

表層改良と杭式改良体を併用した 液状化側方流動対策工法の実証試験

Field Experiment of Pile-type Improvement and Shallow Mixing against Flow of Liquefied Ground

戸村 豪治 GOJI TOMURA

高橋 直樹 NAOKI TAKAHASHI

土木設計部 津田和夏希 WAKAKI TSUDA

土木技術部 草竹 真也 SHINYA KUSATAKE

筆者らは、深層混合処理工法における新たな改良杭配置方法である流動閉塞杭を提案し、液状化に伴う側方流動の抑制効果に関する検討を実施してきた。表層地盤改良と改良杭を組み合わせて一つの構造とした例はこれまでにあまり報告されておらず、施工性や結合部の品質に関して不明な点も多い。表層改良地盤上からの杭式深層混合処理の施工性や、改良杭施工時の表層改良地盤の硬化状態による杭頭結合部の性能の違いについて確認し、さらに杭頭結合部の固定条件を考慮した設計法へ反映させることを目的として、実施工で想定している流動閉塞杭の施工性確認のための現地試験を実施した。その結果、改良杭は表層改良の固化の状態によらず施工可能であり、改良杭と表層改良が一体となった良好な構造体の施工が可能であることが確認できた。

キーワード：液状化、側方流動、深層混合処理工法

The authors have proposed cement-treated soil columns against liquefied ground flow, and examined the effect of the countermeasure. There are not much research on the combination of shallow mixing and columnar improvement into one structure so far and there remains many unknown points on the workability and the quality of the joint part. Field tests were conducted to confirm the workability of columnar improvement from shallow mixing ground and the performance of the pile head joint and to establish a design method considering the fixing conditions of the pile head joint. As a result, it was confirmed that the columnar improvement can be constructed regardless of the state of shallow mixing, and that it is possible to construct a high quality structure by this construction method.

Key Words: liquefaction, lateral flow, deep mixing

1. はじめに

地震時に発生する液状化に伴い、地盤が水平方向に大きく変位する現象は側方流動と呼ばれ、基礎構造物や地下埋設構造物の震害の大きな原因となっている。液状化に伴う側方流動を防止する根本的な方法は、液状化の発生を抑制することであるが、対象範囲が広域に及ぶ場合には大きな費用が必要となるため、側方流動を抑制する合理的な対策が必要であると考えている。そこで、筆者らは低改良率の杭式改良を用いて、未改良部の液状化は許容しつつも側方流動を抑制する対策として、杭式深層混合処理工法に適用可能な改良杭配置である流動閉塞杭を提案し、対策効果の最大化を目指して様々な検討を進めて

いる¹⁾。

本構造では杭頭部を表層改良と一体化することで杭頭部の回転を拘束し、水平力に対して抵抗する機構を採用しており、施工に際しては、最初に表層改良を行った後、改良地盤上から杭式深層混合処理によりセメント系固化材スラリーと原位置土を攪拌混合して改良杭の構築を行う。このように表層地盤改良と改良杭を組み合わせて一つの構造とした例はこれまでにあまり報告されておらず、施工性や結合部の品質に関して不明な点も多い。そこで、表層改良地盤上からの杭式深層混合処理の施工性や、改良杭施工時の表層改良地盤の硬化状態による杭頭結合部の性能の違いについて確認し、さらに杭頭結合部の固定条件を考慮した設計法へ反映させることを目的として、

