

論文 光ファイバセンサによるコンクリート曲げ部材のひび割れモニタリングに関する研究

呉 智深^{*1}・高橋 貴蔵^{*2}・紀 博徳^{*3}・平松 克美^{*4}

要旨:新たな非破壊検査法として注目されている光ファイバ連続計測技術をコンクリート構造物のひび割れ幅モニタリングに使用するための基礎資料を得ることを目的に、まず、光ファイバの敷設方法を考案した。そして、光ファイバを敷設しているコンクリート梁供試体の曲げ試験を実施し BOTDR と呼ばれる光ファイバひずみ連続計測装置により、コンクリート梁供試体のひずみの連続分布計測を行った結果によりコンクリートひび割れの検出およびひび割れの幅に関する計測可能性を検討した。

キーワード:光ファイバ, BOTDR, ひび割れ, コンクリート構造物

1. まえがき

現在トンネルや橋梁などの大型コンクリート構造物の安全性が各地で問題となっている。しかし、大型構造物の検査は目視やハンマーなどによる打音検査、および局所箇所のひび割れ測定に依存しているのが現状である。これに対して、近年非破壊検査技術の発展が目覚ましく、これらを積極的に活用して検査・診断の合理化と定量化を図ることが急務であると考えられ、コンクリート構造物の維持管理技術の高度化とイノベーションが大いに要求されている。

コンクリート構造物の健全性診断を行う上で最も重要なのは、コンクリートひび割れ状態の把握とその原因を見極めることである。しかし、ひび割れなどの変状現象は外的、内的ともに複雑な原因が競合していることが少なくない。そのため、構造物におけるひび割れの内外分布状況を早期に検知し、その進展モニタリングを行う技術が期待されている。

近年、光ファイバの感知機能に関する研究が盛んに行われてきている。通信の光が光ファイバに伝搬したときに、このファイバの変形や損傷で生じる光の強度変動や後方散乱のような光

の伝搬損失と周波数変化、あるいは偏光や可干渉光を伝搬させたときに起きる干渉などの特性などによって損傷の発生と進展を監視することが考えられる。その中、光ファイバ内に発生するひずみをブリルアン散乱光によって、連続測定する BOTDR 法が注目されてきている^{1, 2)}。この計測法の特徴として、①連続測定が可能、②低損失であるため長距離計測が可能、③システム化、遠隔監視が容易、④比較的高精度な計測が可能であるため大型構造物のひずみ計測に適していると思われ、実時間的な健全性監視（ヘルスモニタリング）の実現可能性も期待されている。しかし、土木構造物のモニタリングに関する光ファイバセンサ技術の応用可能性は未知なところが多く、データの蓄積も極めて不十分である。特に計測原理に関する工学的明確や設置方法など課題が数多く残されている。その一つとして、比較的長い距離分解能（ゲージ長）となっている光ファイバ計測装置でいかにひび割れのような構造物の局所性状を計測できるかという問題が挙げられる。本研究は光ファイバセンサを用いて、コンクリート構造物のひび割れの検知と計測方法を検討したものである。

*1 茨城大学助教授 工学部都市システム工学科 工博（正会員）

*2 茨城大学大学院 理工学研究科

*3 三菱重工業（株） 技術本部長崎研究所主査 工博

*4 日本電信電話（株） NTT アクセス網研究所フィールドセンシングP研究主任

2. 試験の概要

2.1 試験の目的

本論文では、ひび割れの検知計測を行うため供試体に光ファイバを直接接着する方法（全面接着敷設法）および適当な間隔で点接着を行うと同時に、光ファイバを距離分解能より短い間隔で数回折り返して、見かけ上のゲージ長を短くする方法（定点接着ループ型敷設法）（2.3 参照）を実施し、コンクリート曲げ供試体による 2 等分点載荷法による曲げ試験（以降 3 点曲げ載荷試験）と 3 等分点載荷法による曲げ試験（以降 4 点曲げ載荷試験）を行った。この実験では距離分解能（ゲージ長）1m の BOTDR 計測装置を用いてひずみ測定を行う。全面接着敷設法および見かけ上の GL（ゲージ長）340mm の定点接着ループ型敷設法によって得られるひずみと、GL（ゲージ長）500mm のパイ型変位計によって得られる梁底面のひずみと比較を行い、ひび割れの検知と計測能力を検証する。

