

4. 圧入施工データを利用した圧入機の自動運転と地盤情報の推定

(株)技研製作所

〃

石原 行博

○岡田 浩一

1. 背景

圧入工法は、施工済みの杭／矢板から反力を得ながら新たな杭／矢板を静荷重で地盤に貫入させる施工技術である(図-1)。施工に伴う振動騒音が限定的で、施工に必要なスペースも小さくて済む。近年ではウォータージェット併用圧入やオーガー併用圧入(硬質地盤クリア工法)、先端刃付きの鋼管杭を回転させながら押し込む回転切削圧入(ジャイロプレス工法)といった工法が開発され、硬質な地盤への適用性が大幅に向上している。

国内では近年、労働人口や熟練技術者数の減少を背景として、自動化・省力化によって建設工事の生産性や魅力を向上させることが i-Construction という名のもとに推進されている¹⁾。また、最近の建築基礎杭工事における支持層未到達問題を受け、適切な施工体制の確保・現場立ち合いや施工データの活用を通じた支持層到達確認、施工記録の管理が求められるようになった²⁾。

2. 圧入施工データの利用

圧入工法では一本一本の杭／矢板の施工データを取得可能である。各圧入機には情報端末が取り付けられており(図-2)、施工時の様々なデータが杭一本ごとに電子データとして自動的に記録される。施工時のデータには圧入力、トルク、貫入深度、時間、回転数、機械傾斜などが含まれ、これらを総称して圧入施工データと呼ぶ。圧入施工データはこれまで杭の施工管理記録としてそのまま使用されてきたが、筆者らは、施工データを加工することにより、杭／矢板で構成される構造物の設計や施工の合理性を高める技術の開発に取り組んでいる。圧入施工データの利用技術の概念の一例³⁾を図-3に示す。

1つ目の活用方法の「施工条件の選定」とは、貫入技術(単独圧入、WJ併用圧入、オーガー併用圧入、回転切削圧入)の選定や、各貫入技術における圧入機の運転パラメータ値(圧入速度、引抜速度、回転数、圧入長、引抜長など)の選定のことを指す。圧入機の自動運転技術は、この活用方法の好例である。

2つ目の活用方法の「地盤情報の推定」は、圧入

中の杭／矢板の先端部の地盤に関する情報を推定することを意味する。打止め管理の信頼性の向上や、工法変更(他の貫入技術への変更)や設計変更(杭／矢板の根入れ長の変更)の客観的な判断材料の提供といった効果を期待している。

3つ目の活用方法の「杭／矢板の性能の推定」では、鉛直支持力、剛性、水平抵抗などの杭／矢板の性能を施工データから推定することを想定している。これにより、通常の载荷試験に要する付加的な時間とコストを軽減しつつ全ての杭／矢板の品質を一定のレベルで保証できると考えられる。

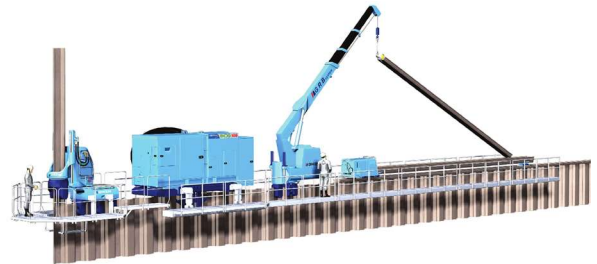


図-1 圧入工法



図-2 圧入機に装備された情報端末

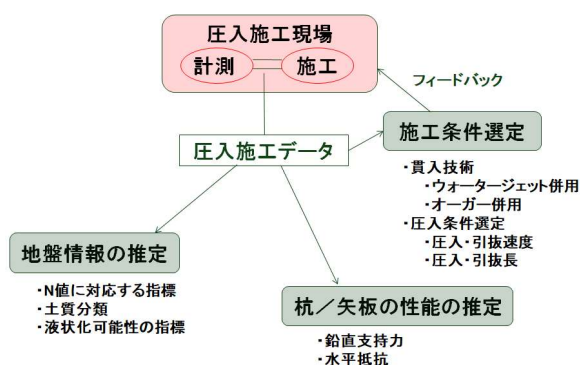


図-3 圧入施工データの利用技術の概念の例

表-1 圧入施工データの利用技術の現時点での適用範囲

	施工条件選定 (自動運転)	地盤情報の 推定	杭/矢板の 性能の推定
単独圧入	—	○	—
WJ併用圧入	—	—	—
オーガー併用圧入	○	○	—
回転切削圧入	△	○	—

