

場所打ち杭の安定液孔内比重測定方法および 自動打設シミュレーションシステムの開発

粕谷 悠紀 山田 祐樹 丹羽 宣道
森下 智貴 三浦 俊彦

Development of Slurry Specific Gravity Measuring Method and Automatic Casting Simulation System for Cast-in-Place Pile

Yuki Kasuya Yuki Yamada Norimichi Niwa
Tomotaka Morishita Toshihiko Miura

Abstract

Because construction management methods for cast-in-place piles have not changed for several decades, it is important to visualize the quality control of piles by using new measurement and “Information and Communication Technology” and to provide security by realizing construction without rework. Therefore, a slurry specific gravity measuring method was developed using a water pressure gauge for slurry stabilization. The specific gravity varied by approximately ± 0.02 compared to the test results of the samples; however, it could be measured continuously in a short time. An automatic casting simulation system was developed for the recovery of tremie pipes and placement of concrete. This system can be used to determine the optimum collection procedure and accurately predict the placement time.

概要

場所打ち杭は、数十年前から施工方法や施工管理方法が大きく変化していないため、新たな計測やICT技術を活用して杭の品質管理を可視化し、手戻りのない施工を実現することで、顧客に対して安心を提供することが重要と考えた。そこで、水圧計を用いた安定液孔内比重測定装置と測定方法を開発した。実現場で検証した結果、採取試料の試験結果と比べて水圧計を用いた比重計測結果は ± 0.02 程度の差異が生じるものの、短時間で連続的な比重分布を測定できることがわかった。施工計画時のコンクリート打設に伴うトレミー管等の回収順序を可視化し、コンクリートへの挿入長を数値化できる自動打設シミュレーションシステムを開発した。このシステムを活用すると、最適な回収順序を把握できるうえに、打設時間を精度よく予測できることを確認できた。

1. はじめに

場所打ちコンクリート杭工法（以降、場所打ち杭工法と称する）は、地盤を掘削して土砂を地上まで排出し、孔内の安定液中に鉄筋かごを建込み、コンクリートを所定の高さまで打設することにより杭を構築する方法である。使用する掘削機や施工方法によってアースドリル工法、リバース工法、オールケーシング工法に分類される。

場所打ち杭の特徴として、杭の性能や品質が地盤や土質に左右されやすいうえに、出来形の形状や寸法等を直接確認することが困難であることが挙げられる。それゆえに、現場での施工管理が重要となる。土工事などと比較して技術革新が遅れている杭工事の中でも、特に、場所打ち杭は数十年前から施工方法や施工管理方法が大きく変化していないのが現状である。以上のような背景を踏まえ、新たな計測やICT技術を活用することにより品質管理を可視化し、手戻りのない施工を実現することで、顧客に対して安心を提供することが重要と考えた。

著者らは、杭の品質を確保するうえで重要となる孔壁

を防護する安定液の品質管理と、コンクリート打設時におけるトレミー管等のコンクリートへの挿入長の施工管理に着目した。前者について、水圧計を用いた簡易的な

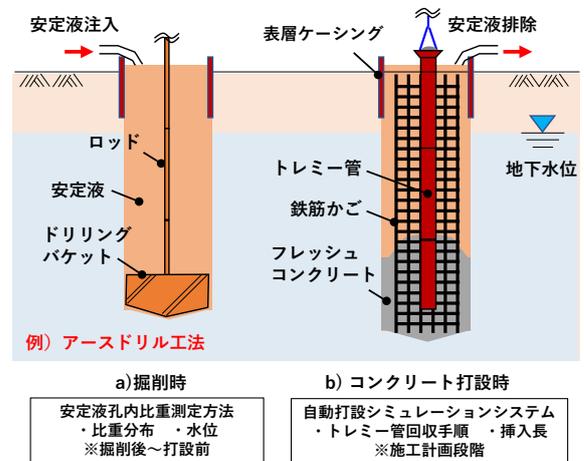


Fig. 1 場所打ち杭の概要および開発内容
Abstract of Cast-in-Place Pile and Development Contents

計測手法により、安定液の比重の深度分布および水位低下量を定量的に把握できる装置と測定方法を開発した (Fig. 1)。後者について、施工計画時にトレミー管等の回収順序を可視化し、コンクリートへの挿入長を数値化できる自動打設シミュレーションシステムを開発した。本報告では、これらの概要、特長、実証実験や実現場で行った検証結果について述べる。

2. 安定液孔内比重測定方法

2.1 孔壁防護としての安定液の役割

安定液とは、掘削孔の崩壊防止を主目的として作液されるベントナイトまたは CMC (Carboxy Methyl Cellulose) と呼ばれるポリマーを主体とする液体である。アースドリル工法の場合、表層部の孔壁はケーシングを用いて防護し、それ以深は安定液で防護する。リバース工法の場合、孔口上部の孔壁はスタンドパイプで防護し、孔口下部は安定液で防護する。いずれの工法も孔壁崩壊を防止するためには、造壁性と安定液圧の管理が重要となる。

