

研究成果報告書

研究開発課題名	既設鋼矢板護岸の画像解析を活用した健全度評価技術の開発および鋼矢板排水路の維持管理支援データベースシステムの構築
研究総括者	日鉄建材株式会社
研究開発組合	日鉄建材株式会社 日鉄エンジニアリング株式会社
試験研究機関	国立研究開発法人農研機構 国立大学法人新潟大学 国立大学法人東京農工大学

1 事業の実施内容

1. 1 事業の背景と目的

1. 1. 1 事業の背景

全国の農業用排水路は約40万km以上存在する。その中で基幹的水路は約5万kmであり、その4割にあたる2万kmが標準耐用年数を超過している状況である。

また、軽量で施工性の良い鋼矢板や鉄鋼二次加工製品は、農業水利施設において古くから数多く使用されてきており、鋼矢板の使用量は、約4,000kmに及ぶと推察される（過去の納入実績等からの推測値）。

排水路は、低平地などの排水不良の改善を目的に設置される。特に地盤が軟弱な地域（代表的な地域としては新潟平野）では鋼矢板を用いた護岸型の排水路が多く採用されてきた。しかし、設置後数十年が経過した施設の中には鋼材の腐食が進み、鋼矢板の補修・補強対策と長寿命化が課題となっている。

1. 1. 2 事業の目的

上記背景に対して、本研究開発事業は、既設鋼矢板の健全度評価技術の確立を目的としている。鋼矢板の維持管理を行うためには、既設鋼矢板の健全度評価が必須である。一般的に、既設鋼矢板の検査は、目視検査、板厚調査にて行われる。この内、目視検査は、既設鋼矢板の損傷具合を目視により確認するが、鋼矢板の孔（欠損）の確認および腐食状況の有無を判断するに留まり、残存板厚までは計測していない。また、人的な検査方法であるため、主観的な判断による結果のばらつきが生じる。一方、板厚調査は、詳細な調査が必要とされる鋼矢板を対象に実施されるが、鋼矢板護岸の構造上、矢板背面側の調査を行えないため、片側（水路側）から超音波厚さ計を用いた方法となる。この場合、板厚の細かな調査が可能であるが、測定には時間を要し、さらに、水路の仮締切が必要となるなど、大がかりとなるため、調査コストが増大することがある。

これらの問題点に対し、UAVにより収集した画像をもとに、近年急速に発展をみせる画像診断技術を活用して、目視検査よりも高精度かつ客観的な調査方法で排水路の健全度評価を行う。さらに、これらの画像データや健全度評価結果に加え、現地での点検調査結果データ等を包括的に管理し、当該水路の維持管理業務を支援するデータベースシステムを開発する。

1. 2 事業の内容及び実施方法

1. 2. 1 事業の内容

既設鋼矢板の健全度評価技術と維持管理業務を支援するデータベースシステムに関する技術確立について、以下にその内容を示す。

(1) 既設鋼矢板の健全度評価技術の確立

1) 画像解析による既設鋼矢板の劣化度推定技術

目視点検の代替えとして、UAV により鋼矢板水路の画像（可視画像および赤外線画像）を取得し、その画像を用いた解析により鋼矢板の劣化度（腐食度合）を定量的に評価する技術を確立する。

2) 鋼矢板の残存性能推定技術

画像解析等により得られた鋼矢板の腐食度合（残存板厚分布など）から、老朽化した鋼矢板の部材としての残存性能（残存耐力、剛性低下等）を評価する技術を確立する。

3) 排水路断面の健全度評価技術

腐食劣化した鋼矢板の残存性能から、排水路断面の劣化度合いを農林水産省にて取りまとめられている健全度指標と関連づける合理的な手法を確立する。

(2) 排水路延長の健全度を包括管理するデータベースシステムの開発

上記の健全度評価の過程で得られた画像データや画像解析結果、健全度評価結果等に加え、別途行われる現地での詳細な点検調査結果データ等を水路延長にわたり包括的に管理するデータベースシステムを構築する。

1. 2. 2 事業の実施方法

上記事業内容の各項目に対して、下記を実施した。

(1) 既設鋼矢板の健全度評価技術の確立

1) 画像解析による既設鋼矢板の劣化度推定技術

①UAVの選定

鋼矢板排水路には幅の狭隘、切梁の有無、曲線区間、橋の有無など様々な状況が存在する。これらの状況の中、解析に適した画像を取得できる UAV を選定する必要がある。狭隘な箇所でも安定的に飛行可能な、自動飛行・自律飛行機能を有する UAV が望ましい。このような飛行が可能な UAV に関する情報を収集し、飛行テストを行い、本事業に最も適する UAV を選定した。

②水路延長方向の調査間隔の検討

水路延長方向の調査間隔に関して、「農業水利施設の機能保全に関する調査計画の参考資料 開水路編」では、調査区間 1km に対して最低 1 箇所調査するとの記述があるが、現在開発中の画像解析を用いて板厚を同定する調査方法の調査間隔は明確となっていない。そこで、水路延長方向の板厚調査を行い、画像解析による調査間隔を明確にした。

③画像解析技術の確立

可視画像と赤外線画像を併用した画像解析を用いて既設鋼矢板護岸の板厚を推定する。具体的には、計測日の気象条件から鋼矢板護岸の熱収支シミュレーションを行い、異なる板厚条件での赤外線計測結果を予測する。画像解析では、評価対象範囲（鋼矢板部）を抽出し、赤外線画像計測結果と熱収支シミュレーションから板厚を推定する。実証試験として、後述する「水中部及び土中部の板厚推定」での板厚計測結果と画像解析結果の比較検証を実施する。

2) 鋼矢板の残存性能推定技術

①腐食した矢板の断面性能算出

一様に腐食していない部分を対象に載荷試験（曲げ試験）を行う。試験結果から板厚分布を有する腐食矢板について、等価な剛性を持つ一様板厚への置き換えを検討した。これにより、矢板壁の断面性能を算出する事ができ、排水路の健全度指標の算出が可能となる。具体的には、載荷試験（曲げ試験）結果と、その試験体の板厚や孔寸法等を用いた解析結果との比較を行い、解析により腐食した矢板の曲げ挙動を再現できる解析モデルを構築した。

②腐食状況（板厚分布）を変えた解析

画像解析から板厚分布が算出される。その板厚分布から等価な剛性を有する一様断面が算出できれば、均等に腐食していない矢板についても容易に断面性能が算出できる。そこで、上記①の解析モデルを用いて腐食状況（板厚分布）を種々変えた解析を行い、それぞれ等価な剛性を持つ一様板厚を算出した。その一様板厚と腐食状況（板厚状況）の比較を行い、その関係性を検証した。

③水中部及び土中部の板厚推定

鋼矢板排水路の特徴として、矢板壁高さ方向に「気中部」「水位変動部」「水中部」「土中部」と腐食環境が異なることが挙げられる。この中で「気中部」と「水位変動部」の板厚は画像解析の対象範囲となるが、画像取得出来ない「水中部」と「土中部」は「気中部」と「水位変動部」の腐食状況から板厚を推定し、鋼矢板全体としての残存性能を評価する必要がある。そこで、亀田郷土地改良区管内の排水路での板厚調査を実施した。本板厚調査では水路を部分的に仮締切りし、河床の掘削行いを、「水中部」「土中部」の板厚計測も行うことにより、矢板壁高さ方向の板厚分布を明確にする。「気中部」と「水位変動部」の腐食状況から「水中部」と「土中部」の板厚を推定するデータを取得した。

3) 排水路断面の健全度評価技術

①発生応力度算出方法の検討

矢板の設計は許容応力度設計法により行う。これにより矢板の発生応力度が鋼材の許容応力度以下になるように矢板断面を設計する。本事業の腐食矢板の健全度指標への関連付けについても、発生応力度にて照査することとした。発生応力度の照査には断面性能と発生曲げモーメントの算出が必要となる。断面性能については画像解析による板厚分布から算出することができるが、発生曲げモーメントの算出に必要な既設鋼矢板の詳細なデータが得られないことが想定される。そこで、現場の限定的な条件で鋼矢板に作用する発生曲げモーメントを簡易的に算出する方法、並びに、照査位置について検討を行った。

②健全度指標との関連付け

算出された発生応力度を閾値に基づき健全度指標に反映させることにより、定量的な判定が可能となる。そこで、健全度判定された調査事例を調べ、その排水路の板厚・現場状況と健全度の関係を整理する。板厚と現場状況から発生応力度を調べ、過去に判定された健全度と発生応力度の関係性を明確化し、閾値を設定する。

(2) 排水路延長の健全度を包括管理するデータベースシステムの開発

管理データベースを作成した実績のあるシステム会社を選定し、このシステム会社とデータベースの構築を進め、画像解析や健全度評価方法等のプログラムを随時データベースに搭載していくこととする。モデル地区となる土地改良区での試運用を行い、問題点や課題点を把握して改善を進める。

1. 3 事業着手時に想定した技術的問題点への対応

技術的問題点	対応
画像解析による劣化度推定技術	① 画像解析に適した画像の取得方法の検討 ② 画像解析を用いた調査の調査間隔の設定 ③ 画像解析技術の確立
既設鋼矢板の残存性能推定技術	① 腐食した矢板の断面性能算出 ② 腐食状況を変えた解析 ③ 画像解析対象範囲外の板厚推定
排水路断面の健全度評価技術	① 発生応力度算出方法の検討 ② 既存の健全度設定法との比較
排水路延長の健全度を包括管理するデータベースシステムの開発	① 矢板排水路のストックマネジメントサイクルの実態に応じて最適化されたシステムの検討

1. 4 事業の実施体制

(1) 研究開発組合内の役割分担

(2) 試験研究機関と研究開発組合の役割分担

【役割分担表】

研究開発の項目	事業実施主体		試験研究機関		
	日鉄建材(株)	日鉄エンジニアリング(株)	新潟大学	東京農工大学	農研機構
既設鋼矢板の健全度評価技術の確立					
画像解析による既設鋼矢板の劣化度推定技術	○	○	◎	○	○
鋼矢板の残存性能推定技術	◎	○	○	○	○
排水路断面の健全度評価技術	○	○	○	○	◎
排水路延長の健全度を包括管理するデータベースシステムの開発	○	◎	○	○	○
実証試験	○	◎	○	○	○

1. 5 事業の年度計画と実績

研究開発の項目	令和2年度		令和3年度		令和4年度	
	上期	下期	上期	下期	上期	下期
既設鋼矢板の健全度評価技術の確立						
画像解析による既設鋼矢板の劣化度推定技術	■	■				
鋼矢板の残存性能推定技術	■	■				
排水路断面の健全度評価技術			■	■		
排水路延長の健全度を包括管理するデータベースシステムの開発	■	■	■	■	■	■
実証試験		■		■		

注) ■ は計画、■ は実績。

1. 6 研究開発の概要、結果、課題等

1. 6. 1 既設鋼矢板の健全度評価技術の確立

(1) 概要

1) 画像解析による既設鋼矢板の劣化度推定技術

①UAVの選定

鋼矢板排水路の画像取得に適したUAVを選定するために2020年度～2021年度に4機種の飛行・航行テストを新潟県亀田郷土地改良区山崎排水にて実施した。4機種のUAVの特徴と結果を下記に示す。

【機種A：空中 UAV】(2021 年度実施)

特徴：UAV に搭載したカメラの動画像から特徴点を検出し、周辺環境と UAV の位置をリアルタイムに推定することで設定された航路を飛行する。

結果：矢板排水路の笠コンクリートの特徴点を基準とする事で飛行テストを行ったが、笠コンクリート上の植生の影響から当該点を基準点にする事が出来ず、設定航路の飛行は不可能であった。また、切梁下の自動飛行は不可能であった。

【機種B：空中 UAV】(2020 年度実施)

特徴：UAV に搭載したプリズムにトータルステーションの光波を当て、そこから反射した光波を基に飛行位置を自動修正しながら設定された航路を飛行する。

結果：水路内（切梁下）を自動飛行させ、矢板壁面を正面から撮影する事を試みたが、自機位置の把握システムにエラーが発生した。飛行当日は快晴で、水面からの太陽光の反射光が UAV に搭載したプリズムに入り込み、トータルステーションがプリズムからの光波を捉えられず誤作動が発生。これにより自機位置を把握することができなくなった。

【機種C：空中 UAV】(2021 年度実施)

特徴：飛行の際、アメリカの GPS の他、EU、ロシア、中国の衛星など、常時 40 基程度の衛星を用いており、安定した自動飛行が可能。

結果：切梁上の自動飛行は可能であったが、航路設定に半日を要することや、航路の調整に時間が掛かった。切梁下の自動飛行は不可能であった。

【機種D：水上 UAV】(2021 年度実施)

特徴：距離センサーを用いる事により、水路壁から一定距離を保ちながら航行が可能。浮力調整する事が可能で、搭載できるカメラの種類が多い。また、カメラを多数搭載する事も可能。

結果：鋼矢板排水路内には昇降用梯子や植生が存在する。そのため、完全な自動航行は不可能であった。水位変動部を正面から撮影が出来た。



写真 1.6.1 山崎排水路 状況写真



写真 1.6.2 機種 B 空中 UAV 飛行状況



写真 1.6.3 機種 D 水上 UAV 航行状況

②水路延長方向の調査間隔の検討

画像解析を用いた調査の適切な調査間隔を検証するために新潟県亀田郷土地改良区の袋津排水路と亀田排水路上流部について、水路延長方向の板厚分布を調査した。下記に各排水路の調査内容を示す。

- ・袋津排水路（1996 年造成 型式 E 元板厚 5.0mm）

調査区間：1km（100m毎に 11 箇所）

調査高さ：腹起しの H 形鋼フランジ端部を基点として、1300mm（気中部）、1450mm（水位変動部）、1550mm（水位変動部）、1700mm（水中部）の高さ位置で計測を実施。

調査箇所：調査箇所を図 1.6.1 に示す。

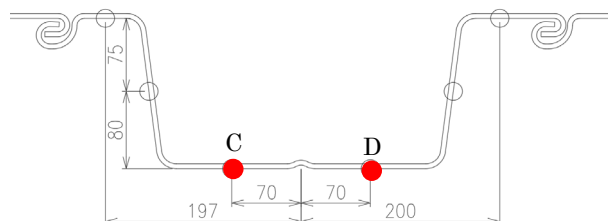


図 1.6.1 板厚調査断面位置図

- ・ 亀田排水路上流部（1984 年造成 型式 E 元板厚 5.0mm）

調査区間：100m（20m毎に 6 箇所）

調査高さ：腹起しの H 形鋼フランジ端部を基点として、1000mm（気中部）、1200mm（水位変動部）、1300mm（水位変動部）、1400mm（水中部）の高さ位置で計測を実施。

