

X線CTの空間統計処理に基づく損傷コンクリートの特性評価

山岸俊太郎*・鈴木哲也・森井俊広

(平成26年8月10日受付)

要約

近年、コンクリート構造物では各種環境要因により損傷が進行している。既存の構造物を維持管理する上で材料損傷の定量的評価は不可欠である。本論では、コンクリートの損傷度をX線CT画像の特性量と力学特性の観点から考察する。実験では、X線CT計測とAE (Acoustic Emission) 法を用いた圧縮強度試験を実施し、コンクリート損傷を圧縮破壊時に発生する弾性波より評価した。検討の結果、力学特性の低下特性をCT値とAEの関係より評価することが可能であり、損傷の進行とCT値の低下が密接に関係していることが明らかとなった。

新大農研報, 67(1):79-84, 2014

キーワード: X線CT法、コンクリート、ひび割れ、AE (Acoustic Emission)、圧縮強度試験

はじめに

農業水利施設は各種環境要因により損傷が顕在化する。特に、農業用水路は部材厚が薄く、表面積が大きいものが多い。このため、既存施設ではひび割れを中心とするコンクリート損傷が発達している。近年、コンクリート損傷の可視化や定量的評価を目的にX線を適用した研究が進められている。武田ら(2006)はコンクリート内部のひび割れや空隙をX線造影撮影より同定し、コンクリート強度の推定に用いている。池田ら(2011)や橋本ら(2013)の報告では、X線CT法による3次元立体画像からコンクリート内部の空隙構造や空間特性の可視化および定量化が試みられ、その適用性が確認されている。X線CT法は、材料内部の空隙やひび割れ損傷を可視化するとともに、X線吸収率をCT値として抽出することができる。CT値を用いることにより材料の密度分布の定量的評価が可能である。天明ら(2008, 2010)の実験的検討では、コンクリートの材料構成や硬化コンクリートの特性とX線CT画像との比較検証が試みられ、その有効性が確認されている。一連の研究結果より、コンクリート損傷の詳細評価には、X線CT画像によりひび割れ損傷を可視化し、コンクリートの破壊過程との関連を明らかにすることが不可欠であると推察される。本論では、既存の農業用水路より採取したコンクリート・コアを対象に、X線CT計測と(Acoustic Emission)法を組み合わせて、CT値の分布特性と力学的特性の関係を考察した結果を述べる。

解析手法

1. AE発生挙動の定式化

コンクリートの圧縮強度試験においてAEの発生挙動は、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、主破壊に至る。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、あるひずみ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、確率過程論における定式化が可能である(鈴木ら, 2004)。

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、損傷度の定量化のために以下の指数関数曲線を仮定する。

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

ここで α 、 β は定数である。

式(2)において、 β 値は応力レベル ε でのAE発生頻度を反映し、載荷初期段階のAE発生確率により、その正負が決定する。 β 値が正の場合、AE発生確率密度関数 $f(\varepsilon)$ は載荷初期段階の低ひずみレベルで低いことを意味し、コンクリートが無損傷であると評価することができる。 β 値が負の場合、AE発生確率密度関数 $f(\varepsilon)$ は低ひずみレベルで高いことを意味し、材料が損傷した状態であると評価できる(図1)。

2. 損傷パラメータの導出

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 Ω が用いられ、弾性係数の相対値として以下の式より定義されている。

$$\Omega = 1 - \frac{E}{E^*} \quad (3)$$

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。

Loland (1980) は、損傷変数である Ω と圧縮応力下でのひずみ ε の関係を式(4)として定義した。

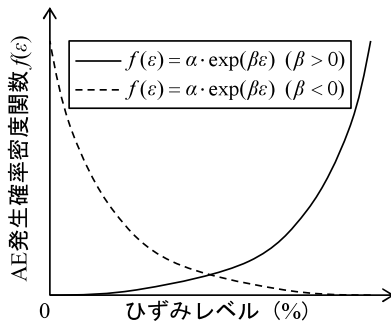


図1 AE発生確率関数 $f(\epsilon)$ とひずみレベル

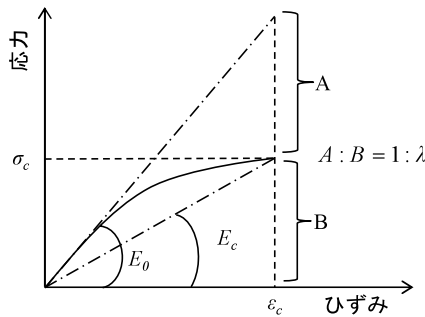


図2 応力-ひずみの関係

$$\Omega = \Omega_0 + A_0 \epsilon^\lambda \quad (4)$$

ここで、 Ω_0 ：初期損傷度、 A_0 、 λ ：材料定数である。損傷パラメータ λ は、初期接線弾性係数 E_0 と割線弾性係数 E_c の関係から導出される(図2)。

