

河口導流堤の損耗・劣化メカニズム解明に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 28～令 2

担当チーム：寒冷沿岸域チーム

研究担当者：中嶋雄一、久保純一、木岡信治、大塚淳一

【要旨】

鋼矢板式導流堤の損耗・劣化メカニズムの解明を目的として、損耗・劣化の実態把握と矢板周辺の流況調査を行った。北海道の導流堤の約 64%が鋼矢板式導流堤であり、そのうち約 59%で著しい劣化が確認された。波が遡上・流下する領域ではコロージョン・エロージョンによって底面付近の矢板が著しく劣化する。河川流中では矢板凹部の両フランジ面が比較的速く劣化する。河川流中の矢板凹部では反時計回りの循環流が形成される。この循環流に駆動される砂礫が比較的肉厚の薄いフランジ面に繰り返し衝突するため、フランジ面で劣化が進むと推察される。波浪場では矢板周辺の水位が上昇する位相において、矢板凹部壁面に向かう比較的強い流れが生じる。キーワード：河口導流堤、鋼矢板、サンドエロージョン、コロージョン

1. はじめに

導流堤は河口位置の固定、みお筋の安定化、河口水深の維持、洪水時及び平時の水位の低下などを目的に設置する施設であり、その多くが鋼矢板やコンクリートブロックで建設されている。鋼矢板で建設された導流堤の中には、腐食対策が行われていたにもかかわらず、耐用年数よりも前に劣化が進行したものが多くあり、図 - 1 に示すように倒壊に至った事例も報告されている。

海域に設置された鋼構造物では、飛沫帯や平均干潮面の直下部分などの水面付近において、コロージョンと呼ばれる電気化学的腐食が進行する。例えば、飛沫帯では腐食の化学反応に必要な水分と酸素が十分に供給されるとともに、反応を促進する塩分も存在するため、とくに激しく腐食が生じる。また、平均干潮面の直下部分では、海水面の上下で腐食反応に要する酸素の供給状態が異なることにより腐食が生じる²⁾。一方、比較的浅い海域に設置される導流堤では、波や流れの作用によって砂礫が繰り返し矢板に接触することにより損耗が進む。砂礫の接触に伴う鋼材の損耗はサンドエロージョンと呼ばれ、導流堤ではおもに砂礫の移動量が多い底面付近で見られることが多い。

陸上から沖へ向かって建設される導流堤において、著しい劣化が確認されるのは波の遡上域を含む水深が極浅い区間である。この区間では、水面と底面の位置が近く、波の遡上・流下により砂礫が活発に移動するため、コロージョンとサンドエロージョンの影響をともに受ける。コロージョンまたはエロージョンがそれ



図 - 1 倒壊した導流堤の様子

ぞれ単独で生じる場合の損耗・劣化対策として、鋼材の腐食・摩耗代の考慮や重防食被覆、摩耗カバー等の設置が行われている³⁾。一方、コロージョン・エロージョンの影響をともに受ける導流堤の場合、現象が極めて複雑であるため損耗・劣化のメカニズムが解明されておらず、有効な対策手法の確立には至っていない。

このような背景を踏まえて、本研究では、コロージョン・エロージョンの影響をともに受ける鋼矢板式導流堤の損耗・劣化メカニズムの解明を目的として、現地調査と室内実験により、損耗・劣化の実態把握と矢板近傍の流況計測を行った。

2. 鋼矢板式導流堤の損耗・劣化の実態把握

2. 1 鋼矢板式導流堤の設置状況

ここでは、北海道全域を対象として、鋼矢板式導流堤の設置状況と劣化の有無を調査した結果について報告する。調査は 2018 年 5 月 9 日～2018 年 9 月 4 日に行われた。調査実施に当たり、航空写真をもとに北海



図 - 2 北海道の導流堤位置図

道全沿岸域の導流堤の位置を確認し、その後、確認したすべての導流堤において目視により導流堤の形式と劣化状況を把握した。

図 - 2 に調査を行った全導流堤の位置を示す。導流堤は全部で 58 か所あり、そのうち 37 か所（全体の約 64%）が鋼矢板式の導流堤であった。多くの鋼矢板式導流堤では、Ⅱ型～Ⅳw 型（幅：400 mm～600 mm）の U 型鋼矢板が用いられていたが、比較的新しい導流堤では、ハット型と呼ばれる幅 900 mm の鋼矢板が用いられていた。また、鋼矢板式導流堤のうち 22 か所（鋼矢板式導流堤の約 59%）で矢板に孔が空くなどの著しい劣化が確認された。劣化が確認された多くの導流堤では、腐食対策がなされていない、または、重防食等の対策工が剥がれて鋼材がむき出しになっていた。

