



X線CTによる亀裂開口解析*

菅原勝彦¹ 小島隆輔² 尾原祐三¹
佐藤晃⁴ 島田英樹⁵

Crack Opening Analysis by means of the X-Rays CT

by Katsuhiko SUGAWARA¹, Ryusuke KOJIMA², Yuzo OBARA¹
Akira SATO¹ and Hideki SHIMADA³

1. Faculty of Engineering, Kumamoto University, Kurokami, Kumamoto 860-8555
2. Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University
3. Faculty of Engineering, Kyushu University

Crack Projection Method has been proposed for the crack opening measurement of rocks, using the 3-dimensional data of the linear absorption coefficient given by the X-rays Computerized Tomography. This is a promising method to measure the crack opening from the X-rays projection normal to the crack surface. The fundamental formulae for the crack opening measurement have been firstly described as well as the necessary regional averaging technique and the data processing for measurement of accuracy to micron meters, and subsequently the crack model experiments using a couple of half-moon aluminum plates has been conducted to examine the accuracy and reliability of the method.

As a case example of the Crack Projection Method, the Short Rod testing has been presented and discussed, that is a suggested testing method of the International Society for Rock Mechanics for determining the fracture toughness of rock. Crack growth characteristics with pull-loading has been described by showing the 2-dimensional images of the X-rays Computerized Tomography. The permanent opening displacement of the extended crack has been successfully examined by the subtraction of the crack opening profiles measured before and after the Short Rod testing, and the elastic opening of the extended crack has been also examined by analyzing the change of the crack opening profile by reloading. Moreover, the dimension of the fracture process zone has been estimated as well as the permanent strain in this zone.

KEY WORDS : Rock, Crack, Crack Opening, Crack Projection Method, X-rays Computerized Tomography, Short Rod Testing

1. 緒 言

X線CT¹⁾は医療検査の分野で発展した技術である。通常のX線写真はX線が進んだ経路全体でのX線吸収の様子を写真の濃淡として表示しており、いわば影絵である。これに対して、X線CTでは、さまざまな方向から影絵を測定し、計算機でデジタル処理を施すことにより、人体内部を可視化したといえる。X線CTを岩石に適用した初期の研究としては、Arthur²⁾の論文があげられる。また、最近の研究としては、Verhelstら³⁾による圧裂試験への応用研究、中野ら⁴⁾による内部構造観察、菅原ら⁵⁾⁶⁾による透水現象の可視化などがあげられる。これらの研究によると、X線CTは、岩石の内部構造、空隙構造、亀裂構造な

どの可視化、構成粒子、粒界、空隙、亀裂、破壊面などに関する幾何学パラメータの測定、透水現象のような過渡現象の可視化、破壊に先立つひずみの局所化の分析など、多様なニーズに対して極めて高い将来性を有する非破壊試験法であると考えられる。

しかし、X線CTの岩石への応用研究が最近に活発化しつつあるとはいえ、岩石に特有な不均質構造の分析に不可欠な鮮鋭化などの画像処理技術、画像データから亀裂の長さや幅などの幾何学パラメータを評価するためのデータ処理技術などは未だ十分に完備されていないのが現状である。そこで、本論文では、亀裂問題を取り上げ、X線の線吸収係数(CT値)の3次元データを用いて、亀裂の開口幅を求めるためのデータ処理技術について検討する。具体的には、亀裂投影法(CPM: Crack Projection Method)により開口幅を数 μm の精度で測定する方法について検討する。なお、CT値の3次元データを得る代表的な方法としては、亀裂面に垂直な断層撮影のデータをつなぎ合わせる方法と、亀裂面に平行な断層撮影のデータをつなぎ合わせる方法とがあるが、本論文では、前者の3次元データを用いる場合について述べる。

本論文では、まず、X線CTの原理および本研究に用いた実験システムについて概説する。つぎに、亀裂投影法の原理を示し、

* 1998年7月15日受付 9月21日受理

1. 正会員 工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科
2. 正会員 熊本大学大学院修士課程 材料開発工学専攻
3. 正会員 工博 熊本大学助手 工学部環境システム工学科
4. 正会員 工博 九州大学助教授 工学研究科地球資源システム工学専攻
〔著者連絡先〕 TEL & FAX 096-342-3685 (熊本大学・環境システム)
E-mail : sugawara@gpo.kumamoto-u.ac.jp

キーワード: 岩盤, 亀裂, 亀裂開口, 亀裂投影法, X線CT, SR 試験

基礎式を誘導する。また、投影解析に必要な領域設定法およびデータ処理方法を明らかにし、実際問題に適用する場合の問題点について検討する。つぎに、アルミ製の半月板を用いた亀裂モデル実験により亀裂投影法の測定精度を具体的に分析する。その後で、岩石のSR試験⁷⁾(Short Rod Testing)への適用例を示し、岩石に特有の先の微亀裂や空隙などの欠陥と媒質の不均質性に対処するための差分評価法について検討する。

2. X線CTの原理および実験システム

均質・等方な媒質からなる長さPの物体に強度*i*₀のX線ビームが入射したとき、透過X線の強度*i*は、

$$i = i_0 \exp \{-f_m P\} \dots\dots\dots (1)$$

与えられ、投影*p* (*i*₀と*i*の比の対数)は次式で定義される。

$$p = -\ln \{i_0/i\} = f_m P \dots\dots\dots (2)$$

ここで、*f_m*はX線の波長、媒質の密度と状態に依存する物質固有の線吸収係数(Linear absorption coefficient)であり、X線が単色の場合、*f_m*は媒質の密度(Radiometric density)に比例する。不均質な物体の投影*p*はX線の光路に沿った線積分、すなわち、

$$p = \int f_m dr \dots\dots\dots (3)$$

与えられる。ここに、*r*は光路の直線座標を示す。

X線CTにおいては、断層撮影法により、互いに独立な多数の方向の投影が計測され、断層内の線吸収係数の分布はフィルタ補正逆投影法(FBPM: Filtered Back-Projection Method)⁸⁾により再構成される。また、線吸収係数の3次元データは多数の平行な断層を測定し、それらを逐次つなぎ合わせて得られる。

