

# TRD工法の河川堤防と都市部雨水貯留対策での適用事例

黒木 義富・日置 洋介

近年、気候変動の影響により全国各地で降雨災害が激甚化、頻発化している。この影響は河川の氾濫を招き、越水、洗堀、浸透などによる堤防の破堤や想定を超える降雨量による都市部の広範囲な浸水など甚大な被害を及ぼしている。TRD工法（等厚式ソイルセメント地中連続壁工法）はソイルセメント地中連続壁を造成する技術として、土留め止水壁以外にも河川堤防の遮水性と耐久性を確保する遮水壁、河川の自然環境を配慮した多自然型護岸、さらには都市部の雨水貯留調節池などに多くの実績を有しており、これら治水対策としての適用事例について本稿で紹介をする。

キーワード：ソイルセメント地中連続壁、川表遮水工、多自然型護岸、地中控え護岸、雨水貯留調節池

## 1. はじめに

我が国の治水事業は、従来の最大降雨実績に基づく治水計画から、気候変動による降雨量の増加を見込んだ計画の見直しに加え、流域全体の関係者が協働して取り組む「流域治水関連法」が令和3年5月に施行された。TRD工法（以下、「本工法」という）は、わが国で発案、開発された工法で、軟弱な地盤から玉石混じりの硬質地盤までの幅広い地盤への対応、優れた遮水性能、低重心設計の施工機械などの技術的な優位性や特徴を有しており、本工法の専用施工機械は鉛直壁用と傾斜壁用機械の2種類がある。令和4年3月末現在、国内での施工件数約850件、累計壁面積450万m<sup>2</sup>の実績を有し、図-1に示すように様々な用途に採用されている。

辺地盤の土圧、水圧を一時的に支え、かつ地下水の流入を防ぐための仮設壁に大別される。本工法は図-2に示すように原位置土とセメント系懸濁液を機械的に混合攪拌するソイルセメント地中連続壁の一つであり、以下の特徴を有する工法である。

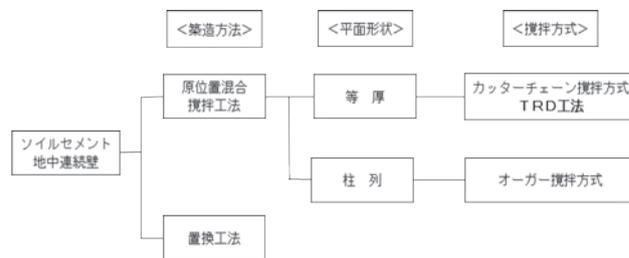


図-2 本工法の位置付け

### (1) 工法の特徴と壁体品質

#### (a) 施工機械の安定性

低重心設計により機械高は、地中にカッターポストを継ぎ足すことにより、図-3に示すように壁深度に関わらず機械高約10mの一定の高さで重心が低く安全な施工が可能である。

#### (b) 壁の連続性、芯材間隔の任意設定が可能

造成する等厚壁は横方向へ連続的に移動しながら攪拌混合するため、目違いが無く遮水性の高い高品質の壁が実現できる。また図-4に示すように壁形状が等厚であるため任意の芯材間隔で建込みが可能であり、H形鋼材以外の鋼矢板、鋼製地中連続壁用部材やコンクリート矢板、PC壁体なども挿入建込みが可能である。

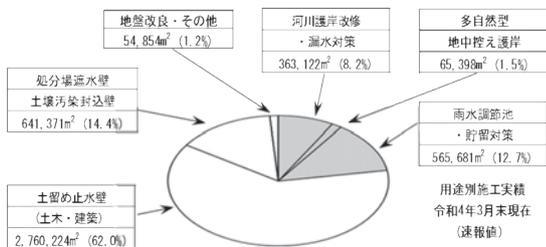


図-1 用途別施工実績

## 2. 本工法の概要

地中連続壁には構造物の荷重、自重を考慮した基礎壁として用いられる本体壁と、地下構造物築造時の周

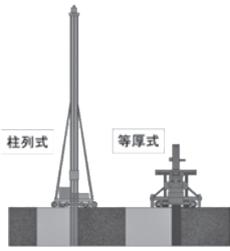


図-3 TRD 施工機械(右)

