

大口径場所打ち杭の固結シルト地盤掘削方法の開発

竹田 茂嗣*1・山田 宣彦*1

概 要

大都市圏のターミナル駅などの改良工事では、駅に商業施設を併設するなど使用目的が多様化し、駅ビルは中・高層化の傾向にあり、その支持杭は大口径化しつつある。

さらに、同種の工事は駅周辺地域も含めて高度利用されており、その施工条件は非常に狭隘なものとなっている。そのため、狭隘条件下での大口径掘削が可能な超低空頭場所打ち杭工法の開発を行い、これまでは主に一般土質を対象として施工実績を積んできた。

このほど、同工法の適用範囲拡大を目指し、 $N \geq 50$ の固結シルト地盤で $\phi 3000\text{mm}$ 以上の大口径の掘削方法を開発し、実証試験を行った。なお、本件は JR 東日本との共同研究開発である。

キーワード：大口径場所打ち杭，固結シルト，超低空頭場所打ち杭工法

DEVELOPMENT OF THE METHOD OF EXCAVATING CONSOLIDATED SILT GROUND WITH CAST-IN-PLACE OF LARGE DIAMETER PILES

Shigetsugu TAKEDA *1, Nobuhiko YAMADA *1

Abstract

In remodeling of terminal station buildings in the metropolitan area, the use of such buildings is diversified along with the operational needs of adjacent commercial facilities, and stations tend to become medium and high-rise buildings on large bearing piles.

In addition, stations are generally remodeled to meet diversified needs in conjunction with circumstances in the surrounding area. Therefore, projects are frequently constructed in extremely restricted space. Under these circumstances, we have developed a cast-in-place piling method in which piles are driven from a very low height, making pile placement possible in confined space. So far, this method has been utilized for sites of general geology.

But for the future extension, we have developed an excavation method with a large diameter boring of more than 3000 mm, which is dedicated to consolidated silt grounds with an N value of 50 or more, and implemented a demonstration test.

This development project was conducted under joint research with the JR East Japan.

Keyword: Cast-in-place of large diameter piles, Consolidated silt, Cast-in-place piling under ultra-low headroom

*1 Engineering Department, Civil Engineering Division

大口径場所打ち杭の固結シルト地盤掘削方法の開発

竹田 茂嗣*1・山田 宣彦*2

1. はじめに

大都市圏のターミナル駅などの改良工事では、駅に商業施設を併設するなど使用目的は多様化し、駅ビルは中・高層化の傾向にある。そのためそれを支持する杭は大口径化しつつある。

一方、このような工事が行われる駅では周辺地域も含めて、高度利用が既に進んでおり、非常に狭隘な条件での施工を強いられることが多い。それゆえ、狭隘条件下での大口径掘削ができる超低空頭場所打ち杭工法¹⁾の開発を行い、これまでは一般土質を主に対象として施工実績を積んできた。

本開発は、これまでは機械掘削が困難で深礎工法を選択するしか方法がなかった、狭隘条件下の $N \geq 50$ の硬質な地盤(固結シルト)を対象に、超低空頭場所打ち杭工法を用いた効率的な掘削方法を、JR 東日本と共同で開発するものである。

2. 開発の概要

2.1 開発条件

開発の条件は、表-1のとおり設定し、効率的な掘削を目指し開発を実施した。

表-1 開発条件

項目	条件	備考
対象土質	$N \geq 50$ の固結シルト	一軸圧縮強度 4500kN/m ² 以上
杭径	ϕ 3200mm	
掘削長	10m 以上	対象土質貫入長
掘削方法	超低空頭場所打ち杭工法	

