

場所打ちコンクリート杭の品質管理システム 「PiRuler®」 Quality Management System for Cast-in-Place Pile “PiRuler”

粕谷 悠紀 Yuki Kasuya
山田 祐樹 Yuki Yamada
丹羽 宣道 Norimichi Niwa

1. はじめに

場所打ちコンクリート杭工法（以下、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、孔内に鉄筋かごを建て込んだ後、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オールケーシング工法、リバース工法（TBH 工法含む）、BH 工法、アースドリル工法等に分類される。

場所打ち杭の計画、施工、施工記録の維持管理には多くの労力と経験が必要である。そこで、AI、ICT の活用によって施工品質の安定化、生産性向上および働き方改革の実現を目標とした場所打ち杭の品質管理システム「PiRuler®」を開発した。

PiRuler は、計画時の情報共有に用いる自動打設シミュレーションシステム「PiRuler-CP™」、施工時の品質管理に用いる杭支持層到達確認システム「PiRuler-GEO™」および安定液孔内比重測定方法「PiRuler-SG™」、維持管理に活用する施工記録のデータベース「PiRuler-DB™」の4つの技術から構成される（Fig. 1）。

Fig. 2 に場所打ち杭の施工概要および適用可能な開発技術を示す。PiRuler-CP と PiRuler-DB は全ての場所打ち杭工法を、PiRuler-GEO は全周回転掘削機を使用するオールケーシング工法を、PiRuler-SG は安定液を使用しないオールケーシング工法以外を対象として開発した。Table 1 に現状の品質管理手法と今回開発した品質管理手法の比較を示す。以降に各技術の概要を述べる。

2. PiRuler の概要

2.1 自動打設シミュレーションシステム(PiRuler-CP)

PiRuler-CP は、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できるだけでなく、コンクリートへの挿入長も数値化できるプログラムである。打設前に回収手順のシミュレーションを行うことにより、コンクリート打設計画を関係者で共有することができる。

既報¹⁾では、PiRuler-CP 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、打設予測グラフを示した。その結果、ケーシング類およびトレミー管の最適な回収順序やコンクリートへの挿入長を把握できること、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ことにより、打設時間を

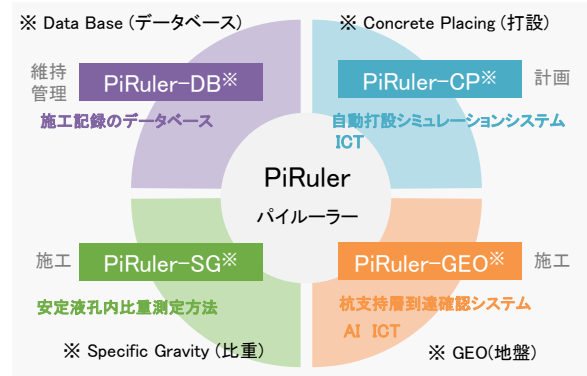


Fig. 1 PiRulerの概要
Outline of PiRuler

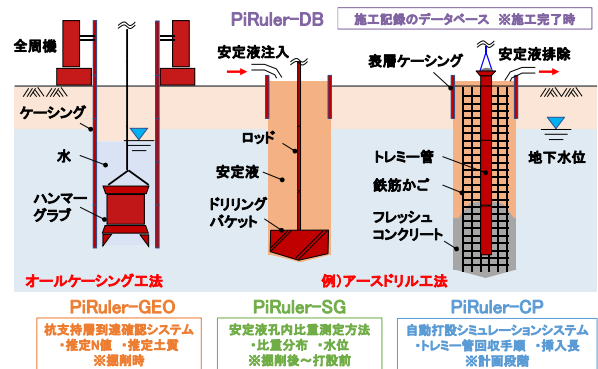


Fig. 2 場所打ち杭の施工概要と適用可能な開発技術
Outline of Cast-in-Place Pile and Adaptable Technologies

