

地中拡翼型の地盤攪拌改良工法の開発

監視・自動制御システムの開発および施工実験に基づく検証

小林 真貴子*¹・石井 裕泰*¹・藤原 斉郁*¹・青木 智幸*¹・立石 洋二*²
 遠藤 堅一*³・広川 郁夫*³・菅 浩一*⁴・三上 登*⁴・佐藤 潤*⁴

Keywords : soil improvement, liquefaction countermeasures, cement, existing structures, in-situ mixing, execution control

地盤改良, 液状化対策, セメント, 既設構造物, 機械攪拌, 施工管理

1. はじめに

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震では、震源から遠く離れた関東地方の旧河道地や埋立地においても液状化が発生し、既存の建物および施設、さらにはこれまで液状化対策が積極的に行われてこなかった住宅地においても大きな被害が生じた¹⁾。一方、事前に地盤改良等の対策を施した建物、施設においては、液状化の被害が抑制されたとの報告もあり^{2),3)}、南海トラフや首都圏直下といった今後発生が予想される大地震に備えて、既存施設直下や周辺狭隘部地盤での対策の重要性が再認識されるに至っている。しかし、この種の地盤改良は、敷地利用等などの施工制約があり、従来工法では適用が困難となる場合も考えられ、施工制約や要求品質に応じた新たな形態の地盤改良工法の開発が求められていると言える。

このような背景から、著者らは「地中拡翼型の地盤攪拌改良工法」(WinBLADE 工法)の開発にあたっている。図-1に本工法の手順、写真-1に攪拌装置を開閉した様子を示す。本工法は、(1)閉じた状態の攪拌翼を地中に挿入し、(2)改良範囲の先端部で攪拌翼を拡げた後、(3)セメントミルクを供給しながら原位置攪拌を行い、円柱状の固結改良体を造成する地盤改良技術である。

本工法の概要、既存工法と比較した特徴および人工地盤における施工試験結果については、前報⁴⁾においてまとめた。また、自然堆積層や実際に液状化が発生した浚渫土層においても施工試験を実施し、既報^{5),6)}で

報告した。本報では、まず、改良体造成時の品質確保・向上のために開発した監視・自動制御システムについて説明し、人工地盤での施工実験に基づき本システムの導入効果を検証する。さらに、東北地方太平洋沖地震で液状化を生じた実存地盤においても本工法を適用し検証した上で、実務適用に向けた課題と対応についてまとめる。

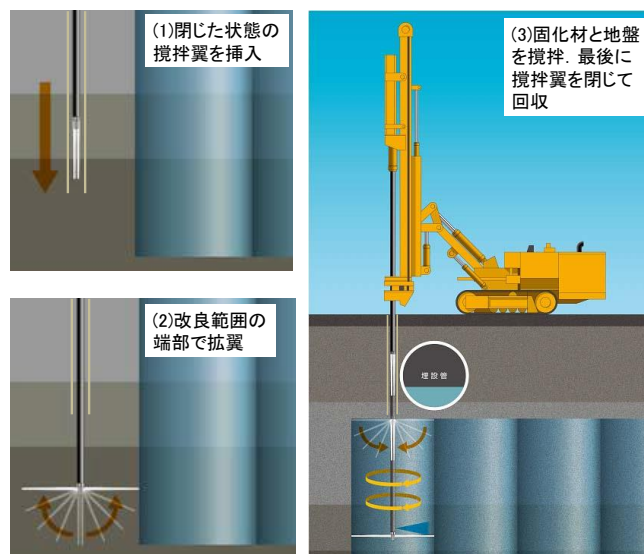


図-1 工法の手順

Fig.1 Soil improvement process



写真-1 地中拡翼型の攪拌装置

Photo.1 Expandable/collapsible mixing blades

*1 技術センター 土木技術研究所 地盤・岩盤研究室

*2 土木本部 機械部

*3 成和リニューアルワークス(株)

*4 日特建設(株)

