

撫養港海岸保全施設整備事業における 砂圧入式静的締固め工法の適用

真鍋 尊年

四国地方整備局 小松島港湾・空港整備事務所（〒773-0001 徳島県小松島市小松島町新港 9-14）

撫養港海岸桑島瀬戸地区では、目前に迫っている東南海・南海地震、津波および高潮災害に備えるために既設海岸堤防を改良する事業を進めている。当該地区での液状化対策は既設構造物直下の地盤を締固めることが必要であり、また作業用地が狭隘であるため、液状化対策工は小型の施工機に限られる。今回、H22年度撫養港海岸桑島瀬戸地区堤防改良工事（その4）において、自然材料である砂を用いて小型施工機で地盤を締固めることを目的に開発された、砂圧入式静的締固め工法（SAVE-SP工法）を採用した。非常に狭隘な場所での施工であったが、所定の改良効果を得る事ができた。

キーワード：地盤改良，締固め，小型施工機，液状化，狭隘地

1. はじめに

撫養港海岸桑島瀬戸地区では、既存の堤防は老朽化が進行しており、現状では亀裂の発生や水叩きが陥没する等、危険な状態である。また、基礎地盤は緩く堆積した砂質土地盤となっているため、地震時には液状化が発生し、堤防の倒壊及び沈下が発生することが予測される。当地区では、目前に迫っている東南海・南海地震、津波および高潮災害に備えるために撫養川の河口から西へ約 2.6km 区間にわたる既設海岸堤防を改良する事業を進めている。

当地区の背後には工場や民家が隣接して立ち並ぶ狭隘な施工条件で、堤防直下の改良も必要である。近年、この様な現場条件の液状化対策として、小型の施工機械により施工が可能な薬液浸透注入工法や圧入式静的締固め工法が採用されるケースが増加している。

本稿は、小型施工機によって自然材料である砂を地中に圧入し、原地盤を締固めることで、さらなるコスト削減や環境負荷低減を可能にすることを目的に開発された、砂圧入式静的締固め工法（以下、SAVE-SP工法と略す）を全国に先駆けて採用した事例について報告するものである。

2. 工法概要

（1）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-1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。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。

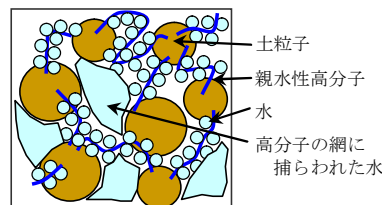


図-1 流動化砂の模式図

写真-1 流動化砂

（2）施工方法

標準的なSAVE-SP工法の機械構成を図-2に示す。

材料砂をバックホウで流動化砂製造プラントに投入し、プラント内で材料砂、水、流動化剤、遅効性塑性化剤を混練して流動化砂を製造する。製造された流動化砂は、流動化砂圧送ポンプによって小型施工機を介して地盤に圧入される。流動化砂の圧送距離は最大 100m 程度まで可能である。図-3 に締固め機構の概念図を示す。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締固められる。これを図-4 に示すように、所定の改良深度から 1 ステップ 20cm を連続して繰り返し、改良天端まで造成して改良対象地盤を締固める。

