

# 論文 ひび割れ損傷の顕在化した補修コンクリート水路橋の実態評価

鈴木 哲也\*1・島本 由麻\*2・西田 浩之\*3・大嶋 雅光\*4

**要旨：**本報では補修後にひび割れ損傷が顕在化したコンクリート水路橋を対象に状態調査を試みた結果を報告する。調査対象は竣工後 60 年が経過し、2008 年に表面被覆工により補修した施設である。損傷状況は、橋脚間の底版中間部において送水方向と直角に発達したひび割れ損傷が確認された。本研究では、現地においてひび割れ損傷から発生する AE (Acoustic Emission) を検出するとともに、コンクリート・コアを採取し、損傷実態を評価した。検討の結果、コンクリート部材の損傷が AE パラメータの詳細解析から明らかになった。

**キーワード：**コンクリート水路橋, ひび割れ損傷, 表面被覆工, Acoustic Emission, DICM, SiGMA 解析

## 1. はじめに

表面被覆工に代表される補修工は、既存施設の長寿命化を目的に各地に適用されている。竣工後の再劣化に伴うひび割れ損傷の顕在化は、母材と補修材の材質とともにそれらの供用環境が影響しているものと推察される。

筆者らは弾性波法の一つである AE (Acoustic Emission) を用いてコンクリート損傷の定量評価法を検討している<sup>1),2),3)</sup>。既往研究では、ひび割れ損傷が極度に進行しコンクリート開渠や地震損傷を受けた水利施設を対象に AE パラメータを用いて力学特性の低下と損傷との関連を明らかにした。

本論では、竣工後 60 年が経過したコンクリート水路橋を対象に、表面被覆工に発達したひび割れ損傷の実態評価を AE 法により試みた事例を報告する。AE 計測後、コンクリート・コアを採取し、圧縮荷重試験と割裂荷重試験による力学特性の評価を試みた。荷重試験時には、現地計測同様、AE 計測を導入し、AE エネルギーの観点から破壊挙動を評価するとともに、大津ら<sup>4)</sup>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試みた。

## 2. 計測施設・方法

### 2.1 計測施設

計測対象施設は昭和 34 年に竣工し、平成 20 年に表面被覆工 (靱性モルタル) により補修した施設である。施設規模は、総延長 120m (内幅 2.0 m, 内高 1.5 m)、橋台 2 基、橋脚 7 基のコンクリート水路橋である (図-1 (a))。

計測対象施設の損傷状況は、水路橋の上面部と底版部とで異なることが確認された。水路橋の上面部では、37 箇所ひび割れが確認された。クラックスケールにより



(a) コンクリート水路橋全景



(b) 底版部ひび割れ発達状況

図-1 計測施設全景

ひび割れ幅を測定した結果、0.04~0.15 mm であった。水路橋底版部では、橋脚間の中間部において送水直角方向に発達したひび割れが複数確認された (図-1 (b))。底版部に発達したひび割れは、コンクリート・コア採取後、断面状況を確認した結果、表面被覆工を貫通し、水路橋本体に達していた。

本研究では、底版部に発達して本ひび割れを対象に現地において AE 計測とデジタル画像相関法による非破壊・非接触変位計測を試みた。その際、計測時の水位変動は、水路橋上流部において 7:30~14:40 の間に 5 分間隔で圧力式水位計を用いて行った。

### 2.2 通水条件でのコンクリート水路橋 AE 計測

計測対象であるひび割れ損傷は、取り入れ口から 30 m

\*1 新潟大学 自然科学系 (農学部) 教授 博士 (工学) (正会員)

\*2 北里大学 獣医学部生物環境科学科 助教 博士 (農学) (正会員)

\*3 日本サミコン株式会社 補修事業部 課長代理 修士 (工学)

\*4 日本サミコン株式会社 補修事業部 部長 学士 (工学)

下流部にある橋脚 (P2) とその 15 m 下流部位に立地する橋脚 (P3) との中間地点の底版部に発達したものである (図-1, 図-2)。クラックスケールによる計測では、ひび割れ幅 0.06mm (延長 760 mm) であった。

