

米国における TRD 工法による大規模堤防 漏水対策適用事例

勝 倉 茂

TRD 工法は、等厚式ソイルセメント地中連続壁工法に分類される。造成されるソイルセメント壁は、その独自の掘削機構により、連続性と高い止水性が特徴のひとつである。日本国内では1992年の誕生以降、適用範囲を広げ、今日では主に大深度、並びに硬質地盤での適用や、高い止水性が求められる条件下において多く採用されている。また、2005年以降のTRD工法技術の海外への普及と共に、多様な用途における施工事例も増加している。

本稿では、米国における大規模な堤防の漏水対策工事の一環として、狭隘な堤頂部からTRD工法により止水壁の造成が行われた適用事例について紹介する。

キーワード：ソイルセメント地中連続壁，止水壁，等厚壁，堤防，漏水対策，補強，TRD工法

1. はじめに

TRD工法（以下、本工法という）は、地中に建て込んだチェーンソー型のカッターを回転させ、地盤を切削しながら水平方向に連続した溝を掘削し、同時に原位置土とセメントスラリーを混合攪拌することにより、ソイルセメント地中連続壁を造成する工法である。

この横行掘削原理、及び鉛直攪拌方式により、ソイルセメント地中連続壁の均質性が確保され、継ぎ目のない止水性の高い連続壁を効率よく造成することが可能となる。

施工機械（写真—1）は、チェーンソー型の掘進機



写真—1 本工法機

構と、これを支えるベースマシンで構成され、ベースマシンの前方にガイドフレームを設け、これに水平移動が可能な掘進機構が装着されている。掘進機構は、複数の切削ビットを取り付けたチェーンと、これを駆動するモーター、カッターポスト等で構成され、ポストの内部には、セメントスラリーをカッターポスト下端に設けた吐出口へ送る複数の配管と、施工精度管理用の傾斜計の挿入管が装備されている。施工機械の高さは約10mと低く、施工深度に拘わらず、機械全体の安定性が常時確保されている。

本工法は、低重心設計の施工機械、且つ高品質なソイルセメント地中連続壁の造成を目的に、1992年にカッターチェーン方式による施工機械として、(株)神戸製鋼所（現コベルコ建機(株)）により開発された、等厚式ソイルセメント地中連続壁造成工法である。

1992年の開発以降、日本国内では、土木、建築等の多種芯材を挿入する仮設土留止水壁をはじめとし、河川堤防、調節池、処分場、汚染物質封じ込め等を目的とした止水壁、並びに地中控え護岸等、計850件を超える現場に供されており、最大壁厚は1,200mm、最大掘削深度は60mに至っている¹⁾。

2. 海外への本工法技術の普及

本工法は、日本国内における工法の確立と共に、米国（2005年）、シンガポール（2007年）、及び中国（2009年）へ展開されている。今日においても、米国、及び

中国では定常的に本工法の採用が進んでおり、米国では主に浅深度ながらも高い止水性が求められる堤防や汚染物質貯留池用止水壁として、中国では大深度仮設土留止水壁や鉄筋コンクリート地中連続壁工法等により造成される RC 連壁の漏水対策止水壁としての適用が多く、地域によりその適用方法に特色が出ている。

3. 米国における本工法の適用状況

米国では 2005 年に、カリフォルニア州における地下水への海水の浸入を防ぐためのフィジカルバリアーとした止水壁の試験施工を行うため、Hayward Baker Inc. (現 Keller North America Inc.) により初めて導入され、米国内唯一の本工法の施工会社として、3 台の本工法機を保有し、今日までに総施工壁面積 240,000 m² 超の施工実績を有している。

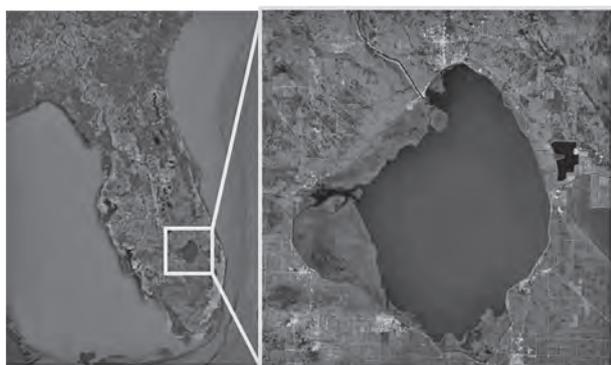
米国内での本工法は、仮設土留壁とした適用は少なく、主に老朽化した堤防の漏水対策、調節池や各種汚染物質貯留池等の止水壁として適用されている。

