

庄内川堤防耐震補強工事における砂圧入式静的締固め工法の適用事例

(株)不動テトラ 正会員 ○久保陽太郎 鵜野雅明 中出雄也
(株)不動テトラ 国際会員 深田 久 竹内秀克

1. はじめに

砂圧入式静的締固め工法（SAVE-SP 工法）は、流動化剤を添加して流動性を持たせた砂（流動化砂）をポンプにて地中に圧入して緩い砂地盤の締固めを行う液状化対策工法である¹⁾。従来のサンドコンパクションパイル（SCP）と比較して非常に小さな施工機械であるため、狹隘地での施工が可能である。この特性を活かして、河川堤防としては初めて庄内川下流部の一部（0.15～5.75kpのうち堤防延長約1.8km）の堤内地側の液状化対策として適用された。庄内川は堤防基礎地盤に沖積の緩い砂層が分布しており、南海トラフで発生する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ていた。庄内川の堤内地側は民家などが連たんしており（写真-1）、SCP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ので静的締固め砂杭工法（SAVE コンポーザー）が適用されている。本稿では、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報告する。加えて、今回の施工結果から得られた圧入圧力のデータを用いて、圧入圧力と改良効果の関係についての検証も行った。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ており、その利用方法などについても報告を行う。



写真-1 施工箇所の一例

2. SAVE-SP 工法の概要

(1) 機械構成

SAVE-SP 工法は、流動化した砂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。また、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。本工法で使用する施工機械は図-1、写真-2に示すように、ロッド（φ100mm 程度）を貫入する小型施工機、流動化砂製造プラント、圧送ポンプ、材料投入のためのバックホウからなる。施工機は、①超小型クローラタイプ機、②ボーリングマシンタイプ機、③ロータリーパーカッションドリルタイプ機が適用可

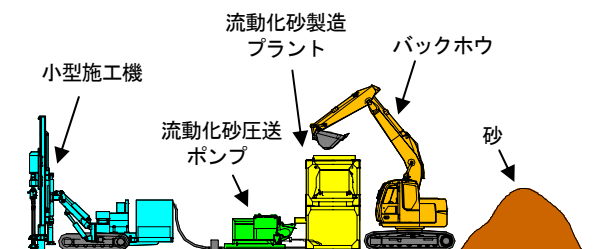


図-1 砂圧入式静的締固め工法の機械構成



写真-2 施工設備

能であり、施工条件（施工深度、空頭制限、斜杭の傾斜角等）や地盤条件（原地盤N値、地中障害物の有無等）により選定される。本工事においては、ロータリーパーカッションドリル（RPD）タイプが用いられている。プラントは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。また、プラントと施工機の離隔は100m程度まで対応可能である。

(2) 流動化砂

流動化砂とは、材料砂に流動化剤（アニオン系高分子材）を添加・混練し、その保水効果で間隙水の粘性を高めるとともに、砂と水の分離が抑制させ、ポンプ圧送を可能にした流動状態の砂のことを言う（写真-3）。



写真-3 流動化砂

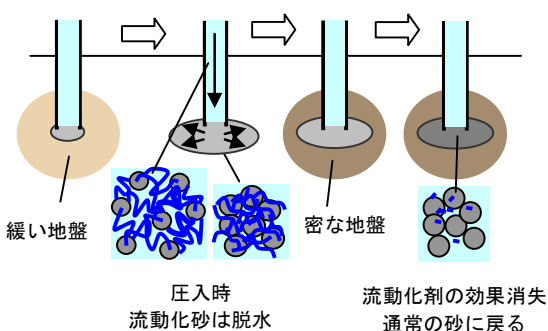


図-2 締固め機構

なお、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）も添加している。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、現時点では細粒分含有率 $F_c \leq 5\%$ 程度の砂の適用性が確認されている。流動性については、テーブルフロー値 170～230mm 程度、分離性についてはブリーディング率が3%程度以下（3時間後）となるよう調整される。本工法の締固め機構を図-2に示す。ロッドから地中に排出された流動化砂は圧力で脱水され、締めりながら拡張されると同時に周囲の地盤は締固められる。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。