筆者らは現場データの収集や実証試験・模型実験の実施などを通じてこれらの方法論の開発を進めてきた。圧入施工データを活用した技術は2017年にNETIS⁴⁾に登録され(登録番号:SK-170006-A)、現在の適用範囲は表-1のようになっている。次節では、圧入施工データの3つの活用方法のうち「施工条件の選定(自動運転技術)」と「地盤情報推定技術」について、最近の実施事例を含めながら報告する。

3. 自動運転と地盤情報推定

3.1 自動運転技術

3.1.1 従来の運転方法

最初に述べた通り、圧入工法は施工済みの杭/矢板から反力を得ながら新たな杭/矢板を静荷重で地盤に貫入させる施工技術である。圧入機の運転では、杭/矢板を貫入させるのに必要な圧入力やトルクが、施工済みの杭/矢板の引抜抵抗力などから得られる反力よりも十分に小さくなるように、運転パラメータの値(押し込み・引抜の距離や速度、ウォータージェットの吐出流量やオーガの回転数など)を管理する。これには一定の技術レベルが必要とされる。

圧入機の自動運転技術は従前から存在していたが、従来の自動運転は、オペレータ自身が設定した運転パラメータの値に従って圧入機が自動的に動作するという運転方法であった。より完全に近い自動運転を実現するためには、圧入機が適切な運

転パラメータ値を自動的に決定するようなシステムが必要であった。

3.1.2 新しい自動運転システムの開発

施工データを活用することにより、運転パラメータの設定自体を自動化した新しい自動運転を開発し得ることに着目し、2007年に本格的なデータ収集を開始した。新しい自動運転では、圧入施工データをもとに地盤条件や施工状態を推定し、それらに応じた適切な運転パラメータ値を逐次自動的に選定し、圧入機にフィードバックする(図-4)。リアルタイムに変化する地盤条件や施工状態に対応するためには、施工時に高い頻度で圧入施工データを分析し、パラメータを更新する必要がある。これを可能にするために、データ処理性能を高めた最新機種を用いて開発を進めた。

圧入工法の4つの貫入技術のうち、まずはオーガー併用圧入を対象として開発を行った。オーガー併用圧入は、N値が50を超えるような硬質地盤を対象とした圧入技術で、オーガーヘッド部で地盤を掘削しながら矢板を圧入する。オーガー併用圧入の場合の主な施工データは、時間、貫入深度、圧入力、トルク、圧入機傾斜、である。これらの施工データから、矢板の先端位置の地盤条件(地盤の場合はN値、岩盤の場合は一軸圧縮強度)や現在の施工状態(鋼矢板の継手部の嵌合状態など)を推定し、これらの推定結果に基づいて適切な運転パラメータ値を選定して、圧入機にフィードバックする。

最近では、新しい自動運転の開発対象を回転切削圧入にも拡大し、現場での試運用を進めている。回転切削圧入では、杭の先端にビットと呼ばれる切削刃を取り付け、鋼管杭を回転させて地盤を切削しながら圧入を行う。



図-4 新しい自動運転のイメージ

3.1.3 実施事例

①オーガー併用圧入

図-5 は、オーガー併用圧入で矢板を施工した際の圧入時間（圧入以外に要した時間を除外した時間）を比較したものである。矢板は III 型鋼矢板、圧入機は F201、オーガーヘッドは外径 330mm・羽根数3のものを使用した。地盤は砂礫で構成され、最大 N 値は 30 程度である。新しい自動運転では、手動運転と比較して所要時間がやや短縮され、平

