論文 AE 指標を用いた鋼矢板 - コンクリート複合材の付着特性の定性評価

佐藤 弘輝*1·鈴木 哲也*2·小林 秀一*3

要旨:農業用水利施設として利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)を低減できる技術が必要とされている。筆者らは既設鋼矢板の補修技術として コンクリートによる被覆技術を検討しており、既往研究において鋼矢板 - コンクリート複合材の曲げ載荷試 験に基づく力学特性の改善効果を確認している。本論では、鋼矢板とコンクリートの界面での付着特性を AE 法により詳細評価した結果を報告する。検討の結果、AE パラメータを用いることにより付着試験を詳細に評 価できることが明らかになった。コンクリートの付着特性は、鋼矢板表面の凹凸に影響を受け、AE パラメー タを変質させることが示唆された。

キーワード:鋼矢板,コンクリート,付着試験,算術平均粗さ,AE法

1. はじめに

既存の社会基盤施設は、老朽化が顕在化することに伴い、適切な補修工法の適用が不可欠である。本論の研究 対象である農業用水利施設で供用されている鋼矢板護岸 は、社会基盤施設と同様、実環境下で腐食が顕在化して いる施設が散見されている。

既設鋼矢板護岸の補修は、一般的に塗装、有機被覆、 無機被覆などの材料が使用されている。これらの材料で 鋼矢板表面を被覆することにより、腐食因子を遮断して 既設鋼矢板の腐食の進行を抑制している。当該の技術は、 被覆厚が薄く、付着力が大きいことから、広く採用され てきたが、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¹⁾。

筆者らは、既設鋼矢板護岸への補修技術としてコンク リートパネルを活用した被覆工法を検討している^{2), 3), 4)}。 既往研究では、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 荷との関連性を検討し、補修効果を明らかにしている^{2),} 3)。その際、破壊挙動へ及ぼす鋼矢板とコンクリートと の界面における付着の影響が示唆されたことから, コン クリートに付着させた鋼矢板切片に引張方向の載荷を実 施し、AE 発生源位置標定による破壊位置の観点から付 着試験結果を評価した⁴⁾。その結果,載荷過程のAE発 生挙動における変化点前後で AE 発生源の拡大が確認さ れ、供試体内部における広範な破壊現象が確認された。 一連の実験的検討から、鋼矢板 - コンクリート複合材の 付着試験時の破壊挙動は、 鋼矢板とコンクリートの界面 性状に影響されることが示唆された。

*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)
*3 (株)水倉組 営業本部 技術営業次長 (正会員)

そこで本報では、実環境で供用されている鋼矢板護岸 の一部を採取し、三次元構造解析顕微鏡を使用した表面 性状評価を実施し、長期供用下における表面性状の変質 を評価した。そのことを踏まえて、AE 計測を援用した 鋼矢板 - コンクリート複合材の付着試験時の破壊挙動に 関する詳細評価を試み結果を試みた。

2. 実験方法

2.1 供試体

本論で供試した試験体には、鋼矢板表面性状を観察す るための「鋼矢板表面観察供試体」と付着試験を実施し た「付着試験供試体」の2種類がある。

鋼矢板表面の観察試料を写真-1 に、鋼矢板表面の観 察範囲を図-1に示す。付着試験(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 に示 し、供試体の種類(表-2)、孔無と孔有の鋼矢板切片の 形状寸法(図-2)、供試体の形状寸法(図-3)および コンクリートの打設状況(図-4)の概要を示す。

本研究では、既設鋼矢板切片の水路面側および土面側 での腐食状況を把握するため、予め別の供試体を用いて 既設鋼矢板の表裏および未使用鋼矢板の表面性状の観察 を行い、付着試験に使用する水路面側の一般的な鋼矢板 表面性状の把握を行った。提案工法は、腐食の進行によ り表面凹凸が土面側と比較して大きいと想定される既設 鋼矢板水路面側に施されることから、付着試験は既設鋼 矢板の水路面側にコンクリートを打設して行った。

鋼矢板表面観察供試体は,付着試験前に未使用鋼矢板 および既設鋼矢板護岸より採取した鋼矢板切片の水路面 側と土面側の表面を観察し,水路面側の表面性状の把握

(正会員)



写真-1 観察試料



			R 1X I	コングリードが			
配合強度	フランプ	空気	W/C	単位量(kg/m ³)			
f'cr (N/mm²)	(cm)	量 (%)	(%)	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

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







図-3 供試体形状寸法図



図-4 コンクリート打設状況(側面方向)



表-2 供試体の種類 表-1 コンクリート示方配合

1		最大荷重	付着応力度	最大変位量	最大荷重時の
ケース	使用材料	(kN)	(N/mm^2)	(mm)	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

