

## 光ファイバを用いたひずみ分布計測の既設鋼橋への適用

Application of Optical Fiber Sensor for Distributed Measurement Test of Steel Bridge's Strain

出戸秀明\*, 大河原正文\*\*, 岩崎正二\*\*\*, 倉嶋利雄\*\*\*\*

Hideaki DETO, Masafumi OKAWARA, Shoji IWASAKI and Toshio KURASHIMA

\*工博, 岩手大学講師, 工学部建設環境工学科 (〒020-8551 盛岡市上田4-3-5)

\*\*工博, 岩手大学助手, 工学部建設環境工学科 (〒020-8551 盛岡市上田4-3-5)

\*\*\*工博, 岩手大学助教授, 工学部建設環境工学科 (〒020-8551 盛岡市上田4-3-5)

\*\*\*\*工博, NTT情報流通基盤総合研究所 (〒180-8585 武蔵野市緑町3-9-11)

From the social needs, the development of measurement method with precision for strains generated in civil engineering structures is very important to progress the reliability and maintenance of these structures. The main purpose of this paper is to improve from the usual measurement method by putting strain gages on some fixed points of the structure to the distributed measurement method by optical fiber sensor. By applying this method the main girder of used steel bridge, it is seen that we can measure distributively the micro strain in the elastic range of the real bridge. The results from our method practically agreed with that of strain gauges. This new measurement method is applicable to every civil engineering structures on estimation system of the durability.

*Key Words: Optical Fiber Sensor, Distributed Measurement Test of Strain, Steel Bridge*

キーワード: 光ファイバ、ひずみ分布計測、鋼橋

## 1. はじめに

岩手県雫石町の正徳橋(1等橋、2径間単純活荷重合成鋼桁橋、橋長52m、支間長25.34m、幅員8m、昭和45年度架設)および東和町の矢崎橋(1等橋、4径間単純活荷重合成鋼桁橋、橋長107.7m、支間長26.3m、幅員9.75m、昭和53年度架設)の2橋について、静的載荷試験を実施し光ファイバを用いた主桁のひずみ測定を行った。

光ファイバを用いる計測の実例としては、AFSS (Absolute Fiber Optical Strain Gage System) <sup>1)</sup> や FBG-IS (Fiber Bragg Grating Interrogation System) と呼ばれるシステムなどが報告されているが、本研究で用いるひずみ測定方法は、NTTアクセス網研究所が開発した通信用光ファイバの保守技術を応用したひずみ・損失統合型OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) を使用し、伝播経路中の光パルスの変状を計測することによりひずみを測定するもので、構造物などのひずみを連続的に計測する新しい手法である<sup>2)3)</sup>。

ひずみ測定においては、光ファイバ中のブリルアン散乱光の周波数が光ファイバの長さ方向のひずみに比例して変化するという特性を利用する。ブリルアン散乱とは、物質に入射した光が物質中を伝搬する屈折率の周期的変化(音波)により散乱され、その周波数がシフトする現象である。NTTでは、散乱光の周波数シフト量 $\nu_B$ が光ファ

イバに発生したひずみに大きく依存することを見いだした。したがって、光ファイバの $\nu_B$ 分布がわかれば、ひずみ分布を求めることが可能となる<sup>2)</sup>。

光ファイバを用いたひずみ分布計測の利点は、光多重化による多モード計測が可能であることや長期間のモニタリングに適していること、データの空間伝送が可能であり遠隔性に優れるなど、多くの応用可能な特徴がある<sup>4)</sup>。

土木構造物に発生するひずみを正確に評価することは、構造物の信頼性を評価する上で極めて重要である。従来、ひずみゲージによる点的計測により構造物全体のひずみの代表的な値を計測している例が多く、ひずみゲージによる連続的計測では多くのセンサーを必要とし、さらに継続的計測ではセンサーの耐久性に問題があるなど、計測維持管理の面では多くの課題が残されている。

今後、構造物の変状を的確に捉え変状の前兆を事前に検出するなどの技術をより向上させるため、点計測から連続計測へ、さらに長期モニタリングを可能とするひずみ計測の手法を開発し、構造物のひずみを正確に評価することが必要である。

本論文で示す実験は光ファイバの鋼橋主桁のひずみ測定への適用について検討したものである。実験結果をひずみゲージより得られたひずみ量および数値解析値との比較の上で、計測精度や測定方法について検討し、計測技術の向上による有用性や信頼性について考察している。

