

静的締固め工法 (STEP 工法) における改良効果の推定方法に関する検証

森 利弘 * 篠井隆之 **

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工事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と同等の改良効果を有する地盤改良工法として、インナースクリューを用いた静的締固め工法 (STEP 工法) を開発した。既報 (第 67 号) では開発時に実施した実証実験工事および実工事での結果を基に、本工法における改良効果および騒音・振動低減効果等について報告した。本報では、改良効果の推定方法として従来の設計法である方法 C に加え、新たな方法 D の適用性について、その後の実工事を含めて検証したので報告する。

キーワード：地盤改良，静的締固め，改良効果，N 値

1. はじめに

比較的緩い砂質地盤に強い地震動が作用すると液状化現象が生じ、建築物や地中構造物などに甚大な被害をもたらす。液状化を防止する有効な方法の一つは地盤の密度増大を図る地盤改良である。これは地盤中に砂等の材料を用い、締固めされた砂杭 (以降、締固め砂杭と称す) を造成し、周辺地盤の密度を増大させるものである (Fig. 1)。これまで、締固め砂杭の施工方法として振動式サンドコンパクションパイル工法 (以降、SCP 工法と称す) が多用されてきたが、大型のバイブロハンマーを用いるため、振動や騒音の問題から、規制を受ける市街地や既設構造物近傍での適用が難しい状況にあった。

そこで、SCP 工法と同等の改良効果を有し、低振動・低騒音で周辺環境にも優しい施工方法として、静的に地盤の密度増大を図る STEP 工法 (以降、本工法と称す) を開発した。既報¹⁾では、開発時に実施した実証実験工事および

び実工事での結果を基に、本工法における締固め砂杭造成による改良効果および騒音・振動特性等について報告した。引続いて、本報では、改良効果の推定方法として従来の設計法である方法 C に加え、新たな方法 D の適用性について、その後の実工事を含めて検証したので報告する。

2. 締固め砂杭の造成方法

本工法における締固め砂杭の造成メカニズムを Fig. 2 に示す。本工法では施工機のケーシングパイプ (外径 508mm, 以降 CP と称す) 内に装備しているインナースクリューとその先端から噴射する間欠エアで、CP 管内に投入された締固め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、拡張された締固め砂杭 (標準 $\phi 700\text{mm}$) を造成することができる。なお、CP とインナースクリューは別々に回転駆動させることができる。

