

# X線CT法によるバイオグラウト処理された 供試体内部の間隙率評価

小林 優矢<sup>1\*</sup>・川崎 了<sup>1</sup>・加藤 昌治<sup>1</sup>・椋木 俊文<sup>2</sup>・金子 勝比古<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北海道大学 大学院工学研究科 環境フィールド工学専攻 (〒060-8628札幌市北区北13条西8丁目)

<sup>2</sup>熊本大学 大学院自然科学研究科 社会環境工学専攻 (〒860-8555熊本市黒髪2-39-1)

\*E-mail: ykobayashi@geo-er.eng.hokudai.ac.jp

本研究では、X線CT法を用いて炭酸カルシウムを主材料としたバイオグラウトにおける炭酸カルシウムの析出量の定量的な把握を試みた。定量的評価のパラメータとして地盤の間隙率に着目し、グラウト処理前後におけるその変化の評価をおこない、間隙率評価手法の有効性を検討した。本手法では間隙率の評価過程において、固体と液体の閾値をミクセルを考慮した対数ゆう度基準による手法で設定した。また、間隙率の評価をおこなう前に予備試験として、間隙率の評価が可能な地盤材料の選定をおこなった。間隙率評価の結果算出されたグラウト処理前後の間隙率の比は、グラウト処理前後の溶液中のカルシウムイオン濃度の変化から試算した値と良い一致を示した。よって、本間隙率評価手法は有効であることが示された。

**Key Words :** Porosity, Threshold, Mixel, Biogrout, X-ray CT

## 1. 序論

バイオグラウト<sup>1)</sup>は、地盤中に生息する微生物の代謝活動を利用し、炭酸カルシウムやシリカを地盤や岩盤の中に析出・固化させ、地盤の間隙や岩盤の亀裂を閉塞させる新しい物性改良工法の1つである。炭酸カルシウムを主材料としたバイオグラウトに関しては、炭酸カルシウムの析出量の増加によるバイオグラウト処理後の供試体の強度の向上が、現在の研究課題の1つとなっている。炭酸カルシウムの析出量について論じるためには、まず、炭酸カルシウムの析出量の定量的な把握が必要となる。そして、その定量的な把握は、供試体の間隙率というパラメータに着目し、評価することで実現可能であると考えられる。

加藤ら<sup>2)</sup>は、X線CT画像から岩石の間隙率の評価を試みた。加藤らの手法では、鉱物と空隙の閾値を、後述するミクセルを考慮した対数ゆう度基準により設定しており、その妥当性について加藤らは、実際に砂岩を用いた空隙率の評価によって確かめている。

しかし、バイオグラウトのように、供試体内にある間隙水の中からカルシウム塩が析出して固体となる前後の変化を、間隙率の変化として定量的に評価した事例はない。加えて、バイオグラウト供試体内の炭酸カルシウムの析出量はわずかであると考えられ、反応後の間隙率の

変化はわずかであると考えられるが、このように反応前後のわずかな間隙率の変化を捉えたいケースにおいても、ミクセルを考慮した対数ゆう度基準により閾値を選定する間隙率の評価手法により精度よく評価がおこなわれるかについては検討がなされていない。

そこで、本研究では、バイオグラウト供試体を用いて、ミクセルを考慮した対数ゆう度基準により閾値を選定する間隙率の評価手法の有効性を検討した。本研究により、このバイオグラウト供試体の微小な間隙の変化を本手法で捉えることが可能と評価されれば、それは、さらに大きな間隙率の変化の把握も可能であることを意味し、本手法をさまざまな供試体の間隙率の評価に、広く適用できるようにすると期待できる。

## 2. 間隙率の評価手法

X線CTスキャナによる測定で得られたCT値分布から間隙率を評価するためには、CT値分布における溶液と地盤材料との閾値を設定し、それらを分離する必要がある。本研究では、X線CT画像における閾値の設定手法に、加藤らによって提案された手法を用いた。以下では、本手法について概説する。