$$\lambda = \frac{E_c}{E_0 - E_c} \quad (5)$$

3. コンクリートの損傷度評価指標

コンクリートの損傷度評価指標には、圧縮強度試験より導出した λ と β の関係から評価している。 λ は式(5)より定義され、初期接線弾性係数 E_0 と割線弾性係数 E_c の関係式より導出される。コンクリート標準示方書において提案されている応力-ひずみ曲線では $\lambda = 1.0$ となることが確認されている。 λ は、初期接線弾性係数と割線弾性係数の差分($E_0 - E_c$)が低下することにより評価値が増加する。 β は式(2)のAE発生挙動とひずみレベルの関係式から導出される評価値であり、コンクリート損傷の進行に伴って β は低下する。本研究では、破壊試験より得られる損傷度評価指標と非破壊試験より得られるCT値の関係からコンクリート損傷を評価した。

実験方法

1. X線CT法

コンクリート・コア内部のひび割れ損傷は、X線CT法により可視化した。X線CT法とは、X線を評価対象に透過し信号に変換することによって、可視画像化し評価を行う手法である。物体の密度の違いからX線吸収率の異なることを利用して、X

表1 X線CT計測の撮影条件

ヘリカルピッチ	15.0
スライス厚	0.5 mm
速度	7.5 mm/rotation
照射線量	120kW and 210 mA
再構成マトリックス	512 × 512 pixel
有効視野	100-200mm

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(6)により評価される。

$$CT値 = \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w} K \quad (6)$$

ここで、 μ_t ：求める点のX線吸収係数、 μ_w ：水のX線吸収係数、 K ：人体や骨材などを撮影する場合である通常値の1,000に設定した。計測条件を表1に示す。X線CTスキャナの解像度は解析範囲 $\phi 104$ mmに対して 512×512 pixelである。このため、各ピクセルの一边の長さは0.2 mmとなる。X線CT画像の各ピクセルのCT値は、スライス厚(0.5 mm)を考慮した $0.2 \times 0.2 \times 0.5$ mmのボクセルにより与えられる。

2. 圧縮強度試験

本研究では、圧縮強度試験にAE計測を導入し、圧縮破壊過程に発生するAEを検出した。計測装置はSAMOSである。計測では、ロードセルの上にコンクリート・コアを設置し、コア側面部にはひずみゲージおよびAEセンサを設置して行った。ロードセルおよびひずみゲージのサンプリング周波数は10 Hzである。AE計測では、しきい値を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センサは150 kHz共振型センサを用いた。実験の概要図を図3に示す。

3. 供試体

検討に用いた供試体は、農業水利施設より採取した30本のコンクリート・コアである。本論では、ひび割れ損傷の進行に伴い供試体をType A、Type B、Type Cの3種類に分類し検討を行った。Type Aはコンクリート・コア全域に層状ひび割れが確認されたサンプルであり、Type Bはコア上層部のみにひび割れ損傷が顕在化したサンプルである。Type Cは目視によりひび割れ損傷が確認されなかったコンクリート・コアである。

結果および考察

1. コアサンプルの力学特性

コンクリート・コアの力学特性を表2に示す。圧縮強度の平均値はType Aで 5.7 N/mm^2 、Type Bで 3.8 N/mm^2 、Type Cで 22.0 N/mm^2 であった。Type AはType Cの25.9%であり、Type Cは17.3%の圧縮強度であった。圧縮強度においてはひび割れ損傷が顕在化したType AとType Bにおいて極度に低下していることが明らかになった。最大ひずみでは、Type Aで $3,304 \mu$ 、Type Bで $1,060 \mu$ 、Type Cで 870μ であり、圧縮強度とは異なる傾向であった。最大ひずみの標準偏差を考慮し