ろ過水量 (ろ過したときの脱水量) が少なく、マッドケーキ (不透水膜) 厚が薄い状態の安定液は造壁性が良好である。安定液圧は、安定液の比重に比例して増大し、安定液位と地下水位の相対的な水頭差によって変化する。安定液の比重が大きいくほど孔壁の安定面では効果的であるが、あまり大きくなると砂分が残留しやすいうえに、コンクリート打設時の置換性が低下するため、孔壁崩壊が生じない範囲で低比重に維持する必要がある。安定液位は、アースドリル工法では地下水位+1m以上、リバース工法では地下水位+2m確保することとしている。

2.2 安定液の品質管理とその課題

安定液は、作液時に比重、ファンネル粘度、砂分率、pHの品質管理試験を行うのが一般的である。一般に、比重は、掘削中および掘削後口元付近の安定液を採取してマッドバランス (泥水比重計) 等で測定する場合がある。空頭制限下や鉄道夜間の施工など掘削完了からコンクリート打設まで数日かかる施工条件では、時間経過に伴う安定液の比重の変化、逸水に伴う水位の低下および豪雨による急激な地下水位の上昇等により、孔壁の安定性が保てなくなり、崩壊に至る可能性が懸念される。そのため、安定液の比重分布を短時間で連続的に測定できる方法が求められていた。

2.3 安定液孔内比重測定装置と測定方法

Photo 1に新たに開発した水圧計を用いた安定液比重測定装置を示す。本装置は、50mの検尺テープ、おもりに2台の水圧計からなる。水圧計のサイズはφ10mm×H13.5mm、容量は500kPaである。φ1.7mmの配線ケーブルの長さは50mとし、透明のチューブ内に格納することで断線を防止した。2台の水圧計は検尺テープと緊結しており、取付け高さが変化しない構造とした。

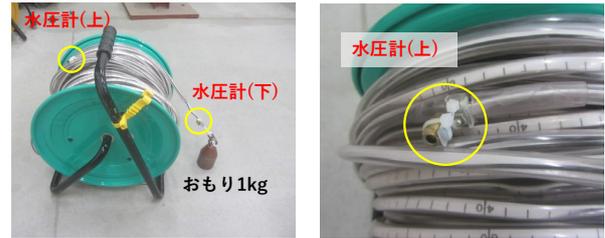
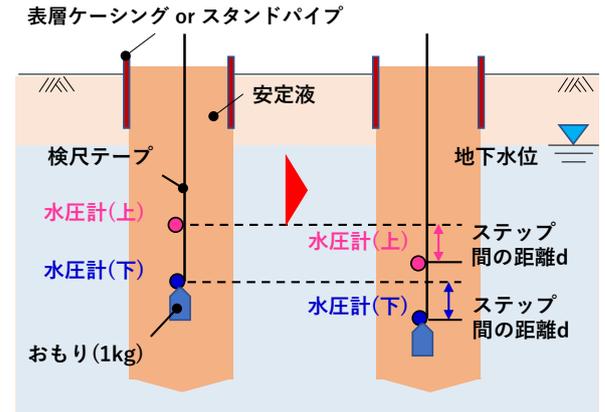


Photo 1 安定液比重測定装置
Slurry Specific Gravity Measuring Apparatus



a) 前ステップの計測水圧 b) 計測水圧

Fig. 2 測定イメージおよび比重の算出方法
Measuring Image and Calculation Method of Specific Gravity

Fig. 2に測定イメージおよび比重の算出方法を示す。安定液の比重 ρ_n は、各深度で測定を行う計測ステップ間の水圧差から求める式(1)によって算出した。

$$\rho_n = \frac{P_{w(n)} - P_{w(n-1)}}{d \cdot \gamma_w} \quad (1)$$

ここで、 ρ_n : nステップの安定液の比重、 $P_{w(n)}$: nステップの計測水圧(kN/m²)、 $P_{w(n-1)}$: n-1ステップの計測水圧(kN/m²)、 d : ステップ間の距離(m)、 γ_w : 水の単位体積重量(kN/m³)とした。各ステップ間の距離 d は、計測対象の杭長によって任意に設定可能である。

安定液比重分布の測定時期は、作業終了時以降のおもりを降ろす際と次の日の作業開始前のおもりを引き上げる際を基本とする。また、検尺テープがたるまないようにおもりを底部に接地した状態で一晩測定することにより、水位変化も把握できる。本装置により、短時間で連続的な比重分布を把握できる。従来のマッドバランスを用いた品質管理に置き換わるものではないが、品質管理の測定回数を容易に多くすることが可能であり、品質の変化に適切に対応できるようになる。

3. 安定液孔内比重測定方法の検証事例

3.1 実証実験による検証事例

3.1.1 測定概要 安定液孔内比重測定方法の動作性

Table 1 実証実験における杭および安定液の諸元
Specification of Pile and Stabilization Slurry for Field Test

