

カゼイン併用セメント改良土の粒度と含水比が軽量化に与える影響

Effect of Particle Size and Water Content on the Weight of Cement Treated Sand Mixed with Casein

木次 貫太¹⁾, 玉置 尊²⁾, 栗本 悠里³⁾, 畠 俊郎⁴⁾, 松川 耕治⁵⁾, 濱本 佳那子⁶⁾

- 1) Kanta KOTSUGI, 修士課程, 広島大学大学院先進理工系科学研究科, m231720@hiroshima-u.ac.jp
2) Takeru TAMAOKI, 学士課程, 広島大学工学部, b212345@hiroshima-u.ac.jp
3) Yuri KURIMOTO, 学士課程, 広島大学工学部, b202458@hiroshima-u.ac.jp
4) Toshiro HATA, 教授, 広島大学大学院先進理工系科学研究科, thata@hiroshima-u.ac.jp
5) Koji MATSUKAWA, 課長, NEXCO 西日本コンサルタンツ(株), k.matsukawa@w-nexco-consul.co.jp
6) Kanako HAMAMOTO, NEXCO 西日本コンサルタンツ(株), k.hamamoto@w-nexco-consul.co.jp

近年, 高速道路の老朽化への対応として大規模更新工事が実施されており, 多くの現場で軽量盛土工法が用いられている. 道路盛土の長期安定性の観点から透水性の良い軽量盛土工法が求められ, 廃棄乳に含まれるカゼインを用いたカゼイン併用セメント改良土に着目した. 中国地方での実用を考え, 真砂土を使用した含水比調整に課題がある. そこで, 粒径と含水比が軽量化に与える影響に関して検証を行った. 真砂土のケース・矢作砂を混合したケースの両方で, ある含水比で大幅に乾燥密度が低下した. また, 乾燥密度の変化は, 急激に低下した後, 材料分離が起きるまで $1.2\sim 1.3\text{ g/cm}^3$ 付近の値となった.

キーワード: 真砂土, 軽量土, 含水比

(IGC : D-2, D-3, D-10)

1. はじめに

わが国では建設後 50 年以上経過した道路構造物が多く存在しており, 老朽化が深刻な問題となっている. そのため, 日本各地で高速道路の大規模修繕・更新工事が行われている. その中で, 発泡スチロールを用いた EPS 盛土や気泡混合軽量土など, 様々な軽量盛土工法が用いられている¹⁾.

特に, FCB 工法は, 密度が調整できることや現地発生土が利用できることから, 多くの施工現場で用いられている²⁾. しかし, 施工場所によっては透水性が低下することが問題となる場合がある. また, 数値解析により, 道路盛土の長期安定性を考える上で, 透水性は重要な要因となることが明らかになっている³⁾.

そこで, 現地発生土が使用でき, 透水性の向上が見込める軽量盛土工法が求められている. 倉本ら⁴⁾は廃棄乳に含まれるカゼイン, 中国地方での実用化を考え広く分布している真砂土を現地発生土として用いた, カゼイン併用セメント改良土の開発を行った. カゼイン併用セメント改良土とは, セメント改良土に少量のカゼイン粉末を加えて混合することによって, カゼインの空気連行性により軽量効果・透水性向上効果が得られる改良土である. FCB 工法をもとに, 14 日養生後に乾燥密度: 1.3 g/cm^3 程度, 一軸圧縮強度 (以下, UCS とする): $300\sim 400\text{ kPa}$ 程度を目標性能と設定した. 実験の結果, 目標性能を満たし, 透水係数: 10^{-7} m/s から 10^{-5} m/s の 2 オーダー程度改良できる配合があることを明らかにした. FCB 工法で

は材齢 28 日の UCS を基準にしているが, カゼイン併用セメント改良土では施工期間の短縮を目的として, 材齢 14 日での UCS で FCB 工法の材齢 28 日の UCS 基準である 300 kPa を超えることを考えて, 養生期間は 14 日と設定された.

カゼイン併用セメント改良土の特徴は主に 3 つある. 1 つ目は, 透水性を向上させることができる軽量盛土工法であることである. 2 つ目は, 産業廃棄物である廃棄乳から得られるカゼインを起泡剤として使用することである. 3 つ目に, 現地発生土である真砂土を使用することが挙げられる.

循環型社会の構築の観点から, 産業廃棄物を地盤改良に有効利用することは地盤工学上において重要であり, 様々な研究が行われている. 例えば, 地盤改良の分野では, 廃棄物が低密度であることを利用して発泡スチロール廃材⁵⁾や PET ボトル⁶⁾などの産業廃棄物を軽量盛土等に有効利用している.

カゼイン併用セメント改良土に用いられるカゼインも同様に生乳から乳製品を製造・加工する際の産業廃棄物である廃棄乳から得られる. カゼインは, 牛乳や乳製品に含まれるたんぱく質の 1 種であり, 牛乳に含まれる全たんぱく質の約 80% をカゼインが占めている⁷⁾. 世界中でも毎年多くの廃棄乳が排出されているため, 廃棄物の削減のためにカゼインの有効利用が求められている.

カゼイン併用セメント改良土では, カゼインを起泡剤として有効利用することにより, 産業廃棄物の削減に寄与する.

