

論文 鋼矢板-鉄筋コンクリート複合材の曲げ載荷過程における破壊挙動評価に関する研究

土田 真生*1・島本 由麻*2・鈴木 哲也*3・浅野 勇*4

要旨：鋼矢板を用いた農業用水路の腐食が課題となっている。本論では鋼矢板-鉄筋コンクリート複合材を対象に、4点曲げ載荷試験時の破壊挙動を検討した。実験的検討には、DICM, AE法を用い、AE計測結果にはSiGMA解析を適用した。検討の結果、曲げ強度が約3倍増加し、累積AEヒット数と累積AEエネルギーを指標とした破壊挙動の評価が可能であることが示唆された。累積AEエネルギーの増加と供試体の破壊過程には一定の関係性があり、SiGMA解析の適用で詳細な評価が可能であることが示唆された。

キーワード：コンクリート被覆, Acoustic Emission, DICM, 鋼矢板, トラス筋, SiGMA解析

1. はじめに

鋼矢板を構造材として用いる護岸施設では、腐食劣化に伴う耐久性の低下が懸念されている¹⁾。筆者らは、農業用鋼矢板水路構造を対象に既存施設における腐食特性の検出²⁾と鋼矢板-コンクリート複合材による補修工法³⁾を開発している。今日までに、鋼矢板-コンクリート複合材の曲げ応力場における破壊特性³⁾や実環境での施工性⁴⁾、発生したひび割れの非破壊検出⁵⁾を対象に実証的な検討を試みてきた。既往研究では無筋コンクリートを対象に検討を試みてきたが、補修後の既存施設に関する長期耐久性を考慮した場合、鉄筋コンクリート構造を構築する条件が必要であると推察されることから、本報では鋼矢板-鉄筋コンクリート複合材を対象に検討を試みる。

そこで本報では、鋼矢板水路構造に一般的に確認される曲げ応力場における鋼矢板-鉄筋コンクリート複合材の破壊特性を実験的に分析・評価することを目的に、4点曲げ載荷試験における破壊特性評価を試みた結果を報告

する。載荷過程では、荷重-変位挙動を計測するとともに、デジタル画像相関法(DICM)による非破壊・非接触ひずみ計測とAE(Acoustic Emission)法による破壊挙動評価を試みた。AE計測結果は、大津らにより開発されたAE-SiGMA解析を援用し、AE波による破壊運動の解析的検討を加えた。

2. 実験方法

2.1 供試体

供試体は、幅1,500 mm、高さ300 mm、奥行き357 mmの鋼矢板-鉄筋コンクリート複合材として実験室内で製作した。実験ケースはCase 1からCase 6までの6ケースである(図-1)。Case 1~Case 4では鉄筋コンクリート表面に幅1,500 mm、高さ60 mm、奥行き357 mmのコンクリート・パネル(二次製品)を配置した。鉄筋の配置はトラス状(以後、トラス筋と記す)に行った(鉄筋降伏強度: 295 N/mm²)。コンクリート・パネルの材料条件は、設計

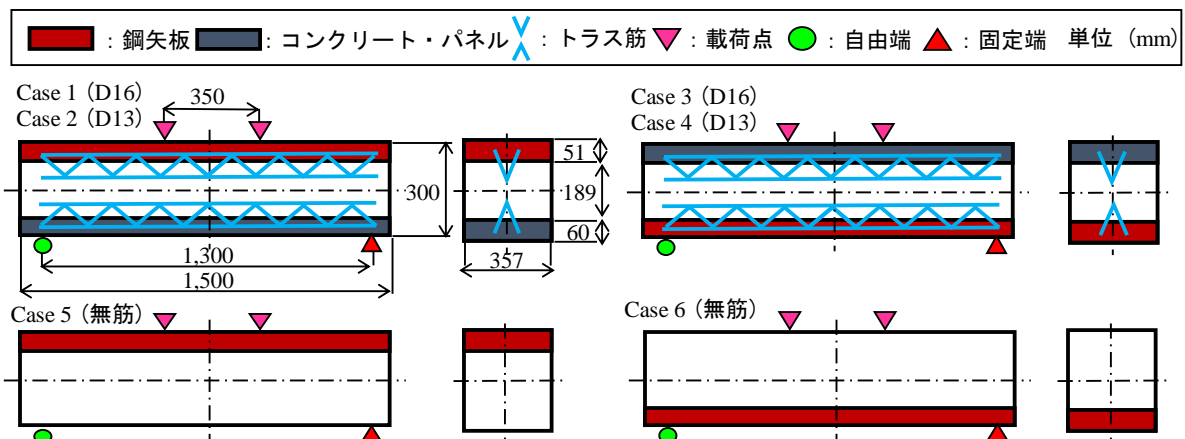


図-1 実験ケース

*1 新潟大学 農学部生産環境科学科 (現新潟県) (正会員)