2.2 開発フロー

開発フローは、図-2のとおりとした。

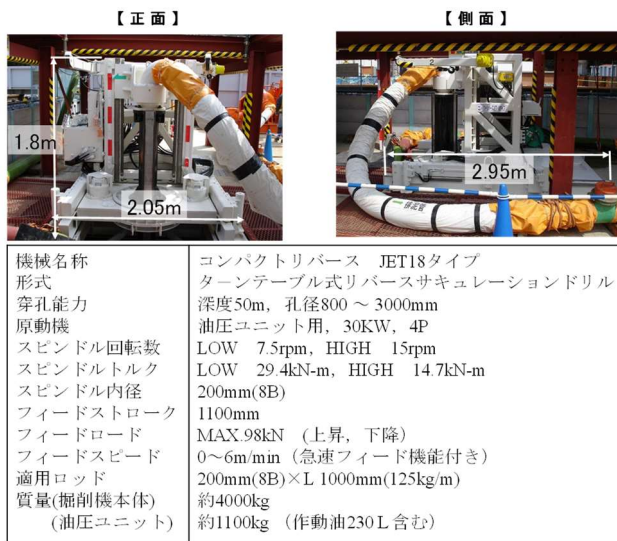


図-1 超低空頭場所打ち杭工法

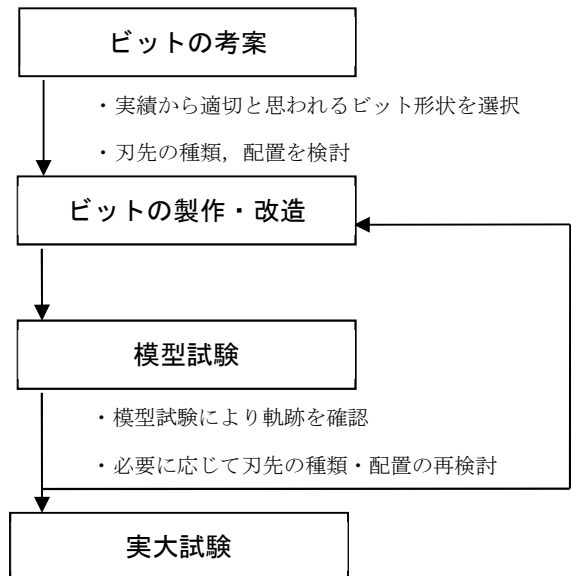


図-2 開発フロー

*1 土木本部 エンジニアリング部 施工技術研究開発 グループ

*2 土木本部 エンジニアリング部 基礎・地盤技術グループ

3. 掘削ビットの検討

3.1 ビット形式

硬質地盤における大口径場所打ち杭の施工を施工環境にとらわれずに既往の工法より選択した場合、大きな掘削トルク能力のある大型機械により、大重量ビットを用いることとなる。参考までに、 $qu=4500\text{kN/m}^2$ 、 $\phi 3200\text{mm}$ の場合の標準的なウィングビットの掘削トルクは $80\text{kN}\cdot\text{m}$ 以上²⁾、ウィングビットの適正重量は、 $500\text{N}\times 3.2\text{m}=160\text{kN}$ ³⁾となる。

なお、本開発では、超低空頭場所打ち杭工法の限られた機械能力で、いかに効率的に掘削するかが重要な課題となる。

ビットの形式は、大きく分けてウィングビット（3翼・4翼，一般土質用・硬土質用），軟岩用トロコイドビットや，硬岩用のローラビットなどがあるが，本開発が対象とする地盤強度は 4500kN/m^2 程度の固結シルトであり，一般に硬土質用のウィングビットを用いることが適当である。

また， $\phi 3200\text{mm}$ の大口径掘削においては，最外周部の刃先の運動量はロッド1回転で，約 10m の掘削を行うため，ビット数を多く配置し磨耗の進行を抑えることと，孔曲がりに対して比較的抵抗力があるという理由で4翼ビットを採用することとした。

3.2 大口径のウィングビット適用事例

大口径掘削のビットの事例として，千葉駅改良工事において， $\phi 3000\text{mm}$ を超低空頭場所打ち杭工法を用いて掘削した実績がある。

当初，不安定な掘削であった改良前のビットと改良後のビットを図-3に示す。当初使用したビットは， $\phi 3000\text{mm}$ の4翼のウィングビットで，刃先は平刃を使用し，スタビライザーおよびリングスタビは装着していなかった。そのため，硬質シルト（ $N=20$ 前後）層などでは掘削回転が不安定となり，孔壁が荒れ，コンクリートの打設数量が増大する結果となった。対策として，ビットにリングビットを，さらにスタ

ビライザーを装着し，掘削回転を安定させるとともに，掘削トルクのロスを低減させた。また，一部尖り刃に変更し，切り崩しの効果による掘削を試みた。

改良後の掘削管理システム⁴⁾の計測結果と孔壁測定結果を図-4に示す。これまでリバース工法による掘削トルク等の計測データは，記録されていないケースが多いが，超低空頭場所打ち杭工法では掘削管理システムを標準搭載し，杭の高品質化を図っている。

