

## 24. シールド掘削鉛直精度管理システム

大成建設(株)：\*三神 克己・近藤 高弘

### 1. はじめに

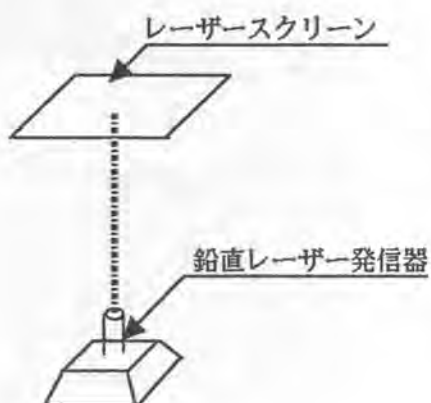
球体シールド工法の開発により、立坑施工に直接シールド掘削機を用いることができるようになった。そこで新たに立坑掘削時、特に到達点での掘削機の位置管理が重要な管理項目となった。

本システムは、このような球体シールド工法の持つ特徴を考慮し掘削中の掘削機の位置をリアルタイムに三次元的にモニタリングすることができる位置精度管理システムである。

### 2. システム概要

掘削機の位置検出方法としては、ワイヤーを用いる方法等も考えられるが、シールド掘削機の空間スペースの問題や、セグメント等の搬入作業における施工上の安全性を考慮して、非接触式の検出方法を検討し採用した。

#### 2-1. 原理

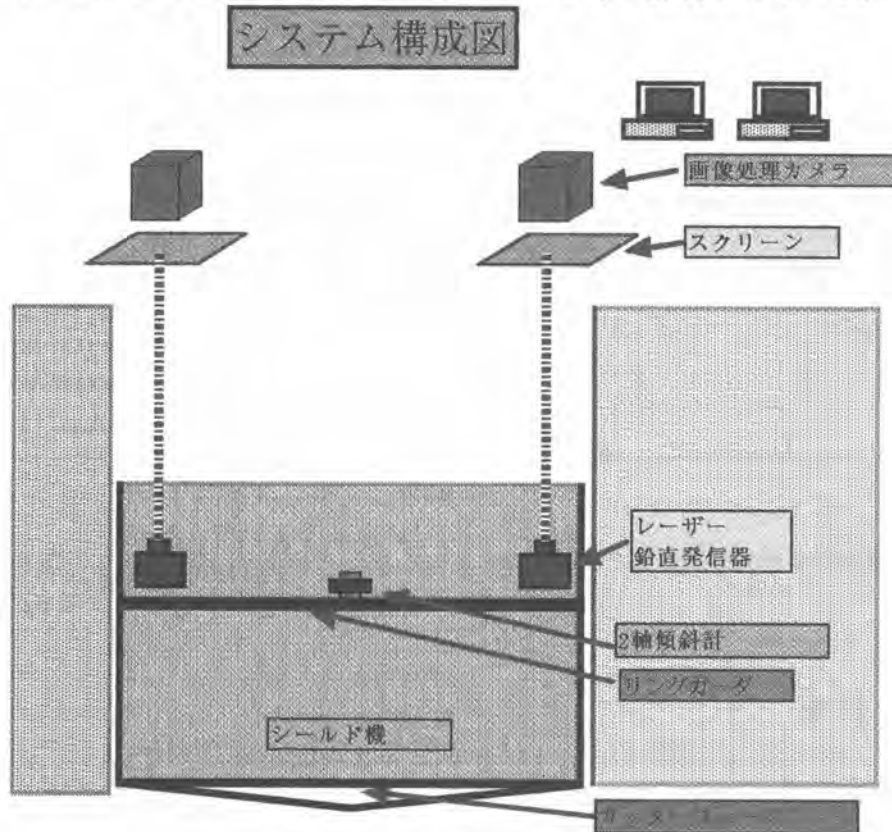


左図の様に鉛直レーザー発信器をシールド掘削機の作業床に設置する。レーザー発信器は、本体が多少傾いても自動的に鉛直補正して発信する機能がある。そのため掘削機の本体が掘削施工時に平面移動した移動量を固定したレーザースクリーンで捕えることができる。

