

堤防 DM 補強工法

地震や津波にも十分耐える粘り強い堤防を目指して

徳永 幸彦

東日本大震災では大津波が海岸堤防を越流して、その水の流が多く多くの堤防を破壊した。震災後、種々の対策工法が提案されているが、堤防法面の破壊を許容しつつ天端高さを保つ工法が「堤防 DM 補強工法」(以下、本工法という)である。特に、堤体中央部に壁状や格子状の改良体を埋め込んだ堤防に対して遠心力場で振動を加えた実験ならびに津波越流を再現した実験では、堤防の法面は崩れるが、天端高さはほぼ保たれることが確認できた。本工法は、地震動に対しても津波越流に対してもともに有効であり、海岸堤防のみならず、同様の外力である地震や越流によって被害を受ける河川堤防にも適用可能な工法である。本稿では、その概要、設計、効果確認のための実験、施工に関する留意点、今後の展望などを紹介する。
キーワード：堤防、地震動、津波越流、液状化対策、CDM 工法、格子状改良

1. はじめに

1995年の阪神・淡路大震災では、直下型地震による液状化によって多くの河川堤防が破壊し(写真-1)、2011年の東日本大震災では、発生した大津波によって多くの海岸堤防が被災した(写真-2)。後者の被災した堤防の多くでは、津波が堤防を乗り越え、越流した水の流が裏法面や裏法尻を洗掘して崩壊に至っていた^{1)~4)}。また、津波が到達する前に、地震動によって原地盤などで液状化が発生し堤防が被害⁴⁾を受けることも十分に想定される。現在、津波に対処するため、法面の保護を強めたり、法尻を強くしたりする方法などが提案され、長時間の越流に対して堤防が崩壊しないように対策が進められている。

一方、軟弱な地盤上に構築された堤防は、津波に先行する地震動によっても変形・破壊し、特に液状化が発生すると津波が来襲する前に天端が大きく沈下することが想定され、地震と津波の複合災害に対処できる経済的で粘り強い構造形式の開発が望まれている。

揺れによる液状化や津波の複合災害に対応可能な粘り強い海岸堤防の具体策として、優れた靱性を有する鋼材料を活用した二重鋼矢板構造が着目され実施に至っている⁵⁾。天端高さを保つ材料として、鋼材の代わりに安価な固化処理土も候補として考えられる。

筆者を含む研究グループは、堤防中央部に液状化対策に多数の実績を有する深層混合処理工法による格子状の固化処理土壁⁶⁾を構築し、地震動や津波越流が

作用しても液状化を防止⁵⁾し、かつ天端高さを保てる本工法を開発した。なお、本稿の模型実験についての記述は、文献^{7), 8)}を抜粋したものである。



写真-1 地震による液状化で被災した堤防



写真-2 津波・越波で破壊した堤防

2. 本工法の概要

(1) 本工法とは

本工法は、**図-1**に示すように堤防内部の中心部に深層混合処理工法によって固化処理土壁を構築する工法である。

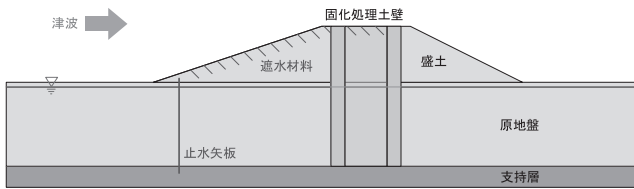


図-1 本工法の概念図

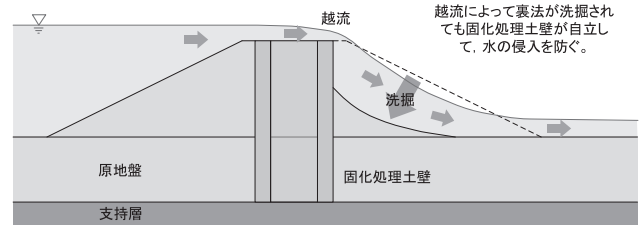
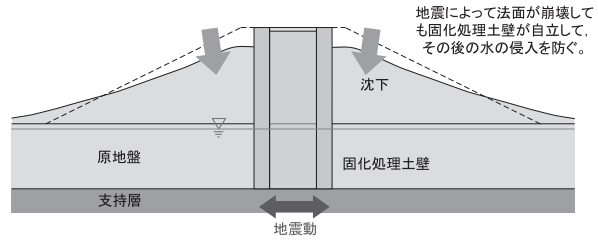


