U.D.C 624.154.5

オールケーシング工法による場所打ち杭の支持層判定システムの開発

鎌田　美佳*　　鈴木　　一*　　小笠原広志*

要　約：　基礎杭の施工管理では，杭先端を確実に支持層に到達させることが重要であり，場所打ちコンクリート杭（オールケーシング工法）における支持層確認方法は掘削土砂の目視により支持層を判断するが，土質が同じであっても深度によってＮ値が異なる場合，支持層の判断が困難である。本研究ではオールケーシング工法を対象に，掘削速度，掘削時間および掘削抵抗（回転圧，押込圧）の施工データを分析し，これらを考慮した支持層判定指標を定め，妥当性を確認した。また，本指標を用いた支持層判定を支援する機能ならびに支持層分布を３次元で表示する機能を有するシステムを開発した。

ｷｰﾜｰﾄﾞ：　場所打ちコンクリート杭，オールケーシング工法，支持層判定システム

目　次：

1. はじめに
2. 支持層判定支援ツールの構築
3. 支持層 3D コンタ表示ツールの構築
4. おわりに

1. はじめに

場所打ちコンクリート杭（以下，「場所打ち杭」と称す）の内，オールケーシング工法における支持層確認の標準的管理方法は，ハンマグラブにより掘削した土の土質及び出現深度について設計図書及び土質調査試料（ボーリング柱状図）を比較して掘削土砂と土質調査試料との照合により支持層の確認を行うが，土質が同じ層でもＮ値が異なる場合など，掘削した土の視覚や触覚だけでは支持層到達の判断が困難な場合がある。

支持層の判断が困難な場合，掘削深度や掘削速度，押込み力，トルク値などの施工データを測定して掘削抵抗の変化状況や掘削土の状況から支持層判定の指標を定める方法など，地盤抵抗を定量的に捉え，力学的にも説明可能な方法を用いることが望ましい[1)]。

オールケーシング工法では施工に用いる全周回転機から掘削深度，掘削速度，押込み力，トルク値等の施工データを表示・記録し，積算トルク値等から掘削抵抗の変化状況を土質データ（Ｎ値）と対比させて表示する機能を有した施工管理装置が近年開発されており[2)]，目視による従来の支持層管理に比べ作業の効率化及び記録を残すことによる信頼性向上等の利点がある。しかし，既往の施工管理装置の適用条件となる押込み力一定の施工は機械負荷を調整しながらの施工状況を考慮すると実質困難である。

本研究では，オールケーシング工法の施工・品質管理を行うため，全周回転機から取得できる掘削速度（時間），掘削抵抗（回転圧，押込圧）等の施工データを分析し，各パラメータを考慮した支持層評価方法の検討を行った。実施工で収集した施工データを用いて感度分析を実施し，分析結果をもとに支持層判定の指標を定めた。設定した判定指標をもとに，全周回転機からのデータを収集・演算してリアルタイムに視覚化するシステムを開発した。また施工途中の支持層傾斜の傾向把握と支持層への着底管理状況や支持層分布をデータで残すことを目的とした，3D コンタ表示で支持層を可視化する機能をシステムに追加した。

2. 支持層判定支援ツールの構築

2.1　開発技術の概要

支持層判定支援ツールは，掘削時間，掘削深度，回転圧，押込圧のデータを集積し，後述する支持層判定指標「エネルギー値」とＮ値との相関を表示し支持層推定に資するシステムである。

全周回転機にレーザー距離計を取付け，掘削深度を測定する（写真 1）。全周回転機操作盤に電圧変換器を接続し，施工中の回転圧，押込圧を取得する（写真 2）。

写真 1　レーザー距離計による掘削深度測定

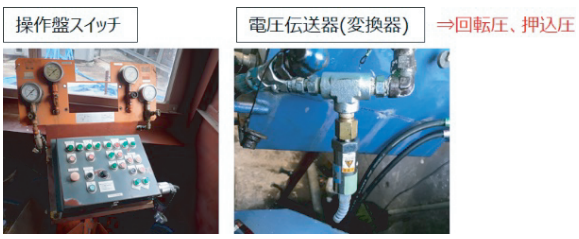


写真 2　操作盤・電圧変換器

＊土木事業本部　技術統括部　技術推進部　技術企画グループ

2.2　支持層判定指標の設定

実施工で収集したデータについて感度分析（重回帰分析）を実施し，支持層判定を評価するため，目的変数（N値，周面摩擦力，基礎支持力）と説明変数（圧入時間，圧入速度，回転圧，押込圧）の相関性，各データ（説明変数）の影響度合いを整理した。

