

従来のサンドコンパクションパイル工法と異なるメカニズム を持つ新しい液状化対策工法

大成建設株式会社
三信建設工業株式会社
大成ロテック株式会社
成和リニューアルワークス株式会社

廻田 貴志
○ 山口 洋
山田 敏広
池田 禎健

1. はじめに

密度増大系の代表的な液状化対策工法であるサンドコンパクションパイル工法は、市街地の施工においては、振動・騒音などの課題があるため、比較的高価な静的締固め砂杭工法の適用場面が増えている。筆者らは低振動・低騒音で地盤密度を増大させる新しい液状化対策工法（TS-improver 以下、本工法と称す）を開発し、従来の締固め砂杭工法より効率的に設計・施工できることを確認した。

本稿では、工法概要および本工法の特長を示すとともに、改良原理、締固め効果および地盤変位、振動・騒音の測定例について紹介する。

2. 工法概要

本工法は碎石などの中詰材を地盤に供給し、拡径しながら改良杭を造成することで周辺地盤を締固める密度増大工法である。本工法の施工状況および施工機の構成を図-1 に示す。本工法の施工は、汎用的なクローラークレーンに専用のバイプロユニットを吊り下げて行う。バイプロユニットは中詰材投入用のホッパー、中詰材を地盤に供給するサイロチューブ（ケーシング）、先端で高周波振動を発生させるバイプロフロットなどで構成される。中詰材の地盤への供給と拡径はバイプロユニットの引上げと打戻しを繰り返すことにより行う。本工法は図-2 に示す以下の手順で施工を行う。

- ① 所定の施工ポイントにバイプロユニットを据え付ける。
- ② バイプロフロットを起振し、バイプロユニットの先端からエアまたは水を噴射しながら改良杭下端深度まで貫入する。
- ③ バイプロユニット頂部のホッパーに中詰材を投入し改良杭の造成を開始する。
- ④ バイプロフロットを振動させながら所定長さの「引上げ」と「打戻し」を交互に繰り返して締固めを行う。
- ⑤ 中詰材を補給しながら所定深度まで締固めを行う。



図-1 施工状況および施工機の構成

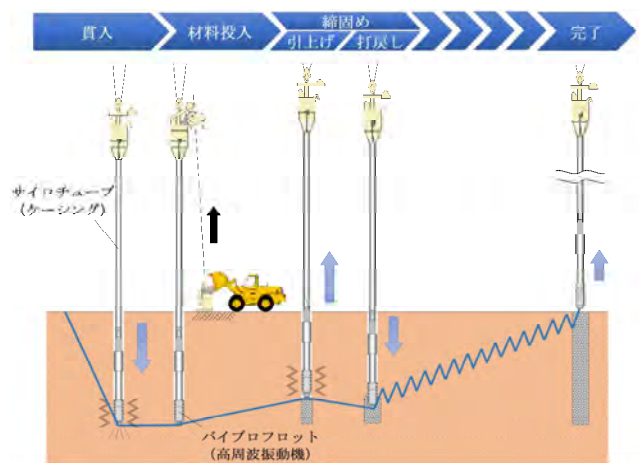


図-2 施工手順

3. 工法の特長

本工法は以下の特長を有する。

- ① 高周波振動機の振動は大きな距離減衰を持つため、低振動・低騒音の施工が可能。
- ② 打戻しの拡径効果に加えて、水平方向の振動が地盤に作用するため、従来技術に比べて高い締固め効果が発揮できる。そのため、直径φ800mmの改良杭と同等以上の改良効果が期待

