

2023年度成果報告会 プログラムNo.29

風力発電等技術研究開発 洋上風力発電等技術研究開発 洋上風力発電低コスト施工技術開発

硬質地盤における ロータリー式パイルトップドリリング及び 杭頭水中測量システムの施工技術実証

発表日：2024年02月01日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

発表者名 黒田俊治 西森拓哉

*団体名(企業・大学名など) 深田サルベージ建設(株)

問い合わせ先 深田サルベージ建設HP：<http://www.fukasal.co.jp/index.html>

1. 目的

本事業は、硬岩での掘削を可能とするロータリー式パイルトップドリリング工法の開発を行うとともに、短時間かつ高精度の計測を可能とする杭頭水中測量システムの開発を行うものである。

2. 期間

2021年12月 ~ 2023年 3月

3. 目標(最終)

- ①硬岩での掘削を可能とするロータリー式パイルトップドリリング工法の開発
- ②短時間かつ高精度の計測を可能とする杭頭水中測量システムの開発

4. 成果

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none">①ドリリング工法の掘削技術の開発<ul style="list-style-type: none">・掘削水循環システムの構築・ビット損耗量の定量化・掘削速度、サイクルタイムの検証 | <ul style="list-style-type: none">②杭頭水中測量システムの開発<ul style="list-style-type: none">・高精度なシステムを構築・システムの測量誤差の定量化・サイクルタイムの検証 |
|--|---|



硬質地盤における ロータリー式パイルトップドリリング 施工技術実証

開発の経緯

導入による効果

試験概要

試験内容

施工方法の構築・成果

今後の課題





開発の経緯

日本は欧州と違い海底地形・地質が複雑で硬質地盤の海域も多く点在している。

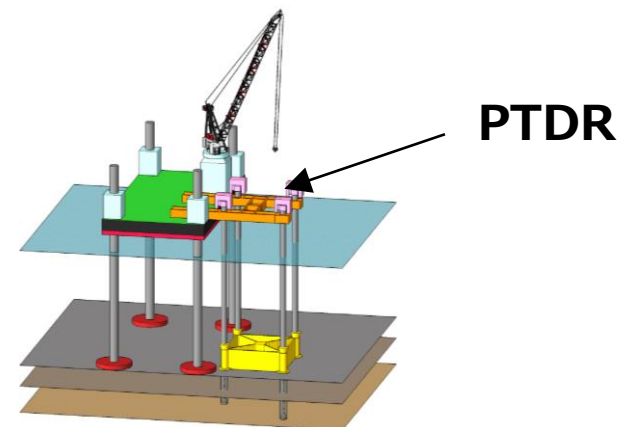
このことから、弊社は7年前より硬質地盤海域におけるロータリー式パイルトップドリリングに（以下「PTDR」と明記）による掘削の必要性を認め、PTDRによる同時掘削の特許を取得した。

しかし、施工に至るまでに解決しなければならない課題が多数あり実証試験を行うこととなった。

【特許の取得】

ロータリー式パイルトップドリリングによる
同時掘削の特許（2019年取得）

特許登録番号 第6586213号

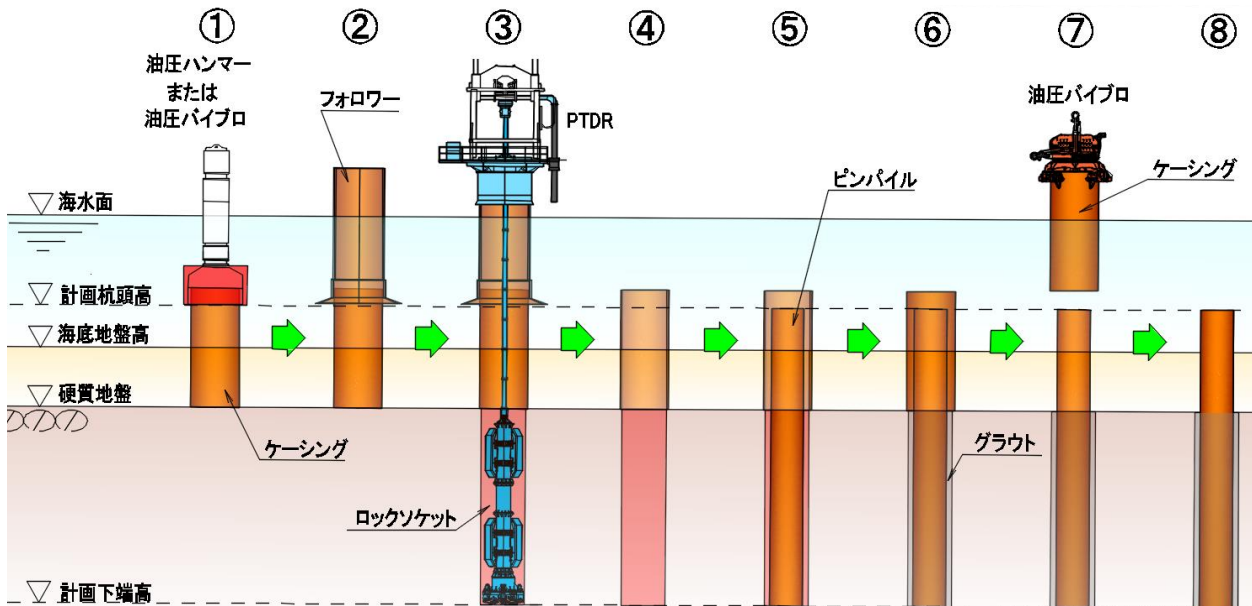


導入による効果

**硬質地盤海域での基礎建設(杭式ジャケット等)の
安定した施工が可能となり建設海域が拡大**

D & G (ドリル&グラウト) 工法

硬質地盤をロータリー式パイルトップドリリングにより先行掘削しピンパイルを挿入しグラウトでパイルを岩盤と一体化させる。



施工フロー

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| ① ケーシング打設
(油圧ハンマー) | ① ケーシング打設
(油圧バイブロ) |
|-----------------------|-----------------------|

孔壁保護

② フォロワーセット

③ ドリリング

④ フォロワー撤去

⑤ ピンパイル設置

⑥ グラウト充填

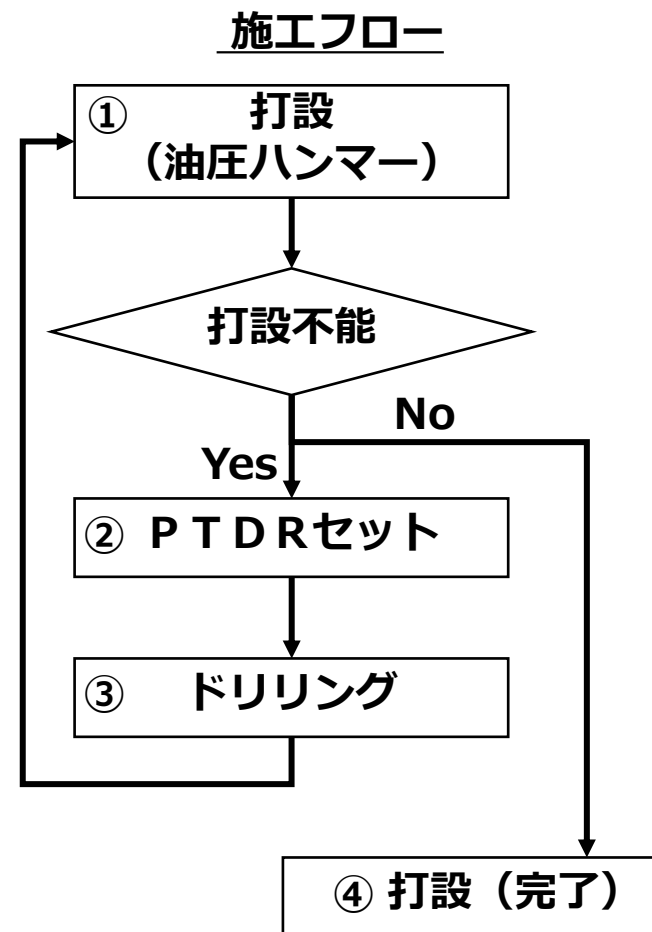
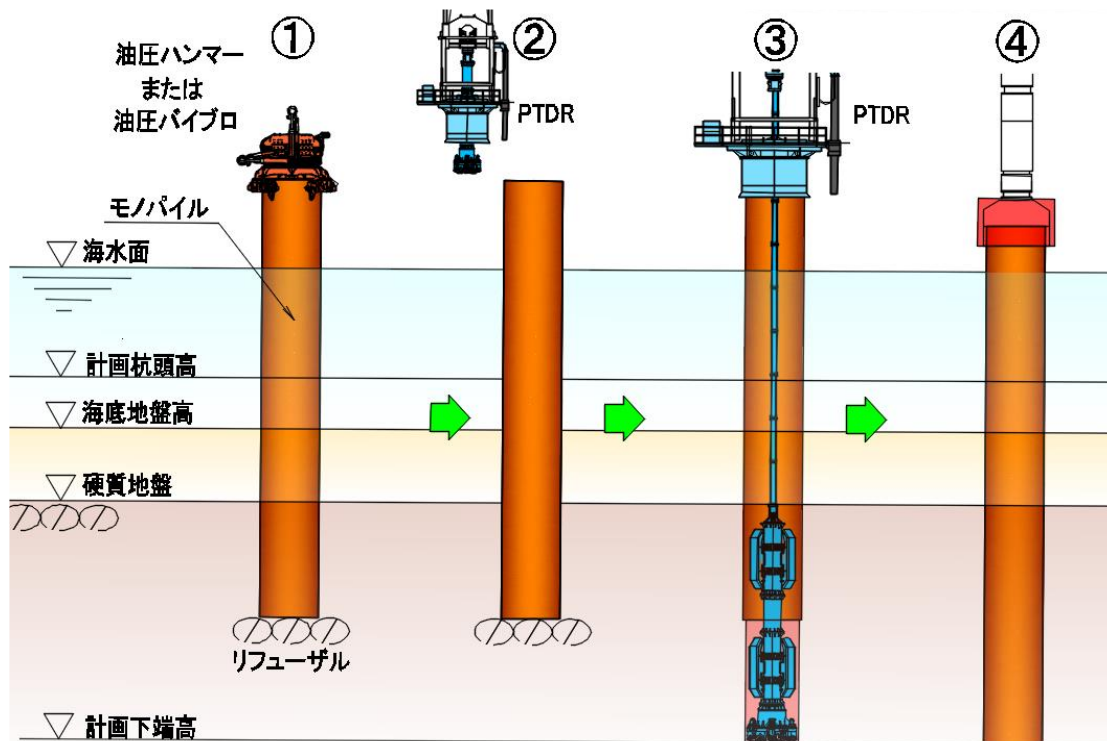
⑦ ケーシング撤去
(油圧バイブロ)

