

論文

ひずみ可視化デバイスによる曲げ変形を受ける部材のひずみ計測

梅本 秀二*, 高木 健**, 大町 正和*,

米本 雅紀*, 小川 真由*, 松田 浩***

Strain Measurement of Members with Bending Deformation
using the Strain Visualization Device

Shuji UMEMOTO, Takeshi TAKAKI, Masakazu OMACHI,

Masaki YONEMOTO, Mayu OGAWA and Hiroshi MATSUDA

The strain visualization device is a strain measurement sensor developed for long-term monitoring of infrastructure. Since the strain detection position of the strain visualization device is structurally separated from the member surface, the distance from the neutral axis is larger than that of the member surface, and the strain value is large when strain measurement of members with bending deformation. Therefore, while showing the correction method, it was experimentally verified that the strain visualization device can be applied to strain measurement of members with bending deformation by adding the correction. In addition, the strain visualization device was applied to strain measurement of the loading test of an actual bridge, and its applicability to an actual structure with bending deformation was proved.

Keywords: Strain measurement, Strain visualization device, Bending deformation, Correction coefficient, Neutral axis

1. 緒 論

近年, 社会インフラの老朽化が次々と顕在化しており, 国民の生活に支障を来し始めている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾. 引き続き, 国民の安全・安心を確保するためには, 社会インフラの状態をできるだけ正確に把握し, 適切な補修・補強あるいは更新によって, 社会インフラの健全性を保たなければならない. そういった中, 社会インフラの状態を把握する上で, 構造部材に作用する応力は, 有力な情報となる⁶⁾. 応力の計測には, ひずみゲージ, ひずみ計と呼ばれる様々な測定原理の電気式変換器や光ファイバセンサなどのひずみ計測用のセンサが良く用いられる⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾. ひずみゲージやひずみ計は, 比較的短期間の計測に用いられている. 一方, 光ファイバセンサの寿命は一般的に 20 年以上と言われており, 長期に亘って安定した計測を行うことができるため, 長期間の計測に適している. 冒頭に述べたように, 社会インフラの老朽化による影響が顕著化していることから, 最近では, モニタリングによる社会インフラの状態把握の重要性が再認識され, 光ファイバセンサも再び脚光を浴び始めているところである¹¹⁾¹²⁾. しかし, 光ファイバセンサのような耐久性の高いセンサは, システムの導入や維持にかかるコスト, 電源の確保など課題があり, あらゆる社会イ

ンフラの長期モニタリングに適用することは困難である. モアレ縞の原理を用いたひずみ可視化デバイス (SVD)¹³⁾は, それらの課題を解決するために, 梅本らによって開発されたひずみ計測用センサであり, ①ひずみを定量的に可視化, ②電源不要, ③自然環境下 10 年相当以上の耐環境性, ④自己温度補償¹⁴⁾, ⑤低コスト, などの特徴から, 社会インフラの長期モニタリングにおけるひずみ計測用センサとして期待される.

計測対象となる社会インフラの構造部材は, 軸力部材としてだけでなく, 曲げ部材としても広く利用されている. そのため, 構造部材の応力を計測するセンサは, 曲げ変形を受ける部材に対しても精度よく計測できる必要があるが,

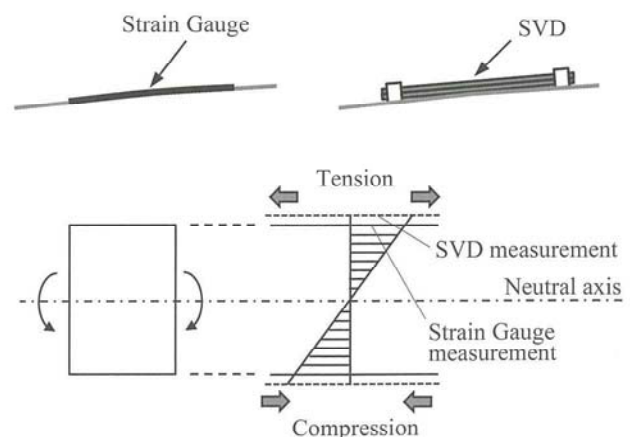


Fig. 1 Difference between strain gauge and SVD measurements

原稿受付 2021 年 3 月 30 日

* 株式会社計測リサーチコンサルタント (〒732-0029 広島県広島市東区福田 1-665-1)