本調査では、導流堤の右岸と左岸、河道側と海岸側、岸側と沖側など、位置によって劣化状況が異なることが確認された。次項では、太平洋側の河口に設置された A 導流堤を対象として、損耗・劣化状況の実態をより詳しく調査した結果について報告する。

2. 2 鋼矢板式導流堤の劣化調査

A 導流堤は比較的規模の小さい河川の河口に建設された導流堤であり、建設からおよそ 32 年が経過している（図 - 3 参照）。A 導流堤は右岸・左岸ともに U 型鋼矢板を用いた二重締切堤であり、北海道内で一般的に設置されている形式の導流堤といえる。図 - 3 に示すように、導流堤の右岸右側面（領域 1）と左岸左側面（領域 4）は砂礫海岸に面しており、右岸左側面（領域 2）と左岸右側面（領域 3）は河道に面している。導流堤先端の水深は 2 m 程度であり、沖からの入射波が砕波を伴って河道内に侵入する。河道の右岸側には入射波の影響により砂州が形成されており、河川流は河道の左岸側を導流堤に沿うように流下する。領域 1～領域 4 の底質を採取してふるい試験を行った結果、各領域における底質の中央粒径はそれぞれ 3.1 mm、3.0



図 - 3 上空から見た A 導流堤



図 - 4 A 導流堤（領域 1）の劣化状況

mm、22 mm、3.1 mm であった。

劣化状況の詳細を調査するに当たって、導流堤の先端付近などの比較的深い領域の矢板を水中ビデオカメラを用いて撮影したが、目立った劣化は確認されなかった。そのため、調査は水深が浅い領域を対象に行うものとし、以下にその結果について報告する。

図 - 4 は領域 1（導流堤右岸の右側面）の劣化状況を示している。領域 1 では底面付近において劣化が著しく進み、矢板断面の欠損が多く見られる。底面付近に残されている矢板は、上部工付近と比べて表面が非常に滑らかであった。調査時は静穏のため波が矢板に作用する様子を確認することができなかったが、荒天時には波浪の来襲に伴って砂礫が活発に移動し、その結果、サンドエロージョンの影響により矢板表面が削られたと考えられる。削られた矢板表面は静穏時に電気化学的腐食（コロージョン）が進むことで脆くなり、その状態において次の荒天時にサンドエロージョンが生じることで、再度表面が削られる。領域 1 では、このようなコロージョン・エロージョンが繰り返し生じ



図 - 5 A 導流堤 (領域 2) の劣化状況



図 - 7 A 導流堤 (領域 4) の劣化状況



図 - 6 A 導流堤 (領域 3) の劣化状況



ることにより、底面付近において劣化が著しく進行したと推察される。なお、領域 1 のやや沖側の矢板は重防食で覆われていた。一部、重防食が剥がれた箇所があるものの、矢板に目立った劣化は確認されなかった。図 - 4 に示す範囲では重防食が設置されていた形跡を確認できなかったが、過去に設置されていたものが長年にわたり波の作用を受けることによって、すべて剥がれてしまった可能性がある。

図 - 5 は領域 2 (導流堤右岸の左側面) の劣化状況を示している。領域 2 では領域 1 と同様に劣化による矢板断面の欠損を確認することができる。領域 2 の前面には砂州が形成されており、河川流の影響を受けずに河道内に入射した波が砂州上で遡上・流下を繰り返す。その結果、領域 2 では、領域 1 と同様なコロージョン・エロージョンの影響を強く受けて劣化が進んでいると