AE センサは 8 センサを設置し (図-3), SAMOS (PAC 社製) により計測を行った。150 kHz 共振型センサを用い、しきい値を 38 dB, 増幅値を 60 dB とした。周波数帯域を 1 kHz~400 kHz に設定した。通水時の精緻な AE 計測を行うためには、環境ノイズである水流起源である弾性波 (連続型 AE) を除去し、ひび割れの擦れや新たなひび割れの発生に起因する突発型 AE のみを抽出することが必要である<sup>5)</sup>。既往研究では、ノイズの除去や低減を目的とし、短時間フーリエ変換 (STFT) やウェーブレット変換が行われている<sup>6)</sup>。本研究では、計測後のポスト処理として、ハイパス処理により環境ノイズと考えられる 20 kHz 以下の連続型 AE を除去し、その後目視により突発型 AE のみを抽出した。得られた AE 波は AE 発生頻度の観点から評価した。

通水条件でのひび割れの動態は、変位計測の観点から画像解析手法の一つであるデジタル画像相関法 (DICM)<sup>7)</sup>を用いて行った (図-2)。DICM とは、CCD カメラで撮影したデジタル画像を数値解析することにより、撮影範囲の変位量およびひずみ分布を推定する手法である。計測対象表面に施されたランダム模様に基づき、計測対象の変形前と変形後の点の移動を追跡することにより変位方向、変位量を算出する。実験的検討では、2 台の CCD カメラを用いて行った。解像度は 1,384×1,036 pixel である。計測前に校正プレートを用いて、位置および角度を変えながら 20 枚程度撮影し、画像のひずみ補正を行った。計測面には、白色のポスターカラーで下地を塗布し、下地の上から黒色のランダム模様を塗布した。計測時の撮影では、CCD カメラの撮影を 5 秒に 1 枚の間隔に設定し、撮影を行った。

### 2.3 コンクリート・コアを用いた圧縮・割裂荷試験

現地計測後、計測位置近傍でコンクリート・コアを採取し、荷重過程に発生する AE を指標に損傷状況の評価した。筆者らは、荷重過程に発生する AE を指標にコンクリート損傷度評価法を既往研究<sup>1), 2), 3)</sup>により提案している。本研究では、被覆材を施した既設コンクリートを採取し、その損傷状況を AE 指標の観点から評価した。荷重方法は、圧縮および割裂である。試験装置は現地計測同様、SAMOS (PAC 社製) である。AE センサは、コンクリート・コアの側面部に設置した (図-4)。閾値を 42 dB とし、60 dB の増幅をプリアンプとメインアンプで行った。AE センサには 150 kHz 共振型センサを用いた。なお、荷重試験では無損傷状態のコンクリート・コアの AE 特性との比較を行う目的で既往研究データ<sup>10)</sup>を用いて



図-2 コンクリート水路橋・底版部計測概要 (x, y, z : 画像解析における軸方向)

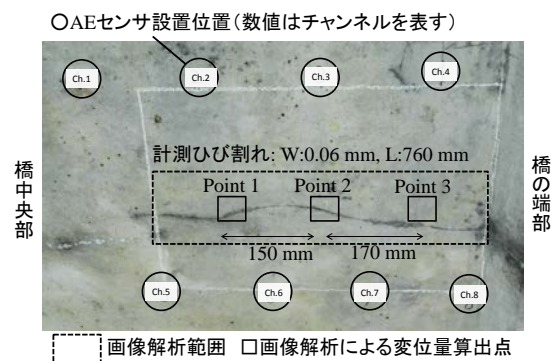
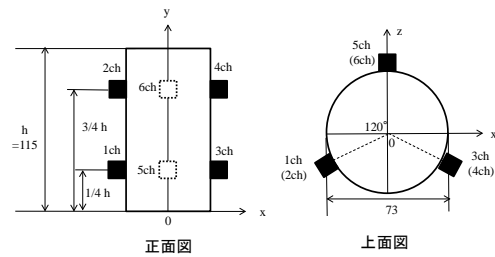
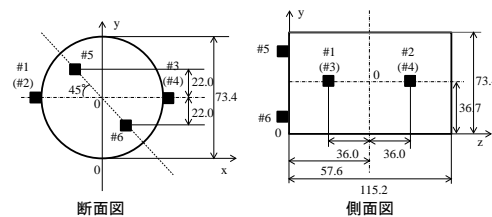