** 広島大学大学院工学研究科 (〒739-8511 広島県東広島市鏡山 1-3-2)

*** 正会員 長崎大学大学院工学研究科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14)

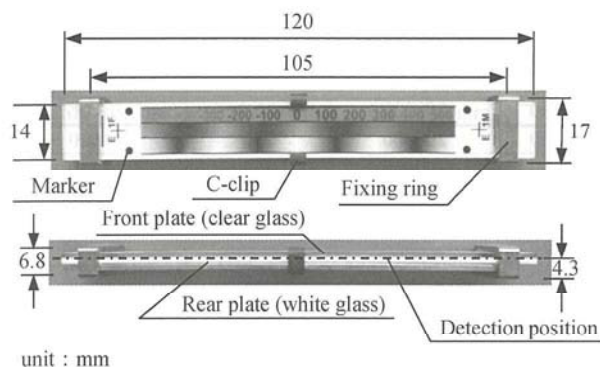


Fig. 2 Appearance of SVD

それに対するひずみ可視化デバイスの適用性は、まだ検証されていない。Fig. 1 に示すように、従来のひずみゲージは、部材表面に貼り付けるため、部材に曲げ変形が生じた場合でも、部材表面に作用するひずみを正確に計測することができる。一方で、ひずみ可視化デバイスを部材に設置して計測する場合、ひずみの検出位置が部材表面から離れた位置になるため、部材が曲げ変形を受けた時、部材表面に発生するひずみを大きく評価してしまう。そこで、本稿では、曲げ変形を受ける部材のひずみ計測に、ひずみ可視化デバイスを適用する場合の補正方法を示し、室内実験においてその妥当性を検証する。また、ひずみ可視化デバイスを橋梁の荷重試験のひずみ計測に適用し、曲げ変形を伴う実構造物への適用性を検証する。

2. ひずみ可視化デバイスの概要

ひずみ可視化デバイスの外観を Fig. 2 に、構造を Fig. 3 に示す。ひずみ可視化デバイスは、ガラス製のフロントプレートおよびリアプレート、鋼製の温度補償板から構成され、固定リングおよびCクリップでユニット化されている。フロントプレートは片方の固定リングに、リアプレートは温度補償板を介してもう一方の固定リングに接着されている。構造部材のひずみを計測する場合は、各固定リングを構造部材に固定する。構造部材にひずみが生じた場合、固定リング間（標点間）の距離が変化し、これに伴い、フロントプレートとリアプレートがスライドする構造となっている。2枚のプレートにはそれぞれピッチの異なる線格子が施されており、モアレ縞の原理を用いて2枚のプレートのスライド量を検出する¹⁵⁾。そのため、ひずみ可視化デバイスのひずみの検出位置は、フロントプレートとリアプレートの境（固定リング下端から4.3 mmの位置）となっている。計測方法は、目視で概略のひずみを読み取れるほか、デジタルカメラで撮影して、専用のひずみ算出アプリケーション¹³⁾で画像を解析することにより、精度 $\pm 10 \mu\epsilon$ 、繰返し精度 $\pm 10 \mu\epsilon$ (2 σ)でひずみを算出することができる。

3. 曲げ変形を受ける部材の計測位置の曲率

曲げ変形を受ける部材に生じる計測位置の曲率を把握す

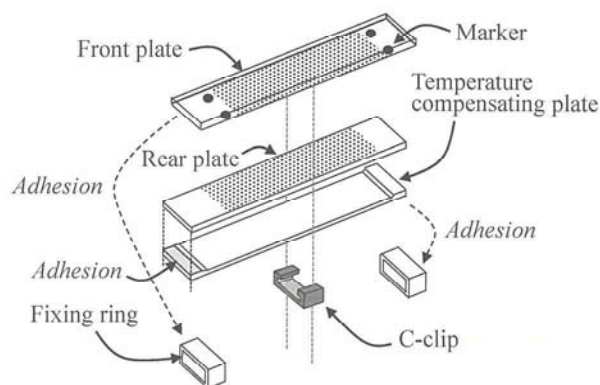


Fig. 3 Structure of SVD

るため、代表的な構造部材である SS400 の H 形鋼を例に求めてみる。計算条件を Table 1, Table 2, Fig. 4 に示す。構造形式は、最もシンプルな片持ち梁 ($l=5.0$ m)・先端荷重とし、最大応力が発生する梁固定端部を計測位置とした。そして、Fig. 4 に示すように、計測位置にひずみ可視化デバイスを設置すると仮定し、部材固定端部に鋼材の許容応力相当の 140 N/mm^2 が発生するときのひずみ可視化デバイス設置箇所の曲率を求めた。曲率は、上記条件で部材が変形した際の、梁固定端部から 0 mm, 105 mm の位置（ひずみ可視化デバイスの両固定リング部）およびひずみ可視化デバイスの中央のたわみ δ_x を Eq. (1)で算出し、この3点を通る円の曲率とした。ここで、 P は先端荷重、 E は部材の弾性係数、 I は部材の断面 2 次モーメントである。

$$\delta_x = \frac{Pl^3}{3EI} \left(1 - \frac{3x}{2l} + \frac{x^3}{2l^3} \right) \quad (1)$$

