

締固めによる 木曽三川下流域堤防基礎耐震化の事例紹介

砂圧入式静的締固め工法（SAVE-SP 工法）

森 鼻 章 治・鶴 野 雅 明

河川堤防や海岸堤防は、基礎地盤に液状化層が分布することが多く、地震時にこれらの構造物が過大な沈下を来すことで本来の性能を確保できなくなることが懸念されている。砂圧入式静的締固め工法（SAVE-SP 工法）（以下「本工法」という）は、流動化剤を添加して流動性を持たせた砂をポンプ圧送して地盤中に圧入することで、緩い砂地盤の締固めを行う液状化対策工法である。省スペースの小型施工機を用いるため、従来のサンドコンパクションパイル工法のような大型施工機が適用困難であった狭隘地の施工が可能である。本稿では、本工法の概要と河川堤防の耐震化として木曽三川下流域に適用された事例について紹介する。

キーワード：液状化、堤防、地盤改良、締固め、サンドコンパクションパイル、小型施工機

1. はじめに

河川堤防や海岸堤防は、津波や高潮、洪水から人命や財産を守るために重要な施設であるが、基礎地盤に液状化層が分布する事が多く、地震時にこれらの構造物が過大な沈下を来し、本来の性能を確保できなくなることが懸念されている。また、都市域においては、これらの施設の背後まで土地利用されていることが多く、液状化対策を実施するにおいても施工スペースなどの面で非常に厳しい制約条件を受けることが往々にしてある。従来用いられているサンドコンパクションパイル工法（以下、SCP）などのような大型施工機はこのような条件下では適用困難であり、省スペースの対策工法が望まれている。既存の省スペース工法としては、薬液注入や高圧噴射攪拌工法などが存在するが、一般に非常に高価であり、かつ水際での使用を考えた場合、環境的にも注意が必要となることが多い。加えて河川堤防などにおいては浸透流の阻害などにより、洪水対策上好まれない構造となる場合もある。

本工法は、流動化剤を添加して流動性を持たせた砂を地盤中に圧入することで地盤の締固めを行う液状化対策工法である¹⁾。小型施工機であるため狭隘地施工が可能であると同時に、SCP がもつ改良効果の確実性や、砂を母材としていることから地盤となじみやすく環境負荷の小さい工法である。これらの特性を活かし、開発以来 2016 年時点で河川堤防、海岸堤防を中心に 100 件以上の施工実績を重ねてきた。本稿では、

本工法の概要と特徴および河川堤防に対する適用事例について紹介する。

2. 本工法の概要

(1) 工法概要

本工法は、水と流動化剤を添加して流動性を持たせた砂（流動化砂、写真—1）を小型施工機のロッド（φ100 mm 程度）を通じて地盤内に圧入することにより、緩い砂質地盤の締固めを行う液状化対策工法である。工法名は「Silent Advanced Vibration Erasing-Sand Press」の頭文字より称した。改良原理は、SCP に代表される密度増大による締固めである。従来の締固め工法と大きく異なる点は、小型施工機を用いることで狭隘地施工が可能なこと、小口径ロッド（φ

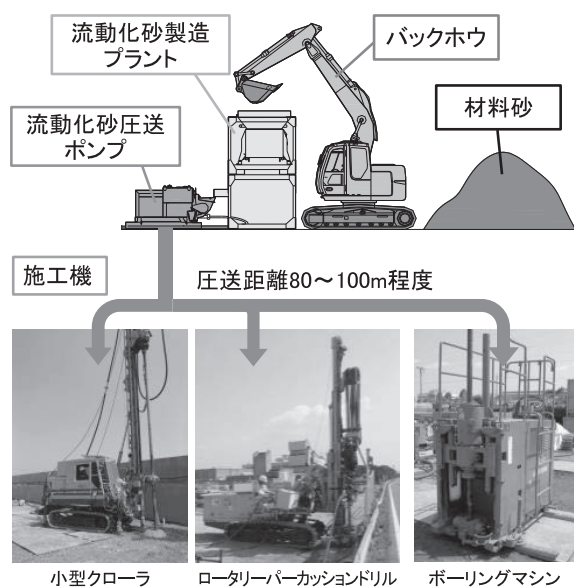


写真—1 流動性を持たせた砂

100 mm 程度) による施工を可能とするために砂に一旦流動性を付与することである。また、他の狭隘地対応型工法との相違点は、砂による締固め工法であるため、固化物を一切造成せず浸透流等の障害がない点である。

