

X線CT画像解析に基づくコンクリートの損傷パラメータ推定に関する研究

Estimation of Concrete Damage using X-ray CT Image Analysis

鈴木哲也*
Tetsuya SUZUKI

1 はじめに

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する。既存の構造物を適切に維持管理するためには、材料損傷の定量的評価は不可欠である。

本報では、コンクリートの損傷度をX線CT画像より抽出したCT値と力学特性の観点から考察する。

2 解析方法

2.1 損傷パラメータλの導出 損傷パラメータλは応力-ひずみ曲線の初期接線弾性係数E₀と割線弾性係数E_cの関係 (Fig.1) より導出され、式(1)より定義されている。

$$\lambda = \frac{E_c}{E_0 - E_c} \tag{1}$$

2.2 AE発生挙動のモデル化 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発生確率関数をf(ε)とすると、εからε+deへのひずみ量の増分に対し、以下の式(2)を導くことができる。

$$f(\epsilon) d\epsilon = \frac{dN}{N} \tag{2}$$

AE発生確率密度関数f(ε)に対して、次のような指数関数曲線を仮定する。

$$f(\epsilon) = \alpha \cdot \exp(\beta\epsilon) \tag{3}$$

ここで、αとβは定数である。式(3)でβはひずみレベルεでのAE発生頻度を反映し、βの正負によりAEの発生確率が異なるモデルになっている (Fig.2)。βが正ならば、ひずみレベルの低い段階でAE発生確率密度関数が低いことを意味し、コンクリート材料が無損傷であると評価できる。β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。

3 実験方法

3.1 X線CT計測 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(4)により評価される¹⁾。

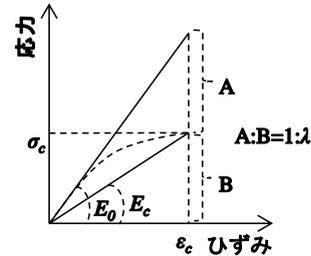


Fig.1 応力-ひずみの関係

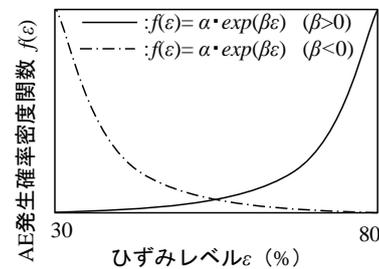


Fig.2 AE発生確率密度関数とひずみレベルの関係

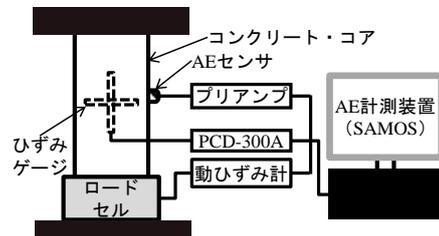


Fig.3 圧縮強度試験の概要図

$$CT値 = \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w} K \tag{4}$$

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。X線CTスキャナの解像度は解析範囲φ104mmに対して512×512pixelである。このため、各ピクセルの一边の長さは0.2mmとなる。X線CT画像の各ピクセルのCT値は、スライス厚(0.5mm)を考慮した0.2×0.2×0.5mmのボクセルにより与えられる。

3.2 圧縮強度試験 実験はAE計測を導入した圧縮強度試験を実施し、供試体の破壊過程に発生するAEを検出した (Fig.3)。計測装置はSAMOS (PAC社製)である。計測は供試体の側面部にひずみゲージおよびAE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。

3.3 供試体 実験に用いた供試体は、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。本報では、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。

4 結果および考察

4.1 コアサンプルの力学特性

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。Type B および Type C は低ひずみで破壊しているものと示唆される。

4.2 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。Fig.4 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。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の低下が確認された。

4.3 コンクリートの損傷度評価指標と CT 値の関係

本報では、コンクリートの損傷度を力学的特性と CT 値との関係を考察した。Fig.5 は、損傷度評価指標と CT 値の平均値のデータを用いて空間統計学手法であるクリギング (Kriging) ²⁾ より、点的データを空間的な物性データへの拡張を試みた。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 の範囲において局部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。

5 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

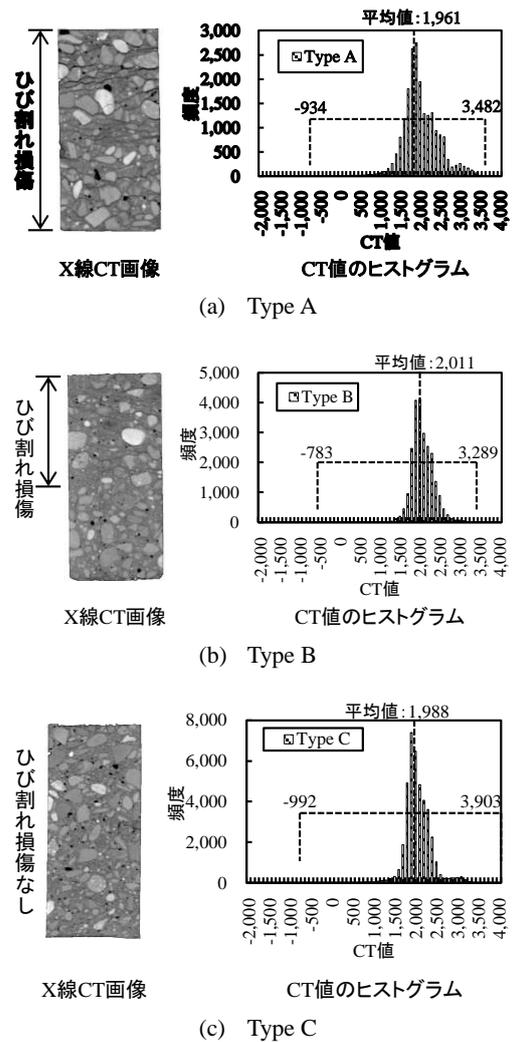


Fig.4 CT 値の分布特性

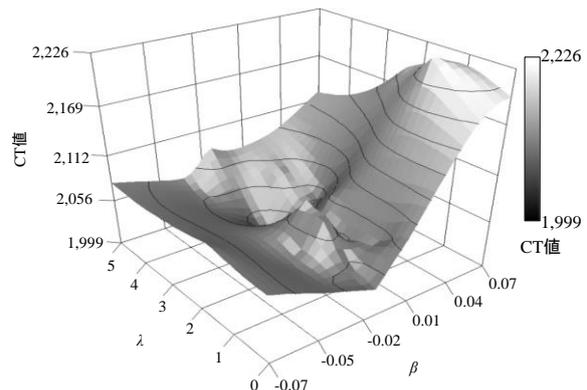


Fig.5 損傷度評価指標と CT 値の関係

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 1) 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, 2008., 2) Hans Wackernagel: 地球統計学, 森北出版株式会社, 2004.