

投稿論文(和文報告)

**TECHNICAL
REPORT**

構造物の計測のための 光ファイバを用いたセンサの開発について

鈴木 英世¹・Maria Q. FENG²

¹ F会員 工博 東京電力 電力技術研究所 (〒230 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)

² 非会員 工博 Dept. of Civil Engineering, University of California, Irvine, CA 92717, USA

本報告では、土木構造物などへ適用するための光ファイバセンサの開発の経過を述べ、2種類の光ファイバセンサを提案している。第一は外力を金属弦の張力に伝え、外力に応じた弦の振動数を光学的に計測するものである。第二は電気的なLC共振回路を利用したものである。弦またはLC回路は、光ファイバを通して与えた光エネルギーにより固有振動数で共鳴し、その振動数を検知し光ファイバによって計測ヘッドへ帰還する。また、PLL回路の使用によって、帰還した振動数の信号をリアルタイムに処理し、駆動用のパルス信号にただちに反映させ、動的計測も可能としている。これまでに室内での較正試験ならびにコンクリート供試体、鋼構造模型の動的振動台試験などの実証試験を実施しておりその結果も述べている。

Key Words : measuring system, optical fiber sensor, vibrating wire, LC circuit, PLL circuit

1. まえがき

従来の土木・建築関係に用いられている計測システムを、受感部および記録・解析装置に大別し概観すると、記録・解析部については静的・動的ともにエレクトロニクス技術のめざましい進歩に伴って、精度の向上と大量データ処理が可能となってきている。一方受感部に関しては、古くからの、歪ゲージ、差動トランス、渦電流ギャップセンサ、カールソン型計器などの方式の採用が続けられている。これらの受感方式には、長期に亘っての実績から使用方法などに信頼性の高い優れた点が多いが、その反面原理的に抱える短所も経験されてきている。各種方式のセンサに共通する短所には以下のものがある。

a)リード線は、通常外部からの電気雑音を受けないようにシールド保護を施しているが、場合によってはこれがアンテナとして働き、工場、電力設備、電波塔などにおいて、電磁界による障害を受けやすい。最近開発の進んでいる「制振技術」に応用する場合には、構造物の動的挙動を検知しつつリアルタイムで外力によって制御することから、これらの雑音を取り除くことは、特に重要である。

b)リード線は、湿気による絶縁不良からの保護を必要とする。また、チャンネル数が多い場合は多くの回線数の配線の処置が困難となる場合もある。このように受感部と比べ配線部のコストと重量が大きい

ことも課題のひとつである。また電気ケーブル類は、通常耐雷対策を施しているが、落雷によって寿命が短くなることもある。

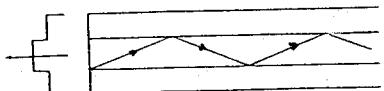
c)使用する箇所に燃料などの発火物がある場合には防爆対策を厳重に施す必要がある。

本報告は、土木・建築などの構造計測に適した形式の光ファイバを利用した計測器の開発の経緯を報告するものである。ここで開発した形式は受感部に、機械的振動弦または電気的LC回路の共振系を用い、これと光回路～電気回路系を組み合わせたものである。以下にこれらの基本的な原理の説明、開発の経緯ならびに基本性能の確認結果について述べる。

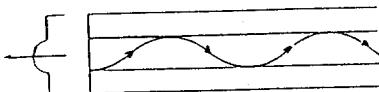
2. 光ファイバセンサの技術の概要

(1) 光ファイバの構造

光ファイバは、1970年代から開発が進められてきており、現在の光通信技術の主要な部分を成している。光ファイバは、発光ダイオードなどの発光素子およびフォトトランジスタなどの受光素子を両端に配し、電気回路と結合し全体の系を構成するものである。今日光ファイバは電気通信用として多用されているばかりでなく、土木構造物の計測に関しても在来型のセンサからの大量の出力を、デジタル化した信号に変換し高速に伝送する手段として用いられている。



屈折率分布（ステップインデックス型）



（グレーデッドインデックス型）

図-1 光ファイバの構造

る。これらの光ファイバは、透明度が高いことに加え、ファイバの内部での全反射または屈折を巧みに応用し、漏洩による損失を減じることによって広く実用化が行なわれている。実際には、図-1に示すとおり屈折率を段状に変化させ全反射を利用したステップインデックス型ならびに中心に近いほど屈折率を大きくし光の屈折を利用したグレーデッドインデックス型とがある。