(2) 機械構成

本工法の機械構成を図一1に示す。ロッドの貫入および引抜きを行う小型施工機、流動化砂製造プラント、流動化砂圧送ポンプ、材料砂投入用のバックホウからなっており、プラントと小型施工機は分離して配置することが可能である(圧送距離は80～100 m程度)。



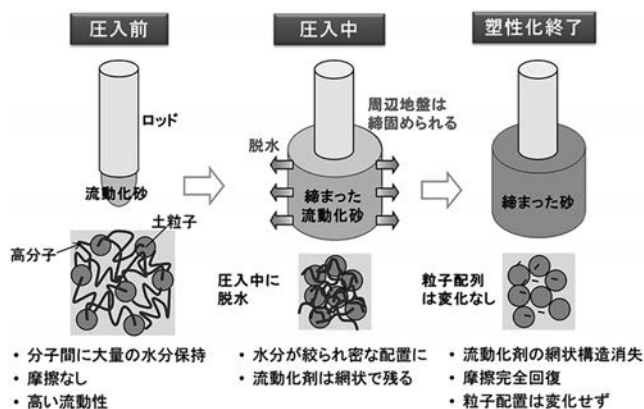
図一1 本工法の標準的な機械構成

また、小型施工機は小型クローラタイプ機、ボーリングマシンタイプ機、ロータリーパーカッションドリルタイプ機が適用可能であり、施工条件（施工深度、空頭制限、改良杭の斜角など）や地盤条件（N 値、地中障害物の有無など）により選定される。

(3) 流動化砂

流動化砂とは、材料となる砂に、水、流動化剤、塑性化剤を添加して、ポンプ圧送可能にした流動性を有する砂のことである。流動化剤は、アニオン系的高分子剤からなり、間隙水の粘性を高め、砂と水との分離を抑制させることにより、流動性を高める効果をもつ。塑性化剤は、カチオン系的高分子剤からなり、流動化剤を電氣的に中和、不溶化させて元の砂の状態に戻す効果をもつ。これらの薬剤は液性が中性であり、環境的にも無害である。

図一2には流動化砂の状態変化の概要について示す。プラントで製造されてから地盤へ圧入が行われるまでは流動性を有しているが、地盤に圧入されると地盤の拘束圧により脱水して流動化砂は密な状態に配置され、概ね流動性は解消される。なお、この時点においては土粒子間には流動化剤が残っており、土粒子間の摩擦はやや小さい状態にあるが、徐々に塑性化剤の効果が発揮され、最終的には流動化剤の効果は消失し、土粒子間の摩擦も完全に回復する。



図一2 流動化砂の状態変化

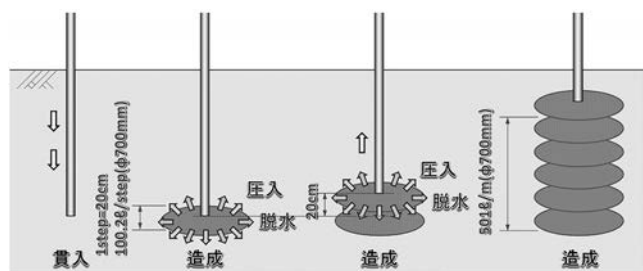
(4) 材料砂

本工法に適用される材料砂は、圧送中の流動性を確保するための良好な保水性、および地盤中に圧入された時点で速やかに脱水するための排水性の両面を持った材料が必要となる。従来のSCPの適用実績と比較すると、細砂分を多く含む材料である。現状では、細粒分含有率5%以下、最大粒径9.5 mm程度以下が目安である。

