

論文 AE データベースの構築に基づくコンクリート損傷度評価

山岸 俊太郎*1・鈴木 哲也*2・大津 政康*3

要旨: コンクリート損傷の定量化は、既設構造物の長寿命化策を検討する際に不可欠な評価指標である。本研究では、圧縮強度試験に AE 計測を導入し、圧縮破壊過程の AE 発生挙動と応力 - ひずみ挙動からコンクリート損傷度評価を試みた。損傷度評価指標には、AE データベースを構築し、スカラー損傷度の観点から推定した健全時の弾性係数 E^* と現在の弾性係数との相対比である相対損傷度を提案した。検討の結果、構築した AE データベースに対する試験値の変動が寄与率 0.6 以上であれば相対損傷度の評価精度が確保できることが明らかになった。

キーワード: AE (Acoustic Emission), 圧縮強度試験, AE レートプロセス解析, データベース

1. はじめに

コンクリート損傷に関する定量的指標は、圧縮強度や弾性係数など力学特性が主に用いられている。既存施設の損傷推定には、健全な状態のコンクリート物性値が不可欠であるが、現状では全ての施設において施工資料が整備されておらず、設計基準値等を代用して機能低下量を推定している。

筆者らは、このような技術的課題を踏まえて損傷力学におけるスカラー損傷度を用いて健全時の弾性係数の推定に基づくコンクリート損傷度評価法を開発している¹⁾。弾性係数の推定には、損傷力学パラメータと AE 発生特性との関係をデータベース化し、評価論理を構築している。既往研究では、その特性を検討し²⁾、実構造物への提案手法の適用³⁾を試みている。実験・解析には、既存施設から採取したコンクリート・コアを用いて圧縮強度試験に AE (Acoustic Emission) 計測を導入し、圧縮破壊の際に発生する AE の特性を AE レートプロセス解析により定量化している。一連の損傷度評価プロセスは DeCAT (**D**amage **E**stimation of **C**oncrete by **A**coustic **E**mission **T**echnique) としてシステム化している⁴⁾。既往の調査研究において明らかになった課題は、損傷度の評価値精度が圧縮破壊過程の応力 - ひずみ挙動と密接に関連し、損傷が極度に進行したコンクリート・コアでは評価指標である相対損傷度の評価精度が低下することが懸念されていることにある。

本論では、凍結融解損傷、摩耗損傷など損傷状況の異なるコンクリート構造物より採取した 50 本のコンクリート・コアを用いて、損傷度評価値と AE データベースとの関係から、評価精度に及ぼす AE データベースの影響を考察した。

2. 解析手法

2.1 AE レートプロセス解析

コンクリートの一軸圧縮下における AE 発生挙動は、微小ひび割れの発生過程と対応している。微小ひび割れは漸増的に発生、集積され、主破壊に至り耐荷力の低下をもたらす。ひび割れ発生に対応する AE 発生挙動は、微小ひび割れの集積により累進的に増加する。この過程は、ある応力レベルで発生するひび割れ総数に依存し、既存の破壊域が次の破壊域の進展を支配すると考えられる。その場合には、確率過程論における定式化が可能である。本研究では、一軸圧縮下の AE 発生挙動の定式化にレートプロセス理論⁵⁾を適用した。

AE の発生総数を N 、応力レベルを V とし、AE 発生確率関数を $f(V)$ とすると、 V から $V+dV$ への応力増分に対し、以下の式(1)を導くことができる。

$$f(V)dV = \frac{dN}{N} \quad (1)$$

AE 発生確率関数 $f(V)$ に対し、損傷度の定量化のために、次のような双曲線を仮定する。

$$f(V) = \frac{a}{V} + b \quad (2)$$

式(2)における a 、 b は定数である。

式(1)、式(2)より応力レベル V に対する AE 発生総数 N は式(3)で表わされる。なお、 C は積分定数である。

$$N = C \cdot V^a \exp(b \cdot V) \quad (3)$$

式(2)で a 値は応力レベル V での AE 発生頻度を反映し、低応力レベルの段階では a 値の正負により AE の発生確率が大きく異なるモデルになっている。 a 値が正ならば、AE 発生確率関数は低応力レベルで高いことを意味し、構造物が損傷した状態であると評価することができる。 a 値が負ならば、AE 発生確率関数は低応力レベルで低い