図-1は実像を画像化する手順を模式的に示した図であ

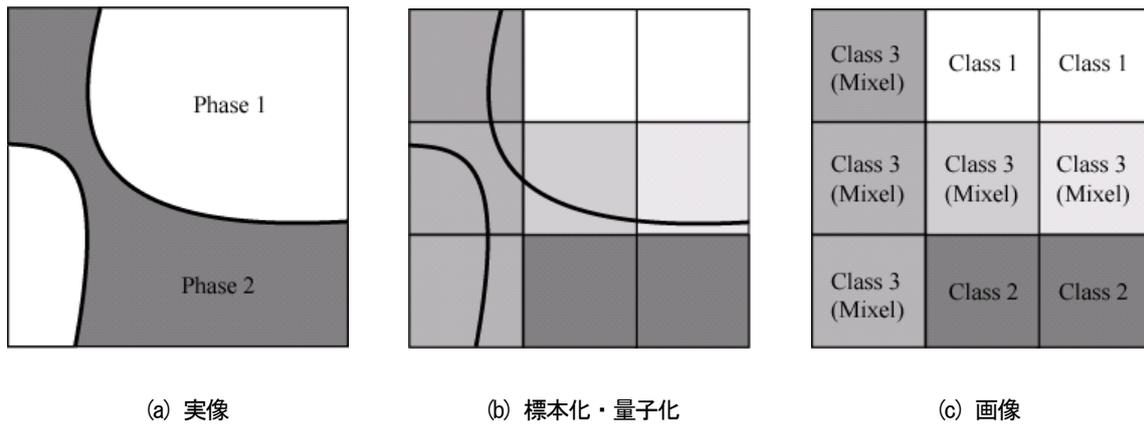


図-1 実像の画像化

る。同図(a)のPhase 1, Phase 2は異なる物質であり、例えば本研究の場合には、Phase 1として液体を、Phase 2として固体を想定することができる。同図のように、連続的な実像にCT値という離散的なデジタル値を持たせる場合には、標準化・量子化をおこなう必要があり、さらにこれを2次元の画像として表現する場合には階調変換が必要となる。実像を標準化・量子化した際、同図(b)のように内部に2つの物質が混在するボクセルがあるとき、部分容積効果により、そのCT値はそれら2つの物質の占有体積によって平均化された値となる。そして、そのようなボクセルが階調変換によって画素に変換されると、2つの物質に対応する画素（同図(c)のクラス1およびクラス2）の値の中間的な値となる。同図(c)のクラス3の画素がそれにあたり、これはミクセル（混合画素、Mixed pixel, Mixel）と呼ばれる<sup>3),4)</sup>。これに対し、同図(c)のクラス1, 2として示した画素は、もともとその領域内に1つの物質のみしか含んでおらず、それぞれその物質に対応する画素の値をとる。これらは純粋画素（Pure pixel）と呼ばれる。クラス3のミクセルは、処理者の閾値の設定の仕方によって、クラス1および2の両方に分割される可能性を秘めており、量子化誤差の原因となる。したがって、X線CT画像の閾値設定の際には、ミクセルを考慮し、処理者の主観に頼らない一貫した設定手法が重要である。

以上を踏まえて本手法について考えると、本手法では、このミクセルを考慮した閾値設定をおこなうため、実像を画像化したときの量子化誤差を考慮することを可能としているといえる<sup>2)</sup>。

例えばいま、密度の異なる2つの物質が混在する供試体内部をX線CTによって測定し、CT値の階調変換をおこなって図-2のSuperpositionに示されるような256階調の頻度分布が得られたとする。関田<sup>5)</sup>によれば、これは同図に示されるようにクラス1~3の3つに分解できる。したがって、これらを分ける閾値は2つ必要となる。

すなわち、同図に示すクラス1とクラス3の閾値 $t_1$ 、およびクラス3とクラス2の閾値 $t_2$ である。これらの閾値の算出には対数ゆう度基準<sup>5)</sup>による最ゆう法を用いており、処理者の主観に頼らない一貫した設定を可能としている。