*2 新潟大学大学院 自然科学研究科博士後期課程 (学生会員)

*3 新潟大学自然科学系准教授 (正会員)

*4 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究部門 (正会員)

基準強度：40 N/mm²(材齢 14 日)，スランプ値：8 cm，骨材最大寸法：15 mm，空気量：4.5±1.5%とした。使用セメントは，普通ポルトランドセメントである。供試体製作は，新品の鋼矢板にトラス筋を溶接し，鋼矢板とコンクリート・パネルとの間にコンクリートを充填して作製した。充填コンクリートは，設計基準強度：24 N/mm²(材齢 28 日)，スランプ値：8 cm，粗骨材最大寸法：25 mm，空気量：5.5±1.5%で配合設計した。

各検討ケースの特徴は，Case 1 が圧縮側に鋼矢板，引張側にコンクリート・パネルを設置した。トラス筋は D16 を用いた。Case 2 は圧縮側に鋼矢板，引張側にコンクリート・パネルとし，トラス筋は D13 を用いた。Case 3 は圧縮側にコンクリート・パネルを設置し，引張側に鋼矢板，トラス筋は D16 を用いた。Case 4 は圧縮側にコンクリート・パネルを，引張側に鋼矢板，トラス筋は D13 を用いて設置した。Case 5 および Case 6 は無筋コンクリートであり，Case 5 は圧縮側に鋼矢板，Case 6 は引張側に鋼矢板とした。

2.2 AE 計測⁶⁾

曲げ破壊挙動を評価するため AE 計測を実施した。AE の計測装置は SAMOS である。AE センサは画像解析範囲を中心に 8 個設置した(図-2)。センサは 150 kHz 共振型センサを用い，しきい値を 42 dB，増幅値を 60 dB とした。周波数域は 5~400 kHz とした。計測条件は，筆者らによる既往研究⁷⁾を参照し，AE-SiGMA 解析を行える計測条件とした。

2.3 画像計測

曲げ載荷時の変形挙動を DICM で計測した。DICM は測定対象物表面を 2 台の CCD カメラで撮影したデジタル画像を解析することにより，変形量と方向を推定する解析手法である⁸⁾。解析原理は測定対象物表面の計測範囲にスプレーなどで不定形ドット(ランダムパターン)を施し，測定対象物の変形前後の移動量を追跡することにより，変形量と変形方向を解析するものである。画像計測は図-2 に示す範囲で行った。撮影間隔は 5 Hz に設定した。ひずみ分布の解析においてはサブセットを 21 pixel に設定した。

3. 解析方法

3.1 AE パラメータ解析⁹⁾

本論では AE パラメータの中でも AE ヒット数および AE エネルギーを指標に破壊挙動評価を試みた。AE の発生挙動は，微小ひび割れの発生過程と対応している。AE ヒット数は単位時間当たりの AE 発生挙動を評価する指標であり，載荷過程を定量評価するための優れた指標である。AE エネルギーは次式より算出した¹⁰⁾。

