

# 砂質土を対象とした気泡添加 セメント改良材の施工性と強度に関する研究

中部大学工学研究科建設工学専攻 TC22003 刑部 俊輔  
指導教授 余川 弘至

## 1. はじめに

地盤安定処理工法は、中間的な位置に支持層がある場合は地耐力確保を、液状化が起きやすいような砂地盤が厚い場合には液状化対策として採用される工法である。比較的地表近くの改良が主体であるが、近年では、より深い位置の改良を可能とすることができる中層改良工法が開発されるようになった。本報は、機械攪拌工法の一つである中層混合処理工スラリー噴射方式<sup>1)</sup>を対象としている。本工法では、スラリー状にした改良材を原位置土と混合することで改良地盤を構築する。しかし、砂地盤を対象とする施工では、砂特有の透水性の高さから、スラリー状にした材料より水分が逸水してしまうことで水締め状態となり密度が高まり流動性が低下する。流動性が低下すると機械に高い負荷(摩擦力)が生じ、機械攪拌できないといった施工性に関わる問題が生じる。これらを解決するための方法として、シールド工法技術で用いられる気泡シールド工法<sup>2)</sup>がある。気泡を注入することで原地盤の止水性を向上させ、流動性を保持しつつ掘削ができる。それに加え、切羽内での掘削した土の付着(機械への負荷)が低減できるため、切羽の安定を保持しつつ、スムーズな掘進が可能とされている。これら気泡を用いるような工法は、ほぼ元の土砂の性状へ戻す必要があるため、消泡材を散布するなどの後処理が必要となる<sup>3)</sup>。後処理を行なわなかった場合、改良土内に空隙ができることによって強度が低下する恐れが生じる。本工法では原位置土で改良材と混合する。そのため、逸水などの外的要因を考慮し気泡添加量や水分量を検討しなければならない。桑原ら<sup>4)</sup>は、地盤改良を行うにあたり、気泡量を一定とし水セメント比をコントロールすることで施工性の改善に必要な最低限の気泡量を算出することを検討している。混和剤としてベントナイトを採用した場合など改良土の物性について多くのデータが蓄積されているが<sup>5)</sup>、気泡混合についてはまだ不十分なのが現状である。そこで、文献<sup>6)</sup>中で使用された気泡添加量をベースとして原地盤の含水比に応じた気泡量を決定した。

気泡量や母材の含水比および粒度分布等の異なる条件で改良土を作成した際には施工性を評価する試験を行い、供試体を作成した際には強度を評価する試験を行った。これらを行うことにより、気泡が施工性および強度に与える影響を明らかにした。また、気泡の有無による密度や強度の変化に着目し、密度変化に関しては含水比による締め固まりやすさを比較することで評価した。強度変化では気泡の有無に関わらず、同じ密度の供試体を作成し、一軸圧縮強度を比較することで評価した。これらを行うことで、気泡が改良土に与える影響因子について検討した。気泡は不安定であり、混合中に消泡や体積変化したりするため、改良土中で消泡した気泡の定性的な評価として空気量を算出する方法が報告されている<sup>7)</sup>。しかし、目視での気泡に対する定量的な評価が確立されていない。そこで、供試体表面をマイクロカメラで撮影したのち、画像解析技術を用いることで、気泡による空隙と強度の関係性を確認した。これらを行うことで、画像解析を用いた強度把握手法の確立を試みた。

## 2. 実験方法

原地盤で想定される様々な含水比を再現するために、絶乾状態の各母材に蒸留水を加え、12時間以上静置したものを試料とした。図-1に使用した母材の物理特性を示す。物理特性を把握する各試験はJIS規格に準拠して測定を行った<sup>8)</sup>。3章の(1)～(8)では三河硅砂6号を使用し(4)では粒径による施工性の評価を行うため6号に加え三河硅砂4号、8号を使用した。図-2に実験方法のフロー図を示す。改良土の作成方法は、固化材(高炉セメントB種)添加量 $150\text{kg/m}^3$ 、水セメント比70%のセメントスラリーに、気泡濃度2.5%、発泡倍率25倍、添加量 $100\text{l/m}^3$ (以下、気泡添加量10%と定義する)に調整した気泡を添加し、各試料と混練した。図-3に気泡発生装置の概略図を示す。一般に改良土の施工性を評価するにあたりテーブルフロー試験が用いられるが、本研究

