

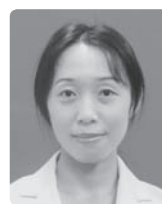
線間施工が可能な 小型場所打ち杭工法に 関する研究



渡邊 明之*



加藤 精亮**



谷口 美佐*

正循環掘削工法の杭（以下、正循環掘削杭とする）は、機械が小型であるため、線路内の狭隘かつ低空頭箇所での場所打ち杭として、高い施工性を有する。しかし、正循環掘削工法は、一般的に掘削に用いる泥水（以下、安定液とする）の比重・粘性が高いことから、孔壁にマッドケーキが付着しやすく、杭の品質も低下するため、鉄道土木構造物では、本設構造物の杭に使用されていない。

本研究では、安定液を品質管理することで、正循環杭の施工性を生かしながら、本設構造物へ適用することについて、分析と工法の提案を行った。

●キーワード：基礎杭、場所打ち杭、泥水（安定液）、品質管理、施工法

1. はじめに

鉄道構造物の場所打ち杭の施工には、一般的に正循環掘削工法のBH工法や逆循環掘削工法のTBH工法が用いられる。正循環掘削工法は施工機械が小さく低空頭・狭隘箇所では高い施工性を有している。しかし、一般的に安定液が管理されず、掘削機構の性質上、杭先端にスライムがたまりやすいことや杭孔壁にマッドケーキが多く付着しやすいため、正循環掘削工法は、杭の支持力、杭体の品質の信頼性が低い。そのため、鉄道土木の本設構造物の杭には、正循環掘削工法より施工機械が大きい、杭の信頼性の高い逆循環掘削工法を採用している。そして、逆循環掘削工法は、線路内の狭隘箇所での基礎杭構築に費やす時間や費用の占める割合が非常に高いため、基礎杭施工の工期短縮、コストダウンが課題となっている。

鉄道構造物等設計標準・同解説^①では、杭の種別で本設構造物へ使用できる杭工法を制限している。使用できる場所打ち杭工法は、アースドリル工法、リバース工法、オールケーシング工法となっており、BH工法を適用する場合は、別途、検討を要する杭となっている。また、安定液の初期ベントナイト濃度によって、コンクリート強度および設計寸法の低減を行っている。ベントナイト安定液を使用する場合は、コンクリートの圧縮強度・曲げ強度・引張強度・支圧強度などの低減を行っている。設計寸法は、ベントナイト安定液を用いる場合、公称径から50mm引い

たものを有効径としている。最大周面支持力や先端支持力などの支持力に対しては、安定液の初期ベントナイト濃度によって、支持力度の低減を行っており、ベントナイト濃度が3～10%未満の場合には、最大周面支持力度を低減している。

一方、道路基準^②では、杭の種別で使用する杭工法を決めておらず、コンクリート強度については、水中コンクリートの設計基準強度を呼び強度の80%としている。周面支持力や先端支持力に対しては、特にベントナイト濃度に対する制限はない。

安定液に求められる役割は、①孔壁の崩壊防止、②掘削土砂の地上への搬出と分離、③コンクリート打設時の良好な置換媒体などがあり^③、ベントナイト系の安定液とCMC・ポリマー系の安定液がある。通常、正循環掘削工法は、掘削機構の性質上、掘削土を安定液に浮遊させて地上部まで持ち上げるため、ベントナイトを多量に混入し、安定液の比重を高くして掘削している。品質を向上させるため低比重の安定液とすると、排泥効率が極端に低減することが予想される。そこで低比重で掘削した土砂を地上部まで浮遊させる方法として、ベントナイト安定液の代わりにポリマー系の安定液を使用し、安定液の比重を低く、粘性を高くして、さらには安定液の流量を調整することで、正循環掘削工法でも品質の高い杭体を構築する方法を考えている。