締固め砂杭の造成手順を Fig. 3 に示す。CP の位置決め

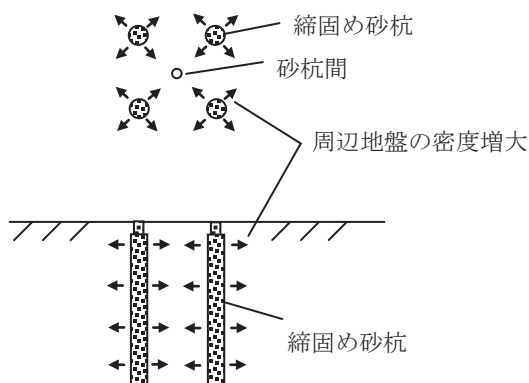


Fig. 1 締固め砂杭造成による改良効果

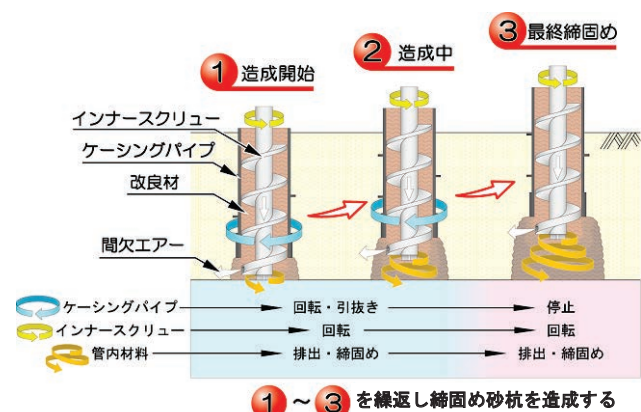


Fig. 2 締固め砂杭の造成メカニズム

* 技術研究所 地盤基礎研究グループ

** 株式会社日本海工 技術部

を行った後、所定深度までCPを正転貫入（半時計回り）させる。貫入後、CP管内に材料を投入する。CPから20cm程度インナースクリューを突出させ、間欠エアーを噴射、インナースクリューを駆動しつつ、CPを引抜き、締固め砂杭を造成する。締固め砂杭の造成時、CPは逆転（時計回り）、材料を排出させるためにインナースクリューは正転（半時計回り）とする。締固め砂杭は単位長さ1mごとに段階的に造成する方法（STEP施工）を標準としており、SCP工法で行う打戻しは行わない。

3. 改良効果の推定方法

締固め砂杭の改良仕様では、締固め後における砂杭間

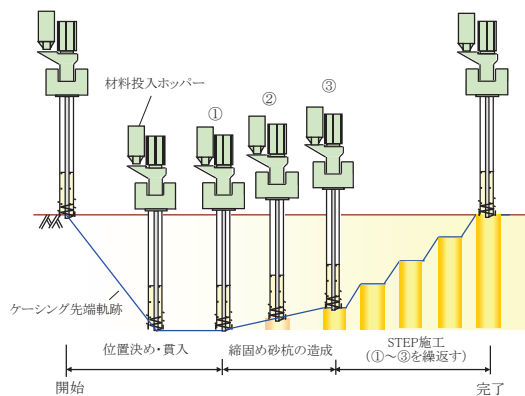


Fig. 3 締固め砂杭の造成手順

(Fig. 1) のN値が所定のN値（必要な杭間強度）となるように置換率 a_s を求め、必要な置換率が得られるように砂杭面積と打設間隔を決定する(式(1), (2), Fig. 4 参照)。

式(1)から分かるように必要な置換率 a_s を求めるためには改良後における砂杭間のN値と間隙比との関係などが必要となる。これらの推定方法として、従来、SCP工法などにおいては過去の施工実績に基づいた方法Cが採用

