

# 高精度 3 次元モーションキャプチャによる画像変位計測を用いた計測事例について

前田建設工業株式会社 正会員 ○川西 敦士

前田建設工業株式会社 正会員 薛 天樂

## 1. はじめに

昨今の建設業界では、動体の 3 次元計測による挙動管理が重要視されており、筆者らは計測の自由度や高い精度による計測が可能な 3 次元モーションキャプチャ画像変位計測システム「Venus3D」<sup>1)</sup>を用いることで、施工時の様々な課題が解決することができると考え、現場での 3 次元計測を試みた。本稿では、以下 2 件の計測事例について報告する。計測事例 1 は、液状化対策工事で用いられる薬液注入に対する施工管理の一つとして画像変位計測による自動施工管理を試みた事例である。安価に高精度な計測が可能かつ薬液注入施工機との連動施工が可能なシステムとして、多点に同時に連続計測が可能な画像変位計測を用いた。薬液注入時に基準値を超えた変位が生じた場合には、注入材を自動停止させるシステムの適用検討を行った。計測事例 2 は、仮橋施工における H 形鋼杭の支持層着底管理として、画像変位計測による施工管理を試みた事例である。短時間で精度良く測定できる手法として、画像変位計測を用いてバイプロハンマ打込み時におけるバイプロハンマ本体と H 形鋼杭の挙動を計測し、支持層管理<sup>2)</sup>の適用検討を行った。

## 2. 画像変位計測概要

画像変位計測とは、高性能カメラを用いて計測マーカーと呼ばれるターゲットを認識し、画像変位システムによる 3 次元座標を算出して計測する。特徴としては、①±0.1mm の高精度で 3 次元計測が可能であること、②高性能カメラ認識範囲内での多点での同時計測および高いサンプリングレート（最大 250Hz）による連続計測が可能であること、③夜間計測では自発光マーカーによる計測が可能であることが挙げられる（写真-1）。

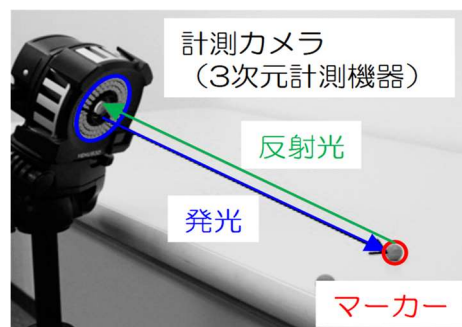


写真-1 画像変位計測概要

## 3. 計測事例 1

### (1) 計測概要

本工事は、湾岸埋立地における民間施設のパイプラック基礎直下の液状化対策として、薬液注入工法の一つである浸透固化処理工法<sup>3)</sup>を採用した。本工事は基礎断面概要および注入概要を図-1 に、基礎平面配置概要を図-2 に示す。液状化対策厚さは、「高圧ガス設備等耐震設計指針（レベル 2 耐震性能評価）」に準じ、めり込み沈下量の算定式により設定した。また、液状化対策に必要な強度として、 $q_{\text{lock}}=90\text{kN/m}^2$ を設定し、事前室内配合試験結果よりシリカ濃度 8%で施工を行った。

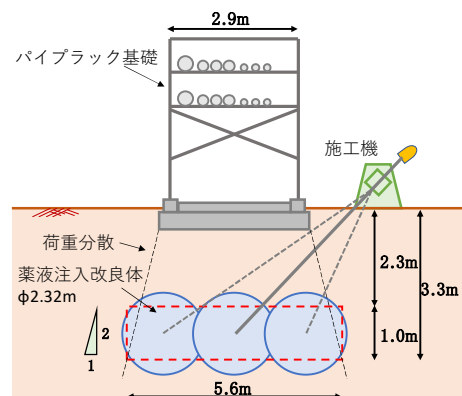


図-1 基礎断面および注入概要

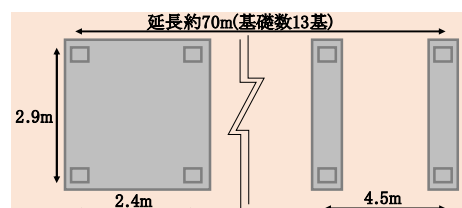


図-2 基礎平面配置概要

$$S_E = \mu_h \cdot q_i \cdot \sqrt{A_i} / E_i$$

ここに、 $S_E$  : めり込み沈下量

$\mu_h$  : 地盤ポアソン比, 厚さ, 基礎底面形状から決まる係数

$q_i$  : 各液状化層に作用する荷重

$A_i$  : 分散に伴う各液状化層の占める面積

$E_i$  : 液状化後のヤング係数 ( $=2800 \times N \times \alpha$ )