掘削の結果，孔壁は安定し，コンクリート打設量は数%程度設計より多い程度に収まった。

以上より，本開発においても4翼ウィングビット+リングビット+スタビライザー+ウェイトを基本形状にすることとした。

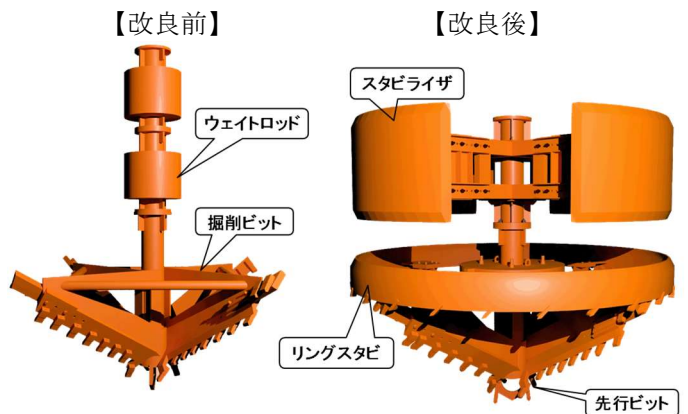


図-3 千葉駅改良工事で用いた掘削ビット（ $\phi 3000\text{mm}$ ）

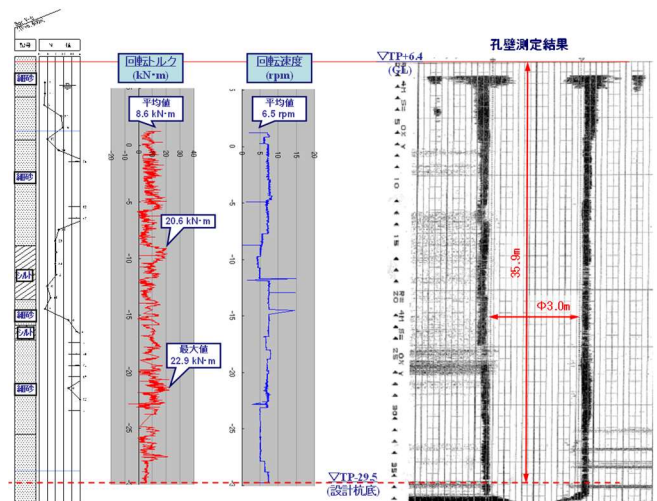


図-4 掘削結果

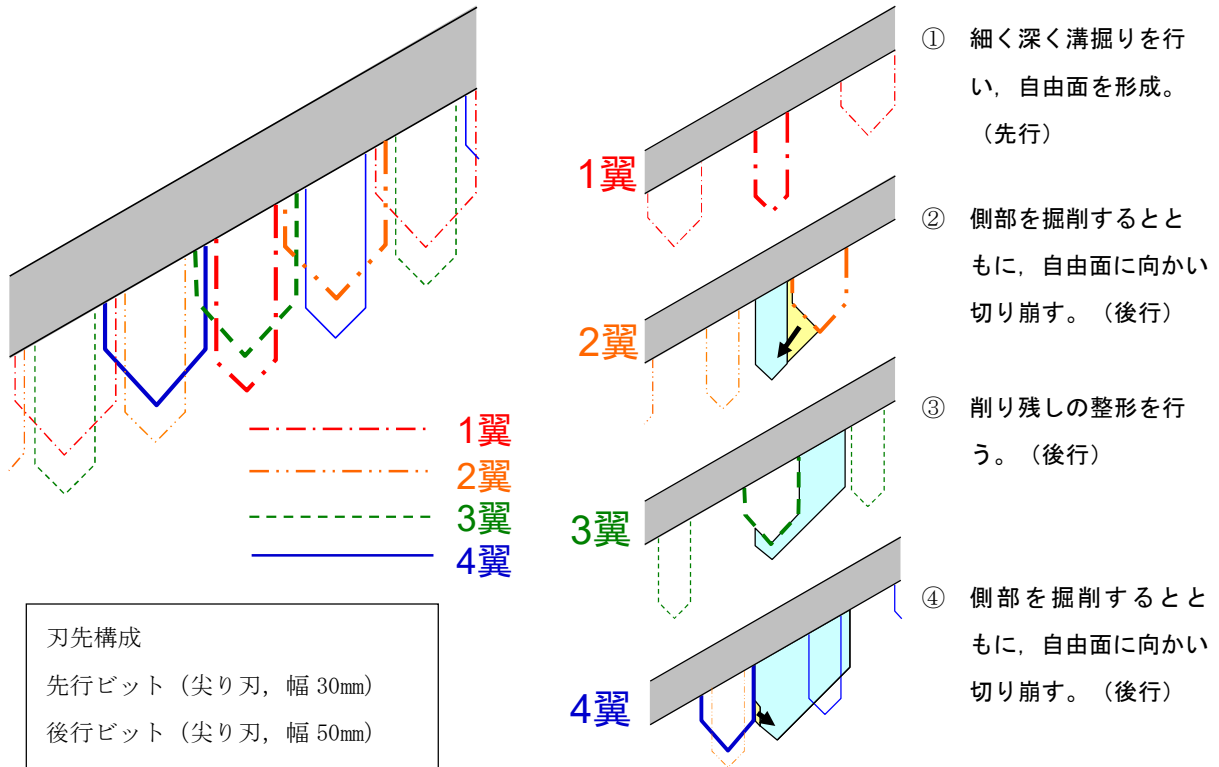


図-5 掘削メカニズム説明図

3.3 切り崩し方法とトルクの低減

一般に、同じ幅の刃先を用いて掘削した場合の抵抗は、尖り刃の方が平刃に比べて掘削抵抗は小さくなることが知られている。本開発においては、掘削トルクを低減させるため、尖り刃主体の刃先構成を、採用した。

