

# 既製コンクリート杭の支持層到達確認技術の開発

萩原由訓 渡辺和博 森尾義彦  
小島宏章 和知康晴 西山高士  
(東京本店品質管理部)

## Development of Bearing Stratum Arrival Confirmation Techniques for Bored Precast Concrete Piles

Yoshinori Hagiwara Kazuhiro Watanabe Yoshihiko Morio  
Hiroaki Kojima Yasuharu Wachi Takashi Nishiyama

### Abstract

In this paper, the developed bearing stratum arrival confirmation techniques are presented. 1) A modified integrated ammeter value based on a conventional integrated ammeter value that is currently used in construction sites is proposed as a new indicator. The modified integrated ammeter value improves the generality by normalizing the borehole diameter and correcting the effects of the drilling water in comparison to the conventional integrated ammeter value. 2) Then, a t-test indicator and an STA/LTA indicator are introduced. These indicators quantify the break point versus the drilling speed. 3) This paper also describes a bored pile construction management system as an application of these indicators. 4) The paper also discussed an investigation with a machine learning approach performed to estimate the SPT *N*-value using drilling records.

### 概要

本報では、既製コンクリート杭の支持層到達確認について検討を行い以下の結果を得た。1)現在広く用いられている積分電流値の問題点に対応し、積分電流値による支持層判断を補完するための新たな指標(補正積分電流値, t検定による指標およびSTA/LTAによる指標)を開発した。補正積分電流値を用いることで、掘削断面積と掘削水量の積分電流値への影響を補正できることを確認した。2)掘削速度の変化を表す指標として、t検定による指標および地震波検知で用いられるSTA/LTAによる指標が有効であることを示した。3)これらの指標を取り込んだ杭支持層を確認するためのシステムの開発を行った。4)今後のシステム改良に向けて検討している機械学習を用いた*N*値の推定について示した。

## 1. はじめに

基礎杭工事の重要性が広く認識されるようになって、平成28年3月4日に「基礎ぐい工事の適正な施工を確保するために講ずべき措置(告示第468号)」が国土交通省により公示された。それにより、既製コンクリート杭の支持層到達及び施工記録に関し、建設会社が遵守すべき事項が定められた。その中で、杭の支持層到達に関して、「建設業者は、下請負人によるぐい支持層到達に係る技術的判断に対し、その適否を確認する」と示されており、下請負人(杭専門業者)だけでなく元請けとなる建設業者も支持層到達に係る技術を備えておくことが重要となった。

既製コンクリート杭のプレボーリング工法における支持層到達の確認方法には、主として

- 「地盤調査結果に基づく確認」
- 「掘削ヘッド等に付着した掘削土採取による確認」
- 「オーガー駆動装置の掘削抵抗の変化による確認」
- 「施工状況の変化による確認」
- 「試掘による確認」

の5種類がある<sup>1)</sup>。このうち杭施工時に一般的に用いられ

る「オーガー駆動装置の掘削抵抗の変化による確認」については、オーガー駆動装置の電流値を利用する<sup>2)</sup>。電流値の深度分布はばらつきが大きいことから、電流値よりばらつきの少ない指標として、単位掘削長あたりに要した時間で電流値を積分した積分電流値<sup>3)</sup>の上昇変化などにより支持層への到達を判断している<sup>1)</sup>。

電流値や積分電流値などの負荷電流は、掘削する地盤の土質、掘削断面積、掘削速度および掘削水量などの影響を受けることが経験的に知られているが、これら施工条件の影響は十分に把握されていない。したがって、隣接杭でも、それらの施工条件が異なる場合、その積分電流値の大小で地盤の硬さを比較することは難しい。

また、電流値や積分電流値などは、土質条件、掘削断面積などにより、掘削が進んでも明確に値の変化が現れない場合もある。その場合、「施工状況の変化による確認」として、掘削速度の低下や掘削重機の振動の変化などの情報を加味して総合的に支持層への到達を判断している<sup>1)</sup>。しかし、この「施工状況の変化による確認」は、客観的な施工記録として残すことが難しいと指摘されている<sup>1)</sup>。

本報では、まず現在広く用いられている積分電流値の問題点に対応し、積分電流値による支持層判断を補完するための新たな指標を検討した。次に、これらの指標を取り込んだ杭支持層確認システムの開発を行った。最後に、今後のシステム改良に向けて検討している機械学習を用いたN値の推定について紹介した。

## 2. 杭支持層到達確認のための新たな指標

前章で述べたように、現在杭支持層判定のためによく用いられる電流値や積分電流値のみで支持層を判断するのは困難な場合がある。そこで、積分電流値を補完するために以下の指標を開発した。

まず初めに、実掘削による施工実験を実施し、積分電流値への影響が考えられる掘削の施工条件(掘削断面積、掘削速度および掘削水量)を加味することができる新たな積分電流値(以下、補正積分電流値<sup>4)</sup>)の検討を行った。この指標により、掘削断面積、掘削速度および掘削水量などの施工条件が異なる杭の積分電流値を比較することができ、敷地全体の杭支持層深度を面的に把握することが可能になる。

