

間欠エアとインナースクリューを併用した静的締固め工法の紹介

— STEP 工法 —

森 利 弘 ・ 服 部 正 裕

サンドコンパクションパイル工法は、砂質土、粘性土のいずれにも適用できる経済性、施工性に優れた地盤改良工法であるが、大型のバイプロハンマーを用いるため市街地等での適用が難しい状況にあった。この課題に対処するため開発した工法が間欠エアとインナースクリューを併用した静的締固め工法（STEP 工法：Screw Torsion-Environmental Compaction Pile Method）で、回転駆動するケーシングパイプ内に独立駆動するインナースクリューを装備、その先端側面から噴射する間欠エアを併用して締固め杭を造成することにより、低振動・低騒音化を図るとともに、レーザーレーダー距離計を用いた新型の施工管理システムを導入した。本工法は、周辺環境に配慮が必要な現場を中心に延べ打設長約 2 万 m の実績を有しており、ここでは機械装置や施工方法、施工実績から得た知見等について紹介するものである。

キーワード：静的締固め、インナースクリュー、レーザーレーダー距離計

1. はじめに

地震時の液状化防止対策として、地盤の密度を増大させるサンドコンパクションパイル工法（以下、SCP 工法と称す。）による地盤改良が多用されてきた。

しかし、近年、都市再開発や既設構造物の耐震補強等、市街地や構造物近傍での液状化対策が増加している中、大型のバイプロハンマーを用いて地盤密度の増大を図る SCP 工法は、振動や騒音等の問題から適用が難しい状況にあった。

そこで、捻りせん断による締め固め効果に着目して開発、実用化に至った工法が間欠エアとインナースクリューを併用した静的締固め工法（以下、STEP 工法と称す。）であり、SCP 工法と同等の改良効果が得られていることから、ここに紹介するものである。

2. 工法概要と特徴

(1) 工法概要

STEP 工法は、図-1 のようにケーシングパイプ（以下、CP と称す。）内に装備した独立駆動するインナースクリューと先端から噴射する間欠エアで、CP 内の材料を強制的に排出させつつ、インナースクリューの回転トルクを排出材料に付与することにより杭径 $\phi 700$ mm を標準とする締め固めされた砂等の杭を地盤中に造成する超低振動、低騒音の地盤改良工法である。

一連の締固め杭は、図-2 に示すように単位長さごと（標準 1.0 m 仕上げ）に段階的に造成（STEP 施工）され、砂質地盤では原地盤の密度増大による液状化の防止、粘性土地盤では複合地盤の形成によるせん断

