バイオグラウト処理された地盤材料を用いた 間隙率評価手法に関する検討*

小林 優 矢¹ 川 崎 了² 加 藤 昌 治³
棕 木 俊 文⁴ 金 子 勝 比 古⁵

Applicability of a Method for Evaluation of Porosity to BiogROUTed Geomaterials

Yuya KOBAYASHI^a, Satoru KAWASAKI^b, Masaji KATO^c,
Toshifumi MUKUNOKI^d and Katsuhiko KANEKO^e

- Graduate student, Division of Field Engineering for Environment, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Sapporo 060-8628, JAPAN
(Corresponding author E-mail: ykobayashi@geo-er.eng.hokudai.ac.jp)
- Associate Professor, Division of Field Engineering for Environment, Graduate School of Engineering, Hokkaido University
- Assistant Professor, Division of Field Engineering for Environment, Graduate School of Engineering, Hokkaido University
- Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, Kumamoto 860-8555, JAPAN
- Professor, Division of Field Engineering for Environment, Graduate School of Engineering, Hokkaido University

This study considers a method for evaluation of porosity of biogROUTed geomaterials. First, we visualized the internal structures of the specimens by using micro-focused X-ray CT scanner. We tested Souma sand, gum tips, plastic pellets, steel balls and glass beads as geomaterial to find suitable geomaterials for evaluation of porosity: geomaterials whose CT-number histogram was bimodal. The results clarified that one of the geomaterials, 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 ratio of the porosity of grouted geomaterial to that of ungrouted geomaterial was 0.98 to 0.99. On the other hand, the value estimated by the measurement of changes in concentration of calcium ion was 0.98. Thus, both values closely agreed. Therefore, this study clarifies that the method enables us to evaluate small change in porosity with great accuracy.

KEY WORDS: Porosity, Threshold, Mixel, BiogROUT, X-ray CT

1. は じ め に

地盤や岩盤の間隙率は、それらの供試体全体の体積に占める間隙体積の割合として定義される。それは、供試体の内部を定量的に特徴づける物理的性質を示すパラメータの一つであり、その評価は重要である。

バイオグラウト¹⁾の研究分野においても、以下に述べる理由でその評価は重要である。バイオグラウトとは、地盤や岩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ものであり、地盤や岩盤の改良工法の一つとして、現在、国内外で研究が進められている²⁻⁴⁾。ここで、炭酸カルシウムを主材料としたバイオグラウトに関する既往の研究について言及すると、バイオグラウト処理された供試体(以下、バイオグラウト供試体)の強度が期待される値に達していない⁵⁾。したがって、炭酸カルシウムの析出量の増加によるバイオグラウト供試体の強度の向上が現在の研究課題の一つとなっている。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間隙率を評価することで実現可能であると考えられる。

これまでの間隙率の評価に関する研究を岩石について言及すると、さまざまな方法で岩石の空隙率の測定が試みられている。そ

*2009年7月6日受付 2009年9月30日受理

- 学生会員 学士(工) 北海道大学大学院工学研究科環境フィールド工学専攻 修士課程学生
- 普通会员 博士(工) 北海道大学大学院工学研究科環境フィールド工学専攻 准教授
- 普通会员 学士(工) 北海道大学大学院工学研究科環境フィールド工学専攻 助教
- 普通会员 博士(工) 熊本大学大学院自然科学研究科社会環境工学専攻 准教授
- 普通会员 工学博士 北海道大学大学院工学研究科環境フィールド工学専攻 教授