Table 1 品質管理手法の比較
Comparison for Quality Management Method

名称	管理項目	現状	今回開発
PiRuler-CP	【計画段階】 トレミー管等の回収計画 コンクリートへの挿入長	一例のみ 確認	全数確認も可 打設前に共有 ICT
PiRuler-GEO	【掘削時】 支持層確認	土砂目視 土質のみ 定性的	N値と土質を AIで推定 定量的
PiRuler-SG	【掘削後～打設前】 孔内安定液の管理	比重、粘 性、砂分 率を断続 的に確認	比重深度分 布、水位デ ータを連続 的に確認
PiRuler-DB	【施工完了時】 施工記録	現場ごと の管理	会社全体で 共有・管理

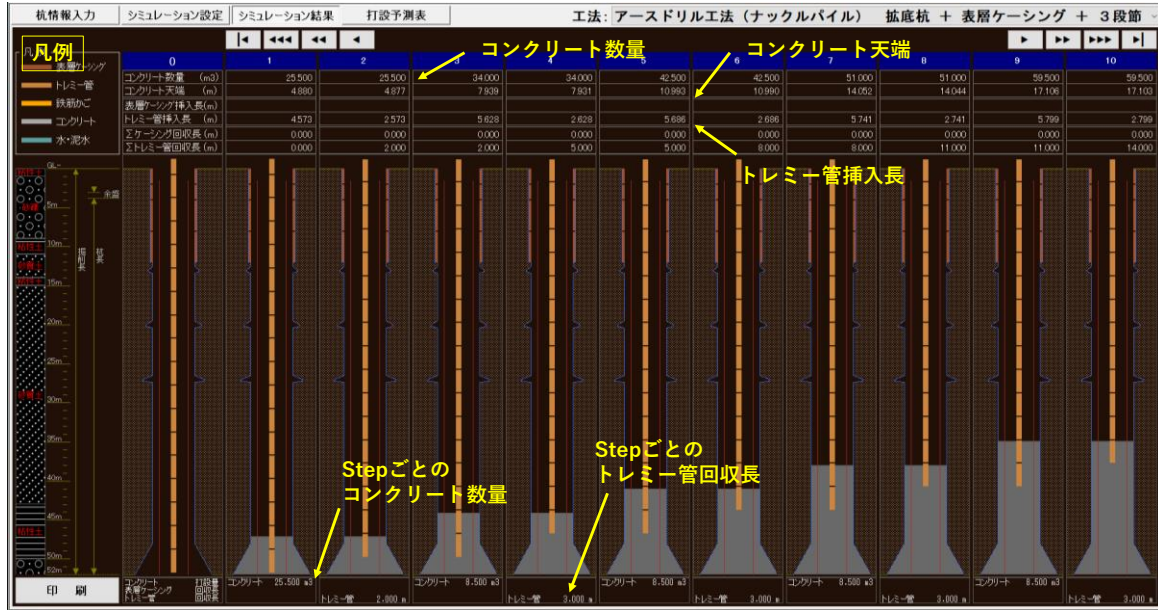


Fig. 3 PiRuler-CP のシミュレーション出力画面の例
Example of Output Screen of Simulation for PiRuler-CP

精度よく予測できることを示した。本報では、PiRuler-CP の特長を以下に列挙する。

- 1) トレミー管、ケーシング、鉄筋かごおよび逆打ち支柱の位置を考慮したコンクリート天端を算出できる。
- 2) コンクリート数量と天端高さの自動算出結果をいつでも確認できる。
- 3) 計画時と実測時のコンクリート打設数量に差異が生じた場合でも、杭直径に対する割増係数を入力することにより、次施工でフィードバックできる。
- 4) ストレート杭に加えて、拡底杭および3段までの節付き杭（ナックル・パイル®）も対応できる。

Fig. 3 に PiRuler-CP の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 はトレミー管等の回収を示している。また、シミュレーション結果から打設予測表とグラフを出力できる。

