

場所打ち杭・地中連続壁の掘削形状の3次元可視化技術 3次元計測技術「T-Pile 3D Monitor」の開発

重光 達・平山 哲也

場所打ち杭や地中連続壁工事では、掘削した孔壁の形状を正確に把握することが、掘削精度の確保や孔壁崩壊の有無の管理に大変重要である。通常使用されている超音波側壁測定装置では、一度の測定で2断面4方向しかわからないため、正確に掘削孔の形状を把握するためには何度も測定する必要がある。それを解決するために、超音波センサーを回転させて掘削孔の形状を3次的に測定し可視化する装置を開発した。これにより、場所打ち杭の掘削精度や孔壁状況が正確に確認できるとともに、コンクリート打設量を正確に把握して残コン（廃棄物）やCO₂排出量の削減にも寄与することができる。

キーワード：基礎、場所打ち杭、超音波側壁測定装置、掘削精度、CO₂排出量削減

1. はじめに

場所打ち杭や地中連続壁（以下、杭・連壁）の構築工事では、掘削形状を正確に把握することが、施工の品質確保の観点から大変重要であり、主に杭径、鉛直精度、掘削時の孔壁の状態（大きな崩壊の有無）を確認するために、通常は全数で孔壁測定を実施する。特に近年では、杭支持力の向上を目的として先端部の形状を拡大する「拡底杭」も多く採用されており、杭・連壁の掘削形状の把握がますます重要になっている。

また、杭・連壁の掘削形状は掘削機の軌跡よりも大きいため、実際に打設するコンクリート量は設計よりも多くなるが、その量を正確に求めるための掘削形状の把握が難しいため余裕を持った手配を行った結果、打設時にコンクリートが余る場合も少なくない。

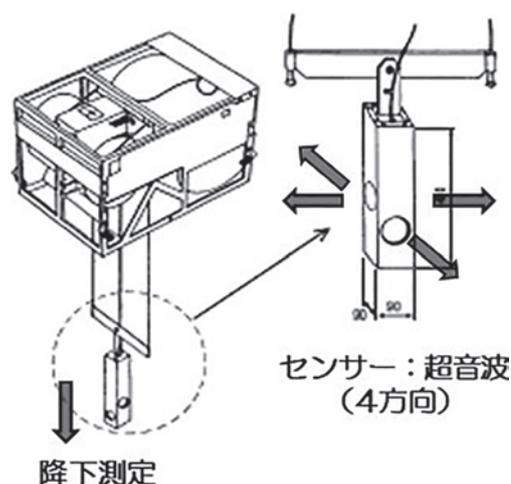
このように、多様な杭・連壁の増加、掘削形状の複雑化という環境の中で、杭の掘削形状を正確に把握することやコンクリート打設時の残コンを削減しCO₂排出量削減を実現することが、一段と重要になっている。

そこで当社は、通常の孔壁測定で使用する超音波側壁測定装置のセンサーを孔壁の円周方向に回転させて測定をし、取得した計測データをリアルタイムに可視化することで、杭・連壁の3次的な掘削形状を正確に把握することができる計測技術「T-Pile 3D Monitor」（以下、本装置）を開発した。

以下に、本装置の概要と特徴について、実際の場所打ち杭の施工での計測事例とともに報告する。

2. 従来方法の課題

杭・連壁のうち、泥水で孔壁安定を図るリバースサーキュレーション工法、アースドリル工法および地中連続壁工法は、掘削孔の傾斜や掘削形状の測定に、通常は超音波側壁測定装置を用いる（図—1）。一般的なこの装置は、超音波センサーが直行する4方向に設置されており、それを掘削孔内に降下させながら孔壁形状を測定するため、1回の測定では鉛直2断面4方向の測定しかできない。1回目で測定した断面以外の方向に杭が傾斜していたり、孔壁崩壊が発生している場合は、その孔壁の3次的な形状を正確に測定するためには、何度も角度を変えて杭孔に挿入して測定する必要があり、多くの労力と時間を要していた（図—2）。