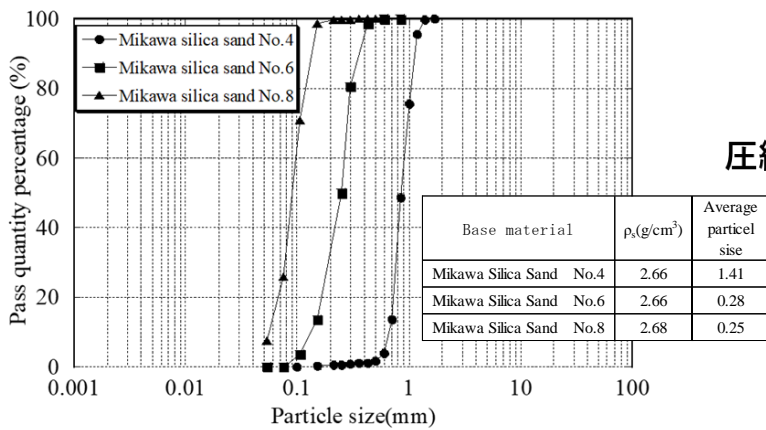


図-1 母材の物理特性

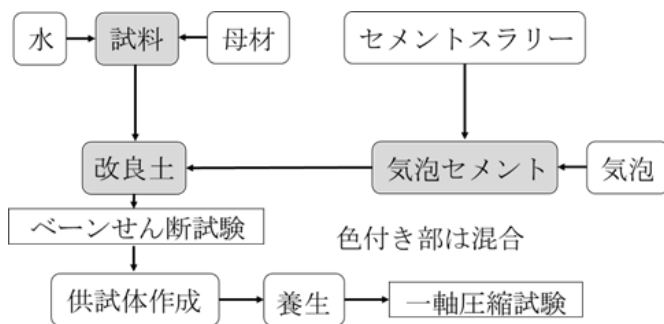


図-2 実験方法のフロー図

で想定するような原地盤の含水比が低い場合（5%や10%）では流動性の僅かな差を評価することが難しい，そのため，施工性の評価にベーンせん断試験（以下ベーン試験）を採用した<sup>9)</sup>．練り混ぜ後，直ちに円柱状の容器に投入し，容器の中心となる位置でベーンせん断強度（以下ベーン値）を求めた．図-4 にベーンせん断試験の概要図を示す．

供試体を突き固める際に手によるタッピング法が採用されるが，低い含水比の原地盤を想定した場合，エネルギー量が少なく亀裂や空隙の多い供試体を作成されると判断した．そのため，タッピング法ではなくランマー（JCAS L-01:2006）を採用し3層12回<sup>10)</sup> 突き固めを行った．気泡を添加した改良土は，材令による強度の変化は改良土のそれと同等であると報告されている<sup>11)</sup>．そのため，供試体の養生期間を7日間（温度20±3°C，湿度95%以上）行ったのち一軸圧縮試験を実施した．

### 3. 実験結果と考察

#### (1) 施工性と水分量の関係

母材の含水比を 0%，5%，10%，15%，20%に変更し，

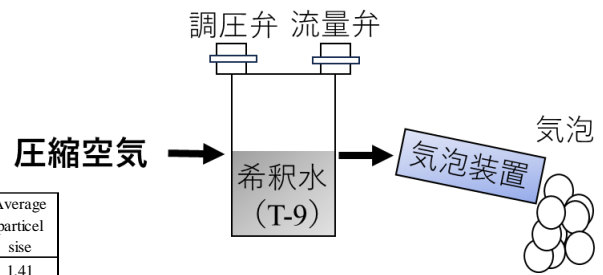


図-3 気泡発生装置の概略図

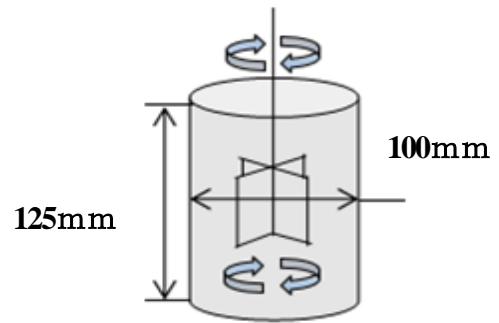


図-4 ベーンせん断試験の概要図

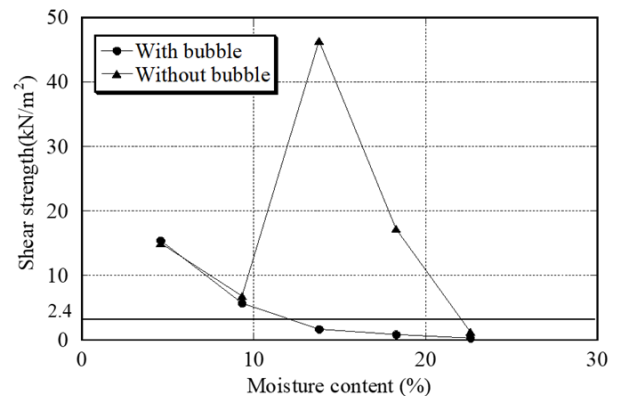


図-5 ベーン値と含水比の関係

気泡が施工性に与える影響について検討した．ベーン値と改良土の含水比の関係を図-5 に示す．なお，ベーン試験は各条件につき2回実施し，それぞれ平均値をプロットした．また，図にプロットしたベーン値2.4 kN/m<sup>2</sup>は安定した施工可能であるかを評価する際に使用した目標値である．これは，桑原ら<sup>12)</sup> がテーブルフロー値とベーン値の関係性から，室内試験において2.4 kN/m<sup>2</sup>を下回るベーン値が得られれば攪拌機への負荷抵抗を低減でき，かつ安定した施工が可能であるとした．図-5 に示す通り，気泡を注入することで大幅に流動性が改善される．これは，微細な気泡が土粒子の間隙部に入り込むことで，離隔が生じ摩擦抵抗が低減したためと考えられる．一方，

