

論文 AE 法に基づく鋼矢板 - コンクリート被覆材の付着特性評価

佐藤 弘輝*1・鈴木 哲也*2・小林 秀一*3・長崎 文博*4

要旨: 現在供用されている鋼矢板護岸は、長期供用に伴う腐食が顕在化しているため効率的に LCC (Life Cycle Cost) を低減できる効果的な技術が必要とされている。そうした鋼矢板護岸に対して筆者らはコンクリートによる被覆技術を検討している。既往の研究では、鋼矢板 - コンクリート複合材の曲げ載荷試験を実施し、最大変位量および残留変位量の低減効果が確認された。本論では、両材料の界面での付着特性を評価した結果について報告する。結果、コンクリートの付着は鋼矢板の表面性状の影響を大きく受け、実構造物自重の 20 倍以上の付着力を有することが確認された。

キーワード: 鋼矢板, コンクリート, 付着試験, AE 法, AE 源位置標定

1. はじめに

本論で着目する鋼矢板護岸は、主に低平排水不良地域や軟弱地盤地域において高度経済成長期に集中的に整備されたため、供用開始から約 40 年経過するものもある。供用期間中の時間の経過とともに腐食が進行し、現在では倒壊や腐食孔からの背面土の流出が見られ、施設の改築が必要と判断される施設もある¹⁾。腐食の進行により不具合が生じる施設は、時間の経過とともに今後も増加する傾向にあり、既存施設の LCC の低減を図る技術の開発が急務な課題となっている。従来は、腐食の進行を抑制する目的で、有機系に代表される被覆材料により鋼矢板材への酸素の供給を遮断して腐食の進行を抑制する技術も開発されているが、適用後の施設において被覆層の剥離や紫外線により再劣化する事例も報告されている²⁾。

筆者らは、技術的課題を解決する手法としてコンクリートによる被覆技術の検討を行っている。既往の研究では、鋼矢板 - コンクリート複合材の曲げ載荷試験を実施し、AE パラメータとデジタル画像相関法により、一連の曲げ載荷過程での詳細な変形挙動と曲げ載荷との関連性を示した^{3), 4)}。その研究では、載荷時の鋼矢板 - コンクリート複合材において最大変位量および残留変位量の低減効果とセクションを境にねじれとずれが生じる現象が発生していたが、載荷試験終了後における複合材の一体性が確認されている。

被覆技術が適用された鋼矢板護岸は、その後さらに長期供用が可能となるが、腐食鋼矢板にコンクリート被覆を実施することから、被覆材料が自重により剥離する可能性が懸念される。供用期間中は、鋼矢板 - コンクリート複合材としての一体性が必要とされることから、付着特性を把握する必要がある。検討に用いた手法は AE (Acoustic Emission) 法である。鋼材とコンクリートが

剥離する際の AE 法による評価方法の検討は、長瀧らにより実施されている⁵⁾。既往の研究では、外殻鋼管コンクリート梁の曲げ載荷中の鋼材とコンクリートの剥離やずれにより発生する AE の識別を試みている。

本論では、技術の信頼性の向上を目的に、コンクリートに付着させた鋼矢板切片へ引張方向の載荷を実施して、付着性能の把握と鋼矢板からコンクリートが剥離する際の破壊機構の詳細検討を行った。

2. 実験方法

2.1 供試体

Case 1~Case 4 の供試体作製に用いたコンクリートの示方配合を表-1 に、供試体の種類を表-2 に、孔無と孔有の鋼矢板切片の形状寸法を図-1 に、供試体の形状寸法を図-2 に、コンクリートの打設状況を図-3 に示す。本研究では、4 ケースの試験を行った。供試体作製に用いた鋼矢板は、未使用の鋼矢板と供用後 30 年が経過して腐食が進行した水路から採取した既設鋼矢板を使用し、各々から 150mm 角の鋼矢板切片を切り出した。採取した既設鋼矢板の部材欠損を考慮して、未使用鋼矢板および既設鋼矢板の各 1 枚に断面欠損率が 3%となるように直径 5mm の開孔を設けた鋼矢板切片を作製した。Case 1 および Case 2 の供試体作製には未使用鋼矢板を、Case 3 および Case 4 の供試体作製には、既設鋼矢板を使用した。既設鋼矢板表面は、ケレン処理を行ってコンクリートが付着する表面のサビ層や付着物を除去した。その後三次元構造解析顕微鏡 (Wyko 製 NT - 3300) を使用して非接触による表面の算術平均粗さの測定を実施した。算術平均粗さとは、輪郭曲線が粗さ曲線の場合、その平均線の方向に基準長さの範囲内での絶対値の平均であり、基準長さの平均線から測定曲線までの偏差の絶対値を合