カゼインが起泡剤として機能することは、タンパク質の界面活性化作用が影響していることが明らかになっている⁸⁾。また、タンパク質が界面活性化作用を持つのは、両親媒性を有しているためである。その性質により、分子の親水性部分を水層に、疎水性部分を気層に向けて、気液界面に配向している。そのため、水の表面張力が低下し、表面積が大きい膜になりやすく、泡立つという原理である。また、カゼインなどの規則構造を有しないタンパク質は他のタンパク質に比べても高い起泡性を有していることが示されている。

そのため、カゼイン併用セメント改良土ではカゼインにより供試体内部に多くの気泡を内包することが可能になるため、供試体内の間隙が増加する。その結果、軽量化・透水性向上の効果を得ることができる。

地盤改良分野において、カゼイン併用セメント改良土以外でも、カゼインを有効利用するためにいくつかの研究が行われている。

例えば、セメントに代わる新たな地盤材料としてカゼインを提案した、カゼイン改良土の研究がある⁹⁾。乾燥状態の供試体と湿潤状態の供試体のどちらも、カゼイン含有率が増加すると UCS が増加することが示された。また、作製された供試体の走査型電子顕微鏡 (SEM) 画像から、結合材として作用したカゼインが土粒子を覆い、カゼインと土の複合体が形成されていることが確認された。複合体が形成されることにより、粒子間結合および凝集効果を促し、カゼイン改良土の強度の増加に寄与したと考察した。

その他に地盤改良分野では EICP 工法の研究¹⁰⁾¹¹⁾などにカゼインを有効利用した例が挙げられる。しかし、カゼイン併用セメント改良土以外では、カゼインとセメントを使用した地盤改良の研究は実施されていない。

しかし、カゼイン併用セメント改良土の実用化には、含水比の管理が難しいという課題がある。気泡混合軽量土でも同様の問題があり、現地発生土として真砂土を用いた際の配合管理に関して研究が行われている¹²⁾。

真砂土は、Regional Soil などと呼ばれ、水に対する安定性が低いことが明らかになっている¹³⁾¹⁴⁾。そのため、真砂土の粒子破碎やコンシステンシーなどの性質に関する研究は数多く行われている¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾。

その他にも起泡剤を加えた土試料のコンシステンシー特性に関する研究が行われており、近藤ら¹⁸⁾は気泡安定液を用いた地中連続壁工法の現場管理手法を提案している。掘削土砂の粒度やコンシステンシー特性等により、改良土の乾燥密度に大きな影響を与える。粒度と含水比の関係を明らかにし、軽量化が確認される最小の含水比を「最小含水比」、土粒子が沈降・分離を生じる含水比を「分離含水比」として定義した。また、比表面積・細粒分含有率・液性限界などの変数を用いて、最小含水比と分離含水比を導出する現場管理で用いる評価式の作成を行った。

そこで本研究では、現地発生土として真砂土を用いた

カゼイン併用セメント改良土の現場での含水比の管理手法の提案を目指して、粒度と含水比が 14 日養生後の乾燥密度に与える影響を検証した。

広島県東広島市で採取された真砂土をふるいを用いて、異なる粒度となるように調整した。また、真砂土と同じ花崗岩系岩石が風化した砂であり、団粒化・粒子破碎の影響が少ない矢作砂を混合させて粒度を調整した。各粒度の試料に対して複数の含水比で供試体を作製し、養生後に供試体の乾燥密度と UCS の計測を行った。その結果から、軽量効果が確認される含水比と粒度の関係、含水比による乾燥密度の変化の傾向に関して考察を行った。

2. 実験材料・実験方法

2.1 実験材料

本研究で用いた真砂土は、広島大学東広島キャンパス内で採取した真砂土である。採取した後に、木などの不純物が混入することを防ぐために 9.5 mm のふるいを通過した試料 (以後、Basis と呼ぶ) を用いた。Basis の粒径加積曲線を図-1 に示す。固化材には普通ポルトランドセメントを使用した。起泡剤として用いたカゼインは、富士フィルム和光純薬工業株式会社から試薬として販売されている化学用 (Practical Grade) の「カゼイン、乳由来 (Casein, from Milk)」である。

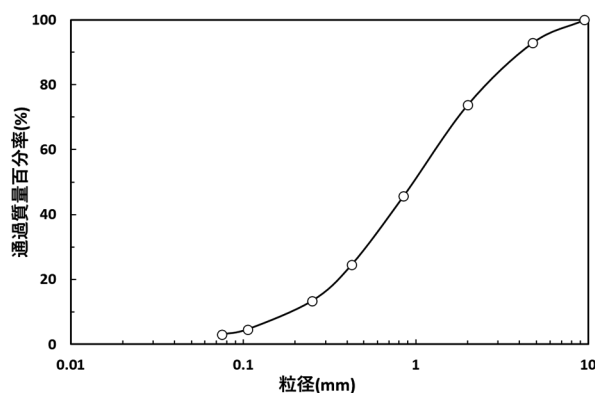


図-1 Basis の粒径加積曲線

2.2 実験方法

2.2.1 配合条件

倉本ら⁴⁾により、既に明らかになっている最適配合 (セメント添加量比・カゼイン添加量比) から基本配合を決定し、表-1 に示す。セメント添加量・カゼイン添加量は、真砂土の乾燥質量に対する質量を示している。本研究では、粒度と含水比を変数として実験を行った。各ケースで示す含水比は、真砂土の乾燥質量比に対する含水比として設定を行った。