バイブロの場合は
ケーシング転用可

工法を選択肢が増え条件に適した掘削方法の選択が可能

DDD（ドライブ・ドリル・ドライブ）工法

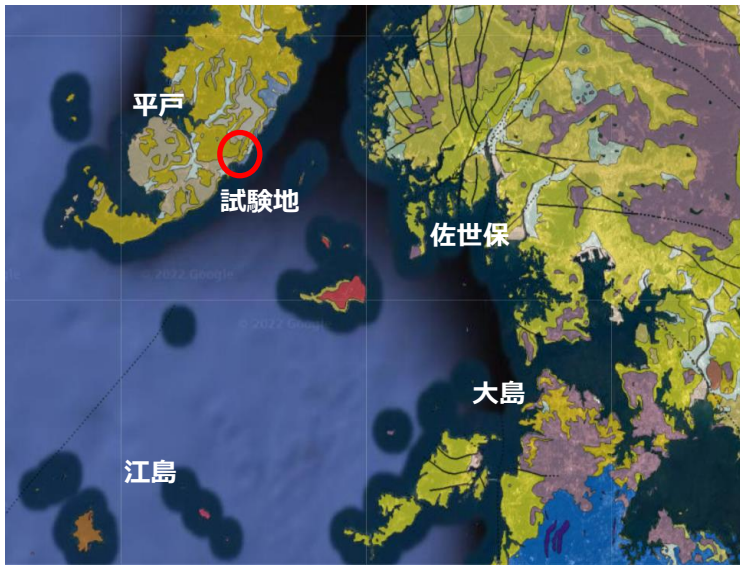
基礎杭打設（パイルドライブ）時、貫入不能（リフューザル）となった場合、リフューザルの原因となる硬質地盤または先端閉塞部をドリリングし、再打設することにより計画高さまで貫入可能になる。ピンパイルだけでなく最大径8mのモノパイルまで適用可能



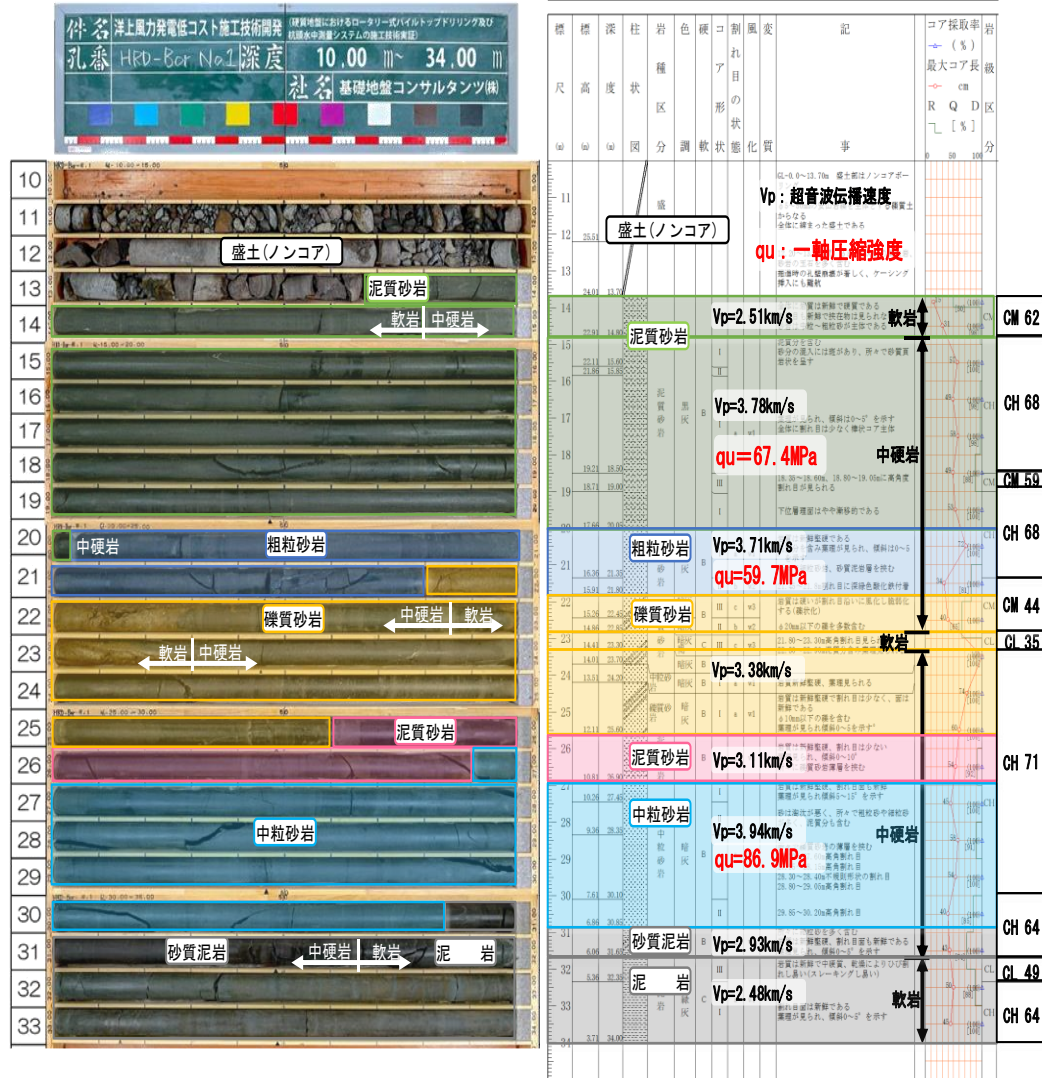
試験概要

実証地は風化が少なく均一な硬質な岩盤が存在する長崎県の砕石場を選定した。岩盤区分は中硬岩CH、一軸圧縮強度で50MPa以上（最大87MPa）、GSIでは60~70程度となる。

実証試験地



出典：産総研地質調査総合センターウェブサイト
 (<https://www.gsj.jp/license/license.html>)



実証試験は洋上施工を模擬するとともに1/2スケールで実施した。

使用するドリルリグは3mのピンパイル(ジャケット式)の1/2スケールを想定し以下のリグを選定した。

実証機 洋上施工 大口径

機種	呼称	PBA 612	PBA 936	PBA 1450
最小・最大掘削径	[m]	0.5-2.0	1.0-6.5	2.0-8.0
掘削回転数(最大)	[rpm]	23	22.4	15
トルク(最大)	[kNm]	116	360	500
ドリルリング重量(最大)	[ton]	45	150	260
掘削機の重量	[ton]	22	31	135