図—1 超音波側壁測定装置

また、掘削した孔壁の形状は掘削機の軌跡よりも大きな形状となるのが一般的であるが、通常の超音波測定機により測定された形状は記録紙で出力され、グラフから掘削形状を読み取らなければならないために、正確な数値（掘削孔の大きさ）を求めることができない（図-3）。

さらに、この孔壁形状の測定記録で立体的な掘削体積（コンクリート打設量）を推定しなければならないため、通常は、設計量の数%割増しでコンクリートを余分に手配する。打設コンクリート量を正確に把握することが重要であるものの、精度が良くない推定値で計画するため、結果的に打設終了後に残コンクリートが生じることとなり、その廃棄物の削減とコンクリート製造時のCO₂削減も大きな課題の一つである。

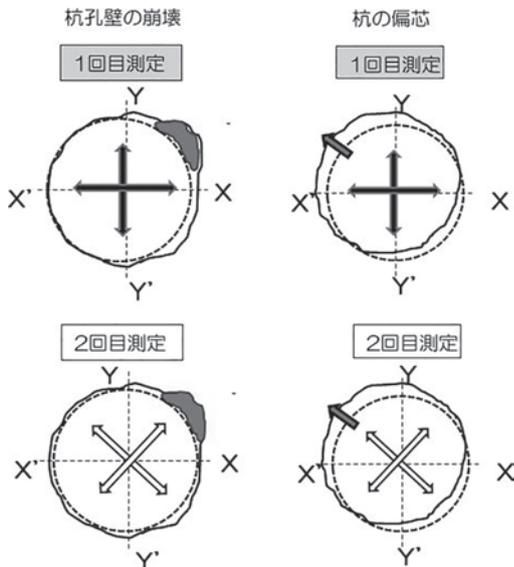


図-2 杭の掘削形状と測定状況

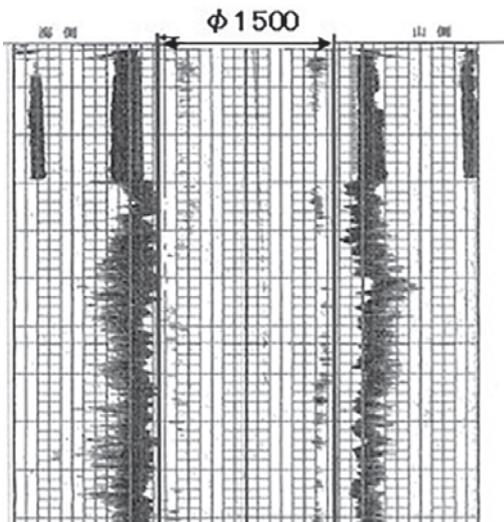


図-3 孔壁測定記録用紙（例）

3. 本装置の概要と特徴

本装置は、一般的な超音波側壁測定装置に回転駆動装置および降下制御装置を取り付け、それぞれに自動制御機能を持たせたものであり、測定時には平面方向と鉛直方向の測定ピッチを入力して測定を開始する。平面方向に超音波センサー（4方向）が90°回転しながら、設定したピッチで順次測定して360°全周の孔壁位置が測定できる（図-4）。設定した鉛直方向の測定ピッチで超音波センサーを自動降下させながら測定することで、掘削孔壁の3次元形状が測定できる。測定データは、平面と断面の掘削形状を現場に設置したノートパソコンにリアルタイムに表示させ、杭の精度や孔壁状況などがすぐに把握できる。また、測定完了時には3D化した孔壁形状を表示し、出力して、地盤中の杭・連壁の掘削形状をわかりやすく見える化することができる（図-5）。本装置の特徴を以下に示す。