（2）従来の光ファイバセンサの概要

光ファイバを用いたセンサは、理論的にはあらゆる種類の物理量および化学量の計測が可能^{1,2)}とされている。これらの計測対象としては、温度、歪、変位、回転速度、振動、圧力、電界、磁界、電流、ガス濃度などがある。光によってこれらの物理量などを計測する原理は、外乱がファイバガラス内部の散乱、干渉、減衰などの性能を変化させる光学的な現象を利用したもの、ポッケルス効果など電磁気学的現象を利用したものなどがある。これらの基本的な現象自体は、既に今世紀の初め頃から解明されてきている著名な現象である。

一般に光ファイバを用いた計測技術には、従来の計測技術と比較し、次の長所がある。

a)光ファイバセンサは電気回路を用いる箇所が一部分に限定されているため、雷や電気設備などからの電磁界の雑音に対しての影響を受けるおそれがない。

b)従来の一般計測におけるリード線部分を、ファイバーケーブルに置き換えていていることから、重量が軽くまた湿気による絶縁不良の影響を受けない。

c)方式によっては一本のファイバによる多重方式も可能となり、配線処理が煩雑とならない。

d)主に光通信技術の分野の大量なファイバ使用量などに支えられこれまで以上に価格が低下することが期待できる。

これらの長所を活用して、光ファイバセンサを実現させるには次の2種類の方式がある。

外部型（Extrinsic）センサ：光ファイバの先端にセンサヘッドを接続し、力、応力その他の外乱を受感させこの信号を光の強度、位相、偏光の角度、パルス信号の周波数などの光信号として、光ファイバを通じて伝送するもの。このように光ファイバを信号の伝送路として用いる。さらにこの型式は、透過型と反射型とに大別される。

内部型（Intrinsic）センサ：光ファイバ自体をセンサおよび伝送路の両方の機能として持たせたもの。これはさらにサニヤック効果、ドップラ効果などの現象を干渉計で計測するタイプ、マイクロペンド損など干渉計以外で計測するタイプ、ならびに後方レーリー散乱やラマン散乱の原理を用いファイバの線上的分布を連続的に計測するタイプ、の3種類に分類される。

このような光ファイバセンサの長所に着目し、変電所における高電圧の電流や電圧の計測などの実用的なセンサ技術の開発がここ15年程の間進められてきている。この例としては、偏光現象を用いたファラディ効果やポッケルス効果による電流、電圧の計測器などがある³⁾。なお、後方ラマン散乱を用いた温度センサのひとつとして、コンクリートダム内部の水和反応熱による温度分布を、従来型の熱電対に替わって計測する技術が確立され実用化されてきている⁴⁾。また、この温度計測技術は電力ケーブルの線上の温度分布計測にも実用化されている⁵⁾。

また海外では、コンクリート内のひび割れの計測などを目指して、ファブリ・ペロ型センサにより、室内試験に試験採用されているほか、高速道路、橋梁、建物などへの適用も試みられている^{6,7)}。これらのセンサは元来土木建築用に開発されたものでなく、実構造物への適用にあたっては、困難な点も少なくない。例えば

a)これらのセンサは光の強度、位相遅れ、波長、干涉光のモードパターンなどを用いたものであり、物理学等で取り扱うÅ級の変位の計測に適している。しかし、土木構造物の歪計測などを対象としたμm以上のオーダーの計測には繊細過ぎる。

b)センサの原理として多種の外的な要因に反応するものが多く、例えば歪と温度、曲げと剪断、曲げと圧縮などを分別することが困難な場合もある。

c)ファイバ自体をセンサとして用いている場合にはセンサの温度・歪に対する物理的な強度に強く支配されるため、使用条件に限界がある。

（3）構造物の計測用光ファイバの必要事項

上に述べた光ファイバセンサの一般的な長所に加え土木建築構造物用の光ファイバセンサはつぎの条

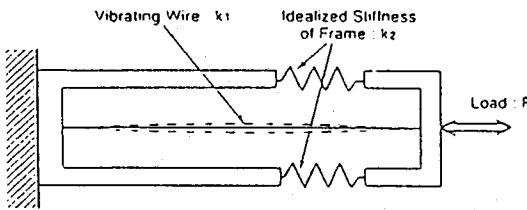


図-2 振動弦と支持フレーム

件を具備することが必要である。

- ・土木建築の現場条件に即した精度、耐久性、外形を有し、またこれらに見合った原理を採用すること。
- ・例えば歪、変位、振動量、圧力など、所望の計測量のみを信号として取り出し、目的以外の要因による影響を受けないこと。