$$a_s = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} \quad (1)$$

ここに、 a_s ：置換率、 e_0 ：原地盤の間隙比
 e_1 ：改良後の地盤の間隙比

$$a_s = \frac{A_s}{x^2} \quad (\text{正方形配置の場合}) \quad (2)$$

ここに、 A_s ：締固め砂杭の断面積、 x ：打設間隔

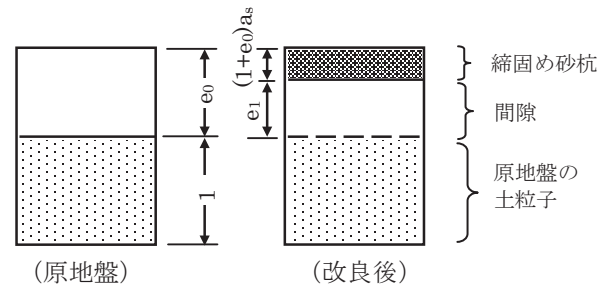


Fig. 4 締固め砂杭の改良原理

Table 1 砂杭間N値の算定手順^{2)一部加算修正}

方法 C	方法 D										
<p>(1)地盤の最大・最小間隙比の算定 細粒分含有率 F_c より e_{\max}, e_{\min} を求める。 $e_{\max} = 0.02F_c + 1.0$ $e_{\min} = 0.008F_c + 0.6$</p> <p>(2)原地盤の間隙比 e_0 の算定 原地盤の N 値 N_0 および拘束圧 σ_v' より相対密度 D_{r0} を算出し、e_0 を求める。 $D_{r0} = 21 \sqrt{\frac{N_0}{(0.7 + \sigma_v'/98)}}$ $e_0 = e_{\max} - \frac{D_{r0}}{100} (e_{\max} - e_{\min})$</p> <p>(3)改良後の間隙比 e_1 の算定 置換率 a_s を仮定し、e_1 を求める。 $e_1 = e_0 - a_s (1 + e_0)$</p> <p>(4)細粒分を考慮しない杭間 N 値 N_1' の算定 改良後の相対密度 D_{r1} より N_1' を求める。 $D_{r1} = \frac{e_{\max} - e_1}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100$ $N_1' = (0.7 + \sigma_v'/98) \left(\frac{D_{r1}}{21} \right)^2$</p> <p>(5)細粒分含有率に対する低減係数 β の算定 細粒分含有率 F_c より低減係数 β を求める。 $\beta = 1.05 - 0.51 \times \log_{10} F_c$</p> <p>(6)杭間 N 値 N_1 の算定 細粒分含有率を考慮した杭間 N 値 N_1 を求める。 $N_1 = N_0 + \beta (N_1' - N_0)$</p>	<p>(1)地盤の最大・最小間隙比の算定 方法 C と同じ。</p> <p>(2)補正 N 値増分 ΔN_f の算定 細粒分含有率 F_c による補正 N 値の増分 ΔN_f を求める。 <table border="1"> <thead> <tr> <th>$F_c(\%)$</th><th>ΔN_f</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0～5</td><td>0</td></tr> <tr> <td>5～10</td><td>1.2(Fc-5)</td></tr> <tr> <td>10～20</td><td>6+0.2(Fc-10)</td></tr> <tr> <td>20～</td><td>8+0.1(Fc-20)</td></tr> </tbody> </table></p> <p>(3)細粒分含有率を考慮した原地盤の間隙比 e_0 の算定 原地盤の N 値 N_0、ΔN_f および拘束圧 σ_v' より相対密度 D_{r0} を算出し、e_0 を求める。 $D_{r0} = 21 \sqrt{\frac{N_0}{(0.7 + \sigma_v'/98)} + \frac{\Delta N_f}{1.7}}$ $e_0 = e_{\max} - \frac{D_{r0}}{100} (e_{\max} - e_{\min})$</p> <p>(4)有効締固め係数 R_c の算定 細粒分含有率 F_c より有効締固め係数 R_c を求める。 $R_c = 1.05 - 0.46 \times \log_{10} F_c$</p> <p>(5)改良後の間隙比 e_1 の算定 置換率 a_s を仮定し、e_1 を求める。 $e_1 = e_0 - a_s \times R_c (1 + e_0)$</p> <p>(6)杭間 N 値 N_1 の算定 改良後の相対密度 D_{r1} より、細粒分含有率を考慮した杭間 N 値 N_1 を求める。 $D_{r1} = \frac{e_{\max} - e_1}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100$ $N_1 = (0.7 + \sigma_v'/98) \left\{ \left(\frac{D_{r1}}{21} \right)^2 - \left(\frac{\Delta N_f}{1.7} \right) \right\}$</p>	$F_c(\%)$	ΔN_f	0～5	0	5～10	1.2(Fc-5)	10～20	6+0.2(Fc-10)	20～	8+0.1(Fc-20)
$F_c(\%)$	ΔN_f										
0～5	0										
5～10	1.2(Fc-5)										
10～20	6+0.2(Fc-10)										
20～	8+0.1(Fc-20)										

