

報文

BCH工法における 施工管理と改良型BCH工法

井出 雄介* 小河 宗之** 神田 政幸*** 吉川 正****

1 はじめに

低空頭対応場所打ち杭工法（以下、BCH工法という）は、主に鉄道工事における低空頭・狭隘地でのリバースサーキュレーション工法による場所打ち杭施工を目的として2004年に開発され、現在は建築・道路などの各種構造物の基礎杭に適用を拡大し、施工実績は現在までに1,200本を超える。今後も、首都圏では駅施設の改良はもとより、新たな構造物を構築する際にも低空頭・狭隘地での杭施工が必要となることが多く、BCH工法の需要が高まることが想定される。

そこで、BCH工法の現状・課題の把握を目的に施工経験者にヒアリングしたところ、軽量でコンパクトなBHマシンを使用していることに起因する礫地盤での掘削効率における課題が浮かび上がってきた。場所打ちコンクリート杭は可視化が難しい地中に構造物を構築することから、想定外の土質への対応などの施工中の課題はオペレーターの技量や経験に頼り解決していたが、近年、数値解析の精度向上により、安定液中の掘削ずりの挙動の見える化が可能となってきている。本稿では、軽量でコンパクトな施工機械であるBCH工法の利点を活かしながら、改善が望まれてきた礫地盤での掘削効率向上のために、今まで経験的に決められていた掘削ビット形状に着目し、流体解析を用いて安定液中の掘削ずりの挙動

の見える化を図り、最適な改良型掘削ビットを考案した。その開発過程と流体解析、縮小模型実験、実物大模型実験による効果の検証結果、さらに実工事への初適用結果について報告する。

2 BCH工法の概要

低空頭・狭隘地での場所打ち杭の施工方法としては、表-1に示す正循環方式のBH工法や逆循環方式（リバース工法）のTBH工法がある。BH工法は、小型の施工機であるため掘削能力が小さく、正循環方式で掘削するため土砂が孔内を浮遊し、孔壁へのマッドケーキの付着、杭先端部のスライムの堆積およびコンクリートとの置換性の低下などにより、支持力性能および杭体の品質が低いとされ、本設杭としては採用されづらい。一方、TBH工法は、中型の施工機であるため掘削能力に優れ、逆循環方式で掘削するため、BH工法の問題点に対する懸念は少なく、造成される杭の信頼性は高く、本設杭にも採用されている。しかし、低空頭・狭隘地では施工機の搬出入、設置の機動性および空頭制限などがBH工法に比べて劣る。BCH工法は、BH工法を改良して、掘削ビット直上に揚泥管を配置し、掘削直後に巻き上がった掘削土砂を吸引・排出する逆循環方式とし、揚泥効果による掘削能力の向上と孔口からの良質な安定液の供給により、BH工法の問題点を改善したりバース工法である。

表-1 場所打ち杭の施工方法比較

	BH工法	TBH工法	BCH工法
概要図			
本設杭としての適用性	孔壁へのマッドケーキの付着、杭先端部のスライムの堆積およびコンクリートとの置換性の低下などにより、本設ではなく、一般的に仮設の基礎杭として用いる。	逆循環方式で、造成される杭の信頼性が高く、本設杭として使用できる。	正循環方式のBH工法の掘削ビット直上に揚泥管を配置し、孔口からの安定液供給によって、逆循環方式に改良することで、本設杭として使用できる。
狭隘・低空頭部での施工性	空頭制限は3.0m以上であり、狭隘地での施工が可能。 4.9tCCでベースマシンを揚重可能。 尺取り機能で自走可能。	空頭制限は4.7m程度必要（一部特殊低空頭機は、BCHと空頭制限は同等であるが、機動性が劣る）であり、空頭制限下や狭隘地では施工できない。	空頭制限は3.0m以上であり、狭隘地での施工が可能。 4.9tCCでベースマシンを揚重可能。 尺取り機能で自走可能。