4. Herbert Hoover Dike^{2)~4)}

フロリダ半島南東部に位置する Okeechobee 湖 (図一1) は、琵琶湖の約 3 倍の面積となる約 1,890 km² におよぶ非常に大きな淡水湖である。通常の水源地とした役割に加え、フロリダ半島南部に広がる大湿地帯に生息する動植物にとっても貴重な役割を担っている。

この Okeechobee 湖の周辺を囲っているのが、全長 143 mile の Herbert Hoover Dike (HHD) である。

HHD 築堤の歴史は 100 年以上前に遡る。1915 年頃より、地元の出資により最初の築堤が始まる。1920 年代後半、数度のハリケーンによる甚大な越流被害が発生し、1930 年代 (写真一2)、US Army Corps of Engineers (米国陸軍工兵隊, USACE) により 84 mile におよぶ大規模な築堤事業が開始されること



図一1 Okeechobee 湖 (フロリダ州)



写真一2 1933 年頃の HHD 初期築堤状況

となる。また、1947 年に更なるハリケーンによる被害を受け、59 mile の追加の築堤工事が着手され、1960 年代に現在の HHD が完成することになる。

当時、HHD 築堤時に使用された主な材料は、礫、石灰岩、砂、貝殻、有機質土、浚渫土砂等であり、ハリケーン等豪雨による湖面の水位上昇に伴い、堤内への漏水やパイピングの発生が確認されることとなる。

これらの問題に対し、堤防の安定化、及びパイピングの軽減を図るため、漏水対策とした止水壁の造成を含む、HHD のリハビリテーションワークの検討が 1990 年代から 2000 年代前半に実施され、2008 年、当事業の最初の漏水対策工となる止水壁の造成が、本工法により開始された。

5. Herbert Hoover Dike における漏水対策工事

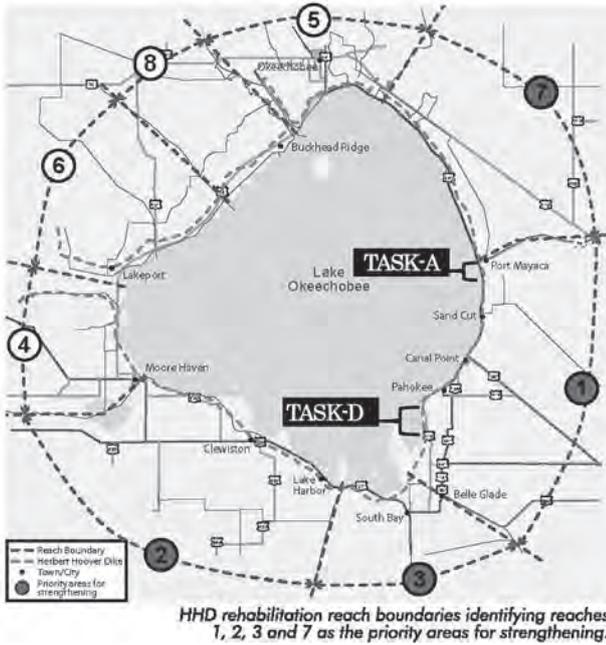
本工法が採用された 2 工区、Reach-1 TASK-A、及び TASK-D (図一2) における止水壁造成工事例を以下に紹介する。

(1) 施工概要

- ①発注者名：US Army Corps of Engineers, Jacksonville District
- ②工事件名：Herbert Hoover Dike Rehabilitation Reach-1 Seepage Cutoff Wall TASK-A, TASK-D
- ③工事場所：Martin and Palm Beach Counties, Florida
- ④土質条件：堤体内埋土、砂質土、有機質土、石灰岩、砂岩等
- ⑤施工数量：表一 参照

