

孔内水位安定化システムの改良

岩瀬 隆*1

概 要

場所打ち杭の孔内水位安定化システムは、JR 東日本が 2011 年に発行した「列車運行時間帯の近接工事設計施工マニュアル」で厳格化されたリバース工法における場所打ち杭の施工管理方法に対応するため開発したものであり、開発後は実施工での運用を積み重ね、各施工条件に適合するよう各種の機能追加及び改良を加えてきた。2016 年 11 月には鉄道 ACT 研究会の PR 工法登録を行い、今後当社保有技術である超低空頭場所打ち杭工法などと共に社外で運用される機会が増えることが見込まれる。

そこで、これまでの改良による水位制御性能の評価を目的として性能確認試験を実施し、その効果を確認した。本報ではその結果を報告する。

キーワード：場所打ち杭・リバース工法・安定液・水位・管理システム

IMPROVEMENT OF THE SYSTEM FOR STABILIZATION
OF SLURRY LEVEL IN PILE HOLE

Takashi IWASE *1

Abstract

The system for stabilization of the slurry level for cast-in-place pile hole was developed in order to comply with the cast-in-place pile construction control process using the reverse circulation method as precisely specified in the “Manual for Design and Implementation of Construction in the Vicinity of Railway Tracks during Train Service Hours” published in 2011 by the East Japan Railway Company (JR East). After development, the system has been applied repeatedly in actual projects, and various new functions were added and improvements made in order to ensure that the system complied with the conditions in different construction projects. In November 2016, this system was registered as a construction method worthy of PR at the Railway ACT Research Council, and it is expected that in the future the system will be increasingly utilized by parties outside the company together with the Cast-in-place Piling Technique with an Extremely Small Overhead Clearance, which is a proprietary technology of the company.

In view of these circumstances, performance verification tests were conducted with the objective of assessing the slurry level control performance of the system attained through improvements implemented so far, and their effect was confirmed. This report presents the results of the tests.

Keywords: cast-in-place piles, reverse circulation method, stabilizing slurry, slurry level, control system

*1 Construction Technology Group, Research & Development Center, Construction Technology General Center

孔内水位安定化システムの改良

岩瀬 隆*1

1. はじめに

筆者らは、東日本旅客鉄道株式会社による「列車運行時間帯の近接工事設計施工マニュアル」¹⁾（以下、同マニュアルと記す）の制定によりリバース工法での場所打ち杭の施工管理方法が厳格化されたことに合わせて、営業中の鉄道をはじめとする重要構造物に近接して施工する杭工事向けの「場所打ち杭の孔内水位安定化システム」²⁾を開発して運用してきた。

一般に掘削中の杭孔内を満たす安定液の管理水位は、孔壁の安定のため地下水位+2m以上で設定される。そのため、地下水位が高く空頭が制限される施工環境では、安定液水位の変動を小さく抑える必要がある。当社保有技術である超低空頭場所打ち杭工法³⁾の適用案件ではそのような施工条件が多くみられ、より精密な水位制御性能が求められる。

本システムは千葉駅改良・駅ビル建替工事他（場所打ちコンクリート杭）での運用開始から約5年が経過した。この間、現場のニーズ及び実運用を通じて得られた知見を基に機能追加や改良を重ねてきた。2016年6月には御茶ノ水

駅改良工事で運用され、初の他社施工案件適用となった。同年11月には鉄道ACT研究会のPR対象工法登録を行なうなど、今後、超低空頭場所打ち杭工法と共に社外での運用の機会が増えるものと見込まれる。そこで、これまでの水位制御性能の改良効果を確認する検証試験を実施したので報告する。

2. システム概要

本システムの構成を図-1に示す。従来のシステムでは、サクションポンプや土砂分離機などのリバース工法における安定液の循環に関する設備類は、杭施工業者の請負範囲に含まれ、業者所有機械を現場に持ち込んで使用することが多い。また、杭孔への安定液の供給は、杭孔内に取り付けられた水面検知電極（またはフロートスイッチ程度のもの）で水面高を検知して、掘削に伴う安定液の排出や地山への逸水による水位低下時に送泥ポンプを稼働させ、水位が回復すれば停止させるといった、ごく初歩的な自動給水装置が用いられていた。