実施機

PBA612



PBA936

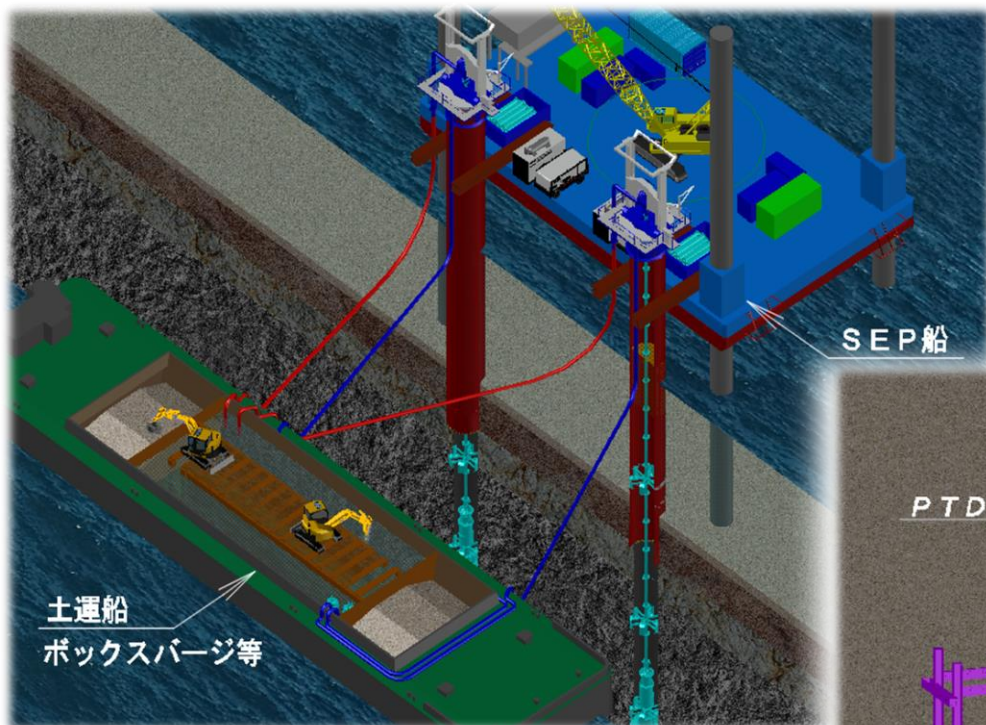


PBA1450



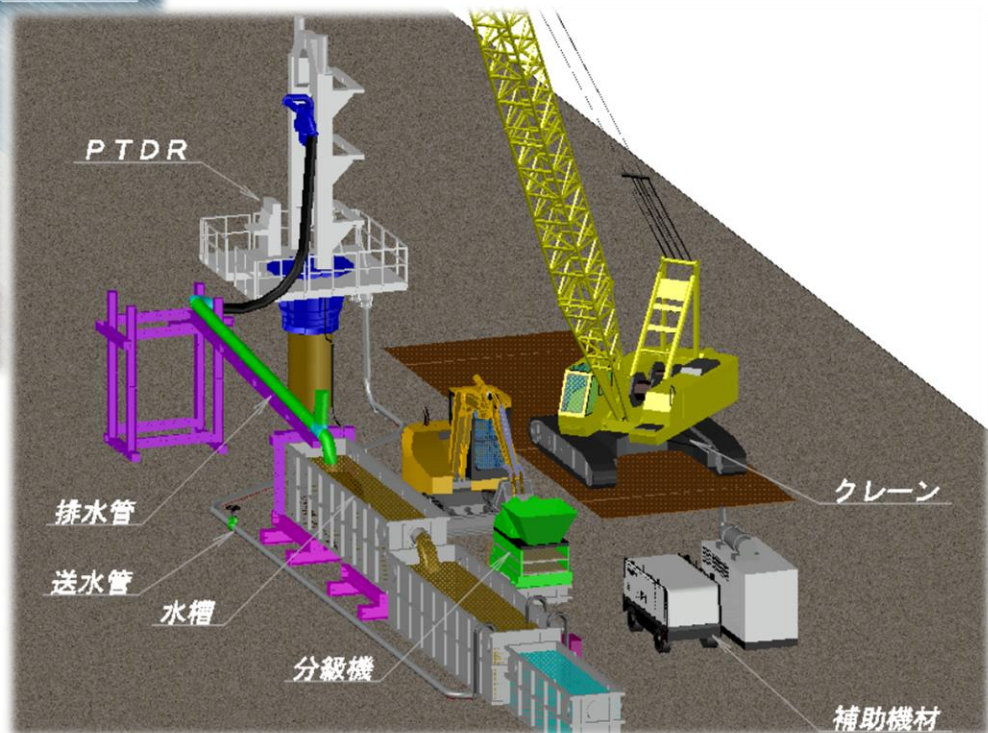
最大 8 m

当工法はエアーリフトを利用し掘削土とともに大量の掘削水が排出される。これらの水は再利用することが必須である。洋上施工ではドリリングに使用する循環水および掘削土は土運船によりストックされるが陸上では大型水槽を使用している。



海上施工イメージ

陸上(実証)施工イメージ



試験内容

掘削水循環システムの構築

<データ計測 1>

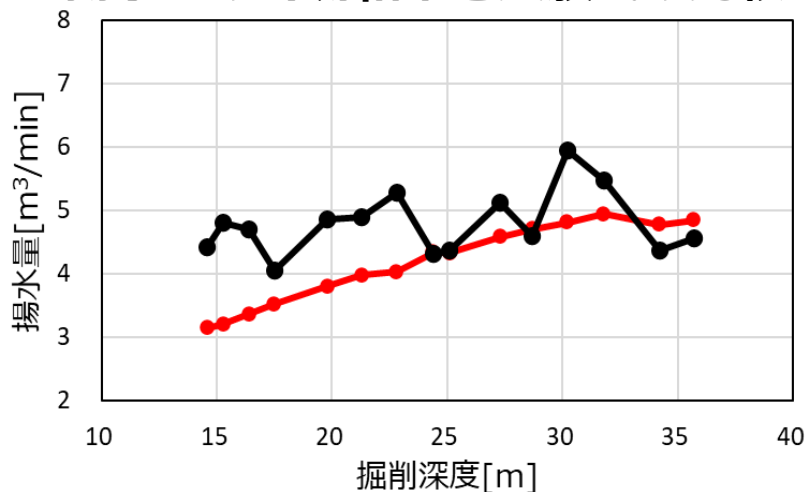
水槽に各測定器を設置し、比重・流速・流量を計測することにより揚水量と空気量の相互関係を検証し、国内の実験式がドリルリグに適用できるかを立証した。

【結果：適用可】

流速の計測



揚水量の計測結果と実験式の比較



流量計測



比重の計測



— 計測結果
— 実験式

【実験式】

エアリフトポンプによる固体粒子の輸送特性

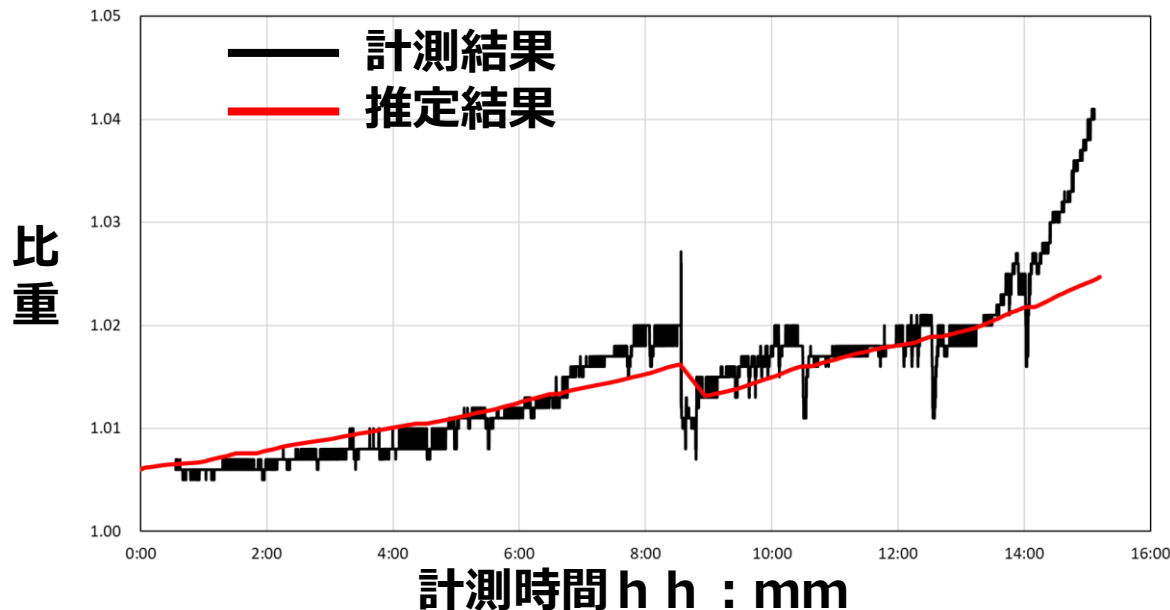
掘削水循環システムの構築

<データ計測 2>

循環水の比重の推移を濁度計で計測するとともに採水した試料を室内試験および経過時間における沈降の推移を測定し、国内の実験式がドリルリグに適用できるかを検証した。

【結果：適用可】

循環水比重の推移と国内推定式の比較



土の粒度試験



沈降分析



【実験式】土工事における濁水処理に関する研究

ビット損耗量の定量化

<データ計測3>

実証試験のうちの微少な摩耗量を計測するため3Dスキャナーを使用して各段階のビットを計測しカッタービットの摩耗量の定量化を図るとともに推定式の摩耗係数の特定をした。

【結果：推定式の適用可】

推定式

$$\delta = K \frac{D \cdot N \cdot L}{R}$$

K：摩耗係数

D：掘削径 [m]

N：回転数 [rpm]

L：掘削長 [m]

R：掘削速度 [m/hr]

使用前



使用後



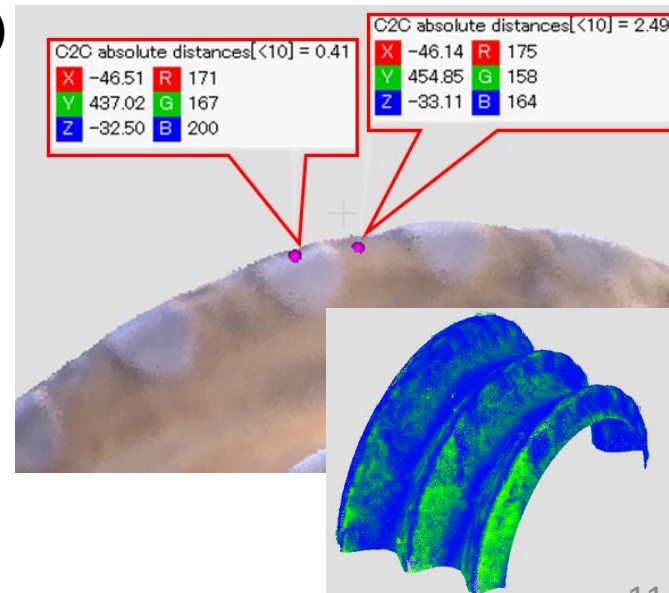
交換後
(別サイトで使用)



