

論文 既設橋梁 RC 部材から採取したコンクリートの材質評価の試み

西脇 健志^{*1}・藤井 伸之^{*2}・小嶋 篤志^{*3}・鈴木 哲也^{*4}

要旨：既存施設の維持管理には、ひび割れ損傷の目視調査に加えて、コア供試体を用いた力学特性の評価が行われる。一般的に圧縮強度や弾性係数の低下傾向から損傷状態が判断されるが、より詳細かつ精緻な評価指標の開発が求められている。本論では、既設橋梁の RC 部材からコンクリート・コアを採取し、圧縮荷重過程で発生する AE に着目したコンクリート損傷度評価を試みた結果を報告する。解析的検討では、検出した AE を破壊の確率過程論に基づく処理を施し、AE 発生頻度の観点から評価した。検討の結果、荷重初期での AE と変形挙動との関連が同定され、AE 指標による損傷度評価の有効性が確認された。

キーワード：既設橋梁, コンクリート, 圧縮強度試験, DICM, AE

1. はじめに

既存施設の損傷実態に関する調査診断では、コンクリート・コアの圧縮強度試験に基づく力学指標が頻繁に用いられている。圧縮強度や弾性係数などの力学指標は、損傷実態を強度特性の観点から同定するためには有効な評価指標である。

筆者らは、コンクリートの圧縮荷重過程で発生する弾性波に着目し、弾性波を受動的に検出する AE (Acoustic Emission) 法を援用した損傷度評価法を提案している^{1),2),3),4)}。既往の研究により、凍害損傷の発達したコンクリート²⁾や長期供用したコンクリート道路床版³⁾、地震損傷を受けた水利施設⁴⁾において、損傷蓄積と評価指標との相関を確認している。

本報では、竣工後 37 年が経過した既設橋梁の RC 部材から採取したコンクリート・コアを用いて、圧縮荷重過程の AE 計測から損傷状況を概略評価した結果を報告する。

2. 解析手法

2.1 AE レートプロセス解析による圧縮荷重過程評価

供試したコンクリート・コアの圧縮荷重過程の AE 発生挙動は、破壊の確率過程論⁵⁾に基づく AE レートプロセス解析により評価した。

コンクリートの圧縮応力下における AE 発生挙動は、確率過程論における定式化が可能である。AE の発生総数を N 、コンクリート・コアの最大ひずみに対する割合をひずみレベルとし ε とする。AE 発生確率密度関数を $f(\varepsilon)$ とすると、 ε から $\varepsilon+d\varepsilon$ へのひずみ量の増分に対し、以下の式 (1) を導くことができる。

$$f(\varepsilon)d\varepsilon = \frac{dN}{N} \quad (1)$$

AE 発生確率密度関数 $f(\varepsilon)$ に対して、本研究では次のような指数関数曲線を仮定する。

$$f(\varepsilon) = \alpha \cdot \exp(\beta\varepsilon) \quad (2)$$

ここで、 α と β は定数である。式 (2) において、 β 値が正ならばひずみレベルの低い段階で AE 発生確率密度関数 $f(\varepsilon)$ が低いことを意味し、コンクリート材料が健全な状態であることが評価できる。 β 値が負ならば、ひずみレベルの低い段階で AE 発生確率密度関数 $f(\varepsilon)$ が高いことを意味し、損傷が進行した材料であると評価することができる (図-1)。ひび割れ損傷の蓄積と β 値の関係については、凍害コンクリートを用いた実証的検討の結果、ひび割れ損傷の幾何学的特性と β 値との関連が確認されている^{1),6)}。加えて、既往の研究では式 (2) を双曲線に仮定し、AE データベースの構築に基づく評価パラメータ (相対弾性係数) を開発し、その有効性を確認されている⁷⁾。

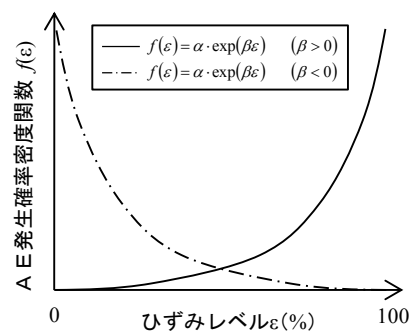


図-1 AE 発生確率密度関数 $f(\varepsilon)$ とひずみレベルの関係

*1 (株) 福田組 技術部 維持更新課 (正会員)