図-3 AE センサ配置・画像解析変位量算出点



(a) 圧縮荷試験



(b) 割裂荷試験

図-4 荷重試験における AE センサ位置 (■, □: AE センサ, 単位 : mm)

考察した。

## 3. 解析方法

### 3.1 検出波のエネルギー評価

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 AE データを評価した。弾性波など

の信号を対象としたエネルギーの評価は、式(1)に示す時系列信号値  $a(t)$  の二乗の積分値として評価される。

$$E_{AE} = \int_{-\infty}^{\infty} a^2(t) dt \quad (1)$$

検出した AE のエネルギー値は、AE パラメータの最大振幅値同様、破壊現象の規模と相関のある評価指標として用いられている。しかし、AE センサにより電気信号へと変換された弾性波の時刻歴波形の後半部はセンサ自身の共振波形であり、検出した現象とは無関係であることから、本研究では AE パラメータである最大振幅値に着目し、その二乗値による検出波のエネルギー評価を試みた。式(2)に評価式を示す。

$$E_{AE} = a_{\max}^2 \quad (2)$$

ここで、 $E_{AE}$  : 検出波の AE エネルギー (単位 :  $V^2$ )、 $a_{\max}$  : AE パラメータの最大振幅値 (単位 :  $V$ ) である。

### 3.2 SiGMA 解析<sup>4), 8)</sup>

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<sup>4)</sup>が大津らによって提案されている。既往研究<sup>8)</sup>においてもその有用性は明らかであり、本研究では割裂載荷試験の 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(3)で表すことができる。

$$m_{pq} = (\lambda l_k n_k \delta_{pq} + \mu l_p n_q + \mu l_q n_p) \Delta V \quad (3)$$

ここで、 $\lambda$  と  $\mu$  はラメの定数、 $\delta$  はクロネッカーのデルタ記号である。 $\Delta V$  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(4)および(5)で表される。

$$\begin{aligned} \text{第 1 (最大) 固有値} & e_1 = \mu b \left( \frac{l_k n_k + 1}{1 - 2\nu} \right) \Delta V \\ \text{第 2 (最小) 固有値} & e_2 = 2\mu b \nu \frac{l_k n_k}{1 - 2\nu} \Delta V \quad (4) \\ \text{第 3 (中間) 固有値} & e_3 = \mu b \left( \frac{l_k n_k - 1}{1 - 2\nu} \right) \Delta V \\ \text{第 1 固有ベクトル} & e_1 = l + n \\ \text{第 2 固有ベクトル} & e_2 = l \times n \\ \text{第 3 固有ベクトル} & e_3 = l - n \end{aligned} \quad (5)$$

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ースベクトル  $b$  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  $R_s = X / (X + Y + Z)$  と定義し、固有値からせん断率  $R_s$  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。

$$\begin{aligned} R_s < 40\% & \text{ 引張ひび割れ} \\ 40\% \leq R_s \leq 60\% & \text{ 混合型ひび割れ} \\ R_s > 60\% & \text{ せん断ひび割れ} \end{aligned} \quad (6)$$

### 3.3 画像解析<sup>7)</sup>

現地計測では、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。コンクリート・コアによる載荷試験では、前述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 通水条件でのコンクリート水路橋の底版変形と AE の関係

図-5 に水位変動と画像解析によって算出した底版  $z$  軸方向 (図-2) の変位量の関係を示す。通水状態における変位量と AE 計測は、計測位置よりも上流部において水位を調整した 7:30 から 14:00 の間で行った。計測開始から 2 時間 15 分が経過した 9:45 より水位を低下させ、13:30 には通水を停止した。計測点において変位量が異なるか検討するために図-3 に示す 3 点において変位量を算出し、比較した。計測点はひび割れ中央部を Point 2 とし、Point 2 から水路橋中央部に 150 mm の地点の Point 1、Point 2 から橋端部に 170 mm の地点の Point 3 の 3 地点とした。

検討の結果、水位と  $z$  軸方向の変位量とは、ほぼ同様の挙動を示すことが確認され、3 地点すべてにおいて正の相関が確認された。相関係数はそれぞれ Point 1 : 0.983、Point 2 : 0.981、Point 3 : 0.979 であった。水路橋中央部に近づくほど相関係数が高くなることが確認された。

