

# 論文 コンクリート被覆を施した既設鋼矢板の曲げ載荷挙動評価に関する実験的研究

佐藤 弘輝<sup>\*1</sup>・鈴木 哲也<sup>\*2</sup>・小林 秀一<sup>\*3</sup>・長崎 文博<sup>\*4</sup>

**要旨**：農業用排水路で供用されている鋼矢板水路では、長期供用に伴い鋼矢板の腐食が進行し、機能低下が進行する。効果的な維持管理には、適切な補修工や補強工の開発が急務な技術的課題となっている。本報では、腐食代が残存する既設鋼矢板へコンクリート被覆による保護工法に着目し、その力学的特性の把握と有効性を実証するために曲げ載荷時の変位計測と AE 計測を行った結果について報告する。検討の結果、鋼矢板 - コンクリート複合材の力学的特性は、コンクリート被覆に伴い荷重 - 変位曲線を変化させた。その際、AE 発生挙動は、AE パラメータである Calm 比により評価可能であることが明らかになった。

**キーワード**：鋼矢板、コンクリート、曲げ試験、変位、AE 法、Calm 比

## 1. はじめに

近年、社会基盤施設の補修工や補強工を伴う更新事業が各地で進められている。農業水利施設も例外ではなく既存構造物の LCC (Life Cycle Cost) の低減を目的とした戦略的な保全管理が展開されているが、東日本大震災に代表される突発的地震災害に伴い農業水利システムの崩壊に起因する送排水が困難になる事例が各地で確認されている。このことから、長期供用下にある既存施設の維持管理における重要な技術的課題は、農業水利システムを構成する施設群の経年劣化と突発的災害に対する確かな保全であると考えられる。

本論で着目する鋼矢板水路は、その多くが供用開始から 20~40 年の経過とともに鋼材腐食の進行が確認されている。腐食反応は、断面の減少や欠損により顕在化するが、一般的に設計段階において腐食代が設定され、腐食後も構造安全性が確保できるように構造設計が行われている。農業水利施設の場合、腐食代は、一般環境において表裏あわせて 2 mm である<sup>1)</sup>。

一般的に水の接する鋼矢板の腐食は、鋼表面に拡散する酸素濃度に依存する<sup>2)</sup>。鋼矢板の腐食特性については 1980 年代を中心に港湾構造物において多くの報告が行われている(例えば、溝口ら<sup>3)</sup>; 横井ら<sup>4)</sup>)。農業水利施設の事例では、水面付近での急激な腐食の進行が施工後 10 年から 40 年の既設鋼矢板排水路を対象に腐食状況が調査された結果、供用から 20 年経過した施設において腐食の顕在化が顕著になったことが報告されている<sup>5)</sup>。このような状況下において既設鋼矢板の更新には、未使用材による再施工では莫大な費用が必要となるため、LCC の低減を目的とした既設鋼矢板への表面被覆工法が

適用されることが多い。使用材料は主にウレタン樹脂などが用いられているが、本研究では施工性と LCC の観点から有意にあると考えられるコンクリートを用いた表面被覆工の適用を検討している。本論では、その基礎的検討としてコンクリート被覆を施した鋼矢板 - コンクリート複合材による既設鋼矢板の曲げ載荷挙動に関して実験的検討結果を報告する。評価指標は、力学的特性を荷重 - 変位過程で検討した。加えて、曲げ応力下での AE (Acoustic Emission) の発生挙動を AE パラメータである Calm 比<sup>6)</sup>により定量化し、鋼矢板 - コンクリート複合材の曲げ載荷過程における力学特性を評価した。

## 2. 実験方法

### 2.1 供試体

モデル試験条件は、4 ケースについて実施した。各ケースのモデル試験条件を表-1 および図-1 に示す。供試体は、鋼矢板 2 枚 1 組で幅 0.7m、長さ 1.5m、Case 1：既設鋼矢板(軽量鋼矢板、板厚 t=4.2~6.1mm)、Case 2：未使用鋼矢板(軽量鋼矢板、板厚 t=6.0~6.1mm)、Case 3：コンクリート被覆を施した既設鋼矢板および Case 4：コンクリート被覆を施した未使用鋼矢板、以上 4 種類の供試体を作成した。