(1) 複雑な掘削形状の正確な把握

杭・連壁の構築では、杭径や鉛直精度などの出来形確認が重要であるが、孔壁の状態は目視確認できないので、孔壁測定が唯一の検証作業となる。また、地盤の性状によっては掘削形状の保持（杭形状の保持）が難しく孔壁崩壊の発生が懸念される。孔壁崩壊が生じた場合には、所定の出来形および強度を有する杭の構

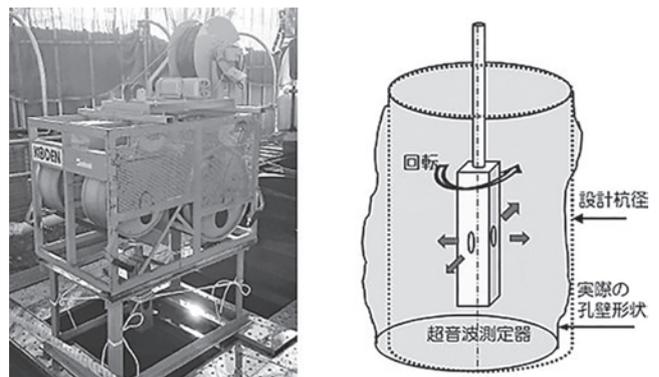


図-4 本装置の概要

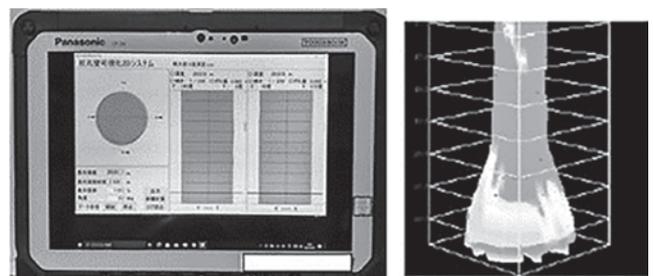


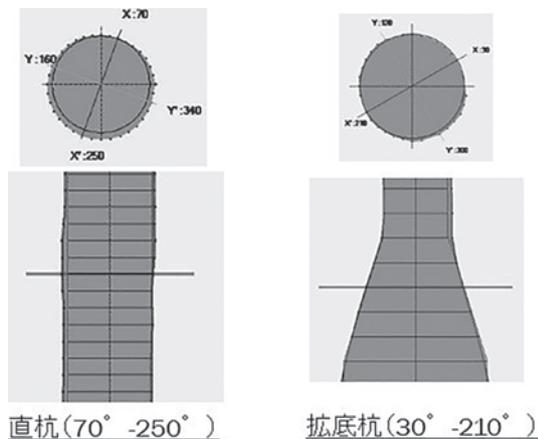
図-5 モニタリング画面と3次元形状表示例

築ができないばかりではなく、隣接杭や近接構造物に変状等が生じる場合もある。また、「拡底杭」ではその拡底部分の孔壁の角度と径が重要であり、大きな支持力を設計どおりに発揮できるように、拡底部の形状を正確に把握することが重要である。

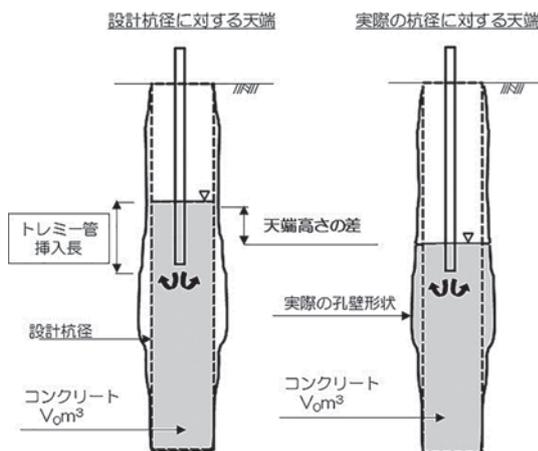
本装置では、孔壁の平面形状から杭の傾斜方向がわかるため、その方向の鉛直断面の孔壁状況を表示することにより杭の正確な出来形確認が可能となる。また、拡底杭などの複雑な形状でも正確な形状を把握することができる（図—6）。地盤の性状を完全に把握することは難しく、試験施工を含めた施工時の孔壁形状を、本装置を使用して正確に把握することが、杭の品質向上と孔壁崩壊防止のためにも重要である。

