場所打ち杭施工時の支持層確認手法に関する技術開発
Technical Development of Method for Confirmation of Bearing Stratum during Construction of Cast-in-place Concrete pile

熊田　健太*　　新井　寿昭**
Kenta Kumada　　Toshiaki Arai

要　約

場所打ちコンクリート杭工事のアースドリル工法における支持層への到達確認は，施工時の掘削土を事前の地盤調査時に採取した土質試料と目視により比較する方法が行われているが，全ての杭位置で土質試料が揃っていることは稀であり，地盤条件によっては現場技術者が支持層到達を見誤るリスクも存在する．そこで，従来の目視で比較する方法に加え，アースドリル工法の掘削機の振動変化に着目した支持層到達の新たな判断指標について検討した．また，現場技術者が支持層到達状況をリアルタイムにモニタリングすることが可能な管理システムを開発した．

目　次
§1．はじめに
§2．支持層確認手法の概要
§3．支持層到達管理システムの開発
§4．まとめ

§1．はじめに

杭工事において，建築物を安定的に地盤で支持するため「支持層への到達確認」は最も重要な管理項目といえる．過去には，支持層未到達が要因で供用期間中の建物が傾斜した事例があり社会問題となった[例えば1)]．現時点で傾斜や沈下が生じていない建物であっても，今後発生が予想される大規模地震によって支持層への未到達が要因の被害が顕在化する可能性がある．

国土交通省は，支持層未到達が要因とされる上述の社会問題を受け，2016年3月に告示468号を発し，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を示した．告示の対象は既製コンクリート杭工事であるが，場所打ちコンクリート杭工事も課題は共通しており，特に出来形を直接確認することができない場所打ちコンクリート杭工事において信頼性の高い杭を実現するためには施工品質管理は重要である．

日本建築学会のJASS4（杭および基礎工事）[2)]には，場所打ちコンクリート杭工事におけるアースドリル工法の支持層確認方法は，目視により掘削土を地盤調査試料と比較することを主とすることが記載されている．目視による確認方法は，事前の地盤調査本数が限られている場合には調査位置と全ての杭位置での土質の対応が確認できていないことや，支持層と支持層上部の土質（色調や粒度）が同じで地盤のN値だけが異なるような地層構成の場合には，現場技術者が支持層への到達を見誤るリスクも存在する．

JASS4では目視以外の方法として，支持層と想定される地盤での掘削機の振動変化を参考とすることも記載されている．しかし，既製コンクリート杭工事では，支持層到達前後での杭打機の振動の変化に着目し，振動計による測定結果と土質やN値との対応を分析した研究開発[3,4)]はあるが，アースドリル工法の掘削機の振動測定事例は見当たらない．そこで，従来の掘削土を地盤調査試料と目視で対比する確認方法に加え，アースドリル工法の掘削機の振動変化に着目した支持層到達の新たな判断指標を提案した．

また，実際の施工管理では現場技術者がリアルタイムに支持層到達状況のモニタリングが可能な管理システムが必要となる．既製コンクリート杭工事では，既にこのような管理システムが先行して開発され，広く普及しているが，場所打ちコンクリート杭のアースドリル工法では同様の管理システムは見当たらない．そのため，本報の提案指標を実装したアースドリル工法の支持層到達管理システムを開発したので，その内容について説明する．

§2．支持層確認手法の概要

掘削機の振動変化に着目した支持層への到達確認の新たな指標を検討するため，場所打ち杭（アースドリル工法）の現場において，軸部掘削中の掘削機の加速度計測

* 技術研究所建築技術グループ
** 技術研究所

を行い，この結果に基づいて支持層の判断指標を検討した．

2—1　現場計測

⑴　計測項目および計測方法

表—1 に計測に使用した加速度センサーの概要を，**図—1** に計測機器の設置位置を示す．計測項目は，掘削機本体の加速度と掘削深度である．掘削機の運転室内のモニターには掘削深度や回転トルク等の情報が表示されているが，デジタル値として出力・記録を行うことができない．そこで，今回の計測では実際の運用を見据えて，設置が比較的簡易な外付けの計測機器を採用した．