Case 1 および Case 3 の供試体を作成するために、干満帯付近で腐食を受けた既設鋼矢板を入手して供試体を作成した。既設鋼矢板は、水路内面側が腐食しており、残存厚さは平均 5.4mm、高圧洗浄にて腐食物を除去後に供試体の作成を行った。鋼矢板水路は、隣接する矢板をセクションで接続して波形形状を連続させて形成されるので、今回の試験では 2 枚 1 組で各供試体を作成した。

\*1 藤村ヒューム管(株) 技術営業部 主任 (正会員)

\*2 新潟大学 自然科学系(農学部) 准教授 工博 (正会員)

\*3 (株)水倉組 建設本部 課長 (正会員)

\*4 藤村ヒューム管(株) 技術営業部 課長 工修(非会員)

表-1 モデル試験条件

実験ケース	試験条件
Case 1	既設鋼矢板 (軽量鋼矢板, $t=4.2\sim 6.1$ mm)
Case 2	未使用鋼矢板 (軽量鋼矢板, $t=6.0\sim 6.1$ mm)
Case 3	既設鋼矢板 (軽量鋼矢板, $t=4.2\sim 6.1$ mm) +コンクリート
Case 4	未使用鋼矢板 (軽量鋼矢板, $t=6.0\sim 6.1$ mm) +コンクリート

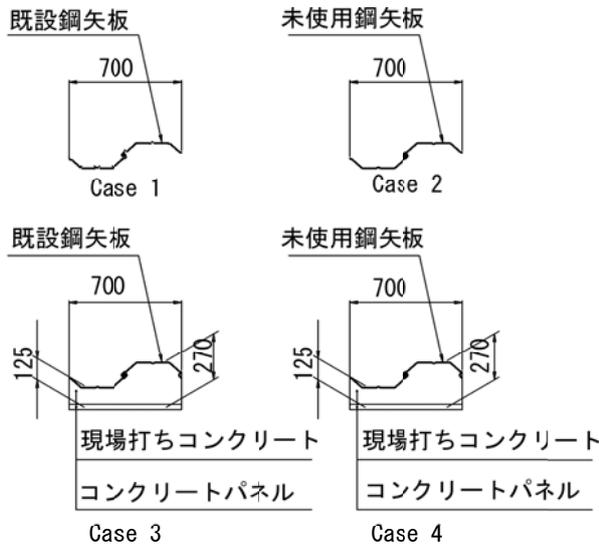


図-1 各ケース検討断面

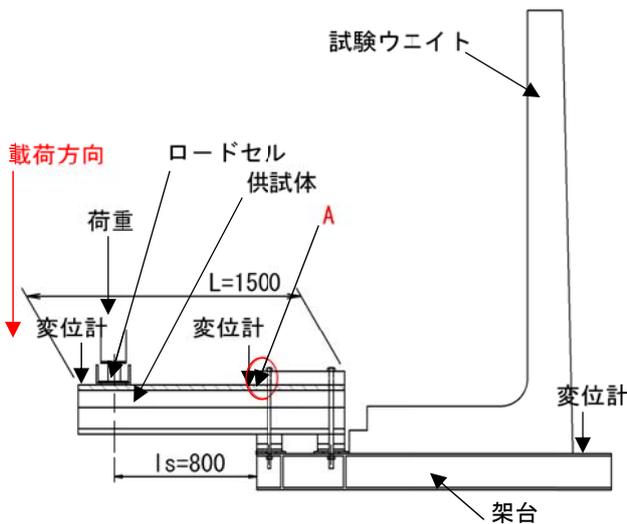


図-2 試験概要

そのうち被覆を施した Case 3 および Case 4 は、正面にコンクリートパネルによる残存型枠を用いて、設計基準強度  $18\text{N/mm}^2$  のコンクリートを打設、養生期間 28 日を経て実験を行った。