(2) 残コンクリート量および CO₂ 排出量の削減

杭・連壁のコンクリート打設では、コンクリート打設量とコンクリート打ち上がり高さ、トレミー管を引き抜くタイミングを施工計画書に記載する。通常は、コンクリート量は設計径から計算されるが、実際に掘削された孔壁形状は設計径よりも大きくなるため、必



図—6 測定結果出力 (例)



図—7 設計と実際のコンクリート天端高さの相違

要なコンクリート量は設計値よりも多くなる。また、打ち込んだ量に対するコンクリートの天端高さは低くなり、計画と実際がずれることが多い（図—7）。

これに対して本装置による測定では、各深度毎の平面形状データから、各断面の面積を算出して深度方向に積分することで実際に掘削された体積が算出され、必要なコンクリート打設量および打設量に対するコンクリート天端高さがわかる。したがって、コンクリート量を設定する際に従来のような「設計量の数%割増し」という不確実な数値から、実測値による確実性の高い数値を使用することができる。これにより、残コンクリートの削減やコンクリート製造運搬時の CO₂ 排出量削減に貢献できる。

(3) 施工時間の短縮が実現

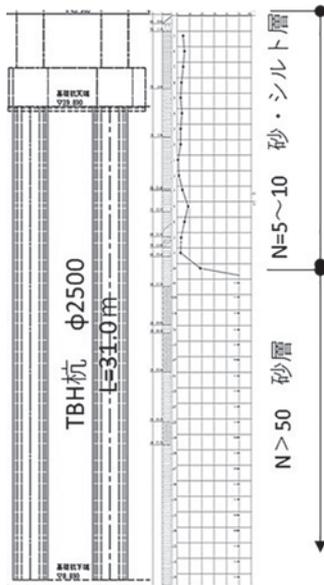
本装置を使用した場合の測定時間は、各深度でセンサーを回転して測定するため、従来方法の1回の測定時間よりも長い。しかし、前述のように、従来の装置で何度も測定する場合には本装置の方が短時間となる。試算によると、長さ約 40 m の杭では従来方法で2回測定すると約 70 分かかるのに対して、本装置の使用では約 50 分と短くなり、この短縮効果は従来方法での測定回数が増えるほど大きくなる。このように、掘削形状の計測時間の削減が可能となり、杭・連壁工事の施工の効率化を図ることができる。

4. 試験杭での計測による効果確認

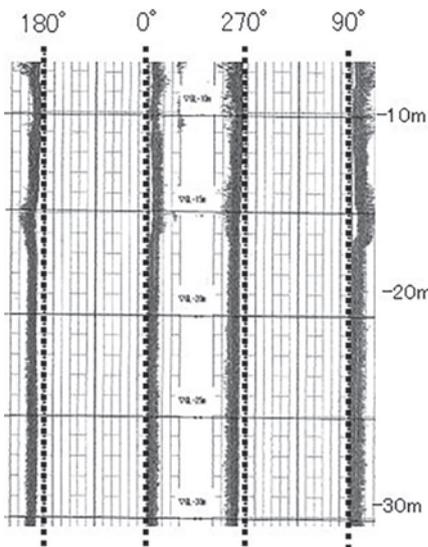
測定は鉄道連続立体化工事の橋脚の場所打ち杭 (TBH 杭 φ2,500 mm, 杭長 31.0 m) で行った。土質は GL-15 m 程度までが N=5~10 の砂、シルト層、GL-15 m 以深が N ≥ 50 の良く締まった砂層である（図—8）。本装置による測定は、平面方向を 10° ピッチ (36 点)、鉛直方向を 50 cm ピッチで行った。この設定ピッチは、φ2,500 の杭孔壁円周方向に対しては約 22 cm 間隔、深度方向には 50 cm 間隔でデータ取得できしており、杭の掘削孔全体の孔壁形状の把握には十分な量のデータであると考えられる。