掘削トルクの低減方法としては、自由面を形成しその面に向かって切り崩していくことで効率的な掘削ができることが、シールド工法や山岳トンネルの掘削方法などで知られている。本開発においても、同様の考えを持ち込み、掘削トルクの低減を図ることとした。

図-5は、1つの先行ビットに注目した掘削のメカニズムであるが、他の先行ビットも同様に、これらの効果が重なり合い掘削トルクの低減を実現する。

なお、本開発に用いる刃先は、入手しやすさを考慮して市用品を使用することを前提とした。以上より、考案した掘削ビットを図-6に、各部の特長を表-2に示す。

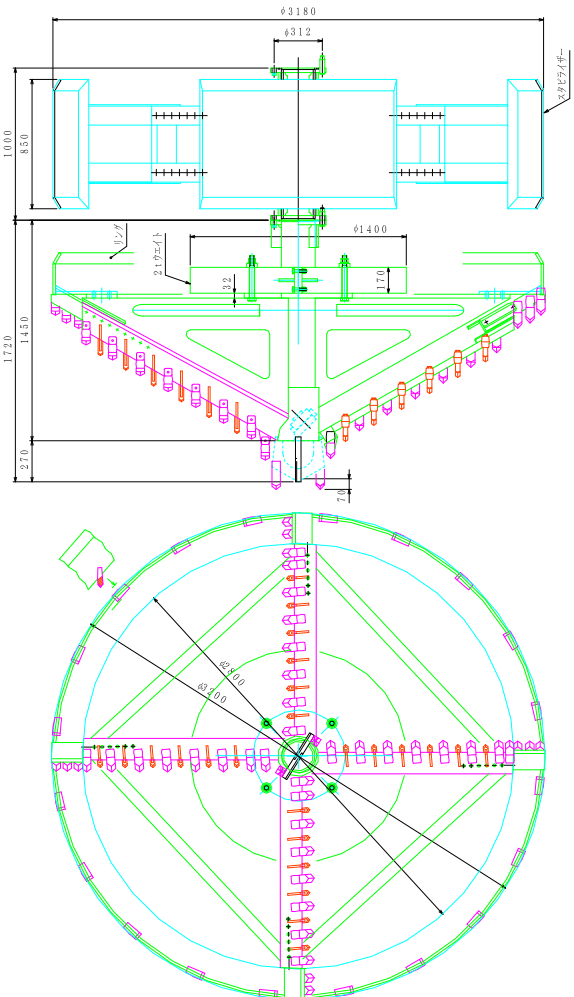


図-6 掘削ビット

表－2 固結シルト向け掘削ビットの特長

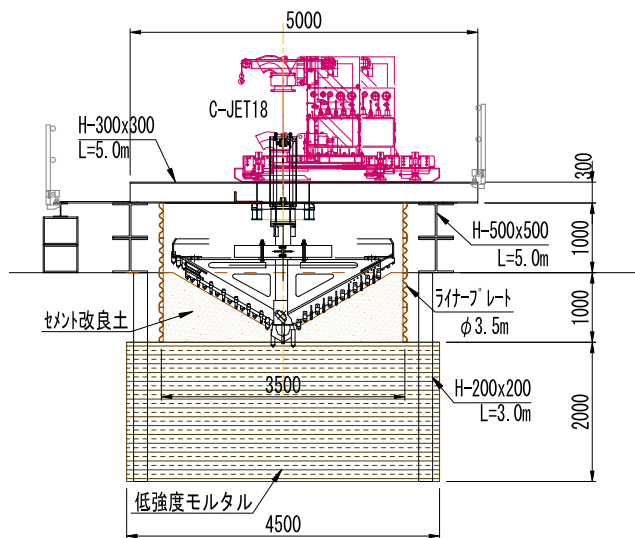
項目	効果	備考
リングビット	この取付により回転を安定させることで、回転のブレによるトルクロスを抑制する。	可変式ビットに取付ける場合、掘削径ごとにリングは製作となる。
ウェイト	ビット・ロッドを低重心化させ、回転を安定させる、刃先荷重を大きくするなどの効果がある。	着脱式。必要に応じて追加可能。
スタビライザー	掘削回転を安定させるとともに、傾斜地盤への孔曲がり対策。	可変式である。
パイロットビット	先端を先行貫入させることで、回転を安定させる。パイロットビットのみ延長することで、トルクを上げずに傾斜地盤対策と同等の効果を見込む。	傾斜地盤対策として、翼の傾斜を大きくする方法があるが、これを行なうと掘削面積が大きくなり、トルクが増す。
尖り刃幅 30mm	先行ビットとして硬質地盤に自由面を形成する。幅が狭く、比較的低トルクで掘削可能。	
尖り刃幅 50mm	先行ビットが掘削した面に切り崩す効果を見込む。	