N値は当該構造物設計図書より設定した。周面摩擦力（周面支持力），基礎支持力（先端支持力）は「鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物」における基準支持力の推定式に準じて当該構造物の設計計算書をもとに算出した。説明変数となる圧入時間，圧入速度，回転圧，押込圧は，実施工で全周回転機から取得した施工データを使用した。

2.2.1　分析対象

感度分析（重回帰分析）は施工した場所打ち杭（オールケーシング）の内，施工データを取得した3構造物（高架橋）の杭9本を対象とした。杭径，杭長を表1に示す。

2.2.2　分析条件

目的変数（y）と説明変数（x1，x2，x3）の組合せを表1に示す。N値に影響する要素として，圧入時間，圧入速度を考慮するほか，機械からの取得データのうち回転圧は周面摩擦力，押込圧は基礎支持力とそれぞれ相関があると仮定し，目的変数（y）はN値，周面摩擦力，基礎支持力の3ケースを設定した。説明変数（x1，x2，x3）は①(圧入時間，回転圧，押込圧）と②(圧入速度，回転圧，押込圧）の2ケースを設定した。

掘削完了までの杭施工データを取得した9本について，それぞれ上述の目的変数3ケース×説明変数2ケースの計6ケースで感度分析（重回帰分析）を実施した。

2.2.3　分析結果

表1に杭9本の感度分析case1～6の結果を示す。表2に構造物3No3におけるcase5（y：基礎支持力，x1，x2，x3：圧入時間，回転圧，押込圧）の分析結果として回帰統計，分散分析表，近似式の一例を示す。また，図1に設計上のN値，周面摩擦力，基礎支持力と重回帰分析case1～6で得られた各目的変数（N値，周面摩擦力，基礎支持力）の近似値の関係図を示す。

表1，表2，図1に示す感度分析の結果，case1，3，5に見られるように，重決定（決定係数）が多くの場合で0.50を上回っておりN値や周面摩擦力，基礎支持力は見かけ上，圧入時間との相関性が高い結果となった。回転圧と周面摩擦力および押込圧と基礎支持力の相関は見受けられなかった。

一方，施工業者（専業者）への追加ヒアリングにおいて，支持層到達時など地盤が固くなった場合には，オペレ

表1　感度分析（重回帰分析）条件・結果一覧

	No.	杭径 (mm)	杭長 (m)	目的変数	y	case1 N値	case2 N値	case3 周面摩擦力	case4 周面摩擦力	case5 基礎支持力	case6 基礎支持力
				説明変数	x1	圧入時間	圧入速度	圧入時間	圧入速度	圧入時間	圧入速度
					x2	回転圧	回転圧	回転圧	回転圧	回転圧	回転圧
					x3	押込圧	押込圧	押込圧	押込圧	押込圧	押込圧
構造物1	1	2000	35.5	重決定 (決定係数)	R2	0.710	0.271	0.725	0.287	0.775	0.298
	4					0.301	0.024	0.698	0.195	0.627	0.032
構造物2	1	1800	34.0			0.766	0.564	0.917	0.484	0.675	0.461
	5					0.784	0.280	0.896	0.253	0.678	0.250
	6					0.721	0.278	0.957	0.253	0.494	0.213
	9					0.782	0.408	0.768	0.318	0.754	0.386
構造物3	3	1500	30.5			0.786	0.404	0.971	0.393	0.901	0.421
	5		29.0			0.673	0.312	0.964	0.282	0.816	0.322
	7		26.0			0.820	0.227	0.911	0.268	0.884	0.248

表2　感度分析結果（構造物3No3，case5）
回帰統計（左上），分散分析表（右上），近似式（下）

y_基礎支持力

回帰統計	
重相関 R	0.95
重決定 R2	0.90
補正 R2	0.90
標準誤差	3356.62
観測数	12978.00

分散分析表

	自由度	変動	分散	観測された分散比	有意 F
回帰	3	1.33E+12	4.42E+11	39265.88	0
残差	12974	1.46E+11	1.13E+07		
合計	12977	1.47E+12			

