

§3. 光ファイバセンサの適用性検討

3-1. 検討の目的

様々な歪・応力モニタリング技術の中でも光ファイバを用いたモニタリング技術は、実橋梁への適用が実施され始めている。従来、点でしか把握しえなかった歪・応力の情報を、空間の分布情報として把握できるようになる点が、ニーズや期待として最も大きいように思われる。しかし、現状では、光ファイバセンサにも様々なタイプものがあり、実橋梁の適用に向けては、計測方法や長所・短所、計測精度について把握しておく必要がある。また、光ファイバセンサを用いて実橋で測定したという事例は良くみられるものの、ひずみゲージ等、他のセンサと比較検証した結果はあまり表に出ていない。そこで、本章では、鋼桁試験体の静的載荷試験で得られたひずみ値の比較を通じて、光ファイバセンサの特性、精度について検討する。使用した光ファイバセンサは、FBG センサと BOTDR センサの2種類である。

3-2. 実験で使用する光ファイバセンサ

実験で使用した2種類の光ファイバセンサの概要を以下に示す。

3-2-1. FBG 光ファイバセンサ

FBG (Fiber Bragg Grating) とは、図 3-1 に示すように光ファイバに紫外線を照射して一定周期の回折格子(グレーティング)を加工したもので、FBG に光を入射させると、グレーティング周期に応じた特定波長の反射光が戻ってくる。FBG 近傍の光ファイバに軸方向ひずみが発生し、FBG のグレーティング周期が変化すると 図 3-2 に示すように反射光の波長がシフトする性質があり、この性質を利用して、ひずみ測定を行う。