調査箇所：図 1.6.1 と同様



写真 1.6.4 袋津排水路調査状況



写真 1.6.5 亀田排水路上流部調査状況

③画像解析技術の確立

画像解析は、既設鋼矢板護岸の腐食実態を踏まえた板厚推定を赤外線画像と可視画像を組み合わせで行うものである。具体的には、可視画像と赤外線画像とをマッチングした後に、スーパーピクセルによるセグメンテーションを行う。各セルの特徴量から主成分分析とk-means法によるクラスタリングを行い、8項目（水位変動部など）に分類し、環境ノイズと評価対象である鋼矢板とを分類する。板厚推定は、赤外線画像と気象条件から推定される板厚との両面から行う。本検証は実証試験にて実施している。1.7実証試験にて詳細を示す。

2) 鋼矢板の残存性能推定技術

①腐食した矢板の断面性能算出

一様に腐食していない部分を対象に載荷試験（曲げ試験）を行い、試験体と等価な剛性を持つ一様板厚への置き換えを検討した。これにより、矢板壁の断面性能を算出することができ、排水路の健全度指標の算出が可能となる。具体的には、載荷試験（曲げ試験）結果と、その試験体の板厚や孔寸法等を用いた解析結果との比較を行い、解析により腐食した矢板の曲げ挙動を再現できる解析モデルを構築した。

・試験体

載荷試験の試験体は、亀田郷土地改良区の大石排水路でサンプリングしたものを用いた。写真 1.6.6 に大石排水路の現場状況、表 1.6.1 に鋼矢板の諸元を示す。サンプリングした矢板の腐食状況を詳細に把握するために、板厚調査を実施した。板厚調査箇所は 1 断面当たり 12 箇所（図 1.6.2）、長さ方向は図 1.6.4 に示す上部①と下部③の 600 mm 区間を 50 mm ピッチならびに中部②の 500 mm 区間を同 25 mm ピッチの 45 断面とした。鋼矢板が設置されていた環境（気中部・水位変動部・水中部・土中部）の該当範囲と、調査結果より得られた各断面の平均板厚を図 1.6.4 に示す。気中部・水中部・土中部では環境が一定のため、ほぼ一様に腐食が進行していた。一方、乾湿を繰り返す水位変動部付近では腐食が進行し開孔が確認された。また、水中部と土中部の境界付近の②区間では腐食が進行する傾向（板厚分布及び、開孔（ $\phi 16$ ）の発生）が見られたことから、この位置で水位変動部の初期腐食状況を模擬できると考え、この区間を切り出し、載荷試験を実施した。



写真 1.6.6 大石排水路現場状況

表 1.6.1 鋼矢板の諸元

施工時期	昭和 52 年（1977 年）
型式	C（LSP-3D（軽量鋼矢板））
板厚	5.0 mm
矢板長さ	5,000 mm

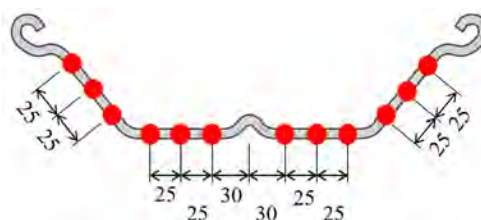


図 1.6.2 板厚測定箇所（断面）

・試験方法

図の②区間を切り出して、端部にプレートを溶接した試験体を写真 1.6.7 に示す。試験体の両側に H 形鋼をボルト接続して、等曲げ区間 700 mm、せん断区間 700 mm の 4 点載荷試験を実施した。計測項目は、荷重と中央変位量、中央断面のひずみ（図 1.6.3 参照）とした。試験概要図を図 1.6.5 に示す。

・解析方法

試験体の板厚や孔寸法を用いた FEM 解析（解析ツール：MARC）より、試験結果の再現を試みた。

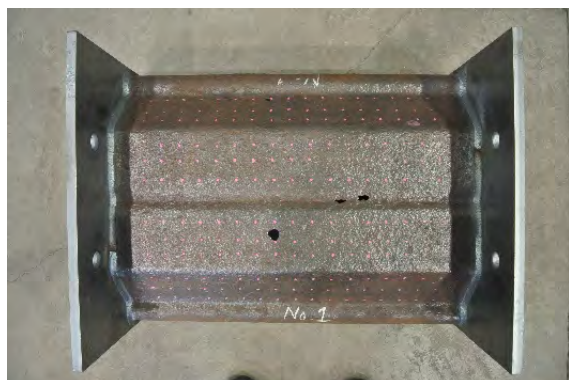


写真 1.6.7 荷供試体

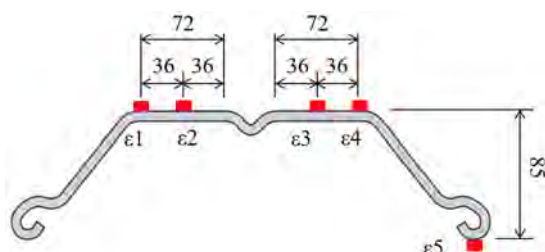


図 1.6.3 中央断面ひずみゲージ設置位置

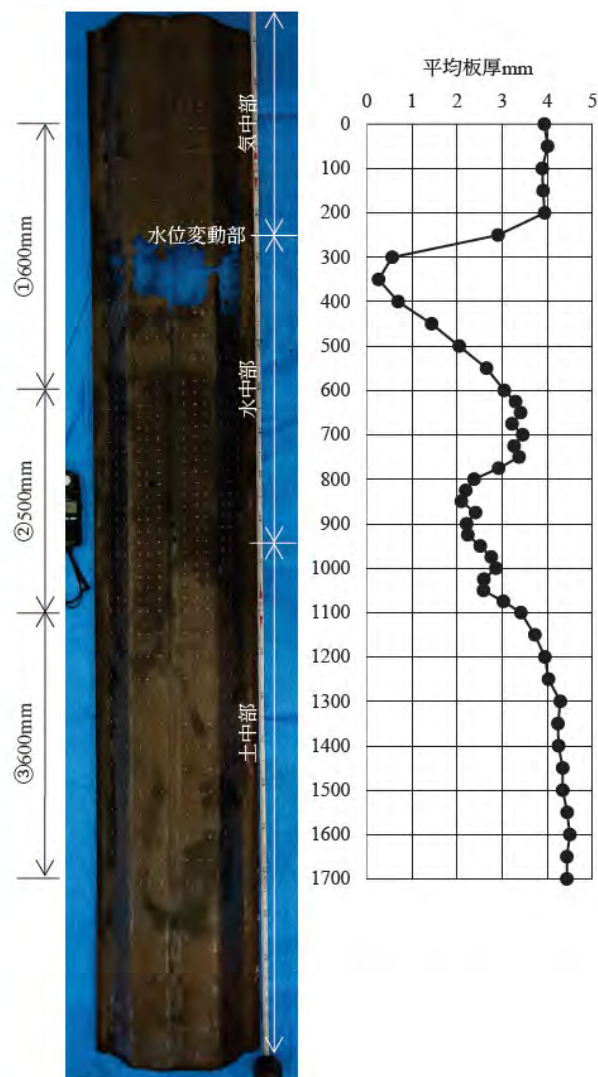


図 1.6.4 板厚計測箇所と平均板厚

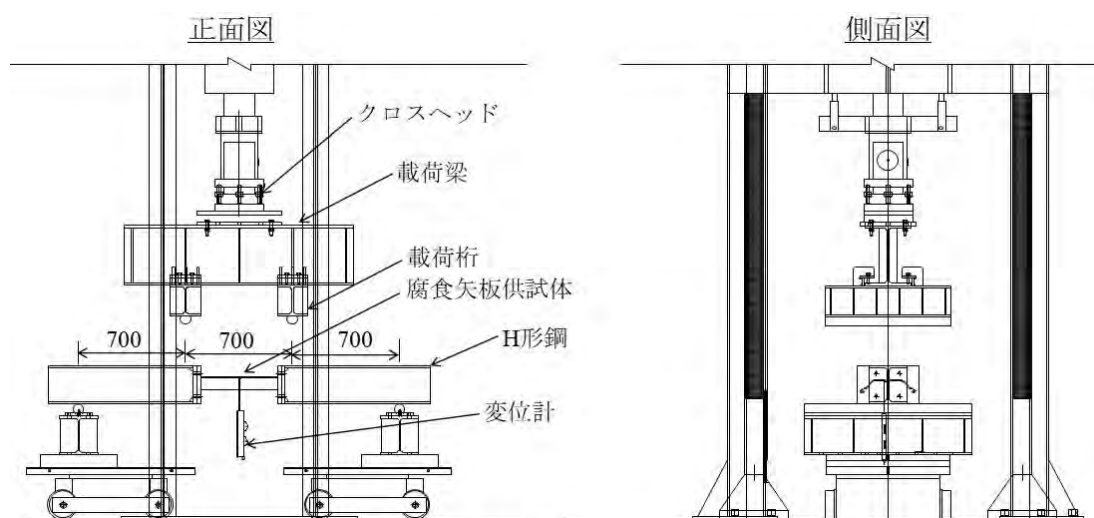


図 1.6.5 試験概要図

②腐食状況（板厚分布）を変えた解析

上記①により、試験結果を再現できるFEM解析モデルを構築し、これを用いて、腐食状況（板厚分布）を種々変えた解析を行い、それぞれ等価な剛性を持つ一様板厚を算出する。その一様板厚と腐食状況（板厚状況）との比較を行い、その関係性を検証した。変化させる矢板の板厚状況は腐食した矢板を参考に図1.6.7とした。矢板の板厚変化は図1.6.7に対して、高さ方向に板厚を増減させたケースと幅方向に板厚を増減させたケースで実施する。また、矢板高さ方向及び幅方向に板厚を減少させたケースも実施した。

解析 CASE を下記とし、それぞれの板厚状況を図 1.6.7～図 1.6.12 に示す。

CASE1：腐食矢板モデル（図 1.6.7）

CASE2：矢板高さ方向に板厚を減少させたモデル（図 1.6.8）

CASE3：矢板高さ方向に板厚を増加させたモデル（図 1.6.9）

CASE4：矢板幅方向に板厚を減少させたモデル（図 1.6.10）

CASE5：矢板幅方向に板厚を増加させたモデル（図 1.6.11）

CASE6：矢板高さ方向と幅方向に板厚を減少させたモデル（図 1.6.12）

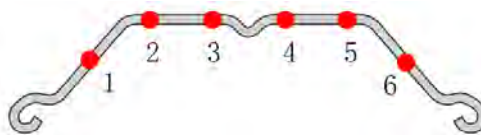


図 1.6.6 解析に用いた板厚箇所

位置 (mm)	板厚 (mm)					
	1	2	3	4	5	6
0	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
100	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
150	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
200	2.50	2.00	2.00	2.00	2.00	2.50
250	2.50	2.00	1.50	1.50	2.00	2.50
300	2.50	2.00	2.00	2.00	2.00	2.50
350	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
400	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
450	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
500	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50

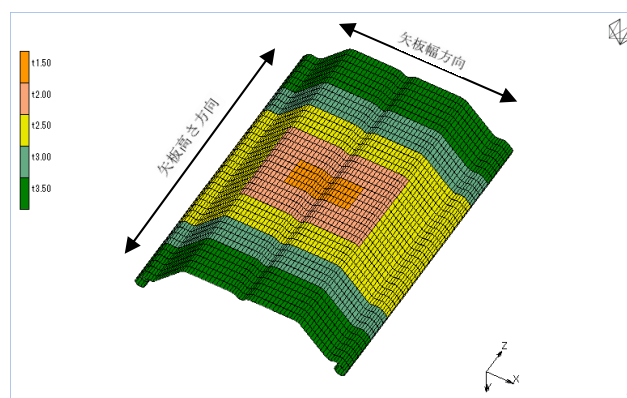


図 1.6.7 CASE1 腐食矢板モデル板厚分布（基本ケース）

位置 (mm)	板厚 (mm)					
	1	2	3	4	5	6
0	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
50	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
100	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
150	2.50	2.00	1.50	1.50	2.00	2.50
200	2.00	1.50	1.00	1.00	1.50	2.00
250	1.50	1.00	0.50	0.50	1.00	1.50
300	2.00	1.50	1.00	1.00	1.50	2.00
350	2.50	2.00	1.50	1.50	2.00	2.50
400	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
450	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
500	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50

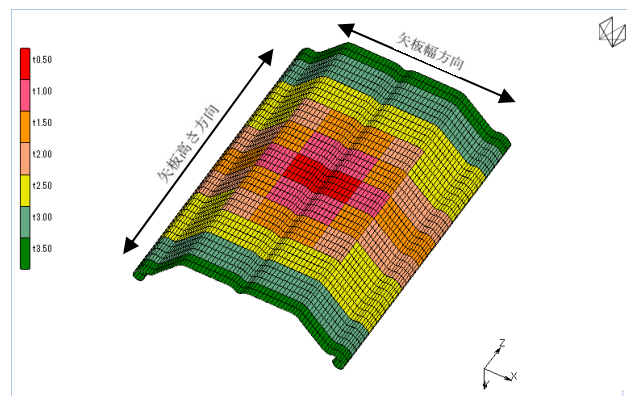


図 1.6.8 CASE2 矢板高さ方向に板厚を減少させたケース

位置 (mm)	板厚 (mm)					
	1	2	3	4	5	6
0	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
100	3.50	3.50	3.00	3.00	3.50	3.50
150	3.50	3.00	3.00	3.00	3.00	3.50
200	3.50	3.00	2.50	2.50	3.00	3.50
250	3.50	3.00	2.50	2.50	3.00	3.50
300	3.50	3.00	2.50	2.50	3.00	3.50
350	3.50	3.00	3.00	3.00	3.00	3.50
400	3.50	3.50	3.00	3.00	3.50	3.50
450	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
500	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50

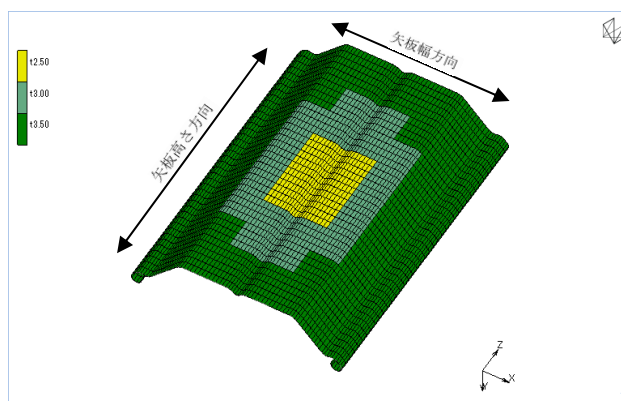


図 1. 6. 9 CASE3 矢板高さ方向に板厚を増加させたケース

位置 (mm)	板厚 (mm)					
	1	2	3	4	5	6
0	3.50	3.00	2.50	2.50	3.00	3.50
50	3.50	3.00	2.50	2.50	3.00	3.50
100	3.00	2.50	2.00	2.00	2.50	3.00
150	2.50	2.00	1.50	1.50	2.00	2.50
200	2.50	1.50	1.00	1.00	1.50	2.50
250	2.50	1.50	0.50	0.50	1.50	2.50
300	2.50	1.50	1.00	1.00	1.50	2.50
350	2.50	2.00	1.50	1.50	2.00	2.50
400	3.00	2.50	2.00	2.00	2.50	3.00
450	3.50	3.00	2.50	2.50	3.00	3.50
500	3.50	3.00	2.50	2.50	3.00	3.50

