

## 2つの角速度センサを用いた孔曲り計測装置

莊司泰敬・大橋武一郎

### Development of a Borehole Deviation Measurement System Using a Pair of Angular Velocity Sensors

Yasunori SHOJI and Takeichiro OHHASHI

#### Abstract

When carrying out a geotomography of 3-D survey in boreholes or when managing a construction of burying steel pipes, it is important to know the exact deviation of the boreholes and pipes.

There are a number of borehole deviation measuring systems in the market. But, due to limitation of measurement accuracy and easiness of its operation, most of them are not seemed to be familiar with us.

Major problem is its instability of the system when using angular velocity sensors for detecting the rotation of the probe. To reduce the sensor's drift caused by temperature change and so on might be a most important subject to improve its instability.

So, the authors have studied on this subject and found a simple method using a pair of angular velocity sensors. This method is illustrated in Fig. 2 and Fig. 3. There are two angular velocity sensor oriented in opposite directions. We assume that the sign of the angular velocity sensor's output due to temperature change is not affected by the sensors orientation. If the output of both sensors are equal in sign then it may be assumed that this output is due to temperature change rather than movement of the sensors. Therefore, this data would not be used to in the position calculation.

As shown in Fig. 4, this method shows a large improvement. And applying this method to the development of a new type of the borehole deviation measurement system, we completed the system.

We have done some of the tests with the system and it has been proved that this system can measure deviation with good accuracy and repeatability. The variation across measurements is less than 10cm for a borehole 100m in depth.

To make this system more practical, we think that we must investigate its applicability in severe conditions such as a noisy environment and in the long periods of measurement required by deeper boreholes or pipes.

#### 1 まえがき

ボーリング孔内にセンサを設置し、それを用いて計測を行うとき、あるいは、鋼管の埋設工事などの施工管理を行うとき、そのボーリング孔や鋼管の孔曲りの状況

を把握することは重要である。

従来の孔曲がり計測技術で、一般に用いられているものに、村田式傾斜儀と呼ばれるものがある。これは、計測したいところの深度に挿入して、その位置におけるボーリング孔の傾斜とその方位を写真に記録するもので、

機構が簡単ではあるが、一定区間の状況を知るためには、決められた深度ごとに1点ずつ計測しなければならず、連続記録を得るような計測をすることはできない。

一方、連続的に孔曲りを計測する装置としては、方位センサと傾斜センサを用いたものがある。方位センサとして磁気センサを利用したものは、鋼管の中では使用不可能であるので、主に裸孔の孔曲り計測装置として使われている。鋼管の中でも使用できる孔曲り計測装置としては、方位センサにジャイロなどの角速度センサを用いたものがある。しかし、計測精度や使用上の制約などの点からか、あまり普及していないようである。

角速度センサを用いる場合、センサの出力のドリフトを解消することが、最大の課題であることが述べられている(大橋ほか, 1994)。

著者らは、ドリフトを軽減する新しい方法を考案し、それによって、鋼管内でも、長時間安定して測定できる孔曲り計測装置を開発した。ここでは、ドリフトを軽減する方法、および、試作した装置の概要と試験結果について述べる。

## 2 孔曲り計測装置の概要

### 2・1 設計上のポイント

計測する対象を鉛直に埋設したとする鋼管とした。計

測装置に求められる機能としては、鋼管の孔曲りを精度良く計測できることに加え、現場で使用するために、できるだけ使いやすく、得られた結果を迅速に解析できるようにすることとした。したがって、設計のポイントを以下のように設定した。

- ① 安定的な計測ができること。
- ② 孔内において連続的に計測することができ、一回の計測で鋼管の形状が求められること。
- ③ 鋼管と鋼管の接続部の内径が異なるような場合でも、これをスムーズに通過できるようなセントライザ(ゾンを常に鋼管の中心に位置させるアーム)を持っていること。

### 2・2 孔曲りの計測原理

図-1に示すように、孔内におけるゾンデの方位を表すための座標として、磁北をX軸、鉛直方向をZ軸とした直交座標系(X, Y, Z)を絶対座標として空間に固定する。次に、ゾンデ軸を $\zeta$ 軸とした座標系( $\xi, \eta, \zeta$ )座標系をゾンデに固定する。

また、ボーリング孔の傾斜角を $\theta$ 、ボーリング孔の傾斜方向を示す方位角を $\phi$ 、および、 $\zeta$ 軸を中心としてゾンデが回転する角度を $\psi$ とする。

