

# 論文 DeCAT を用いた構造体コンクリートの定量的損傷度評価

奥津 広太\*1・鈴木 哲也\*2・青木 正雄\*3・大津 政康\*4

**要旨:** コンクリート構造物における詳細調査では物性値による損傷度評価が行なわれる。本論では既設コンクリート水利構造物より採取したコア供試体を対象に X 線 CT 法を用いた内部空隙の可視化と損傷力学理論のスカラー損傷度概念を用いた健全時の弾性係数の推定に基づく定量的損傷度評価について検討した結果を報告する。検討の結果、コンクリート内部のクラックを含む空隙量と圧縮破壊挙動とは密接に関連し、強度特性では十分に評価できない損傷度を AE 発生挙動の観点から耐久性係数を用いることにより定量的評価が可能であることが明らかとなった。

**キーワード:** AE 法, 損傷力学, 耐久性係数, DeCAT, X 線 CT 法

## 1. はじめに

近年、コンクリート構造物の早期劣化が社会問題として認知されるに伴いコンクリートなどの複合材料に関する定量的損傷度評価法の開発が急務となっている。コンクリートの耐久性は、中性化や凍結融解などの影響を受けて経年的に低下する。コンクリート損傷は、外部環境の影響を受け、クラックを含む空隙構造の変質により顕在化する。既往の研究では、空隙量と強度特性の関係について検討されることが多く、損傷度との関連性について議論した例は少ない。筆者らは、アコースティック・エミッション(Acoustic Emission; AE)法と損傷力学を応用し、健全時の弾性係数の推定に基づくコンクリートの定量的損傷度評価法を開発している<sup>1),2)</sup>。開発手法は、コンクリートの圧縮応力下での AE 発生挙動をレートプロセス理論により近似し、応力-ひずみ挙動から損傷パラメータを推定するものである。損傷パラメータはデータベース化され、耐久性係数として損傷度評価指標を解析的に求めている。一連の解析過程は、DeCAT (Damage Estimation of Concrete by Acoustic Emission Technique) としてシステム化している。

本論では、DeCAT システムに関する一連の解析過程を凍結融解損傷の進行したコンクリートに適用し、定量的損傷度評価を試みる。その際、コンクリート・コア内部のクラックを含めた空隙分布を X 線 CT 法より評価した。その結果を踏まえて、DeCAT により算出される耐久性係数と空隙分布に影響される CT 値の関係から空隙構造の発達した損傷コンクリートの特性評価を試みた。

## 2. 解析理論

### 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、微小クラックの発生過程と対応している。微小クラックは漸増的に発生、集積され、主破壊に至り耐荷力の低下をもたらす。クラック発生に対応する AE 発生挙動は、微小クラック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クラック総数に依存し、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、次のような双曲線関数を仮定する。

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

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。

$$N = CV^a \exp(bV) \quad (3)$$

\*1 日本大学大学院 生物資源科学研究科 (正会員)

\*2 日本大学 生物資源科学部 博士(工学) (正会員)

\*3 日本大学 生物資源科学部 博士(農学)

\*4 熊本大学大学院 自然科学研究科 工学博士 (正会員)

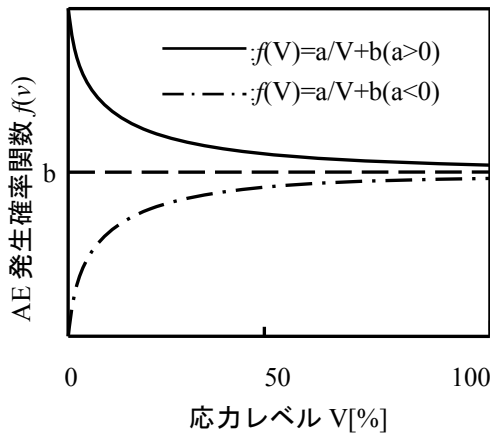


図-1 AE 発生確率関数  $f(v)$  と応力レベル  $V$  の関係

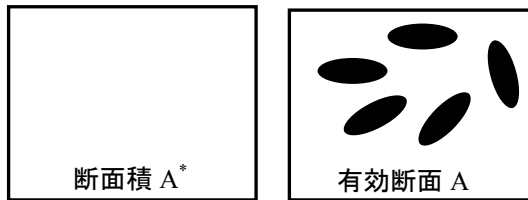


図-3 材料損傷概念図

AE 発生確率関数と応力レベルの関係を図-1 に示す。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となっている。 $a$  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ており、構造物が劣化した状態に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ことを意味しており、構造物が健全な状態にあると評価することができる。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。