推察される。

図 - 6 は領域 3 (導流堤左岸の右側面) の劣化状況を示している。領域 3 では、河道内に入射した波が河川流の影響により勢力を弱めながら遡上する。下流側では波の影響を強く受けるが、図 - 6 に示す範囲では波の勢力が弱く、河川流の影響が支配的となる。領域 3 の劣化状況は領域 1、領域 2 とは異なり、矢板のウェブは欠損しておらず、上流側・下流側のフランジのみが接手部分を残して欠損している。河川流は矢板の凸部 (ウェブ) に対してほぼ平行に流れているが、矢板の凹部では反時計周りの循環流が形成されていた。領域 3 では、このような循環流に駆動される砂礫が比較的肉厚の薄いフランジに繰り返し衝突することにより、ウェブよりもフランジで劣化が進んでいると推察される。矢板凹部で形成される循環流については、第 3 章で詳しく説明する。

図 - 7 は領域 4 の劣化状況を示している。領域 4 では、陸側から先端部まで矢板が重防食で覆われていた。波の遡上部では、一部、重防食が剥がれていたが、その箇所は欠損に至っておらず、錆が浮き上がる程度の弱い劣化が生じていた。波の遡上部の重防食表面には、漂流物や砂礫が衝突した際にできたと思われる傷が多数ついていた。このような傷がさらに増えて、重防食の深部にまで到達することにより重防食の剥離が生じ、鋼材が露出して、劣化が進行すると考えられる。

2. 3 鋼矢板式導流堤の肉厚調査

前節では、水深が浅く、波が遡上・流下する領域では、コロージョン・エロージョンの影響により、矢板が著しく劣化することを説明した。本節では、このよ

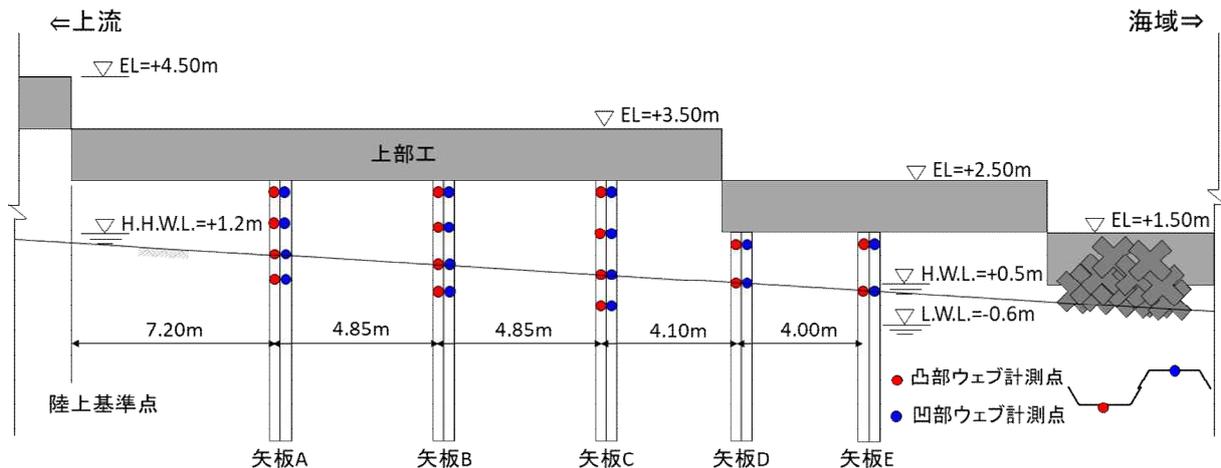


図 - 8 A 導流堤（領域 1）の残存肉厚計測位置（計測は凸部ウェブ、凹部ウェブで実施）

うな著しい劣化の実態をより詳細に説明するため、領域 1 において矢板の残存肉厚の空間分布を計測した結果について報告する。

図 - 8 は領域 1 で実施した肉厚計測の位置を示している。赤丸は凸部ウェブ、青丸は凹部ウェブの計測点を示している。各矢板の計測点は上部工下端から 20 cm と地盤面の 2 点を基本とし、矢板 A～C では、この 2 点の中間点と地盤面から 40 cm 下の点を含めて、合計 4 点計測した。矢板 E よりも海域側では、矢板が大きく欠損していたため、肉厚を計測することができなかった。

