

河川護岸保全に適用した機械攪拌翼併用超高圧噴射攪拌工法とその事例

小野田ケミコ株式会社 正会員 ○柳下 和紀
亀田 昌紀
吉田 直人

1. はじめに

近年、気象変動の影響等で毎年発生する豪雨による河川氾濫や大地震に伴う甚大な被害に対し、既設河川護岸等の堤体補強、耐震化対策や高潮対策として既設施設における国土強靱化が展開されている。国土強靱化は災害に対する国のリスクマネジメントの基本方針であり、その基に各地方自治体が管轄する河川護岸や防潮堤などの防災インフラについて脆弱性を分析・評価し、必要な機能強化が推し進められている。

このような背景の中で、自然災害の発生に備えた防災対策として、愛知県下でも既設河川護岸等の保全事業が施されている。

ここでは地盤改良技術によって、既設河川護岸の耐震化補強として液状化対策の目的で既設鋼矢板式護岸の前面に地盤改良杭体を格子状配置した事例、また、既設護岸の河道域拡幅に伴うすべり防止を目的とした護岸堤体の補強事例について述べる。既設の河川護岸の保全事業では、河川護岸形状等の観点から水上施工の要請や施工エリア範囲等の様々な制約を受ける場合が多い。本事例に適用した地盤改良工法は、小型の施工機械による機械攪拌翼を併用した2種類の施工方式の超高圧噴射攪拌工法である。河川水域の施工では水質保全や既設護岸の変形防止といった河川域施工の特有の課題に対して、水上からの施工方法の実施、また、堤体補強では既設護岸形状に対して変位防止として低変位な施工方法の選定など施工環境に配慮した施工事例である。

2. 地盤改良工法と工法の選定

2.1 地盤改良工法の種類

図-1は河川保全計画における地盤改良工法の施工方法の一例を示す。河川護岸等の耐震化補強を目的とする場合に、地盤改良体と鋼管矢板等の護岸構造体との一体化は重要な要件となる。セメント系を用いた固結工法の地盤改良工法では、スラリー式機械攪拌工法と高圧噴射攪拌工法に大別される。図-1(a)はスラリー式機械攪拌工法で機械翼によって固化材スラリーと対象土を攪拌混合し一定の改良径を造成する方法である。しかしながら、既設構造体と一体化を図るためには、補助工法として高圧噴射攪拌工法の組合せが必要とされる。また、機械攪拌工法の施工機械は改良深度と同程度の機械高が必要で大型化される。

図-1(b)は機械攪拌併用高圧噴射攪拌工法の例で固化材スラリーを超高圧ジェット噴流により地盤を切削し、地盤強度に応じた改良径が造成される方法である。混合攪拌方式がジェット噴流であるため、改良体同士や既設構造体との密着性を一種類の工法によって容易に図れる。本工法の改良造成方法には、圧縮空気を包含させ、地盤内の切削距離を延伸させる多重管方式と、超高圧ジェット噴流のみの単液で切削造成する単相方式がある。前者の場合は、土中で切削噴射して造成する際に圧縮空気とともに固化材スラリ

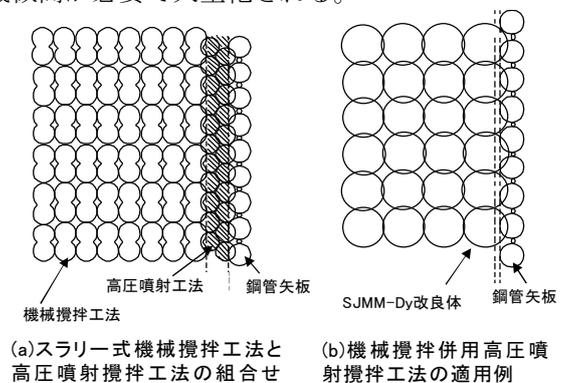


図-1 地盤改良による護岸耐震化補強一例

一を含む排泥液が多量に排出されるため、河川域内の水上施工では水中内に排泥スライムが拡散する。後者の方式では圧縮空気を使用しないため、排泥液の排出はなく、水環境等への影響が少ない。