3. 光ファイバを用いた新しいセンサのコンセプトと原理

(1) コンセプト

ここに提案する新しい光ファイバセンサは次のコンセプトにより考案することとした。

- a) 弦の振動、電気共振回路など既知の物理現象を応用し、確実な機能を期待できることとし、外部型とする。
- b) 多数の点における現象を計測する、いわゆる多重計測に応用展開が可能のこと。これは温度計測で採用しているような分布型の計測に近いものを指向しようとするものである。
- c) 伝送の途中で距離減衰などの情報の変化を受けないよう配慮し、周波数を信号とする方式とする。
- d) 上記a), b) およびc)に呼応し外部型の受感部には所望の計測量を何らかの振動数に変換する振動系を採用するものとし、さらにこの振動を効率良く励振させるため、光回路を介し受感部の外部との電気共振系を形成すること。

上記のコンセプトに従い、筆者らは、次の2種類の方式の組合わせを考案した。受感部の振動系として、

- ・張力の変化によって弦の固有振動を変化させ、この弦の振動の周波数を光ファイバによって伝送する方式
- ・電気的なインダクタンスLと容量Cを並列に接続した電気共振回路(LC回路)を形成し、この回

路の共振周波数を光ファイバによって伝送する方式の2方式を採用し、実証試験を実施した。なお、振動弦式の計測器は、過去に電線を伝送路に用いて商品化されたものがある⁸⁾⁹⁾。

(2) 振動弦方式とLC回路方式の原理

振動弦方式光ファイバセンサでは、図-2に示すようにフレームに支持された弦の振動周波数が張力の平方根に比例することに着目し、この張力を外力によって変化させ、弦の振動周波数の変化を計測しこれを変換して外力や歪を求めようとするものである。弦の張力Tと、弦の振動周波数fの関係は式(1)のとおりである。

$$f = \frac{1}{\pi l} \sqrt{\frac{Tg}{\rho}} = \alpha \sqrt{T} \quad (1)$$

ここにlは弦の長さ、ρは弦の単位長さあたりの重量、gは重力加速度、nは振動モードに対応した定数で、2, 1, 1/2, ……、αは実験定数でありTは張力である。また、図-2に示す弦のばね定数k₁、フレームのばね定数k₂と張力の初期値T₀、外力Fの関係は以下のとおりである。

$$\frac{T_0 - T}{k_1} = \frac{F}{k_1 - k_2} \quad (2)$$

ここに式(2)中のk₁はEA/lである。式(1)および式(2)から振動の周波数f(Hz)と外力F(kgf)との関係を示す式(3)が導かれる。式(3)に示される通り、この方式は基本的には外力Fに支配される力計であるが、このセンサの見かけの剛性の大きさを被測定構造物の剛性よりも十分小さく選ぶことなどによって、歪計としての使用も可能である。

$$f = \alpha \sqrt{T_0 - \frac{k_1}{k_1 + k_2} F} \quad (3)$$

振動弦型光ファイバセンサの構成は、図-3に示すとおりであり、受感部のセンサヘッド、電源・光源・指示部のメジャリングヘッドならびにこれらを接続する駆動用および信号用の光ファイバの3部分に大別される。

センサヘッド(受感部)には固定用のフレームに鋼製の弦を張っており、この弦は外力によって張力が変化するようにフレームに接続されている。弦の振動は電磁石によって駆動される。この駆動エネル