杭諸元		ベントナイト	CMC	分散剤	添加試料	安定液の管理値			
杭径 (m)	掘削長 (m)	クニゲルV1 (%)	DKS280 (%)	炭酸ソーダ (%)	トチクレー (%)	比重		ファンネル 粘度(秒)	砂分率 (%)
						目標	管理		
1.2	18.5	2.0	0.2	0.2	2.6	1.03	1.01~1.15	20~30	3以下

および測定結果の妥当性を検証するため、実証実験を行った。Fig. 3に実証実験の地盤条件と計測深度を示す。場所打ち杭の直径は1.2mであり、掘削長は18.5mである。対象地盤は、粘性土と砂質土の互層地盤であった。場所打ち杭はオールケーシング工法で造成している。ケーシングを圧入しながらGL-15m付近までで内部掘削を行っていたところ、ボイリングの兆候がみられたため、Table 1に示す安定液を投入した。

比較対象用の安定液採水（以降、試料採取と称する）は4m間隔を基本とした6深度とし、水圧計を用いたステップ間の距離dは、2m間隔を基本とした。測定は、掘削直後と一晩放置した18時間後に行った。測定項目は、上下の水圧計の水圧値である。データは2秒間隔でサンプリングし、各深度で約20秒停止して平均的な値を取得した。

安定液は、ベントナイト、CMC、分散剤を使用し、比重が1.03になるようにトチクレーの添加量を決定した。既往の文献を参考とし、比重の管理値は1.01~1.15、粘性の管理値は20~30秒、砂分率は3%以下とした²⁾。

3.1.2 比重測定結果 Fig. 4に比重分布の比較結果を示す。水圧値を用いた安定液比重の深度は、ステップ間の距離dの中心深度とした。採取結果と比べて水圧計を用いた平均比重計測結果は±0.02程度の差異が生じるものの、深度方向にやや増大する傾向や一晩放置後に比重が低下する傾向は同様であり、概ね類似する結果であることを確認した。採取した安定液の比重は1.01~1.05、水圧値から算出したそれは1.00~1.06であり、概ね整合する結果であった。

3.1.3 比重以外の測定結果 Fig. 5にファンネル粘度の深度分布を示す。図中には掘削直後と一晩放置後（18時間後）を併記した。ファンネル粘度とは、円錐型のファンネル粘度計の流出孔を押さえた状態で一定量の安定液を投入し、指を離して流出し終わるまでの時間を測定したものである。測定結果より、測定位置が深いほど若干粘性は低下するものの、28~30秒で概ね同等であった。また、一晩放置すると粘性が約0.5~1.0秒低下した。これは、一晩放置すると安定液中に浮遊する砂分が沈降した影響によるものと推察され、比重が0.01~0.02低下したことも関連していると考えられる。

Fig. 6に砂分率の深度分布を示す。掘削直後は深度に比例して砂分率も増大する傾向がみられた。また、最大でも砂分率は2.8%であり、3.0%以下とする管理基準値を満足する結果であった。一方、一晩放置後の砂分率はいずれの深度も大きく低下した。