写真-4 施工状況

3. 工事概要

本工事は、国土交通省中部地方整備局庄内川河川事務所管の庄内川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。施工状況を写真-4に、代表的な断面および平面を図-3、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。本工事では、1プラントにつき2マシンで施工を行っており、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。

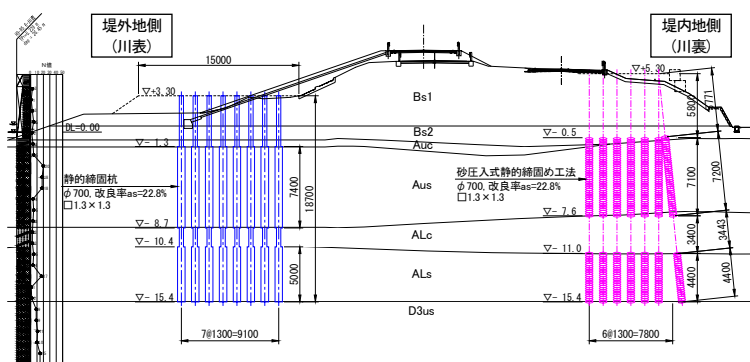


図-3 改良断面の一例

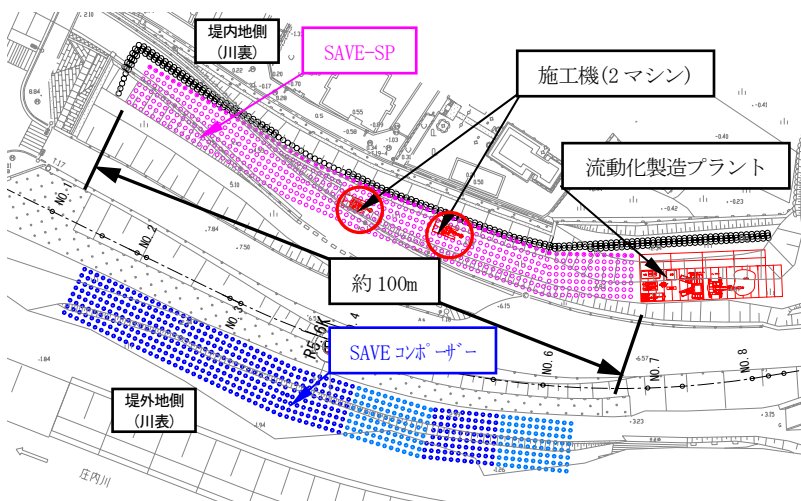


図-4 改良平面の一例

4. 使用材料

本工事の SAVE-SP 材料砂の粒径加積曲線について図-5 に示す。材料は購入砂 (洗砂) と洪水対策として上流側で実施している河道掘削工事において発生する砂を使用した。材料砂の粒度特性は、最大粒径 9.5mm 程度 (配管径の 1/4 程度)、細粒分含有率 $F_c \leq 5\%$ 程度を満足している。

流動化砂の使用材料に関する適用判定基準値を表-1 に示す。流動化砂の含水比は、施工前に配合試験を実施して、テーパーフロー値 170~230mm 程度、ブリーディング率 3% 程度以下 (3 時間後) となるよう調整して、いずれの材料においても 30% とした。

5. 施工仕様および地盤概要

SAVE-SP 工法の施工方法は、所定深度まで削孔後に流動化砂を圧入するものであり、1 ステップ (20cm) あたり 0.101m^3 (1m あたり 0.501m^3) の材料を圧入する。ただし、圧力設定上限値 (7MPa) に達した場合は、次のステップに移行する方法をとっている

(図-6)。砂杭の造成方法は従来の SCP や静的締固め砂杭工法と異なり、従来工法では圧縮エアーをかけながらケーシングを引抜いて材料砂を排出し、さらにケーシングで打戻すことで締固め砂杭を造成していたのに対して、本工法では材料の圧入をポンプの圧力のみで行っており、圧入に際して地盤の影響を受けやすいといえる。

改良対象地盤は、沖積の砂層であり、改良対象地盤の N 値および細粒分含有率について図-7, 8 に示す。SAVE-SP 工法の設計は、図-9 に示す方法 D^2 により打設ピッチ (改良率) を算出し、改良幅は過剰間隙水圧を考慮した円弧すべり解析により決定されている。

