

3 4. 機械攪拌と高圧噴射攪拌を用いたハイブリッド地盤改良工法

－WHJ工法による既設護岸の耐震向上対策の施工事例－

国土交通省関東地方整備局荒川下流河川事務所 嵯峨 弘喜
WHJ工法研究会 鈴木 孝一
○西尾 経
高桑 一輝

1. はじめに

人口や資産，社会経済活動の中核機能などが集中している首都東京や周辺都市等においては，洪水や地震によって壊滅的な被害が発生するおそれがある。このため，高潮対策や河川堤防等の河川構造物の耐震性向上は，いざ災害が発生した際でも，通船可能な河川域の確保や防災船着場の確保の面からも重要な課題である。

本論文は，河川護岸の高潮対策と耐震性強化を目的に，既設護岸部に設置された鋼管矢板の河川側受働域を地盤改良し，矢板と改良体を密着一体化させた護岸構造形式で耐震性の向上を図った施工事例とそれに採用した台船式大口径高圧噴射攪拌工法（以下，WHJ工法〔Waterfront Hybrid Jet Mixing Method〕と略記する）について述べる。

2. 超高压噴流攪拌複合技術工法の概要

2.1 複合技術工法の概要と特徴

護岸の地盤改良による耐震性強化を目的とした従来の施工法は，機械攪拌工法で受働領域を先行改良し，機械翼が寄れない護岸との隙間部は，補助工法として高圧噴射攪拌工法を後施工して矢板と改良体の一体化を図る２段階施工であった。

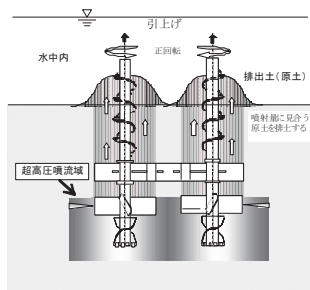
本工法では，固化材スラリーが機械攪拌翼先端部の噴射ノズルから吐出圧力 40MPa と超高压で高速噴射されるため，直径 $\phi 1.6 \sim 2.3\text{m}$ の大口径改良体を造成できる。このため，改良造成域と既

設護岸との一体化施工が容易で，補助工法が省略できる特徴を持つ。また，台船方式の深層混合処理工法である。このため，河川域あるいは河口に面した海域の既設護岸の耐震補強等を目的として，施工に十分な足場が確保できないケースでも，水上から施工できる。さらに，近接施工でも独自の排土機能の採用により低変位施工も可能であるなど特徴を併せ持つ。〔NETIS 登録 No. KT-070064-A〕

2.2 複合技術の改良原理

WHJ工法の基本改良原理を図－1に示す。二軸式で機械攪拌翼先端部の噴射ノズルから固化材スラリーを圧力 $p=40\text{MPa}$ による超高压大容量のジェット噴流を吐出する。このジェット噴流により地盤は瞬時に切削され，同時に対象土は固化材と強制混合攪拌される。これにより，機械攪拌翼外側の外周部は，超高压ジェット噴流による混合攪拌の改良が主となり，既設護岸との高い一体性を確保した密着施工や改良体の相互ラップ施工等も容易に可能となる。従来の機械攪拌工法と高圧噴射攪拌工法の併用施工に比べ，WHJ工法では，単一の1工種の工法によって行うことが可能となり，工期の短縮，施工コストの削減を図ることができる。写真－1にWHJ工法の施工機械の全景を示す。当該現場では，左側に見られるように高速道路の橋梁ピアと近接した施工現場である。