4. 模型試験

4. 1 模型試験概要

本試験を前に、ビット刃先の軌跡確認を目的に模型試験を鉄建建設(株)建設技術総合センターで実施した。その概要図を、図－7に示す。

模型試験では、低強度モルタル（4000kN/m²を目標）をあらかじめ地中に造成しておき、これを超低空頭場所打ち杭工法により、考案したビットで掘削した。なお、掘削は泥水循環を行わず、バキュームによる除去を行い軌跡の確認を行った。



図－7 模型試験概要図

低強度モルタルの配合表を表－3に示す。

また、模型試験の準備状況を写真－1～写真－5に示す。

表－3 低強度モルタル配合表

	単位量 (kg/m ³)					
	水	粉体			細骨材	A E 減水剤
		普通セメント	石灰石微粉末	計		
	W	C	Ls	P	S	A d
配合	275	215	180	395	1408	1.58
比重	1	3.16	2.71	2.93	2.58	1.08



写真－1 低強度モルタル打設状況



写真-2 口元管設置



写真-5 杭打ち機セット



写真-3 ビット投入



写真-6 軌跡確認1



写真-4 ビットセット



写真-7 軌跡確認2

4. 2 模型試験結果

掘削後に泥水および掘削土を除去し、軌跡を確認した結果を写真-6、写真-7に示す。

掘削に伴うロッドのブレはなく、ビットの掘削溝幅は 30mm と刃先の幅とほぼ同じ幅であった。また、ビットの掘削深さは 20~25mm であった。

掘削管理システムの結果より、掘削データは

以下のとおりである。

掘削速度 : 1.2mm/分程度

回転トルク : 22~25kN

回転数 : 5~6rpm

削孔径は、杭径φ3200~3240mmであったため、掘削時の回転は安定していたと考える。

なお、掘削当日の低強度モルタルの強度は、4200kN/m²程度であった。

4.3 ビットの検証

写真-8～写真-10に、ビットの磨耗状況を示す。超硬チップの磨耗は、問題となるようなものはなかったが、一部、超硬チップを固定する母材やホルダーに磨耗が見受けられた。



写真-8 パイロット部シェルビット



写真-9 外端尖り刃(50mm)



写真-10 最内端尖り刃(50mm)

表-4 模型試験の評価

項目	結果	備考
掘削速度	1.0 mm/分程度	泥水循環を行なわないで掘削したので、送排泥した場合の掘削速度がどのようになるかは、不明ではあるが、想定している掘削速度より遅い。
回転トルク	22 kN・m	機械能力としては余裕がある
回転状況	安定	ブレがなく、非常に安定。トルクロスはほとんどなし

表-5 ビット重量

名称	重量
φ3200mm 掘削ビット	24 kN
スタビライザー	11 kN
ウェイト	30 kN
合計	65 kN

表-4に示すとおり、掘削トルクは安定して、掘削機に余裕のある数値を示していた。また、ロッド等の回転状況は良好であり、掘削軌跡に掘り残しもなかった。

一方で、掘削トルクが上がらず掘削速度が遅いことから、刃先に伝わる荷重不足が懸念された。模型試験のビット荷重は掘削ビット(24kN)のみであった。

実大試験においては、表-5に示すとおりウェイトを10kN追加し、30kNとした。

また、パイロット部のシェルビットについては、先掘り量を深くしても、排土できないのでトルクが上昇してしまうことが懸念された。そのため、突出長を現況の70mmから35mmに変更した。