*2 (株) 福田組 技術部 維持更新課 課長 (正会員)

*3 (株) 福田組 技術部 設計課 (正会員)

*4 新潟大学 自然科学系 (農学部) 准教授 博士 (工学) (正会員)

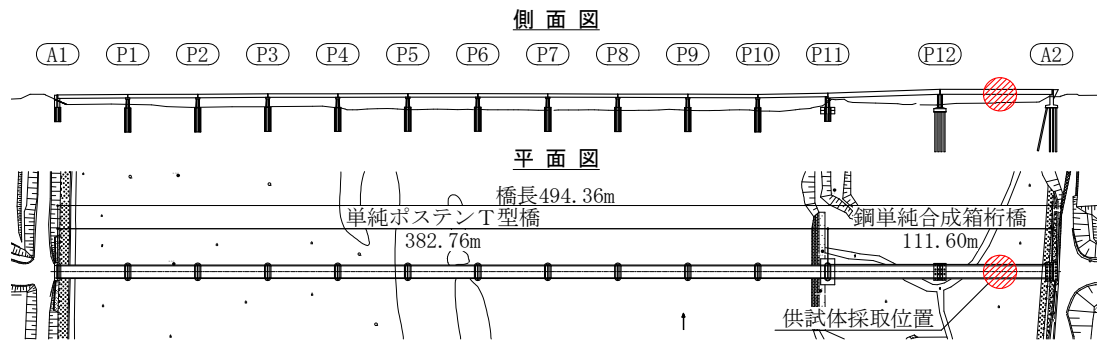


図-2 コンクリート・コア採取位置

2.2 DICM データを用いた縦ひずみの3次元評価

本論では、供試コアが局所的の損傷を発生させていると想定し、ひずみゲージによる縦ひずみ計測に加えて、デジタル画像相関法⁸⁾ (DICM) による圧縮応力場の縦ひずみ分布を評価した。実験ではひずみゲージによる計測面の対面側で DICM 計測を実施し、コア中央部の縦ひずみを評価した。

3. 実験方法

3.1 供試橋梁

コンクリート・コアを採取した試験橋梁は、積雪寒冷地において撤去された橋梁である (写真-1, 図-2)。本調査に用いた供試体は、1978 年に供用され、竣工後 37 年が経過している鋼単純合成箱桁の RC 床版より採取したものである。コンクリート・コアは、直径 10cm で床版厚さの約 18cm を採取している。

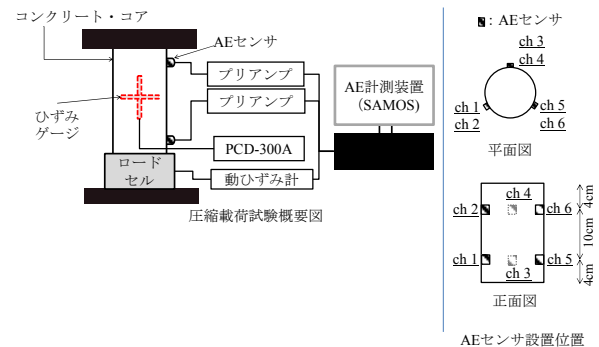
3.2 圧縮荷重過程の AE 計測

コンクリート・コアは、圧縮荷重過程に AE 計測を導入し、破壊過程に発生する AE を検出した (図-3 (a))。計測装置は SAMOS である。AE 計測は、供試体の側面部に 6 個のセンサを設置して行った。しきい値は 42dB とし、60dB の増幅をプリアンプとメインアンプで行った。AE センサは 150kHz 共振型センサを用いた。なお、供試体の載荷面にはシリコングリースを塗布し、テフロンシートを挿入することによって摩擦により発生する AE を低減させた。また、圧縮荷重過程のコンクリート・コアの挙動を検討するため、供試体の端面はキャッピング等の処理を実施していない。本報における圧縮強度は、JIS A1108 に規定された試験法とは異なる。