(2) 堤頂部からの止水壁の施工

止水壁に求められる役割は、漏水対策、及びパイピングの軽減を行うことによる HHD 自体の安定化であり、既存の堤体自体にもその機能を持たせる必要があ



図一 2 Herbert Hoover Dike 漏水対策工区位置

表一 1 TRD 止水壁 施工数量

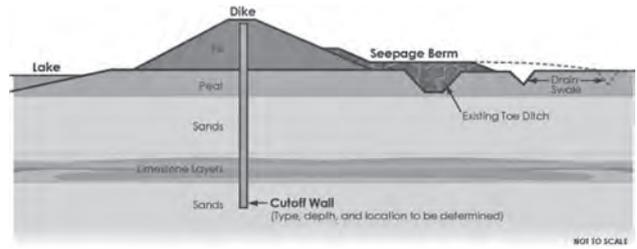
施工数量		TASK-A	TASK-D
施工延長	ft (m)	14,000 (約 4,267)	17,600 (約 5,365)
壁厚	mm	700	700
最大壁深度	ft (m)	56.0 (約 17)	65.7 (約 20)
壁面積	ft ² (m ²)	224,000 (約 20,810)	1,156,320 (約 107,426)
工期	着工	2008 年 1 月	2009 年 1 月
	完工	2008 年 7 月	2011 年 11 月
	(一部のエリアにて施工中断期間有り)		

るため、止水壁は堤頂部からの施工となる（図一 3 参照）。既存の堤頂部の幅員は、数マイルにおよぶ施工エリアにより異なるものの、概ね 3～5 m 程度であるため、本工法機をはじめとした堤頂部に配置される重機足場用として、堤外側に盛土を行い、最小限の作業幅員を確保した上で施工を実施している（写真一 3, 4）。なお、当盛土部については施工完了後に撤去し、植生復帰を行っている。

狭隘な堤頂部には、本工法機の他は必要最低限の重機のみを設置し、プラント設備一式は堤内側のスペースに設置した上で、堤頂部にて止水壁造成を行う本工法機へセメントスラリーを供給している。

なお、施工は 2 シフトにて実施され、横行掘削原理を有する本工法機にとっては、効率の良い施工が実施されている。

また、当該地特有の落雷対策の一環として、重機足



図一 3 漏水対策工とした止水壁施工断面図



写真一 3 本工法施工状況 ①



写真一 4 本工法施工状況 ②

場用とした敷鉄板は使用せずに、ティンバーマットと称する厚さ 20 cm 程度の角材を連結させブロック状にしたものを使用している。

(3) 止水壁の品質管理

本工法による止水壁造成に先立ち、原位置土を採取の後、事前室内配合試験を行い、セメント、及びペントナイトの配合を決定の上で施工は実施されている。止水壁に求められる品質基準を表一 2 に示す。

品質基準を満たすことが出来ない止水壁エリアについては、再施工という厳しい工事仕様が定められており、常時のセメントスラリーの性状確認、テーブルフロー試験、及びウェットサンプリングによる一軸圧縮強度、透水係数の測定を行いながらの施工となる。

表一 2 TRD 止水壁 品質基準

項目	設計・管理基準	備考
一軸圧縮強度 (材令 28 日)	$q_u = 100 \text{ psi} \sim 500 \text{ psi}$ (ASTM D2166)	($\approx 0.69 \text{ MPa} \sim 3.45 \text{ MPa}$)
透水係数 (材令 28 日)	$k \leq 1 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ (ASTM D5084)	コアボーリング採取孔を利用した変水位透水試験
均質性	(諸定義有り)	コアボーリング採取孔に、360°記録が可能なダウンホールカメラを挿入し、止水壁内の混合攪拌性・均質性や、クラック有無等のビジュアルチェック (写真一5)
止水壁頭部出来型	—	部分的に止水壁頭部の両側面を開削した上で壁厚確認、及び出来型形状、壁品質についてビジュアルチェック (写真一6)
本工法管理基準	鉛直精度 1/250	本工法機に内蔵された傾斜計管理装置をもって管理



写真一5 ダウンホールカメラによる壁内ビジュアル検査



写真一7 コアボーリング採取状況



写真一6 止水壁頭部の出来型検査

HHD 現場では、一軸圧縮強度の品質基準において、上限値が定められている特異なケースとなったが、コアボーリングにより採取された全ての試料において、品質基準 ($q_u = 100 \text{ psi} \sim 500 \text{ psi} \approx 0.69 \text{ MPa} \sim 3.45 \text{ MPa}$) の範囲に収まる一軸圧縮強度を維持し、同時に透水係数 ($k \leq 1 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$) も併せて品質基準を満たし、本工法による漏水対策工とした止水壁の造成を完遂するに至っている。

TASK-A における採取されたコアボーリングの一例を写真一7に示す。また、コアボーリングにより採取された試料を基に測定された一軸圧縮強度 (ウェットサンプリングとコアボーリングの強度対比)、及び透水係数 (事前室内配合試験結果とコアボーリングの透水係数対比) の品質確認結果⁵⁾の一部を、図一4、及び図一5に示す。