本研究に用いた実験システム(東芝製産業用X線CTスキャナ)の構成をFig. 1に示す。X線管(X-ray bulb, 300 kV/2 MA)と176個の検出器(Detector)は同一水平面上に固定され、上下に可動である。一方、被検体はターンテーブル(Turntable)の上に設置され、必要な並進と回転を行う。回転軸は鉛直である。断層の厚さ*h*は視準儀(Collimator)により、*h* = 0.5 mm, 1 mm, 2 mmの3通りに可変である。撮影領域は15 cm × 15 cmと40 cm × 40 cmの2通りが選択できるが、表示画素数はどちらの場合も512 × 512である。したがって、画素の一边の長さ*d*は撮影領域が15 cm × 15 cmの場合に*d* = 0.293 mm、撮影領域が40 cm × 40 cmの場合に*d* = 0.781 mmである。

フィルタ補正逆投影法により再構成される線吸収係数*f_m*は、断層の厚さ当たりの平均値に相当し、その表示には*f_m*の値を適当にスケールしたCT値が用いられる。本論文では、空気を0、水を1000と表示したものをCT値と呼ぶことにする。

3. 亀裂投影法の原理および基礎式

平面的な亀裂の開口幅*w*はFig. 2に示す2つの投影領域の投

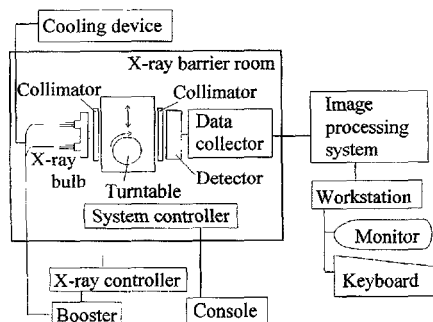


Fig. 1 Composition of X-rays CT scanner (TOSCANER-23200).

影*p*₀、*p*の差Δ*p* = *p*₀ - *p*から算定される。まず、亀裂面上の点Oを原点とし、亀裂面に垂直な方向を*x*軸とする直角座標系(*x*, *y*, *z*)を定める。つぎに、原点Oを中心とし、座標軸に平行な辺をもつ降下域(Drop region)を仮想し、*x*軸方向の長さを*P*、*y*軸方向の長さを*W*、*z*軸方向の長さを*H*とする。降下域に対してX線が -*x*軸方向の端面から入射し、+*x*軸方向の端面を透過する間の投影を考え、投影断面積*S* = *WH*当たりの平均値を*p*とする。以下、投影はすべて断面積*S*の平均値で表されるので、この平均値を単に投影と呼ぶ。

亀裂が空気に満たされているとき、その投影への寄与は0であるから、物体が線吸収係数*f_m*の均質・等方な媒質から構成されている場合、投影*p*は、式(3)より、

$$p = |P-w| f_m \dots\dots\dots (4)$$

与えられる。一方、内部に亀裂を含まない基準域(Base region)として、降下域と同じ寸法の直方体を物体の内部に想定すると、この領域の投影*p*₀は、式(4)に*w* = 0を代入して、

$$p_0 = P f_m \dots\dots\dots (5)$$

与えられる。式(5)から式(4)を差し引き、*w*について解くと、

$$w = \Delta p / f_m = |p_0 - p| / f_m \dots\dots\dots (6)$$

を得る。上式のΔ*p*は亀裂に起因する投影の変化量である。式(6)は開口幅測定の基礎式であり、亀裂面上の開口幅分布を求めるには、降下域を順次移動させて、測定を繰り返す必要がある。

基礎式(6)は*f_m*を一定と仮定して誘導されたが、岩石のように媒質が不均質である場合には*f_m*の値は一定ではないから、基礎式を修正する必要がある。また、Δ*p*と*f_m*をCT値の3次元データから評価する際には、フィルタ補正逆投影法による再構成過程で生じる雑音(画素ごとのCT値のばらつき)の影響を少なくすることが重要である。さらに、本実験システムのようにX線管による連続X線を用いる場合には、単色エネルギーの線源とは異なった特性の影響、すなわち透過厚によるX線スペクトルの変化に起因するカップリング効果⁹⁾(被検体の表面に近づくほどCT値が大きくなる)が表れるので、これに対しても配慮が必要

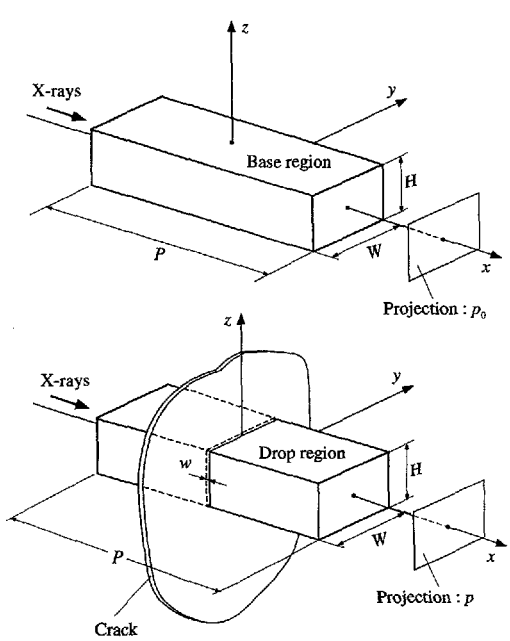


Fig. 2 Projection regions for the crack opening measurement by Crack Projection Method. The drop region is for determining the projection: *p*, and the base region is for determining the original projection: *p*₀ of the object.