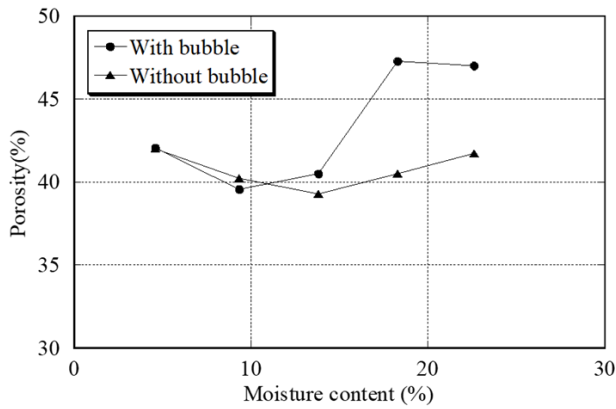


図-6 間隙率と含水比の関係

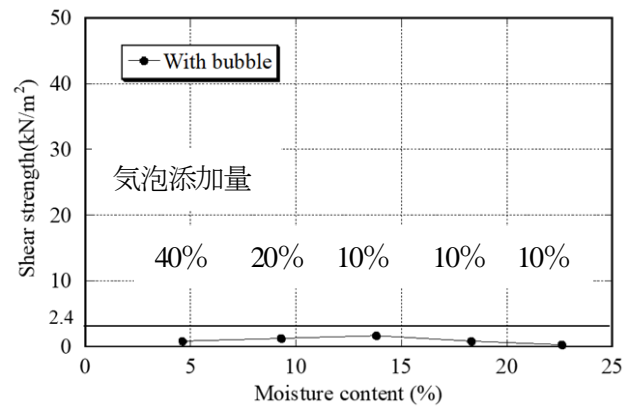


図-8 ベーン値と含水比の関係

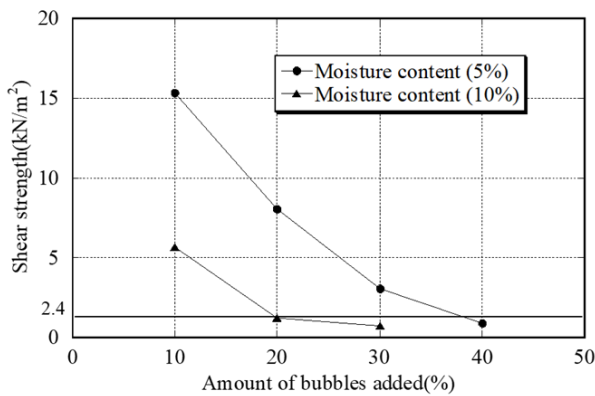


図-7 ベーン値と気泡添加量の関係

改良土の含水比が10%未満では、気泡の有無による流動性の違いがみられないことから、原地盤の含水比が低い場合には、気泡を添加すれば一律に流動性が向上するわけではなく、その地盤の含水比にあった気泡添加量に調整する必要がある。

## (2) 間隙率と含水比の関係

間隙率と改良土の含水比の関係を図-6に示す。間隙率の測定には各条件3本の供試体データを使用し、それぞれ平均値をプロットした。図-6に示す通り、気泡を注入することで改良土の間隙率が高くなる傾向が得られた。これは、気泡を添加した場合、間隙内に気泡が入り込むことで間隙率が高くなったと考えられる。しかし、図-5の結果と同じく改良土の含水比10%未満では、気泡添加による間隙率の違いが見られないことから、原地盤の含水比が低い場合、気泡の効果が発揮できないことが分かる。これについては、気泡を混練した際に改良土の含水比が低ければ、泡膜の水分は土に奪われるため破泡してしまい気泡を添加しない条件と同一になっていると推察される。そのため、改良土の含水比10%未満のベーン値

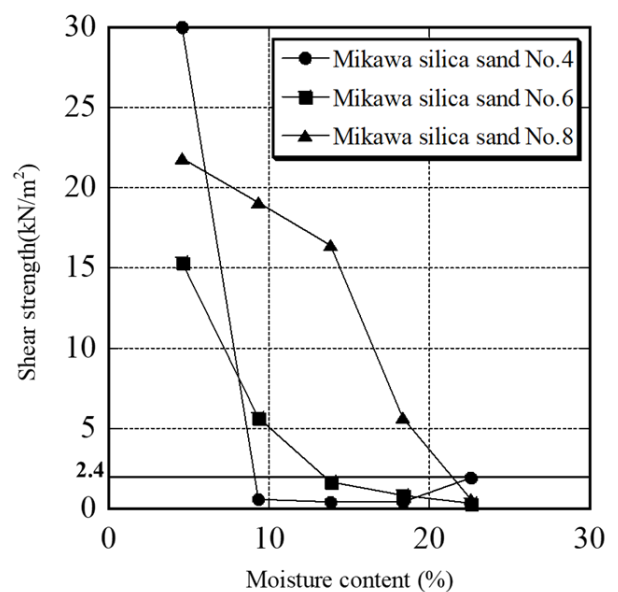


図-9 ベーン値と含水比の関係 (複数の母材)

2.4kN/m<sup>2</sup>を下回らなかったケースについては(3)にて気泡添加量を10%から増やす検討を行った。

## (3) 施工性と気泡量の関係

ベーン値と気泡添加量の関係を図-7に、ベーン値と改良土の含水比の関係を図-8に示す。図-7に示す通り、改良土の含水比5%程度では気泡添加量40%、含水比10%程度では20%でベーン値2.4kN/m<sup>2</sup>を下回り、施工に必要な流動性が確保された。また、気泡添加量を増加することで流動性が向上し、図-8のように、原地盤の含水比に応じた気泡量を添加することで施工に必要な流動性を確保可能なものと判断できる。

## (4) 異なる母材での比較

粒径の異なる母材を用いて気泡を添加した際の施工性について検討した。ベーン値と改良土の含水比の関係を図-9に示す。図-9に示す通り、母材の粒径によって、気泡が及ぼす効果は異なり、粒径が大きいものほど少ない水分量で気泡の効果が生じるとの傾向が得られた。

