

# インナースクリューを用いた静的締固め工法 (STEP 工法) の開発

渡辺則雄 \* 服部正裕 \*\*

液状化対策は、振動式 SCP 工法に代表されるように、地盤の密度増大を図る方法が主流である。その中において、静的締固め工法は低騒音・低振動の方法として開発され、一般工法として実績を伸ばして来ている。STEP 工法は、インナースクリューの回転トルクを用いて締固め砂杭を造成する方法を採っていて、その締固め度合いをリアルタイムに管理できる静的締固め工法として開発したものである。本論では(財)国土技術研究センターの建設技術審査証明を取得した、STEP 工法の開発について報告する。

キーワード：静的締固め、液状化、インナースクリュー、間欠エア

## 1. はじめに

緩い砂質地盤に強い地震動が作用すると液状化現象が発生し、地上構造物や地中構造物に甚大な被害をもたらすことは一般に良く知られている。液状化を防止する有効な方法は地盤の密度増大を図ることであり、その方策として多用されてきた技術が大型振動機を用いたサンドコンパクションパイル工法等の地盤改良技術であった。

騒音・振動規制を受ける市街地や既設構造物近傍での液状化対策地盤改良工の需要が増加する中、振動式サンドコンパクションパイル工法は、これら現場への適用が難しいという課題を抱えており、同工法と同等の効果を有し、しかも低騒音、低振動で周辺環境に優しい地盤改良技術の開発が期待される現状があった。

そこで、この社会ニーズを背景に、インナースクリューの捻り締固め効果を利用した品質の高い締固め杭を超低振動、低騒音で提供できる新工法の開発に取り組んできた。ちなみに、開発目標は、(1)確実に締固め杭が造成できること、(2)改良後の杭間強度が「振動式サンドコンパクションパイル工法の改良仕様の設定方法C法<sup>1)</sup>」に基づく杭間計算N値と同等程度であること、(3)騒音・振動規制法上の制限を受ける現場で、施工が可能な程度に騒音・振動レベルが低いこととした。

以下に、(財)国土技術研究センターの建設技術審査証明を取得した、STEP 工法の開発について報告する。

## 2. 技術概要

### 2.1 工法の概要

STEP 工法(以下、「本工法」という。)は、Fig. 1, 2 に示すケーシングパイプ(以下、「ケーシング」という。)内に装着した独立駆動するインナースクリューと、その

先端側面から噴射する間欠エアを併用して、インナースクリューの回転トルクを作用させつつケーシング内の材料(砂、リサイクル砂、再生砕石等)を強制排出することで緩い砂質地盤中に拡径、締め固めされた杭(以下、「締固め杭」という。)を造成し、地盤の密度増大を図る低振動、低騒音の地盤改良工法である。

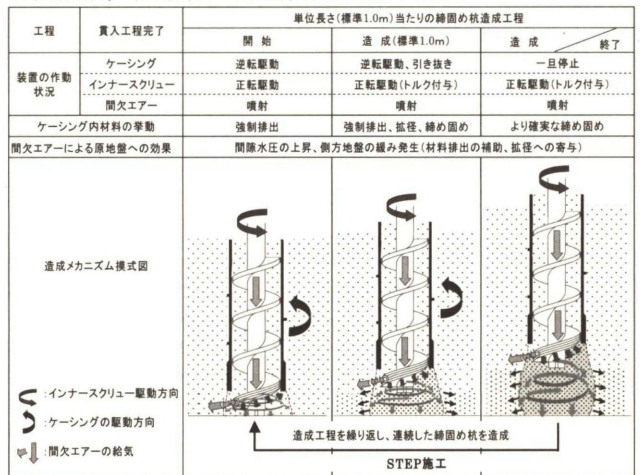


Fig. 1 締固め杭造成メカニズム

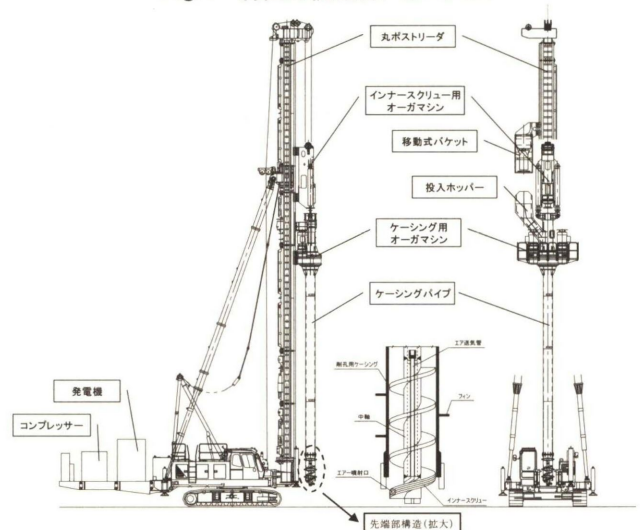


Fig. 2 施工機械の構成

\* 技術研究所 建設技術研究部地盤基礎研究グループ  
\*\* 日本海工株式会社

間欠エアの噴射は、原地盤に対して間隙水圧の上昇と緩みを引き起こし、その効果でインナースクリューによるケーシング内材料の強制排出を助勢する。

## 2.2 施工管理

本工法の施工管理は、ケーシング先端深度、単位引抜き長さおよび使用材料量、さらに補助的な管理として排出材料の締め固め程度の目安となるインナースクリュー用オーガの電流値、引抜き時に使用する間欠エアの噴射圧について行う。前者は施工管理システムによる自動、後者はオペレーターの目視による手動で行う。