Fig. 5 に各サイズの H 形鋼の曲げ剛性と計測位置の曲率の関係を示す。Fig. 5 によると、H 形鋼の曲げ剛性が大きくなると計測位置の曲率は小さくなっている。

4. ひずみ可視化デバイスの補正係数

曲げ変形を受ける部材のひずみ計測において、ひずみ可視化デバイスを適用する場合の補正方法について考える。ひずみ可視化デバイスを構造部材に設置した場合の、部材の中立軸とひずみ可視化デバイスのひずみ検出位置の関係を Fig. 6 に示す。Fig. 1 で示したように、曲げ変形を受ける部材のひずみの大きさは中立軸からの距離に比例する。したがって、ひずみ可視化デバイスの計測値は、ひずみ検出位置が部材表面よりも中立軸からの距離が離れている分だけ大きく出力される。ひずみ可視化デバイスの出力を部材表面のひずみに換算するため、ひずみ可視化デバイスの出力値 (ϵ_s) に中立軸からの距離の比率 R (以後、補正係数という) を乗じて補正する必要がある。補正係数 R は、部材の中立軸と表面までの高さを y 、部材表面からひずみ可視化デバイスのひずみ検出位置までの高さを h とすると、Eq. (2)で求めることができる。

Table 1 Calculation condition

Structure	Cantilever wing beam
Length of girder l	5 m
Loading condition	Tip load P that generates long-term allowable stress 140 N/mm^2 at the measurement position
Structured member	H-steel (SS400) H100, H150, H200, H250, H300, H350, H400

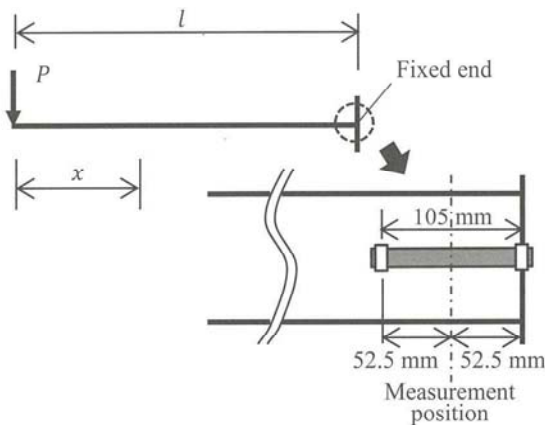


Fig. 4 Calculation condition

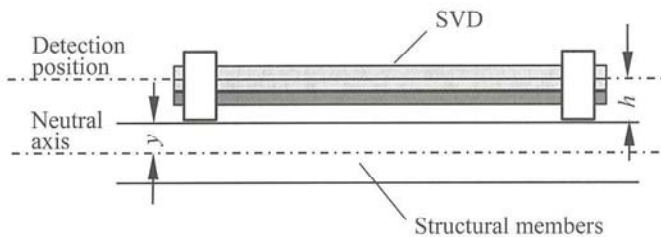


Fig. 6 Member neutral axis and detection position of SVD

$$R = \frac{y}{y+h} \quad (2)$$

なお、構造部材に軸方向の応力成分が含まれる場合には、その成分を除いた後に補正係数を乗じる必要がある。

Table 1 で示した H 形鋼のひずみ計測に、ひずみ可視化デバイスを適用する場合の補正係数を Fig. 7 に示す。中立軸から部材表面までの距離が 200 mm 以上になると、補正係数はほぼ 1 となる。

5. 曲げ変形を受ける部材のひずみ計測実験

5. 1 実験計画

実験では、曲げ易さを考慮し、構造部材と比べ極端に剛性の小さい、幅 50 mm、厚さ 6.0 mm の鋼製フラットバー (FB) を試験体とする。試験体を片持ち梁状に 450 mm 張り出し、梁固定端部から 100 mm の位置をひずみ計測位置とし、試験体先端に 0.4 mm ずつ 4 mm まで強制変位を与

Table 2 Cross-sectional specifications of H- steel

Member	Elastic modulus $E(\text{N/mm}^2)$	Section of modulus $Z(\text{cm}^3)$	Cross-sectional secondary moment $I(\text{cm}^4)$
H100	200000	75.6	378
H150	200000	216	1620
H200	200000	472	4720
H250	200000	880	10700
H300	200000	1350	20200
H350	200000	2280	39800
H400	200000	3330	66600