*1 藤村ヒューム管(株) 技術営業部 係長 (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 (株)水倉組 営業本部 技術営業課長 (正会員)

*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 コンクリート示方配合

配合強度 f'_{cr} (N/mm ²)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	単位量(kg/m ³)			
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
23	12.0	4.5	58.0	156	269	671	1181

表-2 供試体の種類

ケース	材料構成	断面欠損率	鋼矢板厚 (mm)	算術平均粗さ (μm)
Case 1	未使用鋼矢板(孔無) +コンクリート被覆	-	t=6.0~ 6.1mm	6.92
Case 2	未使用鋼矢板(孔有) +コンクリート被覆	3%	t=6.0~ 6.2mm	4.71
Case 3	既設鋼矢板(孔無) +コンクリート被覆	-	t=4.7~ 5.7mm	20.28
Case 4	既設鋼矢板(孔有) +コンクリート被覆	3%	t=4.5~ 6.0mm	10.12

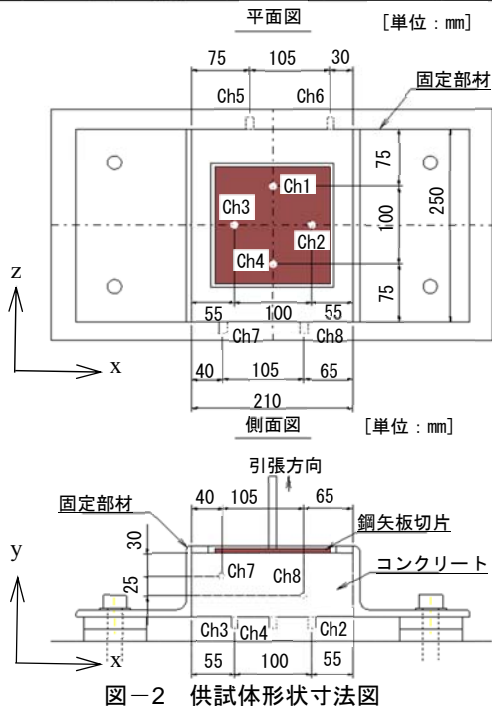


図-2 供試体形状寸法図

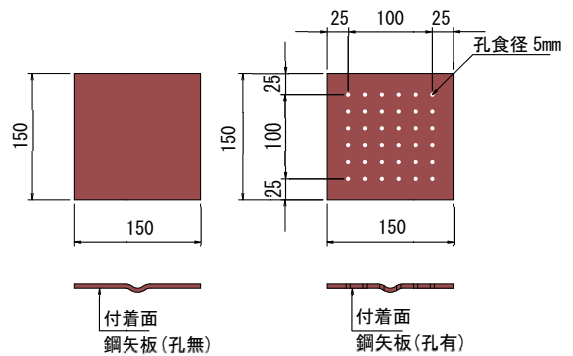


図-1 鋼矢板切片的形状寸法

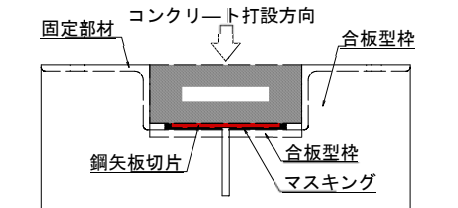


図-3 コンクリート打設状況(側面方向)