### 3. 実験手順

#### (1) 地盤材料の選定

間隙率の評価が可能な地盤材料を選定するために、まず予備試験として、いくつかの地盤材料を用いたバイオグラウト供試体を作製し、マイクロフォーカスX線CTスキャナ（東芝製, TOSCANER 30900  $\mu$  hd）により測定した。本研究では、天然の地盤材料として硅砂を、人工的な模擬地盤材料としてゴムチップ、プラスチックペレット、スチール球、ガラスビーズを用いた。以下、これら硅砂および模擬地盤材料を総称して地盤材料と呼ぶ。

バイオグラウト供試体の作製手順の概要は、以下の通りである。まず、トリス-塩酸緩衝溶液（ニッポンジーオン製, 1M Tris-HCl）、グルコース、硝酸カルシウム四水和物を混合した。そして、それらに後述する各地盤材料およびイースト菌を混ぜ、プラスチック容器に入れて容器上部をパラフィルムで密閉した。さらに、その容器をインキュベータに入れて温度25°Cにて24時間静置した。

#### (2) 間隙率の評価

間隙率の評価が可能であると選定された地盤材料について、間隙率の変化の評価をおこなうのに十分なデータを収集するため、バイオグラウトの処理前後におけるX線CT測定をおこなった。

バイオグラウトの反応前後の変化を比較するためには、同一の供試体について静置前で測定することが望ましい。

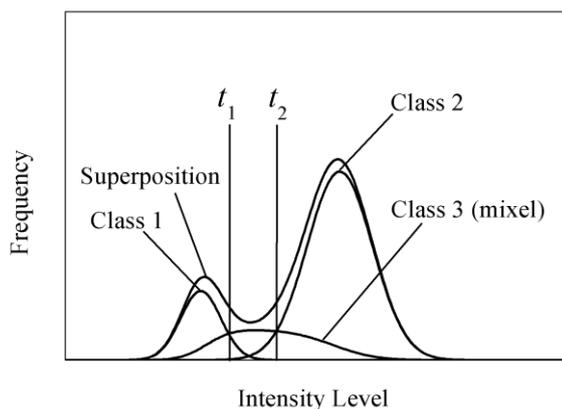


図-2 閾値設定手法

しかし、静置前のX線の照射によって供試体内のイースト菌が死滅する可能性はきわめて高い<sup>9)</sup>。したがって、バイオグラウト反応前の供試体として、前述した供試体作製手順においてイースト菌を混入しない供試体を別途作製した。

算出する間隙率の信頼性を高める目的で、反応前後の両供試体とも3つずつ作製し、各供試体とも下部から上部まで5 mm間隔で4断層をマイクロフォーカスX線CTスキャナを用いて測定した。なお、測定の際のスキャンモードは、スライスのシングルとした。また、分解能（ボクセルサイズ）は、本スキャナの下限値である1画素サイズ5 μm×5 μmおよびスライス厚16 μmとした。さらに、照射X線の管電圧、管電流はそれぞれ130kV、62μAとした。また、ゲイン校正の条件が異なると同一の被検体でも得られるCT値が異なるため、反応前後の供試体でゲイン校正の条件を同一とした。

## 4. 実験結果

### (1) 地盤材料の選定

各地盤材料を用いた供試体における、X線CT測定によって得られたCT値分布の型（形状）を表-1に示す。同表に示すとおり、得られたCT値分布が双峰型となったのは、スチール球およびガラスビーズ2であった。双峰型のCT値分布が得られなかった他の地盤材料については、溶液の密度に対する地盤材料の密度が小さかったこと、またはボクセルサイズに対する地盤材料の粒径が小さかったことが、その主たる原因として考えられる。一方、双峰型のCT値分布が得られた2つの地盤材料のうち、スチール球に関しては、再構成画像にX線CT特有のビームハードニング現象が現れたため、後の間隙率の評価が適切におこなうことができないと考えられた。ゆえに、本研究で用いた地盤材料の中で、間隙率の評価に適した