概ねどの母材も改良土の含水比が多い試料ほど、ベーン値は低くなる傾向にある。これは、微細な気泡が土粒子の間隙部に入り込むことで、離隔が生じ摩擦抵抗が低減したためと考えられる。また、三河硅砂4号で改良土含水比約22%のようにベーン値が増加しているものは、添加した気泡が破泡または分離<sup>13)</sup>したことにより、間隙比の減少(密度の増加)が生じたものと推察される。せん断強度やダイレイタンスー特性には粒径よりも粒子形状の違いが大きく影響することが報告されている<sup>14)</sup>。そのため、粒径のみで評価することができず、粒子形状等による影響も確認する必要がある。

### (5) 気泡の有無による強度変化

気泡添加による強度変化について確認した。なお、一軸圧縮試験は各条件3本ずつ実施し、それぞれ平均値をプロットした。検討ケースは図-8に記した改良土のデータを使用した。強度と改良土の含水比の関係を図-10に、間隙率と強度の関係を図-11に示す。図-10に示した通り、改良土の含水比約5%の供試体を除き気泡を添加すると強度が低下する結果が得られた。これは、改良土内に気泡が残存することにより強度が低下したものと考えられる。一般に改良土の含水比が少ないほど、強度は高くなると考えられるが、改良土の含水比5%で気泡を添加していないケースでは最も低い強度が得られ、気泡を添加したケースでは最も高い強度が得られた。この結果は改良土の不均一性(練り混ぜやすさ)が起因している可能性が高い。写真-1に一軸圧縮試験前の供試体状況を示す。気泡を添加していない供試体ではセメントが小さな結晶として母材と分離散在している、これに対して、気泡を添加した供試体ではセメントの小結晶が確認できず、比較的均一な状況にあったことが分かる。これは、気泡を添加していない改良土では練り混ぜ時に十分な流動性が得られずセメントの分布が不均一となって結合材としての働きを妨げていると推察される。以上のことから、原地盤の含水比が低い条件では気泡を添加することにより、セメントと土の分離を防ぐことができると考えられる。図-11では、強度と間隙率に負の相関性を示している。これは、気泡を添加することで改良土に間隙が生じて強度を低減したものと推察されるものの、気泡の原材料である薬液成分がセメントの水和反応を妨げている可能性もあるため、(6)で強度低下の機構について検討した。

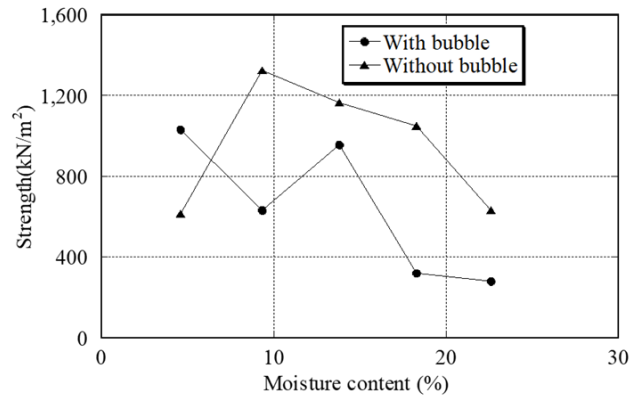


図-10 強度と含水比の関係

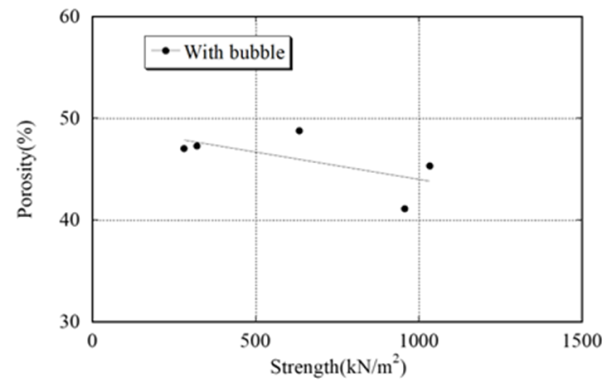


図-11 間隙率と強度の関係

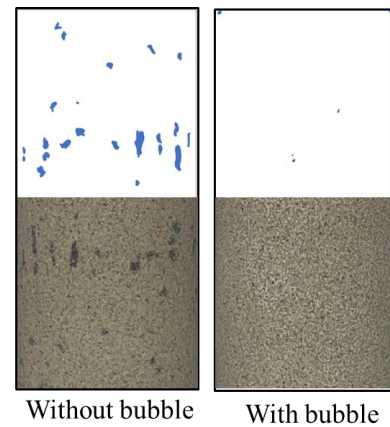


写真-1 セメント分離 (青:セメント)

### (6) 強度低下の機構

強度低下の主因について検討した。強度に影響する主因にはセメント添加量、水分量、密度(間隙量)、気泡の成分が考えられる。気泡の有無による密度や強度の変化に着目し、まずは密度変化を明らかにするために気泡の有無による締め固まりやすさを把握した。