攪拌軸に排土スクリュロッドを装備し，当該現場のような近接施工においては，固化材スラリーの



図－1 WHJ工法の改良メカニズム概要図



写真－1 WHJ工法と護岸施工状況

噴射量に見合う原土量を排土する。動態観測と併せて排土量を調整できる正回転・逆回転混合制御機能があるため施工時変位の発生を抑制できる。

3. 超高压噴流攪拌複合技術工法の施工仕様

3.1 適用土質とWHJ改良径の設定

WHJ 工法の標準改良径を表－1に示す。超高压噴射攪拌を基本原理としており、対象土の粘着力、 N 値により設定改良径が異なる。改良径は $\phi 1.6 \sim \phi 2.3\text{m} \times 2$ 軸，改良断面積 $A=4\text{m}^2 \sim 8\text{m}^2$ である。従来の二軸式機械攪拌工法の $\phi 1.0\text{m} \times 2$ 軸式の場合， $A=1.5\text{m}^2$ に比べ，2.7～5.3 倍が得られる。また，攪拌軸間の幅も $B=1.4 \sim 2.0\text{m}$ に変更できるため適用条件に応じて様々な改良仕様の選択が可能である。対象土の適用範囲は，標準的には粘性土では $S_u=70\text{kN/m}^2$ ，砂質土では $N \leq 20$ としている。

表－1 適用土質と改良径の設定

対象土質		改良径 D(m)	改良断面積 A(m ²)
砂	$N \leq 10$	2.1m×2軸	6.81
	$10 \leq N \leq 20$	1.9m×2軸	5.56
粘性土	$S_u \leq 30\text{kN/m}^2$	2.3m×2軸	8.08
	$30 < S_u \leq 40\text{kN/m}^2$	2.1m×2軸	6.81
	$40 < S_u \leq 50\text{kN/m}^2$	1.9m×2軸	5.56
	$50 < S_u \leq 70\text{kN/m}^2$	1.6m×2軸	3.92

*WHJ攪拌翼径 $\phi 1.0\text{m}$ の場合

3.2 施工仕様

本工法の攪拌混合は超高压噴流体による対象地盤の切削破壊・混合攪拌が主体であり，施工時には，固化材スラリーの吐出圧力，吐出量，改良時間および回転数等の管理を行う。

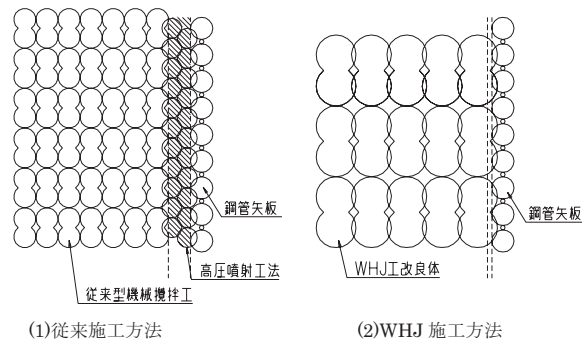
4. 超高压噴流攪拌複合技術の施工技術

4.1 既設構造体との一体化施工

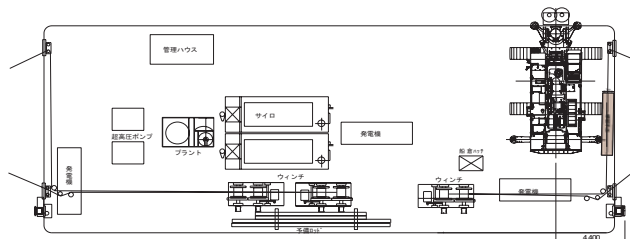
本工法の改良径は $\phi 1.6 \sim 2.3\text{m}$ で，機械攪拌翼 $\phi 1.0\text{m}$ より半径 $0.3\text{m} \sim 0.65\text{m}$ の超高压ジェット攪拌域を有する。図－2に既設護岸の耐震化のための改良配置を従来施工方法と WHJ 施工方法を模式的に比較した。従来は護岸構造体と機械攪拌工法との間詰め工として高压噴射攪拌工法の2工種によって行われる場合が多かった。一方，WHJ 工法では，外周部の改良域が超高压噴射攪拌であるため，護岸構造体との一体性が図れる密着施工と改良体相互のラップ施工が単一工法で計画可能であり，作業性の効率化と信頼性の向上が図れた。

4.2 機械構成

WHJ 工法は，台船上に三点支持式杭打機を搭載させる方式である。その標準的な搭載方法を図－3に示す。台船上には，表－2に示すような WHJ 施工機，スラリープラントの一式を搭載する。使用する台船は，搭載する施工機種，搭載質量によ