(5) 施工方法

【流動化砂作成方法】流動化砂は流動化砂作成プラントにて製造される。初めにプラントに砂を投入し、次に所定量の水、流動化剤、塑性化剤を加えプラント内のミキサーにて混練する。混練が終わった流動化砂はアジテータに貯蔵され、圧送のタイミングでポンプに投入され、施工機に圧送される。各材料の投入量は、所定の施工性が得られるように施工前に配合試験を実施して決定する。

【造成方法】ロッドを所定深度まで貫入する。改良体の造成は20 cm ごとのステップ施工としている。貫入後ロッドを20 cm 引き上げ、流動砂を圧入する。流動化砂が所定量圧入されたのち、再びロッドを20 cm 引き上げ次の圧入を開始する。これを所定深度まで繰返し改良体を造成する。1ステップの圧入量



図—3 本工法の施工概要

は、標準的な改良径 $\phi 700$ mmでは $100 \ell / \text{step} (20 \text{ cm})$ である（図—3）。

3. 適用事例

国土交通省中部地方整備局木曾川下流河川事務所が管理する木曾三川（木曾川，長良川，揖斐川）下流域の高潮堤防補強工事における本工法の適用事例を紹介する。木曾三川下流部は，我が国最大の海拔ゼロメートル地帯であり，一旦堤防が決壊すれば甚大な被害が生じる恐れがあることから，堤防強化等の事業を推進し更なる安全度の向上が図られている。この事業の一環として，堤防の耐震補強工事（液状化対策）に本工法が適用されている。図—4に本工法の施工箇所の位置を示す。堤内側の狭隘地において適用可能であること，堤体からの透水を阻害しないこと，別途洪水対策として実施する河道浚渫工事において発生する浚渫土を有効利用できることなどから，本工法が採用されている。

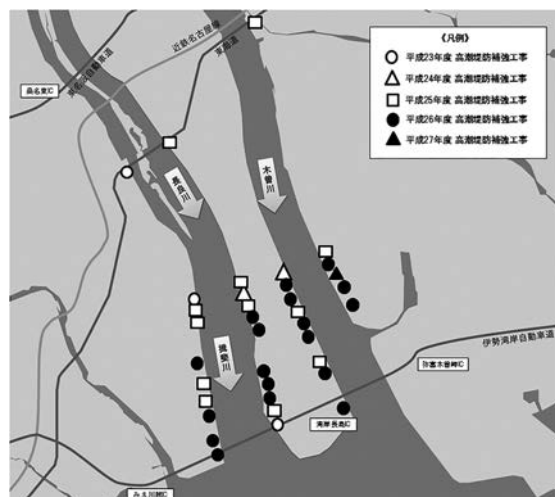
(1) 施工状況

図—5に改良断面の一例を示す。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。仮設盛土の幅は最も狭小な部分で4 m程度であった。削孔長は9～21 m，改良長は4～15 m，改良ピッチは1.2～2.0 m（正方形配置），改良列数は3～8列である。

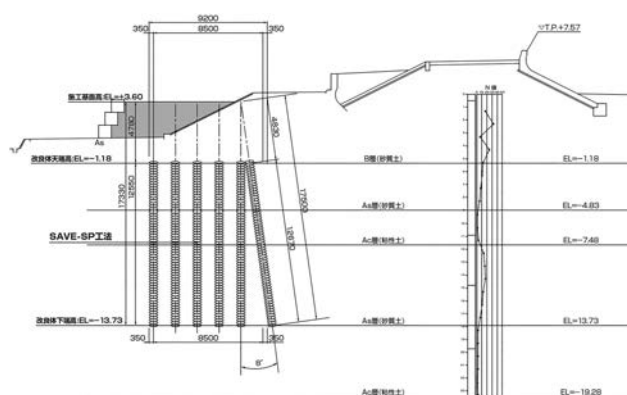
施工機のタイプは，斜杭を有すること，堤体下存在する可能性がある地中障害物の影響を受けないこと，さらに近接する道路交通車両への安全面などを考慮してクレーンによる吊作業を必要としないロータリーパーカッションドリルタイプを用いた。本工法の施工状況を写真—2に示す。

