振動弦型ひずみセンサーの紹介

株式会社シンク・フジイ
開発部　小村芳生

はじめに

昨年より県内某ダムの堤体補強工事におけるボーリング時の安全管理と PS アンカー工法の効果確認のためダム堤体内と基礎地盤内に埋設されたひずみ計でひずみ観測を行っている。ダム堤体の各種計測については一昨年と昨年の研修会で発表した。今回はダム堤体観測に使用したセンサーのうち、一般に馴染みのないと思われる振動弦型ひずみセンサーと差動トランス式ひずみセンサーを紹介する。

ひずみ観測は多くの地盤観測や建造物で行われており、ひずみを検知するセンサーとして代表的なものとして、ひずみゲージや光ファイバーが良く知られている。昨年度のダム工事で使用したひずみ計は振動弦型ひずみ計と呼ばれるもので、これまで国内の土木計測ではほとんど使用実績の無い方式である。また、補助的に差動トランス型ひずみ計も使用しており、この方式も馴染みの薄い人が多いと思われるので併せて紹介する。

一般的なひずみセンサー

後述する振動弦式や差動トランス式のひずみ計との比較のため、先ずは一般的なひずみゲージ式ひずみ計と光ファイバーによるひずみ計測について簡単に紹介する。

ひずみゲージ式ひずみセンサー

折り返した細長い金属箔の張り付いた絶縁体の板（ひずみゲージ）を材料に接着剤で張付けておく。材料が歪む（伸び縮みする）とゲージ上の金属箔も伸縮して抵抗値が変化する。この抵抗値をホイートストンブリッジ回路により増幅し、ひずみを電圧値として計測する。なお、2019 年と 2020 年の夏季研で紹介したアルミパイプ軸歪計はアルミパイプにひずみゲージを張り付けたタイプのダム堤体変位観測用ひずみ計である。

光ファイバーによるひずみ計測

（1）分布型光ファイバセンサ BOTDR（Brillouin Optical Time Domain Reflectometer）

BOTDR は，光ファイバーにレーザ光を通したときに生じる散乱光（ブリルアン散乱光）の周波数がひずみの大きさに比例して変化することを利用する。

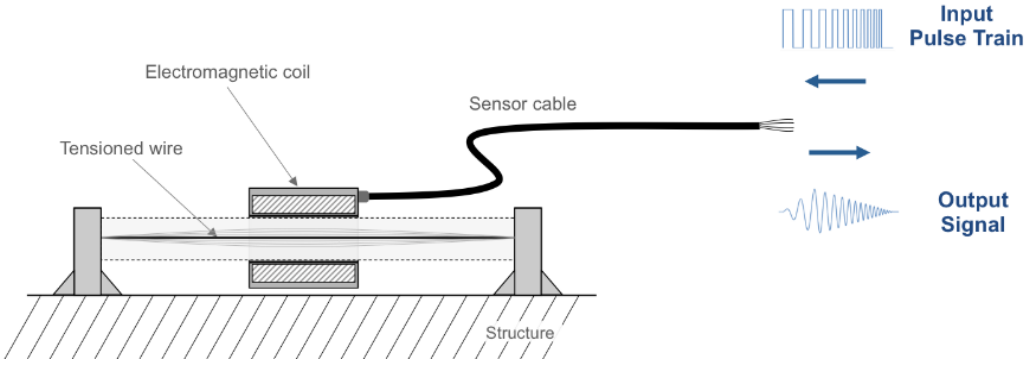
（2）ファイバーブラッググレーティングセンサ　FBG（Fiber Bragg Grating）

ファイバーのコアに作られたブラッグ回折格子にレーザ光が入射されると回折格子の間隔とコアの屈折率の積に比例する周波数を持つ反射光が発生する。光ファイバーにひずみが生じると格子の間隔とコアの屈折率が変化するため，反射光の周波数も変化する。FBG センサーはこの変化量をもとにひずみを計測する.