## 2.2 健全時の弾性係数 $E^*$ の推定による定量的損傷度評価

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概念を用いて評価した。一軸圧縮下のコンクリート供試体の応力 - ひずみの関係を図-2 に示す。ここで、 $\sigma_c$  は最大応力、 $\epsilon_c$  は最大応力時のひずみである。図に示されるように供試体内部のクラックの開始や進展に基づく段階は損傷力学と破壊力学として分けられる。図中で示すとおり、点 A で示す最大応力の 80% の点以前では、一般にクラックの分布が集中することなく全体に均一に分布している。この間での応力 - ひずみ関係を求めるには損傷力学が適しており、クラックが局所化し始める点 A 以降の応力 - ひずみ関係を求めるには破壊力学が適していると考えられている。損傷力学では、材料損傷の程度を示す損傷変数が用いられ、それは応力

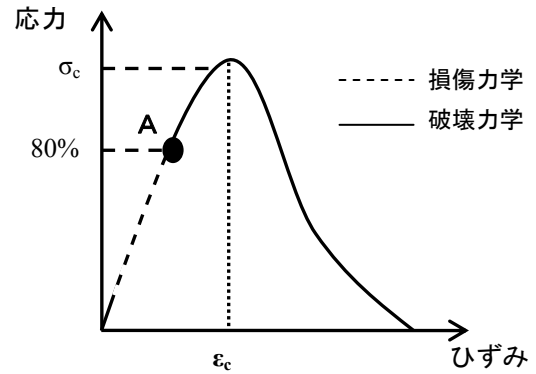


図-2 応力レベルと損傷段階

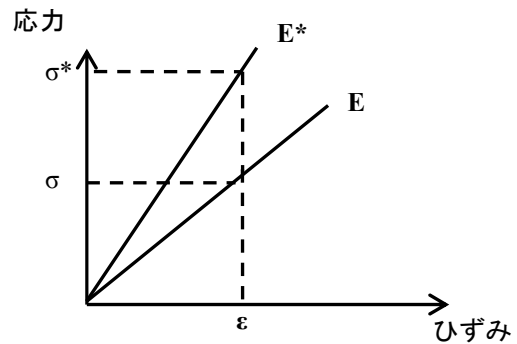


図-4 応力とひずみの関係

またはひずみに関連して累積される。スカラー損傷度の物理的概念を図-3に示す。左図は全く損傷を受けていない健全な状態の材料を示し、その断面領域を  $A^*$  とする。右図は損傷を受けている状態の材料を示し、損傷個所の空隙領域を除外した断面領域を  $A$  とする。 $A$  は空隙領域を除外しているため、損傷を受けていない状態と同様であるとみなすことができる。これらの材料に対し、作用する一軸方向の応力をそれぞれ  $\sigma^*$  (理論的全応力)、 $\sigma$  (実応力) とする。損傷を受けている空隙領域のみを考慮すると、材料の損傷を表すスカラー損傷変数  $\Omega$  は式(4)により表わすことができる。

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

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健全な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  $\Omega$  を計算することは困難である。そこで、図-4に示す、応力とひずみの関係を考察した。スカラー損傷度  $\Omega$  は式(4)に示すとおり、損傷度の定量的指標として定義されている。図-4に示すひずみ場が式(4)と同様の関係にあると仮定すれば式(5)を得ることができる。