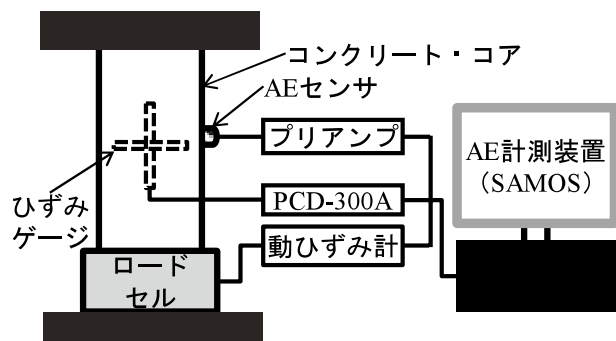


図3 圧縮強度試験の概要図

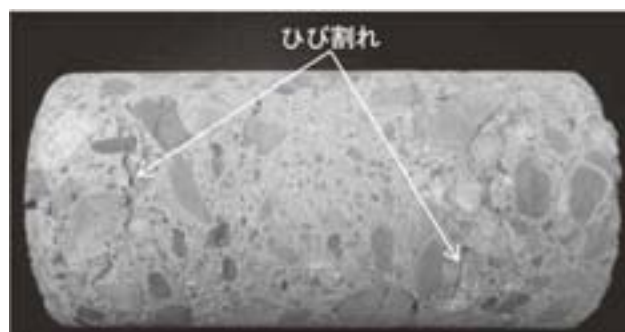


図4 凍害損傷を受けたコンクリート・コア

表2 コンクリート・コアの力学特性

サンプル名	最大応力 (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)	λ	α	β	サンプルサイズ
Type A	5.7 [2.3]	3,304 [452]	2.7 [2.3]	1.5 [0.9]	2.58 [1.41]	0.015 [0.015]	0.012 [0.020]	4
Type B	3.8 [-]	1,060 [-]	5.6 [-]	4.2 [-]	3.00 [-]	0.020 [-]	0.000 [-]	1
Type C	22.0 [6.6]	870 [417]	40.2 [17.8]	27.8 [11.9]	2.72 [1.12]	0.061 [0.124]	-0.006 [0.026]	25

※数値は平均値 [標準偏差] を示す。

表3 CT値の推計統計量

サンプルタイプ	平均	標準偏差	変動係数	範囲	最小	最大	サンプルサイズ
Type A	1,961	466	0.238	4,416	-934	3,482	20,416
Type B	2,011	296	0.147	4,072	-783	3,289	23,744
Type C	1,988	370	0.186	4,895	-992	3,903	40,494

でも Type B および Type C (標準偏差: 417 μ) は低ひずみで圧壊しているものと示唆される。

応力-ひずみ曲線より導出される損傷パラメータ λ では、Type A で 2.58、Type B で 3.00、Type C で 2.72 であった。コンクリート標準示方書 [設計編] の応力-ひずみ曲線では、 $\lambda = 1.0$ となる。各サンプルの平均値は、いずれも 1.0 以上であり、Type C においても応力-ひずみ挙動の変質が確認された。AE 発生挙動より導出した β の平均値では、Type A で 0.012、Type B で 0.000、Type C で -0.006 となった。各サンプルとも β 値は 0.000 近傍に集中していることが確認された。本論では、次節において各サンプルの X 線 CT 計測について検討し、コンクリートの損傷度評価指標である λ および β との関係について考察した。

2. CT 値の分布特性

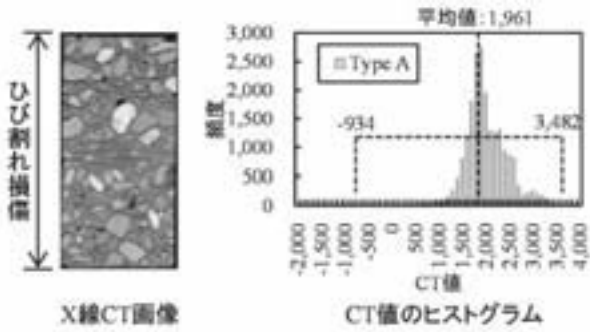
X 線 CT 画像より CT 値を抽出し、各サンプルタイプの分布特性を評価した。表 3 は X 線 CT 画像より抽出した CT 値の推計統計量である。CT 値の平均値は Type A で 1,961 となり、Type B (平均値: 2,011) の 97.5%、Type C (平均値: 1,988)

の 98.6% であった。ひび割れ損傷がコア全域に発達した Type A では、他のサンプルタイプと比較して平均値が低下していることが確認された。CT 値の標準偏差は Type A で 466、Type B で 296、Type C で 370 となった。ばらつき観点においても Type A は他のサンプルタイプと異なり、標準偏差は 1.3~1.6 倍大きいことが確認された。このことから、ひび割れ損傷により CT 値のばらつきが他のサンプルと比較して大きいものと推察された。