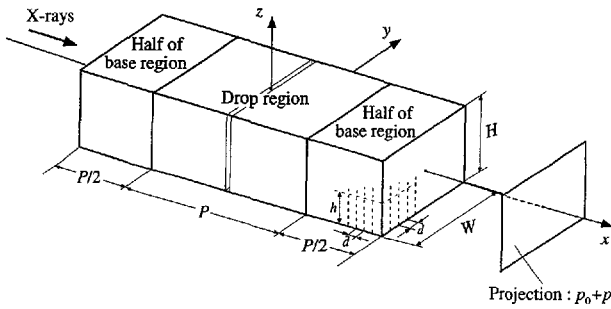


Fig. 3 An alignment of the drop region and the base region.

要である。

そこで、実行が最も簡単であるという理由から、式(6)の f_m を基準域の平均線吸収係数 \bar{f} に置き換える。すなわち、

$$w = \Delta p / \bar{f} = \{p_0 - p\} / \bar{f}, \quad \bar{f} = p_0 / P \quad \dots\dots\dots (7)$$

を基礎式として、開口幅 w を算定することにする。また、再構成過程で生じる雑音の影響に対しては、投影領域の長さや断面積を適正化することによりその軽減を計ることとする。また、カップリング効果の影響を少なくするために、Fig. 3に示すように、降下域と基準域を直列に配置する方法を採用する。ただし、基準域を2等分して、降下域の前後に接続する。

なお、CT値の3次元データから投影の値を求める手続きはつぎのようである。まず、投影領域に含まれる x 軸方向の画素数を \bar{P} 、 y 軸方向の画素数を \bar{W} 、 z 軸方向の断層数を \bar{H} 、投影断面の画素数を \bar{S} と表記すると、これらは次式で与えられる。

$$\bar{P} = P/d, \quad \bar{W} = W/d, \quad \bar{H} = H/h, \quad \bar{S} = \bar{W}\bar{H} \quad \dots\dots\dots (8)$$

つぎに、画素の番地として、 x 軸方向の画素番号 $i = 1, 2, \dots, \bar{P}$ 、 y 軸方向の画素番号 $j = 1, 2, \dots, \bar{W}$ 、および z 軸方向の画素番号 $k = 1, 2, \dots, \bar{H}$ の組み合わせを採用し、降下域の番地 (i, j, k) におけるCT値を $f(i, j, k)$ と表記すると、投影断面 i の平均CT値 $g(i)$ は、

$$g(i) = \sum_k \sum_j f(i, j, k) / \bar{S} \quad \dots\dots\dots (9)$$

と表される。ここに、記号 \sum_n は添字 n についての総和を表す。また、基準域について、番地 (i, j, k) におけるCT値を $f_0(i, j, k)$ と表記すると、投影断面 i の平均CT値 $g_0(i)$ は、

$$g_0(i) = \sum_k \sum_j f_0(i, j, k) / \bar{S} \quad \dots\dots\dots (10)$$

と表される。上述の表記法に従うと、

$$p = \sum_i g(i)d, \quad p_0 = \sum_i g_0(i)d, \quad \bar{f} = \sum_i g_0(i) / \bar{P} \quad \dots\dots\dots (11)$$

である。

4. 適用上の問題点に関する検討

亀裂の開口幅 w は上述のようにCT値の領域平均値を用いて算定される。したがって、算定値 w は投影領域の中心Oの開口幅に必ずしも一致しない。すなわち、投影領域内で開口幅が一定、あるいは線形である場合にのみ、算定値 w は中心Oの開口幅に一致し、非線形分布の場合には一致しない。この点は結果解釈に際して留意すべき点であると考えられる。

また、算定値 w はCT値のスケールに影響される。再構成されたCT値 f とその真値 f^* の関係はつぎの一次式で表される。

$$f^* = \beta f + \beta e \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 β は比例定数であり、誤差がない場合、

$\beta = 1$ である。第2項はスケールのシフトを示し、誤差がない場合、 $e = 0$ である。基礎式(7)に対するスケールの影響はつぎのようである。すなわち、投影 p_0 と p 、および基準域の平均線吸収係数 \bar{f} に関して、比例定数 β とシフト βe の両方の補正が必要である。しかし、投影の変化量 Δp は差分量であるから β の補正は必要であるが、シフト βe の補正は不要である。したがって、式(12)の線形関係が成立する限り、算定値 w は β に無関係で、誤差 e にだけ影響される。言い換えると、誤差 e に関する較正係数 η を算定値 w に掛けると、真の開口幅 w_m が得られることになる。すなわち、

$$w_m = \eta w, \quad \eta = \bar{f} / \{\bar{f} + e\} \quad \dots\dots\dots (13)$$

である。 η は \bar{f} に依存する。誤差 e は画像ごとに一定値をとるが、被検体の密度、寸法と形、撮影方法などによって値が変化することが経験的に知られている。したがって、較正係数 η は被検体ごとに、また、撮影のたびに値が異なる。このことは、開口幅の絶対値測定に際して、較正係数 η の評価、言い換えると、スケールのシフトに対する補正が重要な課題であることを意味している。

スケールのシフトを撮影方法に起因する成分と被検体に起因する成分に大別してみる。前者は撮影条件を整えることにより小さくすることが可能であり、基準域を十分に大きく設定した場合の平均線吸収係数 \bar{f} を比較して検出することが可能である。したがって、各画像の \bar{f} の平均を基準値として、各画像の \bar{f} が基準値に等しくなるように、画像ごとに一定の補正値を各画像のCT値に加えることにより、撮影方法に起因するシフトは補正できると考えられる。この操作を画像補正と呼ぶ。これに対して、被検体に起因するシフトを画像データだけを使って補正することは至難であると想像される。そこで、本論文では、画像内にある既知の開口幅を基準法とし、これを亀裂投影法で測定して較正係数 η を評価する。これを寸法較正と呼ぶ。その詳細は5.以降で述べる。