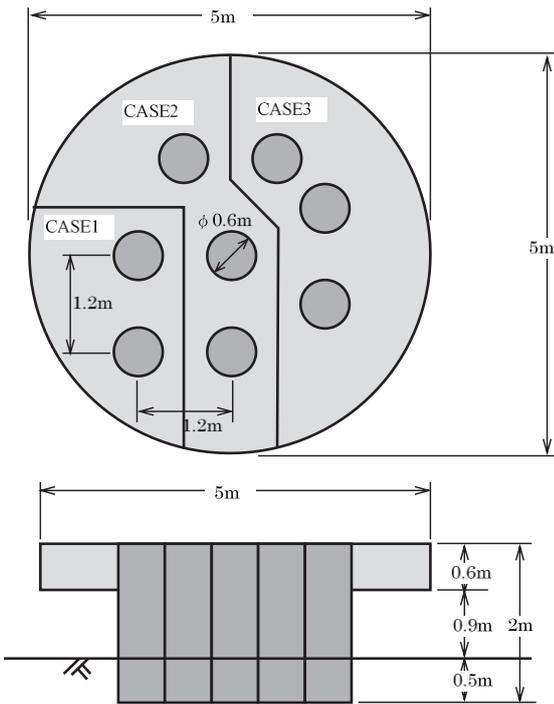


図-1 試験体配置図

表-1 試験ケース

試験ケース	概要	施工方法
CASE1	表層改良部硬化後に改良杭を施工	表層改良施工後に所定期間(28日)養生を行い、強度1000kN/m ² 発現後に改良杭の施工を実施する。
CASE2	表層改良部硬化前に改良杭を造成	表層改良施工時に遅延剤を添加して硬化を遅らせたうえで、2日後に改良杭の施工を実施する。
CASE3	表層改良と改良杭を同時に施工	表層改良を実施した後、概ね4時間以内に改良杭の施工を実施して、表層改良と改良杭の一体化を図る。

表-2 使用材料

種類	材料名	備考
地盤材料	山砂	稲敷郡三浦村産、w _n =17.2% 細粒分まじり砂(SF)
固化材	高炉セメントB種	太平洋セメント(株)製
混和剤	ジオリター (ソイルメント用遅延剤)	主成分:オキシカルボン酸塩 (株)フローリック製

実施工で想定している流動閉塞杭の施工性確認のための現地試験を実施した。

2. 試験方法

(1) 試験概要

施工性確認のための現地試験では、図-1に示すようにφ5m×深さ2mの模擬地盤中に、厚さ0.6mの表層改良を表-1に示す3ケースで施工し、その後、深層混合処理機を用いて杭径φ0.6m×深さ2mの改良杭の施工を行った。養生期間経過後に改良杭周辺を掘削して一体とな

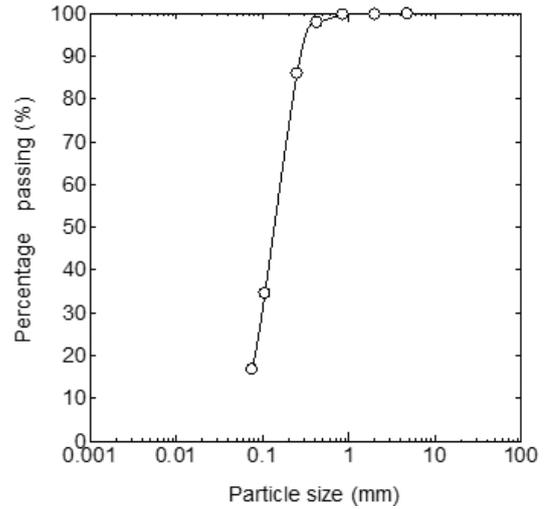


図-2 模擬地盤材料の粒径加積曲線

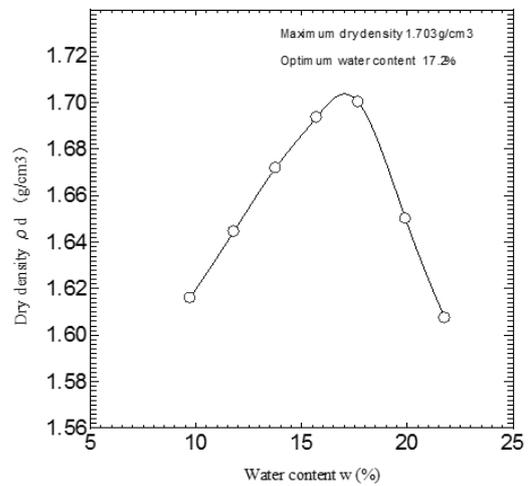


図-3 模擬地盤材料の締固め特性

った表層改良と改良杭を取り出し、出来形を目視により確認するほか、品質確認試験を実施した。

(2) 材料及び配合

現地試験に使用した材料を表-2に、模擬地盤材料用の山砂の粒度分布および締固め特性を図-2、図-3にそれぞれ示す。

表層改良および改良杭の設計強度はともに1000kN/m²とし、事前に室内配合試験を実施して配合を決定した。模擬地盤材料の性状から(現場/室内)強度比を0.66とし、室内配合試験における28日材齢での一軸圧縮強度の目標値は1500kN/m²とした。