次に、積分電流値で明確な違いが現れない場合に用いられる「施工状況の変化による確認」の項目の中で、掘削速度の変化に着目した検討を行い、その指標化を試みた。また、掘削重機に振動計を設置し、それを分析することで、重機のオペレータや支持層判定者が感じていた振動の変化についての可視化を試みた。これら2つの「施工状況の変化」に関する指標により、支持層到達の確認に際し、これまで主観的な判断であり施工記録として残すことが難しかった掘削速度と振動について客観的な判断が可能となり、施工記録として残すことができるようになる。

### 2.1 補正積分電流値の有効性検証

2.1.1 施工方法および施工条件 Fig. 1に地盤調査位置と施工実験を実施した杭孔の平面位置を、Fig. 2に土質柱状図と標準貫入試験のN値を示す。施工実験はプレボーリング工法の通常の施工手順に倣い、アースオーガーを用いて、ビットの先端から掘削水を吐出しつつ、深度24mまで掘削した。Table 1に実験ケースと条件および得られた平均積分電流値を示す。掘削断面積の大きいケースと小さいケース(0.363 m<sup>2</sup>と0.264 m<sup>2</sup>)、掘削速度の速

Table 1 実験ケースと条件および平均積分電流値  
Test Condition and Integrated Ammeter Value

ケース名	掘削断面積 (m <sup>2</sup> )	掘削速度 (m/min)	掘削水量比 ( - )	平均積分電流値 (kA·s/m)
case 1	0.363	0.466	0.418	4.06
case 2	0.264	0.510	0.413	3.70
case 3	0.363	0.343	0.579	3.46
case 4	0.264	0.287	0.734	2.17

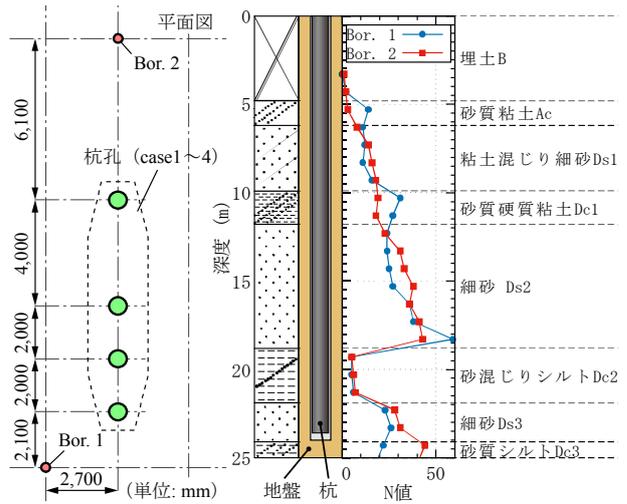


Fig. 1 施工位置  
Distribution of the Test  
Hole and the Boring

Fig. 2 土質柱状図とN値  
Boring Core Column Diagram  
and N-value

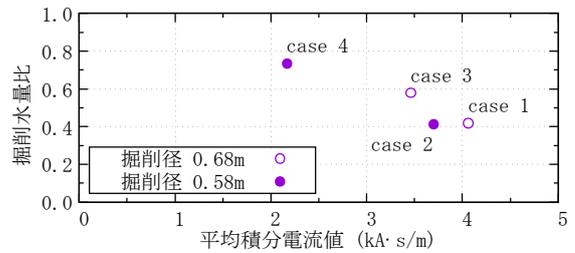


Fig. 3 掘削水量比—平均積分電流値  
Drilling Water Volume Ratio and Average of Integrated  
Ammeter Value

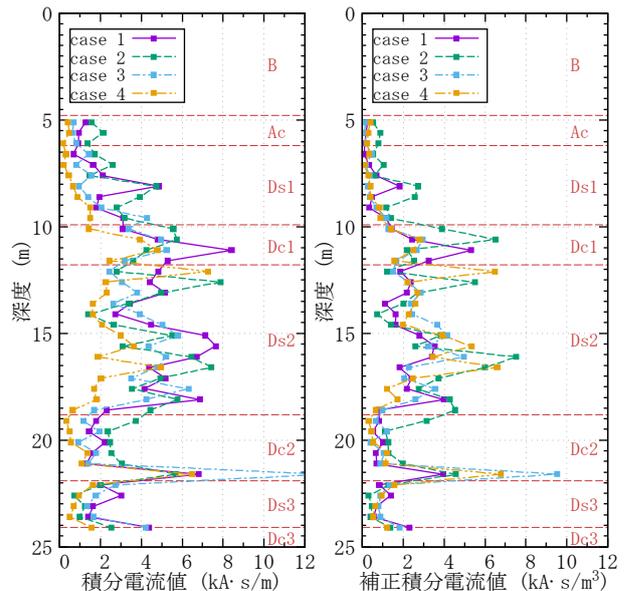


Fig. 4 積分電流値と補正積分電流値の比較  
Comparison between Integrated Ammeter Value and  
Modified Integrated Ammeter Value

いケースと遅いケース(0.5 m/min程度と0.3 m/min程度)を組み合わせて、計4ケースを実施した。施工実験中は、掘削速度と送水流量を一定に保つように努めた。Table 1に示す数値は、施工時の実測値である。なお、掲載する施工記録はすべて、オーガー引き揚げ作業時のデータを除いた、新規掘削作業時のデータである。