加速度センサーはケーブル配線による設置手間や掘削機の旋回に伴うケーブルの断線を懸念し，ワイヤレスでデータ取得可能な MEMS 式センサーを用いた（**写真—1**）．設置位置は**図—1** に示すように，掘削機本体側面の前方と後方とし，サンプリング周波数は 1024 Hz である．

掘削深度は，運転室内のモニターに表示されている数値を小型カメラで撮影し別途読み取った（**写真—2**）．

⑵　計測現場

表—2 に計測現場の概要を示す．同表，Site-A，Site-B は関東地方の現場であり，支持層の直上に N 値が小さい地層が厚く堆積する地層構成の地盤条件である．Site-C，Site-D は関西地方の現場であり，地層構成が複雑で中間に N 値が大きな層を有する地盤条件である．検討対象は，比較的近傍にて標準貫入試験が行われている杭で，杭径は ϕ1.2 m と ϕ2.0 m，掘削長さは GL-28～51.5 m である．杭先端支持層は N 値 50 以上であった．

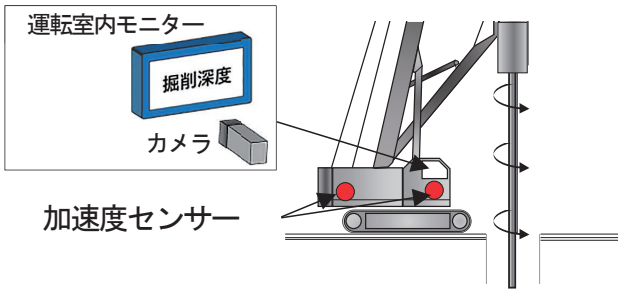
2—2　検討方法

杭工事において，掘削機のオペレータが支持層への到達前後で掘削機本体の振動の変化を感じることは知られている．アースドリル工法の掘削機の車両後部には，作業中の機体を安定させるためのカウンターウエイトが取り付けられており，掘削機本体が剛体として回転運動すると仮定した場合，掘削中は鉛直方向の振動が卓越すると考えた．以下にこの振動の数値化の方法を示す．

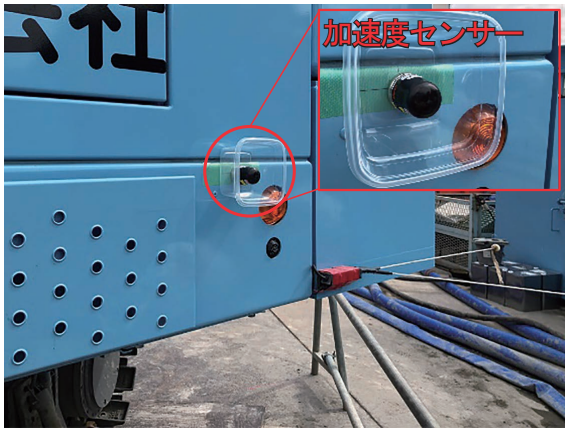
図—2 に角加速度の算出方法を示す．ここでは，回転中心を掘削機本体の中心と仮定し，掘削機の前方と後方の加速度センサーで取得した鉛直成分の加速度値 α_F，α_R およびセンサー間の距離 L に基づき式⑴による角加速度の時刻歴を求めた．次に，角加速度波形の二乗平均平方根である式⑵を支持層判断指標として定義し，軸部掘削中の算出結果を深度方向に整理した．ここで，アースドリル工法の掘削機は一定の速度で掘削することができないため，式⑵では，角加速度波形の二乗平均平方根をとった値を単位時間当たりの掘削深さで規準化した．

表—1　加速度センサーの概要

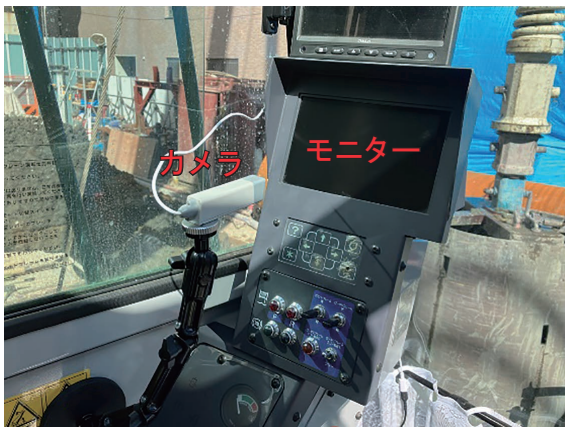
センサー	測定範囲	加速度帯域	備考
MEMS 式加速度センサー	±8 G	DC～1 kHz	ワイヤレス通信



