

# 建設分野における光ファイバセンサの応用

清水建設(株)技術研究所  
山 川 裕 司

## Applications of Fiber Optic Sensors to Construction Work.

Hiroshi Yamakawa

Shimizu Corp., Institute of Technology

### 1. はじめに

「より高く、より広く、より深く」別になにかの広告のキャッチコピーではないが、建設業界の技術開発はバブルの追い風に乗って進み、超々高層のビル、大空間を有するホール・ドーム、耐震構造、免震構造、制振構造の建造物、大深度地下シールドといった、新しい構造形式、より限界を迫った構造形式を産み出し、各種自動施工機械を導入した新しい施工法を産み出してきた。また、より高強度の鋼材、コンクリート、これまで使われることの少なかったFRPなどの新しい材料が用いられ始めており、素材も多様化し始めている。

また、でき上がった建造物も、建物の高機能化、居住環境に対する要求の向上などから、施工後も、より肌目の細かい対応が必要なものも増えてきた。一方、米国ではインフラの老朽化が大きな社会問題になって久しい。これは、過去に集中的に建設されたインフラ施設が一斉に老朽化し、補修の必要が出てきたにもかかわらず、財政赤字のために顧みられなかったことに主因がある。しかし、重大な事故の発生が相継ぎ、最近になって米国政府もことの重要性を認識するに至っている。たとえばNSF(全米科学財団)では1995会計年度からインフラシステムに関する研究に多額の支出を開始しており、な

かでも補修時期と程度を明確にする健全性診断技術の確立が最重要課題の一つとして取り上げられている。これは、過不足ない確かなメンテナンスを可能にし、インフラのライフサイクルコストを減減することを目的にしている。

そのような状況下で「鉄とコンクリートでものを作る」というドロ臭いイメージのある建設業界でも、施工中の品質管理・現場管理、施工後のフォロー、リニューアルのための、より高精度な耐震診断・寿命予測、被災後の健全性診断などのため、各種センシング、モニタリングの必要性がこれまで以上に認識されてきている。

そして、計測点数の増加、計測対象の多様化に対応するため、従来建設現場で使われていた計測機器、センサ以外のものについても検討を始めている。そういった新しいセンサの1つとして、光ファイバセンサも注目を受けているのである。

ここでは、どの光ファイバセンサが、建設分野でどのように使われているかを概説し、一例として、分布型光ファイバ温度センサの適用例を示す。

### 2. 建設分野における主な光ファイバセンサ

研究中・開発中のものまで含めると、光ファイバセンサで検出可能なパラメータは数多い。その中で、建設分野で特に興味のあるパラメー

タは、

- (1) 位置・角度
- (2) 速度・加速度
- (3) 歪
- (4) 振動
- (5) 圧力
- (6) 温度

などである。

これらのうち、建設分野で適用されている光ファイバセンサとしては、

- (1) 分布型温度センサ
- (2) 光ファイバジャイロ

が実用段階にある。

## 2. 1 分布型温度センサ

分布型の光ファイバ温度センサは、光ファイバの中に入射したレーザーパルス光の後方散乱光が温度の影響を受けるというラマン効果を利用している。特徴として、

- (1) 多点の情報を得ることができる
- (2) 寿命が長い
- (3) 発火、電磁波放射などの問題がない

などの特徴がある。ゼネコンとしては清水建設がブレイキング骨材の輸送時の温度分布計測に、大林組がボックスカルバートのマスコンクリートの温度計測に適用したのを皮切りに、LNG地下タンク、ダムなどマスコンクリートの温度計測用として、いくつかの現場で適用されている。

コンクリートが硬化するのは、水とセメントの化学反応による。この反応は発熱反応のため、コンクリートが硬化する際には温度が上昇する。条件によっては、コンクリートの温度は100度近くまでになる。

コンクリートがある程度硬化してしまえば、化学反応はあらかじめ終了してしまい、発熱も小さくなるので、コンクリートの温度は下がってくる。従って、コンクリートは図-1のような温度履歴を経る。