表-1 基本配合

真砂土	セメント添加量	カゼイン添加量
1000 g	61.3 g	3.07 g

2.2.2 供試体作製方法及び養生方法

供試体作製は、乾燥質量 1000 g の真砂土に対して基本配合で設定した量のセメントとカゼインを加える。その後、各ケースで設定した含水比に対応する量の水を加え、スプーン等で軽く混合した後に 10 分間ソイルミキサーで攪拌を行う。攪拌後、ソノモールド（直径 $\phi=5.0$ cm, 高さ $H=10.0$ cm）に 3 層に分けて投入し、1 層につき 25 回タッピングしながら充填した。作製後の供試体は室温 20 °C の室内で 2 週間気中養生を行い、一軸圧縮試験を行った。各ケース 3 本の供試体を作製し、実験結果の UCS と乾燥密度は、3 本の供試体の平均値を使用する。

3. 真砂土の粒度を変えた実験

3.1 実験ケース

異なる粒度の試料を作製するために、ふるいを用いて、Basis の特定の範囲の粒度の砂の割合を増加または減少させて、異なる粒度の真砂土を 6 ケース作製した(図-2)。Particle4 のみ 19 mm のふるいを通過した試料を用いて粒度の調整を行った。また、それぞれの粒度分布に関しては、真砂土の粒度に関する文献に整合するように調整を行った。本研究では、Basis と粒度調整した真砂土の計 7 ケースの異なる粒度の試料に関して実験を行った。

まず、Basis の目標性能を満たす含水比を調べるために実験を行った。目標性能は、FCB 工法と既往の成果をもとに乾燥密度：1.3 g/cm³ 程度、UCS：300~400 kPa 程度、透水係数：2 オーダー程度改良とした。既往研究時の実験結果を参考に、含水比を 36 %から 2 %ずつ増加させ、40 %で目標性能を満たした。その他の粒度の含水比の設定では、共通で 40 %と粒度分布を参考に他 2 つの含水比を設定した。Particle5 を除く 5 ケースは Basis の D₅₀ と比較し、小さい場合は 42.5 %、45 %とし、大きい場合には 35 %、37.5 %とした。Particle5 に関しては D₅₀ が Basis と近い値であるため、40 %前後の 37.5 %、42.5 %を選択した。そのため、表-2 に示すように各粒度に対して 3 つの含水比を設定して実験を行い、真砂土の粒度が軽量効果に与える影響を検証した。

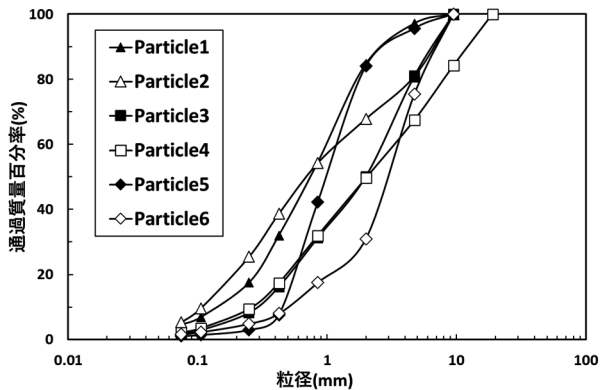


図-2 実験に使用した真砂土の粒径加積曲線

表-2 供試体加水条件 (真砂土のみ)

ケース	粒度の種類	含水比 (%)
1-1	Basis	36.0
1-2		38.0
1-3		40.0
1-4	Particle1	40.0
1-5		42.5
1-6		45.0
1-7	Particle2	40.0
1-8		42.5
1-9		45.0
1-10	Particle3	35.0
1-11		37.5
1-12		40.0
1-13	Particle4	35.0
1-14		37.5
1-15		40.0
1-16	Particle5	37.5
1-17		40.0
1-18		42.5
1-19	Particle6	35.0
1-20		37.5
1-21		40.0

3.2 実験結果

各ケースの UCS と乾燥密度の結果を図-3、図-4 に示す。各ケースの結果の 3 点は左から右に、含水比が順に高くなるように並べている。Particle4 を除く各ケースで、含水比が大きくなると UCS が小さくなっており含水比と UCS には負の相関が確認された。

Particle4 の含水比 40%は他のケースと比較しても乾燥密度が高く、供試体による差も大きいことが分かる。このようになった要因として、9.5 mm~19 mm の試料を用いたことが原因であると考えられる。礫や不純物などにより、不均質な供試体となった結果として他のケースと同様の傾向が得られなかったと考えられる。

