

技術論文

越水に対する粘り強い河川堤防を実現する鋼矢板構造

Double Steel Sheet Pile Walls Having Resiliency Capacity for River Dikes against Long Time Overflow

持田 祐輔*
Yusuke MOCHIDA

妙中 真治
Shinji TAENAKA

亀山 彰久
Akihisa KAMEYAMA

森安 俊介
Shunsuke MORIYASU

山崎 弘芳
Hiroyoshi YAMAZAKI

髙山 嵩
Takashi MOMIYAMA

荒木 優介
Yusuke ARAKI

乙志 和孝
Kazutaka OTSUSHI

抄 録

頻発する洪水被害を受けて“粘り強い河川堤防”が求められるなか、日本製鉄(株)は鋼矢板二重壁の適用を目指した研究開発を進めている。本構造はすでに係船岸や海岸堤防として使用実績があり、高い耐浸透性や耐震性を有することが知られている。河川堤防での適用には、こうした性能に加えて、長時間の越水に対する性能が要求される。そこで1/15スケールの越水模型実験にて検証した結果、洗掘を受けながらも天端高さを保持する粘り強さを実証した。本構造の河川分野での実用化に向けて、設計法や点検・維持管理手法の整備を進めていく。

Abstract

Since flood damages are experienced frequently in Japan, “resiliency” of river dikes is required. Nippon Steel Corporation advances the research and development of double steel sheet pile walls (SPWs) to innovate and improve the resiliency of river dikes. SPWs can be applied as quay walls, coastal dikes and temporary cofferdams etc., because of their high lateral resistance against earthquakes, and their excellent seepage cutoff capability. To be adopted as a reinforcement method against the flooding of river dikes, SPWs are required to verify their resiliency capacity against long time overflow. A hydraulic laboratory experiment of a 1/15 embankment model with SPWs was conducted. The top level of the sheet pile was maintained against an overflow (30 cm overflow depth and 12 hours in proto scale) with scour. In the future, the design method, survey and maintenance method for SPWs having resiliency capacity against long time overflow will be prepared.

1. はじめに

近年、豪雨の激甚化は顕著であり、2015年関東・東北豪雨、2017年九州北部豪雨、2018年西日本豪雨など、日本各地に多大な洪水被害が生じている。2019年台風19号においては、東日本を中心に広域的かつ同時多発的に河川の氾濫が起り、142箇所もの河川堤防の決壊が生じた¹⁾。

このような水災害の頻発化・激甚化を背景に、国は“粘り強い河川堤防”について技術検討を行っている。ダム・遊水地等洪水調節施設の整備によって洪水時の河川水位を少しでも下げること大原則としたうえで、堤防強化策として越水した場合であっても決壊しにくく、堤防が決壊するまでの時間を少しでも長くするなどの減災効果を発揮する“粘り強い河川堤防”を掲げている²⁾。

こうした被害の激甚化や国の方針を踏まえ、日本製鉄(株)は“鋼矢板二重壁”の粘り強い河川堤防への展開を目指している(図1)。すでに仮締切構造、海岸・ため池堤防向けに本構造の技術開発はなされており、それらの知見を活用しつつ、粘り強い河川堤防として要求される性能を具備していく方針である。一方、地震が頻発していることや、東日本大震災では地震後に津波が河川を遡上する事象も生じていることから、地震に対して機能することも重要である。また、河川堤防の多くは土で造られ、洪水被害等を経て嵩上げ・拡幅を重ねており、土質区分や強度分布が複雑であることや、不同沈下を生じ得ること、長期的な維持管理がなされること、流域の生活や自然環境と密接に関係し、景観上の大切な役割を果たしていること等、洪水・地震対策以外にも留意すべき点がある³⁾。こうした河川堤防の様々

* 鉄鋼研究所 鋼構造研究部 鋼構造研究第一室 研究第三課 主任研究員 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

