

## 光ファイバセンサによる鋼管杭のひずみ測定

(Axis force distribution of a steel pipe pile using optical fiber sensor)

北海道開発局開発土木研究所○正会員 日下部祐基 (Yuki KUSAKABE)

同 上 同 上 池田 憲二 (Kenji IKEDA)

同 上 同 上 中井 健司 (Kenji NAKAI)

同 上 同 上 冨澤 幸一 (Koichi TOMISAWA)

## 1. まえがき

杭の鉛直載荷試験では、杭周面摩擦力度を求めるために杭体ひずみが測定される。現在杭体ひずみは、鋼管杭ではひずみゲージを直接杭に貼付してあるいはひずみ計を取り付けて測定され、場所打ちコンクリート杭では鉄筋計やコンクリートひずみ計を杭に埋設して測定される。これらのひずみ測定では、測定器を設置した深度のみの測定となり、深度方向に連続した測定は不可能である。杭の各深度ごとの杭周面摩擦力度は、杭体の連続したひずみが測定されると、さらにより詳細に把握することができる。

最近、新しく開発された光ファイバを用いたひずみ測定は、光ファイバの連続したひずみを測定する技術を応用して、光ファイバをひずみ測定対象物に貼付あるいは埋設し、測定対象物に発生したひずみを連続的に捉えることができるもの<sup>1)</sup>である。本研究は、この技術を打ち込み鋼管杭に適用する手法の開発を目的としている。過去の研究では、場所打ちコンクリート杭に光ファイバを埋設して杭体ひずみが測定され、ある程度良好な結果<sup>2)</sup>が得られている。しかし、鋼管杭についての試験は、これまでに実施された例がないのが実情である。ここでは、新たに考案した光ファイバを鋼材に貼付する方法について耐溶接室内試験を行い、さらに鋼管杭に貼付して杭打設時の耐久性や載荷時の杭体ひずみへの追随性などを検証したので報告する。

## 2. 試験概要

新たに考案した光ファイバの鋼材貼付方法は、過去の研究で開発した場所打ちコンクリート杭のひずみ測定に用いる方法<sup>3)</sup>を応用して、溝切りした鉄筋を鋼材に溶接し、その溝に弛みをとるために光ファイバに 20kN 程度の張力を掛けながら全面接着した後、溝内をエポキシ系樹脂で被覆するものである。試験に用いた光ファイバは、過去の試験で良好な結果が得られた4芯テープ心線である。

この方法で光ファイバを鋼管杭に貼付した場合に、打ち込み杭では杭打設時の地盤貫入抵抗から光ファイバを防護するために、溝型鋼を被せて溶接する必要がある。このときに、光ファイバ周辺が高温になることが予想され、被覆材などが熔解して測定不可能になることが懸念された。耐溶接室内試験では、金属溶接の高熱で被覆材などが溶解するか否かを確

認するとともに、どの程度の温度まで耐えられるかを調査した。

図-1に試験治具全体の概念図を示す。試験では、溝を切った丸鋼 ( $\phi 16\text{mm}$ ,  $L=2.0\text{m}$ ) を H 鋼フランジ上面に点溶接した後、光ファイバを溝内に瞬間接着剤で止めてエポキシ系樹脂で埋設した。溝切り鉄筋には、2箇所に熱電対を貼付した。そして、それらの上から溝型鋼を被せ、H 型鋼との接地部両側を 30cm 間隔で千鳥に溶接し、その時の丸鋼温度と光ファイバのひずみを計測した。この時点の丸鋼温度上昇では、光ファイバのひずみ計測が十分可能であった。そこで、さらに温度上昇させるためにアセチレンガスにより溝型鋼を加熱し、同様に温度およびひずみを計測した。