[著者連絡先] FAX: 011-706-6325

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

キーワード: 間隙率, 閾値, ミクセル, バイオグラウト, X線CT

れらには、乾燥・含水飽和状態における重量を秤量する方法⁶⁾や、水銀圧入式あるいは窒素ガス吸着式のボロシメータによる方法⁷⁾がある。また、岩石試料の薄片を作成して、顕微鏡下における観察から空隙の存在割合を計測する方法もある。ただし、これらのいずれの方法も加熱や液体の圧入、あるいは試料の切断・研磨といった試料に対する擾乱の影響は無視できない。そこで、Kato et al.⁸⁾は、X線CT⁹⁾の非破壊・非擾乱の測定法に着目し、X線CT画像から岩石の間隙率の評価を試みた。Kato et al.⁸⁾の手法では、鉱物と空隙の閾値を、4章で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Kato et al.⁸⁾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、この微小な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、それより大きな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なると期待できる。また、本手法ではX線CTを用いるが、その特長は、供試体内部の間隙分布および間隙率が3次元かつ定量的に評価することができる点、さらに、非破壊測定であるため同一の供試体を用いて間隙分布および間隙率と力学的特性（強度や変形）との関係を調べることができる点である。ただし、本論文では、2次元かつ供試体の間隙率のみに着目し、その評価手法に関する内容について述べる。すなわち、供試体の間隙分布や、間隙分布および間隙率と力学的特性との関係については、別の論文で扱うことにする。

バイオグラウト供試体には、地盤材料および析出した炭酸カルシウムである「固体」と、その間隙を構成する溶液である「液体」が含まれる。間隙率を適切に評価するためには、X線CT測定によって得られるCT値分布において、固体と液体の山が分離した双峰型とならなければならない。部分体積効果⁹⁾を考慮すると、CT値分布が双峰型となるかどうかの判断は、次の4つのパラメータにより決定される。すなわち、①溶液の密度、②地盤材料の密度、③地盤材料の粒径および④ボクセルサイズである。しかし、X線CT測定に際してのボクセルサイズには下限値がある。さらに、溶液の密度を不可変であるとする、そのようなパラメータは他の2つ（②および③）となる。したがって、本研究ではこれらを踏まえ、間隙率の評価を実施する前に予備試験として、CT値分布が双峰型となる条件を満たすようなさまざまな地盤材料について検討をおこなった。そして、その条件を満たし、間隙率の評価が可能であるとされた地盤材料について、前述した手法で間隙率を算出し、その有効性を確かめた。

2. 実験方法

2・1 地盤材料の選定試験

2・1・1 地盤材料の種類 本研究に用いた地盤材料とその物性をTable 1に示す。実際にバイオグラウトの技術を適用する地盤を想定した、天然の地盤材料である相馬硅砂8号（以下、硅

Table 1 Properties of geomaterials.

Geomaterials	Density (g/cm ³)	Particle size (mm)
Souma sand	2.65	0.1(50% particle size)
Gum tips	1.15	2
Plastic pellets	1.53	φ 3×h4
Steel balls	7.87	1.0
Glass beads 1	2.50	0.105-0.125
Glass beads 2	2.50	0.50-0.71

Table 2 Constituents of grout solution.

1M Tris-HCl	100 (ml)
Glucose	3.0 (g)
Calcium nitrate four hydrate	23.6 (g)

砂）に加え、パラメータ（密度および粒径）の操作の容易さを考慮して、人工的な地盤材料すなわちゴムチップ、プラスチックペレット、スチール球、およびガラスビーズについて検討をおこなった。なお、ガラスビーズについては粒径が異なる2種類を用い、粒径の小さな順に、ガラスビーズ1、2とした。

2・1・2 供試体の作製 本研究では、バイオグラウト供試体の作製時に使用する微生物に関して、入手のしやすさおよび取り扱いの容易さを考慮して市販の顆粒状のドライイースト（日清フーズ株式会社製、日清スーパーカメラ）を用いた。以下、ドライイーストのことをイースト菌と呼ぶ。また、溶媒、有機栄養源およびカルシウム源として、それぞれ1M Tris-HCl、グルコース、硝酸カルシウム四水和物を用いた。

本試験に用いた供試体の具体的な作製手順を以下に示す。ただし、本試験では、間隙率の評価に適した地盤材料の選定のみを目的としているため、イースト菌を混入しなかった。

- 1) Table 2の配合に従い、1M Tris-HCl、グルコース、硝酸カルシウム四水和物を混合した。以下、これをグラウト溶液と呼ぶ。
- 2) 1)のグラウト溶液を各地盤材料と混ぜ、空気が混入しないようポリスチレン製の容器（口内径12.8mm、胴径21.0mm、高さ54.8mm）に入れた。ただし、地盤材料とグラウト溶液の分量は以下のとおりとした。すなわち、硅砂以外の各地盤材料については、地盤材料が容器の20～30mmの高さまで達するように地盤材料の分量を決定し、さらにこれが自重で完全にグラウト溶液に浸るようにグラウト溶液の分量を決めた。一方、硅砂については、グラウト溶液による硅砂の飽和度が90%程度となり、これらが容器の20～30mmの高さまで達するように硅砂とグラウト溶液の分量を決めた。