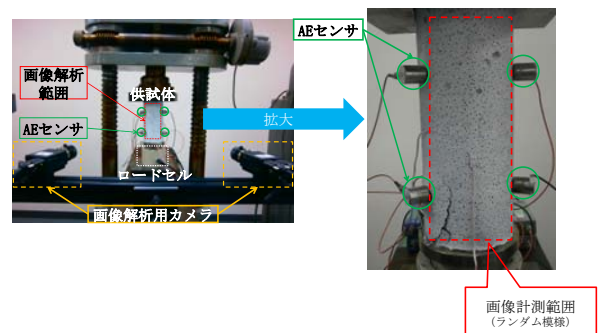
圧縮荷重時の荷重計測はロードセルにより実施した。AE 計測では AE 波を検出した際に、ロードセルからの計測値を記録した。荷重過程のひずみ量は、ひずみゲージ (ゲージ長: 60mm) と画像解析により評価した (DICM, 図-3 (b))。ひずみゲージは、供試体中央部に縦方向と横方向に接着した。画像解析は、ひずみゲージを接着していない断面を対象に供試体表面にランダム模様を施し、2



写真-1 試験橋梁・全景およびコア採取位置



(a) AE 計測



(b) AE 計測と DICM 計測

図-3 計測概要図

表-1 コンクリート・コアの力学特性

サンプル タイプ	圧縮強度 (N/mm ²)	最大ひずみ (μ)	初期接線弾性係数 (GPa)	割線弾性係数 (GPa)	サンプル サイズ
既設橋梁	15.3	958	32.7	25.4	6
	[6.6]	[535]	[17.5]	[18.2]	

※1 表に示した数値は平均値〔標準偏差〕である。

※2 最大ひずみは、ひずみゲージにより計測した評価値である。

※3 圧縮強度は JIS A1108 に規定された試験法ではないことから参考値である。

表-2 AE 指標の解析結果一覧

AE ヒット	AE イベント	β 値 ($\beta < 0.0$: 損傷有)	サンプル サイズ
10,899	253	-0.04	6
[3,161~18,391]	[45~513]	[-0.11~+0.03]	

※1 「AE ヒット」⁹⁾：しきい値を上回り、システム・チャンネルのデータを加算する信号。本論ではしきい値 42dB で、全 6 チャンネルの AE ヒットの合計を AE ヒット数として提示した。

※2 「AE イベント」：3 次元位置標定により発生源が特定された AE 信号。本論では 6 チャンネルの内、4 チャンネル以上で発生位置が同定されたものを対象とした。

※3 表に示した数値は平均値〔最小～最大〕である。

台のカメラによる非接触計測を実施した。

3.3 DICM による非接触ひずみ計測

本論で供試したコンクリート・コアは、既存施設において長期間供用されていたものであったことから、圧縮載荷過程において局所的に発達した損傷部位においてひずみ量の増加が予想された。そこで、ひずみゲージによる計測に加えて、デジタル画像相関法⁸⁾ (DICM) によるコア供試体全体の面的な縦ひずみ分布を計測・評価した。計測システムは、Vic-3D である。使用した CCD カメラは GS3-U3-60S6C である。可視画像のサンプリング周波数は 100 Hz である。

画像解析の原理は、特定の幾何学模様（本研究ではランダムに打点した黒点）の移動量を数値解析し、変位量やひずみ分布を算出するものである⁸⁾。計測した画像データは、初期状態における画像の小領域（サブセット）を一定時間後の試験画像の中から正規化された相関係数の最適値となる領域を探し出すことによってランダムパターン移動量（変位量）を評価するものである。つまり、最も相関性の高い領域を検出し評価している。

変形前後の画像間における小領域の移動量は粗探索と精密探索により特定される。粗探索では、1 画素単位の計測精度で小領域の移動量を求めている。精密探索では、1 画素以下の精度で移動量を求めている。本解析では小領域（サブセット）を 21×21 ピクセル、ステップ数を 5、サンプリングレートを 100 Hz に設定した。画像解析により算出される変位量やひずみ分布には、一般に

ノイズが含まれている。このため、本研究ではガウス分布の関数を用いて、算出されたひずみ分布を正規化している。縦ひずみの算出には、解析により求める点を中心に、ある画素数だけ離れた点の変位を基に変形前後の 2 点間の長さの変化量をひずみ量として算出した。ひずみ計算では、任意の 2 点間の長さを 21 ピクセルに設定した。ピクセルサイズは 0.286 mm/pixel であり、約 6.0 mm のひずみゲージに相当する。なお、ひずみの計測精度は 0.001 μ である。

なお、一般的な画像計測ではカメラレンズに起因する収差があり、撮影された画像はひずみを含んでいる。2 台の CCD カメラで撮影を行う場合、カメラの位置合わせとレンズの収差補正が不可欠であると考えられる。本研究では、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、カメラ画像の位置合わせと画像のひずみ補正を行った。