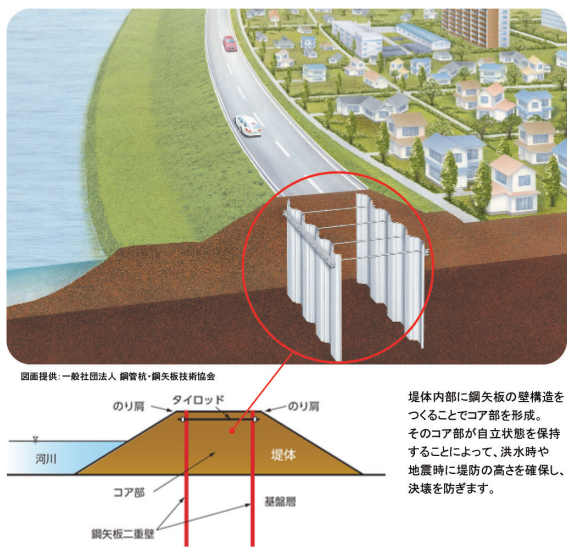


図1 河川堤防における鋼矢板二重壁
Double steel sheet pile wall for river dikes

堤体内部に鋼矢板の壁構造をつくることでコア部を形成。そのコア部が自立状態を保持することによって、洪水時や地震時に堤防の高さを確保し、決壊を防ぎます。

な側面も踏まえて、越水に対して粘り強い性能の具現化を中心に、経済性に優れた“ハット形鋼矢板”と高度な“鋼構造技術”を組み合わせた総合的な提案を行うべく、技術開発に取り組んでいる。

2. 鋼矢板二重壁に関するこれまでの技術開発

鋼矢板二重壁とは、2列の鋼矢板（鋼管矢板を含む）を壁状に打設して頭部をタイ材で結合し、鋼矢板壁間に地盤材料などの中詰め材を施す（以下、コア部）ものである。表1に、本構造の適用分野や設計マニュアルの整備状況を示す。本構造の基本的な構造や設計法は、鋼矢板二重式仮締切構造²⁾として構築された。仮締切構造は堤防決壊時に緊急備蓄用の鋼矢板によって応急的に施工され、本設の堤防が修復されるまでの間、仮設構造物として用いる^{7,8)}。仮締切構造の堤防高さは既設堤防以上とし、越水は生じない範囲の計画高水位時に対して構造安定性を有すること、平水位状態で、地震時に安定性を保持することが要求され

る。これらの性能は浸透流解析や静的あるいは動的遠心模型実験によって検証され、設計手法が構築された⁹⁾。

本構造で強化された堤防の耐震性能は、海岸堤防や河川堤防を対象に検証されている¹⁰⁾(図2)¹¹⁾。振動台模型実験を中心に、液状化を伴う地震によって堤体側面が崩れる状況においても、2列の鋼矢板壁およびタイ材がコア部の変形を抑制し、支持地盤に打設された鋼矢板壁によって天端高さが維持されることを明らかにしている。この耐震機構は液状化を考慮可能な有限要素解析で再現され、レベル2地震動に対する耐震設計手法を確立している。最近では、ため池堤防に本構造を展開し、貯水の堤体内浸透による堤体液状化に対しても有効であることが示されている⁶⁾。

水害に対する性能検証にも取り組まれており、東日本大震災の津波被害を受けて、三戸部¹²⁾は本構造で補強された海岸堤防について、津波の越流を想定した水理模型実験を実施し、裏のり面が洗掘を受ける状況において天端高さを保持し粘り強く耐えることを示している。また、東日本大震災の発生当時、岩手県内で仮締切用途として供用されていた鋼矢板二重壁は、天端高さをはるかに超える想定高さ9mの津波を直交方向に受けたにも関わらず、倒壊せずに残存していたことが報告されている¹³⁾。海岸堤防としての施工事例を写真1¹⁴⁾に示す。

上述の一連の技術開発によって、本構造の特長として以下の点が、実証的に示されている。

- 洪水時には地盤に根入れした鋼矢板壁によってボーリングを抑制するほか、越水が生じても天端高さを保持し越水量を限定できる。
- 地震時には、タイ材で結合した2列の鋼矢板の拘束効果によってコア部の変形を抑制し、液状化被害を軽減することができる。
- 地震直後に津波が襲来する複合災害に対して、鋼矢板の下端を強固な地盤に打設しておくことで地震時の天端高さを保持し、以後の津波に対して越水を限定することができる。

表1 各種堤防分野における鋼矢板二重壁の整備状況
Double steel sheet pile walls employed on the various types of dikes