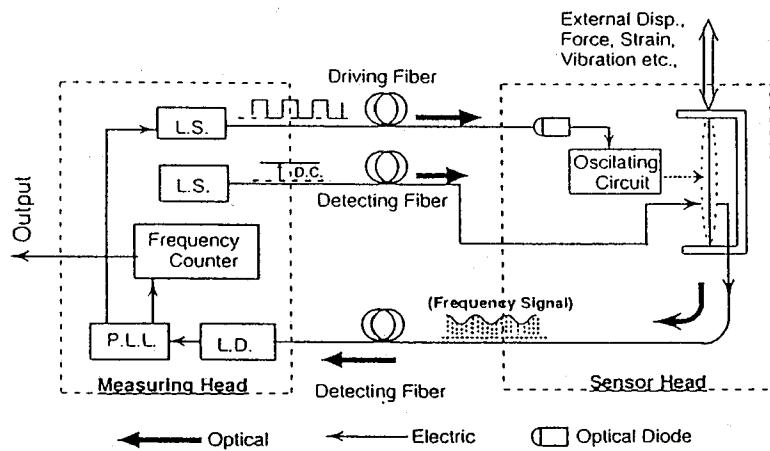


図-3 振動弦式光ファイバセンサの構成概要

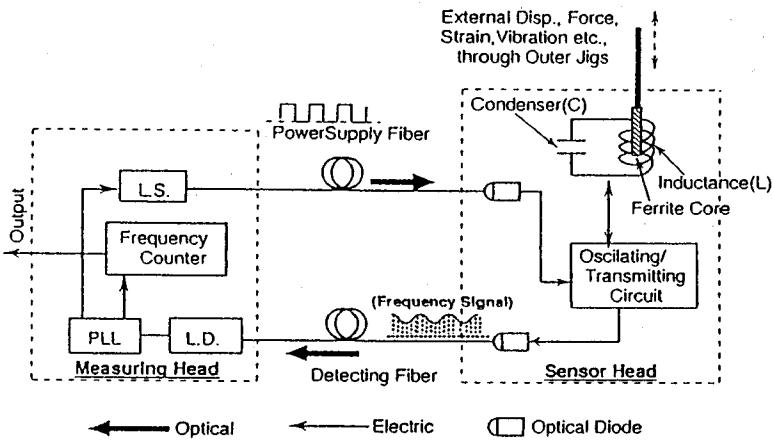


図-4 LC回路方式光ファイバセンサの構成概要

ギーは駆動用の光ファイバを通じて送られてきたパルス光を受光ダイオードによって電気に変換して得られる。弦の振動の検知には、振動弦をシャッターとして用い、光の強さを変化させこの振動周波数を信号として得て、メジャリングヘッドに帰還するものとした。メジャリングヘッドには、駆動用ならびに信号用の光源（L.S.），帰還信号の受感用受光ダイオード（L.D.），PLL回路の集積回路ならびに周波数指示計から成っている。ここに、PLL回路とは、位相同期ループ（Phase Lock Loop）の略称であり、発信している信号と帰還されて来る信号との位相差を零とさせて発信信号を瞬時に補償させる電気回路である。この回路の使用によってこの振動数の変化に追随した駆動信号を発信することができるため、効率よく弦を固有振動数で共振させることができ、また外力を動的に計測することも可能である。

なお、この種の計測器は温度変化による影響を考慮することが重要である。図-2 および式(3)に示すとおり、理論的には振動弦と支持フレームの線膨張係数が一致すれば、弦の共振振動数は変化しないが、実際の設計、製造に当たっては、慎重な配慮が必要である。

一方LC回路方式光ファイバセンサは、振動弦方式のセンサヘッド部の振動弦の箇所を、可動鉄芯を有する可変ソレノイドと固定コンデンサを用いて電気的な共振回路に置き換えたものである。ソレノイドのインダクタンス $L(H)$ とコンデンサの容量 $C(F)$ を用いて、電気共振回路の周波数 f (Hz) は式(4)で表わされる。全体構成の概要は図-4 に示すとおりであり被測定項目に応じた治具を介して接続されている。