2・1・3 X線CT測定 2・1・2項のとおり作製した供試体を、マイクロフォーカスX線CTスキャナ（東芝製、TO SCANNER-30900μhd）を用いて断層の測定を実施した。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、本スキャナの下限值である1画素サイズ5μm×5μmおよびスライス厚16μm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。

2・2 間隙率評価のデータ収集のための試験

2・2・1 地盤材料 本試験では、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、2・1節の試験で得られたCT値分布が双峰型となり、間隙率の評価が可能であると判断された地盤材料を用い、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。

2・2・2 供試体の作製 バイオグラウトの反応前後における測定の際には、同一の供試体について反応前後を測定することが望ましい。しかし、Mashino et al.¹⁰⁾によると、本研究で使用する X 線の照射エネルギーにより、供試体内部のイースト菌が死滅する可能性が高いことが予想された。反応前の供試体の測定に伴う X 線の照射によりイースト菌が死滅すると、以後反応が進まず反応後の測定結果に影響を与えることとなる。そこで、本研究では、バイオグラウトの反応前後を測定するための供試体を別途作製し、反応前後で異なる供試体を測定することにした。以下、バイオグラウトの反応前、反応後を測定するために作製する供試体を、それぞれ初期状態供試体、グラウト処理済み供試体と呼ぶ。グラウト処理済み供試体については、イースト菌を混入し、さらに 25℃で 24 時間の静置をおこなった。グラウト処理済み供試体の作製方法を以下に示す。

- 1) 2・1・2 項と同様な方法でグラウト溶液を作製した。
- 2) 1) のグラウト溶液に、イースト菌を入れて混ぜた。
- 3) 2) のグラウト溶液を地盤材料とともに、空気が混入しないようポリスチレン製の容器（口内径 12.8mm、胴径 21.0mm、高さ 54.8mm）に入れた。ただし、地盤材料とグラウト溶液の分量は 2・1・2 項と同様である。
- 4) 3) の容器を、25℃に設定したインキュベータに入れ、24 時間反応させた。

一方、初期状態供試体は、2・1・2 項と同様に作製し、イースト菌を混入しなかった。初期状態供試体の作製の際にイースト菌を混入しなかったのは、イースト菌混入後から X 線 CT 測定までの間にイースト菌による反応が進むのを防ぐためである。

また、後に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 つずつ作製した。

2・2・3 X 線 CT 測定 2・2・2 項のとおり作製した各供試体に関して、マイクロフォーカス X 線 CT スキャナを用いて断層の測定をおこなった。信頼性を高める目的で、各供試体とも下部から上部まで 5mm 間隔で 4 断層を測定した。スキャンモード、分解能（ボクセルサイズ）および照射 X 線の管電圧・管電流は、2・1・2 項と同様にした。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。

3. 実験結果および考察

3・1 地盤材料の選定試験

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 値分布の形状および間隙率の評価への適性を Table 3 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⁹⁾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 2・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。

Table 3 Histogram type and suitability for evaluation of porosity of geomaterials.

Geomaterials	Distribution profile	Suitability for evaluation of porosity
Souma sand	Monomodal	×
Gum tips	Monomodal	×
Plastic pellets	Monomodal	×
Steel balls	Bimodal	×
Glass beads 1	Monomodal	×
Glass beads 2	Bimodal	○

Fig.1 X-ray CT images for each specimen of glass beads.

Fig.2 CT number histogram for each specimen of glass beads.

3・2 間隙率評価のデータ収集のための試験

3・2・1 測定断層画像および CT 値分布 2・2 節のとおり、ガラスビーズを用いた供試体の全測定断層数は、バイオグラウト反応前後で、共に 12（供試体数 3 × 断層数 4）である。これらのうち、初期状態およびグラウト処理済み供試体の断層画像の一例を Fig. 1 に示す。同図において、白色～明灰色の部分がガラスビーズを、黒色～暗灰色の部分が溶液を表している。

また、測定 12 断層の平均 CT 値分布を Fig. 2 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⁹⁾、Fig. 2 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ことから、気相の頻度は Fig. 2 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、Fig. 2 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にする。

3・2・2 信頼性に関する検討 2・2 節で前述したとおり、本研究では、X 線 CT 測定の際に反応前後で同一の断層を測定することができないため、12 断層を測定し平均をとることでその信頼性を高めようとした。間隙率の算出をおこなう前に、本項では、12 断層の測定により実際にその信頼性が高まったかについ

Fig. 3 Partial enlargements of CT number histogram in Fig. 2.