肉厚の計測方法は港湾の施設の維持管理技術マニュアル（平成 30 年 7 月）⁴⁾に準拠することとし、以下に示すとおり、肉厚計測を行った。計測点を中心とする 10 cm 四方の範囲において錆や付着物等を除去し、ディスクグラインダーを用いて心材を露出させたあと、超音波式肉厚計（UDM-750DL、日本電磁測器株式会社製）の探触子を心材表面に接触させて肉厚を 3 回計測し、平均値を求めた。このような計測を 10 cm 四方の範囲において 5 点行い、5 点の計測値の平均値を残存肉厚として評価した。計測を行った矢板はすべて FSP-IV 型であった。FSP-IV 型矢板の工場出荷時の幅は 400 mm、ウェブ肉厚は 15.5 mm である。

図 - 9 は図 - 8 で示した全計測点の肉厚損耗量を示している（上段：凸部ウェブ、下段：凹部ウェブ）。損耗量は矢板出荷時のウェブ肉厚 15.5 mm から残存肉厚の計測値を引いて得られた値である。地盤面の損耗量に着目すると、上流から下流（海域側）に近づくにしたがって、波の影響を強く受けるため、損耗量が増加（円の直径が増加）していることがわかる。また、

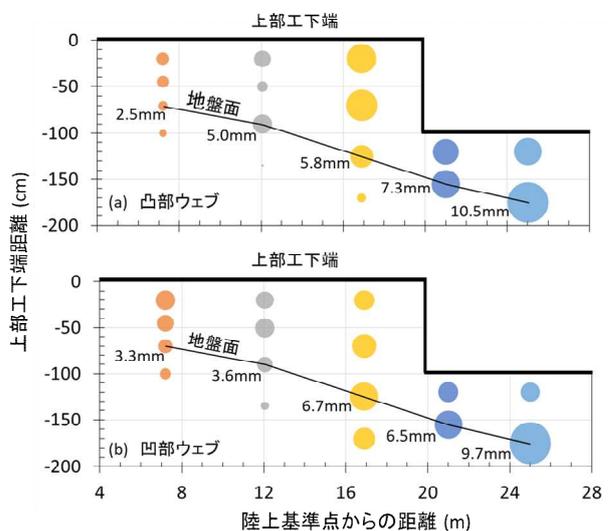


図 - 9 A 導流堤（領域 1）の肉厚損耗量の分布（上段：凸部ウェブ、下段：凹部ウェブ、円の大きさ：損耗量、図内の数値：地盤面での損耗量）

地盤面の凸部ウェブと凹部ウェブの損耗量を比較すると、凹部ウェブでは波の影響を受けにくいいため、凸部ウェブよりも損耗量が少ない傾向が見られる。波の影響を受けやすい矢板 D と矢板 E では、地盤面に近いほど損耗量が多い傾向が明確に表れているが、上流側の矢板 A～矢板 C では地盤面よりも上方で損耗量が多い箇所が確認された。現段階ではその原因を明らかにすることはできなかったが、この範囲では過去にバームが形成されており、地盤面が調査時よりも高かった可能性がある。エロージョン、コロージョンの影響をともに受けにくい地盤面より下では、損耗量は少なく、とくに上流部ではほとんど劣化が進んでいないことが

確認された。

A 導流堤は建設からおおよそ 32 年が経過しているため、調査で得られた損耗量を 32 年で割ることによって、損耗速度（単位：mm/year）を求めることができる。ただし、2.2 で説明したとおり、領域 1 では、過去に重防食が設置されていた可能性があり、その場合、矢板の露出期間が 32 年よりも短くなることから、損耗速度が過少に評価される。A 導流堤に限らず、防食の有無や設置時期が不明な場合については、損耗速度を評価する際に注意が必要である。

3. 矢板周辺の流況調査結果

第 2 章を通じて、導流堤の損耗・劣化には波や河川流によって移動する砂礫の衝突が影響している可能性を示した。本章では、矢板周辺の流況を理解することを目的として、河川流中と波浪場における矢板周辺の流速分布を計測した結果について報告する。

3. 1 河川流中の矢板周辺の流況計測

河川流中における矢板周辺の流速計測は波浪の影響を受けない河口上流部で行われた。図 - 10 に矢板の外観と流速の計測点を示す。本計測では、超音波式 3 次元流速計（FlowTracker2、SonTek 製）を図 - 10 に示す各計測点の底面上方 3 cm に設置し、水平・鉛直流速をサンプリング周波数 10 Hz で 1 分間計測した。矢板のタイプは FSP-III 型（幅 400 mm、高さ 125 mm）であった。すべての計測に要した時間は 2 時間程度であり、その間、水深はほぼ変わらず 50 cm 程度であった。