写真-1 試験状況

表-2 Case 1, 2 試験荷重

サイクル	1	2	3	4	5	6	7
荷重 (kN)	22	27	33	38	43	48	54
作用 M (kN・m)	18	22	27	31	35	39	43

表-3 Case 3, 4 試験荷重

サイクル	1	2	3	4	5	6	7
荷重 (kN)	20	25	31	36	42	46	51
作用 M (kN・m)	18	22	27	31	35	39	43

## 2.2 曲げ載荷試験

載荷試験の概要図を図-2 に、また試験状況を写真-1 に示す。試験は、供試体を片持ち梁部材とした曲げ試験により評価した。曲げ試験の載荷条件は、供試体に発生する作用モーメントが同一となるように設定し、繰り返し載荷とした。力学特性の評価は、ロードセルにより荷重を計測するとともに、図-2 に示す 3 箇所に変位計を設置して変形挙動を検出した。なお、荷重 - 変形挙動は荷重点近傍の変位計を用いて作成した。

## 2.3 検討条件

各ケースにおける試験荷重を表-2 および表-3 に示す。載荷荷重は、既設鋼矢板を採取した現地条件発生モーメントを算出し、このモーメントの 1.5 倍である  $27.0\text{kN}\cdot\text{m}$  を基準として、Case 1, 2 および Case 3, 4 の比較基準断面の発生モーメントの作用位置を図-2 の A 点で同一作用モーメントになるように載荷サイクルを設定した。このとき試験荷重は、自重による作用モーメントを差し引いて算出した。

## 2.4 AE 計測

AE センサの設置位置の概略を図-3 に示す。本試験では、載荷過程で破壊時に発生する弾性波を AE 法により

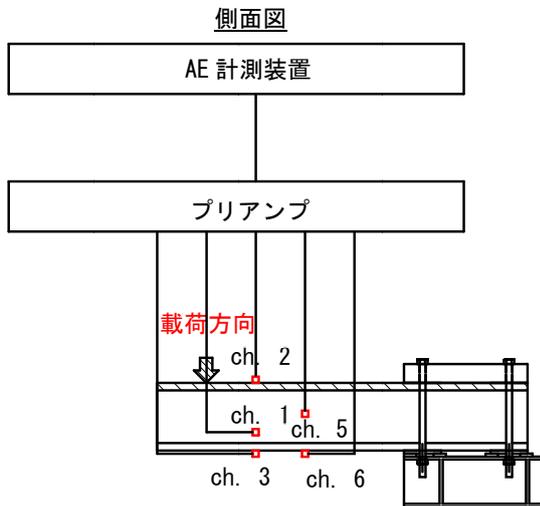
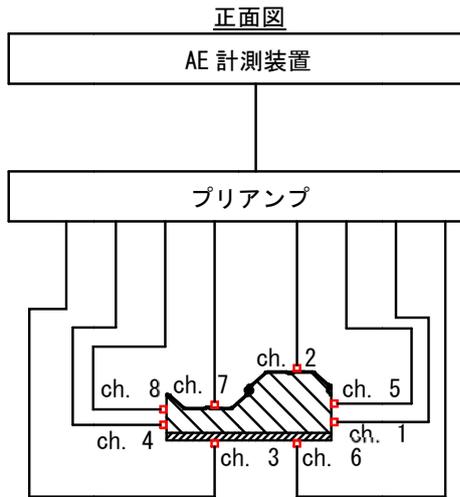


図-3 AE センサの設置位置の概略図

した。AE 計測は、SAMOS - AE システム (PAC 社製) を用いて行った。閾値は 42dB である。検出波は 60dB で増幅した。AE センサは共振型を用い、供試体表面に 8 センサを等間隔で設置した。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 曲げ荷重過程における荷重-変位挙動

Case 1 および Case 2 の荷重 - 変位挙動を図-4 および図-5 に、Case 3 および Case 4 のコンクリート被覆後の荷重 - 変位挙動を図-6 および図-7 に示す。

既設鋼矢板と未使用鋼矢板では荷重 - 変位挙動が異なることが明らかになった。既設矢板に曲げ荷重を行った Case 1 では、基準モーメント 27.0kN・m での試験荷重 33kN において最大変位量 34.3 mm、残留変位量 3.1 mm が確認された。未使用矢板を利用した Case 2 では、最大変位量 22.9 mm、残留変位量 0.8 mm であった。両ケースの差は、最大変位量 11.4 mm、残留変位量 2.3 mm となり、Case 2 が Case 1 に対して最大変位量 67%、残留変位量 2