そして、傾斜センサは $\xi$ および $\eta$ 方向の傾斜を計測するように配置し、振動ジャイロは、 $\zeta$ 軸まわりの角速度

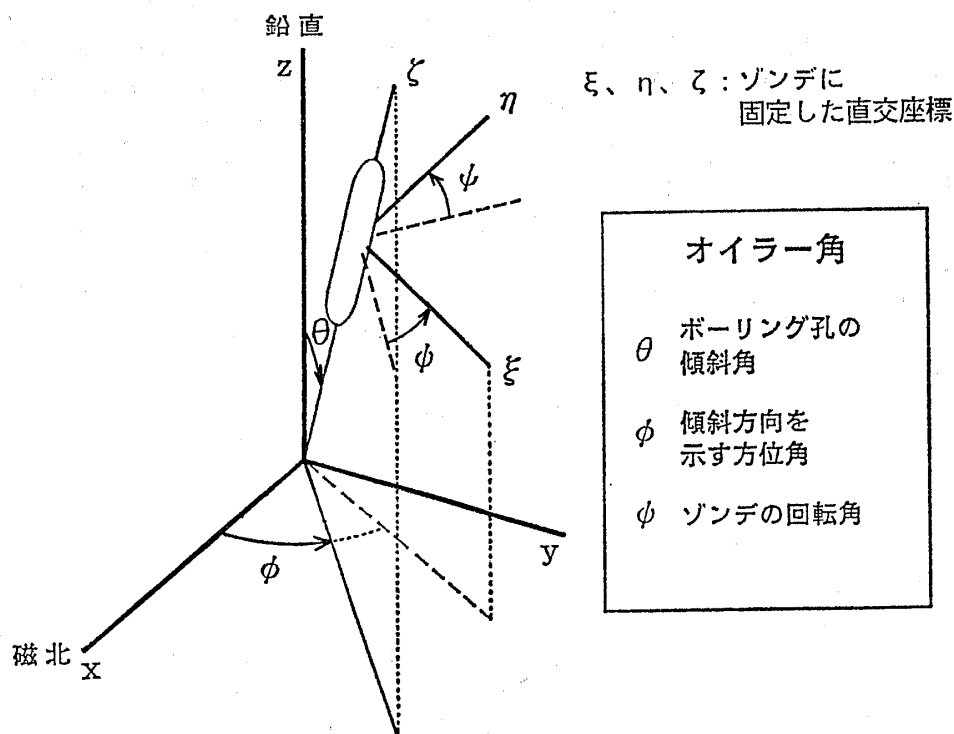


図-1 方位を表すための座標系

Fig.1 Coordinates for expressing the orientation

を計測できるように配置する。

したがって、傾斜センサで得られた $\xi$ 方向および $\eta$ 方向の計測値を、それぞれ、 $g_\xi$ および $g_\eta$ とし、角速度センサの出力をVとすると、

$$g_\xi = g \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi \quad (1)$$

$$g_\eta = -g \cdot \sin \theta \cdot \sin \phi \quad (2)$$

$$\int \frac{dV}{dt} = \beta (\phi \cdot \cos \theta + \psi) \quad (3)$$

であり、 $\theta$ 、 $\phi$ 、および $\psi$ は上式によって求めることができる。ここに、 $g$ は重力加速度、 $\beta$ は振動ジャイロの出力感度で、既知の量である。

このようにして、ボーリング孔中に上記のようなセンサを内蔵したゾンデを降下させ、事前に設定した深度間隔で計測を行い、 $\theta$ 、 $\phi$ 、 $\psi$ を算出すると、孔曲りの状況を求めることができる。

### 2・3 安定した計測を可能にするための検討

(3) 式からわかるように、 $\phi$ を求めるためには、角速度センサの出力を積分するという手順を踏まなければならない。もし、この過程においてセンサ出力にオフセットが生ずれば、その量がわずかなものであっても、積分されるので、その量は大きなものとなる。したがって、計測時間が長くなればなるほど、ますます大きなものとなる。このように、実際の回転角度と積分により算出さ

れた回転角度との間の誤差は、わずかなオフセットであっても、無視できないことになる。

角速度センサとしては、振動ジャイロを採用することとした。このセンサは、他のセンサに比べて、

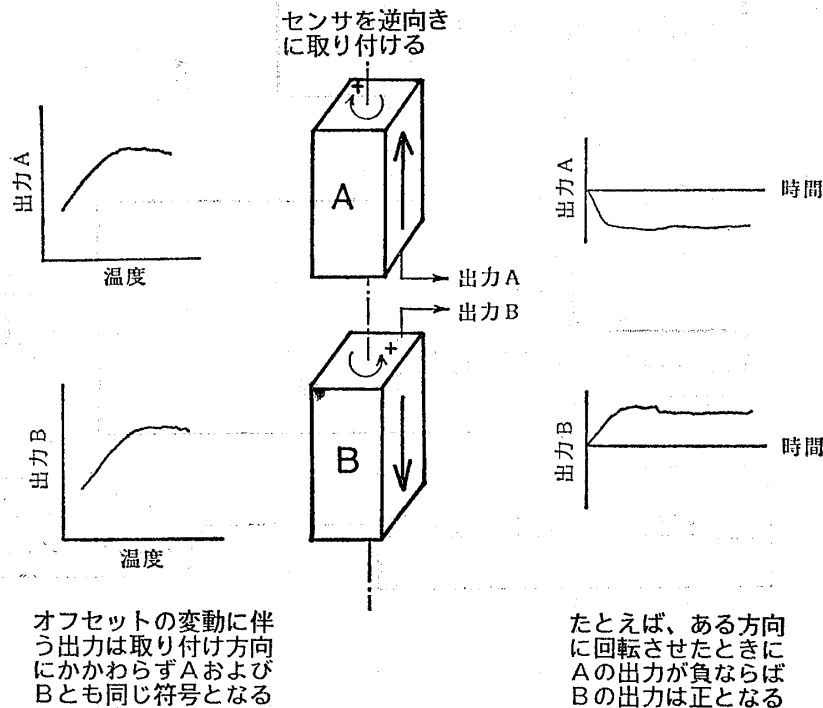
- ① 従来のものに比べて感度が高い
- ② 寸法が小さい

という特徴があり、性能がよいという利点がある。しかしながら、センサ出力に非線形な温度特性があり、しかも、センサごとにその特性がばらついているという欠点があることがあげられる。