3.では、平面的な単一亀裂を例にとり、亀裂投影法の原理を説明したが、これは種々の問題に応用できると考えられる。例えば、Fig. 4(a)の平行亀裂問題の場合、測定値 w_m は平行亀裂の開口幅の合計と等価である。また、(b)の平行微亀裂問題、および(c)の交差型微亀裂問題では、測定値 w_m と投影断面積 S の積が微亀裂の開口容積の合計に等しいと考えられる。また、(d)に示す亀裂先端の破壊プロセスゾーンのように、大きなひずみを履歴して密度が著しく減少した帯状領域がある場合には、測定値 w_m は近似的に帯状領域の開口変形に等しいと考えられる。

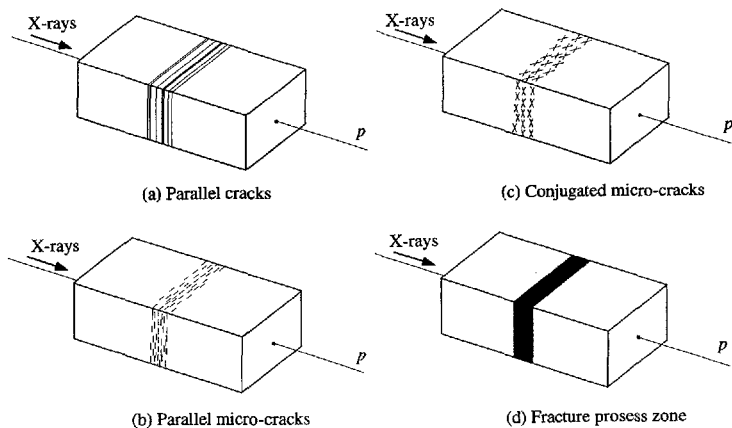


Fig. 4 Promising applications of Crack Projection Method; The measurement of (a) opening of parallel cracks, (b) opening volume of parallel micro-cracks, (c) opening volume of conjugated micro-cracks and (d) strain of the fracture process zone.

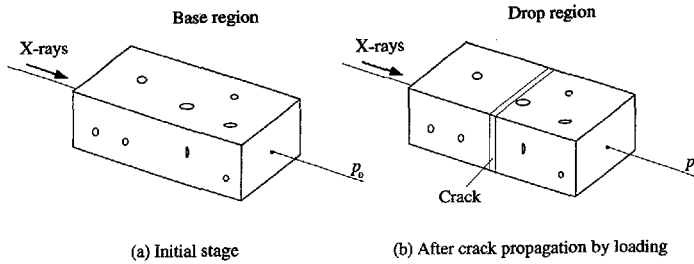


Fig. 5 Elimination of the influence of rock inhomogeneity by subtracting the initial image from the image after crack opening.

しかしながら、岩石に亀裂投影法を適用するとき、岩石に特有な不均質性に十分に配慮する必要があると考えられる。例えば、Fig. 5 に示すように、はじめから欠陥を内部にもつ岩石に亀裂が生じる場合、亀裂発生後に亀裂投影法を適用すると、欠陥の影響を含んだ形で亀裂の開口幅が測定されるので、真の開口幅を知るには、欠陥の影響を消去する手続きが必要である。これには2つの方法が考えられる。1つ目は、降下域を亀裂発生後の物体内に設定し、基準域を亀裂発生前(初期状態)の物体内の同じ場所に設定する方法である。この場合、投影の変化量 Δp は画像間差分によって求められる。2つ目は、初期状態と亀裂発生後の両方にそれぞれ3. の亀裂投影法を適用して、2つの測定値の差から開口幅を評価する方法である。この場合、初期状態の測定値は降下域と基準域の欠陥量の違いに対応し、初期状態の基準域に較べて、初期状態の降下域に含まれる欠陥量の多少を示す。以下、1つ目の方法を画像間差分法、2つ目の方法を開口量差分法と呼ぶ。どちらの方法も亀裂開口解析に有用であるが、画像間差分法は必ずみ解析に威力を発揮すると考えられる。これは別の機会に報告することとし、以下、開口量差分法について検討する。

5. 亀裂モデル実験による検証

単一亀裂に対する亀裂投影法の測定精度を確認するために、一對の半月板を用いたモデル実験を実施した。材料は岩石とCT値に近いアルミを用いた。Fig. 6 (a)に示すように、半月板の直径の面を亀裂面と見なし、面を合わせた後、その一端に隙間ゲージを挿入して、開口幅が線形に変化する亀裂を模す。亀裂端 O' を原点とする直角座標系 (X, Y, Z) を用いると、設定幅は $w_s = w_{\max} Y/D$ で表される。ここで、 w_{\max} は亀裂端 O' の最大開口幅であり、 D は模擬亀裂の長さである。本実験では、 $D = 6$ cm とし、最大開口幅を $w_{\max} = 0.24$ mm, 0.48 mm の2通りに設定した。なお、亀裂面はグラインディングとバフ研磨により鏡面に仕上げられている。

X線CTの2次元画像をFig. 6 (b)に示す。最大開口幅 $w_{\max} = 0.48$ mm、画素の一辺の長さ $d = 0.293$ mm、断層の厚さ $h = 2$ mm の場合である。アルミの平均CT値は2,366であり、この画像はCT値が2,200より高い部分を白く、低い部分を黒くした2値化画像である。半月板の中心を横切る黒い線が模擬亀裂である。

投影領域の長さ P は、Fig. 6 (c)のように、投影断面の平均CT値を調べて設定された。Fig. 6 (c)の $g(i)$ および $g_0(i)$ は、模擬亀裂の中心を測点 O として求められたものであり、画素数 $\bar{S} = 100$ ($\bar{W} = 100, \bar{H} = 1$) の場合である。 $g(i)$ の分布は原点 O に対してほぼ対称であり、原点付近だけ値が低く、原点から離れたとほぼ一定値に収束する。 $g_0(i)$ の分布はほぼ平坦である。これより、投影領域の長さ $P = 5.86$ mm ($\bar{P} = 20$) を採用することにする。

