

既製杭の支持層検出システムの開発

－施工中の支持層到達確認における新たな試み－

Developing a Load Bearing Layer Detection System for Precast Piles

- A New Approach to Confirming Arrival at the Load Bearing Layer during Pile Construction -

清水智明* 松倉勝幸** 石井敏之*** 三澤孝史***

要 旨

既製杭を埋込み工法で施工する場合、支持層到達をオーガーモーターの積分電流値を用いて間接的に判定する方法が一般的であるが、N値が漸増するような地盤では明確な判断が困難な場合がある。そこで、予定深度到達時にオーガー先端で行う貫入試験で換算N値を求め、支持層到達を確認する“支持層検出システム”を開発した。

開発したシステムは、地盤工学会で標準化されている電気式静的コーン貫入試験装置を装備しており、信頼性の高い換算N値を得られることが期待できる。本システムの性能検証のため、実証試験を行ったところ、杭下端でのN値を精度よく求めることができ、定量的な支持層到達判定が可能であることが分かった。

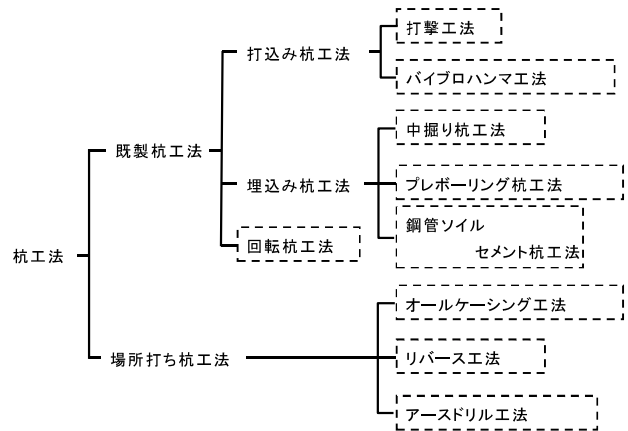
キーワード：埋込み工法、支持層検出システム、電気式静的コーン貫入試験

1. まえがき

杭基礎を用いた構造物の構築では、構造物の重量や作用外力は杭の支持力によって支えられるため、設計上見込んである支持力を施工時において確実に確保することは極めて重要である。杭の支持力は先端支持力と周面摩擦力の和であるが、一般に表層が軟弱な場合、先端支持力はその寄与が極めて大きく、重要である。

図－1は、「杭基礎施工便覧」に記載されている杭の工法による分類¹⁾である。杭基礎には場所打ち杭と既製杭があり、既製杭は場所打ち杭に比べて、品質や出来形が一定となるといった利点を有する反面、場所打ち杭では、掘削土の土質を見れば支持層到達が確認できるが、既製杭ではできない。

一方、既製杭の場合でも、かつては打込み工法が主流であり、打込み工法であれば打撃量の管理、つまり支持層における一打あたりの貫入量、リバウンド量等から動的支持力算定式を用いて支持力確保を容易に確認できた。しかし、騒音・振動といった環境の側面から、打込み工法を採用できる条件が限られるようになり、埋込み杭が主流となった。埋込み杭では、杭を打撃する機構を持たないため、支持力確認という性能規定を、支持層到達確認という仕様規定で代用している。このため、先端支持力の確保のためには、杭を良質な支持層に確実に到達さ



図－1 杭の工法による分類¹⁾

せることが重要である。

良質な支持層とは、基準類によって定義が異なるものの、例えば「道路橋示方書」²⁾では、粘性土でN値20程度以上、砂質土でN値30程度以上と目安が示されている。

埋込み杭における支持層到達管理では、積分電流値による到達判定が一般的に用いられるが、N値が漸増する地盤等では明確な判断が困難であるといった課題がある。

以上のような背景から、埋込み杭における支持層到達を精度よく確認するために、施工中に杭の支持層到達を判定する“支持層検出システム”を開発し、その有効性を実証試験により検証した。

*東日本支社土木技術部 **東日本支社東京土木第2部 ***技術研究所土木研究グループ

2. 既往の支持層の到達確認方法と問題点

「杭の施工管理における支持層到達の確認方法」³⁾によれば、支持層到達の確認方法には、主として以下の5つがある。

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

このうち、本論で着目するのはiiiであるが、そもそもiの地盤調査結果から正しく支持層を想定し、所要の深度まで確実に施工することが前提となる。しかし、想定を超えて支持層の深度が変化している場合があり、これがトラブルの原因となることもある。このため、ii～vのような複数手段を用いて施工時、もしくは施工後の確認を行うが、埋込み杭において主体となるのは、iiiのオーガー駆動装置の掘削抵抗の変化による確認である。