て検討する。

Fig. 2 に示した CT 値分布に関して、反応前後の変化を視覚的に把握可能とするために、CT 値が約 $-350 \sim -100$ 、 $-50 \sim 250$ および $380 \sim 550$ の区域を拡大率一定で拡大した図を、それぞれ Fig. 3 の (a), (b) および (c) に示す。同図 (b) より、CT 値が約 $-50 \sim 250$ の区域では、反応前後で CT 値の頻度の明瞭な変化がみられる。すなわち、溶液に対応する CT 値が約 $-50 \sim 80$ の区域では、グラウト処理済み供試体の CT 値の頻度が低下し、ガラスビーズに対応する CT 値が約 $80 \sim 250$ の区域ではグラウト処理済み供試体の CT 値の頻度が増加していることがわかる。これは、溶液中に炭酸カルシウムが析出したことによる影響と考えられ、供試体内で密度上昇が起こったことを示唆するものである。ただし、炭酸カルシウムの密度は 2.7 g/cm^3 であり、ガラスビーズの密度 2.50 g/cm^3 よりも大きい、析出した炭酸カルシウムはボクセルサイズ以下であったため、部分体積効果により、析出した炭酸カルシウムの頻度はガラスビーズのピークよりも CT 値の小さい約 $80 \sim 250$ の区域に分布し、この区域の CT 値分布に影響を与えたと考えられる。

これに対し、同図 (a) および (c) の CT 値が約 $-350 \sim -100$ および $380 \sim 550$ の両区域では、CT 値が約 $80 \sim 250$ の区域に比して反応前後の変化は小さく、良い一致を示している。この両区域は、炭酸カルシウムに対応する CT 値の区域ではなく、それぞれ溶液およびガラスビーズのみの頻度を表している区域と考えられる。すなわち、この両区域は炭酸カルシウムの析出が起こったとしても、CT 値の頻度はそれによる影響を受けない区域であると考えられる。

以上のことより、12 断層の平均の CT 値分布においては、炭酸カルシウムの析出による CT 値の頻度の変化に比して、断層内のガラスビーズと溶液の頻度の変化は反応前後で小さく、一定であったと考えることができる。なお、12 断層の平均の CT 値分布の反応前後における比較を行う前には、1 断層のみの CT 値分布

Fig. 4 Imaging process of real image.

の比較を行ったが、このときは断層内のガラスビーズと溶液に対応する CT 値の頻度は、良い一致を示さなかった。測定断層数を 12 としたのは、それらが良い一致を示すよう検討を行った結果である。すなわち、12 断層の測定により、断層内のガラスビーズと溶液の頻度の差は反応前後で小さくなり、信頼性を高めることができたといえる。ゆえに、次章の間隙率の評価の際には、これら全 12 断層の測定結果を用いて間隙率の評価をおこなう。

4. 間隙率の評価に関する検討

4・1 閾値の設定

4・1・1 閾値の設定手法 前述したように、ガラスビーズを用いたバイオグラウト供試体には、ガラスビーズおよび析出した炭酸カルシウムである固体と、その間隙を構成する液体が含まれる。間隙率を適切に評価するためには、X 線 CT 測定によって得られた双峰型の CT 値分布において、固体と液体を分ける閾値の設定が必要である。X 線 CT 画像における閾値の選定に、Kato et al.⁸⁾ はミクセルを考慮した対数ゆ度基準による手法を用いた。以下では、まず本手法の有効性を述べ、次にその具体的な選定プロセスについて概説する。

Fig. 4 は実像を画像化する手順を模式的に示した図である。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、部分体積効果により、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、二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^{11,12)}。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

Fig.5 Concept of threshold setting process.