Table 2 工事概要

件名	年 月	場所	規模・数量	使用材料	杭間強度の結果概要
A-1	平成 14 年 11 月	兵庫県 姫路市	$\phi 700\text{mm}$, $\square 2.0\text{m}$, $a_s=9.6\%$ $L=7.0\text{m}$ 12 本	砂	GL-2.0~7.0m(粘性土除く) 平均 N 値 前 7.4 後 13.8
B-1	平成 17 年 2 月~3 月	千葉県 浦安市	$\phi 650\text{mm}$, $\square 2.5\text{m}$, $a_s=5.3\%$ $L=13.5\text{m}$ 100 本	再生砕石 RC-40	GL-3.5~13.5m(粘性土除く) 平均 N 値 前 12.5 後 19.9
B-2	平成 19 年 7 月~8 月	三重県 四日市市	$\phi 700\text{mm}$, $\square 1.9\text{m}$, $a_s=10.7\%$ $L=12.6\text{m}$ 48 本 $L=11.7\text{m}$ 81 本	汚泥分級 リサイクル砂 リーサ	GL-3.5~13.5m 平均 N 値 前 13.8 後 29.3
B-3	平成 19 年 9 月~10 月	京都府 舞鶴市	$\phi 700\text{mm}$, $\square 1.8\text{m}$, $a_s=11.9\%$ $L=5.2\text{m}$ (平均) 848 本	ニッケル精錬 副産物 ナスント [®]	GL-1.5~6.5m 平均 N 値 前 6.7 後 20
B-4	平成 20 年 10 月 ~平成 21 年 2 月	岡山県 浅口市	$\phi 700\text{mm}$, $\square 1.3\text{m}$, $a_s=22.8\%$ $L=3.5\sim 4.2\text{m}$ 1487 本 $\phi 700\text{mm}$, $\square 1.4\text{m}$, $a_s=19.6\%$ $L=2.7\sim 4.2\text{m}$ 696 本 $\phi 700\text{mm}$, $\square 1.7\text{m}$, $a_s=13.3\%$ $L=3.7\text{m}$ 108 本	再生砕石 RC-40	GL-0.35~4.05m 平均 N 値 前 5.0 後 9.7
B-5	平成 21 年 7 月~8 月	三重県 津市	$\phi 700\text{mm}$, $\square 1.9\text{m}$, $a_s=10.7\%$ $L=10.0\text{m}$ 260 本	購入砂	GL-1.5~10.0m 平均 N 値 前 11.2 後 23.0
B-6	平成 21 年 12 月 ~平成 22 年 1 月	東京都 足立区	$\phi 750\text{mm}$, $\square 1.55\text{m}$, $a_s=18.4\%$ $L=5.0\text{m}$ 990 本	再生砕石 RC-40	GL-1.5~5.0m 平均 N 値 前 3.4 後 7.4
B-8	平成 22 年 2 月~3 月	名古屋市 中川区	$\phi 700\text{mm}$, $\square 2.5\text{m}$, $a_s=6.2\%$ $L=10.4\text{m}$ 48 本	購入砂	GL-3.4~10.4m 平均 N 値 前 12.5 後 17.5
B-9	平成 22 年 6 月~7 月	東京都 江東区	$\phi 700\text{mm}$, $\square 2.2\text{m}$, $a_s=8.0\%$ $L=16.5\text{m}$ 80 本 $\phi 700\text{mm}$, $\square 2.35\text{m}$, $a_s=7.0\%$ (下 1m は $\phi 750\text{mm}$, $a_s=8.0\%$) $L=7.5\text{m}$ 1063 本	再生砕石 RC-40	$\square 2.2\text{m}$, FL-2.0~16.5m 平均 N 値 前 4.4 後 8.3 $\square 2.35\text{m}$, FL-1.7~7.5m 平均 N 値 前 4.2 後 8.7

注：規模・数量における□は締固め砂杭が正方形配置であることを示し、つづく数値は打設間隔を示す。

されていたが、最近では締固め砂杭施工時に生じる地盤の盛り上りを考慮できる方法 D²⁾ が主流となってきた^{3),4)}。

方法 C と方法 D による砂杭間 N 値の算定手順を Table 1 に示す。両方法ともに、地盤の相対密度 D_r を介して N 値から間隙比を推定している。方法 C では締固め砂杭の打設による地盤の盛り上りを考慮せず、締固め砂杭の造成はすべて地盤の密度増加に寄与する (Fig. 4 参照) のものとし、改良後の間隙比 e_1 を設定しているのに対して、方法 D では有効締固め係数 R_c を用いることで地盤の盛り上りを考慮している点が異なる。すなわち、Fig. 5 に示すように地盤の盛り上り体積として $(1-R_c)(1+e_0)a_s$ を考慮し、改良後の間隙比 e_1 を設定している。有効締固め係数 R_c は、Table 1 の方法 D に示すように細粒分含有率 F_c と関連付けされており、 F_c が多いほど R_c は小さくなり、盛り上り量は多くなる。