図-6 に画像解析より算出した  $z$  軸方向の変位量の時系列変化を示す。図-5 から水路橋中央部 (Point 1 側) における変位量の増大が確認された。ひび割れ地点における局所的变化は確認できなかった。これは計測水位が最大

でも 25 cm 以下と低かったことに起因すると考えられる。計測施設の最大通水位は 100cm であり、管理者への聞き取りの結果、最頻度水位は 70cm である。

したがって、図-5 および図-6 の計測結果より、橋中央部における変位量の増加と水位との関連が示唆され、水利施設のひび割れ損傷に及ぼす通水実態とそれらが影響する構造物に対する応力場の形成が密接に関連していることが考えられた。z 軸方向の変位量の橋中央部での増加は、通水に伴い底版部に発生する曲げ応力がひび割れ進展に影響していると推察されるが、本計測では観測水位が最大水位の 25% 程度と低かったことから、明確な水理現象と応力場との関連は確認できなかった。

そこで本論では、画像解析による変位計測とともに AE 法による底版ひび割れ部位から発生する弾性波を検出した。水路内水位と AE 発生挙動の関係を図-7 に示し、図-8 に検出した AE の時刻歴波形を示す。AE の評価指標には、単位時間当たりの発生頻度を示す AE ヒット数を用いた。

検討の結果、検出波は連続型 AE と突発型 AE の 2 種類が検出された。一般的に、コンクリート水利施設より検出した AE は、連続型 AE が流水や水理現象が起源であるのに対して、突発型 AE はひび割れの擦れや新たな発生・進展に起因すると考えられる<sup>5)</sup>。検出された連続型 AE は、水位変動と AE ヒット数との間に密接な関係があることが示唆された(相関係数: 0.78)。水位の増加に伴い、流水起源と考えられる連続型 AE が増加した。突発型 AE は、水位が 18 cm 以上のとき高頻度のヒット数が確認された。水位を低下させた 9:45 からヒット数は減少をはじめ、水位が 7 cm 以下の 13:00 以降はほとんど検出されなかった。突発型 AE は連続型 AE と異なり、水位が一定値を下回ると、発生しなくなることが確認された。このことから、コンクリート水路橋底版損傷部において AE 計測を試みた結果、異なる水位条件において、ひび割れの擦れや進展に起因すると考えられる突発型 AE が検出され、AE 指標の有用性が実構造物において示唆されたものと推察される。

#### 4.2 AE 法を用いたコンクリート・コアの損傷度評価

現地計測により通水による変形挙動と AE との関連が示唆されたことから、計測位置近傍から採取したコンクリート・コアの圧縮荷試験と割裂荷試験により材料の損傷状況を考察する。

##### 4.2.1 力学特性と AE パラメータの関係

採取したコンクリート・コアの圧縮強度は 34.3 MPa であり、耐久的な農業用コンクリート水利施設に求められる 24 MPa<sup>9)</sup> の 1.43 倍であった。最大ひずみは 780  $\mu$  で