* IDE Yusuke 鹿島建設(株) 土木設計本部 鉄道・基礎グループ 設計主査	東京都港区元赤坂1-3-8
** OGAWA Muneyuki ケミカルグラウト(株) 施工本部 基礎工事部 工事管理部長	東京都千代田区霞が関3-2-5 霞が関ビルディング16階
*** KODA Masayuki 公益財団法人鉄道総合技術研究所 事業推進部 部長, 博士(工学)	東京都分寺市光町2-8-38
**** YOSHIKAWA Tadashi 一般財団法人先端建設技術センター 審議役, 博士(工学)	東京都文京区大塚2-15-6 オーク音羽ビル4階

表-2 杭の設計径および有効断面¹⁾

	安定液	地盤抵抗の算定に用いる設計径	杭体の断面性能の算定に用いる有効断面	軸方向鉄筋の最小かぶり(mm)
リバース工法	【自然泥水】 ベントナイト濃度3%未満 かつCMC濃度0.6%以下	公称径	公称径を直径とする円断面	120
	【ベントナイト泥水】 ベントナイト濃度3%~10%	公称径	公称径-50mmを直径とする円断面	150

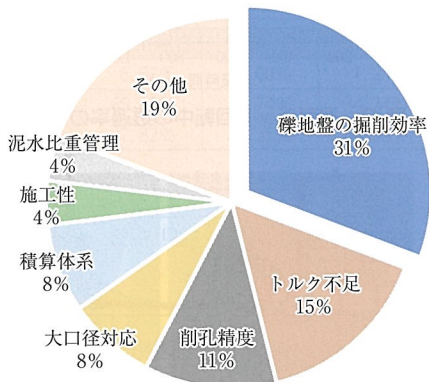


図-1 課題についてのアンケート結果

3 従来型BCH工法の施工管理

BCH工法は掘削ずりを孔口でなくビット直上で回収でき、安定液比重を小さくすることができるため、BH工法の品質課題を解決している。そのため、BCH工法においては安定液の品質管理が重要である。安定液はリバース工法のTBH工法と同等の比重・粘性で管理する。なお、鉄道標準基礎構造物編ではBCH工法はTBH工法と同様、リバース工法に分類されており、表-2のとおり、設計で考慮した条件でベントナイト濃度を管理する必要がある。

4 従来型BCH工法の課題と改良点

従来型BCH工法のさらなる掘削効率の向上を目的とし、施工経験者に施工性、対象地盤、品質、コストの課題についてアンケート調査を実施したところ、図-1に示すとおり、従来型BCH工法は礫地盤での掘削効率に課題があることが判明した。具体的には、揚泥管と掘削ビットが1m程度離れているため、掘削ズリが揚泥管まで十分に巻き上げられておらず、掘削効率が低下していることが分かった。掘削効率向上の方法としては、まずはベースマシンを改造することによるトルクアップや揚泥ポンプの増強が考えられたが、これらの方法だとBCH工法の利点である低空頭・狭隘地での施工性、機動力が損なわれる。そこで、掘削機構の改良に着眼し、掘削ビットにおける①回転速度の変更、②攪拌翼角度の変更、③攪拌補助翼の設置、④先端構造の変更、そのほかに⑤揚泥管構造の変更、⑥揚泥管直上への整流ファンの設置、⑦安定液の性質変更などを検討した。その結果、掘削ビットにおける①回転速度の変更、②攪拌翼角度の変更、③攪拌補助翼の設置が改良効果および実現性があると判断し、その効果について検証した。効果の検証には掘削メカニズムの解明と評価方法を確立することが不可欠であるため、掘削安定液の中で礫がどのような挙動をしているか把握するために流体解析を実施した。