表-1 各材料の物性と測定 CT 値分布の型に関する評価結果

供試体の材料	密度(g/cm <sup>3</sup> )	粒径(mm)	型
硅砂	2.65	0.1 (50%粒径)	単峰型
ゴムチップ	1.15	2	単峰型
プラスチックペレット	1.53	φ3×h4	単峰型
スチール球	7.87	1.0	双峰型
ガラスビーズ1	2.50	0.105-0.125	単峰型
ガラスビーズ2	2.50	0.50-0.71	双峰型

地盤材料はガラスビーズ2となった。したがって、ガラスビーズ2を用いた供試体に関しては、間隙率算出のための詳細なデータ収集を3章2節のとおりおこなった。なお、以後ガラスビーズ2のことを単にガラスビーズと呼ぶこととする。

### (2) 間隙率の評価

測定12断層の平均CT値分布を図-3に示す。地盤材料は溶液に比して密度が大きいこと、またCT値は密度に比例することから、図-3における左の山は溶液に、右の山はガラスビーズにそれぞれ対応している。ここで、気相は溶液に比して密度が小さいから、気相の頻度は図-3における左の山よりもCT値が小さい領域に現れると考えられる。しかし、図-3よりCT値分布上にはこの気相を示すピークが顕著に現れていないことがわかる。したがって、後の間隙率の評価の際には、気相の存在を無視し、供試体内部を固体と液体の二相構造として扱うこととした。

まず、ガラスビーズを用いた供試体におけるCT測定結果から、前述した閾値設定手法を用いてその間隙率を求めた。ここで、測定されたCT画像において、溶液の純粋画素をクラス1、ガラスビーズおよび析出した炭酸カルシウムの純粋画素をクラス2とし、また、それらのミクセルをクラス3とする。本手法による閾値算出の一例として、ある一断層における測定分布と、各クラスの分布およびそれらの閾値 ( $t_1$ ,  $t_2$ ) を図-4に示す。ただし、同図の横軸は、階調変換によりCT値を256階調で表した値である。

図-4のように算出された閾値から、間隙率は以下の通り算出した。クラス1、クラス2を示す物質がクラス3のミクセルを占有する割合は、確率論的にそれらの全体に対する面積占有率に等しい。したがって、クラス1、2、3の面積占有率を  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  とすると、間隙率  $\phi$  は次式となる。

$$\phi = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (1)$$

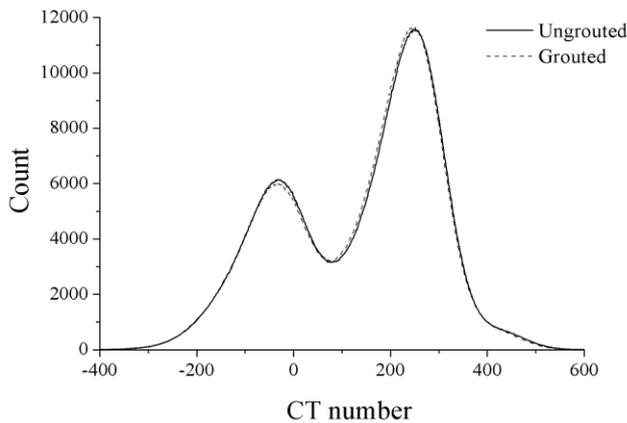


図-3 測定 12 断層の平均 CT 値分布

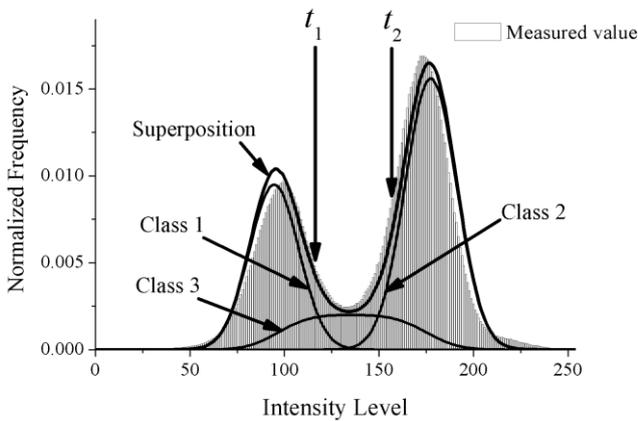


図-4 測定 CT 値分布と選定された閾値の例

したがって、この閾値設定手法を用いて算出された各値  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  から、式(1)を用いて初期状態の間隙率  $\phi_1$  に対するバイオグラウト反応後の間隙率  $\phi_2$  の比  $\phi_2/\phi_1$  を求めると、次のように算出される。