### 2.2.1 施工管理システム

施工管理システムは、Fig. 3 に示すようにケーシング内材料天端の変化を捉えて記録する系統とケーシング先端の動きを捉えて記録する系統から構成されている。ケーシング内の材料天端の変化量は、レーザーレーダー距離計で計測し、光ファイバケーブルで送信、RS232C を介して電気信号に変換する。また、ケーシング先端の動きは、その動きに連動する貫入記録ワイヤーの移動量を貫入発信器で読み取り、シンクロ変換器で電気信号に変換する。これら検出値を管理装置（NLMS 計）に取り込み、コンピュータで自動制御する。

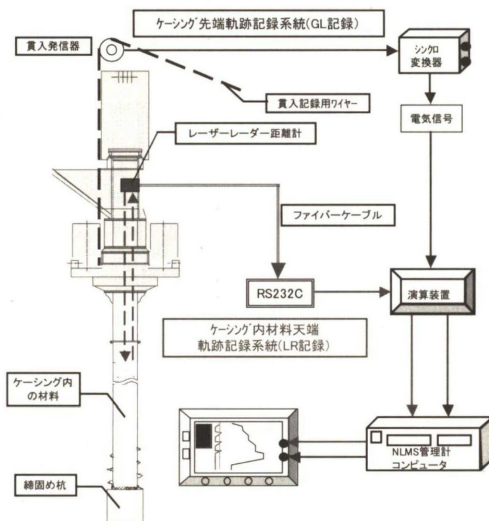


Fig. 3 施工管理システム

### 2.2.2 補助的な管理

#### (1) インナースクリュー用オーガの電流値

締め固め杭に求められる設計上の内部摩擦角  $\phi = 30 \sim 35^\circ$  <sup>2)</sup> を満足するための換算トルクはおおむね 50kN・m 程度、これをインナースクリュー用オーガの電流値で見ると 300 アンペア程度となる。排出材料の締め固め程度の目安としてこの値をオペレーターが目視で監視する。

#### (2) 間欠エアの噴射圧

間欠エアの噴射圧は、全上載土圧の 1.5～2 倍程度を目安とし、オペレーターがケーシング内材料の排出状況

を見ながら調整する。

## 2.3 適用範囲

適用範囲は、Table 1 に示すとおりである。改良対象地盤は主に緩い砂質地盤であり、改良可能最大深度は 20 メートル程度である。造成する締め固め杭の杭径は、 $\phi 70$  センチメートルを標準とする。使用材料は、砂、リサイクル砂、再生砕石（RC-40）の実績を有しており、いずれの材料も既往の粒度加積曲線<sup>3)</sup>内に入る材料を基本とする。

Table 1 適用範囲

適用項目	適用範囲
対象地盤	緩い砂質土
造成杭径	$\phi 70$ ミリメートル
改良深度	施工基盤面下 20 メートル程度
中間地盤強度	N 値 $\leq 20$ 程度、層厚 2 メートル程度
使用材料	砂、リサイクル砂、再生砕石（RC-40）等で既往の粒度加積曲線 <sup>3)</sup> 内に入る材料

## 2.4 技術の特徴

本工法の特徴は、次のとおりである。

- (1) 周辺環境への影響が少ない低騒音・低振動の密度増大工法である。騒音・振動レベルは、打設位置からの離間距離が 5.0 メートル程度で騒音・振動規制基準値を下回る。
- (2) 出来形管理精度、施工性の向上に寄与する新型施工管理システムを搭載した工法である。本工法に適するレーザーレーダー距離計を用いた施工管理システムの開発、確立により、ケーシング内の材料天端の変化量が精度良く計測でき、施工性が向上する。
- (3) 排出材料の締め固め管理が可能な工法である。インナースクリュー用オーガの電流値（インナースクリューに生じるトルク）を目安とすることで、排出材料の締め固めを管理できる。
- (4) 地中および地上環境への影響を考慮した間欠エアを用いる工法である。エアは、間欠で直接地盤内に噴射されるため、効率的に地盤へ作用し、地上環境への影響が少ない。

## 3. 開発目標の検証

開発目標の検証は、Table 2 の実証実験工事と Table 3 の実工事のデータが基となっている。なお、オートラムサウンディング試験および大型動的コーン貫入試験による  $N_d$  値は、標準貫入試験の N 値に換算して示している。

Table 2 実証実験工事

件名	年 月	場所	規模・数量	使用材料	開発目標	確認項目	確認方法	結果概要	
A-1	平成14年 11月	兵庫県 姫路市	$\phi$ 700mm $\square$ 2.0m $a_s=9.6\%$ L=7.0m 12本	砂	(1)	杭芯強度	オートラム サウンディング試験	GL-2.0~7.0m N値=7~36 (7~36)	
						(2)	杭間強度	オートラム サウンディング試験	GL-2.0~7.0m(粘性土除く) 平均N値 前7.4(7.4)後13.8(13.8)
						(3)	騒音レベル	JIS Z 8731	離間距離7m 71.7dB
							振動レベル	JIS Z 8735	離間距離7m 36dB
A-2	平成19年 3月	兵庫県 姫路市	$\phi$ 700mm L=7.5~10.5m 12本	砂	(1)	杭径	澆き取り、露出 縦割り	GL-2.5mまで縦割り確認 $\phi$ 700mmを満足	
						(3)	騒音レベル	JIS Z 8731	離間距離4.9m 76dB 離間距離1m(参考) 79.5dB
						(3)	振動レベル	JIS Z 8735	離間距離2m 49dB 離間距離1m(参考) 54dB