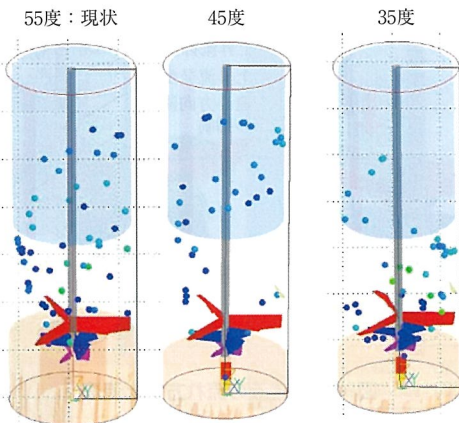


図-2 掘削ビット回転速度ごとの上昇流の変化

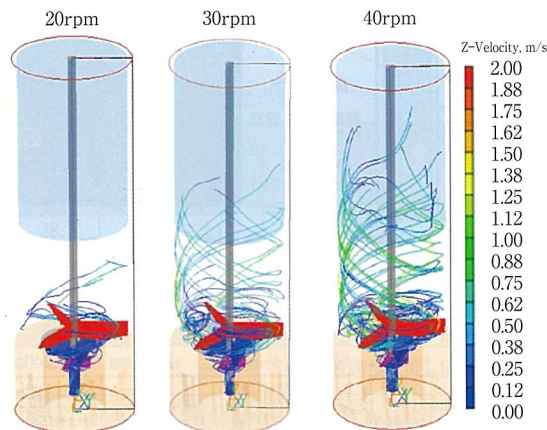


図-3 攪拌翼の角度ごとの上昇流の変化

5 効果の検証

5.1 流体解析²⁾

上記掘削機構の改良効果を検証するために、流体解析を実施した。解析ソフトは「PHOENICS」を使用した。本ソフトは熱流体解析により液体の流れの状況を数値的に計算し可視化することができ、建築・医療・気象など様々な分野で活用されている。①掘削ビットの回転速度の変更、②攪拌翼角度の変更の解析結果を図-2、図-3に示す。掘削ビットの回転速度を早くするにつれ、安定液の上昇流の速度が大きくなることが確認できた。攪拌翼の角度の違いによる流体の上昇傾向は現状の55度と45度がほぼ同じで、35度では上昇流が低下する傾向が見られ、現状の攪拌翼角度が最適である可能性が高いことが判明した。掘削ビットの回転速度を早くすると掘削効率が向上する可能性があるが、実施工では回転速度を早くすることにより孔壁が崩壊する可能性があること、マシンサイズを大きくする必要があることから、回転速度はそのままとし、掘削効率を向上させるために攪拌補助翼の設置について検討した。

現状の掘削ビットでの安定液の流れは図-4(左図)に示すとおり、攪拌翼で攪拌混合された流体が孔壁方向に向かい孔壁沿いに上昇している。一方、揚泥管がある中心から半径の約2/3の範囲では下降流が生じていることが分かった。そこで、遠心方向および孔壁付近の上昇流を制御し、揚泥管の吸い口付近に上昇流を発生させるために、攪拌翼に内向きの補助翼を設置することとした。補助翼を設置した結果、図-4(右図)に示すとおり、