図-2 地震および津波来襲時の状況

図-2に示すように地震後においても天端高さを保持することで、津波の侵入を低減できる。法面が崩れたとしても固化処理土壁が自立するように設計することを念頭においているため、ある程度の幅のブロック状または格子状の改良形状とすることを基本とする。また、津波来襲時に固化処理土壁付近の間隙水圧が高まることを防げば有利な設計が可能となることから、堤防や格子内部の地盤内への水の浸入を防ぐ遮水構造を併用することも想定した工法である。

(2) 本工法の特徴

本工法の特徴を以下に示す。

①優れた経済性

堤体全体を構築するような大掛かりな施工は不要で、堤防の地盤を改良するために高価な施工材料も不要であるため、経済性に優れる。

②粘り強さ

法面が崩れても固化処理土壁が天端高さを保持して、性能を粘り強く発揮できる。

③固化処理土壁の施工信頼性

豊富な施工実績がある深層混合処理工法を利用するため、施工の信頼性が高い。

④堤防的な設計の実現

堤防内部の地盤への水の浸入を防ぐことで、より合理的な設計が可能である。

(3) 性能設計

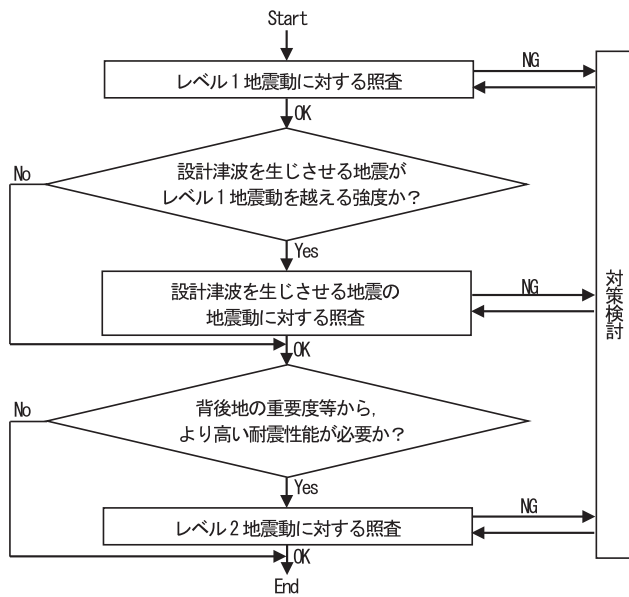
本工法は、**表-1**に示す設置目的、機能、作用、性能（目的達成性能、安全性能）を満足するためにレベル1およびレベル2地震動および津波来襲時の越流に対する設計を行う。耐震性性能照査は、堤防の機能および構造、堤体背後地の重要度、地盤高等を考慮し、

表-1 海岸堤防に関する設置目的、機能、作用、性能⁹⁾

項目	要求性能
設置目的	<ul style="list-style-type: none"> 海岸背後にある人命・資産を高潮、津波および波浪から防護する 陸域の浸食を防護する
機能	<ul style="list-style-type: none"> 高潮若しくは津波による海水の侵入を防止する機能 波浪による越波を減少させる機能 海水による浸食を防止する機能 (これらの機能に加え、堤防の損傷等を軽減する機能) <p>いずれか、または全ての機能</p>
作用	(海岸保全施設全般) 高潮、波浪、地震、津波等 ※水圧、土圧、風圧等も含まれる
目的達成性能	所定の機能が発揮されるよう適切な性能を有する [照査] 堤防の設置目的を達成するための性能は、原則として天端高、表法勾配、天端幅、裏法勾配等の組合せにより評価
安全性能	設計高潮位以下の潮位の海水、設計波、設計津波、設計の対象とする地震およびその他の作用に対して安全な構造とする [照査] 波力、地震力、土圧等の作用に対して安全な構造とするとともに透水をできるだけ抑制し得るものとする