以上の改良を実施し、実大実証試験を行った。

5. 実大実証試験

5.1 試験の概要

実際に固結シルト地盤が一部露頭している神奈川県川崎市の某地において、図-8、図-9に示すとおりφ3200mmで固結シルト層を

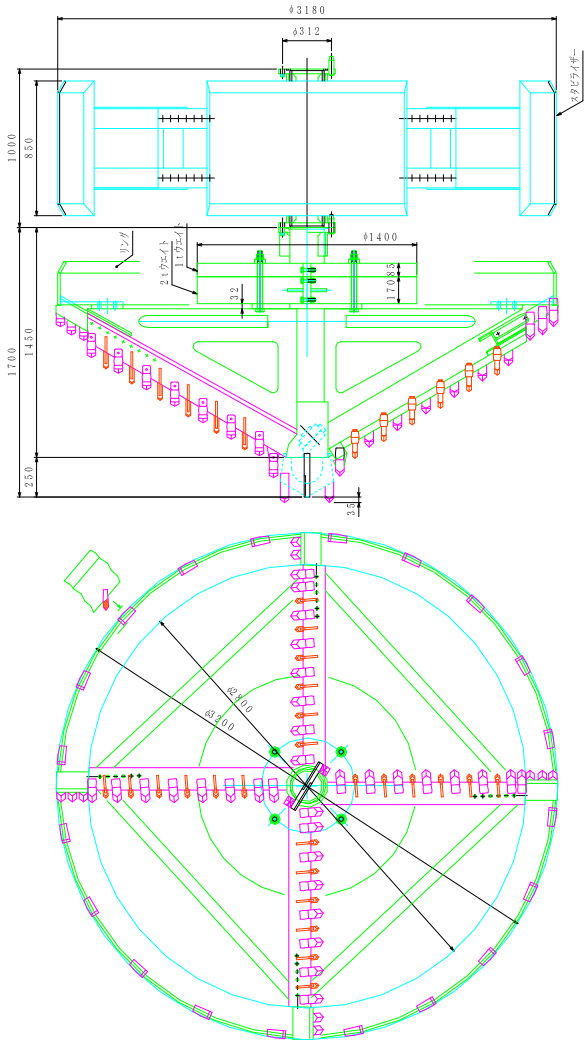


図-8 実大試験用ビット

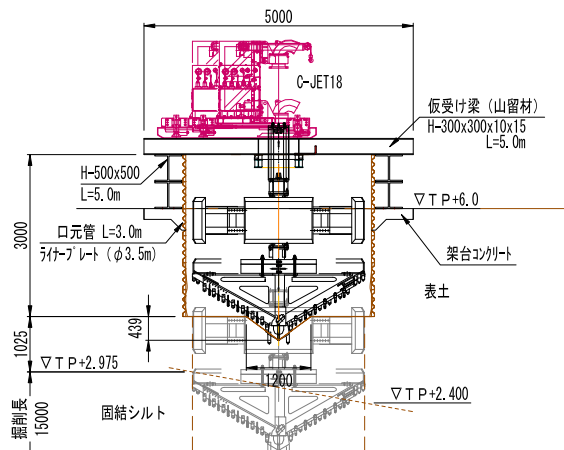


図-9 実大試験概要図

15mの深さまで掘削を行い、その適応性を確認した。

写真-11、写真-12にビットの投入状況、写真-13に超低空頭場所打ち杭工法による掘削状況を示す。

なお低空頭場所打ち杭工法掘削機であるC-JET18は、大口径杭の市場のニーズより、従来機に比較して、20%程度出力を向上させている。表-6にその仕様を示す。



写真-11 ビットの投入状況



写真-12 口元管内に投入されたビット



写真-13 超低空頭場所打ち杭掘削機

表-6 新型 C-JET18 仕様表

原動機	油圧ユニット 37kw,4P
スピンドル 回転数	7.5rpm(Low) 15rpm(High)
スピンドル トルク	35.3kN・m(Low) 17.6kN・m(High)
フィード力	117.6kN
掘削機質量	4400kg
油圧ユニット質量	1300kg

5. 2 掘削

(1) 掘削 1

① 掘削状況

徐々に固結シルトに貫入し（掘削深度 4.074m）、掘削断面の多くを固結シルト層が占めてくると、掘削の速度は低下した。フィード力を低下させ、掘削面に作用する荷重を上げないと、掘削が進まない状況となった。