また、CASE2は遅延剤を使用して硬化を遅らせた状態で表層改良施工から数日後に改良杭の施工を行う条件としているが、CASE3の同時施工条件においても表層改良の施工開始から改良杭の施工完了まで4時間以上要するこ

表-3 使用材料

項目	表層改良	改良杭
地盤材料	稲敷郡三浦村産山砂(細粒分まじり砂(SF))	
設計基準強度	1000kN/m ² (室内目標強度 2000kN/m ²)	
固化材の種類	高炉セメントB種 太平洋セメント(株)製	高炉セメントB種 住友大阪セメント(株)製
固化剤添加量	140kg/m ³	110kg/m ³
水・固化材比	W/C=170%	W/C=120%
遅延剤種類	ジオリター10 (株)フローリック製	—
遅延剤配合	CASE1 遅延剤無し CASE2,3 5.6kg/m ³ (C×4%)	—



図-4 模擬地盤作製状況 (型枠組立)



図-5 模擬地盤作製状況 (地盤作製)



図-6 模擬地盤材料の練混ぜ状況



図-7 表層改良の施工状況

表-4 各ケースの配合および養生日数 (表層改良)

項目	CASE①	CASE②	CASE③
地盤材料	稲敷郡三浦村産山砂 (細粒分まじり砂(SF))		
設計基準強度	1000kN/m ²		
固化材の種類	高炉セメントB種 太平洋セメント(株)製		
固化剤添加量	140kg/m ³		
水・固化材比	W/C=170%		
遅延剤添加量	—	ジオリター10 5.6kg/m ³ (C×4%)	
養生日数	26日	2日	同時施工

とからCASE2と同様に長期強度の発現性に影響を与えない範囲で初期硬化を遅らせるために遅延剤を添加することとした。

表-3に決定したそれぞれの配合を示す。

(3) 施工方法

a) 模擬地盤

施工性確認のための現地試験の模擬地盤は、φ 5 m×高さ 2 m の鋼製型枠を用いて地上で作製した。使用した地盤材料の自然含水比は約 20% で、最適含水比である 17.2% よりやや高かったが、特に含水比調整は行わずに自然含水比の状態で使用した。まず、型枠内部に底部から層厚0.2mずつランマおよびプレートコンパクターを用いて締め、層ごとに「コアカッターによる土の密度試験 (JGS:1613)」を行って、締め度度が概ね 95% となるよう、全部で7層に分けて高さ 1.4 m まで模擬地盤を作製した。模擬地盤の作製状況を図-4、図-5に示す。

b) 表層改良地盤

鋼製型枠の周囲に採石で重機用足場を造成した後、型枠内の上部 0.6 m の箇所を図-1に示す三区画に分けて、それぞれCASE1～CASE3の施工エリアとした。

表層改良地盤の材料は、図-6に示した鋼製箱 (ベッセ

表-5 主要機械一覧

機械名	形式	数量
杭打機本体	GI-80C-HT-K II	1
攪拌ヘッド	ヘッド径 φ600	1
プラント	半自動プラント	1
グラウトポンプ	グラウトポンプ	1
水槽	3m ³	1
発電機	60KVA	1
バックホウ	0.45m ³ 級	1
計測機	深度計, 流量計, トルク計	1



図-8 深層混合処理機



図-9 攪拌ヘッド(φ600mm)



図-10 改良杭施工状況



図-11 不陸整正後状況

ル)に計量した模擬地盤材料と固化材スラリー, さらに, 改良杭と表層改良地盤の界面を確認するためのコンクリート着色用顔料を投入し, バックホウを用いて練混ぜを行って作製した。

均一に練混ぜた材料を型枠内へ投入し, コンクリートバイブレーターを用いて振動締固めを行って全体が均一になるようにし, 表面を均して厚さ 0.6 m の表層改良地盤を作製した。表層改良の施工状況を図-7に示す。表層改良地盤は各ケースで養生日数が異なるため, 改良杭を施工する日に合わせてそれぞれ異なる日に作製した。各ケースの配合および改良杭施工時の養生日数を表-4に示す。

c) 改良杭

表層改良地盤の作製から所定の養生日数経過後に, 深層混合処理機を用いて杭径φ 600 mm の改良杭計 8 本の施工を行った。施工に使用した主要機械の仕様一覧を表-5に示す。また, 深層混合処理機全体および攪拌ヘッドの写真を図-8, 図-9に示す。

