

既設構造物を対象とした締固めによる耐震対策事例

(株)不動テトラ 正会員 ○竹内 秀克
正会員 大林 淳
正会員 鵜野 雅明

1. はじめに

河川堤防や既設岸壁など既設構造物の耐震性向上のため、狭隘地や構造物直下など、より厳しい施工条件においても適用可能な液状化対策工法が求められている。サンドコンパクションパイル工法などのような大型の施工機械を用いる工法では、施工スペースの確保が問題となり適用できない場合が多い。そのため、小型施工機を用いる薬液注入系の固化工法の適用が増加しているが、従来工法に比べてコストが高いため、さらなるコスト削減や環境負荷を軽減できる材料（砂）の使用を可能にする締固め工法が求められている。

砂圧入式静的締固め工法は、流動化剤を添加して流動性を付与した砂をポンプにより地中に圧入して締固めを行う液状化対策工法である。本工法の施工機は小型であり、狭隘地施工が可能であり、斜め施工や硬質障害物層等の貫入にも対応できるため、既設構造物直下の改良にも対応できる。これらの特性を活かし、開発以来2013年5月現在で約25件の施工実績を重ね適用範囲が拡大してきた。本稿では工法概要と海岸堤防や河川堤防を対象とした耐震補強工事における施工状況や改良効果等について紹介する。

2. 砂圧入式静的締固め工法（SAVE-SP 工法）

2.1 概要

砂圧入式静的締固め工法（以下、SAVE-SP 工法）は、圧送可能にした砂（流動化砂と呼ぶ；写真-1）を小型施工機のロッドを通じて地盤内に圧入することにより、緩い砂地盤の締固めを行う地盤改良工法である。工法名は「Silent Advanced Vibration Erasing—Sand Press」の頭文字より称した。小型施工機の使用、低振動・低騒音、材料には砂を用いるため、周辺環境・自然環境にも優しい画期的な地盤改良工法である。改良原理は、SCP工法等に代表される密度増大による従来の締固め工法と同様である。従来工法と異なる点は、地中に圧入する材料の状態である。図-1に流動化砂の状態変化の概要を示す。圧入材料はSCP工法などに用いられる砂を、専用プラントにて流動化剤と混練し、ポンプ圧送可能な状態にして使用する。所定の深度まで貫入されたロッドを通じて地中に圧入され、周囲の地盤を締め固める。圧入された砂は、排出時の脱水および添加された遅効性塑性化剤の作用で流動性が消失し、よく締まった状態で地中に存置される。



写真-1 圧送される流動化砂の状態

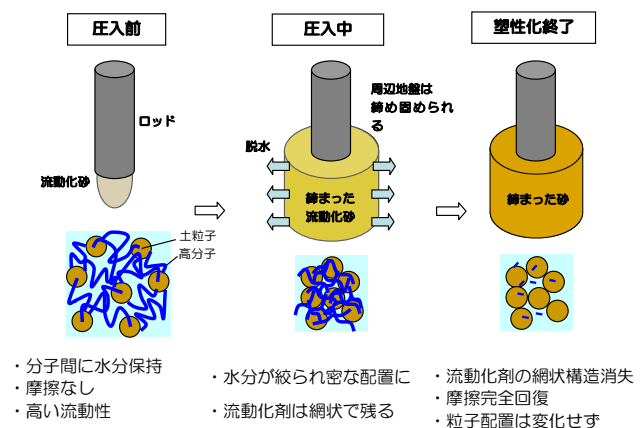


図-1 流動化砂の状態変化

キーワード 締固め，液状化，地盤改良

連絡先 〒103-0016 東京都中央区日本橋小網町 7-2 (株)不動テトラ 地盤事業本部 技術部 TEL 03-5644-8534

2.2 施工機械

SAVE-SP 工法で使用する施工機械は、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。施工機は3m×6m 程度の超小型クローラータイプおよびロータリーパーカッションドリルタイプを取り揃えている。