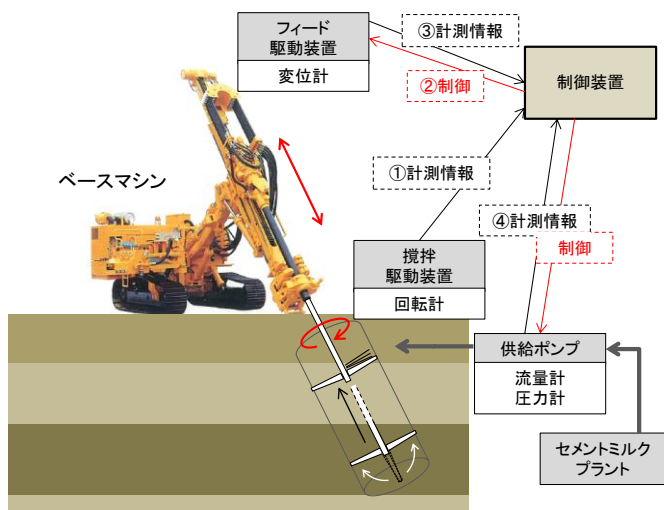


図-2 監視・制御システムの概要

Fig.2 Real-time monitoring and automatic control system



写真-2 施工中の状況

Photo.2 Situation of soil improvement under construction

2. 監視・自動制御システム

2.1 システム導入の背景

本工法のような機械攪拌による地盤改良工法では、セメントミルクの供給や攪拌状況が改良体の品質に大きな影響を及ぼす。これまでの機械攪拌による工法は、主に新設工事を対象として大規模、急速施工を意図した大型機械が多く用いられてきた。この場合、大型機械により十分な反力と駆動能力を確保でき、地盤性状の変化による攪拌翼の回転やフィード速度の変動が問題となることはなかった。また同様に、回転速度やフィード速度に応じたセメントミルクの供給量の制御についても積極的には行われていなかった。

これに対し、地中拡翼型の地盤攪拌改良工法は、狭隘部での施工性、適用性を確保するため、比較的小型のベースマシンを使用することを想定しており、その結果、地盤性状によって施工動作に変動が生じやすい。例えば、地盤が固くなり回転速度が低下した場合、一定のフィード速度を維持したままでは、単位長さあた

りの攪拌回数が不足する。また、回転速度の低下に応じてフィード速度を下げた際、一定のセメントミルク供給量を維持したままでは、セメントを過剰に添加することになる。こうした品質の低下やばらつきを招く要因を自動制御するシステムを導入することで、改良体品質を確保・向上させる効果が見込まれる。

2.2 システムの概要

図-2 に、監視・自動制御システムの概要を示す。本システムでは、回転速度に基づきフィード速度、セメントミルク供給量を PID 制御（目標値との差に比例 (Proportional) して誤差修正を加えるとともに、経過時間に対する積算値 (Integrate)、差分値 (Differential) に応じて修正の度合も調整する方法）するプログラムを、インバータに組み込んでいる。制御機構は以下による。

①まず、攪拌用駆動装置に搭載した回転計で回転速度をリアルタイムに計測し、②この回転速度の情報をもとに、単位改良長あたりの攪拌回数が一定値を確保できるようにフィード速度を制御する。③さらに、フィード速度に基づき、④回転速度およびフィード速度に連動して単位体積あたりのセメント添加量を一定に保つようセメントミルクの供給流量も自動制御される。この一連の流れにより、回転速度が変動しても、それに連動するようフィード速度およびセメントミルク供給流量が制御され、攪拌回数およびセメント添加量の調整を図る事が出来る。また、写真-2 に施工中の状況を示すが、オペレータによる小まめな手動操作を施すことがなくなり、技能差による品質誤差や作業負荷の低減効果も見込まれる。なお、今回使用したシステムでは、ローラー式回転計およびワイヤー式変位計を用いて回転速度およびフィード速度を計測した。

3. 人工地盤での検証

3.1 実験概要

図-3 に、人工地盤における改良体の配置図⁴⁾を示す。対象地盤は、細粒分含有率 5%程度 of 山砂をバックホウで締め固めながら作成した、N 値 5 程度の飽和地盤である。ここでは、フィード速度 1.0m/min、回転速度 40rpm、セメントミルクの供給速度 40L/min の基本計画により、直径 1200mm、高さ 2.0m の改良体を、下端から引上げ、押下げ、引上げの 3 パスで造成した。

3.2 計測結果

本報では、全 7 改良体のうち、1-A の結果についてまとめる (図-3 の赤色太線)。図-4 に 1-A の回転速度、フィード速度、セメントミルク供給速度の経時変化を

