

論文 画像解析を用いたコンクリート-鋼矢板複合材の曲げ載荷挙動評価

佐藤 弘輝*¹・鈴木 哲也*²・館 翔平*³・長崎 文博*⁴

要旨: 腐食の進行した鋼矢板は、耐力低下を伴う劣化が顕在化する。本報では、鋼矢板にコンクリート被覆による補強を施し、鋼矢板-コンクリート複合材の曲げ載荷時の変形挙動を画像解析を用いて評価した結果を報告する。解析手法は、デジタル画像相関法である。曲げ載荷には、未使用と既設の鋼矢板を用いた。実験では、載荷時に発生する弾性波を AE 法により同時に計測し、曲げ変形とひび割れとの関連を考察した。検討の結果、鋼矢板-コンクリートの局所的な曲げ挙動を画像解析を用いた同定が可能であり、載荷時の変形挙動と曲げ破壊との関連が AE パラメータにより評価可能であることが示唆された。

キーワード: 鋼矢板-コンクリート複合材, 曲げ試験, デジタル画像相関法, AE 法

1. はじめに

現在供用されている鋼矢板水路は、高度経済成長期に集中的に整備されてきた。その結果、既存施設では、長期供用による腐食の進行が顕在化している。

一般的に鋼矢板施設の供用期間は 20~40 年とされており¹⁾、腐食代は設計段階で設定されている。本研究対象であ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²⁾。長期供用による鋼矢板施設では、設計値以上の腐食の進行が顕在化する施設も散見される。このことから、既存施設の適切な維持管理に基づく長寿命化策の検討には、腐食現象に対する早期の保全対策は不可欠であり、表面被覆工などの補修工法の開発は急務な技術的課題となっている。

既存の補修工法には、LCC (Life Cycle Cost) の低減を目的としたウレタン樹脂などの有機系材料を鋼矢板表面に塗布する保護工が多用されているが施工後に再劣化が生じている事例も報告されている³⁾。筆者らは、施工性と LCC 低減の観点から優位と考えられるコンクリートを用いて、鋼矢板表面にコンクリートを被覆する鋼矢板-コンクリート複合材による表面被覆工法を検討している^{4), 5)}。既往の研究では、コンクリート被覆に伴う曲げ載荷試験における力学特性の変質に関して基礎的検討を行った⁴⁾。検討には、AE (Acoustic Emission) による曲げ載荷時に発生した弾性波を用いた。室内試験後、現地実証試験を試み、現位置での力学的特性と曲げ変形量と AE との関連を実験的に検討した⁵⁾。

既往の研究において曲げ載荷時の変形挙動を変位計のみの計測で評価したが、本論では供試体が複合材である特性を考慮し、画像解析による面的な変形量の同定を

試みた。試験手法は、デジタル画像相関法 (以後 DICM と記す) である。

2. 実験方法

2.1 供試体

試験条件を表-1 に、各ケース検討断面を図-1 に、鋼矢板の仕様を表-2 に示す。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、供試体は鋼矢板 2 枚 1 組とした。形状寸法は、幅 0.7m、長さ 1.5m の寸法である。そのうち、Case 1 は既設鋼矢板、Case 2 は未使用鋼矢板、Case 3 はコンクリート被覆を施した既設鋼矢板、Case 4 はコンクリート被覆を施した未使用鋼矢板とした。また、Case 1 および Case 3 の供試体作成のために干満帯付近で腐食を受けた既設鋼矢板を入手し、高圧洗浄にて表面を洗浄後に供試体を作成した。そのうち、コンクリート被覆を施した Case 3 および Case 4 の供試体作成は、表-4 に示す仕様のコンクリートパネルと鋼矢板を接続金具で固定した。

鋼矢板とパネルの間に、設計基準強度 18N/mm² (平均圧縮強度 27.7 N/mm²) のコンクリートを打設し、養生期間 28 日を経て実験を行った。図-1 で各々の鋼矢板の凹凸が異なるのは、現地供用の既設鋼矢板を 2 枚 1 組で引き抜く際のセクションが健全な位置を選択して使用したためである。

2.2 曲げ載荷試験

各ケースの試験荷重を表-3 に、曲げ載荷試験状況を図-2 に示す。試験は供試体を片持ち梁部材として評価した。供試体 1.5m のうち、0.5m をカウンターウエイト側で固定し、0.8m の載荷スパンをとって荷重載荷位置の