**2.1.2 実験結果** Table 1には、掘削深度5~24 mの区間における平均積分電流値も示した。

掘削断面積が積分電流値に与える影響を調べるために、掘削速度が同じで掘削断面積の異なるcase 1と2、およびcase 3と4をそれぞれ比較すると、掘削断面積の大きなケースの平均積分電流値が大きくなっている。同様に掘削速度の影響を調べるために、掘削断面積が同じで掘削速度が異なるcase 1と3、およびcase 2と4をそれぞれ比較すると、掘削速度の速いケースの平均積分電流値が大きくなっている。本施工実験では、送水流量を一定に保っているため、掘削速度が変化すると、単位掘削体積あたりの掘削水量の比(以下、掘削水量比)も変化する。Table 1には、各ケースの掘削水量比も示した。実施した実験ケースのみでは、掘削速度の影響と、掘削水量比の影響を切り分けることは難しいが、ここでは、掘削水量比に着目し検討する。Fig. 3に、掘削水量比と平均積分電流値の関係を示す。同図から、掘削水量比が多いほど平均積分電流値が小さくなる傾向が確認できる。

以上の結果から、積分電流値は、地層ごとの地盤の硬さのほか、掘削断面積や掘削水量比という施工条件の影響も受けていることが判る。本検討では、施工条件の影響を受けずに、支持層の判定に必要な地盤の硬さの変

化を示す指標を得ることを目的として、施工条件が積分電流値に与える影響の補正を試みる。Fig. 4に、各ケースの積分電流値の深度分布と、積分電流値を掘削断面積で除し、さらに掘削水量比を乗じた補正積分電流値の深度分布を示す。積分電流値の深度分布に比べ、補正積分電流値の深度分布は、4つの実験ケースの差が小さくなっている。Fig. 1の杭孔と2つのボーリングの配置およびFig. 2に示した2つのボーリングのN値が同様の深度分布であることから、case 1~4の地盤はほぼ同一であると考えられ、補正積分電流値を導入することにより、掘削断面積や掘削水量比などの施工条件の影響を補正できると考えられる。

**2.2 掘削速度変化の指標化と検証**

本節では、掘削速度の変化に関して、統計的な手法に則った計算法と区間平均の比を利用した簡易な計算法との2種類の指標を作成した<sup>5)</sup>。

**2.2.1 統計的な手法(t検定)に基づいた指標化** 評価する掘削深度前後の掘削速度に対して、それぞれの平均に差があるかどうかについて検定を行う。検定とは、帰無仮説を棄却し対立仮説を支持できるかを決定する手続き<sup>6)</sup>のことである。ここでの帰無仮説は、「評価する掘削深度前後の掘削速度のそれぞれの平均について差がない」とする。なお、各種ある検定法の中で、ここでは、検定統計量が、帰無仮説の下でt分布に従うことを仮定して行うt検定を用いる。t検定は標本数が少ない場合でも有効な検定方法である。このt検定で求まるp値(有意確率：帰無仮説の下で検定統計量がこれよりも極端な値を