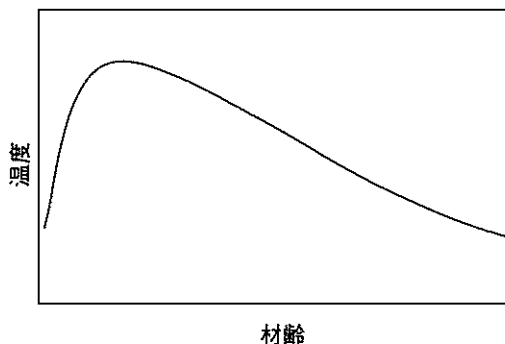


Fig.1 a Typical Change of a Concrete Temperature

コンクリート打設時の温度の上昇・下降に伴い、コンクリートに膨張・収縮が生じる。打設するコンクリートの厚さがある程度大きくなると、コンクリート内外の温度差や、既設コンクリート、地盤などの拘束により、コンクリートにひび割れ（温度ひび割れ）が発生することがある。したがって、ある程度の厚さを持つコンクリートを打設する際には、打設後のコンクリート温度管理など、温度ひび割れ対策が欠かせず、コンクリート温度のモニタリングが必要となるわけである。

これまで、コンクリートの温度計測には、熱電対をコンクリート中に埋設して使われることが多かった。しかし、熱電対の場合、点計測型の温度計であるため、計測点数に比例して、必要なケーブルの本数が増加する。したがって、計測点数を増やすと、コンクリート中の埋設物が著しく増えてしまい、構造物としての健全性が損なわれてしまうので、どうしても計測点数が限られることになる。

分布型の光ファイバセンサを利用した場合、必要な計測ポイントを全て通るようにケーブルを敷設すればよいので、構造物の健全性を損ねることなく、計測点数を増やすことが容易である。これにより、よりきめの細かい温度管理が可能になる。

また、ビル内配線設備の温度監視システム、トンネル火災の監視システム、炭坑防災システ

ムなどとしても使われており、数々開発されている光ファイバセンサの中でも、最も実用化が進み、興味の集まっているセンサの1つである。

## 2. 2 光ファイバジャイロ

光ファイバジャイロはループにした光ファイバの中を、左回りと右回りの光を通し、ループが回転したときに左回りの光と右回りの光に位相差が生じる現象（サニャック効果）を利用するジャイロである。特徴として、

- (1) 起動時間が短い
- (2) 寿命が長い
- (3) 振動・衝撃に強い
- (4) 小型・軽量

などが挙げられる。自動車のカーナビゲーションシステムにも採用されており、建設分野では、鴻池組を初め、戸田建設、鹿島、清水建設など多くのゼネコンのシールド機で、姿勢制御、方向制御用の方位センサとして採用された実績を誇る。

シールド機とは地中にトンネルを掘る機械の1つであるが、予定通りの位置にトンネルを掘るためには、シールド機の位置と方向を正確に知らなければならない。地上であれば、ビーコン、GPSなどいくらでも位置を把握する方法はあるが、地中では、電波、光波などがほとんど透過しないため、シールド機の位置計測は非常に困難であった。

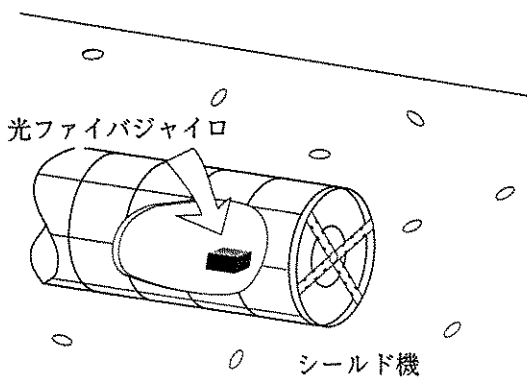


Fig.2 Fiber Optic Gyro in Shield Machine

また、地中連続壁用掘削機の姿勢制御のためのねじれ計測、建設機械の自動走行制御などにも応用された例もある。

地中連続壁とは、地中に作る鉄筋コンクリートの壁である。大深度掘削を行う際、地山が崩れてこないように土留めをしたり、地下水の涌水を止めるための物で、簡単にいえば次のような手順で作る。

まず、構築する土留め壁の位置へ先行ボーリングを行う。この穴をガイドとして、溝型バケットなどで掘削し、そこに、あらかじめ組み立てておいた鉄筋かごを挿入、コンクリートを打設する。これを繰り返すことにより、鉄筋コンクリートの連続壁体を構築する。

地中連続壁工法の掘削で最も重要なことは垂直精度の確保である。これまでは、掘削機を吊っているワイヤのねじれを計測することで、掘削機のねじれを把握していたが、小型軽量の光ファイバジャイロの出現で、掘削機の姿勢を直接計測できるようになった。