Table 3 実工事概要

件名	年 月	場所	規模・数量	使用材料	開発目標	確認項目	確認方法	結果概要	
B-1	平成17年 2月~3月	千葉県 浦安市	$\phi$ 650mm $\square$ 2.5m $a_s=5.3\%$ L=13.5m 100本	再生碎石 RC-40	(1)	杭径	澆き取り、露出	GL-3.5mまで確認 $\phi$ 650mmを満足	
						杭芯強度	標準貫入試験	GL-3.5~13.5m N値=16~50	
						(2)	杭間強度	標準貫入試験	GL-3.5~13.5m(粘性土除く) 平均N値 前12.5 後19.9
						(3)	騒音レベル	JIS Z 8731	離間距離10m 72dB
振動レベル	JIS Z 8735	離間距離10m 49dB							
B-2	平成19年 7月~8月	三重県 四日市市	$\phi$ 700mm $\square$ 1.9m $a_s=10.7\%$ L=12.6m 48本 L=11.7m 81本	汚泥分級リ サイクル砂 リーサ	(1)	杭芯強度	大型動的コーン 貫入試験	GL-2.5~12.6m N値=14~46 (16~53)	
						(2)	杭間強度	標準貫入試験	GL-3.5~13.5m 平均N値 前13.8 後29.3
						(3)	騒音レベル	JIS Z 8731	離間距離10m 77dB
							振動レベル	JIS Z 8735	離間距離10m 36dB
B-3	平成19年 9月~10月	京都府 舞鶴市	$\phi$ 700mm $\square$ 1.8m $a_s=11.9\%$ 平均L=5.2m 848本	ニッケル精 錬副産物 ナスサンド	(1)	杭径	澆き取り、露出	表層部にて4本確認 $\phi$ 700mmを満足(立会)	
						杭芯強度	標準貫入試験	GL-1.5~6.5m N値=11~43	
						(2)	杭間強度	標準貫入試験	GL-1.5~6.5m 平均N値 前6.7 後20
						(3)	騒音レベル	JIS Z 8731	離間距離5m 80dB
振動レベル	JIS Z 8735	離間距離5m 47dB							

### 3.1 出来形形状と杭芯強度

#### 3.1.1 出来形形状

A-2実証実験およびB-1, B-3実工事において造成した締固め杭の表層を剥ぎ取り、杭頭上面を露出して出来形形状を調査した結果、規定の杭径 $\phi$  700mmを有することが確認された。Photo.1にA-2の露出状況を示す。

#### 3.1.2 杭芯強度

杭芯強度は、「港湾の施設の技術上の基準・同解説 平

成11年4月」に示されている設計要求性能の締固め杭の内部摩擦角 $\phi=30\sim 35^\circ$ <sup>2)</sup>を目安に評価した。Fig.4に、前述の基準・同解説に記載されたExp.1で算定した $\phi$ と、杭芯N値(標準貫入試験N値およびオートラムサウンディング試験、大型動的コーン貫入試験の $N_d$ 値をN値に換算、以下、「N値」という。)の関係を示す。杭芯N値は、測定深度に関係なくほとんどが $\phi=35^\circ$ より上方に位置することから、設計上の要求性能を満足することが確認できた。

$$\phi = 25 + 3.2 \sqrt{\frac{100N}{70 + p'_w}} \quad (\text{Exp. 1})$$

ここに

- $\phi$  : 締固め杭の内部摩擦角 (°)
- N : 締固め杭の杭芯強度 (N 値)
- $p'_w$  : 杭芯強度測定深度の有効土被り圧 (kN/m<sup>2</sup>)