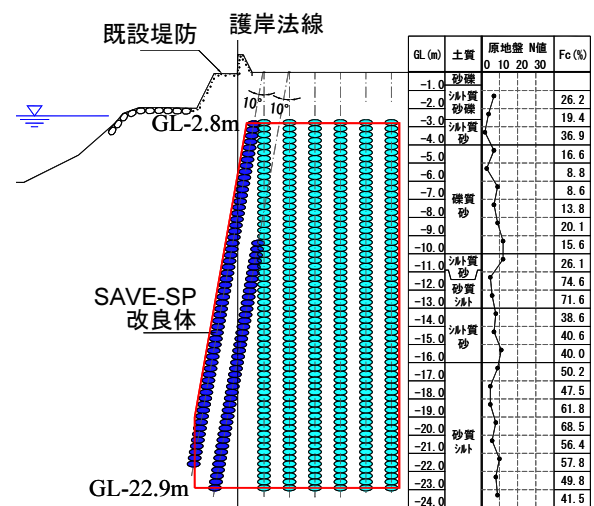
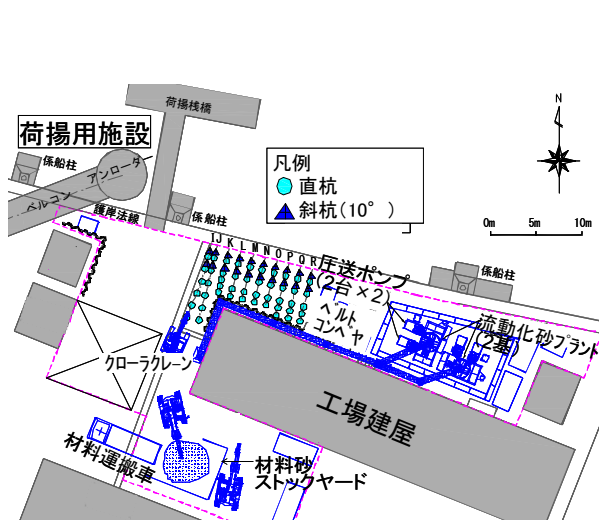
地中に貫入するロッドは $\phi 100\text{mm}$ 程度である。プラントはバッチ毎に流動化砂を製造するもので、搬入した砂への加水、流動化剤および塑性化剤の添加・混練を行う。ポンプはピストン式で、材料の吸込と吐出を連続で行う。ピストン速度を変えることで流量調整が可能である。ポンプと施工機の離隔は 100m 程度まで対応可能である。

2.3 流動化砂

流動化砂は、砂に流動化剤（アニオン系高分子材）を添加・混練することで、砂と水の分離が抑制され流動性が増した状態である。地盤圧入後に流動性が消失するよう遅効性の塑性化剤（カチオン系高分子材）も添加する。材料砂は、圧送中の流動性（保水性）確保と地中圧入時の速やかな脱水が両立する粒度特性が必要であり、細粒分 $F_c=5\%$ 程度、 $D_{50}=0.5\text{mm}$ 程度までの細砂が適用可能であることを確認している。流動性はテーブルフロー値が $170\sim 230\text{mm}$ になるよう調整する。含水比は概ね $30\sim 40\%$ 程度である。流動化砂の地中圧入時の脱水は数分で終了するため、地中に圧入された流動化砂は圧入後には締まった砂になっている。長期圧密試験、一面せん断試験および事後調査において液状化対策工として必要な性能を有することを確認している。

3. 海岸堤防を対象とした耐震対策事例

SAVE-SP 工法が既設構造物の液状化対策として適用された事例について紹介する。既設海岸堤防を耐震改良する事業において SAVE-SP 工法が採用された²⁾。施工エリア(図-2)は、工場建屋、荷揚棧橋、荷揚げ施設等が近接している。工場建屋側には仮設鋼矢板による防護工を設置した。堤防前面部に対しては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、流動化砂の圧入によって地盤の間隙水圧が上昇し、地盤変位の要因となることが想定された。そこで当工事では、間隙水圧計を設置して事前に間隙水圧の消散期間を把握し、隣接杭の打設日間隔を一定期間空けるローテーション施工を実施した。



対象地盤の構成は、図-3 に示すとおり、上層から埋立層、沖積砂層であり、下部はシルトが主体で、N 値は 2~12 程度である。この砂質地盤の液状化対策として、SAVE-SP 工法（換算改良径 $\phi 700\text{mm}$ ）が改良率 20% となるよう配杭され、既設堤防直下は堤防背面から 10° で斜打ち施工が行われた。改良後の N 値は、改良体中央深度付近で最大値（N 値=27）をとり、細粒分含有率の高い G.L.-10m 以深においても N 値は増加しており、全深度に渡って締固め効果が認められた³⁾。施工状況を写真-2~写真-4 に示す。