それに対し、同マニュアルでは、孔内水位の

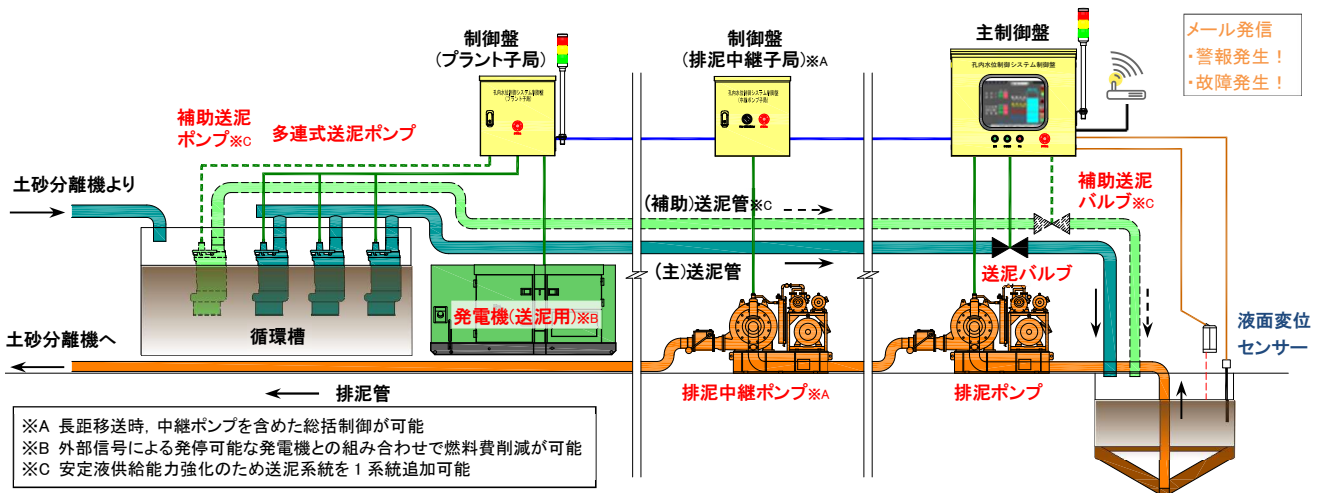


図-1 場所打ち杭の孔内水位安定化システム構成図

*1 研究開発センター 施工技術グループ

管理について、掘削からコンクリート打設完了までの間、坑内水位を常時計測し、作業中は基準水位以上を確保するように管理を行なうものとされ、水位の記録、逸水量の把握と対応、水位低下時の速やかな対応が求められるようになった。そのため、本システムでは液面変位センサーで水位を数値として取得して記録・制御に用い、異常や故障発生時には警報の発信を可能とした。また、水位は計測値の良否が判定しやすいように標高値に換算して表示するものとした。

本システムの機器構成は、場所打ち杭工事は地中連続壁工事と比較して1工事の施工規模が小さく工期が短いことが多いため、大出力のインバータユニットのように高価な機器類を使用すると工事原価への影響が大きくなる。これを避けるため本システムでは、送・排泥機器は下請け業者が持込む従来型の機器に総括制御機能を付加するレトロフィット型のシステムとした。

3. 運用開始後の主な改良点

運用開始後、現場のニーズ及び実運用を通じて得られた知見を基に行った機能追加や改良の主なものを以下に挙げる。

- 自動バルブによる管内貯留方式の(主)送泥管への適用
- 多連式送泥ポンプの個別運転制御による水位変動の抑制
- 送・排泥系統運転開始時、終了時の制御パターンの個別化
- 水位変化予測値を利用した水位制御
- 自動発停可能な発電機への対応

水位変動量の抑制に関する点では、開発当初より自動バルブを装備した補助送泥系統による管内貯留方式で、送・排泥系統運転開始時の応答性向上を図ってきたが、主送泥系統に自動バルブを装備して設備の集約と強化を図った。