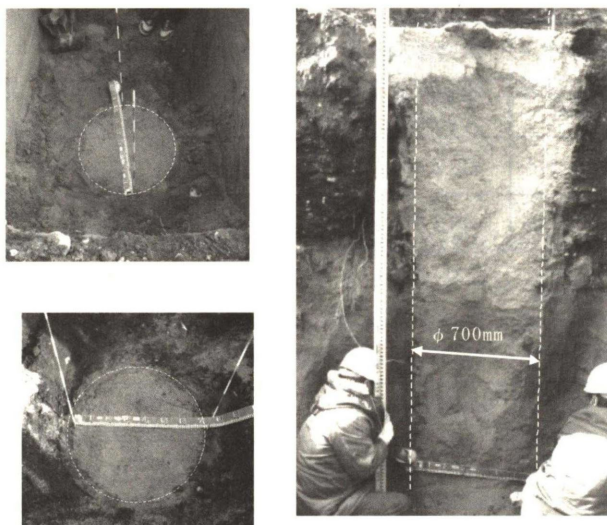


Photo. 1 締固め杭 (A-2) の露出状況

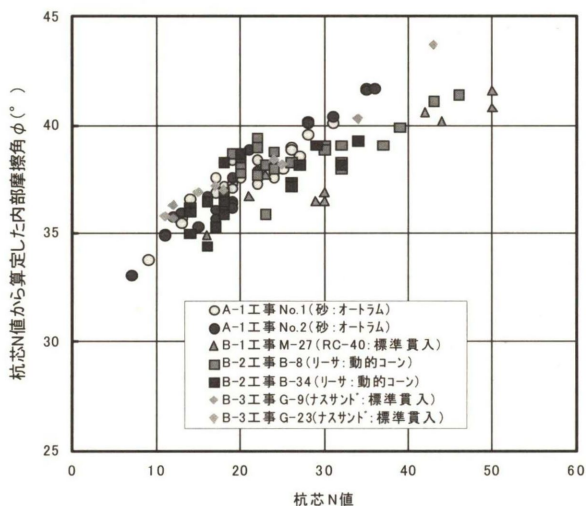


Fig. 4 杭芯 N 値と内部摩擦角

次に振動式 SCP 工法との杭芯強度の比較を Fig. 5 に示す。図は参考文献<sup>4)</sup>に A-1, B-1~3 工事における N 値を細粒分含有率 (以下, 「F<sub>c</sub>」という。)を 10%ごとに区分した範囲に加筆したものである。

なお, N 値は, 引用した参考文献に従い, Exp. 2 で拘束圧 98kN/m<sup>2</sup> に基準化した換算 N 値 (以下, N<sub>1</sub> という。)を表す。

$$N_1 = \frac{168N}{69 + \sigma'_v} \quad (\text{Exp. 2})$$

- ここに, N<sub>1</sub> : 基準化した換算 N 値
- N : 実測 N 値
- $\sigma'_v$  : 拘束圧 (kN/m<sup>2</sup>)

図から, 本工法の杭芯強度は振動式 SCP 工法の杭芯強度と概ね同等であることが確認できた。

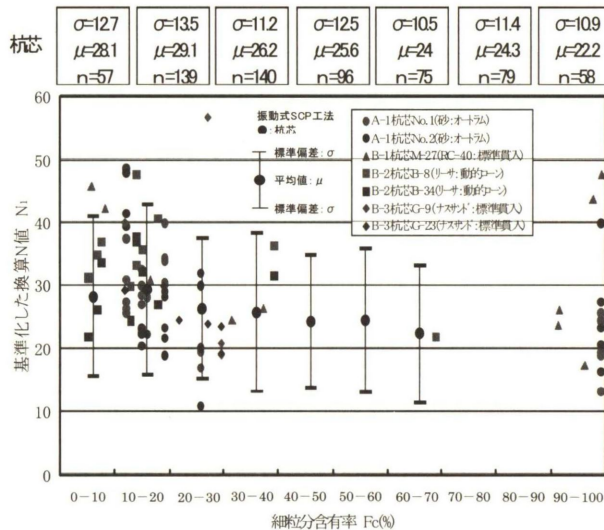


Fig. 5 原地盤の F<sub>c</sub> と杭芯 N 値

### 3. 1. 3 換算トルクと杭芯強度

#### (1) 模型実験によるスクリーへの締固め効果

スクリーへの締固め効果が振動式 SCP 工法に比べ遜色なく, また実機の装備が妥当であることを確認するため, Fig. 6 に示す 1/5 スケールの模型装置による室内実験を行った。装置は固定状態のケーシングパイプと回転 (相似比 1.0) ・上下動可のインナースクリー, 排出砂を受ける下降動可の容器 (造成砂杭  $\phi$  700mm の 1/5 に相当する内径  $\phi$  140mm) で構成される。

測定項目は, 容器内の砂の初期密度, 締固め後の密度, スクリューのトルク値である。トルクは, スクリューの押し込み力と容器底に設置した土圧計が同等になるように容器の下降速度をコンピュータ制御して発生させた。

Fig. 7 に発生トルクと体積変化係数を示す。砂は山砂と海砂で含水比を 5~8% に調整して使用した。体積変化係数は, 締固め前後の密度の比をもって表すが, 乾燥密度に換算して算定したものである。図からは材料やスクリーピッチの違いに関わらず正の相関が見られる。また, 締固め効果はスクリーピッチ 60 ミリメートルの方が高いことが判る。振動式 SCP 工法では, 砂の体積変化係数を, 1.3~1.35 程度<sup>3)</sup> とするのが一般的で, これを目安として実機のスケールに換算すると, 必要トルクは相似比 1/125 の逆数倍の 25~37.5kN-m 程度, 反力は相似比 1/25 の逆数倍の 200~250kN 程度, スクリューピッチは相似比 1/5 の逆数倍の 300 ミリメートル程度となり, 実機の仕様が妥当であることが確認できた。