図—1　計測機器の設置



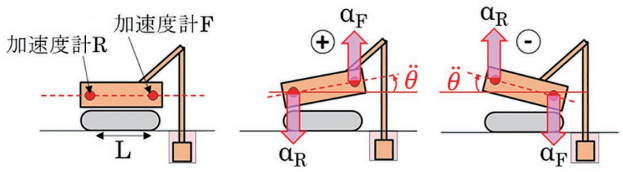
写真—1　加速度センサーの設置状況



写真—2　運転室モニター前のカメラ設置状況

表—2　計測現場と計測杭の一覧

Site	都道府県	杭軸部径	掘削長	杭先端支持層	
				土質区分	層上端深度
A	神奈川	ϕ2000	GL-41 m	泥岩	GL-36.6 m
B	東京	ϕ1200	GL-28 m	砂礫	GL-27.5 m
C	香川	ϕ2000	GL-51.5 m	シルト質砂礫	GL-50.8 m
D	大阪	ϕ2000	GL-42 m	砂	GL-39.3 m



図―2　角加速度の算出方法

$$\ddot{\theta}(t_i) = (\alpha_F - \alpha_R)/L \tag{1}$$

$$RMS[\ddot{\theta}]/d = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\{\ddot{\theta}(t_i)\}^2}/d \tag{2}$$

ここに，$\ddot{\theta}(t_i)$　：角加速度 [rad/s^2]
α_F, α_R：加速度鉛直成分 [cm/s^2]
L　　：加速度センサー間の距離 [cm]
n　　：計測データ数（ここでは 1024）
d　　：単位時間当たりの掘削深さ [cm]

2―3　検討結果

図―3 に**表―2** の各現場における地盤調査結果（土質，N 値）と式(2)で算出した支持層判断指標の比較を示す．

Site-A は，N 値が小さな粘性土が表層に堆積しており，支持層は GL-36.6 m 以深の泥岩層である．計測は GL-13 m から開始した．式(2)で算出される指標（以降，指標値）は，表層地盤ではほぼ一定に推移し，N 値の増加に伴って，指標も増加する傾向が認められた．特に泥岩層では上部の層に比べて指標のばらつきが大きいことが特徴として挙げられる．

Site-B は，N 値の小さな層が厚く堆積しており，支持層は GL-27.5 m 以深の砂礫層である．計測は GL-17 m から開始した．指標値は GL-27.5 m の礫層に入ると大きくなり全体的に N 値の深度分布と対応している．

Site-C は，地層構成が複雑な地盤であり，支持層は GL-50.8 m のシルト質砂礫層である．指標値は，N 値の深度方向の変化と概ね対応しているが，GL-30 m 程度で N 値が大きく変化しているのに対して，指標値の変化はそれほど大きくない．なお，指標値は，支持層付近の GL-50 m 程度で N 値・土質の変化に対応している．