本研究では、掘削機械が小型で狭隘箇所での施工に適

表1 工法比較表

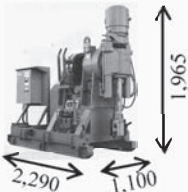
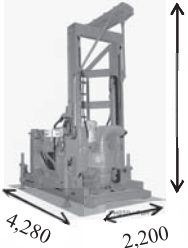
工法名	特徴	形式・削孔能力
新しい正循環掘削杭 (開発工法) TBH88 	○ 施工機械が小型 のため、狭隘な場所での施工が可能である。 ○ 進入道路が狭い場合でも、軽量小型で、搬出入が容易である。 ○ 施工設備が簡素で 施工費が安価 である。 ○ 管理された泥水を用いるため、逆循環掘削杭と同等品質の杭が構築できる ○ 小口径の掘削に向いている	○ 掘削方法 : 正循環方式 ○ 削孔能力 : $\phi 600 \sim 1000$ ○ 機械本体重量 : 3.1t
逆循環掘削杭 (TBH工法) BW-H機-200 	○ 一般的に正循環掘削杭に比べ、施工機械が大型である。 ○ 一般的に正循環掘削杭に比べ、機械重量は重い。 ○ 泥水比重の小さい泥水で掘削されるため、杭壁のマッドケーキ、孔底のスライムが比較的少ない。 ○ 大口径の掘削が可能である。	○ 掘削方法 : 逆循環方式 ○ 削孔能力 : $\phi 600 \sim 2000$ ○ 機械本体重量 : 6.5t

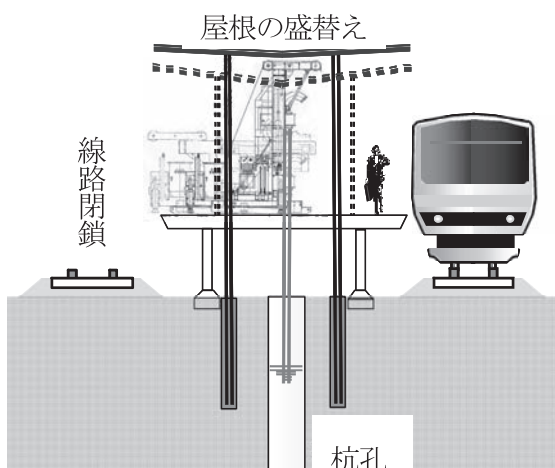
表2 基礎杭の設計値の低減の考え方

安定液中の ベントナイト濃度	3%未満	3~10%	10%超
周面支持力度	100%	低減	—
先端支持力度	100%	100%	—
設計強度他	100%	低減	別途検討

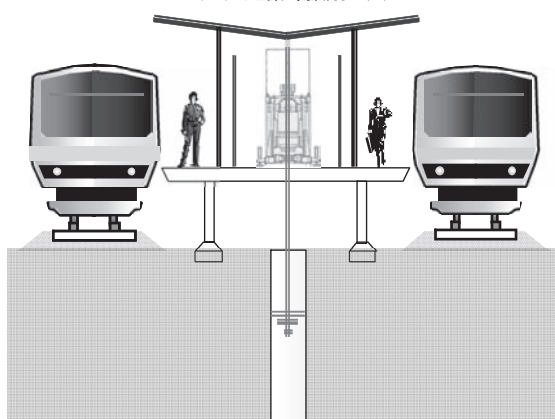
している正循環掘削工法の本設の鉄道構造物への適用を図るため、正循環掘削工法の工法特性の分析、安定液管理の現状、安定液の品質管理の提案を行う。

2. 杭掘削工法の比較

駅構内や線路間では、場所打ち杭工法により、基礎杭が施工される。場所打ち杭工法とは、地盤が崩れないように安定を確保しながら、孔を掘ってそこに鉄筋を挿入し、コンクリートで固める工法である。その孔の掘削工法として、正循環掘削工法と逆循環掘削工法がある。逆循環掘削工法は、強制的に掘削土砂を吸引して排出する。そのため、安定液は粘土分をあまり含めずに施工が可能で、掘削した孔の壁面の仕上がり、杭の本体の品質を良質に上げることが可能である。しかし、掘削土砂を吸引する設備が必要となるため、掘削設備が大きくなり、