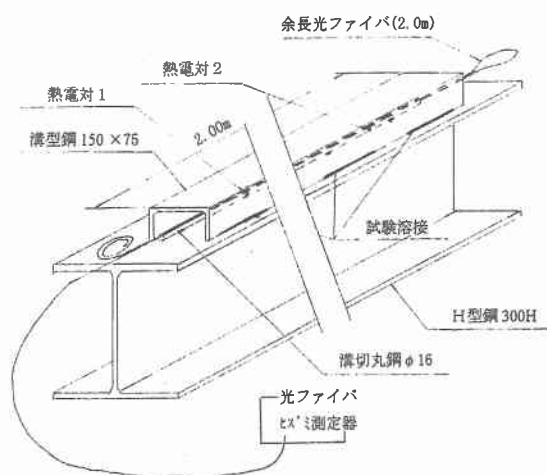


図-1 耐溶接室内試験概念図

光ファイバを貼付した杭の鉛直載荷試験では、試験杭として新設橋梁の橋台基礎杭を用いた。試験杭の諸元は、杭長 23m、杭径 800mm の打ち込み鋼管杭である。鋼管杭には、上杭 (11m) の上下 50cm 離して耐溶接室内試験とほぼ同様の方法 (溝切り丸鋼を鋼管杭に線溶接した点が異なる。) で光ファイバを 10m 貼付した。また、杭には杭先端より 50cm 離れた位置から 2m ピッチでひずみゲージを取り付けている。試験地の地盤状況は、火山灰層を主体とした地盤である。図-2は、試験杭に取り付けた各計測器の配置図および試験地付近の土質柱状図を示したものである。載荷試験は、地盤工学会基準<sup>4)</sup>に準拠して5サイクル載荷で最大荷重 5.89MN (600tf) とした。

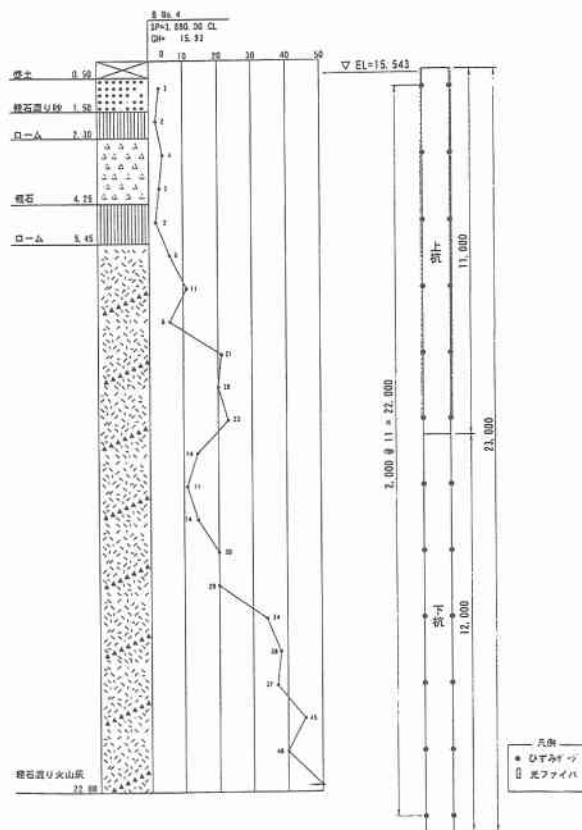


図-2 土質柱状図および試験杭配置図

### 3. 試験結果と考察

#### 3.1 耐溶接室内試験

試験では、最大 314.2℃まで鋼材を加熱し、任意温度での光ファイバのひずみを測定した。図-3は、熱電対1で測定された各任意温度における、光ファイバの測定距離とひずみの測定結果を示したものである。ひずみは100.9℃で最大となり、その後減少していることがわかる。最大値を示す測定距離が2箇所あるのは、光ファイバが丸鋼内を往復しているためである。そこで、最大値を示す2箇所を同一測点として各熱電対の測点位置を求め、各測点の温度と光ファイバのひずみを求めた。

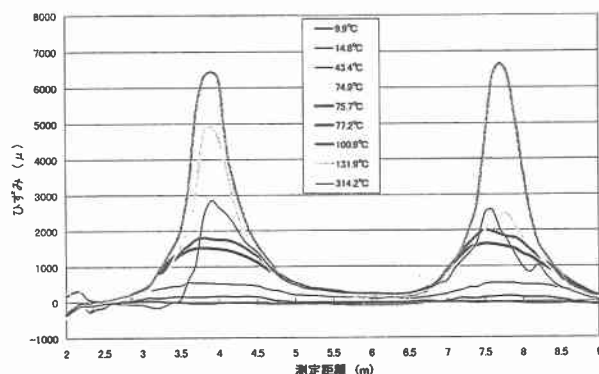


図-3 温度別光ファイバひずみ測定結果

図-4は、それらの関係を示したものである。熱電対1では、往復した光ファイバの(図中)ヒズミ1とヒズミ2の値が、100℃まで増加してその後減少傾向を示す。熱電対2では、100℃を越えてもひずみが増