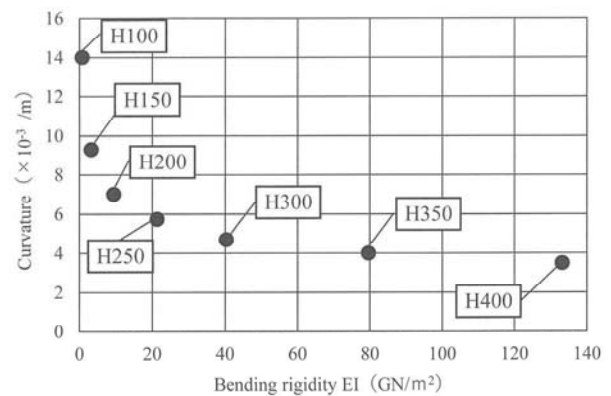


Fig. 5 Relationship between flexural rigidity and curvature on the measurement point

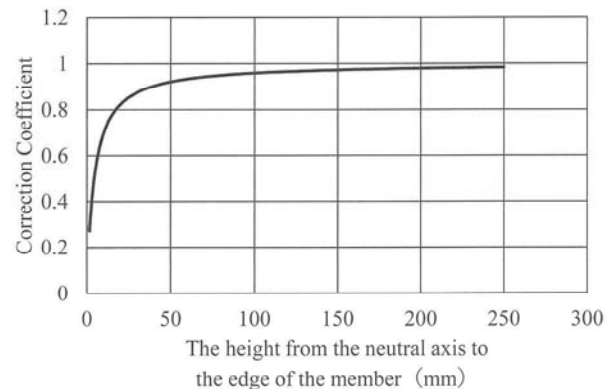


Fig. 7 Relationship between the height from the neutral axis to the edge of the member and the correction coefficient

え、ひずみ計測位置の曲率と生じるひずみおよびひずみ可視化デバイスの出力を得ることとする。実験に先立ち、この条件で事前検討を行った。なお、ひずみ計測位置の曲率は、3 章で述べた方法で求めた。また、計算上求まる計測位置のひずみは、強制変位を与えるために必要な先端荷重を求め、先端荷重と載荷位置から求まる計測位置の曲げモーメントを断面係数および弾性係数で除すことで求めた。また、ひずみ可視化デバイスの出力は、補正係数($R = 3/(3 + 4.3) = 0.41$)の逆数を乗じて算出した。FB の断面諸元を Table 3 に、事前検討結果を Fig. 8 に示す。事前検討結果より、中立軸から部材表面までの距離が短い FB では、部材

Table 3 Cross-section specifications of FB

Cross-sectional area	A	300 mm ²
Elastic modulus	E	200000 N/mm ²
Section of modulus	Z	300 mm ³
Cross-sectional secondary moment	I	900 mm ⁴

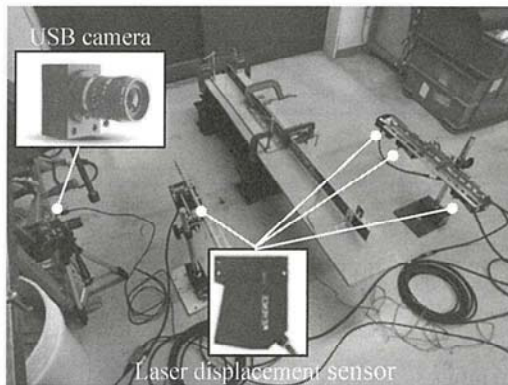


Fig. 9 Experimental device

Table 4 Specifications of laser displacement sensor

Range	±100mm
Light source	Red semiconductor laser Wavelength: 655 nm
Non-linearity	±0.05 % of F.S. (F.S.=±100 mm)
Repeat accuracy	2 μm
Sampling cycle	20, 50, 100, 200, 500, 1,000 μs

表面のひずみとひずみ可視化デバイスの出力は、大きな差異が生じることが分かる。

5. 2 実験装置

Fig. 9 に実験装置を示す。計測位置には、ひずみ可視化デバイスおよびひずみゲージ（ゲージ長 90 mm）を設置した（Fig. 10(a)）。ひずみ可視化デバイスの計測用に 200 万画素の USB カメラを設置した。また、ひずみ計測位置の曲率を求めるために、ひずみ可視化デバイスの両固定リングの位置およびその中央に、また、FB 先端のたわみを計測するために、それぞれ高精度レーザ変位計を配置した（Fig. 10(b)）。高精度レーザ変位計の仕様を Table 4 に示す。

5. 3 実験方法

ひずみ可視化デバイスは、リアルタイム画像解析装置¹³⁾で撮影・解析し、30 フレームの画像解析結果の平均値を採用した。ひずみゲージおよび高精度レーザ変位計はそれぞれ専用の測定器で計測した。フラットバーの先端に 0.4 mm ずつ 4 mm まで強制変位を与え、計測位置に曲げ変形を発生させた。計測は、ステップごとに実施し、高精度レーザ変位計で計測された計測位置の 3 点の変位をもとに、事前検討と同様の方法で曲率を求めた。