したがって、温度変化があった時に、算出される回転角度の精度を保證する方法の検討は、安定した計測を実現するために避けられない事項であった。

種々の検討を行った結果、2つの角速度センサを用いることによって、そのセンサからの出力が、実際に回転して得られたものか、あるいは、オフセットの変動によって生じたものかを判別し、回転によるものと判断したときのみ積分を実施するという方法を考案した。その考え方は、下記の通りである。

図一2に示すように、2個のセンサを同一軸上に反対向きに取り付ける。この状態で回転させれば、2個のセンサの出力は逆符号となる。オフセットの変動によるものであれば、同符号となると考えられる。したがって、その符号を判別することによって回転しているか否かを判断するというものである。この方法のフローチャート



図一2 温度変化による影響を除去する方法

Fig.2 The method to reduce the influence of the temperature change

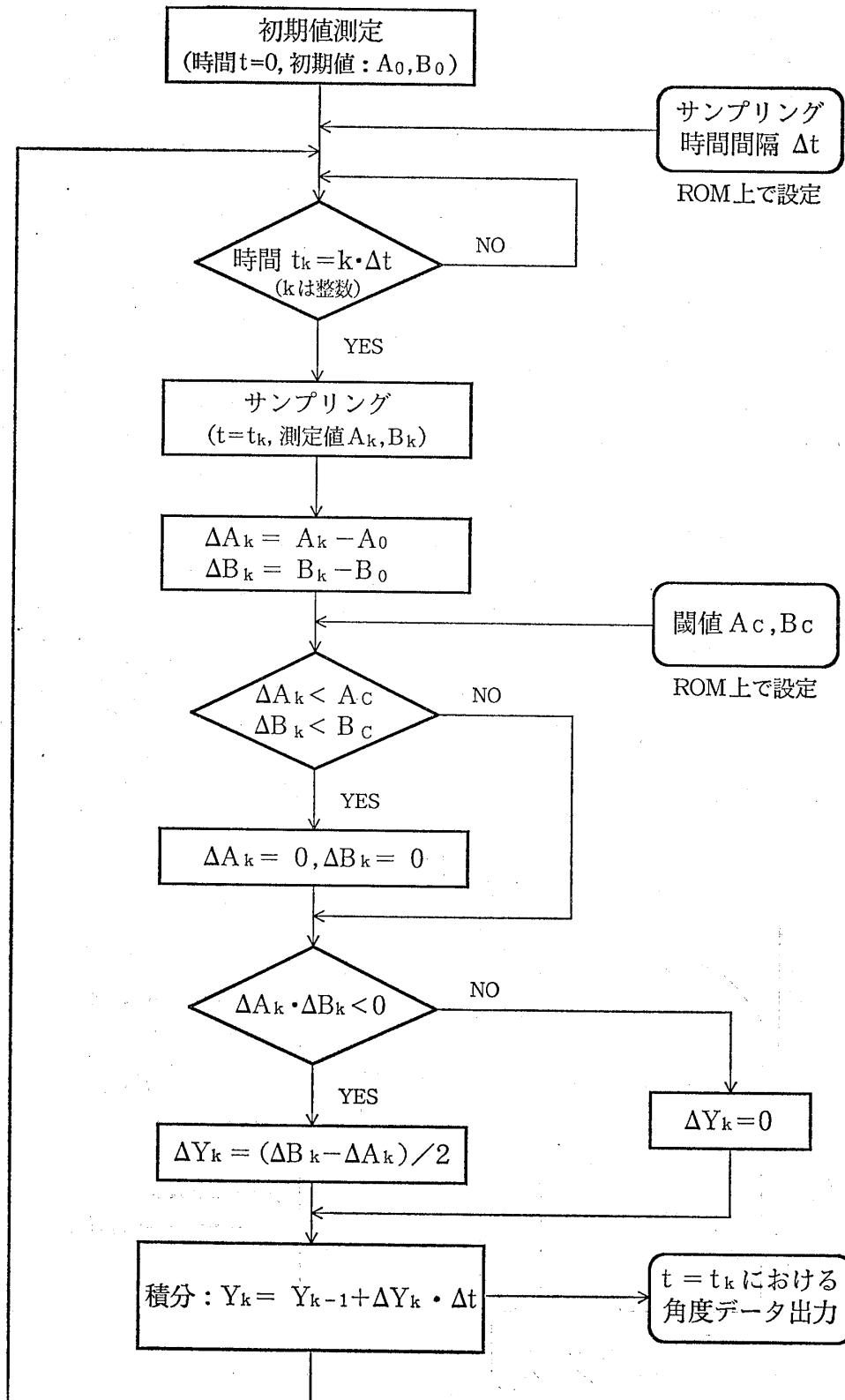


図-3 2つの角速度センサによって出力を判別するフローチャート  
 Fig.3 Flow of the method to distinguish the output using two sensors