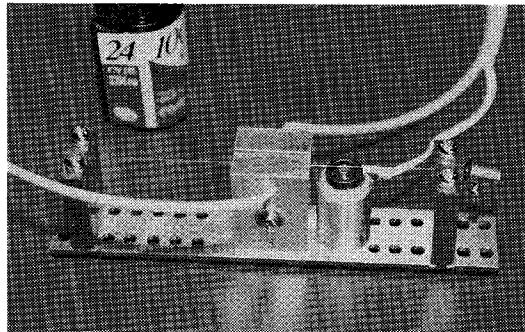


写真-1 振動弦型の原理確認用の試作器外形

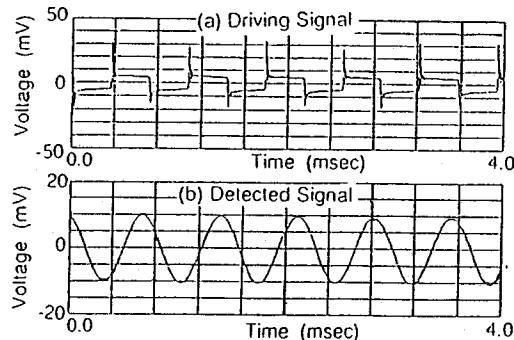


図-5 駆動用および応答信号波形

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4)$$

(3) 原理の確認試験

上記の振動弦型光ファイバセンサの概念に基づいた計測器を試作し、性能試験を実施した。試作器の外形は写真-1に示すとおりである。

静的試験は圧縮荷重に対して、この振動弦型光ファイバセンサが発する信号の精度がどの程度有効であるかを検証するために行なったものである。圧縮力の発生にはスクリュー式の手動型のものを使用し、検証用の基準計器には在来型の歪ゲージ式のロードセルをこの振動弦型に直列に配して試験を行なった。

静的試験の際にメジャリングヘッドからセンサヘッドへ送った駆動用の波形とメジャリングヘッドへ送り帰された弦の振動の信号用波形とを図-5に示す。この図に示すとおり、PLL回路から発生する駆動用の波形は、オーバーシュートの含まれたやや乱れた矩形波であるが、弦の振動は正弦波振動と見

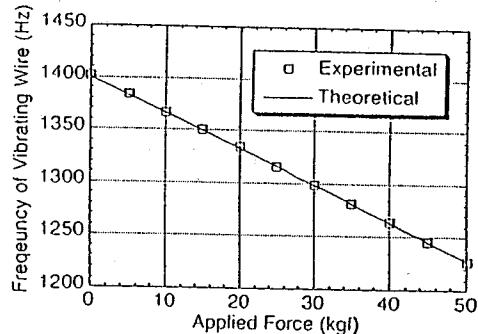


図-6 静的試験結果と理論曲線

做すことのできる滑らかな波形が示されている。静的試験の精度検証の結果は図-6に示すとおりである。この図中の白四角は計測データを、実線は振動弦の理論式(式(3))に基づく曲線を示している。この計測データから回帰解析によって得た振動数 f (Hz)と載荷力 F (kgf)との関係式は式(5)に示すとおりである。

$$f = 95.30 \sqrt{215.8 - F} \quad (r = -0.99998) \quad (5)$$

また、式(3)に基づく理論式は以下のとおりである。

$$f = 95.22 \sqrt{216.0 - F} \quad (6)$$

このように、この試験器によって得られる静的試験の結果は極めて信頼性が高いことが在来の試験器のデータとの対比から認められた。

動的挙動の計測の精度について、周波数特性に関する試験を含め次のとおり行なった。試験装置は、静的試験の際のスクリュー式のジャッキを油圧式アクチュエータに置き替え、正弦波による約±10kgfの加力を周波数を0.25~100Hzまで約10秒の間で連続的に変化させる方法(スイープ試験)によって行なった。なお、検知した弦の振動数から刻々の荷重に変換する方法は、静的試験と同様に、式(5)を用いた。

单一の周波数による加振の結果は、図-7に示すとおりである。この図に示されるとおり、ロードセルとファイバセンサによって得られた波形はほぼ一致している。

なお、周波数伝達関数は図-8に示すとおりであり、およそ0~30Hzの範囲で振幅、位相ともに在来型のロードセルとの一致を見た。

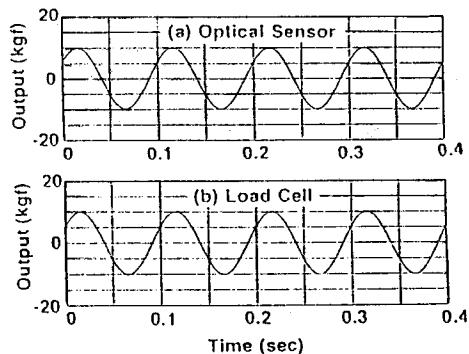


図-7 動的試験の結果
(光センサとロードセルによる計測波形の比較)

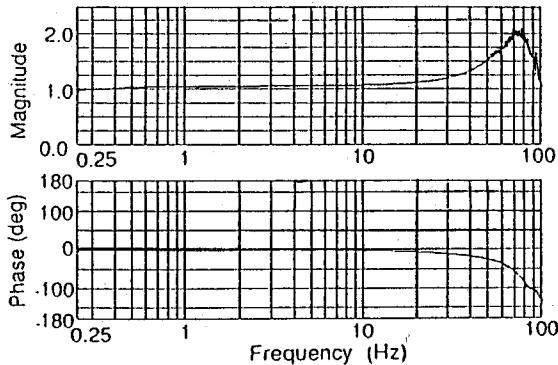


図-8 周波数伝達関数 (光ファイバセンサ / ロードセル)