従来の多連式ポンプによる自動給水システムでは、全ポンプの順次起動(3秒間隔程度)／一斉停止で排泥量とのバランスをとっていたが、

運転台数を変化させて供給量を段階的に制御するものとした。また、送・排泥系統運転開始時、終了時は掘削中と比較して排泥ポンプの吐出量の変化が大きくなるため、各状態に最適化した制御パターンを作成した。さらに、各機器の起動タイムラグを補完するため5秒後の予測水位を演算して各機器の制御に使用するものとした。

外部信号による自動発停可能な発電機と組み合わせることで、安定液の水位に応じて発電機を自動で始動／停止させることができるため、休工時の水位維持作業の無人化を可能にした。

4. 水位変動抑制手法

先に挙げた改良点のうち、水位変動抑制に関する主要なものを以下に述べる。

4. 1 管内貯留方式の主送泥管への適用

杭孔への安定液供給の際、送泥系統の配管の敷設条件によっては送泥ポンプ停止後も管内の安定液が自然流下により杭孔に流入し続けて水位の上昇をもたらす、ポンプ起動時には先の自然流下によって流失した管内の安定液を補充してから杭孔への供給が開始されるため、送・排泥系統起動時の水位低下が顕著になる。この現象は、送泥ポンプの起動／停止タイミングの調整だけでは解消が難しい。

本システム開発当初、主送泥系統の応答遅れを補うため、杭孔側端末部にポンプと連動する自動バルブを設けた補助送泥系統(図-1内※C)を設けて起動／停止時の水位変動を抑制することを試みた。この系統には、主に杭頭処理に用いるバキューム管の予備配管(5インチ)を用いた。このとき、主送泥系統への自動バルブの設置を避けた理由は、大口径(8インチ)の自動ボールバルブを施工箇所近傍に設けることは、設置スペースの確保や各杭施工毎の移動など盛替え時の作業負荷が大きくなるものと判断したためである。

しかし、送・排泥系統の起動時の一時的な流量差の補完とはいえ、排泥系統と補助送泥系統の管径差による能力差は大きく、その効果は不

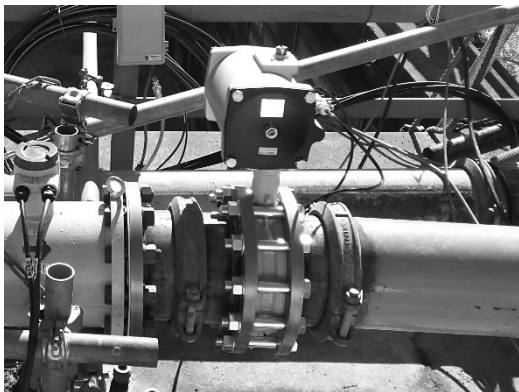
十分であった。加えて、停止時には、主送泥管からの自然流下量に見合った分だけ水位を下げから排泥ポンプを停止させることが必要で、水位変動を小さく抑えなければならない施工条件下や、礫や玉石などによる排泥系統の閉塞には対応できないという問題があった。また、工事規模によっては予備配管を設けない場合もあることから、主送泥系統への自動バルブ設置へと踏み切った。自動バルブには軽量・コンパクトな空圧式バタフライバルブ（写真－1）を採用することで、応答性、設備盛替え時の施工性の問題を解決した。

4. 2 多連式送泥ポンプの個別運転制御

リバース工法では、循環槽内に複数台（3台ないし2台）の汎用型的水中サンドポンプを集合管で並列に接続したもの（以下、多連式送泥ポンプと記す）を設置して、一つの大型ポンプとして機能させることが一般的である。

従来よりこのポンプの動作は、運転信号を受け取ると全台数を起動し、停止信号を受け取ると全台数が停止するようにしていたが、起動時の電源設備（発電機もしくは商用電源）の負担を軽減して工事用電力設備規模を小さく抑えるため、構成要素の汎用サンドポンプは予め設定された時間間隔において1台ずつ順に起動するように設定していた。そのため、この順次起動が要因で、送泥ポンプ全体としては起動応答性の低い大型ポンプの間欠運転となっていた（図－2）。

