

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シールド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や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した場合、消泡による土砂と気泡の分離が起きるため、使用す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し、マイクロX線CTを使って間隙中の気泡の状態を可視化することで、時間経過に伴う気泡の状態変化を分析してきた¹⁾。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易いため、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。そこで保水性が高い高含水比状態のベントナイトミルクを混合することで、土粒子表面を保護して消泡を防止する効果について着目した。

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およ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。破泡は、気泡の大変形や気泡液の希釈等、何らかの外力で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。一方、気泡の合一は大きさの異なる気泡が接触した時、気泡内の空気が液膜を通して内部圧力の低い大きな気泡へ拡散し、小さな気泡は吸収されることによって生じる。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た。

3. マクロスケールにおける気泡の状態変化

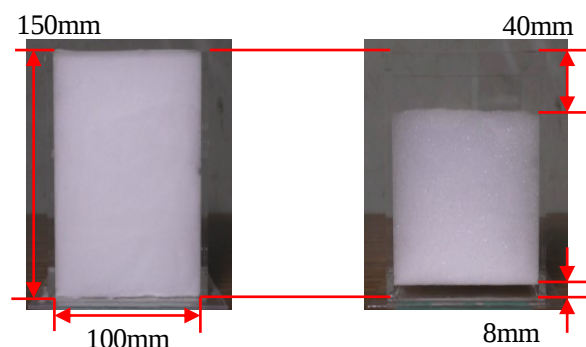
気泡単体での構造のとり方を確認するために、気泡を角柱のアクリルパイプ(100mm×100mm×150mm)に注入し、気泡の様子を撮影した。気泡は発泡倍率FER (Foam Expansion Ratio)を20として作製し、アクリルの角柱パイプに注入した。ここで、発泡倍率FERは、式(1)で定義される。

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

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¹⁾。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。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たことがわかる。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も消泡するが、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



(a) 気泡注入直後 (b) 気泡注入3時間後

図1 気泡の撮影

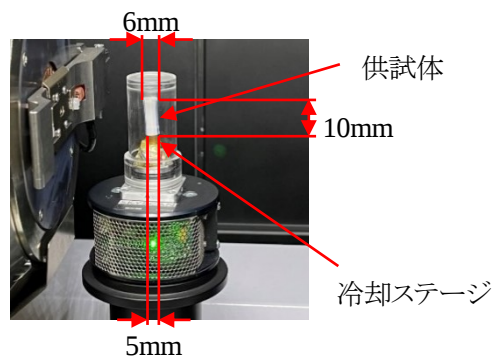


図2 ナノCT撮影室内の冷却ステージ

キーワード: ナノX線CT, 気泡シールド工法, 気泡混合掘削土, 気泡残存率, 低温撮影, 球形度

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

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℃に維持しながら撮影した。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 $h=10\text{mm}$ とし、このうち直径 $\phi=6\text{mm}$ 、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。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に気泡径加積曲線を示す。供試体作製直後の平均気泡径は0.0264mmであり、3時間後は0.0297mm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式(2)²⁾で評価できる。

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

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によって生じると考えられている。気泡全体における球形度0.9～1.0(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—気泡体積図である。図6では評価の目安として、球形度分布の多い球形度0.8から1.0に注目して近似曲線を引いており、球形度あたりの体積の分布を確認することができる。僅かではあるが、時間経過に伴う全体の体積は増加傾向にあったため、消泡は気泡の合一が支配的であることが示唆された。

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, 椋木俊文, 佐藤宇紘, 永谷英基, 川野健一, 劉偉晨: X線CT法を用いた気泡混合土の内部構造の画像解析, 土木学会第77回年次学術講演会概要集, 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

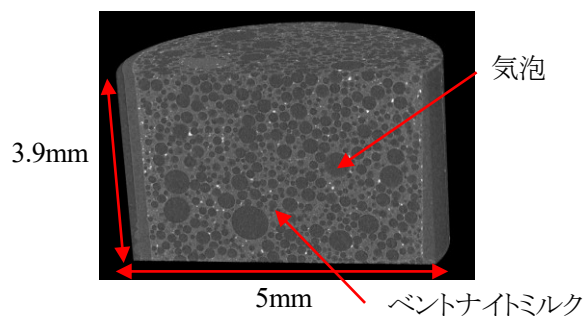


図3 気泡混合ベントナイトミルク3次元画像

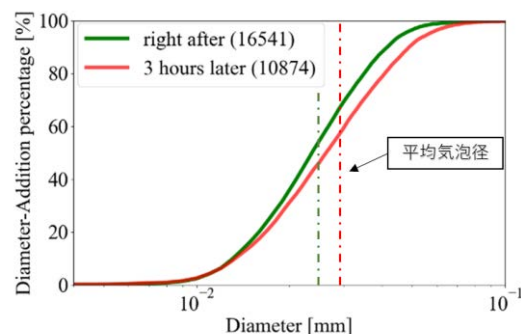


図4 気泡径加積曲線

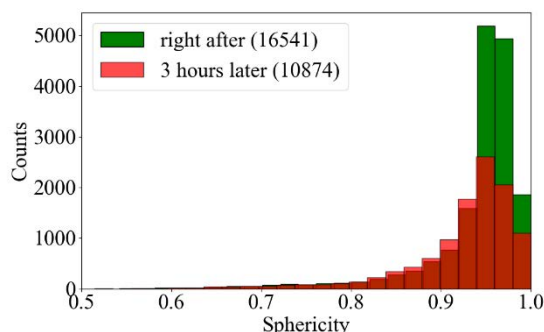


図5 球形度ヒストグラム

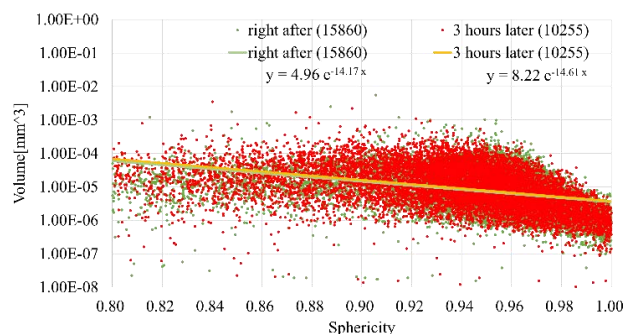


図6 球形度—気泡体積図