(2) 改良効果

改良前後のN値を比較した結果を図—6に示す。改良後のN値は改良前に対して最大で20程度の増加



図—4 本工法の施工箇所的位置

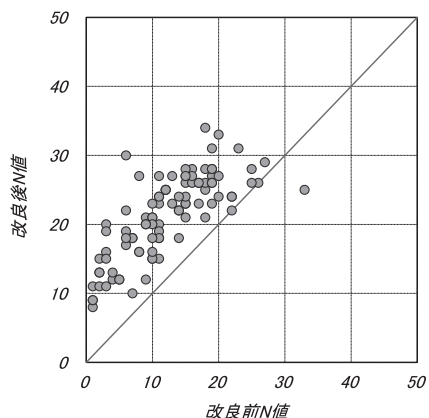


図—5 改良断面図の一例

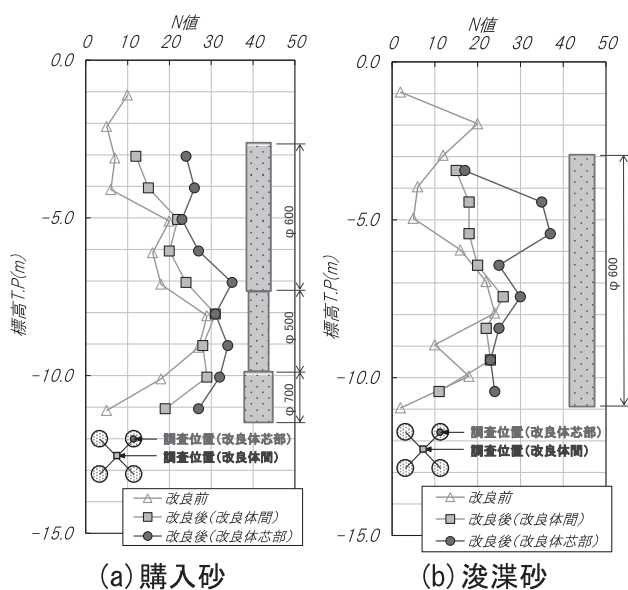


写真—2 本工法の施工状況

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，これは改良前後のボーリング位置が10～50 m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。事後調査では，改良目標液状化安全率 $FL > 1.1 \sim 1.3$ （設計震度 $kh = 0.18$ ）を十分に満足することを確認している。なお，設計では方法D²⁾により改良率を算出し，過剰間隙水圧を考慮した円弧すべり解析により改良幅が決定されている。図—7に同施工域で実施された改良体間N値と改良体芯部N



図—6 改良前後のN値の比較



図—7 改良後N値の深度分布

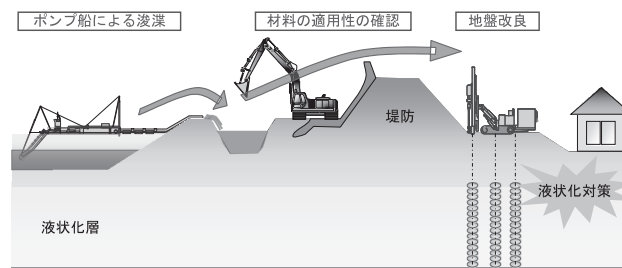
値の深度分布を示す。材料砂に購入砂または浚渫砂(後述)を用いている。どちらについても、改良体間N値は改良前に対して5～10程度増加しており、改良体芯部N値は20～35程度と改良体間N値以上であった。