正常な杭掘削時は、排泥ポンプによる安定液



写真－1 主送泥バルブ (8B バタフライバルブ)

の排出量は変動はあるがほぼ一定である。送泥ポンプの間欠運転の停止期間は安定液の供給量と排出量の差は最大となり、その後、同ポンプが起動しても供給量が排泥ポンプの排出量に達するまでは、杭孔内の安定液水位は低下し続ける。このため、前述の順次起動に起因する起動応答性の低さにより管理水位に対する水位低下は大きくなる。

また、排泥量が変化したときの追従性について考える。排泥ポンプによる排泥量が多連式送泥ポンプの全送泥能力に対して95%から5%に変化したと想定すると（図－3中段）、そのときの水位変動幅は、能力上限付近で最大となり、排泥量が減るにしたがって、ポンプの起動/停止水位設定に近づいてゆく（図－3上段）。

多連式ポンプの構成要素であるポンプA1～ポンプA3の動作パターン（図－3下段）は、排泥量が全送泥能力の33%を下回るまでは3台すべてのポンプがON/OFFを繰り返し、排泥量が小さくなるにしたがって、周期、運転時間も短くなっている。これは送泥ポンプを駆動する電源系統及び、起動器に過大な負担をかけ、故障の原因となる。

改良型の多連式送泥ポンプの個別運転制御による安定液供給機構の追従性を図－4に示す。

ここで管理水位を基準とした各ポンプの起動偏差/停止偏差は、

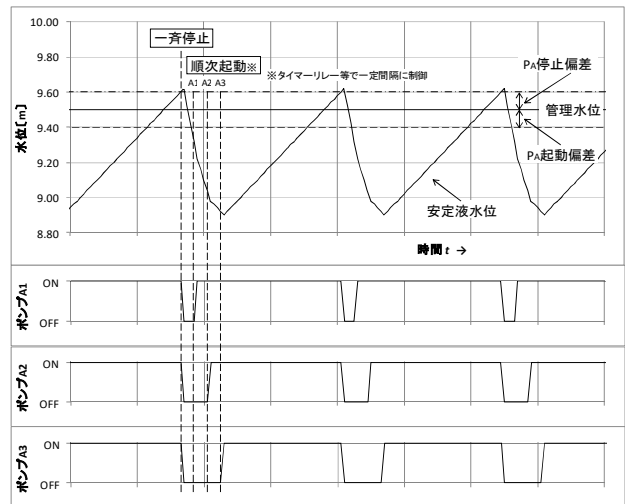


図-2 従来型多連式送泥ポンプ動作パターン

P_{A3} 起動偏差 < P_{A2} 起動偏差 < P_{A1} 起動偏差 < 0 (管理水位) < P_{A3} 停止偏差 < P_{A2} 停止偏差 < P_{A1} 停止偏差と設定する。

排出量 (総供給能力比) が 66.7%~100%である区間①では、管理水位に対する水位偏差が P_{A3} 停止偏差を上回りポンプ A3 が停止すると、排出量が供給量を上回るため水位は低下し始め、 P_{A3} 起動偏差を下回りポンプ A3 が起動すると水位は再び上昇する。これによりポンプ A1 とポンプ A2 が連続運転、ポンプ A3 が間欠運転することで水位のバランスが保たれる。

排出量 66.6%~33.4%である区間②内 (イ) 部では、水位偏差が P_{A3} 停止偏差を上回りポンプ A3 が停止しても供給量が排出量を上回っているため、水位は上昇し続ける。その後、 P_{A2} 停止偏差を上回りポンプ A2 が停止すると、排出量が供給量を上回るため水位は低下し始め、 P_{A2} 起動偏差を下回りポンプ A2 が起動すると水位は再び上昇する。こうしてポンプ A1 が連続運転、ポンプ A2 が間欠運転することで水位のバランスが保たれる。