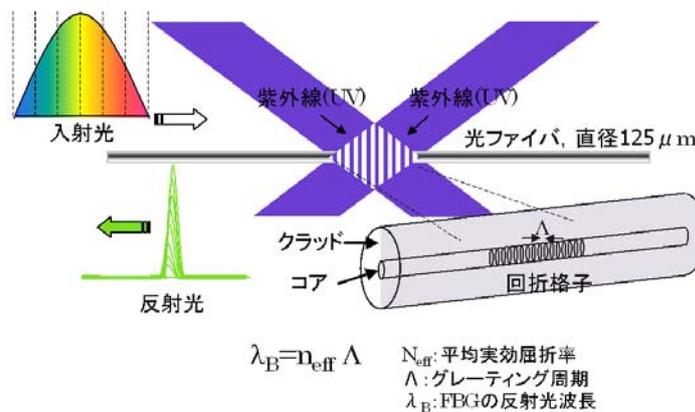


図 3-1 FBG センサによるひずみ計測の原理¹⁾

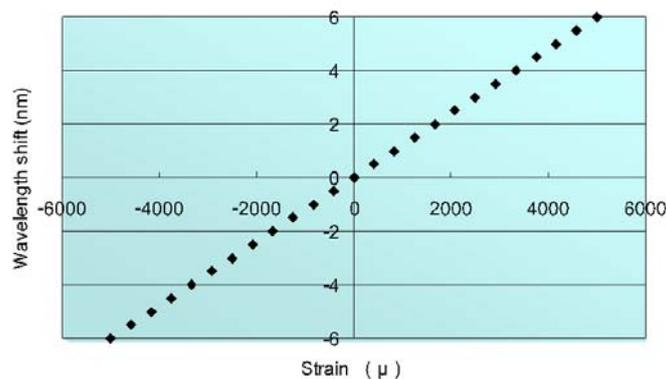


図 3-2 波長シフトとひずみの関係¹⁾

3-2-2. PPP-BOTDA 光ファイバセンサ

PPP-BOTDA (Pulse-PrePump Brillouin Optical Time Domain Analysis) とは、光ファイバの両端に Pulse の Pump 光と CW の Probe 光を入射した時に誘導されるブリルアン散乱光の変化をとらえ、光ファイバに生じているひずみを計測する方法である (図 3-3)。Pump 光のパルス幅を狭くすれば、高い空間分解能が得られることは一般に知られているが、光ファイバ内に誘起される音波には立ち上がり時間があり、高空間分解能を追求するために Pump 光のパルス幅を狭くすると、誘導ブリルアン・ゲインの低下と誘導ブリルアン・ゲイン・スペクトラムの変形のリスクを負わなければならない。