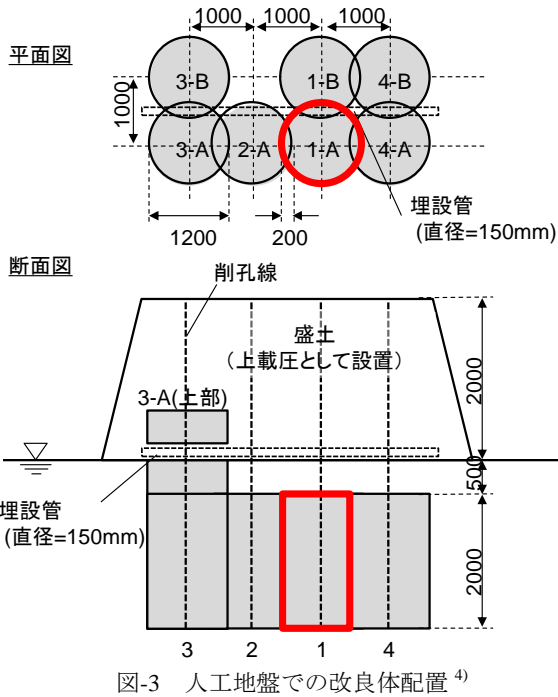


図-3 人工地盤での改良体配置⁴⁾
Fig.3 Artificial ground for field test and position of soil improvements

示す。ここで、左軸の移動距離は下端位置を 0 とし、2m の引上げ、押下げの動きを全データに共通して示している。回転速度は一回目の引上げ時において一時的に計画値より低下する状況が見られたが、その後は計画値を維持した。フィード速度もこれに連動して変化していたが、二回目の引上げ時に計画値より低下する傾向が見られた。また、セメントミルク供給速度はフィード速度の変動に良く連動していた。

3.3 システムの検証

図-5 にセメントミルク積算供給量と時間の関係を示す。なお、赤色実線は本監視・制御システムを導入した実測結果、黒色破線はセメントミルク供給速度を 40L/min で一定で供給した場合の想定線である。本施工では 2m の造成長を 360 秒で造成する計画であったのに対し、実際は地山抵抗などにより 80 秒(21%)程度超過した。この場合、セメントミルク供給速度が一定であったとすると、超過時間に応じた余剰のセメントミルクを供給する事になるが、本システムを導入する事で余剰量を 4%まで低減する事が出来た。また、回転速度はほぼ計画値を維持し、21%程度施工時間も超過したことから、単位長さあたりの攪拌回数が不足する事はなかった。

事後調査においては、写真-3 に示す改良体断面の中心および外周 4 方向に 150mm 間隔でコアを採取し、2 断面 26 供試体の一軸圧縮試験を行った。今回造成した改良体は、単位長さあたりの攪拌回数 240 回/m を確保

