

X 線 CT を用いた発泡倍率が異なる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 羊嘉儀 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、気泡の最適発泡倍率が検討されており、発泡倍率の違い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は重要である。そこで、本研究では、X 線 CT 法および画像解析を用いて、気泡混合土の内部を非破壊で 3 次元可視化し、気泡の分布情報を評価する。

2. 発泡倍率 (FER)

写真 1 は気泡の顕微鏡写真である。気泡は起泡剤希釈液と空気から成っており、大小異なる球体が密集してできている。また、時間経過によって一つ一つの気泡が結合し、大きくなる。気泡の特性に影響を与える発泡倍率 FER(Foam Expansion Ratio)は、以下の式で定義されている。

$$FER = \frac{V_{all}}{V_{liq}}$$

V_{all} は泡の全体積、 V_{liq} は泡に含まれる希釈液の体積を示す。発泡倍率が高くなると、均一で細かい気泡となり、安定した気泡になる²⁾。そこで、既往の文献³⁾を参考に FER=10 と、気泡のさらなる安定性が期待される FER=20 で気泡混合土を作製する。また、起泡剤は実施工で使用する三洋化成工業製のレベルフローを用いた。

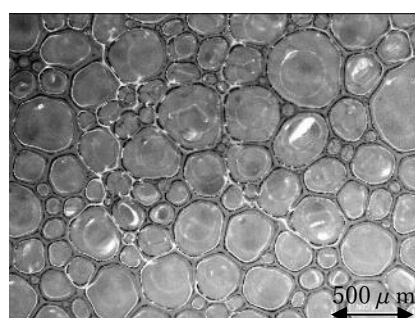


写真 1 気泡の顕微鏡写真



写真 2 FER=20

3. 気泡混合土作製とマイクロ CT 撮影

表 1 は CT 撮影を行った 3 つの試料の諸元である。母材土は珪砂 5 号を使用した。気泡による間隙構造の変化を見るために、無処理湿潤土(Keisa5)も作製した。均質な気泡混合土を作製するには、適切な湿潤状態にする必要があるため、予備実験で水と気泡の分離が生じないことを確認できた含水比 10%の条件を採用した⁴⁾。しかしながら、今回 CT 画像から気泡を見やすくするために、乾燥試料の 12.5%の質量に相当する濃度 20%のヨウ化カリウム水溶液(以下、KI 溶液)を添加した。起泡剤の希釈液濃度については、濃度を上げないと発泡倍率も上げられないため、表 1 の値を採用した。また、気泡注入率は、想定地盤湿潤密度を $1.8[\text{g}/\text{cm}^3]$ として、その湿潤土の 30%の体積の泡を加えた。そして、Keisa5, FER=10, FER=20 の計 3 つの試料を各々バイアル瓶($\phi 35\text{mm} \times h70\text{mm}$)に 3 層にわたって、計 15 回(3 層 $\times$ 5 回)瓶底を叩いて入れた(写真 2)。そして、供試体の中心部分($\phi 12\text{mm} \times h10\text{mm}$)を対象に供試体作製直後と 24 時間後で CT 撮影を行った。撮影条件は、管電圧 125kV・管電流 $400\mu\text{A}$ ・画素サイズ $12\mu\text{m}$ である。

表 1 各供試体諸元

サンプル名	Keisa 5	FER=10	FER=20
起泡剤濃度[%]	泡なし	0.5	5.0
気泡注入率[%]	泡なし	30	30

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 1 は、各条件の供試体作製直後と 24 時間後の水平断面 CT 画像である。気泡混合土の間隙形状は、無処理湿潤土と比較すると、土粒子間の間隙中に円形の気泡が多く分布していることが確認できた。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できる状態が、ベアリング効果¹⁾である。

(2) 供試体作製直後の FER=10 と 20 の比較

図 1 の CT 画像を対象に大津法⁵⁾を適用して、気泡による空隙とそれ以外を分ける二値化処理を行った。この二値化画像に対し、独立した気泡による空隙のみの解析を行い、体積球相当径別の気泡の数を求めた結果と FER=20[直後]の二値化した画像を図 2 に示す。作製直後において、FER=10 と比較して FER=20 の方が小さい気泡が多く、大きい気泡が少ない。均一で細かい泡が安定していることから²⁾、FER=20 の方が FER=10 と比較し、流動性が高い気泡混合土を作製することができると考えられる。