図 - 11 は矢板周辺で計測された水平流速と鉛直流速の分布（1 分間の平均値）を示している。矢板の凸部前面では、ウェブ面に沿うような 100 cm/s 以上の水平流速が生じているのに対して、凹部では、最大 40 cm/s 程度の反時計回りの循環流が形成されている。また、鉛直流速の分布を見ると、凹部の下流側フランジの近傍で鉛直下向きの流速（負の流速）が生じる一方で、上流側フランジの近傍では、鉛直上向きの流速（正の流速）が生じていることがわかる。河川流中の矢板凹部では、このような水平循環流と鉛直流を伴う複雑な流れによって、砂礫が比較的肉厚の薄いフランジ面に繰り返し衝突するため、A 導流堤（領域 3）で確認されたように、ウェブよりもフランジで劣化が進むと推察される。

3. 2 波浪作用時の矢板周辺の流況計測

波浪場における矢板周辺の流速計測は延長 20 m、幅 33 m、深さ 3 m の多方向造波水槽で行われた。水槽内には勾配 1/10 のモルタル床を設置した。矢板周辺の流

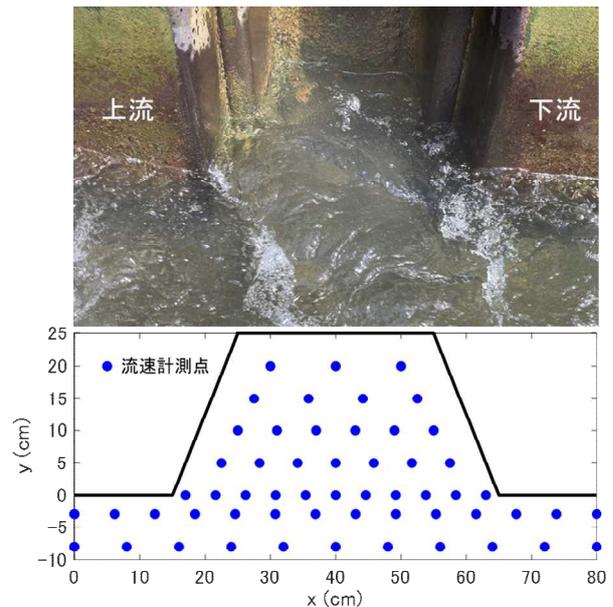


図 - 10 矢板の外観（上段）と流速計測点（下段）

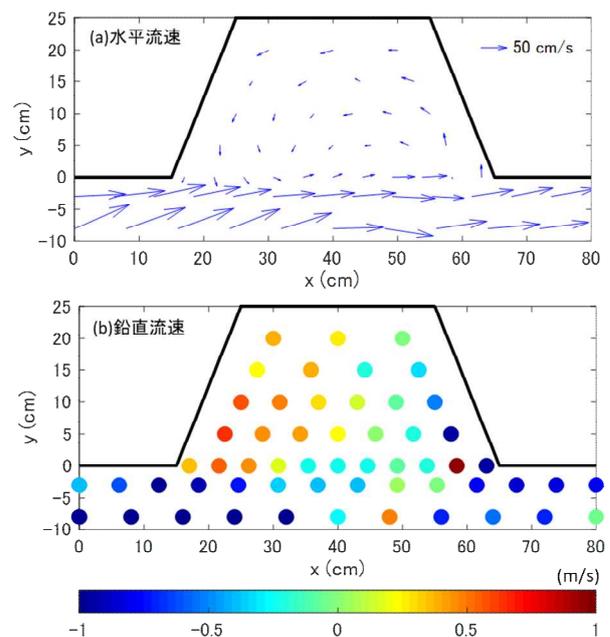


図 - 11 矢板周辺の(a)水平流速と(b)鉛直流速の分布

速を計測するため、水深 0 cm～水深 48 cm の区間に FSP-III 型の鋼矢板を 12 枚設置した。図 - 12 に実験水槽の平面図、図 - 13 に鋼矢板設置区間の断面図を示す。本実験では、図 - 14 に示すように、流速の計測点を No.6 の矢板凹部と No.5 と No.7 の矢板凸部前面に設定し、各計測点の底面上方 1 cm において、矢板法線方向と法線直角方向の水平 2 成分の流速を計測した。また、流速計測と同時に、矢板法線から 80 cm 離れた位置において水位変動量も計測した。流速計測と水位変動量