4. 検証結果

4. 1 実工事概要

改良効果の推定方法を検証した工事の概要を Table 2 に示す。これらの内、A-1 は実証実験として実施した実験工事であり、他の B-1~B-9 は実工事である。なお、B-7 は改良後における砂杭間の N 値を計測していなかったため、検証データからは削除している。

本工法における締固め砂杭の設計径は $\phi 700\text{mm}$ を標準としており、一部の事例では $\phi 650\text{mm}$ または $\phi 750\text{mm}$ とし

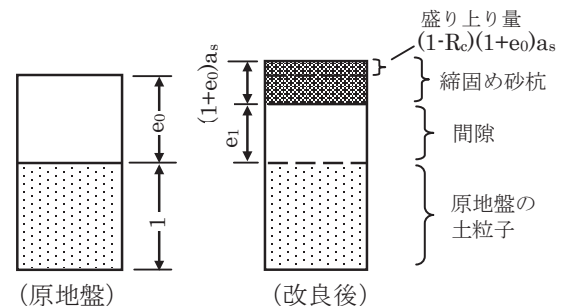


Fig. 5 有効締固め係数 R_c の考え方²⁾

ている。砂杭の打設間隔は、置換率 a_s が小さい 5.3% の場合 2.5m、置換率が大きい 22.8% の場合 1.3m であり、いずれの工事においても締固め砂杭の配置は正方形配置としている。

4. 2 建築工事での結果

Table 2 に示した工事の内、ここでは当社施工である建築工事 (B-1, B-6, B-9) における検証結果を示す。これらの建物は 2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災において震度 5 強の揺れが生じているが、建物に被害は無く、また、敷地内において液状化は発生していない。

(1) B-1 工事

B-1 工事は、千葉県浦安市の新浦安地区の臨海埋立地に建つブライダル施設の建築工事であり、べた基礎による直接基礎形式である。液状化対策として深度-13.5m まで本工法による地盤改良を行っている。なお、締固め砂杭に用いた材料は再生砕石 (RC-40) であり、砂杭径は 650mm、置換率は 5.3% である。

Fig. 6に改良後に実測した杭間N値の深度方向分布を示す。深度-4.5 mからの粘性土を除き、杭間N値は改良前に比べ増加している。

方法Cと方法Dによる各計算N値をFig. 6に併記しているが、置換率は5.3%と小さく、両方法による計算N値には大差ない結果となっている。なお、実測N値は概ね計算N値を上回っている。

(2) B-6 工事

B-6 工事は、東京都足立区の閑静な住宅街の一角に建つ福祉施設の建築工事である。杭基礎支持による建物であるが、杭頭付近における液状化対策として本工法が採用されている。締固め砂杭に用いた材料は、B-1 工事と同様に再生砕石であり、砂杭径は 750mm、置換率は 18.4%である。

Fig. 7に見られるように方法Cによる計算N値に比べ、方法Dによる計算N値は1~2程度大きくなっており、実測N値との整合性は方法Dの方が良いことが分かる。

(3) B-9 工事

B-9 工事は、東京都江東区の臨海部再開発地域に建つプライダル施設の建築工事である。建物の基礎は、べた基礎または布基礎による直接基礎形式である。液状化対策として本工法による地盤改良を行っているが、改良深度は建物の重要度等を考慮し、深くまで改良する場合(CASE1: L=16.5m)と浅い場合(CASE2: L=7.5m)の2タイプとしている。締固め砂杭に用いた材料は、再生砕石であり、その他の仕様はTable2に示すとおりである。

Fig. 8に示すようにB-6 工事と同じく、方法Cによる計算N値よりも方法Dによる計算N値は1~2程度大きく、全体的に実測N値との整合性が良くなっている。

4. 3 考察

(1) 方法Cと方法Dの比較

Table2に示した全工事における杭間実測N値と方法Cまたは方法Dを用いて算定した杭間計算N値との関係をFig. 9に示す。ある程度のばらつきはあるものの、計算N値が20付近におけるデータ(4点)を除くと、プロット点は45度の線上付近に概ね集中しており、方法Cおよび方法Dによる計算N値はともに実測N値との整合性が高いことが分かる。