## 2. 実験概要

### 2.1 正徳橋の静的載荷試験

実験においては桁全長のひずみ分布計測を行う事を目的に、図-1、2に示すように主桁下フランジに光ファイバを敷設した。敷設方法は、光ファイバの計測部に手で初期テンションを与え、その両端部をフランジ裏面に貼り付けた両面テープで固定し、さらにその上から計測部の全長にわたって粘着テープで押さえた極簡単な方法である。桁の継手位置にあるスプライスプレート部2箇所では貼り付けが困難であったため数mの余長をとった。

本実験は道路橋設計自動車荷重が20tfから25tfへと移行したことによる、正徳橋の耐荷力評価を目的とした静的載荷実験の一項目として実施したため、ひずみゲージによるひずみの検出箇所及び載荷方法については、光ファイバ計測の検証という面からは必ずしも満足のいくものではないが、ひずみゲージは、桁中央1箇所のみを設置とし、静的載荷は、20t+25t車を用い、支間中央の外桁に車両

を縦列に配置した。計測器機の全体構成を図-3に、載荷車両の位置を図-4、5に示す。

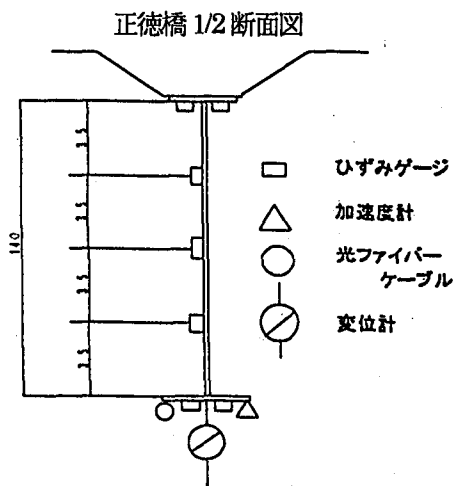


図-1 センサー配置図

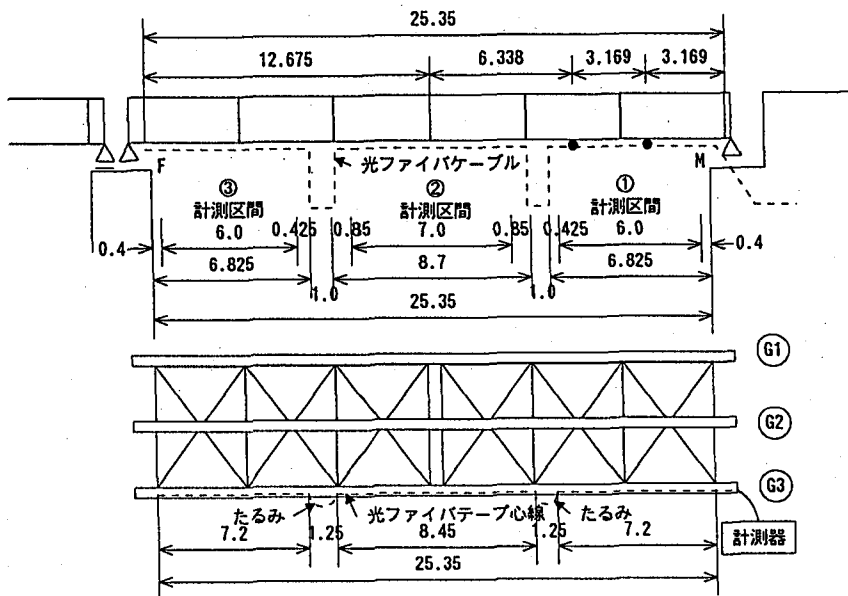


図-2 正徳橋の光ファイバ敷設配置図 (単位:m)