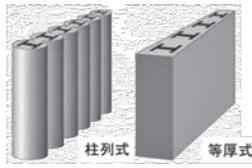


図-4 地中連続壁の形状

(c) 硬質地盤への対応と深度方向に均質な壁品質

掘進機構は図-5に示すように地中に挿入したカッターポストを地盤に、横進行方向へ押し付けた状態でカッターチェーンを鉛直方向に周回することにより換算N値100以上の硬質地盤も掘削が可能であり、鉛直方向に異なる互層地盤の掘削土と固化液を全層攪拌混合することにより、深度方向の壁強度や透水性能のばらつきが少ない均質な、透水係数 $1 \times 10^{-8}$  m/sec以上の高い遮水性を有する壁を造成することができる。

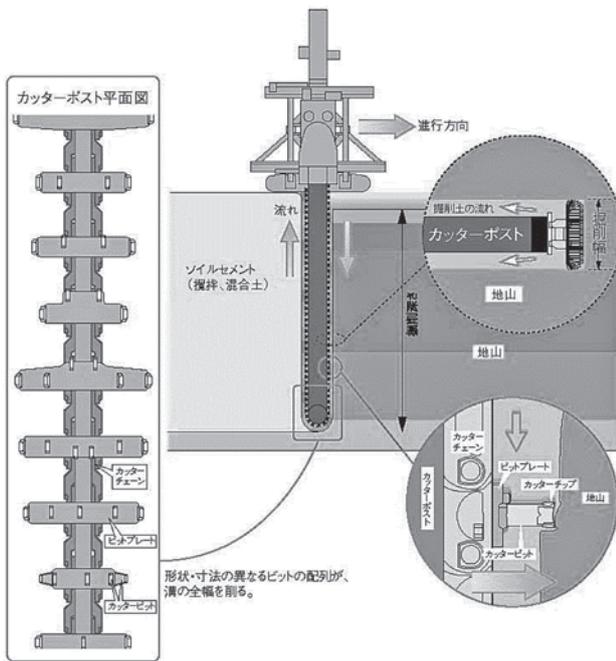


図-5 TRD 機械の掘削機構図

図-6は互層地盤におけるオールコアサンプリングによる壁体品質確認の例で、本工法の上下攪拌機構により土層に関わらず、深度方向の強度分布はバラツキが少なく均質であった。また、透水試験では砂礫層GL-33 m付近で $k = 1.09 \times 10^{-7}$  cm/sec ( $10 \times 10^{-9}$  m/sec)と良好な結果が得られている。

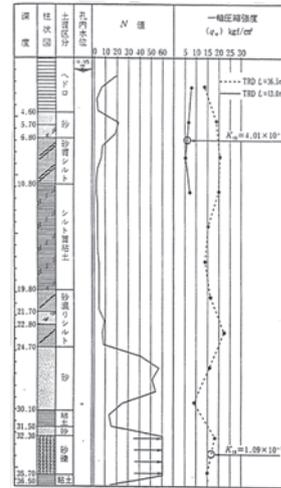


図-6 壁体の品質確認結果

(d) 高精度な施工が可能

地下構造物築造時には高い鉛直精度が求められるため、本工法では基準値1/250以内としている。地中内のカッターポストの挙動は、カッターポスト内に装着した多段式傾斜計で、X軸、Y軸の2方向を運転席上の専用モニターで計測し、常に監視しながら壁造成作業を行うことができる(図-7、写真-1,2を参照)。