(3) 供試体作製直後と 24 時間後の比較

図 1 より、作製直後と 24 時間後に注目すると、無処理湿潤土の間隙構造はほとんど変化していないが、気泡混合土は一つ一つの気泡が結合し、大きくなっていることが分かる。図 2 から、FER=10 及び 20 も作製直後と比較して 24 時間後は小さい気泡が少なくなり、大きな気泡が多くなっていることが分かる。これが、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り、さらなる時間経過に伴って消泡することで、ベアリング効果¹⁾が消失して、土粒子間の摩擦が増大し、気泡混合土の流動性低減につながると考える。

5. おわりに

今後の課題として、本研究では珪砂 5 号のみの実験であったため、他の地盤材料に対しても同じような結果になるのか検証する。

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 Technology77, 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) 近藤義正, 仲山貴司, 赤木寛一 : 掘削土砂に気泡と水を添加した地盤掘削用安定液の開発と適用, 土木学会論文集 C, Vol.64, pp.505-518, 2008
- 5) 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

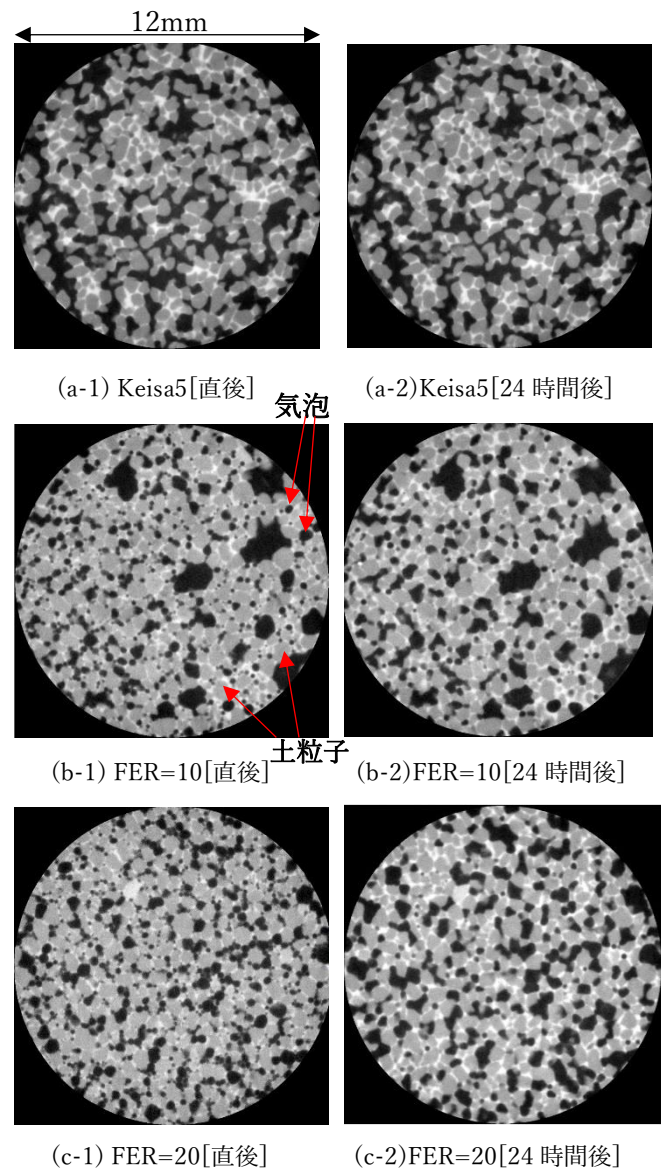


図 1 水平断面 CT 画像
(黒 : 空隙、グレー : 珪砂 5 号、白 : KI 溶液を示す。)

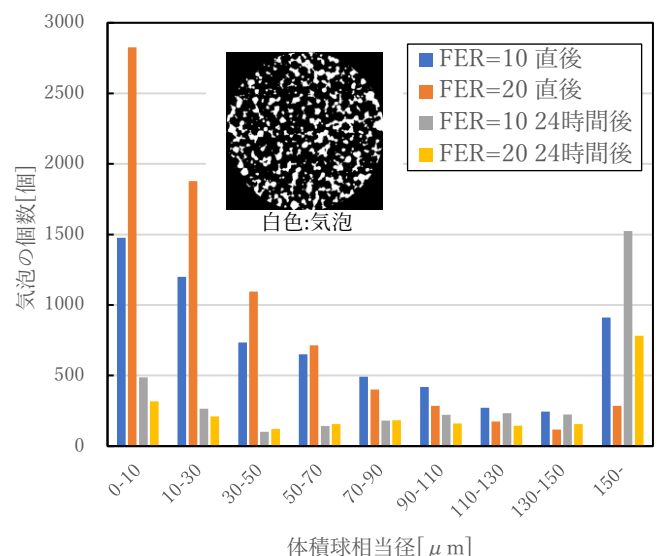


図 2 体積球相当径別気泡の個数