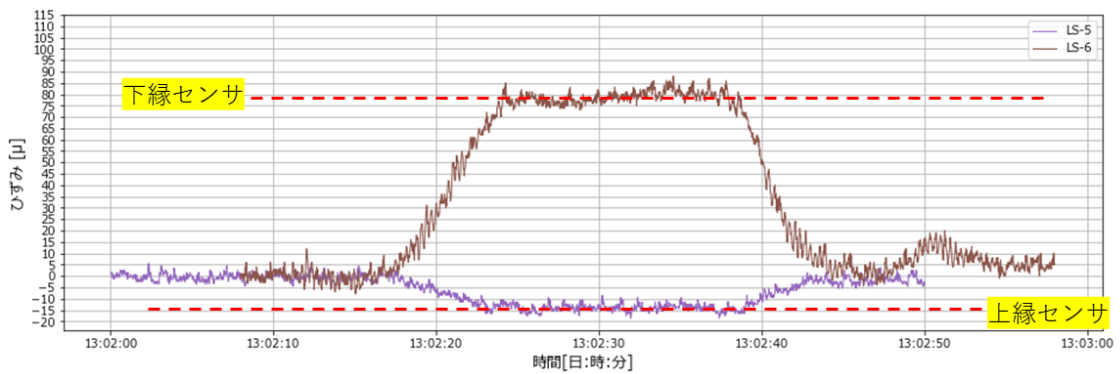


図-5.3 P C桁橋の動的ひずみ計測による中立軸位置の評価例

6 調査結果の解釈の留意点

測定したひずみデータを用いる際の留意点を以下に示す。

- 橋梁等の土木構造物における長期的なひずみ挙動は、温度変化による熱膨張・収縮ひずみによる影響が支配的となるケースが多く、とりわけ静的データについては、ひずみの絶対値で管理するのではなく、温度変動の履歴との相関関係によって評価する必要がある。例として、**図-4.4**に示した静的ひずみ挙動に対応する温度の計測結果を**図-6.1**に示す。**図-6.1**はセンサ内部の温度を出力した結果であるが、温度の変動とPC桁のひずみ挙動が高い相関性を示していることがわかる。

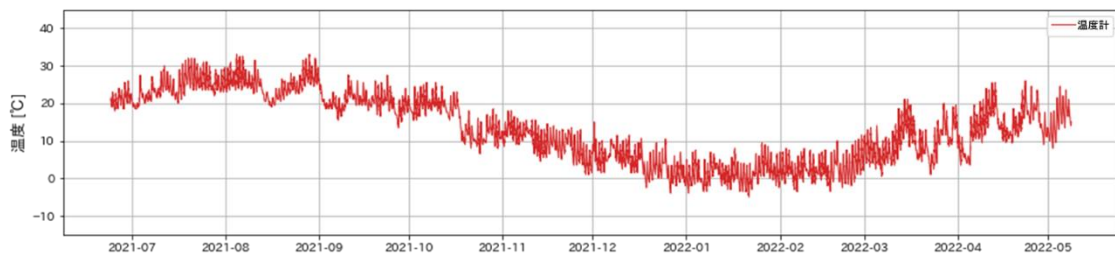


図-6.1 静的温度データ（図-4.4に対応）

- 車両通行時、強風や地震の振動による物理的なひずみ計測の結果を評価する際には、上述の温度変動による熱ひずみの成分を除去する必要がある。熱ひずみを除去する手法としては、物理的な動的ひずみが発生している数分程度以内程度の短時間データの切り出し、もしくは移動平均法によって長期的な温度変動分を除去する方法がある。
- 光学ストランドセンサで計測したひずみはセンサ固定間隔である1m区間の平均ひずみが出力される。このため構造部材や測定箇所によっては、設計値や一般的なひずみゲージによって計測できる局所断面に生じるひずみと差が生じる可能性を考慮する必要がある。

7 記録

調査の記録として残すべき基本事項を以下に示す。

- 1) 対象物名称： 調査構造物の名称、概要
- 2) 調査年月日、モニタリング期間
- 3) 調査機器：センサシステムの種類、仕様
- 4) 設置方法：設置方法、箇所、固定方法、使用する資材、図面等に寸法を記載
- 5) 調査結果：計測データの記録およびデータ分析結果

8 参考となる技術図書等

- 1) OSMOS 技術協会ホームページ：<https://www.osmos.jp/>
- 2) 光ファイバセンシング振興協会：ポイント型光ファイバセンサ建設分野向けマニュアル