

AE パラメータを援用した既設橋梁コンクリートの損傷度評価に関する研究

(株) 福田組 正会員 ○藤井 伸之

(株) 福田組 非会員 小嶋 篤志

(株) 福田組 正会員 西脇 健志

新潟大学自然科学系 (農学部) 正会員 鈴木 哲也

1. はじめに

近年, コンクリート構造物の長寿命化において損傷度評価の必要性が見直されている. 筆者らは, コンクリートの圧縮載荷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, 圧縮載荷過程の AE 計測から損傷状況を概略評価した結果を報告する.

2. AE パラメータによる圧縮載荷過程評価

供試したコンクリート・コアの圧縮載荷過程の 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 , ひずみレベルを ε とし, 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. 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)}.

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. 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 床版である. 供試したコンクリート・コアは 6 本である.

3.2 圧縮載荷過程の AE 計測とひずみ計測

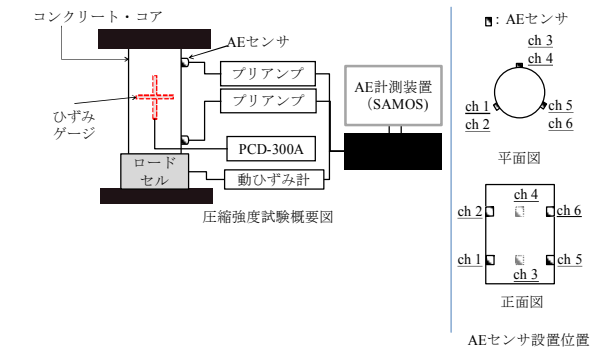
コンクリート・コアは, 圧縮載荷過程に AE 計測を導入し, 破壊過程に発生する AE を検出した (図-1 (a)). 計測装置は SAMOS (PAC 社製) である. AE 計測は, 供試体の側面部に 6 個のセンサを設置して行った. しきい値は 42dB とし, 60dB の増幅をプリアンプとメインアンプで行った. AE センサは 150kHz 共振型センサを用いた. なお, 供試体の載荷面にはシリコングリースを塗布し, テフロンシートを挿入することにより摩擦により発生する AE を低減させた. また, 圧縮載荷過程のコンクリート・コアの挙動を検討するため, 供試体の端面はキャッピング等の処理を実施していない. 本報における圧縮強度は, JISA1108 に規定された試験法とは異なる.

圧縮載荷過程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. 載荷過程のひずみ量は, ひず

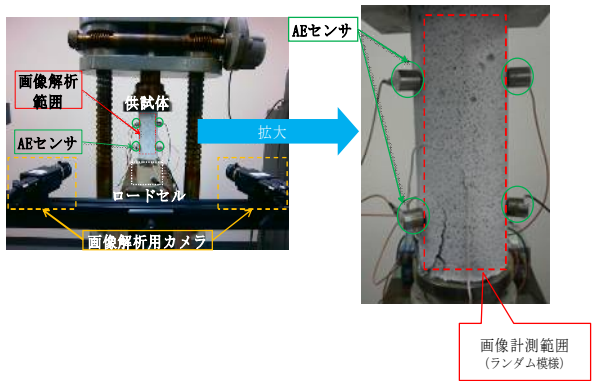
キーワード 既設橋梁, コンクリート, 圧縮強度試験, DICM, AE

連絡先 〒951-8061 新潟市中央区西堀通 2-778 西堀シャルム 205 号 (株) 福田組 技術部

TEL. 025-226-6010 E-mail : fujii1280@dws.fkd.co.jp



(a)AE 計測



(b)DICM 計測

図-1 計測概要図

表-1 コンクリート・コアの力学特性

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)
15.3	958	32.7	25.4
[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。
- ※3 圧縮強度は JISA1108 に規定された試験法ではないことから参考値である。

みゲージ（ゲージ長：60mm、共和電業社製）と画像解析により評価した（DICM、図-1（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、非接触画像計測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（Correlated Solutions 社製）である。使用した CCD カメラは GS3-U3-60S6C（Point Grey 社製）である。可視画像のサンプリング周波数は 100 Hz である。

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 6.6N/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。

4.2 AE 指標を用いた圧縮載荷過程の特性評価

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 $f(\epsilon)$ （式（1））および β 値（式（2））により評価した。

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 $f(\epsilon)$ とひずみとの関係を図-2 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、載荷初期に 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、載荷終期に AE の頻発が確認された。