PPP-BOTDA は Pump 光に着目して、光ファイバ内に誘起される音波を先に立ち上がらせる手法を取ることで、10cm 空間分解能と $\pm 0.0025\%$ ひずみ計測精度を実現している。

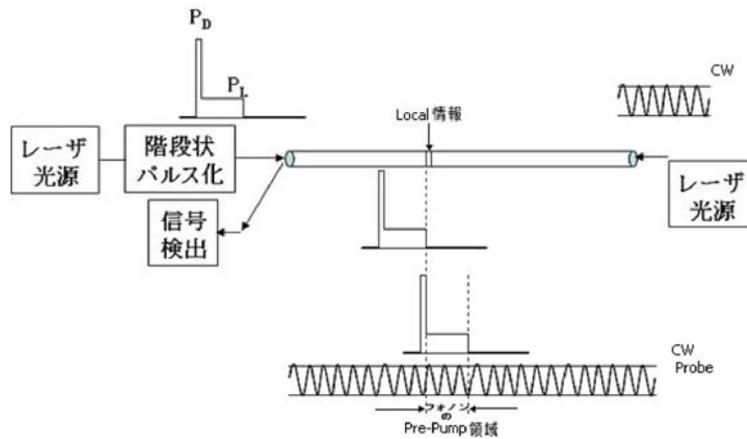


図 3-3 PPP-BOTDR ひずみ計測の原理²⁾

3-3. 実験の概要

3-3-1. 試験体

使用した試験体は、高さ 390mm、長さ 4400mm の H 鋼桁試験体である (図 3-4)。鋼種は SM400 である。後述の通り、実験は 4 点曲げで行うが、せん断力が作用する区間は座屈防止用として、ウェブに鋼板を溶接で設置した。

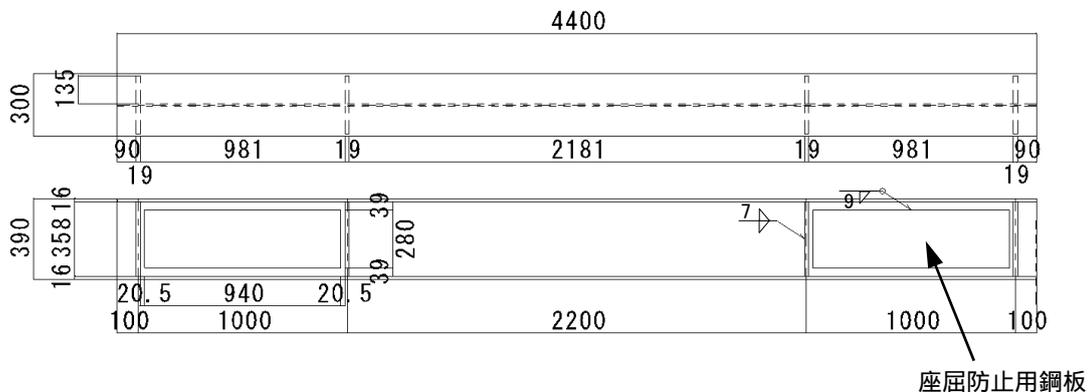


図 3-4 桁試験体の形状と寸法

3-3-2. センサの設置位置

試験体に設置するセンサは、2種類の光ファイバセンサ（FBG センサおよび PPP-BOTDR センサ）、ひずみゲージ、応力聴診器、磁歪法の5種類である（表 3-1）。センサ設置位置を図 3-5 に、設置状況を図 3-6 に示す。