(1) 掘削形状の測定結果

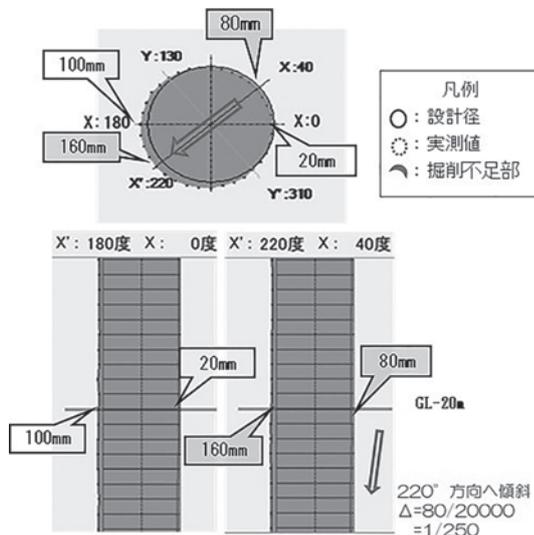
今回測定した杭の測定データの一例を図—9, 10 に示す。図—9 は従来の超音波測定機による出力結果であり記録紙に印字されたものである。杭の設計径と比較すると、杭径は設計値 (φ2,500 mm) より大きくなっており規格値を満足しているが、孔壁形状は 180° と 270° で 100 mm 程度大きくなっている。この



図一八 試験杭の概要



図一九 試験杭での従来の測定記録



図一〇 試験杭での本装置の測定記録

ことから、杭は180°～270°の間の方向へ杭が傾斜していることが考えられるが、正確にどの方向に傾斜しているかについては不明である。

これに対して、図一〇が本装置の出力画面である。平面図はGL-20 mの位置のデータを掲載しているが、従来装置では測定していない方向の、220°で180 mm大きくなっており、40°方向には80 mm小さくなっている。杭径は設計径以上を確保できているが、杭の偏芯方向が220°方向に生じていることがわかる。また、鉛直断面(0°～180°)と(40°～220°)の2断面のデータからも、平面図と同様に杭が220°方向に傾斜していることがわかる。従来の測定では、1回目の測定断面と異なる方向に杭が傾斜していた場合には、何度もセンサーの方向を変えて測定しなければならないため、1回の測定で傾斜方向が把握できたことで本装置の有効性が確認されたといえる。

杭の精度は、杭の掘削孔の設計位置に対するズレであり、今回のように全断面で杭径が設計径よりも大きくなっている場合は、孔壁が設計位置よりも小さくなっている部分で杭傾斜を算出する。この試験杭でのGL-20 m位置で孔壁が設計値よりも小さい場所の最大値は、40°方向で-80 mmであり、掘削の鉛直精度は、 $\Delta = 80/20,000 = 1/250$ で、鉛直精度の規格値(1/50)を満足することは確認された。

また、今回の杭では孔壁の大きな崩壊などは見られなかったが、これに関しても、本装置を使用することにより、1回の測定で孔壁状況を全周、全長にわたって確認することができた。

(2) 正確なコンクリート量の算出と残コンの削減

今回の試験杭でのコンクリート打設量と天端高さの関係を図一〇に示す。図中の破線が設計径(φ2,500)に対するコンクリート打設量と天端高さであり、実線が本装置の測定データから算出した掘削形状に対するものである。実測体積は設計値よりも大きいため、同じコンクリート打設量に対する天端高さは低くなっている。コンクリート打設時の実測値は図中の点で示されているが、本装置の測定データから作成した曲線とほとんど同じであり、本装置による測定結果が的確に掘削体積を把握できることがわかる。