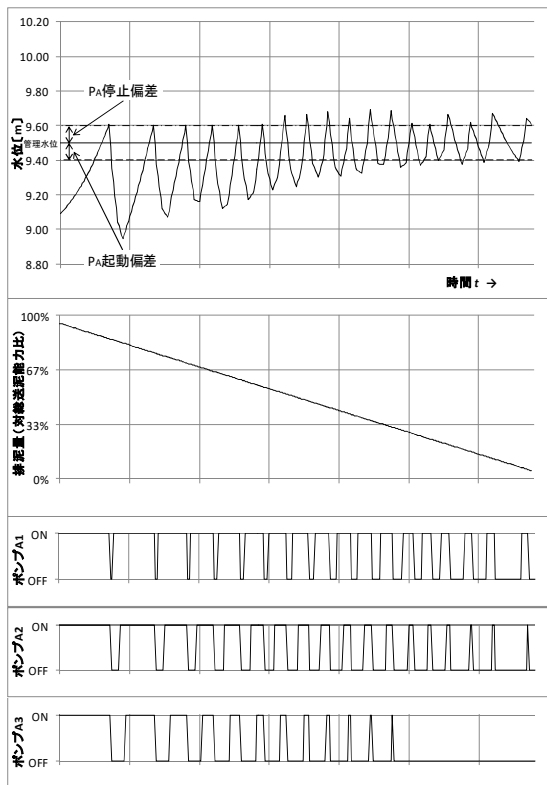


図-3 従来型多連式送泥ポンプの対排泥ポンプ吐出量変化追従特性

排出量 33.3%~0%である区間③内 (ロ) 部では、水位偏差が P_{A2} 停止偏差を上回りポンプ A2 が停止しても供給量が排出量を上回っているため、水位は上昇し続ける。その後、 P_{A1} 停止偏差を上回りポンプ A1 が停止すると、排出量が供給量を上回るため水位は低下し始め、 P_{A1} 起動偏差を下回りポンプ A1 が起動すると水位は再び上昇する。こうしてポンプ A1 が間欠運転することで水位のバランスが保たれる。

これにより排泥ポンプの全流量域にわたり、多連式送泥ポンプの内いずれか1台の間欠運転で供給・排出のバランスを保ち、水位変動を小さく抑えつつ、電源系統や起動器への負担を軽減することができる。

5. 検証試験概要

検証試験は、当社建設技術総合センター (千葉県成田市) 内の試験ヤードに長距離移送を模擬した試験設備を設けて実施した。近年のターミナル駅改良工事等では作業用地の制約から泥水処理プラントから施工箇所までの距離が長く、

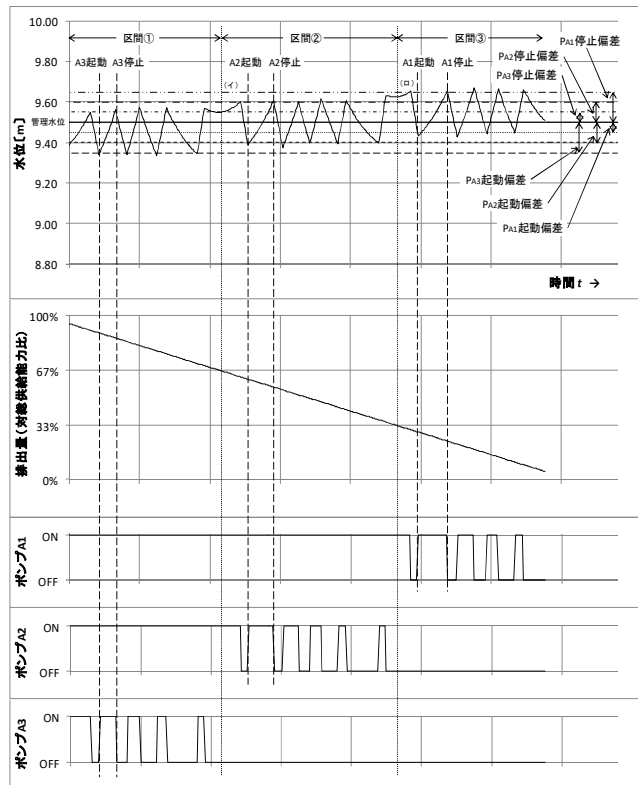


図-4 運転台数制御型多連式送泥ポンプの対排泥ポンプ吐出量変化追従特性



写真-2 検証試験設備(送・排泥配管:400m)