3Dスキャナー計測



解析結果



【推定式】岩盤掘進に挑むCMT工法の特徴と施工事例

掘削速度、サイクルタイムの検証

<データ計測 4>

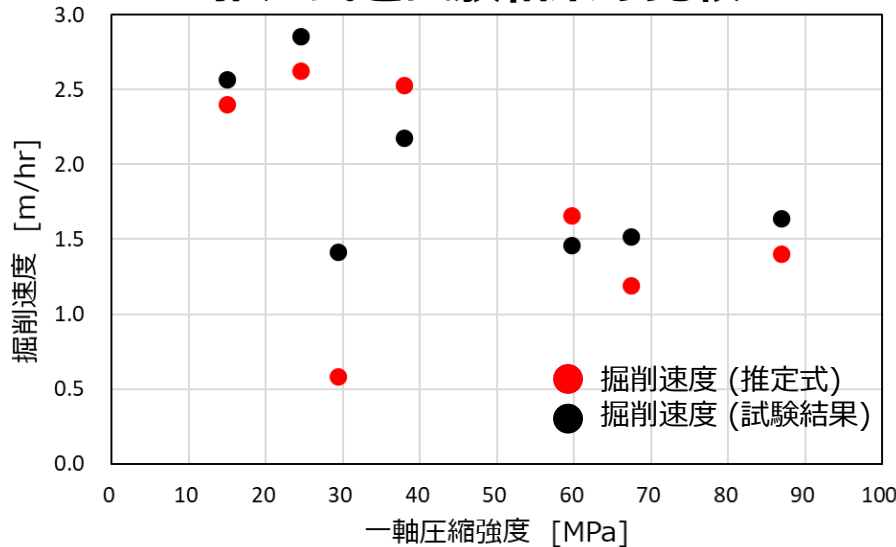
掘削速度・推力・回転数他のデータを計測し相互関係を検証し、推定式と比較したが乖離した結果となったため(カッタービット性能の向上によると思われる)、提案式を導出した。提案式と試験結果を比較すると類似しているといえる。

【結果：提案式の適用可】

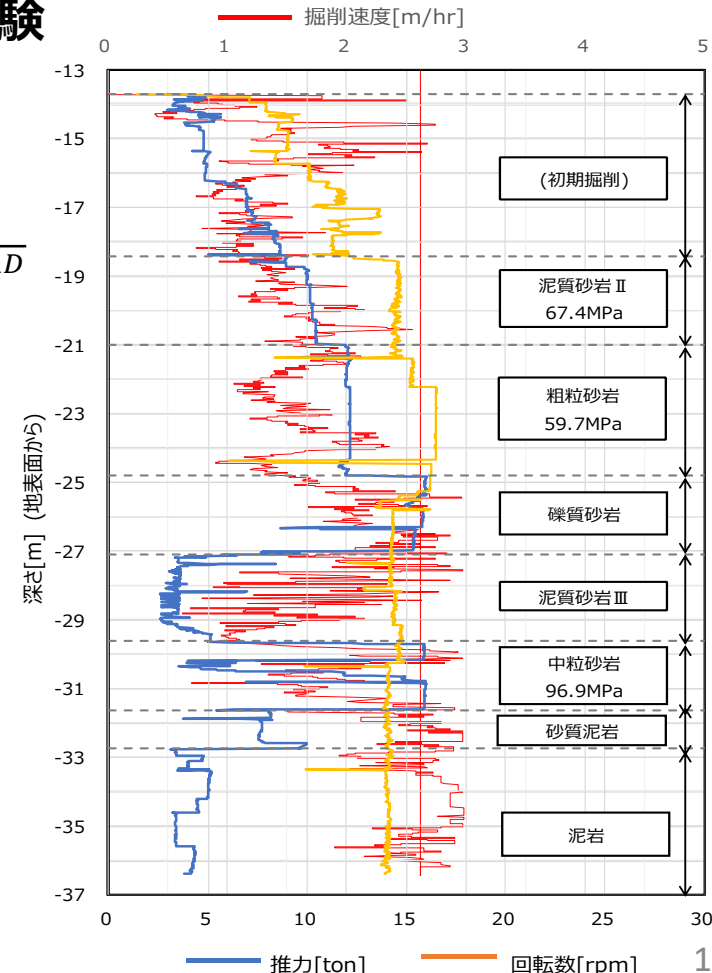
提案式

$$R = K \frac{N^A W^B}{D^{1.2} S^C e^{1.1D}}$$

推定式と試験結果の比較



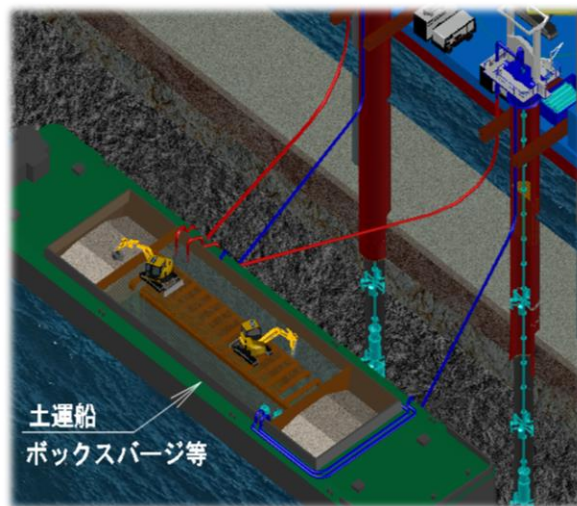
解析データ



【推定式】大口径削孔機械の削孔性に関する研究

施工方法の構築・成果・掘削水循環システムの構築

実証により掘削水の循環システムの規模を推算することが可能となった。

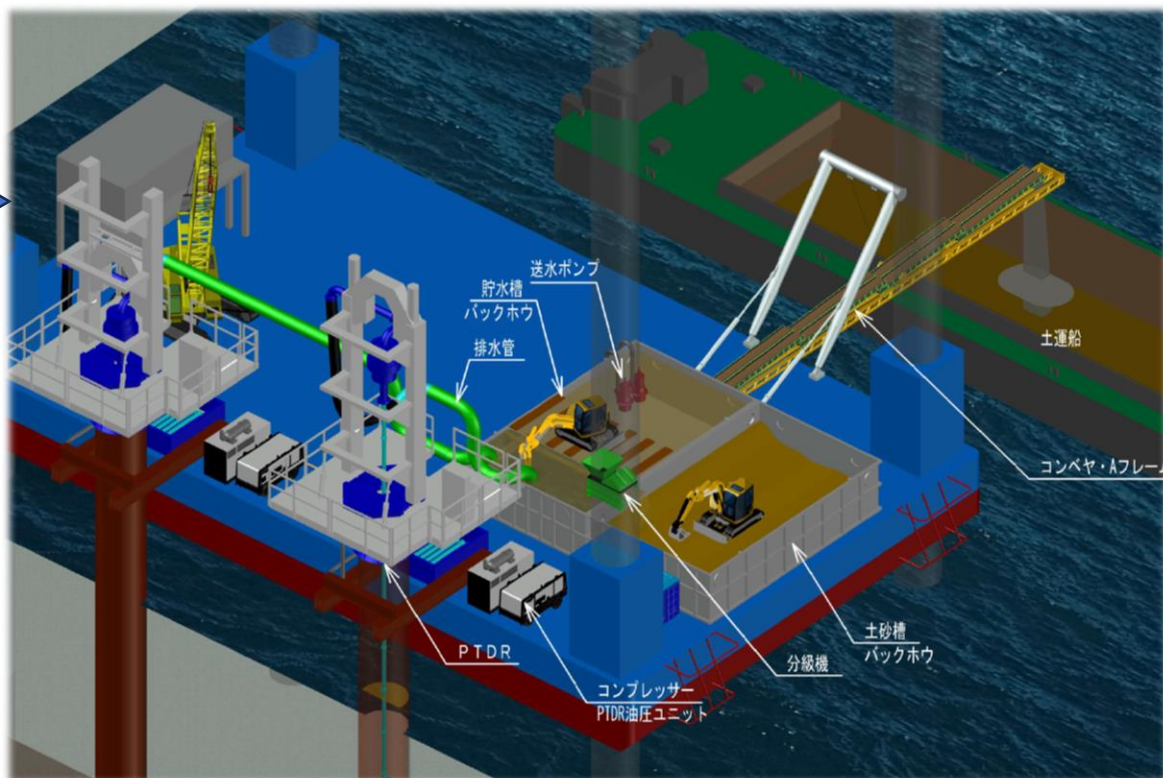


【実証前】

大規模な循環システムで土運船クラスの水槽が必須で、かつ連続稼働するためには複数隻必要であると推測

【実証後】

循環システムの規模を推定できることにより、SEP船上に循環水槽と一定量の土砂貯蔵槽を配置し、数日の間に訪れる海象が良好な日にガットバージ船などを係留し土砂を移送することも提案可能となった。これにより稼働率は大幅に向上できる。