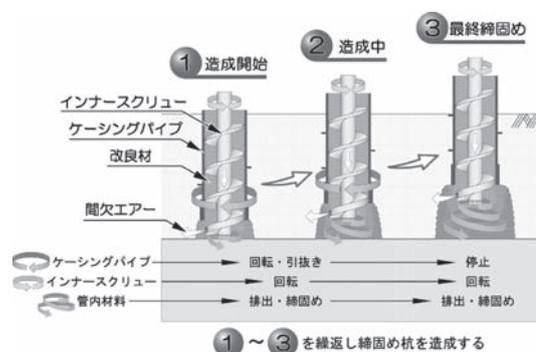


図-1 締固め杭造成メカニズム

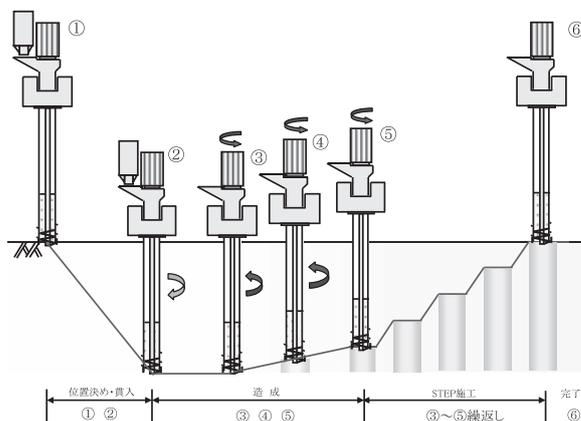


図-2 施工要領図

抵抗や支持力の増大等が期待できる。

なお、本工法は、平成 20 年 1 月に(財)国土技術研究センターから技術審査証明 技審証第 22 号を取得した。

(2) 特徴

本工法の特徴を以下に示す。

(a) 周辺環境の影響負荷を低減

CP の貫入、引き抜きおよび締固め杭の造成には回転駆動装置を用い、また、材料排出補助用の間欠エアは少量を地盤内で噴射するため、周辺環境への影響が少ない。敷地境界から 5 m 程度の離間距離で騒音・振動規制基準値を下回る。

(b) 出来形管理精度の向上

レーザーレーダー距離計を用いた新型の施工管理システムの開発、導入により、CP 内材料の挙動をリアルタイムに精度良くモニタリングできる。

(c) リサイクル材等多様な材料の使用が可能

管内材料はインナースクリューにより強制排出されるため、砂や再生砕石 (RC-40) など多様な材料を用いることができる。

3. 機械装置

本施工機は、CP 内材料の排出と締め固めに独立駆動するインナースクリューを装備していること、CP 内材料の排出補助として間欠エア噴射装置を設けていること、レーザーレーダー距離計を用いた施工管理システムを導入したことに特徴がある。写真-1 に STEP 施工機の全景を示す。



写真-1 STEP 施工機全景

(1) 使用機械・機材

本施工機に用いる主な機械・機材の一覧を表-1 に、図-3 には施工機の組立て姿図および CP 先端部の構造図を示す。

表-1 使用機械・機材一覧表

名称	規格・能力	数量	備考
本体	STEP専用機 50t吊	1	丸ボストリダ
ケーシングパイプ	φ508mm	1	
インナースクリュー	φ440mm	1	3.5巻(ctc300mm)
中軸	φ165.8~216.8mm	1	
ケーシング用オーガマシン	D-120WP(45kW×2)	1	定格トルク147kN・m
スクリュー用オーガマシン	D-120KP(90kW×1)	1	定格トルク 51.5kN・m
間欠エア装置	電磁弁方式	1	噴射口径 38mm
コンプレッサー	10.5m ³ /min	1	
タイヤショベル	ホイール式 0.8m ³	1	
施工管理計	レーザーレーダー距離計	1	
レーザーレーダー距離計	深度計	1	
レーザーレーダー距離計	LD90-3200HIP-GF	1	

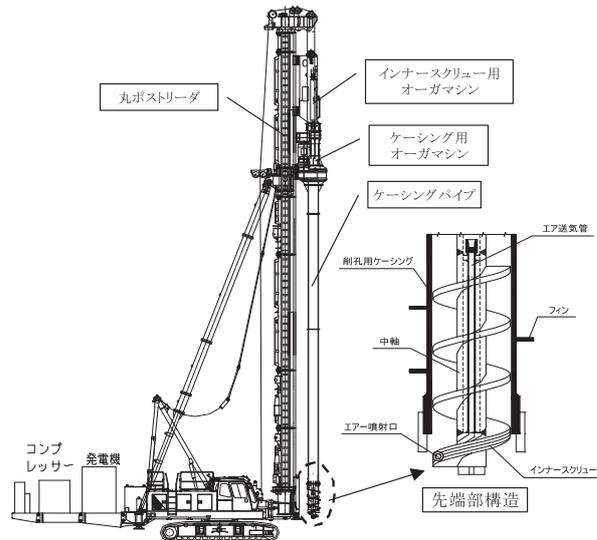


図-3 施工機の組立て姿図及び CP 先端部構造図

(2) 間欠エア装置

間欠エアは、コンプレッサーから送気された圧縮空気を電磁式開閉弁で 1 秒程度に 1 回、0.25 秒程度開放することで生み出され、インナースクリューの軸内を通して、その先端側面の噴射口から地盤中に噴射される。