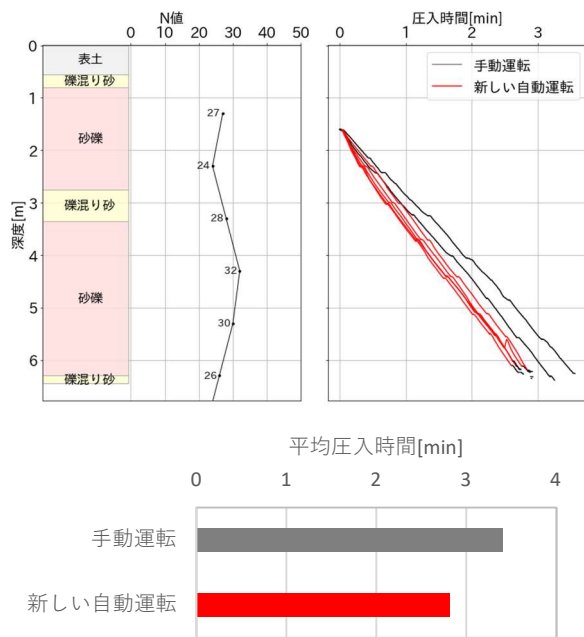


図-5 自動運転方法による圧入時間の違い
(オーガー併用圧入・砂礫地盤)

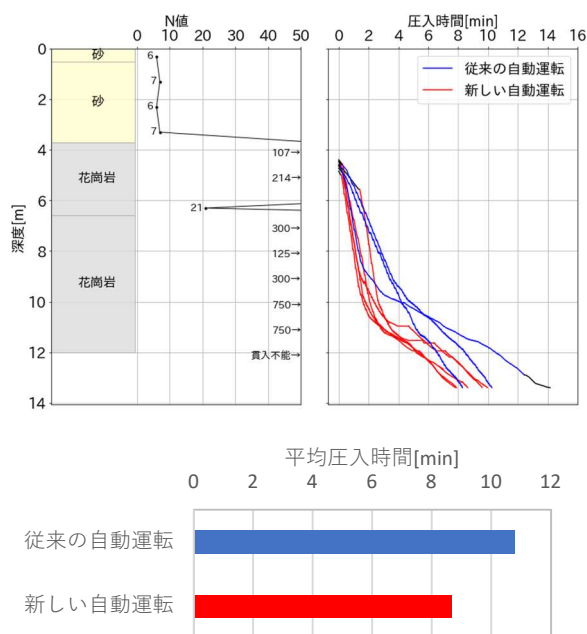


図-6 自動運転方法による圧入時間の違い
(オーガー併用圧入・岩盤)

均値で比較すると 17%の時間短縮となった。なお、表層から 1.6m は手動運転となっているため比較対象から除外した。

図-6 は、オーガー併用圧入で矢板を施工した際の圧入時間を比較したものである。矢板は III 型鋼矢板、圧入機は F201、オーガーヘッドは外径 330mm・羽根数 3 のものを使用した。地盤は主に花崗岩で構成され、最大 N 値は貫入不能である。結果として、従来の自動運転と比較して 20%程度の時間短縮効果を得られた。

これまでの運用を通じて、深度方向に地盤条件の変化が大きい場合ほど、新しい自動運転の効果が大きい(圧入時間が短縮される)ことを確認している。オーガー併用圧入の場合には、たとえば礫・玉石まじりの典型的な地盤条件において、30%程度の時間短縮効果が得られている⁵⁾。

②回転切削圧入

図-7 は、回転切削圧入で杭を施工した際の圧入時間を比較したものである。杭は外径 1000mm・板厚 10mm、圧入機は F401 を使用した。地盤は砂礫で構成され、最大 N 値は 45 である。結果として、従来の自動運転と比較して 35%程度の時間短縮効果を得られた。なお、深度 7m までは障害物を撤去する目的で先行削孔が行われたため、比較の対象外とした。

