

狭隘地での施工を可能とした砂圧入式 静的締固め工法(SAVE-SP 工法)の開発

大林 淳¹・深田 久²・伊藤 竹史³

¹正会員 株式会社不動産テトラ地盤事業本部技術部長 (〒103-0016 東京都中央区日本橋小網町 7-2)

²正会員 株式会社不動産テトラ地盤事業本部技術部担当部長 (〒103-0016 東京都中央区日本橋小網町 7-2)

³株式会社不動産テトラ四国支店研究室グループリーダー (〒760-0023 高松市寿町 2-2-10)

地震時に発生する砂地盤の液状化は、盛土や岸壁の大変形等の多くの被害を引き起こしてきた。先般の東日本大震災でも埋立地の液状化が大規模に発生している。一方、締固め等の地盤改良により液状化を防止できることが確認されており、狭隘地や既設構造物の直下の地盤にも対応できる液状化対策工法が求められている。こうしたニーズに応えるため、当社では砂圧入式静的締固め工法(SAVE-SP 工法)を開発した。砂圧入式静的締固め工法は高分子材を添加して流動性を高めた砂を地盤に圧入することで地盤を締固める工法であり、小型施工機を用いることで狭隘地での施工も可能となった。本稿では、砂圧入式静的締固め工法の概要と改良効果について報告する。

キーワード：液状化、地盤改良、締固め、小型施工機、狭隘地

1. はじめに

近年、既設の岸壁や空港滑走路および堤防等の耐震性向上のため、狭隘地や構造物直下でも適用可能な液状化対策工法が求められている。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(以下 SCP という)工法は、大型施工機械を用いるために、施工スペース等の制約により適用できない場合が多い。既設構造物に対応できる工法として、高圧噴射攪拌工法や薬液注入工法等の小型施工機を用いる工法があるが、比較的高価なことより、コスト削減や環境負荷の軽減が求められている。そこで、砂の圧入を小型施工機で行うことで、コスト削減、環境影響低減を実現した砂圧入式静的締固め工法(SAVE-SP 工法)を開発、実用化した¹⁾。

砂圧入式静的締固め工法は、高分子材を添加して流動性を高めた砂(以下、「流動化砂」と呼ぶ。)をポンプで圧送し地盤に圧入することで地盤を締固める工法である。砂に流動性を付加することで小径の配管で搬送が可能となるため、地中への圧入は小径のロッドを用いる。このため、構造物直下を対象として施工する場合でもわずかな削孔だけで済み、既設構造物への影響を最小限に抑えることが可能である。また、プラント設備は施工位置から離れて設置できるため、施工位置周辺には広いスペースを必要としない。

本稿では、砂圧入式静的締固め工法の概要と試験施工での改良効果について報告する。

2. 工法概要

(1) 施工機械

本工法で使用する施工機械は、図-1 に示すようにロッドを貫入する小型施工機、圧送ポンプ、流動化砂製造プラント、材料投入のためのバックホウからなる。小型施工機は3m×6m程度の占有面積で、地中に貫入するロッドはφ100mm程度である。プラントはバッチ毎に流動化砂を製造するもので、搬入した砂への加水、流動化剤および塑性化剤の添加・混練を行う。ポンプはピストン式で、材料の吸込と吐出を連続して行う。ピストン速度を変えることで流量調整が可能である。ポンプと施工機の離隔は100m程度まで対応可能である。