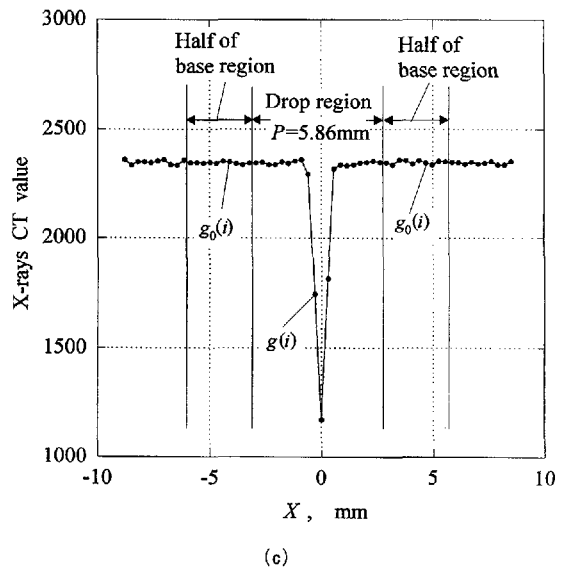
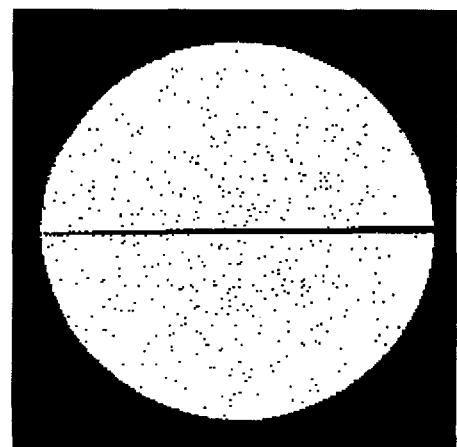
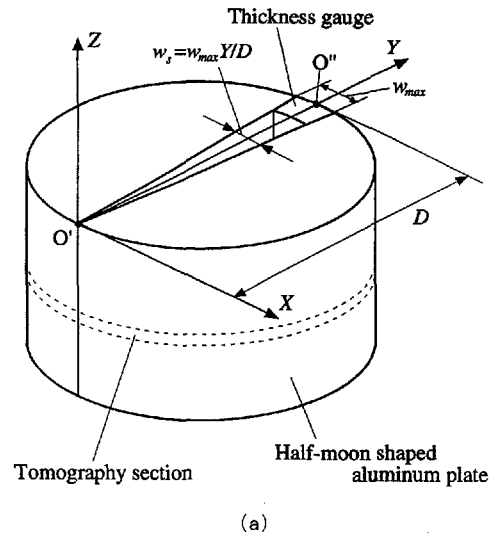


Fig. 6 Measurement of linear crack opening using a couple of half-moon shaped aluminum plates; (a) geometry of the model, (b) a cross-sectional gray-level thresholding image, (c) procedure of setting region for the crack opening measurements by analyzing the distribution of mean CT value in the Y-axis direction.

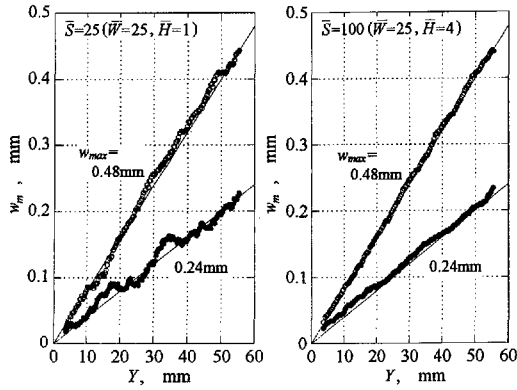


Fig. 7 Result of linear crack opening measurements, indicating the amount of scatter in the measurements decreases with increasing the cross-sectional area S , and a well agreement is obtained in the case of $S = 58.6 \text{ mm}^2$ ($W = 7.32 \text{ mm}$, $H = 8 \text{ mm}$).

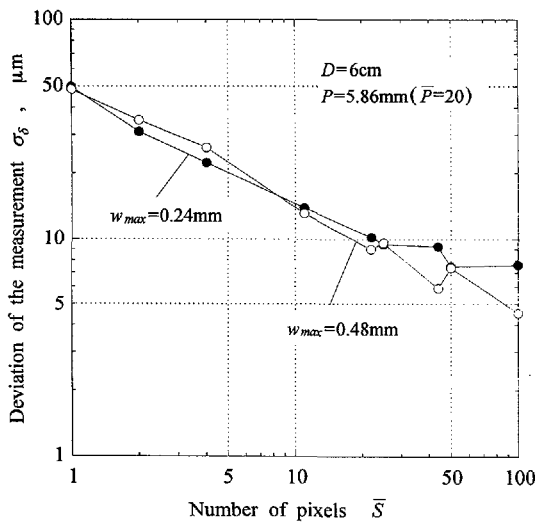


Fig. 8 Deviation of the measurement σ_δ versus the number of pixels \bar{S} in the cross section of the projection region, in the case of $P = 5.86 \text{ mm}$ ($\bar{P} = 20$).