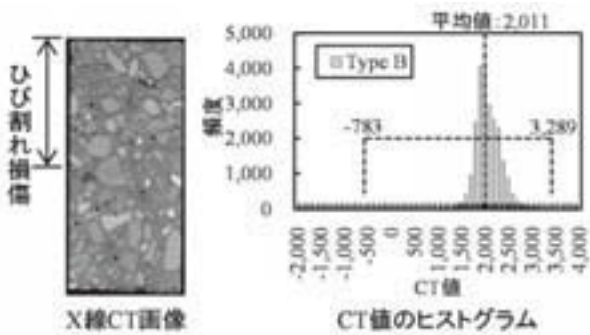
図 5 は、供試したコンクリート・コアの X 線 CT 画像と CT 値の頻度分布である。頻度分布には、最小値、最大値および平均値を明記した。同図より、各サンプルタイプの分布は、平均値近傍の頻度が高く、分布形状は類似していることが確認された。CT 値の分布特性はモルタルや粗骨材の分布に強く起因し、ひび割れや空隙の影響は低いものと推察される。

3. コンクリートの損傷度評価指標と CT 値の関係

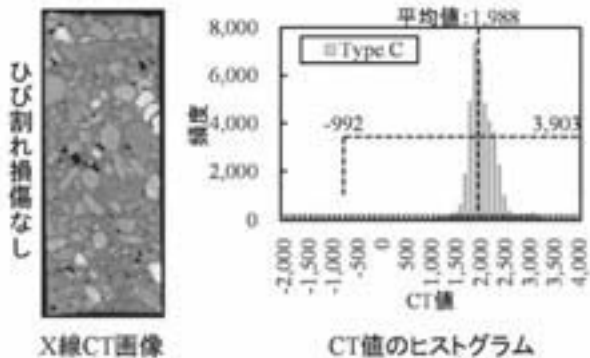
本論では、コンクリートの損傷度を力学的特性と CT 値の推定統計量との関係を考察した。図 6 は、損傷度評価指標に CT 値の平均値のデータをプロットしたものである。同図から、ひ



(a) Type A



(b) Type B



(c) Type C

図 5 CT 値の分布特性

び割れ損傷が確認された Type A および Type B は β -0.02 ~ 0.04 の範囲に分布し、 λ は 0 ~ 5 の広範囲に分布していることが確認された。本論では、CT 値の平均値と損傷度との関係を空間的な物性データとして可視化するために空間統計学手法であるクリギング (Kriging) (Wackernagel, 2004) を用いて点的データの拡張を試みた。検討の結果を図 7 に示す。同図から λ の増加と β の低下に伴って CT 値が低下する傾向にあり、 β 0.00 近傍で λ 3 ~ 4 の範囲において局所的に低下していることが確認された。以上のことから、コンクリート損傷と CT 値の推計統計量とが密接に関係していることが明らかになった。