コンクリート打設量は、設計杭径に対する設計値(158 m³)に対して、本装置の測定値から計算した量は167.5 m³であり、約9.5 m³多かった。仮に、コンクリートを設計量の10%増しで注文した場合、その割り増し数量は15.8 m³となりV=15.8-9.5=6.3 m³程度(設計量の約4%)が余ることになり、本装置に

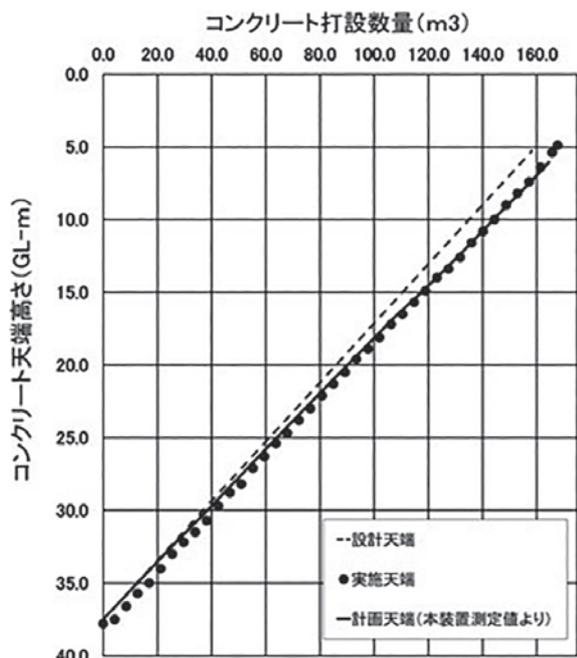


図-11 試験杭でのコンクリート打設量と天端高さ

よる測定の効果が確認された。

このように、本装置の測定データが、場所打ち杭のコンクリート量の正確な算出や、打設計画・打設管理に有効に使用できるとともに、残コンの削減による廃棄物削減やCO₂排出量の削減に寄与することが確認された。

(3) 孔壁測定時間の短縮

今回の本装置での測定の所要時間を従来の測定と比較した結果を表-1に示す。前述のように、今回の杭が220°方向へ傾斜していることを考えると、従来方法では2回以上の測定が必要となる。仮に、2回目で正しい傾斜方向を確認できたとすると、1回の測定が約32分程度であるため、据替の時間も含めて約70分の時間を要する。これに対して、本装置では実際の所要時間は50分であり、従来方法で2回測定する時間よりも短い時間で実施できる。杭の正確な出来形確認や大きな孔壁崩壊の有無を明確にするためには、従来方法では何度も計測する必要があったが、本装置の適用により地盤掘削形状を短時間で正確に把握できる

表-1 試験杭での測定時間の比較

	従来測定 (2回)	本装置での測定	
		計画	実測
測定時間	64分 (32分/回)	48分	50分
据替時間	5分	-	-
合計	69分	48分	50分

ため、掘削・計測工程の効率化が可能となり、施工時間の短縮が実現できる。

5. おわりに

今回開発した杭孔壁形状の3次元計測技術「T-Pile 3D Monitor」は、杭の精度確認や孔壁崩壊状況把握、さらにはコンクリート打設管理手法の精度向上など、場所打ち杭の施工管理・品質管理手法として有効である。また、本装置を使って、先端拡底杭の拡底部形状や地中連続壁のような矩形平面形状でも有効に測定できることも確認できている。さらには、測定データは任意の断面で出力できて杭の出来形確認書類として活用できることなど、生産性の向上にも大きく寄与するものである。今後、拡径杭を含めた場所打ち杭や地中連続壁の実施工に広く展開して、品質管理精度の向上や生産性の向上を図っていく予定である。

JICMA

【筆者紹介】

重光 達 (しげみつ とおる)
大成建設株式会社
土木本部 土木技術部 地盤・環境技術室
専任部長



平山 哲也 (ひらやま てつや)
成和リニューアルワークス株式会社
機械統轄部
部長