5. 4 実験結果

計測位置の曲率とひずみの関係を Fig. 11(a) に示し、事前検討結果を併記する。実験の結果、事前検討結果と同様の

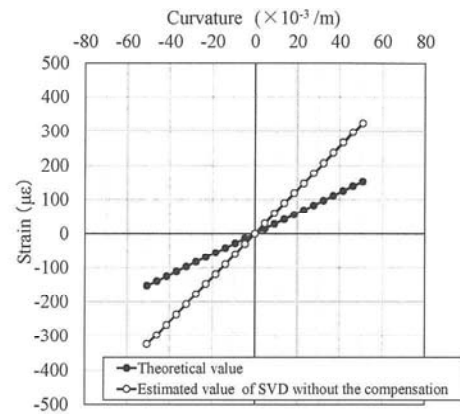
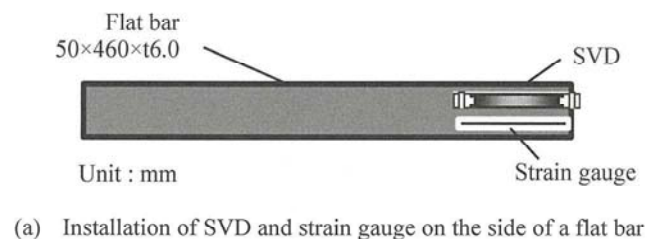
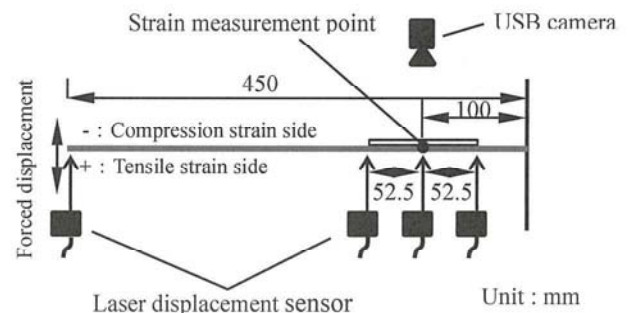


Fig. 8 Calculation result



(a) Installation of SVD and strain gauge on the side of a flat bar



(b) Arrangement of measuring instruments (plane figure)

Fig. 10 Experimental device

結果が得られた。次に、ひずみ可視化デバイスの出力に対して補正係数 $R = 0.41$ を乗じて補正した結果を Fig. 11(b) に示す。ひずみゲージと補正したひずみ可視化デバイスの計測値を比較すると、誤差は $\pm 10 \mu\epsilon$ であり、良く一致している。特に、実構造部材に生じうる曲率の $3.5 \times 10^{-3} \sim 14 \times 10^{-3} /m$ の範囲では誤差は $\pm 5 \mu\epsilon$ 未満であった。これらの実験結果から、補正を加えることで、曲げ変形を伴う部材のひずみ計測に、ひずみ可視化デバイスが問題なく適用できることが確認できた。