$\alpha$  : 液状化後の剛性低下率

キーワード 画像変位計測, 浸透固化処理工法, 自動計測管理, バイプロハンマ, 支持層管理

連絡先 〒102-8151 東京都千代田区富士見 2-10-2 前田建設工業(株)土木事業本部土木設計部 TEL03-5276-5166

## (2) 自動施工管理概要

薬液注入時のパイプラック基礎の変位測定には、通常のレベル計測に加え高性能カメラによる画像変位計測を用い、注入機械と連動した自動施工管理を行った。画像変位計測による3次元座標算出から、基準鉛直変位を超えると自動的に施工停止となる薬液注入自動制御システムを開発した。具体的には、注入ポンプと施工機の間には注入材リターンバルブを設置し、このリターンバルブと薬液注入自動制御システム（図-4）を連動させることで、基準鉛直変位を超えた場合には、注入材が作液プラントへ送られる仕組みである（図-3）。薬液注入自動制御システムの特徴としては、①細分化した変位と注入時圧力を連動監視することで、薬液注入時の高精度な状態監視が可能、②変位状態の遠隔監視により変位異常時には携帯端末への情報送信も可能、④データ記録は電子データで保存可能、④本システムの設置は全ての薬液注入工法に適用可能である、ことが挙げられる。

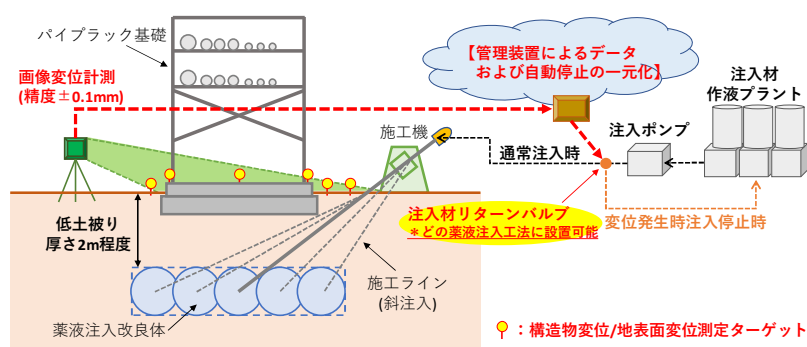


図-3 薬液注入自動制御システム全体フロー



図-4 自動制御システム画面

## (3) 計測結果

画像変位計測と自動制御システムを用い、基礎の鉛直変位を高精度かつ連続的に計測することで、基準値を超えた変位は発生しなかった。画像変位計測による鉛直変位計測状況を図-5に、基礎に貼り付けたマーカを写真-2に示す。また、注入完了後にボーリングによるコア採取を行い、一軸強度試験では設計基準強度 $q_{\text{uck}}=90\text{kN/m}^2$ に対して若干強度不足のコアがあったが、浸透固化処理工法技術マニュアルに基づくシリカ含有量試験<sup>2)</sup>により改良前後のシリカ含有量を測定することで、十分な改良効果が得られていたことを確認した。

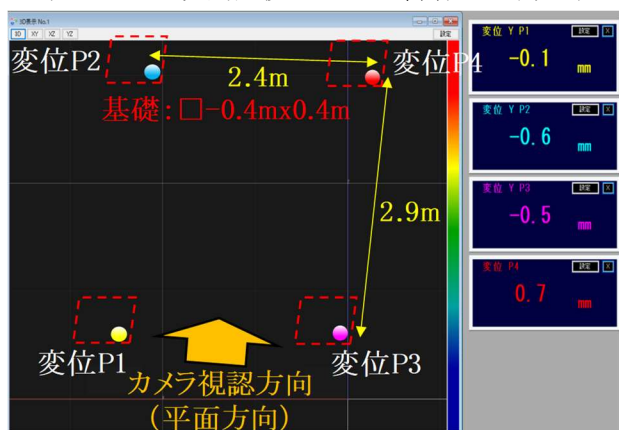


図-5 画像変位計測による鉛直変位計測状況



写真-2 基礎に貼り付けたマーカ

## 4. 計測事例2

### (1) 計測概要

本事例は、地盤が異なる2箇所（以降、地盤1および地盤2と称する）において、H形鋼杭を地盤に打込む時の画像変位計測を実施し支持層管理の適用検討を行った。地盤1における計測は、H形鋼杭（350×350×12×19, L=10.0m）を電動式バイプロハンマ（トーメック製:FM2-80, 出力=60kW, 周波数=18.3Hz, 空転時振幅値=9.5mm）で地盤に打込んだ際の、バイプロハンマとH形鋼杭の挙動を、打ち込み開始時～支持層着底まで計測した。支持層は、GL-4.0m～GL-12.0mの玉石混じり砂礫層（N値50以上を含む）である。計測マーカは、パイプ