前述のように、埋込み杭における支持層到達の管理では、積分電流値による到達判定が一般的に用いられる。積分電流値とは、掘削に要したオーガーモーターでの消費電流を掘削時間で積分したものである。支持層に到達すると、地盤が硬いために掘削抵抗が増加し、モーターを回すために必要な電流も増加することから、電流値を管理すれば支持層到達が判定できるということに依拠している。積分する意味は、掘削速度を上げると地盤が硬くなくても電流が増加するため、単位長さあたりの掘削に要した電気エネルギーで評価すれば、そのような影響をキャンセルできるとの考えからである。しかし、この方法では、前述のようにN値が漸増するような地盤では明確な判断が困難であるといった課題がある。さらに、「杭の施工管理における支持層到達の確認方法」³⁾において、「掘削抵抗値と地盤N値に定量的な関係はないため、掘削抵抗値の変化を土質（土層）の変化と捉えて判断基準とする」との記載があるように、定量的な判断基準が設定できないため、判断に個人差が生じる恐れもある。

3. 開発したシステムによる支持層の到達確認方法

3.1 システムの構成

前述の課題を解決するために、“支持層検出システム”を開発した。本システムでは、通常行う積分電流値の測定に加え、オーガーの先端に装備した外径φ36mmのコーン貫入試験装置により想定支持層に対して貫入試験を行い、換算N値を求めて支持層到達を判定する。貫入試験装置は、地盤工学会で基準化されている電気式静的コーン貫入試験装置⁴⁾と同じ仕様であり、高い信頼性で地盤の土質分類⁵⁾や換算N値⁶⁾を求めることができ

る。開発したシステムは、上記装置を内蔵するために三点式杭打機を用いた埋込み杭工法の施工システムの、スクリーオーガー式と油圧系統を改造したものである。

本システムの中で特徴的な要素は、1) 貫入試験装置内蔵型オーガーヘッド、2) ケーブル保護管付属スクリーオーガー、3) 4系統用油圧スイベルの3点である（図-2参照）。

要素1)は、貫入試験を行うための本体部である。図-3に示す、全長で5.5mとなる大型のオーガーヘッドであり、適用杭径φ1000mm用のものをベースに製作している。通常内蔵しているものに加えて、内部に電気式静的コーン貫入試験装置、油圧ジャッキ、ケーブル巻取り装置、A/D変換器、ワイヤー式変位計を内蔵している。

電気式静的コーン貫入試験装置は、ロッドを介して油圧ジャッキで上下動し（写真-1参照）、地盤貫入時の先端貫入抵抗、摩擦抵抗、水圧等を測定し、土質分類や換算N値を求める。土質分類を求めるのは、1章で述べたように、土質によって支持層として必要なN値が異なるためである。また、ケーブル巻取り装置はジャッキの伸縮によりケーブルのたるみが生じると、からまって引っ張られる恐れがあるため設置した。さらに、大深度地下での計測データをアナログデータのまま地上に伝送すると、ノイズに阻害されて計測データが正しく取得できない恐れがあるため、オーガーヘッドに内蔵したA/D変換器によりデジタル変換して地上のPCに伝送する方法を採用した。貫入試験中のストロークを管理するため、ジャッキシリンダ先端にワイヤー先端を付けたワイヤー式変位計を設置している。