(a) 逆循環掘削工法



(b) 正循環掘削工法

図1 正循環掘削工法と逆循環掘削工法のホーム上で施工イメージ

表3 現場実態調査（BH杭）と計画書管理値（TBH杭）の比較

計測項目		粘性(秒)	比重	砂分	pH	ろ過水量	ろ過水厚
現場実態調査 (BH)	水槽	23.2~27.8	1.17~1.25	10~19%	9.9~10.4	~120ml	~11.4mm
	杭頭	24.1~	1.22~1.48	16~35%	9.8~9.9	~120ml	~21.0mm
計画書管理値(TBH)		20~45	1.01~1.25	~20.0%	7.0~12.0	~30ml	~5.0mm

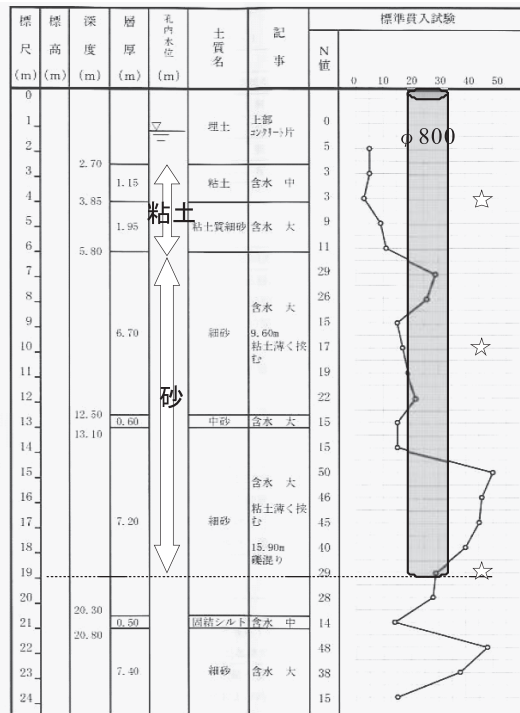


図2 地質柱状図

駅構内や線路間などの狭隘な空間で施工することが難しい。一方、正循環掘削工法は、掘削した杭孔内に安定液を循環させることで、掘削土砂を排出する。そのため、一般的に安定液に多くの粘土分を含有させるため、掘削した孔の壁面の仕上がり、杭の本体の品質が悪くなることが懸念される。しかし、安定液を循環させながら掘削土砂を排出する設備となるため、掘削設備は大幅に縮小することが可能である。

鉄道工事では、駅構内や線路間などの狭隘な空間で施工することが多く、この正循環掘削工法の特徴を生かすことが期待されている。

図1に正循環掘削工法と逆循環掘削工法でホーム上で場所打ち杭を施工しているイメージを示す。表1に工法比較表を示す。

表4 試験シリーズ

	安定液種別	送水量	空気圧
Case-1	清水 (10m ³)	420L/min	—
Case-2	清水 (15m ³)	380~ 400L/min	0.6MPa
Case-3	清水 + エア (15m ³)	380~ 400L/min	0.6MPa
Case-4	ポリマー + エア (0.2%)	380~ 400L/min	0.6MPa

3. 工法開発の目標

本研究では、正循環掘削工法を用いた新しい杭の施工方法を提案する。そして、工法の開発目標を以下とした。

- ①線路間やホーム上などの狭隘部で施工できる施工方法とする。
- ②逆循環掘削工法に比べて、施工コストを20%程度低減する。
- ③本設構造物への適用を可能とする。

また、その他の新しい施工方法の導入メリットとして、施工機械の大きさと重量を軽減するため、ホーム屋根の盛り替え不要、線路への支障を低減するため線路閉鎖不要、資機材の運搬設備の低減などが期待できる。