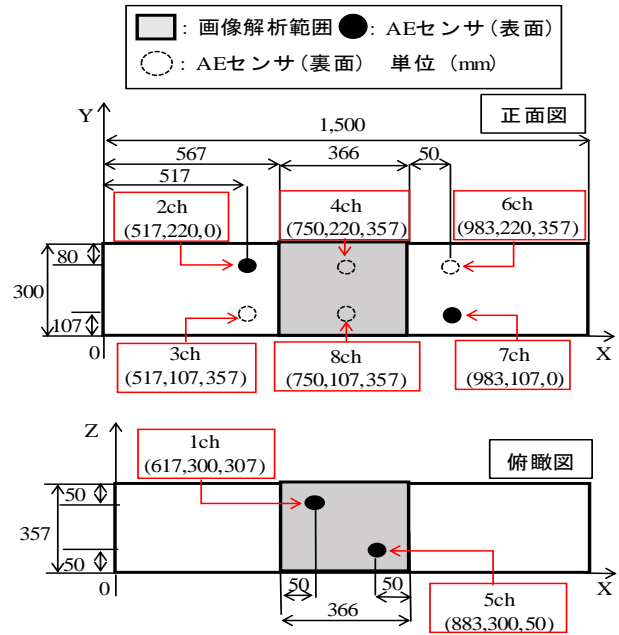


図-2 AE センサ配置図

$$E_{AE} = (\alpha_p)^2 \quad (1)$$

ここで， α_p ：AE 信号の最大振幅値である。

3.2 SiGMA 解析¹¹⁾

AE 法を用いた破壊源探査ではモーメントテンソル解析の有用性が明らかとなっており，実用的な解析法として SiGMA 解析¹¹⁾が大津らによって提案されている。既往研究¹²⁾においてもその有用性は明らかであり，本研究においても AE 計測結果に基づく破壊源探査に SiGMA 解析を用いた。

モーメントテンソルは 2 階のテンソルで，等方性材料では，AE 波の発生源となったマイクロクラックの面が運動した方向をベクトル l ，その法線ベクトルを n とすると式(2)で表すことができる。

$$m_{pq} = (\lambda l_k n_k \delta_{pq} + \mu l_p n_q + \mu l_q n_p) \Delta V \quad (2)$$

ここで， λ と μ はラメの定数， δ はクロネッカーのデルタ記号である。 ΔV は相対変位量のクラック面上で積分して得られる体積量を表している。

モーメントテンソルは 2 階のテンソルであるので，固有値解析を行い，主値と主方向を知ることができる。固有値および固有ベクトルは式(3)および(4)で表される。

$$\begin{aligned} \text{第 1 (最大) 固有値} & e_1 = \mu b \left(\frac{l_k n_k + 1}{1 - 2\nu} \right) \Delta V \\ \text{第 2 (最小) 固有値} & e_2 = 2\mu b \nu \frac{l_k n_k}{1 - 2\nu} \Delta V \quad (3) \\ \text{第 3 (中間) 固有値} & e_3 = \mu b \left(\frac{l_k n_k - 1}{1 - 2\nu} \right) \Delta V \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{第1固有ベクトル} & e_1 = l + n \\
 \text{第2固有ベクトル} & e_2 = l \times n \\
 \text{第3固有ベクトル} & e_3 = l - n
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

となる。ここで、クラック面の運動ベクトルすなわちバーガスベクトル b を、大きさ b と方向ベクトル l の積 $b = bl$ とする。

モーメントテンソルの固有値は、せん断成分 X 、引張偏差成分 Y および引張静水圧成分 Z の3つの成分に分解される。本研究では、モーメントテンソル成分を決定したのち、固有値解析を行った。せん断率を $Rs = X / (X + Y + Z)$ と定義し、固有値からせん断率 Rs を算出した。ひび割れを、大津ら同様に、引張ひび割れ・せん断ひび割れ・混合型ひび割れに分類した。分類を以下に示す。

$$\begin{aligned}
 Rs < 40\% & \text{ 引張ひび割れ} \\
 40\% \leq Rs \leq 60\% & \text{ 混合型ひび割れ} \\
 Rs > 60\% & \text{ せん断ひび割れ}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

3.3 画像解析¹³⁾

変形後のサブセットを対象に、変形前のサブセットの輝度値分布と高い相関性を示すサブセットを数値解析で探索し、サブセット中心の点の移動より変位方向、変位量を算出した。本研究では、この処理を全ての小領域で繰り返すことによって得た変位データを利用して、ひずみ分布を算出した。

4. 結果および考察

4.1 力学特性

各ケースの曲げ載荷試験の結果を表-1に示す。鋼矢板が圧縮側、引張側のどちらにある場合も、トラス筋とコンクリート・パネルを導入することで曲げ強度が約3~4倍増加することが明らかになった。トラス筋とコンクリート・パネルを導入したCase 1~4では引張側に鋼矢板があるCase 3, 4が、圧縮側に鋼矢板があるCase 1, 2より曲げ強度が増加した。トラス筋はD16を用いたCase 1, 3が、D13を用いたCase 2, 4より曲げ強度が増加した。残留変位はトラス筋を挿入した供試体では約23~30mmであった。無筋の供試体ではCase 5が約7mm, Case 6が約18mmであった。本論では、Case 4とCase 6を事例として、以下考察を進める。