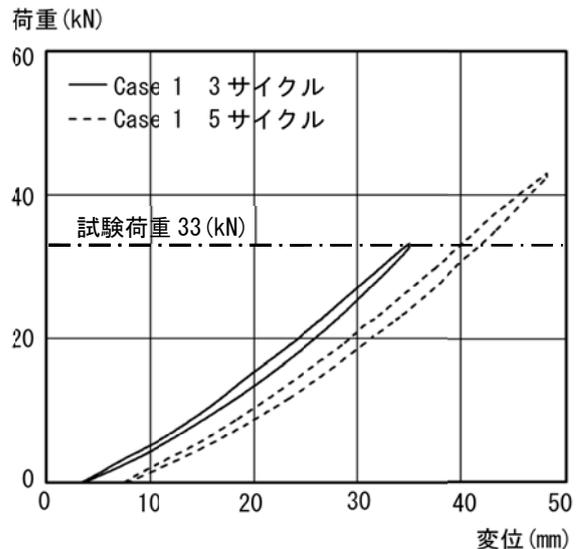


図-4 荷重-変位挙動 (Case 1)

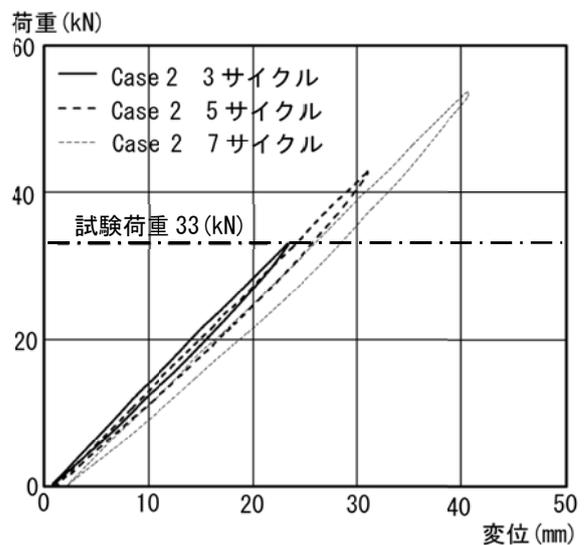


図-5 荷重-変位挙動 (Case 2)

6%であった。

矢板材にコンクリート被覆を施した Case 3 および Case 4 では、Case 1 および Case 2 とは異なり、基準モーメント 27.0 kN・m での試験荷重 31kN において Case 3 で最大変位量 7.3 mm、残留変位量 0.9 mm であった。Case 4 では最大変位量 10.6 mm、残留変位量 1.6mm であった。両ケースの差は最大変位量 3.3 mm、残留変位量 0.7 mm となり、Case 3 が Case 4 に対して最大変位量 69%、残留変位量 56%であった。これは、既設鋼矢板の長期供用に伴う材質変化によるものと考えられる。

以上のことから矢板材にコンクリート被覆を施すことにより、荷重時の複合材の変形挙動はコンクリートにより強く影響を受けているものと推察される。同様の結果は、先行研究である A. M. El-Shihy *et al.*<sup>7)</sup> や Sebastian WM *et al.*<sup>8)</sup> においても報告されている。先行研究の主な論点は荷重過程における荷重 - 変位挙動を踏まえて破壊挙動の観察結果を考察するものである。

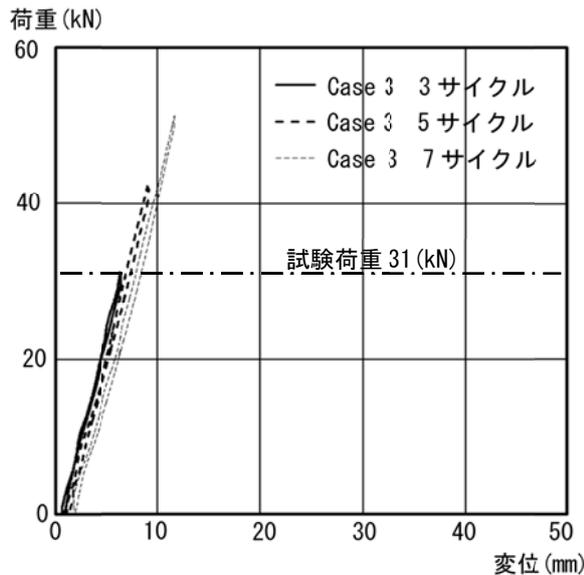


図-6 荷重-変位挙動 (Case 3)