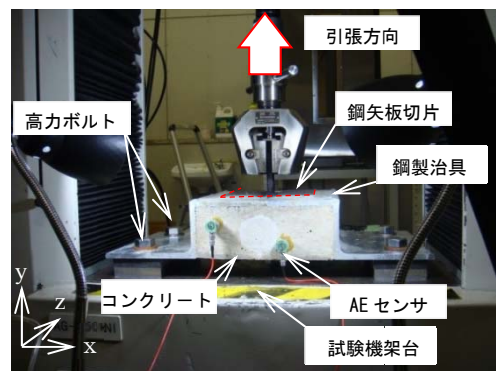


写真-1 附着試験状況

計し、平均した値である⁶⁾。

各鋼矢板切片には、万能試験機のチャックで引っ張り上げられるように鋼矢板中央に鋼棒を溶接にて取り付けた。供試体は、図-3に示すように凸型の固定部材を逆さにし、固定部材の開口箇所に鋼矢板切片を取り付け、鋼矢板切片の表面および孔食内部までコンクリートを打設できるように鋼矢板切片にマスキング処理を施した。鋼矢板切片下側と固定部材の両側面を合板型枠で塞いだ後に表-1に示すコンクリートを打設、28日間気中にて養生を実施し作製した。養生後の圧縮強度試験では、平均26.6N/mm²が確認された。

2.2 附着試験

附着試験状況を写真-1に示す。附着試験は、万能材料試験機(島津製作所製 AG-250kNI)を使用して行った。荷重速度は、2,000 N/minの一定速度として鋼矢板に取り付けた鋼棒を引っ張り上げ、鋼矢板がコンクリートから剥離するまで荷重した。各供試体は、固定部材の四

隅を試験機架台に高力ボルトで固定し、鋼矢板中央に付いている鋼棒を万能試験機のチャックで挟んだ後に荷重した。

2.3 AE計測

本研究では、荷重過程において材料の微小破壊時に発生する弾性波をAE法により計測し、供試体の破壊挙動を検証した。Case 1~Case 4のAEセンサの取り付け位置を図-2に示す。

AEセンサは、コンクリート下面に4センサ、両側面に各2センサ配置した。計測装置は、SAMOS(PAC社製)、350kHz共振型センサを使用し、しきい値を42dB、増幅値を60dBに設定した。本研究では、得られたAEパラメータをAEヒット数およびAE源位置標定にて評価した。