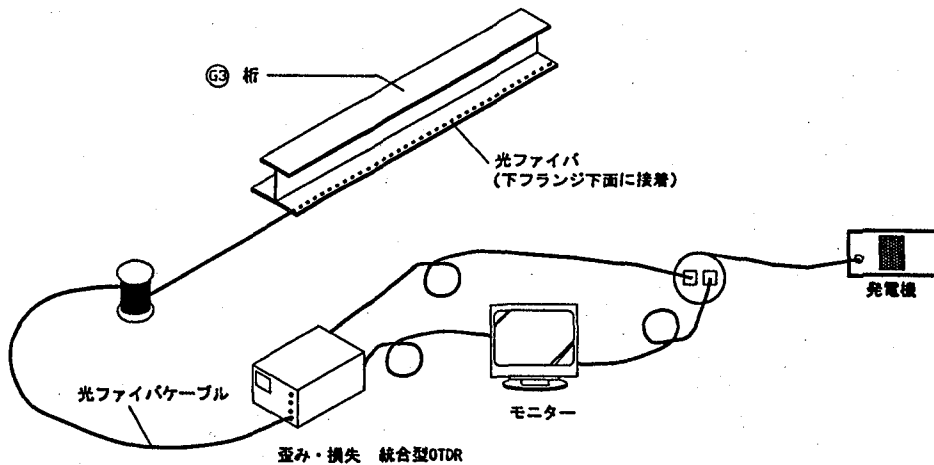


図-3 計測機器の全体構成

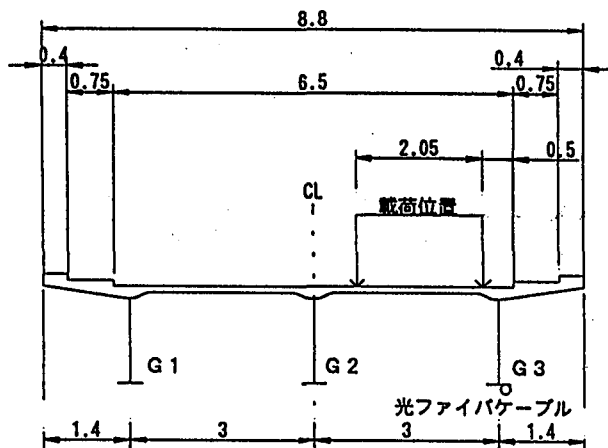


図-4 載荷車両位置断面図 (単位:m)



写真-1 縦列載荷

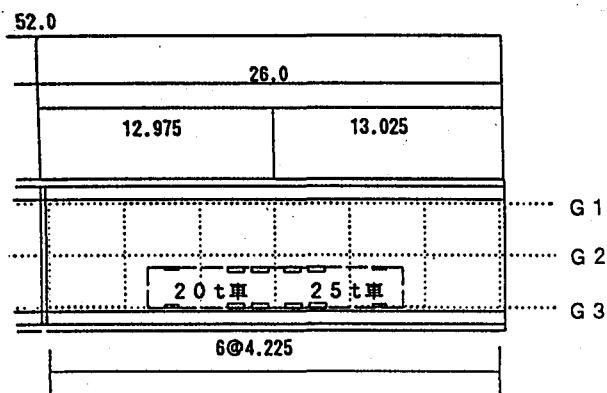


図-5 載荷車両位置平面図 (単位:m)



写真-2 並列載荷

## 2.2 矢崎橋の静的載荷試験

矢崎橋においては、光ファイバの敷設を下フランジの上面とし、図-6に示すようにG1桁とG2桁に敷設した。また載荷車両と配置は、G1桁に最大ひずみが発生するように正徳橋の場合と同様に縦列配置(写真-1)と、さらに並列配置(写真-2)の場合の、2通りの載荷方法で実験を行った。