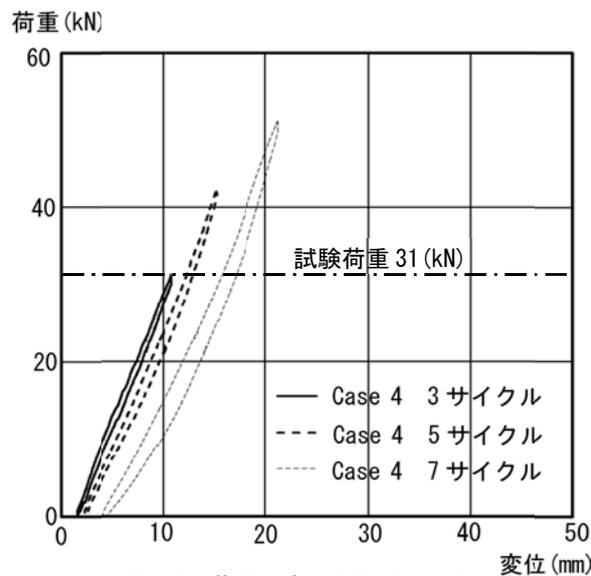


図-7 荷重-変位挙動 (Case 4)

図-8 に残留変位 - 荷重の関係を示す。Case 1 の既設鋼矢板が最も変位が大きく、Case 4 の未使用鋼矢板+コンクリートが次に大きい。また Case 2 の未使用鋼矢板と Case 3 の既設鋼矢板+コンクリート被覆の残留変位が同程度であることが分かる。

本研究では、これら先行研究の成果を踏まえて、より詳細な材料変形や破壊挙動を評価するために弾性波を受動的に検出する AE 法を導入し、載荷過程で発生する破壊現象起源の弾性波を同定することにより載荷過程の詳細評価を試みた。

### 3.2 曲げ載荷過程における AE 発生頻度

曲げ載荷過程に発生するモーメントと AE ヒット数、Calm 比の関係を図-9～図-12 に示す。本研究では一連の載荷ないし除荷過程に発生する AE 発生総数を AE ヒット数と評価した。AE ヒット数と併記されている Calm

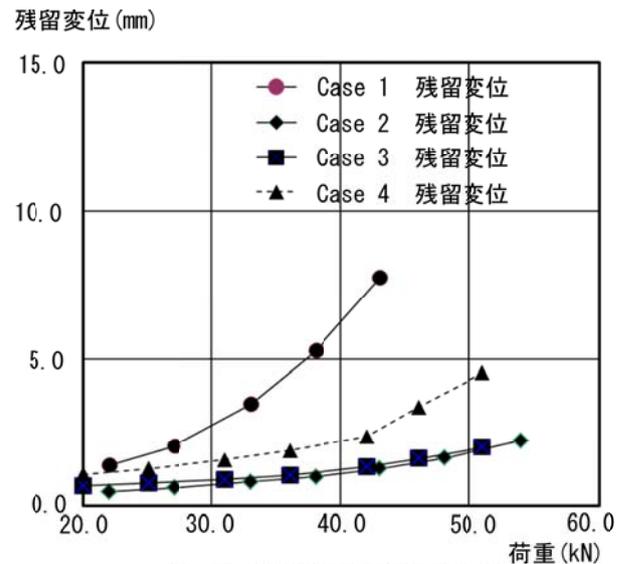


図-8 残留変位-荷重のまとめ

比とは NDIS2421<sup>6)</sup>において定義されている AE パラメータである。評価値は「除荷時に計数された AE ヒット数」に対する「履歴のサイクル中に計数された AE ヒット数」である。本研究では各載荷条件ごとに Calm 比を評価した。Calm 比の上昇は、材料劣化を意味している。載荷時と比較して除荷時の AE が多数確認された場合、Calm 比は 1.0 近傍(=除荷時 AE/載荷時 AE(≠0)+除荷時 AE)になる。本研究では、このような材料劣化が進行した状態 (Calm 比≠1.0) を材料の力学的安定性の低下と考えて検討を行った。