(3) 施工管理システム

図-4 は、施工管理システム系統図である。

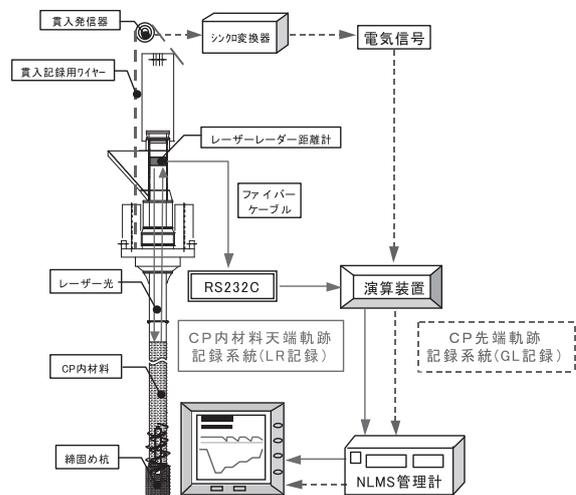


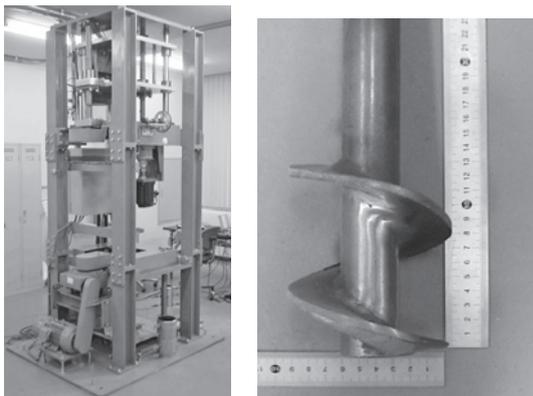
図-4 施工管理システム系統図

CP先端の軌跡は、CPの動きに同調するワイヤーの出入り代をセルシン発振器で計測、電気信号に変換、また管内材料の挙動は、レーザーレーダー距離計で1秒に1回程度計測したCP内材料天端までの距離データをRC232Cで0～20 mAの電流値に変換し、各データは演算器を介して操作室に設置したNLMS型記録計（独自の施工管理装置）によりリアルタイムで表示される。

4. 模型実験によるインナースクリューの締め効果

(1) 模型実験装置の概要

模型実験装置の基本的な相似スケールは実施工機に対して1/5、スクリューピッチは60 mmと80 mm（実施工機では300 mm, 400 mmに相当）を使用した。実施工機のインナースクリュートルクの定格値は、51.5 kN・mであり、これを模型スケールに換算すると、400 N・m（1/125スケール）程度に相当する。写真—2に模型実験装置および模型スクリューの写真を示す。



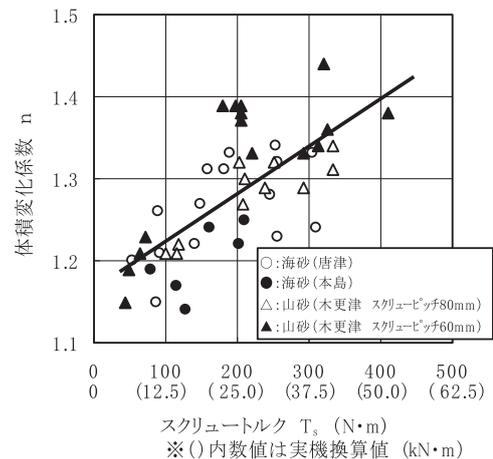
写真—2 実験装置および模型スクリュー

(2) 実験方法

実験に用いた材料は、含水比が5～8%の海砂（唐津産、本島産）および山砂（木更津産）である。実施工ではCPを引き抜きつつ材料の排出と締め固めを行い杭の造成を行うが、実験では底板に固定したφ140 mmのパイプ（実杭径φ700 mm）を引き下げ的方法で造成を行った。また、鉛直軸力と砂の排出速度によってスクリューに生じるトルクが変化するため、その制御方法として底板に土圧計を設置し、鉛直軸力と反力が同等になるよう下降速度をコンピュータ管理した。