③今後の課題

本節で紹介した事例では、いずれの場合にも圧入時間が短縮された。他方、地盤条件や現場条件に

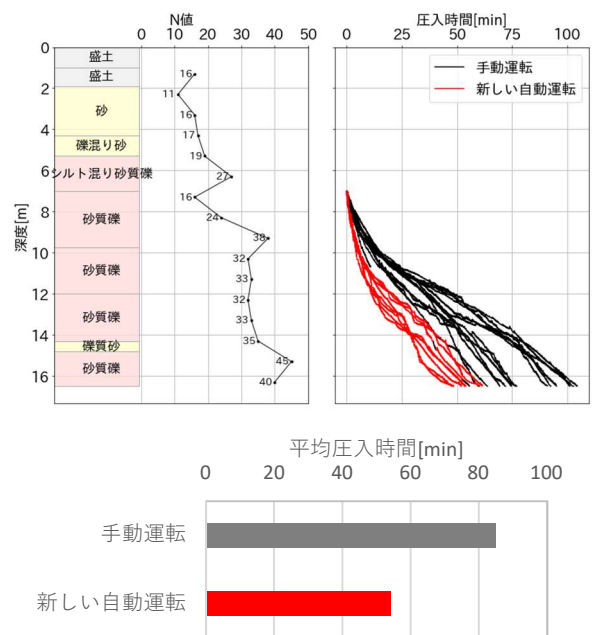


図-7 自動運転方法による圧入時間の違い
(回転切削圧入)

よっては、時間短縮効果が得られないケースや、限定的ではあるが圧入時間が増えるケースも確認されている。新しい自動運転の特徴を踏まえて現時点の適用範囲を見極めながら運用を進めつつ、自動運転プログラムの改良の努力を継続して信頼性のさらなる向上や適用範囲の拡大に取り組むことが、今後の課題である。

3.2 地盤情報推定技術

3.2.1 地盤情報の推定方法

圧入工法では、施工データを全数取得することが可能である。施工データを利用することにより、施工管理や、施工時に想定外の地盤条件に遭遇した際の工法変更の判断を、より合理的・客観的に行うことが可能となると考えられる。筆者らは、圧入施工データの使用方法の一つとして地盤情報推定技術の開発を進めており、単独圧入（通常の圧入）、オーガー併用圧入、回転切削圧入の場合の施工データを用いて地盤情報を推定する方法を構築している。これまでの知見は、国際圧入学会（International Press-in Association, IPA）の技術委員会による評価を受け、技術資料⁶⁾としてとりまとめられている。

通常の圧入（単独圧入）では、杭／矢板は補助工法（ウォータージェットやオーガ）なしで静荷重により地盤に押し込まれる。すなわち、杭／矢板の貫入過程は、地盤調査方法の一つであるCPTのコーンの貫入過程と似ている。この類似性に着目し、寸法や貫入速度の違いを考慮することにより、圧入中の杭の先端抵抗 (Q_b) と周面抵抗 (Q_s) をCPTのコーン指数 (q_c) と周面摩擦 (f_s) の情報に読み替えることが可能である⁷⁾。しかし、施工時に全ての杭に計測装置を取り付けて先端抵抗を計測するのは費用と手間がかかり、非現実的である。そこで、圧入施工時の「打抜」（圧入・引抜きの際の繰返し）と呼ばれる動作を活用することで、杭／矢板に計測装置を取り付けることなく先端抵抗を推定する方法を開発した⁸⁾。この方法では、ある深度を杭／矢板の先端が1回目に通過する際の杭頭荷重と2回目に通過する際の杭頭荷重との差として、杭／矢板の先端抵抗を得る。単独圧入の施工データからN値を推定する流れをまとめると、図-8(a)のようになる。

オーガー併用圧入については、岩盤掘削の分野の知見を参考に、圧入施工データからSPTのN値を推定する2つの方法を構築した⁹⁾。1つ目の方法では、パラメータ $T_b/(d_c)^\gamma$ (T_b はオーガーヘッドに作用するトルク、 d_c は切り込み深さ、 γ は係数) と岩盤の一軸圧縮強度との間の線形関係¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾を活用する。2つ目の方法では、MWD (Measurement While Drilling) と呼ばれる地盤調査方法で用いられている推定方法¹³⁾を活用する。いずれの方法に