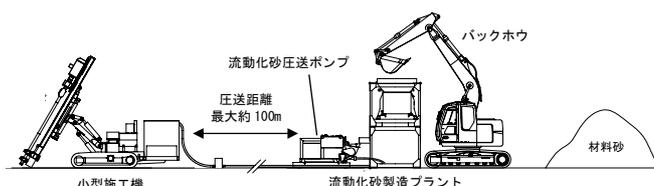


図-1 SAVE-SP 工法の標準的な機械構成

(2) 流動化砂

SAVE-SP 工法の材料は、サンドコンパクションパイル工法などに用いられる砂を流動化剤（アニオン系高分子材）と混練してポンプ圧送可能な状態として使用するものであり、地盤圧入後に流動性が消失するように遅効性の塑性化剤（カチオン系高分子材）を添加する。流動化砂の模式図を図-2 に、練り上がった流動化砂の状態を写真-1 に示す。流動化剤の化学成分であるアニオン系高分子材料は、一般にはシェービングクリーム、法面の緑化吹き付け用添加剤などに用いられる。一方、塑性化剤の化学成分であるカチオン系高分子材料は、紙すき用添加剤、濁水処理用凝集剤などに使用される。流動化剤、塑性化剤ともに中性であり、周辺地盤の水質（pH）への影響は特にない。

化学物質の安全性に関しては、いずれも PRTR 法（環境省：化学物質排出把握管理促進法）における毒性指定化学物質の第 1 種・第 2 種に該当するものではない。また、流動化剤と塑性化剤を添加した流動化砂の安全性に関しては、土壤汚染対策法に準じた溶出試験並びに含有量試験ともに不検出で、土壤に対する安全性は確認されている²⁾。さらに、流動化砂の間隙水を用いた魚類による急性毒性試験 [96 時間 LC₅₀] (JIS K 0102-2008) では、試験最大濃度 1,000mg/L でヒメダカの死亡等はないという結果を得ており、魚類に対する安全性も確認されている。

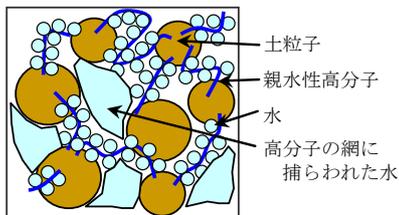


図-2 流動化砂の模式図



写真-1 流動化砂

(3) 施工方法

施工手順は図-3 に示すとおりで、①ロッド貫入、②流動化砂圧入、③引抜き、④②③の繰り返しとなる。②では所定の改良体体積が得られる量の流動化砂を圧入する。この圧入量は、実地盤での改良体出来型の確認などから設定しており、目標の改良体体積の1.3倍の流動化砂を圧入することで所定の改良体体積を確保できると考えている。φ700mmの円柱状の改良体を造成しているとした場合、1m当りの体積は0.385m³なので、圧入する流動化砂量は1m当り0.5m³となる。流動化砂はロッドから同心円上に拡径されるとは限らないので、円柱状の出来型を保証するものではない。そこで、改良体を体積等価な円柱状で考える場合、本文においてはこの直径を換算改良径と呼ぶことにしている。

砂圧入式静的締固め工法の締固めの機構を図-4 に示す。直径約10cmのロッドから地中に排出された流動化砂は注入時の圧力で脱水され、締まりながら拡径される。同時に、周囲の緩い砂地盤が密な地盤に締固められていく。このとき、いくらかの流動化剤は間隙に残るが、時間経過に従い塑性化剤の効果で凝集し、その後は通常の砂になる。