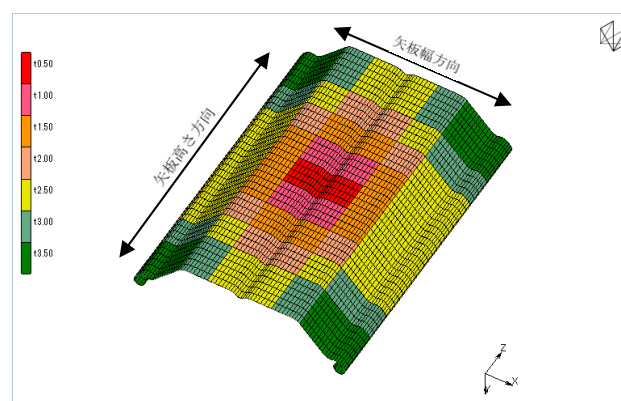


図 1. 6. 10 CASE4 矢板幅方向に板厚を減少させたケース

位置 (mm)	板厚 (mm)					
	1	2	3	4	5	6
0	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
100	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
150	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
200	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
250	2.50	2.50	2.00	2.00	2.50	2.50
300	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
350	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
400	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
450	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
500	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50

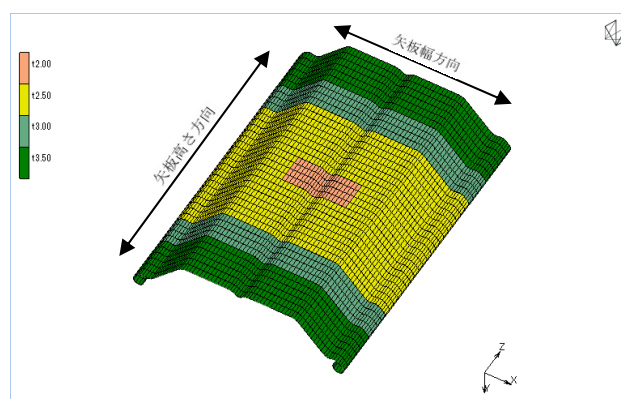


図 1. 6. 11 CASE5 矢板幅方向に板厚を増加させたケース

位置 (mm)	板厚 (mm)					
	1	2	3	4	5	6
0	3.50	3.00	2.50	2.50	3.00	3.50
50	3.00	3.00	2.50	2.50	3.00	3.00
100	2.50	2.50	2.00	2.00	2.50	2.50
150	2.50	2.00	1.50	1.50	2.00	2.50
200	2.00	1.50	1.00	1.00	1.50	2.00
250	1.50	1.00	0.50	0.50	1.00	1.50
300	2.00	1.50	1.00	1.00	1.50	2.00
350	2.50	2.00	1.50	1.50	2.00	2.50
400	2.50	2.50	2.00	2.00	2.50	2.50
450	3.00	3.00	2.50	2.50	3.00	3.00
500	3.50	3.00	2.50	2.50	3.00	3.50

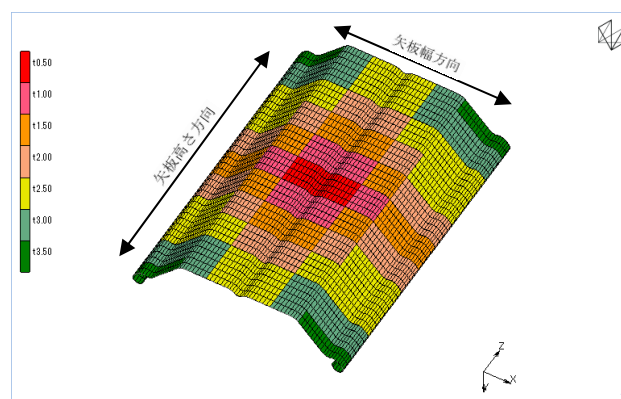


図 1. 6. 12 CASE6 矢板高さ方向と幅方向に板厚を減少させたケース

③水中部及び土中部の板厚推定

画像解析の対象範囲外となる、「水中部」と「土中部」の板厚を「気中部」と「干満帯」の腐食状況から推定するために板厚データを取得した。写真1.6.8、写真1.6.9に現場状況及び板厚計測状況を示す。図1.6.13～図1.6.16に調査排水路と測定箇所を示す。

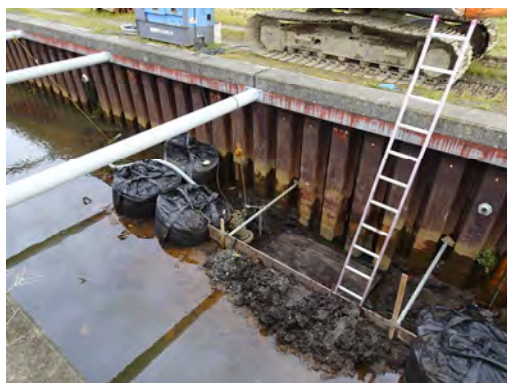


写真 1.6.8 現場状況



写真 1.6.9 矢板板厚計測状況

・ 調査排水路（新潟県亀田郷土地改良区）

- ①袋津排水路（1996 年造成 型式 E（LSP-5） t=5.0）
- ②山崎排水路（2001 年造成 型式 E（LSP-5） t=6.0）
- ③亀田排水路（1998 年造成 型式 E（LSP-5） t=6.0）
- ④亀田排水路（上流）（1984 年造成 型式 E（LSP-5） t=5.0）
- ⑤亀田排水路（最上流）（1988 年造成 型式 C（LSP-3D）元板厚不明）

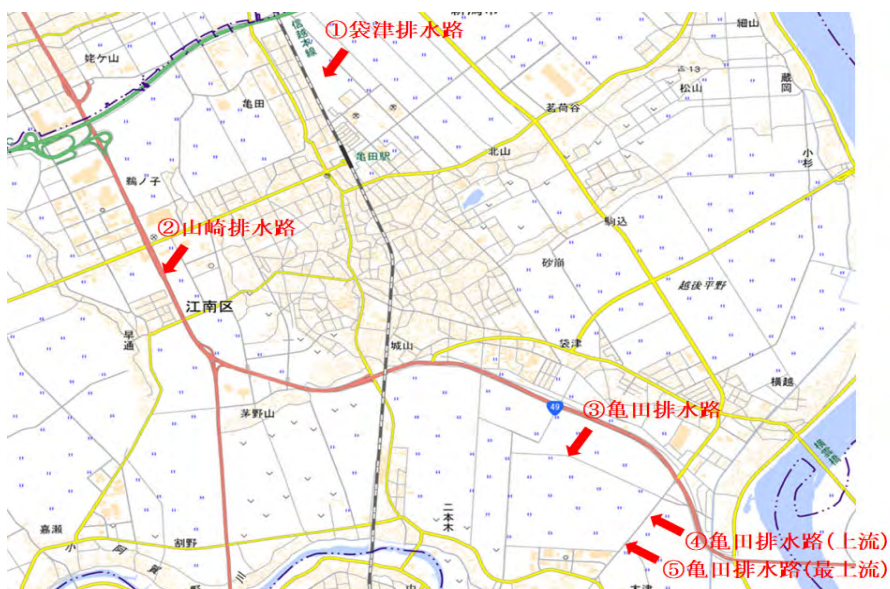


図 1.6.13 調査排水路位置図（出典：国土地理院ウェブサイト）

・測定箇所

矢板の測定箇所（断面）を図 1.6.14 と図 1.6.15 に示す。高さ方向に関しては気中部を 300mm ピッチとし、水位変動部以下は 50mm ピッチとして計測を実施する（図 1.6.16 参照）。

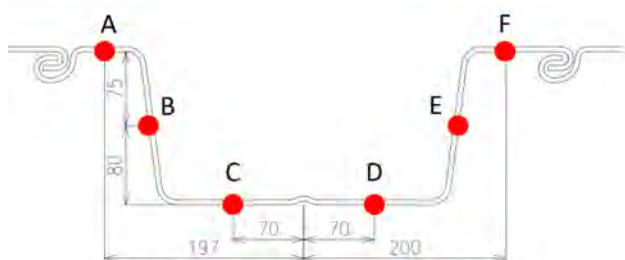


図 1.6.14 型式 E 板厚測定箇所

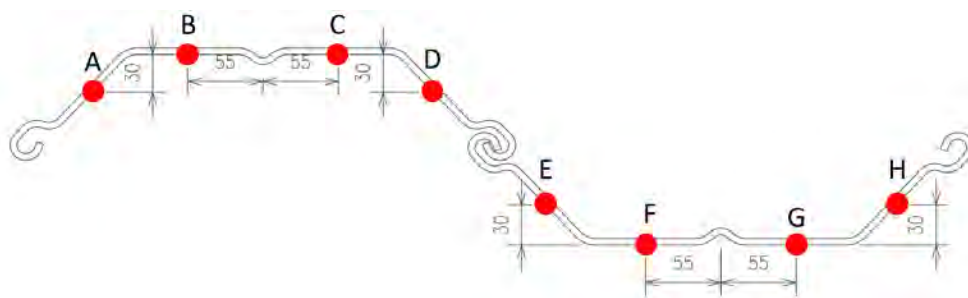


図 1.6.15 型式 C 板厚測定箇所

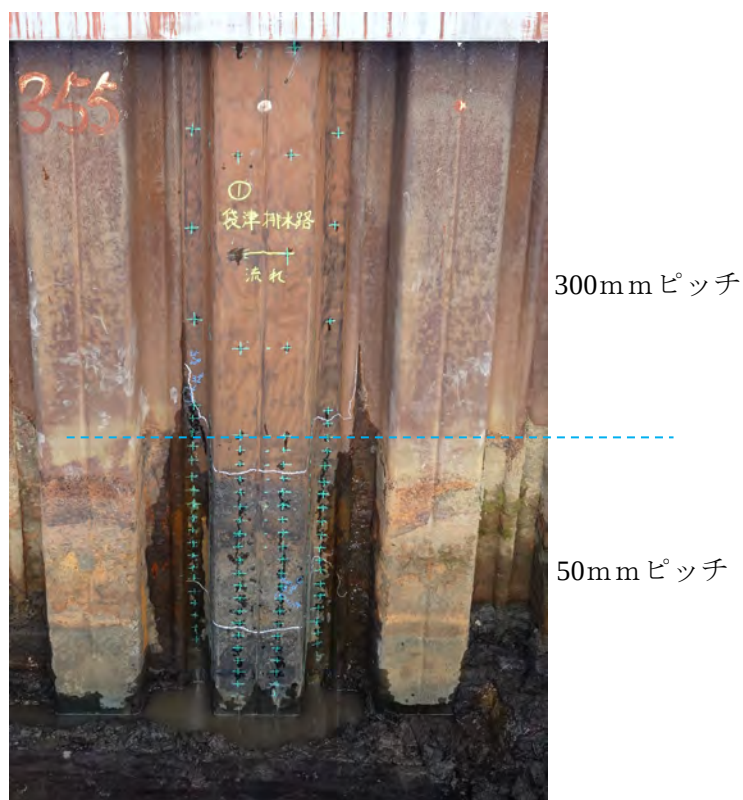


図 1.6.16 高さ方向計測箇所（袋津排水路例）

3) 排水路断面の健全度評価技術

①発生応力度算出方法の検討

矢板に発生する応力の照査に当たり、各現場条件から鋼矢板に作用する発生曲げモーメントを簡易的に算出する方法を検討した。また、照査位置についても検討を行った。

図 1.6.17 に自立式及び切梁式水路の矢板壁に発生する曲げモーメント分布を示す。図 1.6.17 の黒線は詳細設計により求められる発生曲げモーメントである。今回は詳細設計に至るまでの条件が整わない状況を想定し、簡易的な発生曲げモーメントとして図 1.6.17 の赤点線を求めることとした。具体手な算出方法は、自立式と切梁式の 2 タイプにおいて、壁高さ、地盤条件 (N 値と砂質土 or 粘性土) をパラメーターとして設計計算を行い、簡易発生曲げモーメントとの関係性を見出した。設計計算は土地改良事業計画設計基準及び運用・解説「水路工」(平成 26 年 3 月)に従い、背面地盤水位は壁高さの $2/3$ とし、全面水位は設計地盤面の高さとした。また、上載荷重は 10kN/m^2 とし、自立式の矢板頭部の許容変位を壁高さの $1/40$ とした。

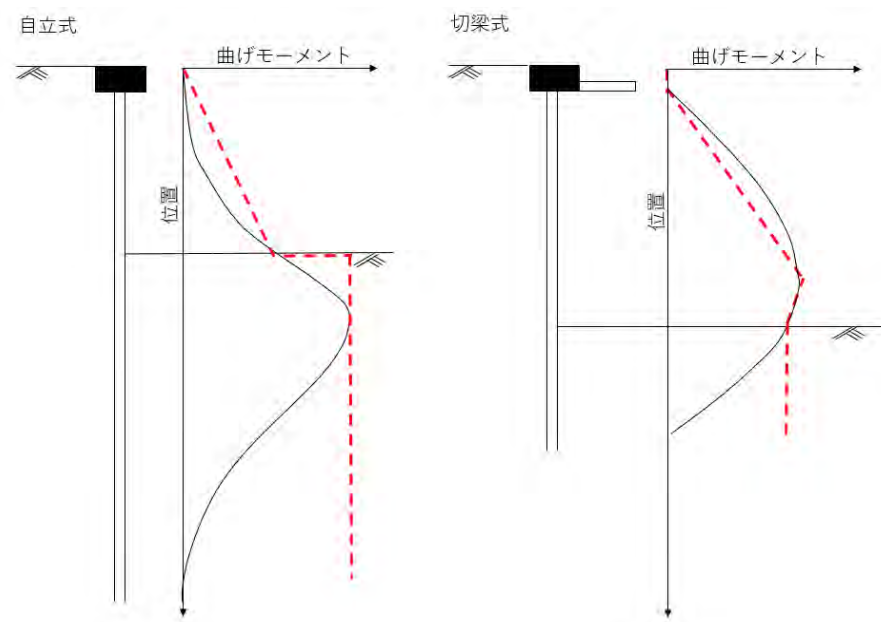


図 1.6.17 簡易曲げモーメント分布イメージ

②健全度指標との関連付け

調査実績のある土地改良調査管理事務所等にヒアリングを実施。健全度を含む調査結果の収集を試みた。

(2) 結果

1) 画像解析による既設鋼矢板の劣化度推定技術

①UAVの選定

空中 UAV 並びに水上 UAV について、飛行・航行テストの結果を表 1.6.2 に示す（空中 UAV は 3 機種のテストから得られた結果をとりまとめて記載）。