掘削機の三次元位置情報としては、実際の掘削長と掘削機本体に設置されている傾斜計からの情報を総合的に処理して求める。

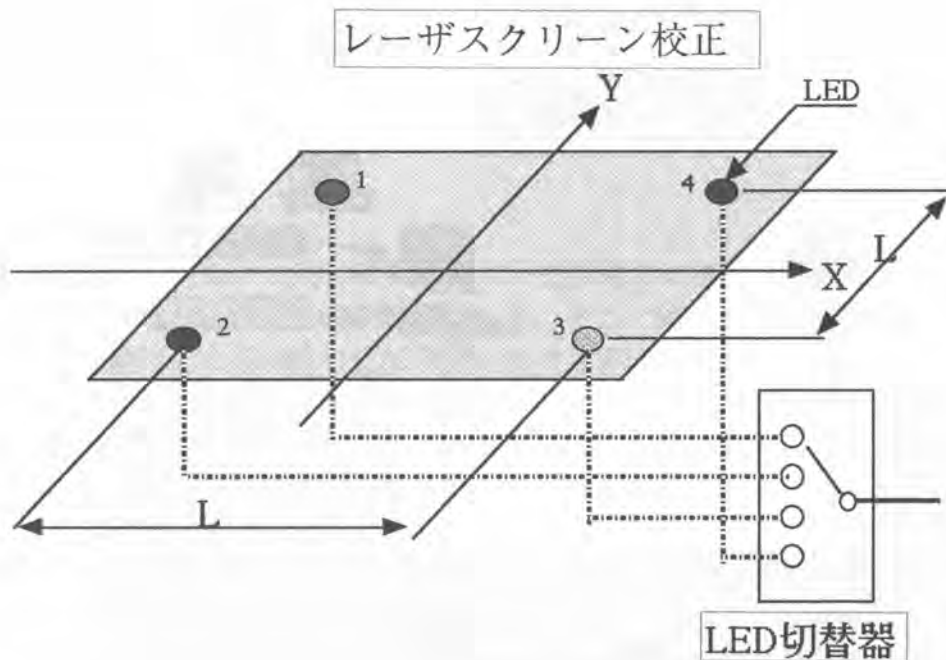
## 2-2. システム図

システムは、下図の様に2軸傾斜計、レーザ鉛直発信器、レーザスクリーン、画像処理カメラ、およびパソコン等で構成されている。



## 2-3. レーザスクリー校正

レーザスクリーンでのレーザ光の読み取り精度がシステム全体の計測精度に与える影響が大きいため、厳密にレーザ座標を校正する必要がある。そのため次図の様にレーザスクリーン内部にLED(発光ダイオード)を所定の位置に埋め込み、順次1~4の順に点灯させる。そしてそのときのカメラで撮らえた画像処理座標を読み、スクリーンとカメラの関係の補正処理を行う。



#### 2-4. 計測

レーザースクリーンに映ったレーザースポットは画像処理により、スポット径の重心位置を処理して求める。スクリーンでの座表系は実寸座標 (mm) の直交座標として認識する。すなわちシールド機が掘削にともない移動した場合、その移動量を捕らえるレーザースポット光の位置を直接捕えることで把握できる。

いま仮にシールド機がXY平面でXに+10mm、Yに-20mm平行移動したとするとレーザースクリーン上のスポット座標も同様にX方向に+10mm Y方向に-20mmのレーザースポットの変化として捕えることができる。掘削深度の情報 (Z軸方向) は組み立て済みセグメント数とジャッキストローク長から求める。また2台のレーザー発信器取り付け平面 (XY平面) におけるシールド機のねじれ (回転方向) と平行移動量も平面座標 (XY平面) として把握できる。また、シールド機本体に取り付けられている2軸 (前後、左右) 傾斜計からの情報から傾きを把握する。それらの情報を総合的に処理することにより、シールド機全体の状態を三次元的に計測することが可能になる。

## 測量計算方法

レーザスクリーンでのスポット座標はスクリーンの座標系表示ではなく現場の施工座標系に変換された値が直接入力されるものとし、それぞれA、B点での座標を(XA、YA)、(XB、YB)とする。