方法Cと方法Dによる杭間計算N値の比較をFig. 10に示す。方法Cに比べ、方法Dによる計算N値は全体的に1~2程度大きくなり、実測N値との整合性はより高くなっている。特に細粒

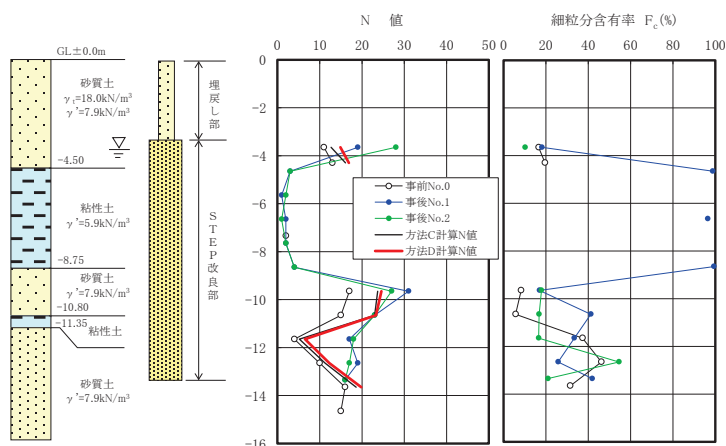


Fig. 6 改良後における杭間N値 (B-1 工事)

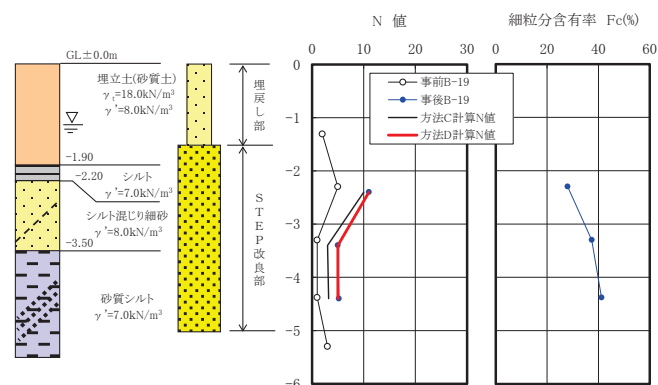
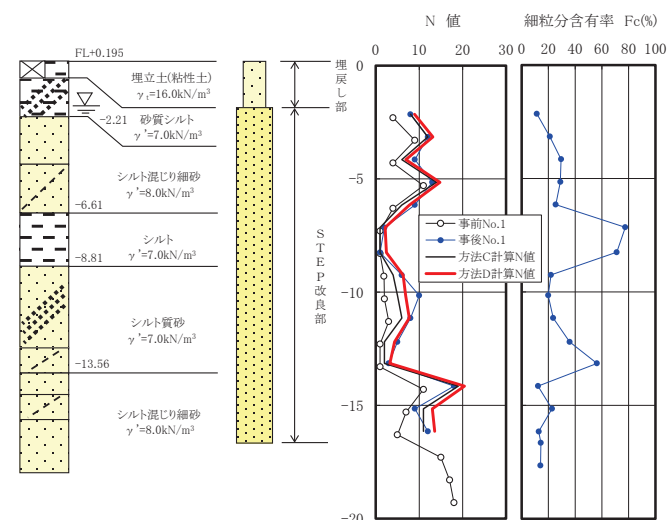
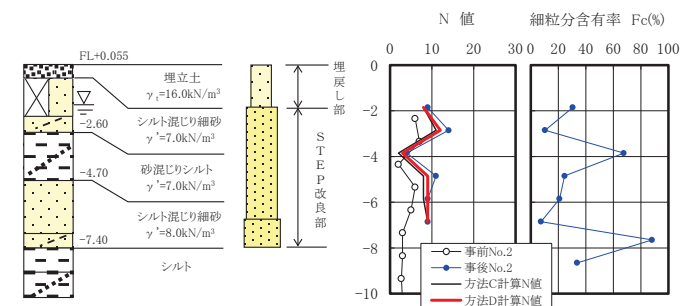