4. 正循環掘削工法における安定液管理

鉄道土木構造物の基礎杭は、鉄道構造物設計標準（基礎構造物）で設計されており、本設計標準では、安定液の品質によって、基礎杭の設計支持力や杭本体の強度を低減している。その低減の割合は、ベントナイト（活性度の高い細粒分）の含有比率によって定めている。表2に基礎杭の設計値の低減の考え方を示す。

安定液の品質管理値は、鉄道構造物も道路構造物も明確に基準化されていない。実務においては、安定液の品質管

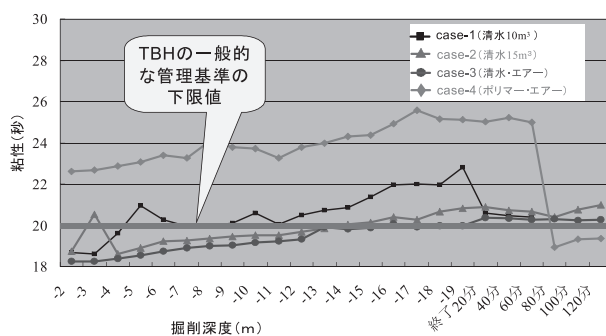


図3 粘性（ファンネル粘度）の計測結果

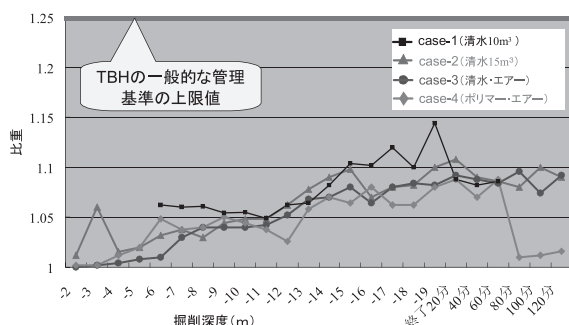


図4 比重の計測結果

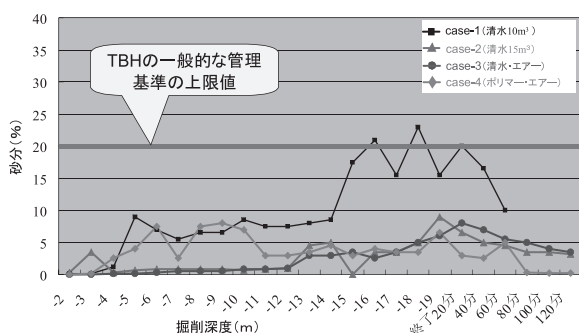


図5 砂分の計測結果

理計画は、工事請負会社が設定し施工計画書に示されて、監督員が設計内容との整合性などを確認し、承諾する方法で管理されている。しかし、正循環掘削工法は、仮設構造物の基礎杭工法として適用されているため、施工計画書にも安定液の品質管理について記載されていない。そこで、正循環掘削工法（BH杭）における安定液の品質の現場実態調査を行った。現場実態調査は、安定液を“杭孔の地表面”と“循環水槽内”で採取し、その成分分析を行った。そして、その調査結果と施工計画書に記載されている逆循環掘削工法（TBH杭）との比較を行った。表3に現場実態調査（BH杭）と計画書管理値（TBH杭）の比較を示す。