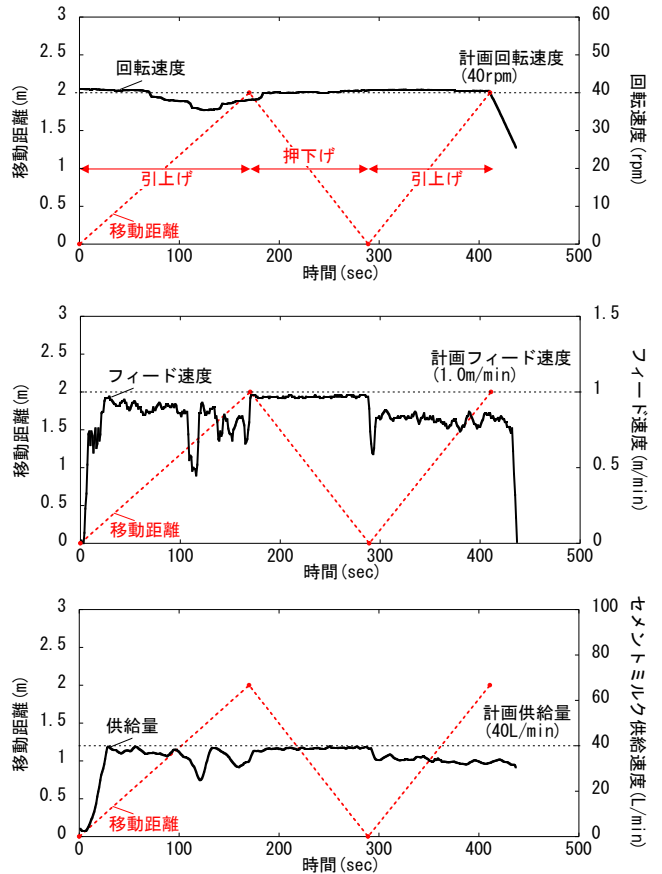


図-4 人工地盤でのモニタリング結果
Fig.4 Results of monitoring in artificial ground

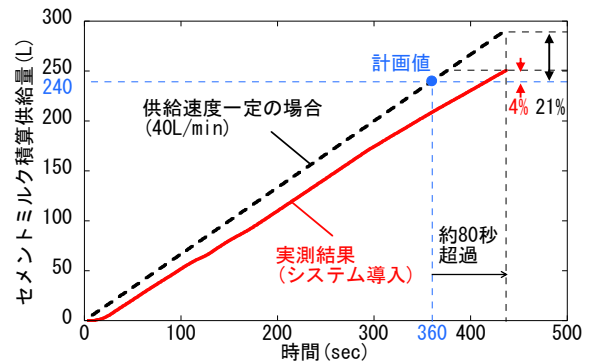


図-5 施工時間とセメントミルク積算供給量の関係
Fig.5 Relationship between measurement time and integral supply quantity of cement milk



写真-3 改良体の造成状況
Photo.3 Observed solidified body (artificial ground)

出来ていた。また、改良体強度の変動係数は 40.1% であり、深層混合処理工法に関する既往の品質管理指針⁷⁾で示された標準的な変動係数 20~45%に見合った水準となった⁴⁾。以上により、システムの導入により余剰セメント量の削減と標準的な品質変動の水準確保を両立できたことを確認できた。

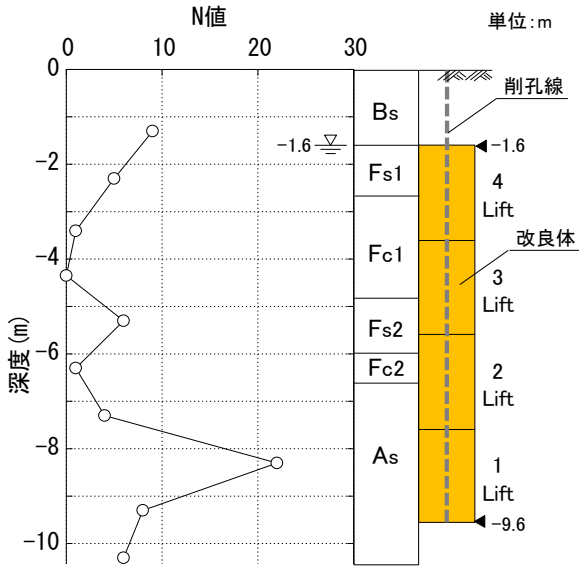


図-6 地層構成と造成位置の一例

Fig.6 Existential ground for field test and position of soil improvement

4. 液状化を生じた実存地盤での検証

4.1 実験概要

前章の人工地盤に対して、物性の異なる土が互層で堆積する、実際に液状化が発生した実存地盤において施工実験を行った。図-6 に地層構成と後述する監視・自動制御により造成した改良体の配置図を、図-7 に改良対象地盤の基本物性を示す。G.L.-1.6~7.0m 付近までは砂層および粘性土層が互層となった浚渫土層 (Fs₁, Fc₁, Fs₂, Fc₂) が存在し、G.L.-7.0m 以深は自然堆積の沖積砂層 (As) である。なお、東日本大震災では、実