2.2 機械攪拌翼を併用した単相式高圧噴射攪拌工法

単相方式の高圧噴射攪拌工法では、大口径化を図るために機械攪拌翼と併用する方式が実用されている。本方式は、単管ロッドに装着した特殊ロッドヘッド（標準翼径 $D=0.6\text{m}$ ）の先端から、水平方向に超高压ジェット噴射により固化材スラリーを吐出し、回転・引き上げすることにより、円柱状の改良体を造成する工法である。図-2は機械攪拌翼を併用し、機械攪拌翼長さに

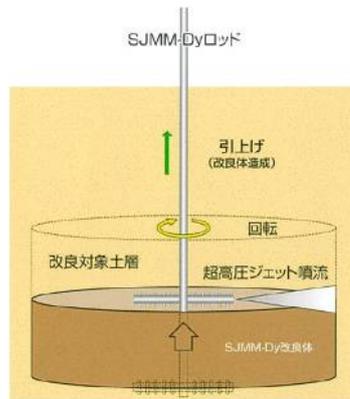


図-2 SJMM-Dy 工法の改良機構



図-3 LDis-Dy 工法の改良機構

高圧噴射攪拌の改良直径をプラスして造成される機械攪拌併用高圧噴射攪拌工法（以下、SJMM-Dy工法と称す）の模式図である。表-1は本方式により造成される改良径の諸元である。土質に応じて改良径は、 $\phi 1.2\sim 1.9\text{m}$ の大口径の改良体が造成される。表-2は改良体造成時の施工諸元である。

表-1 機械攪拌翼併用高圧噴射攪拌工法の改良径諸元

対象土質	適用上限	標準改良径 ϕ (m)	改良断面積 A (m^2)	固化材量 a_w (kg/m^3)
砂質土	$N \leq 20$	1.5~1.7	1.76~2.26	≤ 110
粘性土	$c_u \leq 70\text{kN}/\text{m}^2$	1.2~1.9	1.13~2.83	≤ 120
腐植土	$w \leq 500\%$	1.6	2.01	≤ 230

表-2 機械攪拌翼併用高圧噴射攪拌工法の施工諸元

吐出圧力	$p=40\text{MPa}$
吐出量	$q=150\text{l}/\text{分}$
固化材	C20IS
水・固化材比	W/C=1.0(1.5)
改良時間	$t \leq 3\text{分}/\text{m}$

機械攪拌翼併用高圧噴射式攪拌工法では、既存の構造物や凸凹のある鋼矢板との密着施工、あるいは先行して造成された改良体との一体化が確実にできるという利点がある。しかしながら、単相式噴射攪拌方式の場合、従来のスラリー式機械攪拌工法と同様に地盤内に固化材を供給するため、固化材の噴射吐出量に呼応した体積増加を招き、結果として周辺地盤に変位が発生する可能性がある。このような事態は、今日の都市土木、とりわけ

近接施工では、極力抑制することが求められている。図-3は機械攪拌翼を併用した高圧噴射攪拌工法の地盤変位の抑制施工を実用した低変位超高压噴射攪拌工法（以下、LDis-Dy工法と称す）の模式図である。すなわち、削孔工程において、機械攪拌翼の上段に装着したスクリー状排土盤のLDis-Dy翼先端から少量の加水で攪拌しながら所定の深さまで先行掘削する。改良工程では、吐出圧力 $p=40\text{MPa}$ 、吐出量 $q=150\text{l}/\text{分}$ の超高压ジェットにより固化材スラリーを噴射・混合させながらロッドを徐々に引き上げる。その際、地盤内の切削・混合部と地表部との間に生じた圧力勾配と攪拌翼背後のスクリー状排土盤の押し上げ効果が相乗的に作用して、固化材供給量に見合う軟泥化された先行掘削の原土が地表に押し上げられる。この排土量が固化材量とバランスしていれば、原理的に地盤変位は生じることはなく、周辺地盤の変形を最少限に抑えることができる。また、排出される土が先行掘削土部分で留まり原土の状態が保たれる。したがって水中に排土されても固化材スラリーによるアルカリ拡散はなく、環境負荷はない¹⁾。LDis-Dy工法はSJMM-Dy施工技術を応用し、攪拌装置の先端に特殊な排土機構を付加することで地盤変位の抑制を可能とした変位低減型工法である。