	係数	標準誤差	t	P-値	下限 95%	上限 95%
切片	-1147.63	105.41	-10.89	1.75E-27	-1354.25	-941.00
X 値 1	180.67	0.54	332.83	0.00E+00	179.60	181.73
X 値 2	-1778.77	312.80	-5.69	1.32E-08	-2391.90	-1165.63
X 値 3	-7630.38	203.78	-37.44	1.76E-291	-8029.82	-7230.95

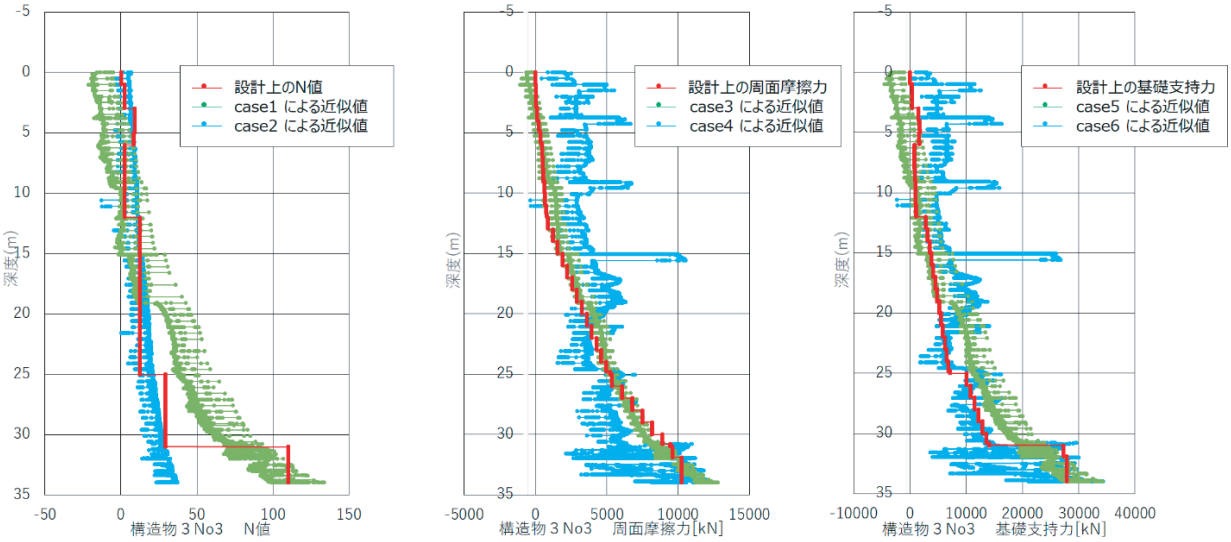


図1　設計上のN値，周面摩擦力，基礎支持力と
重回帰分析で得られた各目的変数（N値，周面摩擦力，基礎支持力）の近似値の関係図

ータは機械への負荷の増大（回転圧や押込圧の大幅な上昇）を避けるため，掘削中に押込の ON/OFF を適宜調整し，負荷を抑えながら調整に応じた圧入時間を要していることが分かった。したがって，回転圧・押込圧の数値には機械負荷を調整するオペレータの判断が影響すること，また圧入時間には調整時に発生する掘削も圧入もしないケーシングの空回し時間が含まれることなどから，各パラメータ単体での支持層判定は困難と考えた。

以上を踏まえ，支持層の判定にはある単位時間内（①圧入時間）にどれだけのエネルギー（②回転圧や③押込圧）を使ったかという仕事量の考え方に基づいて，下式に示す①圧入時間，②回転圧，③押込圧の関数となる「エネルギー値」という指標を用いることとした。なお，係数は現場で実際に使用する機械ごとにキャリブレーションを行い設定する。

エネルギー値＝回転圧×押込圧×圧入時間×係数

上式に実施工のデータを使用しエネルギー値を算出，反映したグラフを図 2 に示す。同図の深度 35 m 付近の N 値およびエネルギー値に着目すると，N 値およびエネルギー値がともに急増する傾向が認められた。したがってエネルギー値を用いた支持層判定方法は妥当であるといえる。

2.2.4　支持層判定の方法

上述した支持層判定を確認するためのエネルギー値は，杭の諸元（杭径，杭長），支持地盤等の現場条件が異なれば変動する。現場で実際に使用し支持層判定を行う際には，構造物ごとに 1 本目の試験杭でシステムの初期設定のためにキャリブレーションを行い，閾値となるエネルギー値を設定する必要がある。試験杭の施工で当該箇所の土質柱状図とエネルギー値の相関を確認後，閾値を設定し，同一条件の杭施工において支持層判定の評価に使用する。