また、掘削時の変位計測データを指定画面からアウトプットできるソフトを新たに開発し運用している。

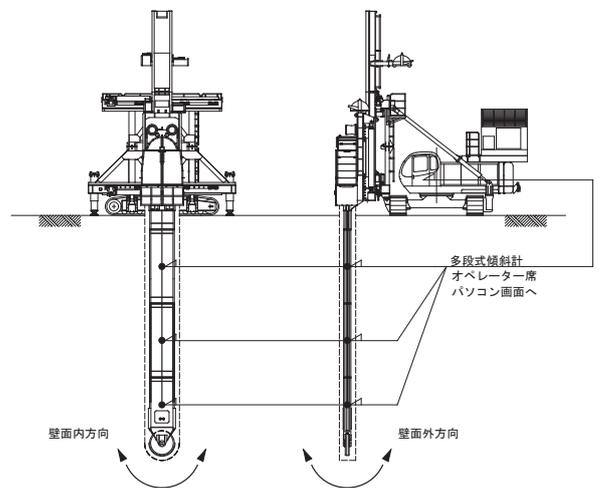


図-7 多段式傾斜計位置説明図

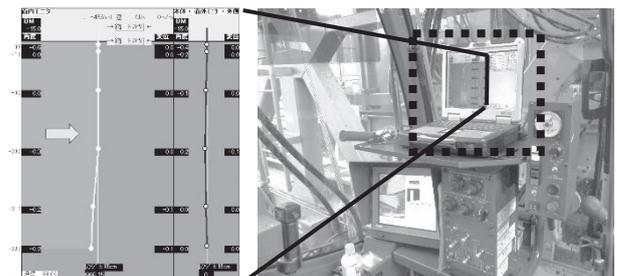


写真-1 モニター画面

写真-2 運転席モニター設置状況

(2) 施工機械の種類と適用範囲

施工機械の種類には、最大壁深度 60 m、最大壁厚 1.2 m まで施工可能な鉛直壁用(写真—3)と、地中控え護岸工に用いる俯角 35~45 度、壁体長 12.5 m まで対応可能な傾斜壁用(写真—4)の 2 タイプがある。



写真—3 TRD III-2型 (鉛直壁)



写真—4 TRD I型 (傾斜壁)

鉛直壁用と傾斜壁用の適用範囲と機械諸元を、表—1 と表—2 にそれぞれを示す。

表—1 鉛直壁の種類と諸元

項目	種別	鉛直壁			
		I 型機	II 型機	III 型機	III-2 型機
施工仕様	最小壁厚	450 mm	550 mm		
	最大壁厚	550 mm	700 mm	850 mm	
	TRD-wide	-	-	900~1,200 mm <sup>※</sup>	
	最大壁深度	20 m 以下	35 m 以下	60 m 以下	
適用土質	砂質土・粘性土	N<40	換算 N<100		
	礫・玉石	礫径 50 mm	礫径 100 mm 以下		
	軟 岩	-	qu ≤ 5 MN/m <sup>2</sup>		
機械諸元	機械高さ	9.980 m	12.052 m	10.101 m	
	ℳ (低空頭)	5.260 m	-	6.490 m	
	機 械 幅	6.700 m	7.200 m	7.218 m	7.200 m
(ポストを除く)	機械質量	64 t	139 t	162 t	177 t

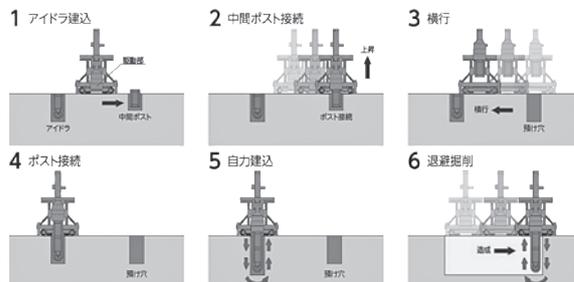
※ TRD-wide の壁厚は、深度と土質条件によって異なる

表—2 傾斜壁の種類と諸元

項目	種別	地中控え護岸		
		I 型機 (傾斜壁対応機)		
施工仕様	俯 角	35°	40°	45°
	最 小 壁 厚	450 mm		
	最 大 壁 厚	550 mm		
	最 大 壁 体 長	12.5 m		
	最大垂直深度	7.460 m	8.357 m	9.198 m
適用土質	砂質土・粘性土	N ≤ 50		
	礫・玉石	礫径 50 mm 以下		
機械諸元	機 械 高 さ	7.398 m	7.897 m	8.434 m
	ℳ (低空頭)	5.249 m	5.946 m	6.577 m
	機 械 幅	5.491 m		
(ポストを除く)	機 械 質 量	64 t		

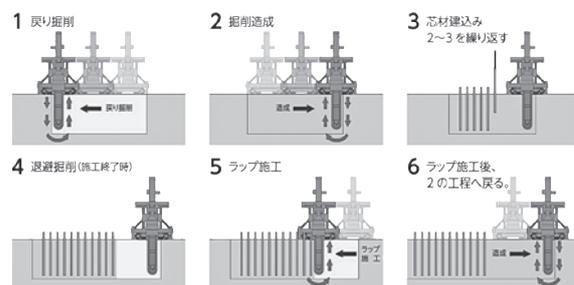
(3) 施工方法

本工法の施工手順については、図—5 に示すカッターポスト (I 型 3.500 m / 本, II, III 型 3.655 m / 本) を図—8 に示す手順で 1 本毎に所定の設定深度まで建込み作業を行う。