施工方法の構築・成果

- ・ビット損耗量の定量化

交換サイクルが推定できるようになったため施工サイクルに影響しないような**計画が可能**となった。

- ・掘削速度、サイクルタイムの推算

施工時間は実績値だけでなく推定式による推算を合わせることにより**精度が向上**する。

今後の課題

掘削水循環システムにおいては自然沈降だけでなく、分級機などを使用したシステムをシミュレーション・推算し、可能な限り恒久的に循環水を再利用できるよう検討する。

摩耗量・掘削速度については、実証試験だけではデータ数が少なく、岩種、ビット、ドリルリグの機種が異なるデータを収集し、さらに精度を上げる必要がある。



杭頭水中測量システムの施工技術実証

開発の経緯

導入による効果

試験概要

試験内容

施工方法の構築・成果

今後の課題

開発の経緯

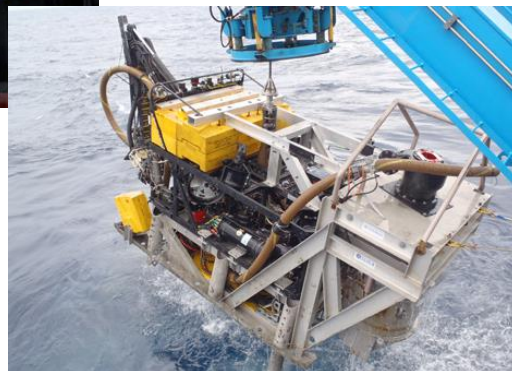
水中での測量は音響測位機を用いることが多いが、これまでは高精度の測量の必要性を求められていない。近年になって多機能型のトランスポンダも開発されているが、誤差の確認の必要性がなかった上、多額な費用が必要で実績もない。

水中で打ち止める杭の出来形計測は、設置した測量台から光波測距儀などを使用して、延伸した杭(計測後切断) 又はヤットコを計測している。ただし、水深が深くなると対応できない。

調査機器



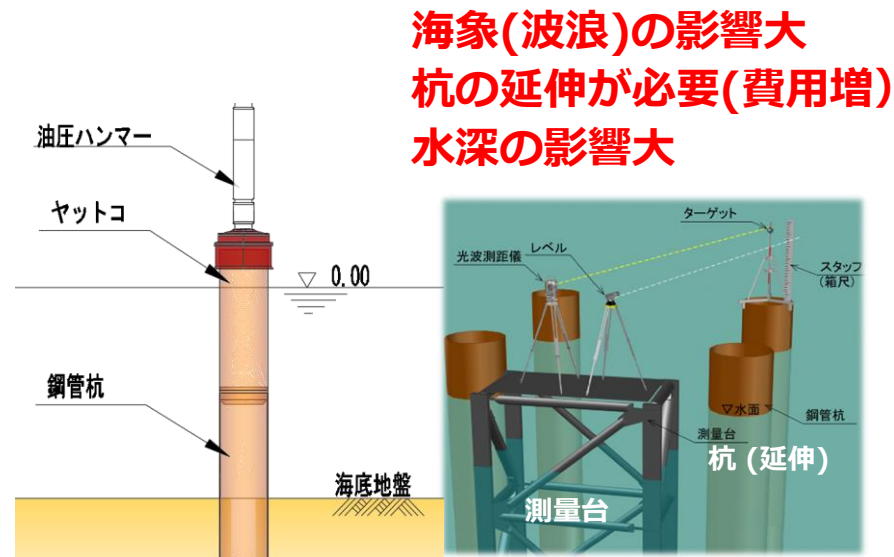
トランスポンダ搭載
AUV/ROV



精度：数十cm

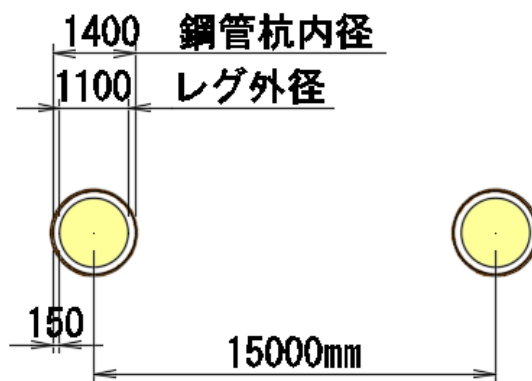
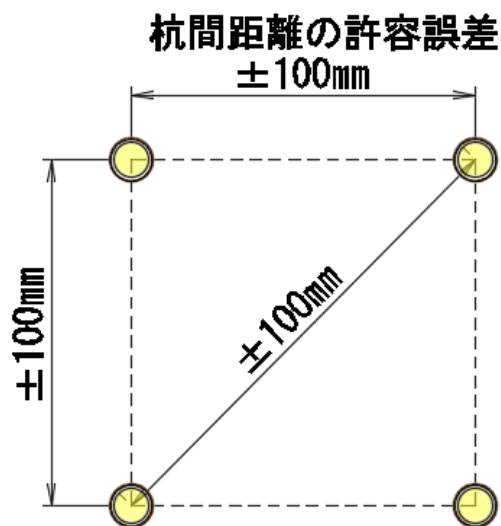
出典：深田サルベージ建設HP

気中測量（光波測距儀・レベル）



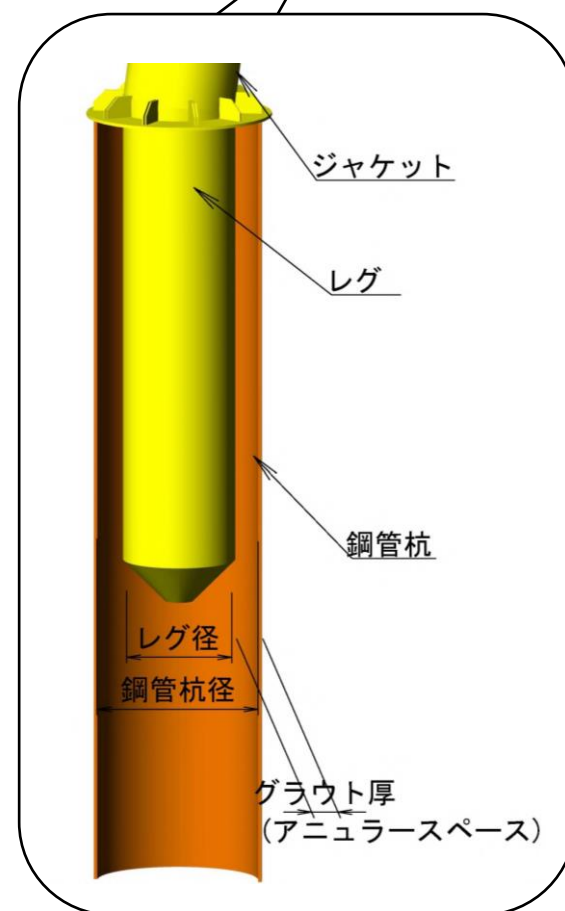
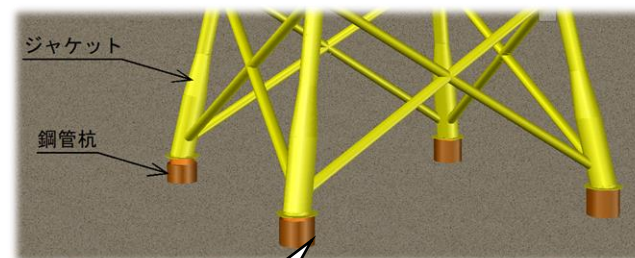
杭式ジャケット基礎杭の要求精度が高精度でなければならない理由

平面位置(X,Y座標)の精度が悪い場合



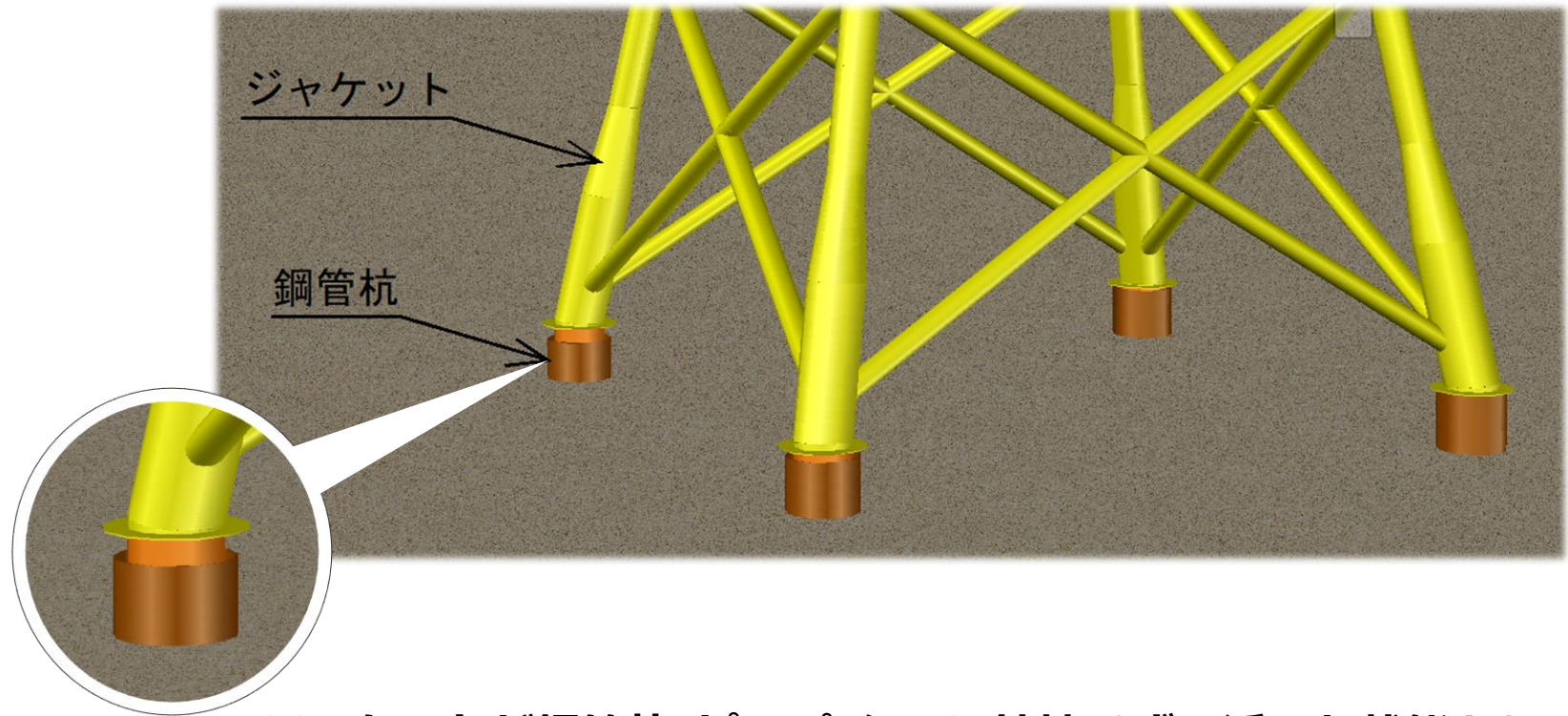
ジャケット製作精度：-10, +30mm
(ジャケット工法マニュアルより)