掘削速度を向上させる目的でビット先端荷重を最大にすると、回転は不安定となり、その後ロックが頻発した。そのときの掘削計測値を表-7に、排土状況を写真-14に示す。

表-7 掘削データ

計測項目	計測値
ビット先端荷重	40kN
回転数	5~6rpm
回転トルク	30kN・m 程度
掘削速度	2mm/min



写真-14 排土状況（固結シルト）

② 考察と対策

市成品の刃先を使用したため、刃先下部の逃げ角・すくい角共に小さく、ビット下面の母材が荷重を受けていることが推測された。

一般には、鋭利な刃物で削るような刃先の形状が固結シルトの掘削では効率的であることが知られているが、その一方で礫・玉石がある場合、刃先の破損が懸念される。

図-10 (a) に効率的と考えられる逃げ角大きい角がともに小さい刃先形状を、(b) に本開発で取り付けられた市成品の刃先形状を示す。

本開発においては、前述の推測を確認する目的で、図-11に示すように2・4翼の先行ビットの一部を間引きし、刃先下部で受けている抵抗力を下げ、掘削を継続した。

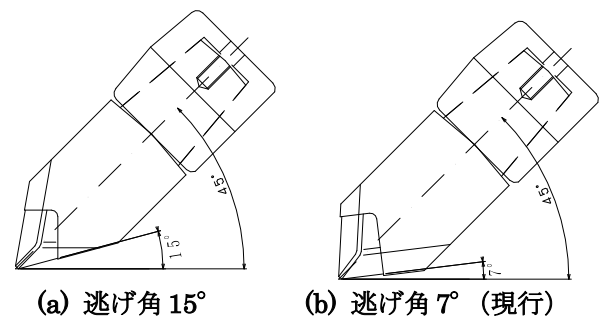


図-10 刃先の形状（後行ビット）

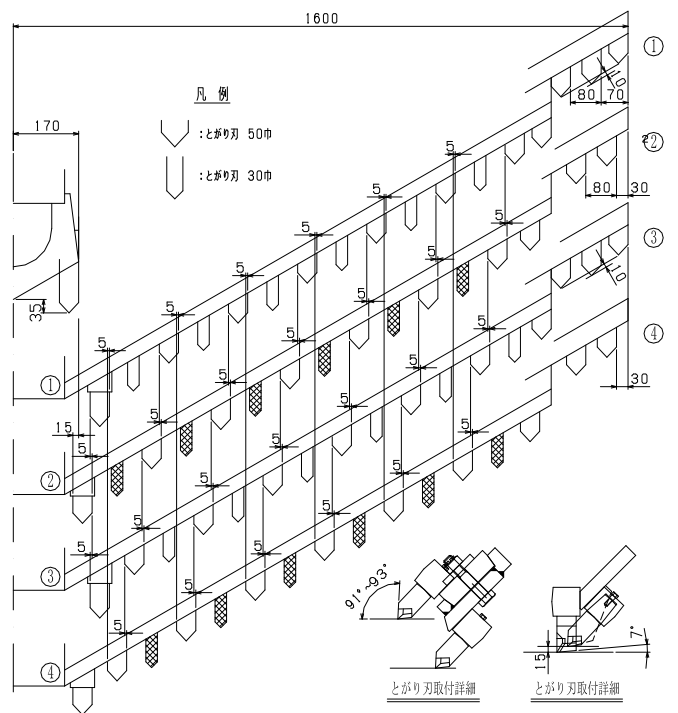


図-11 先行ビット間引き箇所（網掛け部）

(2) 掘削 2 (間引き 2)

① 掘削状況

2・4 翼先行ビットの間引きを行い掘削した (写真-15, 写真-16)。掘削回転は振動がやや大きかったが, 速度は向上した (表-9)。

② 考察

掘削結果より, 刃先下面の母材が荷重を受け, 刃先のチップ部に荷重を与える方法で掘削速度を向上させるという方針に間違いはないと判断, 写真-17 のように刃先母材を一部カットした先行ビットをつけることとした。

なお, 以降は掘削データの収集を目的として, 表-8 に示すケースで実験を継続した。表-9 には, その掘削結果を示す。

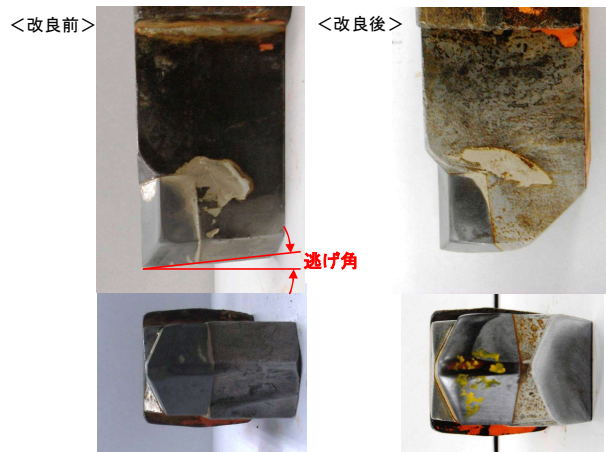


写真-17 先行ビット改良



写真-15 先行ビットの間引き



写真-16 回収した先行ビット

表-8 刃先ケース

ケース	ビット種類	1翼	2翼	3翼	4翼
掘削 1 (当初)	先行ビット	6	6	6	6
	後行ビット	11	10	11	10
掘削 2 (間引き)	先行ビット	6	0	6	0
	後行ビット	11	10	11	10
掘削 3 (改良 1)	改良先行	6	0	6	0
	後行ビット	11	10	11	10
掘削 4 (改良 2)	改良先行	6	6	6	6
	後行ビット	11	10	11	10
掘削 5 (先行無)	先行ビット	0	0	0	0
	後行ビット	11	10	11	10

(3) 掘削 3 (改良ビット+間引き)

改良加工した先行ビットを, 1・3翼の先行ビットと交換し掘削を行った。先行ビットの改良により掘削回転は安定し, さらに掘削速度は向上した (表-9)。

(4) 掘削 4 (改良ビット)