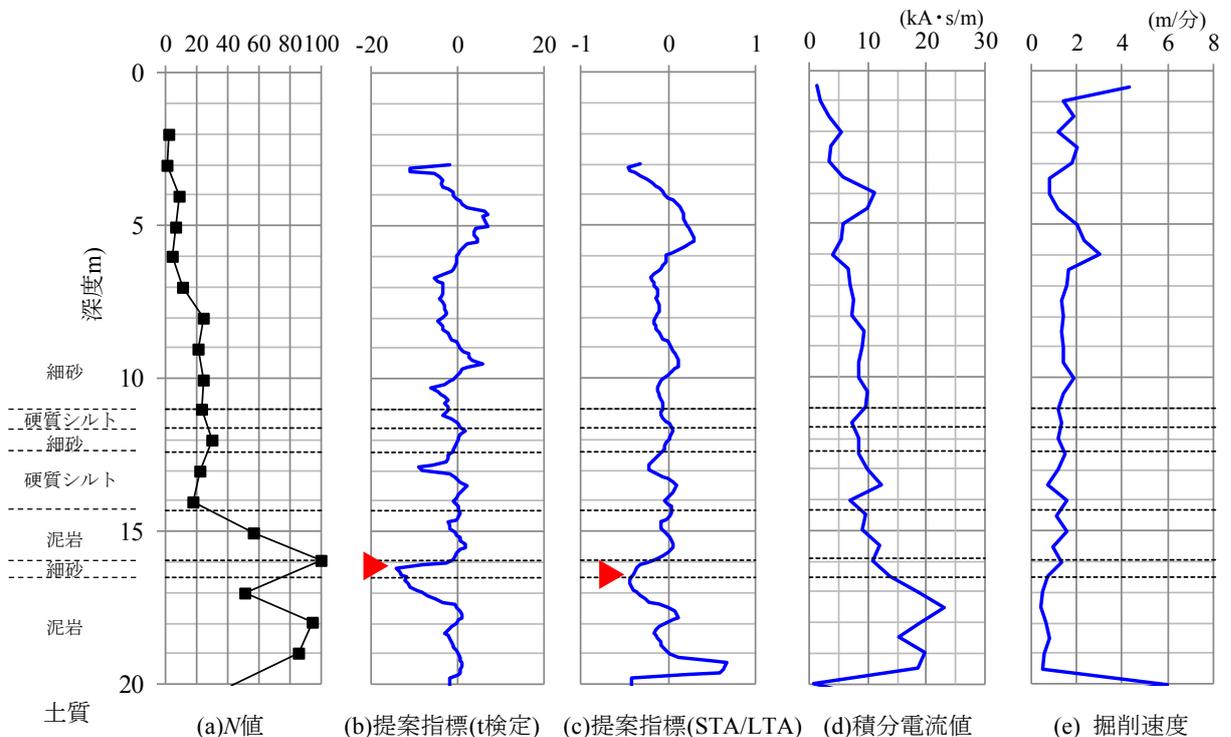


Fig. 5 各指標と地盤調査結果との比較  
Comparison between Proposed Indicators and Boring Core Column Diagram

との確率)に基づいた指標を、以下の手順で算出する。

- 1) 評価する掘削深度より上方に3mの区間で掘削速度の平均値を求める。
- 2) 評価する掘削深度より下方に0.5mの区間で掘削速度の平均値を求める。
- 3) 1)および2)で求めた2つの平均値に対してt検定を行い、p値を求める。
- 4)  $\log_{10}(1/p)$ を算出する。
- 5) 掘削速度が遅くなっている場合(1)の平均値 > 2)の平均値)は負の符号を、掘削速度が速くなっている場合(1)の平均 ≤ 2)の平均)は正の符号を、4)に付加する。

この指標(以下、提案指標(t検定))は、2)の平均掘削速度と1)の平均掘削速度の違いが大きいほど絶対値が大きくなり、2)の平均掘削速度が1)の平均掘削速度に比べて遅くなった場合に負の値になる。したがって、絶対値が大きいかつ負の値の時、速度の変化が大きいかつ遅くなった、つまり支持層に到達したと判断することができる。

### 2.2.2 簡易な計算法(STA/LTA)に基づいた指標化

前項で示したt検定を用いた指標は、統計的な計算手法に基づいているため説明性は高いものの、計算の容易性という点では利便性が高くない。そこで、計算が容易にできる短時間平均(STA : Short Term Average)と長時間平均(LTA : Long Term Average)の比(以下、STA/LTA)を用いた指標化を行う。このSTA/LTAは地震波の検出などに用いられる<sup>7)</sup>。STA/LTAは、例えば、固い層に差し掛かり掘削速度が急に遅くなった場合、STAは小さくなるがLTAはその変化に追従できないため、STA/LTAの値は急激に小さくなる。具体的には以下の手順で算出する。なお、手順1), 2)は前項と同じため割愛する。

- 3) 1)をLTA, 2)をSTAとし、STA/LTAを算出する。
- 4)  $\log_{10}(STA/LTA)$ を算出する。

この指標(以下、提案指標(STA/LTA))の値についても前

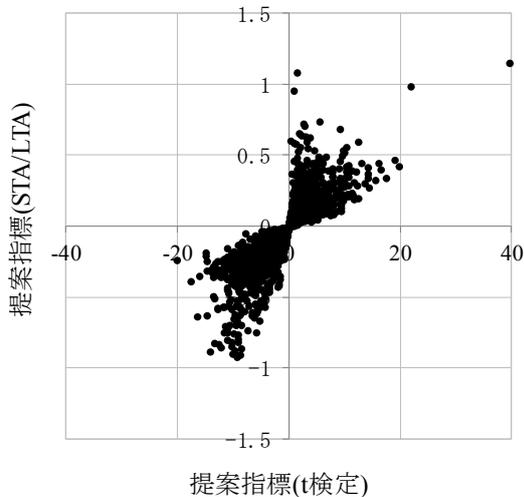


Fig. 6 提案指標の比較  
Comparison between the t-test Indicator and the STA/LTA Indicator

項の提案指標(t検定)と同様に、絶対値が大きいかつ負の値の時、支持層へ到達したと判断することができる。

2.2.3 提案指標と地盤調査結果との比較 ここでは、実際の杭の施工データに対して、前項の手順により求めた提案指標と地盤調査の結果との比較を示す。なお、対象とした杭は、事前に同位置で地盤調査を行っており、土質およびN値が求められている。

Fig. 5 (a)にN値, (b)に提案指標(t検定), (c)に提案指標(STA/LTA)を示す。また、(d)に積分電流値を、(e)には掘削速度を示す。深度16mのN値が100の砂層付近から、どちらの提案指標の値も負の値となり、掘削速度が遅くなっていることがわかる。また、その直後にピーク値となっており急激な速度変化であることがわかる(Fig. 5中の赤▶印)。一方で、掘削速度そのものの値については、16m付近から値は小さくなっているものの、その判断は難しい。また、積分電流値については17.5mでピークとなっており、16m付近で明確な変化は見られない。

