

X線CT法を用いた気泡混合土の内部構造の画像解析

熊本大学 学生会員 ○松元秀平 正会員 椋木俊文 佐藤宇紘
鹿島建設(株) 正会員 永谷英基 川野健一 劉偉晨

1. はじめに

気泡を利用した地盤掘削は、気泡のベアリング効果¹⁾による掘削土の流動性の向上や排土後において消泡による排土量の減容化など多くの利点が挙げられ、地盤掘削工法として利用が広まっている¹⁾。現場で気泡を適用する際は、気泡が安定する最適発泡倍率と時間経過に伴う消泡がおよぼす内部構造の変化を定量評価することが重要である。そこで、本研究では、X線CT法を用いて、気泡混合土の内部を非破壊で3次元可視化し、画像解析により気泡の空間分布を定量評価する。また、発泡倍率の違い及び消泡による内部構造への影響について検討する。

2. 実験概要

(1) 気泡の作製

気泡は起泡剤希釈液と空気から構成されている。起泡剤希釈液を何倍に発泡させて気泡を作製したか（発泡倍率の調整）が、気泡の特性に影響を与え、高発泡倍率になると、均一で細かく安定した泡になることが分かっている²⁾。本研究では、文献3)を参考に発泡倍率10倍と、より安定性が期待される20倍の気泡を作製した。起泡剤は実施工で使用している高性能起泡剤を用いた。また、起泡剤の濃度を上げないと発泡倍率も上がらないため、起泡剤の希釈液濃度については、発泡倍率10倍では濃度0.5%、20倍は5.0%の値をそれぞれ採用した。

(2) 気泡混合土作製と μ CT撮影

珪砂5号を母材として、気泡を混ぜない無処理湿潤土、発泡倍率10倍及び20倍の気泡混合土の計3種類を作製した。含水比は均質な気泡混合土を作製できる10%を試みたが、CT画像から水と気泡の区別が困難であった。そこで、水の代わりにX線吸収量が高い濃度20%のヨウ化カリウム水溶液(以下、KI溶液)を含水比10%となるように添加した。また、気泡混合土作製では、想定地盤の湿潤密度を 1.8 g/cm^3 として、その湿潤土の30%の体積の泡を加え、気泡注入率を調整した。そして、各々の試料をバイアル瓶(内径30mm×高さ70mm)に乾燥密度 1.45 g/cm^3 になるように瓶底を叩いて入れて供試体を作製した。X線CT撮影は、供試体中心部分($\phi 12\text{ mm} \times h 10\text{ mm}$)を対象に供試体作製直後と24時間後に実施した。撮影条件は、管電圧125kV・管電流400 μA ・一画素サイズ12 μm である。

3. 画像解析概要

X線CT画像解析では、供試体内部の空隙分布を評価できる。図-1は、空隙径分布及び空隙間距離分布の概念図を示している。3次元空隙径分布とは、二値化された空隙の中心軸(medial axis)を求めて、この軸上にあるすべてのボクセルにおいて球(ボクセル)を拡張していき、二点が接触した時点の球径を算出するアルゴリズムにて、空隙の局所的な大きさを算出する方法である。3次元空隙間距離分布とは、二値化された空隙以外の領域に球を当てはめていき、空隙間の局所的な幅を算出する方法である。空隙間距離分布は、空隙(気泡)の分散状態を評価する際に有効である。[空隙]と[土粒子とKI溶液]の領域分割するための二値化手法には大津法⁴⁾を適用した。解析範囲は、供試体中心部分($\phi 12\text{ mm} \times h 10\text{ mm}$)である。

4. CT画像と画像解析結果・考察

(1) 無処理湿潤土と気泡混合土の比較

図-2は、各条件の3次元CT画像であり、灰色部分が土粒子、白色部分がKI溶液、黒色部分が空隙(気泡)を示している。図-2(a)と図-2(b)、(c)を比較すると、無処理湿潤土は複雑な空隙形状をしているが、気泡混合土は

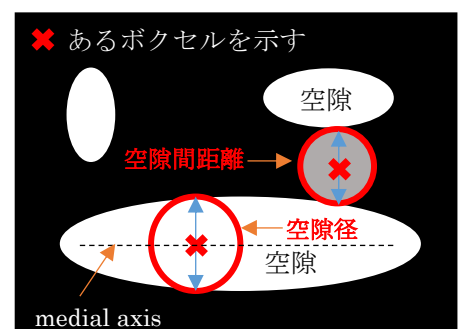


図-1 画像解析の概念図

キーワード 気泡, ベアリング効果, 気泡掘削工法, X線CT, 発泡倍率

連絡先 〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪2-39-1 TEL 096-342-3691

土粒子間の間隙中に球形の気泡がまんべんなく分布していることが分かる。この状態がベアリング効果¹⁾を発揮し、分布する微小な気泡により土粒子間の摩擦を低減させ、含水比が小さくても土の流動性を確保することができると考えられる。

(2) 発泡倍率 10 倍と 20 倍の比較

図-2(b)と図-2(c)を比較すると、発泡倍率 10 倍より 20 倍の方が小さい気泡が多く分布していることが分かる。図-3 は 3 次元空隙径分布、図-4 は 3 次元空隙間距離分布と二値化画像を示している。図-3 から、発泡倍率 10 倍より 20 倍の方が空隙径の小さい部分が多くなっている。一つ一つの気泡の大きさが小さい方が、消泡しにくい安定した気泡となることから²⁾、20 倍の方が安定した気泡であると考えられる。また、図-4 から、発泡倍率 10 倍より 20 倍の方が空隙間距離の小さい部分が多くなっており、20 倍の方が間隙中に存在する気泡の分散度合いが大きいことが示されている。したがって、発泡倍率 20 倍の条件は 10 倍よりも気泡によるベアリング効果¹⁾をより発揮し、流動性のある気泡混合土を作製できると考えられる。