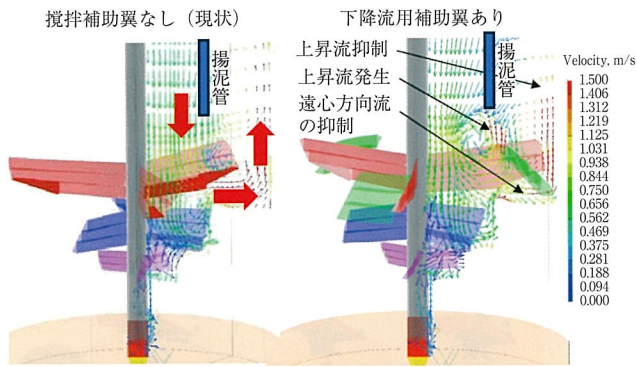


図-4 安定液の流れ方向と流速

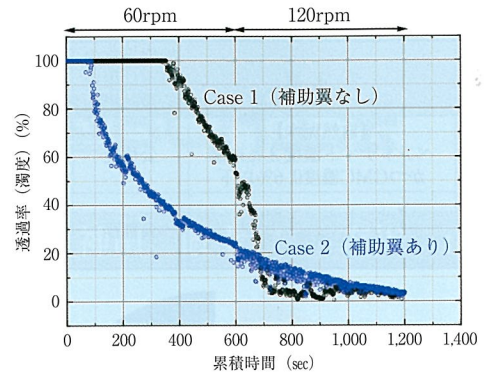


図-6 掘削ビット回転中の透過率の変化

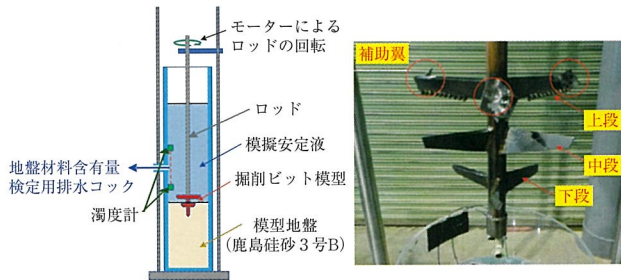


図-5 模型実験装置概要と掘削ビット模型

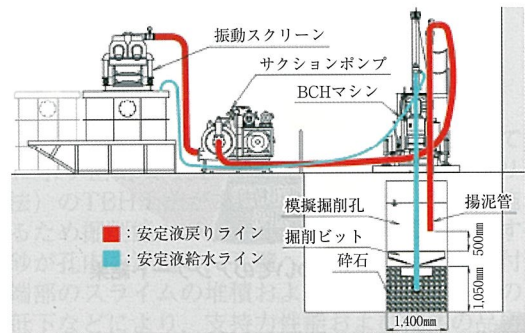


図-7 実物大実証実験装置概要

揚泥管の吸い口付近に上昇流が発生し、揚泥効率が向上したと考えられる。

5.2 縮小模型実験³⁾

補助翼を設置した場合の掘削効率を検証するために、縮小模型実験を実施した。模型実験装置の概要を図-5に示す。実物の1/5程度を想定し、掘削ビットの上段攪拌翼に内向き補助翼を設置した。掘削孔を模擬した円筒形のアクリル内に鹿島珪砂3号Bを用いて水中落下法により砂礫地盤材料を想定した模型地盤を構築し、掘削ビット模型を地盤表面付近で回転させることで、掘削時の揚泥を模擬した。縮小模型実験の条件設定は、フルード数、レイノルズ数、液体と粒子の相互作用の相似則を考慮して、表-3とした。

掘削ビット直上安定液の濁度をレーザー光により、地盤材料の挙動を画像解析により計測し掘削効率の評価を行った。実験のパラメータは補助翼の有無とし、各ケースについて60rpmでの掘削ビットの回転を10分間行ったのちに、120rpmでの10分間の回転を連続して行った。濁度計で計測された安定液中の透過率変化を図-6に示す。

60rpmでの透過率の変化を補助翼の有無で比べると、補助翼を設置したことで透過率が下がり始める時間が短縮しており、地盤材料の巻上げ量が増大し、揚泥効率の向上が確認できた。また、内側に向けて取り付けられた補助翼により、掘削ビット回転時に地盤材料が掘削面(模型実験においてはアクリル面)に押し付けられる量が減少したため、補助翼を設置したケースでは補助翼なしに比べ回転時のトルクが約40%減少し、掘削時の心ずれが生じにくくなるなどの付加的な効果も確認できた。

5.3 実物大実証実験⁴⁾

流体解析および縮小模型実験での掘削ビットへの内向き補助翼の設置による揚泥効率の向上結果を検証する目

表-3 模型実験の条件と実物の比較

	実物	模型
掘削ビット寸法	1,200mm	240mm
土粒子径	5mm	1.2mm
重力加速度	9.8m/s ²	9.8m/s ²
速度	1	0.5
回転角速度	30~60rpm	60~120rpm
粘性係数	100mPa·s	11mPa·s