Fig. 7 改良後における杭間N値 (B-6 工事)



(1) CASE1



(2) CASE2

Fig. 8 改良後における杭間N値 (B-9 工事)

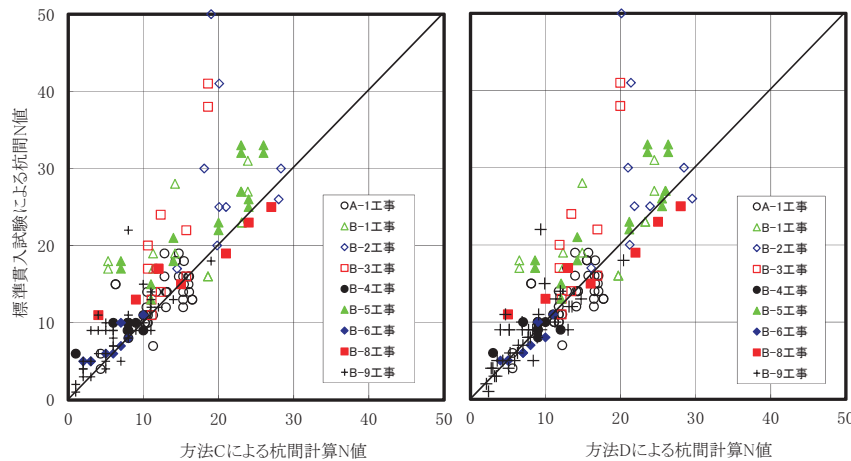


Fig. 9 計算N値と実測N値の比較

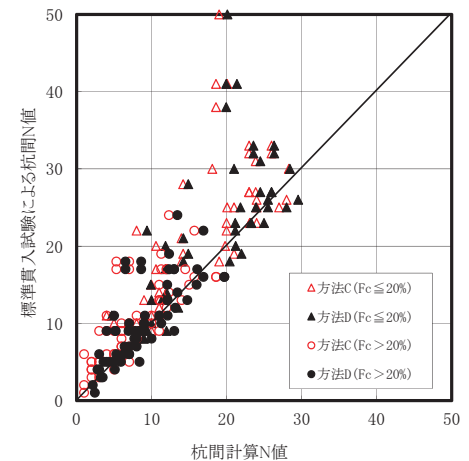


Fig. 10 方法Cと方法Dによる杭間計算N値の比較

分含有率 F_c が多い場合 ($F_c > 20\%$) の整合性が良い。

(2) 本工法と SCP 工法の比較

全工事における杭間実測 N 値の結果と細粒分含有率 F_c との関係を Fig. 11 に示す。ただし、縦軸の実測 N 値は有効上載圧によって基準化した N 値 ($N_{基準}$) を用いている (式(3)参照)。Fig. 11 から、細粒分含有率が多くなると杭間 N 値は小さくなる傾向にあることが分かる。

$$N_{基準} = 167 \cdot N / (69 + \sigma_v') \quad (3)$$

ここに、 $N_{基準}$: 基準化した N 値

N : 実測 N 値

σ_v' : 有効上載圧 (kN/m^2)

Fig. 11 に示した杭間 N 値のデータについて、SCP 工法との比較を行うために、参考文献 5) と同様に細粒分含有率を 10% ごとく範囲に区分し、各範囲に入る杭間 N 値のデータを統計処理した。Fig. 12 より、 F_c が 0~10% の範囲では、本工法の方が SCP 工法を上回っているが、全体的には本工法における杭間 N 値は SCP 工法における値とほぼ同じ値となり、細粒分含有率に対する傾向も同様であることが分かる。

5. まとめ

実証実験工事を含め、本工法が適用された実工事において改良後における杭間実測 N 値と方法 C および方法 D による杭間計算 N 値との比較検討を行った。その結果、以下のことが検証できた。