*1 藤村ヒューム管(株) 技術営業部 学士 (工学) (正会員)

*2 新潟大学 自然科学系 (農学部) 准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 新潟大学農学部生産環境科学科 学士 (農学) (非会員)

*4 藤村ヒューム管(株) 技術営業部 課長 修士 (工学) (非会員)

表-1 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 (LSP - 3D), t=4.2~6.1 mm)
Case 2	未使用鋼矢板 (軽量鋼矢板 (LSP - 3D), t=6.0~6.1 mm)
Case 3	既設鋼矢板 (軽量鋼矢板 (LSP - 3D), t=4.2~6.1 mm) +コンクリート
Case 4	未使用鋼矢板 (軽量鋼矢板 (LSP - 3D), t=6.0~6.1 mm) +コンクリート

表-2 鋼矢板の仕様

ケース	種類	弾性係数 (N/m ²)	1枚当りの寸法 (幅×長)(m)
Case 1	LSP - 3D	4.73×10 ⁶	0.333×1.5
Case 2	LSP - 3D	4.27×10 ⁶	0.333×1.5

表-3 試験荷重

サイクル	1	2	3	4	5	6	7
Case1, 2 荷重 (kN)	22	27	33	38	43	48	54
Case3, 4 荷重 (kN)	20	25	31	36	42	46	51
作用 M (kN・m)	18	22	27	31	35	39	43

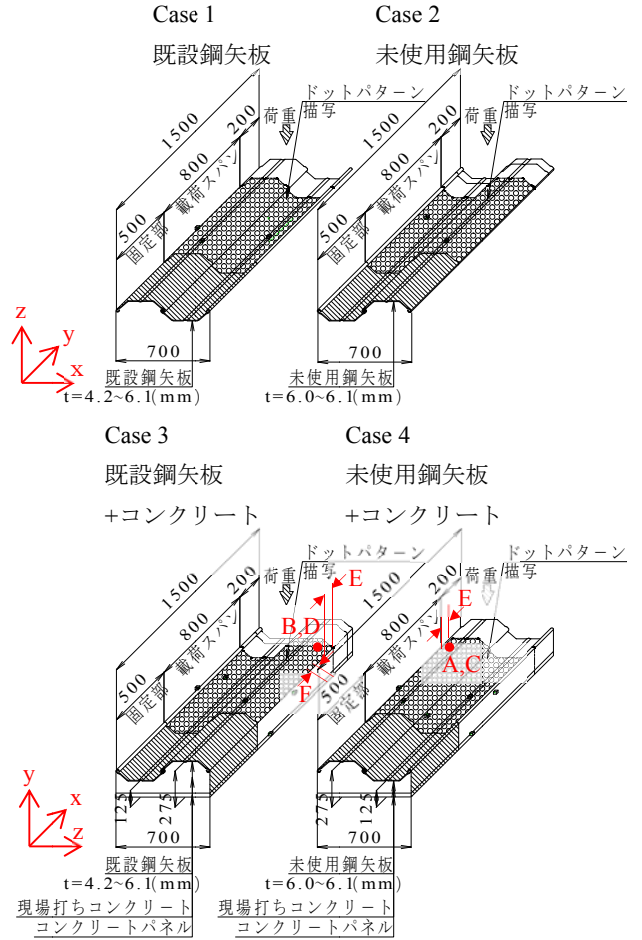


図-1 各ケース検討断面

表-4 コンクリートパネルの仕様

形状寸法 B1×B2×t(mm)	曲げ強度 P(kN)	W/C (%)	使用骨材	補強材
500×500×30	7.2	30	細骨材	メッシュ/SUS304 φ2.0 ガラス繊維

表-5 計測機器仕様

CCD カメラ	型番: CRAS-14S5M-C (Point Grey Research 社製) 解像度: 1384×1036 pixel 画素サイズ: 6.45×6.45μm シャッター速度: 0.02ms~10s
レンズ	型番: Xenoplan 1.4/17 (Schneider Kreuznach 社製)
パソコン	CPU: Core i7 980@2.80GHz メモリ容量: 6.00GB HDD: 1TB