できる。

- ③ クローラクレーン等の汎用性の高いベースマシンにて施工可能であり、三点支持式のサンドパイル打設機等の特殊大型機械は不要である。
- ④ 施工機の先端から中詰材を供給するボトムフィード方式を用いているため、中詰材供給量を把握でき、改良杭の品質を確保できる。
- ⑤ 施工管理計器により、改良効果確保のための適切な施工管理が可能であり、専用の帳票化システムにより出力されたデータを確認することで、適切な施工が実施できたかを迅速に判断できる^り。(図-3、図-4)
- ⑥ 標準として中詰材は調達が容易で安価な再生砕石 RC-40 を使用する。その他として RC10-40、砕石 C-40 などを使用することができる。(写真-1)



写真-1 使用中詰材

4. 改良原理と締固め効果²⁾³⁾⁴⁾

4.1 改良原理

本工法の改良原理の概念図を図-5 に示す。パイプロットの上昇で排出された中詰材は打戻しによって拡径される。周辺地盤の締固めは次の工程で行われる。

引上げ：パイプロットの上昇とサイロチューブ内の空気の加圧により、地盤内に中詰材を供給する。

打戻し：パイプロットの上昇と打戻しにより、中詰材を水平方向に押し広げながら、地盤内に中詰材を圧入する。

締固め：引上げと打戻しを繰り返しながら改良杭を造成し、周辺地盤を締固める。パイプロットによる振動エネルギーを直接地盤に加えながら改良杭を造成する。

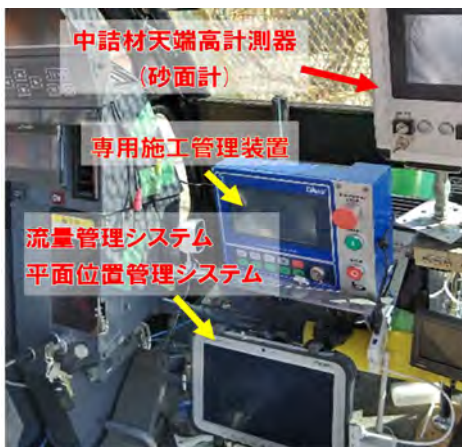
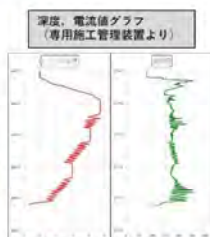


図-3 施工管理計器

施工位置、傾斜角 (平面位置管理システム、専用施工管理装置より)						
座標	実測値	計画値	計画との差	実測ズレ	管理値	判定
X	4990.375	4990.391	-1.6 cm	5.7 cm	±10 cm	OK
Y	1007.221	1007.276	-5.5 cm			
傾斜角	実測値	計画値	実測公差	精度	管理値	判定
X	0.0	0.0	0.0	1/ 100	1/ 100	OK
Y	0.0	0.0	0.0			

貫入深度、内圧等 (専用施工管理装置、流量管理システムより)			
項目	実測値	管理値	判定
貫入深度	7.51 m	7.50 m以上	OK
電流量	138 ~ 225 A	240 A以下	OK
内圧	0.0 ~ 0.3 bar		
エア量(上)	0.0 ~ 3.0 m³		
エア量(下)	0.0 ~ 0.0 m³		
傾斜角 X	-0.4	1/ 141.5	1/ 50 OK
傾斜角 Y	0.2	1/ 239.8	1/ 50 OK



仕上高、ストローク (専用施工管理装置より)			
ストローク	1	2	
開始	終了	高さ	開始
引上げ開始	-7.51	-6.09	1.42
打戻し開始	-6.09	-7.25	1.16
仕上げ高さ		0.26	0.28
判定		OK	OK

図-4 出力帳票例 (抜粋)