その他、歪センサなども、実験的に使われているが、上記2種類のセンサほど本格的な採用には至っていない。

光ファイバセンサに多くの種類があり、いろいろなパラメータが計測できるにもかかわらず（しかも、建設分野で興味のあるパラメータが計測できるにもかかわらず）、いま一つ普及しないのは、建設業界が保守的なせいでなく、性能、コスト、耐久性、実用度などの点で既存のセンサと取って代わるほどのメリットが少ないことが主な原因である。特に光ファイバセンサの場合、性能面では、既存のセンサと同等、もしくは凌駕しているものであっても、コスト面で引き合わないことが多く、ユーザー側としては、二の足を踏まざるを得ない。個人的には、センサはできるだけ安いものを大量に投入できるほうがセンシング、モニタリングの効果が高いと思っており、もし、メーカー側が「新しいセンサだから、高くても当たり前」と思っているのなら、普及には時間がかかるのではないか

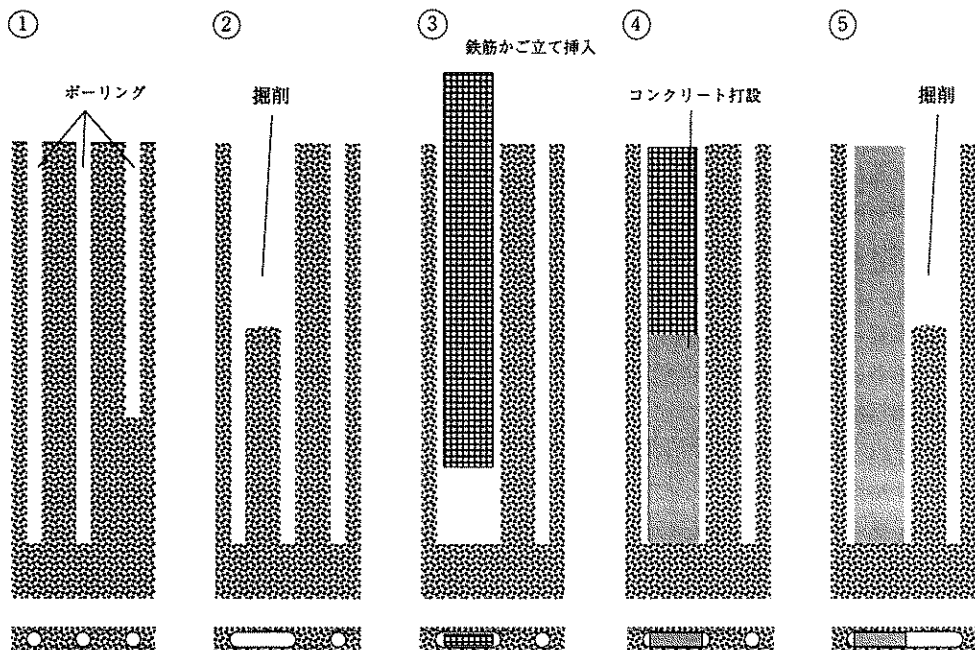


Fig.3 Steps of building a Diaphragm Wall

かと危惧している。

### 3. 建設現場への適用例

最後に、分布型光ファイバ温度センサの適用例を紹介する。

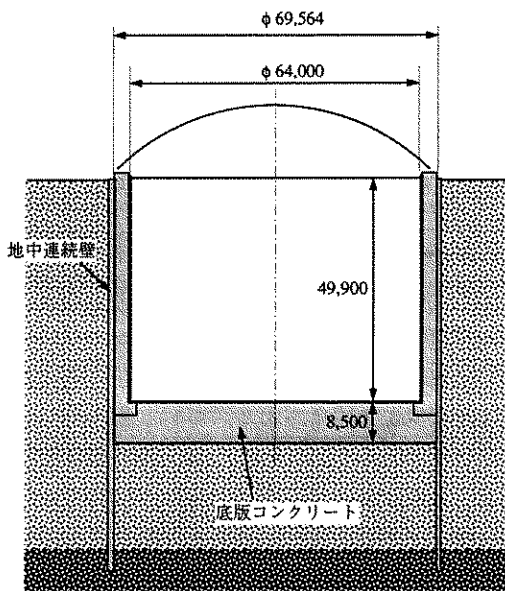


Fig.4 a Section of T-207 LNG Inground Storage Tank

今回、われわれが分布型の光ファイバ温度センサを導入したのは、愛知県知多市に建設中のT-207LNG地下貯槽（施工主：知多エル・エヌ・ジー株式会社。施工者：清水・大林・鹿島・大成共同企業体）の底版部である。タンクの大きさは、直径約64m、深さ約50mの円筒形で、容量は160,000キロリットルに及ぶ中部地区最大のLNG地下タンクである。その底版コンクリートの厚さは8.5mにも及ぶため、温度ひび割れ対策を検討し、施工時の温度計測を行った。