シールド機に取り付けたレーザ発信機の座標をそれぞれA、B点で(LAX、LAY)、(LBX、LBY)とする。

求める本体ねじれ角φ、マシンセンター変位座標(CX、CY)を下記の式より求める。

$$L_{AB} = \sqrt{(LAX - LBX)^2 + (LAY - LBY)^2}$$

$$L_{masAB} = \sqrt{(XA - XB)^2 + (YA - YB)^2}$$

|L<sub>AB</sub> - L<sub>masAB</sub>| / L<sub>AB</sub> > 0.05 であればセンサー ERROR

補正座標値

$$XM = (XA + XB) / 2$$

$$YM = (YA + YB) / 2$$

$$AX = (XA - XM) * L_{AB} / L_{masAB} + XM$$

$$AY = (YA - YM) * L_{AB} / L_{masAB} + YM$$

$$BX = (XB - XM) * L_{AB} / L_{masAB} + XM$$

$$BY = (YB - YM) * L_{AB} / L_{masAB} + YM$$

-----①

求める平行移動変位量CX、CYとねじれ角φとして直交座標系の平行移動量とねじれ変換を行なうと以下の連立方程式がもとまる。

$$AX = LAX * \cos(\phi) - LAY * \sin(\phi) + CX$$

$$AY = LAX * \sin(\phi) + LAY * \cos(\phi) + CY$$

$$BX = LBX * \cos(\phi) - LBY * \sin(\phi) + CX$$

$$BY = LBX * \sin(\phi) + LBY * \cos(\phi) + CY$$

Sφ = sin(φ)、Cφ = cos(φ)として解くと以下ようになる。

$$S\phi = \frac{(AX - BX)(LAY - LBY) - (AY - BY)(LAX - LBX)}{(LBY - LAY)(LAY - LBY) - (LAX - LBX)(LAX - LBX)}$$

$$C\phi = \frac{(AX - BX)(LAX - LBX) - (AY - BY)(LBY - LAY)}{(LAX - LBX)(LAX - LBX) - (LAY - LBY)(LBY - LAY)}$$

-----②

$$\phi = \tan^{-1} \frac{S\phi}{C\phi}$$

$$CX = AX - (LAX * \cos\phi - LAY * \sin\phi) = BX - (LBX * \cos\phi - LBY * \sin\phi)$$

$$CY = AY - (LAX * \sin\phi + LAY * \cos\phi) = BY - (LBX * \sin\phi + LBY * \cos\phi)$$

-----②

これでマシンのレーザ発信機取り付け平面でのねじれ角、およびセンター変位が解析できる。マシン全体を三次元的に把握するには求めたいマシン平面がレーザ発信機取り付け面からどれだけ離れているかを求め基準面からの影響をマシン本体の傾斜(2軸)情報をもとにsin成分だけ補正して求める。

一般式では、レーザ取り付け面を基準にして高さHでの各点の変位座標が下記の式で求められる。

既存座標 (X, Y) より --> (PX, PY) を求める。

$$RX = X * \cos \phi - Y * \sin \phi$$

$$RY = X * \sin \phi + Y * \cos \phi$$

$$XMM = RX + C X$$

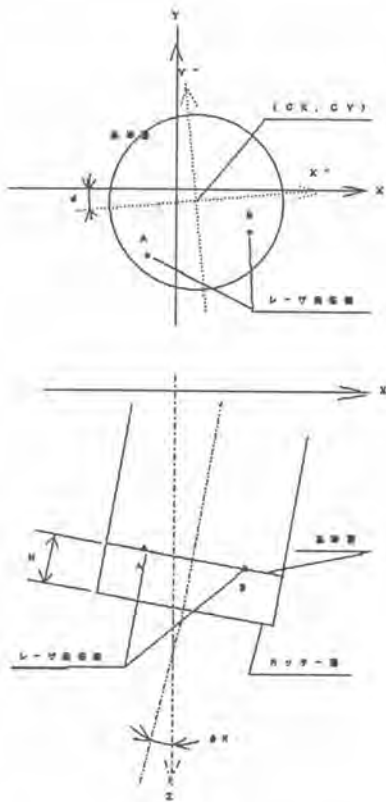
$$YMM = RY + C Y$$

$$PX = XMM + H * \sin \phi x$$

$$PY = YMM + H * \sin \phi y$$

----- ③

として任意の三次元座標を把握できる。



### 【三次元座標計算の説明】

いま X-Y 座標を設計座標として、X''-Y'' 座標をマシン平面座標系とする。

(基準面での座標系)

マシンに A, B のレーザ発信機が (LAX, LAY)、(LBX, LBY) でセットされている。

本体傾斜角 X 成分  $\phi x$  とする。

上記の計算式②を用いて S  $\phi$ 、C  $\phi$ 、C X、C Y の X A は A X に Y A は A Y で X B は B X で Y B は B Y に置き直して計算する。