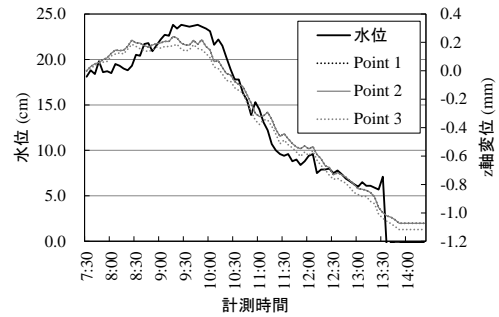


図-5 水位と z 軸方向の変位量の関係

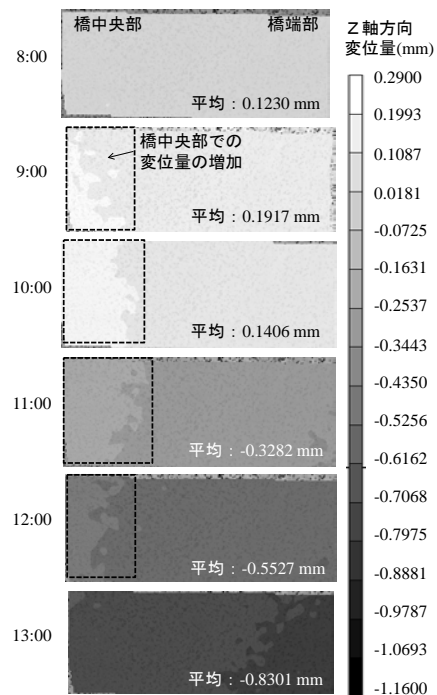
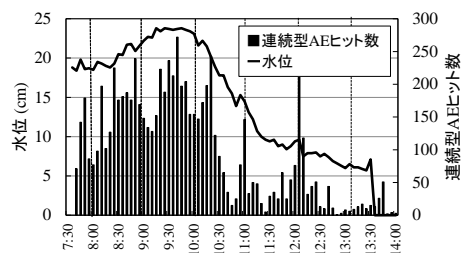
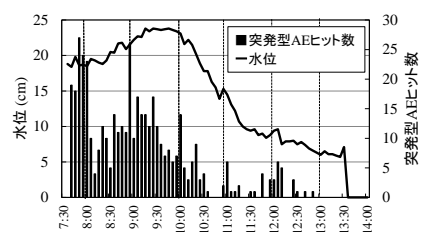


図-6 z 軸方向の変位量の時系列変化 (平均: Point1~3の平均値を示す)



(a) 連続型 AE 発生挙動



(b) 突発型 AE 発生挙動

図-7 水位と AE 発生挙動の関係

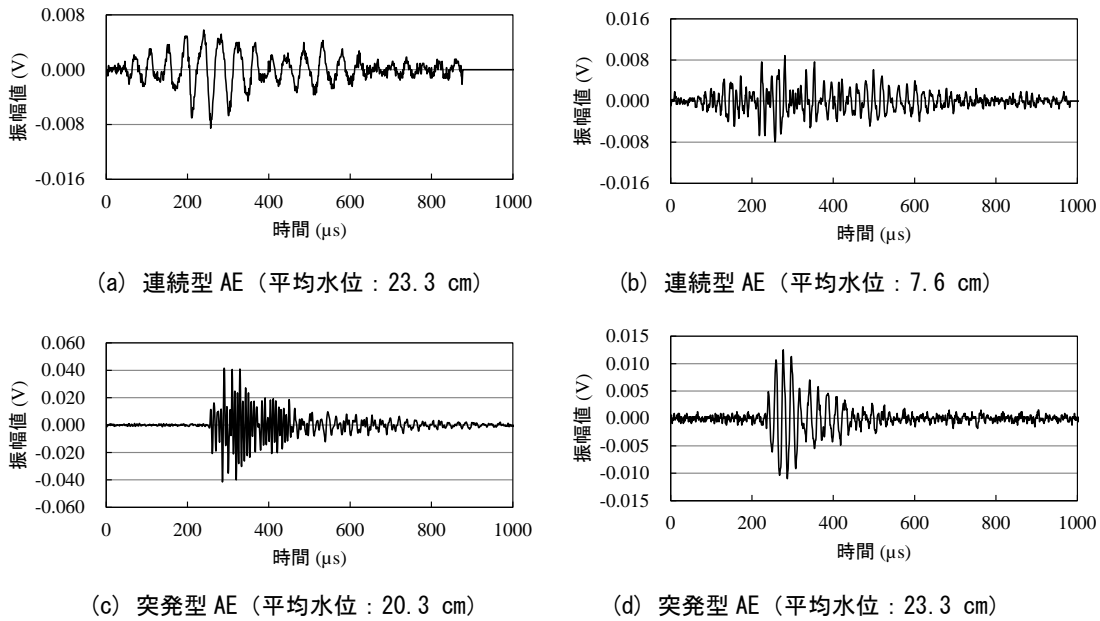


図-8 検出した AE

あり、応力ひずみ曲線から求めたひずみエネルギーは 9.3 J であった。筆者らの既往研究<sup>10)</sup>により実施した無損傷コンクリートでは、3 供試体の平均値が、圧縮強度 28.4 MPa、最大ひずみ 2,147  $\mu$ 、ひずみエネルギー 51.4 J であった。これらを比較すると、本計測施設より採取したコンクリート・コアは最大ひずみの減少が顕著であり、供試材料の脆性化が懸念される。同様の傾向は、AE エネルギーの発生頻度(本論では、AE エネルギー発生頻度割合  $f_e(\epsilon)$  と記す)においても確認された。図-9 に AE エネルギー特性を示す。本図の AE エネルギーは式 (2) により算出し、下式により発生頻度を評価した。