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いる。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⁸⁾。さらに、閾値の算出には対数ゆう度基準を用いており、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。以下では、本手法の具体的な閾値の算出法について述べる。本研究では、クラス1, 2のCT値 x の確率密度関数 $p_i(x)$ は(1)式で表される正規分布に従うものとする。一方、クラス3のCT値 x の確率密度関数 $M(x)$ は(2)式で与えられるものとする¹²⁾。

$$p_i(x) = N_i(x; \mu_i, \sigma_i^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp\left\{-\frac{(x_i - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right\} \quad (i=1,2) \quad (1)$$

$$M(x) = \frac{1}{B(m,n)} \int_0^1 a^{m-1} (1-a)^{n-1} N(x; \mu_a, \sigma_a^2) da \quad (2)$$

ここで、(1)式の μ_i , σ_i^2 はそれぞれ x の平均、分散を表している。また、(2)式の a はクラス1の物質の面積占有率であり、ベータ関数 $B(m, n)$, $M(x)$ の平均 μ_a と分散 σ_a^2 は次式(3)～(5)で表される。なお、本研究では変数 m, n は簡単化のため、 $m=1, n=1$ とする。

$$B(m,n) = \int_0^1 a^{m-1} (1-a)^{n-1} da \quad (3)$$

$$\mu_a = a\mu_1 + (1-a)\mu_2 \quad (4)$$

$$\sigma_a^2 = a^2\sigma_1^2 + (1-a)^2\sigma_2^2 \quad (5)$$

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Fig. 5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。(1)～(5)式に従えば、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。

以下に、閾値 t_1 および t_2 の算出手順について述べる。

- 1) 測定によって得られたCT値に対して階調変換をおこない、256階調の画像データへ変換する。
- 2) 上記の手順1)のデータを用い、Table 4にしたがって対数ゆう

Table 4 Correspondence between properties of classes and log likelihood functions¹³⁾.

		Variances of each class (σ_k^2)	
		nearly equal	different
Occurrence probability of each class (ω_k)	nearly equal	$J_C(t) = \ln \frac{1}{\sigma}$	$J_D(t) = \sum_{k=1}^M \tilde{\omega}_k \ln \frac{1}{\tilde{\sigma}_k}$
	different	$J_Q(t) = \sum_{k=1}^M \tilde{\omega}_k \ln \frac{\tilde{\omega}_k}{\sigma}$	$J_J(t) = \sum_{k=1}^M \tilde{\omega}_k \ln \frac{\tilde{\omega}_k}{\tilde{\sigma}_k}$

度 J_J が最大となる閾値 t_1 および t_2 を選定する。

- 3) 上記の手順2)において、 $t_1 \approx t_2$ となった場合には、Table 4の対数ゆう度 J_D が最大となる閾値 t_1 および t_2 を選定する。

Table 4において、 $\tilde{\sigma}_k$ はクラス k の分散であり、 M は総クラス数で、本研究では $M=3$ である。また、クラス k の生起確率 $\tilde{\omega}_k$ と $\tilde{\sigma}_k^2$ は、それぞれ次のように表される。

$$\tilde{\omega}_k = \frac{\text{クラス}k\text{に存在する画素数}}{\text{全画素数}} \quad (6)$$

$$\tilde{\sigma}_k^2 = \sum_{k=1}^M (\tilde{\omega}_k \sigma_k^2) \quad (7)$$

ここで、上記の手順2)および3)について、さらに詳しく述べる。まず、 t_1 および t_2 をパラメータとしてクラス k の生起確率 $\tilde{\omega}_k$ とクラス k の分散 $\tilde{\sigma}_k$ を求める。次に、本研究で扱う分布のクラスの性質を考えると、各クラスの分散 $\tilde{\sigma}_k$ と生起確率 $\tilde{\omega}_k$ が両方異なるので、Table 4の J_J を用いるのが望ましい^{13,14)}。したがって、 $\tilde{\sigma}_k$ と $\tilde{\omega}_k$ の値を J_J に代入する。そして、 t_1 および t_2 を $0 < t_1 < t_2 < 256$ の区域内で変化させ、 J_J が最大となったときの t_1 および t_2 を閾値として選定する。