2.2 試験体の概要と試験方法

本実験では鉄筋コンクリート梁の 3 点曲げおよび 4 点曲げ載荷試験を行い供試体のひずみを計測した。図-1 に試験体の概要を示す。試験体の寸法は、長さ 2100mm、幅 150mm、高さ 200mm くなっている。

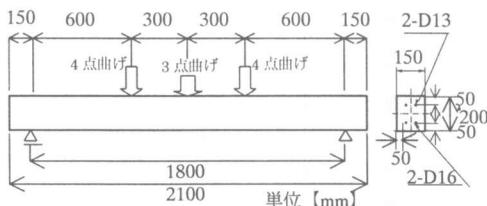


図-1 鉄筋コンクリート曲げ梁供試体

試験体は図-1 示すように支点間隔を 1800mm とし、同時に BOTDR による光ファイバひずみ計測、パイ型変位計による変位計測を行った。載荷方法は、光ファイバで計測できる限界まで単調に増加させた。その中、ひび割れの発生、鉄筋降伏前後について比較的小さい荷重ステップで載荷を行った。光ファイバを用いた BOTDR による計測は 1 度に数分かかるため、光ファイバのひずみを測定している間は試験体にかかる荷重を一定に保つ。

2.3 光ファイバ敷設位置と変位計の取り付け

本実験では先に述べた通り図-2 に示す定点接着ループ型敷設法と全面接着敷設法を用いた。

現在開発されている最新の BOTDR 計測器を用いた光ファイバの距離分解能は 1m であるため、光ファイバセンサの敷設距離 1m を保つつつ、ゲージ長を短くするために用いられるのがループ型敷設法である。また、光ファイバは曲率半径 60mm 以下で断線してしまうおそれがあるので本実験では 60mm のアクリル円盤をガイドとして用いる。光ファイバのアクリル円盤に接している箇所 2 点を接着し、定点接着を図る。

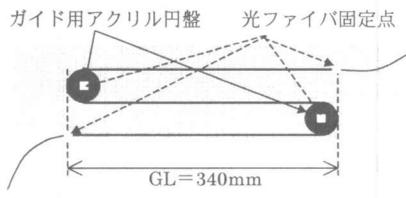


図-2 定点接着ループ型敷設法

全面接着敷設法は、光ファイバ全体をエポキシ樹脂で固定する方法である。これは微少なひずみが測定可能であり、光ファイバと接着しているコンクリート面のひずみがすべて反映されることになっている。その反面、接着しているコンクリート面にひび割れが生じた場合ひび割れの周辺に光ファイバのひずみ集中が生じ、この集中ひずみを正しく計測できるかどうかが検討の課題となっている。また、ひずみ集中による光ファイバの大きなクリープ損傷や断線の恐れもある。本研究において全面接着敷設法で敷設した光ファイバの長さは 1800mm である。

