

10. 同心円状レチクル内蔵 TS の開発と 斜杭打設システムへの応用

関西工事測量株式会社
大阪大学
住友金属工業株式会社

○ 中庭 和秀
矢吹 信喜
阿部 幸夫

1. はじめに

構造物の基礎工事には構造物の特性や地質条件、施工条件に応じた種々の工法があり、支持層が深い場合には杭基礎が広く採用される。杭基礎には杭を地盤に対して鉛直に打設する直杭基礎と地盤に対して傾斜を持たせて打設する斜杭基礎があり、杭体の形状は円柱が主体である。斜杭基礎を採用すると構造物の地震時水平変位が抑えられるため、耐震性を確保しながら杭径を小さくできるというメリットがある。一方で、斜杭基礎は施工精度を確保することが難しいことや工法が打撃工法に限定され騒音・振動問題を伴うことなどのデメリットからほとんど採用されなかった。しかし近年、建設業界においてコスト縮減が強く求められる中で合理的・経済的な基礎形式として斜杭基礎に注目が集まってきており、その性能に関する研究も行われてきている¹⁾²⁾³⁾。また、低騒音・低振動であり斜杭基礎の施工も可能である回転貫入工法が開発され⁴⁾、その実績も増えてきており、施工性と環境負荷の課題も解消されている。

回転貫入工法による直杭基礎の施工状況を写真-1に、斜杭基礎の施工状況を写真-2に示す。これらの写真からも判るように、斜杭基礎の場合は杭を所定の角度で地盤に貫入するための施工管理を行うことが求められるが、杭軸角度を精度よく計測できる方法がないのが現状である。また、実工事においては、得られた角度情報を杭打ち機のオペレータにリアルタイムで伝え、そのずれ量を補正しながら施工を進めることができるシステムの開発も望まれている。

そこで、本研究では基礎杭のような円柱構造物の中心軸を計測できる装置として、レチクルの十字線に同心円状のサークルを加えた“Baum”を内蔵したトータルステーション(TS)の開発を行う。また、Baum内蔵TSを応用することで、斜杭基礎の施工を精度よく行う管理方法の確立を目指す。



写真-1 直杭基礎の施工状況



写真-2 斜杭基礎の施工状況

2. 従来の基礎杭施工の精度管理

直杭基礎の打込み精度を管理する一般的な方法は、建込みにあたり杭先端を所定の位置に設置した後、直角2方向に設置した2台のトランシットで鉛直度を管理する方法である⁵⁾。この場合、2台のトランシットそれぞれに計測員を配置する必要があり工数がかかるほか、計測員の目視で鉛直度



写真-3 傾斜計による杭の傾斜角の計測風景

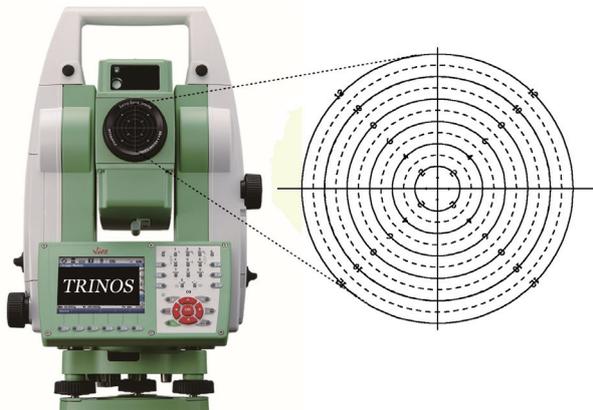


写真-4 Baum内蔵トータルステーション

を判断するため計測データが残らないという問題もある。

また、ターゲットシールを用いて1台のTSで杭の鉛直度を計測する方法もある。これは、杭にターゲットシールを貼り、TSからのレーザーをターゲットに当てることで鉛直度を管理するものである。しかし回転貫入工法では、杭を回転させて打設を行うため、計測するたびに杭の回転を止める必要があり、施工性が悪い。