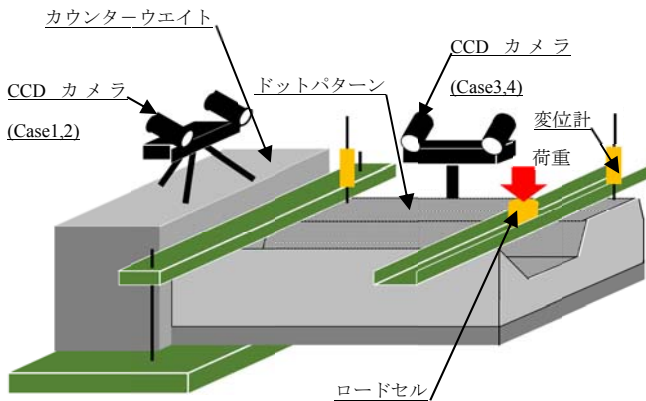


図-2 曲げ荷試験状況

中央とした。荷重は、既設鋼矢板を採取した現地の条件より作用モーメントを求め、その1.5倍である27.0kN・mを基準値とした(表-3)。両サイクルで荷重が異なるのは、供試体の自重を考慮した結果である。同一荷重は載荷-除荷サイクルを3回繰り返した。力学量は、ロードセルにより荷重を計測するとともに、図-2に示す箇所に変位計を設置して変位挙動を検出した。

2.3 AE計測

本実験では、一連の載荷-除荷過程において発生する弾性波の検出にAE法を採用した。AEとは個体材料内部の微小な破壊あるいは、それと同等なエネルギー解放過程によって発生する弾性波動現象である。本研究のAE計測装置はSAMOS-AEシステム(PAC社製)を採用した。閾値は42dBとし、検出波を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。設置方法は参考文献4)と同様である。これにより供試体内で発生する弾性波を検出し、曲げ破壊の進行状態をAE発生位置を特定することにより詳細に評価した。

2.4 画像解析

本実験では、鋼矢板表面および鋼矢板-コンクリート複合材の局部変形の確認と供試体の左右不均等によるねじれが生じる可能性を考慮してDICMを採用し、画像による変位解析を試みた。計測機器の仕様を表-5に示す。計測システムの構成は、CCDカメラ、レンズ、パソコン、接続ケーブルであり、解析にはVic-3D(Correlated Solutions社製)を使用した。本手法は、計測対象が載荷荷重を受けた前後でランダムに配置されたドットの移動量を2台のCCDカメラで異なる方向から撮影し、その可視画像データから変位方向、変位量を数値解析により3次元で推定する手法である⁹⁾。その解析原理は、デジタル画像が一般的に256階調で表現された濃淡のある画像であることを利用したものである。

本実験では、撮影間隔を100Hzに設定し、計測前にキャリブレーションプレートを使用して画像のひずみ補正を行った。これはレンズの曲面による影響を補正するために行う。供試体の表面には白色のドットパターンを描画し、供試体にハロゲンライトを使用して一定量の照度を保ち、図-2に示すようにCase1およびCase2ではカウンターウエイトの上に、Case3およびCase4では供試体の横にCCDカメラを配置して画像解析を行った。

3. 結果および考察

3.1 曲げ載荷過程における荷重-変位挙動

検討の結果、コンクリート被覆前のCase1およびCase2、コンクリート被覆後のCase3とCase4で荷重-変位挙動が異なることが明らかになった⁴⁾。コンクリート被

覆後の供試体では、被覆前と比較して最大変位量の低減が確認された。これは、載荷過程におけるコンクリート挙動に影響を受けたためと考えられる。ただし、コンクリート被覆後のCase3とCase4を比較すると、Case4の変位量が基準モーメントによる荷重で44%増加した⁴⁾。

3.2 曲げ載荷過程におけるAE発生位置

Case3のy-z方向のAE位置評定を図-4に、Case3のx-z方向のAE位置評定を図-5に、Case4のy-z方向のAE位置評定を図-6に、Case4のx-z方向の検討のAE位置評定を図-7に示す。