次にダム堤体観測に用いた振動弦式ひずみ計と差動トランス式ひずみ計を紹介する。

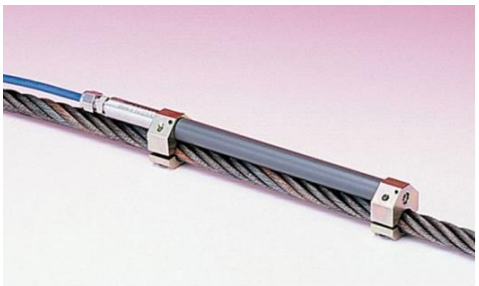
振動弦型ひずみセンサー

振動弦型ひずみ計測原理図



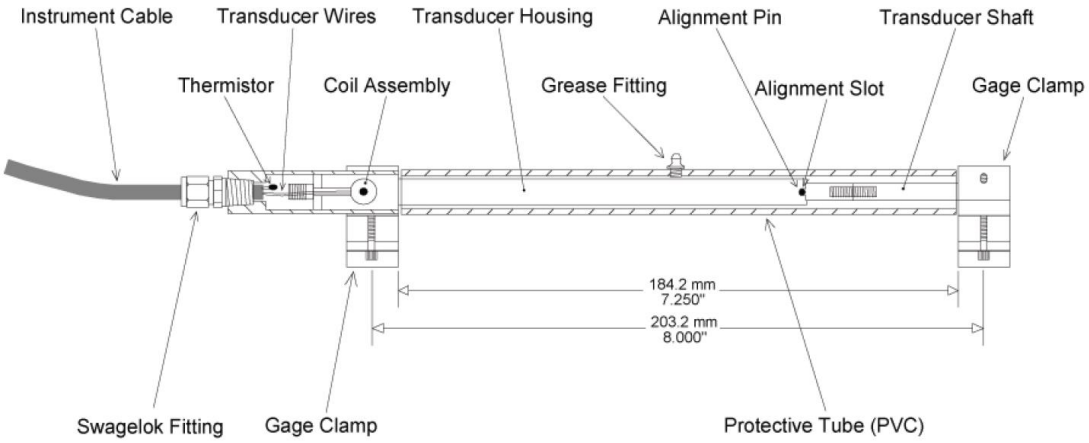
NATIONAL INSTRUMENT 社資料より

防水構造の内部に張られた弦（ピアノ線）の中央両側にコイルが配置されている。このコイルにパルス電流を流して弦を引きつけた後、開放するとギターの弦を弾くのと同様に弦が自由振動する。すると今度は振動する弦がコイルに電磁誘導によって交流電圧を発生させる。ギターは弦の張力が変わると音が変わるように、電磁誘導によって発生する交流電圧の周波数（振動数）は弦の張力により変化するため、この周波数を演算することでひずみ量を求めることができる。



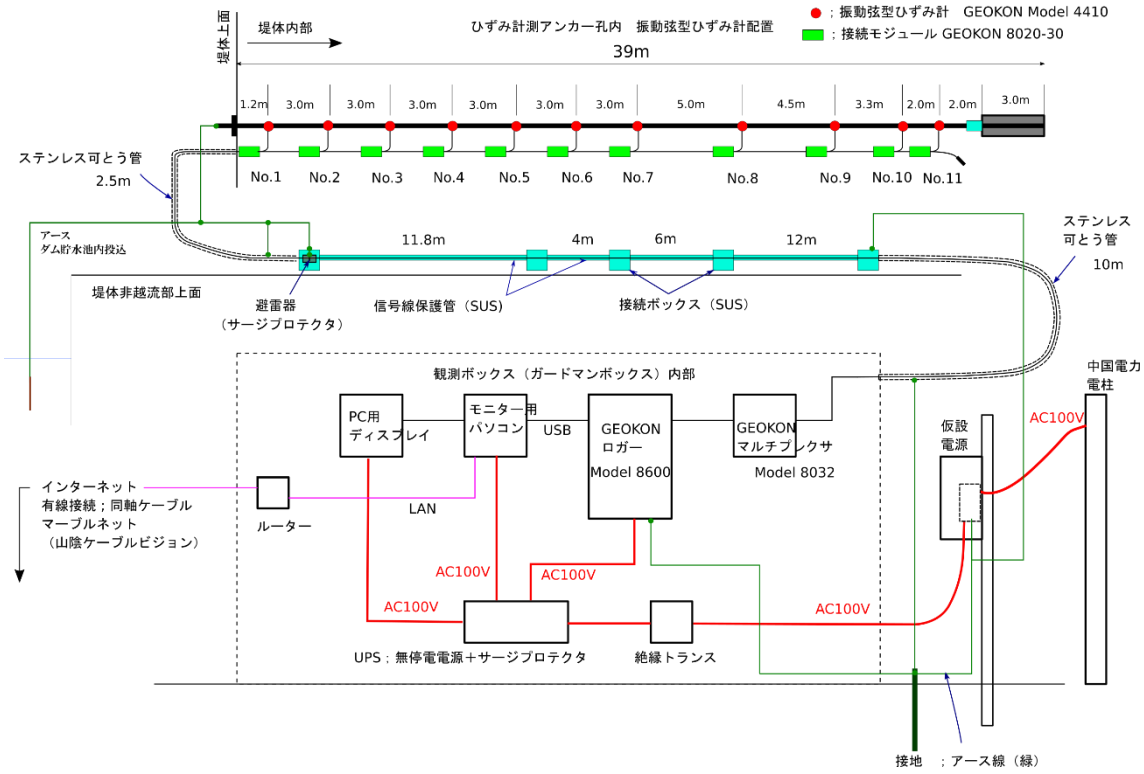
右の写真はストランドに取り付け金具により取り付けられたひずみ計（ストランドメーター）である。ストランドの伸縮に応じたひずみ値を計測する。密閉された筒の中には 203.2 ㎜のピアノ線が張られている。