*1 新潟大学大学院 自然科学研究科環境科学専攻 (学生会員)

*2 新潟大学 自然科学系 (農学部) 准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 熊本大学大学院 自然科学研究科教授 工学博士 (正会員)

ことを意味し、構造物が健全な状態であることが評価できる。このモデルは、圧縮応力下での応力レベルが低い段階での AE 発生挙動により損傷の進行を判断するものである。

したがって、圧縮強度試験に AE 測定を導入し、レートプロセス解析を適用することにより、構造材料の損傷度を定量的に評価することができる。

2.2 スカラー損傷度

コンクリート損傷度の定量化には、損傷力学理論におけるスカラー損傷度を用いた。損傷力学では、材料損傷の程度を示す指標として損傷変数が用いられ、それは応力またはひずみに関連して累積的に評価される。全く損傷を受けていない健全な状態の材料の断面領域を A^* とし、損傷領域を除外した断面領域を A とすると、スカラー損傷変数 Ω は式(4)により表わすことができる。なお、本研究では既設構造物の竣工当初の弾性係数を健全時の弾性係数と定義した。

$$\Omega = \frac{A^* - A}{A^*} = 1 - \frac{A}{A^*} \quad (4)$$

式(4)により、 $\Omega=0.0$ のときは $A=A^*$ となり、全く損傷を受けていない状態であることを示す。 $\Omega=1.0$ であれば $A=0.0$ となり、全く応力に耐えることができない状態であることを示す。しかし、空隙領域を除外し、実際に損傷変数 Ω を計算することは非常に困難であることから、本研究では有効断面の減少とコンクリート物性値の低下に着目し、式(4)を応力 - ひずみ挙動の関係から式(5)に示す弾性係数の相対値として定義した。

$$\Omega = 1 - \frac{E}{E^*} \quad (5)$$

ここで、 E : 損傷を受けた材料の弾性係数、 E^* : 損傷を受けていない健全な材料の弾性係数である。

Loland⁶⁾ は、損傷パラメータである Ω と一軸圧縮下でのひずみ量 ε の関係を式(6)として定義した。

$$\Omega = \Omega_0 + A_0 \varepsilon^\lambda \quad (6)$$

ここで、 Ω_0 : 初期損傷度、 A_0 、 λ : 材料定数である。式(5)と式(6)より式(7)が導出される。

$$\sigma = (E_0 - E^* A_0 \varepsilon^\lambda) \varepsilon \quad (7)$$

ここで、

$$E_0 = E^* (1 - \Omega_0) \quad (8)$$

$$E_c = E_0 - E^* A_0 \varepsilon_c^\lambda \quad (9)$$

2.3 AE データベースの構築に基づく健全時の弾性係数 E^* の推定

式(6)に示す初期損傷度 Ω_0 は、一種の損傷指標である。

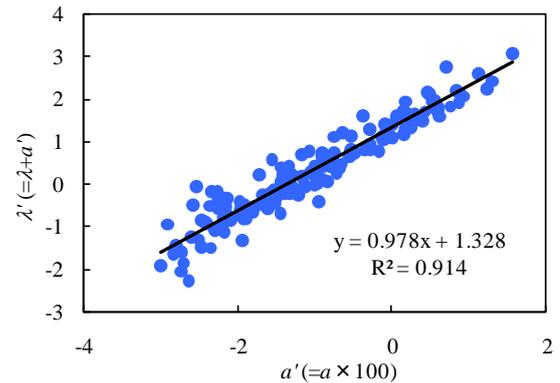


図-1 AE データベース

式(5)と式(6)から導かれる式(7)では、健全時の弾性係数 E^* が必要であるが既設構造物では竣工当時の技術資料が残されていない限りを明らかにすることは困難である。