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

ここで、 $E$  : 損傷を受けた材料の有効弾性係数,  $E^*$  : 健全な材料の弾性係数である。

本研究では、健全時の弾性係数  $E^*$  を AE データベースより推定し、 $E^*$  を用いた損傷度評価指標として耐久性係数を提案している。この背景には、一般的に建設当初の圧縮強度以外の資料は保管されておらず、調査時点において健全時の弾性係数を得ることは困難である現状がある。一連の評価論理は、DeCAT(Damage Estimation of Concrete by Acoustic Emission Technique)システムとして提案している。一軸圧縮下における弾性係数の変化(損傷パラメータ)を  $\lambda$  値とする。この  $\lambda$  値と AE レートプロセス解析より評価した  $a$  値との関係をデータベース化(図-5)し、健全時弾性係数を式(6)により評価するものである。図-5における  $\lambda'$  は損傷パラメータ  $\lambda$  と  $a'$  の和である。

$$E^* = E_c + \frac{E_c}{Y} \quad (6)$$

式(6)の  $Y$  値は AE データベースから求める評価値で、線形近似を行なった際に得られる値である。 $E_c$  は一軸圧縮試験の結果より得られる割線弾性係数である。本研究では、AE データベースより推定した  $E^*$  と一軸圧縮試験により得られる初期接線弾性係数  $E_0$  の相対比である  $E_0/E^*$  を求めることにより、建設当初からの弾性係数の低下量(損傷量)を評価することを目的にしている。この指標を耐久性係数と定義した(式(7))。

$$E' = \frac{E_0}{E^*} \times 100 \quad (7)$$

### 2.3 X線CT法

コンクリート・コア内部の空隙分布は、X線CT法により評価した。X線CT法は、計測対象にX線を照射し、トモグラフィ処理により物体の内部構造を可視化・定量評価する手法である。X線吸収率の単位は一般的に水を0、空気を-1,000としたHU(Hounsfield Unit)として定義されている。これによる透過率をCT値と呼び、CT値の定義は式(8)により評価される。

$$CT \text{ 値} = \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w} K \quad (8)$$

ここで  $\mu_t$ : 組織のX線吸収係数,  $\mu_w$ : 水のX線吸収係数である。 $K$  は任意に設定できる係数であり、本研究では1,000とした。この場合、水のCT値は0となり、空気のCT値は-1,000となる。CT値は、X線吸収係数が物質の密度に比例することから、同様の傾向を示すものと考えられる。本研究における計測条件を表-1に示す。

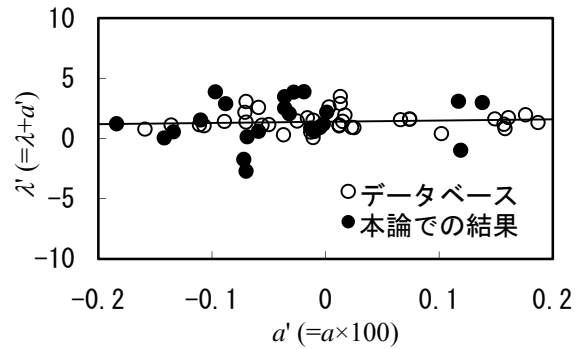


図-5 AE データベース

表-1 X線CT法による計測条件

Helical Pitch	15.0
Slice Thickness	1.0mm
Speed	7.5mm/rotation
Exposure	120kW and 300mA
Recon Matrix	512×512
Field of View	100-200mm

### 3. 実験材料

実験に用いた供試体は、コンクリート製開水路より採取したコンクリート・コアを対象とした。摩耗損傷の進行した開水路より採取した  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  の供試体を18本(図-6, 8)、凍結融解作用を受けたコンクリート製開水路から採取した  $\phi 75 \times 150 \text{ mm}$  の供試体3本(図-7, 9)を対象とした。

### 4. 実験方法

#### 4.1 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験時にAE計測を導入し、コンクリートの圧縮破壊挙動をモニタリングした(図-10)。供試体中央部分にAEセンサを接着し、載荷時のAE検出に用いた。AE計測にはSAMOS(PAC社製)を用いた。しきい値は47dBとした。供試体の裏側の中央部分にひずみゲージを縦横方向2チャンネル接着し、物性値を評価した。

#### 4.2 X線CT法

X線CT法によりコンクリート空隙分布を評価した。取得データは、CT値の観点からコンクリート損傷との関連を考察した。

### 5. 結果および考察

#### 5.1 コンクリート物性値

一軸圧縮試験の結果から初期接線弾性係数  $E_0$  と割線弾性係数  $E_c$  を評価し、それらを用いてAEデータベースより健全時の弾性係数  $E^*$  を評価した。摩耗損傷の進行した供試体では、初期接線弾性係数 22.1GPa(平均値)と