斜杭基礎の場合は、傾斜計により杭の傾きを計測する方法がある。写真-3のように、作業員が杭に傾斜計を直接当てて計測するため、計測時には杭の回転を止める必要があり、施工性に劣る。また、傾斜計を当てる位置や当て方によって計測結果に大きなばらつきが生じるなど、施工精度の面でも問題がある。

別な方法として、杭の周囲の地面に、杭の所定の回転貫入方向と平行に棒状部材を設置し、杭と棒状部材とを照らしあわせることで、杭の傾斜を確認する方法がある。この場合、棒状部材を地盤にある程度以上貫入させる必要があり、手間が掛かるほか、人の目視でずれの修正を行うため、精度管理が難しく、計測データも記録されない。

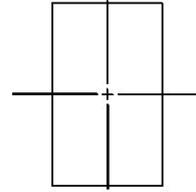


図-1 十字線による長方形の中心位置計測

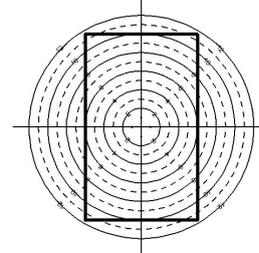


図-2 Baumを用いた長方形の中心位置計測

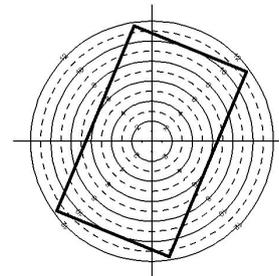


図-3 Baumを用いた傾いた長方形の中心位置計測

3. Baum内蔵TSの開発

3.1 Baum内蔵TSの概要

TSはレチクルに描かれている十字線の交点と計測位置の目印を合わせ、角度と距離を計測する器械である。位置を合わせることが出来る場所が十字線の交点だけであることから、計測位置にピンポイントで目印がなければ、位置を合わせることができない。

Baum内蔵TSは、TSのレチクルに描かれている十字線に同心円状の目盛が付いたサークルを加えたBaumをレチクルとしている(写真-4)。幅対距離の比が1:1000になるような間隔で同心円を配置しているため、Baumを覗いて1m先のものを見た場合、同心円の1目盛の幅が1mm(0.001m)として計測される。

レチクルがBaumとなることでこれまで対象物に目印がないことで計測できなかったものが、Baumの同心円を目印とすることで計測が可能となる。例えば、長方形の中心を計測する場合、図-1のように十字線を用いて長方形の中心を計測しようとしても十字線の交点を合わせる目印がないため正確な中心位置を計測することができない。しかし、図-2のようにBaumの同心円状のゲージ

を用いて同心円の中心から構造物の左右両端までの距離が同じになるようにすれば左右における中心線にあわせることができ、同様に上下両端と Baum の円を合わせれば計測対象の上下における中心線に合わせることができるので長方形の中心を計測することができる。また、レチクルが同心円であることで図-3 のように長方形が斜めであっても同じ手法で中心に合わせることができる。

3.2 Baum のゲージ幅の算出と精度

ゲージの幅と対象物までの距離 L と実際の幅 D の関係を図-4 に示す。ゲージの幅は、 D と L の関係が 1:1000 となるように 0.226mm と定めた。ただし、 D と L はレンズのひずみと距離による誤差があり、微妙に比例していない。 L が 10m の場合に、 D は 10.03mm であり、 L が 100m のとき D は 99.60mm である。すなわち、10m 離れた位置では 0.03mm の誤差があり、100m 離れた位置で 0.4mm の誤差ということになる。一般的な TS における測距精度は $2\text{mm}+2\text{ppm}$ 、測角精度は 5 秒である。100m 先における 5 秒の誤差は 2.4mm であることから Baum のゲージの精度は測量における精度を十分に満たしているといえる。なお、レチクルのゲージ幅と実際の見え幅は TS のメーカーによって微妙に異なり、現在使用している値はライカ製の TS をもとに算出したものである。