Case3とCase4のAEの発生位置を比較した結果、両ケースで異なる傾向が確認された。変位量の増加が確認されたCase4では、鋼矢板のセクション付近で集中的なAE発生源が確認された。図-4および図-6を比較するとCase4では、セクション真下の鋼矢板とコンクリートの界面付近から供試体凸部のコンクリート内に分布が確認された。さらに図-5および図-7を比較するとCase4では、供試体の固定端付近に集中して分布が確認された。

両ケース共にAE発生は、鋼矢板のセクションから供試体凸部のコンクリート内に分布することが確認された。これは載荷に伴う鋼矢板の変位が、セクションから直角方向のコンクリート内へ影響したためと考えられる。ただし発生したAEは、Case3と比較してCase4で頻発していた。過年度の研究成果より、Case4の載荷荷重46kNから51kNにおいてAEの頻発が確認された⁴⁾。この傾向は、本検討によりセクションより凸部で確認されたAEが影響しているものと考えられる。

本研究では、以上の検討結果を踏まえて、各ケースの詳細な材料変形や破壊挙動を評価するためにDICMによる載荷過程の変形挙動を詳細評価した。

3.3 鋼矢板-コンクリート複合材の曲げ変形の特性と画像解析による局所変形の同定

Case1およびCase2のz軸方向での載荷荷重43kN時のDICMによる画像データを図-8に、DICMによるCase1およびCase2の試験荷重43kNにおけるy軸方向およびz軸方向での変位量を図-9に、Case3およびCase4の載荷荷重46kN時のDICMによる画像データを図-10に、Case3およびCase4の載荷荷重46kN除荷後のDICMによる画像データを図-11に示す。

図-8の検討の結果、Case1とCase2の画像による変化量の検出でコンター分布が異なることが明らかになった。Case1では、A部付近の色相とB部付近の色相は、同程度の色相分布でコンターが供試体長さ方向に対して直角であることが確認された。これに対してCase2のコンター分布領域は、供試体長さ方向に対して斜めに検出されており、供試体にねじれが発生していることが確認された。

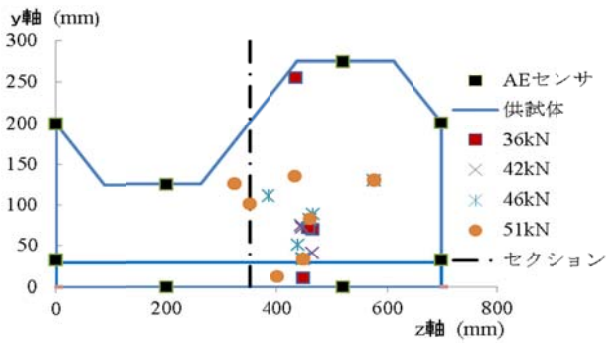


図-4 y - z 方向 AE 位置評定 (Case 3)

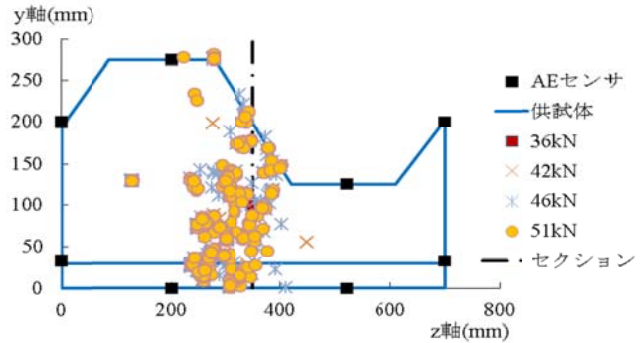


図-6 y - z 方向 AE 位置評定 (Case 4)

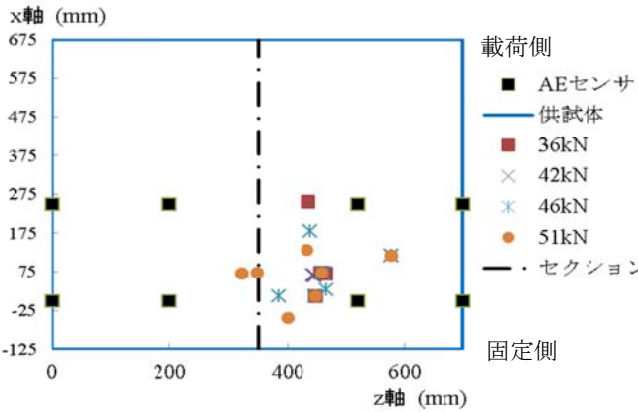


図-5 x - z 方向 AE 位置評定 (Case 3)