米国　GEOKON 社製ストランドメーター4410



振動弦型ひずみセンサーは専用のロガーに接続し、センサー入力（パルス電流）と出力（周波数信号）の収集を行う。

堤体内ひずみ観測システム図



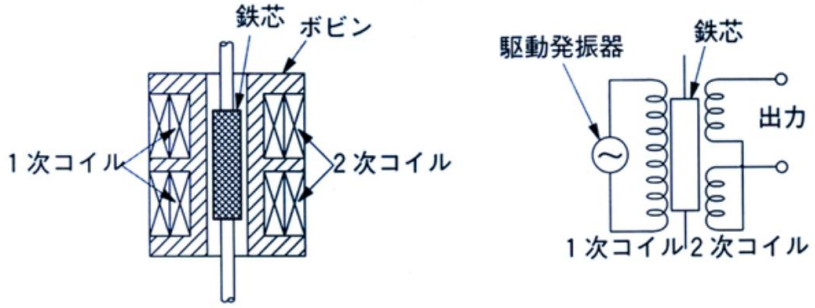
堤体内のひずみ分布を計測するため、11 個の振動弦型ひずみセンサーが接続モジュールを介して数珠繋ぎ（デイジーチェン）で計測用ストランドに取り付けられ、堤体内に埋設された。上図の通り、1 本の信号線が堤体の外部にある観測ボックス内のロガーに接続され、データは管理用パソコンからルーターを介してインターネット経由でデータサーバーに送られる。

振動弦型ひずみセンサーの特徴

1. ひずみゲージ式センサーは計測対象に接着剤で張り付けるため、経年劣化によりいずれ剥がれるが、振動弦式は接着剤など有機質を用いていないため長期にわたり安定である。
2. 信号線を伝わるのは周波数であるため、長いケーブルでも信号が減衰しない（2.7 km まで減衰しないデータがある）
3. ケーブルやセンサーの絶縁抵抗が劣化により落ちても他の方式に比べて安定している。絶縁抵抗の許容値が 5KΩといわれる。（ひずみゲージは 50MΩ以上）

差動トランス式ひずみセンサー

差動トランス式ひずみ計測原理図



坂田電機 WEB ページより　差動トランスの動作原理（図１）

差動トランスひずみセンサーの内部には、鉄芯（ボビン）とその周りにドーナツ状に空いた空間、周囲に 2 段の順接続の 1 次コイルとその外側に対称に巻かれた上下 2 段の逆接続 2 次コイルが配置されている。1 次コイルに交流電流を流すと、上段下段で逆接続された 2 次コイルには誘導電流が流れるが、鉄芯が上下の中心にあれば上下の 2 次コイルの出力電圧は等しく、位相も逆となるため出力電圧は 0 となる。鉄芯が中心からずれると 2 次コイルの 1 次コイルから得られる相互インダクタンスが上段と下段で変化し誘導起電圧に差が生じる。鉄芯の移動に応じた出力電圧と方向を、位相整流回路を通して得ることができる。鉄芯を計測対象に接続すれば測定対象の変位を鉄芯の移動として計測できる。

差動トランス式の特徴

1. 鉄芯とコイルの設計次第で変位の大きさに応じたセンサーを作ることができる。（10 μm～数 100 ㎜まで）
2. 出力電圧が 100mV 程度あり、変換効率も他方式の 10 倍～20 倍あるためケーブルによる信号伝達時にノイズの影響を受けにくい
3. 鉄芯が周囲と非接触であり、接着剤などを使用しないため長期間の使用に耐える。
4. 絶縁抵抗の許容値が 1MΩ程度と低く、ひずみゲージに比べて絶縁低下に強い。

おわりに

振動弦式および差動トランス式によるひずみ計測は勿論、ひずみゲージ式と同様に計測対象への適用方法により他のセンサー（圧力計、ロードセル、変位計など）にも使用され、各種センサーが製造・販売されている。

測定原理の異なるセンサーはそれぞれ特徴があり、使用にあたっては測定目的、測定対象の形状、周囲環境や観測期間などを考慮し、最適な方式のセンサーを選択するべき

と思われる。その選択肢の数は多いほど良いと考えられるため、これまでに自分が使用してきた慣れた方式だけで全て解決しようとするのではなく、別の方式のセンサーについても知っておくこと、可能ならば試して実際の効果を確認することも大切である。

参考資料

株式会社東京測器研究所　WEB ページ　ひずみゲージ
https://www.tml.jp/knowledge/strain_gauge/about.html

日本機械学会誌　2002. 10 Vol. 105 No. 1007
光ファイバセンサの最近の動向

NATIONAL INSTRUMENT　WEB site　How Vibrating Wire Sensors Work
https://www.ni.com/ja-jp/support/documentation/supplemental/13/using-vibrating-wire-sensors-with-compactrio.html

東横エルメス　WEB ページ　振動弦形計器とは
https://www.elmes.co.jp/product/shindou/shindou01

坂田電機株式会社 WEB ページ　差動トランスの動作原理と特性
https://www.sakatadenki.co.jp/technology/sensor.html

GEOKON　WEB site　DISPLACEMENT TRANSDUCERS　Strandmeters (VW)
https://www.geokon.com/4410

GEOKON　WEB site　Strandmeters (VW) | Model 4410　Manual
https://www.geokon.com/content/manuals/4410_Strandmeter.pdf