3.3 Baum 内蔵 TS による中心軸座標計測

TS が計測できる距離は計測対象物の表面である。そのため円柱構造物の中心軸を直接計測することはできない。そこで円柱構造物表面の座標から中心軸座標を計算により算出しなければならない。そこで図-5 に示すように Baum 内蔵 TS から見える円柱構造物表面の中心線上の異なる 2 点までの距離と角度を計測した値をもとに円柱構造物の中心軸の傾きを算出し、円柱の半径の長さだけ円柱の中心方向へと平行移動するという計算を行うことにより円柱の中心軸を求める。なお、今回の手法では円柱構造物の半径は既知であるものとする。計算の手順を以下に示す。

- ① Baum 内蔵 TS から見える円柱構造物の両端が Baum のゲージの同心円の中の一つの円の接線となるように Baum 内蔵 TS の角度を合わせ、その位置の角度と距離を計測する。計測した点を点 A とする (図-5 ①)。
- ② 同じ円柱構造物において点 A とは異なる点を ① と同様にして角度と距離を計測し、これを点 B とする (図-5 ②)。このとき、ベクトル \vec{AB} が円柱構造物の傾きを表す。
- ③ Baum 内蔵 TS の器械位置を点 O とし、 \vec{AB} とベクトル \vec{AO} に垂直で点 A 始点とする方向ベクトル \vec{c} を求める (図-5 ③)。