3. 結果および考察

3.1 荷重過程における荷重-変位挙動とAEの関係

各ケースの応力度-変位挙動と累積AEヒット数の関

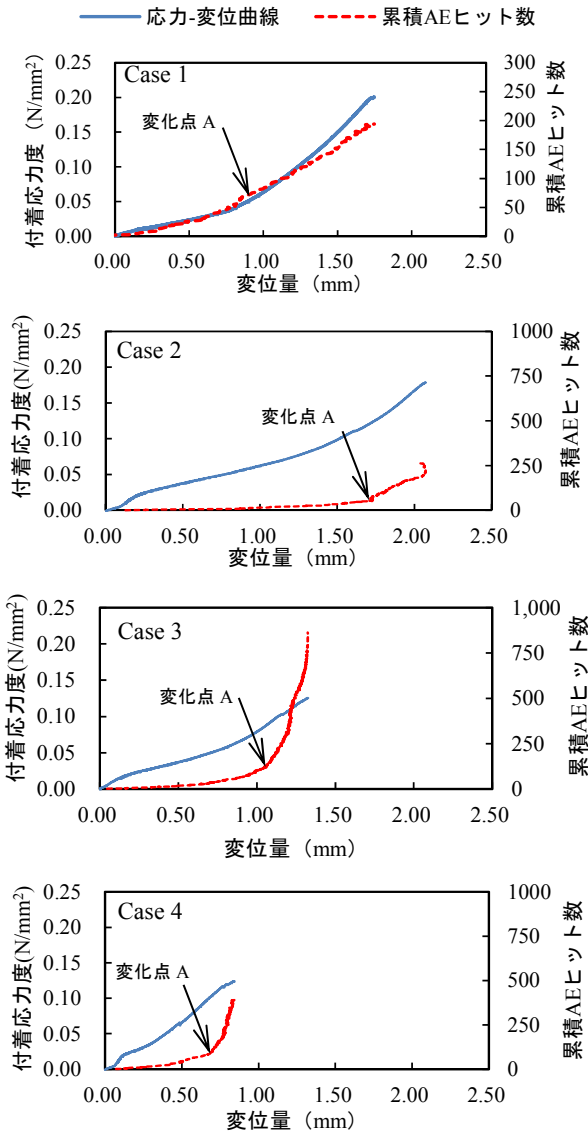


図-4 応力度 - 変位挙動と累積AEヒット数

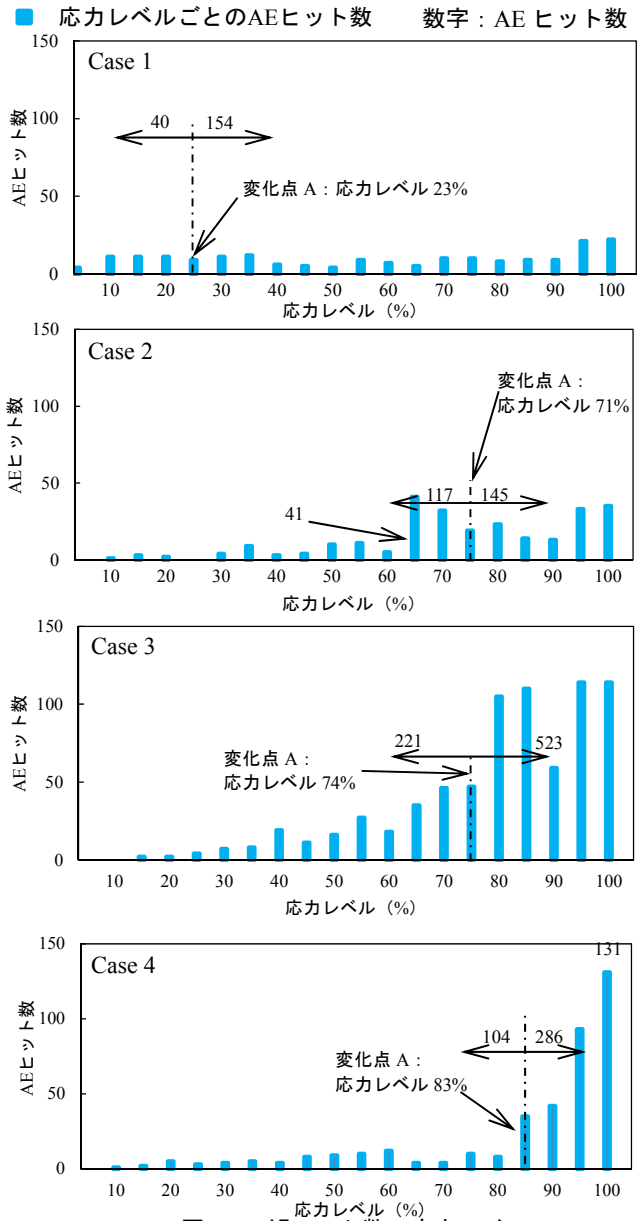


図-5 AEヒット数 - 応力レベル

表-3 試験結果のまとめ(Case 1~Case 4)

供試体 No.	使用材料	最大荷重 (kN)	付着応力度 (N/mm ²)	最大変位量 (mm)	最大荷重時の累積AEヒット数
Case 1	未使用鋼矢板 (孔なし)	4.51	0.20	1.75	194
Case 2	未使用鋼矢板 (孔あり)	4.01	0.18	2.07	262
Case 3	既設鋼矢板 (孔なし)	2.83	0.13	1.33	863
Case 4	既設鋼矢板 (孔あり)	2.79	0.12	0.84	390

係を図-4に、AEヒット数-応力レベルの関係を図-5に、各ケースの試験結果のまとめを表-3に示す。

本研究では、一連の載荷過程において発生するAEを累積AEヒット数とし、応力度-変位挙動とともにAEの発生挙動の変化点を示した。また、各ケースについて応力レベルごとのAEヒット数と変化点での応力レベルを示した。ここでの変化点とは、累積AEヒット数の発

生挙動が変化し、グラフに現れた点を示す。

検討の結果、鋼矢板とコンクリートの付着特性について各ケースで共通する荷重-変位挙動と特徴的な累積AEヒット数が確認された。付着応力度と変位量の関係は、いずれも一連の載荷過程で直線状に増加する傾向が確認された。AEヒット数-応力レベルでは、各ケースで特徴的な挙動が確認された。