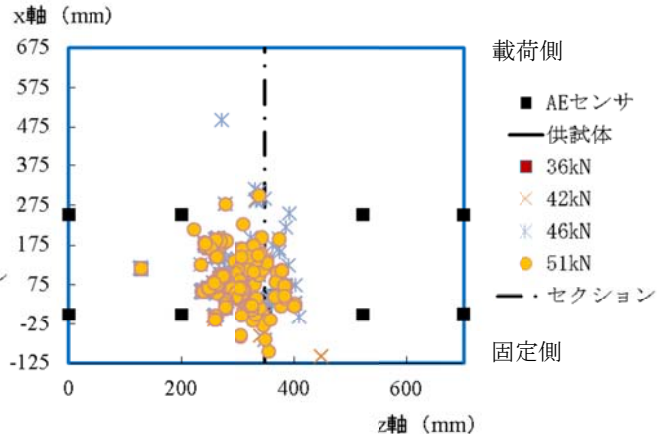


図-7 x - z 方向 AE 位置評定 (Case 4)

Case 1 の A 部 (凸部) で z 方向の変位変化量は-19.57mm, B 部 (凹部) で z 方向の変位変化量は-18.87mm, その差 0.70mm であった。一方 Case 2 では, A 部 (凸部) z 方向の変位変化量は-15.72mm, B 部 (凹部) z 方向の変位変化量は-13.73mm, その差は 1.99mm であった。

y 方向の変位量を比較すると Case 1 の A 部で 0.49mm, B 部で-1.97mm, その差は 2.46mm であった。一方 Case 2 では, A 部で 1.20mm, B 部で-1.52mm, その差 2.72mm であった。z 方向の変位量を比較した結果, 両ケース共に供試体の凹部 (B 部) より凸部 (A 部) の変位量大きいことが確認された。両ケースの凹凸部での z 方向の変位量を比較すると, Case 2 の方が大きい結果となった。y 方向の変位量を比較した結果, 両ケース共に凹部 (B 部) は固定側へ, 凸部 (A 部) は載荷側へ変位していることが確認された。両ケースの凹凸部での y 方向の変位量を比較すると, Case 2 の方が大きい結果となった。

Case 1 および Case 2 の画像解析による変位方向と変位量の比較により Case 2 においてセクションを境にねじれとずれが生じていることが確認された。これは鋼矢板の中立軸の位置の違いに伴い, セクションにずれが生じたと考えられる。Case 1 と Case 2 で変位量が異なるのは, 未使用鋼矢板に対して既設鋼矢板が腐食による部材欠損の影響を受けて中立軸が異なるためと考えられる。

Case 3 よりも Case 4 において大きい変位量とひび割れが確認されたのは, 未使用鋼矢板のセクションを境に発

生したねじれとずれを伴う変形挙動が, 複合材に影響を与えていたことが示唆された。

Case 3 と Case 4 の詳細な変形挙動を把握するために両者の荷重 46kN 時と 46kN 除荷直後の画像解析を比較したところ, Case 3 と Case 4 で変位量分布が異なることが明らかになった (図-10, 図-11)。この荷重は, Case 4 で AE ヒット数の増加とひび割れが確認された荷重である⁴⁾。Case 4 の載荷時における DICM による変位量は, 3 回の載荷とも図-10 に示す A 点で 8.5~9mm の変位量を確認されたのに対し, Case 3 の B 点では 5~5.5mm 程度であった。除荷時の変位量は, 図-11 に示す C 点で Case 4 の 1 回目 0.35~0.4mm, 3 回目で 0.75~0.8mm であるのに対して Case 3 の D 点で 1 回目 0.05~0.1mm, 3 回目で 0.4~0.45mm であった。これは, 荷重 - 変位挙動で確認した変位量とは異なるものの Case 3 が Case 4 よりも変位量が小さいという点では同様の結果が得られた。この違いは, 変位計の計測位置が, 供試体の載荷側先端であるのに対して, 画像解析では固定端から載荷点までの範囲で計測していることに起因するためと考えられ, 変位計による計測において大きな数値を得ている。載荷時における変位領域の分布傾向は, Case 3 では 1~3 回目において同様の傾向が確認されたが, Case 4 では回数が増えるにしたがって最大変位量の分布領域が載荷側で局所的に増加する傾向であった。また, 図-10 の E および F に示すように供試体の鋼矢板側とコンクリートパネル側で