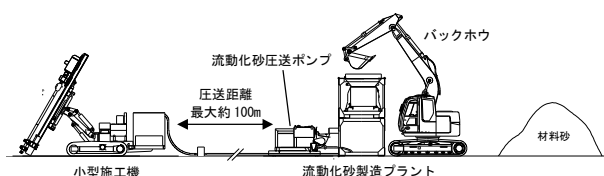


図-2 標準的な機械構成

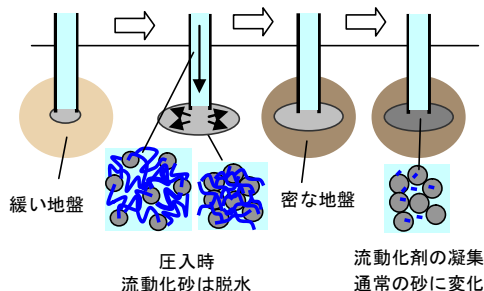


図-3 SAVE-SP 工法の締固め機構

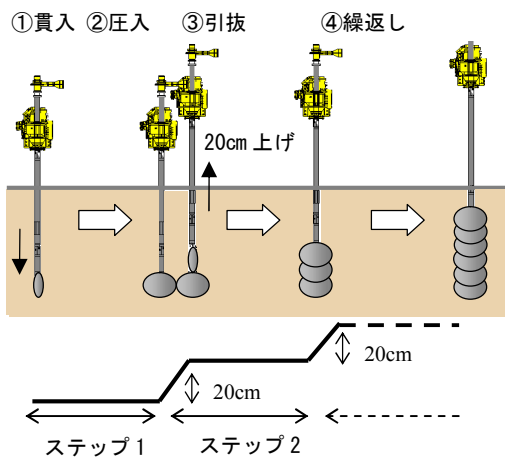


図-4 施工手順

(3) 工法の特長

従前の圧入式静的締固め工法は、低スランプのモルタルを使用するものであったが、SAVE-SP 工法は、従前の工法と比較して以下に示す特長を有している。

- 1) 圧入材は固化しないため、改良後に増杭や再改良が容易である。
- 2) セメント系の材料を使用しないため、周辺環

境への影響が少ない。

- 3) 圧入材は砂であるため、土地評価価格の下落をもたらさない。
- 4) 削孔と注入が連続して施工可能であるため、施工能率が良い。

また、従前の工法と同様に小型の施工機械で施工可能である点も本工法の特長である。

SAVE-SP 工法の設計法については従来のサンドコンパクションパイル工法の改良効果予測式が適用できることが既往の試験施工により確認されている¹⁾。

3. 採用の経緯

本事業では、狭隘な施工条件や比較的シルト含有率の大きな地盤条件から、適用できる工法は低スランプのモルタルを使用する圧入式静的締固め工法に限られていた。そこで、複数の地盤改良工法を適用可能とすることによる、競争性や選択肢の拡大を目的に SAVE-SP 工法の採用を検討した。しかし、SAVE-SP 工法は採用実績がなかったため、採用にあたっては以下の手順を踏んだ。

- 1) H21年4月に撫養港海岸堤防の敷地等を試験工事用地として紹介・調整を行い、実証試験工事の実施により、施工性及び改良効果を確認した^{1),2)}。
- 2) 実証試験工事結果等の実績をもとに、高松港湾空港技術調査事務所で NETIS に登録した(登録番号 SKK-090002-V)。
- 3) 新技術活用システムにより、発注者指定型での手続きを検討した。
- 4) 発注者指定型の事前審査の手順により、国土技術政策総合研究所で技術的事項及び経済性等の事項に関する確認を行い、「現場での試行可」の評価を得た。
- 5) H22年3月、事前審査の結果をもとに、四国地方整備局における新技術活用評価会議で現場での試行を承認された。
- 6) H22 撫養港海岸桑島瀬戸地区堤防改良工事(その4)で採用した。

4. 施工概要

H22 撫養港海岸桑島瀬戸地区堤防改良工事(その4)(以下、本工事)での施工概要を以下に述べる³⁾。

(1) 改良仕様

SAVE-SP 工法施工エリアの平面図を図-5、施工断面図および土質柱状図を図-6 に示す。改良深度は GL-2.8m~-22.9m (L=20.1m)、N 値は 2~12 程度である。上層から埋立層(砂礫)、沖積砂層(礫質砂、シルト質砂)の層序となっており、下部はシルト主体の層となっている。この砂質地盤の液状化対策として、換算改良径φ700で改良率20%となる

ように配杭し、既設堤防直下は堤防背面から10度の角度で斜打ち施工をした。目標とする改良強度（杭間N値）は、埋立層が平均等価N値15以上、沖積砂層が平均等価N値16以上である。

(2) 施工条件

SAVE-SP工法施工エリアは、図-5に示すように、工場建屋、荷揚棧橋、荷揚用アンローダー、機械設備等が近接している。工場建屋側には仮設鋼矢板による防護工を設置した。堤防前面部の荷揚棧橋や荷揚用アンローダー、堤防上部工に対しては、トータルステーション等による動態観測工を実施し、近接構造物の変状を逐一監視しながら慎重な施工を行った。また、SAVE-SP工法は従前の圧入式静的締固め工法と同様に、流動化砂を強制的に圧入して改良体を造成するという原理から、施工時の地中応力が増加して地盤変位が発生することが予想された。そこで本工事では、施工時の地中応力が集中しないような打設順序に留意して施工を行った。

(3) 施工性について

本工事では、工期の制約から流動化砂の製造は2プラントで行い、圧送ポンプおよび削孔・注入施工機は最大4台で施工した。写真-2に流動化砂の製造プラント、写真-3に流動化砂圧送ポンプ、写真-4、5にロータリーパーカッションドリルタイプの施工機による施工状況を示す。図-5に示したように、本工事は狭隘な施工環境であるため、一箇所に多くのスペースを確保できない状況であった。そのため、施工エリアに隣接する作業ヤードにプラント設備と材料砂ストックヤードを分散して配置することでこの問題を解決した。すなわち、従前の工法と同程度の施工エリアで施工可能なことが実証された。