それに対して、 β 値が最小値を示す No.2 では載荷当

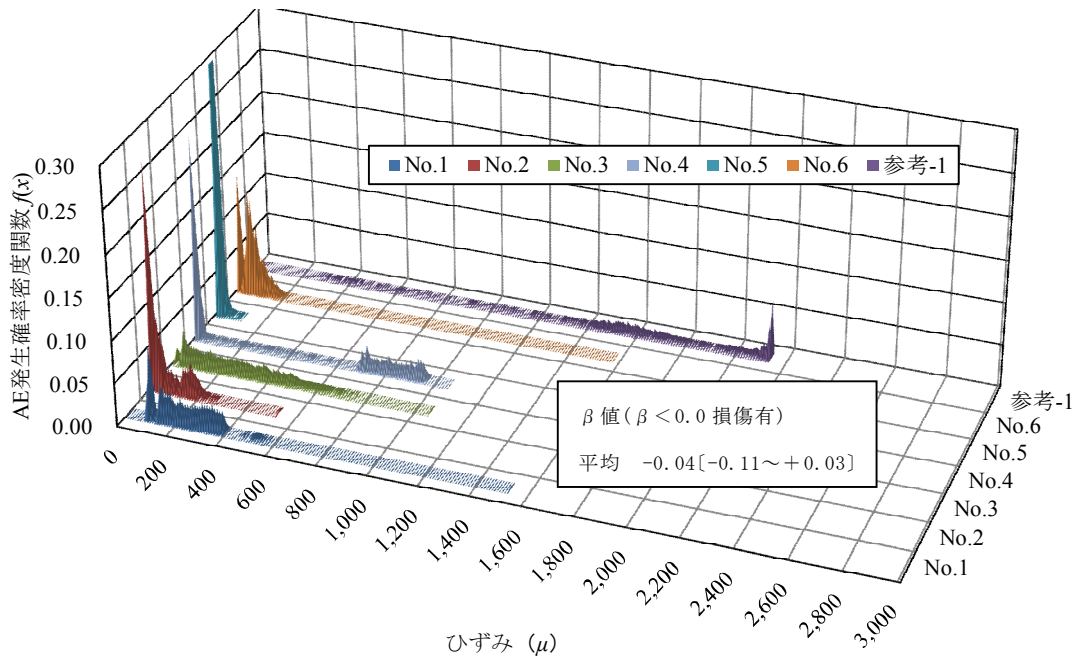


図-2 AE 発生確率密度関数 $f(x)$ とひずみの関係

初から AE が頻発し、 $\beta = -0.11$ を確認した。以上の AE 指標の特徴から、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。

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-3 に示す。本図は、応力レベル 30% の No.2 (最小 β 値) および No.4 (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、厳密には荷重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の応力とひずみは 1:1 の関係と考えられる。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。図-3 は、低応力下における損傷起

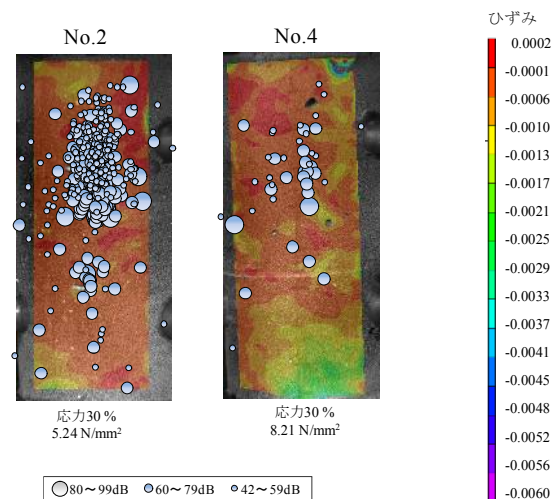


図-3 AE イベントと縦ひずみ分布の関係

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 Grosse⁶⁾ や Ohtsu⁷⁾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、圧縮載荷過程の 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-2 に示す全載荷過程の AE 発生確率密度関数 $f(\epsilon)$ 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 200μ までに AE のピークが確認された。最大強度 27.4N/mm^2 を示す No.4 も例外ではなく、載荷初期に 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、圧縮載荷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う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⁾。

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、載荷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. まとめ

(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、圧縮載荷時の最大荷重における縦ひずみの最大値が、平均 958μ （標準偏差 535μ ）であり、脆性化が示唆された。今回は、コア採取が橋面舗装撤去後となり、撤去時の部材損傷の可能性もあるため、今後は採取方法を含めた精緻な検討が必要だろう。

- (2) 圧縮載荷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、載荷から 200μ 程度で AE の頻発を確認した。無損傷コンクリートでは、載荷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) Grosse, C. U. and Ohtsu, M. (Eds.): Acoustic Emission Testing, Springer, pp. 211-237, 2008.
- 7) Ohtsu, M. (Eds.): Acoustic Emission and Related Non-Destructive Evaluation Techniques in the Fracture Mechanics of Concrete, Woodhead Publishing, 2014.