Fig. 4 に打設シミュレーション時間の比較結果を示す。従来方法とは、トレミー管等のコンクリートへの挿入長を手計算でチェックし、打設数量に応じて図面化する方法である。モデルケースにおいて、従来方法の作業時間は合計 130 分であったのに対し、開発方法のそれは合計 45 分であった。これは、「シミュレーション設定」のコマンドで必要情報を入力し、「自動打設シミュレーション開始」のボタンをクリックすると、5 分程度でシミュレーション結果と打設予測表およびグラフの作成が可能となったためである。以上より、打設シミュレーションに要する時間は、合計で 65% 程度削減することができ、生産性向上や働き方改革に貢献できることがわかった。

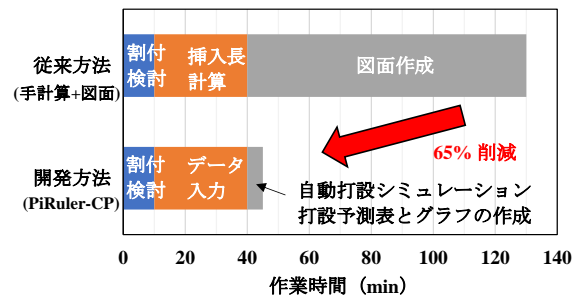


Fig. 4 打設シミュレーション時間の比較結果
Comparison Results for Casting Simulation Time

2.2 杭支持層到達確認システム (PiRuler-GEO)

Fig. 5 に PiRuler-GEO の概要を示す。全周掘削回転機から得られる回転トルク、押込み力、掘削時の深度などの情報は、モバイルパソコンの取込みソフトを用いて油圧ユニット、制御盤を経由してデータが記録される。加えて、設計土質、所要時間（実作業）、回転トルク×所要時間で算出した積算トルクなどを基に機械学習させた AI ソフトを活用することにより、掘削時にリアルタイムで N 値と土質を推定することができる。また、リモート接続用の ICT ツール（Wi-Fi ルーター、リモート接続ソフトウェア「TeamViewer」）を活用することにより、遠隔地からでも計測画面を確認し、品質管理状況をモニタリングすることができる。

Fig. 6 に N 値・土質の推定フローを示す。事前に工事名、杭径、全周回転式掘削機の重量、地盤高さ、近傍のボーリング柱状図に記載された各深度の N 値と土質をシステムに入力する。本システムでは、ボーリング柱状図に記載された N 値を「設計 N 値」、土質を「設計土質」

と呼んでいる。施工中は、回転トルク、押込み力、掘削時の深度、設計土質、所要時間、積算トルク等から後述する AI ソフトを活用して N 値を推定する。次に、推定 N 値を加えた情報(設計土質を除く)で土質を推定する。なお、本システムでの土質は、粘性土、砂質土、砂礫、岩盤の 4 種に分類している。加えて、推定結果に至るプロセスが人間によって説明可能である機械学習のモデル XAI (Explainable AI) を活用することで、推定土質に対する各情報の順位表 (Fig. 7 の右端に示す影響度) も示すことができる。

従来の支持層の土質試料の目視確認に加え、本システムで出力された推定 N 値、推定土質、回転トルク、所要時間などの指標を用いることにより、現場技術者は総合的に支持層到達状況をリアルタイムで確認することができる。

本システムの機械学習に使用した教師用データは、27 箇所の現場、873 本の杭データである。支持層の土質に着目すると、岩盤が全体の 5 割強を占めており、次いで砂礫が 3 割弱、砂質土が 2 割程度を占めている。工事分類、杭径分類、計測深度分類結果は、既報²⁾に譲る。上記の教師用データ (学習用データ 8~9 割、検証用データ 1~2 割) を使い、ボーリング柱状図に基づく設計 N 値や設計土質を正解とみなしたときの推定 N 値と推定土質の精度を評価した。

N 値の評価について、線形回帰や回帰木など 6 種類の手法を比較した結果、機械学習のアンサンブル方式 (バギング) と深層学習の LSTM (Long Short-Term Memory) 回帰の推定精度が優れることがわかった。さらに、両手法について、RMSE (二乗平均平方根誤差) の指標を用いて杭本数ごとに比較検討した結果を Table 2 に示す。RMSE は数値が小さいほど推定精度が優れる。設計 N 値と推定 N 値の深度分布を比較した結果、傾向が類似するアンサンブル方式を採用した。