両工法では排土機能の付加以外は改良原理が同類技術であり、表-1および表-2の施工諸元は共通している。施工機本体も共通化され、軽量型専用ボーリングマシンを用い、スライドベース上に搭載され、H鋼型レール上を走行・横行できることから機動性が高い。また、補助トラッククレーンを使用することなく、自機のウインチでロッドの継切り作業を行うことができるなど施工の効率化が図れている。大型重機では不可能な施工場所や河川・海域内でも軽構造な仮設で施工が可能である等の特徴がある。施工域は陸上施工も水上か

らの施工も軽構造足場や台船搭載により河床改良も可能で、河川水質の水環境保全にも対応できる。

3. 河川護岸保全に適用した施工事例

大都市には人口・資産をはじめ社会・経済の中核機能が集積している。一方で、東海地区では南海トラフ地震等の大規模災害の発生予測や、近年、気象変動の影響と考えられる豪雨による甚大な被災も経験するなど、災害に伴うリスクをコントロールする必要性が唱えられている。このため、「強さ」と「しなやかさ」を備えた「国土の強靱化（ナショナル・レジリエンス）」を具体化するための「アクションプラン」²⁾が国レベルによる策定と実行がなされている。これに呼応して各自治体では、例えば河川域や港湾域の堤防、防潮堤、護岸などの社会資本施設の補強、耐震対策が強力に推し進められている。以下に愛知県下において、機械攪拌翼併用高圧噴射攪拌工法の地盤改良技術によって実施された河川護岸の大地震の発生予測に伴う河川鋼矢板護岸の液状化対策、また豪雨による洪水対策を目的とした河川護岸保全について述べる。

3.1 液状化対策を目的とした耐震護岸補強対策事例

(1) 工事概況

豊橋地区南東部に位置し三河湾に注ぐ河川域では、南海トラフによる大地震の発生に備え、2006～2008年度にかけ河川護岸の耐震補強工事が実施されてきた。本地区の近郊には大規模工場が隣接した工業地帯や重要港湾等が立地し、経済の拠点となる地域でもある。二級河川流域の河川護岸の保全において、既設鋼矢板護岸形式の護岸の耐震性検討に対し、耐震化補強として液状化防止対策が必要であることが示唆された。

(2) 地盤改良計画

河川流域の護岸保全において、既設鋼矢板護岸の前面に液状化対策として地盤改良を施すことによって、改良体全体が地震時作用荷重により滑動しなければ、鋼矢板に対する横抵抗が期待される。

図-4は既設鋼矢板形式の河川護岸右岸側に対する液状化対策としての改良位置の断面図および土質柱状図である。地盤改良計画においては、川表側の水面に面した位置からの施工方法が計画された。工法の選定において、耐震化性能の目的から河川護岸の右岸側は既設鋼矢板護岸形式であり、地盤改良体と鋼矢板を密着させ一体化が可能な改良方法が必須とされた。また、河口付近には、主要な国道や上空には高圧送電線等の施設物が架橋するため、大型施工機やクレーン船等の接触回避および緊急時の処置に伴う安全確保が要請された。また河川水に対し汚濁等が少なく、環境に配慮することも施工要件とされた。

このような背景から地盤改良工法において、小型化された施工機械の構成で、地盤改良体と既設鋼矢板との一体化が実現できる施工技術であること、かつ水面下の施工が可能で排泥スライム等の排出がなく、水環境に影響の少ないこと、また既設河川護岸の受働側からの地盤改良であることから既設鋼矢板への変位は生じにくいとの判断から機械攪拌翼併用超高圧噴射攪拌工法（SJMM-Dy工法）が選定された。