図—8 カッターポスト建込み手順

次に土留め壁造成などの場合には、図—9 に示すとおりベントナイトなどの掘削液を注入しながら地山を先行掘削し、戻り掘削で開始地点まで戻った後、固化液を注入しながら壁造成を行い芯材挿入後、再び先行掘削を行う。この一連の手順を「3 パス施工」と称する。



図—9 「3 パス施工」施工手順

一方、芯材が不要な漏水防止目的の遮水壁など比較的透水層が浅く、N 値 50 以上の硬質地盤が介在しない場合は、掘削液と固化液の混合スラリーを同時に注入攪拌しながら「1 パス施工」することによって工期短縮、コスト縮減ができる。

また最近では、周辺地盤の土圧、水圧をあまり考慮しない漏水防止の遮水壁や汚染土壌の封じ込め壁などで、セメント系固化材の代替品として自然由来の粘土系鉱物を採用する施工事例も増加し、低炭素化社会の実現に向けて今後の活用が期待されている。

### 3. 河川堤防への適用事例

本章では河川堤防での適用事例について「川表遮水護岸工」と「地中控え護岸工」の2例を紹介する。

2例はいずれも平成12年9月に発生した東海豪雨による甚大なる被害を被った愛知県下を流れる矢作川と庄内川における河川堤防の適用事例である。

#### (1) 川表遮水護岸工

矢作川中流部の豊田市区間では、豪雨により計画水位を超過し堤防の越水や堤体内の浸透が発生したため、様々な堤防補強対策が進められている。本工法を用いた川表遮水対策工は図-10に示すとおり、河川水の基礎地盤への浸透を抑制あるいは防止することを目的に川表法尻部に鋼矢板打設や地中連続壁構築をするものである。

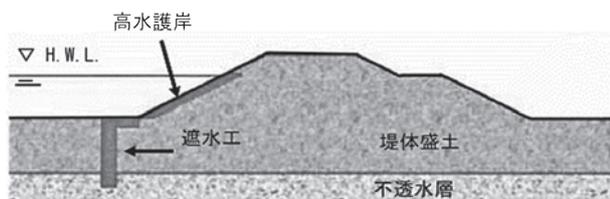


図-10 川表遮水工

本工法による施工は、国土交通省 中部地方整備局 豊橋河川事務所発注区間 (図-11) で、平成14年1月より豊田市竜宮橋から豊田大橋の区間 (38~40 km 付近、施工総延長 3,085 m) と平成26年1月より高橋区間 (右岸 40 km 付近、施工総延長 320 m) の2区間で行われた。両区間とも図-12に示すようなN値50を超える玉石が混在する砂礫主体の硬質地盤であり、鋼矢板打設は補助工法が無くしては困難であったことから、本工法による川表遮水護岸工が採用された (表-3 参照)。

平成29年度に施工した矢作川豊田高橋下部工事は、図-12に示す土質柱状図 (抜粋) よりGL-10~20 m 付近にN値50以上の砂礫層が介在し、採取した土の粒度試験結果では礫分8%, 砂分60%, シルト・粘土分32%, 湿潤密度試験では2.05 g/cm<sup>3</sup>であった。表-4に施工数量を、表-5に壁体品質試験結果をそれぞれ示す。

壁体品質は互層地盤においても品質要求性能 (壁強度, 透水係数) を満足する結果となった。写真-5に橋梁下施工時の低空頭に改造した施工機械 (機械高約6.5 m) を示す。

表-3 施工数量\*

	工事名称	施工延長	壁面積
1	H14 矢作川瑞穂築堤護岸工事	193 m	2,520 m <sup>2</sup>
2	H14 矢作川竜宮護岸工事	259 m	2,537 m <sup>2</sup>
3	H14 矢作川砂町護岸工事	298 m	3,782 m <sup>2</sup>
4	H14 矢作川竜宮護岸 (その2) 工事	427 m	4,360 m <sup>2</sup>
5	H14 矢作川白浜護岸工事	468 m	8,379 m <sup>2</sup>
6	H14 矢作川寺部護岸工事	248 m	2,007 m <sup>2</sup>
7	H14 矢作川川端護岸工事	859 m	11,426 m <sup>2</sup>
8	H17 矢作川白浜漏水対策工事	638 m	7,146 m <sup>2</sup>
9	H26 矢作川白浜漏水対策工事	286 m	4,940 m <sup>2</sup>
10	H29 矢作川豊田高橋下部工事	32 m	550 m <sup>2</sup>
	計	3,708 m	47,647 m <sup>2</sup>