検討の結果、矢板のみを供試した Case 1 と Case 2 では、各サイクル荷重の載荷時において AE の頻発が載荷荷重の増加に伴い確認された (図-9, 図-10)。

除荷時の AE の頻発は、Case 1 においては 48 kN で確認された。Case 2 では Case 1 とは異なり、載荷時と比較して除荷時の AE の頻発は確認されなかった。この相違は、既設矢板を用いた Case 1 において長期供用に伴う供試材の損傷蓄積が影響したものと考えられる。腐食を有する鋼矢板では、鋼材物性の不均一性が進行し、腐食部位において局所的破壊の進行と変形挙動の変質が認められるものと考えられる。

コンクリート被覆を施した Case 3 と Case 4 では、Case 1 と Case 2 とは異なり、ひび割れ発生に伴う AE の頻発が Case 4 において確認された。Case 3 では、曲げ載荷過程においてコンクリート破壊は確認されなかったことから Case 4 と比較して試験荷重 46 kN 以降において高頻度の AE は検出されなかった。

載荷過程における Calm 比の変動は、未使用矢板のみで試験を行った Case 2 において約 0.2~0.4 の範囲で変動していたのに対して、既設矢板を用いた Case 1 では約 0.1~0.5 を計測し、Calm 比の変動範囲の増加を確認した。Case 3 では、Case 1 と同様に約 0.1~0.5 の範囲であった

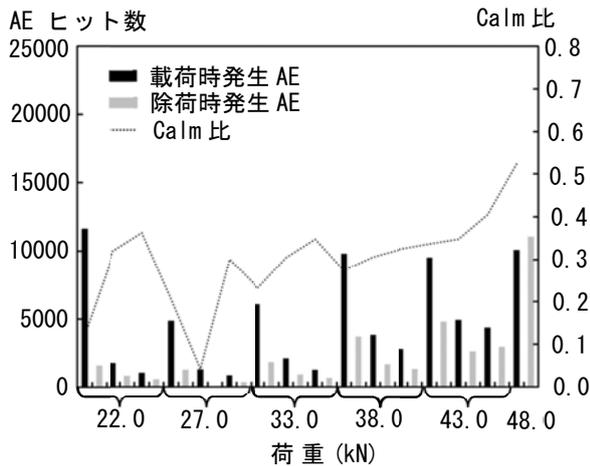


図-9 AEパラメータと載荷荷重の関係 (Case 1)

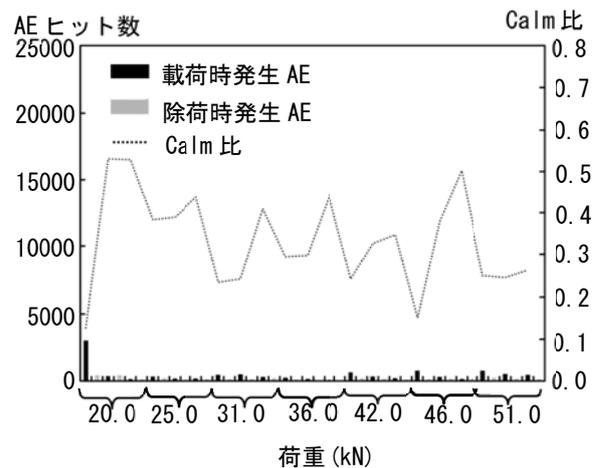


図-11 AEパラメータと載荷荷重の関係 (Case 3)

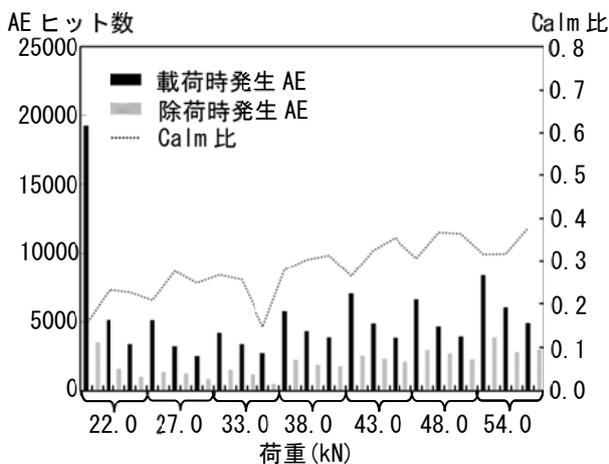


図-10 AEパラメータと載荷荷重の関係 (Case 2)