	Temporary cofferdam using double steel sheet pile wall 鋼矢板二重式仮締切	Coastal dike 海岸堤防	Small earth dam ため池堤防	River dike 河川堤防
Design manual	○ ²⁾	○ ³⁾	○ ⁴⁾	○ ⁵⁾
Earthquake protection	○	○	○	○
Water damage protection	Estimated high-water level (without overflow)	Tsunami protection	Against heavy rain (under development) ⁶⁾	Against heavy rain with overflow (under development)

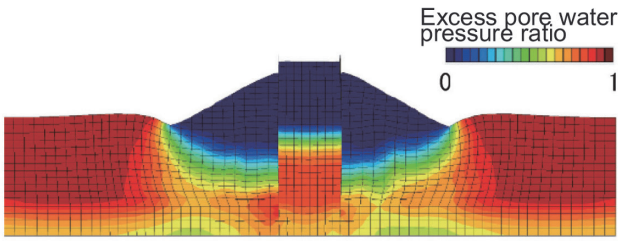


図2 地震応答解析による鋼矢板二重壁の堤防補強効果検証¹¹⁾
Verification of reinforcement effect for river dikes with double steel sheet pile wall using seismic analysis¹¹⁾

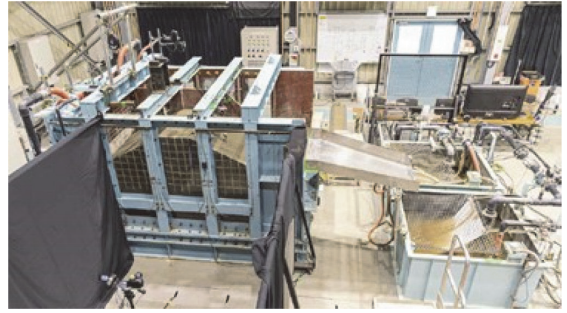


写真2 循環式給排水装置を有する土槽実験装置
Hydraulic laboratory equipment with earth tank



(a) Double steel sheet pile walls constructed using Press-in Method



(b) Double steel sheet pile walls connected by tie rods

写真1 鋼矢板二重壁の施工事例¹⁴⁾
(a) 圧入施工 (b) タイ材施工

Construction example of double steel sheet pile wall¹⁴⁾

3. 模型実験による越水に対する粘り強さの実証

鋼矢板二重壁で強化した河川堤防については、2021年度の国土交通省公募研究“越水に対する河川堤防の強化構造の検討に資する評価技術の開発”¹⁵⁾において、一部自立型として採択を得て、日本製鉄は東京工業大学・京都大学とともに研究開発を進めている。前述の津波を受ける海岸堤防と異なるのは継続時間であり、例えば三戸部ら¹²⁾の実験では実大換算の津波継続時間10分(越流水深2~5m)を想定したのに対して、河川堤防では越水時間3時間(越流水深30cm)が指標とされている¹⁶⁾。

日本製鉄はREセンター(千葉県富津市)に継続時間の

表2 越水模型実験：各ケースの鋼矢板諸元
Sheet pile specification employed in the experiment cases

Case	Sheet pile length L (mm)	Embedded depth from ground level EL (mm)	Sheet pile thickness t (mm)
EL 1000	1400	1000	6.0
EL 500	900	500	
EL 300	700	300	
EL 100	500	100	

長い越水が可能な循環式の給排水実験装置を新規導入した(写真2)。この装置を活用し、堤高400mm・天端幅400mm(想定実大堤高6m・天端幅6mの幾何縮尺1/15スケール)の堤防を鋼矢板二重壁(実大剛性ハット型鋼矢板25H相当)で補強した条件で越水模型実験を実施した。ここでは、鋼矢板の根入れ長さをパラメータにしたCaseを紹介する(表2)。根入れ長さEL1000mmは十分に長く、EL500mmは既往知見⁹⁾に基づく堤体高さ相当の水圧を受ける際の標準的な根入れ長さ、EL300mmとEL100mmはそれより短い設定である。

越流水深は前述の指標に沿って、20mm(実大越流水深30cm)とした。実験方法の詳細は持田ら¹⁷⁾を参照されたい。

実験の結果、いずれのCaseも越水によって川裏側のり面が完全に侵食され、洗掘が地表面以深の基盤層で進行した後、洗掘深さ100mm程度で収束し定常状態に至った。越水50分後(実スケール3時間相当)の堤防側面の様子を写真3に示す。EL1000, EL500では鋼矢板の傾斜は生じていないのに対して、EL300ではやや傾き、EL100では大きく傾斜している。

