建設空間 XR システム 「T-Real」

森　研造 [1]

[1] 東洋建設株式会社　土木事業本部　土木技術部　部長.

本システムは，自動追尾式トータルステーションや GNSS 端末などによる施工管理システムの計測情報をもとに，3D モデルで表現した施工対象物（杭やケーソン，ブロックなど）の設計位置への誘導をパソコン上の VR（仮想現実）空間においてリアルタイムに表示する。さらに，360 度カメラで撮影した現場映像を背景として合成した実写映像空間において，AR（拡張現実）技術によって，現況映像に 3D モデルで表現した施工対象物の誘導状況を重畳表示する。これにより，オペレータや作業指揮者が作業状況を視覚的・直感的に把握できるため，作業の効率化・省人化や安全性・品質の向上に貢献できる。

本報では，既製杭打撃工法に用いた杭誘導システムの概要および現場への導入事例について報告する。

キーワード：実写映像空間，VR空間，現場映像，3Dモデル，デジタル技術

1.　はじめに

近年，建設業界では人手不足や担い手不足，さらには労働者の高齢化・若年化などが深刻化している。そのため，建設 DX を推進してデジタル技術を計画や設計，施工のさまざまな場面で取り入れることにより，業務の効率化や省人化，安全性・品質の向上，さらには仕事のプロセスや働き方の変革などを進めている。

一般的な既製杭の打撃工法は，杭の建込み，ハンマによる打込み，支持層到達の確認，打止めの作業工程で構成される。従来，これらの施工管理は主に人手に頼っており，例えば，杭の建込みや打込み中の誘導には，トランシットを用いて 2 方向から杭の傾斜や杭芯のずれを目視確認する方法が使われてきた。また，支持層到達や打止め時の杭の高さ管理には，杭頭に配置したスタッフの値をレベルで読み取る方法，杭の打止め管理には，杭側面に貼った記録紙に鉛筆で変位量を記録したのち手作業で解析する方法が一般的に用いられてきた。これらの管理方法は，最低でも 4 名の技術者を必要とし，今後の技術者不足を考慮すると，さらなる効率化や省人化が求められる。また，いずれの管理方法も目視による確認や計測，手作業での記録が中心であり，施工管理や記録のデジタル化が進んでおらず，デジタルデータを現場の効率化や省人化，働き方の変革などに十分活用できていないのが現状である。

こうした課題を解決するため，杭の誘導から打止め管理まで一連の施工管理を合理化・デジタル化するシステム「打設杭トータル施工管理システム Pile T」を自社開発した（図-1，2参照）。さらに今回は，この VR 空間を拡張して，360 度カメラで撮影した現場映像を背景として合成した実写映像空間を構築し，実際の映像と杭の打設状況などの 3D モデルを重畳表示する「T-Real」を開発した。本報では，このステムの概要および現場への導入実績について報告する。

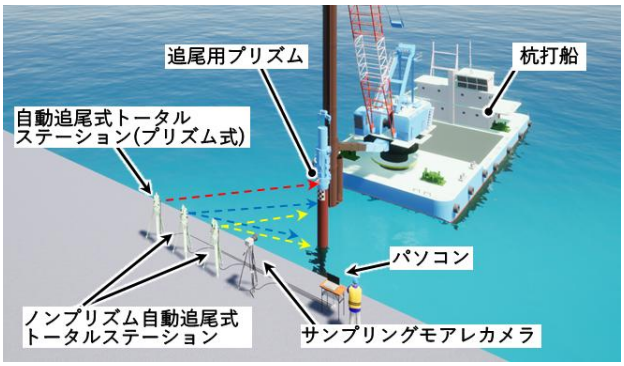


図-1　杭の計測概要図

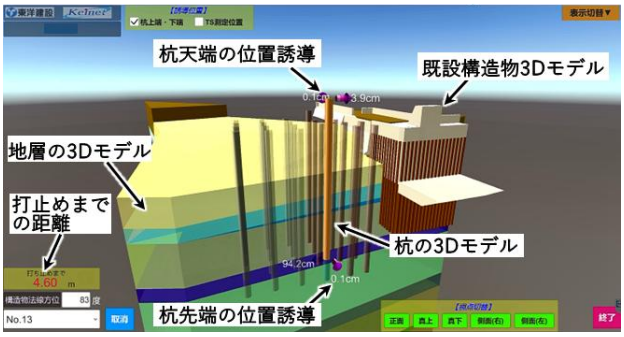


図-2　杭誘導 VR 画面

2. システム概要

VR 空間における杭の誘導は，3 台の自動追尾式トータルステーションによる計測情報をもとに，パソコン上の VR 空間に 3D モデルで表現した杭の打設状況をリアルタイムに表示する。VR空間では，杭の天端と先端の2箇所に対して杭芯のずれを修正するよう誘導矢印と誘導量をリアルタイムに表示するため，所定位置への誘導や傾斜の修正を正確に行える。これにより，オペレータや作業指揮者は 360 度の自由視点で誘導状況を確認しながら実際の杭打設作業を行うことが可能となる。杭の高さ管理では，ハンマに取り付けたプリズムを自動追尾式トータルステーションにより計測することで，支持層や打止めまでの杭先端の距離を正確にリアルタイム表示する。また，VR 空間には，杭だけではなく既設構造物や土質調査結果にもとづく地層などの 3D モデル，現地盤の測量点群データなども登録でき，デジタル技術を活用した施工管理が可能となる。