- ・ グラウト厚を確保できない。
(施工精度を考慮すれば精度50mm以内が必要)
- ・ レグが鋼管杭に干渉しジャケットが据付できない。



杭式ジャケット基礎杭の要求精度が高精度でなければならない理由

高さ(Z座標)の精度が悪い場合



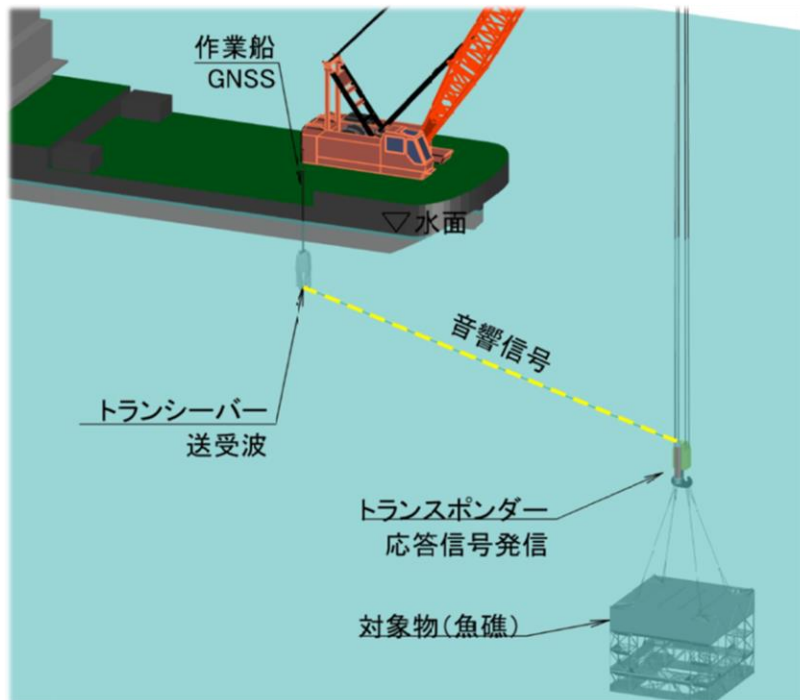
ジャケットが鋼管杭(ピンパイル)に接地せず、浮いた状態となる。
(高さの精度が50mm以下であれば、実機スケールでも
0.2°以内の傾きとなり、許容値を下回る。)

導入による効果

現在使用されている従来型のシステムのように水中計測精度が数十センチであれば、高精度の測量が必要な杭式ジャケット基礎は成り立たない。当事業で杭頭水中測量システムの測量誤差が定量化でき、高精度なシステムを構築できれば、経済的かつ効率的に杭式ジャケット基礎が施工できるようになる。

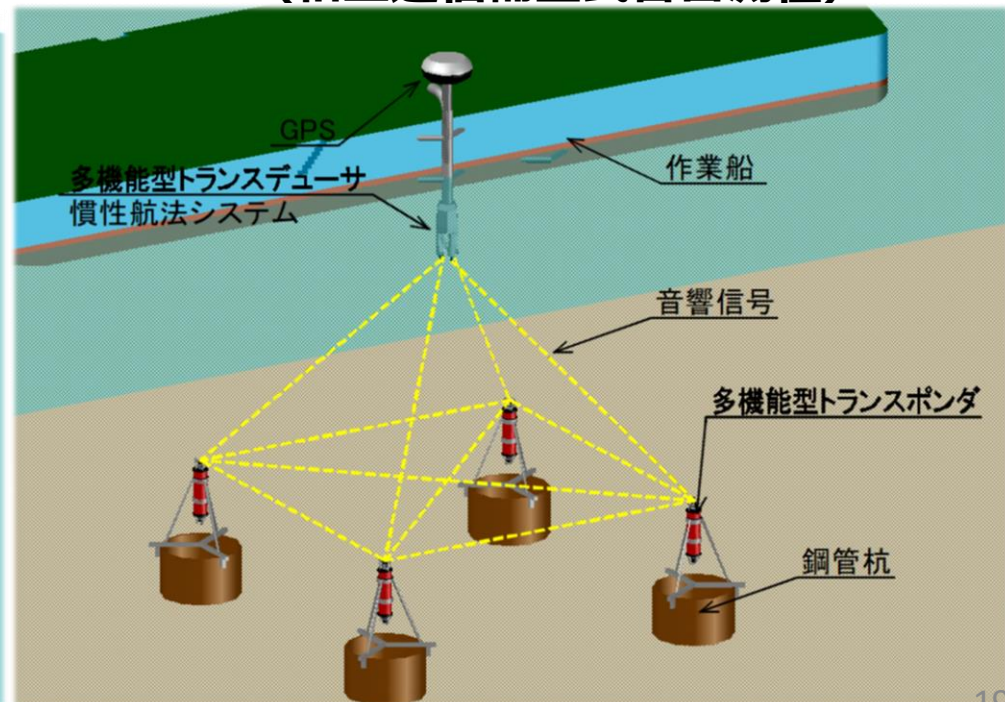
既存の技術

USBL(Ultra Short Base Line)



提案する技術

(相互通信補正式音響測位)

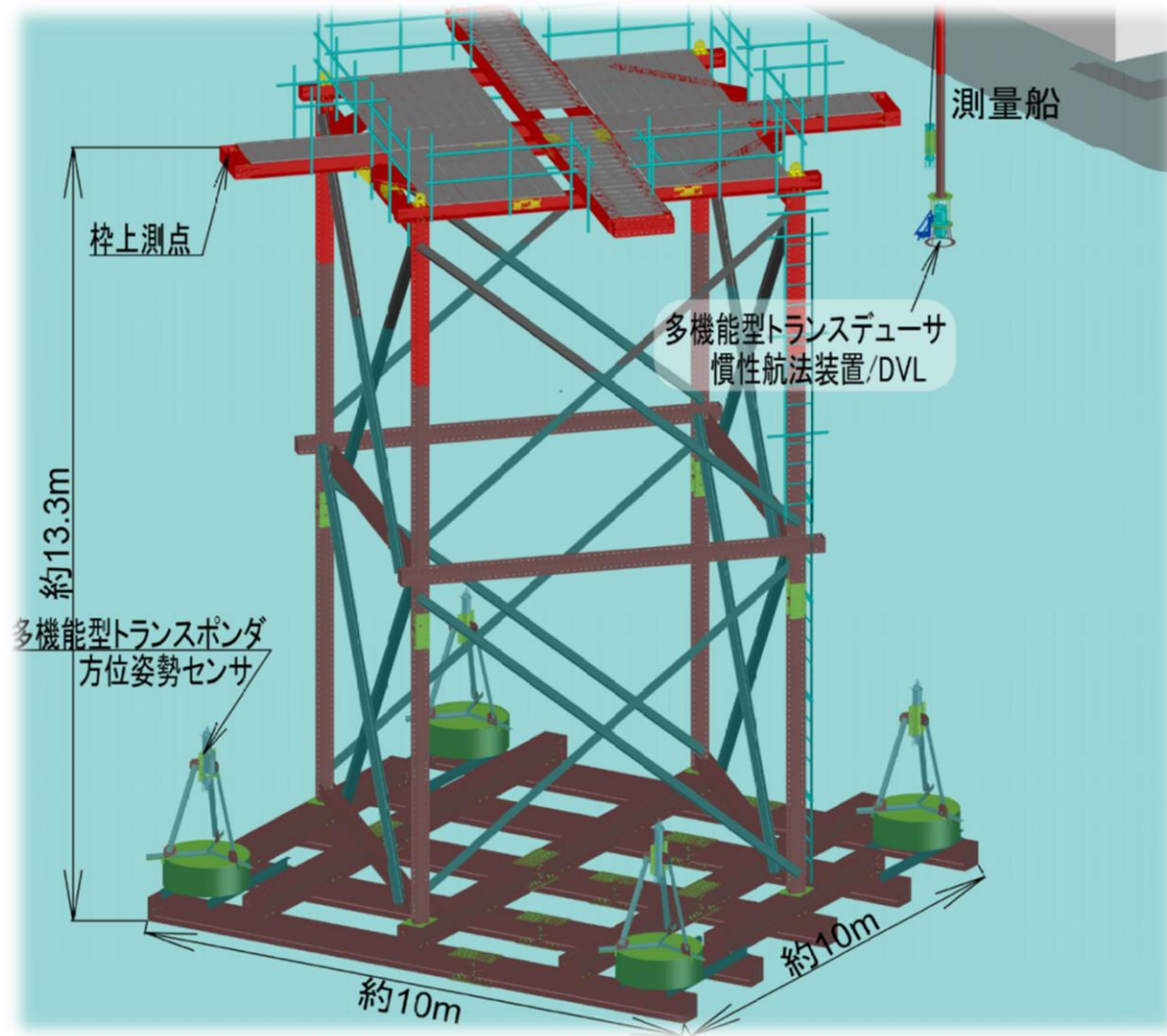


試験概要

ジャケット式基礎杭を模擬し4本杭を取り付けた測量枠を製作し、各測点を事前に3次元座標を計測する。

測量枠を沈設し岸壁から測量枠の姿勢を計測し、正となる3次元座標を取得する。

条件を変えながら水中測量システムによる計測を実施し各条件による誤差を検証する。



試験概要

実証地は岸壁からの測量が可能な離岸距離内で所定の深さがあり、また静穏で数日間の海域調整ができ、かつ近傍に組立ヤードがある港湾海域が必要であった。これらの条件を満たす佐世保港内海域とした。