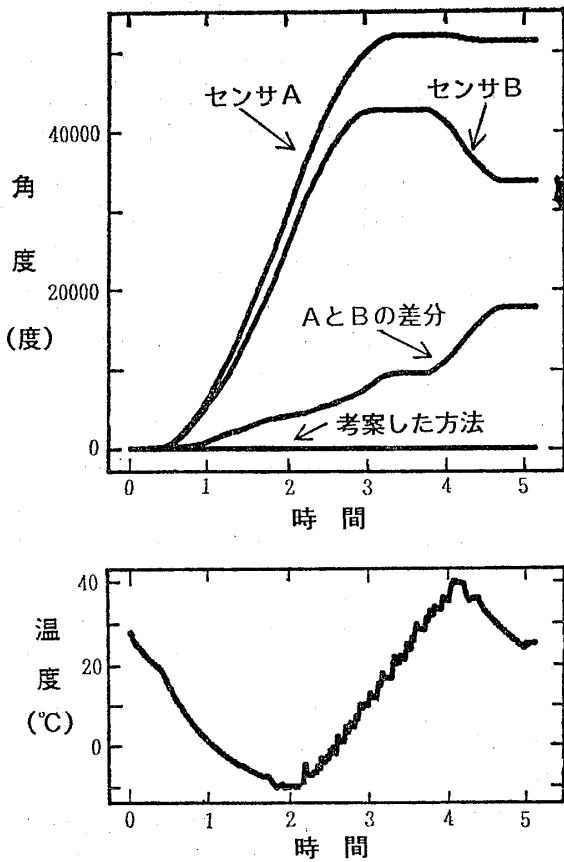


図-4 温度変化に伴って計測される角度変化  
 Fig.4 The variation of measuring angle due to temperature change

を図-3に示す。

この方法の実用性を評価するために、同一軸上に反対向きに取り付けたセンサに対して、5時間にわたって、 $-5 \sim 40^{\circ}\text{C}$ の範囲の温度変化を与え、積分された角度を求める実験を行った。

その結果は、図-4に示す通りである。すなわち、センサを静止させたまま、下段に示すような温度変化をセンサに与えた。上段には、センサAおよびBがそれぞれ単独に示した積算角度、2つのセンサの出力の差を用いて温度補償を試みた時に算出された角度、および、上述の方法で求めた積算角度のそれぞれについて、その時間経過を示してある。

センサは静止しているのであるから、本来は角度は初期値の $0^{\circ}$ として計測されなければならない。しかし、センサを1個だけ用いて単純に積分する方法では、温度変化に伴うオフセット電圧の変動による出力が累積され、数万度という非現実的な角度が計測されている。

さらに、AとBの2つのセンサの温度特性が異なるため、それぞれのセンサで計測される角度の経時変化は異なっている。このために、差分データを用いて角度を求めてもゼロにはならない。一方、新たに考案した方法においては、信号の動きを符号により判別し、同じ符号である場合には積算しないために、この図から明らかのように、5時間を経ても角度はゼロを保っている。

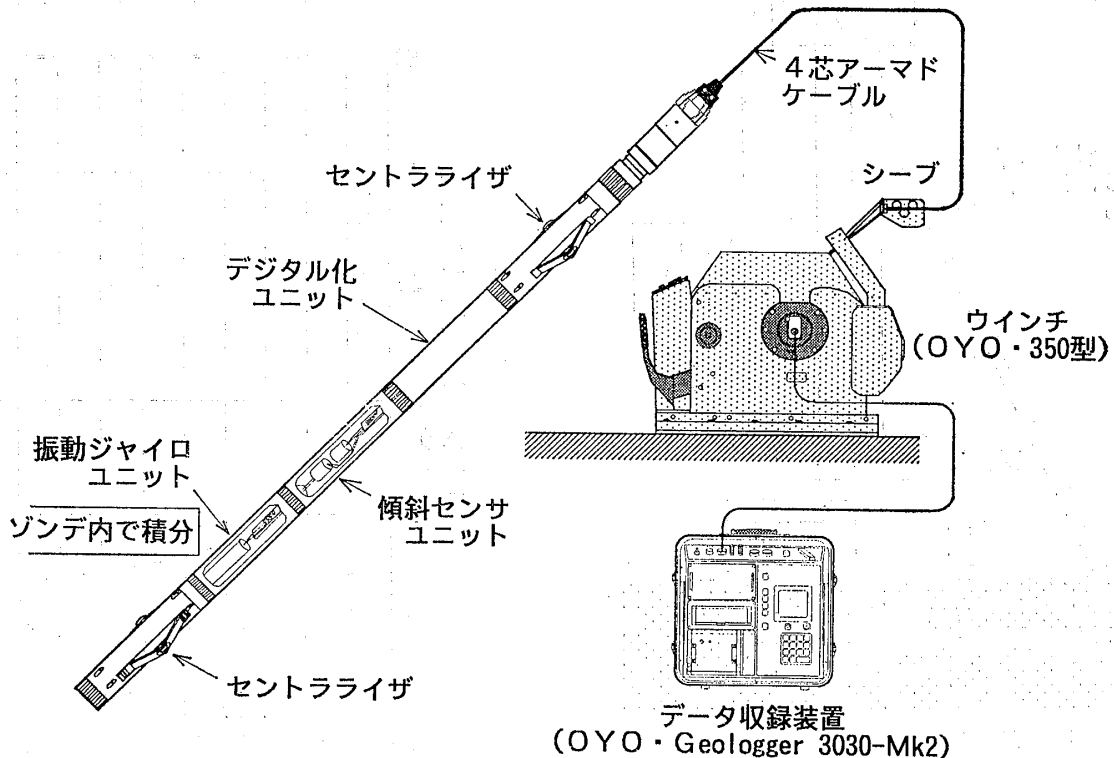


図-5 システムの構成  
 Fig.5 Diagram of the system

## 2・4 装置の概要

以上のような検討結果を踏まえて、図-5に示すような構成による装置を開発した。

孔曲がり計測においては、ゾンデが孔曲がりを忠実に捉えるセントライザが重要な役割をもつ。そこで、セントライザとしては、ゾンデから3方向(120°間隔)に、バネ力によって開くパンタグラフ式構造のものを、ゾンデ両端に取り付けた。その間のゾンデ内には、電子回路、センサが収納されている。傾斜センサとしては、サーボ型傾斜センサ2個を直交2方向に配置し、角速度センサとしては、2個の振動ジャイロを互いに逆向きに配置した。