4. 結果および考察

4.1 コンクリート力学特性

供試したコンクリート・コアの力学特性を表-1 に示す。圧縮強度は平均値 15.3N/mm²（標準偏差 6.6 N/mm²）である。その際、縦ひずみの最大値は、平均 958 μ （標準偏差 535 μ ）と、一般的な無損傷コンクリートで最大荷重が検出される 2,000 μ の約 50%以下であることが確認され、脆性化が示唆された。

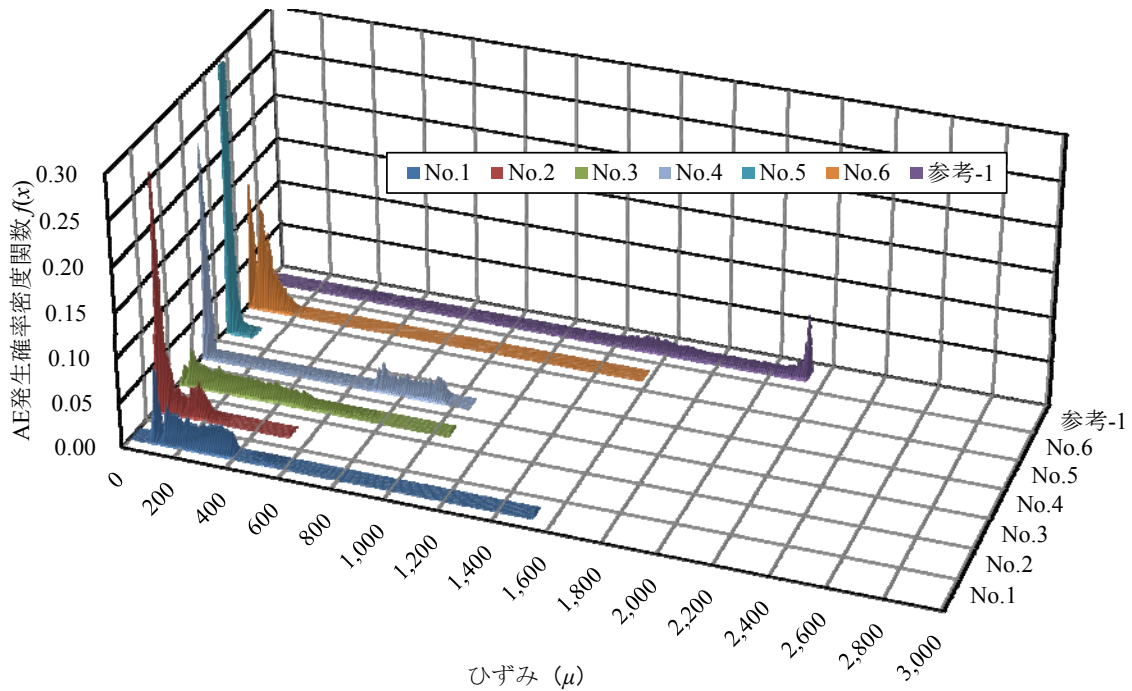


図-4 AE 発生確率密度関数 $f(x)$ とひずみの関係

4.2 AE 指標を用いた圧縮荷重過程の特性評価

本論では、AE 指標によりコンクリート損傷度を評価することを試みるものである。AE 指標には、AE ヒット、AE イベント、AE 発生確率密度関数 $f(x)$ (式 (1)) および β 値 (式 (2)) により評価した。AE ヒットおよび AE イベントの定義は表-2 脚注に詳述した。検討結果を表-2 に示す。

実験的検討の結果、AE ヒットは平均 10,899 ヒットであり、1 チャンネル当たり一連の試験過程で 1,817 ヒットが確認された。供試体による相違は、最大値 18,391 ヒットであり、最小値はその 17% の 3,161 ヒットであった。AE ヒットデータを用いて式 (1) により算出した AE 発生確率密度関数 $f(x)$ とひずみとの関係を図-4 に示す。同図中の「参考-1」は、実験室内で打設した無損傷コンクリート (W/C=55%) の試験値である。無損傷コンクリートは、ひずみ 2,130 μ で圧縮破壊時の AE の頻発を確認した。それに対して、既設橋梁から採取したコンクリート・コアでは、荷重初期に AE の頻発が確認された。AE 指標である β 値 ($\beta < 0.0$: 損傷有) で比較すると、無損傷コンクリートが $\beta = +0.04$ であるのに対して、既設橋梁から採取したコンクリート・コアは平均 $\beta_{AVE} = -0.04$ (最大値: $+0.03$, 最小値: -0.11) であり、供試した 6 サンプルの内 4 サンプルにおいて $\beta < 0.0$ となった。 β 値が最大値である $\beta = +0.03$ が確認された No.4 サンプルでは、荷重終期に AE の頻発が確認された (図-5)。それに対して、 β 値が最小値を示す No.2 では荷重当初から AE が頻発し、 $\beta = -0.11$ を確認した (図-6)。以上の AE 指標の特徴から、