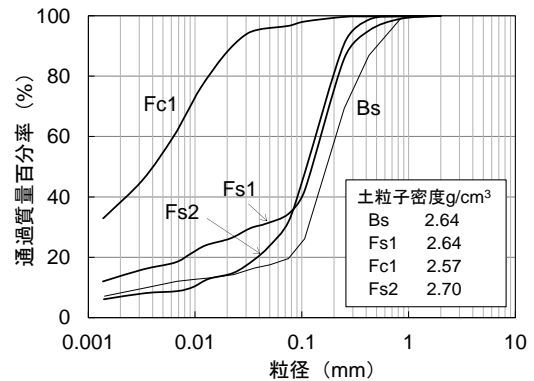


図-7 対象地盤の基本物性

Fig.7 Property of the existential ground

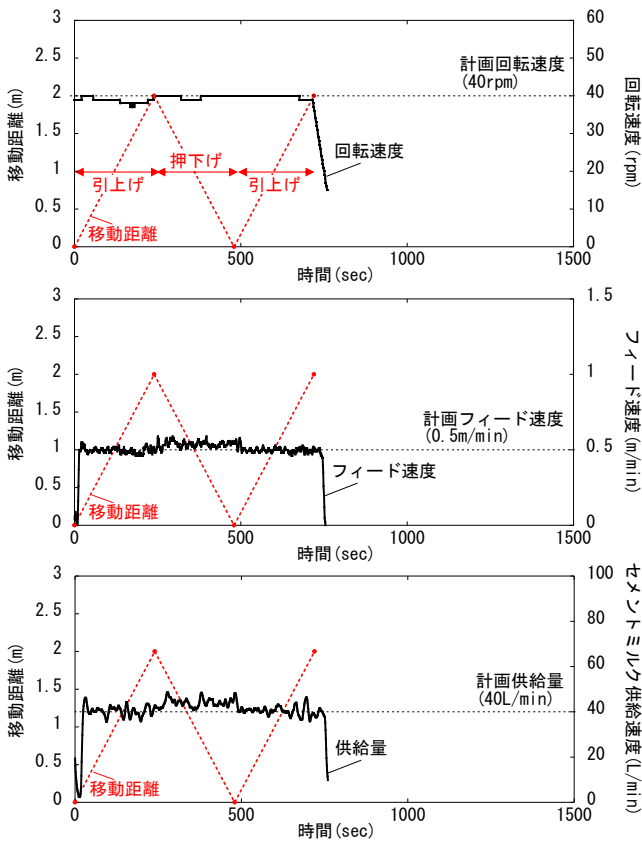


図-8 沖積砂層でのモニタリング結果(1リフト)
Fig.8 Results of monitoring in the alluvial sandy soil

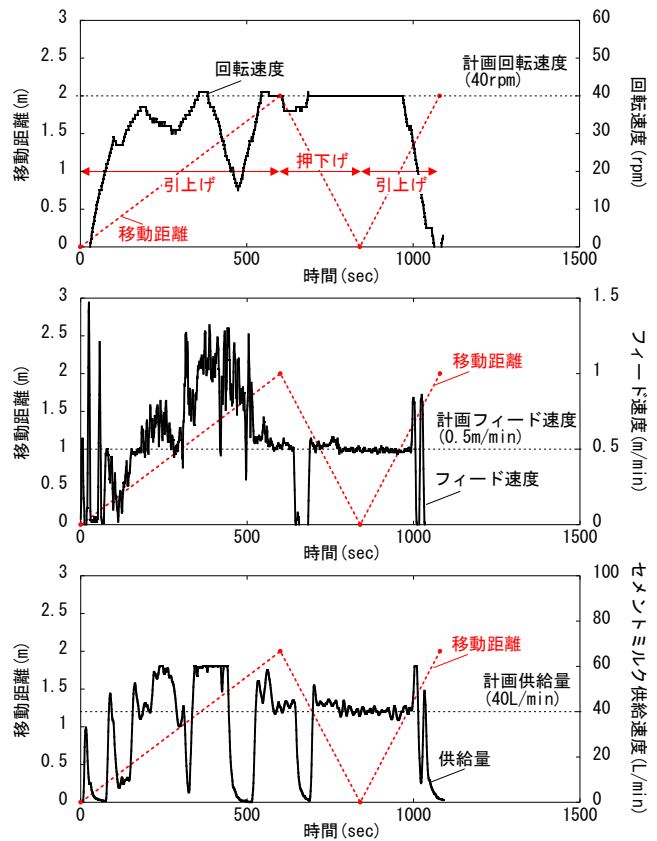


図-9 浚渫土層でのモニタリング結果(4リフト)
Fig.9 Results of monitoring in the dredge soil

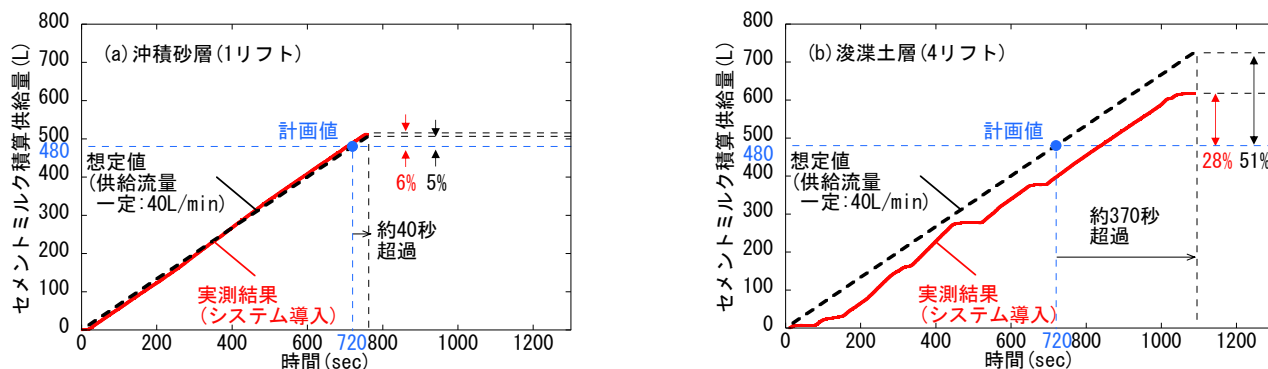


図-10 セメントミルク積算供給量と施工時間の関係
 Fig.10 Relationship between measurement time and integral supply quantity of cement milk

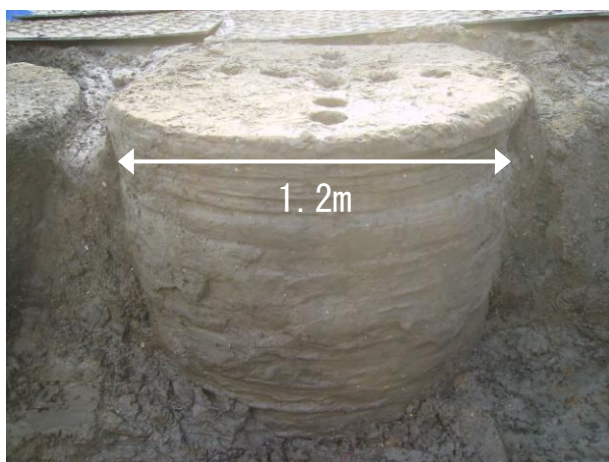


写真-4 改良体の造成状況
 Photo.4 Observed solidified body (existential ground)