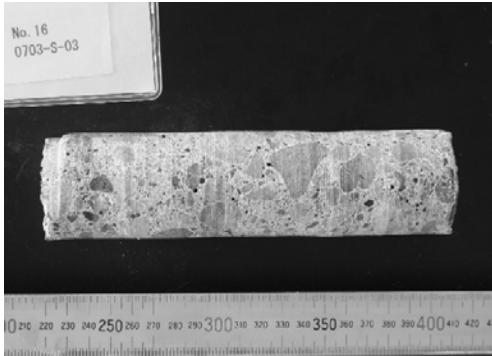


図-6 摩耗損傷供試体・可視画像

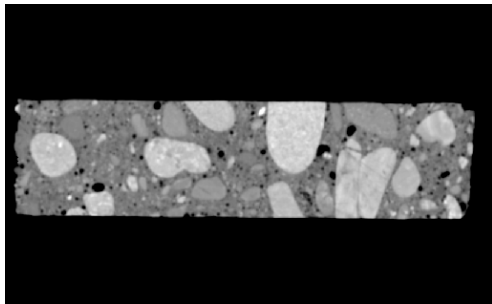


図-8 摩耗損傷供試体・X-CT 画像

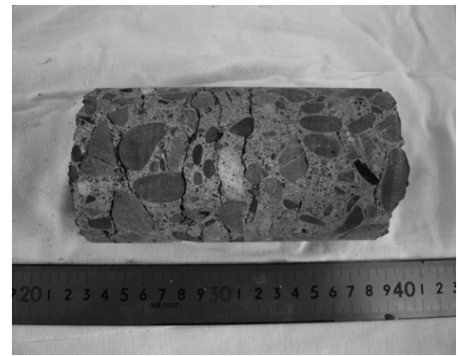


図-7 凍結融解損傷供試体・可視画像

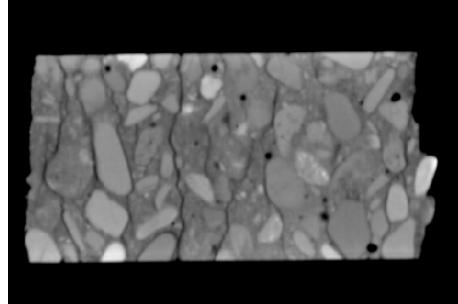


図-9 凍結融解損傷供試体・X-CT 画像

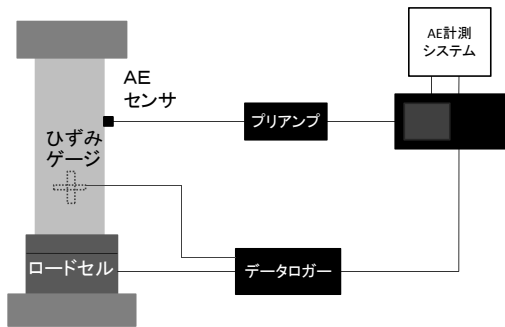


図-10 AE 計測システム

なり、凍結融解を受けた供試体（平均 10.5GPa）と比較して 2.1 倍を記録した。割線弾性係数も初期接線弾性係数とほぼ同様の傾向を示し、摩耗損傷の進行した供試体で平均 16.5GPa、凍結融解の供試体 7.4GPa であった。AE データベースより推定した健全時弾性係数は、摩耗損傷の供試体で平均 29.0GPa、凍結融解の供試体で 13.1GPa であった。供試したコンクリート・コアの物性値一覧を表-2 に示す。

## 5.2 圧縮破壊過程における AE の発生と空隙量の関係

コンクリート損傷は、内部の空隙量の影響を強く受ける。本項では、圧縮強度の類似した供試体を用いて AE 発生確率関数  $f(v)$  と応力レベル  $V$  の関係から、空隙量の相違がコンクリート破壊挙動に及ぼす影響を評価した。