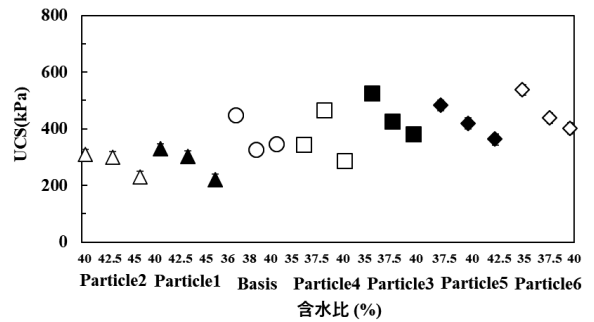


図-3 各真砂土の UCS の比較

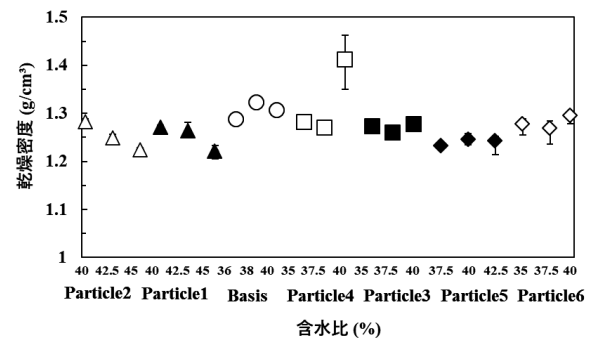


図-4 各真砂土の乾燥密度の比較

また、Particle4の40%を除く全ケースで乾燥密度の違いはほとんどなく、約 1.3 g/cm^3 程度の値となっている。そこで、図-5に示すように含水比40%で作製されたParticle1の供試体を確認すると、2mm以上の粒径の土粒子は、ほとんど確認されなかった。

そこで、攪拌により粒度が変化し、作製された供試体の性質に関する評価が適切に行えていないと判断した。作製された供試体の粒度は、攪拌後の粒度に近いと考え、攪拌後の粒度の計測を行った。計測は、セメントとカゼインを加えずに含水比40%で調整した真砂土を10分間ソイルミキサーで攪拌した後に、ふるいを用いて粒度試験を行った。試験結果を図-6に示す。攪拌前に見られたケース間の差が明らかに小さくなっていることが分かる。全ケースが近い粒度になっていることから、団粒構造が破壊されたことが原因であると推測される。真砂土の団粒化した土粒子は、ミキサーで攪拌されることにより、分離する。団粒構造を形成している土粒子の粒径が近いいため、各ケースの攪拌後の粒度分布が似通ってしまったと考えられる。また、各ケース間で近い粒度の試料となっていたため、UCSと乾燥密度の差が見られなかったと考えられる。



図-5 作製された供試体 (Particle1 含水比40%)

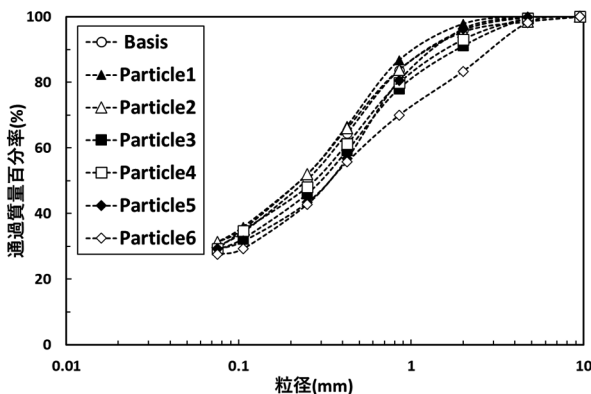


図-6 攪拌後の粒径加積曲線

4. 矢作砂を加えた実験

4.1 実験ケース

真砂土単体で、粒度を調整した試料による実験ではUCSと乾燥密度のケース間での差はほとんど確認されなかった。そのため、攪拌後もケース間で粒度の差が出る

ように粒度の調整を行う必要がある。そこで、攪拌後の粒度を変えたケースでの含水比と乾燥密度の関係を調べるために、真砂土に矢作砂を混合した試料を用いて供試体の作製を行うことを考えた。

矢作砂は、真砂土と同じ花崗岩系岩石が風化した砂であり、団粒化・粒子破碎の影響が少なく、攪拌後の粒度が変化しにくい。そのため、矢作砂と真砂土を混合することにより、攪拌後の粒度に差が生じるケースでの実験が可能になると考えた。

土粒子密度試験を行った結果、真砂土 2.609 g/cm^3 、矢作砂 2.599 g/cm^3 であったため、土粒子密度差による軽量化の影響もほとんどないと考えられる。

試料は、Basisを更に2mmのふるいを用いて通過した真砂土と矢作砂を混合したものを用いた。それぞれの試料の粒径加積曲線を図-7に示す。真砂土と矢作砂をそれぞれ8:2, 6:4, 4:6の質量比(以下それぞれ矢作砂混合率20%, 矢作砂混合率40%, 矢作砂混合率60%とする)で混合し、粒度を変化させた。粒径加積曲線を図-8に示す。真砂土のみの場合と同様に、攪拌後の粒度を計測したところ、攪拌後の粒度に差があるケースを用意することができた(図-8)。

配合に関しては、真砂土のみの場合と同様に表-1に示す配合を使用した。表-3に各粒度での設定した含水比を示す。含水比は、2.5%ずつ徐々に上げていき、供試体が作製可能になった状態のみ試験を行った。判断基準は、加水不足による流動性不足と過剰加水による材料分離により、均質な供試体が作製できない場合である。