データ収録装置には、各センサから得られた出力を連続的に収録できるようにし、計測終了後、現場で収録結果を解析して、孔曲がりの状況が求められるような機能をもたせた。

## 3 開発した装置の評価

### 3・1 孔曲がり計測の精度について

図-6に示すように、内径 70mm、4 m 長のアクリ

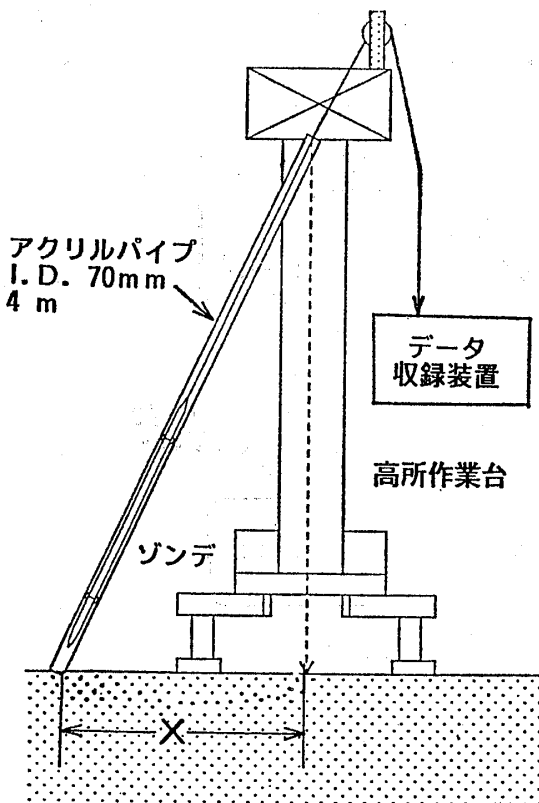


図-6 定尺パイプを用いた実験方法

Fig.6 Schematic to show the experiment method using the pipe

ルパイプを作業台に立てかけ、パイプ中をゾンデを移動させて、データを収録し、孔曲がり計測精度の評価を行った。パイプの下端の位置を変えて種々の傾斜角や方位角を設定した。傾斜角が比較的大きい場合には、傾斜角、方位角ともに、設定した通りの値が得られた。

しかしながら、傾斜角が小さい場合には、方位角の決定にばらつきが見られるようになった。この理由としては、(1)式および(2)式によって示されるように、傾斜センサの出力電圧が小さくなり、したがって、 $S/N$ 比が小さくなる。また、方位角 $\phi$ は、(1)式と(2)式の比から $\phi$ を求めて、これを(3)式に代入することによって求めることになるが、(1)式と(2)式の比は $S/N$ 比が小さくなった値の比であるので、得られる結果に大きなばらつきが生ずる。そのために、方位角の計測精度がかなり落ちることになるのである。

図-6に示した方法で行った実験において、パイプの設定方位角と求められた方位角との間の最大誤差 $\Delta\phi$ と傾斜角 $\theta$ との関係を示すと、図-7のようになる。傾斜角が小さくなると方位角の誤差が極端に大きくなることを示している。

一方、孔曲がり計測とは、ボーリング孔が、図-1に示すように、直交座標系(X, Y, Z)で定義される空間のどこに位置するかを求めることといえることができる。したがって、上述の方位角決定の誤差が、各深度におけるボーリング孔の位置の決定に、どの程度の誤差を