写真-3 検証試験設備(模擬杭孔 φ2,700mm)

配管経路も施工面よりも高所を通さなければならないケースがあり、より送・排泥量の管理が困難になっている。そのような条件を再現するため配管延長(移送距離)は400mとし、そのうち杭孔に近い100m区間は地上高1.8mに設置した(写真-2)。模擬杭孔は、駅改良工事等で施工数が増えつつある大口径杭を想定して円形立坑φ2,700mmを使用した(写真-3)。システムの改良前後の比較は、送泥ポンプ個別制御及び主送泥バルブの有効/無効を切り替えて動作させ行なった。

6. 試験結果

従来型では、送・排泥系統運転開始時に送泥管内を安定液で充填してから供給開始となるため約0.5mの水位低下が生じ、停止時に高所配管区間の安定液の杭孔への流出により約0.5mの水位上昇を生じ、運転中の水位変動幅は約0.3m(管理値に対して低下:0.05m, 上昇:0.25m)であった(図-5)。改良後(送泥バルブ制御+送泥ポンプ稼働台数制御+起動/運転

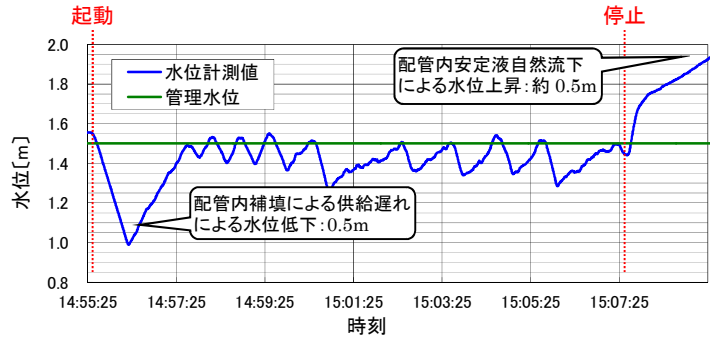


図-5 水位計測結果(従来型)

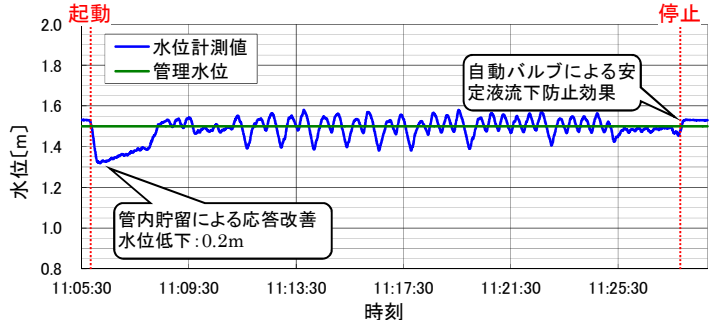


図-6 水位計測結果(自動バルブ+ポンプ個別制御)

／停止制御切替+水位予測)は、起動時の水位低下は0.2m、運転中の水位変動幅は約0.2m(管理値に対し低下・上昇ともに0.1m)、停止時の水位上昇は約0.05mに抑えることができた(図-6)。運転中の水位変動幅は約2/3に、起動/停止時を含めると、約1/3に抑えることができた。

7. まとめ

今回のシステム改良では、杭径φ2,700mmにおいて杭孔内を満たす安定液の最大変動幅を、従来型の約1mに対して0.3mと約1/3に改善することができ、その有効性を確認した。今後、杭径の違いによる制御の最適化を進めてゆく。

参考文献

- 1) 列車運行時間帯の近接工事設計施工マニュアル, 東日本旅客鉄道株式会社, 2011.
- 2) 岩瀬隆ほか: 場所打ち杭の孔内水位管理システムの開発, 第67回土木学会年次講演会, 第584号, pp.15-21, 2004.
- 3) 河野政典ほか: 超低空頭場所打ち杭の開発, セメントコンクリート論文集, 第62号, pp.318-325, 2008.