### 2.2.4 提案指標(t検定)と提案指標(STA/LTA)との比較

同様な検討を他の杭についても行い(2現場合計25本、内：杭とボーリングが同位置：10本、杭とボーリングが数m以内：15本)、提案指標(t検定)と提案指標(STA/LTA)を求め、それぞれの値の比較を行った。Fig. 6に示すように、正の相関(相関係数0.84)が確認できる。したがって、統計的な手法であり説明性の高い提案指標(t検定)だけでなく、計算が簡易な提案指標(STA/LTA)も支持層への到達確認に利用できると考えられる。

なお、3章で示す杭支持層到達を確認するためのシステムには、計算が容易な提案指標(STA/LTA)を採用した。

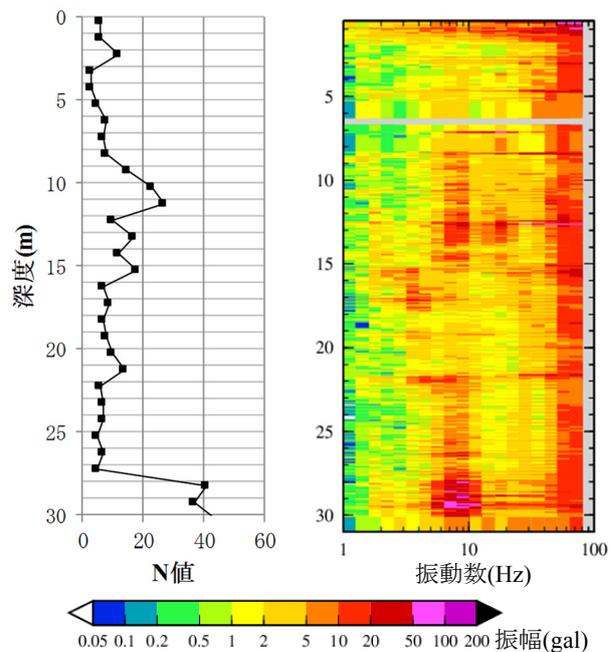


Fig. 7 N値と振動の分析結果との比較例  
N-value and Analysis Result of Vibration

### 2.3 振動の可視化

掘削重機に振動計を設置し、その波形を周波数分析することで重機のオペレータや支持層判定者が感じていた振動の変化についての可視化を行う。工事振動監視で多くの実績があり、測定した振動波形をリアルタイムで分析することが可能な観測システム<sup>8)</sup>を使用する。Fig. 7にN値と重機振動の周波数分析結果との比較例を示す。振動の分析の図は横軸が周波数(Hz)、縦軸が深さ(m)、色が振動の大きさ(gal)を示す。N値が大きくなり始める9m付近から10Hz前後の振動が大きくなり、再びN値が小さくなる16~20m付近では振動も小さくなっている。さらに、N値が急激に大きくなる28m以深は振動も大きくなっており、N値の変化の傾向をよくとらえている。このように掘削重機の振動を可視化することで、振動の変化を客観的な施工記録として残すことができるようになる。

### 3. 杭支持層到達確認のためのシステム開発

支持層到達判断のために広く用いられている積分電流値に加え、前章で示した独自の指標をリアルタイムに確認できるシステムを開発した。Fig. 8にシステムの概要を示す。掘削重機の施工データおよび重機に設置した加

速度計の振動データをクラウドサーバーを介してユーザーが閲覧できるようになっている。なお、施工状況だけでなく、あらかじめ登録しておくことで、近隣のボーリング情報(N値)を表示することもできる。杭を施工している現地だけでなく、現場事務所や現場を支援する部門も遠隔で施工状況を確認できる。

Fig. 9に事例を示す。積分電流値や独自指標など複数のグラフをパソコンのマウス操作やタブレットのフリック操作で切り替えることができ、様々な指標により支持層到達を確認することができるようになった。また、このシステムにより、これまで客観的な施工記録として残すことができなかった振動などの「施工状況の変化」を記録として残すことが可能になった。

### 4. 機械学習を用いたN値の推定

システムの改良に向けた取組みとして、機械学習を用いたN値の推定について示す。

杭は支持地盤のN値に基づいて設計されるため、施工管理においては、設計N値を満足する地盤に到達していることを確認する必要がある。しかしながら、施工時に掘削する地盤のN値を把握するのは容易ではない。