要素2)は、写真-2のように通常のスクリーオーガーの側部に保護管として鋼管が付属したものであり、

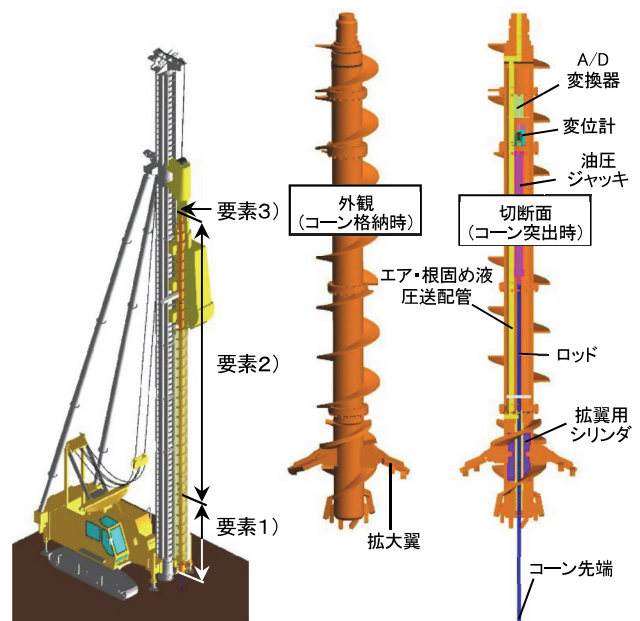


図-2 システムの構成要素

図-3 オーガーヘッドの構造



写真-1 貫入試験装置動作確認状況
(右上: ロッド部拡大)



写真-2 ケーブル保護管付属スクリーオーガー

保護管内には計測ケーブルが内蔵されていて、上記の計測信号を地上まで有線で伝送する。1本のオーガーの両端にはケーブルの防水コネクタを設けてあり、オーガーを接続する際には、コネクタも接続し、鋼製の保護カバーを取り付ける。

要素3)は、回転体であるスクリーオーガーに（回転できない）油圧ポンプからの油圧を供給するもの（写真-3参照）であり、通常の杭施工でも使用する拡翼用シリンダ開閉のための2系統の油圧に、上記の油圧ジャッキの上下動に使用する2系統の油圧を加えた、合計4系統の油圧を供給する。オーガージョイントでは、写真-4のように、これら4系統分の油圧カプラが付いている。

3.2 システムの特長

開発したシステムには、以下の特長がある。

a. 地盤支持力のみを直接かつ正確に測定
コーン直近に付けたひずみゲージで荷重測定を行っているため、計測値に貫入試験ロッド周囲での摩擦力が混入しない機構となっており、直接的かつ正確な荷重測定が可能である。

b. N値50を超える地盤でも測定可能
油圧ジャッキは50kNの載荷能力を有している。

図-4は、類似調査法であるオランダ式二重管コーン貫入試験



写真-3 油圧スイベル

写真-4 オーガー
ジョイント (オス)

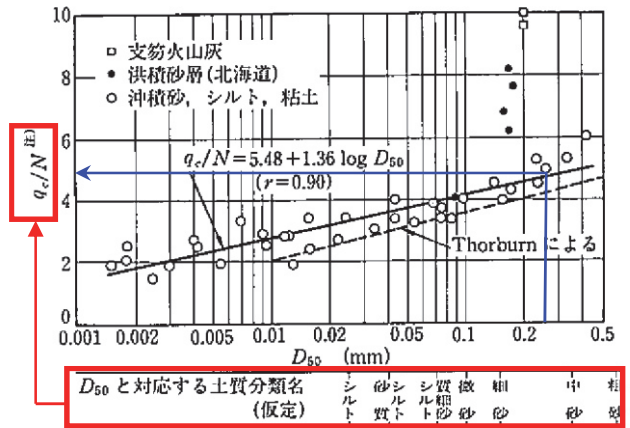


図-4 オランダ式二重管コーン貫入試験における平均粒径 D_{50} と q_c/N (q_c : コーン指数、 N : N値) の関係⁷⁾

入試験における平均粒径 D_{50} に対応するN値とコーン指数の比の関係⁷⁾である。

D_{50} の最大値を0.25mmと想定すると、 q_c/N は5となり、 $N=50$ 、コーン断面積10cm²を用いると、必要な想定荷重は25kNとなる。したがって、礫地盤を除けば、硬質地盤の目安であるN値50を超える地盤でも貫入可能である。

c. オーガーヘッド掘削の影響を排除

掘削により緩んだ地盤では正確な測定ができないため、緩んでいない深さの地盤へコーンを貫入できるように、ジャッキストロークは1200mmと長めの設計としている（根拠は4.3に記載）。

3.3 到達確認の手順

中掘り杭工法を例に、本システムによる到達確認の標準手順を図-5に示す。なお、杭工法の違いにより手順も異なるが、掘削の最下点で貫入試験を行うという考え方は同じである。手順図の中で貫入試験の実施工程以外は一般的な中掘り杭工法の施工工程と同じである。