ただし、 t_1 および t_2 の局所解に注意が必要である¹⁴⁾。すなわち、 J_J 基準での閾値の選定の結果、 $t_1 \approx t_2$ となることがあるが、これは閾値として不適当である。したがって、 $t_1 \approx t_2$ となったときには、もう1つの対数ゆう度 J_D を用いて前述した J_J の場合と同様に閾値 t_1 および t_2 を選定し直す必要がある。

4・1・2 閾値の設定 本研究では、前述の手法による閾値の算出を、測定した各断層に対して個別におこなった。測定した全ての断層は、 J_J 基準での閾値の選定の結果 $t_1 \approx t_2$ となったため、 J_D 基準により算出した。

本手法による閾値設定の一例として、Fig. 1(a)に示した断層における閾値を、測定頻度分布とともにFig. 6に示す。ただし同図の横軸は、本手法を適用した際に用いた256階調表示であり、CT値を階調変換した値である。

4・2 間隙率の算出

4・2・1 間隙率の算出法 4・1節で算出された閾値から間隙率を算出する方法について以下に述べる。

各CT画像において、液体の純粋画素をクラス1、固体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。ミクセルであるクラス3の区画には、標準化・量子化の際に、液体および固体の二つの物質が含まれていたことになる。そして、それらがクラス3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。すなわち、クラス1, クラス2, クラス3の面積占有率をそれぞれ $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ とすると、クラス3はクラス1とクラス2にそれぞれ $\alpha_1\alpha_3 / (\alpha_1 + \alpha_2)$, $\alpha_2\alpha_3 / (\alpha_1 + \alpha_2)$ と分割できる。したがって、間隙率 ϕ は次式のように求められる。

$$\phi = \frac{\alpha_1 + \frac{\alpha_1\alpha_3}{\alpha_1 + \alpha_2}}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3} = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (8)$$

Fig.6 A result of threshold setting.

4・2・2 間隙率の算出 各クラスの面積占有率は、4・1・2項で算出した閾値を用いて、頻度の積算によって求めた。そして、求めた面積占有率を(8)式に代入し、各断層における間隙率を求めた。さらに、その間隙率に関して、反応前後の供試体でそれぞれ12断層の平均値を算出した。各クラスの面積占有率および間隙率の12断層の平均値をTable 5に示す。ここで、初期状態供試体の間隙率の平均値 ϕ_1 に対するグラウト処理済み供試体の間隙率の平均値 ϕ_2 の比 ϕ_2/ϕ_1 を求めると次のようになった。

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

このように、 ϕ_2/ϕ_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、3・2・2項で前述したFig. 2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、Fig. 2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。

4・3 推定値の算出と比較

前節で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 ϕ_2/ϕ_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 ϕ_1 に対するグラウト処理済み供試体の間隙率 ϕ_2 の比 ϕ_2/ϕ_1 は次式で算出される¹⁵⁾。

$$\frac{\phi_2}{\phi_1} = \frac{cy}{27} \quad (9)$$

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、Shoji⁵⁾の研究結果を用いた。Shoji⁵⁾によると、カルシウムイオン濃度0.1mol/lおよび1mol/lのバイオグラウト供試体を25℃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Table 6のようになる。ただし、同表の測定は溶液のみで実施した点に注意が必要である。ここで、初期のカルシウムイオン濃度を C_0 、 n 時間後のカルシウムイオ

Table 5 Average area occupancies and porosities for each specimen.

	Area occupancy			Porosity
	Fluid (α_1)	Solid (α_2)	Mixel (α_3)	
UngROUTED	0.295	0.551	0.154	0.349
Grouted	0.288	0.557	0.155	0.340

Table 6 Changes in concentration of calcium ion with time⁵⁾.

	Concentration of calcium ion(mol/l)		
	Initial state	18 hours later	24 hours later
Case 1	0.1	0.03	0.05
Case 2	1.0	0.75	0.81

Table 7 Rates of reaction of the cases in Table 6.

