

VI-24

振動弦式光ファイバーセンサの開発と実証試験

東京電力 正会員 鈴木 英世、カリフォルニア大学 M. Q. Feng

1. まえがき

光ファイバーを用いたセンサは、ファラデー効果やラマン散乱を利用し、それぞれ電流計、温度計など工学の分野での実用化が進められてきている。また、構造工学の分野でもファブリペロ型センサによって歪計測が試みられている。このような光ファイバーを利用したセンサは、一般的に(a)電磁気環境のノイズを受けない(b)電気的な防爆から無縁(c)配線が軽量で、多量の情報を安価に設置可能(d)長寿命化が可能など多くの長所を備えている。しかし、土木建築構造物などに特有の環境条件や測定レンジに適したセンサはこれまでのところ非常に少ないのが現状である。このような光ファイバの優れた特性に着目し、筆者らは外力の変化を振動弦の張力に伝えその振動数を光学的な信号として伝送し計測する方式を考案し実証試験を行なったのでその概要を報告する。

2. 原理と構成

振動弦式センサの原理は、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、計測された弦の周波数を変換し外力や歪を求めるものである。振動弦とこれを支持するフレームの概念は図-1に示すとおりである。弦の振動の周波数は式(1)のとおりである。ここに、 l :弦の長さ、 ρ :弦の単位長さ当たりの重量、 g :重力加速度、 n :振動モードに対応した定数で $2, 1, 1/2, \dots$ 、 α :実験定数である。また図-1中の弦のばね定数 k_1 、フレームのばね定数 k_2 と張力 T および外力 F の関係は式(2)のとおりであり、式(1)(2)から弦の振動数 f と外力 F の関係が式(3)のとおり得られる。なお T_0 は弦の張力の初期値である。

このセンサの全体構成は図-2に示すとおりであり、受感部のセンサヘッドと指示部のメジャリングヘッド並びにこれらを接続する光ファイバの3部分に大別される。受感部に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た鋼製の弦が張られており、連続したパルス光源をエネルギーとする電磁石によって駆動される。弦の振動周波数の検知には、弦をシャッターとして用いて光の強さを変化させ光信号として、指示部に帰還させる。指示部には駆動用および信号用の光源、帰還信号の受光用ダイオード、PLL回路ならびに周波数指示計から成っている。ここにPLL回路とは位相同期回路の略称であり発信信号と帰還信号との位相差を零とさせるよう瞬時に補償させる機能を有し、これによって弦の刻々の固有振動数に応じた駆動用パルス信号を発することができる。

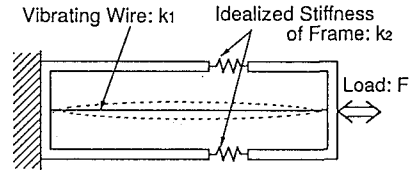


図-1 振動弦式センサの原理

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

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

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

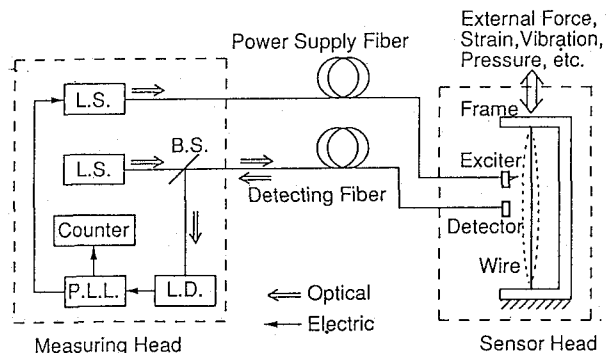


図-2 振動弦式光ファイバーセンサの全体構成

3. 実証試験と結果

(1) 荷重計の静的試験

上記の原理が機能することを確認するために、荷重計を試作し、静的載荷試験を行なった。試験結果は図-3に示すとおりであり、図中には式(3)に定数を代入して得た理論曲線を併記した。この理論式と実験結果から得た回帰式とは、右に示すとおり非常に良い一致をみた。

(2) 荷重計の動的試験

この荷重計と在来形式のロードセルとを直列に接続し、油圧アクチュエータで加力し動的に試験を行なった結果を図-4に示す。この図のとおり光センサはPLL回路の機能によって、動的にも十分に応答し計測が可能であることが分かった。

(3) 歪計の実証試験

コンクリート内に埋設する形式の歪計を試作し、コンクリート供試体を用いた実証試験を行なった。試作した歪計は、直径32mm、長さ105mmの円筒形とし片端から駆動用と信号用の光ファイバケーブルを引き出す構造とした。また、このセンサの見掛けのヤング率は $3.00 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ とし、コンクリートのヤング率よりも小さい値を与えるよう配慮した。コンクリート供試体は直径10cm、高さ20cmとし、配合はフライアッシュを用いた高流動コンクリートとした。センサは供試体の中央に位置するよう宙吊りとしコンクリートを打設した。供試体の側部には歪ゲージを貼付し参照データを得た。光ファイバセンサと歪ゲージセンサの計測データは図-5に示すとおりであり、良好な結果が得られた。

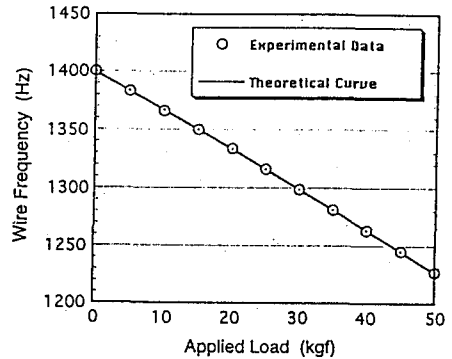


図-3 荷重計の静的試験結果

式(3)に基づく理論式:

$$f = 95.22 \sqrt{216.0 - F}$$

実験結果に基づく回帰式:

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

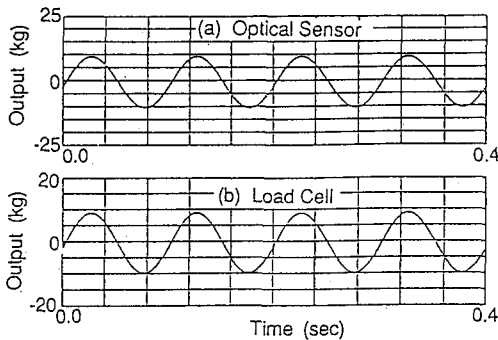


図-4 荷重計の動的試験結果
(在来形ロードセルとの比較)

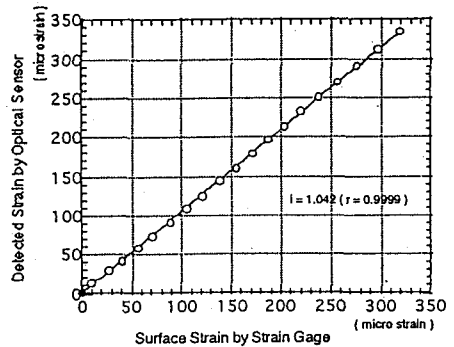


図-5 コンクリート用歪計の試験結果
(歪ゲージとの比較)

4. あとがき

新規に開発した振動弦式光ファイバセンサは、荷重計の静的試験から弦の振動の原理のとおり確実に機能することが示され、動的計測にも対応が可能であることを確認した。また、歪計としても応用できることが分かった。今後は、土圧計、振動計、波圧計など幅広く応用を拡大し、光センサの長所を活用させてゆきたい。

【参考文献】 M. Q. Feng and H. Suzuki: An Optical Fiber Sensor for Monitoring Civil Infrastructures, Proc. of 1994 International Conference on Intelligent Materials, Williamsburg, Virginia