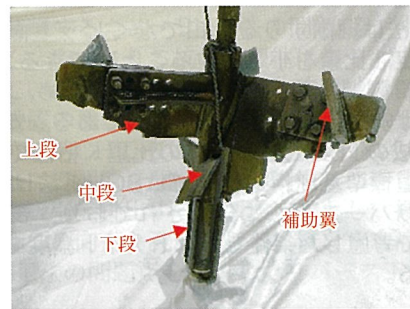


写真-1 改良型掘削ビット

表-4 実物大実証実験の試験確認項目

確認内容	確認項目	確認方法
①掘削効率	5分間の礫排出重量	重量計測
	排出礫の粒径比較	ふるい分け
	排出礫の最大粒径	ふるい分け
②施工性確認	掘削ビットの抵抗	マシンのガタつき、ブレ掘削ビットの偏心
	掘削ビットの変形	目視
③その隊	安定液の粘性	ファンネル粘度計

的で、実物大実証実験を行った。実験装置概要を図-7に、内向き補助翼を設置した改良型掘削ビットを写真-1に示す。地下ピット内に径1,400mmの鋼管を設置し、鋼管内に碎石(5号6号混合, 5~20mm)を投入し模擬地盤を構築した。安定液は天然ポリマー系を主体とした増粘剤を用い、実施工と同程度の比重、粘性とした。

実験は掘削ビットのうち、下段、中段ブレードを模擬地盤に貫入した状態から30rpmで5分間掘削したのちに、60rpmで5分間掘削し、従来型掘削ビット(補助翼なし)と改良型掘削ビット(補助翼あり)で各1回行った。ビット先端から安定液を供給し、上段ブレードから500mm上方で揚泥管から吸引することで掘削土砂を振動スクリーンまで排出した。試験項目を表-4に示す。

表-5 試験結果 (30rpm, 60rpm 各5分間)

確認内容	確認項目	従来型	改良型
①掘削効率	5分間の礫排出重量	49.68kg	145.43kg
	排出礫の粒径比較	表-6参照	
	排出礫の最大粒径	19mm以下	25mm
②施工性確認	掘削ビットの抵抗	変化なし	変化なし
	掘削ビットの変形	変化なし	変化なし
③その隊	安定液の粘性	37.03秒	36.39秒

表-6 排出礫の粒径比率 (30rpm, 5分間)

粒径	試験用碎石	従来型	改良型
19.00mm~	6.52%	0.00%	1.20%
9.50mm~19.00mm	65.65%	15.74%	34.24%
4.75mm~9.50mm	27.82%	84.25%	64.56%

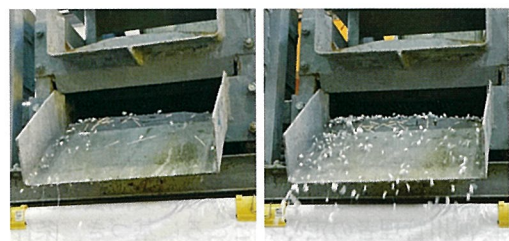


写真-2 振動スクリーンからの礫の排出状況

写真-2 振動スクリーンからの礫の排出状況



写真-3 施工場所写真



写真-4 排出された礫

▽施工基面

GL-7.7m	B	埋土層 N値10以下 φ2~80mmの礫が混在
GL-12.8m	Tocl	粘性土層 N値10以下
GL-16.7m	Tos	砂質土層 N値20~30 φ5~30mmの礫が混在
	Tog	東京礫層 N値50以上 φ2~100mmの礫が混在