比較項目は、粘性（ファンネル粘度）、比重、砂分、ph、ろ過水量、ろ過水厚とした。比較結果では、比重、砂分、ろ過水量、ろ過水厚が、逆循環掘削工法より大き

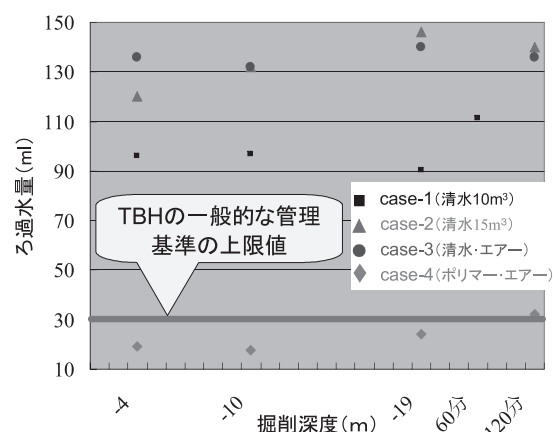


図6 ろ過水量の計測結果

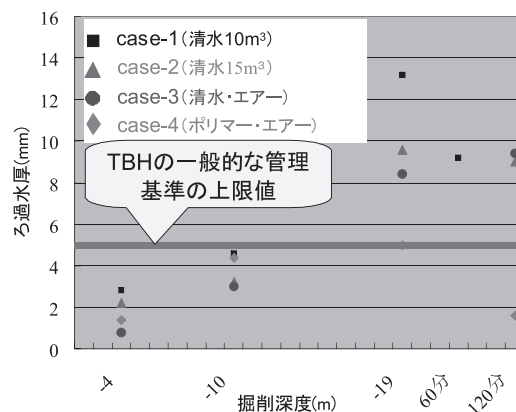


図7 ろ過水厚の計測結果

な値が計測された。表中の○で囲んで示した数値が、逆循環掘削工法（TBH杭）の管理値を超過している数値である。この結果より、通常、正循環掘削工法で用いられている安定液では、比重、砂分が高く、コンクリートと安定液の置換が十分に行われず杭本体の品質低下が生じるおそれがあること、ろ過水量、ろ過水厚が大きく、杭の設計支持力が確保されないおそれがあることが分かった。

5. 良質な安定液を用いた正循環掘削試験

正循環掘削工法を鉄道土木構造物に適用できるようにするため、安定液の品質を逆循環掘削工法と同程度としたときの掘削状況を試験によって確認した。この試験の目的は、正循環掘削工法で、安定液の比重（細粒分の濃度）を低くして、掘削土砂を効率よく排出できることを確認するものである。