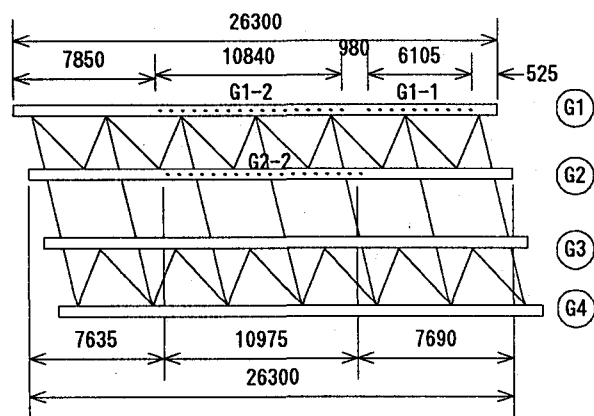


図-6 矢崎橋の光ファイバ敷設位置図

## 3. 実験結果と考察

正徳橋の静的載荷試験より光ファイバによって得られた主桁のひずみ分布の初期値と試験値を、図-7に示す。計測区間①②③は、図-2に示すように主桁に敷設した光ファイバの計測区間である。ここで、「距離」はひずみ・損失統合型OTDR本体からの光ファイバの延長距離(長さ)を表している。敷設にあたっては計測区間ごとに初期テンションを与えて両端を固定し、その上から粘着テープで押さえる方法をとった。この方法では、一端から順次貼りつけていくため、他端に達するまでに漸進的にテンションが変化してしまうことから、ひずみ曲線は、右下がりの不成形分布となつてはいるが、主桁全長にわたりひずみが測定されていることが認められた。

図-8は、初期ひずみと載荷後ひずみの差による主桁のひずみ曲線であり桁中央に最大値を示す。ひずみゲージの測定値は $162 \times 10^{-6}$ 、光ファイバの測定値は $210 \times 10^{-6}$ 、計算値は $241 \times 10^{-6}$ となり、光ファイバを用いたひずみの分布計測方法が、弾性変形領域における微小ひずみ測定にも有用性があることが確認できた。ここで、計算値としているのは設計書をもとに格子桁理論より求めた数値解析値

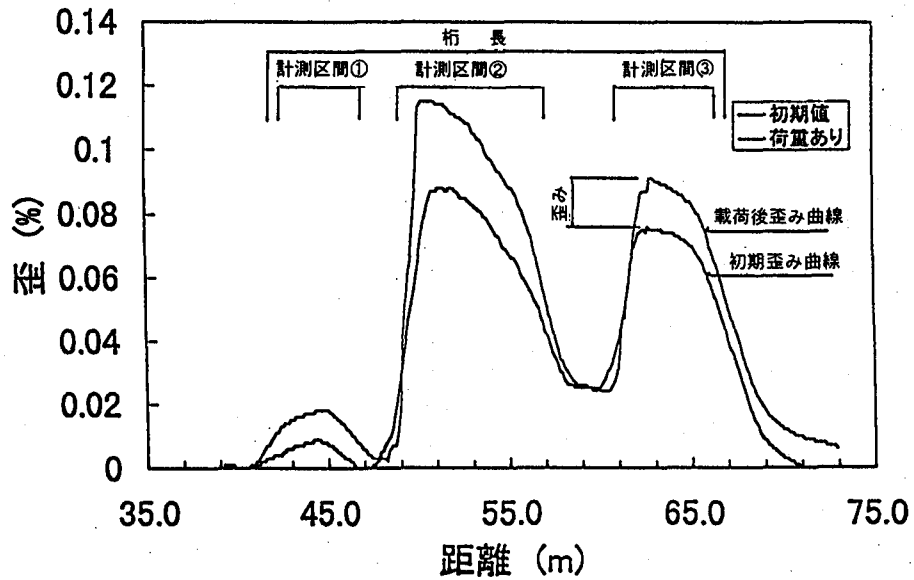


図-7 正徳橋の光ファイバひずみ曲線

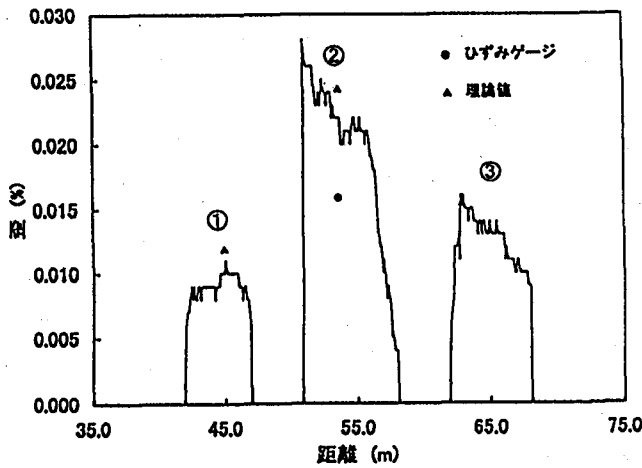


図-8 正徳橋のひずみ測定結果

である。設計計算上の数値解析値と施工後の実構造物の計測値とは多少の差があることは周知の事であり、一般に設計計算値とひずみゲージ測定値の実応力比は、単純合成I桁橋で、ほぼ0.6といわれている<sup>9)</sup>。本実験においても実応力比は0.67となり、この結果が妥当なものであることから、ひずみゲージの値が最も信頼できる実構造物の値と考えて検討を行うこととした。