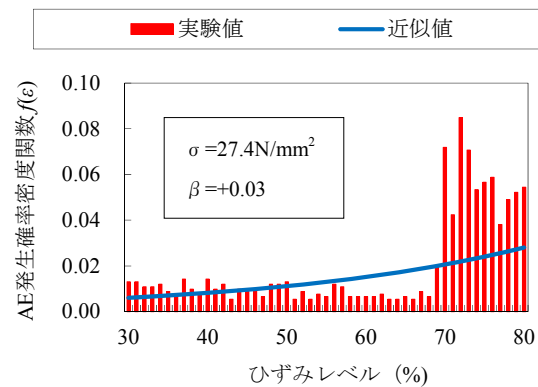


図-5 AE レートプロセス解析結果
(No.4, 最大 β 値)

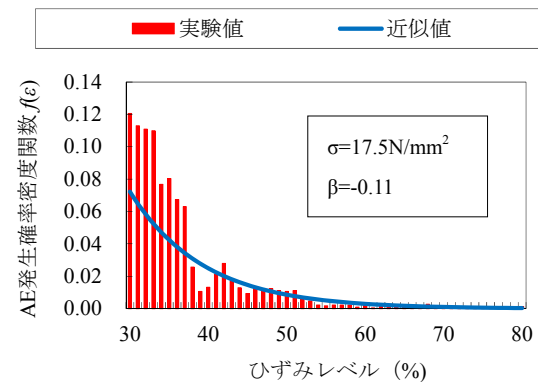


図-6 AE レートプロセス解析結果
(No.2, 最小 β 値)

既設橋梁より採取したコンクリート・コアは、損傷蓄積が示唆されたものと考えられる。筆者らの既往研究³⁾で

は、同様の試験研究を竣工後 87 年経過した RC アーチ部材に適用した結果、AE レートプロセス解析により、極度な損傷蓄積は確認されなかった。配合設計が同一でないことから単純比較は困難であるが、本報で供試したコンクリート・コアは竣工後の供用環境（走行荷重、寒冷地環境など）の影響を受けて損傷が蓄積したものと推察される。

4.3 圧縮荷重過程の変形挙動と AE との関係

そこで本論では、低応力下での AE 発生挙動に着目し、 β 値との関連を考察する。検討結果を図-7 に示す。本図は、応力レベル 30%における No.2 (図-6, 最小 β 値) および No.4 (図-5, 最大 β 値) 供試体を対象に、画像解析により検出した縦ひずみ分布と 3 次元位置標定により AE 発生位置が同定された AE イベントを図化したものである。最大振幅値は、42~59dB, 60~79dB および 80~99dB の 3 段階に分類した。

圧縮荷重過程のコンクリート挙動は、厳密には載荷初期から非線形となるが、一般的に応力 - ひずみ挙動の線形領域で最大応力に達するため、その間の圧縮荷重過程における応力とひずみの関係を 1:1 と仮定した。AE レートプロセス解析では、ほぼ弾性域と考えられる最大応力の 30%から 80%を対象に検討している。コンクリートの圧縮破壊過程は、応力 - ひずみ挙動の約 30%の応力に達すると粗骨材とモルタルの境界層である遷移帯にボンドクラックが局部的に発生し、剛性がわずかに低下する。最大応力の 50 %になると、局部ひび割れがモルタル中に進展し、最大応力の 80~90 %ではひび割れが連結する¹⁰⁾。図-7 は、低応力下における損傷起源 AE の特徴を検出する目的で応力レベル 30%における縦ひずみ分布と AE イベントの関係を示したものである。