いま仮に (LAX, LAY) = (-1000, -1000)、(LBX, LBY) = (700, -800) 座標にセットしたとする。

そのときレーザスクリーンから計測される座標値は X-Y 座標値で計測されるので A 点 (X A, Y A) = (-923.4, -1067) B 点 (X B, Y B) = (766.2, -792.7) で計測されたとして、マシン座標軸の移動量(ねじれ、平行移動量)を求める。

A, B 点の測定値が線分長 AB を満足するものであれば計測誤差が生じなかった事になるが、ここで線分 AB になるように計測データを AB の中点から振り分け補正する。式①より

補正結果は (A X, A Y)、(B X, B Y) でこの値を用いて S  $\phi$ 、C  $\phi$  を計算する。

以上の式から座標軸のねじれ  $\phi$  を求めると  $\phi = 2.5 \text{ deg}$  となる。

以下C X、C Yの式に代入してC X = 3 2、C Y = - 2 4が求めまり、マシン座標系が設計座標系と2. 5 degのねじれと(3 2, - 2 4)の平行移動成分をもった座標系であることがわかる。この(3 2, - 2 4)は基準面のマシンセンター座標と等しくなる。

実際のマシンカッター面のセンター座標は高さ成分Hを考慮に計算されたものが実際にカッターセンターとして求められる。

カッターセンターX成分 = 3 2 + H \* s i n φ X

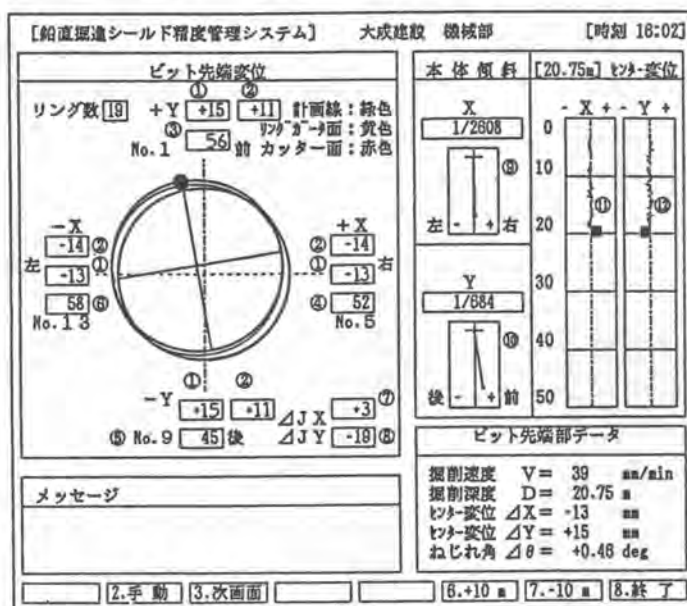
Y成分 = - 2 4 + H \* s i n φ Y として計算される。

即ちマシンの任意の位置の座標を設計座標系に変換計算するには③式を用いれば任意の(X, Y)と基準面よりの高さHを与えることでとまる。

すなわち今カッター面のX軸上端の位置がどの様になるかを求めるに仮にマシン外形を3 0 0 0 mm、基準面からカッター面までの距離H = 2 0 0 0 mm、本体傾斜角φ X = - 0. 4、φ Y = 0. 3 degとする。

いまマシンの中心線右端座標(1 5 0 0, 0)がどの様に移動したかを求めると(1 5 1 7. 1, 5 1. 9)となる。

## 計測画面の説明



計測画面 (各計測値の内容)

以下に計測画面の各計測値の内容 (①-⑨) を示します。

- |                       |                      |
|-----------------------|----------------------|
| ①ビット先端変位(mm)          | ⑦ジャッキストローク差 (X) (mm) |
| ②リングゲータ中心変位(mm)       | ⑧ジャッキストローク差 (Y) (mm) |
| ③ジャッキNo. 1 ストローク(mm)  | ⑨本体傾斜 (X)            |
| ④ジャッキNo. 5 ストローク(mm)  | ⑩本体傾斜 (Y)            |
| ⑤ジャッキNo. 9 ストローク(mm)  | ⑪ビット先端変位履歴 (X)       |
| ⑥ジャッキNo. 13 ストローク(mm) | ⑫ビット先端変位履歴 (Y)       |