4. 実証試験によるシステムの有効性の検証

4.1 概要・方法

装置を製作し、システムが有効に機能することを確認するため、実際の杭施工に近い形態で実証試験を行った。

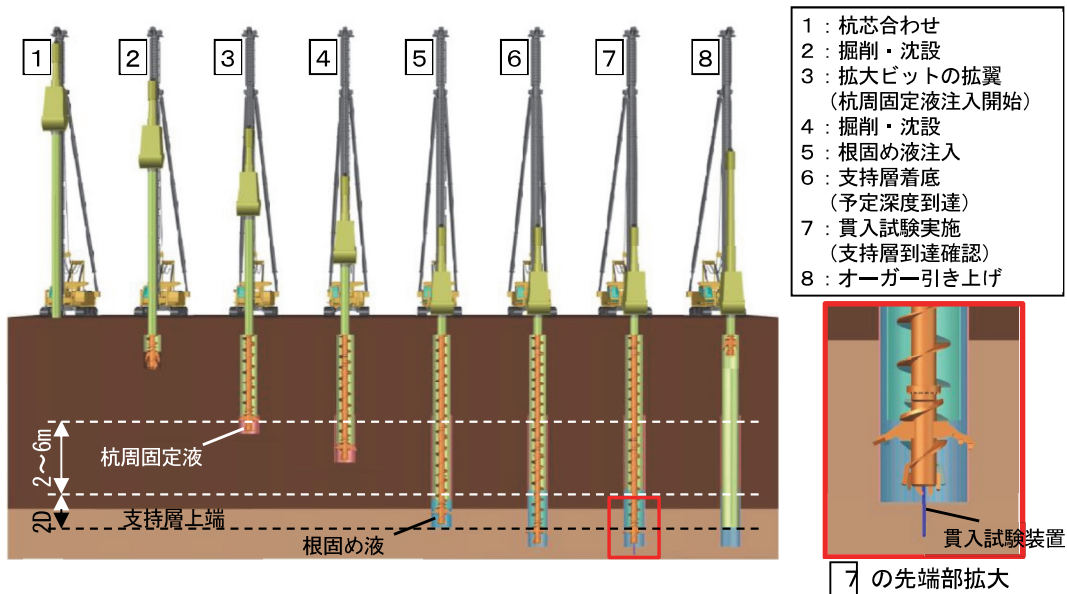


図-5 到達確認の標準手順（地中部は2倍に拡大して表示）

ただし、1本の杭施工から表層地盤を含め多くの換算N値等のデータを取得して信頼性を高めるために、削孔1mごとに削孔を中断して貫入試験（以下、オーガーCPT）を行った。

試験場所は茨城県つくば市の奥村組技術研究所内で、支持層深度は約13mである。図-6は試験の配置平面図である。杭長17mの杭施工を7本行い、比較用の事前の地盤調査として、近傍で通常の電気式静的コーン貫入試験を4本（以下、連続CPT）、標準貫入試験を3本（以下、SPT）実施した。調査位置の近いデータは地層構成の差が少ないと考え、図中に示すA～Dの4グループに分け、グループ内で比較・評価した。

得られた計測値より、土質分類については Robertson⁵⁾の方法で、換算N値については鈴木ら⁶⁾の方法で求めた。

4.2 土質判定の評価

事前のボーリング調査、オーガーCPT、連続CPTのそれぞれから得られた土質分類を柱状図にし、グループごとに比較したものを図-7に示す。なお、CPTから得られる土質分類は1～9の9種類に分類されるが、分類番号1～4および9の粘性土と分類番号5～8の砂質土とに分けた。粘性土、砂質土の区分は3種類の調査いずれも同様の結果を示しており、オーガーCPTにより問題なく判定できることを確認できた。

4.3 掘削による地山の緩みの影響を考慮したデータ採用範囲の検討

オーガーCPTは、掘削後の孔底から開始するため、試験開始からある深さまでは掘削時の地山の緩み等で正しい値を示さないことが予想されることから、オーガーCPTの換算N値と連続CPTの換算N値の差を正しさの指標と位置づけ、貫入ストロークと換算N値の差（オー