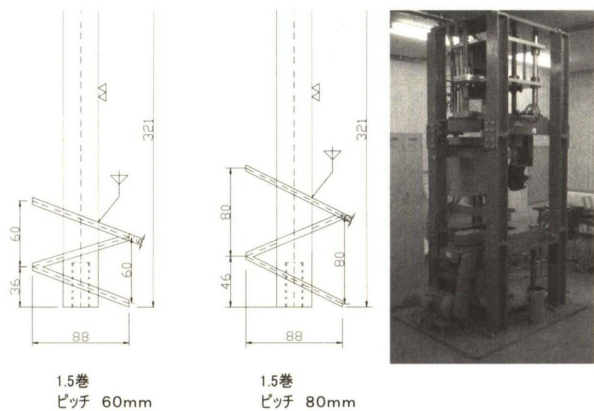


Fig. 6 模型実験装置

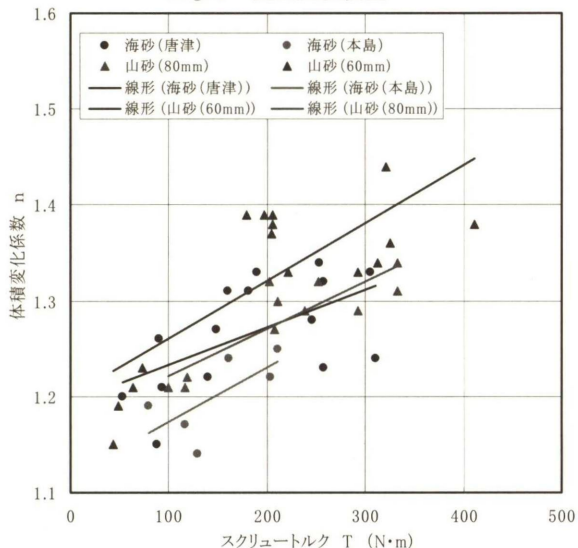


Fig. 7 発生トルクと砂の体積変化率

(2) 換算トルクと杭芯強度

Fig. 8は、A-1、B-1～3工事における締め固め杭造成時のインナースクリューに発生したトルクと杭芯N値（N値および  $N_d$  値から換算したN値）の関係を示す。相関関係は材料の違いによって異なるが、いずれも模型実験の結果と同様に右上がりの傾向が有り、本工法ではトルク値の目安を 50kN-m 程度（電流値で 300～400 アンペア程度）とすることで杭芯強度を管理できる可能性がある。なお、図中の内部摩擦角  $\phi=35^\circ$  の範囲は、式(1)において有効土被り圧  $p_w'$ を 30 kN/m<sup>2</sup>および 200 kN/m<sup>2</sup>に設定した時に相当する杭芯N値を示している。

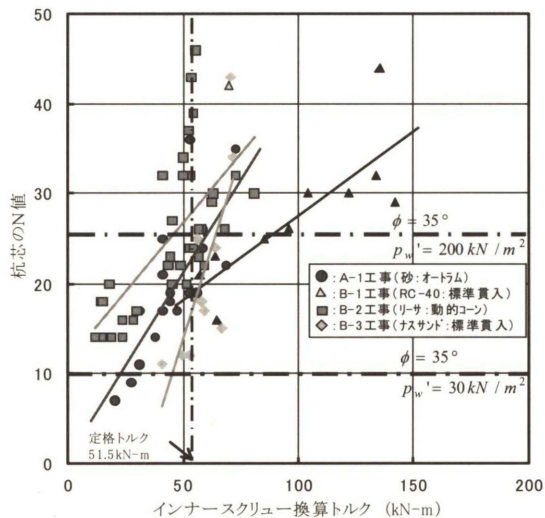


Fig. 8 インナースクリュートルクと杭芯N値

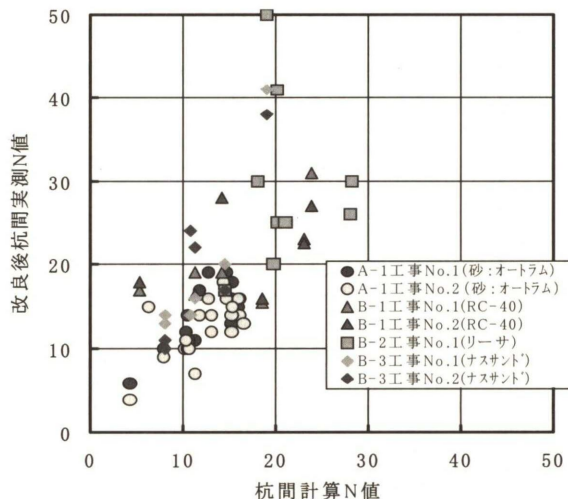


Fig. 9 計算N値と杭間実測N値

3.2 杭間強度

Fig. 9は、A-1、B-1～3工事について事前の地盤データ（N値および  $N_d$  値から換算したN値、 $F_c$ 、地下水位等）から振動式 SCP 工法の改良仕様の設定方法C法<sup>1)</sup>に基づき改良後の計算N値を算定し、改良後の実測杭間N値と比較したものである。図から、プロット点の多くは 45° 線上か、それより左上に位置し、改良後の杭間強度が上記C法に基づく計算値と同等程度であることを確認した。