6. 橋梁の載荷試験におけるひずみ計測

6. 1 橋梁の諸元

Fig. 12 に橋梁の外観を、Table 5 に対象橋梁の諸元を示

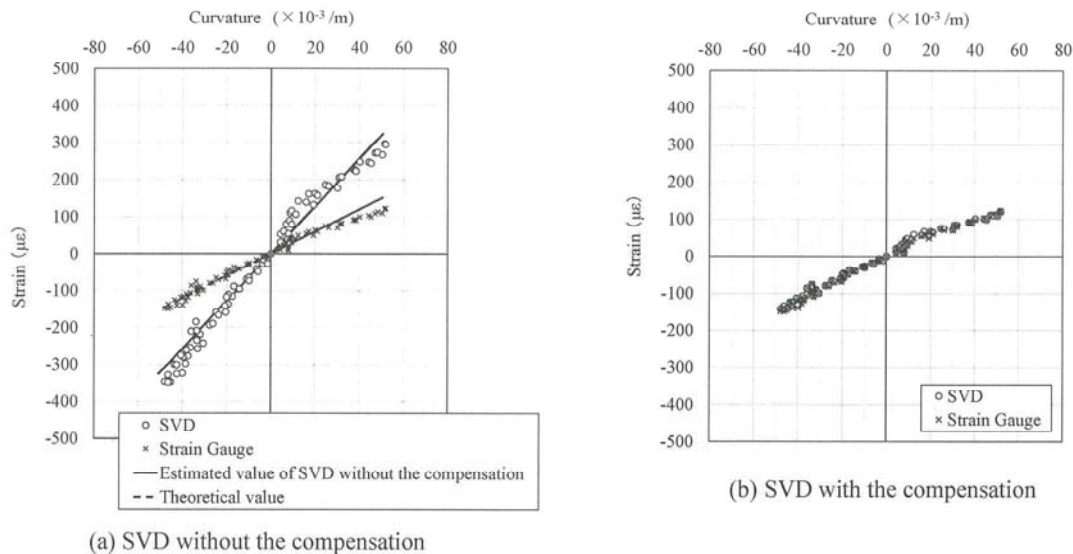


Fig. 11 Experimental result

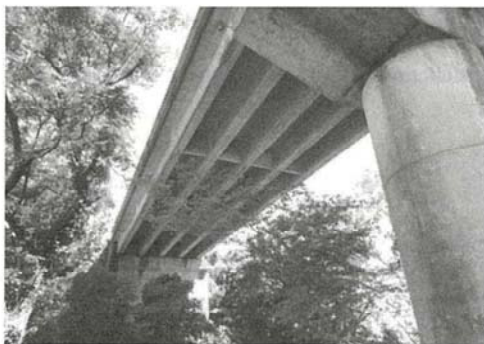


Fig. 12 Appearance of the bridge

Table 5 Specifications of the bridge

Bridge length	102.230 m
Girder length	30.750 + 40.750 + 30.550 m
Span length	30.050 + 39.950 + 29.850 m
Effective width	Vehicle road: 6.750 m, walk way: 1.500 m
Total width	9.250 m
Superstructure construction system	Post-tensioned PC simple T-girder bridge (5 girders)
Year of construction	1975

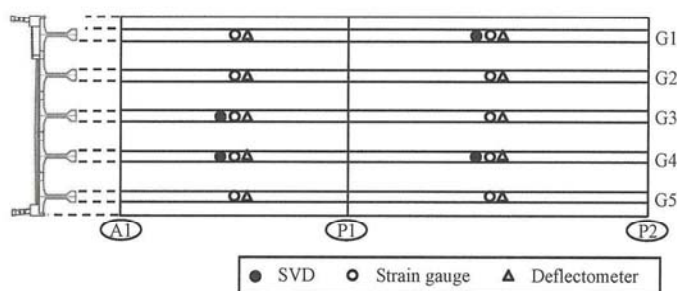


Fig. 13 Arrangement of measuring devices

す。対象橋梁は鹿児島県にある3径間ポストテンション方式PC単純T桁橋(5主桁)である。この橋梁は架設から46年経過しており、アルカリ骨材反応によるひび割れが主桁の橋軸方向に多数発生している。

6. 2 計測器の配置

Fig. 13に計測器の配置図を示す。A1-P1径間およびP1-P2径間の支間中央の各主桁下面にひずみゲージおよびたわみ計を設置した。ひずみ可視化デバイスは、A1-P1径間

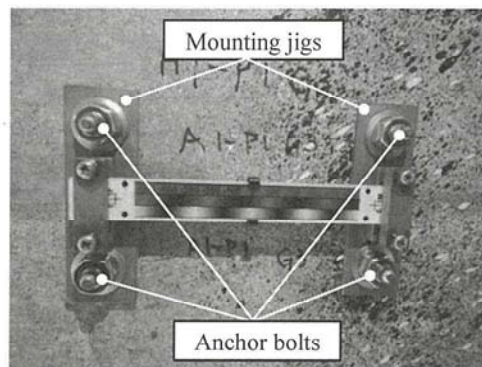


Fig. 14 Installation of the SVD

ではG3桁とG4桁に、P1-P2径間ではG1桁とG4桁のひずみゲージ近傍にそれぞれ設置した。Fig. 14にひずみ可視化デバイスの設置状況を示す。ひずみ可視化デバイスは、専用の取付治具を使用し、アンカーボルトを用いてコンクリートに固定した。専用の取付治具を使用する際のひずみ可視化デバイスの検出位置は、部材表面から11.5 mmとなる。