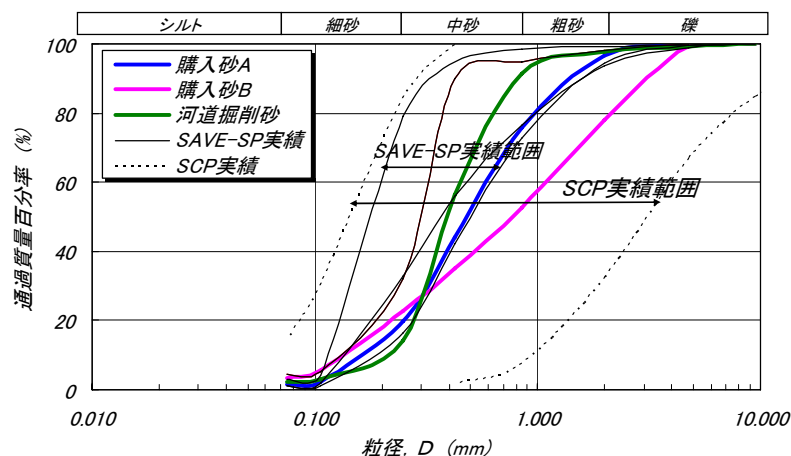


図-5 材料砂の粒径加積曲線

表-1 使用材料に関する適用判定基準

対象	判定項目 (試験名)	適正值
材料砂	粒度特性 (粒度試験)	- 最大粒径: 9.5mm程度 (配管径の1/4程度) - 細粒分含有率: $F_c \leq 5\%$程度
流動化砂	流動性 (フロー試験)	・フロー値: 170~230mm程度
	分離性 (ブリーディング試験)	・ブリーディング率: 3%程度以下 (3h後)

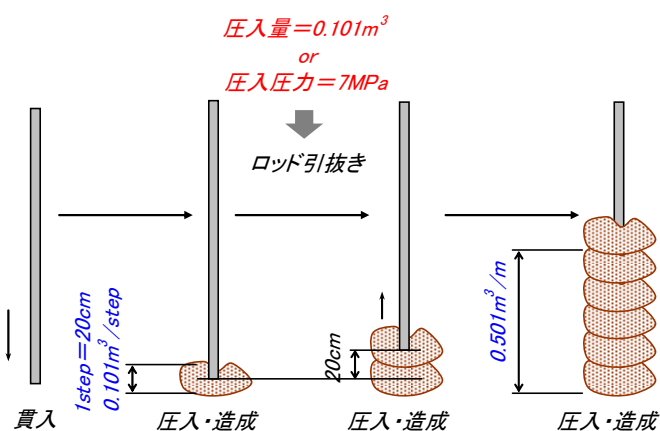


図-6 SAVE-SP 工法の施工方法

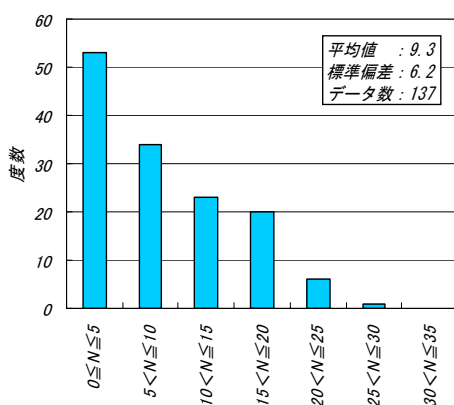


図-7 改良対象地盤の N 値

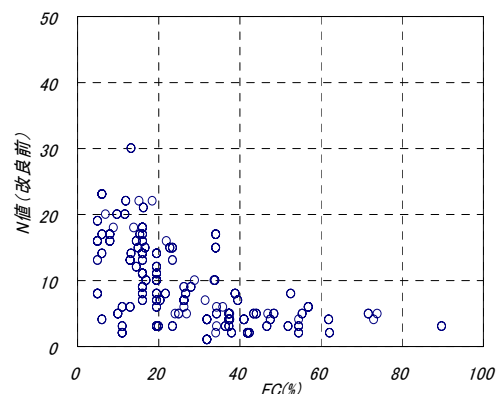


図-8 細粒分含有率と原地盤 N 値

6. 改良効果

(1) 改良後 N 値と FL 値

改良前後の N 値を比較した結果を図-10 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、本件での改良目標値 $FL > 1.1 \sim 1.3$ (設計震度 $k_h = 0.18$) を十分に満足するものであった (図-12, 13)。方法 D²⁾ による改良後 N 値の推定結果と実測改良後 N 値の比較を行った結果を図-11 に示す。なお、推定値を求めるにあたっては、実際の圧入量から実質の改良率を算定している。両者は概ね良好の一致を示しており、SAVE-SP の改良効果が従来の SCP 等と同等であることが判る。