図-12に気泡を添加した改良土と添加しない改良土の締



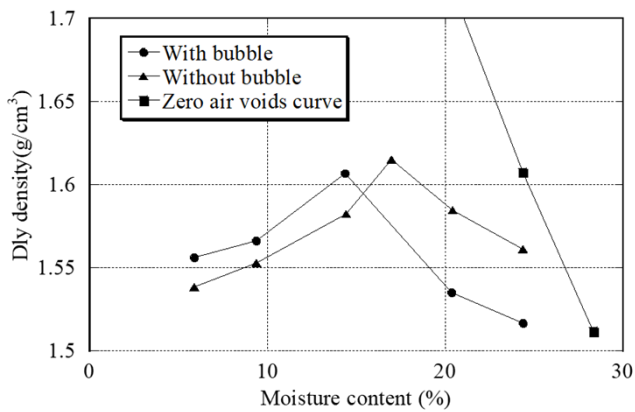


図-12 乾燥密度と含水比の関係

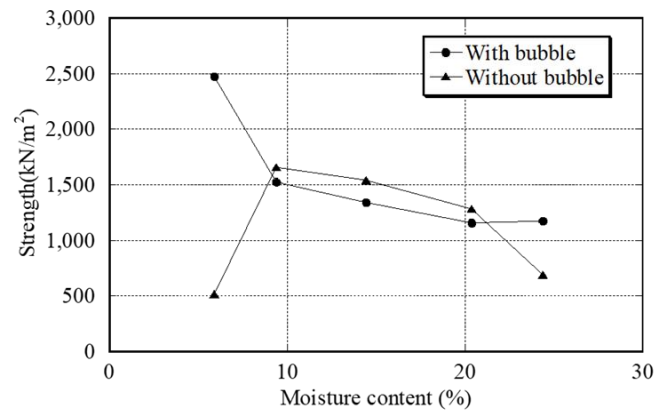


図-14 強度と含水比の関係 (密度調整後)

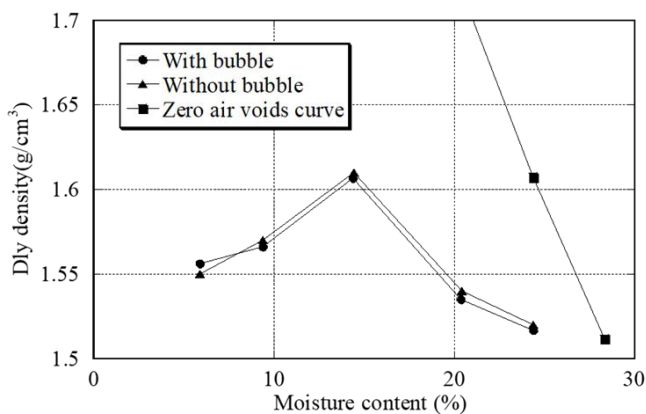


図-13 乾燥密度と含水比の関係 (密度調整後)

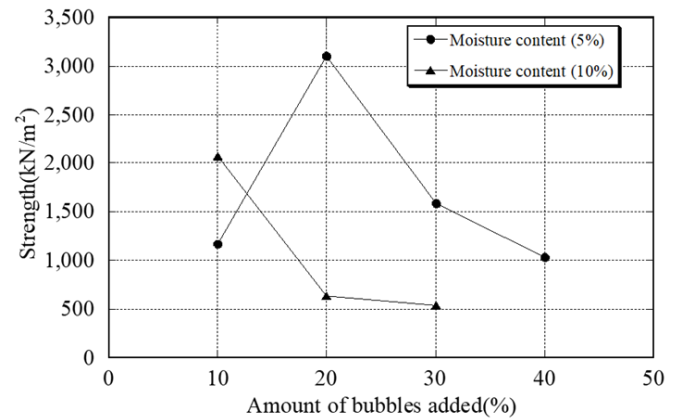


図-15 強度と気泡添加量の関係

固め結果を示す。気泡を添加した改良土では最適含水比約15%、気泡を添加しない改良土では最適含水比約18%と気泡を添加することで最適含水比が約3%低くなること判明した。そこで、試行錯誤的にランマーの突固め回数を調整して、図-13のように気泡の有無に関わらず、ほぼ同等の乾燥密度が得られる改良土の含水比と締固め回数との関係を取得した。この関係を利用して改良土の含水比に応じた乾燥密度を一定とした供試体における一軸圧縮試験の結果は図-14のように示される。図-14に示す通り、乾燥密度を一定とした供試体における一軸圧縮試験結果においては含水比約5%や25%のように極端な試料の含水比で作成した供試体を除き、気泡の有無による差が得られていない。このため、気泡の存在や成分がセメントの水和反応を妨げていないと判断される。つまり、気泡を添加することによる強度低下の主因は間隙量の増加にあるものと推察される。含水比約5%の場合には図-10と同様な傾向が得られ、写真-1に示した気泡を添加していない供試体にはセメントが小さな小結晶が確認され、気泡を添加した供試体には小結晶が確認されなかった。改良土の含水比約25%の場合には、気泡の分離作用が生

じているため気泡を添加していない改良土と同様な条件であると考えられる。そのため、気泡の成分は強度に影響しないことが推察される。

### (7) 気泡添加量の変更が強度に与える影響

気泡添加量を増やすことが強度に与える影響について検討した。検討ケースは図-7に記した改良土のデータを使用した。強度と気泡添加量との関係を図-15に示す。気泡量を増加させると強度が低下することがわかる。しかし、改良土の含水比5%で気泡添加量10%では少ない気泡量にも関わらず気泡添加量40%と同等の強度が得られた。その原因は、試料の含水比が低いことによりセメントとの水和反応に必要なとされる水分が足りず、セメントの結合材としての働きを妨げることで強度が低下していると推察される。以上のことから、ベーン値2.4kN/m<sup>2</sup>を下回る値が得られる最小限の気泡量を添加する必要があることが分かった。