Fig. 7にpHの深度分布を示す。pHはいずれの深度にお

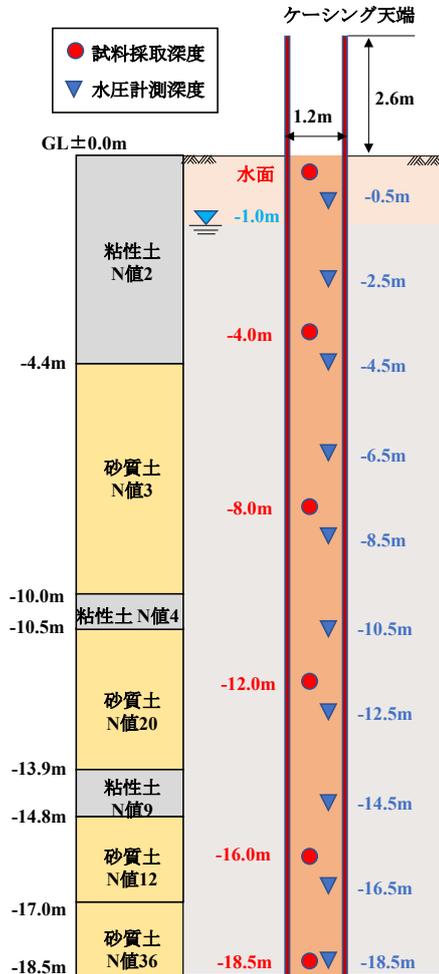


Fig. 3 実証実験の地盤条件および計測深度
Soil Conditions and Measuring Depth of Field Test

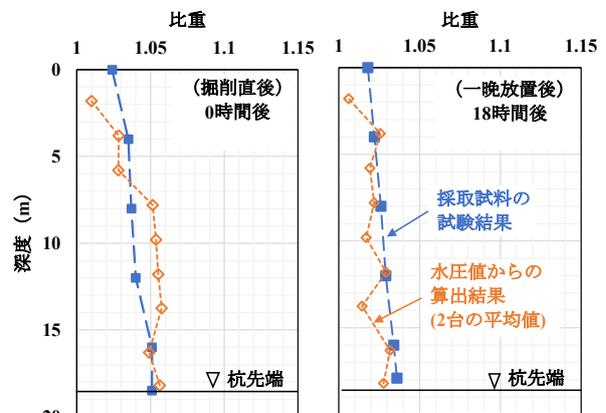


Fig. 4 比重分布の比較結果
Comparison Results with Distribution of Specific Gravity

Table 2 実杭および安定液の諸元
Specification of Actual Pile and Stabilization Slurry

杭諸元		ベントナイト (%)	ポリマー (%)	分散剤 (%)	上水道 (%)	安定液の管理値				
杭径 (m)	杭長 (m)					比重	ファンネル粘性(秒)	砂分率 (%)	pH	ろ過水量 (mL)
2.7	52.0	1.5~2.0	0.15~0.2	0.1	100	1.01~1.10	21~30	1以下	7~11.5	30以下

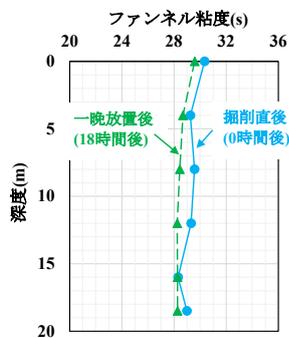


Fig. 5 ファンネル粘度の深度分布
Distribution of Funnel Viscosity

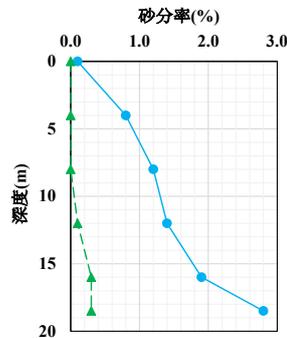


Fig. 6 砂分率の深度分布
Distribution of Sand Fraction

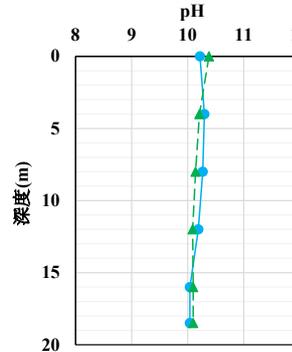


Fig. 7 pHの深度分布
Distribution of Potential of Hydrogen

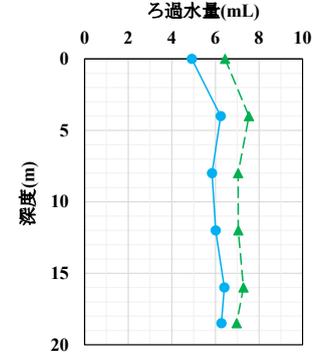


Fig. 8 ろ過水量の深度分布
Distribution of Filtered Water Volume

いても10付近であり、経過時間によらず概ね一定であった。また、一般的な安定液のpHの管理基準値 (8~12) の範囲内であることを確認した。

Fig. 8にろ過水量の深度分布を示す。掘削直後のろ過水量は5~7mL、一晩放置後のそれは6~8mLであり、18時間経過しても約1mLしかろ過水量は増加しなかった。また、一般的な安定液のろ過水量の管理基準値の30mL以下であることを確認した。

3.2 実現場による検証事例

3.2.1 測定概要 実現場における安定液孔内比重測定装置の動作性および測定結果の妥当性を検証するため、現場実験を行った。Fig. 9に実現場の地盤条件と計測深度を示す。場所打ち杭の直径は2.7mであり、掘削長は52.0mである。対象地盤は、GL-2.2m~-8.8mまで砂礫層であり、それ以深はシルトと砂質土の互層地盤であった。場所打ち杭はアースドリル工法で造成しており、掘削初期からTable 2に示す安定液を投入した。

比較対象用の試料採取は10m間隔を基本とした7深度であり、水圧計を用いたステップ間の距離dは、杭頭付近で2.5m間隔、GL-10m以深で5m間隔を基本とした。試料採取は掘削完了から1時間後と19時間後、安定液比重の測定は、掘削完了から3時間後と19時間後に行った。

安定液はポリマー系で、比重の管理値は1.01~1.10、ファンネル粘度のそれは21~30秒、砂分率のそれは1%以下、pHのそれは7~11.5、ろ過水量のそれは30mL以下であった。

3.2.2 比重測定結果 Fig. 10に比重分布の比較結果を示す。水圧値を用いた安定液比重の深度は、ステッ



Fig. 9 実現場の地盤条件および計測深度
Soil Conditions and Measuring Depth of Actual Site

ブ間の距離dの中心深度とした。採取試料の試験結果と比べて水圧計を用いた比重計測結果は±0.02程度の差異が生じるものの、深度方向にやや増大する傾向は同様であり、概ね類似する結果であることを確認した。ただし、採取試料の試験結果と比較して深度ごとの比重の変化が大きく、安定した比重分布が得られていないことから、精度面においては今後も改良・検証する必要がある。