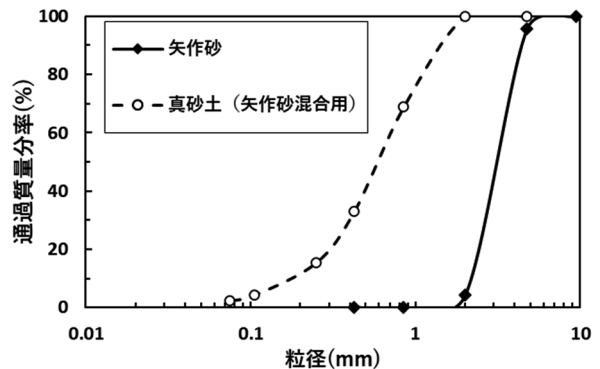


図-7 矢作砂と混合用の真砂土の粒径加積曲線

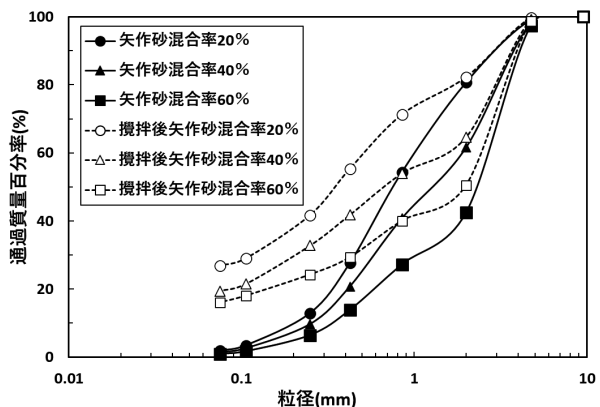


図-8 真砂土+矢作砂の粒径加積曲線

表-3 供試体加水条件（真砂土+矢作砂）

ケース	粒度の種類	含水比 (%)
2-1	矢作砂混合率 20 %	25.0
2-2		27.5
2-3		30.0
2-4		32.5
2-5		35.0
2-6		37.5
2-7		40.0
2-8		42.5
2-9		45.0
2-10		47.5
2-11	矢作砂混合率 40 %	20.0
2-12		22.5
2-13		25.0
2-14		27.5
2-15		30.0
2-16	矢作砂混合率 60 %	15.0
2-17		17.5
2-18		20.0

4.2 実験結果

実験結果を図-9、図-10に示す。3つの粒度全てで、含水比の増加による、大幅な乾燥密度の変化が確認された。よって、作製された供試体の粒度である、攪拌後の粒度の違いは UCS と乾燥密度に影響することが示された。また、各粒度で乾燥密度が急激に低下する点があり、その点を軽量化に必要な最小の含水比として既往研究¹⁸⁾同様に最小含水比と呼ぶ。

含水比による変化は、最小含水比を越えると最終的に材料分離が起きて均質な供試体を作製することが困難になるまで、乾燥密度は 1.2~1.3 g/cm³ 付近の値となり、ほとんど変化しなかった。UCS に関しても乾燥密度と同様に、最小含水比で急激に強度が低下する点があり、その後は材料分離が生じるまでは強度はほとんど一定の値に留まり、変化は確認されなかった。また、UCS や乾燥密度は最小含水比付近で最小値もしくは一度小さな値を取る特徴が見られる。これは、最小含水比付近で攪拌後の状態が最も粘性の大きい液状であることが要因として挙げられる。混合によって内包された気泡は上昇していき、外部に放出される。つまり、固化されるまでに気泡が外部に放出されるかが強度や乾燥密度に大きく関与し、含水比が少ないほど粘性が大きいため気泡が上昇する速度は小さくなり、時間を要する。また、含水比が少ないほどセメント含有率が大きく、固化時間が早くなると考えられる。そのため、軽量化に必要な最小含水比付近で UCS・乾燥密度は最小値もしくは一度小さな値を得る傾向が確認されたと考えられる。

この結果から、カゼインの軽量化効果が発揮される含水比は、1点ではなく、軽量化から材料分離までの範囲に収まれば良いことが示された。矢作砂混合率が大きくなるにつれて、最小含水比から材料分離が起きる含水比の範囲が狭くなっていくことが示された。そのため、現場での含水比の調整は、小さい粒径の土粒子を多く含む試料に比べて、大きい粒径の土粒子を多く含む試料ほど困

難であると言える。

さらに、小さい粒径の土粒子を多く含む試料ほど軽量化に必要な含水比が大きくなることも示された。また、乾燥密度の変化は大きい粒径の土粒子を多く含む試料ほど軽量化効果が大きいことも示された。