図-3に縦軸を荷重、横軸を時間とした各ケースの荷重時間曲線のグラフを示す。Case 1とCase 2では795秒で初めて荷重が低下した。Case 3は1,134秒で初めて荷重が低下し、Case 4では1,179秒で初めて荷重が低下した。Case 5が977秒で初めて荷重が低下し、Case 6では522秒

表-1 曲げ載荷試験の結果

	最大荷重 (kN)	曲げ強度 (N/mm ²)	最大荷重時の変位 (mm)	残留変位 (mm)
Case 1	227.70	9.41	33.84	23.64
Case 2	211.30	8.70	33.76	23.98
Case 3	360.14	14.75	30.71	32.62
Case 4	273.54	11.39	20.30	23.99
Case 5	92.95	3.79	1.61	7.01
Case 6	84.10	3.44	1.73	18.25

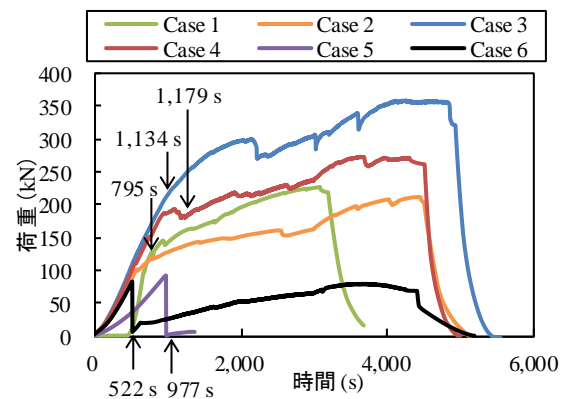


図-3 荷重時間曲線

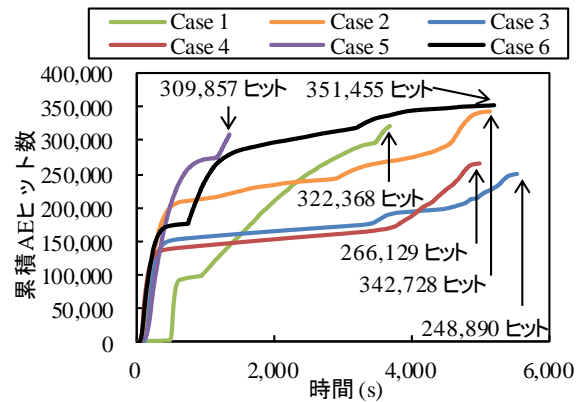


図-4 累積 AE ヒット数の比較

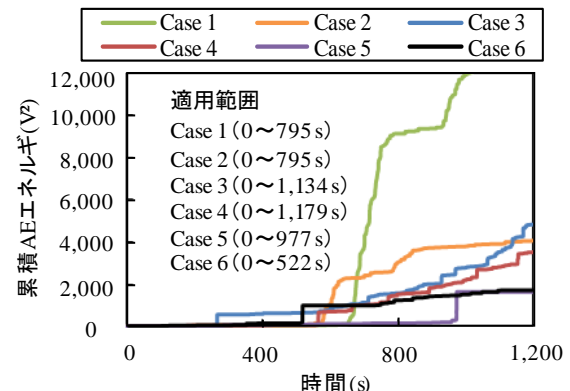


図-5 累積 AE エネルギーの比較

秒で初めて荷重が低下した。このことから弾性域において、Case 4の方がCase 6と比べて耐久性があると考えられ、トラス筋とコンクリート・パネルによる補強効果が付加されたと考えられる。次節では、荷重開始から荷重が初めて低下した時間までに発生した AE を適用範囲として、考察を進める。

4.2 AE 法を用いた破壊挙動評価

4.2.1 累積 AE ヒット数

図-4に各ケースの累積 AE ヒット数の結果を示す。縦軸は累積 AE ヒット数を、横軸は時間を示している。荷重試験終了後の累積 AE ヒット数は Case 4 が 266,129 ヒット、Case 6 が 351,455 ヒットであった。累積 AE ヒット数が少ないことは、AE 波の発生すなわち微小なひび割れの発生が少ないことを示している。このことからトラス筋とコンクリート・パネルを導入した Case 4の方が、無筋である Case 6 より累積 AE ヒット数が少ないので、Case 4 は材料安定性の向上が見込めると考えられる。ひび割れ発生位置と累積 AE ヒット数との間には、明確な関係性は確認されなかった。