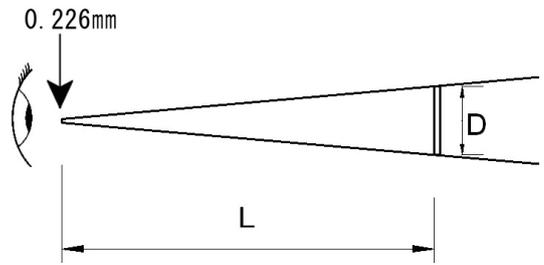


図-4 Baum 内蔵 TS による幅の見え方

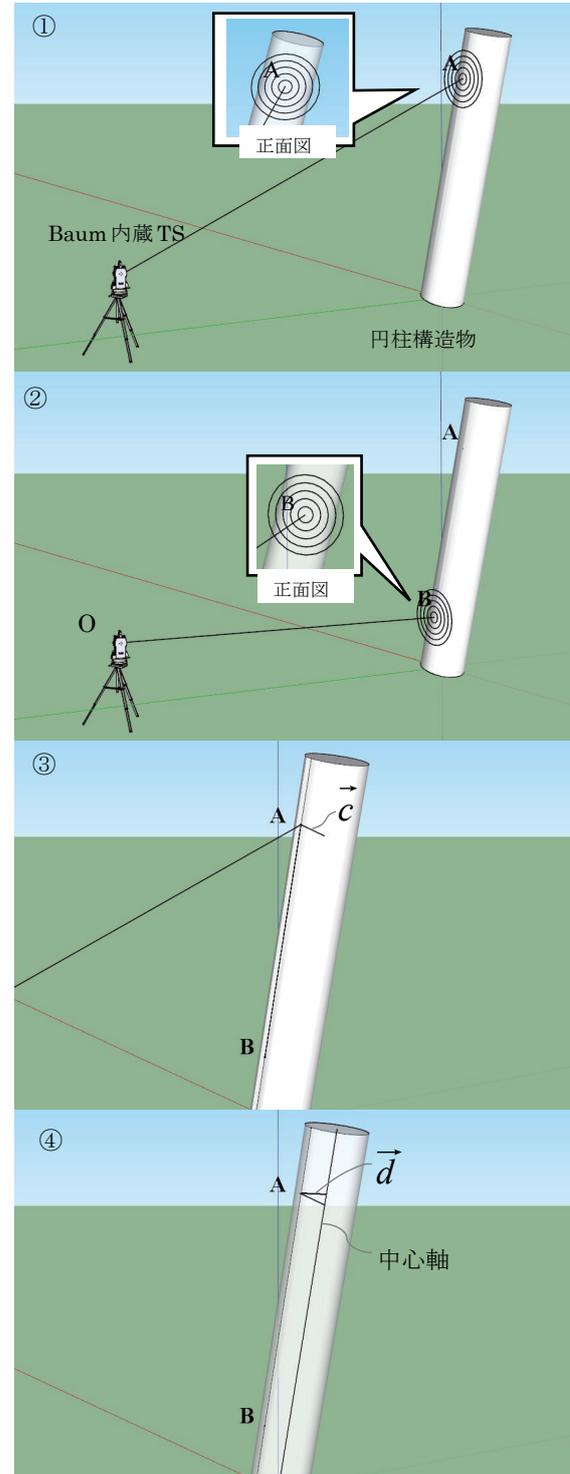


図-5 中心軸計測手順

- ④ \vec{AB} と \vec{c} に垂直な方向ベクトル \vec{d} を求め、
 \vec{AB} を \vec{d} の方向に平行移動する (図-5 ④)。平行移動の距離は円柱構造物の半径の長さとする。これによって求められるベクトルが杭の中心軸を表す。

4. 斜杭打設システムへの応用

4.1 杭打設ナビゲーションの開発

3章で述べた Baum 内蔵 TS を用いて杭の中心軸を計測する方法では、測量座標系に基づいた座標値が結果として得られるため杭打ち機や杭打ち機のオペレータの向きを考慮していない。例えば図-6 のように座標系と杭打ち機の方向がマッチしていない場合、ずれを修正するために、杭打ち機をどの方向に何度傾けるのかが判りにくい。このため、杭打ち機のオペレータが打設のずれを修正する際、迅速に操作することができず、操作ミスが起こる原因にもなる。

そこで斜杭基礎工事に適用するために中心軸を計測することにより求められる杭の傾きや位置と計画値とのずれを求め、このずれが無くなるようにオペレータにナビゲーションするシステムを開発した。これは3章で述べた中心軸の算出の計算を行うための専用のアプリケーションをインストールした情報端末に TS と杭と杭打ち機の位置関

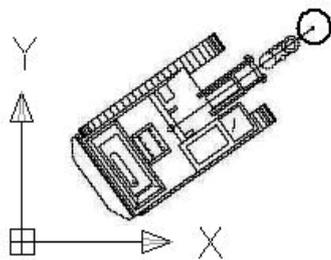


図-6 杭打ち機と平面座標軸

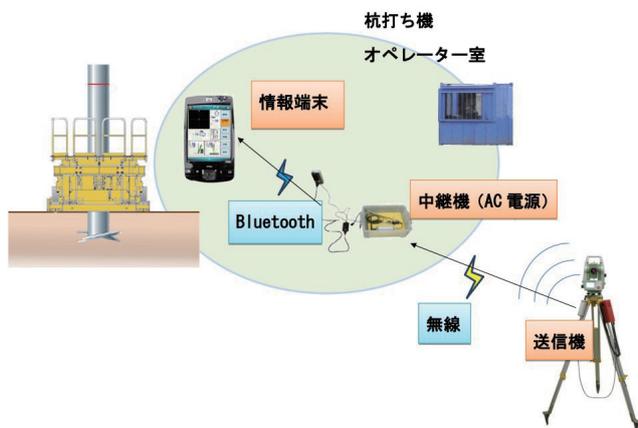


図-7 杭打設ナビゲーションシステム概略図

係を登録することによりオペレータに操作しやすい座標系で杭を傾ける方向を表示することができる。これにより、オペレータの視点で杭の打設状況が把握でき、正確な打設を行うことができる。

4.2 杭打設ナビゲーションの概要

図-7 に杭打設ナビゲーションのシステム概略図を示す。写真-5 のように Baum 内蔵 TS で計測した杭の情報 (杭表面の座標値) が Baum 内蔵 TS に取り付けられた送信機から無線を通じて杭打ち機のオペレータ室にある中継機に送信され、Bluetooth に変換されて情報端末に送られる。情報端末に内蔵されたプログラムで杭の位置を瞬時に計算し、杭の偏芯と傾きと正規の位置までの補正量、現在の杭深度がオペレータの操作しやすい杭打ち機の方角で情報端末の画面上に表示される。写真-6 は Baum 内蔵 TS のレチクルを斜杭の中心線上に合わせたものである。写真-6 の鋼管杭に書いてある 22 という数字は杭下端から 22m の長さであるということを表し、全周マーキングがされている。このマーキング位置に十字線の交点をあわせて計測することで杭先端深度の計測が可能となる。