図-9は、光ファイバによる測定値と計算値を比較した結果である。“桁距離”は支間長25.34mを表したものである。ここでは、ひずみゲージによる測定が1箇所であることから、計算値との比較により光ファイバ測定方法の妥当性について検証した。計算値と測定値を多項式近似による回帰分析法により近似式を求めた結果、極めて近い値を示すことが認められた。さらに、図-10に示すように、計算値と光ファイバ測定値の近似式から得られた値を、最小

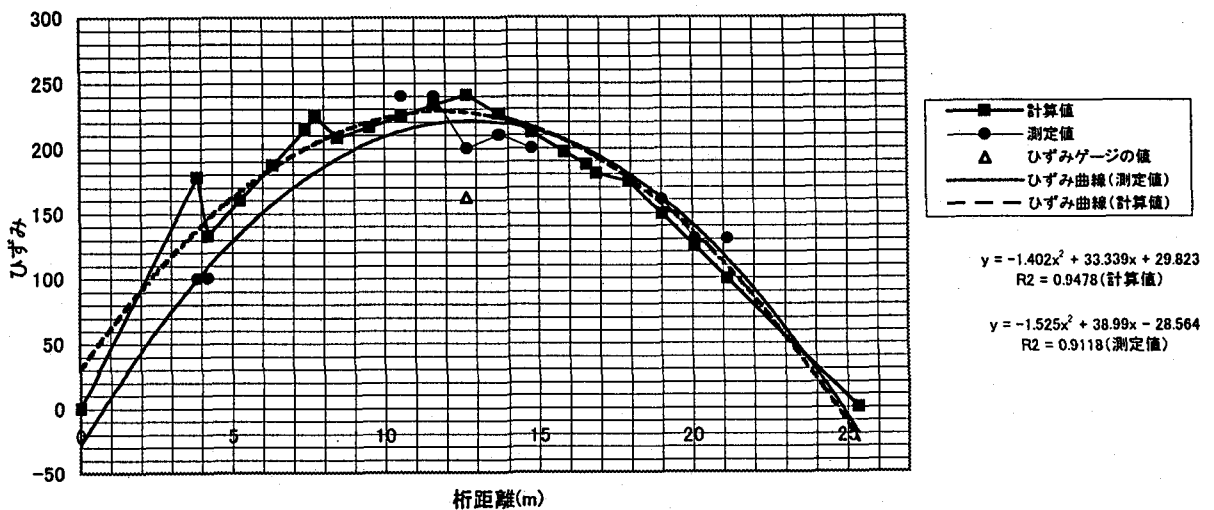


図-9 ひずみ測定値と理論値の比較

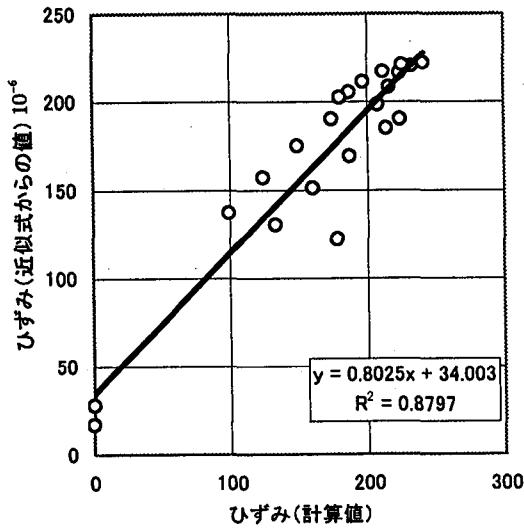


図-10 ひずみ比較の線形図

二乗法により直線近似したとき、線形関係が明確に認められた。

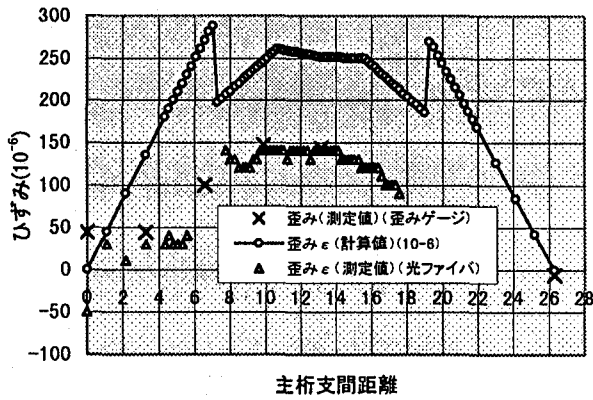
ここで、ひずみゲージ測定値が信頼できるひずみ量であると考え、光ファイバ測定値が計算値の方に近似することは、光ファイバ測定値に何らかの測定精度上の問題が