験箇所周辺において、 F_{s1} 層や F_{s2} 層と思われる噴砂跡が確認されている。

本施工実験では、フィード速度 0.5m/min、回転速度 40rpm、セメントミルクの供給速度 40L/min の計画で、人工地盤での施工と同様に、長さ 2.0m を 1 施工単位 (リフト) とし、下部より引上げ、押下げ、引上げの 3 パス施工を 4 回繰り返して、全体長 8.0m の改良体を造成した。

4.2 計測結果

図-8 に沖積砂層を対象とした 1 リフト目、図-9 に浚渫土層を対象とした 4 リフト目の回転速度、フィード速度、セメントミルク供給速度の経時変化を示す。1 リフト目では、一回目の引上げで回転速度の低下およびそれに連動した動きが見られたものの、それ以降は比較的安定した造成が行われた。4 リフト目についても一回目の引上げ時、回転速度の変化に伴いフィード速度、セメント供給量ともに大きく変動する傾向であったが、これらが連動して制御されていることが確認された。なお、7 日程度の養生後、4 リフト目の深度に

相当する F_{s1} 層から F_{c1} 層にかかる深さまで掘り起したところ、改良体周辺から木片や植生跡が確認されており、上記の不規則な施工動作を引き起こす要因であったものと推察される。