	18 hours later	24 hours later
Case 1	0.70	0.50
Case 2	0.25	0.19

ン濃度を C_n とすると、Table 6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Table 7のようになる。

$$y = \frac{C_0 - C_n}{C_0} \quad (10)$$

本研究におけるカルシウムイオンの初期濃度 c は0.87mol/lであり、ケース1および2の中間の値であること、また、Table 6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(9)式に代入して算出された推定値 ϕ_2/ϕ_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 ϕ_2/ϕ_1 の推定値と、4・2節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。

さらに、前述のように、本研究では閾値の算出を J_f 基準ではなく J_D 基準によっておこなったが、この場合でも閾値の算出が適切におこなえることがわかった。

5. まとめと今後の課題

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を以下にまとめる。

- 1) 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0.50-0.71mmであるガラスビーズであった。
- 2) 初期状態供試体の間隙率 ϕ_1 に対するグラウト処理済み供試体

の間隙率 ϕ_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、パ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。

今後は、人工的な地盤材料を用いてその粒径および密度を詳細に変化させ、間隙率の評価の可/不可との関係式を求める必要がある。この関係式が確立されれば、これを用いて天然の地盤材料の場合も、間隙率の評価が可能であるかについての判断ができることとなる。そして、その関係式によって間隙率の評価が可能とされた地盤材料については、その地盤材料を含む供試体の間隙率を本研究で用いた手法で算出することができることとなる。

前述したように、1章で示したような他の間隙率の評価手法に比して本手法は、X線CT法を用いているため非破壊・非擾乱の測定が可能であるという特長を持つ。したがって、例えば間隙率の変化と強度との関係を把握したい場合においては、間隙率の測定と強度試験の両方が必要になるが、間隙率の算出に本手法を用いれば、間隙率の算出と強度試験で同一の供試体を用いることができることとなる。パイオグラウト供試体においても、強度の向上を目指すにあたり、間隙率の変化と強度との関係を把握する必要が今後生じてくる。したがって、そのような場合に本手法を用いることは意義があると考えられる。

謝辞 本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)(課題番号:18300304,研究代表者:川崎 了)により行われた。末筆ながらここに記して、深甚なる感謝の意を表する次第である。

References

- 1) S. Kawasaki, A. Murao, N. Hiroyoshi, M. Tsunekawa and K. Kaneko: Jour. Japan Soc. Eng. Geol., **47** (2006), 2-12.
- 2) J. T. DeJong, M. B. Fritzges and K. Nusslein: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, **132** (2006), 1381-1392.
- 3) V. S. Whiffin, L. A. van Paassen and M. P. Harkes: Geomicrobiology Journal, **24** (2007), 417-423.
- 4) K. Kiyota, A. Murakami and S. Kawasaki: Jour. Japan Soc. Eng. Geol., **50** (2009), 70-78.
- 5) H. Shoji: Graduation thesis (2008), Hokkaido University.
- 6) U. Yamaguchi and Y. Nishimatsu: *Ganseki Rikigaku Nyumon*, (Tokyo Daigaku Syuppan Kai, Tokyo, 1991), pp.16-18.
- 7) M. Kawamura and S. Chatterji: *Concrete no Zairyo Kagaku*, (Morikita Syuppan Kabushiki Kaisya, Tokyo, 2002), pp.77-79.
- 8) M. Kato, M. Takahashi and K. Kaneko: Geoinformatics, **19** (2008), 132-133.
- 9) M. E. Coles: Ch. 8 X-ray imaging, In: *Method in the Physics of Porous Media* (P.-z. Wong, Ed.), (Academic Press, San Diego, 1999), pp.301-336.
- 10) Y. Mashino, N. P. Hua, R. Nakai, T. Hasegawa, K. Nakamura, K. Yukimura, T. Naganuma, S. Imura, T. Iwatsuki, K. Kobayashi, M. Saigusa, H. Sato, K. Shimada, Y. Shirakabe, Y. Takano, K. Takayama, H. Tawara, H. Hashimoto, Y. Morita, H. Yasuda, M. Yamashita and H. Yoshida: Space Utiliz Res, **24** (2008), 314-317.
- 11) A. Kitamoto and M. Takagi: Trans. IEICE, **J81-D-II** (1998), 2582-2597.
- 12) A. Kitamoto and M. Takagi: Trans. IEICE, **J81-D-II** (1998), 1160-1172.
- 13) I. Sekita, T. Kurita, N. Otsu and Nabih N. Abdelmalek: Trans. IEICE, **J78-D-II** (1995), 1806-1812.
- 14) A. Kitamoto: A maximum likelihood Thresholding methods considering the effect of mixels, **PRMU99-166** (1999), 7-14.
- 15) Y. Kobayashi: Graduation thesis (2009), Hokkaido University.