写真-5 Baum 内蔵 TS を用いた基礎杭の計測風景



写真-6 Baum 内蔵 TS による斜杭計測

4.3 ナビゲーションの流れ

本システムの操作フローを図-8に示す。まず、Baum内蔵TSに送信機の取り付けを行い、杭打ち機のオペレータ室に無線の受信機とBluetoothへの変換機、専用アプリケーションがインストールされている情報端末を設置する。また、杭先端からの長さが既知である位置に全周マーキングをしておく。次に打設する杭の計画座標値と杭の半径を入力する。重機位置の測定では杭打ち機の周囲4面のうち1面を2点計測する。このとき、計測した面がナビゲーション画面の基準の面となるため杭打ち機のオペレータが操作しやすい面を選択する。写真-6のように全周マーキングと十字線の交点が重なり、Baumを用いて求められる杭の中心線上の点を1点目として計測し、杭の中心線上で1点目と異なる任意の点を2点目として計測する。これらの測定データは送信機を通して自動的に杭打ち機のオペレータが持つ情報端末に送られ、計算された結果が情報端末に表示される。ナビゲーションに従って杭のずれを修正しながら施工を進める。

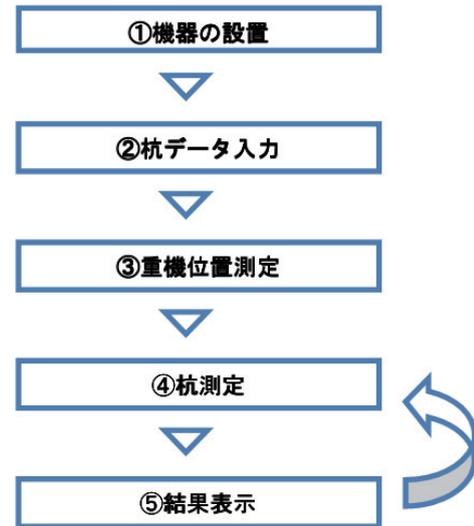


図-8 操作フロー

4.4 出力情報

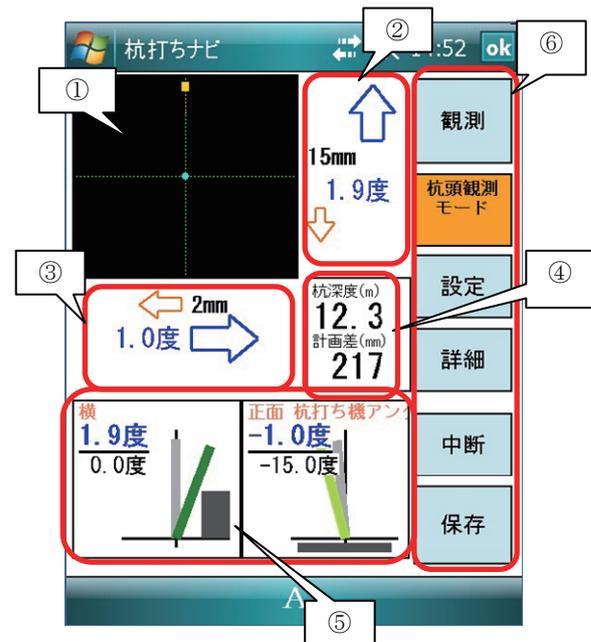
図-9に杭打設ナビゲーションの情報端末に表示される計測結果画面の一例と画面の説明を示す。補正量が数値化されて表示されるためオペレータは正確にずれの修正を行うことができる。表-1は直杭基礎の計測履歴を出力したものである。この表に示すように観測日時、杭深度、1点目と2点目の実測座標、計画高における中心座標の計画位置と実測位置、XY 偏芯量と傾きの角度が自動的に記録されるため、時系列ごとの施工の履歴を残すことができる。

5. まとめ

本研究では、従来の十字線に代わり同心円状のサークルが描かれたレチクルである Baum を内蔵した TS の開発を行った。この Baum 内蔵 TS を用いて円柱構造物の表面の 2 点の座標値を計測し、計算によって円柱構造物の中心軸を計測できることを示した。