改良杭の施工では, 最初に所定の杭芯に攪拌ヘッドの中心を合致させ, 攪拌ロッドの垂直性を保ちながら掘削

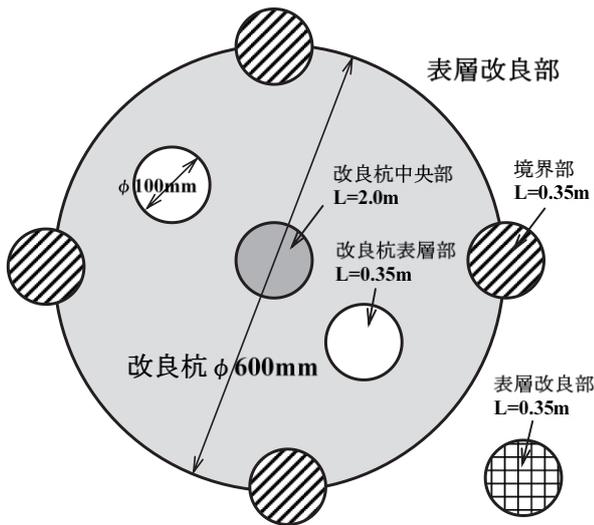


図-12 改良杭周辺の品質確認用コア採取位置

表-6 品質確認用コア試験項目

採取位置	コア長	目的	品質確認
改良杭中央部	2.0m	改良杭の高さ方向の強度分布確認	一軸圧縮試験
改良杭表層部	0.35m	改良杭表層部の地盤塊混入状況確認	目視等
境界部	0.35m	境界部の界面の状態を確認	目視等
表層改良部	0.35m	強度確認	一軸圧縮試験

表-7 改良杭施工時の表層改良地盤強度

	CASE1	CASE2	CASE3
養生日数	26日	2日	同時施工
圧縮強度	1690kN/cm ²	320kN/cm ²	—

を行う。掘削速度は 0.5 m/min とし、速度に合わせて所定の配合となるよう、全自動プラントで自動計量された固化材スラリーを攪拌ヘッド先端より吐出しながら攪拌混合を行った。

攪拌ヘッドが所定深度に達したら、先端部の上下反復攪拌（ダブルリング）を行って着底部の混合を行った後、再度混合攪拌を行いながら 1.0 m/min の速度で引き抜き作業を行った。施工状況を図-10 に示す。

杭最上部は表層地盤表面より 0.3 m 程度高くなるように仕上げ、改良杭打設翌日にバックホウにて表層改良地盤表面と同等の高さになるよう不陸整正を行って仕上げた。不陸整正後の状況を図-11 に示す。

(4) 品質確認試験方法

表層改良地盤の作製時には、各ケースとも品質確認用のテストピース (φ 100 mm×200 mm) を採取し、7、28 日材齢の他、CASE1、CASE2については改良杭施工時の材齢で強度確認のための一軸圧縮試験を実施した。



図-13 表層改良地盤掘削状況

また、改良杭施工から約 2 ヶ月の養生期間経過後に、鋼製型枠を撤去し改良杭周辺の模擬地盤を掘削して表層改良地盤と改良杭を取り出し、出来形を目視により確認した。

その他、改良杭周辺のコア抜きボーリングを実施して、改良杭の高さ方向の強度の違いや、改良杭中の表層改良地盤塊の混入状況、改良杭と表層改良部の界面における付着状況などを確認した。図-12 および表-6 に品質確認用コアの採取位置と試験項目を示す。

3. 試験結果と考察

(1) 改良杭の施工性

表-7に改良杭打設時における表層改良地盤のテストピースの一軸圧縮試験結果を示す。図-13にCASE1の硬化地盤での改良杭の施工状況を示すが、硬化地盤からの施工でも施工速度の低下や表層改良地盤のひび割れなどは特に認められなかった。今回の実証試験では、φ 600 mmの施工機械を用いており、実施工ではより大口径の改良杭の施工を行うことも考えられるが、その場合、杭径の増加に伴って攪拌翼の必要トルクは増大するものの、施工機械の大型化により杭径当たりの攪拌能力はより向上する。したがって、実施工においても硬化後の表層改良地盤に対する施工性に関しては特に問題ないといえる。また、CASE2やCASE3のように表層改良地盤の硬化前に改良杭の施工を行うケースでは、施工機械設置場所の地盤の支持力を確保するための養生を別途考慮する必要があるが、改良杭の施工自体には特に問題は確認されなかった。このように、表層改良の施工後に改良杭を施工して一つの構造とする場合でも、表層改良の硬化状態によらず、施工性や結合部の品質に関して良好であることが