図-8 土層構成

表-7 排出土の比較結果

ふるいの 公称目開き (mm)	ふるい残留量(掘削深度: GL-15m)				ふるい残留量(掘削深度: GL-18m)			
	従来型ビット		改良型ビット		従来型ビット		改良型ビット	
	(kg)	(%)	(kg)	(%)	(kg)	(%)	(kg)	(%)
4.75	9.2	38.5	19.4	14.9	1.4	15.6	45.1	77.8
9.50	12.3	51.5	31.6	24.3	0.7	7.8	12.5	21.6
19.00	2.4	10.0	79.2	60.8	6.9	76.7	0.4	0.7
計	23.9	100	130.2	100	9.0	100.0	58.0	100

表-8 各土層での掘進速度比較

土層	従来型ビット	改良型ビット
埋め土層	7.23m/hour	12.50m/hour
シルト層	2.92m/hour	9.95m/hour
礫層 (GL-15m)	2.55m/hour	3.26m/hour
礫層 (GL-18m)	0.27m/hour	0.94m/hour

従来型掘削ビットと改良型掘削ビットでの各試験結果を表-5に、排出礫の19.0mm, 9.5mm, 4.75mmふるいにより算出した粒径比率を表-6に、振動スクリーンからの礫排出状況を写真-2に示す。

排出開始から5分間での粒径4.75mm以上の礫の排出重量は従来型掘削ビットで49.68kgに対し、改良型掘削ビットで145.43kgと約3倍であった。また、従来型掘削ビットでは19mm以上の礫は排出されなかったのに対し、改良型掘削ビットでは最大粒径で25mm程度の礫の排出が確認され、排出重量、排出最大粒径から掘削効率が大きく改善していることが確認できた。また、補助翼を設けたことによる掘削ビットの電流抵抗値上昇やビット変状も見られず、改良型掘削ビットを使用したことによるトラブルは確認できなかった。

5.4 実工事での適用事例

品川駅付近連続立体交差事業第2工区において、軌道仮受け杭に改良型BCH工法を適用した。本工事は写真-3に示すとおり、供用中の品川駅東西自由通路部での施工であったため、第三者災害防止のため防護柵を設置した狭い施工場所で、かつ高架橋下の低空頭で施工可能なBCH工法が選定されている。削孔径はφ1,000mmで、削孔長はL=18.7mである。対象土層は図-8に示すとおりで、支持層であるGL-16.7m以深の東京礫層(φ2~100mmの礫が混在)を2m削孔した。

礫層(GL-15mおよびGL-18m)において30rpmで5分間、60rpmで5分間削孔した際の従来型と改良型ビットの排出土の比較結果を表-7に、土層での掘進速度を表-8に示す。

表-7より、改良型ビットでは従来型ビットと比べGL-15mで5.4倍、GL-18mでは6.4倍の礫排出が確認でき、排出礫の最大粒径は100mm(写真-4参照)であった。また表-8より、礫層以外の土層においても大幅な掘進速度の向上が確認でき、補助翼を設置したことの効果が確認できた。

6 おわりに

BCH工法が開発されてから20年が経過し、多くの施工実績から課題が浮かび上がってきた。本稿では、場所打ち杭の施工において解明されていなかった安定液中の掘削ずりの挙動を流体解析および各種実験により見える化し、掘削ビットに補助翼を設置する改良を行うことで大幅に掘削効率を向上させることができた。改良型BCH工法を施工する際は、補助翼により発生する上昇流付近に揚泥管先端を位置させるよう管理し、礫が排出されているか確認しながら施工することが重要である。

今後、リニューアル工事の増加により低空頭・狭隙地での場所打ち杭施工の需要増加が予想されるため、さらなる掘削効率の向上と適用拡大を目指していく。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説基礎構造物，平成24年1月。
- 2) 吉川ら：低空頭対応場所打ち杭BCH工法の新たな取り組みについて，土木学会第77回年次学術講演会，2022.9。
- 3) 佐名川ら：低空頭場所打ち杭BCH工法改良に向けた新たな取り組みについて(その2)，土木学会第78回年次学術講演会，2023.9。
- 4) 井出ら：低空頭場所打ち杭BCH工法改良に向けた新たな取り組みについて(その3)，土木学会第78回年次学術講演会，2023.9。