2.3　システム構成

全周回転機の各種施工データ（圧入時間，回転圧，押込圧，バンド締付 ON/OFF，上昇・下降 ON/OFF，ケーシングストローク（レーザー距離計データ））を取得し，①圧入時間，②回転圧，③押込圧の関数となる「エネルギー値」という指標により，支持層判定を行うツールのプログラムを構築した。

支持層判定支援ツールの関連機器及びシステム構成を図 3 に示す。全周回転機の各種施工データは操作盤（写真 2・左）から支持層判定支援ツールに取り込む。操作盤の各スイッチ（回転・下降（押込）・バンド締付）の ON/OFF による油圧電圧値を取得する。全周回転機の操作盤操作項目と対応する測定項目を表 3 に示す。

掘削深度は全周回転機ジャッキ下部に取付けたレーザー距離計から取得するが，バンド締付が ON の時即ちケーシング把持している間に限りレーザー距離計の変動値を積算する。バンド締付が OFF から ON に切り替わった時点での距離値を基準に，その数値が縮まれば下降，伸びれば上昇とする。圧入時間はバンド締付が ON 且つ，回転もしくは押込の出力がある時間を積算する。この掘削深度に応じて，各種施工データをグラフ表示し支持層判定を行う（図 2）。

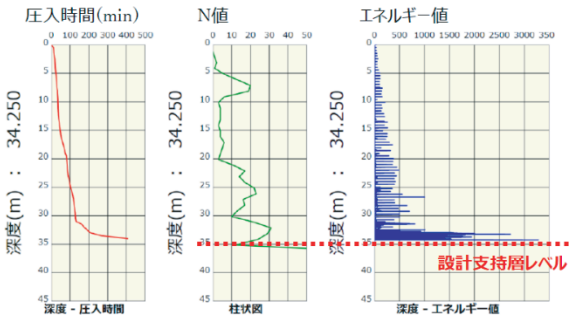
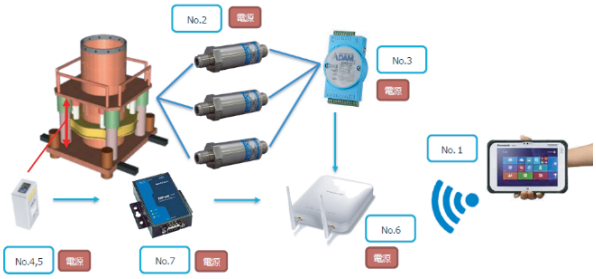


図 2　エネルギー値グラフ（実施工データを反映）



No.	機器	備考
1	表示端末	Windows10
2	電圧伝送型圧力伝送器	3 セット(回転、下降、バンド締付)
3	アナログデジタル変換器(電圧)	1 セット(最大 8 チャンネル)
4	レーザー距離計	
5	レーザー距離計設置治具	
6	無線アクセスポイント	有線での実施も可
7	シリアル-LAN 変換器	No.4 と No.6 を接続
8	LAN ケーブル	2 本(No.3、No.7)

図 3　支持層判定支援ツール 関連機器システム構成
（ハードウェア・ソフトウェア）

表 3　全周回転機の操作・測定項目

全周回転機での操作盤操作項目		測定項目
回転(正回転) ：ON/OFF	ON時、 各種データ取得	モータ正転圧力(Mpa) ⇒回転圧データ取得
上昇 ：ON/OFF	バンド締付ON,上昇ON 時 ケーシングストローク(上)取得	スラスタ上昇圧力(Mpa) ⇒押込圧データ取得
下降 ：ON/OFF	バンド締付ON,下降ON 時 ケーシングストローク(下)取得	スラスタ下降圧力(Mpa) ⇒引抜圧データ取得
バンド締付圧力 ：ON/OFF	ON時(ケーシング把持)、 各種データ取得	バンド締付圧力(Mpa)

3.　支持層 3D コンタ表示ツールの構築

施工途中の支持層傾斜の傾向把握と支持層への着底管理状況や支持層分布をデータで残すことを目的とし，支持層判定支援ツールに支持層を 3D コンタ表示する機能を追加した。