4. 光ファイバを用いたセンサの試作と検証

上に述べた新しいコンセプトならびに原理とその確認試験の結果に基づき以下のとおりセンサの試作と検証を実施した。

(1) コンクリート供試体の歪計測

コンクリートの歪計測には、従来、表面ストレインゲージまたは埋込み型の計測器が用いられている。これに替わり、振動弦型光ファイバセンサを以下のように試作した。試作した振動弦型光ファイバセンサは、コンクリート内部に埋込んで計測するタイプとし、円筒の上下端のみがコンクリートと接するように周辺のコンクリートとの縁を切るための処理を施した。寸法は、外径 $\phi 32\text{mm}$ 、長さ 105mm の円筒形状とし、駆動用ならびに周波数測定用の光ファイバは円筒の一方の端部に接続した。コンクリート内部へ

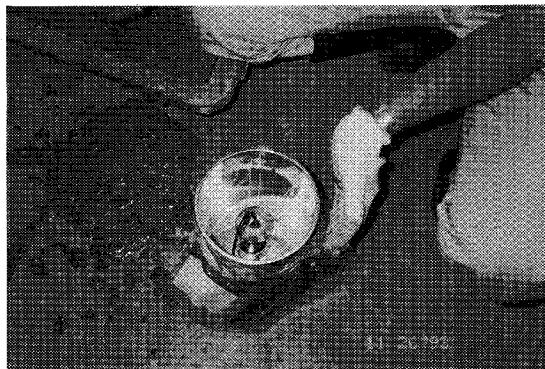


写真-2 供試体用モールドとセンサ

の埋設に先立って較正試験を実施し、弦の振動数と荷重との関係が今回の試験条件では線形回帰が可能であることを確認し、

$$L = -0.7412 (f - 1479.0) \quad (r = -0.9960) \text{ の回帰式を得ている。}$$

ここに L は供試体への載荷荷重(kgf), f は弦の振動数(Hz)である。

供試体は、光ファイバセンサを内蔵するために $\phi 15\text{cm}, h30\text{cm}$ の大きさとした。別途実施した強度試験用の供試体から、載荷試験を行なった日の材令7日では $\sigma_t = 98.9\text{kgf/cm}^2$ 、弾性係数 $E = 1.770 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ が得られている。

供試体の中央部にセンサを配置するために、写真-2 に示すとおりモールド内部にセンサを糸で宙吊りにし、周辺にコンクリートを充填した。計測項目は、載荷荷重 L 、表面歪（載荷方向2ヶ所、同直角方向2ヶ所、ゲージ長 120mm ）ならびに光ファイバセンサから得られる周波数とした。

振動弦型光ファイバセンサの事前の較正試験結果に基づく周波数～荷重の関係式を用いて、供試体への載荷荷重(P)とセンサの検出荷重(F)との関係を図示すると図-9のとおりである。この図に示されるとおり、センサ検出荷重と供試体への載荷荷重とは良好な線形関係が得られている。この関係から、センサが負担する荷重は、供試体への載荷荷重の 0.797% (注: 図-9では単位が tf と kgf であることが分かる) であることが分かる。このセンサの荷重負担率の値は、センサの軸方向剛性を k_s 、周囲のコンクリートの剛性を k_c とする並列ばねの簡略力学モデルによれば、 $k_s / (k_s + k_c) = 0.00797$ であることを示すものである。よって $k_s = 0.008034k_c$ が得られる。一方コンクリートの剛性 k_c は、