ガーCPT-連続CPT）の関係を全杭について調べた。一例としてNo.1のケースを図-8に示す。オーガーCPTと連続CPTは調査位置が数m離れており、両地点の地層構成の標高が若干異なるため、個々のデータはばらつきがみられる。しかし、系統のないばらつきは多くのデータの平均を取れば解消するため、図中に赤線で平均値をプロットした。ただし、連続CPTのN値も小さい値を示している軟弱層では緩みの影響による差が出にくいいため、連続CPTのN値が10を超えるデータを平均の対象とした。図中の平均値プロットより、0.45m以降はオーガーCPTと連続CPTは一致しているのに対し（差がほぼ0）、0～0.45m付近までは緩み等の影響で正解（連続CPTの換算N値）より小さい値を示している。なお、今回は0.15mの余裕度を考慮してストロークが0～0.6mまでの値は評価対象から除外した。

4.4 N値の評価

それぞれの調査から得られたN値、もしくは換算N値の深度分布を図-9に示す。オーガーCPTは、連続CPTの結果と細かい変動も含めてほぼ一致した。SPTの結果は、深度1mピッチしか値を持たないため、調査深度（図中のSPTの緑丸）と比較すると、概ね一致している。

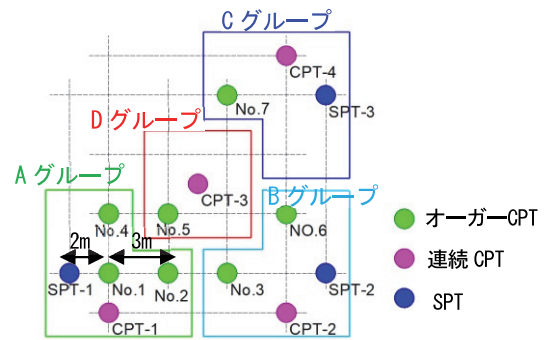


図-6 試験の配置平面図

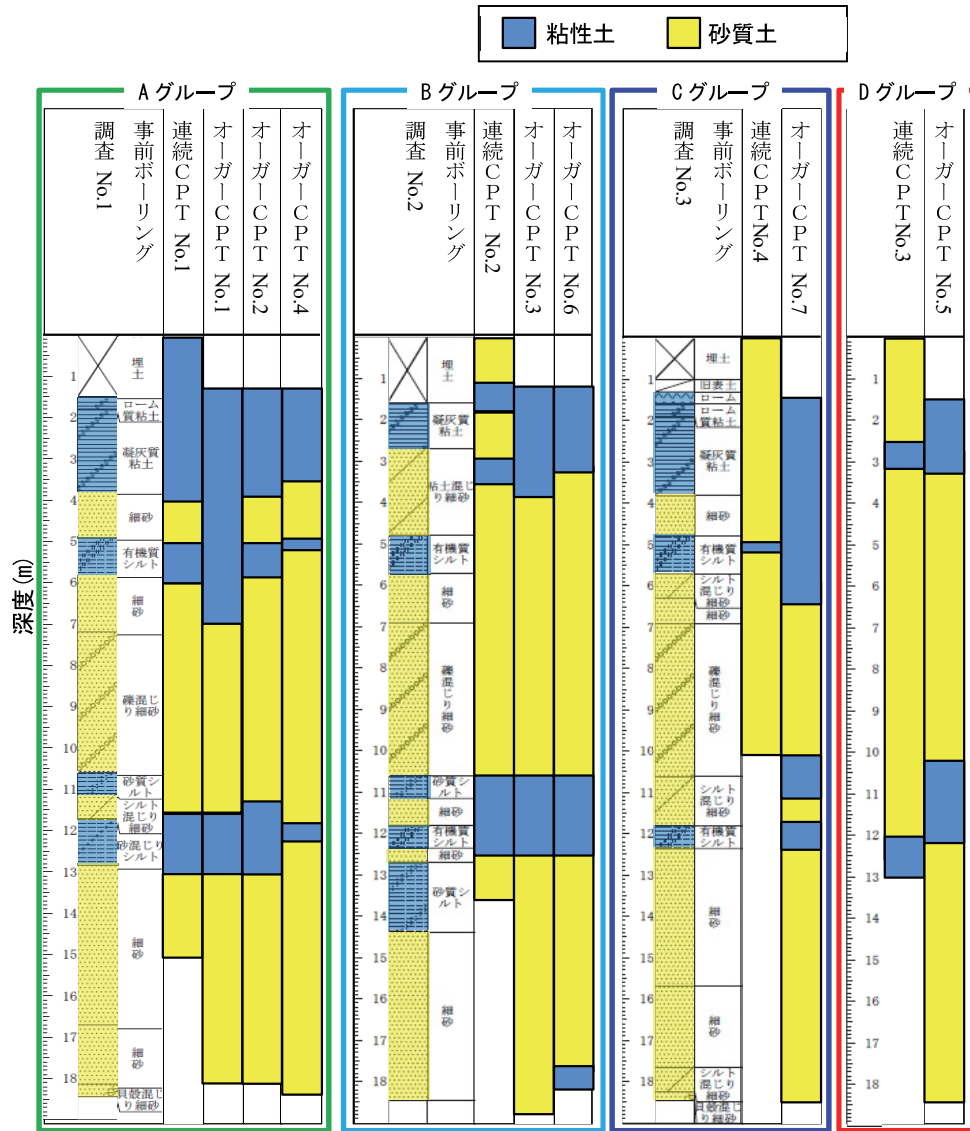


図-7 土質分類柱状図の比較

一方、積分電流値は深度13m付近でのN値の上昇に対する感度が鈍く、全体的に変化がなだらかである。これは、積分電流値による支持層確認時は掘削速度等の諸条件を極力一定に保つことが重要であるとされているにもかかわらず、貫入試験のために掘削1mごとに掘削を中断したことが影響している可能性がある。