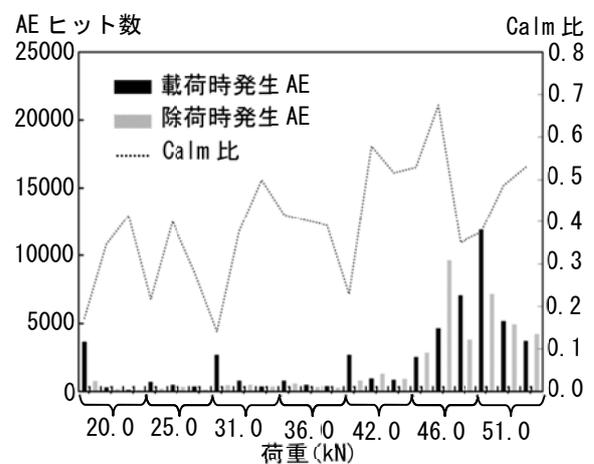


図-12 AEパラメータと載荷荷重の関係 (Case 4)

のに対して、コンクリート損傷が生じた Case 4 では約 0.1~0.7 と評価範囲の拡大と試料にひび割れが確認された 42~51 kN において評価値の増加が見られた。これは除荷時において AE の頻発を意味しており、ひび割れによる材料損傷の進行が、供試体の力学的安定性を低下させたものと考えられる。

以上のことから、曲げ載荷における荷重 - 変位過程を力学的観点から評価するとともに、載荷過程において発生する弾性波を AE 法により検出し、AE パラメータによる定量評価を試みた結果、材料安定性を除荷時の AE 発生頻度を指標とした Calm 比から評価可能であることが示唆された。矢板 - コンクリート複合材の耐荷性能は、載荷過程におけるコンクリート挙動に依存することが本試験結果から示唆された。

### 3.3 腐食鋼矢板のコンクリート被覆の有効性

本試験では腐食代を残存させている既設鋼矢板へコンクリート被覆を施した場合の実験的検討を行ったが、断面欠損が進行した鋼矢板は検討の対象外とした。

Case 1 および Case 2 の設計モーメントにおける荷重 - 変位挙動を図-13 に、Case 3 および Case 4 設計モーメントにおける荷重 - 変位挙動を図-14 に示す。

今回の載荷試験での被覆前供試体 Case 1 および Case 2 と被覆後 Case 3 および Case 4 の結果について、荷重 - 変位挙動では Case 1 の 3 サイクル目の最大変位が 35mm 付近まで達しているが、被覆後の Case 3 および Case 4 では、3 サイクル目での変位が 10.6mm 以下であった。また Case 1 および Case 2 と Case 3 および Case 4 の荷重変位挙動を比較したとき、Case 3 および Case 4 の被覆後の挙動の勾配が Case 1 および Case 2 よりも起きていることが分かる。以上より、腐食代を残存させている既設鋼矢板へコンクリート被覆を施すことの有効性は確認できたものと考えられる。

## 4. おわりに

本報では腐食の進行した農業用鋼矢板水路を対象に、矢板表面の保護を目的としたコンクリート被覆による矢板とコンクリート複合材による矢板の表面保護の力学的観点からの提案手法の有効性を検証した。