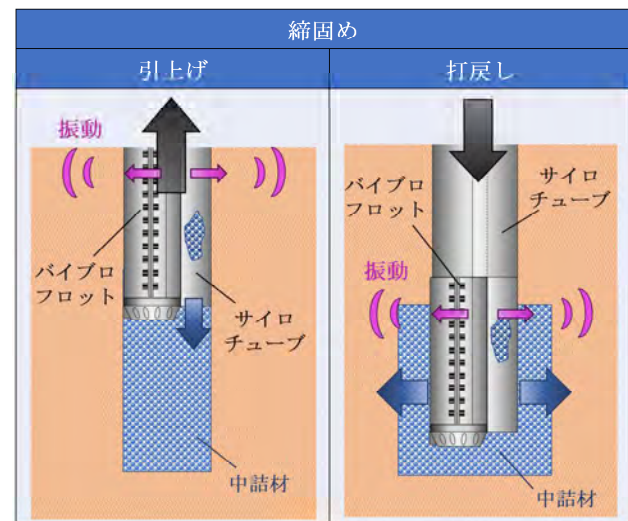


図-5 改良原理の概念図

4.2 締固め効果

前述のように、本工法の締固めのメカニズムとして振動による動的なエネルギーが地盤に伝達される効果と、中詰材の圧入による静的なエネルギーが地盤に伝達される成分が重ね合わされていると考えられる。

ここで締固め効果を整理するにあたり、締固め効果の推定法として山崎が提案する方法⁵⁾(以下、 κ 法と称す)を採用した。 κ 法は N 値、相対密度および累積せん断ひずみの関係を利用し、改良後 N 値を推定する方法であり、本工法の締固めメカ

ニズムにより近いものと考えた。

本工法では、振動と中詰材の圧入それぞれの作用によって、累積せん断ひずみが増加していると考えられる。各作用による累積せん断ひずみの増分を求め、その和から本工法による累積せん断ひずみの増分を求めることが望ましいが、現状ではそれぞれの寄与度を個別に算定することは困難である。よって、 κ 法にて、圧入と振動による累積せん断ひずみの増分を、圧入のみの成分に換算した場合に、どの程度の換算径とすればよいか検討を行ったところ、等価な改良体の直径を $\phi 800\text{mm}$ 程度と推定すると改良効果としての N 値の測定結果と整合することが分かった。以上より、換算径 $\phi 800\text{mm}$ として求めた改良率 α_s から κ 法を用いて改良後推定 N 値を算定する。なお、 κ の値はSCP工法に対する提案式である式(1)を用いた。

$$\kappa = 5 \times 10^{-0.01F_c} \dots\dots\dots (1)$$

過去の試験施工における柱状図および改良前後の実測 N 値と改良後推定 N 値の一例を図-6に示す。この事例では改良深度はGL-0.0m~7.5mであり、GL-3.0m~6.0mは細粒分含有率が比較的高く N 値の増加が得られにくいと想定された。また、GL-7.5m以深は、 N 値が20を超える地盤であるため、適用範囲外とした。改良杭の配置は正三角形配置とし改良杭の間隔は、換算の杭径 $\phi 800\text{mm}$ から、改良率が10, 15, 20%となるようにそれぞれ1.7, 2.0, 2.4mに設定した(図-7)。図-6に示すように、3ケースともに細粒分含有率20%以下のほぼ全ての深度で改良後実測 N 値は、改良後推定 N 値より高い値であった。

上記の一例を含む過去の試験施工において、改良率10~20%の範囲で実施した改良後実測 N 値と換算径 $\phi 800\text{mm}$ より算出した改良後推定 N 値の関係を図-8に示す。この相関図に示されるように、概ね推定 N 値と実測 N 値は整合しており、改良後 N 値を推定する際に用いる換算径 $\phi 800\text{mm}$ の妥当性を改めて確認することができた。