実証地の近傍の岸壁上で測量枠を組み立て、起重機船に積み込む。

実証地まで海上運搬し、計画位置に沈設し、計画した各手法にて実証した。

測量枠組立・浜出し

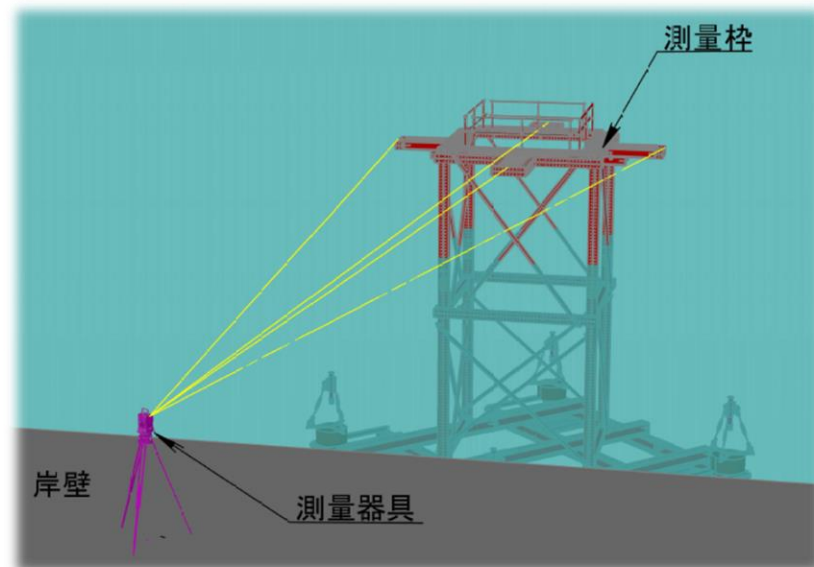


試験内容

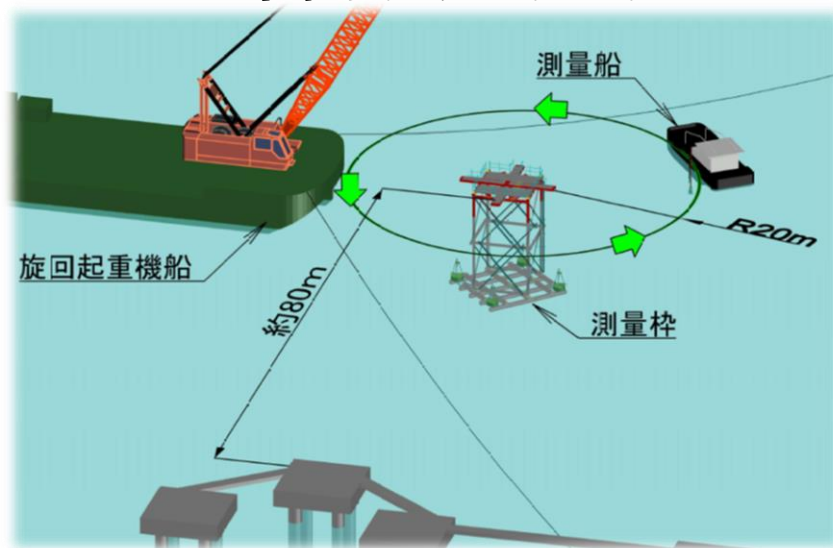
測量枠の据付後、岸壁より枠上を測量し、事前計測した杭中心位置とのオフセット値により水中測量に対する正の値を取得する。