そこで本研究では、AE データベースを構築することにより健全時の弾性係数 E^* を推定することを試みた。AE データベースは、損傷パラメータ λ' と AE パラメータ a' 値で構築されている (図-1)。 λ' は下式により評価される。

$$\lambda' = a'X + Y$$

$$\lambda + (a \times 100) = (a \times 100)X + Y \quad (10)$$

$$\lambda = \frac{E_c}{E_0 - E_c} \quad (11)$$

ここで、 $a=0.0$ の時に $E_0=E^*$ と仮定すると、AE データベースより健全時の弾性係数 E^* を推定することができる。

$$E^* = E_c + \frac{E_c}{Y} \quad (12)$$

本研究では、コンクリート損傷を弾性係数の相対値 E' (相対損傷度) として評価した。

$$E' = \frac{E_0}{E^*} \times 100 \quad (13)$$

ここで、 E_0 は圧縮強度試験から求められる現状の初期接線弾性係数であり、AE データベースは、熊本大学および新潟大学において試験された 200 サンプルにより構築されおり、現在もデータの蓄積が進められている。

3. 試験方法

3.1 供試体

実験的検討に用いたコンクリート・コアは、損傷状況の異なる 50 本の供試体である。概要を表-1 に示す。いずれのコンクリート・コアも農業用コンクリート製開水路の側壁部 (壁厚: 15~20cm) より採取したものである。

表-1 コンクリート物性一覧

サンプルタイプ	損傷状況	サンプルサイズ	圧縮強度 (N/mm ²)	割線弾性係数 (GPa)	初期接線弾性係数 (GPa)	健全時の弾性係数 (GPa)	相対損傷度 (%)
Type A	無損傷	28	12.1-41.6 [22.9]	12.8-82.4 [28.8]	15.6-85.7 [35.7]	22.4-144.4 [50.5]	36.9-116.4 [74.7]
Type B	摩耗損傷	19	4.6-30.9 [19.5]	6.0-40.4 [17.5]	7.6-65.1 [27.2]	10.5-70.8 [30.7]	36.3-166.9 [89.9]
Type C	凍結融解損傷	3	4.2-27.7 [13.1]	1.0-19.3 [7.4]	0.2-28.8 [10.4]	1.7-33.8 [13.0]	13.3-85.1 [53.2]

- (1) 数値は最小値~最大値[平均値]を示す。
 (2) 健全時の弾性係数 E^* は AE データベースから推定した評価値である。

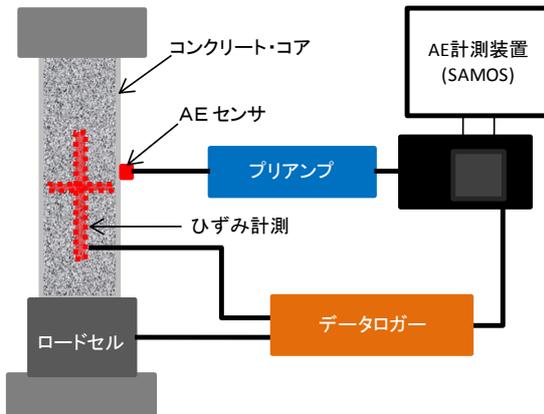


図-2 圧縮強度試験時の AE 計測

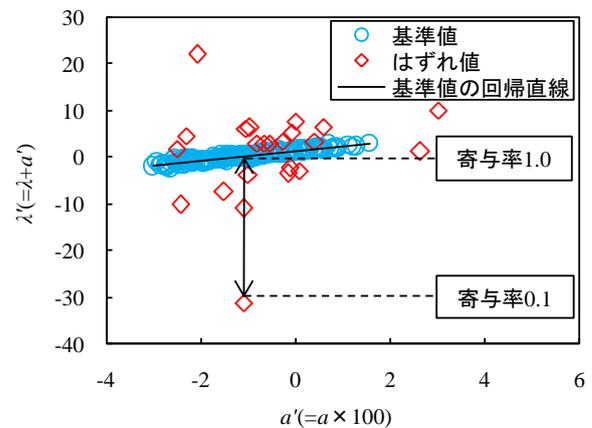


図-3 AE データベースとはずれ値の関係

3.2 圧縮強度試験

コンクリート・コアは、圧縮強度試験に AE 計測を導入し、破壊過程に発生する AE を検出した。計測装置は SAMOS (PAC 社製) である。AE 計測は、供試体の側面部に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。試験概要を図-2 に示す。