図-3 に取り付け位置を示す。パイ型変位計はできるだけ光ファイバの測定地点に近づけるためコンクリート供試体の底面に光ファイバをまたぐ形で取り付けた。

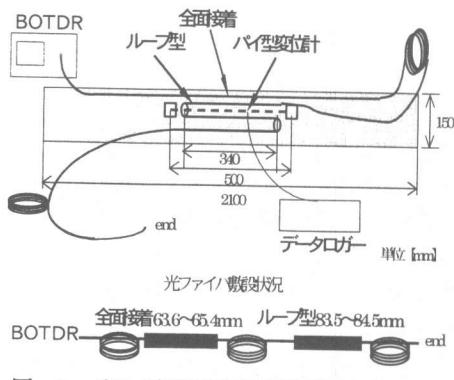


図-3 光ファイバ及びピエゾ型変位計貼り付け位置

3. BOTDR の測定原理

BOTDR は、光ファイバの長さ方向に発生したひずみを連続的に測定する装置である。従って構造物と光ファイバを一体化し、構造物に発生したひずみを光ファイバを介して計測することができれば、構造物が破壊に至る前に、構造物に発生した変状をモニタリングすることが可能になると期待されている。以下に測定原理を示す³⁾。

BOTDR 計測器に接続されている光ファイバの片端からレーザーパルス光を入射すると、レーリー散乱光、ラマン散乱光、ブリルアン散乱光などのような散乱光が発生し、散乱光の一部は後方散乱光として入射端の計測器に戻ってくる。この内、ブリルアン散乱光とは、物質に入射した光が物質中を伝播する屈折率の周期的变化（音波）により散乱され、その周波数が変化する現象であり、光ファイバにひずみが生じるとブリルアン散乱光の周波数が変化する（図-4）。

図-5 に BOTDR の基本構成を示す。ブリルアン散乱光の周波数は、入射パルス光に対してブリルアン周波数 ν_B だけシフトするため、光源の周波数 f_0 をあらかじめ ν_B に近い周波数 $+f_1$ ($\approx \nu_B$) だけシフトさせ、周波数 $f_0 + f_1$ のパルス光を光ファイバに入射する。よって、ブリルアン周波数を検出するには、光ファイバにひずみが発生し、ブリルアン散乱光の周波数がシフトしたら、 $f_0 + f_1 - \nu_B = f_0$ となる f_1 を計測することにより求めることができる。

ひずみ測定は光ファイバの伸縮による光ファイ

バ中のブリルアン散乱光の周波数シフト量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して実現できたものである（図-6）。

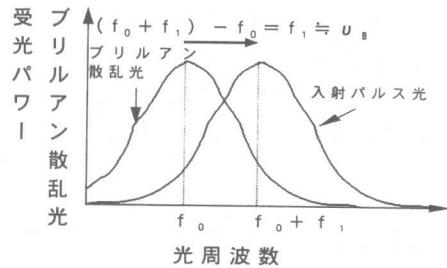


図-4 周波数変化量

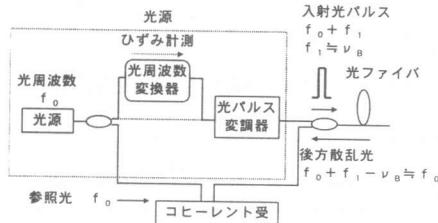


図-5 BOTDR の基本構成

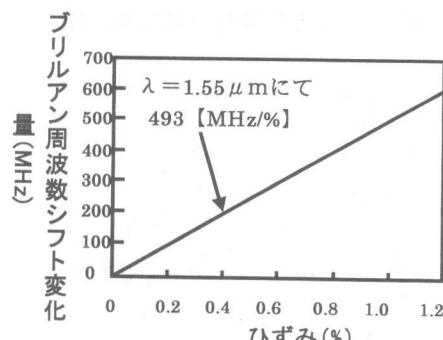


図-6 光ファイバのひずみの比例関係

4. 載荷試験結果

光ファイバのひび割れモニタリングを検討するため、図-7、8に各コンクリート供試体の終局荷重に至る梁側面のひび割れの発生状況を示す。

各試験体とともに終局荷重に至るまで、曲げによるひび割れが支配的であり、曲げ破壊により終局状態に至った。3点曲げ、4点曲げのループ型敷設範囲内の目視によるひび割れ発生状況としては、3点曲げにおいて1本目は約12KN、2本目は15KN、3本目は20KNであり、4点曲げにおいて1本目は約11KN、2本目は20KN、3本目は23KNであった。図-9に荷重と梁中央変位の関係を示す。この関係によると初期ひび割れは3点曲げ試験が11.8KN、4点曲げ試験の方が10.9KNであった。