表 3-1 設置するセンサの一覧

| | | 測定位置 | 測定点数 |
|----------|---------------|--------|-------|
| 光ファイバセンサ | FBG センサ | 下フランジ | 2 点 |
| | PPP-BOTDA センサ | 上下フランジ | 1 ライン |
| ひずみゲージ | | 上下フランジ | 24 点 |
| 応力聴診器 | | 下フランジ | 2 点 |
| 磁歪法 | | 下フランジ | 1 点 |

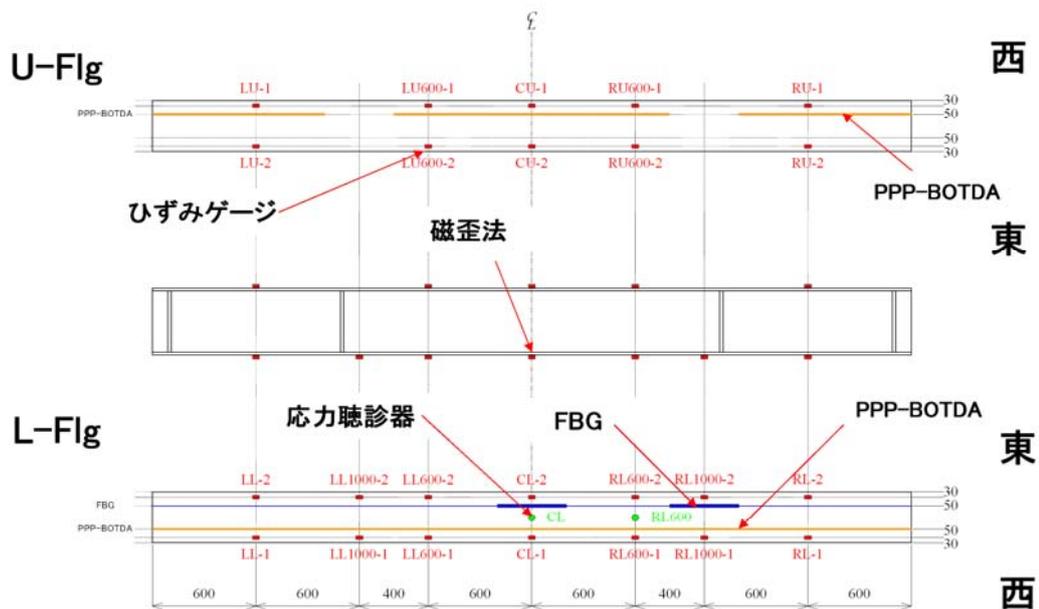


図 3-5 センサ設置位置

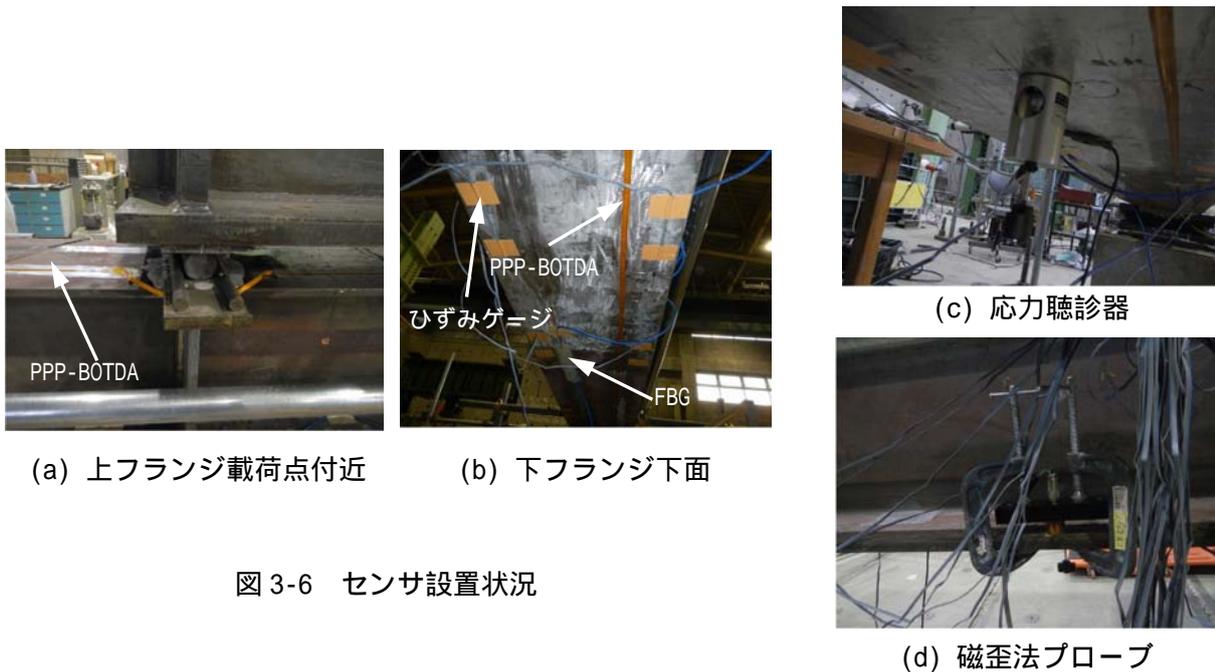


図 3-6 センサ設置状況

3-3-3. 実験方法

実験は、静的載荷容量 2000kN の試験機を用いて、等曲げ区間を設ける 4 点曲げ試験で行った(図 3-7)
実験状況を 図 3-8 に示す。載荷手順は表 3-2 に示すとおりである。2 回の予備載荷後、本載荷を行った。
本載荷では、梁理論から求められる最大荷重 (950kN) までは荷重制御、それ以降は変位制御とした。