※出典元：TRD 工法協会



図-11 矢作川対策区間

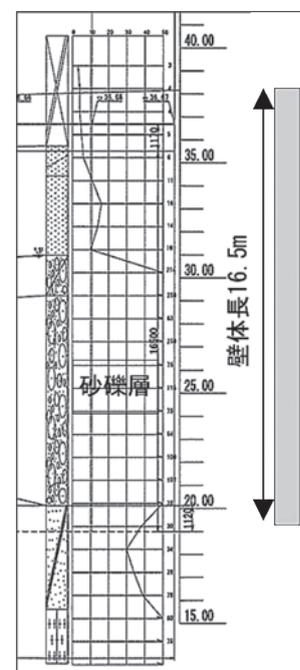


図-12 土質柱状図 (抜粋)

表-4 施工数量

施工延長	32.0 m
壁 深 度	17.5 ~ 18.9 m
壁 厚	550 mm
壁体強度	quf = 0.5 N/mm <sup>2</sup>
透水係数	k = 1.0 × 10 <sup>-8</sup> m/s

表-5 壁体品質試験結果 (平均値)

品質確認結果	壁体強度	透水係数 m/s
設 計	0.50 N/mm <sup>2</sup>	1.0 × 10 <sup>-8</sup>
室 内 配 合 試 験	1.65 N/mm <sup>2</sup>	2.15 × 10 <sup>-8</sup>
ウェットサンプリング	2.09 N/mm <sup>2</sup>	4.12 × 10 <sup>-8</sup>
コアサンプリング	2.01 N/mm <sup>2</sup>	6.90 × 10 <sup>-8</sup>



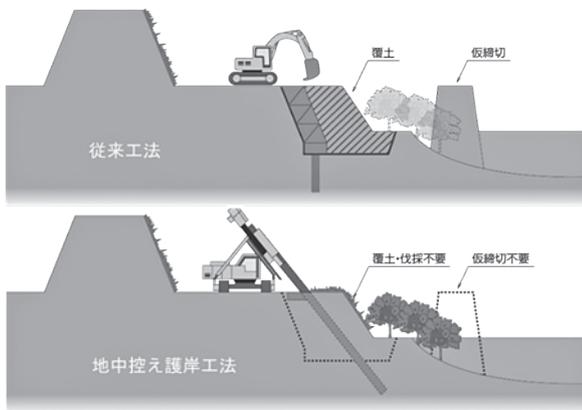
写真—5 橋梁下での低空頭施工機械

(2) 地中控え護岸工

河川整備計画を推進する上で、河川が本来有している生態系の環境保全と景観維持もまた重要である。

「多自然川づくり」の方針の一つである「多自然型護岸工法」は、かごマット、連節ブロック、法覆い工など様々な工法が採用されている。これらの工法はいずれも水際に護岸を設置するため、河岸に手が加わることや河川側に仮締切が必要となるなど一時的に自然環境へ影響を与え、また出水時には施工が制約されるなどの問題点が指摘されてきた。

こうした背景をもとに従来、鉛直地中連続壁として利用されていた本工法を傾斜地中壁へ応用検討した結果、平成9年度に国土交通省関東技術事務所とTRD工法協会により「地中控え護岸工法」として実用化された。図—13に従来工法との比較図を示す。

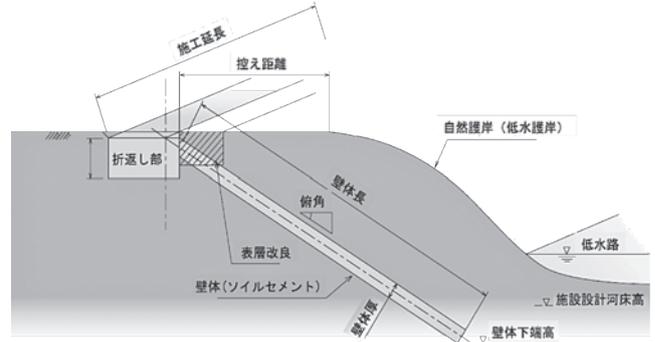


図—13 多自然型護岸 従来工法（上）と地中控え護岸工法（下）

地中控え護岸工法は洪水時に河岸前面の土砂浸食を防ぐことを目的とし、河川低水敷上よりソイルセメント地中連続壁を地中に造成し、洪水後の土砂の再堆積により河岸の自然再生を考慮した工法となっている。