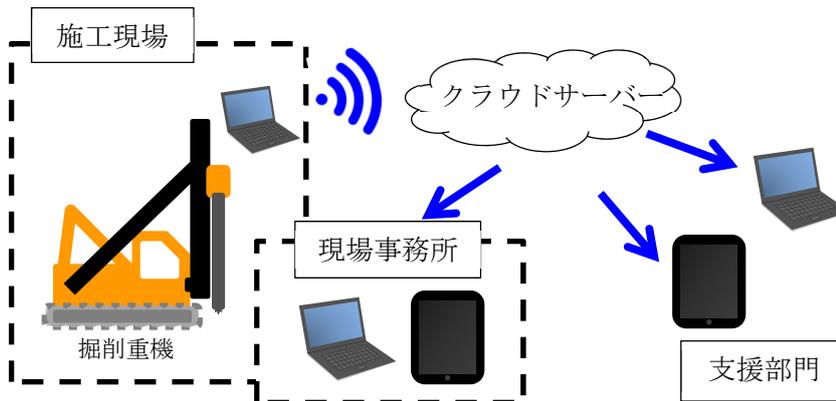


Fig. 8 システムの概要  
Overview of the System

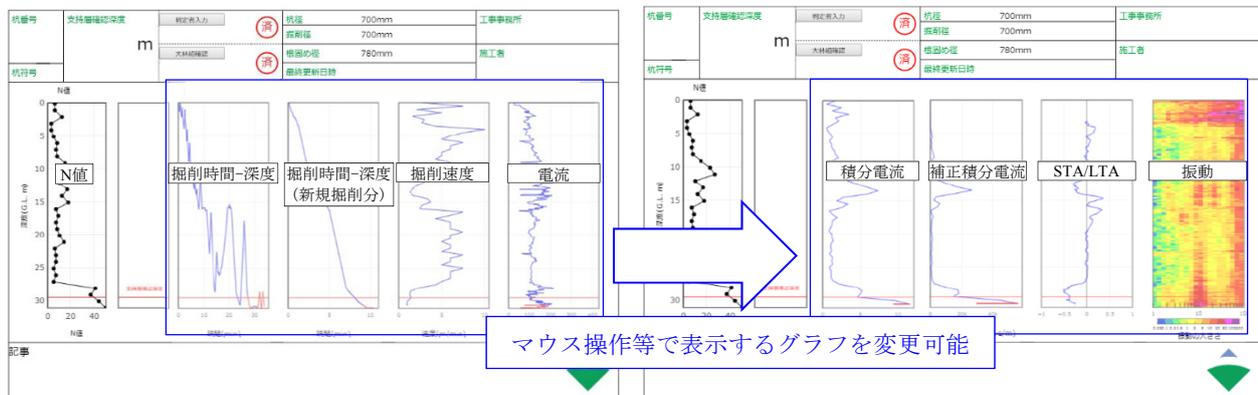


Fig. 9 杭支持層を確認するためのシステム画面表示例  
Screenshot of the System

代表的な施工管理指標である積分電流値からは、地盤の相対的な硬さを把握できるが、地盤のN値を定量的に評価することはできない。そのため、積分電流値を用いて施工管理を行う場合には、事前にボーリング調査を行って支持層のN値を確認した上で、施工時には地盤の相対的な硬さを確認することによって、杭が支持層に到達したことを判断している。

施工記録から地盤のN値を可視化し、原位置で設計値との比較を行うことができれば、施工の良否をより明確に判断することができる。本検討では、機械学習を用い、杭の施工記録に基づいた地盤のN値の推定を試みた。その結果、実測N値と対応する推定N値が得られた。以下にその事例を示す。

#### 4.1 施工事例の概要

検討には、同一の敷地で施工した埋込み工法の既製コンクリート杭のうち、標準貫入試験の調査点から10 m以内にある43本の施工記録を用いた。

Fig. 10に原位置の代表的な土質柱状図および杭の姿図を示す。地盤は、水平成層な細砂とシルトの互層地盤である。杭は、杭径1.0 mの既製コンクリート杭で、深度55 m付近にあるN値50以上の細砂層に支持させた。

Fig. 11に計測した施工記録の例を示す。掘削深さ0.1 m毎に、掘削時間*t*(0.1 m区間を掘削するのにかかった時間)、

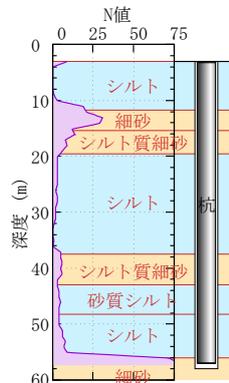


Fig. 10 土質柱状図および杭の姿図  
Boring Core Column Diagram and Pile

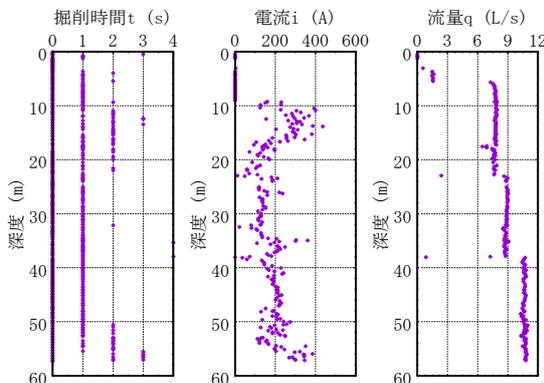


Fig. 11 施工記録  
Drilling Records

オーガーマーターの負荷電流*i*、および、掘削ビットの先端から吐出した掘削水の流量*q*を計測した。

#### 4.2 検討に用いた機械学習の概要

機械学習とは、コンピュータが与えられたデータの中から知識やルールを学習する技術や手法である。近年、機械学習モデルと呼ばれるソフトウェアが、入力データの中から着目すべき特徴を自ら発見し、学習する手法の開発が進み、画像認識や自然言語処理の分野で大きな成果が報告されている。本検討では、機械学習モデルに、施工記録からN値を推定する方法を学習させた。

Fig. 12に検討の概念図を示す。検討は、学習段階と検証段階の2段階に分けられる。学習段階では、使用できる43本の施工記録から無作為に32本を選び、施工記録と実測N値の関係を機械学習モデルに学習させた。検証段階では、学習段階には使用しなかった残りの11本の杭の施工記録を機械学習モデルに入力し、出力された推定N値を、実測N値と比較することで機械学習モデルの性能を検証した。