ロハンマチャック部と、H 形鋼杭の上端から 2.0m 端部に取り付けて、4 台のカメラで計測した（写真-3）。地盤 2 における計測は、H 形鋼杭（400×400×13×21, L=12.0m）を油圧式バイプロハンマ（DIESEKO 製:PVE2308, 周波数=38.3Hz, 最大振幅=23mm）でプレボーリング孔に打込んだ際のバイプロハンマの挙動を、支持層着底（風化花崗岩, D~CM 級程度）まで計測した。計測マーカは、バイプロハンマの油圧モーター側面部とサブレッサー（遮断部）側面部に取り付けて 2 台のカメラで計測した（写真-4）。ただし、狭隘な現場でカメラの設置位置などが制限されたため、施工基面より天端が低くなる H 形鋼杭の挙動は計測できていない。

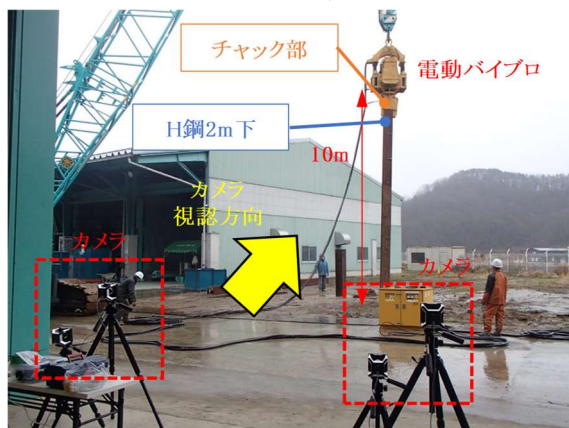


写真-3 計測マーカ位置（地盤 1）

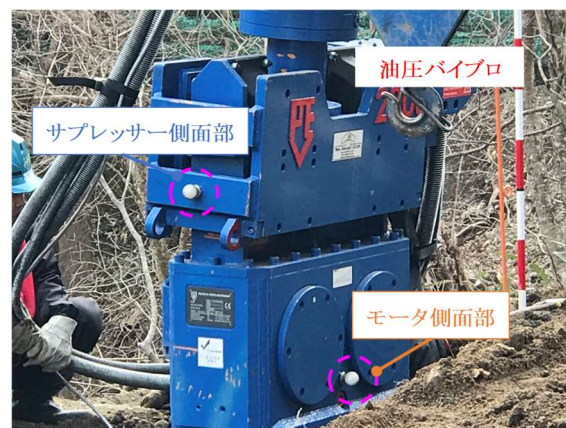


写真-4 計測マーカ位置（地盤 2）

## (2) 計測結果

地盤 1 でのバイプロハンマ打込み時における、支持層前と支持層変化点での、チャック部と H 形鋼杭部の測定結果を図-6 に示す。すべてのデータで、バイプロハンマの周波数や振幅値が高精度で確認することができた。支持層前では、チャック部および H 形鋼杭ともに、 $A_v=7.0\text{mm}$  の片振幅幅値を維持しながら深度方向に変位する挙動が確認できた。支持層変化点では、片振幅幅値が徐々に小さくなり、チャック部では、支持層からのリバウンドの影響で波形を乱しながら、片振幅幅値は  $A_v=1.0\text{mm}$  に、H 形鋼杭では、波形の乱れは確認されずに、片振幅幅値は  $A_v=0.5\text{mm}$  に収束した。図-7 に移動平均速度の経時変化を示す。支持層に至るまでと、支持層に到達してからで、移動平均速度に明瞭な差が確認された。本結果と支持力値との相関関係を考察するにはデータ不足であるが、本技術が新しい支持力管理手法の開発に寄与できる可能性は示されたと考える。