地中控え護岸の基本構造は図—14に示すとおり、鉛直壁と同様の手順で原位置土と固化液で混合攪拌して造成する「壁体部」とソイルセメントを材料とする「折返し部」から構成される。

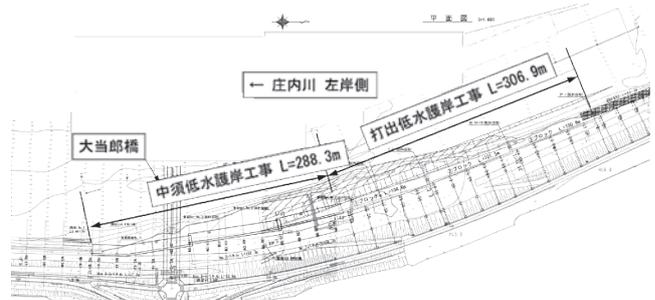
令和4年3月末現在、地中控え護岸工法の累計施工件数は27件、累計護岸総延長は約7.3kmの施工実績を有しており、平成21年4月にはNETIS準推奨技



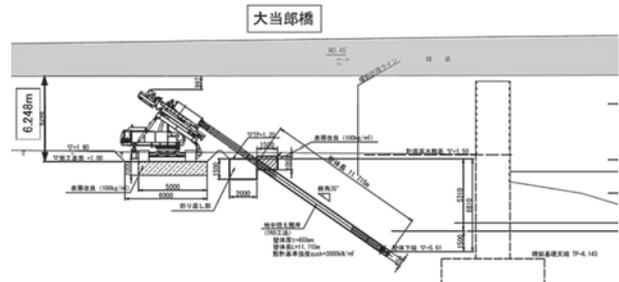
図—14 地中控え護岸の基本構造図

術 (KT-980128-V) に選定されている。

平成26年に実施した中部地方整備局庄内川河川事務所発注の庄内川左岸「H26庄内川中須低水護岸工事」、「H26庄内川打出低水護岸工事」の平面図を図—15に、大当郎橋桁下部の断面図を図—16にそれぞれ示す。



図—15 中須低水護岸工事・打出低水護岸工事平面図



図—16 「大当郎橋」桁下部断面図

両施工箇所は河道の浸食が進行しているため高水敷を防護する低水護岸の構築が必要となり、従来工法の自立式鋼矢板護岸では捨石を高い位置まで設置する必要があり、施工性、経済性に有利な本工法による地中控え護岸工法が採用された。また大当郎橋の桁下空間は6.3mであるため、施工基盤を50cmほど下げて低空頭型に改造した施工機械により施工を行った。

なお両施工箇所は低水護岸設置後に河道掘削を行うため、計画河床高への壁体根入れ部分を考慮して壁体長11.75m、傾角は河川堤防の勾配1:2に近い35度とした。写真—6に施工箇所上流側からの施工状況、

写真一七に橋梁の桁下部施工中の低空頭型仕様機を示す。



写真一六 庄内川（左岸側）の施工状況



写真一七 大当郎橋桁下の施工状況

地中控え護岸の壁体設計基準強度は、コンクリート護岸より強度の劣るソイルセメントによる地中連続壁のため強度  $3.0 \text{ M/m}^2$  を基準としている。表一六に各ブロック（壁体）のセメント（高炉B種）添加量とウェット、コア両サンプリングによる壁体平均強度を示す。なお、コアサンプリングは壁体上、中、下の位置に地表面から鉛直ボーリングを行って採取した。

今後の課題としては、固化液に短繊維を混入して曲げモーメントに対するじん性を高めるなど、地中控え護岸の壁体強度の向上が求められている。

表一六 壁体品質試験結果（H26庄内川打出低水護岸工事）

ブロック	固化材添加量 (kg/m <sup>3</sup> )	ウェット平均強度 (kN/mm <sup>2</sup> )	コアサンプリング		
			上 (kN/mm <sup>2</sup> )	中 (kN/mm <sup>2</sup> )	下 (kN/mm <sup>2</sup> )
①	353	4.10	4.77	3.90	4.11
②	353	5.28	7.07	5.65	5.40
③	387	13.28	14.3	13.9	13.5