実写映像空間における杭の誘導は，360 度カメラで撮影した現場映像を VR 空間に取り込み背景として合成することで，360 度カメラの設置位置を視点とする実写映像空間を構築する。その上で，実写映像空間の所定位置に 3D モデルを重畳表示するとともに，現場映像に映る打込み中の杭に対して，自動追尾式トータルステーションの計測情報をもとに，杭の天端と先端の 2 箇所に杭芯のずれを修正するよう，誘導矢印と誘導量をリアルタイムに表示する。また，杭の高さ管理は，VR 空間と同様に支持層や打止めまでの杭先端の距離を正確かつリアルタイムに数値で表示する。これらにより，3D モデルでは表現が難しかった動きのある作業員や，作業進捗に伴い移設が必要となる杭の定規材なども映像により視認でき，オペレータや作業指揮者が現場状況を視覚的・直感的に把握しながら杭打設作業を行うことが可能となる。図-3 に本システムを用いた杭の誘導概要を示す。

3. 主な機能および特徴

(1) 情報空間の切り替え

本システムでは，杭の誘導中に VR 空間と実写映像空間を自由に切替えることが可能である。これにより，VR 空間では地中や水中などの不可視箇所を 3D モデルで可視化できる一方，実写映像空間では作業員の退避状況や打込みの杭と定規材との接触の有無など，現場の実状を視覚的・直感的に確認できるため，誘導中の多面的な安全・品質管理に寄与する。図-4 に本システム運用中のシステム画面を示す。