トランスポンダに基となる座標を与えるため、トランスポンダの周囲を航行しながら計測し、GNSSの座標を与える。

正の三次元座標の取得



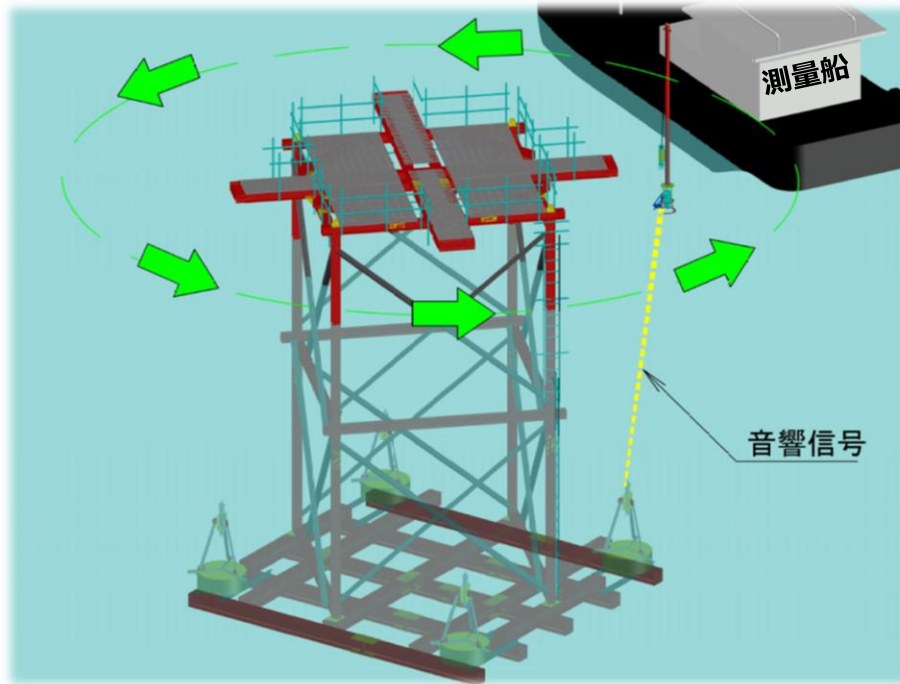
キャリブレーション



試験内容（平面座標）

【測量方法1】

4点すべてキャリブレーションのみ
で計測データを取得

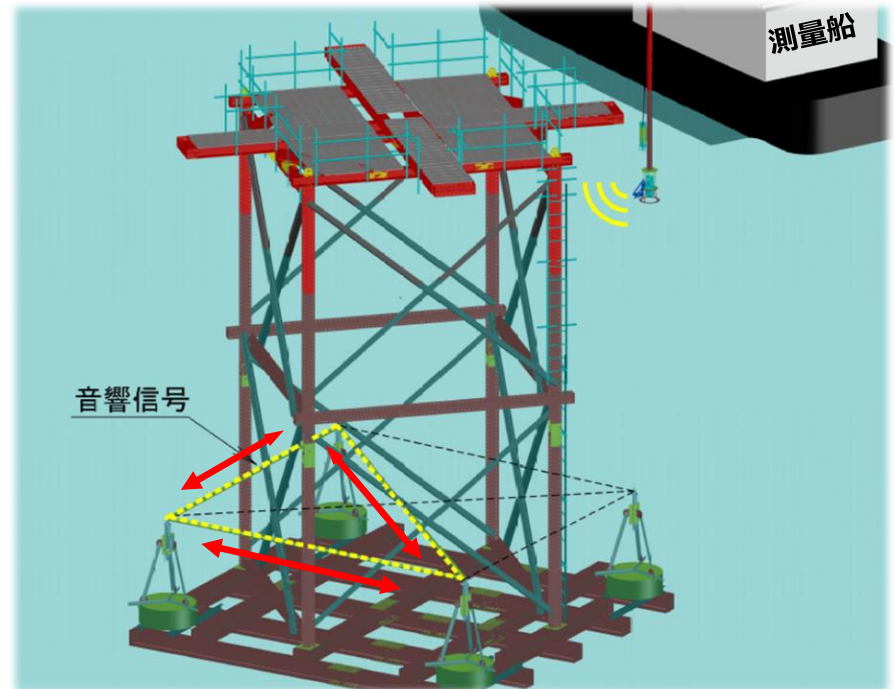


【結果】

誤差 : 27~77mm

【測量方法2】

2・3台と相互通信(↔トランスポンダ
同士の通信)の台数を変化せてデータ
を取得



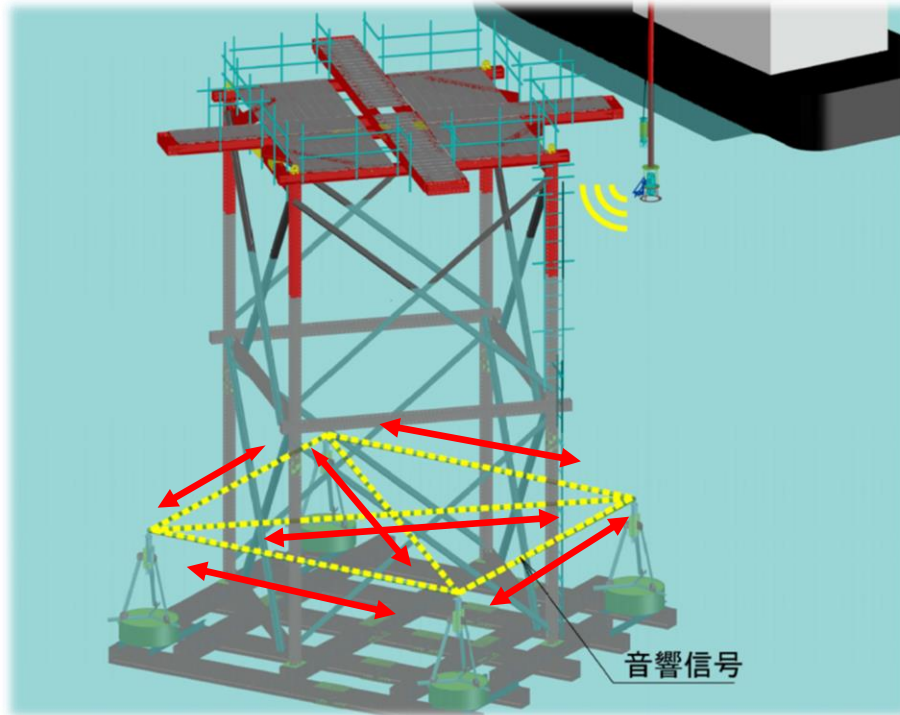
【結果】

2台 : 15~64mm

3台 : 2~70mm

【測量方法3】

4台すべてを使用して相互通信した場合のデータを取得

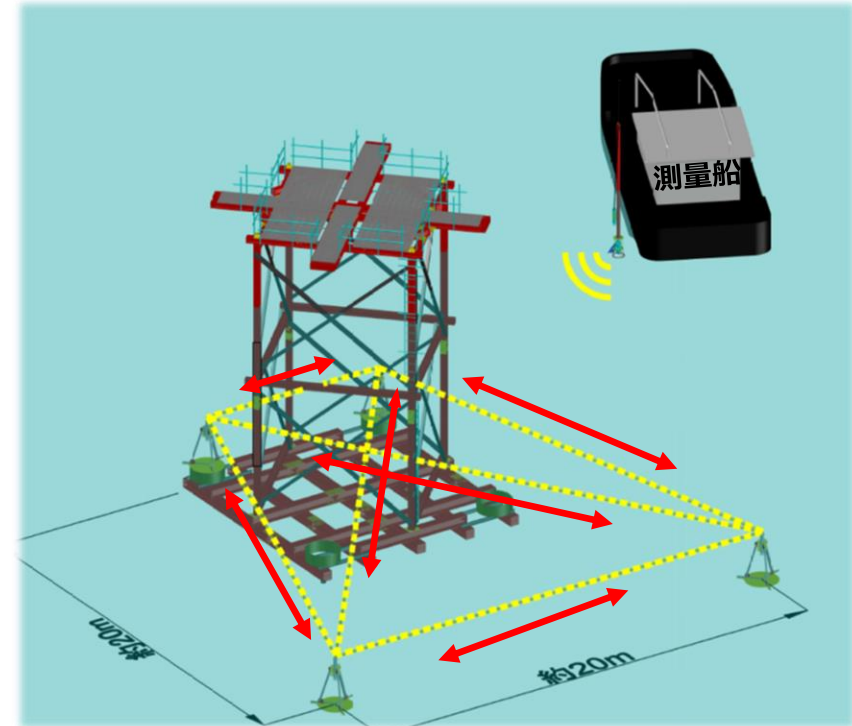


【結果】

誤差 : 9~36mm

【測量方法4】

トランスポンダの相互距離を10から20mに離し実スケールに近づけデータを取得



【結果】

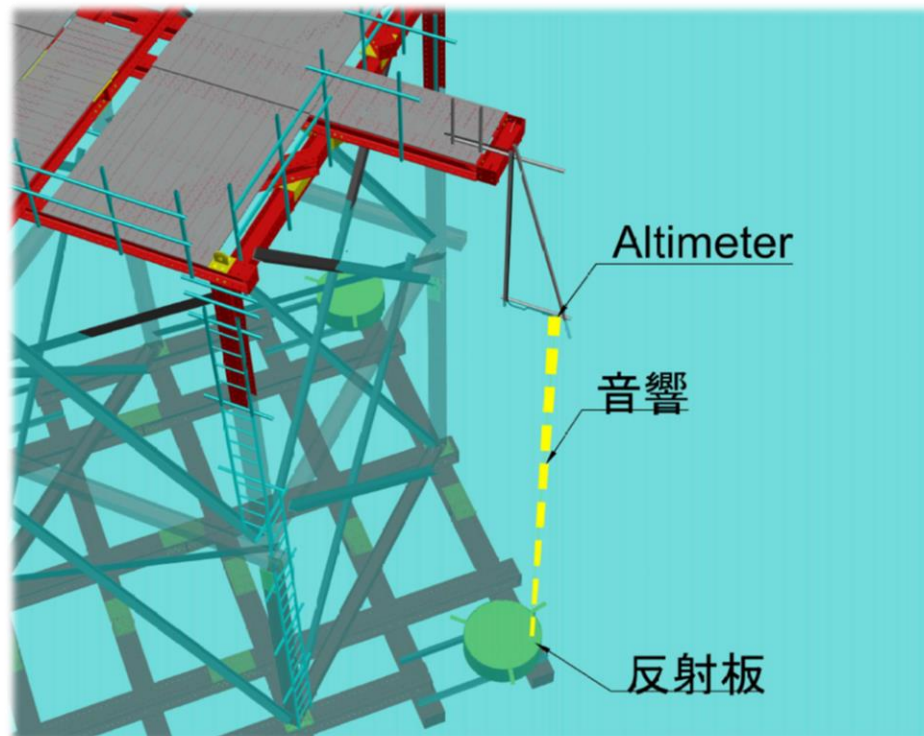
誤差 : 15~40mm

※正の値は潜水士での計測ため、比較はできないが高精度である。

試験内容（鉛直座標）

【測量方法A】

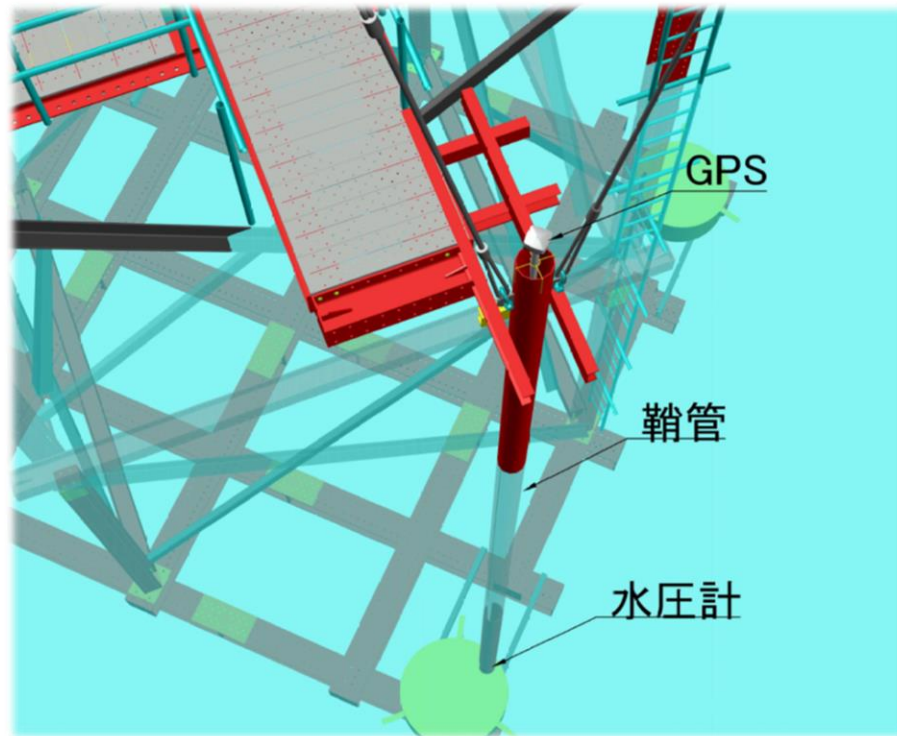
Altimeterを使用した音響による計測



誤差は**±20mm以内**で計測可能

【測量方法B】

水圧計による計測



水圧計は深海・港湾モデルの2種類を使用した**が、いずれも±30mm**で計測可能

波形処理をすれば鞘管の有無は関係なく高精度のデータ取得が可能

施工方法の構築・成果

- ・高精度システムの構築とシステムの測量誤差の定量化

【平面座標】

設定していた**要求精度50mmを下回る精度(36mm)を確保**できたことにより、工事に大きく寄与する。また相互通信(トランスポンダの台数)を増やすごとに精度は向上することが検証できた。これにより費用対効果を考慮し選定することが可能となった。

【鉛直座標】

いずれの方法も設定していた**要求精度50mmを下回る精度(±20・30mm)**を立証できたことにより、用途に合わせ選択することができる。

- ・サイクルタイムの検証

水中測量の実施時間(平均)

【平面座標】

キャリブレーション	6分
測定時間(4基)	30分

【鉛直座標】

水圧計による計測	5分
Altimeterによる計測	5分

測定にかかる作業は
1時間もあれば実施可能

今後の課題

高精度かつ短時間で実施可能な杭頭水中測量システムは、杭頭測量のみならず、他工種においても活用の可能性を有すると予想される。そのため、さらなる応用手法の検討を行い、利用の幅を拡大する必要がある。