#### 4. 雨水貯留調節池による治水対策

増水した雨水を一時的に貯留する地下式や掘り込み式の調節池の遮水壁に本工法は多く採用されており、特に首都圏（1都3県）では全国実績（壁面積）の2/3を占めている（表一七参照）。

表一七 首都圏の雨水貯留調節池での本工法の採用実績\*

地区別	件数	壁面積 m <sup>2</sup>	比率	最大深度
首都圏計	71	377,065	66.70%	49.2 m
東京都	7	59,071	10.40%	42.5 m
埼玉県	14	86,046	15.20%	24.2 m
千葉県	41	135,517	24.00%	47.0 m
神奈川県	9	96,431	17.00%	49.2 m
首都圏以外	40	188,616	33.30%	51.5 m
全国合計	111	565,681	100.00%	51.5 m

※出典元：TRD 工法協会

（令和4年3月末現在）

東京都は現在、「中小河川における都の整備方針（H24.11）」をもとに多摩地域で時間最大降雨量を  $50 \text{ mm/時間}$  から  $65 \text{ mm/時間}$  に引き上げ、流域治水対策に取り組んでいる。平成30年度に実施した東京都三鷹市の「野川大沢調節池」第二貯留池では3.1 m掘り下げる雨水貯留量拡張工事において、図一七に示す位置に本工法の遮水壁工が採用された。



掘込式調節池の例（野川大沢調節池）

図一七 遮水壁施工位置

本工法の遮水壁面積は  $17,297 \text{ m}^2$  で、計画雨水貯留量は  $158,000 \text{ m}^3$  となっている。

遮水壁工の壁体長は難透水層（壁体長最大GL-26.3 m）までの根入れとし、土質条件は最大換算N値250の砂礫主体の硬質地盤であったが、壁体強度、透水係数とも設計値を満足する品質結果が得られた（表一八施工数量、表一九壁品質、図一八土質柱状図参照）。

表一八 施工数量

施工延長	709.0 m
壁深度	22.3 ~ 26.3 m
壁厚	550 mm
壁体強度	$q_{uf} = 0.5 \text{ N/mm}^2$
透水係数	$k = 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 以下

表一 9 壁体品質試験結果 (平均値)

品質確認結果	壁体強度	透水係数 m/s
設計	0.50 N/mm <sup>2</sup>	1.0×10 <sup>-8</sup> 以下
室内配合試験	1.04 N/mm <sup>2</sup>	4.2×10 <sup>-9</sup>
ウェットサンプリング	2.1 N/mm <sup>2</sup>	4.12×10 <sup>-9</sup>
コアサンプリング	-	-



図一 18 土質柱状図と施工・砂礫分布状況

## 5. おわりに

本工法は現在まで河川護岸、雨水調節池など約 200 件の治水対策工事に採用されてきた。また本稿では紹介することができなかったが、海外の事例では米国フロリダ州最大の湖 (Lake Okeechobee) で、老朽化した石灰岩質の築堤修復対策として堤防直上から施工する遮水壁構築工法の一つに本工法が採用されている。

国内でも各水系で流域治水プロジェクトが開始されているが、大規模な水災害を防ぐために本工法が脆弱な築堤箇所の堤防補強、浸透・パイピング防止、堤防法面崩壊防止及び都市部浸水対策の一助になるよう更なる普及展開を目指していきたい。

## 謝 辞

本稿の執筆にあたり、国土交通省中部地方整備局豊橋河川事務所、庄内川河川事務所ならびに東京都建設局北多摩南部建設事務所の方々には、写真、図面等の掲載ご承認とご助言を賜り心より感謝申し上げます。

J C M A

### 《参考文献》

- 1) TRD 工法協会 技術・積算マニュアル 鉛直壁用 2020 年 7 月版
- 2) TRD 工法協会 地中控え護岸工法 技術・積算マニュアル 2020 年 7 月版

### 【筆者紹介】



黒木 義富 (くろき よしとみ)  
TRD 工法協会  
技術部会長



日置 洋介 (ひおき ようすけ)  
TRD 工法協会  
事務局長