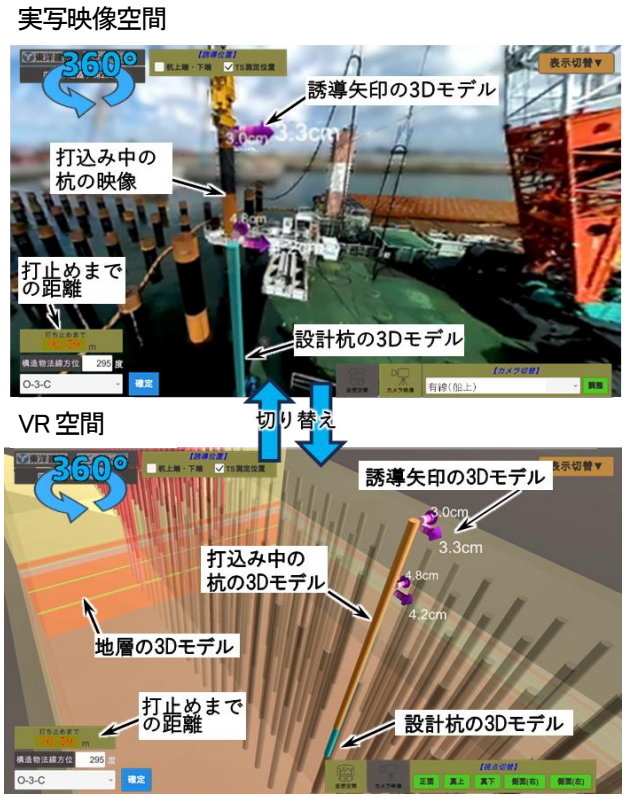


図-4　運用中のシステム画面

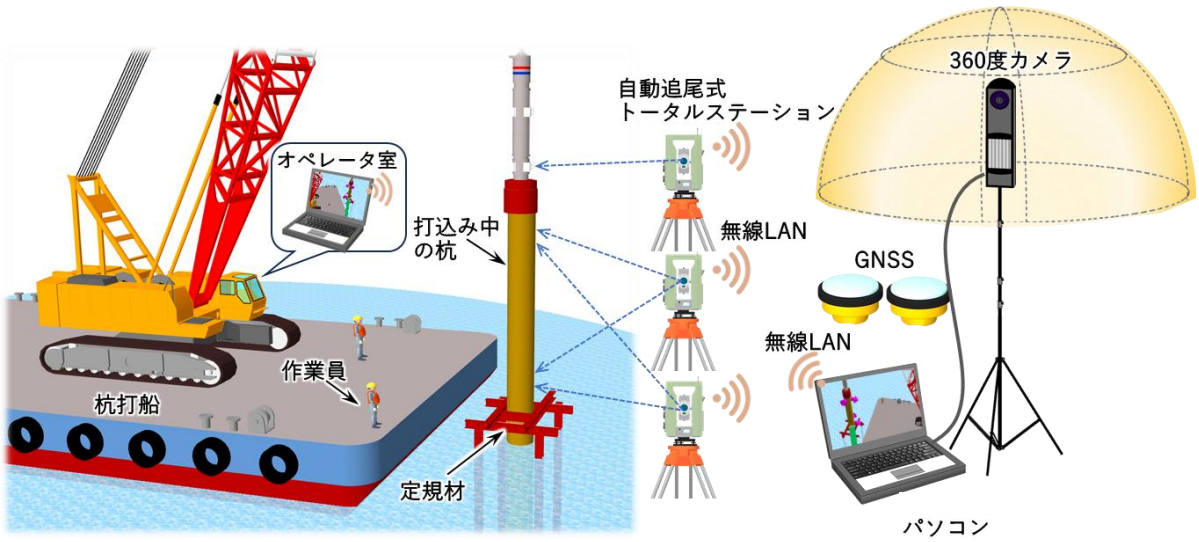


図-3　杭の誘導概要図

(2)　現場映像の取得方法

システムの実写映像空間では，360 度カメラの設置位置を視点に杭打設作業を 360 度方向から自由に確認できる。360 度カメラによる現場映像の取得方法には，有線および無線方式によるリアルタイム取得のほか，録画取得にも対応している。リアルタイム取得では，作業に対する即時性を確保できる一方，録画取得では，さまざまなカメラ視点から撮影した映像の登録が可能であり，杭打設作業中のオペレータが，必要に応じてカメラ視点を切り替えて確認したい場所を把握できる利点がある。

(3)　3D モデルの表示方法

実写映像空間においては，現場映像に 3D モデル情報を重畳表示するが，この際，3D モデルが映像前面に表示されるため，実際には 3D モデルより手前にある現実物体が 3D モデルによって隠れる場合や，目の錯覚で 3D モデルと現実物体の位置関係が不明確になる場合などがある。本システムでは，杭や既設構造物，地層分布，誘導矢印などの 3D モデルに対し，杭の誘導中でも表示・非表示の切り替えや透過度の調整をリアルタイムで実施できる。この機能により，現場映像に映る現実物体の遮蔽や目の錯覚を低減し，オペレータが必要な情報を視認できる。本機能の詳細は図-5 に示す。



図-5　表示・非表示の切り替え及び透過度の調整機能

(4)　GNSS 情報との連動

実写映像空間に 360 度カメラで撮影した現場映像の情報を正確に反映するためには，カメラの座標（位置）と方向角（向き）を適切に紐づける必要がある。本システムでは，360 度カメラの位置と向きを固定して使用するだけでなく，杭打機や杭打船などの移動体に設置する際には，GNSS（全球測位衛星システム）の位置情報と連動させてカメラの位置と向きをリアルタイムに補正する機能を備えている。

具体的には，2 台の GNSS アンテナを用いて，それぞれの相対座標からカメラの座標を算出し，2 点間ベクトルによってカメラの方向角を算出する。これにより，360 度カメラを設置した移動体の動きに合わせて実写映像空間において現場映像が追従し，さらに自動追尾式トータルステーションの計測情報をもとに杭および誘導矢印・誘導量などの 3D モデルを実写映像空間の正確な位置に重畳表示する。本システムの GNSS 測位方式には，GNSS の位置情報に加え電子基準点から求めた補正情報をネットワーク経由で利用することで，センチメートル単位の高精度測位が可能な VRS 方式（仮想基準点方式）を採用している。また，本機能には，現地の既知点を用いて，GNSS の位置情報を現地座標に適合させるサイトキャリブレーション技術も付属する。これらにより，実写映像空間において現場映像と 3D モデルの表示誤差を最小化する。写真-1 に GNSS アンテナの設置状況を示す。