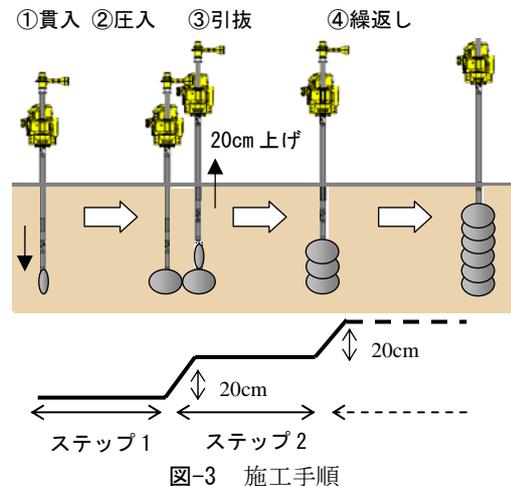


図-3 施工手順

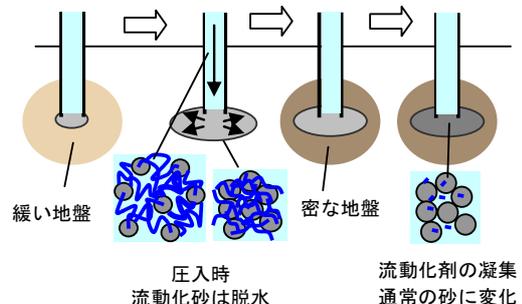


図-4 SAVE-SP 工法の締固め機構

(4) 地中に圧入された流動化砂の長期安定性

砂に流動化剤（高分子剤）を加えて地中に圧入された砂の長期安定性について、大型圧密試験を実施した。流動化砂が長期間拘束された状態を再現し、流動化剤の網状構造が消えて摩擦が回復する際の体積変化（沈下）の有無を確認した¹⁾。長期大型圧密試験結果を図-5に示す。使用した海砂の最大・最小間隙比は $e_{max}=1.246$, $e_{min}=0.693$ であり、緩い状態で静的荷重を載荷した。最終荷重の載荷後10日および30日における沈下量の差は0.1mmであり、この沈下量差は、供試体の初期高さに対して $0.1/200=0.05\%$ であり、有意な差はみられなかった。

また、この変形特性は粗粒土のクリープ特性と同等であり、流動化剤の効果の消失による地中の流動化砂の体積変化は問題と判断される。

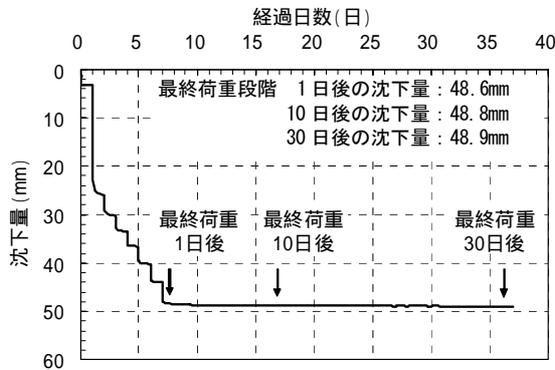


図-5 沈下量～経過日数の関係¹⁾

3. 試験施工の事例

本工法の開発・実用化において、地盤の締固め効果や改良体強度、施工に伴う地盤変位を確認するために4件の試験施工を実施してきた。ここでは、試験施工（その1）と（その2）の2件の現場での計測結果の概要を報告する。試験施工（その1）では主として改良効果と改良体の強度に着目して施工を行った。また、試験施工（その2）では、既設構造物の直下での適用性と施工性を確認するため、既設の堤防を対象として試験を実施している³⁾。

(1) 試験施工（その1）

当工事ではGL-7m～-15mの砂質土を対象に締固め効果を確認した。地盤のN値は2～18、細粒分含有率Fcは30%程度である。この地盤に換算改良径φ500mm、φ700mmで改良率as=20%となるように施工を行った。地盤の柱状図と施工平面図を図-6に示す。