さて、測定結果を Fig. 7 に示す。投影断面積 S は 2 通りに設定されている。すなわち、(a)は $S = 14.65 \text{ mm}^2$ ($W = 7.32 \text{ mm}$, $H = 2 \text{ mm}$)、(b)は $S = 58.6 \text{ mm}^2$ ($W = 7.32 \text{ mm}$, $H = 8 \text{ mm}$)である。画素数 \bar{S} で表すと、(a)は $\bar{S} = 25$ ($\bar{W} = 25$, $\bar{H} = 1$)、(b)は $\bar{S} = 100$ ($\bar{W} = 25$, $\bar{H} = 4$)である。図中の細直線は設定幅 $w_s = w_{\max} Y/D$ を示している。測定値 w_m は画像補正と寸法較正を施したものである。ただし、寸法較正は最大開口幅 $w_{\max} = 0.48 \text{ mm}$ の設定幅 w_s を基準寸法として実施され、測定誤差 $\delta = w_s - w_m$ の偏差 σ_δ を最小化するように較正係数 η が求められた。得られた較正係数 $\eta = 0.803$ は $w_{\max} = 0.24 \text{ mm}$ の実験にも適用されている。Fig. 7 において、 $w_{\max} = 0.24 \text{ mm}$ の測定値と設定幅の対応は良好である。この結果は、被検体が同じであれば、開口幅が異なっても、同じ値の較正係数が適用できることを示している。

測定偏差 σ_δ は投影断面の画素数 \bar{S} に依存する。この関係は Fig. 8 に示すようである。測定偏差 σ_δ は画素数 \bar{S} の平方根にほぼ反比例する。この事例では、 $\bar{S} > 25$ のとき、 $\sigma_\delta < 10 \mu\text{m}$ である。したがって、開口幅が線形に変化する単一亀裂に関して、亀裂投影法により高精度の絶対値測定が可能であると結論できる。

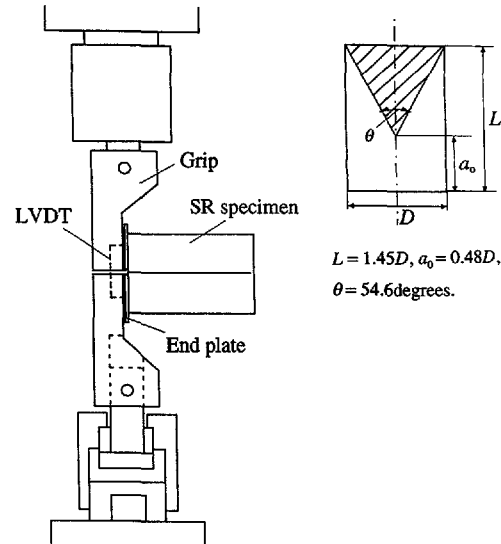


Fig. 9 Apparatus for the Short Rod testing and geometry of standard specimen.

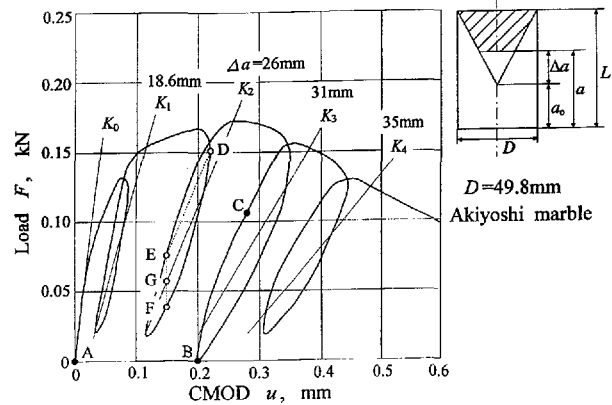


Fig. 10 Load-crack mouth opening displacement curve for Akiyoshi marble. The crack length, Δa (in the figure), is evaluated by the numerical solution presented by Matsuki et al.¹⁰⁾. A, B and C represent the three stages of X-rays CT, and DE is a linearized unloading line.

6. 岩石のSR試験への適用

SR試験装置とシェブロンノッチを含む標準試験片の形状を Fig. 9 に示す。試験片の端面に2枚の硬質アルミ製エンドプレートが接着され、これらを介して試験片はグリップにより上下に引張られる。同時に、エンドプレートに取り付けた一対のLVDTを用いて、荷重線変位 (CMOD: Crack Mouth Opening Displacement) が測定される。通常、引張荷重はストローク制御で加えられ、変形速度は亀裂成長速度が 1 mm/sec 以上になるように定められる。

秋吉大理石の荷重・荷重線変位線図を Fig. 10 に示す。これはサーボコントロール型材料試験機 (MTS, 容量 25 t) を用いて、通常より遅い変形速度 $96 \mu\text{m/min}$ で求められた荷重・荷重線変位線図である。試験片は、直径 $D = 49.8 \text{ mm}$ 、長さ $L = 72.2 \text{ mm}$ である。シェブロンノッチの加工には幅 0.8 mm のダイヤモンドカッターが用いられ、先端距離 $a_0 = 23.9 \text{ mm}$ 、角度 $\theta = 54.6$ 度に設定されている。図中の細直線は線形化除荷直線 (Linearized unloading line) であり、つぎのように定められる。まず、除荷曲線の変位減少開始点を D とし、点 D の荷重を F と

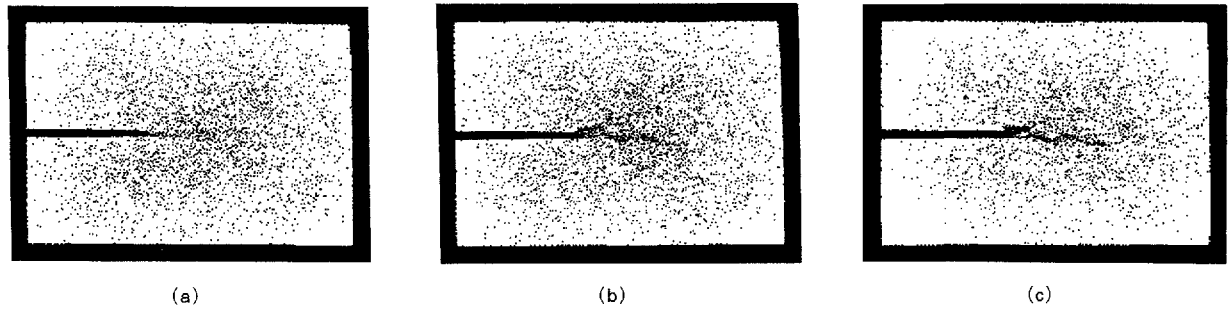


Fig.11 Gray-level thresholding images of Short Rod specimen; (a) at the initial stage A, (b) at the unloading stage B, (c) at the reloading stage C.