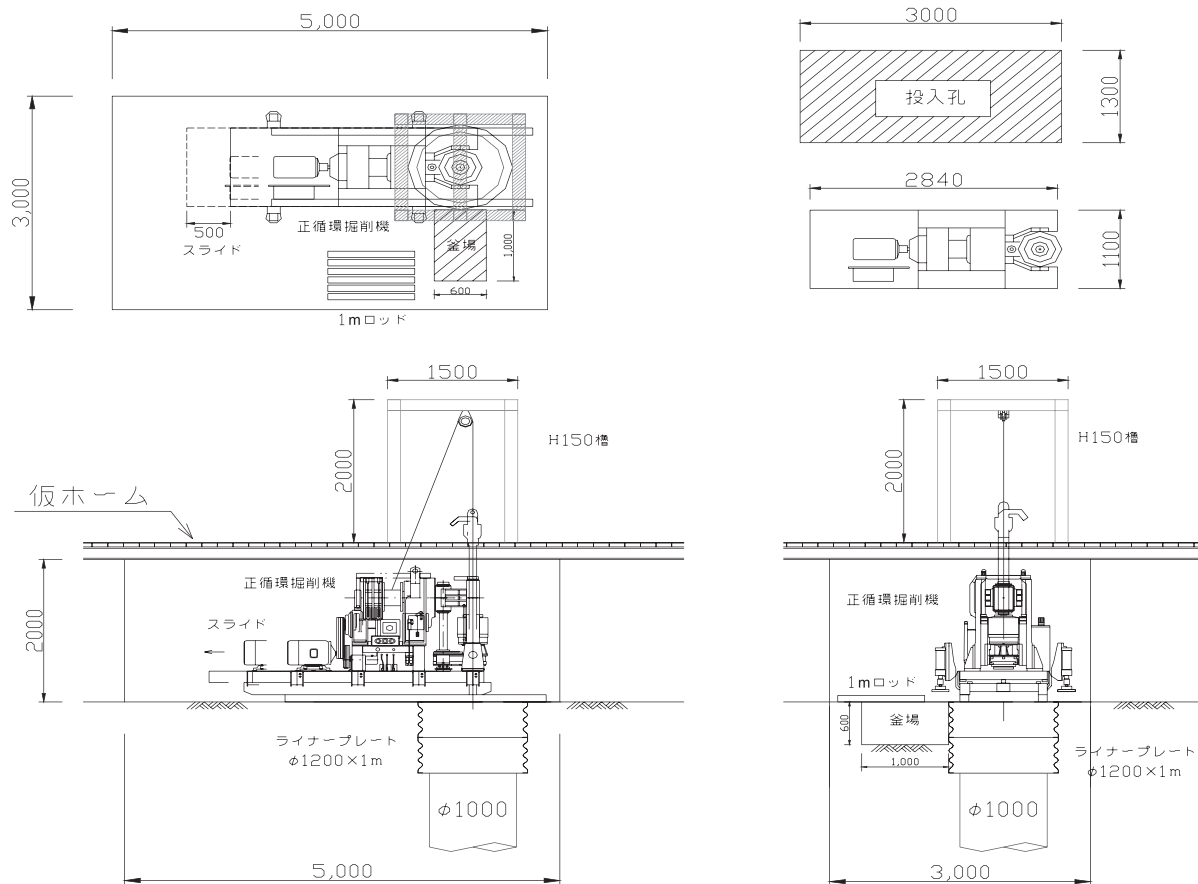


図9 設備概要図

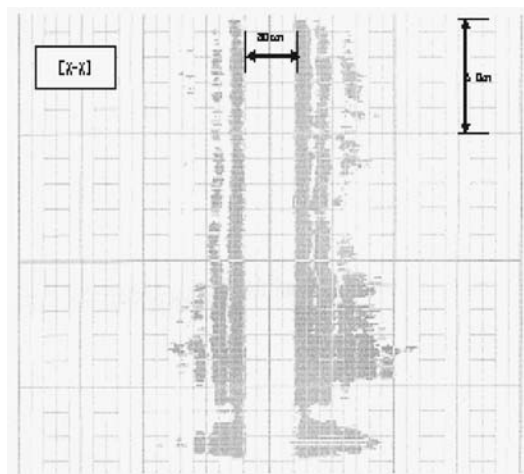


図8 杭孔の超音波探査結果 (Case4)

5.1 試験概要

(1) 掘削地盤条件

地表面から2mまでが埋土、2m～4mまでが粘性土、4m～6mが粘土質細砂、それ以深は細砂である。地下水位は、地表面以下1.0mである。図2に試験箇所の地質柱状図を示す。

(2) 試験シリーズ

試験シリーズは、安定液の種類（清水、ポリマー有・無）、

送水量、空気圧でCase1～4とした。ここで、安定液に空気を混入した場合も実験シリーズとしているが、別の水槽を用いた実験で空気の混入する効果は小さいことが判明しているため、本研究では、空気圧は比較項目としない。表4に試験シリーズを示す。

5.2 試験結果

試験では、各Caseとも、380L/min以上を確保することで、清水であっても、杭孔の掘削が可能であった。杭孔掘削は、各Caseとも、掘削開始から掘削終了後まで7時間程度で掘削を完了した。これより、概ね2m/h以上の掘削速度が維持できたことが確認できた。各安定液の品質管理項目に関する分析結果を以下に示す。また、掘削後の杭孔状態についても検証結果を示す。

(1) 粘性（ファンネル粘度）

掘削開始から掘削終了後までの粘性（ファンネル粘度）の変化を計測した。その結果、Case3のポリマーを添加した安定液では、逆循環掘削工法における一般的な管理基準の下限値よりも大きく安定的な粘性を維持できている