6. おわりに

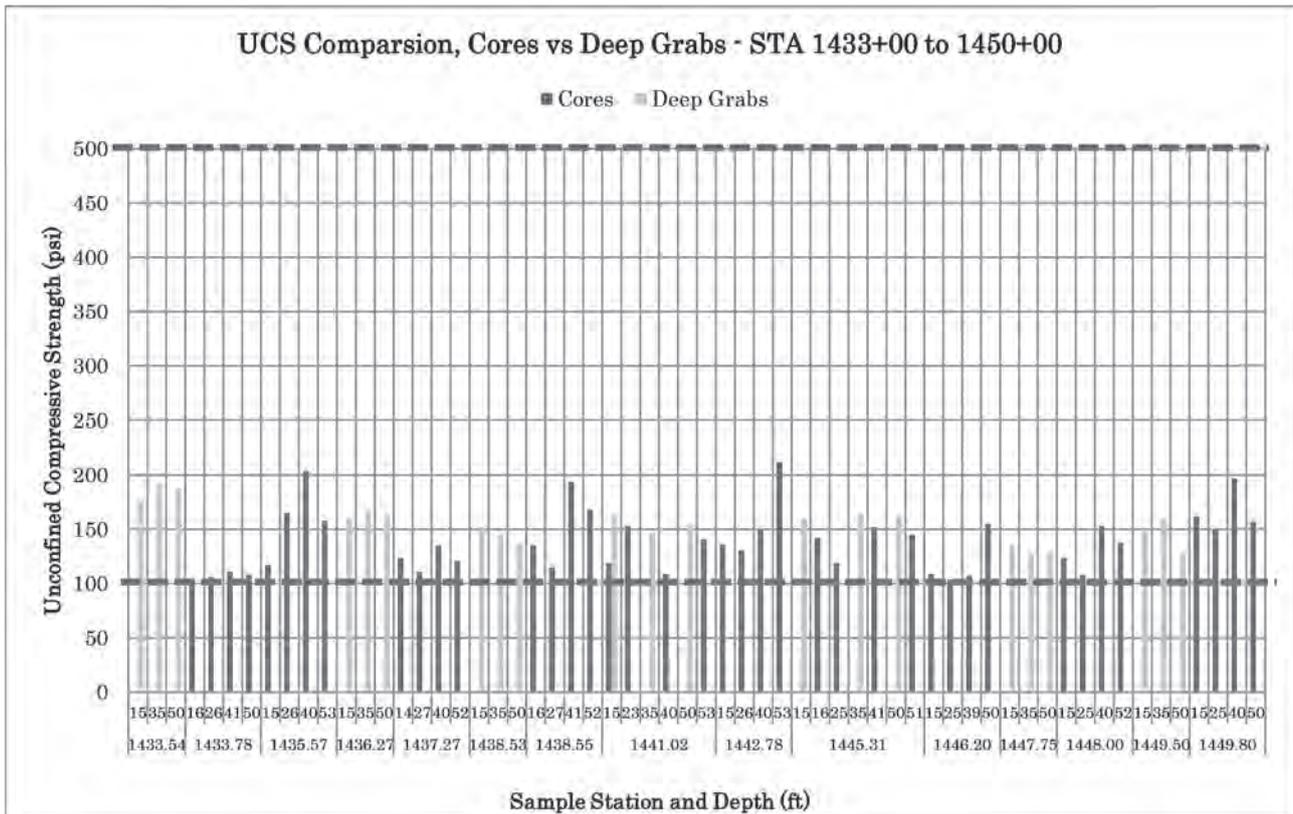
本稿では、米国における大規模な漏水対策工とした施工事例について紹介をさせて頂いた。

HHD の他工区でも、他工法による止水壁工事が堤頂部より実施されており、2008 年より始まった HHD の長期に亘る漏水対策事業は、約 15 年経過した 2023 年 1 月に完了するに至っている。