土質の評価は、線形判別、決定木など 8 種類の手法を比較した結果、機械学習のアンサンブル方式 (バギング) と深層学習の LSTM 分類の推定精度が優れることがわかった。Table 3 に示すように、両手法について設計土質と推定土質を比較した結果、精度に優れるアンサンブル方式を採用した。また、推定 N 値も推定土質もデータが多いほど検証精度が向上することを確認した。なお、アンサンブル方式における学習の推定精度が 100%となっている。その理由は、同方式が多数決法であり、学習データを用いて学習し、その後学習データを評価しているためである。

Fig. 7 に本システムにおける検証用データの計測画面例を示す。N 値の深度分布の凡例は、青色が設計 N 値 (ボーリング柱状図など)、橙色が推定 N 値である。土質分布は、左に設計土質、右に推定土質の判定結果を示している。推定土質の凡例は、青色が粘性土、黄緑色が

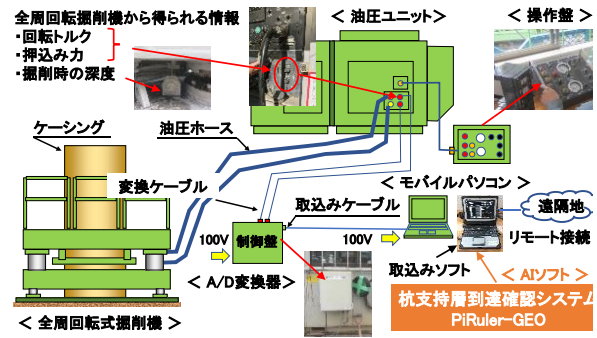


Fig. 5 PiRuler-GEO の概要
Outline of PiRuler-GEO



Fig. 6 N 値・土質の推定フロー
Estimation Flow of N-Value and Soil

Table 2 推定 N 値の AI 評価結果 (RMSE)
AI Evaluation Results of Presumption N-Value

杭本数	学習数	検証数	機械学習 (アンサンブル)		深層学習 (LSTM 回帰)	
			学習	検証	学習	検証
635	556	79	3.954	7.951	2.523	6.079
699	604	95	3.681	7.340	2.033	5.767
873	756	117	3.795	7.163	1.099	6.997
判定			○ 傾向が類似		△ 傾向がややずれる	

Table 3 推定土質の AI 評価結果 (精度%)
AI Evaluation Results of Presumption Soil

杭本数	学習数	検証数	機械学習 (アンサンブル)		深層学習 (LSTM 回帰)	
			学習	検証	学習	検証
635	556	79	100	90.5	87.6	63.6
699	604	95	100	92.4	74.7	72.8
873	756	117	100	92.5	65.9	74.4
判定			○ (精度: 優)		△ (精度: 良)	