(3) 河道掘削砂の適用

本工事の一部では、河道整備工事で発生する浚渫砂を本工法の材料として利用している³⁾。これにより、本工法の材料コスト低減のほか、浚渫砂の処分コストも大幅に低減されている。利用にあたっては、ポンプ船によって浚渫された砂について、本工法の材料砂としての適用性を確認してから、施工箇所に運搬し施工を行った(図—8)。

(4) 粒度調整材の効果

流動化砂の材料砂は、ポンプによる圧送中に管内で閉塞しない保水性の確保と、圧入時に地盤内で速やか



図—8 浚渫砂の利用方法

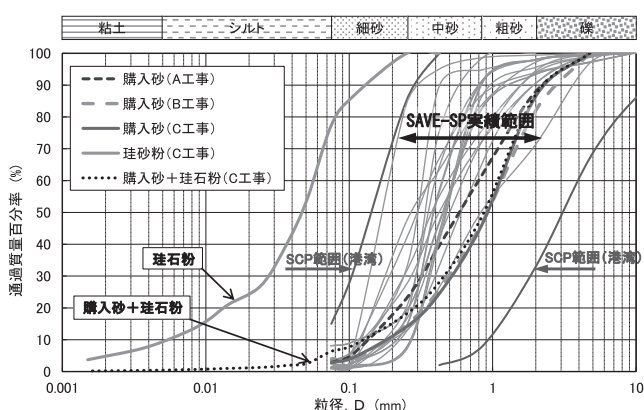
表—1 3工事の改良仕様

工 事	改 良 仕 様				
	打設間隔	改良率	改良幅	削孔長	改良長
A (珪石粉なし)	□ 1.6 m	as = 15.0%	B = 6.4 m	L = 17.7 m	L = 14.9 m
B (珪石粉なし)	□ 1.5 m	as = 17.1%	B = 6.0 m	L = 19.0 m	L = 11.4 m
C (珪石粉あり)	□ 2.0 m	as = 9.6%	B = 4.0 m	L = 16.0 m	L = 8.0 m

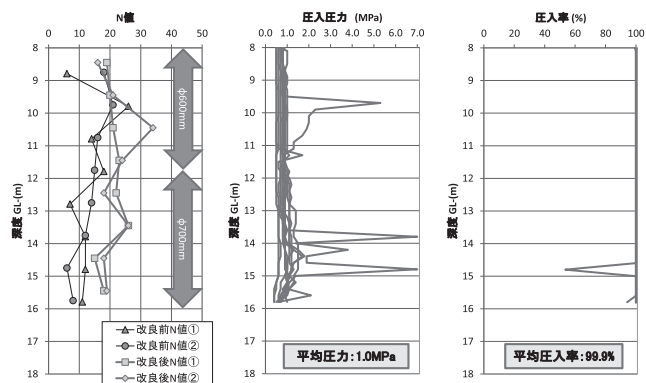
に脱水する排水性の良さを併せ持つことが必要である。これまでに、室内土槽実験では、流動化砂に粒径の小さい非塑性の珪石粉といった粒度調整材を混合することで、流動化砂の圧入性が向上することを確認している⁴⁾。これは、流動化砂自体の保水性を確保し、管内圧力を抑制することで圧入性が向上するものと考えられる。本工事では、一部の工事においてこの粒度調整材を適用し、その結果をもとに、未使用の他工事と比較を行った⁵⁾。比較を行ったのは、同一地区の3工事(表—1)の施工データであり、この中の1工事で珪石粉混合材料を使用した。

図—9に使用した材料砂の粒径加積曲線を示す。材料は3工事とも同じ産地の購入砂(洗砂)を使用しており、そのうち1工事(C工事)で粒度調整材である珪石粉の混合材料を使用した。なお、珪石粉の混合量は既往の室内試験と同様に購入砂の5%(重量比)とした。

