

Ⅲ - A285

X線CTによる岩石の亀裂幅の定量的評価

熊本大学工学部環境システム工学科
同上

正会員 尾原祐三
正会員 菅原勝彦

1. 緒言

X線CTは、Hounsfield(1972)により開発され、医療検査の分野で発展した技術である。本研究の主題は、X線CTの岩石への応用技術の開発であり、平成8年に設備購入した東芝製TOSCANER-23200（図1）をベースとして、画像解析のノウハウを蓄積し、地盤工学の多くの場面で利用できるツールを構築しようと考えている。

X線技術はすでに多くの工業分野に応用されている。地盤関係では、Kirkpatrick et al.(1968)以来、砂の破壊の非破壊調査にしばしば利用された。X線CTの最初の論文としては、Arthur(1971)が挙げられる。最近の研究としては、Verheist et al.(1995)による圧裂試験片の亀裂観察への応用などが挙げられる。我が国では、最近、いくつかの地盤関連研究機関にX線CTが導入され、その応用研究が緒についた段階であると思われる。

2. X線CTの原理

断層画像の再構成に利用されるX線の吸収は1次元状態において式(1)に従う。式中の i は物体通過後のX線強度、 i_0 はX線源の強度、 r はX線源から検出器に向かう方向の距離、 f はX線吸収係数である。X線のエネルギーレベルが一定であれば、X線吸収係数 f は物体の密度に正比例する。式(1)の対数をとって、投影(projection)が式(2)で定義され、互いに独立な多数の方向の投影を計測して、フィルター補正逆投影法(Takagi and Shimoda(1991))によりX線吸収係数 f の断層画像が再構成される。図2のような3次元画像は断層画像を積み重ねて構築される。

$$i = i_0 \cdot \exp \left\{ - \int f dr \right\} \quad (1)$$

$$p = -\log \{ i / i_0 \} = \int f dr \quad (2)$$

3. TOSCANER-23200の構成

X線管(300kV/2mA)と176個の検出器は、同一水平面上に固定され、上下に移動する。一方、試験片はターンテーブルの上に設置され、必要な並進と回転を行う。回転軸は鉛直。断層の厚さは視準儀(collimator)により、0.5mm, 1mm, 2mmの3通りに可変。したがって、得られるX線吸収係数はこの厚さの平均値である。撮影領域は15cmx15cmと40cmx40cmの2通りが選択できるが、表示画素数はどちらの場合も512x512である。したがって、画素の辺長は撮影領域15cmx15cmの場合に0.293mm、撮影領域40cmx40cmの場合に0.781mmである。

画像データは、Hounsfield scaleに従い、画素ごとのCT値で与えられる。CT値は水が0、空気が-1000であり、物体の密度にほぼ比例する。

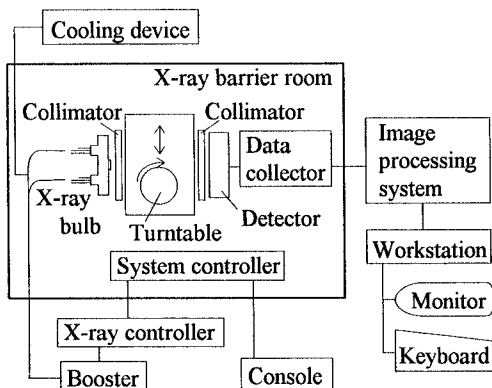


図1 TOSCANER-23200の構成

図2 琉球石灰岩の3次元画像
(1軸圧縮試験後の円柱試験片、直径19.3cm)