(3) 実験結果

図—5は、トルク (T_s) と体積変化係数 (n) の関係を表したものである。プロット点にバラツキはある



図—5 トルク (T_s) と体積変化係数 (n) の関係

ものの材料の違いやスクリューピッチの違いにかかわらず、右上がりの傾向が伺える。また、予備実験では、鉛直軸力 (σ) と発生トルク (T_s) には $\sigma = 25.3 \cdot T_s$ (相関係数 $r = 0.89$) なる関係があることを確認している。

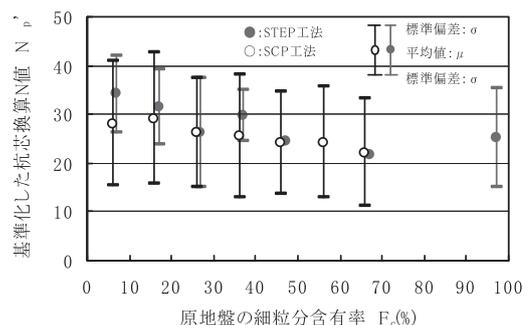
SCP工法における砂の体積変化係数 (n) は、1.3～1.35程度¹⁾とするのが一般的で、このことを踏まえ図を参照すると、模型装置で $n > 1.3$ を満足するためのスクリュートルクは $T_s = 300 \text{ N} \cdot \text{m}$ 程度になる。これを実施工機に置き換えると、鉛直軸力200 kN程度、発生トルクは37.5 kN・m程度となる。実施工機は、鉛直軸力に相当するCP等フロント装備重量が300 kN程度、インナースクリューの定格トルクが51.5 kN・mであり、締め固め杭の造成に必要な機械能力を十分有していることが分かった。

5. 施工結果報告

(1) 改良後の杭芯強度

(a) 杭芯強度の発現傾向

図—6は、既往のSCP工法における原地盤の細粒分含有率 (F_c) と基準化した杭芯N値 (N_p') の関係図²⁾に本工法のデータを加算したものである。なお、杭芯N値は、既往文献²⁾に従い(1)式で基準化した。



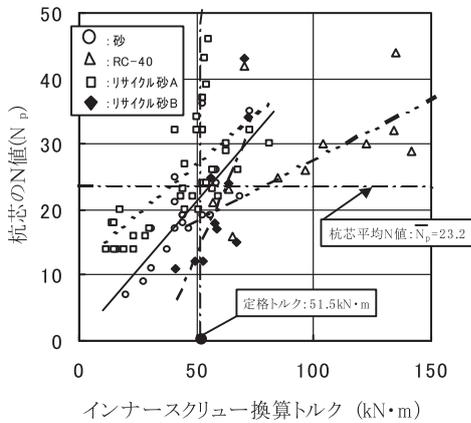
図—6 F_c と N_p' の関係図²⁾

この図から本工法で造成した締固め杭の杭芯強度は、SCP工法の杭芯強度と遜色ない。

$$(N_p', N_b') = \frac{168 \cdot N}{69 + \sigma_v'} \dots\dots(1) \text{式}$$

ここに N_p' : 基準化した換算杭芯N値
 N_b' : 基準化した換算杭間N値
 N : 杭芯及び杭間実測N値
 σ_v' : 拘束圧 (kN/m²)

(b) インナースクリューの締固め効果と杭芯強度
 インナースクリューのトルク値と杭芯強度の関係を明らかにするため、施工中のインナースクリュー用オーガモータの電流値を計測、電流値をトルクに換算し、杭芯N値(N_p)との関係を分析した。図一七がその結果である。



図一七 換算トルクと杭芯N値の関係

各材料のプロット点はそれぞれ傾きが異なるが、いずれも右上がりの傾向が伺える。また、この図から杭芯N値は定格トルク(50 kN·m)程度で概ね15以上発現しており、インナースクリュー用オーガモータの電流値が締めり具合の1つの目安となる。