次に振動式 SCP 工法との杭間強度の比較を Fig. 10 に示

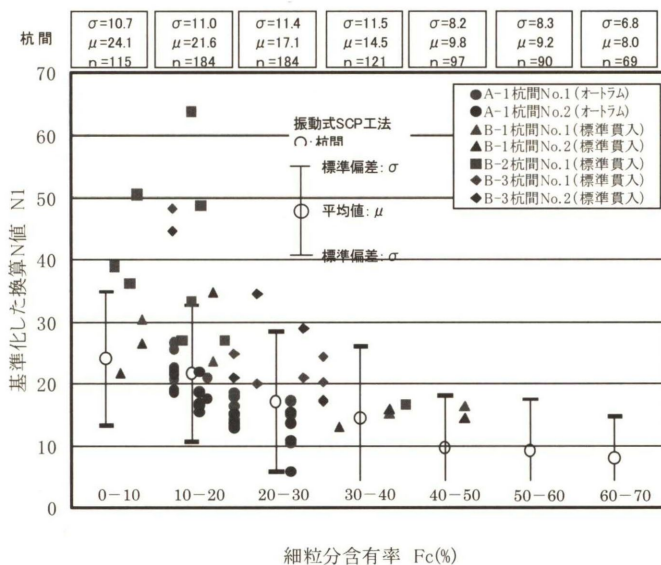


Fig. 10 原地盤の  $F_c$  と杭間N値

す。図は、杭芯と同じように参考文献<sup>4)</sup>にA-1, B-1 ~ 3 工事におけるN値を細粒分含有率 (以下, 「F<sub>c</sub>」という。)を10%ごとに区分した範囲に加筆したものである。図から, 本工法の杭間強度は振動式 SCP 工法の杭間強度と概ね同等であることが確認できた。

### 3.3 騒音及び振動

#### 3.3.1 騒音レベル

Fig. 11 は, A-1 ~ 2, B-1 ~ 3 工事における騒音レベルの測定結果を示す。打設位置から離間距離が5メートル程度で特定建設作業規制基準 (85dB) を下回ることが確認できた。なお, ケーシング貫入時に比べ締め固め杭造成時のほうが1~5dB程度高い傾向にある。

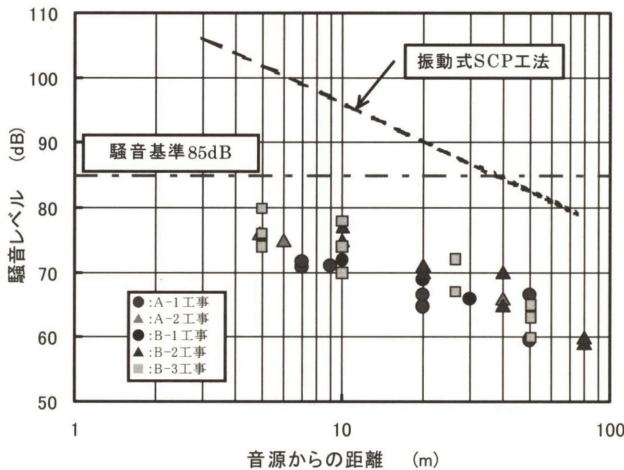


Fig. 11 騒音レベルの距離減衰

#### 3.3.2 振動レベル

Fig. 12 は, A-1 ~ 2, B-1 ~ 3 工事における振動レベルの測定結果を示す。打設位置から離間距離が2メートル程度で特定建設作業規制基準 (75dB) を下回ることが確認できた。

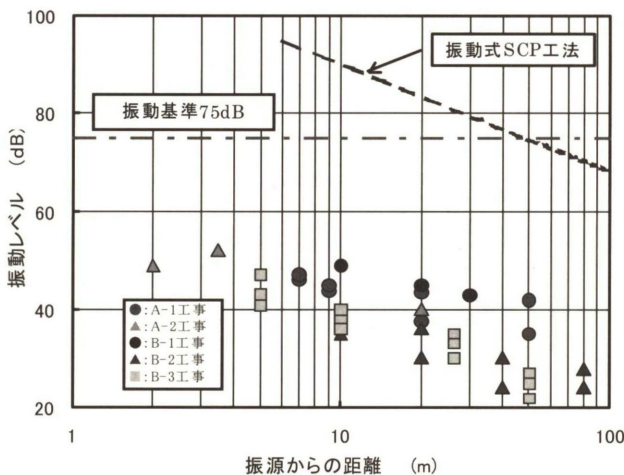


Fig. 12 振動レベルの距離減衰

### 3.4 地盤変位

本工法は, 地盤中に材料を強制圧入するために地盤変位が少なからず発生する。そこで, B-3 工事において施工に伴う地盤の地中変位を挿入傾斜計で測定し, 影響範囲と変位量を確認した。Fig. 13 に測定概要, Fig. 14 に施工の進捗, Fig. 15, 16 に地盤変位の測定結果を示す。