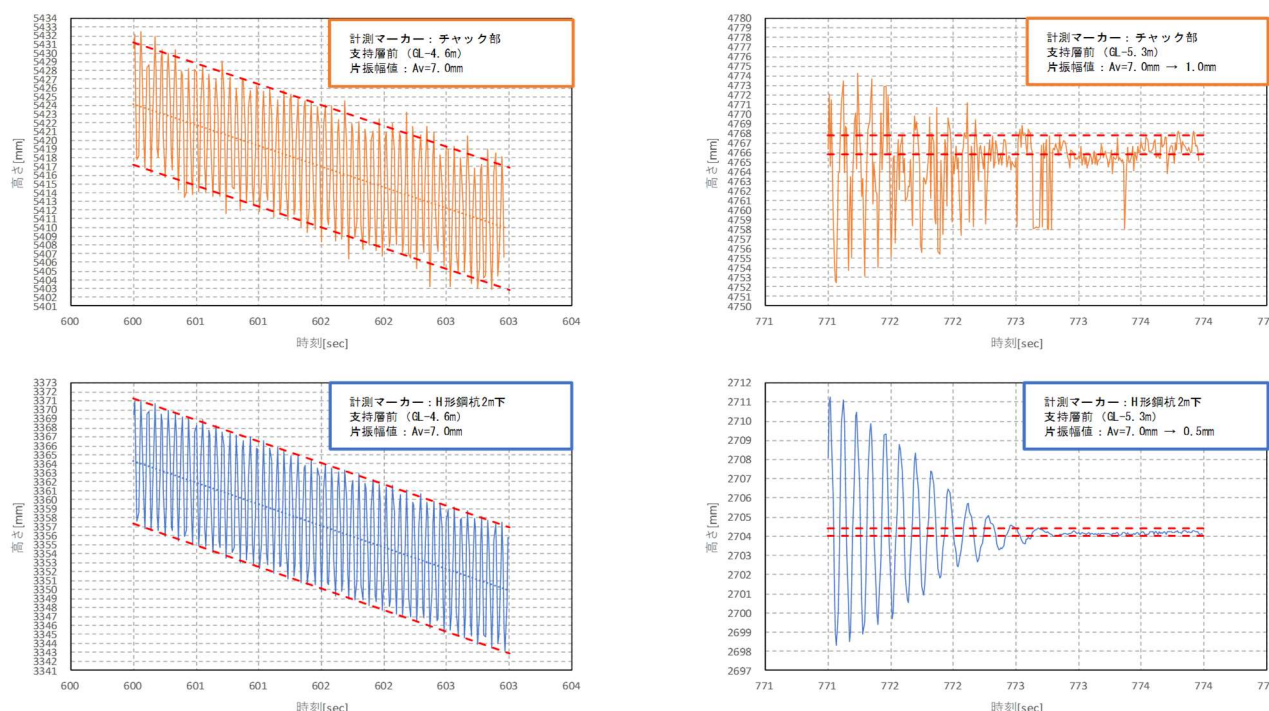


図-6 打込み時におけるバイプロハンマ部と H 形鋼杭の挙動（地盤 1）

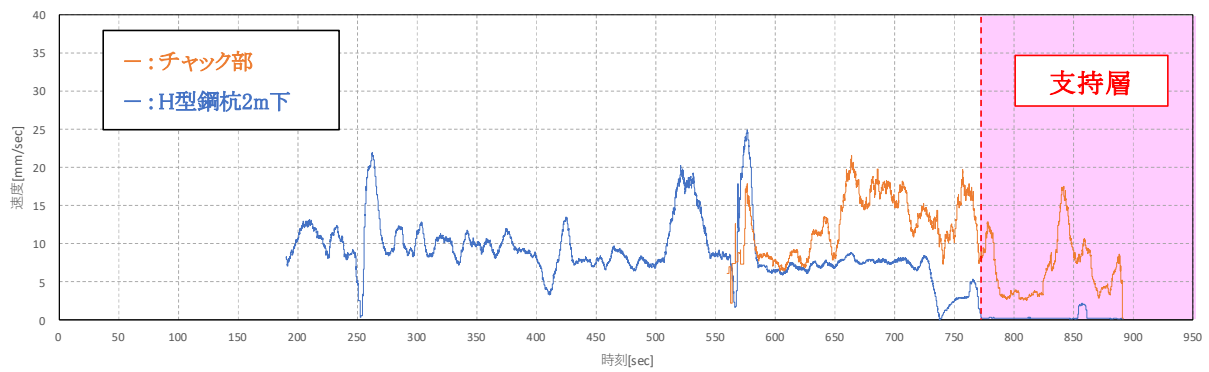


図-7 移動平均速度（2sec）の経時変化（地盤 1）

地盤 2 におけるの計測結果を図-8 に示す．支持層前では，油圧モーター側面部で  $A_v=3.0\text{mm}$ ，サプレッサー側面部で  $A_v=0.4\text{mm}$  の片振幅値を維持しながら，深度方向に変化する挙動が確認できた．サプレッサー側面部での波形に乱れがないことから，振動が吸収されている挙動を高精度で確認できることが分かった．支持層変化点でのサプレッサー側面部の片振幅値は，最終的に  $A_v=0.3\text{mm}$  収束した．機材の設置環境の影響で，油圧モーター側面部の挙動は確認できなかったが，サプレッサー側面部においても高精度で波形が得られたことから，油圧モーター側面部でも，試験 A と同様に支持層で収束された波形が得られるものと推測する．

