

## ナノ X 線 CT を用いた気泡混合ベントナイトミルク中の気泡の画像解析

熊本大学 学生会員 ○庄司信彦 正会員 椋木俊文  
鹿島建設(株) 正会員 永谷英基 川野健一 劉偉晨

### 1. はじめに

近年、トンネル施工における地盤掘削で掘削土に気泡を混合させる気泡掘削工法が注目されている。その長所としては、掘削土の流動性向上、消泡による排土量の減容化が挙げられる。しかし、夜間や土日に工事が休止することで、消泡による土砂と気泡の分離が起きるため、使用される気泡には土砂の間隙中で長期間消泡しない性能が求められる。著者らは、豊浦砂と発泡倍率を変えた気泡を混合させ、マイクロ X 線 CT を使って間隙中の気泡の状態を可視化し、時間経過に伴う気泡の状態変化を分析してきた<sup>1)</sup>。その結果、砂質土の場合、気泡が土粒子表面に接すると消泡しやすいため、土粒子を保護するような状況を作ることが有用であるとわかってきた。そこで次に保水性が高い高含水比状態のいわゆるベントナイトミルクを適用することに着目した。

本研究では、気泡混合ベントナイトミルク試料を作製し、ナノ X 線 CT 撮影技術によって気泡及び気泡混合土の内部構造を画像解析し、地盤材料中の気泡の消泡と残存メカニズムを分析してきた。本報では、その結果について報告する。

### 2. 消泡のメカニズム

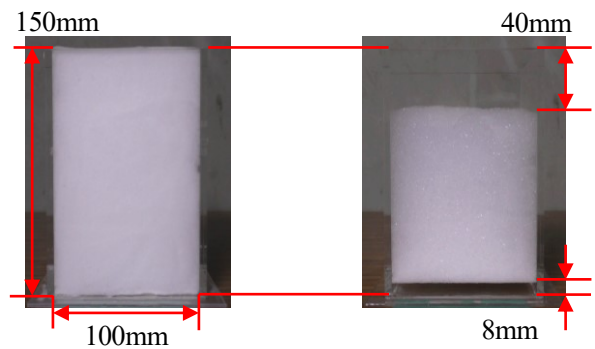
消泡には二つの現象があり、一つは破泡、もう一つは気泡同士が結合する合一である。破泡の要因としては気泡の大変形や気泡液の希釈である。前者は、何らかの外力によって気泡が大きく変形し、球形を維持できなくなる時に生じることを意味する。後者の気泡の合一は、大きさの異なる気泡が接触した時、気泡内の空気は液膜を通過して内部圧力の低い大きな気泡へ拡散することを意味する。小さな気泡は吸収されるように消泡する。本研究では、デジタルビデオ撮影により気泡の時系列変化と CT 画像解析により、試料内部の破泡と気泡の合一を評価することを試みる。

### 3. マクロスケールにおける気泡の状態変化

気泡単体での構造のとり方を確認するために、気泡を角柱のアクリルパイプ(100×100×150mm<sup>3</sup>)に注入し、気泡の様子を撮影した。気泡は発泡倍率 FER (Foam Expansion Ratio) を 20 として作製し、アクリルの角柱パイプに注入した。ここで、発泡倍率 FER は、式(1)で定義される。

$$FER = \frac{V_{all}}{V_{liq}} \quad (1)$$

$V_{all}$  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る<sup>1)</sup>。撮影はビデオカメラを用いて 2 時間行い、図 1 は気泡注入直後と 3 時間後の気泡試料の様子である。



(a) 気泡注入直後 (b) 気泡注入 3 時間後

図 1 気泡の撮影

図 1(b)は図 1(a)と比較すると、白い供試体の長さが短くなっていることがわかる。供試体上部は、空気に触れているため、消泡が進行したことを示している。また、気泡表面の溶液が流れ落ちることで消泡するが、消泡した気泡から流れ落ちた液体が下部に溜まっていることが確認できた。

### 4. ナノ CT 画像とその画像解析結果

気泡の消泡は、時間に依存するため CT 撮影時間はできるだけ短い方が好ましい。そこで、本実験では気泡の経時変化を抑制するために冷却ステージを使用し、供試体中の温度を水が一番安定する 4 度に維持しながら撮影した。