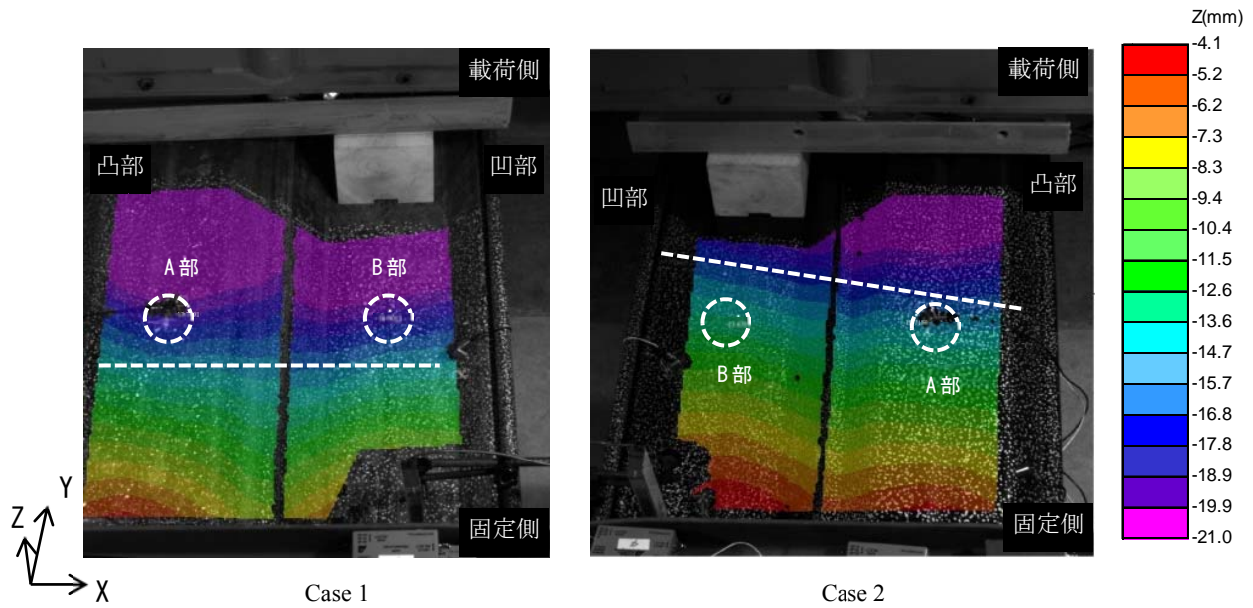


図-8 載荷荷重 43kN 時の DICM による画像データ

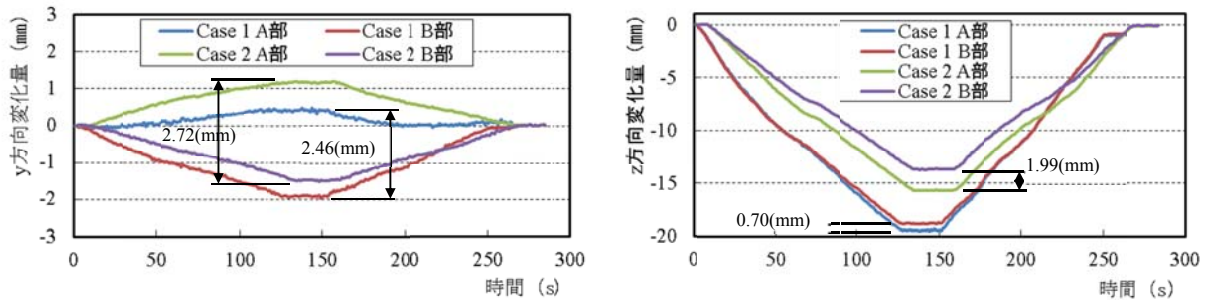


図-9 DICM による荷重 43kN における YZ 軸方向での変化量 (Case 1, 2)