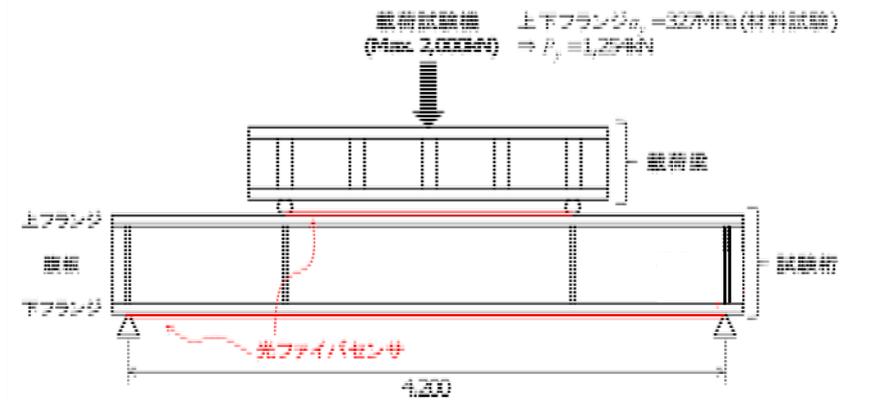


図 3-7 載荷方法



図 3-8 試験状況

表 3-2 載荷手順

| 計測番号 | 荷重 [kN] | 備考 | 計測番号 | 荷重 [kN] | 備考 |
|------|---------|-------------|------|---------|---|
| 1 | 0 | イニシャル測定 | 32 | 0 | イニシャル測定 |
| 2 | 50 | 予備載荷 1回目 | 33 | 100 | 荷重制御 |
| 3 | 100 | | 34 | 200 | |
| 4 | 150 | | 35 | 300 | |
| 5 | 200 | | 36 | 400 | |
| 6 | 250 | | 37 | 500 | |
| 7 | 300 | | 38 | 600 | |
| 8 | 350 | | 39 | 650 | |
| 9 | 400 | | 40 | 700 | |
| 10 | 300 | | 41 | 750 | |
| 11 | 200 | | 42 | 800 | |
| 12 | 100 | | 43 | 850 | |
| 13 | 0 | 予備載荷 2回目 | 44 | 900 | 変位制御 (アクチュエータ変位) 45~53: 0.2mm 53~54: 0.5mm 54~57: 1.0mm 57~62: 2.0mm |
| 14 | 50 | | 45 | 950 | |
| 15 | 100 | | 46 | ↓ | |
| 16 | 150 | | ↓ | ↓ | |
| 17 | 200 | | ↓ | ↓ | |
| 18 | 250 | | ↓ | ↓ | |
| 19 | 300 | | ↓ | ↓ | |
| 20 | 350 | | ↓ | ↓ | |
| 21 | 400 | | ↓ | ↓ | |
| 22 | 450 | | ↓ | ↓ | |
| 23 | 500 | | ↓ | ↓ | |
| 24 | 550 | | ↓ | ↓ | |
| 25 | 600 | | ↓ | ↓ | |
| 26 | 500 | | ↓ | ↓ | |
| 27 | 400 | | ↓ | ↓ | |
| 28 | 300 | | ↓ | ↓ | |
| 29 | 200 | | ↓ | ↓ | |
| 30 | 100 | ↓ | ↓ | | |
| 31 | 0 | 62 | | 終了 | |

3-4. 実験結果

支間中央(等モーメント区間)における,各センサの荷重と軸方向ひずみの関係を図 3-9 に示す。図中の実線は,鋼材を完全弾塑性体と仮定して,梁理論より求めた結果である。ただし,計算では残留

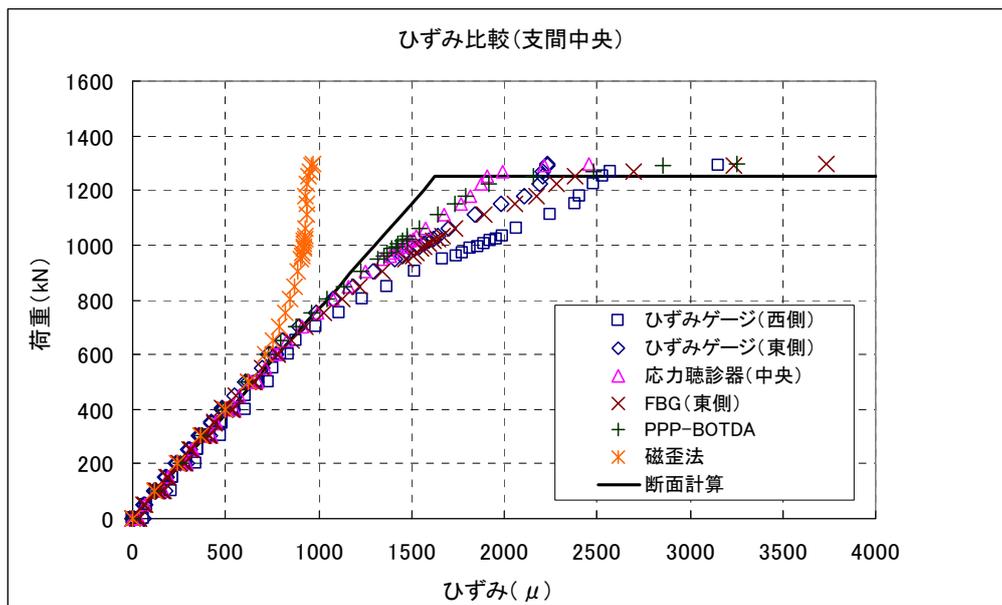


図 3-9 支間中央における各センサの測定値

応力・初期不正は考慮していない。载荷の初期段階での各センサの出力値と計算値はほぼ一致している。ひずみが 800μ を超えたあたりから、磁歪法で得られたひずみは計算値から離れ始めている。载荷の早い段階で磁歪法が計算値と乖離したのは、1) 試験体と同じ鋼材でキャリブレーションを行うことができなかった、2) 今回の実験では別の実験で降伏させた試験体を使用している、の2点が原因と考えられる。