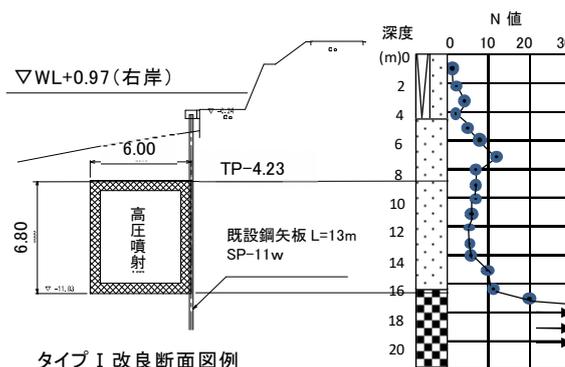


図-4 既設鋼矢板形式の河川護岸の地盤改良範囲図

(3) 土質特性と地盤改良配置

本河川護岸の液状化対策工は右岸側に対して延長 580m が計画された。表-3 は液状化対策とする対象土の土質特性である。TP-4.23～11.03mの改良対象深度 L_c 6.8m 間は $N=8\sim 10$ の緩い細砂層が堆積し、改良下端は $N<20$ 程度の礫層である。図-5 は地盤改良杭体を格子状に配置され

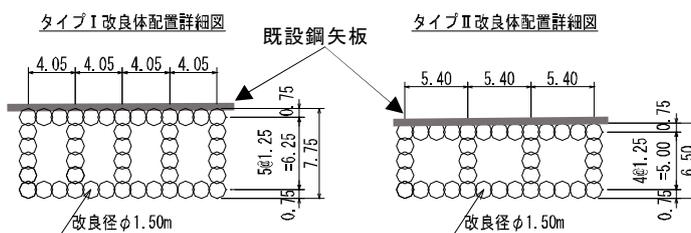


図-5 既設鋼矢板形式の河川護岸の格子状液状化対策図

たタイプ I およびタイプ II の杭配置図である。

SJMM-Dy 工法による地盤改良杭の配置計画は、改良下端位置の細砂層 $N < 20$ を考慮し、改良径 $\phi 1.5\text{m}$ とし、横断方向に 0.25m 、縦断方向に 0.15m のラップ幅で格子状配置とした。表-4 は SJMM-Dy 工法の施工諸元である。施工延長 850m に対し、タイプ I およびタイプ II の改良形式で総数 1815 本が配置された。設計基準強度 $q_{uck}=400\text{kN/m}^2$ が設定され、固化材配合量は室内配合試験より、工法上必要最小限の配合量としてセメント系固化材の混入量 $aw=140\text{kg/m}^3$ とした。

(4) 施工機械の構成と施工方法

機械攪拌翼を併用した超高压噴射攪拌工法に使用する施工機械の構成は、施工機本体とプラント部を 2 編成に分け、各々 500t 級の台船上に搭載した。写真-1 は台船上の施工機本体の全景である。台船上には横行スライド装置付きの SJMM-Dy 施工機 2 機を並列させた。その他の主要な施工機械では固化材スラリーを高圧噴射させる超高压ポンプ 2 台が搭載されている。写真-2 は台船上のプラント設備である。護岸陸上部の用地に制約を受けることから、固化材スラリーを製造供給するプラント設備についても同様に台船上に搭載した。本施工では国道桁下の空頭制約を受けたものの、施工マシンは機械高 10m 程度と低空頭で、リーダ部を起倒することで解決された。また、プラント部は横型サイロを使用することで、国道橋桁下の艤装環境に対応させた。

SJMM-Dy 工法の施工方法では、まず GPS 測量により河川縦断方向に台船本体を 1.35m ピッチに電動ウインチにて移動させる。横断方向は台船上のスライド装置で SJMM-Dy マシンを所定位置に移動しセットする。次に SJMM-Dy マシンにより $\phi 0.6\text{m}$ 攪拌翼を所定深度まで貫入させ、地中内の攪拌翼先端部より吐出圧力 $p=40\text{MPa}$ 、吐出量 $q=150\text{l/分}$ の施工仕様に準じ、定速度で引上げ改良する。なお、GPS 測量による改良杭の位置設定の実用は、当時の技術から鑑み ICT 化技術の先駆的な管理手法である。施工延長 850m 間は 4 区域に分け実施された。この期間において、施工規模が大きい場合には施工機台船およびプラント台船を 2 基編成でも適用された。