加する傾向を示している。これらのことから、光ファイバの耐溶接温度としては、ヒズミ1とヒズミ2の値が増加傾向を示す100℃を許容限界温度とした。

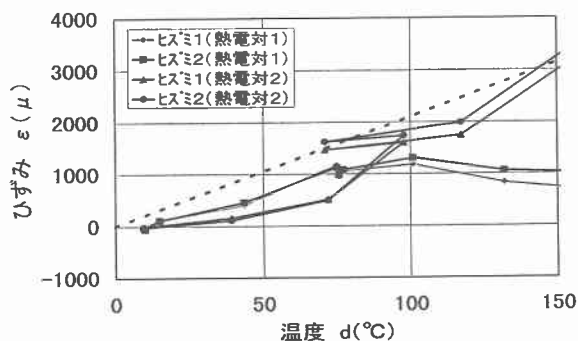


図-4 温度測定位置の光ファイバひずみ

試験での鋼材初期温度は9.9℃であり、鋼管杭で行う溶接作業と同条件での温度上昇は最大72℃で、その差62.1℃が溶接作業による温度上昇量となることが推測された。これらの温度から逆算して、現地で鋼管杭に光ファイバを貼付して溶接作業をする場合の、許容初期鋼管杭温度を求めると40℃程度となる。この許容温度は、夏季の直射日光を避けるために鋼管杭に覆いをかけた中での作業とするか、あるいは早朝の気温の低い時間帯に溶接を行うことなどで、対処可能であると判断した。実施した現地光ファイバ貼付作業は、6月中旬の曇天下で鋼管杭の初期温度20℃程度で行なった。

なお、同図には光ファイバの温度依存性を調査した既存資料<sup>5)</sup>にある、光ファイバの温度とひずみの関係を波線で示した。今回の試験結果と比較すると、既存の温度勾配は試験結果に比べて急になっていることがわかる。これは、今回の試験で測定された温度が光ファイバを貼付した付近の丸鋼の温度であり、光ファイバ自体の温度と異なったことが考えられる。

#### 3.2 杭鉛直載荷試験

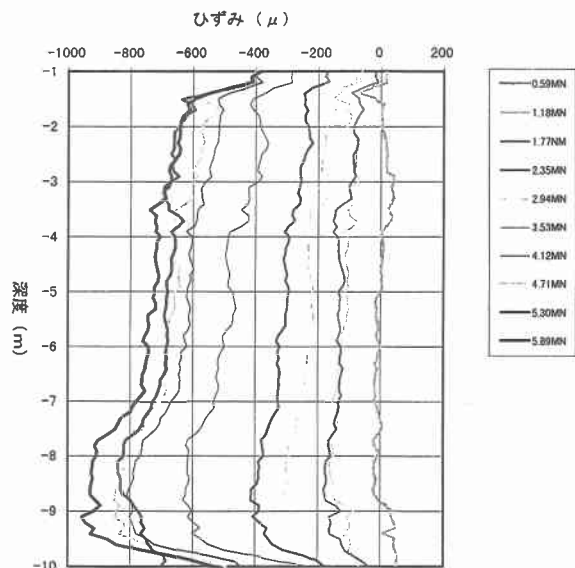


図-5 各荷重段階の光ファイバひずみ

図-5は、各荷重段階の光ファイバによるひずみ測定値を示したものである。光ファイバによるひずみ測定技術の特性から、理論上の杭体ひずみとして測定されている区間は、深度-1.5m から-9.5mの間である。また、ひずみ測定値は10cm間隔で得られる。各荷重段階の光ファイバのひずみ分布は、各深度でばらつきがみられ、滑らかな曲線形状を示していない。

本来杭は連続体であるから、その分布は曲線形状となる。測定値がばらついた原因としては、光ファイバが杭体ひずみに良く追随していないことが考えられるが、さらに測定器の測定原理<sup>6)</sup>に関する精度上の問題も考えられる。光ファイバのひずみ測定では、入射パルス光と後方散乱光の周波数変化量を求めてひずみに換算される。この時に入射するパルス光は、周波数を変化させながら繰り返し測定される。そして、変化量が最大レベルになる周波数を、各距離毎に最小自乗法を用いた周波数分布近似曲線から求める。この統計処理による最大レベル周波数の推定が、今回のひずみ測定値に影響したことが考えられる。

これまでの研究の結果<sup>7)</sup>、このデータ整理法として5点移動平均法による平滑化が有効であるとされている。5点移動平均法とは、次式で表されるもので、各深度のひずみにその深度を含む上方5点の平均値を用いるものである。

$$F_t = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N A_{t-j+1}$$

ここに、N：移動平均法の計算に用いる計測値の個数(N=5)

A<sub>t</sub>：測定深度t番目のひずみ(μ)

F<sub>t</sub>：測定深度t番目の移動平均ひずみ(μ)