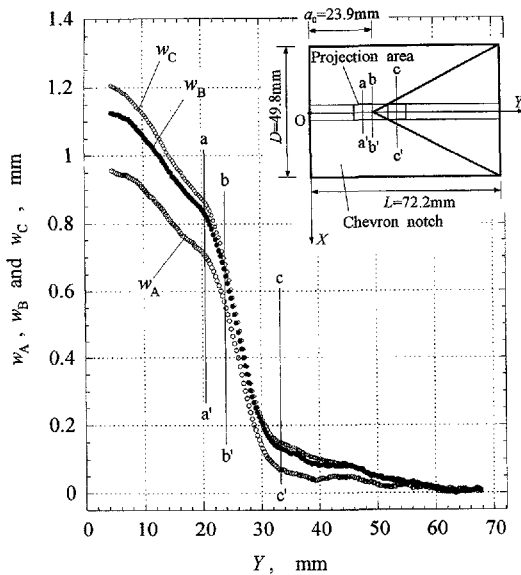


Fig.12 Crack opening profiles of Short Rod specimen measured at the three stages A, B and C. The values of w_A , w_B and w_C are the crack openings at the three stages A, B and C respectively.

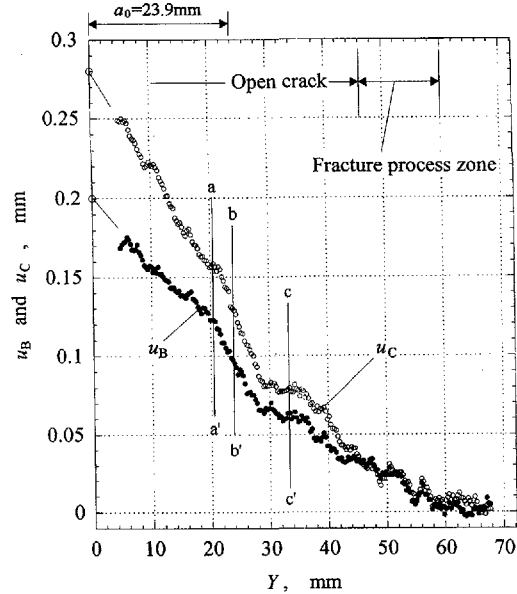


Fig.13 Crack deformation analysis by subtraction: $u_C = w_C - w_A$ and $u_B = w_B - w_A$, suggesting that the fracture process zone is ranging from $Y = 46$ mm to $Y = 60$ mm.

する。また、再載荷曲線上で荷重が $F/2$ となる点を E とし、点 E の変位を u とする。つぎに、除荷曲線上で変位が u の点を F とし、線分 EF の中点を G とする。このとき、線形化除荷直線は点 G を通り、直線 DE に平行な直線である。

松木ら¹⁰⁾は、Fig. 10 の付図のように亀裂前縁が直線である場合について、線形化除荷直線の剛性 K_i と亀裂の無次元長さ $\alpha = a/D$ の関係を解析し、次式を提案している。

$$K_i/K_0 = \exp \{-1.414 + 10.46\alpha - 23.88\alpha^2 + 20.40\alpha^3 - 6.752\alpha^4\} \dots (14)$$

ここに、 K_0 は初期接線剛性である。上式を用いて求められた亀裂の進展長 Δa の値は図中に付記したようである。

X 線 CT は、開口量差分法を適用するために、Fig. 10 に黒丸で示す 3 段階で実施された。すなわち、実験開始前の無荷荷段階 A (CMOD = 0 mm)、荷重線変位 CMOD = 0.34 mm を履歴させた後に荷重を完全に除いた除荷段階 B (CMOD = 0.20 mm)、および再載荷段階 C (CMOD = 0.28 mm) である。ただし、段階 B から段階 C までの荷重には変則的な方法が採用された。すなわち、一対のくさびをシェブロンノッチの口元の左右に挿入し、所定の荷重線変位を与える方法が用いられた。理由は、本実験システムのバリアルーム内で標準的な SR 試験を実施することが困難なためであり、バリアルーム内での載荷試験は今後の課題となっている。

X 線 CT 画像を Fig. 11 に示す。撮影は試験片の中心断面である。秋吉大理石の平均 CT 値は 2,524 であり、これらの画像は CT 値 2,400 より高い部分を白く、低い部分を黒くした 2 値化画像である。無荷荷段階の画像(a)では、白い部分が秋吉大理石であり、左側の黒太線はシェブロンノッチである。除荷段階の画像(b)では、シェブロンノッチの先端から右に向かって亀裂が進展している。ただし、亀裂面は凸凹している。これは秋吉大理石の結晶が大きく、亀裂が結晶境界を辿ったためと考えられる。また、画像(b)と画像(c)を比較すると、再載荷による亀裂の開口が読みとれる。

亀裂投影法の適用に際しては、まず、Fig. 6 (c)と同様に投影断面の平均 CT 値の分布が調べられ、投影領域の長さが $P = 8.79$ mm ($\bar{P} = 30$) に設定された。つぎに、投影断面積 S を種々に変化させた解析から、測定結果の安定性が調べられ、投影断面積 $S = 44.0$ mm² ($W = 7.32$ mm, $H = 6$ mm)、画素数 $\bar{S} = 75$ ($\bar{W} = 25$, $\bar{H} = 3$) に定められた。また、画像補正と寸法較正が行われた。寸法較正に必要な基準寸法は段階 B の CMOD = 0.20 mm と段階 C の CMOD = 0.28 mm である。