4. 結果および考察

4.1 コンクリート物性

本研究で用いたコンクリート・コアの物性値一覧を表-1 に示す。Type A は、目視により損傷が顕在化していないコンクリート・コアである。圧縮強度は 12.1~41.6N/mm² (平均値 : 22.9N/mm²) である。Type B は、摩耗損傷が顕在化したコンクリート・コアである。圧縮強度は 4.6~30.9N/mm² (平均値 : 19.5N/mm²) と平均値で Type A の約 85% の強度であった。Type C は、凍結融解損傷が顕在化し、コンクリート・コア内部に層状のひび割れが進展している供試体である。圧縮強度は、Type A と Type B の両サンプルとは異なり、4.2~27.7N/mm² (平均値 : 13.1N/mm²) を示し、極度に低

下していることが確認された。割線弾性係数と初期接線弾性係数は、圧縮強度と同様の傾向が確認された。

AE データベースを用いて推定した健全時の弾性係数 E^* と圧縮強度試験結果より算出された初期接線弾性係数 E_0 の相対比である相対損傷度では、最大値と最小値の範囲が Type A 79.5% であるのに対して、Type B 130.6%、Type C 71.8% であった。相対損傷度は式(13)により算出されるが、評価精度はコンクリート・コアの応力-ひずみ挙動により算出される損傷パラメータ λ 値 (式(11)) と AE パラメータ a 値の特性に影響されると考えられる。本研究では、AE データベースに対する試験値の寄与率の相違が損傷度評価へ及ぼす影響について、AE データベースに対する試験値の寄与率の観点から次節において検討する。

4.2 相対損傷度評価

(1) AE データベースとはずれ値の関係

本研究では、AE データベースにおけるはずれ値を設定した。はずれ値は、モデル試験により構築された 200 サンプルの AE データベースの回帰直線を基準回帰直線とし、寄与率 R^2 から設定した。寄与率の算出式を式(14) に示す。

表-2 相対損傷度評価値のばらつき特性

寄与率	サンプルサイズ	相対損傷度 (%)		
		平均値	標準偏差	変動係数
0.90~1.00	27	97.8	21.9	0.224
0.80~0.89	9	67.4	14.2	0.211
0.70~0.79	4	46.2	13.2	0.285
0.60~0.69	5	61.2	12.2	0.200
0.60未満	5	53.4	3.4	0.064

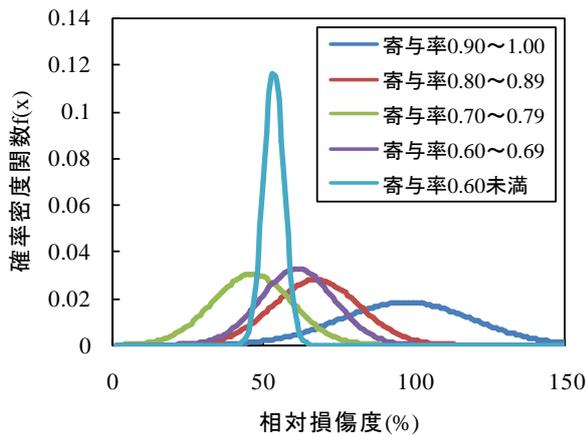


図-4 相対損傷度の分布特性

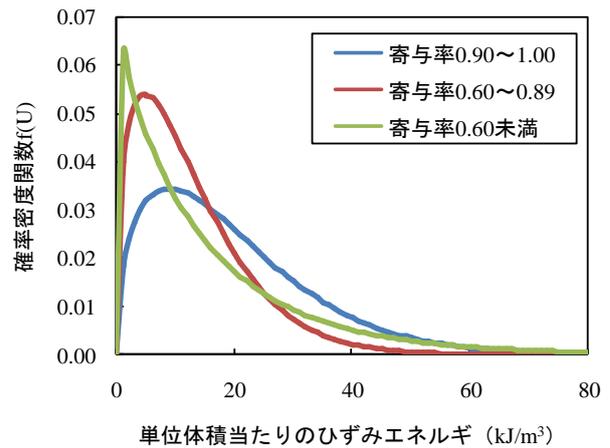


図-5 確率密度関数 $f(U)$ とひずみエネルギーの関係

$$R^2 = 1 - \frac{V_e}{V_0} \quad (14)$$

ここで、 V_e : 実測値 λ と基準回帰直線 λ 値の残差分散、 V_0 : 実測値 λ の分散である。

はずれ値は、AE データベースの回帰直線に対し、全供試体の寄与率を算出し、寄与率が 0.9 未満のものをはずれ値と定義した。寄与率は 1.0 のとき、そのプロットデータは基準値の回帰直線と一致し、寄与率の減少に伴いプロットデータは回帰直線との差が大きくなる。AE データベースとははずれ値の関係 (模式図) を図-3 に示す。