図-12 に同一箇所を実施された静的締固め砂杭工法 (SAVE コンポーザー) との改良後 N 値と FL 値の比較を示し、図-13 に材料砂 (購入砂, 河道掘削砂) の違いによる改良後 N 値と FL 値の比較を示す。これより、上層部から下層部まで確実に N 値が増加しており、改良目標値を十分に満足していることがわかる。この結果、SAVE-SP 工法は従来工法 (SAVE コンポーザー) と同等の改良効果であることが確認できる。また、河道掘削砂については、粒度分布が適合すれば材料砂として十分に適用が可能であることがわかる。

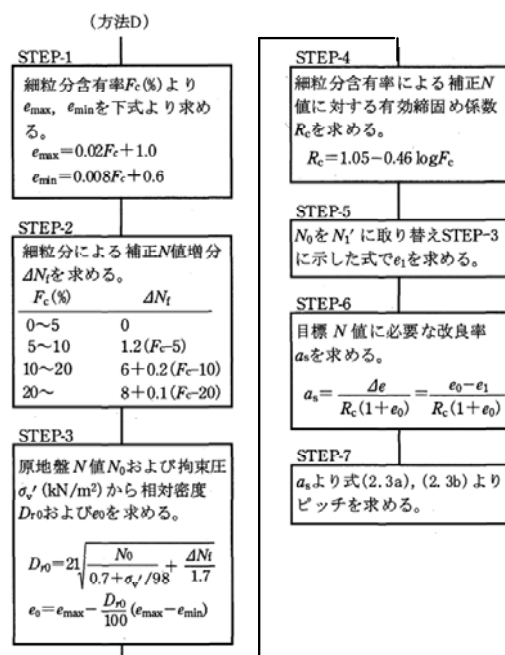


図-9 SCP の砂地盤に対する設計手法 (方法 D)