採取した安定液の比重は1.02～1.07, 水圧値から算出したそれは1.00～1.07であり、概ね整合する結果であった。

3.2.3 比重以外の測定結果 Fig. 11にファンネル粘度の深度分布を示す。図中には掘削完了から1時間後と一晚放置後（19時間後）を併記した。測定結果より、深度の増大に伴い若干粘性は低下するものの、21～22秒で概ね同等であること、一晚放置してもほとんど変化していないことがわかった。

Fig. 12に砂分率の深度分布を示す。掘削完了から1時間後は深い位置ほど砂分率も増大した。また、最大でも砂分率は0.8%であり、1.0%以下とする管理基準値を満足する結果であった。一晚放置後の砂分率はいずれの深度も大きく低下したことを確認した。

pHはいずれの深度においても9～10付近であり、経過時間による差異もほとんどみられなかった。また、ろ過水量は掘削完了から3時間後も一晚放置後も20～25mLであり、深度方向による差異もみられなかった。

3.3 比重測定時間の検証

Fig. 13に比重測定時間の比較結果を示す。従来方法とは、試料採取および現地でマッドバランスを用いて比重を測定する方法である。実証実験において、従来方法は合計86分であったのに対し、開発方法は合計35分であった。一方、実現場において、従来方法は合計104分であったのに対し、開発方法は合計42分であった。この結果、安定液孔内比重測定方法を活用することにより、従来方法と比較して60%程度の作業時間を削減できることがわかった。なお、開発方法の測定時間は、ローガーからデータを回収し、現地でモバイルパソコンを用いてデータ整理が完了するまでの時間である。

今後は、データ整理を手作業ではなくポスト処理等を活用することにより、更なる時間短縮を図る予定である。

4. 自動打設シミュレーションシステム

4.1 場所打ち杭のコンクリート打設

場所打ち杭工法では、一般に安定液中でコンクリート打設が行われる。安定液中のコンクリートはトレミー管を用いて打設する。一般に、孔内の安定液を良質なコンクリートに置換するためには、ケーシングやトレミー管のコンクリートへの挿入長は常に2m以上を確保する必要がある。挿入長が2mより短い場合、レイタンスや安定液と混入し、品質低下を引き起こす可能性がある。一方、挿入長が9mより長く、コンクリートの流動性が悪い場合

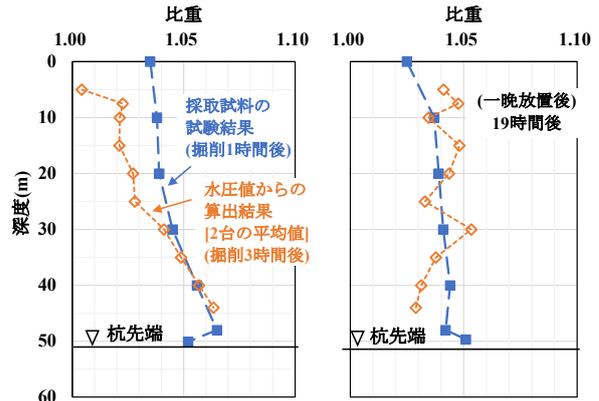


Fig. 10 比重分布の比較結果
Comparison Results with Distribution of Specific Gravity

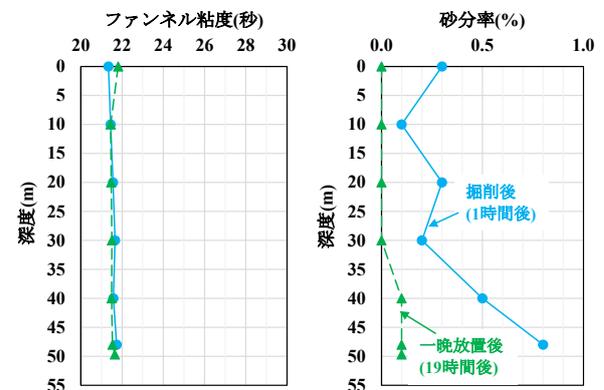


Fig. 11 ファンネル粘度の深度分布
Distribution of Funnel Viscosity

Fig. 12 砂分率の深度分布
Distribution of Sand Fraction

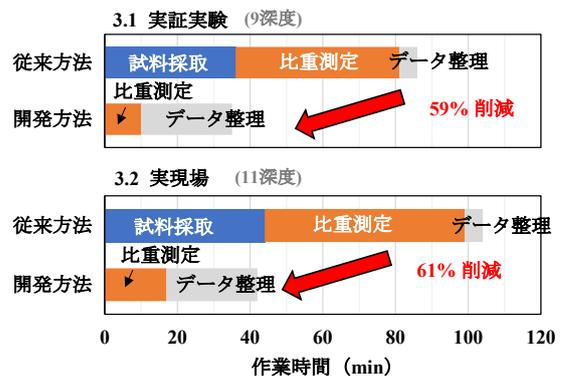


Fig. 13 比重測定時間の比較結果
Comparison Results for Measuring Time of Specific Gravity

にも打設不良のリスクが高まる。打設前にトレミー管等の割付や生コン車の配車間隔を計画するが、コンクリートの打上がり状況に応じたトレミー管等の回収手順等を計画することは時間も手間もかかる。