- (1) 方法 C および方法 D による杭間計算 N 値は実測 N 値と整合性が良く、本工法における改良効果の推定方法として両方が適用できる。
- (2) 方法 D による杭間計算 N 値は方法 C による杭間計算 N 値よりも 1~2 程度大きく、実測 N 値との整合性は方法 C よりも良い。特に細粒分含有率が 20% を超える場合に有効である。
- (3) 細粒分含有率が多くなると杭間 N 値は小さくなる傾向を示し、その特性は SCP 工法と同様である。

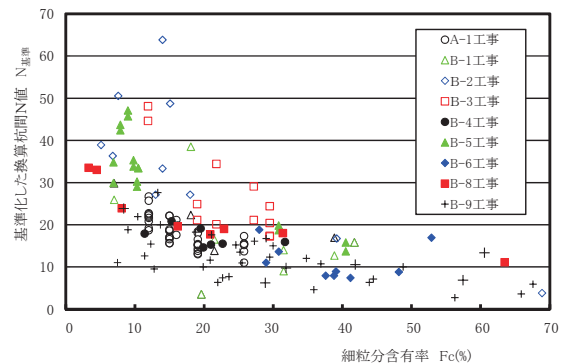
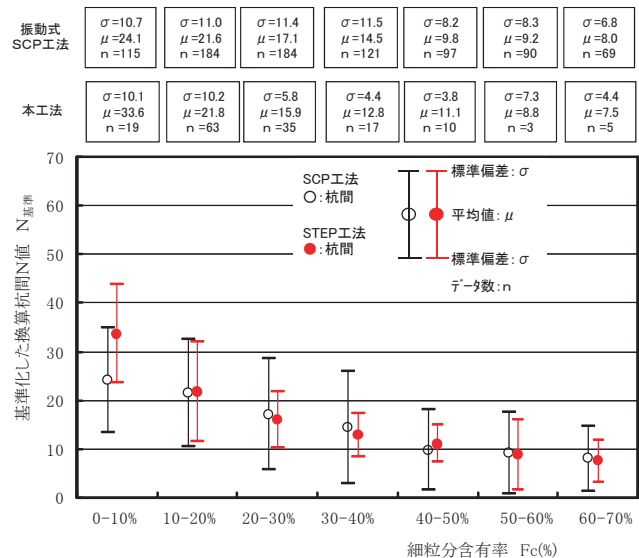
Fig. 11 原地盤の F_c と杭間 N 値の関係

Fig. 12 本工法と SCP 工法の杭間 N 値の比較

今後も継続してデータ収集を行い、杭間 N 値の推定精度を向上させていく予定である。

謝辞

本工法の開発は、日本海工(株)との共同開発であり、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) 渡辺則雄, 服部正裕: 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, 熊谷組技術研究報告 第 67 号, pp. 43-50, 2008. 12
- 2) 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, pp. 96-101, 2009
- 3) 日本建築学会: 建築基礎のための地盤改良設計指針案, pp. 333, 2006. 11
- 4) 日本道路協会: 道路土工 軟弱地盤対策工指針 (平成 24 年度版), pp. 271-278, 2012. 08
- 5) 原田健二, 石田英毅: 大地震における建築構造物の締固めによる直接基礎改良地盤の評価に関する実証的研究, 実務に見る地盤改良工法の技術的諸問題 (日本建築学会), pp. 93-98, 1999

Inspection about the Estimated Method of Improved Effect by the Static Sand Compaction Pile Method (STEP Method of Construction)

Toshihiro MORI and Takashi SHINOI

Abstract

While the construction demand against liquefaction in an urban district or near the existing structure increases, we developed the static sand compaction pile method using the rotating torque of an inner screw. We had reported improved effect of this construction method and noise and vibration properties based on the result of the proof experiment construction that we carried out at the time of development by the previous announcement. In this report we examined applicability of the new method D as an estimated method of the improved effect in addition to the conventional method C based on the result in the actual construction.

Key words: Soil improvement, Static compaction, Improved effect, N-value