表一 地震動ごとに満たすべき耐震性能⁹⁾

地震動	耐震性能
レベル1地震動 (堤防の供用期間中に1~2度発生する確率を有する地震動)	所要の構造の安全を確保し、かつ、海岸保全施設の機能を損なわない
設計津波を生じさせる地震の地震動	設計津波を生じさせる地震がレベル1地震動を超える強度の場合においても、これに対して生じる被害が軽微であり、かつ、地震後に来襲する津波に対して所要の構造の安全を確保するとともに海岸保全施設の機能を損なわない
レベル2地震動 (現在から将来にわたって当該地点で考えられる最大級の強さを持つ地震動)	生じる被害が軽微であり、かつ、地震後の速やかな機能の回復が可能(より高い耐震性能が必要と判断されるもののみ)



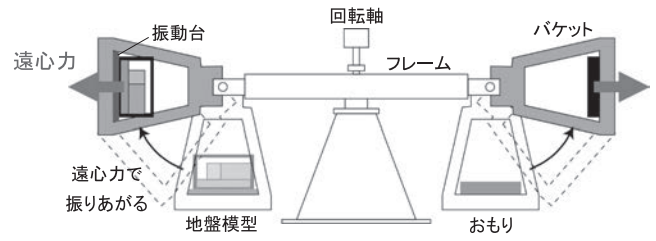
図一 3 耐震性能照査のフロー⁹⁾

当該堤防が所要の耐震性能を満足することを適切に照査する。表一 2 に地震動ごとに満たすべき耐震性能を、図一 3 に耐震性能照査のフローを示す。

また、越流に対しても天端高さを保てる粘り強い工法であることを目標として、非越流時と越流時の両方において所要の耐津波性能を満足することを照査する。

3. 本工法の性能確認

本工法の性能を確認するために遠心模型実験装置を用いた動的振動実験と津波・越流実験を実施した。遠心模型実験装置は、模型地盤に遠心力を加えて応力や水圧を高めることで実構造物と同じ応力状態を作りだし、実際の地盤の変形や破壊挙動を再現することができる¹⁰⁾。この実験手法は地盤の挙動を調べることに多く利用されており、地盤挙動の相似則はほぼ確立している。図一 4 に遠心模型実験装置の概念図を示す。



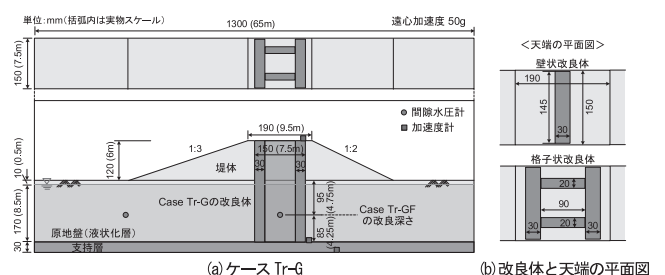
図一 4 遠心模型実験装置の概念図

(1) 動的振動実験⁷⁾

図一 5 に模型地盤の概略断面図と堤体天端の平面図を、表一 3 に実験ケースを示す。実験に用いた地盤材料は飯豊硅砂 7 号(平均粒径 0.18 mm)であり、原地盤と堤体は相対密度が約 50%で水中下では液状化する条件とした。