キーワード：トモグラフィー、X線、画像解析、亀裂、亀裂開口量
〒860 熊本市黒髪2丁目39-1 TEL & FAX 096-342-3685

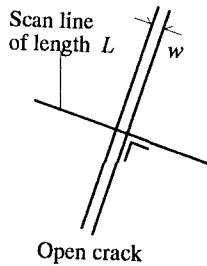


図3 スキャンラインと亀裂の関係

$$CT_{average} \cdot L = CT_{solid} \cdot (L - w) + CT_{air} \cdot w \quad (3)$$

$$w = L \cdot \{CT_{solid} - CT_{average} \} / \{1000 + CT_{solid}\} \quad (4)$$

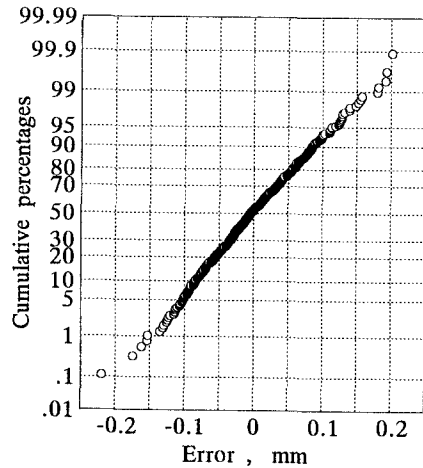


図4 スキャンライン法の誤差分布
(模擬亀裂実験による)

4. スキャンライン法による亀裂の開口量評価

X線CTを岩石に適用するとき、岩石固有の各種のHeterogeneityをどこまで分解できるか、分解精度が問題になる。とくに、破壊に関連する研究では、亀裂の可視化と幾何学的パラメータの測定が不可欠である。そこで、開口亀裂を例にとり、開口量測定に関して、スキャンライン法の適応性を模擬亀裂実験により調査した。

スキャンライン法では、図3に示すように、スキャンラインは亀裂に直交する方向に設定され、基礎式は式(4)で与えられる。これは、式(2)から導かれる関係式(3)を解いて与えられる。式中の L はスキャンラインの長さ、 w は亀裂の開口量、 $CT_{average}$ はスキャンライン上のCT値の平均、 CT_{solid} はスキャンライン上の固体部分の平均CT値、 CT_{air} は開口亀裂内の空気CT値 $=-1000$ である。

基礎式(4)の適応性を調査するための模擬亀裂は2枚のアルミニウムプレートに所定の開きを与えた平行亀裂であり、開口量は0.090mm, 0.180mm, 0.27mm, 0.35mmの4ケースである。各ケースに、 $L=20$ mmのスキャンライン法を各110回、合計440回適用して、測定誤差を解析した。ただし、断層の厚さ:2mm、撮影領域:15cmx15cm。

測定誤差を正規確率紙上にプロットすると、図4のようである。式(4)による測定誤差は見事に正規分布に従い、標準偏差は約0.073mm、95%信頼区間は ± 0.144 mmである。後者は画素の辺長0.293mmの約1/2である。したがって、スキャンライン法は画素よりも幅の広い亀裂に有効であると結論できる。

5. 結 言

X線CTデータによる亀裂幅の定量に絞って報告したが、最後に、スキャンライン法の精度はスタックによって容易に改良されることを指摘する。スキャンラインを亀裂に平行に移動させて開口量 w を繰り返して求め、平均開口量 $\bar{w}$ を決定する2次元評価法が有効である。その精度は図4から確率論的に推定できる。たとえば、領域を20mmx20mmにとると、 $L=20$ mm、スタック数 $n=20$ mm/0.293mm $=68=8.2^2$ 。したがって、95%信頼区間は ± 0.144 mm/8.2 $=\pm 0.0176$ mmに減少する。この試算は、開口量がわずかであっても、連続性のある亀裂については、開口量の平均値評価が可能であることを証明している。

参考文献

- Arthur, J.R.E. (1971): New techniques to measure new parameters, Proc. of Roscoe Material Symp. on stress-strain behaviour of soils, G. T. Foulis, Cambridge, pp.340-346.
- Hounsfield, G.N. (1972): A method of and apparatus for examination of a body by radiation such as X- or Gamma-Radiation, London, British Patent No.1283915.
- Kirkpatrick, W.M. and D.J. Belshaw (1968): On the interpretation of the triaxial test, Geotechnique, 18, 3, pp.336-350.
- Takagi, M. and H. Shimoda (1991): Handbook of Image Analysis, Tokyo Univ. Pub., pp.356-371.
- Verhelst, F., A. Vervoort, PH. de Bosscher and G. Marchal (1995): X-ray computerized tomography, Determination of heterogeneities in rock samples, Proc. of 8th ISRM Cong., Tokyo, 1, pp.105-108.