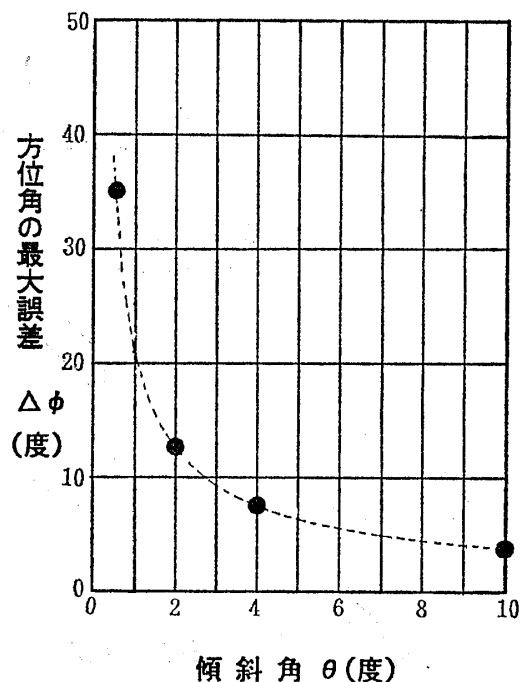


図-7 方位角の最大誤差と傾斜角との関係

Fig.7 Relation of the maximum error in azimuth and tilt angle

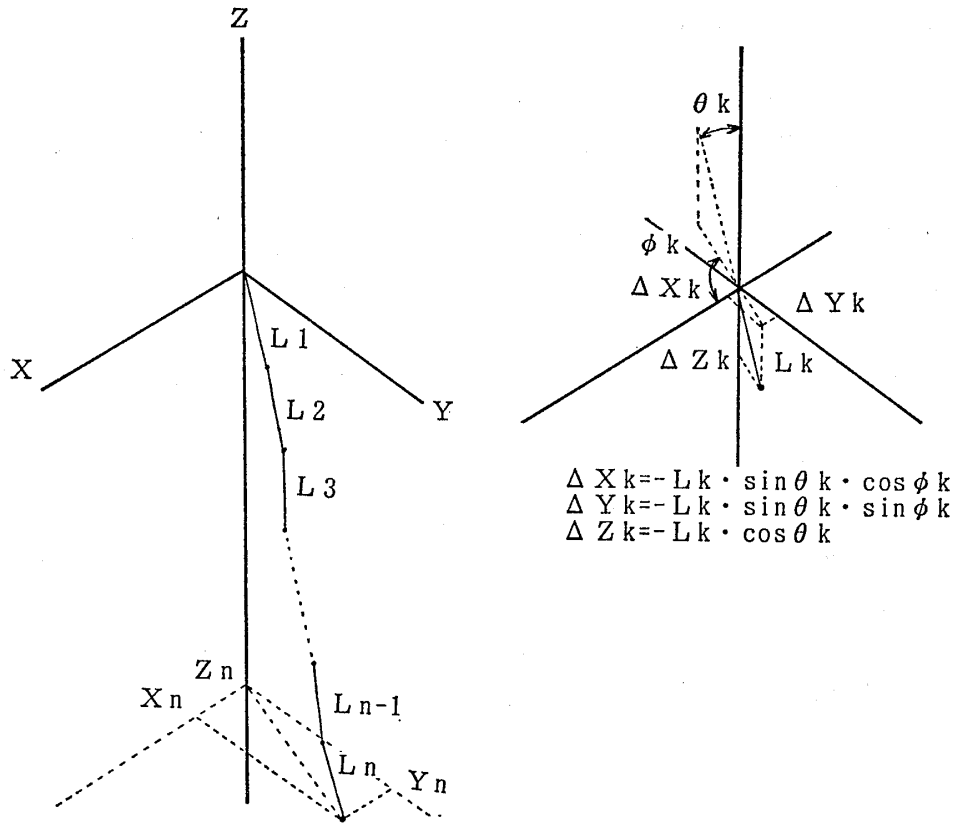


図-8 鉛直からのボーリング孔の変位  
 Fig.8 The deviation of the borehole from the vertical

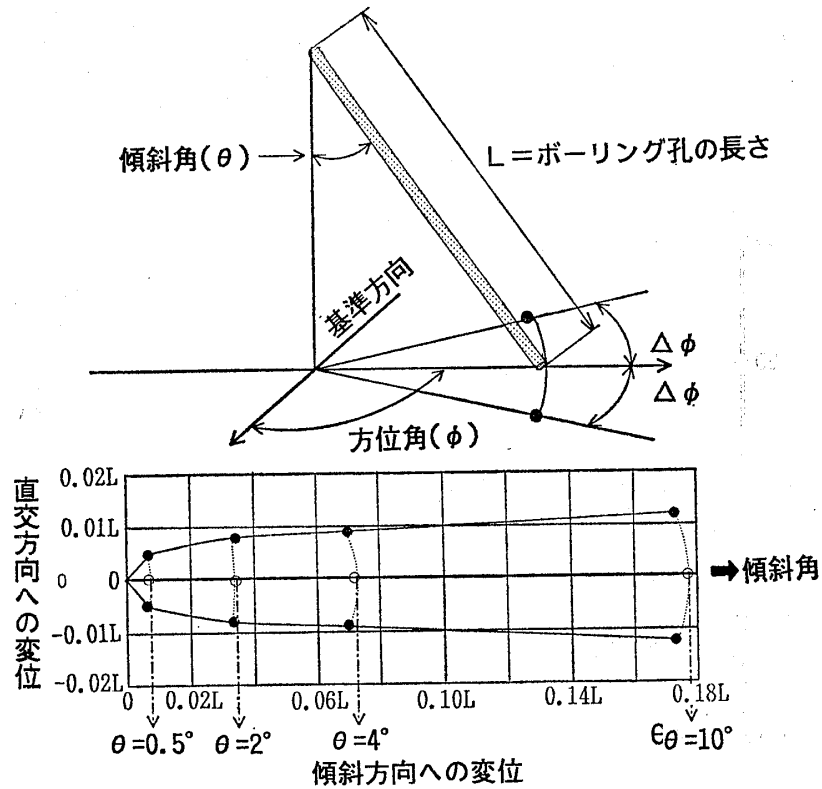


図-9 方位角の誤差が鉛直からの変位計算に及ぼす影響  
 Fig.9 Relation between the error in azimuth and calculated deviation

与えることになるかについて検討を行った。

図-8に示すように、ボーリング孔を部分的に直線とみなせる線分に分けて考える。孔口からk番目の線分の長さを  $L_k$ 、傾斜角を  $\theta_k$ 、方位角を  $\phi_k$  へするへ、各座標軸方向の成分 ( $\Delta X_k, \Delta Y_k, \Delta Z_k$ ) は、つぎのように表すことができる。

$$\Delta X_k = -L_k \cdot \sin \theta_k \cdot \cos \phi_k \quad (4)$$

$$\Delta Y_k = -L_k \cdot \sin \theta_k \cdot \sin \phi_k \quad (5)$$

$$\Delta Z_k = -L_k \cdot \cos \theta_k \quad (6)$$

ただし、 $\phi_k$  の範囲を  $-180^\circ \sim +180^\circ$  とし、X軸から反時計方向を正とする。

したがって、孔口からn番目の線分の下端の位置を表す座標 ( $X_n, Y_n, Z_n$ ) は、次式によって表すことができる。

$$X_n = -\sum (L_k \cdot \sin \theta_k \cdot \cos \phi_k) \quad (7)$$

$$Y_n = -\sum (L_k \cdot \sin \theta_k \cdot \sin \phi_k) \quad (8)$$

$$Z_n = -\sum (L_k \cdot \cos \theta_k) \quad (9)$$

(4)式および(5)式から明らかのように、傾斜角  $\theta_k$  が小さいときには、 $\Delta X_k$  および  $\Delta Y_k$  も小さくなる。かりに、方位角  $\phi_k$  の計測の誤差が大きくても、 $\Delta X_k$  および  $\Delta Y_k$  の誤差は小さくなり、結果的には、 $X_n$  および  $Y_n$  の決定精度に大きな影響を与えないことが予想される。