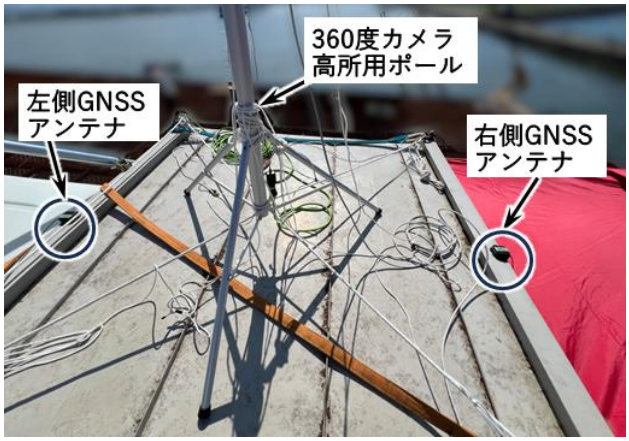


写真-1　GNSS アンテナの設置状況

4.　現場への導入事例

(1)　概要

対象現場では，φ1300mm，L=約 45m の鋼管杭をハーフセップ台船（以下，台船と記載）により，バイブロハンマを用いて支持層手前まで打込み，その後，油圧ハンマに取り替えて最終打撃を行った。

本システムで杭の誘導に使用する 3 台の自動追尾式トータルステーションは，直交 2 方向の位置に設置する必要がなく，任意の場所に設置可能である。現場では，ハンマの振動影響が及ばない既設護岸上に設置した。誘導中は，杭の位置・高さ追尾および計測が自動で実施されるため，従来，トランシットやレベルを用いて，合計 3 名の技術者で行っていた杭の傾斜や杭芯のずれの目視確認作業およびスタッフ読み取り作業が不要となる。また，現場映像を撮影する 360 度カメラは，既設護岸上と台船上の 2 箇所に設置した。その際，広範囲かつ高所から映像を取得できるよう高所用伸縮ポール（最長 7.5m）を使用した。現場映像の取得方法は，作業に対する即時性を重視して有線方式を採用した。ここで，写真-2 に自動

追尾式トータルステーションによる現場計測状況，写真-3 に 360 度カメラの現場設置状況を示す。



写真-2　現場計測状況

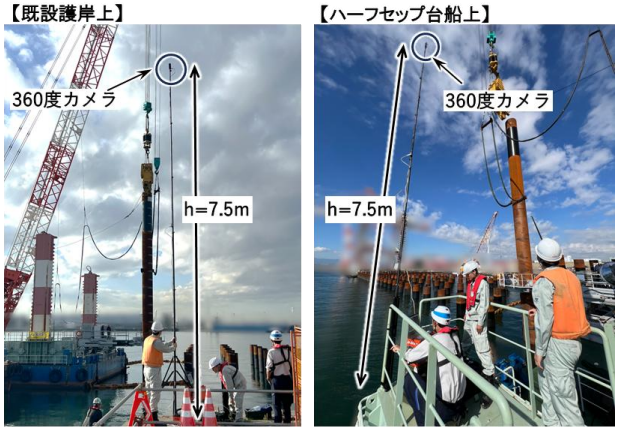


写真-3　現場設置状況

(2)　結果

杭の誘導は，自動追尾式トータルステーションから得られる計測情報をもとに，実際の杭の位置や傾斜，高さを自動計算し，1mm 単位で設計位置からのズレをガイダンスすることができた。実写映像空間における現場映像は，配信遅延がなくリアルタイムで杭の誘導が可能であった。なお，台船上の 360 度カメラで撮影した現場映像では，ハンマ打撃中の振動によって僅かに上下の揺れが見られたが，杭の誘導を支障無く行えた。さらに，台船上の 360 度カメラで撮影した現場映像の方が，既設護岸上よりも杭の施工箇所に近いため，作業員や杭の定規材などを詳細に確認でき，現場状況に即応した安全管理および品質管理を実施できた。また，杭の誘導中には，VR 空間へ適時切り替えを行い，杭先端の深度が地層のどの位置に到達しているかを 360 度方向から自由に確認できた。結果，本システムの導入により，デジタル技術を活用した高度な施工管理が実現可能であり，杭打設作業の効率化や省人化，安全性・品質の向上に繋がると評価した。

なお，本システムを導入した鋼管杭の打設出来形は，杭頭中心位置が設計許容誤差 100mm 以下に対し 82mm 以下，天端高が設計許容誤差±50mm 以下に対し±20mm 以下，傾斜が設計許容誤差 2 度以下に対し 0.6 度以下に収まっており，出来形精度が向上した。

5.　おわりに

今回，Pile T の杭誘導 VR 画面を拡張・高度化した新システム「T-Real」を開発した。本システムを使用することで，3D モデルだけでは表現が難しかった動きのある作業員や作業の進捗に伴い移設が必要となる杭の定規材なども映像で視認でき，オペレータや作業指揮者が現場状況を視覚的・直感的に把握しながら杭打設作業を行うことが可能となった。本システムを現場に導入した結果，デジタル技術を活用した高度な施工管理が実現可能であることが確認できた。

今後は，本システムで施工中に取得したデジタルデータを活用し，システムの AI 連携や施工の遠隔化・自動化などに発展させ，DX 推進を継続する所存である。

なお，本技術に関する特許は出願中である（特願 2024-220052）。