図－2 WHJ 施工による既設護岸の密着施工例



図－3 WHJ 施工機の台船搭載例

表－2 台船上の搭載施工機械

機 械 名	仕 様
WH J 処理機	WH J 駆動装置、耐圧40MPa 施工管理装置
WH J オーガスクリュ	特殊オーガスクリュ×2軸 WHJオーガヘッド $\phi 1.0\text{m} \times 2$ 軸 軸間幅1.4m～2.0m
超高压大容量ポンプ	可変型ポンプ 110kW
スラリープラント	処理能力20m ³ /h
施工位置測定機器	自動追尾光波測定器またはGPS



写真－2 台船上に搭載した WHJ 施工機械全景

って選定されるが，通常では呼称 700 t 級台船を用いる場合が多い。台船の設備には，WHJ 本体のほかに台船移動のためのウインチ設備，施工位置の固定のためのスパッドを装備する。写真－2にWHJ 施工機の台船上の搭載例を示す。

4.3 施工時の環境軽減

鋼管矢板等の既設護岸前面側から地盤改良施工を行う場合には，改良体と既設護岸との密着性が求められる。構造体との近接した施工によって地盤変位を及ぼす場合がある。WHJ 工法では，図－

4に示すように、回転軸の排土スクリュロッドの正回転と逆回転の比率を組み合わせることで、施工時の地盤変位を抑制することが可能である。機械攪拌工法は、改良時の回転方向が一方向に決まっているのに対し、高圧噴射攪拌工法では、変位制御のために軸回転を切替えることで、WHJ 攪拌翼先端装置部の超高圧ジェット噴流の方向も切り替わる。改良品質は回転方向に影響受けないことから、施工能率を制限することなく、通常施工のままで行うことができる。排出土率は、標準的には 100%である。また、排出土は原土のみで固化材の混入がなく、水質の汚染等は生じない。WHJ 工法は单相式高圧噴射攪拌方式であり、エアを併用しないため、排出土は水中内で拡散することなく、施工が可能である。

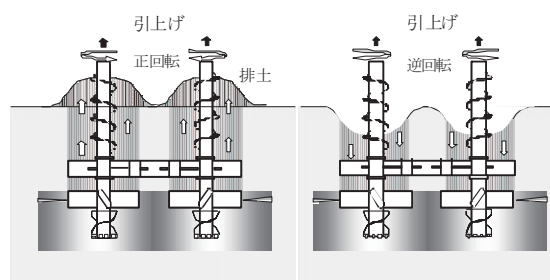


図-4 正回転と逆回転による排土制御模式図

5. 超高圧噴流攪拌複合技術を用いた護岸耐震補強工事施工事例

5.1 工事概要

東京都東部に位置する荒川と中川の間位置する「中堤」では、08年2月から老朽化や地盤沈下に伴う改修工事を実施した。本工事は、東京都が中川左岸の護岸耐震補強を実施するために江戸川競艇を一時休止させることから、対岸の中堤でも同様に改修を進めるものである。工事延長は、競艇場前後の延長約 1500m を整備するものである。

中堤は、荒川と中川の間部に位置する延長約 7km の背割堤で、完成後約 20 年が経過し、老朽化や地盤沈下による変形が進んでいることから、鋼管矢板杭の打設による補強、変形個所の補修などを行うものである。地盤改良施工において、中堤内の地盤改良域は、陸上部側からの地盤改良施工に十分な足場が確保できないため、水上から台船施工が可能な WHJ 工法が適用された。

5.2 地質概要

河口から測点 4k 付近（江戸川区東小松川 2 丁目）の対象土質は、現況河床から AP-8m 付近までは $N=2\sim14$ の非常に緩いシルト質細砂で構成されている。また、AP-8m 以深では、含水比 $w=44\sim51\%$ 、砂分含有量 $50\sim60\%$ の砂質シルトで、粘着