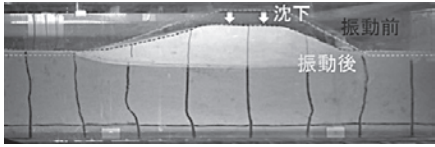
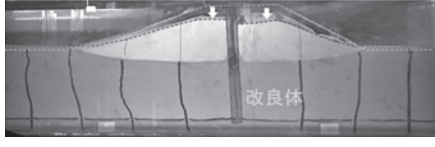
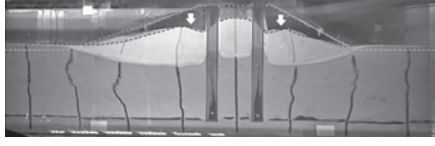
作製した地盤模型を遠心模型実験装置に搭載し、遠心力場にて振動実験を行った。遠心加速度を 50g まで増加して、地盤模型に振動を加えた。振動の入力信号は 50 Hz (実物換算で 1 Hz) の正弦波 50 波である。ケース UN で計測した試料容器底面での加速度を実物スケールに換算して図一 6 に示す。約 280 cm/s² の大きな加速度となっており、地盤が液状化する振動条件となっていた。

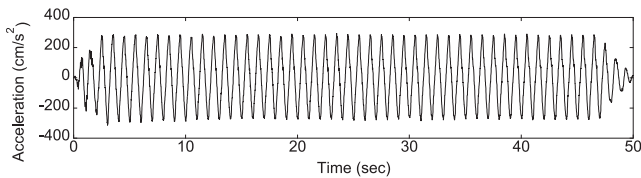
振動による各実験ケースの堤防の変形状況について、振動直後に撮影した模型の様子と考察を表一 3 に示す。



図一 5 実験模型の概略図

表一 各実験ケースにおける振動後の堤防の変形状況と考察

実験ケース名	改良深さ	改良体材料	振動直後の堤防の変形状況	考察
UN (無改良)	-	-		原地盤は左右に広がって側方流動が生じ、堤体は大きく沈下するとともに左右に広がった。
Ac-B (壁式改良)	着底	アクリル		改良体脇の法面が崩れていたが、改良体自体は大きな変形や破壊を免れた。
Tr-G (格子式改良)	着底	固化処理土 ($q_u \approx 1,500 \text{ kN/m}^2$)		改良体脇の法面が崩れていたが、改良体自体は大きな変形や破壊を免れた。



図一六 模型に入力した加速度

(2) 津波・越流実験⁸⁾

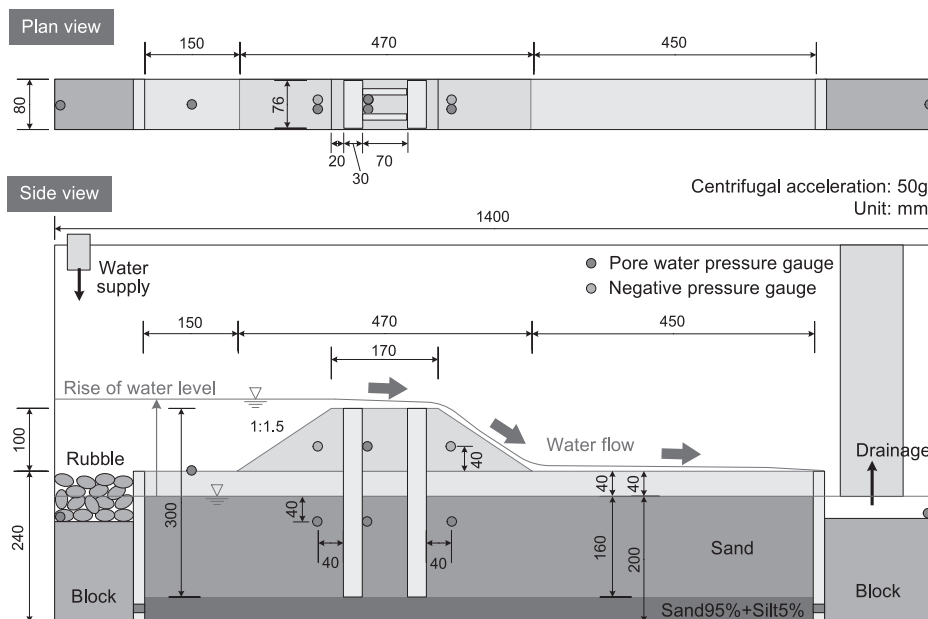
図一七に示す模型に対して遠心力場で越流を発生させ、補強した堤防の越流時の挙動について調べた。実験ケースと越流直後と越流継続後の堤防の状況をまとめて表一四に示す。改良形式としては壁式と格子式とし、脆性破壊しにくいアルミ、固化処理土を材料とした。