検討の結果、応力レベル 30%の段階で縦ひずみ分布に明確な相違は確認されなかった。AE 発生挙動は、縦ひずみ分布とは異なり、明確に最小 β 値を検出した No.2 供試体で多数の AE イベントを確認した。一連の圧縮破壊過程で検出された AE は、No.2 が No.4 の 11.4 倍の AE イベントが確認された。低応力下の圧縮荷重過程において AE が検出されることは、供試したコンクリート・コア内部において微小な破壊が進行しているものと考えられる。同様の試験結果は Grosse¹¹⁾や Ohtsu¹²⁾においても報告されており、本研究結果は既往研究を支持する結果となったものと考えられる。

これらのことから、一般的に既存施設より採取したコンクリート・コアの損傷状況は、設計基準値である強度特性と実験的に求めた圧縮強度や弾性係数との比較により判断されることが多いが、圧縮荷重過程の AE を検出することにより、より詳細な損傷状況の評価が可能になるものと考えられる。図-4 に示す全載荷過程の AE 発生

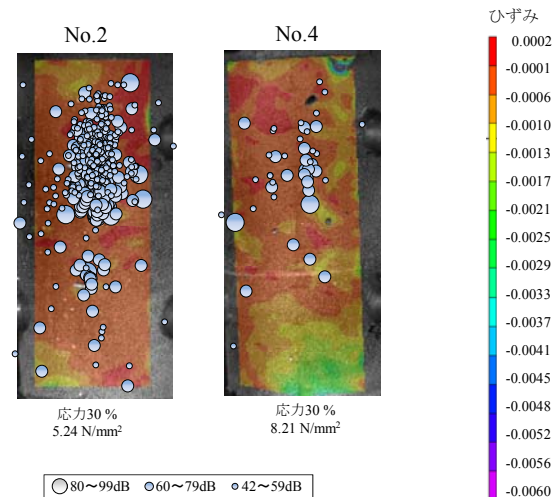
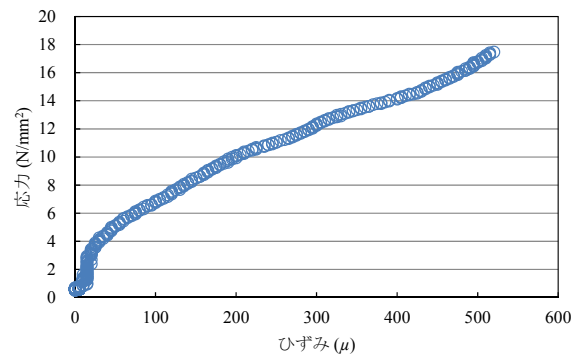
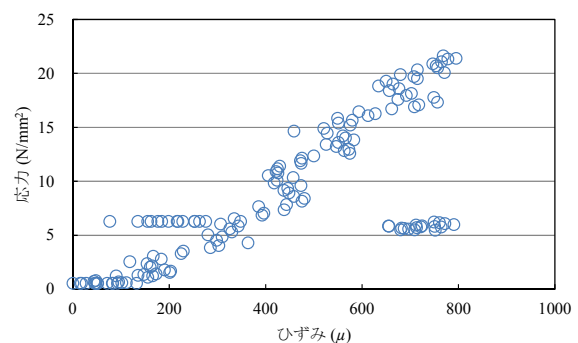


図-7 AE イベントと縦ひずみ分布の関係



(a) ひずみゲージ計測結果



(b) DICM 計測結果 (コア中央部を対象とした解析)

図-8 ひずみゲージと DICM 計測に基づく応力-ひずみ曲線の比較 (No.2, 最小 β 値)

確率密度関数 $f(\epsilon)$ と縦ひずみとの関係では、無損傷コンクリート (図中「参考-1」) において終局時に AE の頻発が確認されるのに対して、本研究で供試したいずれのサンプルにおいても、縦ひずみ 200 μ までに AE のピークが確認された。最大強度 27.4N/mm² を示す No.4 も例外