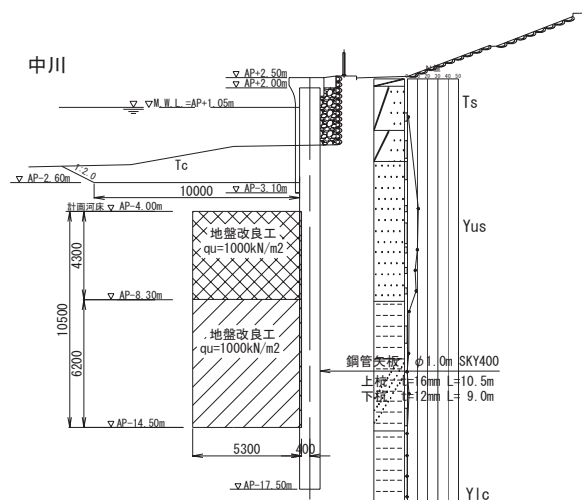


図-5 土質柱状図と改良位置

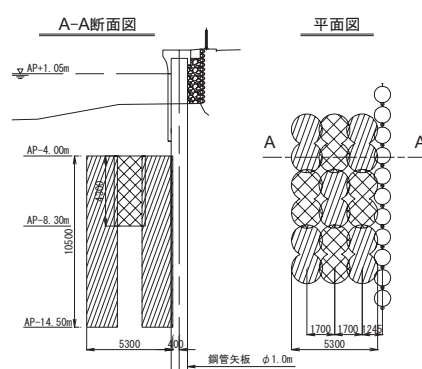


図-6 WHJ 改良体の配置図

表-3 WHJ 施工数量

区分	貫入長	改良長	空打ち長	本数
1	6.0m	4.3m	1.7m	144本
2	12.4m	10.5m	1.7m	201本

力 $S_u=28\sim64\text{kN/m}^2$ である。図-5に WHJ 工法の地盤改良断面図と土質柱状図を示す。

5.3 地盤改良計画

本工事は、河川内に新設された鋼管矢板の前面部に 3 列の WHJ 改良体を配置した。改良形式は、2 仕様の改良体を交互に配置した。改良上部の AP-4.0 $\sim$ 8.3m までの改良長 $l_1=4.3\text{m}$ では、改良率 $a_w=89\%$ の改良とした。改良体の配置ではラップ状に配置し、改良体相互で一体化が図れる計画である。また、それ以深の AP-8.3 $\sim$ 14.5m の改良長 $l_2=10.5\text{m}$ では、 $a_w=47\%$ 改良とした杭式改良である。なお、いずれの 2 仕様の WHJ 改良体も新設鋼管矢板と改良体との密着性を図る配置とした。

図-6に WHJ 改良体の標準配置を示す。

5.4 施工概要

(1) 施工仕様

本工事の施工延長 390m の WHJ 施工における施工数量を表-3に示す。また、実施した WHJ 施

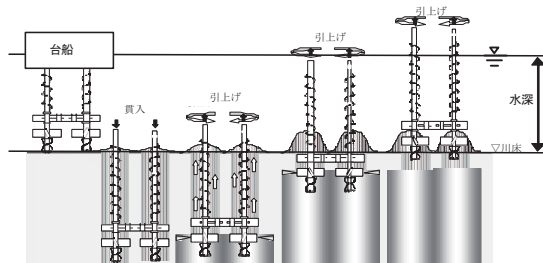
工の施工仕様を表－４に示す。設計強度は $q_u=1000$ kN/m²とした。設定改良径は、対象土質の N 値および粘着力から判断し、改良径 $\phi 1.9$ mとし、軸間幅 1.7m で改良断面積は、 $A=5.56\text{m}^2$ の連珠形状である。鋼管矢板と WHJ 攪拌翼先端部との距離は、25cm と近接した離隔距離である。また、鋼管矢板と超高压ジェット噴流域との密着幅は、10cm とした。

表－４ WHJ 施工仕様

項目	施工仕様
改良径	$\phi 1.9\text{m}$ (軸間1.7m)
改良断面積	$A=5.56\text{m}^2$
改良時間	4分/m
使用固化材	ケミコC-201
水・固化材比	W/C=1.0
材料混入量	$aw=166\text{kg/m}^3$
設計強度	$qu=1000\text{kN/m}^2$