堤防模型に遠心加速度 50 g を負荷した状態で、試

料容器上部に設置した給水タンクから試料容器端部に水を流し越流を発生させ、遠心力場においては堤防模型が瞬時に破壊するため、その破壊挙動を遠心力場でも作動する耐 G カメラで撮影した。

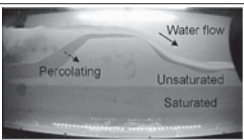


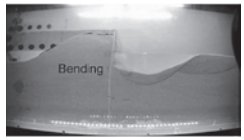
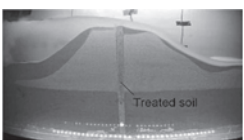
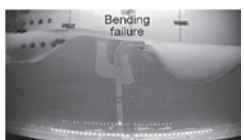
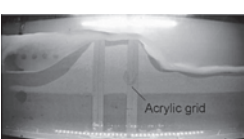
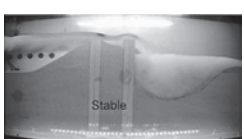
無対策の堤防では裏法面とその法先が洗掘し、最終的には堤体全体が洗掘によって喪失した。一方、堤体に改良体を埋め込むことで、裏法面の洗掘は改良体で止まり、裏法面は洗掘されるが表法面の崩壊は免れた。

これらの結果より、堤体中央部に壁状や格子状の改良体を埋め込むことで、改良天端高さを維持できて、津波の陸域への侵入を大幅に低減できることが確認された。ただし、改良体が壁状である場合、壁が屈曲する可能性があるため、慎重に構造設計を行う必要がある。



図一七 模型の概略図

表一 実験ケースおよび越流直後と越流継続後の堤防の状況

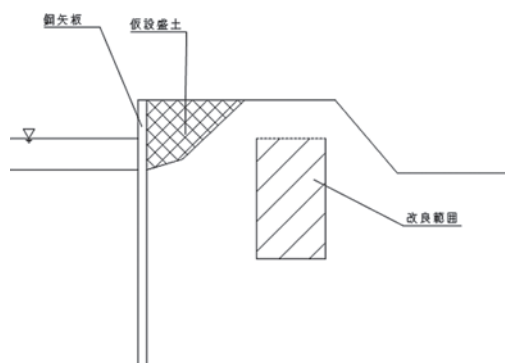
実験ケース名	材 料	厚 さ	越流直後の画像	越流継続後の画像	考 察
UN (無改良)	-	-			越流した水の流れが強く当たる裏法先での洗掘は激しく、最終的には堤体全体が洗掘によって喪失。
Al-B (壁式) 鋼矢板を想定	アルミ U形鋼矢板 II型程度の 曲げ剛性	3 mm 実物スケール 換算で0.15 m			裏法面が喪失した後は、表法面から作用する大きな土圧に抵抗するために矢板が屈曲している。矢板の曲げ強度が小さい場合には、完全な崩壊に至っていた可能性がある。
Tr-B1 (壁式)	固化処理土 $q_u=477$ kPa 現場での強度よりも小さい	10 mm 実物スケール 換算で0.5 m と薄い。			越流が発生して裏法面が洗掘し、表法面からの土圧に耐えられず固化処理土壁において曲げ破壊が発生したため、堤防の天端で洗掘が進み、最終的には堤体が洗掘によって喪失。
Ac-G (格子式)	アクリル	30 mm 実物スケール 換算で1.5 m			越流が生じて裏法面が洗掘するが、裏法面の洗掘は格子式の改良体で止まり、天端もほとんど洗掘せず。改良体を格子式としたため、裏法面が洗掘した後も変位がほぼ生じず、安定性が高い。