6. 3 計測方法

ひずみ可視化デバイスの計測方法は、デジタルカメラを用いて計測する方法とした。はじめに無載荷状態で初期の画像を撮影し、次に載荷ケース毎に静止画を撮影した。撮

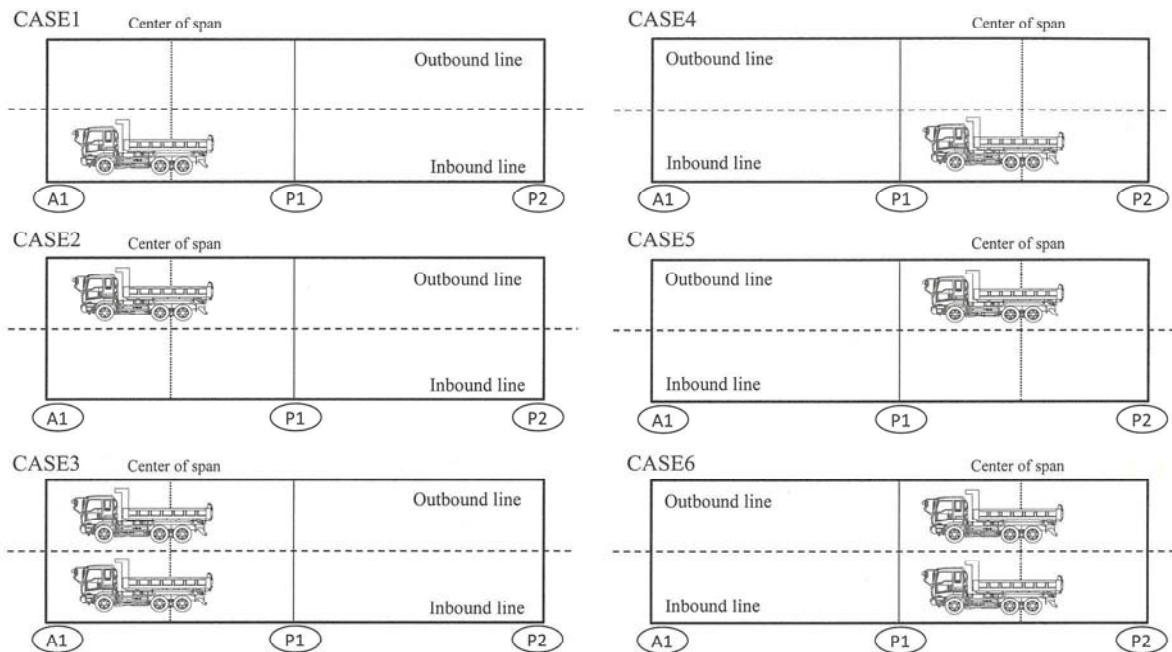


Fig. 15 Loading cases

Table 6 Results of strain measurements in loading test

CASE	Strain Visualization Device ($\mu\epsilon$)				Strain Gauge ($\mu\epsilon$)			
	A1-P1		P1-P2		A1-P1		P1-P2	
	G3	G4	G1	G4	G3	G4	G1	G4
CASE1	24	53	-	-	30	52	-	-
CASE2	27	43	-	-	37	25	-	-
CASE3	52	63	-	-	66	77	-	-
CASE4	-	-	3	21	-	-	4	27
CASE5	-	-	8	20	-	-	26	18
CASE6	-	-	20	42	-	-	33	45

影した画像をひずみ算出アプリケーションによって解析し、ひずみを算出した。なお、ひずみゲージおよびたわみ計の計測は、それぞれ専用の測定器で行った。

6. 4 載荷方法

Fig. 15 に載荷試験の車両載荷ケースを示す。事前に計量した 200kN のダンプトラックを載荷荷重とし、上り線に載荷するケース、下り線に載荷するケースおよび上り線と下り線の両方に車両を載荷するケースをそれぞれの径間で実施した。なお、ダンプトラックは、各径間の支間中央に車両の後輪中央が載荷されるようにした。

6. 5 載荷試験結果

ここでは、ひずみ可視化デバイスとひずみゲージの両方を設置した A1-P1 径間の G3 桁・G4 桁、P1-P2 径間の G1 桁・G4 桁のひずみ測定結果について示す。Table 6 に載荷試験時のひずみ測定結果を示す。ひずみ可視化デバイスの計測値は、複数枚の画像解析結果の平均値を採用した。な

お、計測対象桁の中立軸からの部材表面までの距離は、A1-P1 径間の桁で 1194 mm、P1-P2 径間の桁で 1381 mm あり、補正係数は 0.99 以上となるため、本試験ではひずみ可視化デバイスの補正係数は 1 とした。

CASE4 および CASE5 における P1-P2 径間 G1 桁は、他の桁と比較して $4\mu\epsilon \sim 26\mu\epsilon$ と発生ひずみが小さくなった。また、CASE5 の G1 桁では、ひずみ可視化デバイスの値が、ひずみゲージの 1/3 以下の値を示した。これは、G1 桁の橋面側は歩道になっており、直上に載荷されていないために発生ひずみが小さくなったと考えられる。これに対し、ひずみ可視化デバイスは、最大で $\pm 20\mu\epsilon$ の誤差が生じる可能性があるため、CASE4 および CASE5 の G1 桁については、ひずみ可視化デバイスの計測値の信頼性は低いと考えられる。CASE4 および CASE5 の G1 桁を除けば、ひずみ可視化デバイスとひずみゲージは概ね同様の結果が得られており、ひずみ可視化デバイスとひずみゲージの差は最大で $18\mu\epsilon$