最大付着応力度を比較すると、未使用鋼矢板では Case 2 が Case 1 に対して 90%、変位量は同比較で 118%であった。これに対して、既設鋼矢板を用いたケースでは、最大付着応力度では Case 4 が Case 3 に対して 92%、変位量は同比較で 63%であった。未使用鋼矢板と既設鋼矢板の最大付着応力度を比較すると孔無しのケースでは Case 1 が Case 3 に対して 154%、孔有りのケースでは Case 2 が Case 4 に対して 150%であった。最大付着応力度の最小値は、Case 4 の 0.12N/mm^2 であった。実構造物自重が 5kN/m^2 であることから 20 倍以上の付着力を有することが確認された。Case 1 の累積 AE ヒット数は、載荷過程の途中で変化点 A が確認されたが、ほぼ直線状に増加する傾向が確認された。Case 2～Case 4 では、載荷過程の後半で累積 AE ヒット数を示すグラフの勾配が変化する挙動が確認された。Case 1 では、応力レベル 23%で変化点 A が確認され、その後も連続して AE が発生する挙動が確認された。その他のケースの変化点は、Case 2 では AE ヒット数の最大値 41 が確認された後の応力レベル 71%、Case 3 では 74%、Case 4 では 83%で確認されている。Case 3 および Case 4 の変化点は、AE ヒット数の最大値が発生する前に確認されている。一連の載荷過程で発生した AE ヒット数の合計は、Case 1 が 194、Case 2 が 262、Case 3 が 744、Case 4 が 390 であった。Case 1 での変化点以降の AE ヒット数は、合計の 79%であった。Case 2～Case 4 の変化点以降の AE ヒット数は、合計に対して Case 2 が 55%、Case 3 が 70%、Case 4 が 73%であった。

孔無と孔有の鋼矢板切片的付着応力度に 10%程度しか差が生じなかったことから、断面欠損率 3%程度の孔では、コンクリートの付着力に大きな影響がないものと考えられる。Case 1 において、累積 AE ヒット数がほぼ直線状に推移したのは、鋼矢板切片表面の粗さが小さく孔も無いことから、コンクリートの付着に寄与する鋼矢板表面の凹凸が少ないためと考えられる。一方 Case 2～Case 4 で載荷過程の途中から累積 AE ヒット数が増加する挙動が確認されたのは、表面の粗さや鋼矢板切片に設けた孔による影響と考えられる。特に累積 AE ヒット数を示すグラフの変化点 A が応力レベルの 70～80%であることから、変化点以前の付着応力度は、鋼矢板が剥離しない安全な荷重であり、変化点以降は急激に鋼矢板とコンクリート界面での破壊が進行しているものと考えられる。既設鋼矢板を用いた Case 3 および Case 4 では、AE ヒット数の最大値が確認される前に変化点が発生していることから、載荷過程の終盤まで表面の粗さの影響を受けているものと推測される。変化点の傾向により、鋼矢板がコンクリートから剥離する段階をある程度推測することが可能であるものと考えられる。