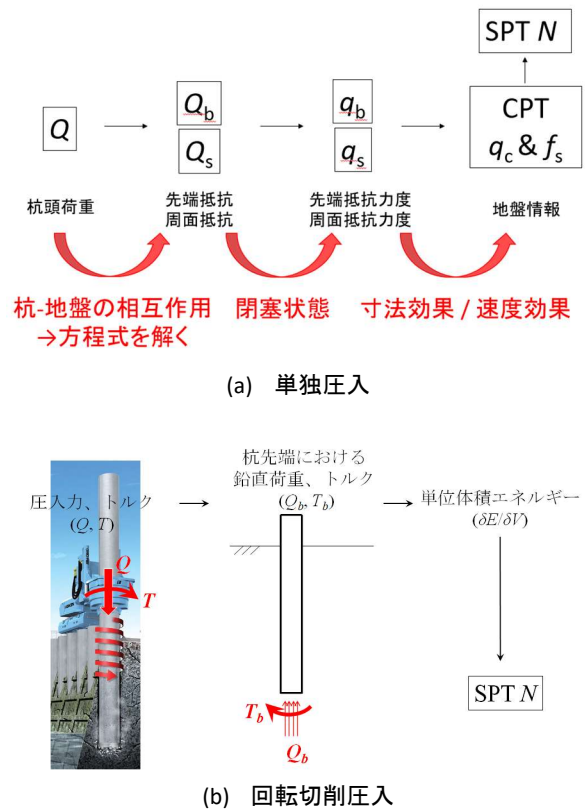


図-8 圧入施工データから地盤情報を推定する流れ

おいても、推定式に含まれている係数の値を、オーガー併用圧入の施工データとSPTのN値とのデータセットを用いて逆解析して得た値に置き換える。

回転切削圧入では、杭先端直下の地盤を体積 δV だけ変形させるのに要するエネルギー δE とSPTのN値との間に線形的な相関があると仮定することにより、施工データからSPTのN値を推定する¹⁴⁾。この仮定は、岩盤掘削における単位体積エネルギー (= $\delta E/\delta V$) と岩盤の一軸圧縮強度との間の線形的な相関性に関する知見¹⁵⁾¹⁶⁾に基づいている。単位体積エネルギーの算出には、杭頭に付与される荷重 (Q) とトルク (T) ではなく杭先端に作用する荷重 (Q_b) とトルク (T_b) の情報が必要となる。 Q_b と T_b を先端抵抗力度 q_b によって表し、かつ、杭の外周面に作用する摩擦力が貫入速度と回転速度との比によって鉛直方向と水平方向に分配される¹⁷⁾ことを考慮すると、 Q と T から Q_b と T_b を推定することができる。回転切削圧入の施工データからN値を推定する流れをまとめると、図-8(b)のようになる。

3.2.2 推定方法の改良

①オーガー併用圧入

前節で述べたように、オーガー併用圧入の場合、推定式に含まれている各係数の値は、施工データとSPT結果のデータセットから逆解析して得られたものである。この場合の施工データは、「外径

450mm・羽根数3」のオーガーヘッドを用いた施工データに限定されていた。結果として、IPA 技術資料⁶⁾では、オーガーヘッドの規格が「外径 450mm・羽根数 3」に限定されている。

地盤推定技術の実用性を高めるためには、この制約を緩めて様々な規格のオーガーヘッドに対応する必要がある。そこで、任意の規格のオーガーヘッドに作用するトルクを図-9 に示すようなモデルで計算し、「外径 450mm・羽根数 3」のオーガーヘッドに作用するトルクに換算することにより、前節で述べた推定式をそのまま適用することを考えた¹⁸⁾。

図-10 は、7 種類のオーガーヘッドを用いた施工データから推定した N 値と SPT で得られた N 値を示したものである。トルクの補正をしない場合（図-10(a)）、推定 N 値は大きくばらつき、大きな外径のオーガーヘッドを用いた場合の推定値が課題となる傾向が確認できる。他方、トルクを補正した場合（図-10(b)）には、推定値のばらつきが抑え