施工を進めていく中での変位の程度は、平面的な施工密度や打設速度および対象地盤の土質に複合的に影響されていると考えられる。実工事への最初の採用でもあるため、図-5に示す改良範囲については、緩速施工と近接構造物の変状監視を強化することで、施工を無事完了した。

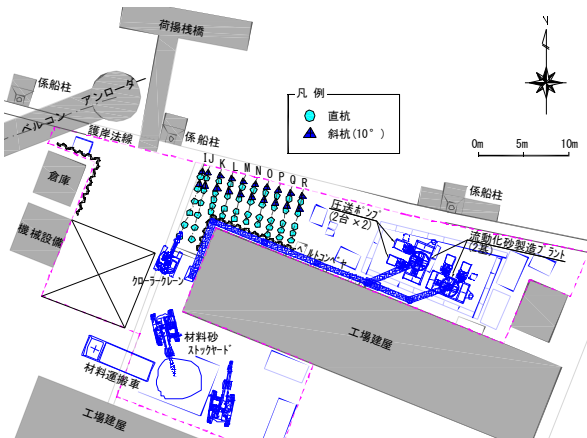


図-5 施工平面図

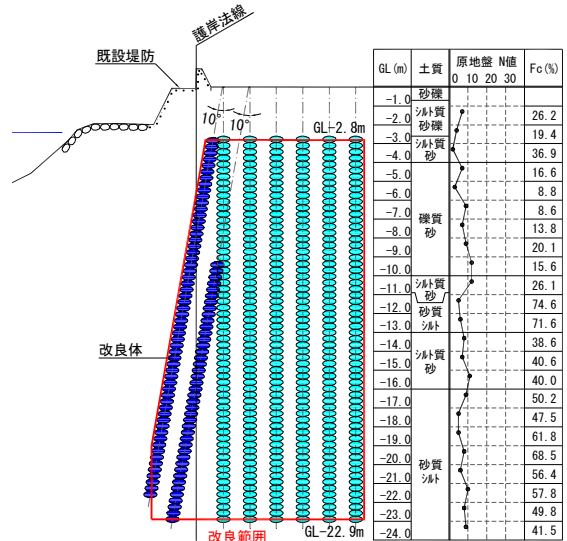


図-6 施工断面図および土質柱状図



写真-2 流動化砂製造プラント



写真-3 流動化砂圧送ポンプ



写真-4 施工状況 (近景)



写真-5 施工状況 (全景)

5. 施工結果

本工事における、施工時の変位と改良効果についての結果を以下に述べる。施工時の変位の着目点と改良効果確認のための調査ボーリング位置を図-7に示す。事後調査は別途業務で発注したボーリングH22-11Cと、施工者が実施したボーリングを合わせて示している。

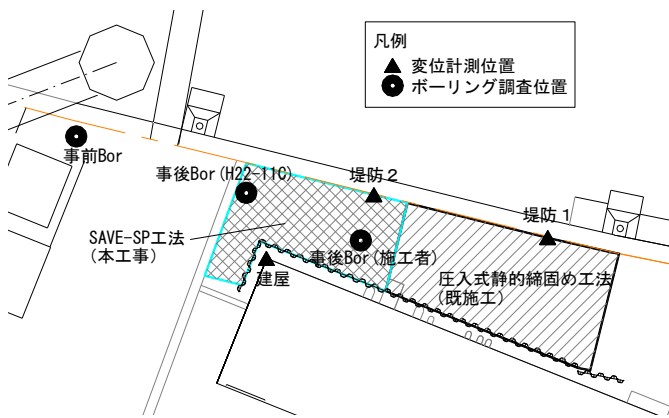


図-7 調査位置図

(1) 施工時の変位

図-7 に示すように、改良範囲に最も近接した堤防パラペット及び背面建屋の変形量を表-1 に示す。同表には、本工事の隣接工区で、従前工法である圧入式静的締固め工法を施工済みであるので、比較のために同工法の施工時の変位量を合わせて示す。