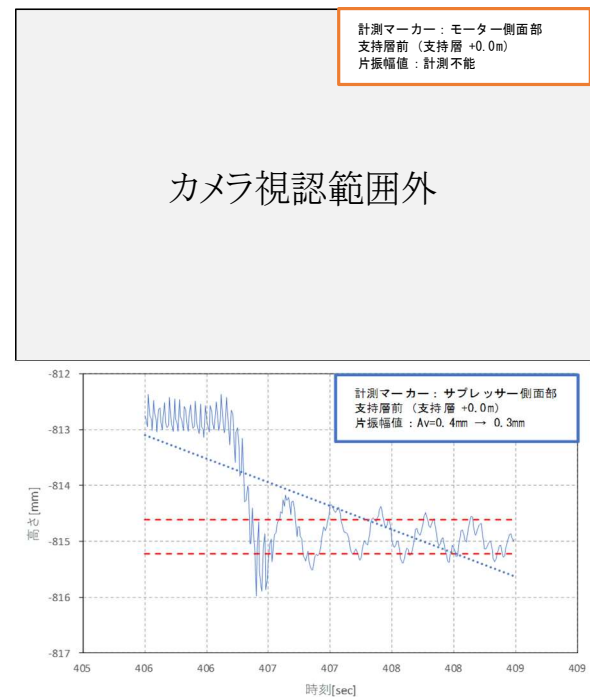
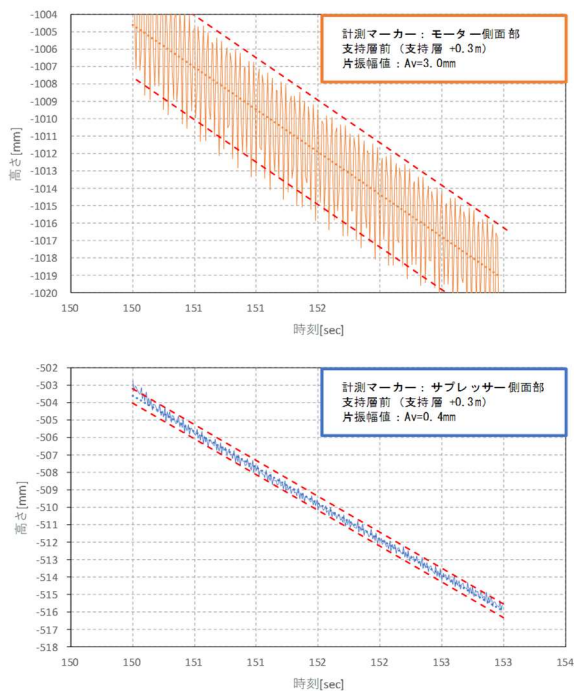


図-8 打込み時におけるパイロハンマモーター側面部およびサプレッサー側面部の挙動（地盤 2）

## 5. まとめ

計測事例 1 では，薬液注入の施工管理方法の一つに画像変位計測による施工管理を適用し，その有効性を確認した．地盤変状が発生する可能性が高い薬液注入において，変位発生初期段階を把握することで施工を進めながら変位抑制対策も進めることが今後可能になると思われる．計測事例 2 では，画像変位計測でパイロハンマ打込み時に発生する細かい挙動が確認することが可能となり，今後新たな支持層管理手法の確立に役立たい．画像変位計測は，本稿 2 件の計測事例以外にも高精度・高密度の変位情報取得を活かした計測事例を継続して増やし，様々な施工管理の課題解決に取り組んでいきたい．

## 6. 参考文献

- 1) 佐藤真平：従来技術を応用した新 3 次元モーション計測システムの紹介，映像情報 industrial，2013.2
- 2) バイブロハンマ設計施工便覧，バイブロハンマ工法技術研究会，2015.10
- 3) 浸透固化処理工法技術マニュアル，(財)沿岸技術研究センター，2010.6