あるように思われる。現段階ではひずみ・損失統合型 OTDR のひずみ測定精度が十分でないことと、光ファイバの初期テンションの与え方や貼り方などの敷設技術が未熟であることが原因であると考えられるが、今後の OTDR の改良と敷設技術の改善により精度上の問題は解消されるものとする。

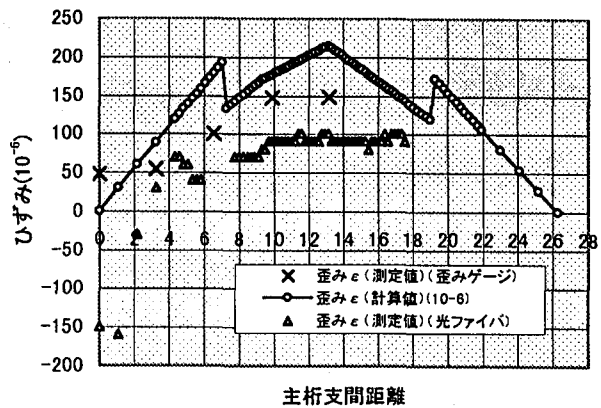
以上、光ファイバによるひずみ測定は精度上の問題があるものの、連続ひずみの測定が可能であること、ひずみ値を推定できることが確認された。

次に、矢崎橋のひずみ測定値と計算値を図-11に示す。計算値は設計書をもとに格子桁理論より求めた数値解析値である。ひずみゲージと光ファイバの測定値は、縦列桁荷の結果はよく一致し、G2桁の並列桁荷結果を除いて、相関が見られた。ここで、並列桁荷においては光ファイバの測定値が、ひずみゲージの測定値に比べてかなり低くなっている。縦列桁荷と並列桁荷の桁荷状態の違いはあるもののその理由については現在のところ不明であり、今後の実測で明らかにしていきたい。

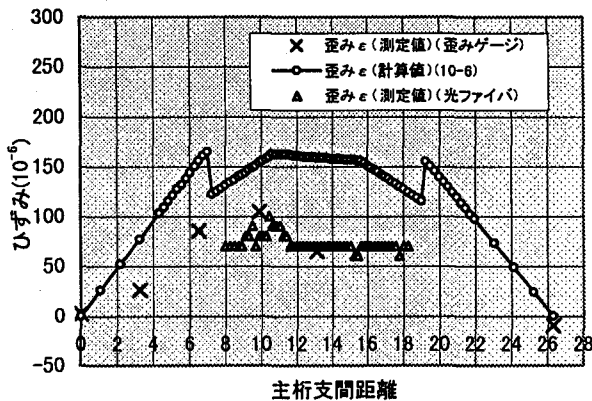
本実験結果より、ひずみゲージの測定値が計算値と比較して妥当な結果であることがわかったが、光ファイバの測定値には精度上の問題が残された。これは前述したように、実験に使用したひずみ・損失



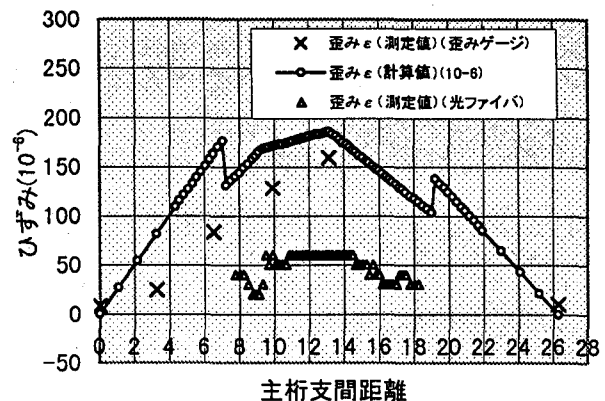
G1桁縦列載荷



G1桁並列載荷



G2桁縦列載荷



G2桁並列載荷

図-11 矢崎橋のひずみ比較図

統合型 OTDR のひずみ測定精度の問題であり、現在も改良中であるため今後はさらに精度が上がるものと期待される。また、現段階では光ファイバの初期テンションと敷設方法については敷設技術者の経験によるところが大であり、これについても初期テンションの定量化と敷設方法の改善が可能であると考ええる。