図—10に珪石粉混合材料を使用したC工事における改良前後のN値, 圧入率, 圧入圧力の深度分布を示す。なお、圧入率とは、所定の改良径(φ500～700mm



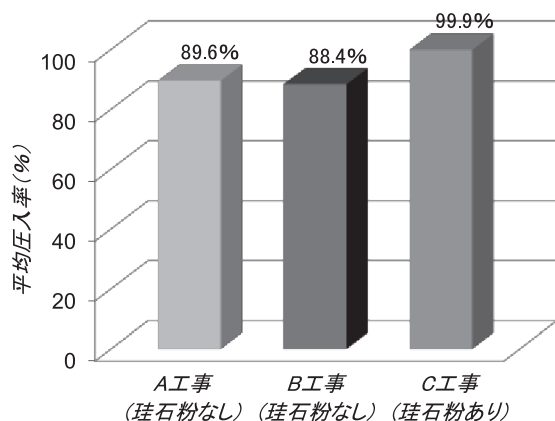
図—9 材料砂の粒径加積曲線



図—10 改良前後の N 値、圧入率、圧入圧力の深度分布
(C 工事：粒度調整材あり)

程度)を造成するのに必要な材料の圧入量(設計量)に対する実際の圧入量(施工量)の割合を示す。圧入圧力は概ね 2 MPa 以下を示しており、材料の圧入率はほぼ 100%と良好な圧入性が確保されていることがわかる。

粒度調整材を混合していない A, B 工事では、平均圧入圧力は 3～4 MPa 程度であるのに対し、珪石粉を混合した C 工事では、平均圧入圧力は 1 MPa 程度と小さく、約 25～30%程度圧力が小さかった。また図—11 に 3 工事の平均圧入率を示す。平均圧入率については、A, B 工事どちらも約 90%であったのに対し、C 工事ではほぼ 100%と約 10%程度多い結果であった。なお、改良効果については、圧入圧力、圧入率の違いによらず、いずれも改良目標を満足することを確認している。



図—11 粒度調整材の有無による平均圧入率

以上より、原地盤の条件(N 値等)や改良仕様が異なるものの、材料砂に比較的粒径の細かい珪石粉を混合することで、流動化砂の圧入性、圧送性は良好な傾向であった。

4. おわりに

本稿では、本工法砂圧入式静的締固め工法(SAVE-SP 工法)の概要、および河川堤防に対する適用事例について紹介した。本工法はこれまで SCP などの締固め工法が適用困難な狭隘地でも施工可能となり、コスト削減策としても大いに期待できる。さらに特徴のひとつである地盤の透水性を改変しない点や、粒度分布が適合すれば河道浚渫砂など現地発生土が利用可能であることなど、今後の狭隘地における液状化対策に新たな可能性を切り開く技術と考える。

J C M A

《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、pp.579-584, 2009.
- 2) 地盤工学会：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, 2001.
- 3) 久保陽太郎・鶴野雅明・竹内秀克：木曽川下流域河川堤防における砂圧入式静的締固め工法の適用事例—改良効果と施工データの考察—、第 49 回地盤工学研究発表会講演概要集、pp.789-790, 2014.
- 4) 竹内秀克・大林淳・深田久・渡辺英次・中嶋嘉孝：砂圧入式静的締固め施工における地盤条件の影響に関する土槽実験、第 48 回地盤工学研究発表会講演概要集、pp.929-930, 2013.
- 5) 久保陽太郎・鶴野雅明・竹内秀克：砂圧入式静的締固め工法における珪石粉混合材料による圧入効果、第 50 回地盤工学研究発表会講演概要集、pp.1843-1844, 2015.

【筆者紹介】

森鼻 章治(もりはな しょうじ)
(株)不動テトラ
地盤事業本部 技術部 技術企画課



鶴野 雅明(うの まさあき)
(株)不動テトラ
中部支店 地盤営業部