4.3 システムの検証

図-10 に 1 リフト目および 4 リフト目のセメントミルク積算供給量と時間の関係を示す。1 リフト目は施工動作が安定していたため、造成時間は計画に対し 40 秒 (5%) 程度の超過で、余剰なセメント供給なく施工が行われた。一方、4 リフト目では一回目の引上げ時の回転速度およびフィード速度の変動の影響で、施工時間を 370 秒 (51%) 程度超過した。これに対して、セメントミルクの余剰供給量は 28% 程度にとどまり、課題は残るものの、自動制御による効果が確認された。

事後調査では、写真-4 に示す改良体の全長にわたりロータリー式スリーブ内蔵サンプラーにてコア採取を行った。コア断面の 50% 以上が固結したと認められる長さの割合を表すコア採取率を確認したところ、全体で 89% となり、品質の良否の目安となる 90%²⁾ をほぼ満たす結果となった。

今回の施工では、地中の木片や植生跡などによりフィード速度が激しく変動する場面も見られ、本システムで用いたワイヤー式の変位計のたわみやぶれによる機械的な誤差が生じていた可能性がある。また、PID 制御の感度調整などのソフト的要因についても、対象地盤の性状に応じて調整余地があるものと考えられる。コア採取率に基づく改良品質の変動に関しては一定水準を確保しているものの、これらの改善にあたり、システムの精度向上につなげたい。

5. まとめ

地中拡翼型の地盤攪拌改良工法の開発に関して、本報では監視・制御システムの概要、および施工実験に基づくシステムの検証についてまとめた。本研究結果を以下に示す。

- ・ 改良体の品質確保・向上のために、回転速度に連動してフィード速度とセメントミルク供給量を自動制御するシステムを開発した。
- ・ 人工地盤での施工実験の結果、回転速度、フィード速度およびセメントミルク供給量は良く連動しており、標準的な品質変動水準を確保しながら、本システムを導入しない場合に見込まれた21%の余剰セメント供給量を4%に抑える事が出来た。
- ・ 実存地盤での施工実験の結果、沖積砂層では人工地盤での施工実験結果と同等に安定した制御が行えた。一方、浚渫土層では木片や植生の影響で施工動作が不規則となったものの、余剰セメント量の削減、品質変動水準の抑制に一定の効果が認められた。

今後は、機械的、ソフト的要因に改良を加えながら、システムの精度や改良体品質の向上を図っていきたい。

謝辞

本研究の取り組みにあたっては、「平成23年度建設技術研究開発助成制度 震災対応型技術公募（国土交通省大臣官房

技術調査課）」、「浦安市が管理する施設を利用した液状化対策工法の実証実験」事業で採択を頂きました。関係各位のご協力、ご支援に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 風間基樹：2011年東北地方太平洋沖地震被害の概要と地盤工学的課題，地盤工学ジャーナル，Vol.7，No.1，pp.1-11，2012.
- 2) 石井裕泰，船原英樹，松井秀岳，堀越研一：東北地方太平洋沖地震で効果が確認された液状化対策事例と新たな地盤改良工法，大成建設技術センター報，第44号，2011.
- 3) 諸星一信，鈴木明宏，工藤秀輝，鈴木亮彦，安藤滋郎，田中隼矢：仙台空港における耐震化工事の施工管理と改良効果について～その1～，第47回地盤工学研究発表会，pp.1545-1546，2012.
- 4) 石井裕泰，藤原斉郁，小林真貴子，松井秀岳，青木智幸，立石洋二，菅浩一，三上登，佐藤潤：地中拡翼型の地盤攪拌改良工法の開発，大成建設技術センター報，Vol.45，2012.
- 5) 石井裕泰，藤原斉郁，小林真貴子，青木智幸，立石洋二，菅浩一，三上登，佐藤潤：地中拡翼型の地盤攪拌改良工法の開発～浚渫土層，沖積砂層での造成～，土木学会第68回年次学術講演会，pp.591-592，2013.
- 6) 佐藤潤，菅浩一，三上登，石井裕泰，藤原斉郁，小林真貴子，青木智幸，立石洋二：地中拡翼型の地盤攪拌改良工法の開発～斜め方向改良体の造成～，土木学会第68回年次学術講演会，pp.593-594，2013.
- 7) 日本建築センター：改訂版建築物のための地盤改良の設計及び品質管理指針 -セメント系固化材を用いた深層・浅層混合処理工法-，pp.37-38，2002.