検討の結果、寄与率が 0.6~1.0 の範囲では、相対損傷度の変動係数が 0.200~0.285 であったのに対して、寄与率 0.6 未満のコンクリート・コアでは、変動係数 0.064 と評価値の集中が確認された (表-2)。データの正規性を仮定し、平均値と標準偏差を用いて確率密度関数 $f(x)$ を評価した結果を図-4 に示す。同図より、寄与率 0.60 未満では相対損傷度の評価値が約 50% に集中していた。寄与率 0.60~0.89 の範囲では、平均値と標準偏差が類似していたことから確率密度関数 $f(x)$ の分布範囲が重複していた。寄与率 0.90~1.00 のコンクリート・コアでは、平均値が他の供試体とは異なり 97.8% を示したことから、相対損傷度が約 100% を中心に分布が広がる結果となっ

た。AE データベースは、主に無損傷のコンクリート・コアの試験結果 (相対損傷度評価値 : 100%) で構成されている。このことから、AE データベースの回帰直線において寄与率が高く、回帰直線とほぼ一致するコンクリート・コアは、平均値が相対損傷度 100% 近傍に評価されるものと考えられる。

これらの結果から、試験値の AE データベースに対する寄与率の相違により損傷度評価値が変化することが示唆された。このことから、コンクリート・コアの相対損傷度を 0~100% の範囲で適切に評価するためには、AE データベースに対する寄与率が 0.60 以上であることが必要であると考えられる。

そこで本研究では、応力 - ひずみ曲線から圧縮応力下の単位体積当たりのひずみエネルギー (式(15)) を算出し、コンクリート・コアの圧縮破壊特性の相違が AE データベースに対する寄与率に及ぼす影響を考察した。

$$U = \int \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (15)$$

ここで、 U : 単位体積当たりのひずみエネルギー、 ε : ひずみ量、 $\sigma(\varepsilon)$: 応力値 である。

本研究では、コンクリートに代表される脆性破壊の確率分布の評価方法として主に用いられているワイブル解析の観点から圧縮応力下でのひずみエネルギーを評価

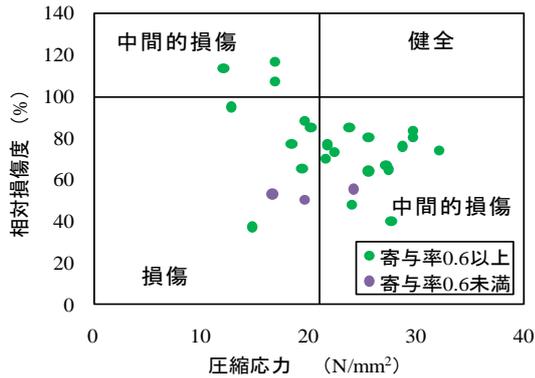


図-6 相対損傷度と圧縮強度の関係 (Type A)

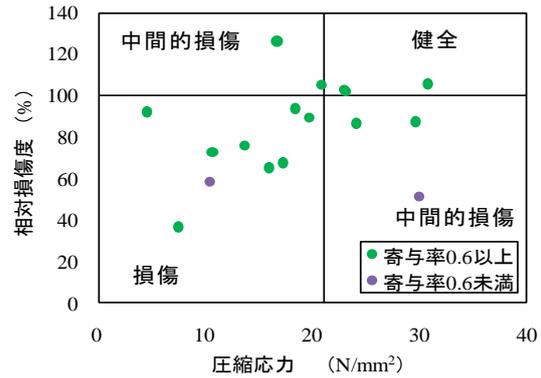


図-7 相対損傷度と圧縮強度の関係 (Type B)