改良型先行ビットをすべて取り付けて, 掘削を行った。刃先の数が増えた結果, 荷重分散され, 掘削 3 より掘削速度が遅くなった。掘削回転は安定していた (表-9)。

(5) 掘削 5 (先行ビット無)

先行ビットをすべてはずし、尖り刃のみで掘削すると、切り崩し効果がないので、掘削回転は不安定となり、速度が遅くなった(表-9)。

表-9 掘削データ

ケース	貫入力 (KN)	掘削速度 (cm/min)	回転速度 (rpm)	トルク (KN・m)	備考
掘削 1 (当初)	40	0.2	6	8~13	ボーリング柱状図で同一層と表記されているが、性状は刻々と変化する。現地の施工状況を分析しながら、対応を継続する必要がある。
掘削 2 (間引き)	30~45	0.6~1.0	8~15	11	
掘削 3 (改良-1)	28~35	1.0~1.3	10~15	10~18	
掘削 4 (改良-2)	25~35	0.3~1.0	10~15	10~18	
掘削 5 (先行無)	30	0.1~0.4	15	8~11	

(2) 回転トルク

刃先形状は、回転トルクに大きな影響を及ぼし、重要な要因である。本開発では市中品の刃先で構成したため当初掘削効率は、良くなかったが、適合性を高めるため刃先を改良すると掘削効率は向上した。地質に適合した刃先を用いることでより効率的な掘削が可能である。

(3) 掘削鉛直性

固結シルト層を 15m 掘削した後に行った超音波による孔壁測定結果を図-12 に示す。

固結シルトが硬質で層境で孔曲がりの可能性が懸念されたが、ビット装置の構造による対策やビット荷重の把握による管理により、鉛直性を確保できた。

6. まとめ

本開発においては、軽量小型である超低空頭場所打ち杭工法の限られた性能でも、固結シルトの掘削に、一定の成果が得られた。

ビット構造、ビットの磨耗、土丹の性状の違いにおける掘削性の変化等、得られた所見も多い。

本開発のように、実際の施工を考慮して、安定した掘削性を確保できるよう工法を熟成させ、これまで不可能であった狭隘かつ硬質地盤である施工条件においても、本工法の適用が可能になっていくものと考えている。

参考文献

- 1) 和田旭弘ほか：超低空頭場所打ち杭工法の開発(1)，土木学会第 66 回年次学術講演会，IV-333，pp.665-666，2011 など
- 2) 磯上一男ほか：図 4.16 ローラビット・ウィングビットの掘削トルク計算例，大口径 RCD 工法，森北出版，pp.88
- 3) 磯上一男ほか：図 4.18 ウィングビットの適正荷重，大口径 RCD 工法，森北出版，pp.91
- 4) 鈴木啓晋ほか：列車運行時間帯における大口径場所打ち杭の施工，土木施工 2013.8，オフィス・スペース pp.60-63

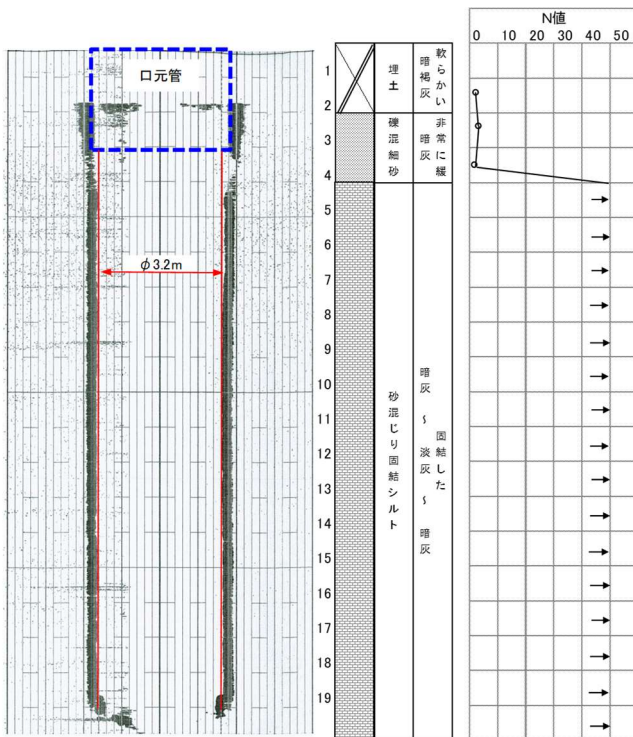


図-12 孔壁測定結果

5. 3 考察

(1) ビットの回転安定性

土質とフレーム構造、ビットの3つが調和しないと回転時にブレや振動が発生するが、本試験においては安定した回転が確保できた。