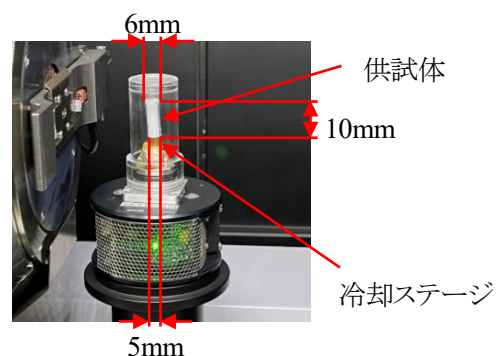


図 2 ナノ CT 撮影室内の冷却ステージ

図 2 は、ナノ CT 用温度制御チャンバーに供試体をセットした撮影時の様子である。気泡混合ベントナイトミルク供試体は直径  $\phi=6\text{mm}$ 、高さ  $h=10\text{mm}$  の物を用意し、直径  $\phi=6\text{mm}$ 、高さ  $h=3.9\text{mm}$  の範囲を撮影した。この実験では、供試体作製直後と作製 3 時間後の供試体を CT 撮影した。図 3 は、供試体 3 次元 CT 画像である。画像の供試体は直径  $\phi=5\text{mm}$ 、高さ  $h=3.9\text{mm}$  にトリミングしており、ブルカージャパン株式会社の 3D 表示ソフトウェア CTVOX で作製した。図 3 より、色が濃く、丸みを帯びている部分が気泡であり、灰色の部分がベントナイトミルクを示す。この画像に対し、気泡とそれ以外の領域を分割する二値化処理を行い、気泡の寸法と球形度の時間変化を評価することが可能となる。画像処理には汎用画像解析ソフト Image J を使用し、3D object counter を使って、気泡径と気泡の表面積、体積を求めた。図 4 は気泡径加積曲線である。供試体作製直後の平均気泡径は  $0.0264\text{mm}$  であり、3 時間後は  $0.0297\text{mm}$  に変化していることが分かった。凡例に気泡の総数を示しており、時間経過で減少していることが分かる。この理由としては時間経過に伴って気泡の合一が進んだためと考えられる。図 5 は、球形度の時間変化を示している。一般に気泡の球形度は次式<sup>2)</sup>で評価できる。

$$\text{球形度} = \frac{\text{実際の粒子と同じ体積を有する球の表面積}}{\text{実際の粒子の表面積}} \quad (2)$$

球形度は 1 を真球とし、0 から 1 の範囲で形状を評価する指標となる。また、気泡液の希釈は、気泡液と水の密度差により重力によって分離するか、間隙水中に気泡液が拡散することが考えられている。気泡全体における球形度  $0.9\sim 1.0$  (以下、高球形度) の気泡は、供試体作製直後が  $86.8\%$  で、3 時間後が  $77.9\%$  であった。よって、高球形度な気泡は 3 時間で  $8.9\%$  消泡したことが分かった。図 6 は球形度と気泡径で気泡の分布を示した散布図である。3 時間後の分布の偏りから、小さな気泡径が消泡していることも分かるが、特に球形度  $0.8$  以下が多く消泡していることが分かった。したがって、消泡は気泡の形状の影響を受けやすいことがわかった。

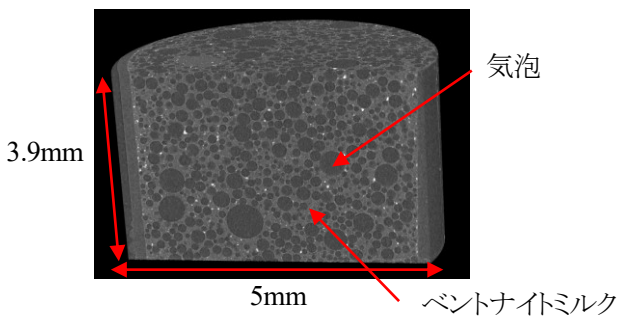


図 3 気泡混合ベントナイトミルク 3 次元画像

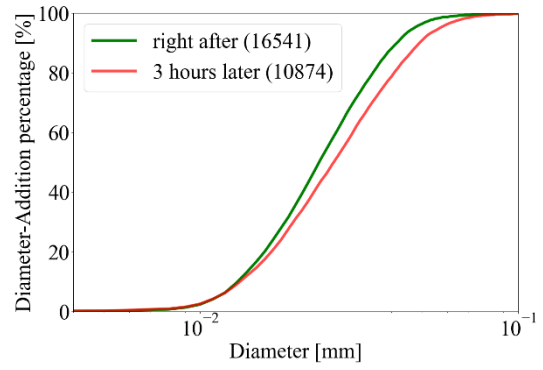


図 4 気泡径加積曲線

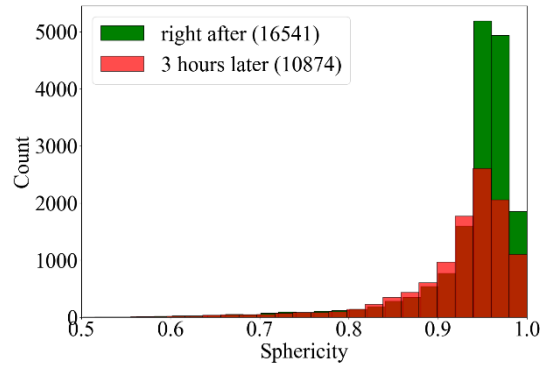


図 5 球形度ヒストグラム

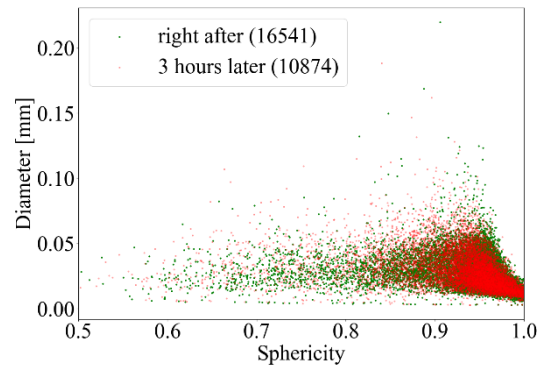


図 6 球形度—気泡径分布図

### 5. おわりに

本研究では、ベントナイトミルク中において 3 時間後の気泡の状態変化を画像解析した。今後は、CT による観察時間を一日単位として、実際の作業工程を想定した気泡の状態変化を評価する。

#### <参考文献>

- 1) 松元秀平: X 線 CT 法を用いた気泡混合土の内部構造の可視化及びその定量評価に関する研究, 熊本大学卒業論文, 2022
- 2) 一般社団法人 色材協会, 武林敬: 色材協会誌 68 巻 1 号, 粉体粒子の形状, 1995, p.53