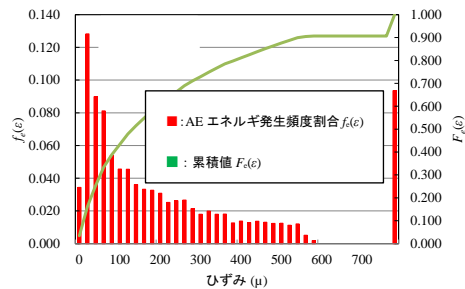
$$f_e(\epsilon)\Delta\epsilon = \frac{\Delta E_{AE}(\epsilon)}{E_{AE}} \quad (7)$$

ここで、 $\Delta E_{AE}(\epsilon)$ : 単位ひずみ (本論では 20  $\mu$ ) における発生した AE エネルギー、 $E_{AE}$ : 一連の圧縮荷重過程で発生する総 AE エネルギーである。

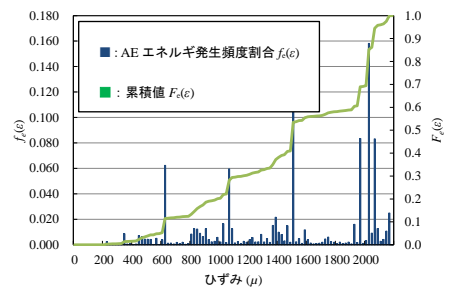
供試コンクリート・コアは、圧縮荷重過程において荷重初期 0~100  $\mu$  で顕著な AE エネルギーの放出が確認された (図-9 (a)), 図-9 (b) に示す無損傷コンクリートとは異なるエネルギー放出形態が確認された。

底板部において水路軸直角方向のひび割れ (図-1 (b)) が顕在化したことから、コンクリート損傷の蓄積に伴い低引張応力下での破壊が顕著に進行したものと推察される。そこで本論では、圧縮強度と同一の部位において採取したコンクリート・コアを用いて割裂荷重試験により引張応力に対する耐性を評価した。

検討の結果、割裂引張強度は 4.6 MPa であり、最大変位量は 0.51 mm であった。AE エネルギーは採取コンクリートが 3,421 V<sup>2</sup> であるのに対して、無損傷コンクリート (割裂引張強度: 3.0 MPa, 最大変位量: 0.73 mm) はそ



(a) 既設水路橋採取コンクリート・コア



(b) 無損傷コンクリート<sup>10)</sup>

図-9 AE エネルギー発生頻度割合  $f_e(\epsilon)$  とひずみの関係 (圧縮荷重過程)

の 3.4 % の 118 V<sup>2</sup> であり、圧縮荷重過程同様、損傷が示唆される結果となった (図-10)。AE-SIGMA 解析の結果、採取コアにおいて引張り型ひび割れ (Tensile) が卓越していることが理解できる (図-11)。

これらのことから、計測対象であるコンクリート水路橋は、母材コンクリートの圧縮強度に代表される力学特性は基準値を上回っているが、損傷に伴う脆性化が進行しているものと推察される。補修後に顕在化したひび割れは、表面被覆材に加えて母材コンクリートの変質およ

び損傷に起因する現象であると推察される。

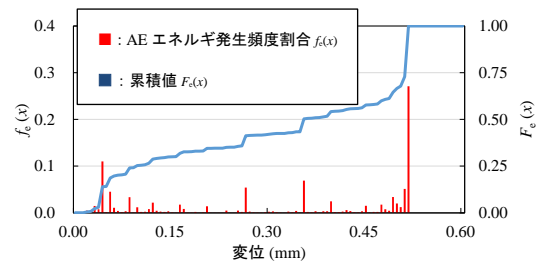
## 5. まとめ

本論では、ひび割れ損傷が顕在化した補修コンクリート水路橋を対象に AE 法による調査を試みた結果を報告した。表面被覆工を施して 10 年経過した調査施設では、橋脚間の底版中間部において送水方向と直角に発達したひび割れ損傷が確認された。AE 計測とデジタル画像相関法による検討の結果、通水条件により変形挙動と検出される AE (突発型 AE, 連続型 AE) が異なることが明らかになった。現地計測後、コンクリート・コアによる損傷度評価を試みた結果、载荷初期に AE エネルギーの特異的な放出が確認され、供試コンクリートが損傷を有することが示唆された。