(5) 品質管理における地盤改良体の格子状改良の一体化確認

格子状の改良配置による液状化対策では、改良杭同士の一体化が重要である。改良杭同士の連続性を確認するために、 45° 角度の斜めボーリングにより改良土のコアを調査した。図-6 はタイプ II における縦

表-3 土質特性値

対象土質	細砂 (As層)
湿潤密度	$\rho_t=1.85\text{g/cm}^3$
N 値	$N=8\sim 20$

表-4 SJMM-Dy 工法施工諸元

改良径	$\phi 1.5\text{m}$
改良断面積	$A=1.766\text{m}^2$
改良長 (タイプ I)	$L=7.9\text{m}$
改良長 (タイプ II)	$L=6.8\text{m}$
施工本数	1815本
吐出圧力	$p=40\text{MPa}$
吐出量	$q=150\text{l/分}$
固化材	C-20I
固化材配合量	$aw=140\text{kg/m}^3$
改良時間	$t=3\text{分/m}$
水固化材比	$W/C=1.5$
設計基準強度	$q_{uck}=400\text{kN/m}^2$
改良体配置	格子状配置



写真-1 台船上に搭載した SJMM-Dy 施工機全景



写真-2 台船上に搭載した SJMM-Dy プラント全景

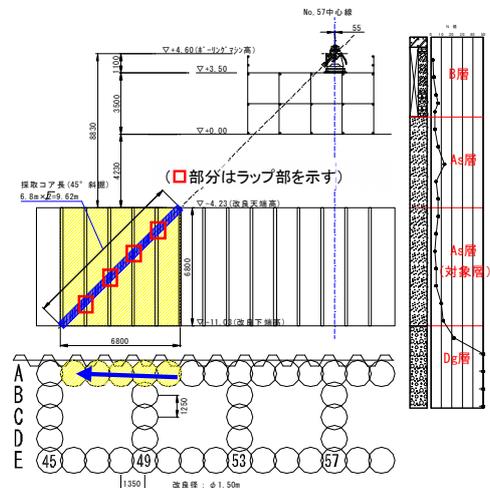


図-6 斜め 45° の SJMM-Dy 改良土の採取方法と位置

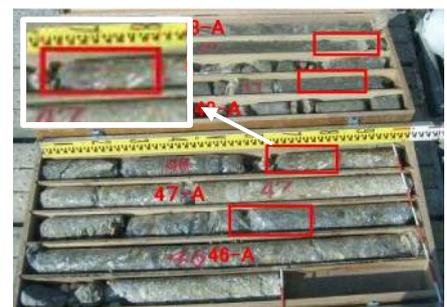


写真-3 45° 角度方向に採取した改良土コア (□部分はラップ部分)

断方向への改良土の採取方法と位置である。採取方法は陸上側から単管パイプにて張り出し用の足場を仮設した。採取深度は TP-4.23~TP-11.03m で改良長 $L_c=6.80m$ の As 層から下端層の Dg 層までである。写真-3 は河川縦断方向から 5 本の改良杭に対し、採取したコア状況である。改良対象層には半分以上に砂礫・玉石が混入していた。45°方向における改良土の採取長 9.62m において、改良土コアの 部分のラップ部 4ヶ所の改良杭同士の接合状況は、採取率および固結状態から全体の改良杭と同等と判断され、改良杭同士の格子状配置による一体化を確認した。

3.2 河川護岸の補強整備工事事例

本河川は東海市南部の丘陵地に発し、伊勢湾に注ぐ河川延長約 4km の二級河川である。本川流域では過去には高潮や洪水による被害が繰り返されてきた。このため、高潮対策や洪水対策の河川保全が整備されてきた。しかしながら、洪水対策は整備途上であり、近年も気象変動と考えられる東海豪雨により、甚大な水浸被害を受けている³⁾。このような背景から、2015年に緊急防災対策として河川護岸の整備保全が計画された。