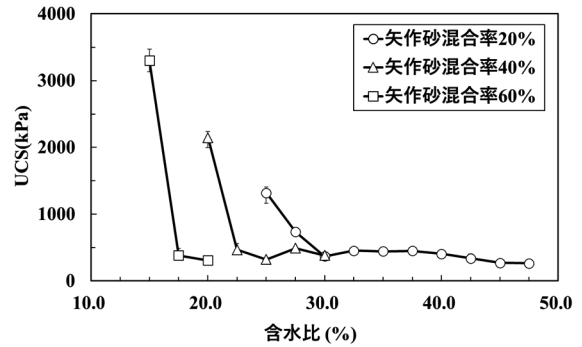


図-9 真砂土+矢作砂の UCS の比較

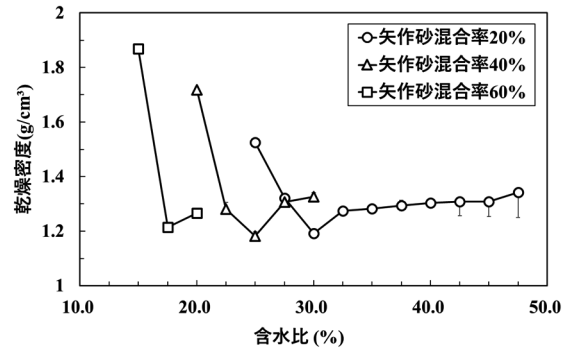


図-10 真砂土+矢作砂の乾燥密度の比較

5. 真砂土単体の追加実験

5.1 実験ケース

3章の実験の結果では、乾燥密度は既に 1.2~1.3 g/cm³ 程度であり、既に軽量化効果が発揮されていた可能性がある。そこで、矢作砂を加えたケースと同様に、急激に乾燥密度の変化が起きる点が存在するかを検証するために追加実験を行った。粒度は7つの粒度の中から、Particle4、Particle6を除く残りの5ケースの中から図-6の攪拌後の粒度を参考に2つ選択した。Particle4、Particle6は攪拌後の粒度や UCS・乾燥密度の結果(図-3、図-4、図-6)が他の5ケースと比べて傾向が異なるため除いた。残り5ケースの中で、粒径加積曲線が小さい粒径側にある Particle1、大きい粒径側にある Particle3の2つを選択した。供試体作製の際の含水比の条件を表-4に示す。

表-4 供試体加水条件（真砂土追加実験）

ケース	粒度の種類	含水比 (%)
3-1	Particle1	32.5
3-2		35.0
3-3		37.5
3-4	Particle3	27.5
3-5		30.0
3-6		32.5

5.2 実験結果

Particle1 と Particle3 の追加実験の一軸圧縮試験の結果を図-11、図-12 に示す。矢作砂を加えた実験と同様に、急激な乾燥密度の変化が確認された。また、UCS や乾燥密度は最小含水比付近で最小値もしくは一度小さな値を取る特徴も見られる。

Particle1 と Particle3 の攪拌後の粒度（図-6）を比較すると、Particle3 が Particle1 より少し大きいことが分かる。そのため、小さい粒径の土粒子を多く含む試料ほど軽量化に必要な含水比が大きくなる傾向と大きい粒径の土粒子を多く含む試料ほど軽量効果が大きい傾向に関しても同様に確認された。

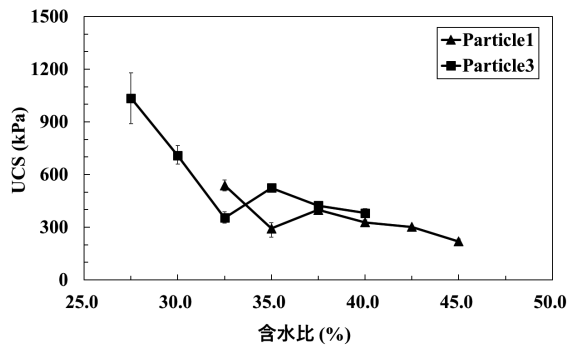


図-11 追加実験の UCS の比較

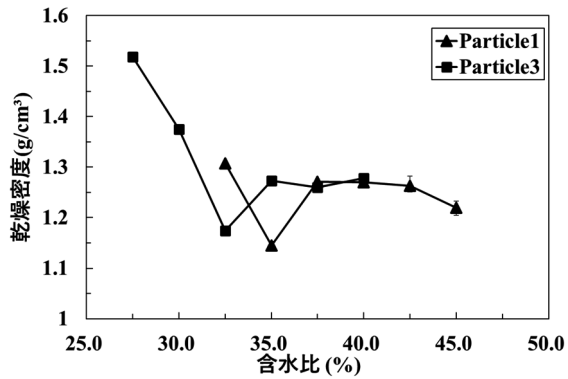


図-12 追加実験の乾燥密度の比較

6. 軽量化に関するコンシステンシー特性

6.1 攪拌後の写真の比較

真砂土を用いたカゼイン併用セメント改良土の現場での含水比の管理手法の提案を目指して、軽量化に必要な条件について考察を行う。

まず、攪拌後の見た目に関して考察を行う。図-12 に矢作砂を混合させた実験での攪拌後の写真、図-13 に真砂土の追加実験での攪拌後の写真を示す。図-12 の含水比 30% に着目すると粒度によって、性状が大きく変わることが分かる。非軽量から軽量に移る境界として、パスついた状態から液体状に近づいたタイミングで軽量化が起きている。つまり、この境界にあるコンシステンシーが軽量化に影響を与えていると考えられる。液性限界の定義は、塑性状態から液体状に変化する含水比であるこ

とから、今回の写真から得られたコンシステンシーは液性限界に近いコンシステンシーであることが推測される。攪拌後の写真からコンシステンシーが軽量化に関与していることが明らかになった。土のコンシステンシーに関する研究は既に多く行われている¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾。土の性状に係る様々な要因がある中で、細粒分含有率はコンシステンシーに大きく影響を与える要因であることが明らかになっている²²⁾²³⁾。そこで、本研究も同様に以下で細粒分含有率がカゼイン併用セメント改良土の軽量化に必要な含水比に与える影響を調べた。