ことが確認できた。図3に粘性（ファンネル粘度）の計測結果を示す。

(2) 比重

掘削開始から掘削終了後までの比重の変化を計測した。その結果、掘削に用いる安定液が循環するため、杭孔体積（約10m³）と比重の変動が相関していることが確認できた。杭孔体積に近いCase1では、杭孔体積の1.5倍の安定液であるCase2～3に比べて、掘削底面に近づくとき急激に安定液の比重が大きくなった。つまり、掘削深度が深くなると循環水槽内の安定液量が少なくなるため、掘削土砂が十分に沈殿しない間に杭孔へ循環して、安定液の比重が急激に上昇したものと考えられる。ただし、逆循環掘削工法における一般的な管理基準の上限値よりも小さな比重を維持できていることが確認できた。図4に比重の計測結果を示す。

(3) 砂分

掘削開始から掘削終了後までの砂分の変化を計測した。その結果、比重と同様の理由により、掘削に用いる安定液が循環するため、杭孔体積と砂分の変動が相関していることが確認できた。杭孔体積に近いCase1では、逆循環掘削工法における一般的な管理基準の上限値を超過してしまうことが確認できた。図5に砂分の計測結果を示す。

(4) ろ過水量

掘削開始から掘削終了後までのろ過水量の変化を計測した。その結果、Case4のポリマーを添加する安定液は、逆循環掘削工法における一般的な管理基準の上限値を満足することが確認できた。つまり、良質なマッドフィルムを形成させて、ろ過水量を低減させるためには、ポリマーの添加は、必要と考えられる。図6にろ過水量の計測結果を示す。

(5) ろ過水厚

掘削開始から掘削終了後までのろ過水厚の変化を計測した。その結果、Case1～4ともに、掘削深度が深くなるとろ過水厚は大きくなった。これは、杭孔体積に対して安定液量が少ないために、循環の過程で十分に掘削土砂が分離されずに、そのまま杭孔へ循環されたため、安定液中の土砂量が上昇したものと考えられる。安定液量を杭孔体積の1.5倍以上とすることと、コンクリート打設する前に安定液中の土砂分の処理が必要となる。図7にろ過水厚の計測結果を示す。

(6) 杭孔形状

掘削後に杭孔形状を超音波探査により確認した。その結果、杭孔は設計径・設計深度どおり掘削されたことが確認できた。図8に杭孔の超音波探査結果を示す。

6. 正循環掘削工法の施工設備の検討

ホームでの昼夜での施工を実現するためには、杭の掘削機械をホーム桁の下に設置できる設備が望まれる。そこで、従来の正循環掘削設備を改良して、ホーム下に設置できる機械高さ2000mm、ホーム上の仮囲い設備2000mm×2000mmで設備検討した。図9に設備概要図を示す。

7. まとめ

試験によって、正循環掘削工法で本設構造物を施工するためには、以下が必要であることが判明した。

- (1) 流速を確保することで、清水のみで、杭孔掘削が可能である。
- (2) 杭孔掘削速度は、各杭とも概ね2m/h以上の速度が確保された。
- (3) ポリマーを添加することで、安定液の粘性が安定した。
- (4) ポリマーを添加することで、良質なマッドフィルムが形成された。
- (5) 安定液は、杭孔体積の1.5倍以上とすることで、砂分の増加を抑えることができる。
- (6) コンクリート打設前に安定液中の土砂分の処理が必要となる。

8. おわりに

正循環掘削工法は、一定の安定液の品質管理を行うことによって、本設構造物の基礎杭工法として適用できることが明らかになった。今後、施工設備、品質管理方法を確立し、実プロジェクトへの適用を図る予定である。

参考文献

- 1) 鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物編）1997.3
- 2) 道路橋示方書・同解説（IV 下部工編）2002.4
- 3) 社団法人、日本基礎建設協会；場所打ちコンクリート杭の施工と管理 2005.7