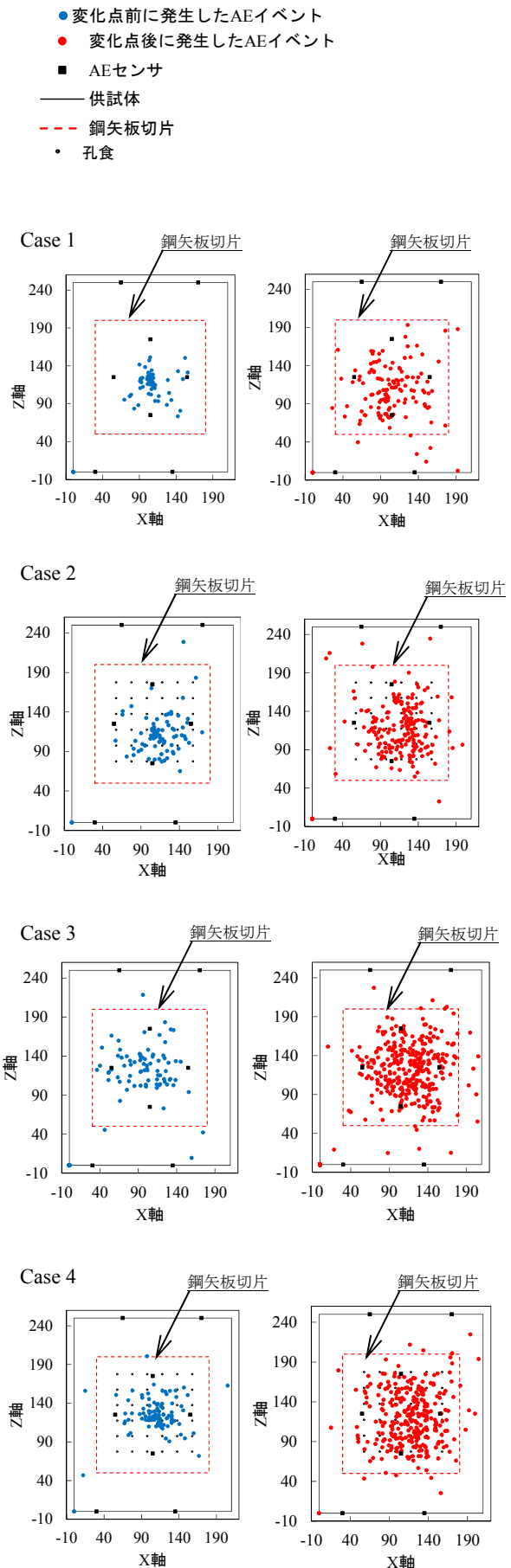


図-6 変化点前後のx-z方向AE源位置標定

以上の結果より、鋼矢板表面の粗さや鋼矢板切片に設けた孔は、コンクリートの付着性能に影響を与えているものと考えられる。ただし、最大付着応力度は、鋼矢板切片表面の凹凸が大きいと考えられる既設鋼矢板よりも未使用鋼矢板のケースで大きい値が確認された。本研究では、荷重過程で発生する破壊現象起源の弾性波を同定して荷重過程の詳細な解析を行うために AE 源位置標定を行い、荷重過程の評価を試みた。

3.2 荷重過程における AE 源位置標定

Case 1~Case 4 の変化点前後の x - z 方向のコンクリート以外のノイズを除去後の AE 源位置標定を図-6 に示す。Case 1~4 の変化点前後の x - y 方向のコンクリート以外のノイズを除去後の AE 源位置標定を図-7 に示す。

検討の結果、AE 発生位置において各ケースで共通する挙動が確認された。また、未使用鋼矢板と既設鋼矢板で異なる挙動が確認された。x - z 方向の変化点前の AE 源位置標定では、各ケースとも鋼棒を取り付けた鋼矢板切片の中央付近で頻発していた。ただし、未使用鋼矢板と既設鋼矢板のケースを比較すると、既設鋼矢板を用いたケースにおいて AE 発生位置が広範囲に分布している傾向が確認された。変化点後の AE 源位置標定では、鋼棒を取り付けた中央付近から鋼矢板切片の範囲に AE の発生箇所が分布する傾向が確認された。変化点後の AE 源位置標定の範囲が最も狭いのは Case 1 で、Case 2~Case 4 では Case 1 よりも広範囲に分布する傾向が確認された。孔を設けた Case 2 と Case 4 の比較では、既設鋼矢板を用いた Case 4 で広範囲の AE の分布傾向が確認された。各ケースを比較して最も広範囲に AE が分布する傾向が確認されたのは、Case 3 であった。x - y 方向の AE 源位置標定より、変化点前は鋼棒直下付近のコンクリート内部からの AE 発生であったが、変化点後は広範囲に広がり、鋼矢板とコンクリートの界面での AE 発生挙動が確認された。AE の分布範囲は、x - z 方向と同様に未使用鋼矢板を用いたケースよりも既設鋼矢板を用いたケースで広範囲に分布する傾向が確認された。

x - y 方向の AE 源位置標定で各ケースともコンクリート内部から AE が発生しているのは、荷重過程におけるコンクリートの変形に起因するものと考えられる。特に Case 3 および Case 4 において x - z 方向および x - y 方向で広範囲に AE が発生しているのは、鋼矢板表面の長期供用により生じた表面の粗さに起因するものと考えられる。Case 2 と Case 4 の AE 源位置標定より、孔の付近から AE が発生している傾向が確認されなかった。しかし Case 1 よりも Case 2 で広範囲に AE 源位置標定が確認される傾向であったのは、鋼矢板に設けた孔に入り込んだコンクリートが、供試体内のコンクリートの AE 発生挙動に影響を与えているものと考えられる。