$$\frac{\phi_2}{\phi_1} = 0.98$$

このように、 $\phi_2/\phi_1$  の値は 1 未満となり、グラウト処理済み供試体の間隙率が、初期状態供試体のそれに比して低下したことが明らかとなった。一方、前述した図-3 の CT 値分布においても、析出した炭酸カルシウムによりグラウト処理済み供試体における溶液の頻度が相対的に減少し、固体の頻度が増加したことから、グラウト処理済み供試体の間隙率が初期状態供試体のそれに比して低下したことが理解できる。したがって、図-3 の CT 値分布においてこのように視覚的に把握可能であった間隙率の変化を、本手法によって具体的な数値として定量的に捉

えることができたことになる。

## 5. 考察

前章で X 線 CT による測定結果および閾値設定手法から算出した  $\phi_2/\phi_1$  の値を実測値と呼び、以下に求める推定値と比較する。推定値は、バイオグラウト反応前後の溶液中のカルシウムイオン濃度の変化から試算することができる。初期状態供試体の間隙率  $\phi_1$  に対するグラウト処理済み供試体の間隙率  $\phi_2$  の比  $\phi_2/\phi_1$  は次式で算出される<sup>7)</sup>。

$$\frac{\phi_2}{\phi_1} = \frac{cy}{27} \quad (2)$$

ただし、 $c$  はカルシウムイオンの初期濃度 (mol/l)、 $y$  は初期状態のカルシウムイオンが炭酸カルシウムの生成に寄与した割合 (以下、反応率) である。

$y$  値を推定する際には、東海林<sup>8)</sup>の研究結果を用いた。東海林<sup>8)</sup>によると、カルシウムイオン濃度 0.1 mol/l および 1 mol/l のバイオグラウト供試体を 25°C で 18 時間および 24 時間静置したときのカルシウムイオン濃度の変化は表-2 のようになる。ここで、初期のカルシウムイオン濃度  $C_0$  を、 $n$  時間後のカルシウムイオン濃度を  $C_n$  とすると、表-2 における  $n$  時間後の反応率  $y$  は次式で求められることから、それぞれの反応率は表-3 のようになる。

$$y = \frac{C_0 - C_n}{C_0} \quad (3)$$

表-2 カルシウムイオン濃度の経時変化

試験ケース	初期 (mol/L)	18h 後 (mol/L)	24h 後 (mol/L)
ケース 1	0.1	0.03	0.05
ケース 2	1.0	0.75	0.81

表-3 反応率  $y$  の推定値

試験ケース	18h 後	24h 後
ケース 1	0.70	0.50
ケース 2	0.25	0.19

本研究におけるカルシウムイオンの初期濃度  $c$  は 0.87 (mol/l) であり、ケース 1 および 2 の中間の値であること、また、表-2 において 18 時間後に低下したカルシウムイオン濃度が 24 時間後に増加していることから、 $y$  値の推定には、ケース 1 および 2 における 18 および 24 時間後の 4 値を用い、 $y = 0.19 \sim 0.70$  とした。この  $y$  値を式(2)に代入して算出された推定値  $\phi_2/\phi_1$  は、次のようになった。

$$\frac{\phi_2}{\phi_1} = 0.98 \sim 0.99$$

以上のように求めた  $\phi_2/\phi_1$  の推定値と、前章で求めた実測値は良い一致を示した。よって、バイオグラウト供試体の間隙率の変化の評価に、X線CTおよびミクセルを考慮した対数ゆう度基準による閾値設定手法を用いた本手法は有効であることがわかった。そして、本手法は、バイオグラウト反応前後における1~2%というわずかな間隙率の変化の評価を適切におこなうことを可能としたことから、これより大きな間隙率の変化の評価も、本手法を用いることで適切におこなうことができることになる。