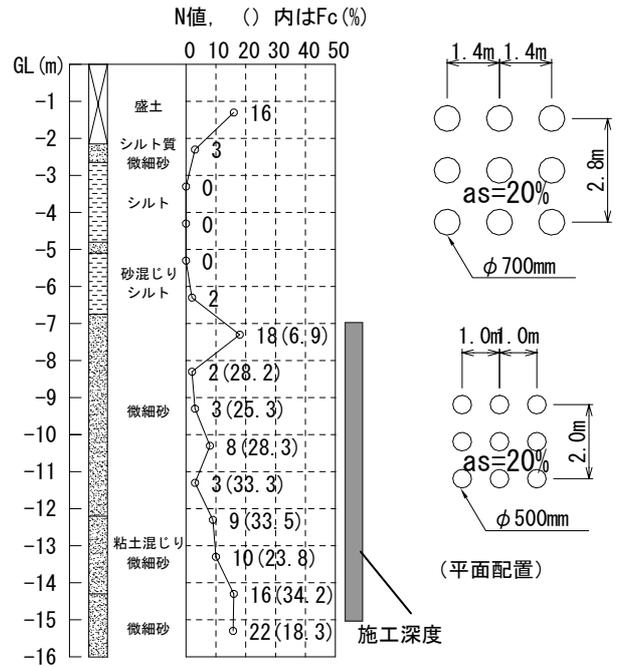


図-6 試験施工（その1）
対象地盤と改良体配置

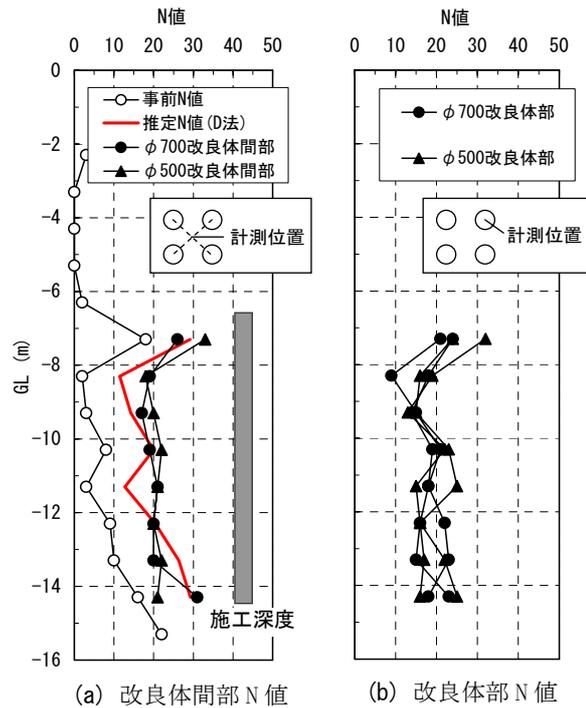


図-7 試験施工（その1）
施工前後のN値

施工後、各改良体の対角線交点（以下、改良体間部）と改良体部でN値を計測した。その結果を図-7に示す。図-7(a)にはas=20%でのD法⁴⁾による推定N値も示しているが、改良体間部N値はこの推定値と同等であった。

また、φ700mm 仕様のロッド貫入位置から 30cm の位置でボーリングしたところ、締まった流動化砂が採取された。このことから、φ700mm 程度の改良体が造成されていると考えられる。

当工事において地表面変位の観測も行ったが、有意な変位は観測されなかった。これは、施工深度が大きい変位が分散して小さくなることに加え、拘束圧が比較的大きいので改良体体積のほとんどが締固めに寄与したためと考えられる。

(2) 試験施工 (その 2)

当工事は、既設堤防の背面および直下での施工であり、地盤は堤防背面の GL-2.4m~-12.2m の砂質土を対象としている。地盤の N 値は 1~7、細粒分含有率 F_c は 20~30% 程度である。

この地盤に改良率 20% にて換算改良径 φ500mm、φ700mm を目標に砂圧入式静的締固め工法を施工した。なお、本工事では既設堤防直下の改良のためロッドの傾斜 20° (鉛直より) での施工も行っている。当工事の断面図を図-8 に示す。

改良前後の N 値の深度分布を図-9 に示す。図-9(a) には改良率 $as=20\%$ での D 法⁴⁾ による推定 N 値も示した。この結果より、いずれの仕様においても推定値と同等の改良効果があると言える。

図-10 に当工事の施工時に測定した地中傾斜計の記録を示す。傾斜計からの離隔 3.4m の改良体 1 本の施工で生じた変位と、離隔 5~7.6m の改良体 3 本の施工で生じた累積変位を示している。離隔 5~7.6m の改良体 3 本の施工においては、ほとんど地中変位が発生していないことから、本工事では 4m 程度が影響範囲と言える。