一方、他のセンサは 1200μ 付近から計算値と離れ始めている。このことは、残留応力の影響により計算値よりも先に試験体の降伏が始まったことを示している。また、磁歪法を除く4種類のセンサを比較すると、測定値に大きな違いはない。

1/4 支間（せん断作用区間）における荷重とひずみ値の関係を図 3-10 に示す。PPP-BOTDA センサで得られた値は、計算値とよく一致している。ひずみゲージは、東側の値が载荷初期から計算値と多少の差があるものの、全体的には計算値とよく一致していると言える。ひずみゲージの東側と西側で差があるのは、試験体の初期不正が影響している。FBG センサで得られた値は、残留応力の影響で 1200μ 付近から計算値と乖離しているものの、大きな違いではない。

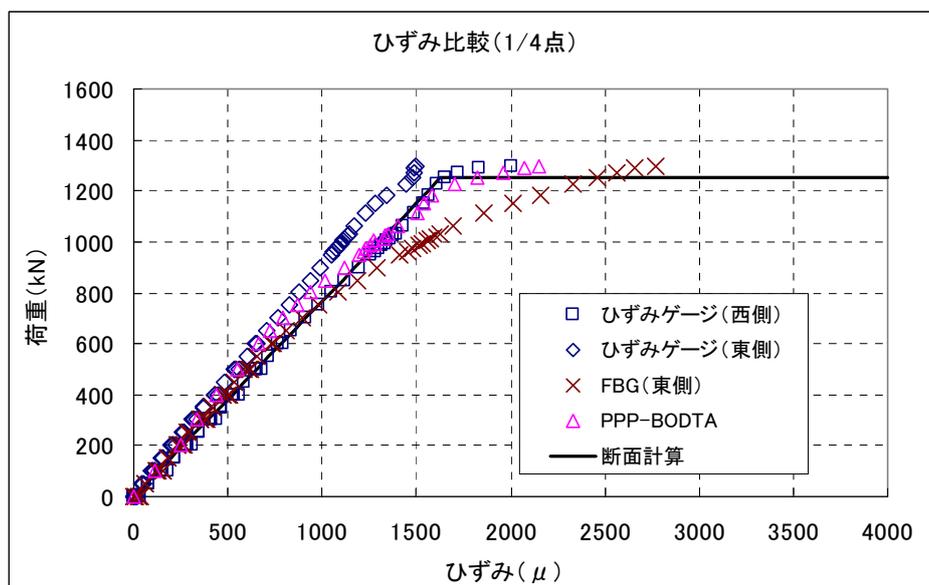


図 3-10 1/4 支間における各センサの測定値

PPP-BOTDA センサで得られた、下フランジ下面の軸方向ひずみの分布を図 3-11 に示す。図中の横に引いた点線は降伏ひずみを表している。弾性範囲内（ 900kN 以下）では、測定値は梁理論より求めた値とほぼ一致している。このことから、弾性範囲内であれば、PPP-BOTDA センサを用いてひずみを連続的に精度よく測定できることがわかる。ただし、支点から約 400mm の範囲では、測定値は計算値よりも小さくなっている。これは、座屈防止用としてウェブの両面に設置した鋼板により、この区間の断面剛性が増加したことが原因と考えられる。