## 6. 結言

本研究では、まず、X線CTを用いてバイオグラウト供試体の間隙率の評価が可能な地盤材料について選定をおこなった。次に、選定された地盤材料について、ミクセルを考慮した対数ゆう度基準により閾値を選定する間隙率の評価手法を用い、反応前後の間隙率の変化を評価した。本研究を通して得られた知見は以下のようである。

本研究で用いた地盤材料の中で、間隙率の評価が可能と選定されたのは、粒径が0.50-0.71 mmであるガラスビーズであった。

初期状態供試体の間隙率  $\phi_1$  に対するグラウト処理済み供試体の間隙率  $\phi_2$  の比の推定値は  $\phi_2/\phi_1 = 0.98 \sim 0.99$  であり、一方、X線CTおよび間隙率の評価における本手法で求めた実測値は  $\phi_2/\phi_1 = 0.98$  と、両者は良い一致を

示した。よって、バイオグラウト供試体の間隙率の算出に本手法が有効であることがわかった。

## 参考文献

- 1) 川崎了, 村尾彰了, 広吉直樹, 恒川昌美, 金子勝比古: 微生物の代謝活動により固化する新しいグラウトに関する基礎的研究, 応用地質, 第 47 巻, 第 1 号, pp.2-12, 2006.
- 2) 加藤昌治, 高橋学, 金子勝比古: X線 CT 画像を用いた岩石の空隙率評価の試み, 情報地質, 第 19 巻, 第 2 号, pp.132-133, 2008.
- 3) 北本朝展, 高木幹雄: ミクセル密度を含む混合推定を用いたミクセルの面積占有率推定, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J81-D-II, No.6, pp.1160-1172, 1998.
- 4) 関田巖, 栗田多喜夫, 大津展之, ナビーアブデルマルク: 画像の量子化誤差を考慮したしきい値選定法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J78-D-II, No.12, pp.1806-1812, 1995.
- 5) 北本朝展: ミクセルの影響を考慮した最大ゆう度しきい値選定法, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. PRMU99-166, pp.7-14, 1998.
- 6) 増野陽一, 許玉福, 中井亮祐, 長谷川剛史, 中村慶子, 幸村基世, 長沼毅, 伊村智, 岩月輝希, 小林憲正, 三枝誠行, 佐藤皓, 嶋田和人, 白壁義久, 高野淑識, 高山健, 俵裕子, 橋本博文, 森田洋平, 保田浩志, 山下雅道, 吉田英一: 大線量 X線および Fe イオン照射の照射に対する放射線耐性微生物の生残に関する予察的研究, Space Utiliz Res, 24, pp.314-317, 2008.
- 7) 小林優矢: X線 CT 法によるバイオグラウト処理された供試体内部の評価, 北海道大学工学部環境社会工学科平成 20 年度卒業論文, 2009.
- 8) 東海林丈修: バイオグラウト改良土の力学的特性, 北海道大学工学部資源開発工学科平成 19 年度卒業論文, 2008.

## EVALUATION OF POROSITY OF BIOGROUTED SPECIMEN USING X-RAY CT METHOD

Yuya KOBAYASHI, Satoru OGATA, Masaji KATO, Toshifumi MUKUNOKI and Katsuhiko KANEKO

This study considers a method for evaluation of porosity of biogROUTED geomaterials. First, we tested some geomaterials to find suitable ones for evaluation of porosity by using micro-focused X-ray CT scanner. The results clarified that glass beads whose particle size was 0.50-0.71mm was suitable for evaluation of porosity. Second, we calculated the porosity of the glass beads by using a method for evaluation of porosity based on a maximum likelihood thresholding method considering the effect of mixels. The result showed that the method enables us to evaluate small change in porosity with great accuracy.