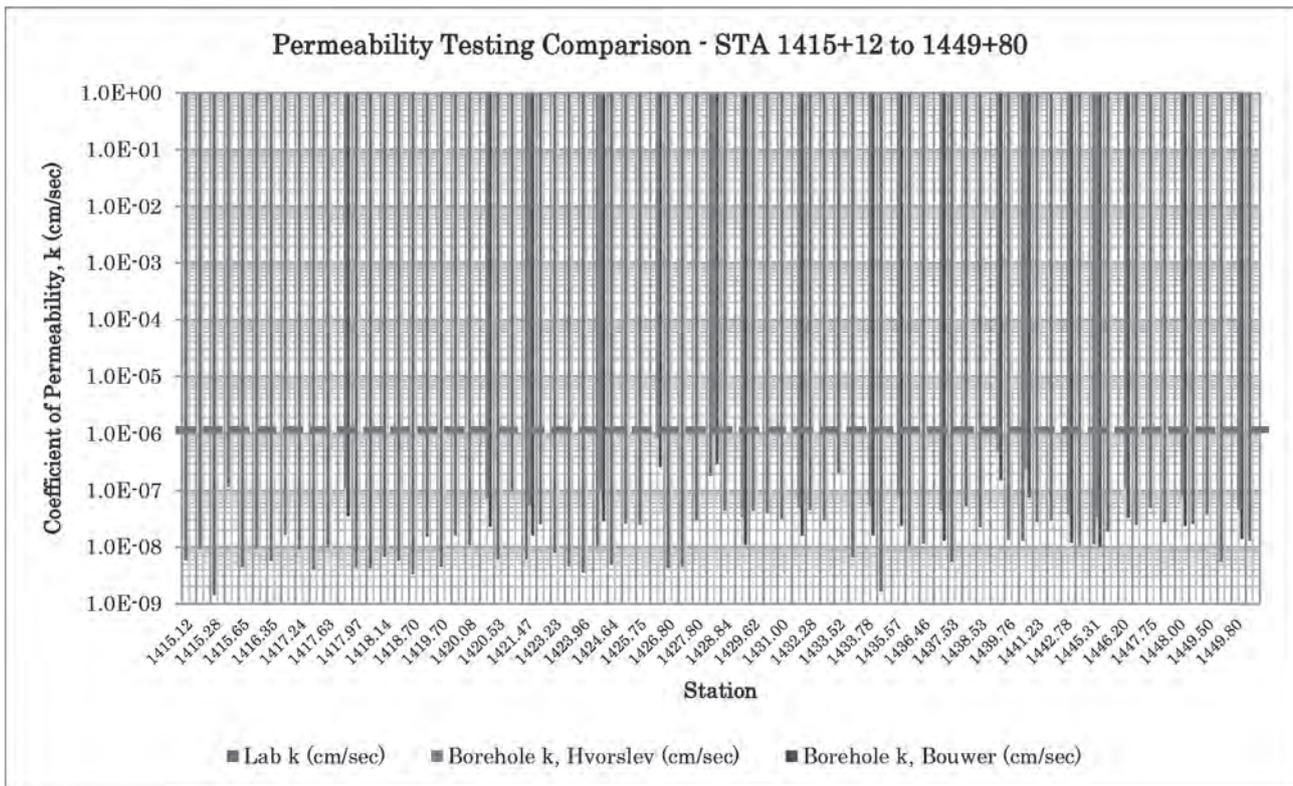
今日までの日本国内における本工法による堤防の漏水対策工は、全て堤防法尻部からの施工となり、堤頂上部からの施工実績は無い。米国での本工法の更なる普及と、日本国内での米国同様の適用機会が得られることを切に願う次第である。

謝 辞

TRD 工法技術の米国への普及において必要不可欠であった、工法特有の施工技術や現場管理等の総合的なエンジニアリングの提供を頂いた(株)テクノックス、並びに HHD 現場に従事頂いた東興ジオテック(株)、関係各位に対して、この場を借りて深く感謝の意を表します。



図一 4 TASK-A : 一軸圧縮強度試験結果 (材令 28 日)



図一 5 TASK-A : 透水係数試験結果 (材令 28 日)

《参考文献》

- 1) 黒木義富, 日置洋介: TRD工法の河川堤防と都市部雨水貯留対策での適用事例, 建設機械施工, pp.26-32, Vol.74, No.6, 2022年6月
- 2) E. Garbin, 日置洋介, 上周史, C. Lewis, : Evaluation of Trench Remixing Deep (TRD) Cutoff Wall Homogeneity Using Thermal Integrity Testing, International Symposium on Deep Mixing & Admixture Stabilization, OKINAWA 2009
- 3) US Army Corps of Engineers, Jacksonville District, "Herbert Hoover Dike."
<http://www.saj.usace.army.mil/HHD/>
- 4) Davis, J, "Herbert Hoover Dike." Presentation, 2008 ASCE Florida Section Conference, Orlando.
- 5) "HHD TASK-A Quality Data" , Keller North America Inc.



【筆者紹介】

勝倉 茂 (かつくら しげる)
株式会社KGフローテクノ
営業部 特機課
副部長