また、この方法を応用して、基礎杭打設時にオペレータが操作しやすい視点で杭の平面位置と傾きの補正量のナビゲーションを行うシステムの開発を行った。このシステムを用いることで、今まで困難とされていた斜杭基礎の施工管理を精度よく行うことができるため、今後の斜杭基礎の普及に貢献することが期待できる。

さらにこのシステムは、計測員 1 名で、杭の鉛直度、杭芯ずれ、杭の深度を計測でき、その結果をリアルタイムで判りやすくオペレータに伝えることが可能であり、さらにこれらの計測データを時系列に記録できるため、直杭基礎の施工管理シ



- ①：TS と杭の位置関係を示す。十字線の交点が杭の位置となる。基準面として設定した面が画面下部となる視点として表示される。
- ②：基準面から見て前後の傾きと偏芯量を表す。矢印は計画値に対して修正する方向を示す。
- ③：基準面から見て左右の傾きと偏芯量を表す。矢印は計画値に対して修正する方向を示す。
- ④：杭先端深度と深度の計画値との差を示す。
- ⑤：正面と横の角度から見た杭の傾きの模式図
- ⑥：操作ボタン

図-9 杭打設ナビゲーション計測結果画面表示例

表-1 杭打設ナビゲーション計測履歴出力例

観測日時	杭深度 (M)	1点目の 杭芯実測位置座標			2点目の 杭芯実測位置座標			杭芯計画位置座標 (計画高)			杭芯実測位置座標 (計画高)			XY偏芯量		角度 (実測/計画) (°)
		(X)	(Y)	(Z)	(X)	(Y)	(Z)	(X)	(Y)	(Z)	(X)	(Y)	(Z)	(X)	(Y)	
2012/08/01 08:27	1.056	1039.989	999.985	9.944	1039.995	999.992	2.969	1040.41	1000	0	1040.398	999.995	0	0.008	0.005	0.08/0.00
2012/08/01 08:40	2.551	1040.001	1000.024	8.448	1040.005	1000.004	3.223	1040.41	1000	0	1040.408	999.992	0	-0.002	0.008	0.23/0.00
2012/08/01 08:44	3.415	1040.019	999.998	7.585	1040.015	999.997	3.817	1040.41	1000	0	1040.411	999.996	0	-0.005	0.004	0.06/0.00
2012/08/01 08:54	4.770	1039.992	999.995	6.229	1039.999	999.997	3.418	1040.41	1000	0	1040.407	999.999	0	-0.001	0.001	0.14/0.00
2012/08/01 09:10	5.775	1040.003	1000.004	5.225	1040.003	1000.002	2.803	1040.41	1000	0	1040.404	999.998	0	0.002	0.002	0.07/0.00
2012/08/01 09:28	7.760	1040.006	1000.006	3.240	1040.007	1000.006	2.576	1040.41	1000	0	1040.409	1000.005	0	-0.003	-0.005	0.05/0.00

システムとしてもメリットがある。

今後は、計測データを蓄積し分析することで、より精度の高い計測ができるシステムを目指す。さらに、実現場で作業するオペレータの意見をもとに、より使いやすいシステムとなるように改良を進める。

参考文献

- 1) 清田三四郎・米澤豊司・青木一二三・神田政幸・西岡英俊・出羽利行：斜杭基礎の水平抵抗特性と鉄道構造物への適用，第54回地盤工学シンポジウム（平成21年度論文集），pp.299-306，2009.
- 2) 佐藤正義・田地陽一・張至鎬・田蔵隆：直杭基礎との比較による斜杭基礎の耐震性能に関する遠心振動実験，防災科学技術研究所研究報告，第79号，pp.1-8，2011.
- 3) 木村 亮・牧野洋志・大川賢紀・亀井宏之・張 鋒：斜杭を有する群杭基礎の静的水平支持力特性，土木学会論文集 No. 722/III-61，pp.97-107，2002.
- 4) 阿部幸夫：ジオウイング・パイルⅡ，基礎工，Vol.36，No.12，pp.90-92，2008.
- 5) 日本道路協会：杭基礎施工便覧，pp.65，2007.1.