4.2 自動打設シミュレーションシステム

4.1節で述べたとおり、場所打ち杭のコンクリート打設



Fig. 14 杭情報入力画面の例
Example of Input Screen of Pile Information



Fig. 15 シミュレーション情報入力画面の例
Example of Input Screen of Simulation Information

Table 3 杭情報の入力・選択項目
Input or Choice Items for Pile Information

記号	内容	入力・選択項目
ア	杭工法	工法・杭形状
イ	杭情報	施工場所, 杭No. 杭径, かぶり 杭長, 余盛
ウ	杭深度・天端	掘削深度, 支持層深度, 鉄筋天端, 地下水位
エ	ケーシング	直径, 肉厚
オ	トレミー管	直径, 肉厚
カ	コンクリート	セメント, 設計基準強度, スランプ, 粗骨材の最大寸法
キ	土質・N値	地層境界の深度 各層のN値

Table 4 シミュレーション情報の入力項目
Input Items for Simulation Information

記号	内容	入力項目
ク	杭情報 (イ)と同じ)	杭径, かぶり 杭長, 余盛
ケ	コンクリート	生コン車1台ごとのコンクリート 数量(4.25m³を基本)
コ	ケーシング	回収するケーシング長
サ	トレミー管	回収するトレミー管長
シ	設定	自動打設シミュレーション 開始番号, 終了番号, コンクリートへの挿入長

作業の手順は、杭の性能や品質に大きく影響するため、従事する全員で作業手順を把握することが重要である。そこで、施工計画時の打設に伴うトレミー管等の回収順序を可視化し、コンクリートへの挿入長を数値化できる自動打設シミュレーションシステムを開発した。以降に、3.1節の実証実験で施工したオールケーシング工法の杭情報入力画面、シミュレーション情報入力画面、自動打設シミュレーション結果、打設予測グラフを説明する。

4.2.1 杭情報入力画面 Fig. 14に杭情報入力画面の例を、Table 3に杭情報の入力・選択項目を示す。杭情報

の入力・選択項目のうち、杭天端(ウ)では、オールケーシング工法では機械高を、リバース工法・BH工法・TBH工法ではスタンドパイプ下端高を、アースドリル工法では表層ケーシングの下端高を入力する。土質・N値(キ)では、地表面から1層目以降に各層のN値を入力する。土質の凡例は、砂質、粘性土、砂礫、岩の4種類としている。

4.2.2 シミュレーション情報入力画面 Fig. 15にシミュレーション情報入力画面の例を、Table 4にシミュレーション情報の入力項目を示す。シミュレーション情報の入力項目のうち、コンクリートの数量(ケ)は合計数量が余盛込のコンクリート数量以上となるように入力する。ケーシング(コ)はリバース工法、TBH工法、BH工法ではスタンドパイプ長を、アースドリル工法では表

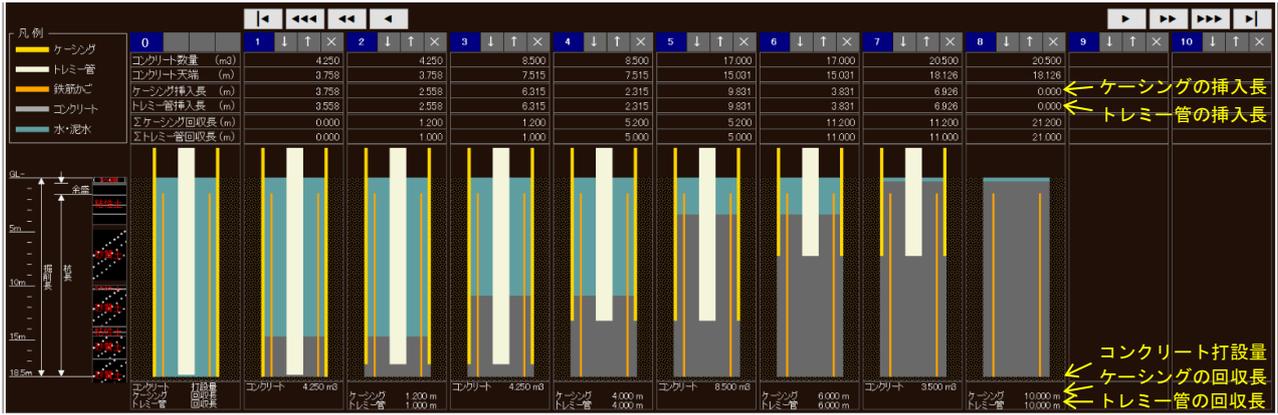


Fig. 16 自動打設シミュレーション出力画面の例
Example of Output Screen of Automatic Casing Simulation