検討には圧縮強度が類似し、空隙量の差が 2.94 倍ある供試体を用いた。空隙量は供試体の断面画像を二値化し、

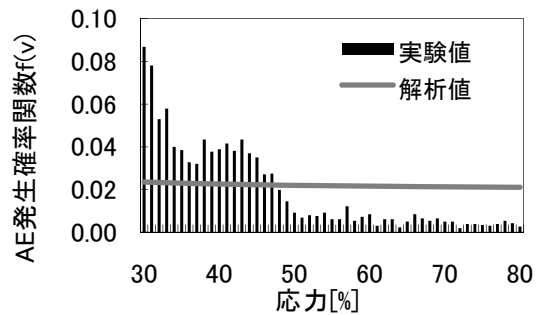


図-11 Type A の AE 発生確率関数と応力レベルの関係

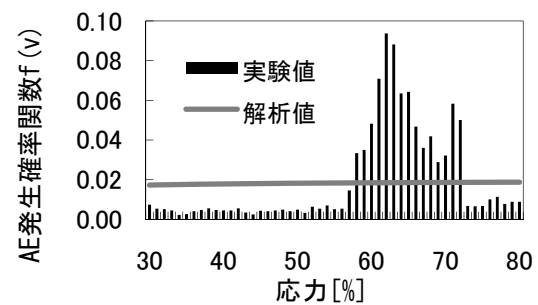


図-12 Type B の AE 発生確率関数と応力レベルの関係

空隙部の面積を求めることにより評価した。ここで空隙量の多い供試体を” Type A” とし、空隙量の少ない供試体を” Type B” とした。Type A の圧縮強度は 29.7N/mm<sup>2</sup> で Type B の圧縮強度は 30.9N/mm<sup>2</sup> であった。Type A では、荷重初期段階において AE の頻発が確認された。それに対し、Type B では応力レベル 60~70%近傍の終局時において AE の頻発が確認された。既往の研究では、健

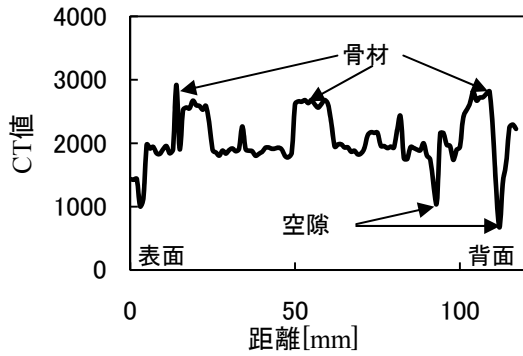


図-13 コンクリート・コアのCT値分布 (Type A)

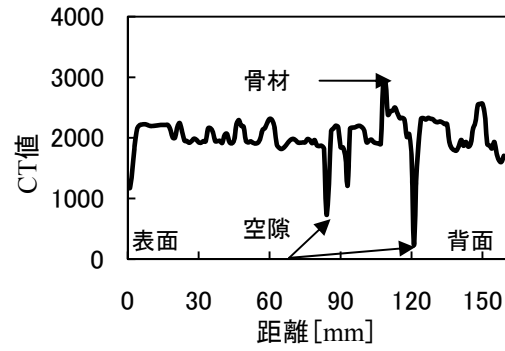


図-14 コンクリート・コアのCT値分布 (Type B)