表 1.6.2 UAV 飛行結果

	空中 UAV	水上 UAV
自律・自動	可能であるが安定しない 自動設定に 2～3 時間必要	半自動可能
最小人員	3 人 (操縦者+画像確認者+安全確認者)	2 人 (操縦者+画像確認者)
撮影可能時間	10 分～20 分 (距離にして 200m でバッテリー交換が必要)	60 分 (距離にして 800m (両岸往復撮影 1.6km) をバッテリー交換無しで撮影)
切梁下撮影	撮影不可	撮影可能
市街地での撮影	申請必要	申請不要
天候条件	風雨の影響が大きい	風雨の影響が少ない

画像解析に適した鋼矢板正面からの撮影画像を取得するためには、切梁下から撮影が望ましく、また、鋼矢板水路は延長が長いと撮影可能時間が長い方がよい。以上を踏まえると、鋼矢板水路の画像取得には水上 UAV が適していると判断した。

②水路延長方向の調査間隔の検討

袋津排水路の板厚調査結果を表 1.6.3 と図 1.6.18～図 1.6.21 に示す。

表 1.6.3 袋津排水路板厚調査結果

測定箇所番号		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪		
距離(m)		0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000		
平均値		C-D平均											高さ別全平均	標準偏差
気中部	1300	4.75	4.91	4.94	4.93	4.96	4.87	4.58	4.86	5.02	5.07	4.59	4.86	0.15
水位変動部	1450	3.89	4.40	4.03	3.82	3.65	3.90	4.22	4.01	4.13	4.26	4.19	4.04	0.21
水位変動部	1550	4.03	3.73	3.83	3.76	3.90	3.89	3.86	3.65	3.80	3.83	4.07	3.85	0.12
水中部	1700	4.14	4.14	4.03	3.69	3.93	3.93	4.06	4.13	4.07	4.08	4.11	4.03	0.13

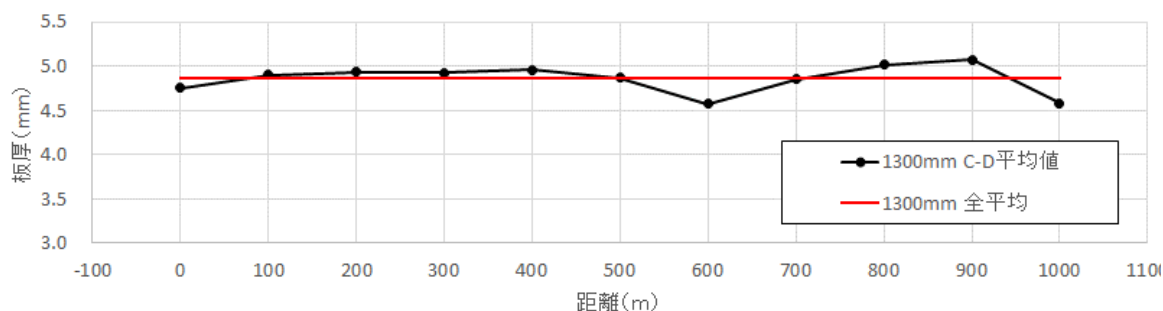


図 1.6.18 袋津排水路 距離位置-板厚関係 (高さ 1300mm)

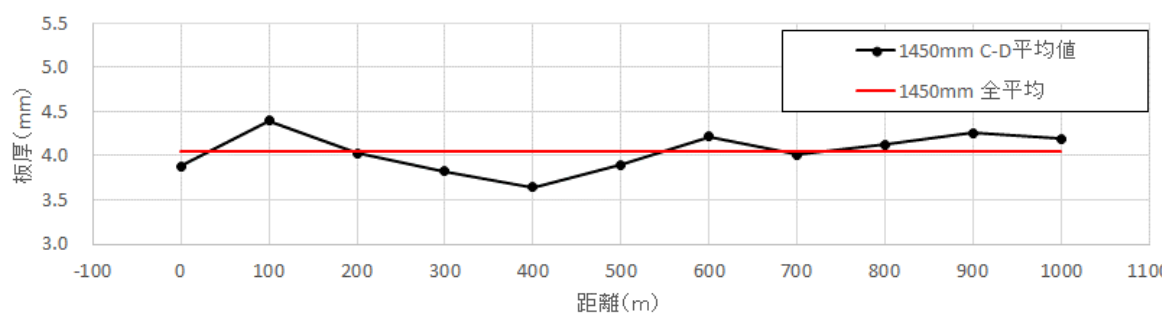


図 1.6.19 袋津排水路 距離位置-板厚関係 (高さ 1450mm)

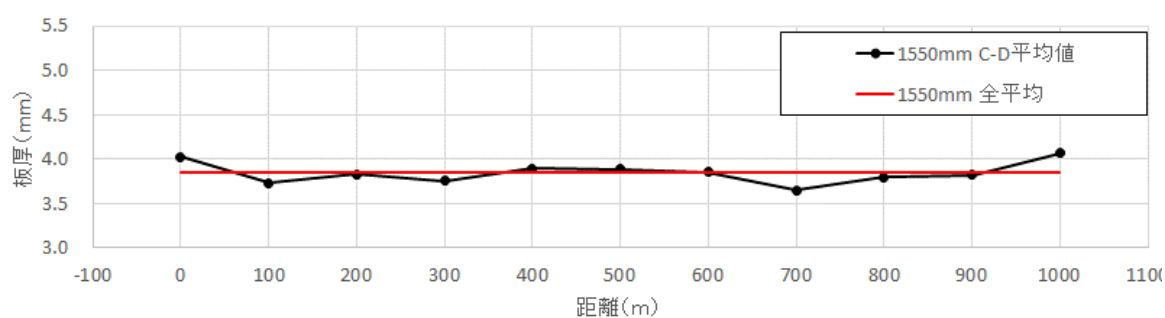


図 1.6.20 袋津排水路 距離位置-板厚関係 (高さ 1550mm)

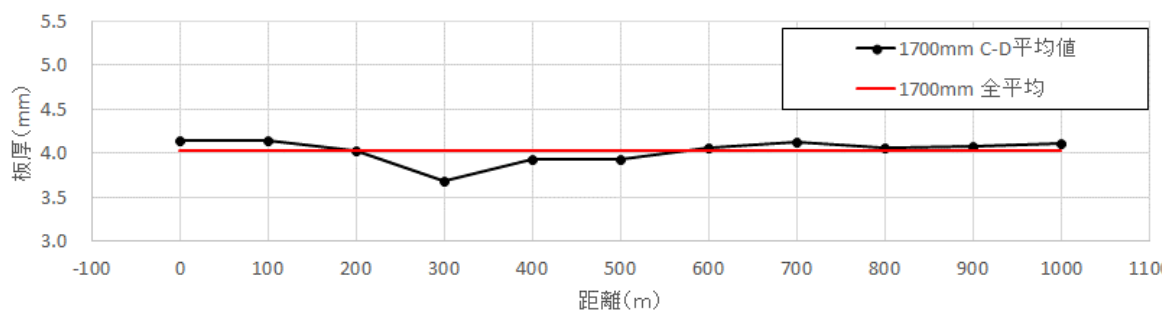


図 1.6.21 袋津排水路 距離位置-板厚関係 (高さ 1700mm)

亀田排水路上流部の板厚調査結果を表 1.6.4 と図 1.6.22～図 1.6.25 に示す。

表 1.6.4

測定箇所番号		①	②	③	④	⑤	⑥		
距離(m)		0	20	40	60	80	100		
平均値		C-D平均						高さ別全平均	標準偏差
気中部	1000	4.99	5.03	5.05	5.03	5.05	4.95	5.01	0.04
水位変動部	1200	3.34	3.27	3.54	3.42	3.78	3.84	3.53	0.21
水位変動部	1300	2.28	2.93	4.19	3.84	3.67	4.14	3.51	0.69
水中部	1400	3.33	4.49	4.46	4.15	4.71	4.32	4.24	0.44

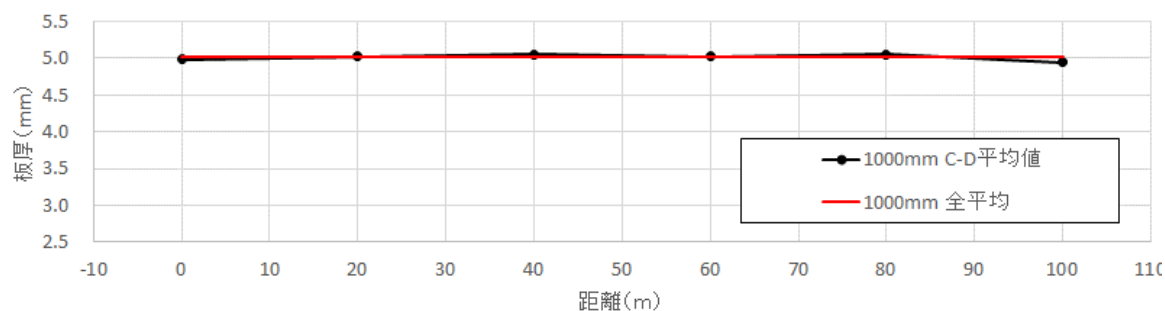


図 1.6.22 亀田排水路上流部 距離位置-板厚関係 (高さ 1000mm)

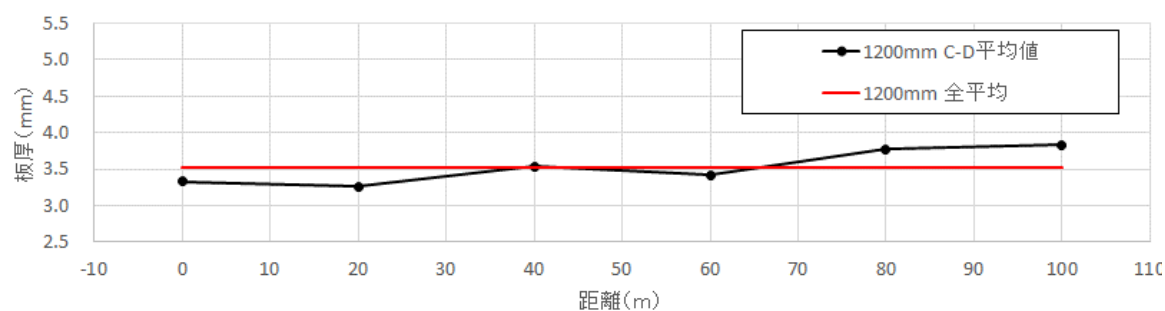


図 1.6.23 亀田排水路上流部 距離位置-板厚関係 (高さ 1200mm)

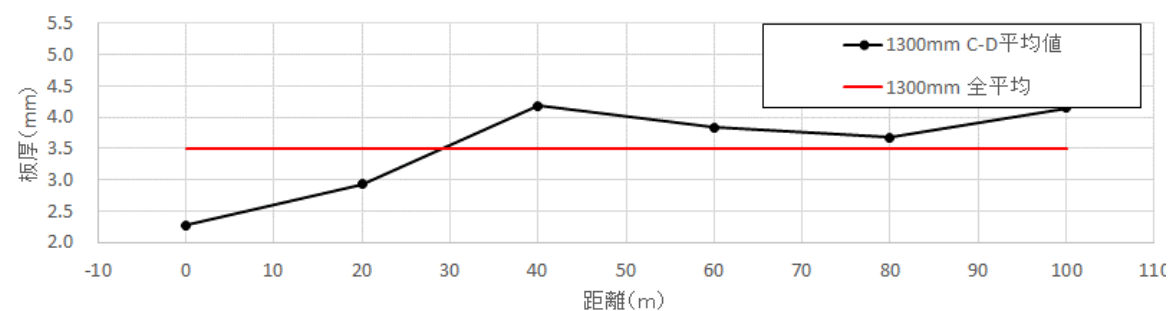


図 1.6.24 亀田排水路上流部 距離位置-板厚関係 (高さ 1300mm)

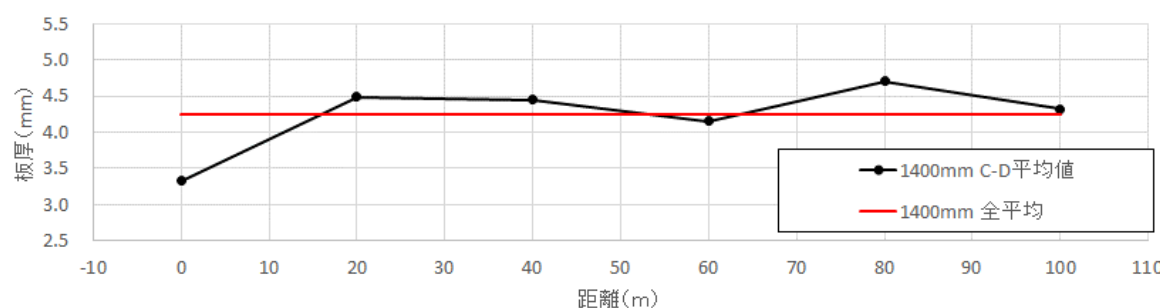


図 1.6.25 亀田排水路上流部 距離位置-板厚関係 (高さ 1400mm)

袋津排水路は、すべての高さ位置においてレンジは 1mm 以内であり、延長 1km 内で距離位置における板厚変動は小さかった。測定誤差等を考慮すれば、水路延長方向の腐食状況について有意な差は無いと言える。

また、亀田郷排水路上流に関して、袋津排水路よりも振れ幅が大きい。とくに測定箇所①の高さ 1300mm と 1400mm がその他距離の板厚と乖離している。これは、①の元板厚がその他の矢板と異なり、設置時期が異なると推察される。特殊な①を除けば、延長 100m 内で距離位置における板厚変動は小さく、水路延長方向の腐食状況について有意な差は無いと言える。