(3) 時間経過に伴う内部構造の変化

図-2(c)と図-2(d)を比較すると、時間経過で微小な気泡が少なくなり、一つ一つの気泡が結合し、大きくなっていることが定性的に分かる。図-3 は、時間経過で気泡混合土の空隙径が大きくなっている傾向を示していることが分かる。これは、気泡の合一による現象で、土粒子間に分布していた微小な気泡が時間経過とともに一つ一つが重なって大きくなっていることを意味する³⁾。更に時間が経過すると消泡し、ベアリング効果¹⁾が消失して気泡混合土の流動性の低減や減容化につながるものが想定される。

5. まとめ

X 線 CT 画像から、土粒子間に分布している気泡の様子を非破壊で観察することができた。また、3 次元空隙径分布および空隙間距離分布を求めることで、空隙(気泡)の大きさや分布状況を定量評価することができた。

参考文献

- 1) 安井利彰, 川島要一, 赤木寛一, 近藤義正, 土屋敦雄: 気泡掘削工法を適用した柱列式ソイルセメント壁の発生汚泥量低減効果
- 2) Yuanli Wu, Michael A. Mooney, Minsu Cha: An experimental examination of foam stability under pressure for EPB TBM tunneling, *Tunnelling and Underground Space Technology*77, pp80-93, 2018
- 3) 川野健一, 吉迫和生, 佐藤一成, 瀧川信二, 吉田智哉: 気泡シールド工法に用いる気泡の圧力下における性状(その2: 気泡単体), 土木学会第 75 回年次学術講演会概要集, 2020.
- 4) 財団法人 画像情報教育振興協会: デジタル画像処理, pp.174-176, 2006
- 5) 小山内州一: 入門講座 泡の化学, オレオサイエンス 第 1 巻第 8 号, 2001

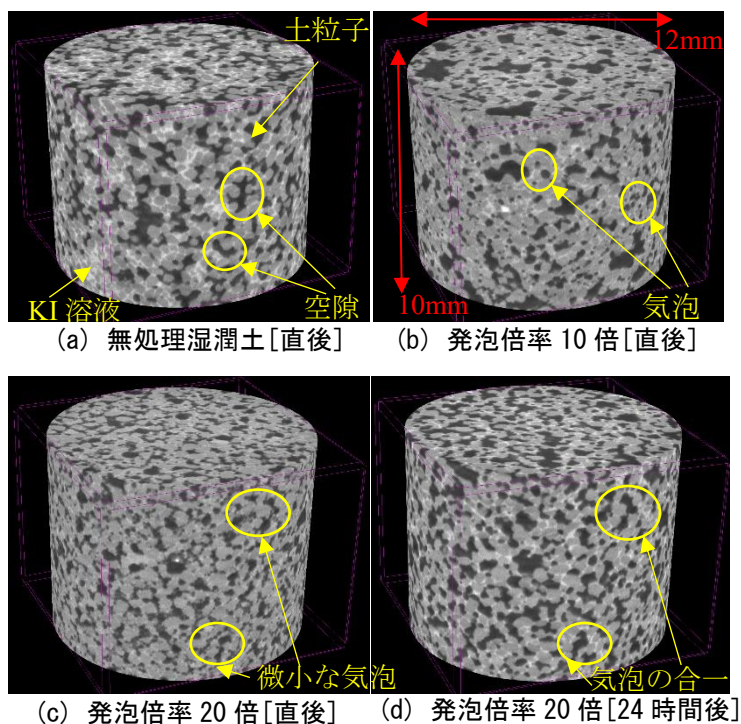


図-2 各条件の 3 次元 CT 画像

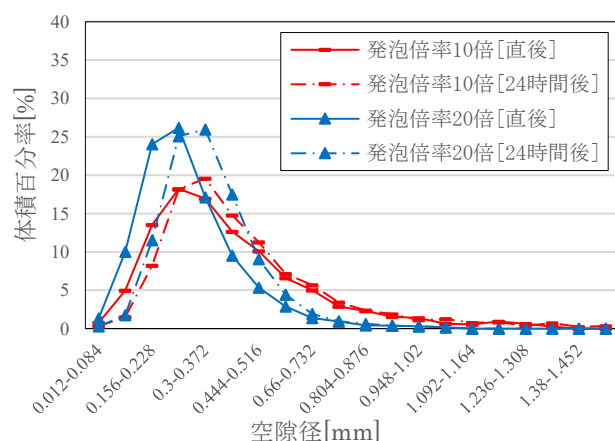


図-3 3次元空隙径分布

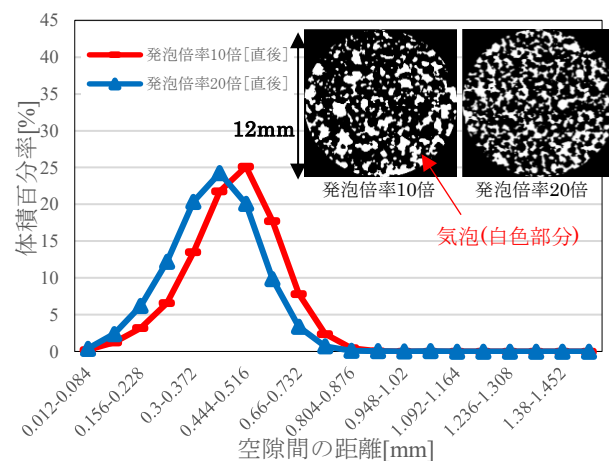


図-4 3次元空隙間距離分布