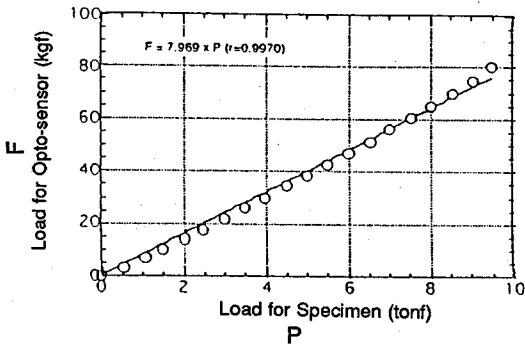


図-9 供試体載荷荷重と光センサ受感荷重

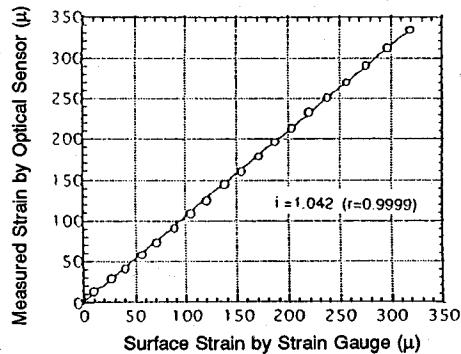


図-10 表面歪ゲージと光センサからの歪の比較

$k_c = A_c E_c / l_c = 2.842 \times 10^6 \text{ kgf/cm}$ であり
センサの剛性は、 $k_s = 2.28 \times 10^4 \text{ kgf/cm}$ と得られる。
このようにコンクリートの弾性係数から、センサの見掛けの弾性係数を得ると、

$$E_{ds} = (k_s \cdot l_s) / A_s \\ = 2.982 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$$

となる。従って、センサの受感歪 ϵ とセンサへの荷重 F_s の関係は、

$$\epsilon = \sigma / E_{ds} = F_s / A_s \cdot E_{ds} \\ = 4.17 \times 10^6 F_s$$

によって得て、歪ゲージの計測値と対比し図-10に示す。この図に示すとおり、供試体表面に張付した歪ゲージの計測値とほぼ一致していることが分かる。
以上の材令条件の下で、振動弦型光ファイバセンサを用いて、コンクリート供試体の内部の歪の計測に応用した結果、実用に耐えられる精度で計測を行なうことができることが実証された。

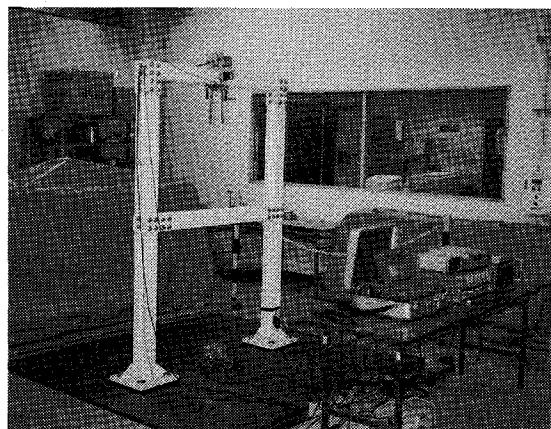


写真-3 鋼構造模型の振動台実験の状況

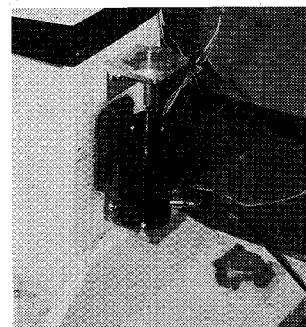


写真-4 光ファイバ歪計の外観

(2) 鋼構造模型の動的計測

2層ラーメンの鋼構造模型を振動台上に設置し、LC回路方式の歪計および速度計を試作し動的計測を実施した。試験の状況は写真-3に示すとおりである。またここに用いた歪計の取付け状況は写真-4に示すとおりである。

速度計は、箱型とし内部に水平振子として可動輪線を置き、これに接続した外部抵抗によって減衰回路を形成し、速度計として機能させている。この振子の変位を、LC回路のインダクタンスのコアに直結させて検知する構造としている。事前に行った較正試験時の出力周波数特性は、図-11のとおりである。

この実験によって得られた計測波形の例を光ファイバセンサおよび在来型計器のデータと対比し図-12に示す。この図に示すとおり、新型の光ファイバセンサによって、在来型と同等のデータが得られることが確かめられた。

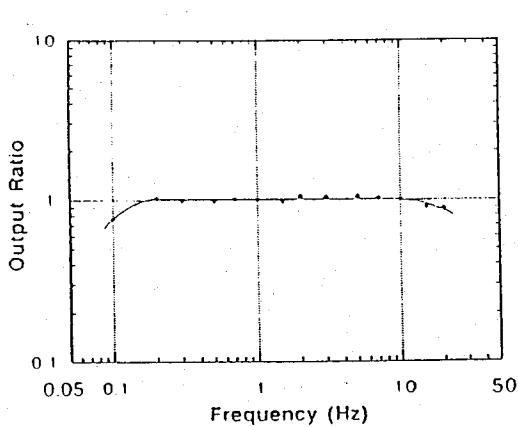


図-1-1 光ファイバ型速度センサの較正試験結果

5. あとがき

2種類の原理に基づいた新しいファイバセンサを考案し、試作と基本性能の確認を行なった結果、実用性の高い精度を有することが示された。このように光ファイバセンサは、室内試験において十分実用的に使用できることを確認し、今後の現場適用が可能となることが示唆された。今後は、現地での取付けのノウハウの取得、長期安定性の検証など実用化を拡大するための確認事項が残されている。