以上の結果から、特異点が無ければ調査区間は 1km 間隔で問題は無いと考えられる。

③画像解析技術の確立

開発技術の検証は、板厚計測を実施した亀田郷土地改良区管内の 2 排水路（袋津・亀田上流）で実施している。1.7 実証試験にて詳細を示す。

2) 鋼矢板の残存性能推定技術

①腐食した矢板の断面性能算出

試験により得られた荷重と中央変位量との関係を図 1.6.26 に、試験後の鋼矢板の変形状況を写真 1.6.10 に示す。最大耐力後、腐食の孔付近に座屈が生じたが、脆性破壊せず、塑性変形が進行する比較的粘り強い挙動を示した。鋼矢板に作用させた曲げモーメント M と曲率 ϕ との関係を解析結果と併せて図 1.6.27 に示す。本試験体は、矢板に腐食があり一様板厚でないことから、矢板に貼付したひずみゲージ $\varepsilon 1 \sim \varepsilon 4$ （図 1.6.3）のそれぞれの値を用いて曲率を算出し、その平均値を赤線で示した。解析値については、鋼矢板の板厚計測結果を FEM 解析のシェル要素に反映させ、 $\varepsilon 1 \sim \varepsilon 4$ と同じ位置の発生ひずみを基に ϕ を算出しその平均値を青線で示した。図 1.6.27 より、曲げモーメント 6 kN・m まではほぼ弾性挙動を示し、FEM 解析により腐食矢板の曲げ挙動を評価することが可能と考えられる。

本試験結果を用いて、板厚勾配がある腐食鋼矢板に対し曲げ挙動が一致するように一様板厚の算出を試みた。結果を図 1.6.27 に併記する。今回用いた腐食矢板は 2.4 mm（破線）の一様板厚で表現することができた。

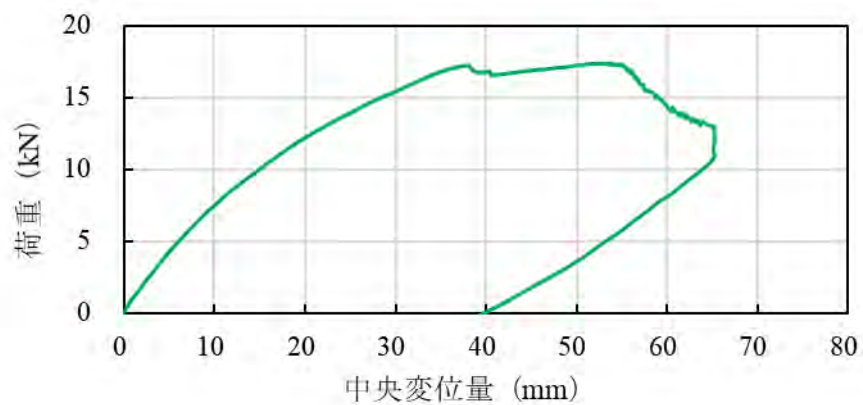


図 1.6.26 荷重-中央変位量関係

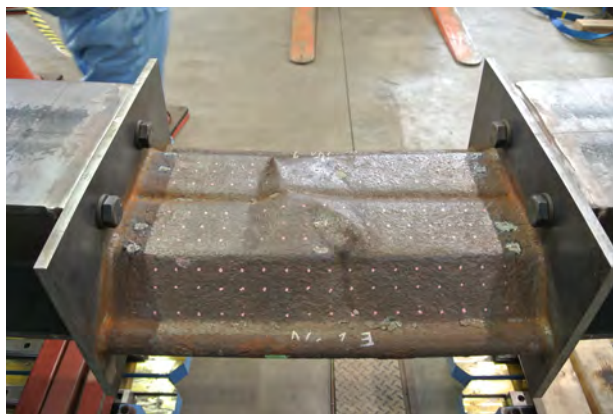


写真 1.6.10 試験後状況

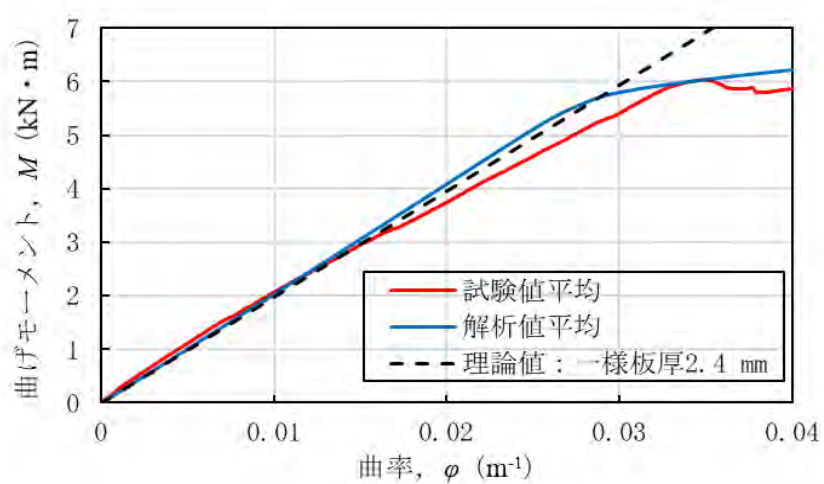


図 1.6.27 $M-\phi$ 関係

②腐食状況（板厚分布）を変えた解析

図 1.6.28 (CASE1～CASE3) 、図 1.6.29 (CASE4～CASE6) に解析結果と、各解析結果と同等の初期剛性を有する一様板厚の理論値を示す。

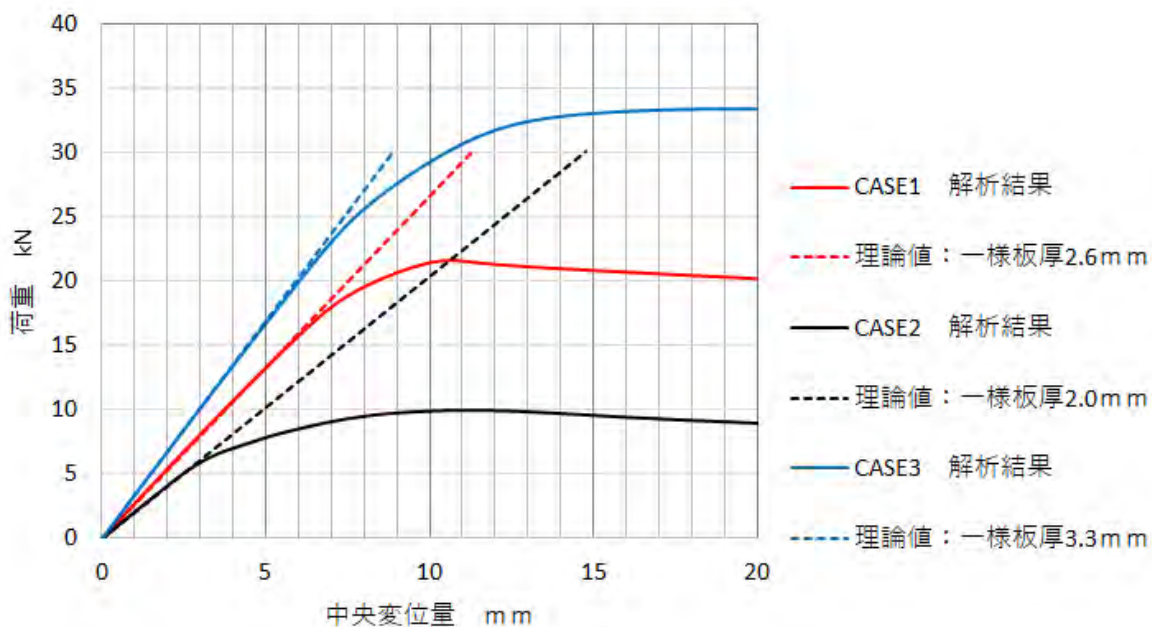


図 1.6.28 解析結果及び一様板厚 CASE 1 ～CASE3

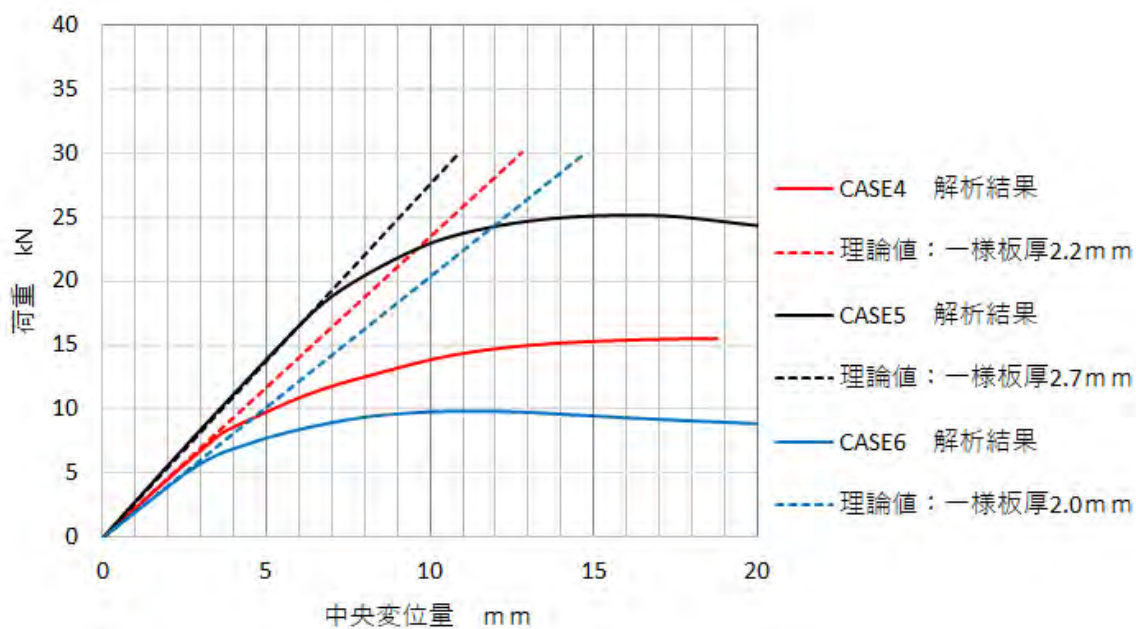


図 1.6.29 解析結果及び一様板厚 CASE4～CASE6

また、表 1.6.5 に各 CASE の最小板厚、板厚の全平均、最小板厚が存在する高さの平均（行平均）、一様板厚換算値を示す。

表 1.6.5 一様板厚と各種板厚

単位 (mm)	最小板厚	全平均	最小板厚が存在 する高さの平均	一様板厚
CASE1	1.50	2.85	2.00	2.60
CASE2	0.50	2.36	1.00	2.00
CASE3	2.50	3.27	3.00	3.30
CASE4	0.50	2.35	1.50	2.20
CASE5	2.00	2.94	2.33	2.70
CASE6	0.50	2.21	1.00	2.00

表 1.6.5 より、腐食した矢板を一様板厚に換算する場合、矢板の最小板厚で評価すると大きく過小評価することになり、全平均で評価すると過大評価になることが判った。一方、最小板厚が存在する高さの平均を用いると、大きく過小評価することがなく、かつ安全側の設計をすることができる。

以上より、画像解析で得られた水位変動部の板厚分布から等価な剛性を有する一様板厚を算定する際、最小板厚が存在する高さの平均板厚を算出し、これを水位変動部の一様板厚とすることとする。

③水中部及び土中部の板厚推定

次頁以降に板厚の計測結果を示す。なお、矢板継手部から腐食が進行している箇所は気中部②としている。また、土中において、堆積した土と思われる部分を「へどろ部」、その下の比較的硬い部分を「土中部」と分類して計測を行ったが、両者に大きな違いは観察されなかったため、「へどろ部」も「土中部」として扱うこととする。板厚の標準偏差を比較すると「土中部」「気中部」「水中部」「水位変動部」「気中部②」の順に大きくなっている。これらの結果は環境条件を踏まえると妥当と言える。

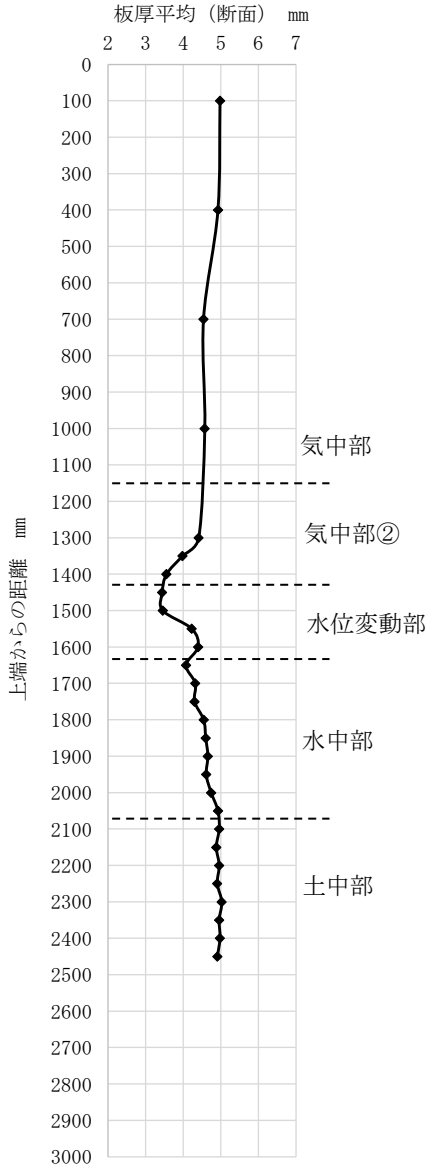
「土中部」と「気中部」の板厚平均値を比較するとほぼ等しい。また、水位変動部の最下段の板厚平均が水中部の板厚平均値とほぼ等しいことが判る。以上より、画像解析で算出される気中部の平均板厚を土中部の平均板厚とし、水位変動部の最下段の平均板厚を水中部の平均板厚として健全度の算出を行うこととする。

・袋津排水路

段数	上端からの距離	部位	測定値					
			上流			下流		
			A	B	C	D	E	F
1段目	100	気中部	5.08	4.87	5.03	4.74	5.10	5.07
2段目	400		4.90	5.10	4.93	4.84	5.10	4.69
3段目	700		5.01	4.48	4.29	4.57	4.36	4.54
4段目	1000		4.39	4.58	4.55	4.71	4.77	4.45
5段目	1300	気中部②	2.13	4.77	4.86	5.01	5.04	4.67
6段目	1350		2.34	4.84	4.23	4.73	3.06	4.70
7段目	1400		2.80	3.62	5.08	4.98	1.83	3.03
8段目	1450	水位変動部	2.84	3.51	3.89	4.16	3.30	2.95
9段目	1500		2.92	4.07	3.15	3.40	3.92	3.28
10段目	1550		4.29	4.67	3.81	3.85	4.28	4.48
11段目	1600		4.69	4.63	4.35	4.45	4.07	4.20
12段目	1650	水中部	2.88	4.52	3.82	4.05	4.61	4.58
13段目	1700		4.55	4.20	3.97	4.08	4.73	4.42
14段目	1750		4.49	4.29	3.99	4.68	4.32	4.05
15段目	1800		4.75	4.74	4.68	4.71	4.57	3.83
16段目	1850		4.72	4.57	4.57	4.89	4.38	4.47
17段目	1900		4.15	4.81	4.88	4.80	4.73	4.58
18段目	1950		4.57	4.94	4.91	5.02	4.30	3.95
19段目	2000		4.92	4.83	4.87	4.58	4.20	5.07
20段目	2050	へどろ部	4.92	4.86	5.02	5.04	4.69	5.03
21段目	2100		5.06	5.05	5.08	5.04	4.66	4.87
22段目	2150		5.02	4.82	5.02	5.03	4.83	4.58
23段目	2200	土中部	4.97	4.96	5.07	5.02	4.73	5.01
24段目	2250		5.07	5.02	5.06	5.02	4.29	4.99
25段目	2300		5.07	5.00	5.02	5.02	4.97	5.08
26段目	2350		4.99	5.05	5.07	5.01	4.98	4.66
27段目	2400		4.91	4.95	5.05	5.04	4.95	4.98
28段目	2450		5.01	4.61	5.05	5.07	4.74	4.99