(1) 工事概況

本川流域は、上流部、中流部および下流部に分けられ、河道はコンクリート護岸である。本事例は中流部に位置し、川幅は 20m 程度で河川周辺地には市街地が形成されている³⁾。豪雨による洪水対策として、河川護岸の整備工事が計画され、その際の堤体の安定を検討した結果、護岸背面へのすべり防止対策として地盤改良工による対策が計画された。

(2) 地盤改良工法の選定

本河川の護岸沿いには遊歩道等の施設が整備され、地域住民の憩いの場ともされている。また河川に面し集合住宅、家屋、耕地等が隣接している。さらに本流域はすでにブロック式護岸が整備済の区域もあり、護岸背面からの地盤改良において、護岸に対しての変位を極力防止することも要請された。このため、大型施工機による施工方法を避け、かつ既設護岸への変位を抑制可能な低変位な地盤改良工法として、低変位型超高压噴射攪拌工法 (LDis-Dy 工法) が選定された。LDis-Dy 工法は高压噴射攪拌工法の一つで、施工機の構成が軽量小型である。施工時には、固化材スラリーの供給量と同程度の軟泥土を排出させ地盤変位を抑制するほか、排出土にはエアを併用する多重管工法に見られるような固化材スラリーを含む排泥スライムの発生はなく、河川域の水環境の保持に適した地盤改良工法である。

(3) 地盤改良計画と土質特性

図-7 は既設河川護岸のすべり防止を目的とした地盤改良による補強保全の標準断面図および地盤改良杭の配置図である。既設護岸の背面の右岸部と左岸部に LDis-Dy 改良杭が配置されている。地盤構成は表層部に $N=10$ 程度で堤体部の盛土層である。改良対象位置は $N=0$ のシルトの沖積粘性土層で、改良下端部では礫層をなしている。表-5 は改良対象地盤の土質特性である。含水比 w 80~88%、一軸圧縮強さ $q_u=50kN/m^2$ と軟弱地盤を呈する。表-6 は LDis-Dy 施工における施工諸元である。本工法の改良径は $\phi 1.7m$ で、改良杭の配置は河川横断方向に 0.2m のラップ幅と縦断方向では 1.7m の接円とした長方形配置である。施工長は各改良断面が変化し、各々貫入長 $L=6.30\sim 8.20m$ 、改良長 $L_c=2.10\sim 4.90m$ である。また設

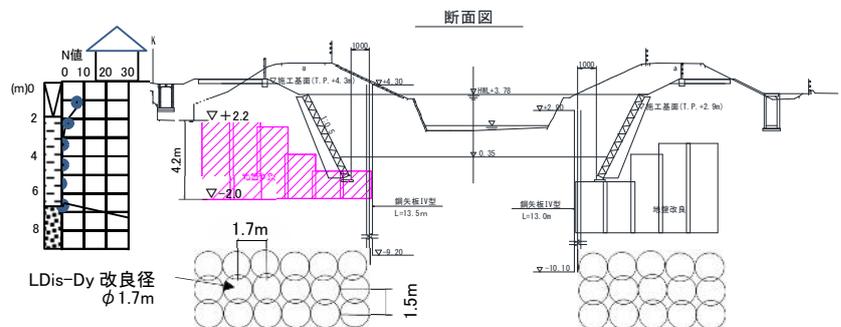


図-7 河川護岸補強標準断面図および地盤改良位置

表-5 土質特性値

対象土質	シルト
湿潤密度	$\rho_t=1.601\sim 1.607g/cm^3$
含水比	$w=79.5\sim 88.1\%$
一軸圧縮強さ	$q_u=45\sim 55kN/m^2$