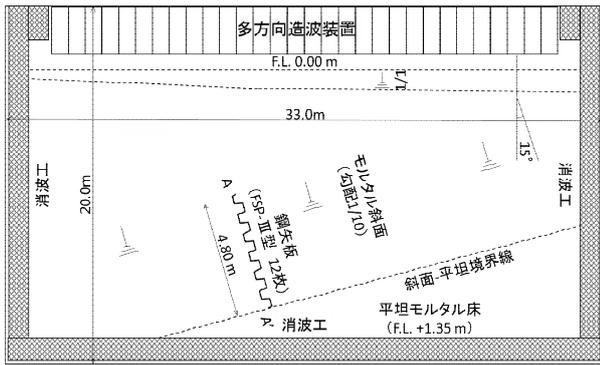


図 - 12 実験水槽平面図

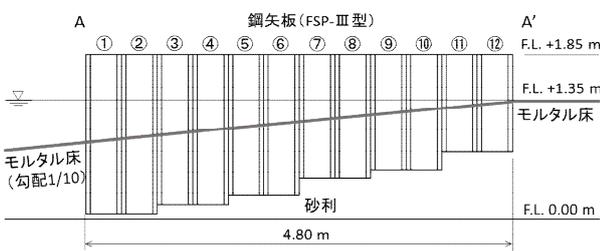


図 - 13 鋼矢板設置区間の断面図

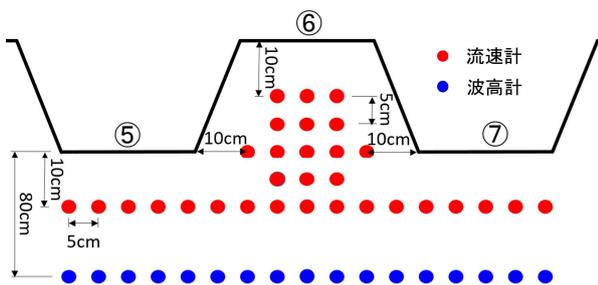


図 - 14 流速計と波高計の設置位置

の計測では、それぞれ電磁流速計と容量式波高計を使用した。No.1の矢板から造波板側に2.43m離れた位置には、もう一台の容量式波高計が設置されており、造波開始後、この波高計が1波目を検知すると同時に出力されるTTL信号により、矢板周辺に設置した電磁流速計と容量式波高計を起動し、サンプリングレート50Hzで3分間のデータを記録した。

本実験は波高48.8cm、周期2.5s (No.1矢板前面の値)の規則波で行うものとし、波の入射角0度(矢板法線に平行)の条件をCase1、入射角10度の条件をCase2と設定した。両ケースとも10回の試行計測を行っており、10回の試行計測のアンサンブル平均値を用いて計測結果を説明する。