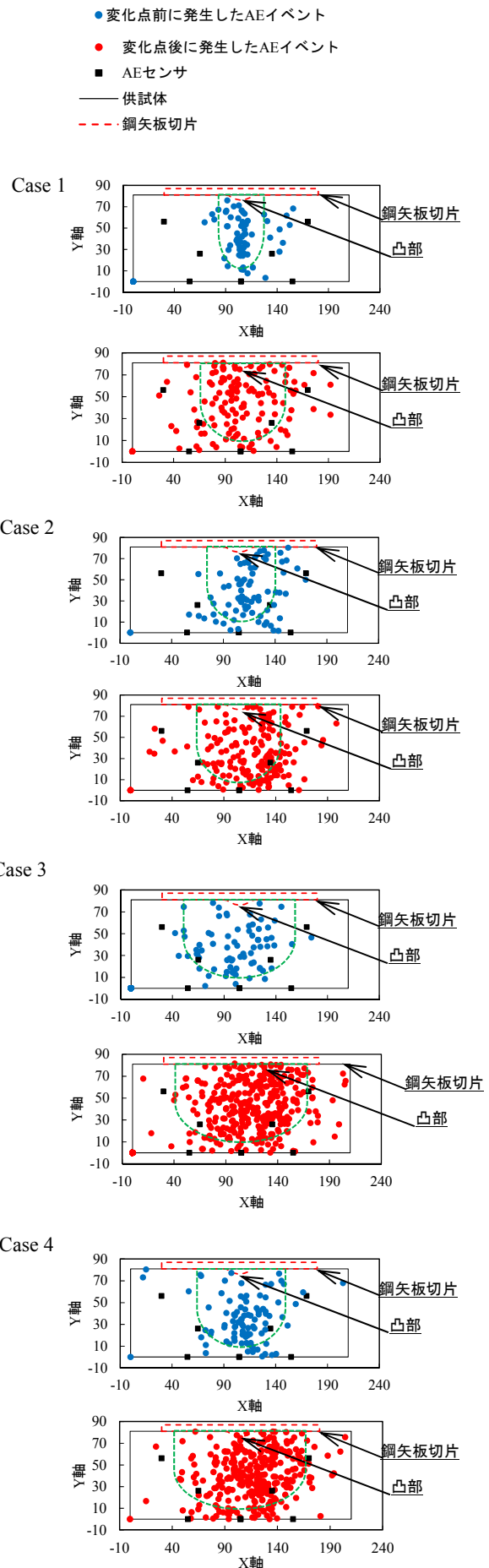


図-7 変化点前後のx - y方向AE源位置標定

3.3 試験結果に及ぼす形状の影響

写真-2に付着試験終了後の状況を、写真-3に付着試験終了後の付着面の状況を示す。

試験終了後の鋼矢板切片中央の凸型の高さ寸法を確認したところ埋め込み高 A は、未使用鋼矢板で 5mm であるのに対して既設鋼矢板では 3mm であった。中央の凸部の高さは、各ケース共に鋼矢板切片の両端部および中央部とも同じ高さであったことから、付着試験時の鋼矢板の変形により凸部寸法が大きくなったとは考えられず、既設鋼矢板の切片は、長期供用に伴う表面の腐食進行により中央の A 寸法が小さくなっていったものと考えられる。このことから未使用鋼矢板と既設鋼矢板の中央の山の高さが、付着応力度に影響を与えたものと考えられる。A 寸法の大きい未使用鋼矢板では埋め込まれた高さ A の凸部が、荷重過程の終盤までコンクリートの付着力に影響した結果、付着応力度が大きくなったものと考えられる。

4. おわりに

本論では、検討する技術を鋼矢板-コンクリート複合材として考えるために必要不可欠な両材料の界面での付着特性を評価するために検討した結果を報告した。結果、コンクリートの付着性能は、鋼矢板の表面性状の影響を受けることが示唆された。以下に今回の検討の結果を列記する。