(2) 施工方法

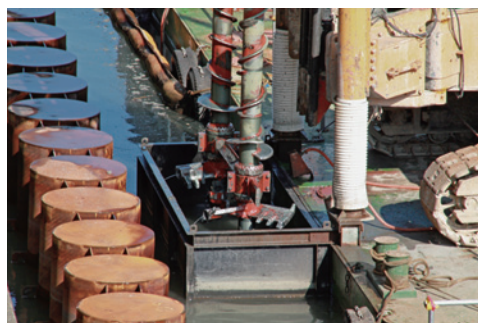
WHJ 工法の施工手順図を図－７に示す。WHJ 処理機を搭載した台船を施工工位置に移動し、台船を固定する。WHJ 攪拌装置と施工管理システムを作動させ、所定深度まで貫入する。WHJ 超高压ポンプを所定の圧力、吐出量に設定した後、定速回転で引抜き改良する。なお、改良時に護岸等の構造物の変位が懸念される場合は、WHJ 攪拌装置



図－７ 施工手順図



写真－３ 中堤地区 WHJ 施工状況



写真－４ 鋼管矢板との密着施工状況

の軸回転を正回転、逆回転の組合せ制御により、発生変位を管理値内に抑制することができる。写真－３には WHJ 工法の施工状況を、また、写真－４には既設鋼管矢板と WHJ 改良体との密着による一体化を図るための位置セット状況である。

5.5 施工結果

(1) 現場改良強さ

WHJ 改良後の現場改良強さ q_{uf} の結果を表－５に示す。その結果、各改良杭 $\ell_2=10.5\text{m}$ 仕様の上層、中層および下層とも平均 $q_{uf}=2300$ kN/m² 以上であった。現場改良強度の変動係数は、 $V=13\sim 21\%$ と小さく、改良土の混合性能は高いと判断される。また、改良杭体相互のラップ部の改良強度は、上、中、下層とも $q_{uf}=2300$ kN/m² 以上であり、外周改良体とほぼ同等の強度であることが確認された。

表－５ WHJ 改良体の現場改良強度結果

採取位置	改良体 NO.	現場改良強さ $q_{uf}(\text{kN/m}^2)$					変動係数 $V(\%)$
		1	2	3	平均	杭平均	
上層部 (AP-4m)	A	2674	2861	1917	2484	2314	20.2
	B	1803	1961	2666	2143		
中層部 (AP-8m)	A	3127	2385	2900	2804	2533	21.3
	B	1702	2899	2186	2262		
下層部 (AP-12m)	A	2377	2781	2994	2717	2577	12.6
	B	2340	2168	2802	2437		
上層部	CとD (ラップ部)	2662	1837	2475	2325		
中層部		2445	3189	2560	2731		
下層部		3107	2963	2230	2767		

(2) 施工環境

施工時の鋼管矢板の変位観測によると、陸側へ 8mm 程度の変位が認められた。このため、変位抑制の制御方法として、正回転と逆回転を始める深度を改良下端から 3m までを正回転させ、それより上部は逆回転により行う改良方法が最も変位の少ない排出土の調整方法であった。また、水中施工時の水質汚濁等に与える環境影響は認められなかった。

6. まとめ

本工法は、機械攪拌工法と高压噴射攪拌工法の複合技術を応用し、台船上に搭載した地盤改良工法である。既設護岸と地盤改良体との一体性を保つことは、護岸構造物としての耐震性の向上を図る上で重要である。中堤地区における施工事例を紹介したが、今後の耐震補強に向け、施工性、経済性の高い地盤改良工法が期待される。

参考文献

- 1) 鈴木孝一，西尾経，松岡大介：高压噴射攪拌による高速低変位施工を実現した SDM 工法(高速低変位深層混合処理工法)，建設の施工企画 No.698，pp.29～34，2008.4
- 2) 鈴木孝一，西尾経，田中 信哉，松岡大介，斎藤邦夫：SDM 工法（高速低変位深層混合処理工法）－機械攪拌併用高压噴射攪拌による地盤変位の抑制制御型工法の概要と施工事例－，基礎工 vol.37，pp.88～90，2009.5