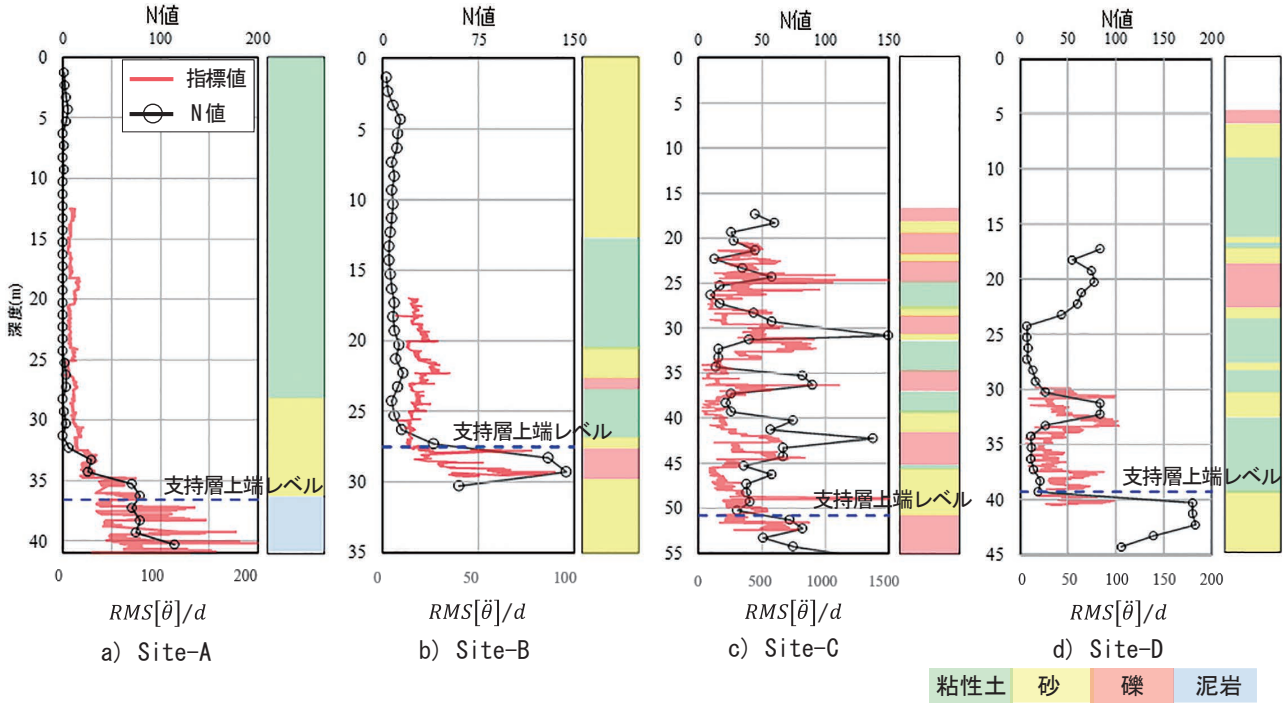
Site-D は，地層構成が複雑な地盤であり，支持層上端の深度は，GL-39.3 m の砂層である．ただし，GL-30 m から計測を開始し，計測システムの不具合のため GL-41 m で計測が停止しており，支持層付近の比較ができない．指標値は，GL-30 m 以深の砂層で大きい値を示すが，砂層下部のシルト層へ入ると値が小さくなり N 値の分布と対応している．

以上より，本章で提案した指標は，N 値の変化に概ね対応しており，従来の目視により対比する確認方法に加えて，支持層への到達確認に適用できる可能性を示した．ただし，指標値は，掘削機本体の深さ方向の相対的な変化に着目したものであり，標準貫入試験の N 値と一義的な関係を有するものではないことに注意が必要である．

§3.　支持層到達管理システムの開発

3―1　開発目的

前章で示した計測方法では，加速度データと掘削深度をそれぞれ別の記録媒体に保存し，掘削終了後に別途事務所でデータ整理を行っていた．実際の施工管理では，現場技術者がリアルタイムに支持層への到達確認を行う必



図―3　支持層判断指標と土質及び N 値との比較

要があるため，加速度データと掘削深度の取得からグラフ化までを自動化し，従来の掘削工程を妨げることなく，現場技術者が支持層への到達確認を行える管理システムを開発した．

3—2　掘削深度の取得

(1)　掘削深度の取得方法

アースドリル工法の掘削機では，掘削深度をクレーン滑車部のロータリーエンコーダーにより測定し，その結果を運転室内のモニターに表示している．本管理システムでは，掘削機から掘削深度のデジタルデータを直接出力し利用することも検討したが，デジタルデータを出力可能な掘削機の車種は限定的であり，汎用性を有する管理システムとするには，外付けの計測機器を用いてデジタルデータを取得する必要があった．