コンタ表示で支持層 3D モデリングに用いた手法は，TIN（triangulated irregular network，地形を不規則な三角網の集合体として表現）の作成にも用いられるドロネー分割を使用し，支持層の面情報を構築する。さらに，構築された面情報にスプライン曲線を使用して等高線を描画す

る手法を用いた。ドロネー分割の概要図を図 4 に示す。

まず，既存ボーリングの支持層位置（X，Y，Z 座標）にて設計支持層面を生成しておき，その後，杭施工時の支持層確認位置（X，Y，Z 標高）と設計支持層面の情報を基に，上述したドロネー分割手法により，支持層 3D モデリングを再生成する。杭打設が進むに従い，支持層データが増えるので，その都度システム内で支持層表示を更新していき，施工途中の支持層傾斜の傾向や支持層分布を把握する。

支持層 3D コンタの表示方法の例を図 5 に示す。設計支持層面を初期値として面を構築する。あらかじめ施工する杭の X，Y 座標と支持層の深度 Z を登録しておき，施工が進み実際の支持層に着底後，杭情報と初期値の面から周囲の支持層面（標高）を自動計算する。算出された標高値をもとにメッシュの色，数値を更新する。

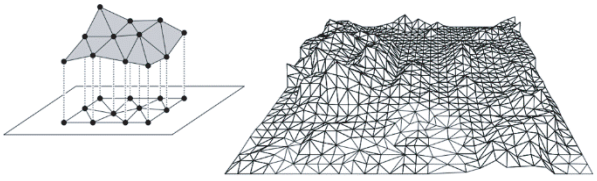


図 4　支持層 3D モデリング（ドロネー分割）概要図[3)]

5. おわりに

本研究では，オールケーシング工法による場所打ち杭を対象として実施工で収集した施工データを分析し，分析結果をもとに支持層判定の指標を定めた。全周回転機からのデータを収集，演算して設定した判定指標を表示しリアルタイムに視覚化する，支持層判定支援システムを開発した。

今後はより多くの施工データの収集を重ね，システムの有効性を検証していく。また支持層判定だけでなく周面支持を含めた杭の支持力評価について検証するため，必要なデータの収集・分析を継続する。

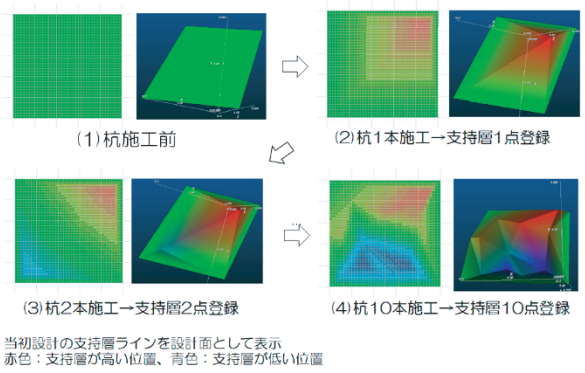


図 5　支持層 3D コンタの表示方法（例）

謝　辞

本システムは，計測ネットサービス株式会社と共同研究により開発したものである。ここに感謝の意を表する。

参考文献

1）一社）日本基礎建設協会：場所打ちコンクリート杭施工指針・同解説 オールケーシング工法（土木），pp. 14, 2020.10
2）公社）日本道路協会：杭基礎施工便覧，pp. 313-314, 2020.9
3）Mark de Berg・Otfried Cheong 他 2 名：Computational Geometry : Algorithms and Applications, pp. 191-192, 2008.3

DEVELOPMENT OF SUPPORT LAYER DETERMINATION SYSTEM FOR CAST-IN-PLACE PILES USING THE ALL-CASING METHOD

M. Kamada, H. Suzuki and H. Ogasawara

In the construction management of foundation piles, it is important to reliably reach the support layer at the tip of the pile, and the support layer confirmation method in the place-poured concrete pile construction method（all-casing method）determines the support layer by visual inspection of the excavated sediment, but even if the soil quality is the same, If the N value differs depending on the depth, it is difficult to judge the support layer. In this study, we analyzed the construction data of the drilling speed, drilling time, and drilling resistance（rotational pressure, pressing pressure）for the all-casing method, determined the support layer determination index considering these, and confirmed the validity. In addition, a system having a function to support the determination of the support layer using this index and a function to display the support layer distribution in three dimensions has been developed.