砂質土, 黄色が砂礫, 赤色が岩盤である。

計測画面の杭について、杭径は 1.2m, 設計杭長は 24.2m,

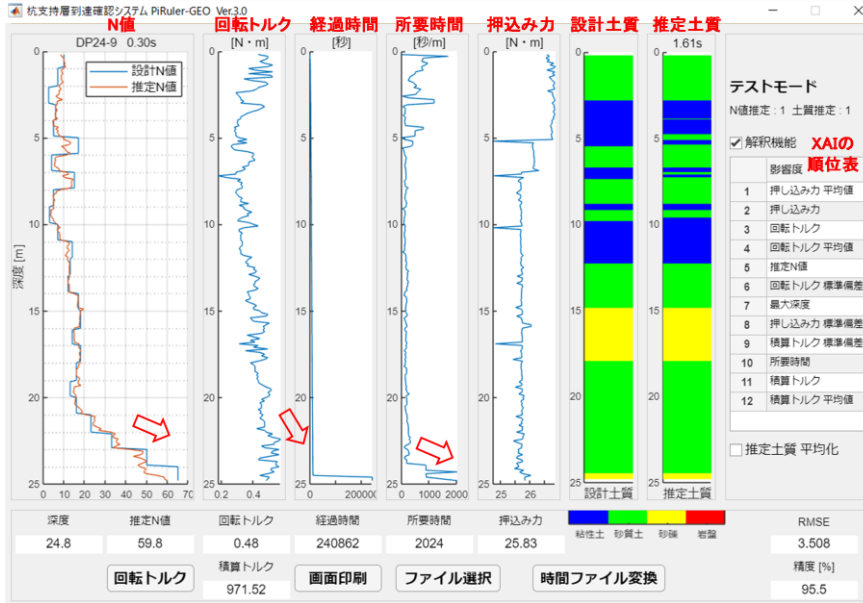


Fig. 7 PiRuler-GEO 計測画面の例 (検証用データ)

Example of Measurement Screen for PiRuler-GEO (Validation Data)

実測杭長は24.8mである。支持層の土質は砂質土であり、その深度はGL-23mであった。Fig. 7より、推定N値は設計N値と、推定土質は設計土質とよく対応していることを確認した。また、支持層付近で回転トルクが上昇するとともに所要時間が増大していることから、総合的に支持層に到達していると判断できる。

2.3 安定液孔内比重測定方法 (PiRuler-SG)

PiRuler-SGは、水圧計を用いた簡易的な計測手法により、孔内安定液における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。Photo 1に安定液比重測定装置を示す。本装置は、ドラム、50mの検尺テープ、おもり、水圧計からなる。安定液の比重 ρ は、計測点間の深度の差(高低差)と計測結果の差(水圧差)から求める。詳細な計算式や実証実験および実現場での検証結果は、既報¹⁾に譲る。

本装置により、短時間で連続的な安定液比重の深度分布を把握できる。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、計測回数を容易に増やすことが可能であり、品質の変化に適切に対応できる。また、水圧値と比重から求めた水位を管理し、アラート装置と組み合わせることにより、安定液の水位低下による孔壁崩壊などのトラブルを抑制することも可能である。なお、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、生産性向上や働き方改革に貢献できる²⁾。

2.4 施工記録のデータベース (PiRuler-DB)

PiRuler-DBは、場所打ち杭工法を採用した現場の施工計画書や施工記録を会社内のシステム上で保存できると

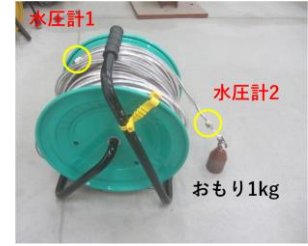


Photo 1 安定液比重測定装置
Slurry Specific Gravity
Measuring Apparatus



Fig. 8 PiRuler-DBの画面例
Example of Screen for
PiRuler-DB

ともに地図上で検索できるデータベースである (Fig. 8)。地図上では、オールケーシング工法, アースドリル工法, リバース工法他を区別して検索できる。必要に応じてデータベース上で閲覧したり, ダウンロードすることにより, 現場条件に応じて施工計画する際に参考にすることができる。

3. おわりに

本報では、AI, ICTを活用した場所打ち杭の品質管理システム「PiRuler」を構成する4つの技術を紹介した。2.1の自動打設シミュレーションシステム「PiRuler-CP」では、システムの概要および特長を紹介するとともに打設シミュレーション時間の比較結果を示した。2.2の杭支持層到達確認システム「PiRuler-GEO」では、システム概要、N値・土質の推定フロー、AIソフトを活用した評価結果、計測画面例および支持層到達確認事例について示した。2.3の安定液孔内比重測定方法「PiRuler-SG」および2.4の施工記録のデータベース「PiRuler-DB」では、その概要および特長を紹介した。今後は、PiRulerを現場の適材適所で活用し、場所打ち杭における施工品質の安定化、生産性向上などを図る所存である。

参考文献

- 1) 粕谷ら：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, 大林組技術研究所報, No.86, 2022
- 2) 粕谷ら：オールケーシング工法における杭支持層到達確認システムの開発, 第58回地盤工学研究発表会, No.13-9-3-05, 2023.7