図-9に示すように、長さがLのボーリング孔が傾斜角  $\theta$  だけ、 $\phi$  の方位に傾いているとする。このとき、ボーリング孔の下端は、傾斜角  $\theta=0$  のときの孔の下端の位置から、 $\phi$  の方位に  $L \cdot \sin \theta$  の距離のところにあるこ

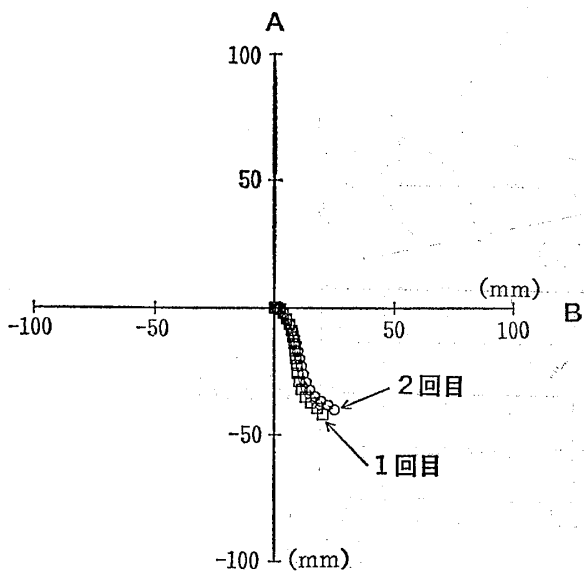


図-10 同一条件で2回測定した結果の比較  
Fig.10 Comparison of the measured results under the same conditions

とになる。したがって、この距離を横軸にとり、図-7に示した傾斜角  $\theta$  に対する方位角の最大誤差から求められる距離を縦軸にとって描くと、図-9の下段に示すようになる。この図において、白丸は、方位角の測定値に

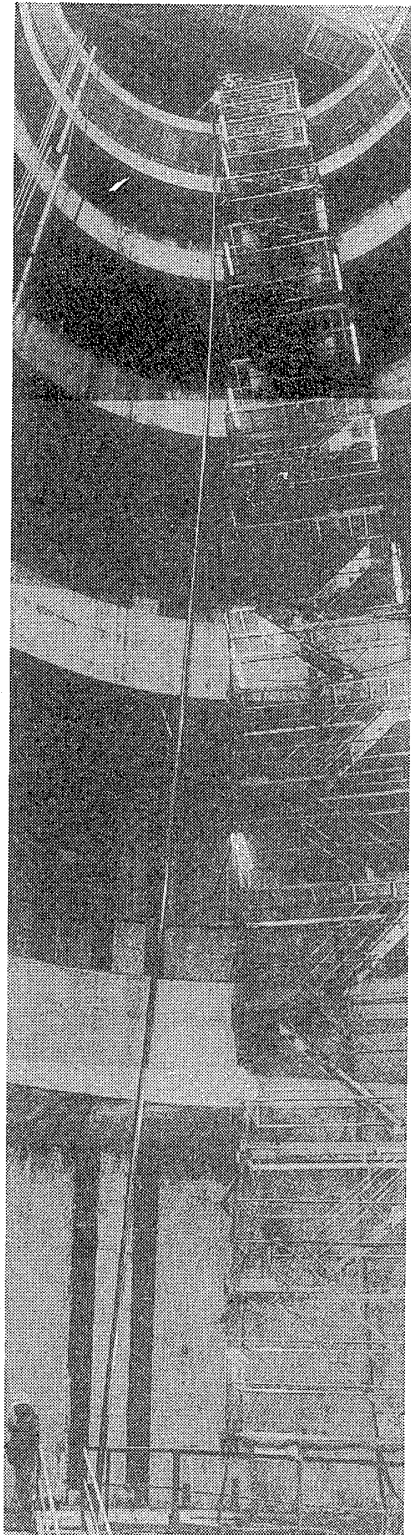


図-11 実験に用いたパイプの設置状況  
Fig.11 Arrangement of the long pipe in the shaft



誤差のない場合における  $\theta = 0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 10^\circ$  のときのボーリング孔の下端の位置を表している。

しかし、実際には、図一7に示したように、傾斜角  $\theta$  に応じて方位角の最大誤差  $\Delta\phi$  があるので、ボーリング孔の下端の位置は、黒丸で示したところとなる。したがって、実際のボーリング孔の位置の決定精度は、黒丸と白丸を結ぶ円弧上にあることになる。同図によると、ボーリング孔の位置の決定精度は、傾斜角に依存する度合は小さく、ほぼ一定であると考えてよいようである。