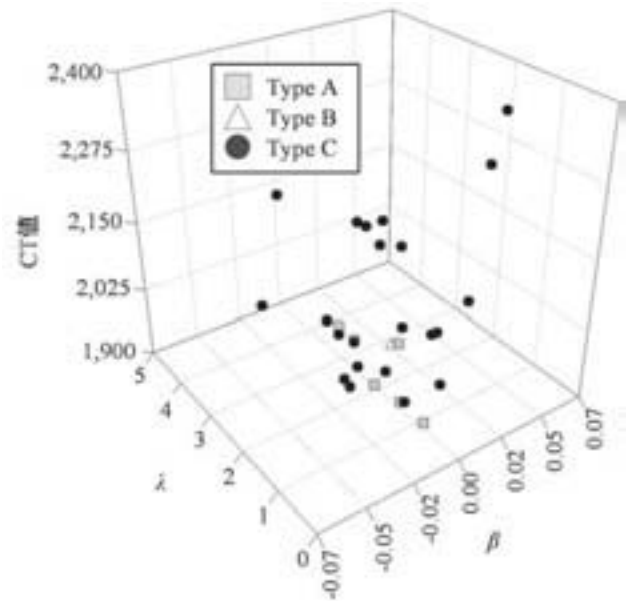


図 6 損傷度評価指標と CT 値の関係

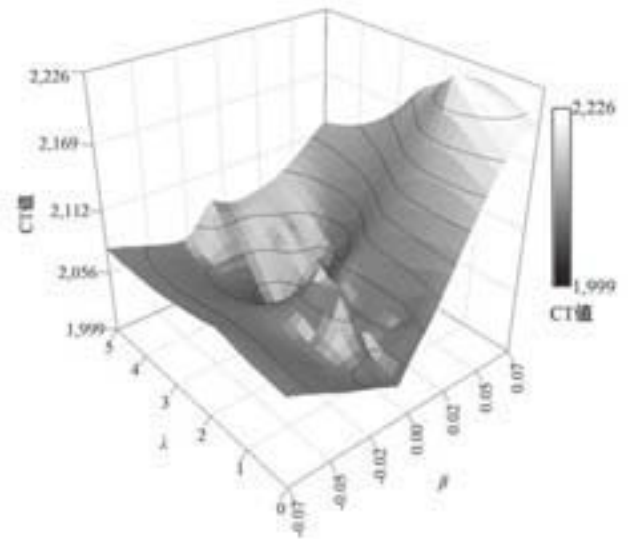


図 7 クリギング処理によるデータ補完

おわりに

本研究では、既存の農業水利施設より採取したコンクリート・コアを用いて、X 線 CT 計測と AE 計測を伴う圧縮強度試験を実施し、コンクリート損傷を CT 値と力学的特性の両観点から評価した。検討結果を以下に列挙する。

- (1) 凍害によりひび割れ損傷が顕在化したコンクリート・コアでは、圧縮強度の低下が確認された。圧縮強度はひび割れ損傷が顕在化していないサンプルの 16.3 ~ 24.5% であることが確認された

- (2) X線CT画像のからCT値を抽出し、分布特性を頻度分布と推計統計量から検討した。各サンプルの平均値の差は2.5%以下であり、明確な相違は確認されなかった。
- (3) コンクリートのX線CT計測と圧縮強度試験の両試験から損傷度の分布特性を評価した結果、損傷の進行とCT値の低下が密接に関係していることが確認された。

参考文献

a) 雑誌

- Loland, K. E. 1980. Continuous Damage Model for Load - Response Estimation of Concrete, Cement and Concrete Research. Vol.10. pp. 385-402.
- 橋本勝文, 横田弘, 杉本隆文, 吉川昂純. 2013. 凍結融解作用を受けたモルタルのX線CT撮影による空隙構造評価. 材料. Vol.62. No.8. pp.492-497.
- 池田隆徳, 濱田秀則, 佐川康貴, 多田昂平. 2011. 鉄筋周囲に形成される空隙のX線CTスキャナによる定量評価. コンクリート工学年次論文集. Vol.33. No.1. pp. 1085-1090.

鈴木哲也, 池田幸史, 友田祐一, 大津政康. 2004. 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.

武田三弘, 大塚浩司. 2006. X線造影撮影によるコンクリート強度の推定. 土木学会論文集 E. Vol.62. 376-384.

天明敏行, 伊藤剛, 濱崎大志, 尾原祐三. 2008. X線CT法を用いたコンクリートの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.

天明敏行, 尾原祐三, 堤知明, 村上祐治. 2010. X線CT法による硬化コンクリートの特性評価. コンクリート工学年次論文集. Vol.32. No.1. pp. 545-550.

b) 単行本

Hans Wackernagel 著, 青木謙治監訳. 2004. 地球統計学. 森北出版株式会社. pp.8-121.

社団法人 土木学会. 2012. 2012年度制定 コンクリート標準示方書 [設計編:本編]. pp.172-173.

Characteristics Evaluation of Damaged Concrete using X-ray CT with Spatial Statistics Analysis

Shuntaro YAMAGISHI^{1*}, Tetsuya SUZUKI² and Toshihiro MORII²

(Received July 10, 2014)

Summary

In recent years, a large number of concrete structures were damaged by environmental effects. Maintenance of concrete structures, damage evaluation is now in agent demand. In this study, damaged concrete samples were examined based on the mechanical properties and X-ray CT images. In the experiments, concrete damage was evaluated by X-ray CT and acoustic emission (AE). Then, concrete damage is evaluated based on AE parameters due to fracture under compression. It is demonstrated that the decrease in mechanical parameters could be evaluated by comparing CT number and AE rate. A relation between AE and damage parameter is correlated.

Bull.Facul.Agric.Niigata Univ., 67(1):79-84, 2014

Key words : X-ray computed tomography, Concrete, Crack, Acoustic emission, Compression test

¹ Graduate School of Science and Technology, Niigata University

² Faculty of Agriculture, Niigata University