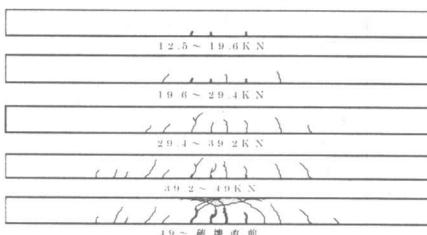


図-7 3点曲げ試験ひび割れ発生状況

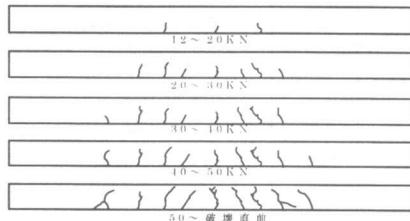


図-8 4点曲げ試験ひび割れ発生状況

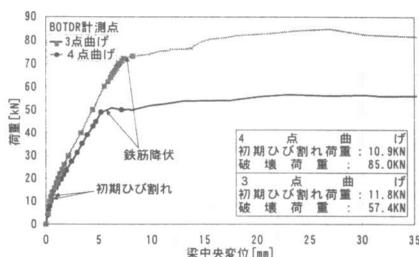


図-9 3点・4点曲げ試験荷重一変位曲線

5. 光ファイバの試験結果と考察

5.1 ひび割れ幅測定の原理

光ファイバセンサから得られるひずみをひび割れ幅に換算する場合、以下の式を用いる。

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{a} = \frac{\Delta_{cr} + \Delta_c}{a} \quad (1)$$

Δ_{cr} =コンクリートのひび割れ幅、 Δ_c =コンクリートの弾性変形、 a =ゲージ長(距離分解能)

通常コンクリートの引張領域において、弾性変形はひび割れの変形とに比べて非常に小さい関係であるため、 $\Delta_c=0$ と近似すれば、 $\Delta_{cr}=a\varepsilon$ となり、複数のひび割れを有するゲージ長範囲内の平均ひび割れ幅、またはそのトータル量は一意的に求められる。

5.2 光ファイバのひずみ分布

光ファイバ線上のひずみ分布を測定するため計測点を10cmずつシフトしてBOTDR端からendまで連続的に計測を行った。3点曲げおよび4点曲げ試験体の定点接着ループ型敷設部分のひずみ分布を図-10、11に示す。

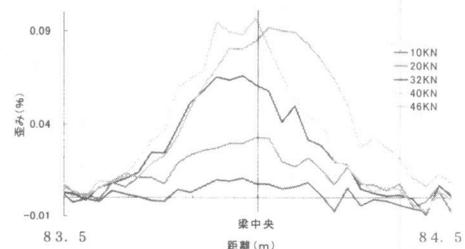


図-10 3点曲げ光ファイバひずみ分布

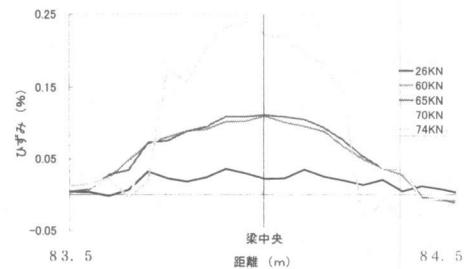


図-11 4点曲げ光ファイバひずみ分布

最初2、3荷重ステップの計測値はかなり微少であり、光ファイバの敷設状況、例えば光ファイバの初期引張り具合によって支配される可能性が

あると考えられ、光ファイバの敷設に十分注意を払う必要がある。そのため微少ひずみ範囲において適切なプレテンションを施した定点接着ループ型敷設法の方が全面接着より比較的に高い精度でひずみを計測できている。これは後出の図-12, 14, 15, 17の比較により明かになっている。