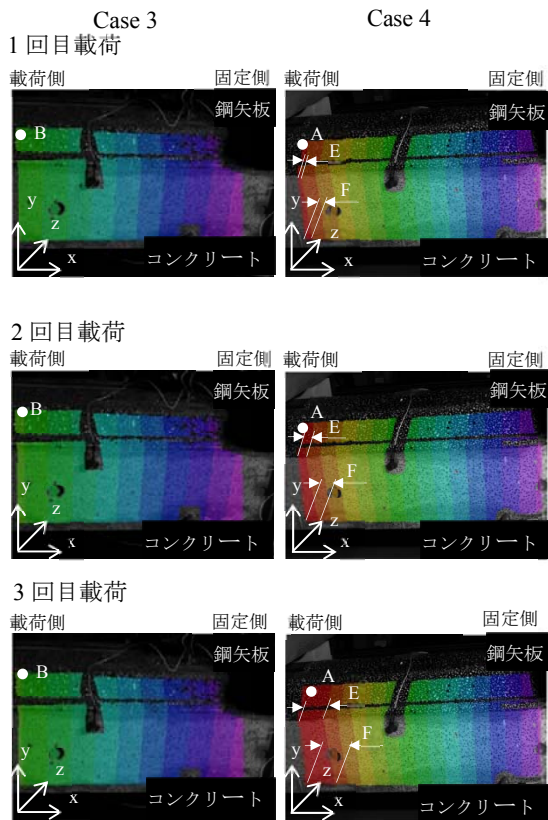


図-10 載荷荷重 46kN 時の変位量分布図 (Case 3, 4)

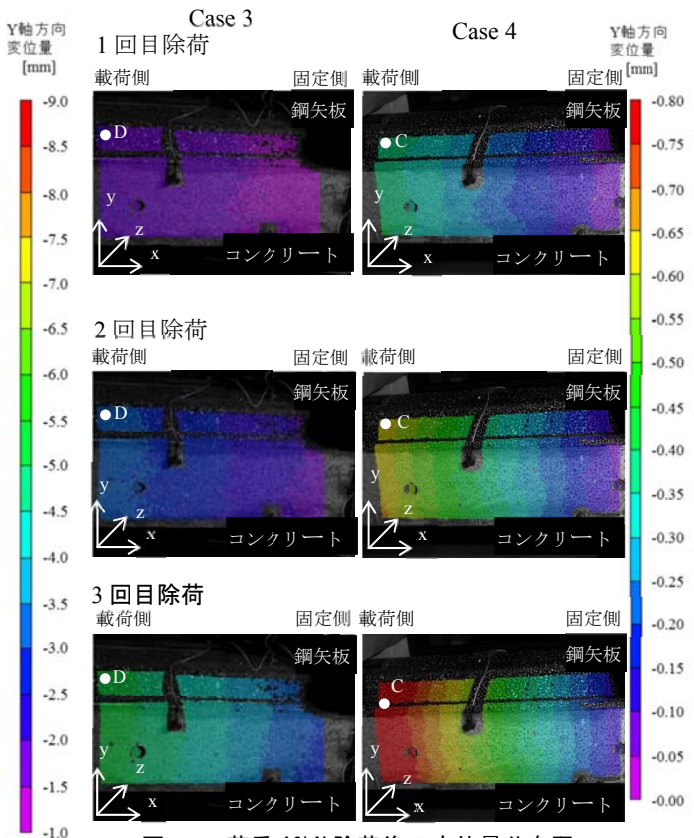


図-11 荷重 46kN 除荷後の変位量分布図 (Case 3, 4)

の変位量の差が確認された。特にひび割れが発生した 2 回目と 3 回目の分布を比較すると、8.5~9mm の領域が増加している事象が確認された。

以上の結果より、Case 4 は未使用鋼矢板のセクション付近のねじれとずれを伴う変形挙動が、被覆コンクリートに影響を及ぼした。一連の荷重サイクルにおいて供試体セクションから供試体凸部のコンクリート内で微細なひび割れが発達した。その結果耐荷性能が低下し、変位量の増加とひび割れ発生が確認された 46kN 荷重時において局所変形が発生したと考えられる。図-12 に Case 4 の荷重サイクル終了後に荷重 80kN まで荷重した後の状況を示す。供試体へのひび割れは、最も大きなモーメントが作用する固定端で確認された。供試体裏側では、固定端から供試体側面に曲線形状のひび割れが確認された。