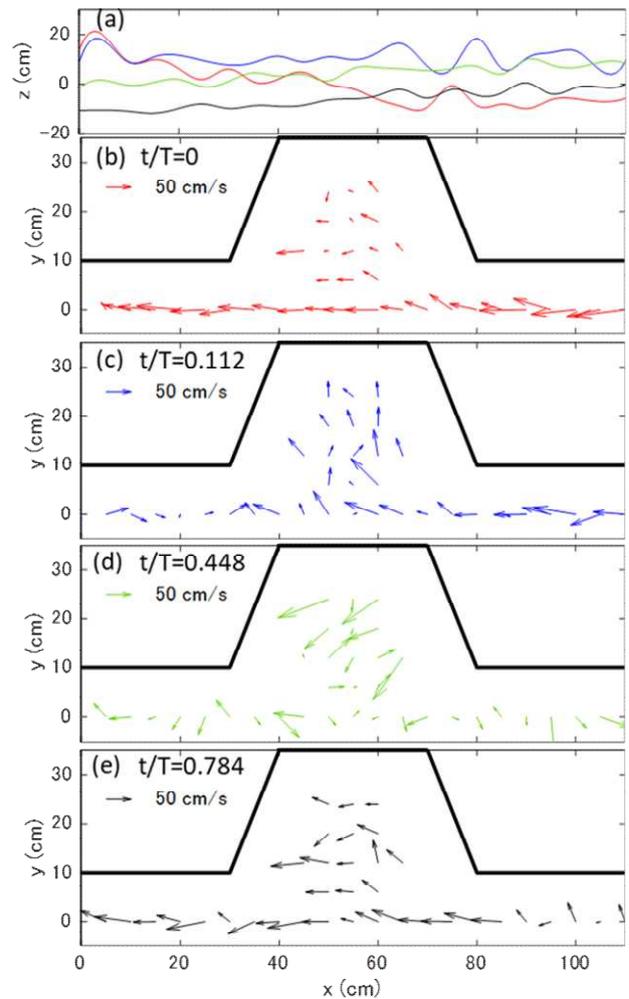


図 - 15 Case1における矢板周辺の(a)水位変動量と(b)(c)(d)(e)水平流速の時間変化

図 - 15 は Case 1 (波の入射角 0 度) における、矢板周辺の水位変動量と水平流速の時間変化を示している。(b)は計測領域に波が入射したとき、(c)は計測領域の水位が最も上昇したとき、(d)は水位が低下を開始したとき、(e)は(c)よりもさらに水位が低下ときの流速分布を示しており、(b)~(e)のベクトルの色は(a)に示す水位変動量の色に対応している。x軸はNo.5の矢板ウェブ沖側端部を起点とした矢板法線方向の距離、y軸は矢板凸部ウェブから10cm前面を起点とした法線直角方向の距離、z軸は鉛直上向きを正とした静水面からの距離を表している。

波が入射するときの流速分布(b)では、矢板の凸部前面と凹部ともに、波の戻り流の影響により50cm/s~100cm/s程度の沖に向かう流れが生じている。その後、波が進行して、計測領域の水位が最大となる(c)では、沖側ウェブの前面において弱い岸向きの流れが生

じる一方で、岸側ウェブの前面では比較的強い沖に向かう流れが生じている。また、矢板凹部では、これら岸沖方向の流れが交わることによって、法線直角方向に 50 cm/s 程度の流れが生じている。波の通過に伴って水位が低下を開始する(d)では、全体的に矢板から離れる方向の流速が生じており、矢板凹部の流速は 100 cm/s 以上に及ぶ。さらに水位が低下する(e)では、戻り流れが発達して、計測領域全体に沖向きの流れが生じる。この沖向きの流れは次の波が入射するまで比較的長時間継続するが、河川流中に見られたような矢板凹部における循環流の形成は確認されなかった。

図 - 16 は Case2 (波の入射角 10 度) における図 - 15 と同様の図である。(b)と(e)では、計測領域全体で戻り流れが発達しており、その様子は Case1 と大きく変わらない。一方、水位が最も上昇する(c)と水位が低下を開始する(d)では、Case1 と比べて、複雑な流速場が形成されている。矢板法線に対して斜めに波が入射することが、(c)(d)での複雑な流速場の形成に影響していると考えられるが、詳細な理由については本実験結果で明らかにすることはできなかった。なお、波が斜めに入射することによって、矢板の凸部・凹部のウェブや凹部岸側フランジ面に向かう強い流速が確認されることを予想していたが、本実験では、そのような流速場は確認されなかった。

4. まとめ

本研究では、鋼矢板式導流堤の損耗・劣化に関する実態把握および河川流中と波浪場における矢板周辺の流速計測を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 北海道を対象として調査した導流堤 58 か所のうち、37 か所 (全体の約 64%) が鋼矢板式導流堤であり、そのうち 22 か所 (鋼矢板式導流堤の約 59%) で矢板の欠損などの著しい劣化が確認された。
- 2) 水深が浅く、波が遡上・流下する領域では、コロージョン・エロージョンによって、矢板の底面付近が著しく劣化する。
- 3) 河川流が流下する領域では、矢板凹部の両フランジがウェブよりも速く劣化する。
- 4) 河川流中の矢板凹部では反時計回りの循環流が形成される。この循環流に駆動される砂礫が比較的肉厚の薄いフランジ面に繰り返し衝突することにより、フランジ面で劣化が進むと推察される。
- 5) 導流堤に波が平行に入射する (入射角 0 度) ケースでは、波の入射時に矢板周辺に沖向きの流れが生じる。その後、波の進行に伴い矢板周辺の水位が上昇すると、