4.2.2 累積 AE エネルギー

図-5に各ケースの累積 AE エネルギーの結果を示す。縦軸は累積 AE エネルギー、横軸は時間を示している。累積 AE エネルギーの適用範囲は、Case 1 と Case 2 が、0~795 秒、Case 3 が 0~1,134 秒、Case 4 が 0~1,179 秒とした。Case 5 は 0~977 秒、Case 6 は 0~522 秒を累積 AE エネルギーの適用範囲とした。図-3 で示した荷重低下点に着目すると、Case 4 および Case 6 どちらの供試体も、荷重低下直後か荷重が低下するよりも前に累積 AE エネルギーが増加することが確認された。このことから、累積 AE エネルギーを指標とした供試体の破壊挙動評価が可能であると考えられる。次節で累積 AE エネルギーと供試体の破壊過程についてより詳細に検討をする。

4.3 画像計測結果と累積 AE エネルギーの関係

4.3.1 Case 4 (D13 配筋コンクリート、引張側：鋼矢板、

圧縮側：コンクリート・パネル)

累積 AE エネルギー増加と供試体の破壊過程について考察する。対象範囲は荷重開始から、最初に荷重が低下する 1,179 秒までとする。図-6 に各ケースの累積 AE エネルギーの適用範囲におけるひずみ分布の変化図を示しており、各ケースで曲げ破壊が生じたことが確認された。ひずみ分布は引張方向のひずみを正、圧縮方向のひずみを負の数値で示し、赤色に変化するほど引張方向のひずみ量が大きくなり、紫色に変化するほど圧縮方向のひずみ量が大きくなる。ひずみ量の最大値は 0.0075、最小値は -0.000695 とした。ひずみ分布の座標軸は、画像解析範囲の中心を原点としている。図-7 に Case 4 の SiGMA 解析による AE 源の位置標定およびひび割れの分類結果を

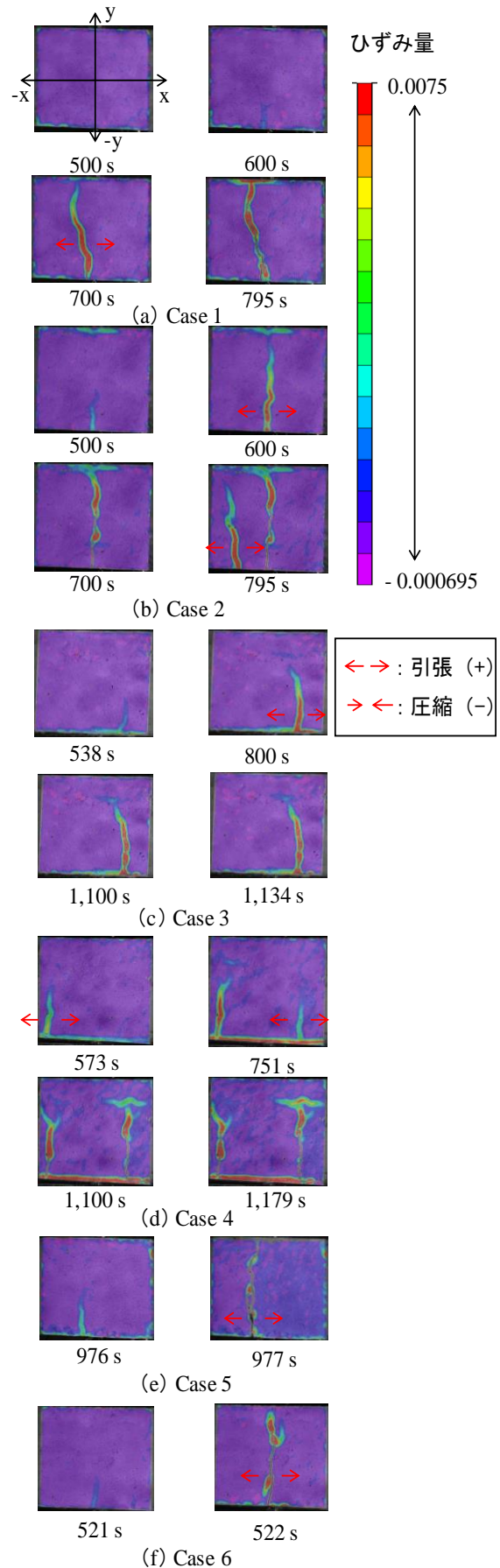


図-6 各ケースのひずみ分布の変化図

示す。SiGMA 解析は MIXED-MODE が混合型ひび割れ、SHEAR がせん断ひび割れ、TENSILE が引張ひび割れを示している。AE パラメータである最大振幅値を位置標定の結果に反映させ、42~60 dB、61~75 dB、76~90 dB に分類し、種類ごとに異なるプロットサイズで表記した。