表-3 試験結果のまとめ(Case 1~Case 4)

を試みた。評価パラメータは,算術平均粗さである。鋼 矢板表面の観察は,**写真-1**に示す5枚の直径47mm円 形切片について中央10mm角の範囲で実施した(図-1)。 表面の観察には,三次元構造解析顕微鏡を使用して未使 用鋼矢板,既設鋼矢板の水路面側と土面側表面の算術平 均粗さの測定を非接触で実施した。測定結果を元にコン クリートと付着させる水路面側の鋼矢板の表面性状の把 握を行った。

鋼矢板切片とコンクリートの付着試験は、4 ケースで 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。その後に三次元構造解析顕微鏡を使用 した。算術平均粗さとは、図-5の概念図に示すように、 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計し平均した値で ある5。評価式を以下に示す。

$$\operatorname{Ra} = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} |f(x)| \, dx \tag{1}$$

ここで, Ra:算術平均粗さ, l:基準長さである。

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-4 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 付着試験

付着試験状況を写真-2 に示す。付着試験は,万能材 料試験機を使用して行った。載荷速度は,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載荷した。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 ックで挟んだ後に載荷した。最大変位量は,載荷時に万 能試験機で計測された値である。

2.3 AE 計測

本研究では、載荷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-3 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、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 鋼矢板円形切片の表面性状

鋼矢板の水路面と土面での算術平均粗さと板厚の関係 を図-6に示す。

検討の結果,円形切片の表面性状の観察では水路面側 および土面側,未使用鋼矢板で各々異なる表面性状の傾 向と鋼矢板厚との相関性が確認された。既設鋼矢板の残 存板厚は,3.0~3.9 mm であった。未使用鋼矢板の板厚 が6.0~6.2 mm であることから,既設鋼矢板の残存板厚 は,未使用鋼矢板の50~60%であった。既設鋼矢板の表 面粗さは,水路面側で算術平均粗さ13.61~16.85 µm,土 面側では6.03~9.89 µm が確認された。未使用鋼矢板の 算術平均粗さが,3.74~6.92 µm であることから,水路 面側での算術平均粗さが大きい傾向が確認され,板厚減 少との相関性が確認された。

以上より既設鋼矢板水路面側は,腐食の進行によって 表面の凹凸が拡大する傾向が確認されたものと考えられ る。このことから付着試験でコンクリートと付着させる 既設鋼矢板の水路面側表面は,算術平均粗さが増加する 傾向であると推測される。

3.2 付着試験における鋼矢板 - コンクリート複合材の AE パラメータの発生挙動

各ケースの引張試験結果の総括を表-3 に示す。鋼矢 板とコンクリートの付着特性は,既往研究⁴により荷重 -変位挙動と累積 AE ヒット数の特性とに関連が確認さ れた。一般的に,付着面の凹凸が大きいと付着面積が増 えることから付着強度が増加すると考えられるが,本研 究での付着応力度は, Case 1 で最大値が確認された。こ れは,図-2 に示す腐食の進行により既設鋼矢板の凸部 が未使用鋼矢板よりも小さくなったことに起因するもの と考えられる⁴。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と実構造物の 20 倍以上の付着力を有することが確認された。本報では, 検出した AE の特性を詳細に把握するため,得られた AE の振幅値および AE エネルギーの特徴量を破壊挙動との 関連から考察した。

図-7に応力度レベル - AE パラメータの関係を示す。 使用した AE パラメータは,累計振幅値と AE エネルギ ーである。本研究では,最大付着応力度を 100%とした ときの載荷過程の応力度の比率を応力度レベルと定義し た。検討の結果,累計振幅値と AE エネルギーは類似の 挙動を示すことが確認された。Case 1 では,累計振幅値 が一連の載荷過程においてほぼ直線状に推移する傾向が 確認された。AE エネルギーも同様に直線状に推移する 傾向が確認された。Case 2 では,応力度レベル 60%で AE エネルギーに増加傾向が確認された。Case 3 および Case 4 では, Case 2 と同様に応力度レベル 60~80%において



図-7 応力度レベル - 累計振幅値とAEエネルギーの関係



AE エネルギーの傾向の変化が確認された。応力度レベ ルの増加に伴う AE エネルギーの変化は、付着試験の進 行に伴う破壊挙動の進行と密接に関連し、局所的に発達 した破壊部位が連結したことにより、エネルギー値の増 加が確認されたものと推察される。