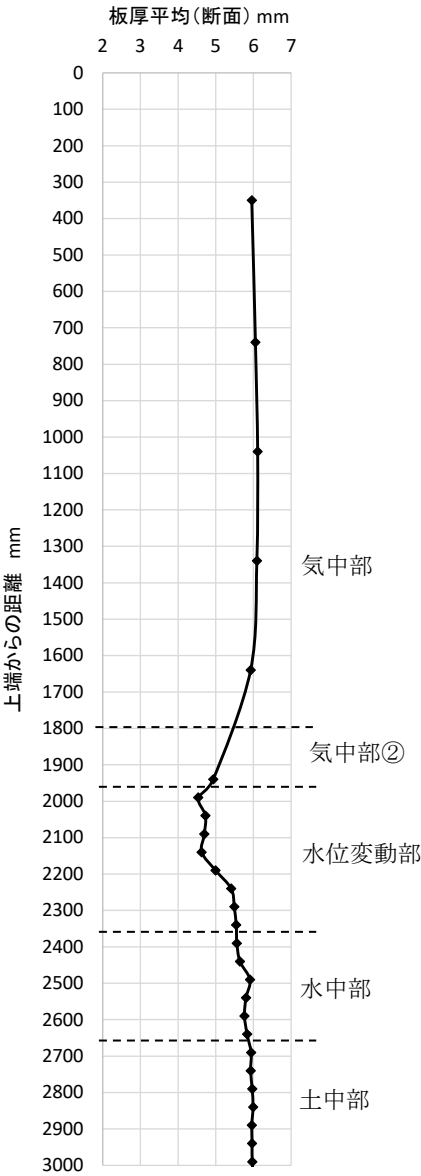
断面平均	全平均	標準偏差
4.98	4.76	0.26
4.93		
4.54		
4.58		
4.41	3.98	1.11
3.98		
3.56		
3.44	3.88	0.57
3.46		
4.23		
4.40		
4.08	4.53	0.40
4.33		
4.30		
4.55		
4.60		
4.66		
4.62		
4.75		
4.93	4.92	0.16
4.96		
4.88		
4.96	4.96	0.16
4.91		
5.03		
4.96		
4.98		
4.91		

へどろ部+土中部	
全平均	標準偏差
4.95	0.16



・山崎排水路

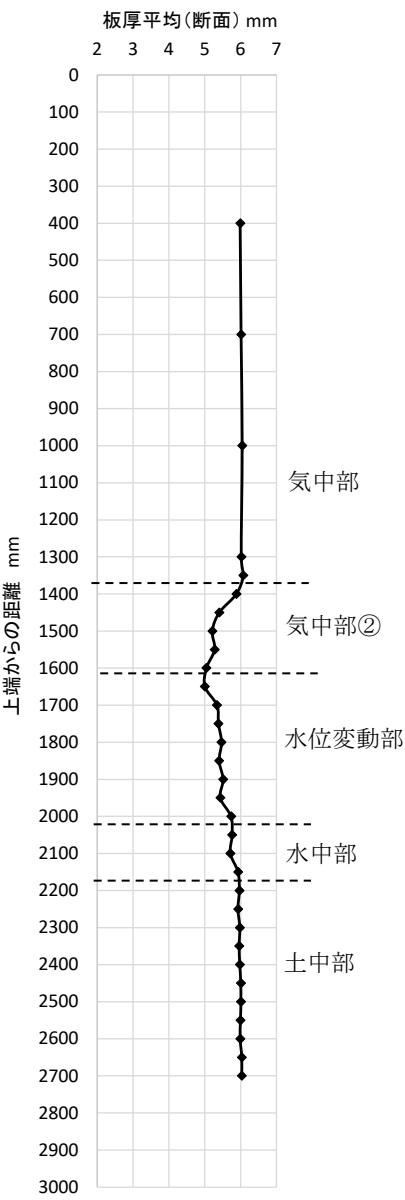
単位：mm											
段数	上端からの距離	部位	測定値					断面平均			
			下流				上流	全平均	標準偏差		
			A	B	C	D	E	F			
1段目	350	気中部	5.94	5.95	5.96	6.03	6.13	5.72	5.96	6.03	0.19
2段目	740		6.15	6.13	6.12	5.90	5.93	6.09	6.05		
3段目	1040		6.12	6.17	6.09	6.10	6.17	6.02	6.11		
4段目	1340		6.05	6.15	6.12	6.11	6.11	6.00	6.09		
5段目	1640		6.14	6.12	6.02	6.05	6.06	5.16	5.93		
6段目	1940	気中部②	4.10	4.24	6.18	6.19	5.00	3.87	4.93	4.93	0.95
7段目	1990	水位変動部	4.01	4.21	4.82	5.10	5.11	3.95	4.53	5.00	0.52
8段目	2040		4.22	4.29	5.08	5.33	5.01	4.42	4.73		
9段目	2090		4.44	4.21	5.07	5.14	4.94	4.36	4.69		
10段目	2140		4.74	4.16	4.82	4.81	4.66	4.56	4.63		
11段目	2190		5.63	4.99	4.60	4.59	4.87	5.28	4.99		
12段目	2240		5.68	5.10	5.14	5.25	5.77	5.52	5.41		
13段目	2290		5.36	5.54	5.12	5.28	5.81	5.83	5.49		
14段目	2340		5.41	5.65	5.87	5.75	5.39	5.18	5.54		
15段目	2390	水中部	5.65	5.24	5.30	5.50	5.91	5.76	5.56	5.75	0.21
16段目	2440		5.38	5.69	5.62	5.84	5.91	5.41	5.64		
17段目	2490		5.82	5.90	5.89	5.96	5.94	5.95	5.91		
18段目	2540		5.30	6.04	5.80	5.78	5.97	5.92	5.80		
19段目	2590		5.57	5.67	5.86	5.75	5.82	5.90	5.76		
20段目	2640	へどろ部	5.74	5.82	5.87	5.97	5.76	5.84	5.83	5.96	0.10
21段目	2690		5.76	6.00	6.00	5.98	5.99	5.90	5.94		
22段目	2740		5.71	6.05	5.97	6.00	5.92	5.91	5.93		
23段目	2790		5.75	6.07	5.98	6.03	6.03	5.94	5.97		
24段目	2840	土中部	5.85	6.09	6.01	6.01	5.98	6.00	5.99	5.99	0.07
25段目	2890		5.83	6.01	6.08	6.03	5.92	5.87	5.96		
26段目	2940		5.99	6.03	5.92	5.97	5.92	5.95	5.96		
27段目	2990		6.01	6.02	6.00	5.95	5.93	5.89	5.97		
28段目	3040		6.03	6.09	6.01	6.08	5.89	6.00	6.02		
29段目	3090		6.09	6.07	6.09	6.11	6.07	5.98	6.07		



・亀田排水路

単位：mm

段数	上端からの距離	部位	測定値					断面平均					全平均	標準偏差
			下流				上流							
			A	B	C	D	E	F						
1段目	400	気中部	6.13	5.78	5.99	5.98	6.10	5.95	5.99			6.03	0.06	
2段目	700		5.99	6.04	6.03	6.04	5.97	6.03	6.02					
3段目	1000		6.07	6.05	6.03	6.03	6.06	6.03	6.05					
4段目	1300		6.05	6.00	6.01	6.04	6.04	5.97	6.02					
5段目	1350		6.12	6.09	6.07	6.06	6.05	6.07	6.08					
6段目	1400	気中部②	6.09	6.07	6.08	6.09	6.09	4.88	5.88			5.36	0.70	
7段目	1450		4.85	5.55	6.10	6.10	5.17	4.67	5.41					
8段目	1500		4.90	4.30	6.05	6.10	5.50	4.41	5.21					
9段目	1550		5.15	4.71	6.12	6.09	5.10	4.49	5.28					
10段目	1600		4.92	4.04	6.12	5.99	4.45	4.75	5.05					
11段目	1650	水位変動部	5.06	3.97	5.80	6.04	4.56	4.59	5.00			5.41	0.39	
12段目	1700		5.15	4.79	5.54	5.93	5.48	5.16	5.34					
13段目	1750		4.92	5.82	5.22	5.55	5.50	5.29	5.38					
14段目	1800		5.49	5.26	5.61	5.81	5.24	5.40	5.47					
15段目	1850		5.41	5.15	5.35	5.50	5.19	5.81	5.40					
16段目	1900		5.74	5.57	5.39	5.27	5.51	5.59	5.51					
17段目	1950		5.37	5.03	5.37	5.32	5.70	5.81	5.43					
18段目	2000		5.68	5.75	5.66	5.50	5.95	5.87	5.74					
19段目	2050	水中部	5.56	5.89	5.84	5.75	5.69	5.85	5.76			5.80	0.14	
20段目	2100		5.74	5.62	5.77	5.74	5.91	5.51	5.72					
21段目	2150		5.94	5.99	5.95	5.92	5.90	5.88	5.93					
22段目	2200	へどろ部	5.96	6.02	6.00	5.99	5.84	5.98	5.97			5.96	0.06	
23段目	2250		5.99	5.97	5.99	5.96	5.68	5.98	5.93					
24段目	2300		5.98	6.00	5.98	5.96	6.02	5.94	5.98					
25段目	2350		5.99	5.99	5.98	5.94	5.97	5.89	5.96					
26段目	2400		5.98	6.02	5.94	5.98	6.01	5.94	5.98					
27段目	2450	土中部	5.96	6.05	6.01	6.02	5.99	6.01	6.01			6.01	0.05	
28段目	2500		5.90	5.98	6.07	6.00	6.09	6.02	6.01					
29段目	2550		6.07	6.01	6.00	5.91	6.05	5.95	6.00					
30段目	2600		5.99	6.03	6.00	6.02	6.00	5.90	5.99					
31段目	2650		6.08	6.03	6.10	6.04	6.00	5.96	6.04					
32段目	2700		6.07	6.04	6.08	6.02	6.01	5.97	6.03					

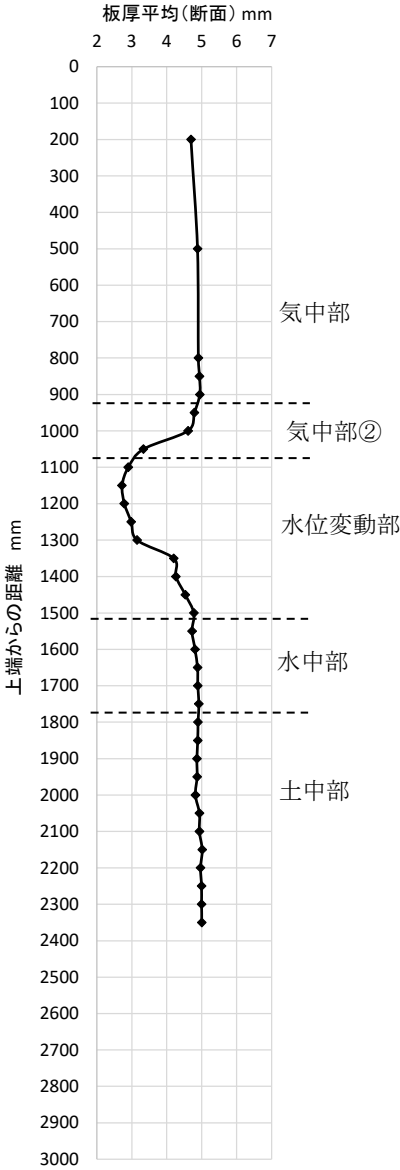


・亀田排水路(上流)

単位：mm

段数	上端からの距離	部位	測定値					
			上流					下流
			A	B	C	D	E	F
1段目	200	気中部	4.98	4.98	4.69	4.73	4.11	4.68
2段目	500		4.98	4.89	4.88	4.91	4.78	4.85
3段目	800		4.85	4.91	4.97	4.89	5.01	4.82
4段目	850		4.96	4.94	4.92	4.90	4.97	4.95
5段目	900		4.93	4.87	4.99	4.93	5.01	4.97
6段目	950	気中部②	4.95	4.87	4.95	4.99	3.99	5.02
7段目	1000		4.99	4.96	5.01	5.04	3.46	4.20
8段目	1050		2.92	1.66	5.06	5.05	2.82	2.49
9段目	1100	水位変動部	2.88	1.58	4.95	3.59	2.88	1.51
10段目	1150		2.20	2.54	3.39	3.26	2.46	2.47
11段目	1200		2.75	1.90	3.23	3.30	2.95	2.59
12段目	1250		3.38	2.80	3.63	1.49	3.59	3.00
13段目	1300		3.66	2.43	4.10	1.76	3.21	3.76
14段目	1350		4.04	4.38	4.16	4.37	3.79	4.47
15段目	1400		4.23	3.25	4.40	4.58	4.51	4.62
16段目	1450		4.63	4.43	4.70	4.82	4.44	4.18
17段目	1500		4.88	4.96	4.79	4.48	4.81	4.76
18段目	1550		4.81	4.79	4.66	4.86	4.77	4.46
19段目	1600	水中部	4.88	4.84	4.64	4.74	4.84	4.93
20段目	1650		4.87	4.94	4.87	4.86	4.91	4.85
21段目	1700		4.84	4.94	4.85	4.84	5.01	4.87
22段目	1750		4.88	4.95	4.90	4.90	5.01	4.90
23段目	1800	へどろ部	4.85	4.89	4.90	4.92	4.91	4.91
24段目	1850		4.86	4.83	4.95	4.84	4.89	4.97
25段目	1900		4.97	4.92	4.44	4.91	4.97	4.98
26段目	1950		4.96	5.01	4.46	4.92	5.09	4.79
27段目	2000	土中部	4.96	5.08	4.60	4.52	4.88	4.89
28段目	2050		5.05	5.05	4.70	4.90	4.96	4.97
29段目	2100		4.96	4.70	4.98	5.05	5.05	4.88
30段目	2150		5.02	5.05	5.07	5.01	5.09	4.86
31段目	2200		4.97	4.96	4.86	5.00	5.02	5.01
32段目	2250		4.92	5.01	4.95	5.10	5.06	4.94
33段目	2300		5.06	5.07	4.75	5.02	5.04	5.06
34段目	2350		5.09	5.01	5.01	4.96	4.96	5.00