このひび割れは、荷重時における供試体の凸部で発生した変位の影響を受けてコンクリートパネル側で発生したせん断によるひび割れと推測される。

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、その変形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。ただし、複合材の荷重時の変形挙動は、鋼矢板の荷重時のねじれとずれによる変形挙動の影響を受けることが確認された。

このことから、荷重時における鋼矢板 - コンクリート複合材は一体化した部材として外力に抵抗し、荷重過程における曲げ変形量を抑制する効果があることが確認されたと考えられる。

4. おわりに

参考文献 4) では、鋼矢板 - コンクリート複合材の力学的特性を荷重時の変位量と AE パラメータに着目して実施した。本研究では、AE の発生位置を確認し、DICM による鋼矢板 - コンクリート複合材の曲げ変形とひび割れの関連を考察した。この結果を以下に列挙する。

- 1) 鋼矢板 - コンクリート複合材の曲げ荷重による変形挙動は、コンクリート被覆に依存することが明らかとなった。コンクリート被覆による変形の抑制効果が認められ、腐食を伴う既設鋼矢板においてもこの効果が確認された。
- 2) AE 計測の結果、鋼矢板 - コンクリート複合材の AE 発生源が、セクション付近からコンクリート内へ分布している傾向が確認されたことから、AE パラメータによる曲げ荷重時の詳細な破壊挙動を評価できることが示唆された。

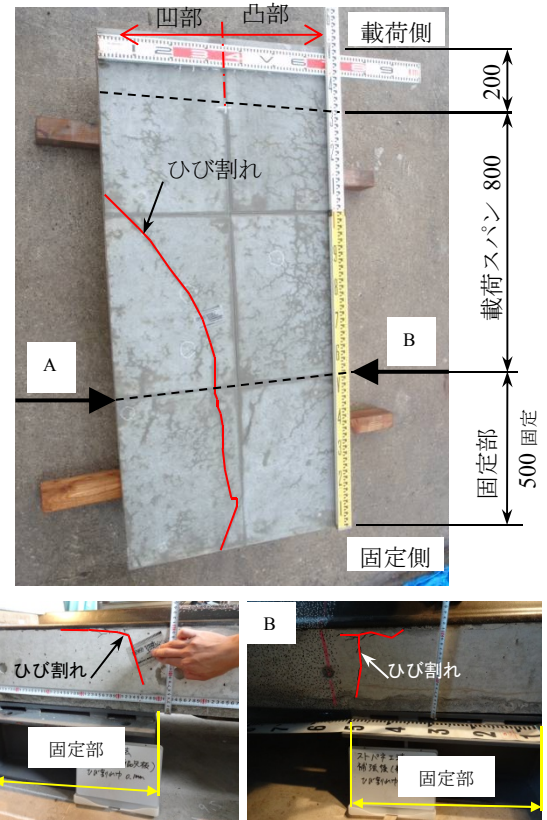


図-12 供試体のひび割れ状況 (Case 4)

3) DICM より、本試験に用いた鋼矢板 2 枚を 1 組とした供試体では、凹凸断面によるねじれを伴う変形挙動が確認された。これに伴う鋼矢板継手のずれの発生が認められ、鋼矢板 - コンクリート複合材の破壊挙動に影響を及ぼしているものと推察された。

参考文献

- 1) 農村振興局整備部土地改良企画課：土地改良事業の費用対効果分析に必要な諸係数，2009.
- 2) 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.
- 3) 小林秀一ほか：：矢板水路の腐食実態を踏まえた保全対策，土木学会論文集F4（建設マネジメント），Vol.69，No. 4，pp. I_129-I_136，2013.
- 4) 佐藤弘輝ほか：コンクリート被覆を施した既設鋼矢板の曲げ荷重挙動評価に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集 Vol.35，pp. 1639-1644，2013.
- 5) 小林秀一ほか：既設鋼矢板水路のコンクリート被覆による再生に関する実証的研究，コンクリート工学年次論文集 Vol.35，pp. 1303-1308，2013.
- 6) Sutto, M. A., Orteu, J. J. and Schreier, H. W.: Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements, Springer, 2012.