4. 施工に関する留意点

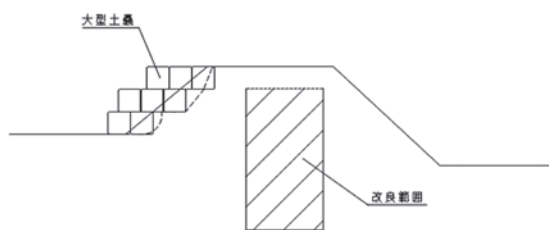
本工法に適用される深層混合処理杭の貫入長は、根入れ深さも考慮して 25 m 以下を標準とする。貫入長が短いことは施工機械の取扱いとしては有利になるが、対象地盤が一般的に砂質地盤であることを留意すると、処理機およびベースマシンの容量は通常の深層混合処理工法に適用するものより大きめに選択することが望ましい。また、堤防天端からの改良となるため、現場条件によっては施工範囲が限られるので、処理機およびベースマシンの大きさやタイプ（二軸、単軸）や組合せを適切に選定する。また、法肩に近い箇所の改良においては、処理機およびベースマシンの安定性および作業スペースが必要なため、一時的な堤防の拡幅等も考慮することが望ましい。堤防に CDM 工法を活用する場合には、堤防の天端が狭い状況が多いので、以下にその対策について示す。

(1) 堤防天端が狭い場合の対策

通常の施工とは異なり堤防天端幅が狭いために、2 軸施工の可能な小型施工機、または単軸施工機械を使用する必要があることは言うまでもないが、仮想的に天端幅を広げて施工することも考えられる。図一 8 および図一 9 にその方法を示す。



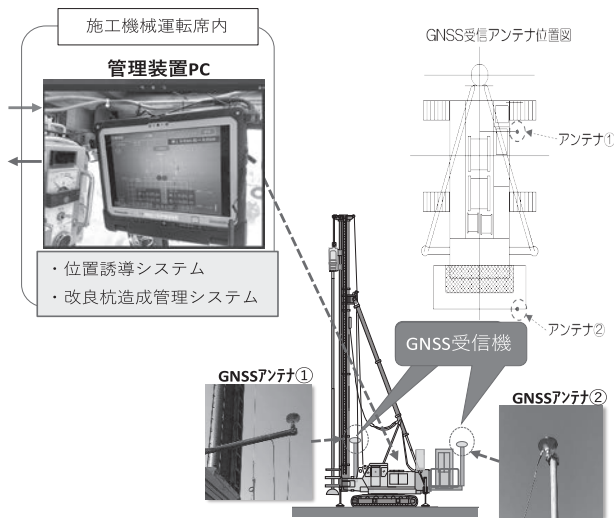
図一 8 前面側に矢板を打設して仮設盛土を設置する方法



図一 9 堤防裏面に土のうを設置する方法

(2) CIM 施工について

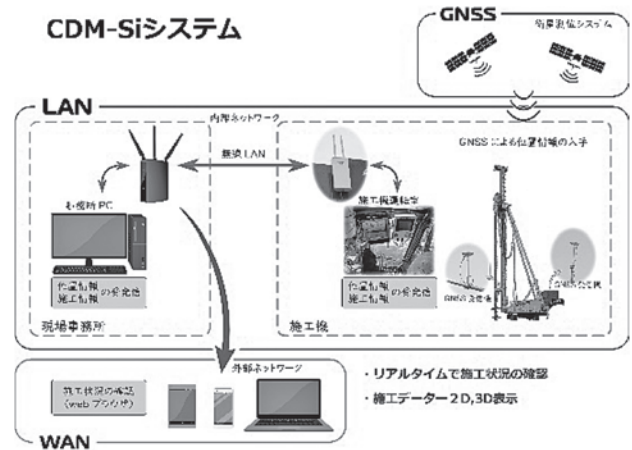
堤防天端という狭隘な場所での施工となるため、従来の誘導員による施工機の誘導は危険であることは否めない。近年、GNSS（全世界測位システム）による測位情報精度が向上し、ICT 技術を利用したシステム（例えば、CDM-Navigate）により、施工機の施工