写真-2 流動化砂製造プラント



写真-3 施工状況（全景）



写真-4 施工状況（近景）

4. 河川堤防を対象とした耐震対策事例

当該地は堤防基礎地盤に沖積の緩い砂層が分布しており、大規模地震等に伴う液状化により、堤防が大きく沈下・変形することが懸念された。堤内地側は民家などが接近して存在しており（写真-5）、振動式サンドコンパクションパイル工法など大型の施工機を用いることが困難な施工条件である。また、堤内地側の液状化対策を行う上では浸透流を阻害しないことが求められる。このような条件に適応する工法として SAVE-SP 工法が選定された。なお、堤外地側は施工ヤードが広い静的締固め砂杭工法（以下、SAVE コンポーザー）が適用されている。工事の概要について報告を行うとともに、その改良効果等についても言及する。また、一部においては河道掘削砂を材料として適用して有効利用を図った事例を紹介する⁴⁾。



写真-5 施工箇所の一例

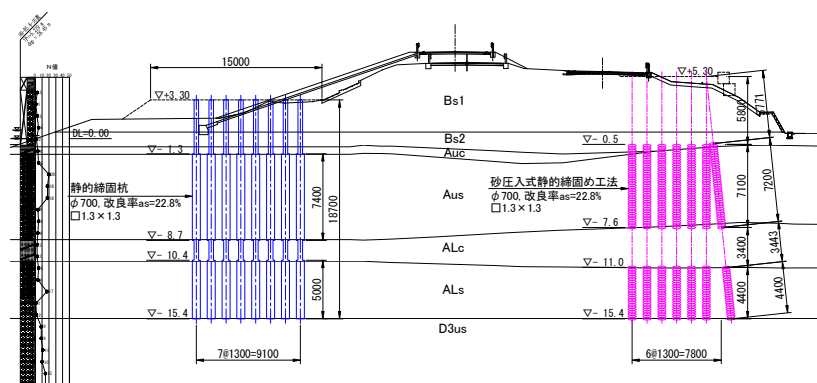


図-4 改良断面の一例

当工事は既設の河川堤防の堤防耐震補強工事であり、全7工区（堤防延長約1.8km）において実施された。代表的な断面を図-4に示す。施工に際しては堤内地側法面に仮設盛土を行って施工ヤードを造成している。仮設盛土の幅は狭小な部分で4m程度であった。削孔長は9～21m、改良長は2～14m、改良ピッチは1.2m～1.9m（正方形配置）であった。改良列数は3～8列である。流動化砂製造プラントから施工機までは最大で100m程度の圧送を行った。施工状況を写真-6に示す。



写真-6 施工状況

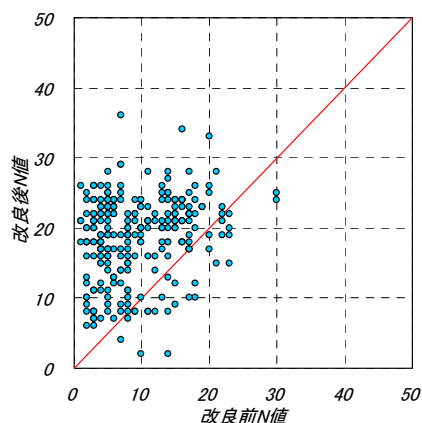


図-5 改良効果

改良前後の N 値を比較した結果を図-5 に示す。改良後の N 値は事前に対して最大で 20 程度の増加が確認できる。一部で改良前の N 値を下回る箇所も見られるが、これは改良前のボーリング位置と 10～50m 程度の離隔があるため地盤のバラツキの影響と考えられる。地盤の細粒分含有率や改良仕様により N 値増加の程度は異なるため、詳細な分析を必要とするが、当工事での改良目標値 $FL > 1.1 \sim 1.3$ （設計震度 $k_h = 0.18$ ）を十分に満足するものであった。また、図-7 には N 値の深度分布の一例を示すが、上層部から下層部まで確実に N 値が増加していることがわかる。併せて、大型機による SAVE コンポーザーの効果と同程度であった。

また、当工事においては、洪水対策として実施している同河道掘削工事で発生する砂を SAVE-SP 工法の方法として利用した。これにより、SAVE-SP 工法の方法コスト低減のほか、掘削砂の処分コストも大幅に低減されている。利用に当たっては、図-8 に示すように水中ブルドーザーによって掘削された砂を自走式ふるい分け機を用いてゴミや石などを除去した後、各施工箇所に運搬し施工を行った。図-9 に浚渫砂の粒度分布を示す。掘削砂を使用した場合の改良後 N 値についても、購入砂と同等の改良効果が得られている。