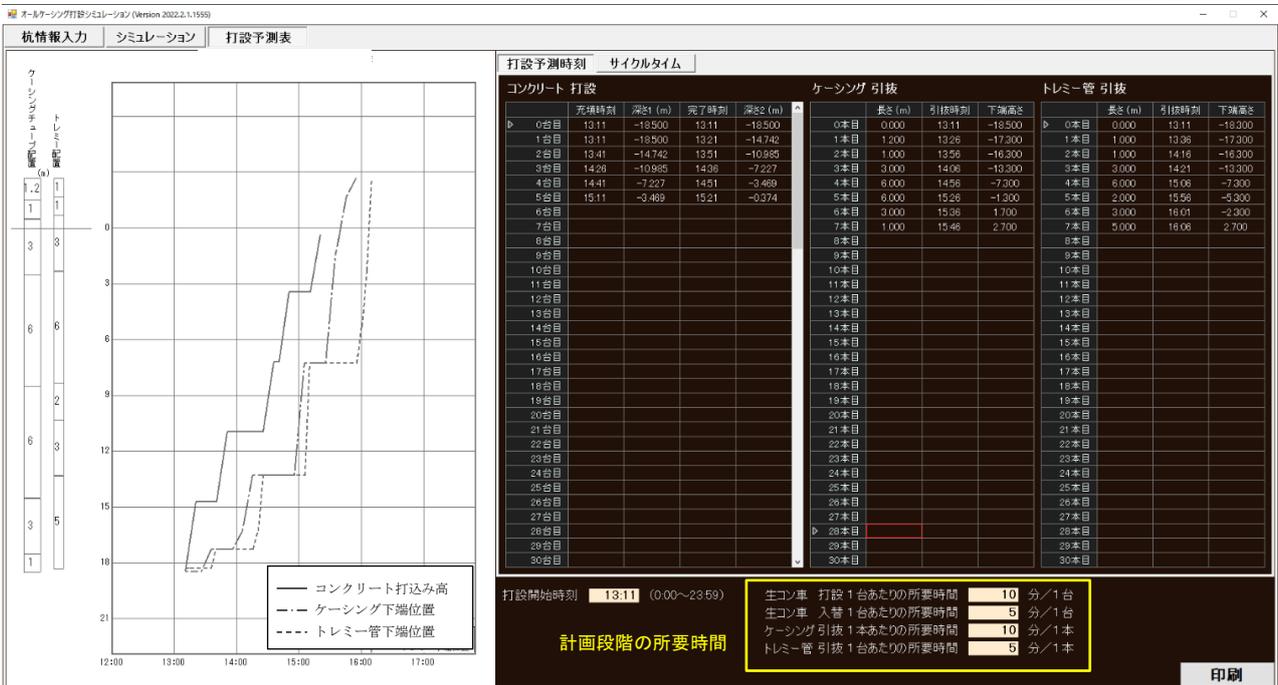


Fig. 17 打設予測グラフと時間入力画面の例
Example of Prediction Graph and Input Screen of Time

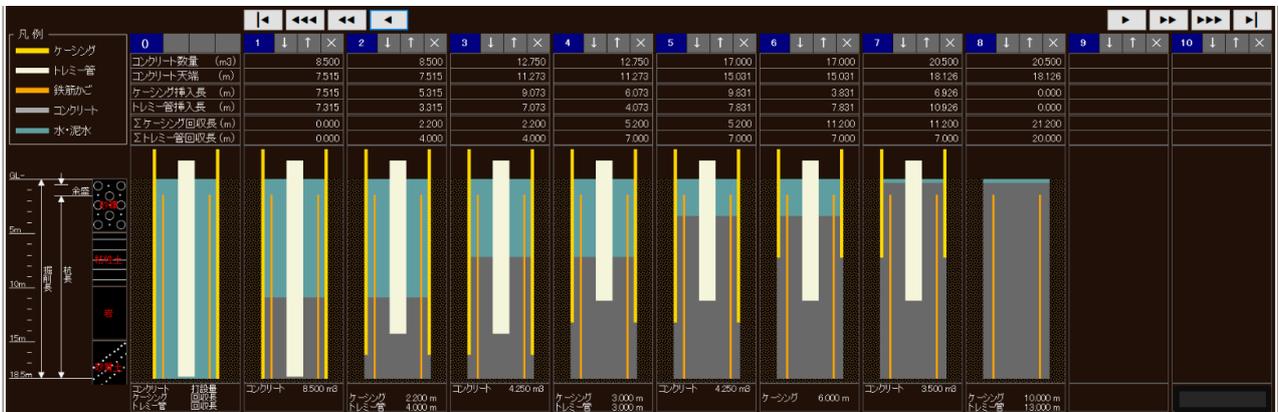


Fig. 18 施工時の回収手順を再現した自動打設シミュレーション出力画面
Output Screen of Automatic Casing Simulation Reproduced the Collection Procedure at the Time of Construction