図一10 CDM 施工機誘導システム (CDM-Navigate)

位置への移動がスムーズになった。図一10に示すように、重機オペレーターが画面に表示される指示に従うことでNavi感覚で正確な位置に移動することができる。誘導人員を不要とすることで接触災害の低減や、事前の設計施工位置のマーキングを残置することが困難な状況での誘導が期待できる。

また、深層混合処理工法で造成した改良体の施工データ（深度、スラリー量、電流値等）を2次元および3次元で可視化することで、あらかじめ記憶させた地盤改良設計データに基づき改良体の施工管理および判定を行うことができる。このシステム（CDM 施工



図一11 CDM 施工情報管理システム (CDM-Si)

情報管理システム：CDM-Si)により、施工状況および施工結果を複数人が外部タブレット端末で確認することで、施工時の人的ミスの削減が期待できる（図一11）。

5. 今後の展望

令和元年（2019年）10月の台風19号において全国142箇所もの堤防が決壊し、各地で甚大な被害が発生したことを受け、河川堤防の強化、とりわけ越水に対する堤防強化対策を中心に技術的な検討が進められている¹¹⁾。また、地震、津波、越流など有事の際に機能を発揮することはもとより、長期的にも堤防として

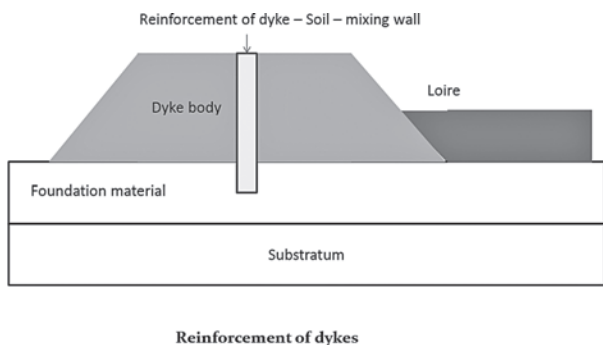
表一5 堤防補強で考慮すべき事項と堤防DM補強工法の評価

評価項目 (堤防補強で考慮すべき事項)	堤防DM補強工法の評価
環境及び景観との調和	・外観は堤防と同様、土で被覆することにより植生が繁茂することで、自然環境および景観との調和を図ることができる。
構造物の耐久性	・地盤改良体は土中にあるので、劣化は生じにくい。 ・表層部からの被りが浅い場合には被覆等、留意が必要となる。
維持管理の容易性	・地盤改良体は土中にあるので、維持管理に留意する必要性はほとんどない。 ・表層部からの被りが浅い場合には被覆等、留意が必要となる。 ・堤防と同様に表層に陥没や沈下等の形で表れやすく、目視等で発見しやすく維持管理が容易である。
施工性	・地盤改良体は、低騒音、低振動の深層混合処理工法により施工可能なため、施工しやすい。 ・大型の施工機械では足場に留意が必要。
事業実施による地域への影響	・材料の搬入に関して、地域への影響を考える必要がある。 ・変位低減型深層混合処理工法を用いることで、施工中の周辺の地盤や施設にほとんど影響を与えない。 ・地下水の水質への影響はないが、流動阻害については検討を要する。
経済性	・地盤改良体は格子状改良でも改良率が高くなく、比較的安価な施工が可能。 ・腐食対策が不要で、二重鋼矢板に比べて相対的に安価である。
公衆の利用	・堤防と同様に考えれば、緩傾斜化等によって、ふれあいおよび交流の場としての公衆の利用が可能である。

求められる基本性能を維持できる補強工法であることが求められている。表一5に堤防補強で考慮すべき事項と本工法の評価を示す。

同表に示す通り、本工法は、劣化しにくく、景観を損ねず、維持管理が容易などの堤防本来のメリットを損なわずに補強ができる工法とも言え、今後の海岸堤防や河川堤防での適用が大いに期待される。国内での実績は現時点ではないが、海外では遮水のための施工ではあるが、図一12に示すように河川堤防の堤体内部に固化処理土壁を適用した事例がある。