図-14 試験体取出し状況



図-15 試験体取出し後状況

確認できたものとする。

実際の施工に際しては、通常、表層改良の硬化後に改良杭の施工を行うことになると思われるが、表層改良の層厚や設計強度が大きくなるケースなど、改良杭の施工が困難な場合には遅延剤を用いて強度発現を遅らせることも可能である。

養生期間経過後に図-14に示すように改良杭周辺を掘削して表層改良と改良杭を取り出した。取り出し後の状況を図-15に示すが、表層改良と改良杭が一体となった良好な構造体となっていることがわかる。

(2) 改良杭の性状

改良杭の施工から72日養生後に地上より深さ2mまでサンプリングした改良杭のコアの状況を図-16に示す。サンプリングコアを目視にて確認したところ、すべての杭で改良地盤塊の混入等は見られず、表層改良地盤から施工した場合でも、硬化の有無にかかわらず均質な改良杭の施工が行われていることが確認できた。

次に、所定の深度でコアを採取して一軸圧縮試験を実施した。採取コアの位置を図-17に示し、試験結果を図-18、図-19に示す。



図-16 改良杭の深度方向サンプル

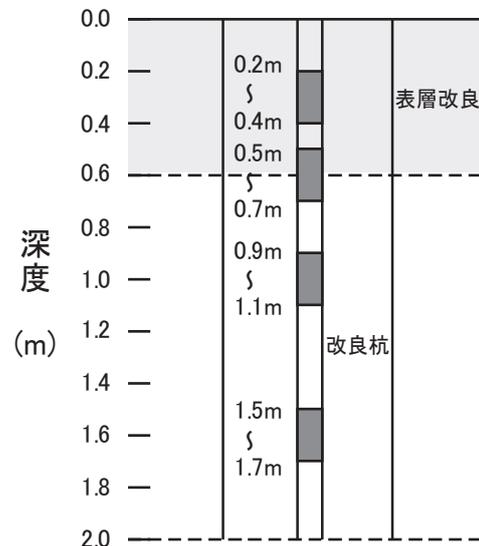


図-17 改良杭のサンプリング深さ

図-18、図-19はそれぞれ、改良杭の深度方向の強度分布および湿潤密度分布を表しているが、特に改良杭上部の表層改良地盤中の強度や湿潤密度がかなり大きくなっており、設計強度の4倍程度の一軸圧縮強度となっている箇所も見られた。また、図-20に示すように供試体の一軸圧縮強度と湿潤密度には相関関係が見られ、全体