各Caseの曲げモーメント分布を図3に示す。ここで、深度と曲げモーメントは実スケール換算値で表している。EL1000, EL500では、川裏側の鋼矢板の地表面より上方に正の曲げモーメント(コアから川裏側に作用する主動土圧)が生じ、それに抵抗するように地表面より下方に負の曲げモーメント(川裏側の地表面以深からコア側に作用する受働土圧)が生じている。EL300では、川裏側の鋼矢板に負の曲げモーメントが生じていない一方、川表側のモーメントピークが大きいことから、タイ材を介して川表側の鋼矢板によ

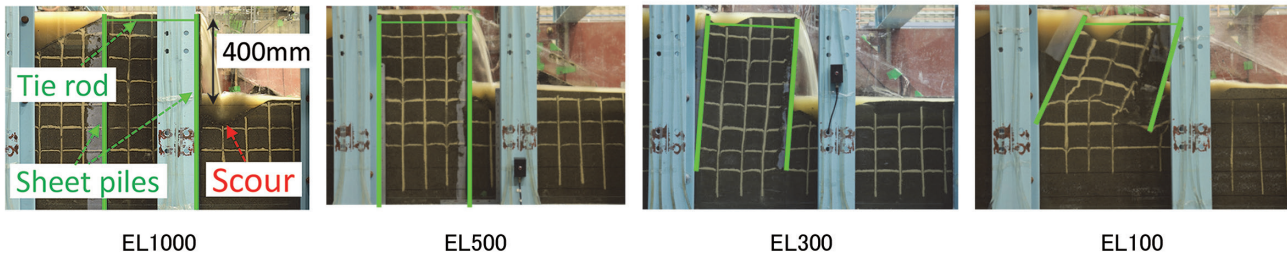
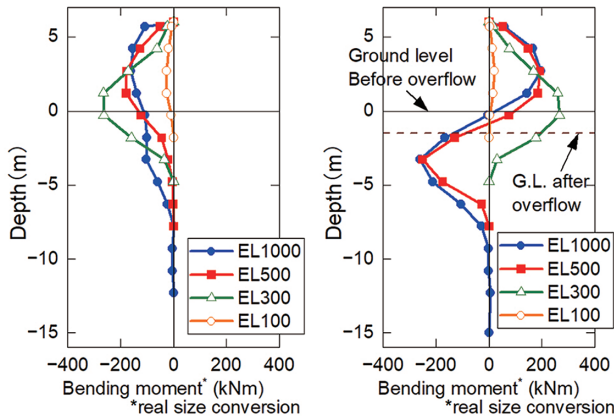


写真3 鋼矢板二重壁で補強された河川堤防の越水実験状況
Overflow laboratory experiment for river dike reinforced with double steel sheet pile wall



(a) Sheet pile on the water side (b) Sheet pile on the landside

図3 越水実験の終局状態における鋼矢板の曲げモーメント
(a) 川表側の鋼矢板 (b) 川裏側の鋼矢板

Bending moment of sheet piles in the final state of overflow

て川裏側の鋼矢板が支えられていると考えられる。EL100では、曲げモーメントが小さく、抵抗部材としてほとんど機能していないことが示唆される。

また、EL100では給水量を上回る越水流量が測定されており、天端高さが低下し河川水量が流出した状況である。それ以外のケースでは越水流量は給水量と等しく、初期の天端高さが維持されたことを意味する。以上より、鋼矢板二重壁で補強した堤防は、川裏側のり面の浸食や地表面以深の洗掘が生じて、根入れ長さを適切に設定することで天端高さを維持し、越水に対して粘り強く耐えることが示された。

4. おわりに

頻発する洪水被害に対応すべく、“粘り強い河川堤防”としての鋼矢板二重壁の研究開発に取り組んでおり、本稿では越水に対する本構造の性能を中心に紹介した。本構造の実用化に向けては、すでに確立している本構造の耐震性や施工性等を継承しつつ、新たに、越水および洗掘と本構造の抵抗機構の関係を踏まえた設計法の提案、河川堤防に求められる耐久性や維持管理の容易性等に対する整備を進め、我が国の防災・減災に貢献していく所存である。