検討の結果、複合材の力学的特性は被覆コンクリートの挙動に依存することが明らかになり、その変位挙動は被覆コンクリートの影響を受けているものと考えられる。

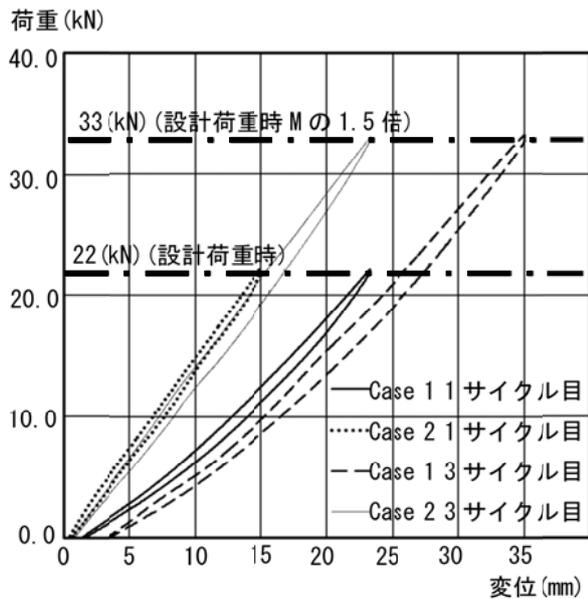


図-13 設計モーメント時における荷重-変位挙動  
(Case 1 および Case 2)

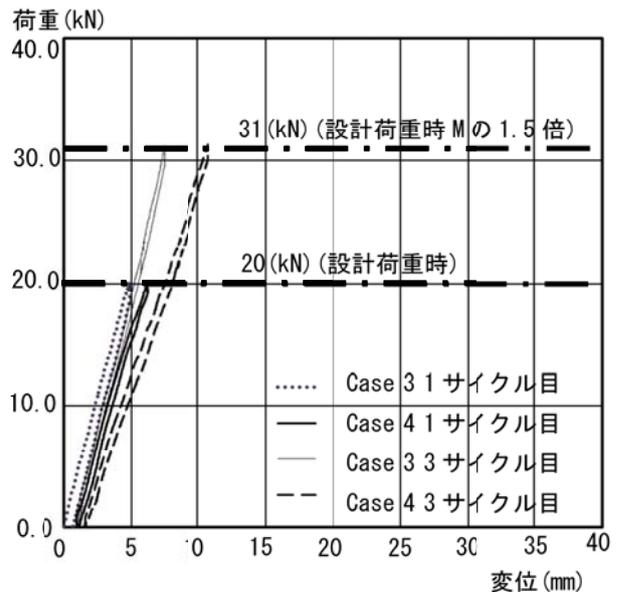


図-14 設計モーメント時における荷重-変位挙動  
(Case 3 および Case 4)

その結果は、コンクリート保護前よりも保護後の最大変位が小さくなったことから明らかとなり、鋼矢板-コンクリート複合材の耐荷性能は、載荷過程におけるコンクリートの影響を受けていることが本試験結果から示唆された。AE法での計測でも、AEの発生頻度の減少が確認できたので、載荷試験における結果が裏付けられた。したがって、コンクリート被覆による保護工法は有効であると考えられる。

また、曲げ載荷過程の変位は、Case 3よりもCase 4の方が大きな数値を示していたが、AE法でも同様の結果が得られた。このことから、破壊挙動はAE法により検出可能であり、AEパラメータによる材料安定性評価の有効性が示唆された。

#### 参考文献

- 1) 農林水産省農村振興局監修：土地改良事業計画設計基準・設計「水路工」技術書，pp.357-374，2001.
- 2) 松下巖：自然環境における腐食，金属表面技術，Vol. 3，No. 7，pp.383-392，1980.

- 3) 溝口茂，山本一雄，杉野和男，沢井章：半世紀経過した護岸用鋼矢板の腐食挙動，防食技術，36，pp.148-156，1987. 03.
- 4) 横井聰之，阿部正美：港湾構造物の腐食の実態について，土木学会論文集，第403号，VI-10，pp.85-92，1989. 03.
- 5) 峰村雅臣ほか：新潟県における鋼矢板水路のリサイクルの取り組み，平成24年度農業農村工学会大会講演会要旨集，2012. 09.
- 6) 日本非破壊検査協会：NDIS2421 コンクリート構造物のアコースティック・エミッション試験方法，2000.
- 7) A.M. El-Shihy, S.S.J. Moy, H. Shehab El-Din, H.F. Shaaban and S. A. A. Mustafa: Torsional effect on steel-concrete composite sections subjected to negative moment, Materials and Structure, 45, pp.393-410, 2012.
- 8) Sebastian W. M. and McConnell R.: Non-kiner FE analysis of steel - concrete composite structures, ASCE Journal of Structural Engineering, 126 (6), pp.662-647, 2000.