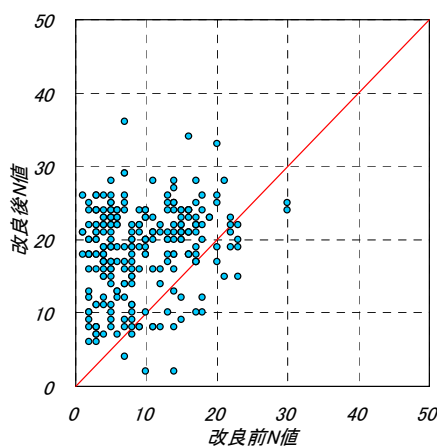


図-10 改良前後の N 値の比較

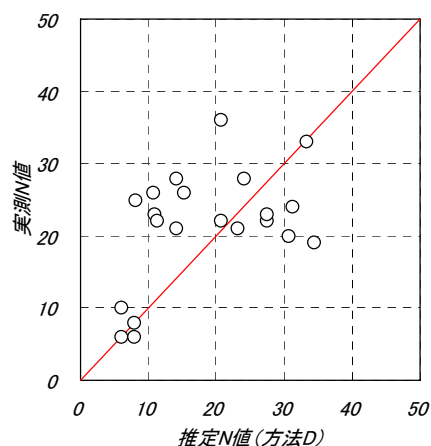


図-11 改良後推定 N 値と実測 N 値

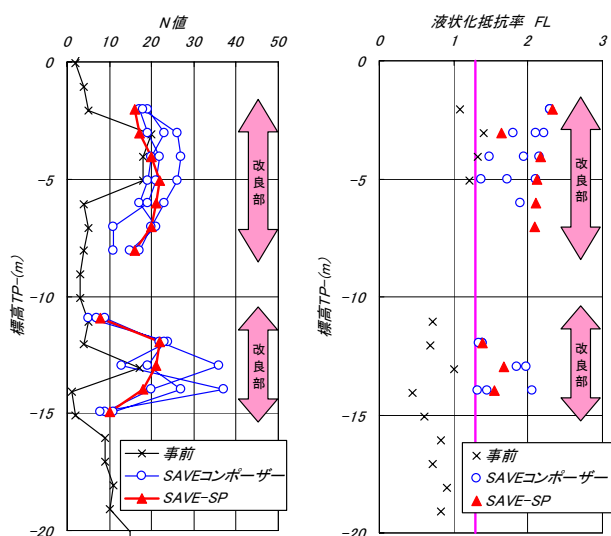


図-12 SAVE-SP 工法と静的締固め砂杭工法による改良後 N 値と FL 値の比較

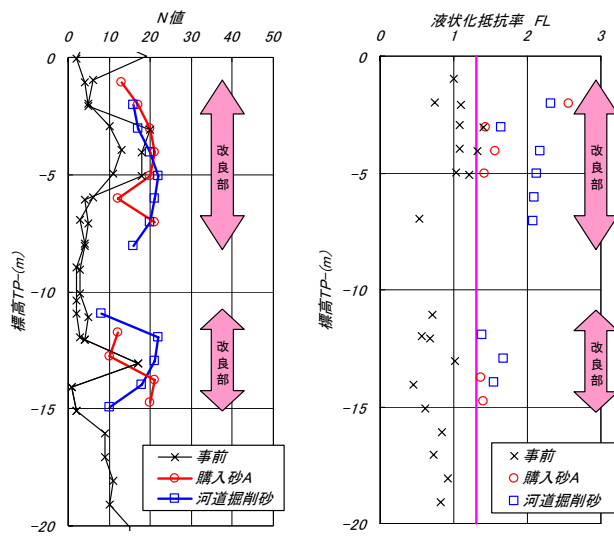


図-13 材料砂 (購入砂, 河道掘削砂) の違いによる改良後 N 値と FL 値の比較

(2) 圧入圧力とN値・相対密度の関係

図-14 は、本事例における圧入圧力とN値を対比した一例であるが、特に改良前のN値と圧入圧力には相関性が認められる。つぎに、これらの結果を基に改良前後のN値と圧入圧力の頻度について整理した。図-15 は改良前の結果であるが、改良前のN値が大きいほど、圧力設定上限値7MPaが発生する割合が大きい。N値の大きさに比例して圧入圧力が増加するのではなく、上限値に達する頻度が増加する傾向がある。図-16 は改良後の結果である。改良前と同様に、N値が大きくなるに従い圧力設定上限値に到達する頻度が比例的に増加する。また、改良後N値が10以下の場合、上限値に達する頻度が殆どないが、改良前N値が10以下の場合には40～50%が上限値に達している。これは、圧入に従い徐々にN値が増加し、設定上限値に達するという現象を表していると考ええる。一方で、改良後N値が15以下(図中に明記)のようにN値増加が小さい場合には圧力設定上限値に達することが殆どないことがわかる。これは、N値が小さい箇所は細粒分含有率が高いことが想定されるため、次式を用いて改良後の相対密度を算出して、細粒分の影響を考慮した改良効果の評価を行った。

$$D_r = 21 \{ N / (0.7 + \sigma'_v / 98) + \Delta N_f / 1.7 \}^{0.5}$$

(D_r : 相対密度, N : N値, σ'_v : 有効土被り圧,

ΔN_f : 細粒分による補正N値)

図-17 は圧入圧力

と改良後相対密度の関係である。図中には、圧力範囲ごとに相対密度の平均値を算出した結果についても示している。これによるとバラツキはあるが圧入圧力によらず相対密度の値は概ね一定であり、

圧力が上昇せず改良後N値が小さな場合においても相応の密度が得られているということと、圧力設定上限値に達して所定量の圧入ができない場合でも同等の相対密度が得られていることが判る。