SAVE-SP 施工時の堤防の変位は最大 37cm で、圧入式静的締固め工法の 34cm と同程度であった。若干の差については、本工事では 2 プラント 4 マシンで大量施工を行い施工密度が高くなった事と、既施工工部が締固められているため、変位が堤防方向へ増幅しやすかったことが原因と考えられる。両工法とも施工エリアから離れた場所では、堤防の変位量がそれぞれ 1.6cm、4.4cm と小さくなり、施工時変位は距離によって減衰することが確認できた。建屋の変位も SAVE-SP 施工時は最大 1.3cm で、圧入式静的締固め工法の 1.8cm と同程度であった。建屋に対しては、仮設鋼矢板による変位防護効果が発揮され、変位影響を小さく抑えることができた。

表-1 近接構造物の施工時最大変位量

観測点	従前工法	SAVE-SP 工法
	施工時変位量	施工時変位量
堤防 1	34.0cm	1.6cm
堤防 2	4.4cm	37.0cm
建屋	1.8cm	1.3cm

(2) 改良効果

ボーリング調査結果を図-8 に、等価 N 値に換算した結果を図-9 に示す。図-8 より、改良後の地盤は事前調査に比べ改良全層で N 値の上昇が確認できた。H22-11C では増加 N 値が小さい傾向にあるが、調査位置が未改良エリアとの境界部であるためと考えられる。なお、各深度の細粒含有率も事前調査ボーリングと同程度であり、同様の地盤であることが確認できる。通常、締固め工法では細粒含有率の大きな地盤では締固め効果が得られにくい傾向にあるが、SAVE-SP 工法では、GL-11m 以深の細粒含有率の大きな深度でも N 値の増加が確

認できた。図-9 より、今回改良対象となった改良層 (As 層) の平均等価 N 値は 16.5~23.8 が得られ、目標とする改良強度を満足していることが確認できた。

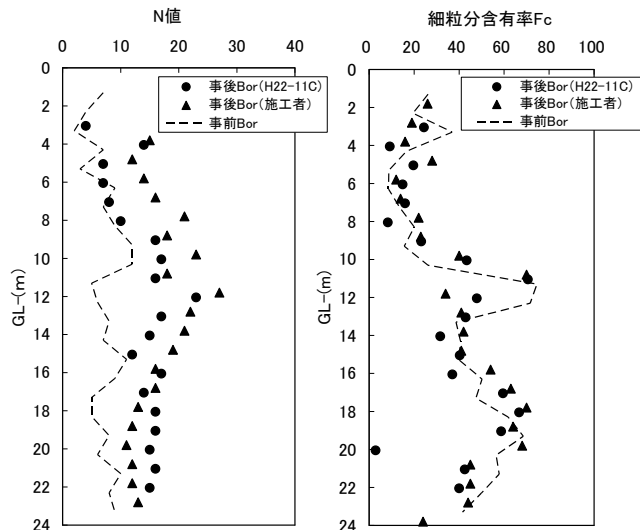


図-8 事後調査結果

6. おわりに

SAVE-SP 工法は、撫養港海岸保全施設整備事業において初めて実工事に採用した液状化対策工法である。本工事の様に狭隘な施工環境でも施工が可能であることが実証できた。また、目標値を満足する改良効果が得られたことから、実工事への適用が十分可能であることが確認できた。施工時の変位は、従前工法と同等程度の変位量であることを確認したが、今後、重要構造物に近接施工する場合は、事前の変位対策をしっかりと計画する必要がある。

本工事において、狭隘な施工条件等で適用できる液状化対策工法の幅が広がったことから、様々な地盤条件に合わせた工法の選択肢拡大に期待が持てる。

本工事において、狭隘な施工条件等で適用できる液状化対策工法の幅が広がったことから、様々な地盤条件に合わせた工法の選択肢拡大に期待が持てる。

参考文献

- 1)今井ら：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 回地盤改良シンポジウム, pp.579-584, 2009.
- 2)伊藤ら：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.
- 3)後藤ら：砂圧入式静的締固め工法の開発と現地における適用、第 46 回地盤工学研究発表会、投稿中

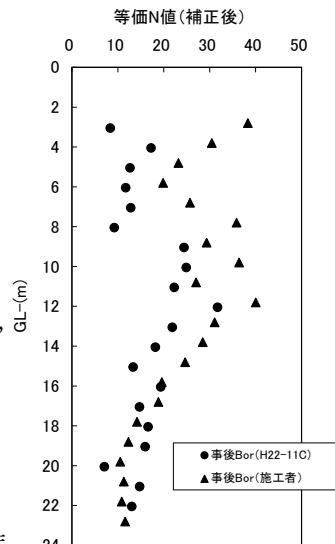


図-9 改良後等価 N 値