### 3・2 再現性の確認

直径 75mm の塩ビ製ケーシングが挿入されているテスト孔を用いて、複数回の孔曲がり計測を行い、再現性のチェックを行った。図一10は、そのうちの1回目と2回目の計測結果を、孔口を原点としたときの孔曲がりの状況として、平面図にプロットして比較したものである。計測開始時のゾンデの  $+\xi$  方向および  $+\eta$  方向を、それぞれ、 $+A$  方向および  $+B$  方向へして示してある。

この場合、計測された変位の差は、最大で 4.8cm に収まっているが、この程度の差は、計測開始時の基準方向のとりかたが  $2^\circ$  程度ずれていると生じ得るものである。角速度センサを用いた孔曲がり計測では、計測開始時のセンサの位置を基準とするため、ゾンデの挿入の向きによって、測定結果にずれが生ずる。この実験では、基準方向は、孔口のケーシングとゾンデにつけられている印を目測で合わせているため、 $2^\circ$  程度のずれは考えられる範囲である。したがって、ここで得られた計測値の

誤差は、実験誤差の範囲内にあると考えられる。言い換えれば、再現性を向上させるためには、計測開始時のゾンデの向きを正確に合わせるか、あるいは、その向きを正確に把握できるようにし、解析時に挿入時の向きのずれを補正できるような手だてが必要であるということである。

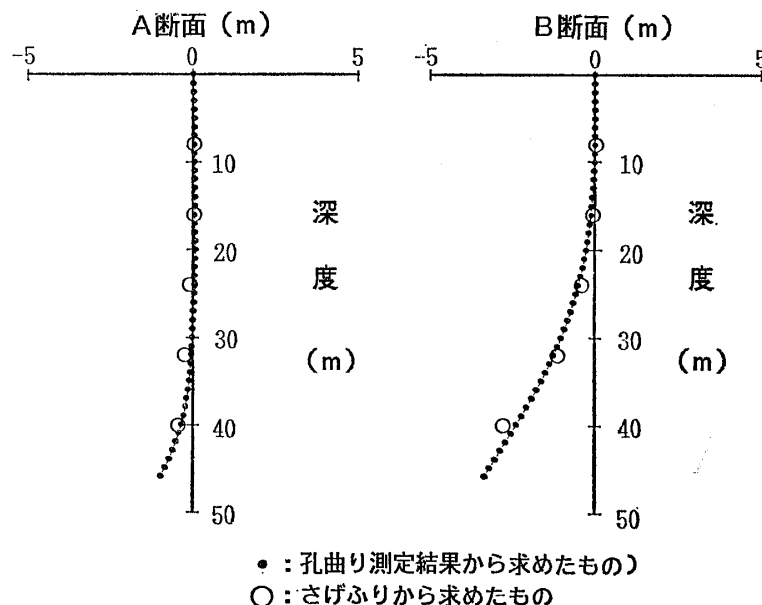
前述のようなやりかたで、ゾンデの挿入時の向きをいろいろ変えて複数回計測を行ったところ、算出孔曲がり量の再現性は、約50mの深度において、おおむね 10cm 以内に収まることが確認できた。

このボーリング孔においては、外気温度と孔内温度の差は、 $10\sim 15^\circ\text{C}$  であった。しかしながら、2・3に述べた方法によって、角速度センサーに対する安定性の向上を図った効果によって、温度変化による計測誤差は認められなかった。

### 3・3 堅坑内で行った鋼管の曲がり実験による評価

実際の現場条件での試験として、長さが約 49m の鋼管を堅坑内に設置した檣に立てかけ、その底部を移動させることによって、人為的に鋼管の撓みを変化できるようにした。さらに、鋼管の近くの堅坑上部にさげふりを取り付け、これを堅坑底部まで垂らした。そして、これを基準線として測量により鋼管の曲がりも併せて計測した。図一11は、実験を行った堅坑における鋼管の設置状況を示したものである。

図一12に計測結果の一例を示す。この図は、3・2の場合と同じように、計測開始のゾンデの  $+\xi$  方向および



図一12 パイプのたわみの測定結果

Fig.12 The measurement result of pipe bending

+7 方向を、それぞれ、+A方向および+B方向とし、これらの方向と鉛直軸を含む断面に孔曲がりの状況を投影したものである。

図中の黒小丸は、孔曲がり測定結果から求めた鋼管の撓み状況を示しており、白丸は、さげふりから求めたものである。両者は、極めて良い一致を示しており、この孔曲がり計測装置の測定値の信頼性を示しているといえることができる。

#### 4 あとがき

今後、ボーリング孔を利用する調査や土木分野における施工管理は、その求められる内容や精度がより多様化し、より高度化することが予測される。それにともなって、孔曲がり計測の需要はますます大きくなるものと思われる。

孔内方位計測技術に関する理論的検討結果を用いて、連続的に鋼管の孔曲がりを計測できる装置を開発することができた。

この装置に関する評価実験の結果、2つの角速度センサの組合せを利用して試作した孔曲がり計測装置は、少なくとも、今回実験を行ったような条件下では、十分に実用的であることが判った。

しかし、次に示すような条件下において、どの程度の真価が発揮できるかは現時点では未知であり、今後の課題である。

- ① 地盤やパイプなどが振動を受けている場合などのような厳しい環境条件下での計測
- ② 大深度における長時間の計測

これらの条件下で正確に計測するためには、センサのノイズを軽減したり、外部からの擾乱を受けにくい構造にするなど、さらに安定性を増すことが重要となるであろう。

#### 参 考 文 献

大橋武一郎, 荘司泰敬 (1994): 孔内方位計測に関する基礎的検討 応用地質年報 第16号