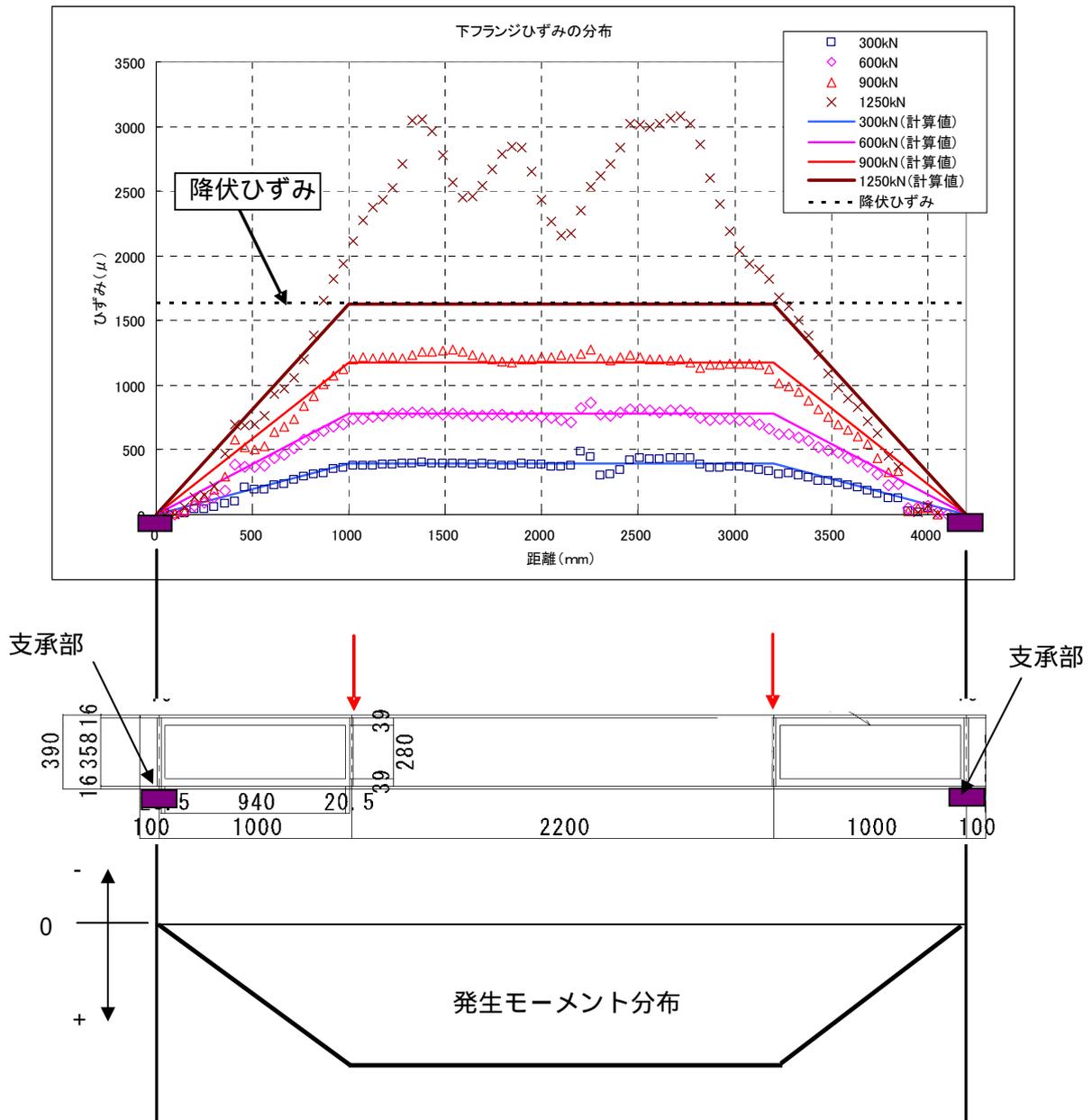


図 3-11 PPP-BOTDA センサで得られたフランジ下面のひずみ分布

3-5.FBG センサと PPP-BOTDA センサの測定まとめ

今回の実験を通して得られた知見をまとめると、以下の通りとなる。

- 1) FBG は、センサを配置した箇所のみひずみの測定であるため、測定時間が非常に短い。一方、PPP-BOTDA センサは、分布測定をするため、今回の実験規模で測定に約 2 分程度要する。
- 2) FBG センサは、エポキシ樹脂で母材に堅固に固定するが、PPP-BOTDA センサは、両面テープで母材に接着する。実橋での計測においては、接着方法の検討が別途必要と考える。
- 3) PPP-BOTDA センサにおけるひずみの分布計測では、図 3-12 のとおり、着目測定箇所と、センサの位置関係を予め把握しておく必要がある。本実験では、冷却スプレーを用いて、故意にセンサに低温のひずみを与えることで、その箇所を把握している。この点は、FBG センサに比べると手間を要する。