であった。この結果は、ひずみ可視化デバイスの総合精度 $\pm 20 \mu\epsilon$ (非直線性: $\pm 1\%$ of F.S., 繰り返し精度(2σ): $\pm 10 \mu\epsilon$) を満足するものであり、ひずみ可視化デバイスの実構造物への適用性が証明された。なお、発生ひずみが $20 \mu\epsilon$ 程度までの構造物部材にひずみ可視化デバイスを適用する場合は計測値の信頼性が低いため、適用にあたっては留意が必要である。

7. 結 論

曲げ変形を受ける部材のひずみをひずみ可視化デバイスで計測する場合の補正係数の算出方法を示し、実験でその妥当性を示した。そして、補正を加えることで、剛性の小さい部材に対しても適用できることを示した。また、ひずみ可視化デバイスを橋梁の載荷試験におけるひずみ計測に適用し、精度よく計測できることが証明され、ひずみ可視化デバイスの実構造物への適用性を示した。

ひずみ可視化デバイスは、従来型のセンサと比較して、同等の性能を有しているとともに、電源が不要で、10年以上の耐環境性を有していることから、社会インフラの長期モニタリングに適したひずみ計測用センサと言える。今後、実現場で実績を積み、ひずみ可視化デバイスによる社会インフラの管理手法を構築・展開し、社会インフラの維持管理に貢献していきたい。

謝 辞

ひずみ可視化デバイスの実橋梁への適用に当たり、多大なる協力を頂いた、鹿児島県担当部局ならびに株式会社久永コンサルタントの内村氏に深く謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism download directory: <https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/pdf/3.pdf>
- 2) Yamada, K.: *Kisogawa no syazai no hadan kara mierumono* (in Japanese), *JSCE Magazine*, **93-1** (2008), 29-30.
- 3) Ito, H., Suzuki, T., Kohno, E. and Aoki, M.: Nondestructive evaluation of deteriorated steel pipelines affected by C/S macro cell corrosion (in Japanese), *Journal of Agricultural Development Studies*, **22-3** (2012), 24-33.
- 4) Infra Saisei Kenkyukai: *Kohai suru Nihon* (in Japanese), *Nikkei BP* (2019), 27-111.
- 5) Ikeda, M. and Tanimura, Y.: Current status and recent research topics of maintenance of existing railway structures (in Japanese), *Journal of JSCE*, **65**(2016), 287-293.
- 6) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism download directory: <https://www.mlit.go.jp/common/001016261.pdf>
- 7) Takayama, H., Masuda, Y., Nakayama, T., Uemura, Y., Narentorn, Y., and Asakura, T.: Experimental study on the mechanism of cracks generation on NATM concrete lining: a review, *Journal of JSCE*, **66-1** (2010), 132-145.
- 8) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism download directory: <http://www.mlit.go.jp/common/001023294.pdf>
- 9) Fujita, K., Sueyoshi, Y. and Matsusita, H.: *Keisokukiki no genryo to tenbo* (in Japanese), *Concrete Journal*, **44-5** (2006), 13-17.
- 10) Imai, M., Igarashi, Y., Mizuno, S. and Miura, S.: Experimental study on monitoring for asphalt layer by embedded fiber optic sensor (in Japanese), *Journal of JSCE*, **68-3** (2012), 696-706.
- 11) Iwaki, H. and Tamura, K.: Applicability study of distributed optical fiber sensors for long-term monitoring of long-span PC cable-stayed bridge (in Japanese), *Journal of JSCE*, **62A** (2016), 41-54.
- 12) Okubo, K., Imai, M., Sogabe, N., Nakaue, S., Chikiri, K. and Niwa, J.: Development of the measuring method for pc-tensile force distribution by optical fiber applicable to control of prestressing and maintenance of pc structure (in Japanese), *Journal of JSCE*, **76-1** (2020), 41-54.
- 13) Omachi, M., Umamoto, S., Takaki, T., Matsuo, K., Miyamoto, N., Ishii, I. and Aoyama, T.: Visualization of strain and new strain measurement technique, *CD-ROM Proc. The 8th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure* (2017), SS3-6.
- 14) Umamoto, S., Takaki, T., Omachi, M., Matsuo, K., Miyamoto, N., Ishii, I. and Aoyama, T.: Development of self-temperature compensated strain visualization sheet, *CD-ROM Proc. The 8th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure* (2017), SS3-3.
- 15) Umamoto, S., Tanoue, S., Miyamoto, N., Takaki, T., Ishii, I., Aoyama, T. and Fujii, K.: Concrete surface strain measurement using moiré fringes, *Construction and Building Materials*, **67** (2014), 115-120.