### (8) 強度把握手法の検討

図-11の結果より強度と間隙率に負の相関性を示した

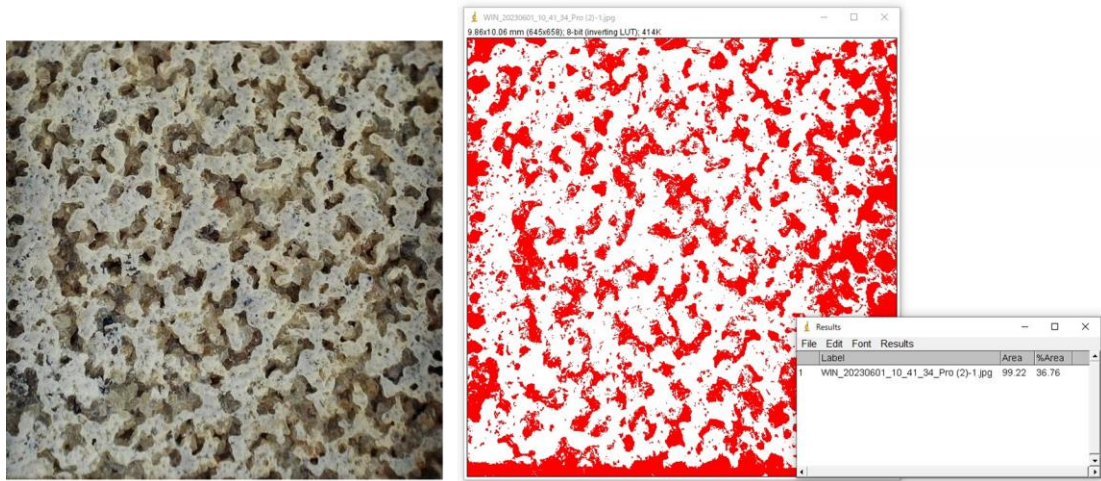


写真-2 ImageJによる画像解析 (赤：空隙)

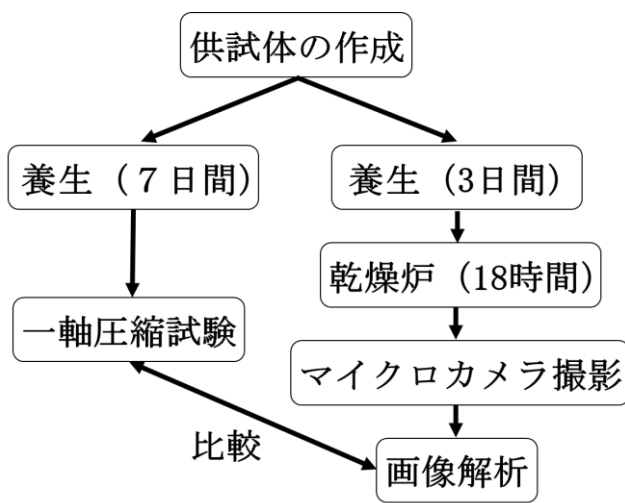


図-16 強度把握手法の検討手順

ことから、目視での気泡（気泡が形成されている量など）に対する定量的な評価を行うことが可能であれば改良施工後、早期の強度把握をすることができると考えた。そのため、養生期間を要さず早期に強度把握をすることを目的とし画像解析を用いた強度把握手法の確立を試みた。手順を図-16に示す。強度試験用供試体を3本、画像解析用供試体を2本作成する。外圧を受けた気泡改良土は即時的に大きな圧縮が起こり、圧縮変形が3日程度で収束すると報告されている<sup>15)</sup>。そのため、画像解析用のものは3日間養生を行った。供試体が湿潤状態で画像解析を行った場合、母材の種類によっては供試体表面が黄褐色であり、画像解析には適していないケースがあった。そのため、養生後に炉乾燥炉(±110℃)で供試体を絶乾状態にすることで、画像解析の適用範囲を広げた。絶乾状態にしたのち、供試体表面をマイクロカメラで撮影した。そこで、画像解析を用いて1cm<sup>2</sup>内にある空隙との面積比（以下空隙率と定義する）を定量的に評価した。

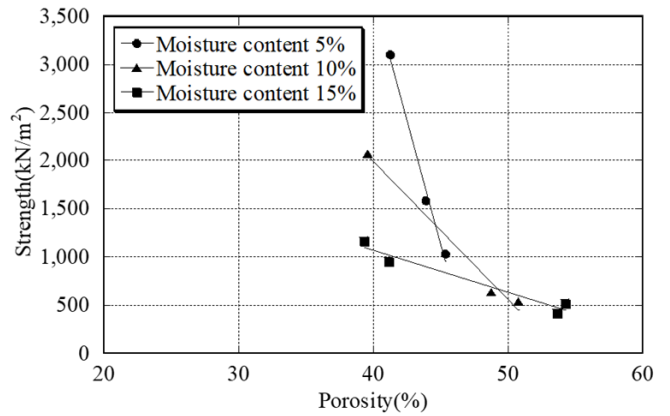


図-17 強度と空隙率の関係

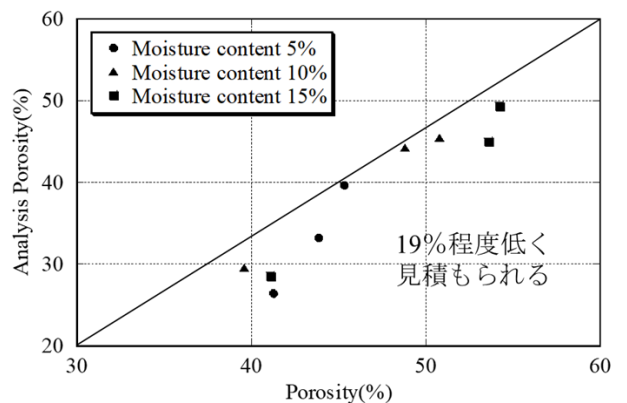


図-18 空隙率と空隙率の関係

写真-2にImageJによる画像解析の概要図を示す。なお、画像処理には、アメリカ国立衛生研究所（National Institutes of Health）で開発されたオープンソースである画像解析ソフトImageJ<sup>16)</sup>を用いた。