4. 改良効果

(1) 締固め後の改良体間部の N 値

4 件の試験施工において、締固め後の改良体の中間部の N 値を調査した。SCP 工法や静的締固め砂杭工法の設計方法⁴⁾ (方法 D) を用いて推定した改良後推定 N 値 ($N1'$) と、改良後の実測 N 値 ($N1$) の関係を図-11 にまとめている。

図中の○印は従来の静的締固め砂杭工法における結果 (15 現場 300 データ) を示したものである。同図より、SAVE-SP 工法においても従来の SCP 工法の設計手法を用いて改良後の地盤の N 値の推定が可能であることがわかる。

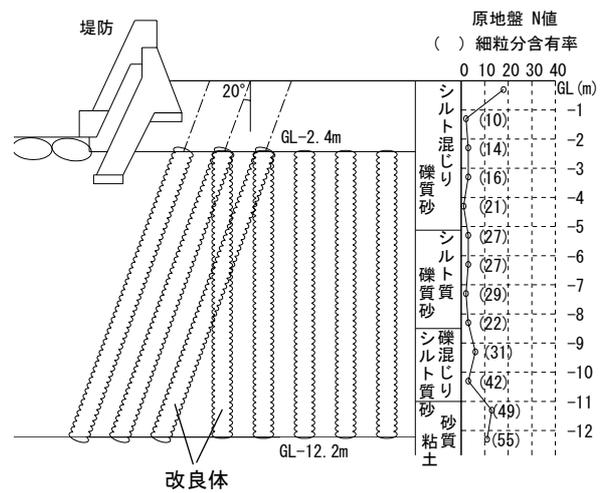


図-8 試験施工 (その 2) 断面図

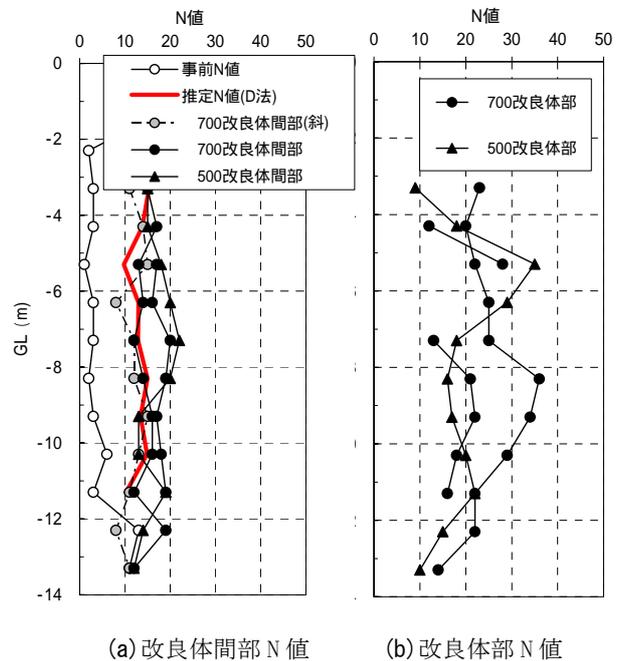


図-9 試験施工 (その 2) 事後調査結果

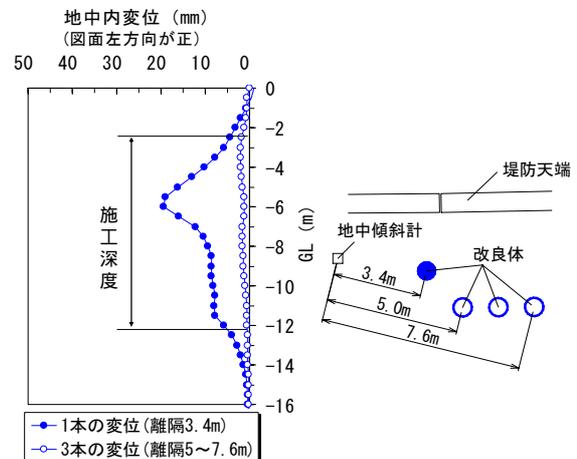


図-10 試験施工 (その 2) 地中傾斜計測定結果

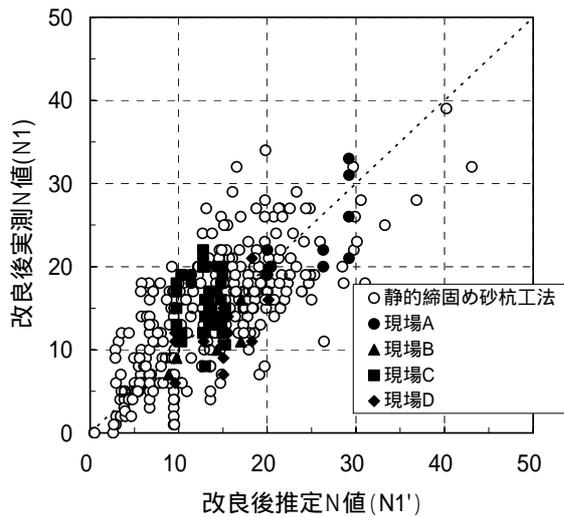


図-11 試験施工全体での事後調査結果

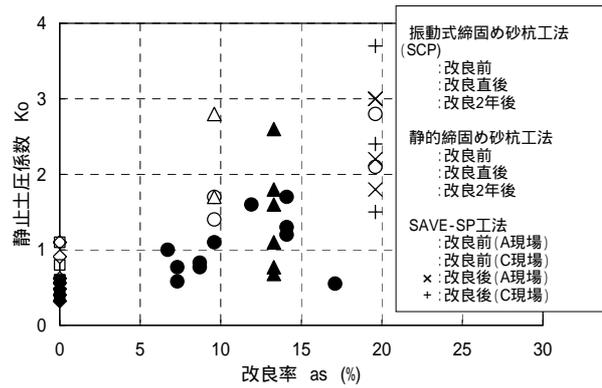


図-12 静止土圧係数の調査結果

(2) 静止土圧係数 K_0 の増加

各現場において孔内水平載荷試験を行い、得られた改良前後の静止土圧係数の計測結果を図-12 に示す。既往の研究から、SCP打設地盤の静止土圧係数 K_0 の増加が確認されており⁴⁾、流動化砂の圧入による地盤の締固めにおいても、同様な静止土圧係数 K_0 の増加が確認された。静止土圧係数 K_0 は改良前に対して2~4倍程度となっており、この結果からも十分な地盤の締固めが可能なが確認された。