Fig. 13に、使用した機械学習モデルを示す。本検討では、画像認識で実績がある<sup>9)</sup>畳込みニューラルネットワーク(Convolutional Neural Network: CNN)を用いた。

CNNは、入力から出力に向かってデータに変換を加えながら順次受け渡すことにより、出力を生成する。機械学習モデルは畳込み層(Conv.)、プーリング層(Pool.)および全結合層(FC)からなり、それぞれ以下の機能を有する。畳込み層は、データに先鋭化や平滑化のフィルタを適用し、データの局所的な特徴を学習する。プーリング層では、入力されたデータを間引くことにより、データを粗

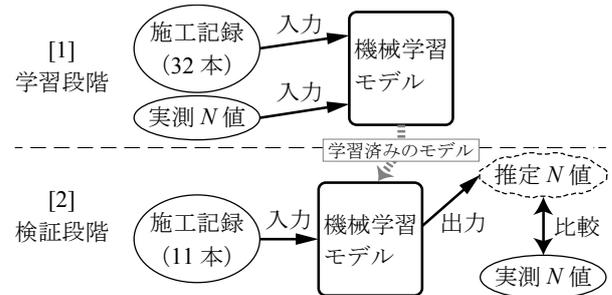


Fig. 12 検討の概念図  
Schematic Chart

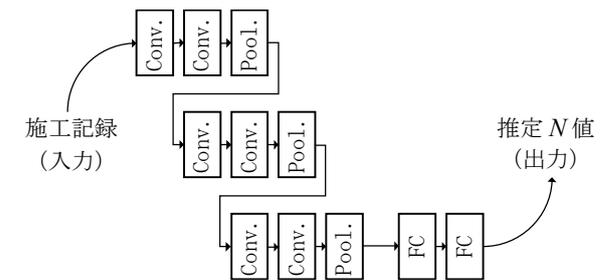


Fig. 13 機械学習モデル  
Machine Learning Model

視化する。全結合層では、抽出された特徴の重み付き平均を計算する。機械学習モデル全体では、畳込み層とプーリング層を段階的に適用することにより、局所的な特徴から大局的な特徴を順次抽出し、その特徴を足し合わせて目標とする $N$ 値の近似式を生成する。

### 4.3 学習段階における入力データ

Fig. 14に入力データの書式を示す。着目する深度を中心とした0.8 m区間の施工記録を1組の入力データとした。すなわち、ある深度における瞬間的な値に基づいて $N$ 値を推定するのではなく、前後の値も考慮して $N$ 値を推定した。

学習段階に使用する32本の施工記録から、13,400組の入力データを生成し、機械学習モデルに学習させた。

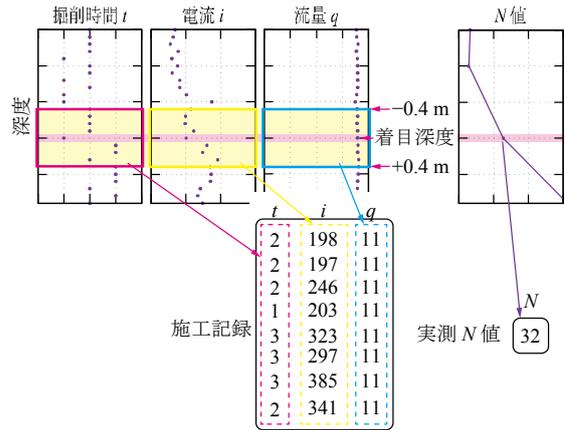


Fig. 14 入力データの書式  
Input Data Format

### 4.4 検証段階における実測 $N$ 値と推定 $N$ 値の比較

検証段階では、学習段階で使用しなかった11本の杭について、3,351組の入力データを生成して機械学習モデルに入力し、対応する推定 $N$ 値を出力させた。

Fig. 15に、検証段階で得られた推定 $N$ 値の一例を示す。同図には真値である実測 $N$ 値も重ねて示す。また、Fig. 16に、比較対象として、同じ杭の積分電流値の深度分布を示す。推定 $N$ 値および積分電流値の深度分布は、どちらも実測 $N$ 値と概ね対応している。一方で、深度15m付近 ( $N$ 値25) と深度55m付近 ( $N$ 値50) の結果に着目すると、積分電流値ではいずれの深度においても8 kA·s/m程度の値を示し、定量的な違いは見られないのに対し、推定 $N$ 値では $N$ 値25程度の層と $N$ 値50以上の層の違いを明確に読み取ることができる。

Fig. 17に使用した、3,351組のデータに対する推定 $N$ 値と実測 $N$ 値の相関を示す。また、Table 2に推定 $N$ 値と実測 $N$ 値の相関係数、および積分電流値と実測 $N$ 値の相関係数を示す。実測 $N$ 値と推定 $N$ 値には高い相関があり、実測 $N$ 値と積分電流値の相関と比較しても相関係数が高かった。