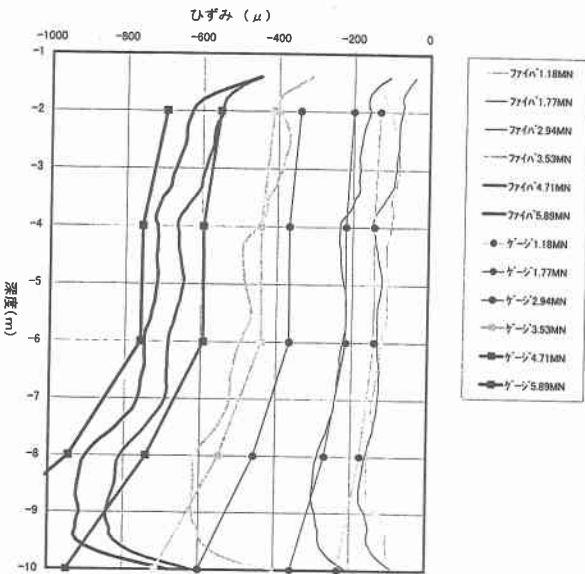


図-6 平滑化した光ファイバひずみ

図-6は、各荷重段階中の代表的な光ファイバひずみ測定値を、5点移動平均法により平滑化して示したものである。各荷重段階のひずみ分布は、ある

程度連続した曲線形状になっていることがわかる。なお、5点移動平均法で補正した場合の杭体ひずみ測定始点は、深度-2.0mになる。

同図には、ひずみゲージによるひずみ測定値も示した。両ひずみ値を比較すると、ひずみ分布の傾向は類似しているが、特に載荷荷重 1.77MN(180tf)、2.94MN(300tf)の光ファイバひずみの絶対値が全体的に小さい値にシフトしていることがわかる。この現象は、これまでの試験<sup>8)</sup>でも確認されていることで、原因として測定装置自体の誤動作あるいは0補正や温度補正の方法などに、問題があると考えられる。現状では、この現象に対する解決策がない。ここでは、この解決方法として光ファイバによるひずみ測定と、他のひずみ測定器(ここではひずみゲージ)1点の併用による補正方法を提案する。

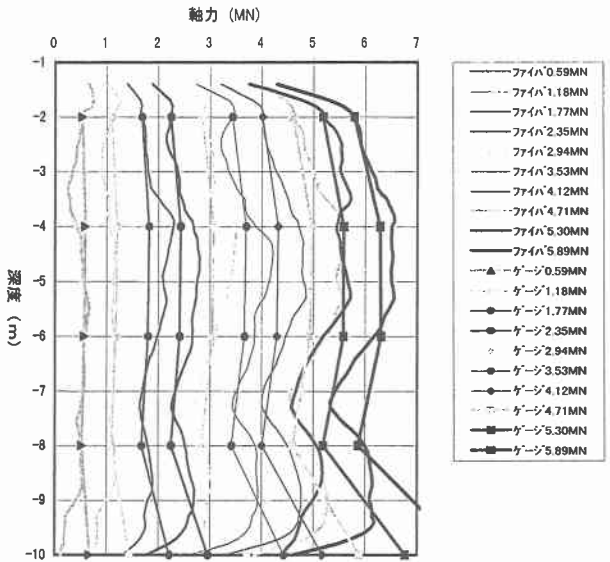


図-7 光ファイバとひずみゲージによる軸力分布

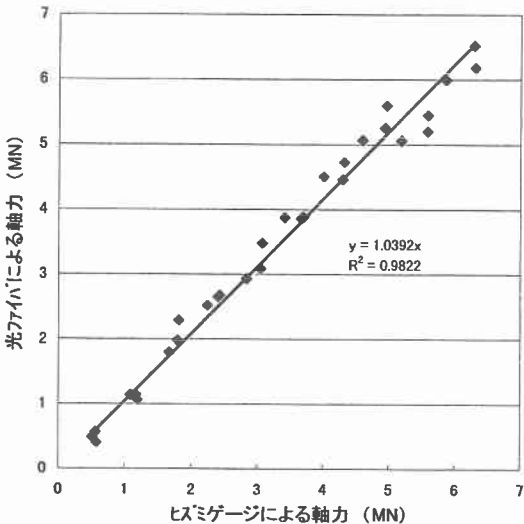


図-8 同一測定深度における各軸力の比較

光ファイバのひずみ測定値が、真値と傾向が類似して全体的にシフトしているのであれば、ある1点の真値との差を測定値全体に加算することにより補正できる。そこで、試験結果の深度-2mの光ファイ

バと、真値と仮定したひずみゲージの測定値が一致するように、光ファイバの測定値を補正した。その補正ひずみを用いて、杭の軸力を求めたのが図-7である。同図には、ひずみゲージの測定値より求めた軸力も示した。これらの軸力分布の傾向は、ある程度一致している。