- (1) 鋼矢板とコンクリートの付着試験の結果、最小値で $0.12\text{N}/\text{mm}^2$ の付着応力度が確認された。実構造物の自重は、 $5\text{kN}/\text{m}^2$ であることから、技術適用後の施設の自重に対して約 20 倍以上の付着力があることが確認された。
- (2) 表面性状が異なる鋼矢板切片において、累積 AE ヒット数を示すグラフの勾配の変化点を確認されたことから、変化点以前の付着応力度は、鋼矢板が剥離しない安全な荷重、変化点以降は急激に鋼矢板とコンクリート界面での破壊が進行しているものと考えられる。同時に、鋼矢板がコンクリートから剥離する段階をある程度推測することが可能であるとされる。
- (3) AE の発生挙動は、未使用鋼矢板よりも既設鋼矢板を用いたケースで多く発生しており、AE 源位置標定では孔食を想定した孔近辺からではなく鋼矢板とコンクリートの界面やコンクリート内部から発生している傾向が確認された。ただし Case 1 と Case 2 の AE 源位置標定より孔を設けたケースで広範囲に AE が分布している傾向が確認された。このことから、鋼矢板へのコンクリートの付着には、表面の細かな凹凸と孔の影響が寄与しているものと考えられる。

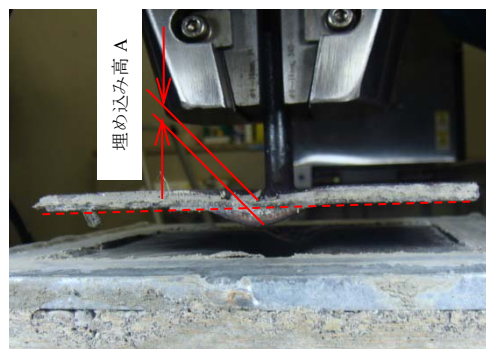


写真-2 付着試験終了後の状況

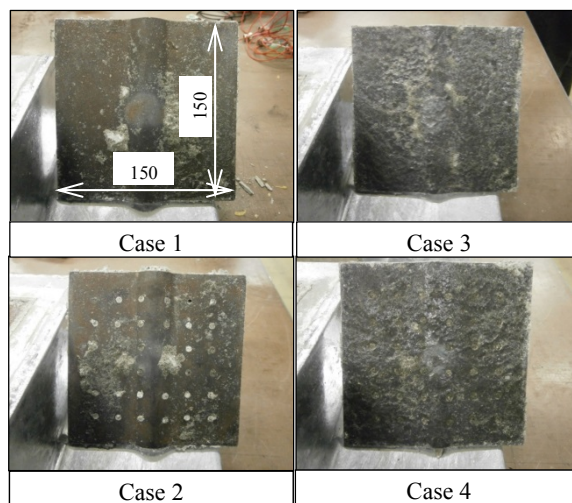


写真-3 付着試験終了後の付着面の状況

参考文献

- 1) 上越地域振興局農林振興部農村整備課：よみがえれ 瀧川～県営基幹水利施設ストックマネジメント事業 瀧川地区の護岸形式の検討について～、農地情報(第93号)、2010.11
- 2) 小林秀一、鈴木哲也、長崎文博、佐藤弘輝：腐食が進行した鋼矢板構造物のコンクリート被覆による保護工に関する実証的研究、土木学会論文集 F6 (安全問題)、Vol.69, No.4, pp. I 55- I 62, 2013.11
- 3) 佐藤弘輝、鈴木哲也、小林秀、長崎文博：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、コンクリート工学会年次論文集、Vol.35, pp.1639-1644, 2013.7
- 4) 佐藤弘輝、鈴木哲也、館 翔平、長崎文博：画像解析を用いたコンクリート-鋼矢板複合材の曲げ荷重挙動評価、コンクリート工学会年次論文集、Vol.36, pp.1918-1923, 2014.7
- 5) 長瀧重義ほか：非破壊試験による鋼・コンクリート合成構造の欠陥評価方法に関する研究、土木学会論文集、Vol.35, No.564, pp.133-143, 1997.5
- 6) 土木学会監修：腐食した鋼構造物の耐久性照査マニュアル、pp.1-203, 2009.