5. おわりに

狭隘地や既設構造物の直下での締固めを可能とした砂圧入式静的締固め工法 (SAVE-SP 工法) の概要と改良効果の事例について報告した。

本工法は、試験施工を経て既設の海岸堤防の耐震対策工事に採用され、非常に狭隘な地区での施工が可能であることが確認された⁵⁾。今後も、各現場での調査を継続することにより、改良効果や既設構造物への周辺影響等のデータの蓄積に務め、適用範囲の拡大を図っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 今井優輝, 大林淳, 福島信吾, 伊藤竹史: 砂圧入式静的締固め工法 (SAVE-SP 工法) の改良効果と適用事例, 第 54 回地盤工学シンポジウム 平成 21 年度論文集, pp579-584, 2009.11.
- 2) 櫛原信二, 磯谷修二, 渡辺英次, 大林淳, 福島真吾, 野田洋: 砂圧入式静的締固め工法 (SAVE-SP 工法) の使用材料に関する一考察, 第 45 回地盤工学研究発表会, 2010.8.
- 3) 伊藤竹史, 田口雄一: 砂圧入式静的締固め工法の既設堤防への適用 (撫養港海岸堤防での試験工事報告), pp.65-66, 地盤工学会四国支部平成 21 年度技術研究発表会, 2009.11.
- 4) (社)地盤工学会: 打ち戻し式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.96-102, 2009.
- 5) 後藤文男, 水野健太, 末岡裕司, 山田哲也, 深田久: 砂圧入式静的締固め工法の開発と現地への適用, 第 46 回地盤工学研究発表会, 2011.7.