図-8は、深度-2.0m ひずみゲージ以外の各測定深度におけるひずみゲージと光ファイバによる軸力を比較したものである。原点回帰の最小二乗法による相関係数 $R^2$ は 0.98 となり、高い相関性が認められる。したがって、この補正方法は、光ファイバの測定値が全体的にシフトすることに対する解決方法として、有効であることが示唆された。

#### 4. まとめと今後の課題

ここで実施した一連の試験では、打込み鋼管杭に光ファイバを貼付して、打設後の杭のひずみを測定することができた。今回の試験結果から得られた考察をまとめると、次のとおりである。

1) 耐溶接室内試験の結果、鋼材に貼付した光ファイバの耐溶接限界温度としては、100℃程度であることが推察された。

2) 現地で鋼管杭に光ファイバを貼付して、溶接作業を行う場合の許容初期鋼管杭温度は、40℃程度である。この程度の温度は、夏季の直射日光を避けるかあるいは早朝の気温の低い時間帯に溶接を行うことで対処可能と考える。

3) 杭鉛直載荷試験による各荷重段階の光ファイバひずみにはばらつきがみられ、この対処法として5点移動平均法により平滑化することが有効であると推察された。

4) 各荷重段階の光ファイバによるひずみ分布曲線には、全体的にシフトするものがあり、この解決法として光ファイバと他のひずみ計測器1点を併用した測定を行い、補正する方法を提案した。

5) 提案した解決法により補正した光ファイバによる軸力分布の傾向は、ひずみゲージによるものとある程度一致していた。

6) 同一深度におけるひずみゲージと光ファイバによる軸力を比較した結果、相関係数 $R^2$ が 0.98 の高い相関性が認められ、ここで提案した解決法が有効であることが示唆された。

7) 今後の課題としては、今回の試験では上杭のひずみ測定のみとしたが、杭全長のひずみ測定を行う場合には杭継ぎ手部の処理方法を検討する必要がある。

#### 5. あとがき

光ファイバを用いて打ち込み鋼管杭のひずみを、深度方向に連続して測定する試験は、今回が最初の試みである。試験の結果、耐溶接温度を明らかにし、さらにひずみ測定値から軸力などを求める場合のデータ補正法を提案したことは、有用な成果であると考えられる。この技術は、鋼管杭の軸力測定に利用する

だけでなく、橋梁などの鋼構造物を対象とした各種試験のひずみ測定や一般供用構造物の維持管理・安全監視などにも利用可能であることが予想される。したがって、今後の展開が大いに期待されるものである。本報告が、これらに関連した技術開発の一助になれば幸いである。

なお、札幌開発建設部札幌新道建設事務所工事課高島功工事課長はじめ試験工事担当者には、光ファイバを貼付した杭鉛直載荷試験の実施にあたって多大なご協力を頂いた。ここに記して、深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 倉嶋利雄, 佐藤昌志: 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, pp18 ~ 20, 1997.5
- 2) 日下部祐基, 佐藤昌志, 倉嶋利雄, 野引敦, 高見和弘: 光ファイバによる杭の軸力測定に関する研究, 第33回地盤工学研究発表会講演集, pp.2477 ~ 2478, 1998.7.
- 3) 日下部祐基, 佐藤昌志, 倉嶋利雄, 野引敦, 高見和弘: 光ファイバセンサによる杭の軸力測定, 地盤工学会北海道支部技術報告集第38号, pp.271 ~ 274, 1998.2.
- 4) 地盤工学会: 杭の鉛直載荷試験方法・同解説, pp.76 ~ 111, 1993.6.
- 5) 倉嶋利雄, 堀口常雄, 立田光廣: ブリルアン散乱光を応用した分布型光ファイバセンサ, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J74-C-11, No.5, 1991.5
- 6) 内山春義, 佐藤泰史, 李哲賢: 光周波数変換技術とコヒーレント検波技術を用いた光ファイバ歪/損失測定器の開発, ANDO TECHNICAL JOURNAL, pp17 ~ 22, 1996.10
- 7) 池田憲二, 中井健司, 日下部祐基: 急崖斜面の変状計測センサに関する研究, 北海道開発局開発土木研究所急崖斜面の道路防災に関する研究プロジェクト・センサ開発チーム報告書, pp9 ~ 19, 2000.12
- 8) 日下部祐基, 池田憲二, 中井健司, 川瀬良司: 光ファイバセンサによる現地岩盤斜面計測結果とその考察, 土木学会北海道支部論文報告集第56号, 2000.2