センサ全延長に対して、例えば、
 ここが支間中央の位置であると
 いう関連づけが必要となる

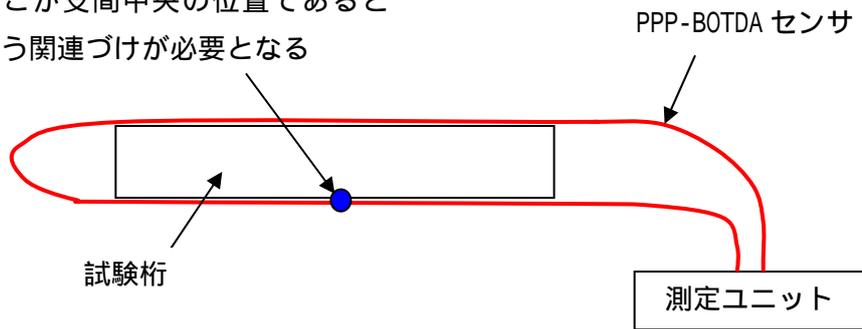


図 3-12 PPP-BOTDA センサにおける位置の確認

4) 外気温の変化に対する補正処理については、以下に示す。

光ファイバは、外力の作用のほか、外気温の変化に対しても、ひずみが生じるため、測定期間中の外気温の変化を補正する必要がある。本実験では、FBG センサ及び PPP-BOTDA センサの各々について、以下のようなひずみの補正の処理を行った。

FBG センサ

外力の作用に対して影響しない桁端部にダミーのセンサを設置し（図 3-13）、外気温の変化によるひずみ量を測定した。この方法を用いれば、比較的容易にデータの補正処理が行える。

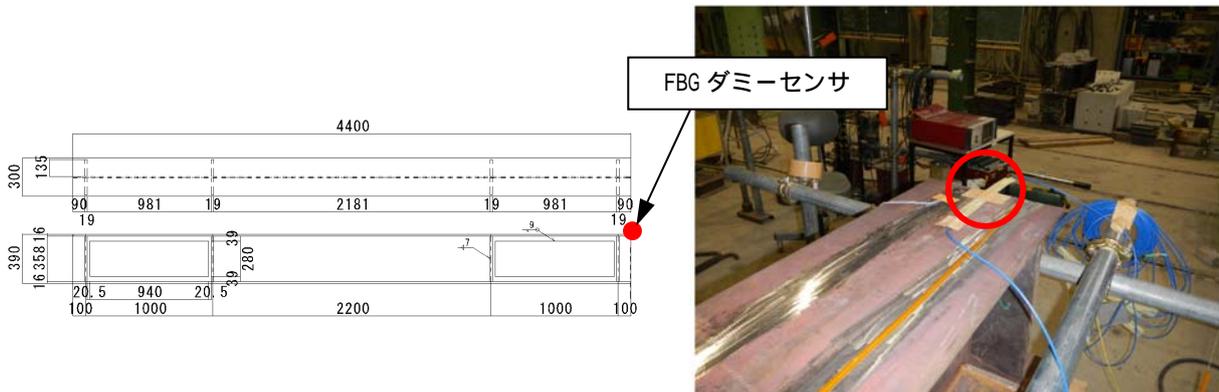


図 3-13 ダミーセンサの設置状況

PPP-BOTDA

測定時の外気温を別途、温度計等で記録しておき、別途に設定されたキャリブレーションデータにて補正を行う。このため、処理に時間を要し、実験途中ではデータが確認できない。