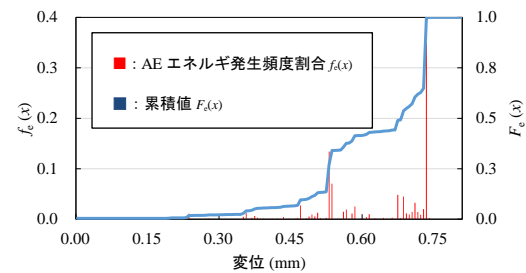
本計測対象は、通水位により AE 発生挙動や変形挙動が変化するものと考えられるが、計測水位が最大水位の 25 % 程度であったことから計測指標と水理現象との関連については今後、より詳細な検討が必要である。

## 参考文献

- 鈴木哲也：AE 法を援用したひび割れコンクリートの損傷度評価，非破壊検査，64 (6)，pp. 267-273，2015
- Suzuki, T., Shiotani, T. and Ohtsu, M.: Evaluation of Cracking Damage in Freeze-Thawed Concrete using Acoustic Emission and X-ray CT Image, Constructions and Building Materials, 136, pp. 619-626, 2017
- Ishibashi, A., Matsuyama, K., Alver, N., Suzuki, T. and Ohtsu, M.: Round-robin tests on damage evaluation of concrete based on the concept of acoustic emission rates, Materials and Structures, Publish online, pp. 1-9, 01 August 2015
- 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
- Suzuki, T., Ohtsu, M., Aoki, M. and Nakamura, R.: Damage Identification of Concrete Water - Channel in Service by Acoustic Emission, Advance Acoustic Emission, pp. 46-51, 2007
- 伊藤海太，榎学：連続計測されたレーザ AE 波形の時間周波数解析によるノイズ低減，日本金属学会誌，Vol.71, No.11, pp.1061-1065，2007
- Sutton, M. A., Orteu, J. J. and Schreier, H. W.: Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements, Springer, pp.81-118, 2009
- 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

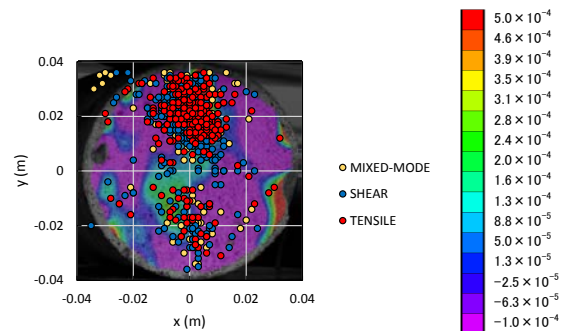


(a) 既設水路橋採取コンクリート・コア

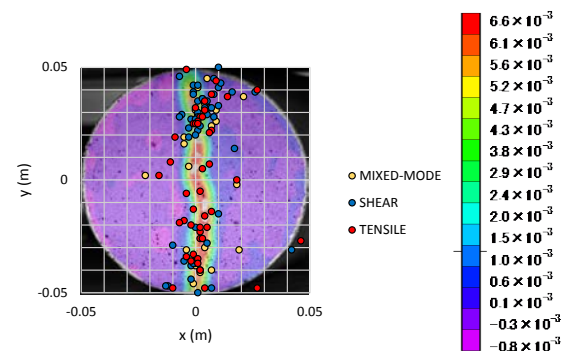


(b) 無損傷コンクリート

図-10 AE エネルギー発生頻度割合  $f_e(x)$  とひずみの関係 (割裂载荷過程)



(a) 既設水路橋採取コンクリート・コア



(b) 無損傷コンクリート

図-11 AE-SiGMA 解析結果 (割裂载荷過程)

- 農林水産省構造改善局監修：土地改良事業計画設計基準・設計「水路工」技術書，農業農村工学会，pp. 290-291，2001
- 鈴木哲也，石神暁郎，島本由麻：X 線 CT 計測に基づくひび割れコンクリートの定量的損傷度評価，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，18，pp. 529-534，2018