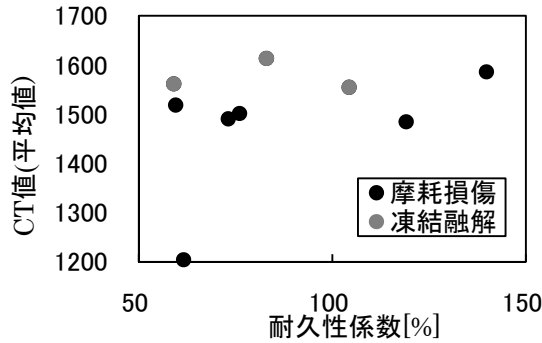


図-15 耐久性係数とCT値(平均値)の関係

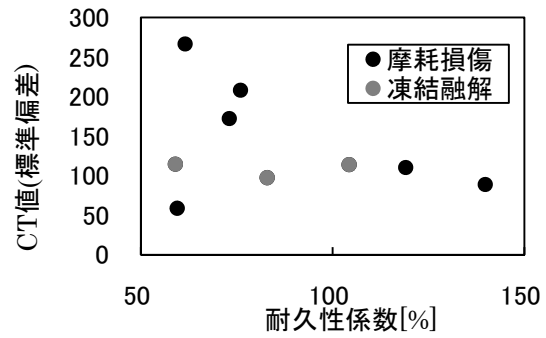


図-16 耐久性係数とCT値(標準偏差)の関係

表-2 物性値一覧<sup>(\*)</sup>

サンプル名	本数	圧縮強度[N/mm <sup>2</sup> ]	E <sub>c</sub> [GPa]	E <sub>0</sub> [GPa]	E* [GPa]	耐久性係数[%]
摩耗損傷	18	10.1-40.7(21.4)	7.0-30.6(16.5)	7.6-36.2(22.1)	12.3-53.8(29.0)	23-145(80)
凍結融解	3	5.4-26.7(13.1)	0.6-19.0(7.4)	1.1-27.7(10.5)	1.1-33.4(13.1)	59-104(82)

(\*)Min-Max (AVE)

表-3 CT値一覧

サンプル名	本数	CT値分布範囲		
		モルタル	骨材	空隙・クラック
摩耗損傷①	6	1,219-1,989	2,020-2,812	207-1,430
凍結融解②	3	1,471-1,958	1,910-2,756	1,054-1,536
①/②	-	1.58倍	0.94倍	2.54倍

全なコンクリートの AE 発生確率関数と応力レベルの関係は、応力レベルの増加に伴い AE 発生確率関数の急増が確認されている<sup>り</sup>。これらの結果から、本研究で供試したコンクリート・コアは Type A は Type B と比較して損傷が進行しているものと考えられる。構造体コンクリートでは、強度特性が類似していたとしても外部からでは確認できない微視的に発達したクラックにより損傷度の相違が生じるものと考えられる。

### 5.3 CT 値分布特性

コンクリートの破壊挙動と空隙量との関係が圧縮応力下での AE 計測結果から示唆されたことから、本論では CT 値の分布特性とコンクリート断面構造の関係を考察した。X 線 CT 法により得られる画像を 1cm 四方の格

子状に分割し、上端から下端について 1mm 毎に CT 値を評価した。

検討の結果、CT 値はモルタル部で 1,500~2,000、骨材部で 2,000~2,500、クラック・空隙部では 1,500 未満となることが確認された。CT 値分布を図-13、図-14 に示す。図-13 と図-14 の供試体は、空隙量で 2.94 倍の差 (Type A > Type B) が確認されたが、供試体の一断面の CT 値を見る限り、明確な相違はない。そこで本研究では CT 値の全断面データを用いて平均値および標準偏差を算出し、コア供試体全体での評価を試みた。その結果、コンクリートの損傷が進行した供試体では、CT 値の平均が低下するとともに、標準偏差の増加が確認された。