使用した分布型光ファイバ温度センサは、日立電線(株)製の光ファイバ温度レーダPTR030である。PTR030の性能を表-1に示す。表-1を見てわかるとおり、温度の精度、分解能、使用温度範囲などは、熱電対と遜色がない。

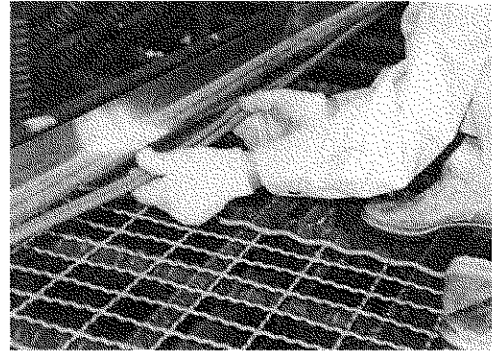
センサ部分には、事前に、施工性、耐久性、性能などを検討し、市販されている通信用光ファイバケーブルの1つを選定した。これにより、性能を損ねることなく、光ファイバケーブルのコストの低減、施工にかかる人件費の低減を図った。

Table.1 Speculation of FTR030

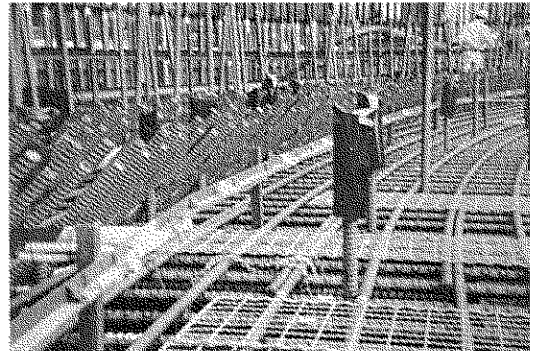
最大測定距離	2 km
距離分解能	1m
使用温度範囲	-200 ℃～ 500 ℃
温度精度	± 1 ℃
温度分解能	0.1 ℃

計測は、約2,500点で行い、温度ひび割れの発生がないと予想される程度に温度が下がるまで続けられた。計測結果の1例を図-5に示す。

この計測に基づき、適切な温度管理を行い、温度ひび割れのない健全なコンクリートを施工できた。



Picture 1 laying cables



Picture 2 laid cables

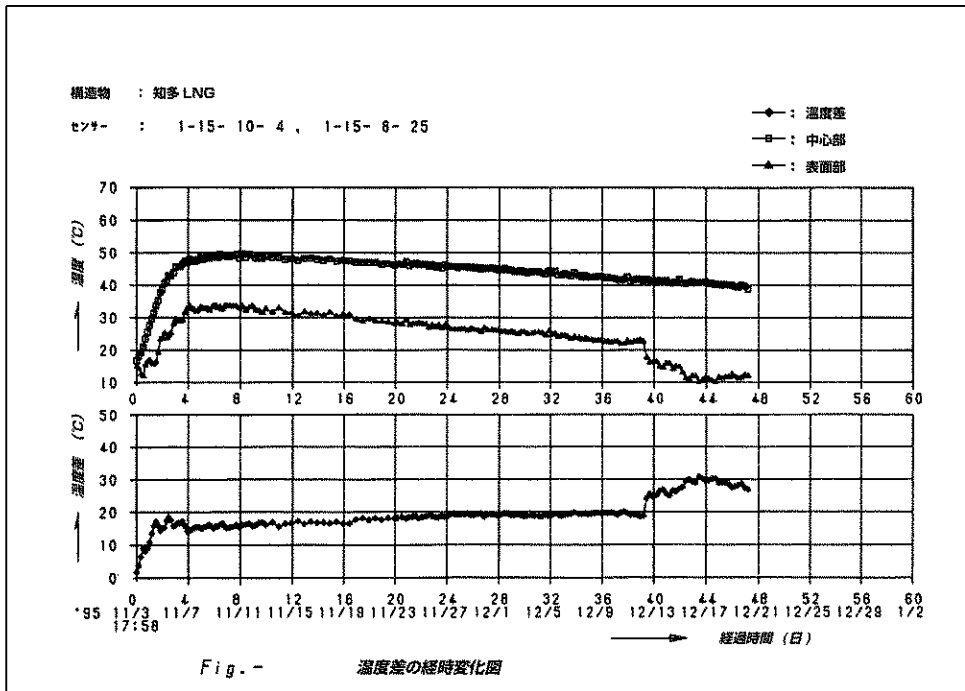


Fig.5 an Example of a Temperature Measurement