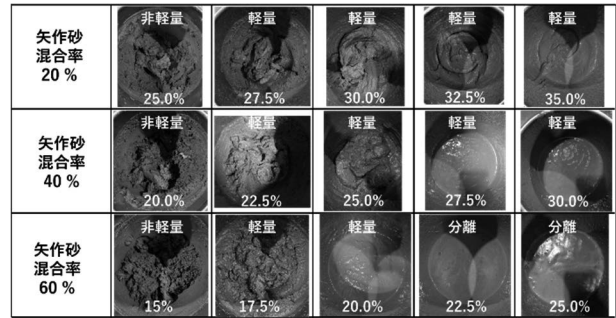


図-12 攪拌後の様子（矢作砂混合）

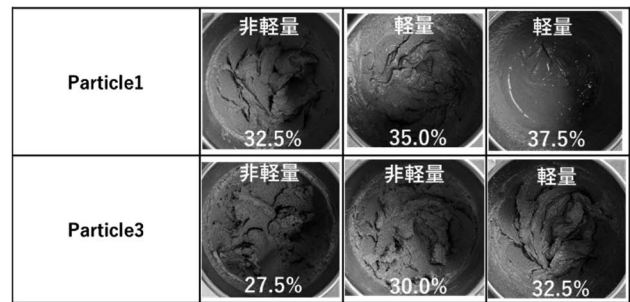


図-13 攪拌後の様子（真砂土追加実験）

6.2 細粒分含有率と最小含水比の関係

ここでは、細粒分含有率と最小含水比の関係について考察を行う。本実験で得られた最小含水比とそれぞれの粒度ケースの細粒分含有率を表-5 に示す。また、細粒分含有率と最小含水比の関係を図-14 に示す。細粒分含有率が増加するほど最小含水比も増加する単調増加が確認された。これは、細粒分含有率が増加することにより所定のコンシステンシーを得るために多量の水を必要とすることと繋がる。また、図-14 で示すように各プロットから、直線の近似式が算出された。

以上より、細粒分含有率は、最小含水比に大きく影響を与えていることが示された。今後の現場での評価式の作成の際の重要な因子になり得ると推測される。

表-5 細粒含有率と最小含水比

粒度	最小含水比(%)	細粒分含有率(%)
Particle1	32.5	31.3
Particle3	35.0	29.0
矢作砂混合率 20%	27.5	26.9
矢作砂混合率	22.5	19.4

40%		
矢作砂混合率	17.5	16.0
60%		

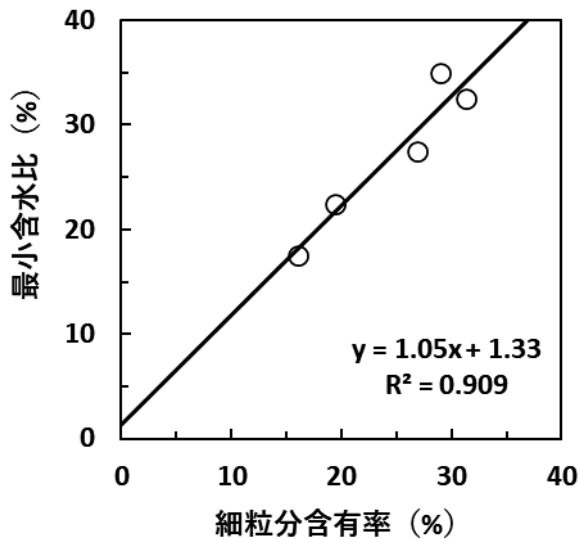


図-14 細粒分含有率と最小含水比の関係

7. 結論

真砂土を対象としたカゼイン併用セメント改良土の現場での含水比の管理手法の提案を目指して、粒度と含水比が乾燥密度と UCS に与える影響を検証した。

ふるいを用いて粒度を変えた真砂土と矢作砂を混合して粒度を変えた試料を準備し、複数の含水比で供試体を作製した。養生後に UCS と乾燥密度の計測を実施した。

- (1) 真砂土のみで粒度を調整した際には、含水比の変化による乾燥密度の変化は確認されなかった。団粒構造の破壊により粒度が変化したことが原因であると推測される。そのため、攪拌後の粒度を調べたところ、各ケースの攪拌後の粒度は近く、粒度が変化しなかったため各ケースの乾燥密度・UCS が近い結果を得たことが分かった。
- (2) 矢作砂を混合した実験により、各ケース間での差が確認された。そのため、作製された供試体の粒度に近い、攪拌後の粒度が重要であることが示された。
- (3) 矢作砂を混合した実験と真砂土のみの追加実験により、乾燥密度が急激に低下する点を確認された。急激に低下した点を越えるとしばらく乾燥密度は 1.2~1.3 g/cm³ 付近の値となり、さらに加水を続けると材料分離が確認された。
- (4) 軽量効果が発揮される含水比は、ある程度の範囲があることが示された。矢作砂混合率が大きくなるにつれて、軽量化から材料分離が起きるまでの含水比の範囲は狭くなる。また、乾燥密度の変化は矢作砂混合率が大きいほど軽量効果が大きいことが示

れた。

- (5) 攪拌後の性状を写真から比較したところ、パサついた状態から液体状に変化したところで、軽量化が起きることが示された。そのため、液性限界に近いコンシステンシーが軽量化に関与していることも示された。
- (6) 細粒分含有率と最小含水比の間には単調増加の関係があることが確認され、得られた近似式は直線となった。