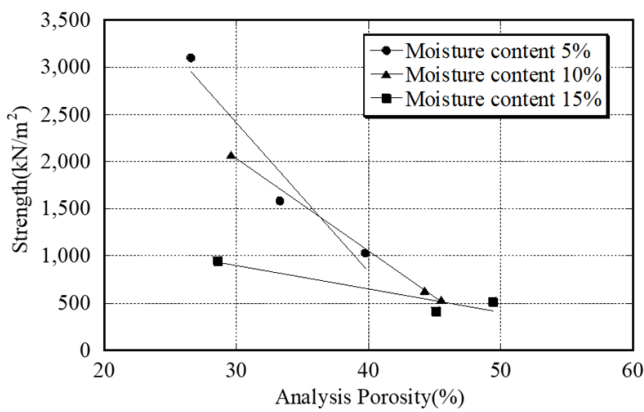


図-19 強度と空隙率の関係

早期で強度把握をする手法を確立するために、まず、湿潤密度や含水比を測定することによって求められる空隙率と強度の関係について把握した。そこで、各母材の含水比を5%、10%、15%となるよう蒸留水を加え試料を作成した。気泡添加量を試料の含水比5%では20%、30%、40%、含水比10%と15%では10%、20%、30%に変更し空隙率に変化をさせた。図-17に強度と空隙率の関係を示す。なお、空隙率の測定には強度試験用に作成した供試体データを用いて、それぞれ平均値をプロットした。供試体データより算出した空隙率と強度では負の相関性が見られた。次に、画像解析により求められる空隙率と空隙率の関係について把握した。図-18に空隙率と空隙率の関係を示す。空隙率と空隙率の関係には正の相関性がみられた。しかし、空隙率と空隙率は同一の数値にはならず平均19%程度空隙率が低い値が得られた。これは、画像解析上では表現することができない奥行の有無による影響であると考えられる。空隙率は供試体実測値から算出する値のため、必然的に3次元での空隙を表現している。しかし、画像解析で求める空隙率では球ではなく円の間隙を算出することになる。そのため、ある程度空隙率は低くなるのが考えられる。今後の課題として、空隙率が低く見積もられることを考慮し、補正値を算出することで、同一の値が得られる検討を行っていく必要が生じると考えられる。最後に、空隙率と強度の相関性について検討した。図-19に強度と空隙率の関係を示す。強度と空隙率の関係には負の相関が得られた。これは、図-17と同様の傾向から気泡を添加すると空隙率が向上する本工法では空隙率は空隙率に置き換わる値として強度を評価できる可能性が期待できる。

#### 4. まとめ

本研究では、砂地盤における中層改良工法の施工性に関わる問題点を解決するために、気泡混入したセメント

改良材の流動性向上の効果および強度について検討した。気泡の有無や気泡注入量および含水比などの地盤材料の条件を変えた供試体で一軸圧縮試験を実施し、気泡による強度変化や流動性（施工性）について整理した。また、画像解析技術を用いることで、改良施工後に早期強度把握ができるような手法について検討した。得られた結論をまとめると、次のとおりである。

(1) 気泡を注入することで空隙内に気泡が入り込み大幅に流動性が改善される。しかし、原地盤の含水比が低い場合、気泡を添加すれば一律に流動性が向上するわけではなく、その地盤の含水比にあった気泡添加量を調整する必要がある。

(2) 含水比が低いような地盤であっても気泡添加を調整することで施工に必要な流動性を確保することができる。

(3) 母材の粒径によって、気泡の効果が発現する含水比は異なり、粒径が大きいものほど低い含水比で気泡の効果が発現し、粒径が小さいものでは高い含水比が気泡の効果が発現するためには必要である。粒径によって気泡の大きさを発泡倍率等で調整する等の検討を行っていく必要があると考えられる。

(4) 気泡を添加することで改良土内に空隙が生まれ強度が低減してしまう。気泡の成分による強度への影響はなく、気泡添加量の増加に比例して強度の低下規模は増加する傾向がある。

(5) 空隙率と空隙率および空隙率と強度に相関性が得られたことから、気泡を混合する本工法において、供試体表面に形成される空隙量を定量的に評価した空隙率で強度を評価でき早期での強度把握手法が一般化できる可能性が期待される。

#### 5. 今後の展望

本研究では、各母材の含水比や気泡添加量および粒径の異なる母材を変化させることで気泡が改良土に与える影響を把握することができた。また、目視での気泡に対する定量的な評価を行うにあたり、画像解析技術を用いて空隙率を算出し、早期での強度を評価することができる可能性を示した。しかし、今回の研究で得られた結果は特定条件での結果であり一般性を持たせるために今後、異なる地盤材料やセメント量などの配合比率の変更を行うことで施工性や強度などの傾向の一貫性を確認することが必要だと考えられる。加えて、粒径が異なる地盤材料の場合に気泡の効果に違いがあることが示されたものの気泡濃度や発泡倍率が施工性や強度に与える影響について検討されていない。そのため、粒径の小さいもの場合には微細な気泡を添加する等の検討を行っていく必