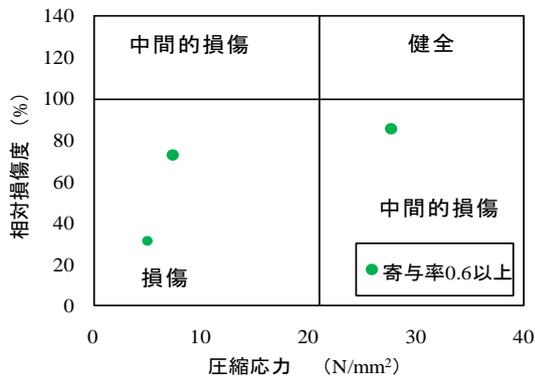


図-8 相対損傷度と圧縮強度の関係 (Type C)

することを試みた。ひずみエネルギー U の特性は、ワイブル分布の確率密度関数 $f(U)$ の観点から評価すると式(16)となる。

$$f(U) = \frac{m}{U_0^m} U^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{U}{U_0}\right)^m\right] \quad (16)$$

ここで、 m : 形状パラメータ、 U_0 : 尺度パラメータである。式(16)で用いられる形状パラメータと尺度パラメータは、 $\ln U$ を横軸、 $\ln \ln(1-F)^{-1}$ を縦軸とするワイブルプロットより求められる。ワイブルプロットにおいて、ワイブル分布は直線となり、その直線の傾きが形状パラメータ m となる。切片から尺度パラメータ U_0 が算出できる。本研究では、破壊確率 F_i の推定するためにメディアンランク法を用いる。メディアンランク法とは、実験値を小さい順に並べその順序 i を用いて、破壊確率 F_i を推定する方法であり式(17)により算出される。

$$F_i = \frac{i-0.3}{n+0.4} \quad (17)$$

ここで、 F_i : 破壊確率、 i : ひずみエネルギーを小さい順に並べた順序数、 n : サンプルサイズ である。

検討結果を図-5 に示す。AE データベースに対する寄与率が 0.6 未満の場合、ひずみエネルギーが非常に低い段階での確率密度関数 $f(U)$ の増加が確認された。寄与率

0.60~0.89 と 0.90~1.00 では、寄与率 0.6 未満と比較してひずみエネルギーの高い範囲での確率密度関数 $f(U)$ の増加が確認された。この背景には、圧縮強度試験の際に計測する応力 - ひずみ挙動が影響していると考えられる。寄与率 0.6 未満のコンクリート・コアは、極度に損傷が進行しているコンクリート・コアが大多数ある。これらは载荷に対して十分にひずむことなく最終破壊に至っていることから、ひずみエネルギーが非常に低い範囲で確率密度関数 $f(U)$ が集中したと考えられる。このことから、構築した AE データベースを用いた損傷度評価は、全てのコンクリート・コアに対して適用できるのではなく、損傷度評価値 (図-4) や応力 - ひずみ挙動の特性 (図-5) を踏まえて、AE データベースに対する試験値の寄与率が 0.6 以上のコンクリート・コアで適用できるものと考えられる。AE データベースに対する試験値の寄与率が 0.6 未満の場合、低応力での圧縮破壊を起こし、結果として相対損傷度の評価値の集中が引き起こされることから同一の構造物から採取したコンクリート・コアであったとしても評価精度に相違が内在化していることが推察される。

そこで、相対損傷度を用いたコンクリート損傷度評価をサンプルタイプ別に評価することを試みた。

(2) 相対損傷度評価と圧縮強度の関係

コンクリート・コアの損傷度評価には、相対損傷度と圧縮強度の関係から損傷、中間的損傷および健全に区分する評価法が提案されている⁴⁾。本論では、評価基準を相対損傷度 100%、圧縮強度 21N/mm² とした。圧縮強度 21N/mm² は、コンクリート・コアを採取した構造物が農業用コンクリート製開水路であることから、農林水産省土地改良設計基準に記載されている基準値とした。評価範囲「損傷」では、相対損傷度 100%未満かつ圧縮強度 21N/mm² 未満のコンクリート・コアを示す。「健全」は、相対損傷度 100%以上かつ圧縮強度 21N/mm² 以上のコンクリート・コアである。「中間的損傷」は、いずれかの条件が基準値を下回るものである。