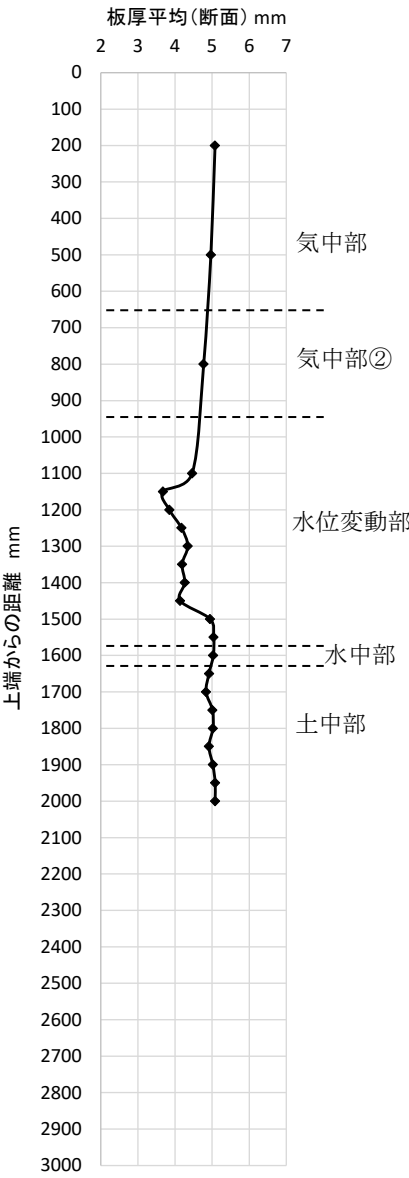
断面平均	全平均	標準偏差		
4.70	4.88	0.17		
4.88				
4.91				
4.94				
4.95				
4.80	4.25	1.06		
4.61				
3.33				
2.90	3.59	1.00		
2.72				
2.79				
2.98				
3.15				
4.20				
4.27				
4.53	4.85	0.11		
4.78				
4.73				
4.81				
4.88				
4.89				
4.92				
4.90	4.88	0.15		
4.89				
4.87				
4.87				
4.82				
4.94	4.99	0.09		
4.94				
5.02				
4.97				
5.00				
5.00				
5.01			4.93	0.14



・亀田排水路(最上流)

段数	上端からの距離	部位	単位 : mm							
			測定値 (上流凸側)				測定値 (下流凹側)			
			A	B	C	D	E	F	G	H
1段目	200	気中部	5.02	4.87	5.07	5.10	5.16	5.16	5.10	5.21
2段目	500		5.05	5.11	5.10	4.74	5.21	4.72	4.91	4.86
3段目	800	気中部②	5.07	5.06	5.22	4.53	3.74	5.08	5.00	4.64
4段目	1100	水位変動部	5.15	4.56	4.76	4.26	4.06	3.83	5.31	4.96
5段目	1150		4.28	4.52	4.71	2.65	4.59	3.39	2.18	2.20
6段目	1200		4.12	3.97	3.97	2.96	4.68	3.66	3.84	4.84
7段目	1250		2.30	4.62	4.66	4.26	4.05	3.24	4.22	4.22
8段目	1300		4.30	4.44	4.64	4.21	4.44	4.20	4.14	4.00
9段目	1350		4.49	4.39	4.69	4.56	4.23	3.69	3.59	3.74
10段目	1400		4.63	4.70	4.45	3.79	4.50	3.98	4.16	3.63
11段目	1450		3.98	4.32	4.29	3.67	4.46	3.97	4.13	3.74
12段目	1500		4.92	4.88	4.89	4.99	4.87	5.09	4.95	4.77
13段目	1550		5.04	5.07	5.09	5.00	5.08	5.00	5.01	5.12
14段目	1600	水中部	5.06	5.03	5.08	5.11	5.04	4.91	5.01	5.10
15段目	1650		5.07	5.01	5.00	5.00	5.05	4.46	4.98	5.06
16段目	1700	へどろ部	5.06	5.02	4.61	4.50	5.06	5.04	4.79	5.09
17段目	1750		5.04	5.07	5.03	4.85	5.05	5.06	5.00	5.08
18段目	1800	土中部	5.22	5.05	5.01	5.02	5.02	4.96	5.07	5.08
19段目	1850		4.38	4.99	4.94	4.38	5.05	5.05	5.07	5.09
20段目	1900		4.46	5.02	4.98	4.92	5.04	5.11	5.04	5.03
21段目	1950		5.02	5.18	4.98	5.07	5.10	5.06	5.10	5.05
22段目	2000		5.03	5.07	5.08	5.02	5.09	5.11	5.11	5.09
23段目	2050		土中からの水の噴出し及び掘出し深さが深い為、検査ポイント削減							
24段目	2100									

断面平均	全平均	標準偏差			
5.08	5.02	0.15			
4.97					
4.77	4.77	0.46			
4.46	4.31	0.67			
3.67					
3.85					
4.18					
4.35					
4.19					
4.26					
4.14					
4.95					
5.04					へどろ部+土中部
5.03	5.03	0.06	全平均	標準偏差	
4.92	4.95	0.16	4.98	0.18	
4.84					
5.01					
5.02	5.02	0.20			
4.91					
5.02					
5.08					
5.08					



3) 排水路断面の健全度評価技術

①発生応力度算出方法の検討

自立式と切梁式の2タイプにおいて、壁高さ、地盤条件（N値と砂質土or粘性土）、をパラメータとする36ケースの設計計算を行った。これらの結果から矢板の型式、構造タイプ（自立式or切梁式）、地盤条件（N値と砂質土or粘性土）から簡易的に発生曲げモーメント分布を算出した。また、既設の鋼矢板は腐食環境毎に板厚が異なるため、図1.6.30の赤点で示す各環境高さ位置において発生する最大の曲げモーメントで照査を行うこととした。

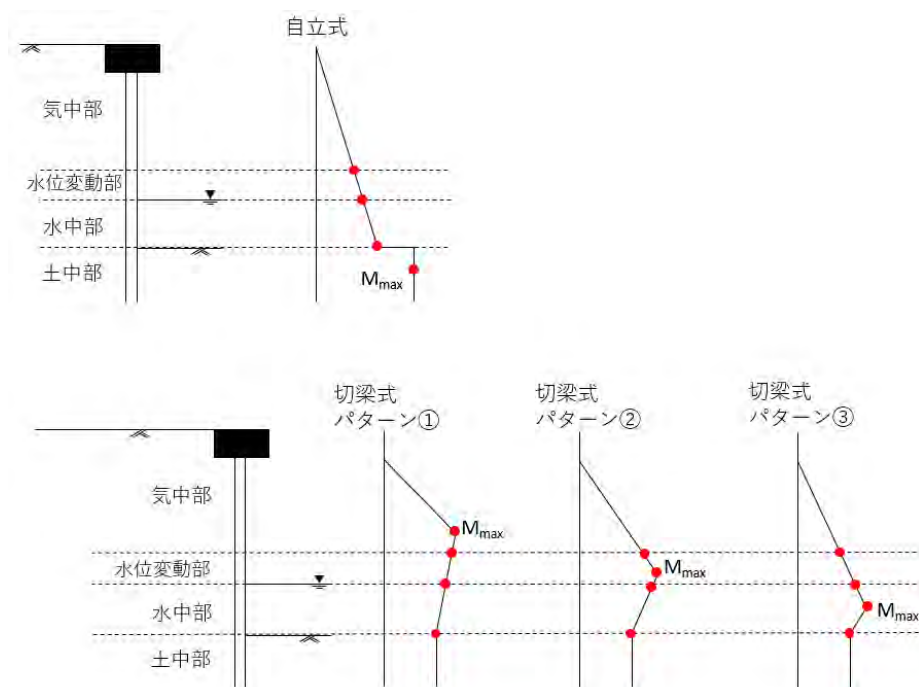


図 1.6.30 発生応力度照査位置（赤点箇所）

②健全度指標との関連付け

過去に健全度判定された調査事例を調べたが、板厚、現場状況、健全度が整理された調査結果を入手することができず、発生応力度と、現在の調査の健全度との関係性を見出す事ができなかった。そこで表1.6.6に示す鋼矢板の部材（SS400）の長期許容応力度（140 N/mm²）、短期許容応力度（210 N/mm²）、JIS 規格降伏応力度（245 N/mm²）を閾値とすることとした。

表 1.6.6 健全度判定閾値

判定基準 (N/mm ²)	健全度	施設の状態
$\sigma \leq 140$	S-5	変状がほとんど認められない状態
$140 < \sigma \leq 210$	S-4	軽微な変状が認められる状態
$210 < \sigma \leq 245$	S-3	変状が顕著に認められる状態
$245 < \sigma$	S-2	施設の構造安定性に影響を及ぼす変状が認められる状態
顕著な開孔	S-1	施設の構造安定性に重大な影響を及ぼす変状が複数認められる状態

(2) 課題

① 画像解析による既設鋼矢板の劣化度推定技術

画像解析精度は、水路の設置位置、計測時間、太陽高度および気象条件が影響する。開発技術の検証作業では異時点間の比較を空間統計指標を用いて行った。その結果、計測時間帯による特徴量の相違が確認された。このことから、最適な計測条件の把握が今後必要である。

現段階では水上 UAV による撮影が有用であると判断したが、通信衛星を含む通信技術や航空技術の発達により空中 UAV の技術は日々進歩しており、今後、より長い時間、安定した飛行を可能とする空中 UAV が開発される可能性がある。また、今回の事業では水中の板厚は水位変動部の板厚から推定したが、水中 UAV の開発も進められており、画像解析に適した水中画像の取得も今後可能となる可能性がある。UAV の技術発展に注視し、より画像取得に適した UAV があれば適用を検討する必要がある。

② 鋼矢板の残存性能推定技術

矢板の腐食状況は、その腐食環境により大きく異なるため、今回の残存性能推定方法から逸脱する腐食状況も存在する可能性がある。データベースを運用していく中でそのようなケースが発生した場合は、推定方法を追加検証する必要がある。

③ 排水路断面の健全度評価技術

今回、健全度の閾値として、矢板に発生する応力に着目し、長期許容応力度 (140 N/mm^2)、短期許容応力度 (210 N/mm^2)、規格降伏応力度 (245 N/mm^2) とした。データベースを運用していく中で、健全度判定については、実状とすり合わせながら適宜閾値の見直しが必要であると考ええる。

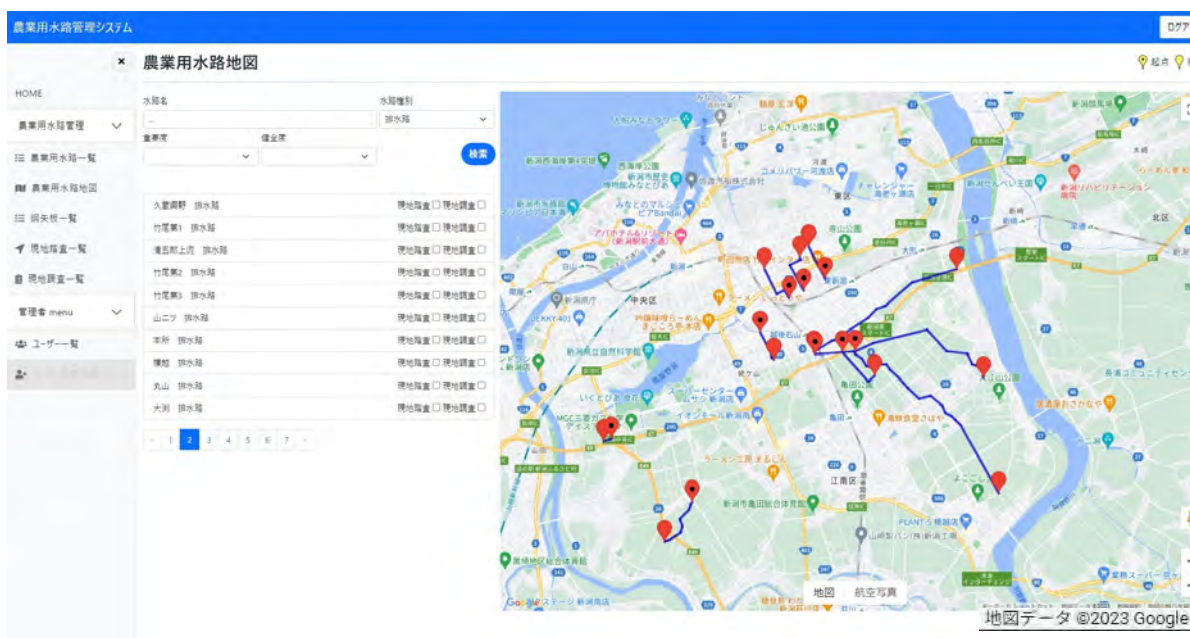
1. 6. 2 排水路延長の健全度を包括管理するデータベースシステムの開発

(1) 概要

健全度評価の過程で得られた画像データや画像解析結果、健全度評価結果等に加え、別途行われる現地での詳細な点検調査結果データ等を水路延長にわたり包括的に管理するデータベースシステムを構築する。

(2) 結果

ブラウザ上で動作するデータベースを構築した。地図上で管理できるシステムとしており、亀田郷土地改良区をモデル地区として、同管内の排水路をインプットしている。調査の入力項目は「農業水利施設の機能保全に関する調査計画の参考資料(案)〔開水路編〕ポケット版(柵渠・矢板型水路編)平成30年3月」を参考とした。撮影した可視画像と赤外線画像を用いて画像解析を行い、自動的に健全度を判定する機能を有する。画像解析によって算出される健全度を現地踏査結果に反映し、健全度に問題があるものは次ステップの現地調査で詳細な調査を行う流れとした。さらに施設の重要度を鑑みて、経過観察・補修・補強・更新の判断を行うこととする。また、調査結果はCSVでアウトプットすることができる。



(3) 課題

データベースを運用する中で、ユーザーからの改善要望が想定される。より使いやすいデータベースを目指す。

1. 7 実証試験（現場適用）の概要、結果、課題等

(1) 概要

画像解析の実証試験として、実水路（新潟県亀田郷土地改良区、袋津排水路・亀田排水路上流）にて異時点で可視画像と赤外線画像を取得して各ケースで板厚の推定を行った。板厚の推定方法を下記①～⑥に示す。推定した板厚と超音波板厚計での計測結果との比較を実施した。