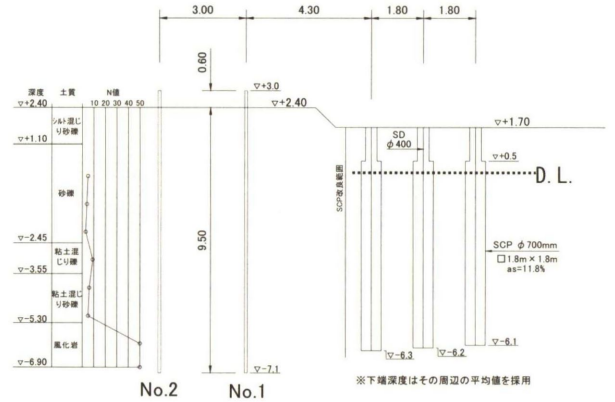


Fig. 13 測定概要

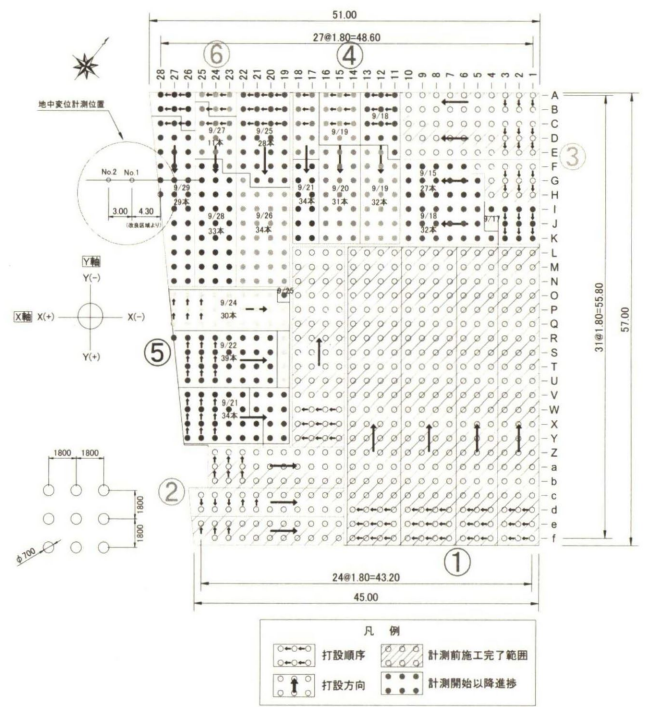


Fig. 14 施工の進捗

次のような地盤の挙動が見られた。

- ① 地盤変位は, 造成杭列 (Y) 方向に比べ造成杭行 (X) 方向が大きく, 最大が測点 No. 1 (造成杭外縁から離間距離 4.3 メートル) では締め固め杭の杭頭付近の D.L. +0.5 メートルで 10 ミリメートル程度, 測点 No. 2 (造成杭外縁から離間距離 7.3 メートル) でも同深度で 4 ミリメートル程度発生している。
- ② 測点 No. 1, No. 2 の X 方向の変位は, ともに計測管に最接近する改良区域の造成時に大きく動き出