検討の結果、図-6 より 573 秒でひずみ分布図から、左下のひずみ量および下側のひずみ量が増加したことが確認された。SiGMA 解析の結果では、図-7 より 400 秒までに検出された AE 源の位置標定をすることができた。検出された AE 源ではせん断ひび割れが最も多く、次点で引張ひび割れが多かった。せん断ひび割れが卓越したのは、鋼矢板とコンクリートの界面で生じた擦れが生じたからと考えられる。その後 751 秒でひずみ分布の変化図から右下のひずみ量が増加し、1,179 秒までに Case 4 では 2 本のひび割れが発達したことが確認された。右上でひずみ量が増加したことが確認されたが、これはコンクリート・パネルと充填コンクリートとの界面で生じたものと考えられる。

これらのことから、累積 AE エネルギーの増加と供試体の破壊過程には一定の関係性があると示唆され、SiGMA 解析を用いることでより詳細な評価ができると考えられる。

4.3.2 Case 6 (無筋コンクリート, 引張側: 鋼矢板, 圧縮側: コンクリート・パネル)

図-8 に対象範囲におけるひずみ分布の変化図を、図-9 に SiGMA 解析による AE 源の位置標定およびひび割れの分類結果を示す。

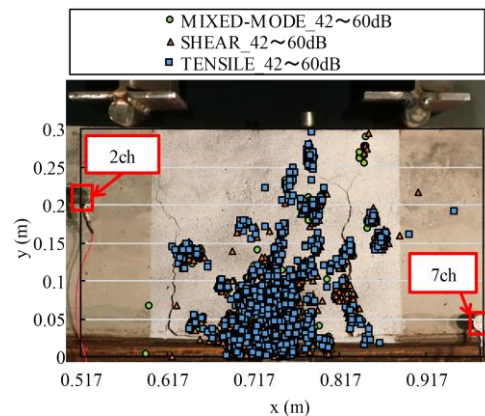
検討の結果、荷重開始から 520 秒までひずみ分布の変化図に変化は確認されなかった。SiGMA 解析の結果では、対象範囲までに検出された AE 源の位置標定をすることができた。200~300 秒の SiGMA 解析の結果では、検出された AE 源は引張ひび割れが最も多く、次点でせん断ひび割れが多かった。その後ひずみ分布の変化図から、521 秒で表面下部にひずみ量が増加し始め、522 秒でひび割れが発生したことが確認された。

図-6 で Case 4 と比較すると、破壊過程は異なるが、図-5 からひずみ量の増加およびひび割れが発生したときに、累積 AE エネルギーが増加する点は Case 4 と同じであることが確認された。

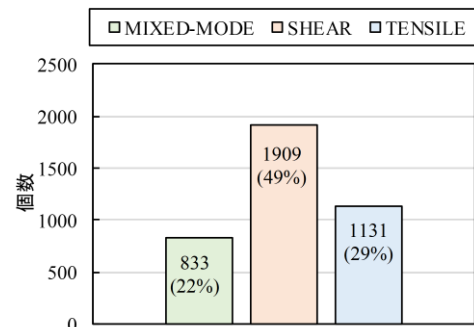
5. まとめ

本論では、鋼矢板にコンクリートを被覆した材料を製作し、4 点曲げ荷重試験を行い、曲げ荷重時の破壊挙動についてデジタル画像相関法 (DICM)、Acoustic Emission 法 (AE 法)、SiGMA 解析を用いて評価した。検討の結果を以下に列挙する。