要があると考えられる。また、早期で強度を把握する手法の課題としては、補正値を算出するとともに配合比率や気泡濃度および地盤材料の変更等に伴い画像解析のデータを活用範囲の広い AI 技術に蓄積していくことで一般性を持たせた手法にすることが必要だと考えられる。

## 参考文献

- 1) パワーブレンダー工法協会：パワーブレンダー工法（中層混合処理）技術資料, 2020. [Power blender construction method association : (Power blender method) technical data, 2020.]
- 2) シールド工法技術協会：気泡シールド工法技術資料, 2020.[ Shield Tunnelling Association of Japan : Bubble shield construction method technical data, 2020.]
- 3) シールド工事用の高発泡性気泡材の開発（2016）：大林組技術研究所報 No.80.[Development of High Performance Foam Agent for Shield Tunnel（2016）：report of OBAYASHI corporation technology research institute. No.80.]
- 4) 桑原崇詞, 大川拓真：気泡混合処理による地盤改良の施工性の改善および品質に関する知見, 土木学会第 76 回年次学術講演会, pp.VI-112-113, 2021.[ Kuwahara, T. and Ookawa, T. : Knowledge regarding improvement of workability and quality of ground improvement through bubble mixing treatment, Japan Society of Civil Engineers 76th Annual Academic Conference, pp.VI-112-113, 2021.]
- 5) セメント系安定処理土の物理・力学特性に関する研究委員会：セメント系安定処理土に関するシンポジウム発表論文集, (社)地盤工学会, 1996.2.[ Research Committee on Physical and Mechanical Properties of Cement Stabilized Soil: Collected Papers Presented at Symposium on Cement Stabilized Soil, Geotechnical Society, 1996.2.]
- 6) 刑部俊輔, 桑原崇詞, 余川弘至：気泡混合処理による改良体内の残存空気率と摩擦力の関係(画像解析を用いた残存空気率の推定), 土木学会第 77 回年次学術講演会, pp.III-112, 2022.[Osakabe, S. and Kuwahara, T. and Yokawa, H. : Relationship between residual air content and frictional force in the modified body by bubble mixing treatment (Estimation of residual air fraction using image analysis) , Japan Society of Civil Engineers 77th Annual Academic Conference , pp.III-112, 2022.]
- 7) 渡邊康夫, 海野隆哉：気泡含有量の多い軽量土の強度特性と破壊機構, 土木学会論文集, No.680, III-55, pp131-139, 2001.6.[Watanabe, Y. and Kaino, T. : Strengt characteristics and failure BEHAVIOR of foamed lightweight soil with much air, Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, No.680, III-55, pp131-139, 2001.6.]
- 8) 公益社団法人地盤工学会：土質試験基本と手引き第 二回改訂版, 丸善出版, p.17-159, 2010.[Japan Geotechnical Society : Soil Testing Basics and Handbook 2nd Revised Edition, Maruzen Publishing, p.17-159, 2010.]
- 9) 平野聡, 水谷羊介, 中村博, 下村修一, 笹田寛, 安達俊夫：分散材を用いたセメント改良土の室内配合試験(流動性と発現強度の材令変化の検討), 2016 年度日本建築学会関東支部研究報告書, 2017.3.[Hirano, S. and Nakamura, H. and Simomura, S. and Sasada, K. and Adachi, T. : Indoor mixing test of cement-improved soil using dispersion material (Examination of age changes in fluidity and developed) , 2016 Architectural Institute of Japan Kanto Branch Research Report strength, 2017.3.]
- 10) NPO 住宅地盤品質協会推奨：改良土の室内配合試験(案), T003, 2011.[Recommended by NPO Housing Ground Quality Association : Indoor mixing test of improved soil, T003, 2011.]
- 11) 林泰弘, 鈴木敦巳：気泡セメント改良土の一軸圧縮強度への影響, 土木学会論文集, No.638/III-49, pp.353-362, 1999.12.[Hayashi, H. and Suzuki, A. : Influential Factor in the Unconfined Compression Strength of the Air-Cement Treated Soil, Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, No.638/III-49, pp.353-362, 1999.12.]
- 12) 桑原崇詞, 刑部俊輔, 余川弘至：気泡混合処理による地盤改良と攪拌機械への負荷抵抗, 土木学会第 77 回年次学術講演会, pp.VI-10, 2022. [Kuwahara, T. and Osakabe, S. and Yokawa, H. : Ground improvement through foam mixing treatment and load resistance to stirring machines, Japan Society of Civil Engineers 77th Annual Academic Conference, pp.VI-10, 2022.]
- 13) 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, Vol.64, No.3, pp.505-518, 2008.7.[Kondo, Y. and Nakayama, T. and Akagi, H. : Production of Air Foam Suspension for Diaphragm Wall Excavation using Excavated Soil and its Application, Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, Vol.64, No.3, pp.505-518, 2008.7.]
- 14) 吉村優治, 小川正二：粒状体の間隙比およびせん断特性に及ぼす一次性質の影響, 土木学会論文集, No.487, III-22, pp.95-130, 1993.[Yoshikawa, Y. and Ogawa, S. : The Influence of the Primary Properties on the Void Ratio and Shear Characteristics of Granular Materials, Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, No.487, III-22, pp.95-130, 1993.]
- 15) 阿部俊宏：軟弱地盤の軽量安定処理工法に関する研究, 熊本大学卒業論文, 1987.3.[Abe, T. : Research on light-weight and stable treatment methods for soft ground, Kumamoto University graduation thesis, 1987.3.]
- 16) Schneider, C.A., Rasband, W. S. and Eliceiri, K.W. "NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis", Nature Methods 9, pp.671-675, 2012.