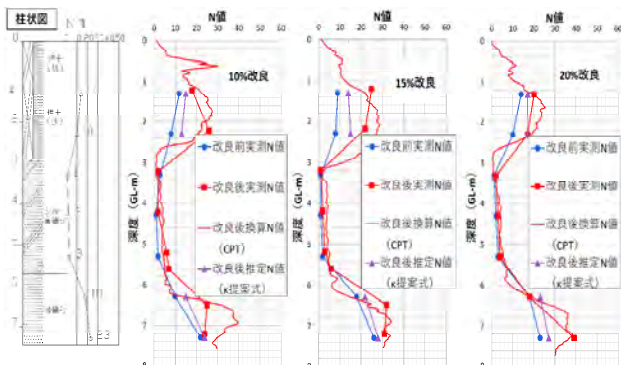


図-6 改良前後 N 値の測定結果と改良後推定

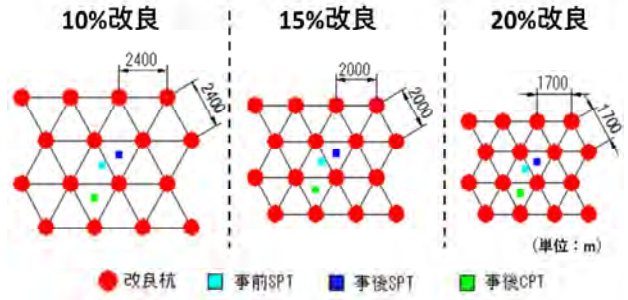


図-7 改良杭配置

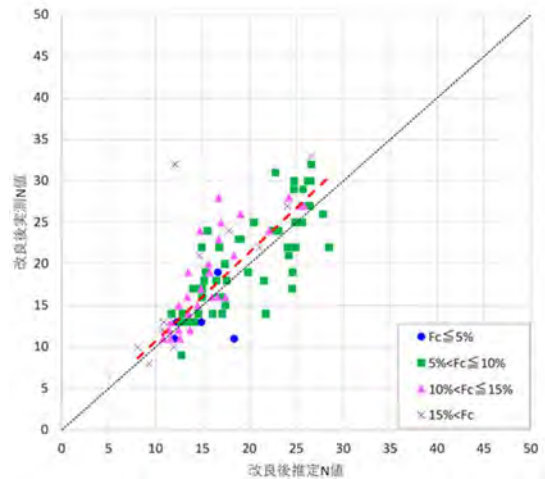


図-8 改良後推定 N 値と改良後実測 N 値の関係
(改良深度0~10mのデータ)
※ $\phi 800\text{mm}$ として推定値を算定

5. 周辺環境への影響

周辺環境への影響として、過去の試験施工における地盤変位(水平変位)および騒音・振動の測定結果について報告する。

5.1 地盤変位(水平変位)

砂地盤を対象とした水平変位の測定結果を図-9に示す。本工法の水平変位は約-5.1cm~+1.1cmの範囲であり、サンドコンパクションパイル工法と比較して低い値である。例えば、改良杭から比較的近い $\theta=10^\circ$ の位置では、本工法の水平変位は5cm程度であるのに対して、サンドコンパクションパイル工法は20cm程度であり、7割以上低い値である。

さらに、一部のデータでは負の水平変位を示している。これは中詰材の圧入による体積が増大する効果より施工箇所周辺の地盤間隙比が減少(密度増大)する効果のほうが優勢であることを反映したものである。

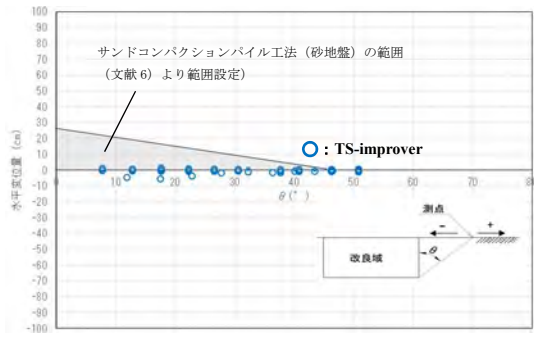


図-9 地盤変位（水平変位）の測定結果

5.2 振動・騒音⁷⁾

振動・騒音レベルの測定結果を図-10に示す。振動・騒音レベルともにサンドコンパクションパイル工法よりも低い値である。例えば、改良杭から30mの位置にて近似曲線で比較した場合、本工法の振動レベルは60dB、騒音レベルは65dB程度であるのに対して、サンドコンパクションパイル工法の振動レベルは80dB、騒音レベルは85dB程度であり、ともに20dB程度低い値である。なお、騒音レベルについては、概ね静的締固め砂杭工法と近い値である。