(1) トラス筋およびコンクリート・パネルの導入で、曲

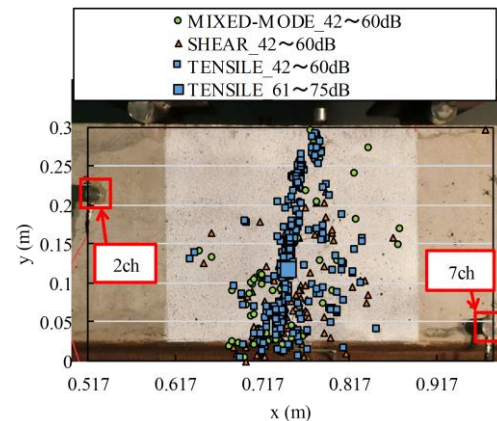


(a) AE 源の位置標定 (0~400 s)

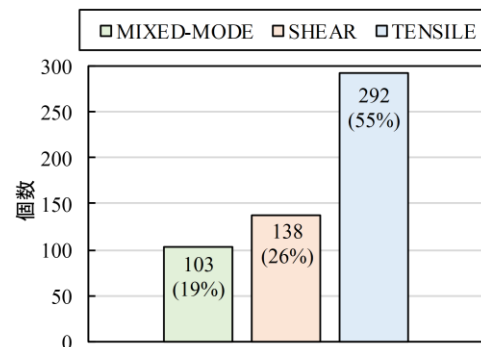


(b) ひび割れの個数と割合 (0~400 s)

図-7 Case 4 の SiGMA 解析結果



(a) AE 源の位置標定 (200~300 s)



(b) ひび割れの個数と割合 (200~300 s)

図-9 Case 6 の SiGMA 解析結果

- げ強度が約3倍増加し、補強効果を付加できると明らかになった。
- (2) Case 4 と Case 6 に着目し、累積 AE ヒット数と累積 AE エネルギーを用いて評価した結果、Case 4 では累積 AE ヒット数が少ないことから、トラス筋とコンクリート・パネルによる材料安定性の向上が示唆された。また累積 AE エネルギーを用いた破壊挙動評価が可能であると示唆された。
- (3) 累積 AE エネルギーと DICM のひずみ分布、SiGMA 解析の結果から、累積 AE エネルギーの増加と供試体の破壊過程には一定の関係性があると示唆され、SiGMA 解析を用いることでより詳細な評価が可能であると示唆された。

参考文献

- 1) 鈴木哲也, 森井俊広, 原斉, 羽田卓也: 地域資源の有効活用に資する鋼矢板リサイクル工法の開発, 農業農村工学会誌, Vol.80, No.10, pp.21-24, 2012
- 2) 鈴木哲也: 鋼矢板排水路の腐食実態を踏まえた保全対策に関する実証的研究, 土木構造・材料論文集, 29, pp.75-82, 2013
- 3) 佐藤弘輝, 鈴木哲也, 小林秀一, 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1639-1644, 2013
- 4) 小林秀一, 佐藤弘輝, 長崎文博, 鈴木哲也: 既設鋼矢板排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, No.1, pp.1303-1308, 2013
- 5) 小林秀一, 鈴木哲也: 赤外線画像のセミバリオグラム特性に基づくコンクリートひび割れの定量評価, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.70, No.2(応用力学論文集 Vol.17), pp. I_107- I_114, 2014
- 6) 日本非破壊検査協会編: アコースティック・エミッション試験 II, 日本非破壊検査協会, pp.9-11, 2008
- 7) 長崎文博, 鈴木哲也, 佐藤弘輝, 小林秀一: コンクリートを被覆した鋼矢板の曲げ特性評価に関する研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.67, No.1, pp.521-528, 2013
- 8) Sutton, M. A., Orteu, J. J. and Schreier, H. W.: Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements, Springer, pp.81-118, 2009
- 9) 日本非破壊検査協会編: アコースティック・エミッション試験 I, 日本非破壊検査協会, pp.16-19, 2006
- 10) 日本非破壊検査協会編: アコースティック・エミッション試験 II, 日本非破壊検査協会, pp. 60-61, 2008
- 11) 大津政康: アコースティック・エミッションの特性と理論, 森北出版, pp.95-109, 2005
- 12) 大津政康, 野崎渉太, 川崎佑磨: AE-SiGMA 解析によるコンクリート割裂破壊の考察, コンクリート工学論文集, Vol.22, No.3, pp.27-34, 2011
- 13) 出水享, 松田浩, 戸次翔, 森崎雅敏, 内野正和, 伊藤幸広, 森田千尋: デジタル画像相関法のひずみ計測向上に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.68, No.2(応用力学論文集 Vol.15), pp. I_683- I_690, 2012