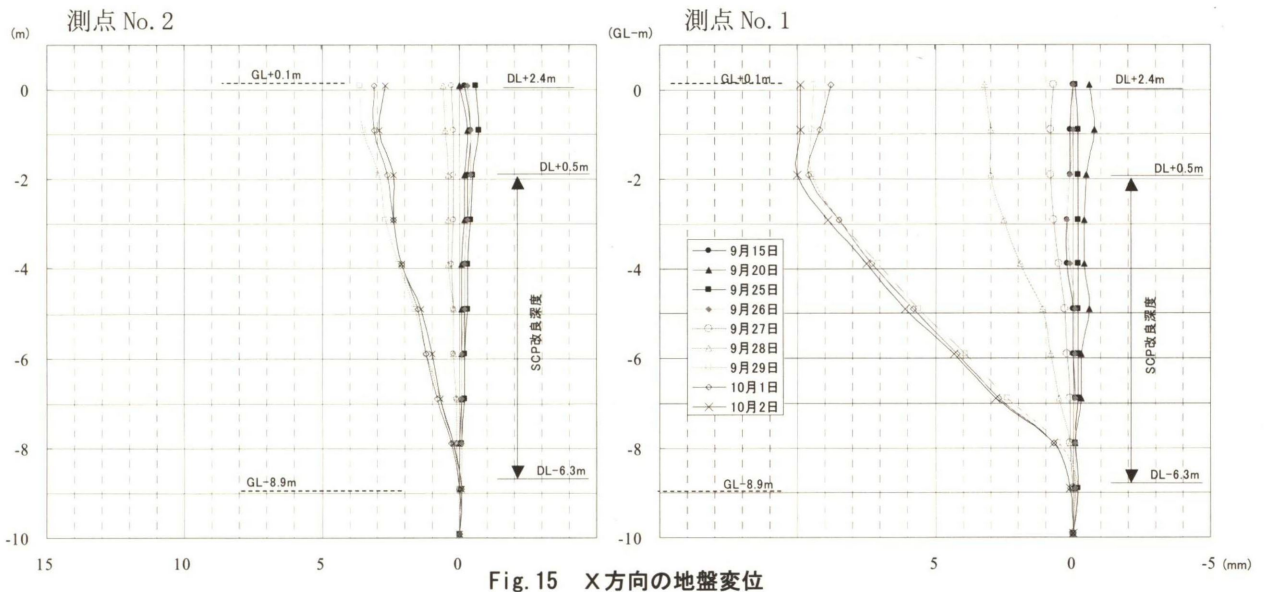


Fig. 15 X方向の地盤変位

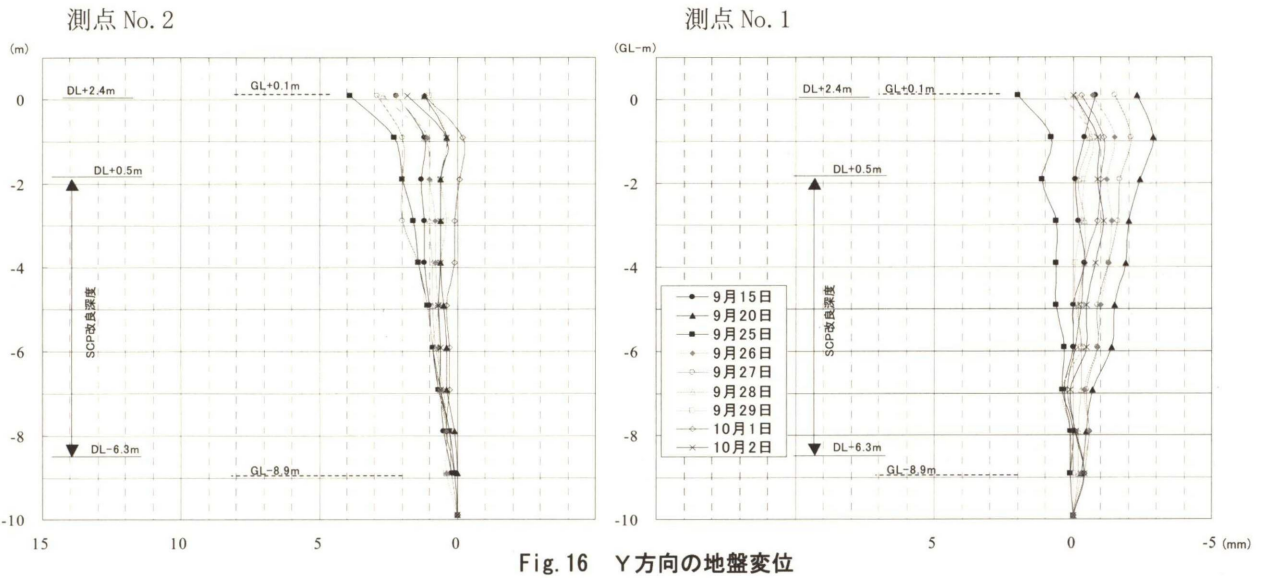


Fig. 16 Y方向の地盤変位

し、押出される方向に発生している。

- ③ 測点 No. 1, No. 2 の Y 方向の変位は、計測管から離れた改良区域の造成時からの反対の動きを示し、その最大変位量は 3~4 ミリメートル程度である。

#### 4. まとめ

本工法の三つの開発目標は、実証実験および実工事のデータを基に検証された。

##### 4.1 開発目標 (1)

- 1) 本工法で造成した締り杭は、規定の出来形性状 (杭径  $\phi$  700mm) を満足することが確認できた。
- 2) 杭芯の内部摩擦角  $\phi$  は、杭芯 N 値と内部摩擦角の関係から「港湾の施設の技術上の基準・同解説」<sup>2)</sup> に示されている設計上の  $\phi$  の要求性能範囲を概ね上回っていることが確認できた。

- 3) 本工法で造成した締り杭の強度は、原地盤の  $F_c$  と杭芯 N 値の関係から振動式 SCP 工法の杭芯強度と概ね同等であることが確認できた。

##### 4.2 開発目標 (2)

- 1) 杭間 N 値は、計算 N 値と杭間実測 N 値の比較から「振動式サンドコンパクションパイル工法の改良仕様の設定方法 C 法」<sup>1)</sup> で計算された杭間計算 N 値と概ね同等であることが確認できた。
- 2) 杭間強度は、原位置の細粒含有率  $F_c$  と杭間 N 値の関係から振動式 SCP 工法の杭間強度と概ね同等であることが確認できた。

##### 4.3 開発目標 (3)

- 1) 騒音レベルは、騒音レベルの距離減衰図に示すとおり、打設位置からの離間距離が 5 メートル程度で騒音規制基準値 85dB を下回ることが確認できた。また、ケーシング貫入時に比べ締り杭造成時

の方が若干高い傾向にあった。

- 2) 振動レベルは、振動レベルの距離総括図に示すとおり、打設位置からの離間距離が2メートル程度で騒音規制基準値75dBを下回ることが確認できた。

### 謝辞

本開発は、日本海工(株)との共同開発であり、(財)国土技術研究センターから建設技術審査証明を取得するにさいし、ご協力をいただいた関係者の方々に深く感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 地盤工学会：液状化対策工法，pp. 223-241, 平成16年7月
- 2) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，pp. 245, pp. 562, 平成11年4月
- 3) 土質工学会：軟弱地盤対策工法-調査・設計から施工まで，pp. 121, pp. 139, 平成3年9月
- 4) 日本建築学会：実務にみる地盤改良工法の技術的諸問題，pp. 95, 平成11年10月

---

## Development of the static compaction pile using an inner screw (STEP method of construction)

Norio WATANABE, Masahiro HATTORI

### Abstract

A Method to increase density of the foundation of which the vibrating type sand compaction pile construction method is most typical becomes the main measure against liquefaction. Among these methods, a static hardening construction method is developed as low noise and has been making the track record as a general construction method. The STEP construction method is the method of forming a hardening sand pile using the rotating torque of an inner screw, and is developed it as a static hardening construction method which can manage the degree of compaction on real time.

Keywords : Static compaction pile, Liquefaction, Inner screw, Intermittent air

---