Case 1 の累計エネルギーを示すグラフにおいて応力度 レベル 30%まで勾配が急である傾向が確認されたのは, この段階で急激に破壊が進行していたものと考えられる。 Case 1 で最大付着力が確認された理由は,未使用鋼矢板 中央の山の高さが試験結果に影響を及ぼしたものと推察 されるが,検出された AE のエネルギー値は,既設鋼矢 板と比較して小さいことから,未使用鋼矢板では一連の 載荷過程においてコンクリートの付着に寄与する表面の 凹凸が少なく,載荷に対する界面での靱性が小さいもの と考えられる。Case 2 および Case 3 では応力度レベル 60%で,Case 4 では応力度レベル 80%で,累計振幅値, AE エネルギー共に発生挙動が変化する傾向が確認され たことから,鋼矢板に設けた孔や表面の凹凸が界面での 付着性能に大きく寄与しているものと考えられる。特に 既設鋼矢板を用いたケースでは,載荷過程の後半でパラ メータの発生挙動が変化する傾向が確認されたことから, 鋼矢板とコンクリートの付着には,鋼矢板表面の凹凸が 大きく影響を及ぼすものと考えられる。

3.3 AE パラメータの変化点における AE 源位置標定結果

図-8 に各ケースの AE エネルギーの変化点である 30%,60%および80%における X - Z 方向の AE 源位置標 定を示す。検討の結果,各ケースで異なる AE 発生挙動 が確認され,累計振幅値や AE エネルギーの増減と共通 する発生挙動が確認された。

Case 1 では、応力度レベル 30%以下の位置標定で振幅 値60~79dBのAEヒットが供試体中央付近で集中的に確 認された。その後応力度レベルの上昇とともに供試体内 部に AE ヒットが分散する傾向であるが,他のケースと 比較して分散範囲が最も小さい傾向が確認された。Case 2 では、応力度レベル 60~80%の位置標定において AE ヒットが頻発する傾向が確認された。Case 3 では、応力 度レベルの進行とともに AE ヒットが広範囲に分散する 傾向が確認された。Case 4 では,応力度レベル 80~100% において急激に供試体内部に AE ヒットが分散する傾向 が確認された。各ケース共,応力度レベル30%以下では AE ヒットが少ない傾向が確認された。応力度レベル 60 ~80%では, Case 2 および Case 3 で共通する AE ヒット の発生挙動が確認された。応力度レベル80~100%では、 未使用鋼矢板を用いたケースと既設鋼矢板を用いたケー スで AE の発生挙動が異なる傾向が確認された。いずれ のケースも累計振幅値および AE エネルギーの発生挙動 と同様な傾向が確認された。

Case 1における AE エネルギーにおいて応力度レベル 30%までの勾配が急である傾向は,供試体中央での集中 的な AE ヒットに起因するものと考えられる。未使用鋼 矢板を用いたケースでは,既設鋼矢板を用いたケースと 比較して,AE ヒットが分散する傾向が確認されなかっ た。既設鋼矢板を用いたケースで AE ヒットが広範囲に 分布している傾向が確認された。以上のことから,累計 エネルギーおよび累計振幅値と同様に表面の凹凸が影響 しているものと考えられる。特に鋼矢板の凹凸の影響は, 載荷過程の後半で界面での付着特性に大きな影響を与え るものと考えられる。

4. おわりに

本論では、本検討技術の確立するために必要不可欠な 鋼矢板 - コンクリート複合材の界面での付着特性を応力 度レベルに着目して AE パラメータにより評価した。

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) 鋼矢板の円形切片の表面観察の結果,水路面側での 算術平均粗さが大きい傾向が確認され,板厚減少と の高い相関性が確認された。また水路面側の表面性 状は,未使用鋼矢板や土面側と比較して算術平均粗 さが大きい傾向が確認されたことから,水路内面側 へ本技術を適用することが有効であることが確認 された。
- (2) 付着応力度が最も大きい Case 1 は, AE パラメータの 比較において注目すべき挙動が確認されなかった。 このことから,載荷過程で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く,載荷に対する界 面での靱性が小さいものと考えられる。
- (3) AE 源位置標定では、未使用鋼矢板を用いたケース と既設鋼矢板を用いたケースを比較し、載荷過程の 後半での AE ヒットの発生挙動が異なる傾向が確認 された。このことから、鋼矢板とコンクリートの界 面での付着性能には、鋼矢板の凹凸が大きく影響し ているものと考えられる。

参考文献

- 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
- 2) 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載荷挙動評 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
- 佐藤弘輝,鈴木哲也,舘 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載荷 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
- 4) 佐藤弘輝,鈴木哲也,小林秀一,長崎文博: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,コンクリート工学会年次論文集,Vol.37, pp.1651-1656,2015.7
- 5) 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.