ではなく、荷重初期に AE 頻発を確認したことから、強度低下が顕在化するまでには損傷の進行は顕著ではないが、AE の特徴から微弱な損傷蓄積が考えられる。

損傷進行したコンクリートでは、圧縮荷重過程において局所変形が顕著に確認される。ひび割れ損傷が顕在化した凍害コンクリートを用いた筆者らの同様の試験研究では、ひび割れ部位における局所変形の進展と低応力下での AE の頻発が確認されている¹⁾。本研究では面的な縦ひずみ分布の計測に DICM を援用し、応力ひずみ挙動を評価した。従来から行われているひずみゲージでの計測結果と DICM による非破壊非接触計測結果との比較を図-8 に示す。ひずみゲージは図-3(a)に示す供試体中央部に設置した。DICM データは、ひずみゲージ同様、供試体中央部を対象に解析的に縦ひずみを評価したものである。両図よりひずみゲージによる計測結果と比較して DICM データでは、荷重初期の低応力場でのひずみ評価値の相違や計測値のエラー(600~800 μ 部分)が確認された。これらは、DICM の画像処理過程において小領域(サブセット、本研究条件: 21×21 ピクセル)が荷重過程で一定ではなく、破壊の進行に伴い小領域が変質するため、解析精度の低下が影響しているものと推察される。

以上より、既存施設より採取したコンクリート・コアの損傷度評価には、力学特性に加えて、AE 指標を活用することにより詳細な損傷度の評価診断が可能になるものと考えられる。その際、荷重初期の圧縮応力場で発生する AE は有効な評価指標になるものと推察される。応力ひずみ挙動の評価には、従来から行われているひずみゲージでの計測に加えて、画像解析を導入することにより局所損傷の影響を同定できる可能性はあるが、その際、評価精度に関する検討は不可欠であると考えられる。

5. おわりに

本論では既設橋梁より採取したコンクリート・コアを対象に圧縮荷重過程の AE を指標に損傷度評価を試みた結果を報告した。検討の結果を以下に挙げる。

- (1) 実橋梁 RC 部材から採取したコンクリート・コアの力学特性は、圧縮荷重時の最大荷重における縦ひずみの最大値が、平均 958 μ (標準偏差 535 μ) であり、脆性化が示唆された。
- (2) 圧縮荷重過程に発生する弾性波を AE 法により検出し、AE レートプロセス解析により評価した結果、AE 指標である β 値が 6 サンプル中 4 サンプルで、損傷の蓄積が考えられる $\beta < 0.0$ の範囲に評価された。強度特性同様、蓄積損傷の影響が AE 指標の観点からも確認された。

- (3) 供試コンクリートでは、荷重から 200 μ 程度で AE の頻発を確認した。無損傷コンクリートでは、荷重初期と比較して終局時に AE の頻発を確認したことから、低応力下での AE 発生挙動が損傷度評価指標として有効であると推察される。

参考文献

- 1) 鈴木哲也: インフラ健全性評価に資する AE など弾性波計測の最前線・解説「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.
- 2) Suzuki, T., Ogata, H., Takada, R., Aoki, M. and Ohtsu, M.: Use of Acoustic Emission and X-Ray Computed Tomography for Damage Evaluation of Freeze-Thawed Concrete, Construction and Building Materials, 24, pp. 2347-2352, August 2010.
- 3) Suzuki, T., Shigeishi, M. and Ohtsu, M.: Relative Damage Evaluation of Concrete in a Road Bridge by AE Rate - Process Analysis, Materials and Structures, 40(2), pp. 221-227, March 2007.
- 4) Suzuki, T. and Ohtsu, M.: Use of Acoustic Emission for Damage Evaluation of Concrete Structure Hit by the Great East Japan Earthquake, Construction and Building Materials, 67, pp. 186-191, June 2014.
- 5) 横堀武夫: 材料強度学, 技報堂出版, pp. 6-14, 1966.
- 6) Suzuki, T., Shiotani, T. and Ohtsu, M.: Evaluation of X-ray CT Image Properties of Cracked Concrete by Spatial Parameter Analysis, ETNDT 6 (Emerging Technologies in Non-Destructive Testing 6), May 2015.
- 7) (社) 土木学会: 弾性波法の非破壊検査研究小委員会報告書および第 2 回弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関するシンポジウム講演概要集, コンクリート技術シリーズ, 73, pp. 31-36, 2007.
- 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) (社) 日本非破壊検査協会: アコースティック・エミッション試験 I, pp. 74-75, 2006.
- 10) 谷川恭雄: 硬化コンクリートの性質, セメントジャーナル社, pp. 10-11, 2005.
- 11) Grosse, C. U. and Ohtsu, M. (Eds.): Acoustic Emission Testing, Springer, pp. 211-237, 2008.
- 12) Ohtsu, M. (Eds.): Acoustic Emission and Related Non-Destructive Evaluation Techniques in the Fracture Mechanics of Concrete, Woodhead Publishing, 2014.