7. 施工時変位

SAVE-SP 工法は、材料圧入により地盤を締固める原理であるため、施工時に変位を有する。本工事で実施した変位計測結果の一例について図-18 に示す。図中にはSAVEコンポーザーの既往の計測結果についても併せて示す。SAVE-SP 工法の変位は、SAVEコンポーザーの上限付近となっているが、これ

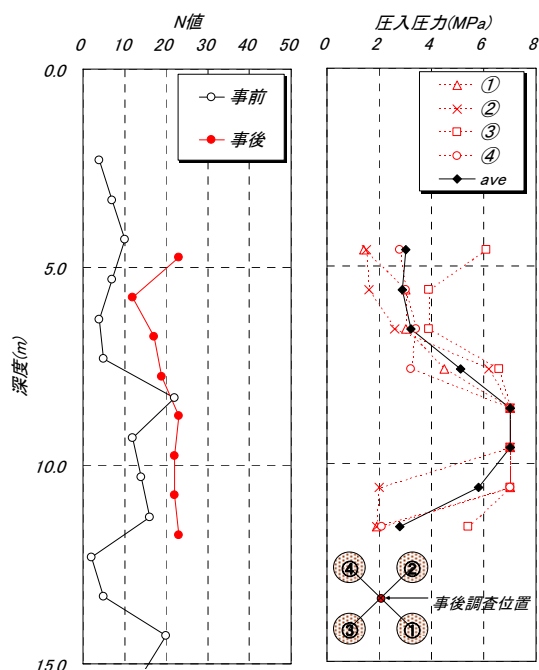


図-14 N値と圧力関係の一例

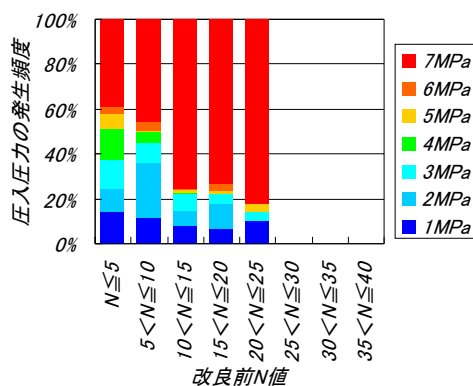


図-15 改良前N値と圧入圧力関係

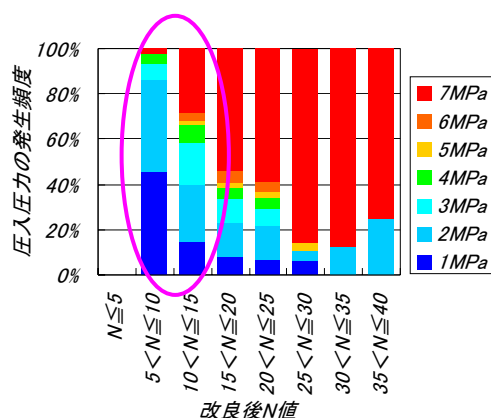


図-16 改良後N値と圧入圧力関係

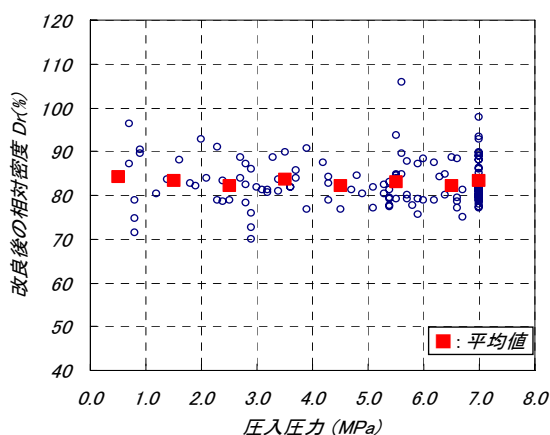


図-17 圧入圧力と改良後相対密度の関係

は変位が発生しやすい地形パターンであったため、実際には同程度以下の変位影響であると考えられる。

8. 振動・騒音

SAVE-SP 工法の振動および騒音の測定結果について図-19, 20 に示す。なお、測定は施工機と流動化砂製造プラントのそれぞれについて行った。振動レベルは離隔距離 10m で 50dB 程度、騒音レベルは離隔距離 10m で 75dB 程度と直近においても規制基準値以内である。本工法は小型施工機という特性から近接施工に用いられることも想定されるが、今回の測定結果より低振動