今回の実験では交通規制等の条件により光ファイバの残留ひずみの測定ができなかったが、これについても、ひずみ測定後の初期値移行履歴による測定法の妥当性は室内実験により実証可能と考える。

#### 4. まとめ

ここで用いたひずみ測定方法は、NTTが開発した通信用光ファイバケーブルの保守管理技術を応用した、ひずみ・損失統合型OTDRを使用し、光ファイバの一端から計測用のパルス光を入射して、その反射波の周波数変化を分析しひずみを計算する方法で、構造物などのひずみを連続的に計測する新しい手法である。著者の本間・大河原等は、ひずみ・損失統合型OTDRを用いた斜面崩壊検知システムの開発を行っているが<sup>7)8)</sup>、既設橋梁の静的載荷試験に応用したのは今回が初めてのケースであり、本研究はひずみ・損失統合型OTDRを用いた橋梁計測例としての貴重な基礎資料を提供しているものと考ええる。

今回の光ファイバを用いたひずみ分布計測では、ひずみゲージの測定値や理論値とはほぼ一致した結果が得られた。また、理論値との線形関係が認められ相関は極めて近似することが解かった。ひずみゲージと光ファイバの測定値には若干精度上の違いが見られるが、その原因としてひずみ・損失統合型OTDRのひずみ測定精度と光ファイバの敷設に関する経験不足が大きいと考えられる。

本研究で使用した光ファイバセンサーは、光ファイバの全長を感受部とするため、測定対称を「線」として計測することが可能である。また、光ファイバ自体がデータ伝送路として機能するため、電気抵抗もなく長距離の伝送が容易であるため、広範囲かつ複数の計測対象が一本の光ファイ

バで計測可能となる。今回の橋梁計測のように、一本の主桁だけでなく、複数の主桁を一本の光ファイバにより計測することが容易である。光ファイバはガラス繊維であるため、誘導電磁ノイズ等の影響を受けない。また、経年変化が少なく長期間の計測に適している。本計測法は、斜面防災の分野に限らず、本論文で述べた橋梁計測を始め、河川堤防、トンネル、ダム等の建設現場における計測監視システムや、構造物の維持管理システムとしての適用が期待される。

本論文の2例の実測だけで測定方法の有用性を説くのは時期早々ではあるが、敷設技術の開発と計測データの集積により、従来の電気抵抗ひずみゲージ計測法に匹敵する新しい計測法としての確立を急ぎたい。

本実験は社団法人岩手県土木技術センターの共同研究の一環として、平成10年度および11年度に実施されたもので、センターの保健一会長を始め共同研究員各位のご協力に感謝して、ここに御礼申し上げる次第です。

#### 参考文献

- 1)大島、三上、山崎、金子、工藤、M.S.Rahman：光ファイバセンサーによる構造内部のひずみ計測、土木学会第55回年次学術講演会、1999
- 2)倉嶋、佐藤：光ファイバを用いた構造物のひずみ分布計測、土木学会誌、Vol.82、No.12、1997
- 3)倉嶋：片端から非破壊で光ファイバの歪み・損失を測定、NTT技術ジャーナル、1997
- 4)西原、裏：光エレクトロニクス入門、コロナ社、1998
- 5)構造工学シリーズ10 橋梁振動モニタリングのガイドライン、pp.175-179、土木学会、1999
- 6)本間、倉嶋、平賀、佐々木、三田地、大河原：光ファイバセンサによる斜面崩壊検知システムの開発、土木学会東北支部技術研究発表会、III-14、2000
- 7)島山、倉嶋、大河原：光ファイバの斜面敷設技術の開発、土木学会東北支部技術研究発表会、III-15、2000
- 8)小野寺、倉嶋、村上、大河原：光ファイバ歪センサによる岩手県津谷川地すべりの地中変位計測実験、土木学会東北支部技術研究発表会、III-16、2000

(2000年9月14日 受付)