そこで，運転室内のモニターをカメラで連続撮影して，画像処理（OCR）によりデジタルデータの取得を試みた．

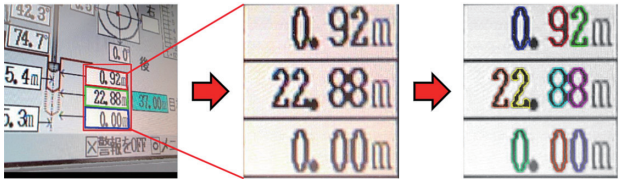
(2)　画像処理（OCR）の現場試行

稼働中の掘削機の環境下でも，運転室モニターに表示された数値を OCR により正確に取得可能か確認するため，実際の環境下でカメラを設置し検証を行った．

図—4 に画像処理状況の一例を，**表—3** に**図—4** の画像処理結果の一例を示す．画像処理ソフトには市販の汎用ソフトを使用した．画像処理（OCR）による文字認識は，撮影画像内で認識したい数値を含む読取り範囲を選択し，抽出した文字形状と事前に読み込ませた文字形状の比較により行われる．稼働中の掘削機は，常に振動しているため，運転室モニターとカメラの相対的な位置関係がずれ，正確に画像処理を行えないことが懸念されたが，実現場での検証の結果（**表—3**），稼働中の掘削機の環境下において運転室モニター内の掘削深度の値を正確に認識できた．

3—3　支持層到達管理システムの概要

図—5 に支持層到達管理システムの概要を示す．本システムは，掘削機の運転室に設置したタブレット PC で

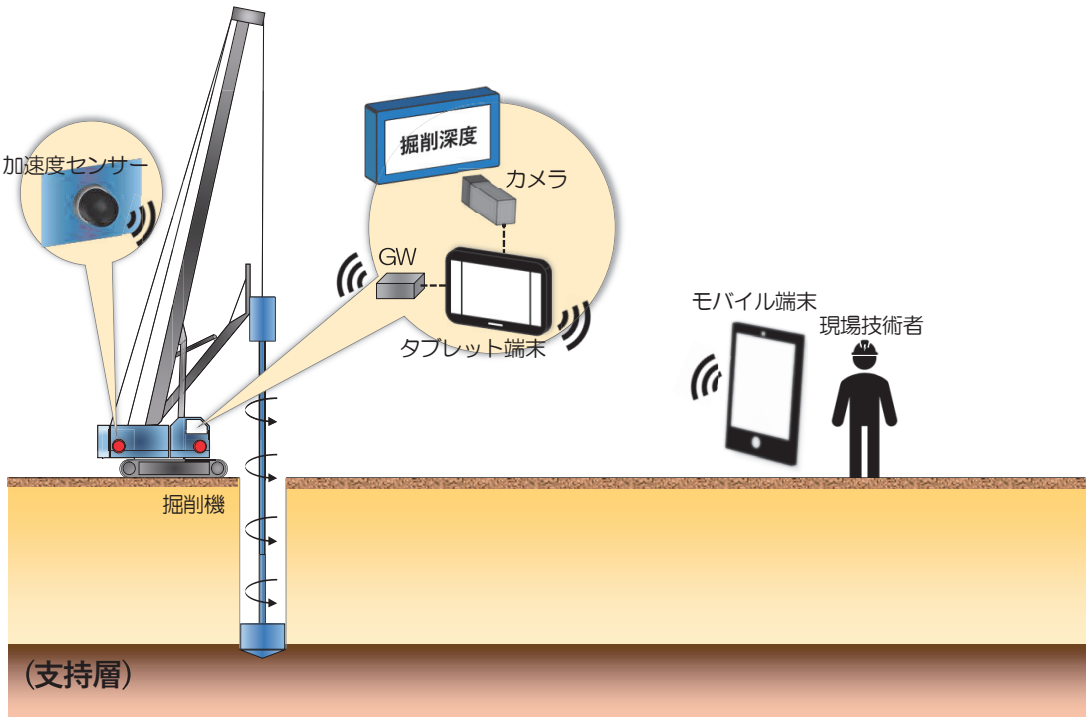


(a)　撮影画像　　(b) 拡大　　(c) OCR 検出

図—4　画像処理状況の一例

表—3　図—4 の画像処理結果の一例

撮影画像の文字	文字認識の精度	検出結果
0	0.99	0.92
9	1.00	
2	0.99	
2	0.99	22.88
2	0.99	
8	0.99	
8	1.00	
0	0.99	0.00
0	1.00	
0	0.99	