表-6 LDis-Dy 工法の施工諸元

改良径	$\phi 1.7m$
改良断面積	$A=2.27m^2$
貫入長	$L=6.30\sim 8.20m$
改良長	$L_c=2.10\sim 4.90m$
施工本数	184本
吐出圧力	$p=40MPa$
吐出量	$q=150l/分$
固化材	C20IS
固化材配合量	$aw=109kg/m^3$
改良時間	$t=3分/m$
水固化材比	W/C=1.5
設計基準強度	$q_{uck}=150\sim 220kN/m^2$
改良体配置	1.5m×1.7m長方形配置

計基準強度においても改良断面が変化する地点で異なり、 $q_{uck}=150\sim 220\text{kN/m}^2$ である。

(4)施工機械の選定および LDis-Dy 施工方法

写真-4 は河川護岸と LDis-Dy 施工状況である。小規模の河川形態であり、堤体幅も狭隘である。また、河川周囲には集合住宅等が隣接し大型機械による施工方法に制約を受ける。LDis-Dy 工法の基本的な施工構成は、専用マシンを 10m 幅のスライドベースを使用し、H 鋼型レール上を走行させ機動性を図る方式である。しか



写真-4 河川護岸状況と LDis-Dy 施工全景



写真-5 自走式 LDis-Dy 施工機による堤体部施工状況

しながら、本施工域は堤体幅が狭隘で遊歩道等の施設が隣接することから、自走式による施工機を用いた。写真-5 は自走式 LDis-Dy 施工機で機械質量は約 16t である。自走式施工機は機械移動が自在である反面、転倒防止として機械足場の養生等安全面に配慮する必要がある。

LDis-Dy 工法の施工方法は、 $\phi 0.6\text{m}$ のスクリー状排土盤の機械攪拌翼を所定深度まで貫入し、一度引上げて攪拌翼部を乱すことで排土効果高められる。その後、再度所定深度まで貫入し、吐出圧力 $p=40\text{MPa}$ 、吐出量 $q=150\text{l/分}$ の施工諸元に応じた仕様によって所定位置まで改良する。写真-6 は改良中の軟泥土の排出状況である。粘性土の場合、一般的に排出される軟泥土の含水比は原地盤に比べ、数%程度高めではあるが、乱された原土の性状と同程度を呈する¹⁾。この結果、既設ブロック式護岸の変位は見られなかった。表-7 は施工後の現場改良強度の結果である。いずれの改良杭も設計基準強度を十分に満足していることが確認された。



写真-6 LDis-Dy 改良時の軟泥土排出土状況

表-7 LDis-Dy 改良土の現場改良強度

杭No.	採取位置	q_{uf} (kN/m^2)
A	上層	1353
	中層	1877
	下層	1368
B	上層	3900
	中層	2027
	下層	3180
C	上層	4057
	中層	3953
	下層	2340

4. まとめ

自然災害に備えた防災対策において、愛知県下で河川護岸の保全事業として地盤改良が適用された 2 事例を紹介した。地盤改良技術によって河川護岸の液状化対策を目的とした耐震化補強では、鋼矢板式護岸と格子状の地盤改良杭体との一体化が重要である。また、小規模河川では大型機械の適用に制約を受ける場合や、近接した既設構造物等の変位防止が要請される場合がある。このような施工制約のなかで、SJMM-Dy および LDis-Dy 工法の二つの施工方式の機械攪拌翼併用超高圧噴射攪拌工法は、いずれの施工条件においても適用が可能であった。

近年、既設河川護岸の保全では、大地震や豪雨に伴う自然災害に備え、国内各地で河川護岸等の保全事業が展開されている。河川条件に応じた護岸保全の観点から、水上施工や護岸背面の補強対策に地盤改良は必要不可欠である。今後、本工法のさらなる工法技術の改善を図り、社会資本整備に貢献する所存である。

参考文献

- 1) 西尾経・松岡大介・竹田敏彦・齋藤邦夫 (2015) : 原土排土による排土抑制型低変位高圧噴射攪拌工法, 基礎工, Vol.42, No.3, pp.62-65.
- 2) 内閣府国土強靱化推進本部編 (2018) : 国土強靱化アクションプラン 2018.
- 3) 愛知県ホームページ(2005) : 二級河川水系河川整備計画.