- ①可視画像と赤外線画像のマッチング
- ②スーパーピクセルによるセグメンテーション
- ③各セルの特徴量から主成分分析と k-means 法によるクラスタリング
- ④環境ノイズと評価対象である鋼矢板の分類
- ⑤計測日の気象条件からの熱収支シュミレーション
- ⑥赤外線画像計測結果と熱収支シュミレーションから板厚の推定

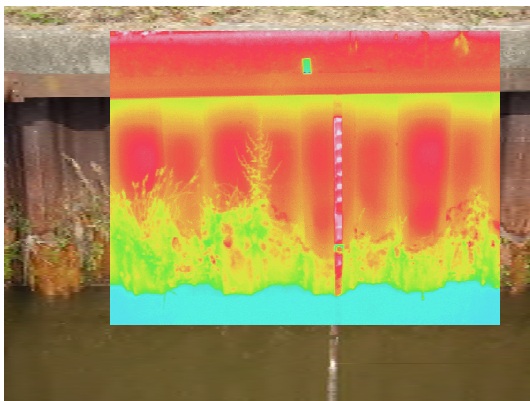
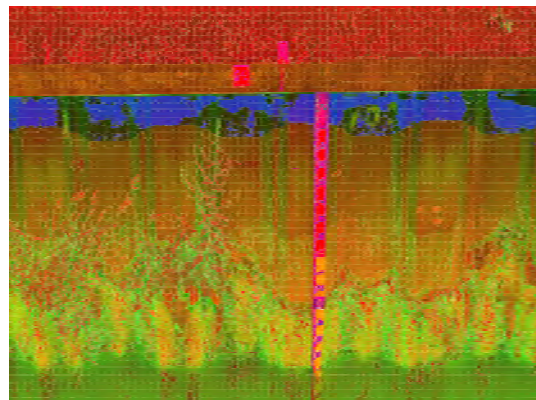
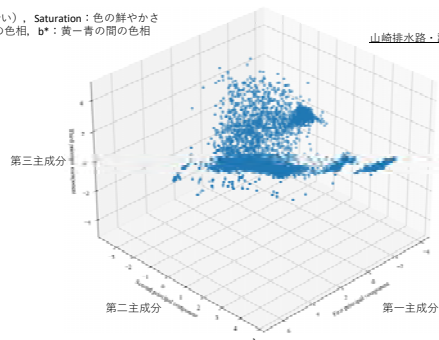


写真1.7.1 画像マッピング

写真1.7.2 スーパーピクセル
によるセグメンテーション

主成分分析結果・・・Blue, Green, Red, Hue, Saturation, a*, b*, IR（温度）の9変数に対して標準化後、主成分分析による次元削減

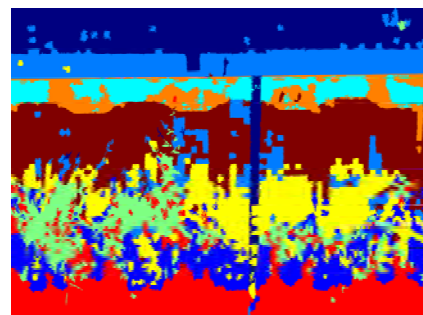
* Hue：色相（色合い）、Saturation：色の鮮やかさ
* a*：赤～緑の間の色相、b*：黄～青の間の色相



山崎排水路・護岸No.26 (2021/6/9, 8時撮影)

	第一主成分	第二主成分	第三主成分	第四主成分
寄与率	0.45	0.27	0.15	0.08

※第7主成分まであり



k-means法による自動クラスタリング結果

■：気中部分 ■：干満帯（錯層） ■：干満帯（凹凸部）
■：植生 ■：水
■：陰 ■：笠コン ■：H鋼

図1.7.1 主成分分析とk-means法によるクラスタリング

(2) 実証試験の結果

袋津排水路の実測値と推定値の平均値の差は 0.5mm 以下となり、それらの標準偏差の差も小さく良い一致を見せた。一方で亀田排水路上流では実測値と推定値の平均値の差は 1.0mm 程度となった。また、推定値の標準偏差は実測値と比べて大きくなった。

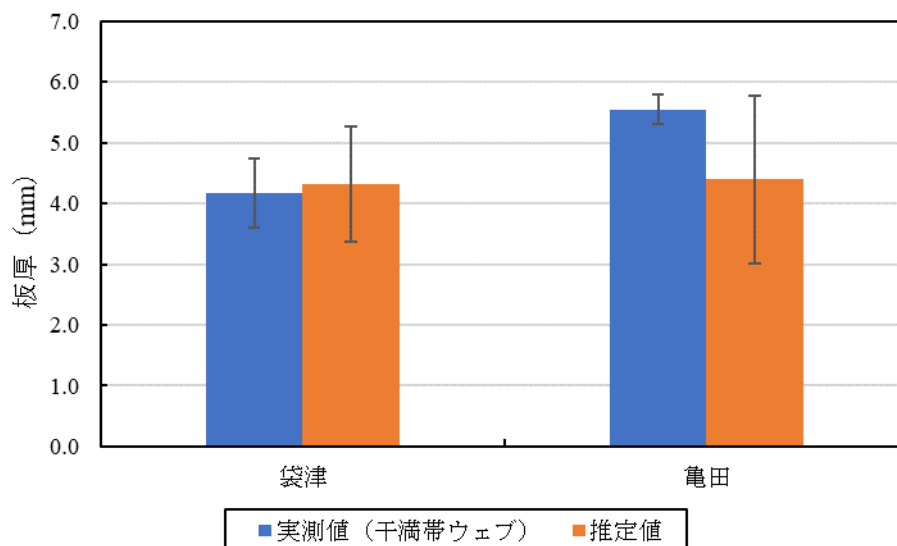


図 1.7.2 板厚実測値と推定値（熱画像温度・熱収支解析）の比較

(3) 課題

異時点間の比較を空間統計指標を用いて実施した。鋼矢板護岸の赤外線画像特性は、矢板の設置環境に加えて画像撮影時の計測条件や時間帯などが影響する事が判った。現地計測に関する最適な条件を今後把握する必要がある。

2 事業の成果

2. 1 成果の内容

本研究により、UAV により収集した画像から画像診断技術を活用し、目視検査よりも客観的な調査方法で排水路の健全度の評価する技術を確立できた。さらに、これらの画像データや健全度評価結果に加え、現地での点検調査結果データ等を包括的に管理し、当該水路の維持管理業務を支援するデータベースシステムを開発することができた。以下にその成果をまとめる。

- (1) 可視画像と赤外線画像を組み合わせた画像解析手法を用いて、腐食した矢板の板厚状況を把握する技術を確立した。
- (2) UAV の飛行テストを行い、矢板排水路の画像取得において、水上 UAV が最適であることを確認した。
- (3) 画像解析を用いた調査の調査間隔は特異点が無い場合、1km でよいことを確認した。
- (4) 腐食した矢板の水位変動部の載荷試験を解析により再現することができることを確認した。
- (5) 水位変動部の腐食を想定した矢板の解析を行い、その腐食状況と換算一様板厚との関係性を見出した。具体的には「最小板厚が存在する高さの平均板厚」を一様板厚とすれば、大きく過小評価する事なく、安全側の設計が可能となる。
- (6) 「気中部」「水位変動部」「水中部」「土中部」の詳細板厚を計測する事により、「気中部」と「水位変動部」の腐食状況から「水中部」と「土中部」を推定することができた。「気中部」と「土中部」の板厚はほぼ等しく、水位変動部の最下段の平均板厚が「水中部」の平均板厚とほぼ等しいことが判った。
- (7) 現場の限定的な条件から簡易的に発生曲げモーメントを算出し、各環境の板厚から算出される断面性能を用いて発生応力度を算出することができた。また、閾値を設定することにより健全度との関連付けを行った。
- (8) 画像解析プログラムを実装した包括的なデータベースを構築することができた。

2. 2 目標の達成度

(1) 成果から得られる効果

- 1) 既設鋼矢板の健全度評価技術を確立することにより以下の事業効果が得られる。
 - ① 目視検査よりも高精度かつ客観的な調査が効率的に行えるようになる。
 - ② 時間と費用の掛かる板厚調査（超音波厚さ計測）の実施対象を画像解析により選別でき、点検コストの削減が見込める。
 - ③ 腐食劣化した鋼矢板の残存性能の評価が可能となることで、排水路の健全度を定量的に把握でき、計画的な補修・補強・更新事業の推進が可能となる。
 - ④ 将来的に、排水路の耐用年数を推定可能な技術の構築が期待できる。
- 2) 健全度を包括管理するデータベースシステムを開発することにより以下の事業効果が得られる。
 - ① データベースとして情報を蓄積することで、水路全体の劣化状況の把握や経年的な変化等の把握が容易となり、効果的で効率的な維持管理計画の策定が可能となる。
 - ② システム化することでモバイル端末等からも劣化状況が確認することができるため、正確な点検作業の指示および実施が可能となる。
 - ③ 常に情報が更新され、最新の情報を点検者、管理者、事業者が共有できるため、点検・維持・管理に関する迅速な合意形成が可能となる。

(2) 従来技術との比較

1) 比較する従来技術

目視点検を含む現地踏査と板厚計測を含む現地調査の実施と健全度判定

2) 従来技術に対する優位性

画像診断技術を活用し、目視検査よりも高精度かつ客観的な調査方法で排水路の健全度の評価を行うことができる。

表 2.1.1 新技術と従来技術の比較

	新技術	比較する従来技術	比較の根拠
概要図	 		新技術は水上 UAV を用いた調査。従来技術は超音波板厚計を用いた調査。
工法名	画像解析を用いた健全度調査	超音波厚さ計測を用いた健全度調査	-
経済性（直接工事費）	90 万円/箇所	167 万円/箇所	自社見積り 従来技術は仮締切工、水替工、掘削工、矢板洗浄、板厚計測を実施
工程	1 日/箇所	3 日/箇所	実調査より算出
品質	水路全体で必要な箇所の健全度を取得可能	1 箇所の詳細な板厚データを取得可能	UAV 撮影は水路全体で実施するが、板厚計測はポイントでの計測となるため
安全性	向上	標準	新技術は水上 UAV の遠隔操作となるため、水路内での作業を伴う従来技術より安全性が向上。
施工性	向上	標準	新技術は従来技術より作業項目が減るため施工性が向上。
周辺環境への影響	向上	標準	新技術は水路内での仮締切が不要であり周辺環境への影響が小さい。

2. 3 成果の利用に当たっての適用範囲・留意点

(1) 適用範囲

軽量鋼矢板（型式 A、B、C、D、E）で構成された農業用排水路

(2) 留意点

画像解析の適用範囲が軽量鋼矢板のため、鋼矢板（型式 SP-I_A、SP-II、SP-II_A、SP-II_W、SP-III、SP-III_A、SP-III_W、SP-IV、SP-IV_A、SP-IV_W、SP-V_L、SP-V_{I_L}、SP-10H、SP-25H）は適用外とする。

3 普及活動計画

3. 1 想定される利用者

(1) 事業者

農林水産省農政局、都道府県、市町村、土地改良区等

(2) 民間企業

設計業者（設計コンサルタント）、施工業者（ゼネコン）等

3. 2 利用者への普及啓発等の方法

- ① 学会等への新技術発表
- ② ARIC への情報公開
- ③ HP などのネット活用
- ④ 技術資料、カタログ、PR 資料の配布
- ⑤ 業界紙などへの広告掲載

3. 3 利用者に対するサポート体制、参考資料等

- ・調査の手引き及びマニュアルの整備
- ・要請により講習会の企画と実施

3. 4 特許・実用新案等の申請予定

① : 板厚推定装置、板厚推定方法及びプログラム

概要： 鋼板の板厚を推定する板厚推定装置、板厚推定方法及びプログラムに関する発明
出願： 済み

申請者： 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構、国立大学法人新潟大学
国立大学法人東京農工大学、日鉄エンジニアリング株式会社
日鉄建材株式会社

4 研究総括者による自己評価

審査のポイント	着眼点	申請時計画目標 ^{注1}	自己評価 ^{注2}	自己評価の理由 ^{注3}
目標の達成度	・効果 (従来技術に対する優位性)	・客観的な健全度評価の確立 ・データベースシステムの開発	Ⓐ: 優れている B: 概ね妥当 C: 不十分	画像解析を用いた評価手法を用いるため。
	・信頼性 (品質、精度、安全性、耐久性等)	・目視調査よりも高精度な調査	Ⓐ: 優れている B: 概ね妥当 C: 不十分	調査結果のばらつきが減り、調査結果の信頼性が向上。
	・適用範囲・適用条件等	軽量鋼矢板護岸の農業用排水路	A: 広範囲に適用 Ⓑ: 概ね妥当 C: 限定的	画像解析が軽量鋼矢板のみに対応しているため。
普及の可能性	・想定される利用者への普及啓発の方法	・学会誌等への新技術の発表 ・HP などのネット活用	A: 十分な利用が見込まれる Ⓑ: 概ね妥当 C: 限定的	今後ストックマネジメントの普及に伴い、的確な管理・運営を実施する上でデータベースが必要とされるケースが想定される。
	・利用者に対するサポート体制 (設計・積算・施工等の参考資料、相談窓口等)	・調査の手引き及びマニュアルの整備	A: 十分に整備されている Ⓑ: 概ね妥当 C: 改善が必要	
総合コメント ^{注4}	画像解析技術を用いた健全度評価技術を確立すると共に、その画像データや健全度評価結果に加え、現地での点検調査結果データ等を包括的に管理可能なデータベースシステムを構築することができた。本データベースにより、紙媒体で管理されていた排水路のデータを一括管理可能となり、管理者の業務負担軽減につながる。また調査データを蓄積することで、効率的な維持管理が可能となり、農具用排水路のストックマネジメントに寄与することが期待できる。			

注1) 成果報告書に記載の研究開発目標を記載する。

注2) 評価結果欄は、A・B・Cのうち「A」を最高点、「C」を最低点として3段階で記入(○付け)する。

注3) 自己評価の理由を記載する。

注4) 総合的なコメントを記載する。

5 今後の課題及び改善方針

本研究では、UAVにより収集した画像から画像診断技術を活用して、目視検査よりも高精度かつ客観的な方法で排水路の健全度評価を行った。さらに、これらの画像データや健全度評価結果に加え、現地での点検調査結果データ等を包括的に管理し、当該水路の維持管理業務を支援するデータベースシステムの開発を行った。

昨今の技術革新によりコンピューターの演算能力は指数関数的に増えており、それに合わせた新たな診断方法や機械学習方法が今後開発される可能性があり、画像解析プログラムのアップデートも視野に入れて運用を進めていく必要がある。同様に通信衛星を含む通信技術や航空技術の発達により UAV の技術は日々進歩しており、今後も最適な UAV の選定を行っていく。データベースに関してはエンドユーザーが使いやすいように適宜改良を加えるとともに、健全度判定の閾値を実状に合わせることや鋼矢板への適用範囲の拡大を検討する必要がある。