さらに、この計器は今後以下の項目などの発展が期待される。

- 1) 各種計測への応用の拡大：加速度計、土圧計、水圧計、風速計、波圧計など
- 2) 超小型化
- 3) 多重連結計測への拡大
- 4) 長期安定性、耐久性の確認

謝辞：本研究の実施にあたって光ファイバの技術全般に亘って、東京電力（株）電力技術研究所の黒沢潔氏の助言を得ており、また、試作および試験に当たっては、（株）東京測振の横井勇氏の協力を得た。記して謝意を表わします。

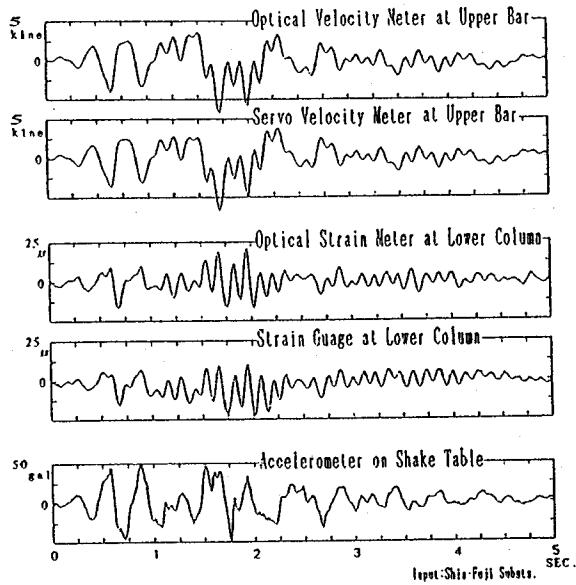


図-1-2 光ファイバセンサによる動的計測結果
(在来型計器による記録との比較)

参考文献

- 1) 大越孝敬：光ファイバセンサ、オーム社、1986.
- 2) Dankin, J. et al.: Optical fiber sensors (Vol. 1 and 2), Artech House, Inc., MA, USA, 1988.
- 3) Kurosawa, K., et al.: Development of optical instrument transformer, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 2, April 1990.
- 4) 土木学会創立80周年記念事業実行委員会イベント部会テレビ小委員会制作ビデオ：NHK「テクノパワー」より土木の世紀、下巻#7 ダム巨大な水圧に挑む、1994.
- 5) 小川勝徳ほか：光ファイバによる地中送電線温度分布測定システムの開発、電気学会全国大会、1989.
- 6) Huston, D.R., Fuhr, P.L. and Beliveau, J.G.: Bridge monitoring with fiber optic sensors, *8th U.S.-Japan Bridge Engineering Symposium*, Chicago, IL, 1992.
- 7) Fuhr, P. and Huston, D.R.: Intelligent civil structures efforts in Vermont- An overview, *Smart Structures and Materials '93*, NM.
- 8) 中根博司：土木計測ハンドブック、pp.89-99、日刊工業新聞社、1969.
- 9) 中根博司：土木計測概論、pp.56-57、土木計測研究所、1981.

(1994.8.22 受付)

DEVELOPMENT OF OPTICAL FIBER SENSOR FOR INFRASTRUCTURES USING VIBRATING WIRE AND ELECTRIC RESONANCE CIRCUIT

Hideyo SUZUKI and Maria Q. FENG

This paper proposes two principles of extrinsic optical fiber sensors for civil infrastructures; and describes their prototype developments and their static/dynamic tests for future application. The first one employs a vibrating wire, and the second one employs an electric LC circuit. The tension of the wire is modulated by external force, and transformed into the change of the vibrating frequency. The oscillating frequency of the LC circuit changes as a core in a solenoid for an inductance moves. These resonant frequencies are optically detected, and transmitted through the optical fibers. The returned frequencies are dealt by a PLL circuit, with which frequencies of the driving optical pulses are adjusted as the same frequencies of the wire or the LC circuit.