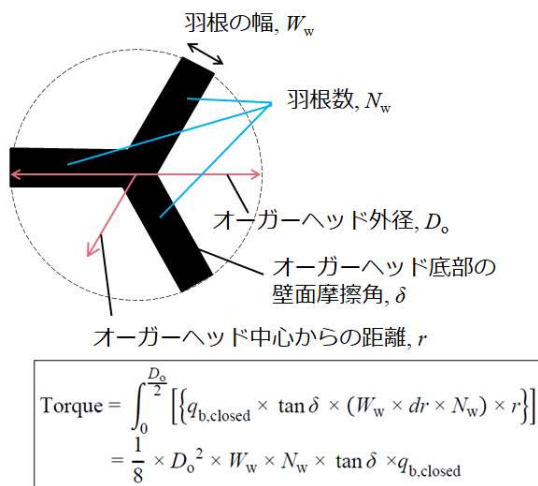


図-9 オーガーヘッドに作用するトルクの計算モデル

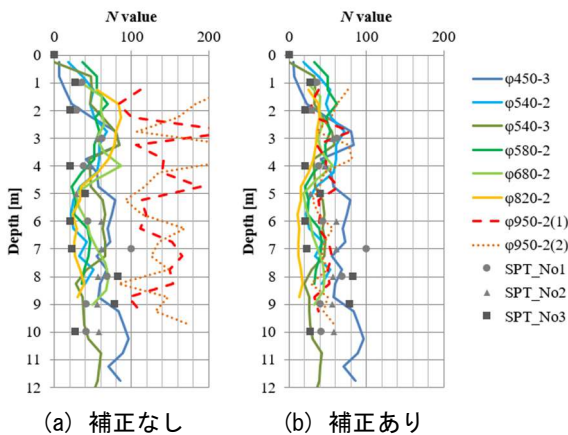


図-10 トルクの補正の有無による推定結果の違い

られていることが分かる。

②回転切削圧入

回転切削圧入の場合、推定 N 値は施工時の閉塞状態の影響を強く受けることが指摘されている⁶⁾。前節で紹介した通り、回転切削圧入の場合には、単位体積エネルギー ($\delta E/\delta V$) を介して SPT の N 値を推定する。 δV は、鋼管の閉塞状態を加味した有効断面積 $A_{b,\text{eff}}$ (次式) に貫入深度増分 dz を乗じて求める。

$$A_{b,\text{eff}} = \frac{\pi D_o^2}{4} - IFR \times \frac{\pi D_i^2}{4} \quad (1)$$

ここで、 D_o および D_i は杭の外径および内径、 IFR は閉塞状態を表す指標で管内土長増分と貫入長増分の比、である。 IFR の把握には管内土長の連続計測が必要となるが、施工時に連続計測が難しい場合には、 IFR のかわりに PLR (施工完了時の管内土長と貫入長の比) を用いることが考えられる。しかしながら、閉塞状態は深度とともに変化するのが一般的であり、例えば図-11 に示すように深度 10m 以深で完全閉塞状態となるような場合、 PLR を用いるとこの深度区間で推定結果が過大となる（図-12）。他方、 IFR を用いると 10m 以深の過大評価傾向は解消されるが、他の深度では深度方向に大きく増減を示すような推定結果となる。この主要因として、式(1)が閉塞状態 (IFR) に対して過剰に敏感であることが考えられる。

閉塞状態を IFR により評価する支持力推定法として、UWA-05 法が知られている。この方法におけ

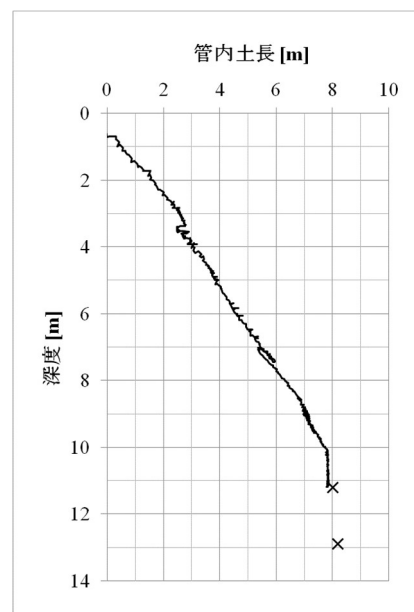


図-11 閉塞状態が急激に変化する事例

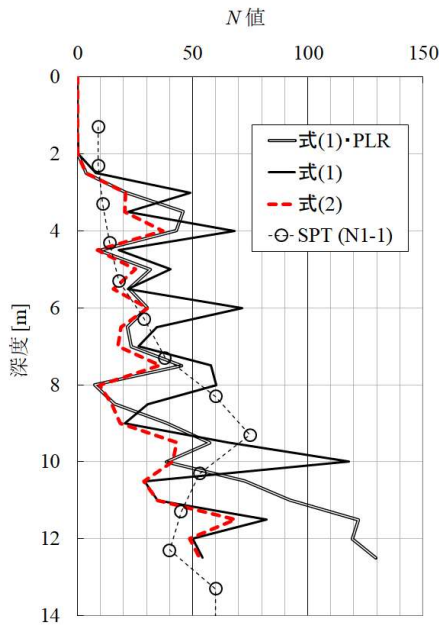


図-12 推定結果に対する $A_{b,eff}$ の影響

る先端支持力推定式を参考にして、 $A_{b,eff}$ を

$$A_{b,eff} = \frac{\frac{\pi D_o^2}{4} \left[0.15 + 0.75 \left(1 - IFR \frac{D_i^2}{D_o^2} \right) \right]}{0.9} \quad (2)$$