また、図-10, 11に示したように3点・4点曲げ供試体の変形状況がそれぞれ捉えられていることが明かであるが、BOTDRの距離分解能(ゲージ長)は1mであるため、測定されたひずみ分布と梁軸方向の真のひずみ分布との違い、即ち光ファイバ線上のある位置のひずみは点のひずみではなくこの点よりゲージ長1m範囲の平均ひずみとなっていることに注意されたい。

また、出力ひずみは距離分解能範囲の平均ひずみといわれるが、ゲージ長内の実質的なひずみ分布の状況により、本当に平均ひずみとして出力されているかについて不明な点もあり、現在調査しているところである。本研究では既存の研究成果がないためBOTDRの計測結果が分解能1mの平均ひずみとしてひび割れの計測性能を検討する。

5.3 3点曲げ試験の計測結果

図-12, 13は定点接着ループ型敷設法による光ファイバとパイ型変位計による荷重-ひび割れ幅曲線とその部分拡大図である。

荷重値14KN地点まで光ファイバループ(GL=340mm)とパイ型変位計(GL=500mm)内のひび割れ本数は同じであったが、その後、両範囲内のひび割れ本数は異なり、計測結果は大きく異なることとなった。但し、初期ひび割れや鉄筋降伏による突然の大きなひずみ変化から初期ひび割れの発生や鉄筋降伏の検知ができたと思われる。また、光ファイバGL範囲外のひび割れの発生によるひずみ計測結果の乱れも表されている。

一方、図-14は全面接着敷設法を用いた光ファイバとパイ型変位計による荷重-ひび割れ幅曲線である。荷重値40KNまではパイ型変位計のGL500mm範囲に生じるひび割れ本数と光ファイバGL1000mm範囲のそれは同数であるため、両方法の値はほぼ同じ値を示した。その後、パイ型変位

計測外のひび割れが発生進展し、梁中央部1m範囲の光ファイバに影響を与え、その範囲の光ファイバのひずみが増減したりすることとなっている。よって、全面接着でもゲージ長1m範囲内の平均ひび割れ幅はよくとらえていることが分かる。

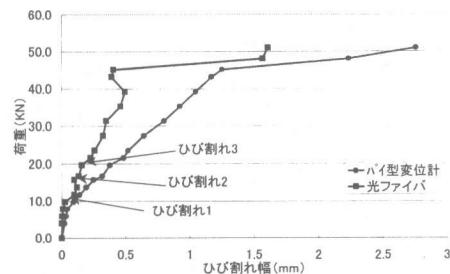


図-12 荷重-ひび割れ幅曲線
(定点接着ループ型)

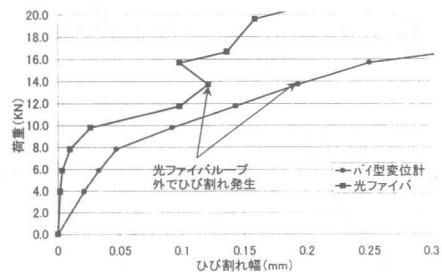


図-13 荷重-ひび割れ幅曲線拡大図
(定点接着ループ型)

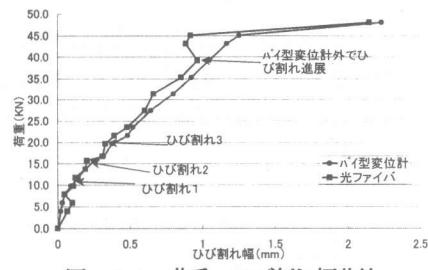


図-14 荷重-ひび割れ幅曲線
(全面接着)

5.4 4点曲げ試験の計測結果

図-15, 16は定点接着ループ型敷設法による光ファイバとパイ型変位計による荷重-ひび割れ幅曲線とその部分拡大図である。また、図-17は全面接着による計測結果である。基本的に3点曲げと同様な傾向を示している。