図—5　場所打ち杭支持層到達管理システムの概要

加速度センサーおよびカメラを制御し，軸部掘削中のデータを取得することが可能である．加速度値は 1024 Hz，掘削深度は 1 Hz のサンプリング周波数で取得し，タブレット PC 内で式⑵の指標値を自動算出し，当該指標の深度分布をリアルタイムに作成する．現場技術者は各自のモバイル端末からタブレット PC にアクセスすることで，測定結果をリアルタイムにモニタリングすることが可能である．

⑴　事前設定

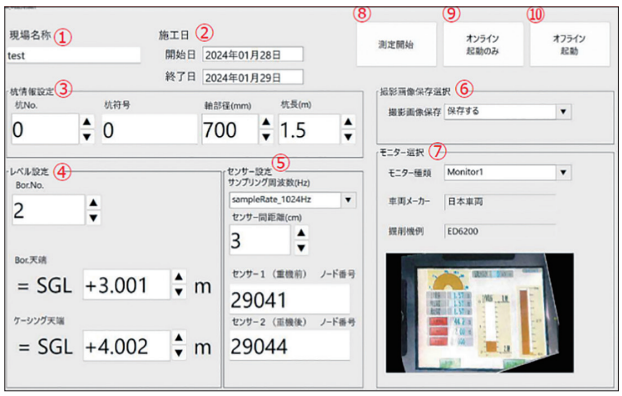
図―6 に事前設定画面を示す．ここでは，杭工事の基本情報として，現場名称，杭情報，深度の基準レベル，センサーの設定を行う．また，画像処理（OCR）の最適な詳細設定を現場で行うことは困難であるため，予めモニターの種類に応じた詳細設定を済ませており，この画面から使用するモニターの選択を行う．

⑵　画像処理（OCR）の設定

図―7 に画像処理（OCR）の設定画面を示す．ここでは，読み取り範囲を設定し，測定開始前に文字認識精度の確認を行う．

⑶　測定結果の表示

図―8 に現場技術者のモバイル端末上に表示される測定結果の一例を示す．測定結果は，約 3 秒ごとに更新され，これまで検尺テープで測定していた掘削深度もリアルタイムに確認することができる．また，備考欄から，施工中の記録を残すことが可能である．



図―6　事前設定画面

図―7　OCR 設定画面

図―8　測定結果の表示例

§4. まとめ

以下に本報のまとめを示す.

⑴ 場所打ちコンクリート杭のアースドリル工法における支持層への到達確認方法として，掘削土と地盤調査時の土質試料を目視で比較する従来の方法に加えて，掘削機の振動変化に着目した新たな判断材料を検討した.

⑵ 掘削機が剛体として回転運動すると仮定して，車両本体の前後に設置した加速度センサーの値から角加速度の時刻歴を求め，その二乗平均平方根を単位時間あたりの掘削深さで規準化した値を支持層判断指標と定義し，標準貫入試験の N 値の深度分布と比較した．4 現場において比較を行った結果，いずれの現場でも深度分布は全体的に対応しており，本報で提案した指標により支持層への到達を判断できる可能性を示した.

⑶ 現場技術者が支持層への到達状況をリアルタイムに確認可能な支持層到達管理システムを開発し，その概要を示した.

今後は，更に場所打ちコンクリート杭工事への適用実績を蓄積し，支持層到達管理システムの更なる信頼性向上を進める予定である.

謝辞．現場計測にご協力頂いた関係各位に謝意を表します.

参考文献

1）国土交通省土地・建設産業局建設業課：横浜市の分譲マンションにおける基礎ぐいに係る問題に関する省内連絡会議（第 1 回）開催について，平成 27 年 10 月 20 日，https://www.mlit.go.jp/common/001107001.pdf,（参照 2024-05-23）

2）日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS4 杭および基礎工事，第 7 版，2022. 3.

3）萩原ら：既製コンクリート杭の支持層到達確認技術の開発（その 1）支持層到達確認支援システムの概要と振動の可視化，日本建築学会大会学術講演梗概集，2020. 9.

4）和知ら：既製コンクリート杭の支持層到達確認技術の開発（その 2）振動可視化の効果，日本建築学会大会学術講演梗概集，2020. 9.