図-6～図-8に検討結果を示す。無損傷のコンクリート・コア (Type A) では、中間的損傷が高頻度に確認された。これは、コンクリート・コアを既設構造物より採取したことに起因していると考えられる。既設構造物の損傷要因は複数あり、損傷の進行が異なるため中間的損傷が頻出したと考えられる。前節、図-4の検討から、AE データベースと損傷パラメータとの関係から寄与率 0.6 未満のコンクリート・コアでは、相対損傷度が約 50% に集中することが示唆された。Type A～C では、寄与率 0.6 未満のコンクリート・コア (サンプルサイズ $n=5$) の相対損傷度が 49.7%～58.4% (平均値: 53.4%) に集中した。損傷度評価は、損傷または中間的損傷を示し、図-4と同様に評価値の偏在が確認された。寄与率 0.6 以上のコンクリート・コアでは、損傷度評価が健全、中間的損傷および損傷のいずれも確認され、評価値の過度の集中は確認されなかった。

これらのことから、実構造物においてコンクリート・コアを採取し、損傷度評価を行う場合、AE データベースと試験値とが寄与率 0.6 以上であれば、推定した健全時の弾性係数 E^* を用いた損傷度評価に過度の集中はなく、評価値の有効性は高いと考えられる。寄与率 0.6 未満の場合、評価値の偏在から精度の低下が引き起こされると考えられ、提案手法の適用は困難であると考えられる。

5. おわりに

本研究では、圧縮強度試験に AE 計測を導入し、圧縮破壊過程の AE 発生挙動と応力 - ひずみ挙動からコンクリート損傷度評価を試みた。損傷度評価には、AE データベースを構築し、健全時の弾性係数 E^* をスカラー損傷度の観点から推定し、現在の弾性係数との相対比である相対損傷度として評価した。検討結果を以下に列挙する。

- (1) 損傷状況の異なるコンクリート構造物よりコンクリート・コアを採取し、圧縮破壊過程の AE 発生挙動を評価した。コンクリート物性は、無損傷、磨耗損傷および凍結融解損傷の順に低下した。
- (2) 各コンクリート・コアの相対損傷度は、圧縮強度や弾性係数などコンクリート物性と同様の傾向が確認された。最大値と最小値の範囲は、Type A が 79.5% であるのに対して、Type B で 130.6%、Type C で 71.8% であった。
- (3) 既往の研究成果から、応力 - ひずみ挙動が明確に確認

できるコンクリート・コアの試験結果を用いて AE データベース (損傷パラメータ λ' と AE パラメータ a' 値の関係) を構築し、実構造物より採取した 50 本の試験データの特性を評価した。その結果、AE データベースからのはずれ値の度合いが大きくなる (寄与率の低下) コンクリート・コアでは、損傷度評価値の分布が集中することが明らかになった。特に、寄与率 0.6 未満のコンクリート・コアでは、相対損傷度が約 50% (49.7%～58.4%; サンプルサイズ $n=5$) に集中することが明らかになった。

- (4) AE データベースに対する試験値の寄与率が 0.6 以上のコンクリート・コアでは、本試験で確認した磨耗損傷と無損傷のコンクリート・コアでは損傷度評価結果の過度の集中は確認されなかった。凍結融解損傷サンプルは、サンプルサイズ $n=3$ と非常に小さいことから、確定的な議論は困難であるが、損傷と中間的損傷の評価を示したことから損傷度の違いを提案手法により評価できているものと考えられる。

参考文献

- 1) Suzuki, T. et al. : Use of Acoustic Emission and X-Ray Computed Tomography for Damage Evaluation of Freeze-Thawed Concrete, *Construction and Building Materials*, 24, pp. 2347-2352, 2010. 6
- 2) 鈴木哲也, 池田幸史, 友田祐一, 大津政康: データベース構築に基づく AE レートプロセス解析による劣化コンクリートの定量的損傷度評価, *コンクリート工学年次論文集*, 26 (1), pp. 1791-1796, 2004. 6
- 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, 2007. 3
- 4) 鈴木哲也, 中達雄, 大津政康: AE 法を用いたコンクリート損傷度評価システム DeCAT の開発, *ARIC 情報*, 99, pp. 15-19, 2010. 12
- 5) 横堀武夫: 材料強度学 - 強度・破壊および疲労 -, 技報堂, 1955.
- 6) Loland, K. E.: Continuous Damage Model for Load - Response Estimation of Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol.10, pp. 385-402, 1980.
- 7) 農林水産省農村振興局: 土地改良事業計画設計基準 (水路工), pp. 302-326, 2001.