本工法における振動源は地中にて稼働するパイプロットのみであるため、低騒音の施工が可能である。また、パイプロットの周波数は30Hz（標準）と高周波であることから、振動の距離減衰が大きく、遠くまで振動が伝搬することはないため、低振動の施工が可能である。

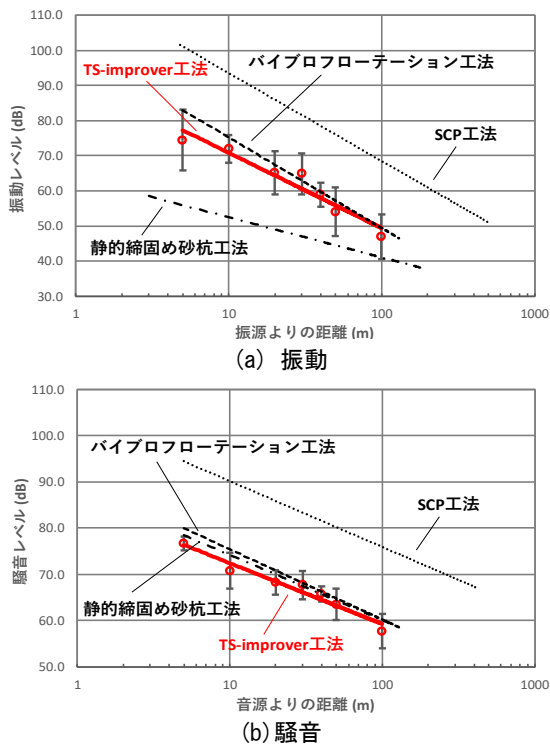


図-10 振動・騒音の測定結果

5. まとめ

低振動・低騒音で地盤密度を増大させる新しい液状化対策工法であるTS-improverを開発した。本工法を用いた試験施工の結果などにより、中詰材の圧入による拡径と水平振動の相乗効果によって直径φ800mmの改良杭と同等以上の改良効果があることが確認された。また、周辺環境へ影響として水平変位および振動・騒音レベルの測定結果を示した。その結果として、従来の締固め砂杭工法より低い値であり、周辺環境へ影響も少ない工法であることが確認された。

参考文献

- 1) 廻田・本谷・青木・池田：低振動・低騒音の新液状化対策工法（TS-improver工法）－帳票システムを用いた施工管理について－，第77回土木学会年次学術講演会，2022（投稿中）
- 2) 村田・本谷・湯川・池田：低振動・低騒音の新液状化対策工法－改良後N値の推定方法について－，第75回土木学会年次学術講演会，p.VI-154，2020
- 3) 太田・本谷・山田・大高：低振動・低騒音の新液状化対策工法（TS-improver）－改良後N値推定方法の考察－，第76回土木学会年次学術講演会，p.VI-106，2021
- 4) 太田・本谷・山田・大高：低振動・低騒音の新液状化対策工法（TS-improver工法）－品質管理に対する考え方－，第77回土木学会年次学術講演会，2022（投稿中）
- 5) 港湾空港技術研究所：港湾空港技術研究所資料 液状化対策としての締固め工法の設計法に関する研究 No.1220，2010
- 6) 地盤工学会：地盤改良の調査・設計と施工－戸建住宅から人工島まで－，p.111，2013
- 7) 中西・山口・青木・池田：低振動・低騒音の新液状化対策工法（TS-improver）－2020年度実験 改良効果と騒音・振動について－第76回土木学会年次学術講演会，p.VI-105，2021