謝辞

国土交通省の公募研究においては、東京工業大学 高橋章浩教授(研究代表者)および京都大学 藤澤和謙教授と連携し、多くの助言をいただいている。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省：令和元年台風第19号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会報告書. 2020
- 2) 財団法人国土技術研究センター：鋼矢板二重式仮締切設計マニュアル. 2002
- 3) 国立大学法人高知大学, (株)技研製作所, 新日鐵住金(株)：二重鋼矢板・鋼管杭堤防補強工法の耐震・耐津波設計の手引き. 初版. 2016
- 4) 国立大学法人高知大学, 日本製鉄(株), (株)エイト日本技術開発：鋼材によるため池堤体補強工法設計の手引き. 初版. 2021
- 5) 鋼管杭協会：鋼矢板芯壁堤 鋼矢板による河川堤防補強工法設計の手引き(案). 2002
- 6) 杉山 ほか：ため池堤体の耐震対策に貢献する鉄鋼材料を用いた補強技術. 日本製鉄技報. (420), 28-34 (2023)
- 7) 国土交通省, 入手先 <<https://www.hrr.mlit.go.jp/press/2019/10/191028press2.pdf>> (参照 2022.08.12)
- 8) 鹿島建設(株)ホームページ：千曲川堤防緊急復旧工事—災害対応と鹿島 <https://www.kajima.co.jp/news/digest/feb_2020/feature/> (参照 2022.08.12)
- 9) 鋼管杭協会：鋼矢板芯壁堤 鋼矢板による河川堤防補強工法技術資料. 2002
- 10) 乙志和孝 ほか：鋼矢板を用いた堤防の補強に関する実験的研究. 地盤工学ジャーナル. 6 (1), 1-14 (2011)
- 11) 乙志和孝 ほか：巨大地震および津波遡上に対する海岸堤防・防潮堤のソリューション技術. 新日鐵住金技報. (403), 70-77 (2015)
- 12) 三戸部佑太, 乙志和孝, 黒澤辰昭, 田中仁 ほか：津波越流に対する鋼矢板壁構造の堤防補強効果に関する実験的検討. 土木学会論文集 B2 (海洋工学). 70 (2), 1976-1980 (2014)
- 13) 一般社団法人鋼管杭・鋼矢板技術協会：東日本大震災1次調査報告書. 2011
- 14) Ishihara, Y., Yasuoka, H., Shintaku, S.: Application of Press-in

Method to Coastal Levees in Kochi Coast as Countermeasures against Liquefaction. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA. 51 (1), (2020)

- 15) 国土交通省, 入手先 <https://www.mlit.go.jp/river/gijutsu/download/kasenryuiki_list.pdf> (参照 2021.12.3)
- 16) 国土交通省: 河川堤防の強化に関する技術検討会 資料2 越水に対して「粘り強い河川堤防」の検討について, 2022
- 17) 持田祐輔, 山崎弘芳, 妙中真治, 藤澤和謙, 高橋章浩: 越水による河川堤防の決壊に対する鋼矢板補強構造の抵抗機構に関する実験的研究, 第9回河川堤防技術シンポジウム論文集, 2021, p.89-92



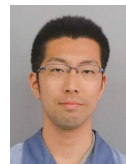
持田祐輔 Yusuke MOCHIDA
鉄鋼研究所 鋼構造研究部
鋼構造研究第一室 研究第三課 主任研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



山崎弘芳 Hiroyoshi YAMAZAKI
鉄鋼研究所 鋼構造研究部
鋼構造研究第一室 研究第三課



妙中真治 Shinji TAENAKA
厚板・建材事業部 建材開発技術部
土木建材技術室長 Ph.D.



初山 嵩 Takashi MOMIYAMA
鉄鋼研究所 鋼構造研究部
鋼構造研究第一室 研究第三課 主任研究員
Ph.D.



亀山彰久 Akihisa KAMEYAMA
厚板・建材事業部 建材開発技術部
土木建材技術室 土木技術第二課 部長代理
技術士(建設部門)



荒木優介 Yusuke ARAKI
厚板・建材事業部 建材開発技術部
土木建材技術室 土木技術第二課



森安俊介 Shunsuke MORIYASU
厚板・建材事業部 建材開発技術部
土木建材技術室 土木技術第二課 主幹
博士(工学)



乙志和孝 Kazutaka OTSUSHI
厚板・建材事業部 建材開発技術部
土木建材技術室 土木技術第二課長
博士(工学)