施工面では、深層混合処理施工機の硬質地盤対応、変位低減型、大口径化、高性能小型化など現場ニーズに応じた改善・改良がなされる一方で、今後はBIM/CIMを活用した3次元モデルでの情報共有化による地盤改良工事の効率化・高度化、さらにはAI技術の導入による自動化が進んでいくものと思われる。



図一12 堤体内部に鉛直の固化処理土壁を造成した事例(セメント協会編:文献¹²⁾より転載)

6. おわりに

大きな地震動や津波越流に対して、たとえ法面が崩れても固化処理土壁が天端高さを保持して、性能を粘り強く発揮できる「堤防DM補強工法」は、国土交通省港湾局の委託を受けて国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所が検討したものであり、海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所とCDM研究会理事会(五洋建設株、清水建設、竹中土木、東亜建設工業株、東洋建設株、不動テトラ)による「深層混合処理工法の有効活用技術に関する共同研究」の一環として発展させた

工法である。海岸堤防のみならず同様の外力である地震や越流によって被害を受ける河川堤防にも適用可能な工法であり、越水に対しても決壊しないことを保証できる補強技術としても有効であると考えられる。今後は、さらに有効な施工機械の開発、長期的な機能の維持、損傷した場合の復旧等についても検討し、適用の拡大を図っていきたい。

JICMA

《参考文献》

- 1) Kato, F., Noguchi, K., Suwa, Y., Kimura, A., Kawai, M., Takagi, T., and Omata, M.: Field survey on coastal dike damage and scouring in the southern part of the Sendai plain induced by the great east japan earthquake tsunami, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering), Vol.68, Issue 2, pp. L1396-L1400. (in Japanese), 2012.
- 2) Mikami, T., Shibayama, T., Esteban, M. and Matsumaru, R.: Field survey of the 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami in Miyagi and Fukushima Prefectures, Coastal Engineering Journal, Vol.54, No.1, 1250011, 2012.
- 3) Ogasawara, T., Matsubayashi, Y., Sakai, S. and Yasuda, T.: Characteristics of the 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami and its impact on the northern Iwate Coast, Coastal Engineering Journal, Vol.54, No.1, 1250003, 2012.
- 4) Tokida, K. and Tanimoto, R.: Lessons for countermeasures using earth structures against tsunami obtained in the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Soils and Foundations, Vol. 54, Issue 4, pp. 523-543, 2014.
- 5) 古市ら:地震・津波の複合災害に耐える鋼矢板堤防補強法に関する研究, 地盤工学ジャーナル, Vol.10, No.4, pp.583-594, 2015.
- 6) 鈴木吉夫, 齊藤聰, 鬼丸貞友, 木村玄, 内田明彦, 奥村良介: 深層混合処理工法を用いた格子状地盤改良による液状化対策工, 土と基礎, Vol.44, No.3, pp. 46-48, 1995.
- 7) 高橋英紀: 深層混合処理工法で補強した堤防の地震時振動特性, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol.76, No.2, pp. I_426-1431, 2020.
- 8) 高橋英紀: 深層混合処理工法で補強した海岸堤防の越流実験, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol.77, No.2, pp.I_859-I_864, 2021.
- 9) 全国農地海岸保全協会, 全国漁港漁場協会, 全国海岸協会, 日本港湾協会: 海岸保全施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 2018.
- 10) Takahashi, H., Fujii, N., Morikawa, Y., and Takano, D.: Development of Hyogo-Geotechnical Centrifuge PARI Mark II-R, Technical Note of the Port and Airport Research Institute, No.1353, pp27, 2019.
- 11) 国土交通省ホームページ: http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/gijutsu_kentoukai/index.html
- 12) セメント協会: 防災・減災, 国土強靱化に資するセメント系固化材による地盤改良, pp.107, 2021.

【筆者紹介】

徳永 幸彦 (とくなが さちひこ)
CDM研究会
事務局
事務局長