測定結果を Fig. 12 に示す。図中の w_A , w_B および w_C はそれぞれ段階 A, B および C の開口幅である。付図の断面 aa' と断面 cc' の間、すなわち、 20.2 mm $< Y < 33.4$ mm の区間では、投影領域がシェブロンノッチの輪郭に掛かるために、測定値の信頼

性は低いと考えられる。この区間 aa'~cc'を除外してみると、 $Y < 20.2$ mm の測定値はほぼ平行で右下がりの曲線を描いており、シェブロンノッチは口元が広く、奥が狭いことを示している。ここで、 $Y < 20.2$ mm の w_A を延長すると、ノッチの先端 $Y = 23.9$ mm で $w_A = 0.65$ mm である。この値はカッタの幅 0.8 mm より小さいが、カッタの先細形状を考慮すると、妥当であると考えられる。一方、 33.4 mm $< Y$ では、 w_A は小さい値をもち、波打った分布をしている。これは先在微亀裂、結晶の不均質性などに由来すると考えられる。

開口変位 $u_B = w_B - w_A$ および $u_C = w_C - w_A$ の計算結果を Fig. 13 に示す。測定値の信頼性が低いと考えられる区間 aa'~cc'を除外すると、 u_B および u_C の分布は比較的滑らかであり、有意であると考えられる。すなわち、 u_B は残留変形に、 u_C は全変形にそれぞれ対応し、弾性変形は $u_C - u_B$ によって評価できると考えられる。ここで、寸法較正について述べる。基準寸法は前述したように段階 B の CMOD = 0.20 mm と段階 C の CMOD = 0.28 mm である。これらは Fig. 13 の縦軸上に 2 つの白丸で示されている。白丸がそれぞれ対応する測定値の延長線（細直線）上に位置するように、較正係数 η が求められている。評価された較正係数は $\eta = 0.775$ である。

残留変形 u_B と全変形 u_C を比較すると、 46 mm $< Y$ の範囲で、近似的に $u_B = u_C$ である。また、 60 mm $< Y$ の領域は $u_B = 0$ であると見なせる。したがって、 46 mm $< Y < 60$ mm の区間が破壊プロセスゾーンに対応し、 $Y < 46$ mm の区間が開口亀裂であると解釈できる。すなわち、破壊プロセスゾーンを含めた亀裂の長さは $a = 60$ mm であり、開口亀裂の長さは $a = 46$ mm であると見なせる。松木らの方法による計算値 $a = 55$ mm は両者の中間にある。破壊プロセスゾーンの最大非弾性変形は約 0.03 mm であり、これを降下域のひずみに換算すると、約 5000 μ strain である。

7. 結 言

X線CT値の3次元データを用いて、岩石内部の亀裂の開口幅を精密に評価するためのデータ処理法を検討した。そして、フィルタ補正逆投影法によるCT値の再構成過程で生じる雑音、および連続X線を用いるために発生するカップング効果の影響を考慮した亀裂投影法を提案するとともに、その岩石への適用方法について論じた。得られた成果を要約するとつぎのようである。

(1) 亀裂の発生および開口幅の増加に起因して発生する亀裂面に垂直な方向の投影の変化を用いて、亀裂の開口幅あるいは変

化量を測定するための基礎式を誘導し、問題点を明らかにした。

(2) 各種の雑音の影響を最小化するために領域型のデータ処理法を提案するとともに、CT値のスケールのシフトに関して、絶対値評価に有用な画像補正法と寸法較正法を明らかにした。

(3) 一対のアルミ半月板を用いた亀裂モデル実験を実施し、亀裂投影法の有効性を検証するとともに、測定偏差が投影断面内の画素数の平方根に反比例することなどを明らかにした。

(4) 亀裂投影法をSR試験に適用し、岩石に特有な不均質性の影響を回避する方法として、実験開始前の無負荷段階を基準とする開口量差分法を提案し、その有効性を具体的に示した。

(5) 開口量差分法により、亀裂の開口変位を弾性変位と非弾性変位に分解する手続きを明らかにし、本方法の破壊プロセスゾーンへの適用性について検討した。

引 用 文 献

- Hounsfield, G. N. : A method of and apparatus for examination of a body by radiation such as X-or Gamma-Radiation, British Patent No. 1283915, (1972)
- Arthur, J. R. E. : New techniques to measure new parameters, Proc. of Roscoe Material Symp. on stress-strain behaviour of soils, G. T. Foulis, Cambridge, p. 340-346, (1971)
- Verhelst, F., Vervoort, A., De Bosscher, PH. and Marchal, G. : X-ray computerized tomography, Determination of heterogeneities in rock samples, Proc. of 8th ISRM Cong., Tokyo, Japan, Vol. 1, p. 105-108, (1995)
- 中野 司・中村光一・染谷利明・大塚浩士 : X線CTによる岩石内部構造の3次元観察, (1) CT値と物体密度の関係式の決定, 情報地質, 8, 4, P. 239-255, (1997)
- Sugawara, K., Obara, Y., Kaneko, K. and Koike, K. et al. : Visualization of three-dimensional structure of rocks using X-ray CT method, Proc. of the 1st ARMS, Seoul, Korea, Vol. 2, p. 769-774, (1997)
- 菅原勝彦・尾原祐三・青井崇浩・小島隆輔 : X線CTによる岩石透水現象の可視化, 第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 大阪, p. 341-346, (1998)
- ISRM Commission on Testing Methods: Suggested Methods for Determining Fracture Toughness of Rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., 25, p. 71-96, (1988)
- 高木幹雄・下田陽久監修 : 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, p. 356-371, (1991)
- 岩井喜典編 : CT スキャナー X線コンピュータ断層撮影装置, コロナ社, p. 35-37, (1982)
- Matsuki, K., Matsune S. and Takahashi H. : Boundary element analysis for standard specimen configurations in the ISRM suggested methods for determining fracture toughness of rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 28, p. 355-363, (1991)