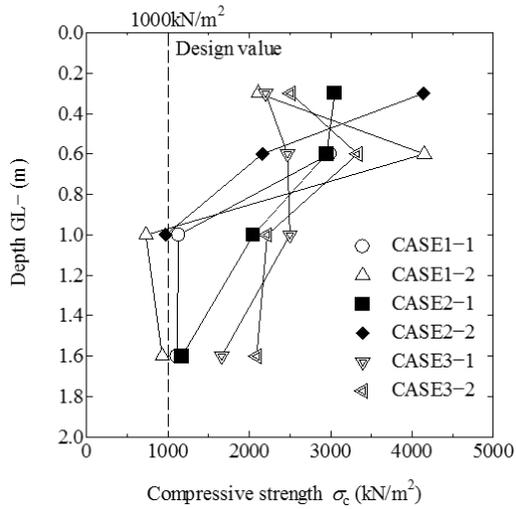


図-18 改良杭の深度方向の強度分布

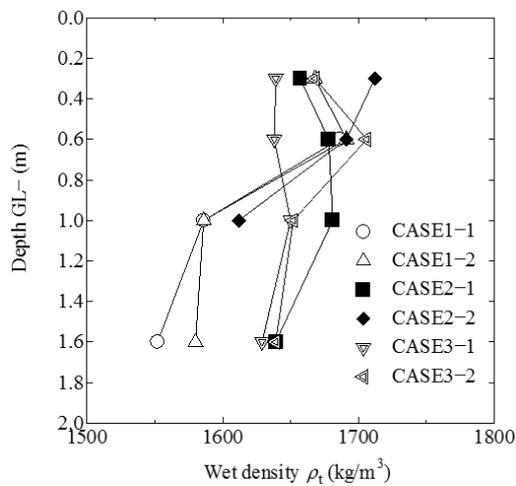


図-19 改良杭の深度方向の湿潤密度分布

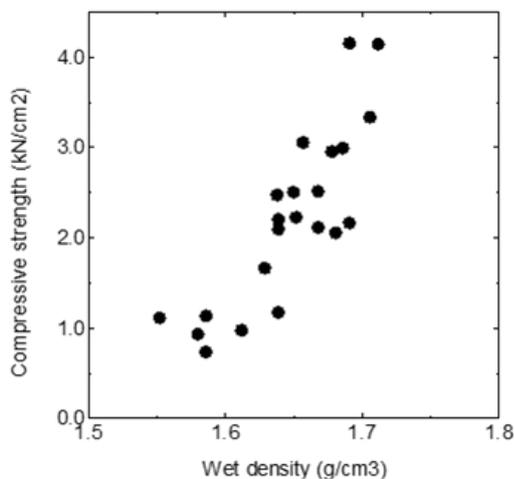


図-20 湿潤密度と一軸圧縮強さ

的に改良杭は上部に行くほど一軸圧縮強度と湿潤密度が高くなる傾向が確認できた。

これは、表層改良地盤中に改良杭の施工を行った場合には単位地盤体積当たりの改良材添加量が多くなるため



図-21 表層改良 / 改良杭境界部サンプリング孔

と考えられる。特に、表層改良地盤の硬化前に改良杭の施工を行ったCASE3では表層改良地盤より下部となる箇所でも改良杭の強度が大きくなる傾向を示しており、改良杭施工時にスラリー状の改良材とともに硬化前の表層改良地盤がある程度一緒に攪拌された状態で改良杭が構築されているものとする。しかし、改良材添加量の割増し率やその影響範囲を予め考慮することは困難であることから、特に設計には反映せず安全側の傾向として見込むべきであると考えられる。

(3) 杭頭結合部の性状

改良杭施工時の表層改良地盤の硬化状態による杭頭結合部の性能の違いについて確認するため、改良杭と表層改良境界部のコアサンプリングを実施し、採取コアおよ

びサンプリング孔内部の目視確認を行った。

図-21に各ケースの境界部のサンプリング孔内部の状況を示すが、どのケースでも境界部の外観には差はみられず、CASE2、CASE3のみならず、表層改良地盤が硬化した後に改良杭を施工したCASE1の場合でも改良杭と表層改良地盤の境界部は一体化していることが確認できた。

4. まとめ

施工性確認のための現地試験を実施し、表層改良と改良杭の一体性およびそれらの施工性についても検討した。その結果、得られた結論は以下のとおりである。

- ① 表層改良地盤上からの改良杭の施工に関して、表層改良地盤の固化の程度によらず施工速度の低下や表層改良地盤のひび割れ等は生じないことを確認した。
- ② 硬化後の表層改良地盤に対する施工性は特に問題ないが、表層改良の層厚や設計強度が大きくなるケースなど、改良杭の施工が困難な場合には遅延剤を用いて強度発現を遅らせることが望ましい。
- ③ 改良杭は上部ほど一軸圧縮強さと湿潤密度が高くなる傾向が見られた。これは改良杭施工時に表層改良地盤材料が混合されることにより、単位地盤体積当たりの改良材添加量が多くなるためと考えられた。

謝辞：本研究は（国研）港湾空港技術研究所と東京大学、三井住友建設（株）の共同研究として実施したものである。本共同研究においては、共同研究三者のみならず、多くの関係各位のご助力を頂きました。深謝申し上げます。

参考文献

- 1) Naoki Takahashi et al.: Shaking model tests on mitigation of liquefaction-induced ground flow by new configuration of embedded columns, Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, pp1623-1624, 2013.
- 2) 草竹真也, 戸村豪治, 高橋直樹, 津田和夏希, 森川嘉之, 高橋英紀, 東畑郁生: 流動閉塞杭の実証実験—その1: 施工性の確認および品質試験—, 第51回地盤工学研究発表会, 2016.