5. まとめ

埋込み杭において貫入試験を行って換算N値を求め、支持層到達を定量的に判定できる“支持層検出システム”を開発した。本システムを用いて実際の杭施工を行った実証試験により、本システムの有効性を確認した。主な結論を以下に示す。

- i. 本システムで得られた土質分類や換算N値は、既往の方法の測定結果とほぼ一致し、本システムの有効性が確認できた
- ii. 実証試験より、貫入試験を行う孔底は、掘削の影響

で緩みが生じており、緩み範囲は評価対象から除外する必要があることが分かった。緩み範囲は砂質土では約0.45mであり、ストローク1.2mの後半のデータを採用すれば問題ないことが分かった

【参考文献】

- 1) 日本道路協会、「杭基礎施工便覧」、p.2、2015.3
- 2) 日本道路協会、「道路橋示方書・同解説IV下部構造編」、pp.177-178、2017.11
- 3) 日本建設業連合会、「杭の施工管理における支持層到達の確認方法」、p4、2017.2
- 4) 地盤工学会、「地盤調査法」、pp.233-241、1995
- 5) Robertson, P. K.、“Soil classification using the cone penetration test Canadian Geotechnical Journal”、Vol. 27、No. 1、pp.151-158、1990
- 6) 鈴木康嗣、時松孝次、實松俊明、「日本建築学会構造系論文集」、第566号、pp.73-80、2003
- 7) 地盤工学会、「地盤調査法」、p.239、1995