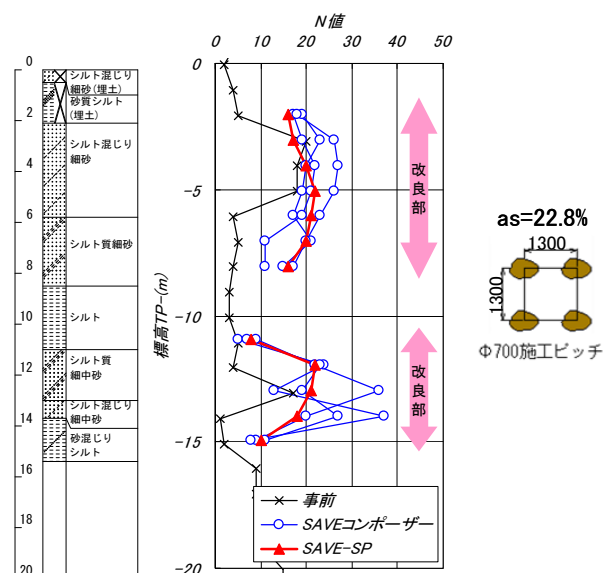


図-7 改良前後の N 値の比較

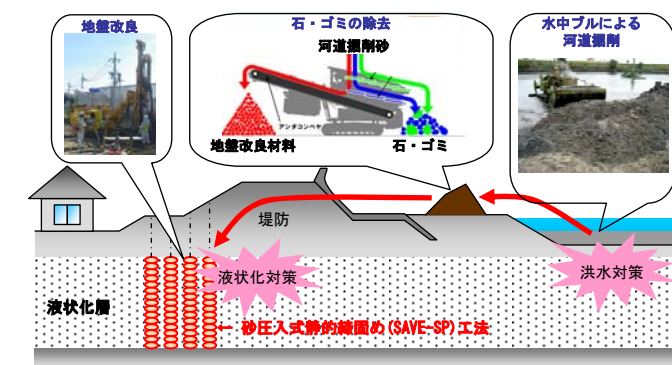


図-8 河道掘削砂の利用方法

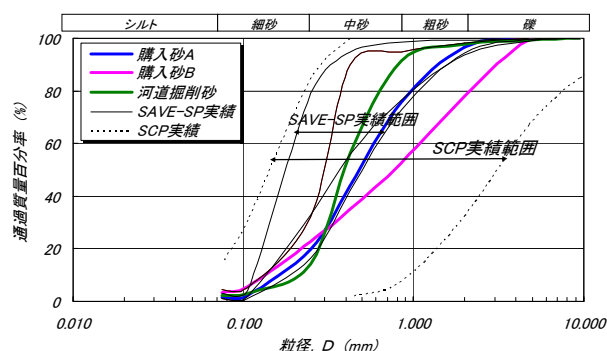


図-9 材料砂の粒径加積曲線

5. おわりに

本稿では、既設の海岸堤防および河川堤防における砂圧入式静的締固め工法（SAVE-SP 工法）の適用事例について報告を行った。改良効果は、明確に N 値増加が確認され目標を十分に満足するものであった。さらに、河川堤防の事例では河道掘削砂についても粒度分布が適合すれば十分に適用が可能であり、耐震対策及び洪水対策のコスト縮減策として大いに期待される。

最後に、本稿を纏めるにあたりご指導ご協力を頂いた関係者の皆様に謝意を表します。

参考文献

- 1) 大林淳・深田久・伊藤竹史：狭隘地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，土木建設技術発表会 2011 概要集，pp.200～204，2011.
- 2) 後藤文雄・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における適用，第 46 回地盤工学研究発表会，pp.889～900，2010.
- 3) 藤野正宏・深田久：海岸堤防の耐震化―撫養港海岸堤防における SAVE-SP 工法の適用―，土木施工，Vol.52，No.12，pp.34-37，2011.
- 4) 鶴野雅明・竹内秀克・久保陽太郎・中出雄也：庄内川河川堤防における砂圧入式静的締固め工法の適用事例，第 48 回地盤工学研究発表会，pp.931～932，2013.