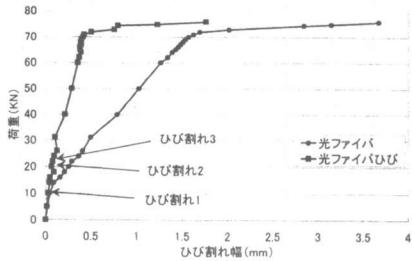


図-15 荷重-ひび割れ幅曲線
(定点接着ループ型)

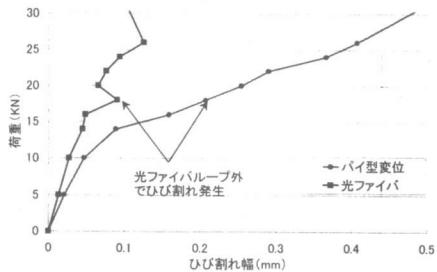


図-16 荷重-ひび割れ幅曲線拡大図
(定点接着ループ型)

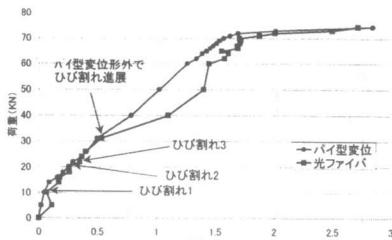


図-17 4点曲げ試験ひずみ分布(全面接着)

図-18は3点曲げと4点曲げ試験におけるループ型敷設光ファイバ計測とパイ型変位計計測による等価ひずみ(変位/GL)の相関を示したものである。いずれも、光ファイバの計測ひずみが小さくなっているが、それぞれGL内のひび割れ本数が違っているため厳密的に比較できないものである。但し、比較的に長いGLを有する光ファイバ計測に対して、その計測精度の検討に関する比較手法を新たに考える必要がある。なお、パイ型変位計の計測値よりBOTDR計測値が小さくなっている一因としては、計測点を10cmずつシフトして計測していることと、ちょうど1m分のループ敷設領域しかないと、ある計測点とループ敷設部の起点と一致することはまれで、その計測位置の不一致によるものだと考えられる。

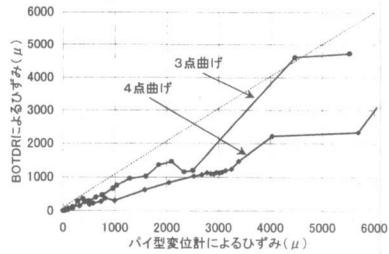


図-18 3点曲げ、4点曲げ試験の
ひずみ計測結果

まとめ

本研究によって得られた結果と知見を以下のとおりまとめる。

(1) コンクリートひび割れの発生・進展により局所的に生じるひずみ集中を解消するため考案された定点接着ループ型敷設法の有効性があるものと思われる。但し、多数のひび割れの発生につわい型変位計と光ファイバ敷設内のひび割れ本数が異なり厳密に比較できないため、今のところ光ファイバの計測特性に関する定量的評価がまだできない状況にある。

(2) 全面接着による光ファイバ敷設法に関しても複数の局所ひび割れによる距離分解能範囲のトータルひび割れ幅の計測が可能となっている。但し、実用上ひび割れ箇所に生じるひずみ集中により、光ファイバの破損や長期緊張による信頼性の低下などの問題が考えられる。

(3) 今後、光ファイバによるひび割れ幅の測定精度に関する定量的な検討を行う必要がある一方、ひび割れと鉄筋降伏などの検知に関して十分適用性があると明らかになっている。

(4) 比較的微少ひずみの計測や計測精度を高めるために、プレテンションやBOTDRの基準値の設定などを工夫した光ファイバの敷設法を確立する必要がある。

参考文献

- 1) 倉島利雄・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、Vol.82, pp.18-20, 1997.12
- 2) 安藤電気株式会社：光ファイバ歪み/損失アナライザ取扱説明書