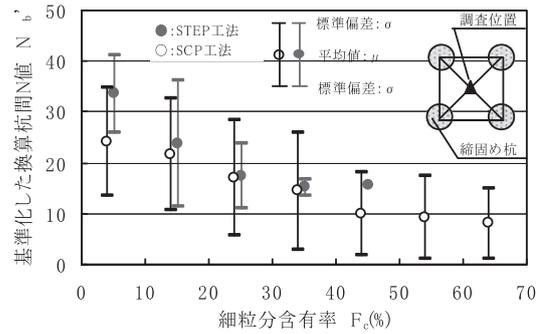
しかし、トルクや杭芯N値は、地盤条件や使用材料により発現傾向が異なり、さらに現時点ではデータ数が少ないため、品質管理手法の一つとして確立するためには、今後、更なる実績の蓄積が必要である。

(2) 砂質土地盤に対する改良効果

(a) 杭間強度の発現傾向

図一八は、杭芯強度と同様、SCP工法における原地盤 F_c と基準化した改良後の杭間N値(N_b')の関係図²⁾に本データを加筆したものである。なお、加筆に当たって、本データも杭芯強度同様、(1)式で基準化した。

この図から本工法の杭間強度は、SCP工法と同等程度であり、強度の発現は、原地盤の F_c の増加に伴い、右下がりの傾向(発現N値が低下)が伺えた。

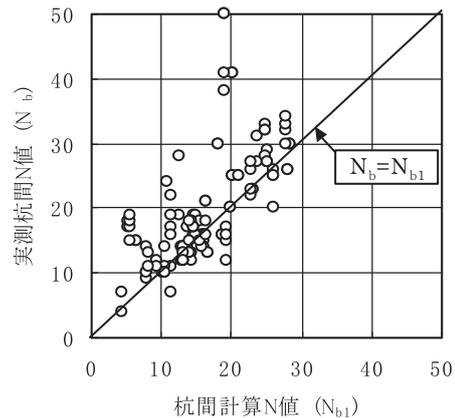


図一八 F_c と N_b' の関係図²⁾

(b) 設計手法の検証

前述のとおり、本工法による杭間強度は、SCP工法と同等と評価できたことから、既往のSCP工法の砂質地盤に対する設計方法(方法C)³⁾の適用性を検証した。

図一九は、既往の設計方法(方法C)³⁾で算定した改良後杭間計算N値(N_{b1})と実測杭間N値(N_b)を比較したものである。 N_b は概ね N_{b1} と同等もしくはそれ以上であり、SCP工法の設計方法が適用できる。

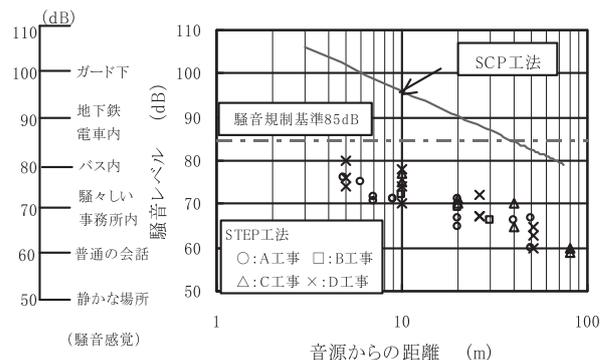


図一九 杭間計算N値と実測N値の関係図

(3) 周辺環境への影響確認

(a) 騒音レベル

図一十は、4現場における騒音レベル測定結果を施工機からの離間距離で整理した図である。離間距離



図一十 騒音レベルの距離減衰図

5 m 程度で騒音規制基準 85 dB を下回り、本工法の騒音レベルは SCP 工法に比べ相対的に 20 dB 程度低い。

(b) 振動レベル

図-11 は、騒音レベルと同様、4 現場における振動レベル測定結果を施工機からの離間距離で整理したものである。

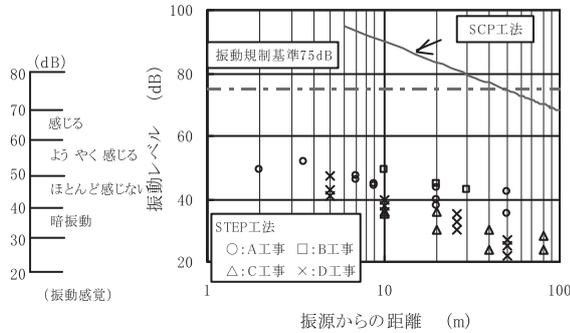


図-11 振動レベルの距離減衰図

本工法の振動レベルは、離間距離 2 m で 50 dB 程度であり、振動規制基準値 75 dB を大きく下回る。また、SCP 工法に比べ相対的に 40 dB 程度低く、人体にはほとんど感じないレベルである。