ここで、摩耗損傷が顕在化した供試体を 6 本、凍結融

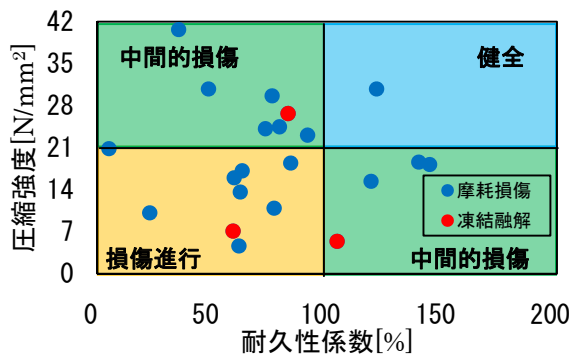


図-17 耐久性係数と圧縮強度の関係

解損傷を受けた供試体を3本選択し、各供試体のCT値の平均値、標準偏差と耐久性係数との関係を検討した。CT値の平均値と標準偏差は、部位ごとにモルタル、骨材、空隙・クラック、全要素と分けて評価した。図-15に骨材部を除いたモルタル部と空隙部におけるCT値の平均値と耐久性係数との関係を示す。図-16は同条件でCT値の標準偏差と耐久性係数との関係を示したものである。耐久性係数は一軸圧縮試験の結果から得られる初期接線弾性係数 $E_0$ と健全時弾性係数 $E^*$ (式(6))より式(7)に基づいて評価した。図-15より、摩耗損傷の供試体では耐久性係数が高く、健全と考えられる供試体ほどCT値(平均値)が増加する傾向にある。耐久性係数の低下は、クラックを含む損傷の蓄積と考えられることから、CT値の低下と連動するものと考えられる。凍結融解損傷の顕在化した供試体ではCT値が1,500~1,600を示した。

耐久性係数とCT値の標準偏差の関係に着目すると、耐久性係数が高い供試体ほど標準偏差が低下する傾向にあることが確認された(図-16)。これは、損傷している(耐久性係数が低い)コンクリートほど空隙やクラックといったCT値を変動させる要因が多く、検出値のばらつきが大きくなるためであると考えられる。

#### 5.4 耐久性係数と圧縮強度の関係をを用いた損傷度診断

本研究では、耐久性係数と圧縮強度の関係からコンクリート損傷度を評価した。評価指標は、圧縮強度の場合、 $21\text{N/mm}^2$ 以上であれば「健全」とした。これは、本研究で供試したコンクリート・コアを採取した構造物が農業用コンクリート開水路であることから、農林水産省土地改良設計基準に準拠したものである<sup>5)</sup>。耐久性係数は、100%未満を「損傷あり」とした。両指標から、圧縮強度 $21\text{N/mm}^2$ 以上かつ耐久性係数100%以上の場合、健全と評価した。圧縮強度 $21\text{N/mm}^2$ 未満かつ耐久性係数100%未満の場合、「損傷進行」と評価した。それ以外のケースは、「中間的損傷」と評価した。供試したコンクリート・コアにおける耐久性係数と圧縮強度の関係を図-17に示す。本論では、前述の通り、耐久性係数を100%、圧

縮強度は鉄筋コンクリートの標準的強度(農林水産構造物)である $21\text{N/mm}^2$ を基準値として評価した。その結果、供試体のうち、9本が損傷進行状態にあることが推定された(耐久性係数 $<100\%$ 、圧縮強度 $<21\text{N/mm}^2$ )。

#### 6. まとめ

本論では、健全時の弾性係数の推定に基づく構造体コンクリートの定量的損傷度評価について検討し、X線CT法によるクラック構造の可視化と組み合わせて、コンクリート損傷と空隙の関係を検証した。その結果、コンクリート損傷は耐久性係数を用いることにより評価可能であることが示唆された。以下に本論により明らかになった事項を列挙する。

- (1) コンクリート圧縮応力下のAE発生挙動をレートプロセス理論により評価し、構造体コンクリートの損傷度を定量的に推定可能であることが明らかとなった。圧縮破壊挙動と内部の空隙分布は密接に関係し、強度特性のみでは十分に評価できないコンクリート損傷をAE発生挙動の観点から定量的に評価できることが明らかとなった。
- (2) AEデータベースから健全時の弾性係数 $E^*$ を推定し、耐久性係数を算出した。耐久性係数は、空隙分布の影響を受けることが示唆され、CT値と密接に関連していることが明らかとなった。
- (3) クラックの発達したコンクリートの損傷度評価には、耐久性係数とCT値の関係から定量化を試みるものが有効であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 鈴木哲也, 米野現樹, 池田幸史, 大津政康: コア・コンクリートのAEレートプロセス解析に基づく損傷度評価に関する研究, 土木学会論文集, Vol.62, No.1, pp.95-106(2006)
- 2) 鈴木哲也, 池田幸史, 米野現樹, 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, Vol.26, No.1, pp.1791-1796(2004)
- 3) 天明敏行, 伊藤剛, 濱崎大志, 尾原祐三: X線CT法を用いたコンクリート材料構成定量化法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.739-744(2008)
- 4) 奥津広太ほか: X線CT法を用いた損傷コンクリートの空隙構造の可視化, 農業農村工学会大会講演会要旨集, pp.526-527(2009)
- 5) 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)