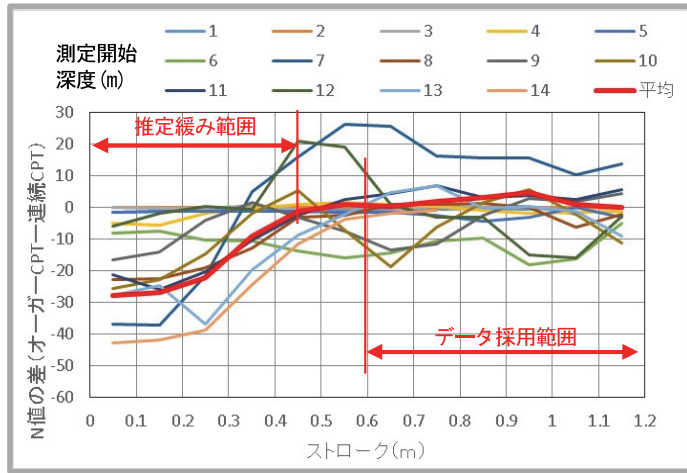


図-8 貫入ストロークと
N値の差（オーガーCPT-連続CPT）の関係

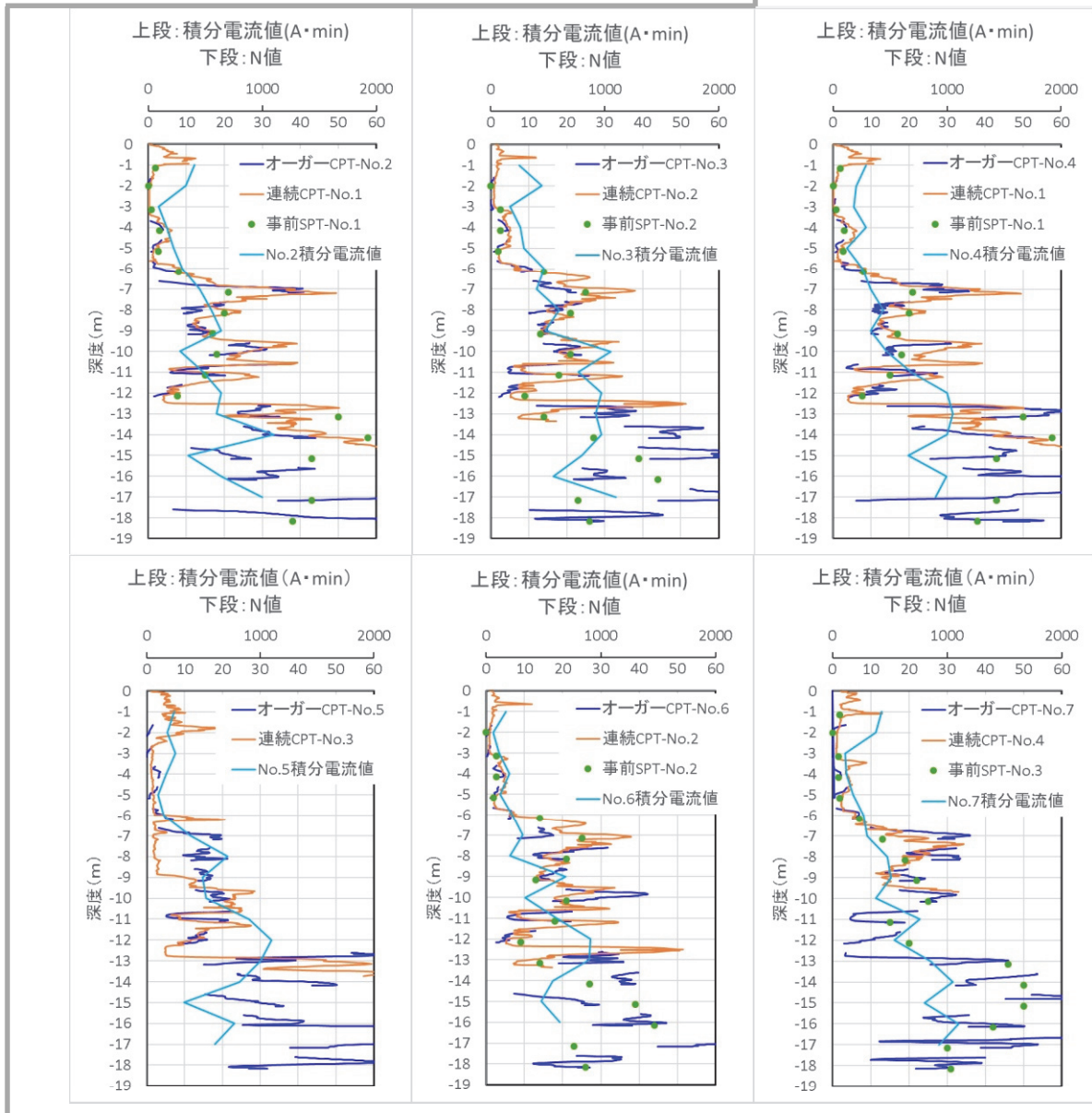
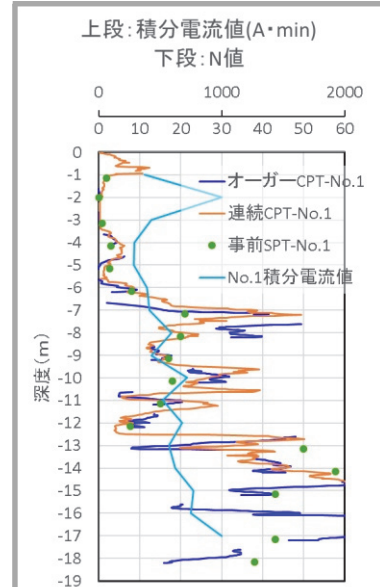


図-9 N値・積分電流値の深度分布