(c) 地盤変位

本工法による周辺地盤への影響を把握するため、改良区域境界から 4.3 m (No.1) と 7.3 m (No.2) の 2 地点に挿入式傾斜計用観測管を埋設し、水平地盤変位を計測した。対象地盤は $F_c = 12 \sim 30\%$ 程度の砂質土、打設長は 8 m 程度、打設配置は正方形 1.8 m である。

図-12 は観測位置平面図および断面図であり、合わせて平面図には施工順序を加筆した。施工は①ブロックから③ブロックの順で進捗しており、各ブロックの打設順序を図中の矢印で示した。水平変位量は、この①~③ブロックで日々発生する水平変位の累積値で評価した。

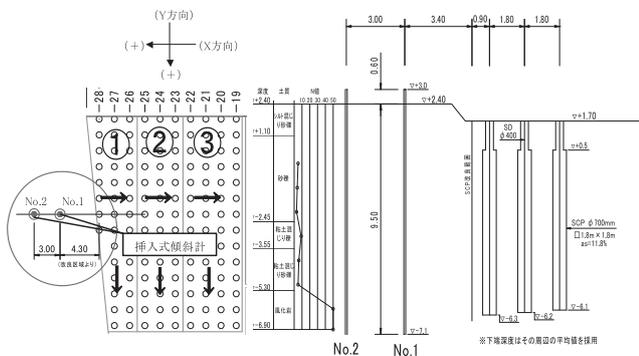


図-12 観測位置平面図および断面図

図-13 は、累積最大水平変位量の深度分布図である。この結果から概ね変位の影響範囲は打設長程度と

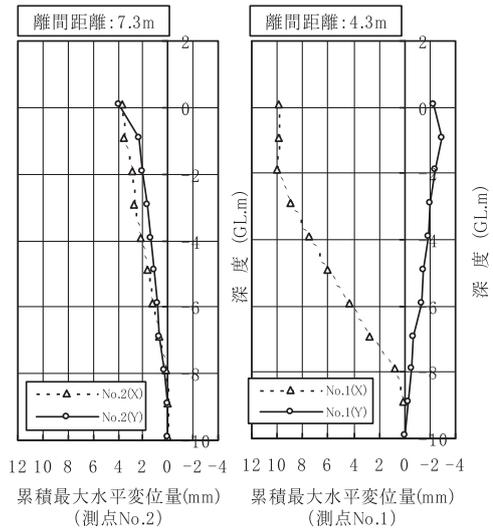


図-13 地盤変位の計測結果

見ることができる。また、水平変位の影響範囲（水平）は、従来の密度増大を改良原理とする SCP 工法や類似工法と同等程度であると評価できる。

6. おわりに

本工法は、平成 20 年 1 月に技術審査証明を取得し、現場への本格的な導入を図って 2 年程度であるが、その特徴を生かした成果が得られつつある。

今後、更なる実績の積み重ねにより、品質や施工性の向上を図る所存であり、特に杭芯強度とインナースクリュートルクの関係を明らかにすることが顧客への信頼度を高めるとともに、品質の向上に寄与するものとする。

J C M A

《参考文献》

- 1), 3) (社)地盤工学会：打戻し施工によるサンドコンパクションパイル工法設計・施工マニュアル、p110 および p98、平成 21 年 3 月
- 2) (社)日本建築学会：実務にみる地盤改良工法の技術的諸問題、p95、平成 11 年 10 月

【筆者紹介】

森 利弘 (もり としひろ)
 (株)熊谷組
 技術研究所 地盤基礎研究グループ
 部長



服部 正裕 (はっとり まさひろ)
 日本海工(株)
 事業部 技術グループ
 次長