以上のことが、今回の研究に明らかになったが、軽量化に必要なコンシステンシーの定量的な評価までは至らなかった。今後、定量的評価を実施するために、フロー試験などを実施していく必要がある。また、実際の現場で用いることができる含水比評価式の提案には至っていない。真砂土のコンシステンシー特性には多くの影響因子が関係している。本研究では、粒度のみを考慮したが、真砂土は風化度により性質が大きく変化する。そのため、異なる場所で採取した真砂土を対象に実験を行い、含水比や乾燥密度に与える影響を調べる必要がある。最終的に真砂土に対する汎用性の高い品質管理手法の提案が行えると考えられる。さらに、実現場の適用や適用拡大に向けて、7日強度、長期耐久性、劣化特性などについても調べていきたい。

謝辞

本研究の実施にあたり、京都大学工学研究科社会基盤環境工学専攻の橋本涼太准教授と広島県の倉本史佳さんには研究に関する助言や実験方法を教えて頂きました。ここに記して感謝を表します。

参考文献

- 1) 亀井健史, 志比利秀, 高嶋純一: 初期高温養生を受けた気泡混合軽量土の応力-ひずみ関係に関するモデルシミュレーション, 地盤工学ジャーナル, Vol.2, No.2, pp.65-72, 2007.
- 2) 豊福俊泰, 三嶋信雄, 田中久士: 気泡混合軽量土の品質管理手法に関する研究, 土木学会論文集, No.658, IV-48, pp.141-152, 2000.
- 3) 山本剛, 中井卓巳, 丸本義文, 小高猛司, 岸田潔, 大西有三: 長期劣化の概念を導入した道路法面の健全性評価手法の提案, 地盤工学ジャーナル, Vol.4, No.1, pp.21-23, 2009.
- 4) 倉本史佳, 畠俊郎, 松川耕治, 濱本佳那子: 実現場を想定したカゼイン併用セメント改良盛土の有効性検証, 令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会, III-104, 2023.
- 5) 松尾栄治, 玉滝浩司, 保井渉: 発泡スチロール廃材を細骨材代替とした超軽量モルタルの材料分離性状および強度特性, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.3,

- pp.368-378, 2007.
- 6) 亀井健史, 松尾和俊: フレーク状の PET ボトルを利用した気泡混合軽量土の一軸圧縮特性, 土木学会論文集, No.764, III-67, pp.359-366, 2004.
 - 7) 石井哲也: カゼインミセルの構造および性質に関する最近の研究動向, Milk Science, Vol.54, No.1, pp.1-8, 2005.
 - 8) 土井悦四郎: 食品タンパク質の加工特性に関する研究, 日本食品工業学会誌, Vol.39, No.12, pp.1163-1169, 1992.
 - 9) Chang, I., Im, J., Chung, M., Cho, G.: Bovine casein as a new soil strengthening binder from dairy wastes, Construction and Building Materials, pp.1-9, 2018.
 - 10) Miyake, M., Kim, D., Hata, T.: Casein-assisted enhancement of the compressive strength of biocemented sand, Scientific Reports, Vol.12, No.1, pp.1-13, 2022.
 - 11) Phanvongsa, N., Nakayenga, J., Hata, T.: Application of casein - combined enzyme - induced carbonate precipitation to mitigate shallow failure in cut slope, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 82, No.12, p.452, 2023.
 - 12) 古河幸雄, 深沢誠, 神谷孝宏: まさ土を用いた気泡混合軽量土の風化度の影響, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.4, pp.822-833, 2009.
 - 13) 木村和弘: マサ土の締固め特性について, 信州大学農学部紀要, Vol. 10, No.1, pp.63-73, 1973.
 - 14) 日置和昭, 服部健太, 中村聡司: 特殊土の流動限界と締固め特性について一崩壊土砂有効利用の観点から一, 日本地すべり学会誌, Vol.56, No.6, pp.189-196, 2020.
 - 15) 松尾新一郎, 福本武明: マサ土の破碎性に影響する諸要因, 土質工学会論文報告集, Vol.16, No.4, pp.85-92, 1976.
 - 16) 甲本達也, 藤本昌宣: フォールコーン試験によるまさ土の液性・塑性両限界の測定, 佐賀大学農学部彙報, Vol.71, pp.133-138, 1991.
 - 17) 中山義久, 西田一彦, 西形達明, 井上啓司: まさ土の物性と液状化特性, 土木学会論文集, No.638, III-49, pp.207-215, 1999.
 - 18) 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, No.3, pp.505-518, 2008.
 - 19) 松下英次, 山本哲朗, 鈴木泰之: 土のコンシステンシーに及ぼす pH の影響, 土木学会論文集, No.617, III-46, pp.283-297, 1999.
 - 20) 青山要, 宮森建樹, 脇山哲也, 菊池大輔: 土の物理化学的性質が改良土の初期性状と強度に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.721, VI-57, pp.207-219, 2002.
 - 21) 三井隆, 吉川正, 池田昭彦, 青山要, 中川浩二: 細粒分含有率が異なる改良土の室内配合試験による基礎的な研究, 土木学会論文集, No.693, VI-53, pp.117-129, 2001.
 - 22) 青山要, 宮森建樹, 脇山哲也: 土の粒度特性を考慮した改良土の特性と配合設計に関する研究, 土木学会論文集, No.749, VI-61, pp.149-163, 2003.
 - 23) 熊本直樹: 砂・粘土混合土のコンシステンシー特性, 広島工業大学紀要研究編, 第 49 巻, pp.35-42, 2015.

(2024 年 6 月 24 日 受付)