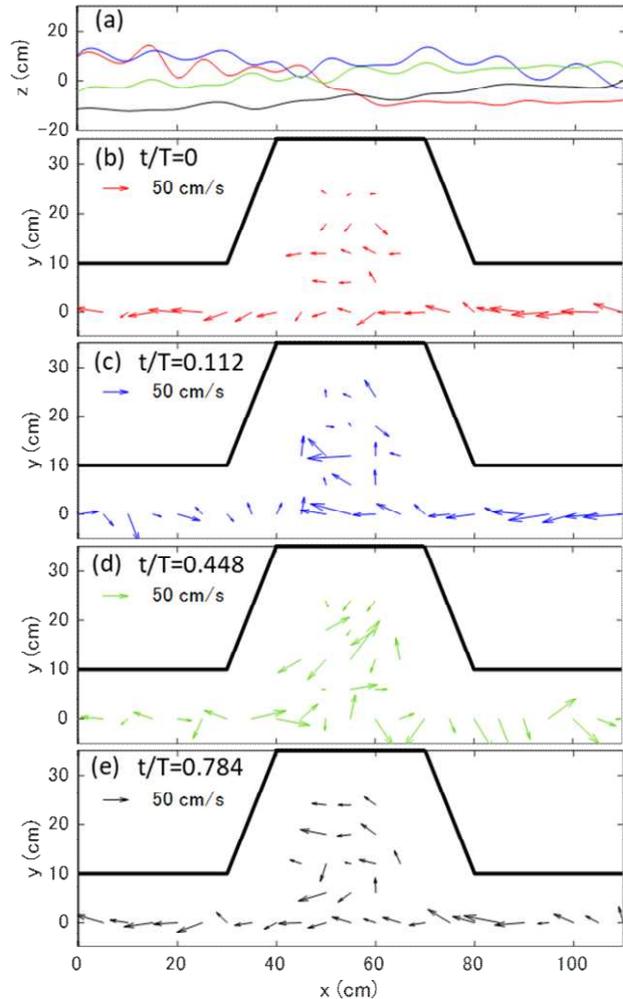


図 - 16 Case2 における図 - 15 と同様の図

矢板凹部の壁面に向かう比較的強い流れが生じる。

6) 波が矢板法線に対して斜めに入射する (入射角 10 度) ケースでは、波が斜めに入射することによって、矢板凸部・凹部のウェブや凹部岸側フランジ面に向かう強い流速が確認されることを予想していたが、本実験では、そのような流速場は確認されなかった。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局、河川砂防基準 施設配置等計画編 第2-1章河道並びに河川構造物 第1節河道計画 技術資料、2018
- 2) 防食補修工法研究会 港湾鋼構造物 調査診断・防食補修工法、233p、1990
- 3) 鋼管杭の防食法に関する研究グループ、海洋構造物の防食技術、技報堂出版、241p、2010
- 4) 国土交通省港湾局、港湾の施設の維持管理技術マニュアル、社団法人沿岸技術センター、338p、2018

A STUDY ON THE EROSION AND CORROSION OF SHEET-PILE-TYPE JETTIES CONSTRUCTED AT RIVER MOUTH

Research Period : FY2016-2020
Research Team : Cold Region Hydraulic and Aquatic
Environment Engineering Research
Group (Port and Coast)
Author : NAKAJIMA Yuichi
KUBO Junichi
KIOKA Shinji
OTSUKA Junichi

Abstract : We investigated deterioration states of sheet-pile-type jetties constructed at river mouth in Hokkaido, Japan, and found that more than half of the jetties were remarkably degraded due to sand erosion and corrosion. We also observed wave and flow conditions around sheet piles of the jetties. It was found that waves with sand particles repeatedly run up attacking the sheet piles, and in river flows, circulating flow was generated in the concave of the sheet piles. These sand attacks and circulating flow might affect deterioration of the sheet piles of the jetties.

Key words : river mouth, sheet-pile-type jetty, erosion, corrosion