Table 5 ケーシングおよびトレミー管のコンクリートへの挿入長の比較結果
Comparison Results of Concrete Insertion Length for Casing Pipe and Tremie Pipe

計画段階での自動打設シミュレーション結果					施工時の回収手順の再現結果				
Step	ケーシング		トレミー管		Step	ケーシング		トレミー管	
	挿入長(m)	回収長(m)	挿入長(m)	回収長(m)		挿入長(m)	回収長(m)	挿入長(m)	回収長(m)
2	2.558	1.2	2.558	1.0	2	5.315	2.2	3.315	4.0
4	2.315	4.0	2.315	4.0	4	6.073	3.0	4.073	3.0
6	3.831	6.0	3.831	6.0	6	3.831	6.0	7.831	—
8	—	10.0	—	10.0	8	—	10.0	—	13.0

層ケーシング長を入力する（以降、各工法のケーシングを総称して、“ケーシング類”と記す）。条件を入力した後、自動シミュレーションを開始する（シ）と、1分程度でシミュレーション結果が出力される。

4.2.3 自動打設シミュレーション結果 Fig. 16に実験前に実施した自動打設シミュレーション出力画面の例を示す。奇数Stepはコンクリート打設を、偶数Stepはケーシング類の回収を示す。偶数Stepのケーシング類およびトレミー管の挿入長は、いずれも2m以上9m未満であった。杭、生コン数量、ケーシング類およびトレミー管の情報を入力するだけで誰でも容易に操作可能である。

4.2.4 打設予測グラフ Fig. 17に打設予測グラフと時間入力画面の例を示す。自動打設シミュレーションを行うと各打設予測時刻は自動的に入力される。打設開始時刻を任意に設定し直すと、各時刻も演算機能により変更する仕組みとなっている。このように、シミュレーション結果と打設開始時間をリンクすることで、簡単に打設予測グラフを作成できる。

5. 自動打設シミュレーションシステムの検証結果

5.1 自動打設シミュレーション結果の検証

Fig. 18に実証実験時の回収手順を再現した自動打設シミュレーション出力画面を、Table 5にケーシングおよびトレミー管のコンクリートへの挿入長の比較結果を示す。本データは3.1節の実証実験のものである。Fig. 18は、施工業者にFig. 16を提示することなく従来どおり打設作業を行った手順を再現したものである。Fig. 16およびFig. 18に白抜きで示した数字とTable 5のStep数を対応させている。

Step6までの各コンクリート打設時の挿入長をみると、施工時の回収手順の再現結果よりも計画段階での自動打設シミュレーション結果のほうが、最低挿入長の2mを確保しつつ、より短い挿入長となっている。この検証結果より、本システムを活用すると、最適な回収順序およびコンクリートへの挿入長を把握でき、品質不良等のリスクの低減に貢献できると考えられる。

5.2 打設予測グラフの検証

Fig. 17に示すとおり、計画段階の生コン車1台あたり

の打設にかかる所要時間は10分、入替5分、ケーシング類1本あたりの引抜きにかかる所要時間は10分、トレミー管5分に設定した。これに対し、施工時の所要時間を整理した結果、生コン車1台あたりの打設にかかる平均所要時間は7.4分、入替6.6分、ケーシング類1本あたりの引抜きにかかる平均所要時間は11.6分、トレミー管3.8分であり、計画段階と1～3分程度の差異がみられた。また、合計作業時間で比較すると計画段階で180分、施工時の実測で174分であり、ほぼ同等であった。この検証結果より、オールケーシング工法においては、Fig. 17で設定した所要時間で概ね打設時間を予測できることがわかった。

6. まとめ

場所打ち杭の品質管理の高度化を目的として、水圧計を用いた安定液比重測定装置と測定方法および自動打設シミュレーションシステムを開発した。各開発内容の検証結果より得られた知見を以下に示す。

- 1) 採取試料の試験結果と比べて水圧計を用いた比重計測結果は±0.02程度の差異が生じるものの、深度方向に短時間で連続的な比重分布を計測できることを確認した。また、水圧計を用いた安定液比重測定方法の活用により、試料採取と現地試験により比重を求める従来方法と比較して約60%の作業時間を削減できることを確認した。
- 2) 自動打設シミュレーションシステムを活用すると、ケーシング類およびトレミー管の最適な回収順序およびコンクリートへの挿入長を把握できることを確認した。また、自動打設シミュレーション結果と打設開始時間をリンクすると、打設時間を精度よく予測できることを確認した。

安定液孔内比重測定方法の精度と自動打設シミュレーション時のコンクリート天端の精度に改善の余地がある。今後、各種改良に取り組み、検証する予定である。

参考文献

- 1) 日本基礎建設協会：場所打ちコンクリート杭の施工，2019.6
- 2) 日本建設業連合会：場所打ちコンクリート杭の品質管理のポイント，2017.6