と表現すると、図-12で確認できるように、推定N値の深度方向の過剰な増減傾向はある程度解消される。

4. まとめ

圧入施工データを利用した圧入機の自動運転と地盤情報の推定技術について、実施事例や最近の改良の取り組みを含めて報告した。今後は、現時点の技術レベルでの適用範囲を見極めながら現場での運用を進めつつ、適用範囲を拡大するための技術研鑽を継続する。また、他の計測技術やデータ加工技術などを活用して当技術の信頼性・応用性をさらに高める所存である。

参考文献

- 1) i-Construction委員会：i-Construction～建設現場の産業性革命～、2016
- 2) 国土交通省：国土交通省告示第四百六十八号、2016
- 3) Ishihara, Y.・Ogawa, N.・Kinoshita, S.・Kitamura, A.・Tagaya, K.：Study on development of the pile penetration test system based on press-in construction data. Society for Social Management Systems, CD-ROM. 2008
- 4) 国土交通省：NETIS・公共工事における新技術活用シス

テム、2014

- 5) Ishihara, Y.：Use of press-in piling data for automatic operation of press-in machines and estimation of subsurface information. Proceedings of the First International Conference on Press-in Engineering 2018, Kochi, pp. 651-660, 2018
- 6) 国際圧入学会 (IPA)：圧入工法における施工データの利用に関する技術資料 I. 地盤情報の推定, 63p, 2017
- 7) 石原行博, 尾川七瀬, 木下三郎, 多賀谷宏三. 2009. PPTデータに基づく土質分類および換算N値に関する研究. 最近のサウンディング技術と地盤評価シンポジウム発表論文集, pp. 85-90.
- 8) Ogawa, N.・Nishigawa, M.・Ishihara, Y.：Estimation of soil type and N-value from data in press-in piling construction. Testing and Design Methods for Deep Foundations, IS-Kanazawa 2012, pp. 597-604, 2012
- 9) Ishihara, Y.・Ogawa, N.・Lei, M.・Okada, K.・Nishigawa, M.・Kitamura, A.：Estimation of N value and soil type from PPT data in standard press-in and press-in with augering, Press-in Engineering 2013: Proceedings of 4th IPA International Workshop in Singapore, pp. 116-129, 2013
- 10) Nishimatsu, Y.：The mechanics of rock cutting, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, Vol. 9, Issue 2, pp. 261-270, 1972
- 11) 福井勝則・大久保誠介・本間直樹.：TBMの掘削抵抗を利用した岩盤強度の推定—二軒小屋トンネルの事例—, 資源と素材, Vol. 112, pp. 303-308, 1996
- 12) 藤本明生・竹之内康昭・小倉靖之・小林暁・配野均.：道路トンネル分岐合流部の合理的な構築工法の開発, トンネル工学報告集, 第15巻, pp. 323-330, 2005
- 13) 地盤工学会：その他のサウンディング, 地盤調査の方法と解説, pp. 329-337, 2004
- 14) Ishihara, Y.・Haigh, S.・Bolton, M. D.：Estimating base resistance and N value in rotary press-in, Soils and Foundations, Vol. 55, No. 4, pp. 788-797, 2015
- 15) Hughes, H. M.：Some aspects of rock machining, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 9, pp. 205-211, 1972
- 16) Li, Z.・Itakura, K.：An analytical drilling model of drag bits for evaluation of rock strength, Soils and Foundations, Vol. 52(2), pp. 206-227, 2012
- 17) Bond, T.：Rotary jacking of tubular piles, M.Eng. Project Report, Cambridge University Department of Engineering, 50p, 2011
- 18) Okada, K.,・Ogawa, N.・Ishihara, Y.：Case study on estimation of ground information with the use of construction data in press-in method. Proceedings of the First International Conference on Press-in Engineering 2018, Kochi: 371-378, 2018