・低騒音の工法であることが確認された。

9. 河道掘削砂の利用

本工事においては、洪水対策として実施している河道掘削工事で発生する砂を SAVE-SP 工法の材料として利用している。これにより、SAVE-SP 工法の材料コスト低減のほか、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-21 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り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。掘削砂を使用した場合の改良後 N 値について図-13 中に示すが、購入砂と同等の改良効果が得られている。

10. まとめ

本稿では河川堤防において、SAVE-SP 工法をはじめて適用した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り、従来の SCP 等と同程度の改良効果であることが確認された。河道掘削砂については、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削減策として大いに期待される。さらに、今回の施工データをもとに、圧入圧力に着目した改良効果の考察を行った。その結果、圧入圧力は N 値との相関があるものの、最終的に得られる改良効果は圧力の大小によらず、改良目標値を十分に満足することが確認された。施工時変位は、地形条件を考慮すると SAVE コンポーザーと同程度の変位影響であると考えられる。また、振動・騒音測定結果より、改めて低振動・低騒音工法であることが示された。最後に、本稿を纏めるにあたりご指導ご協力を頂いた庄内川堤防耐震補強工事の各工区関係者の皆様に謝意を表します。

参考文献

- 1) 今井優輝他(2009): 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論文集, pp. 579-584.
- 2) (社)地盤工学会(2001): 打戻し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. 98-101

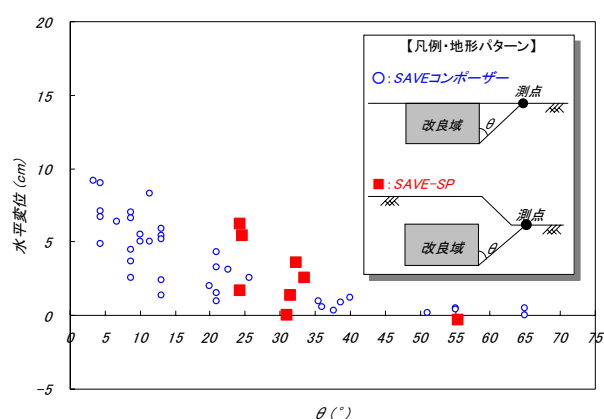


図-18 周辺地盤変位

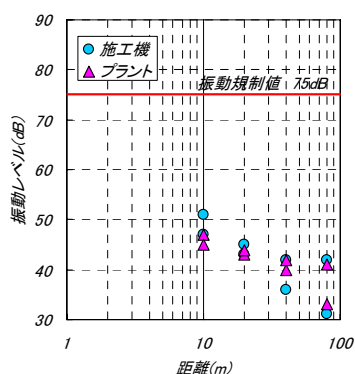


図-19 振動測定結果

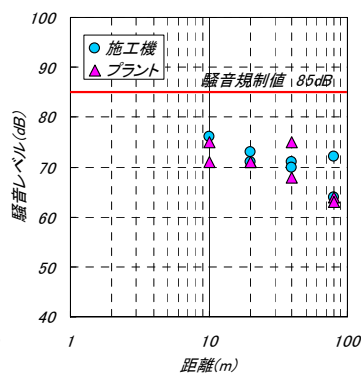


図-20 騒音測定結果

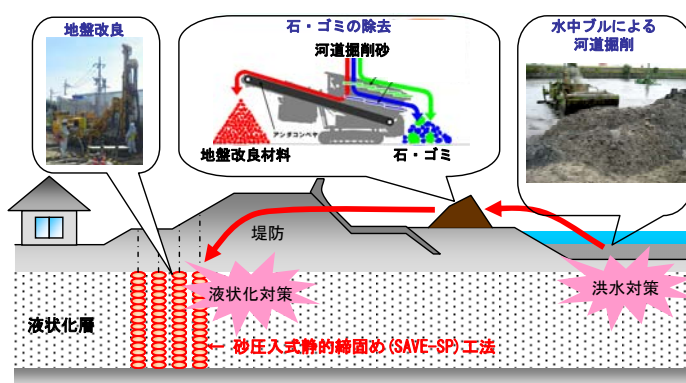


図-21 河道掘削砂の利用方法