本検討では、同一の敷地で得られた杭の施工記録から、地盤の $N$ 値を推定することを試みた。その結果、機械学習を用いて施工記録と実測 $N$ 値の関係を学習することにより、実測 $N$ 値と対応する推定 $N$ 値が得られることを確認した。

## 5. まとめ

既製コンクリート杭の支持層到達確認をするための指標を提案し、その指標を組み込んだシステムを開発した。また、機械学習を用いた $N$ 値の推定の検討を行った。得られた結果を以下に示す。

- 1) 掘削断面積や掘削水量が積分電流値に影響を与えてしまうという課題は、補正積分電流値を用いることで補正できる。
- 2) 掘削速度の変化に関して、 $t$ 検定とSTA/LTAを利用した指標は、支持層への到達確認に利用できる。

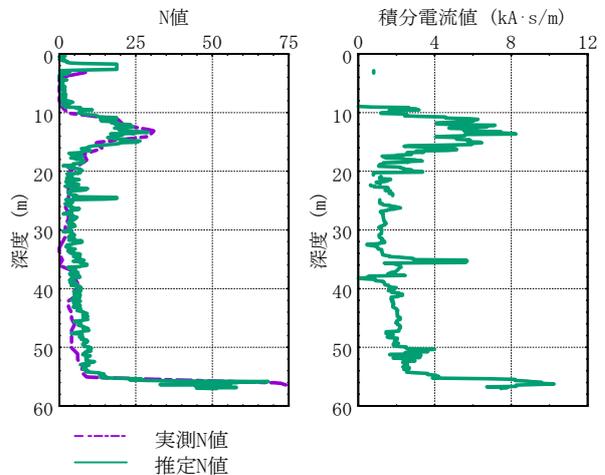


Fig. 15 推定 $N$ 値  
Estimated  $N$ -value

Fig. 16 積分電流値  
Integrated Value of Ammeter

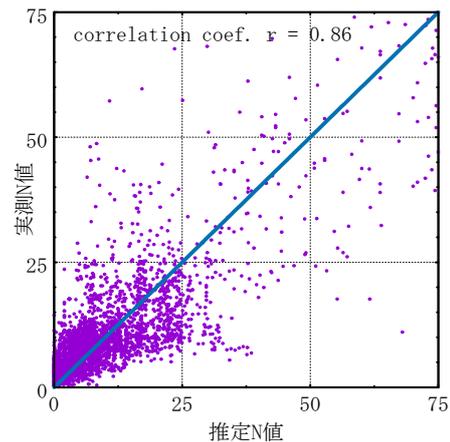


Fig. 17 推定 $N$ 値と実測 $N$ 値の相関  
Correlations of Estimated  $N$ -value vs. Measured  $N$ -value

Table 2 推定 $N$ 値と実測 $N$ 値の相関係数

Correlation Coefficients	
推定 $N$ 値と実測 $N$ 値	0.86
積分電流値と実測 $N$ 値	0.64

- 3) 掘削重機の振動を可視化することで、振動の変化を客観的な施工記録として残すことができる。
- 4) 機械学習を用いることで、杭の施工記録から掘削した地盤のN値を推定できる。

今後も、施工状況をリアルタイムに可視化するシステムおよび指標の適用を進め、既製コンクリート杭の施工品質の向上を図る。さらに、各指標に対して支持層到達判定のための閾値の設定を目指していく。また、継続してデータ収集を行い、機械学習を始めとする新たな指標の精度向上を目指したい。

### 謝辞

一部の図の作成にはWessel and Smith<sup>10)</sup>のGMTを用いました。また、実験に協力いただいた関係各位、貴重な実測データを提供していただきました関係各位に深謝致します。

### 参考文献

- 1) 日本建設業連合会・コンクリートパイル建設技術協会：杭の施工管理における支持層到達の確認方法(既製コンクリート杭埋込み工法), p.19, 2017.2
- 2) コンクリートパイル技術協会：既製コンクリート杭の施工管理, 第4版, p.485, 2006.4
- 3) 橋詰, 内田, 木谷：埋込み杭工法の施工管理について, 地盤工学会大会, pp.1391-1392, 2002.7
- 4) 渡辺, 西山, 和知, 森尾, 森岡：埋込み杭の施工条件が負荷電流に与える影響, 地盤工学会大会, pp.1269-1270, 2008.7
- 5) 萩原：既製コンクリート杭の支持層到達確認のための指標に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.733-734, 2019.9
- 6) JISZ8101-1：統計用語及び記号—第1部：一般統計用語及び確率で用いられる用語, p.19, 2015.10
- 7) 松村, 岡田, 堀：地震前兆解析システムにおける地震データ(高速採取データ)の処理, 国立防災科学技術センター研究報告, 第41, pp.45-64, 1988.3
- 8) 高野, 中村：工事振動の予測・監視技術, 大林組技術研究所報, No.72, pp.1-6, 2008.12
- 9) Alex Krizhevsky, Ilya Sutskever, Geoffrey E. Hinton: ImageNet classification with deep convolutional neural networks, Proceedings of the 25th International Conference on Neural Information Processing Systems, Volume 1, pp. 1097-1105, 2012.12
- 10) Wessel, P. and Smith W. H. F. : New, improved version of Generic Mapping Tools released, EOS AGU 79, p.579, 1998.12