

クリンカアッシュと自然土混合試料の圧密及びせん断特性

Consolidation and Shear Characteristics of Clinker Ash and Natural Soil Mixtures

吉本憲正	Norimasa YOSHIMOTO	(山口大学大学院創成科学研究科)
中下明文	Akifumi NAKASHITA	(中国高圧コンクリート工業(株))
大本尚樹	Naoki OHMOTO	(中国高圧コンクリート工業(株))

クリンカアッシュは、地盤材料として優れた力学特性を有していることから、有効利用が進んできている。一方で、大規模な土工では、十分な量を供給できないこともあり、更なるクリンカアッシュの活用方法の提案が期待される。本研究では、自然土とクリンカアッシュを混合し、盛土材としての利用を念頭に置き、混合試料の圧密及びせん断特性を解明することとした。その結果、クリンカアッシュの混合率が大きくなるにつれ、圧密終了時間が大幅に改善されること、自然土やクリンカアッシュの種類に寄らず、せん断強度は混合率 30%以上で概ねクリンカアッシュと同程度を発揮することなどが明らかとなった。

キーワード：クリンカアッシュ、混合率、せん断強度 (IGC : D-05, D-06, D-09)

1. はじめに

石炭火力発電所から発生する石炭灰は、資源有効利用促進法において「特に再生資源としての有効利用を促進しなければならない指定副産物」に位置付けられている。その石炭灰は、フライアッシュとクリンカアッシュの2種類に大別される。フライアッシュは、燃焼ガス中を浮遊して球形粒子となり、電気集塵器で回収されるもので、主に細粒分で構成され、石炭灰発生量の約 8～9 割を占める。一方、クリンカアッシュは、石炭火力発電所のボイラー底部にたまった塊状の石炭灰を破砕機で砂や礫の大きさに破砕したものであり、その発生量は、石炭灰発生量の約 1～2 割である。

フライアッシュについては、その発生量が多いことから、地盤工学においても積極的に有効利用の研究が勧められ、その地盤材料としての特性や様々な利用方法について提案されてきている^{1) 2)}。一方、クリンカアッシュについては、その発生量がフライアッシュに比べて少ないためか、やや遅れて地盤材料としての有効利用に関する研究が行われてきている。

クリンカアッシュの材料特性に関する研究は、高橋・梅原ら^{3) 4)}が行っており、2箇所の石炭火力発電所からクリンカアッシュを採取し、色調や形状を外観するとともに、粒子密度、粒度分布、最大・最小密度、化学成分を求めている。また、供試体の相対密度が 65%の場合について一面せん断試験を行い、内部摩擦角や粘着力を求めている。そして、いくつかの研究を経て、一般的なクリンカアッシュの地盤材料としての力学特性を解明するため、全国 15 箇所の発電所で産出されたクリンカアッシュを 60 試料集め、主に、締固められた状態で、一連の室内土質試験を行い、物理特性、締固

め特性、静的せん断特性、透水性などを求めるとともに、クリンカアッシュの利用用途の検討が若槻ら⁵⁾により実施された。さらに、若槻ら⁶⁾や Winter, M. J. et al.⁷⁾は、クリンカアッシュが人工材料であり、粒子特性に特徴があることから、粒子の形状や単粒子破砕強度などの粒子特性の観点からも検討をすすめるとともに、三軸試験により、様々な密度、拘束圧での静的せん断特性、繰返しせん断特性などを明らかにし、クリンカアッシュが地盤材料として、優れた力学特性を有していることを示した。

これらの研究から、クリンカアッシュが地盤材料として優れた力学特性を発揮し、有用な地盤代替材になり得ることが明らかとなった。しかしながら、大規模な土工などの実際の有効利用において、一つの発電所から産出される量が十分ではないこともしばしばあり、更なる活用方法を検討する必要が生じてきた。

そこで、クリンカアッシュの優れた地盤材料としての力学特性に着目し、自然土と混合して利用することを考えた。本研究では、自然土とクリンカアッシュを混合して、盛土材料として利用することを念頭に置き、混合試料の締固め特性や締め固めた混合試料の圧密及びせん断特性を明らかにし、混合試料としての活用の可能性を調べることにした。

2. 物理及び締固め特性

2.1 用いた試料

クリンカアッシュは、安定的な発生が見込める 2つの発電所から採取した C.A. Mi と C.A. Shi を用いている。本研究で用いたクリンカアッシュも、これまでに

表-1 用いた試料の物理的性質

Sample	ρ_s g/cm ³	w_L %	w_p %	I_p
CA. Mi	2.072	—	—	—
CA. Shi	2.151	—	—	—
Ube Masado	2.676	—	—	—
Misumi SFG	2.625	43.0	41.6	1.4

報告 9)されているクリンカアッシュと同様に、粒子形状は複雑で、粒子内に空隙が存在する特徴を有している。

使用した宇部まさ土は、購入土であり、購入時には20mm までの大きさの粒子を含む、粒径幅の広い試料である。粒径幅がクリンカアッシュと類似していることや、一般的に土工材料として利用されていることから、本研究では、分級されたものに近づけることを目的に2mm 以下に粒度調整した宇部まさ土を使用した。

宇部まさ土の他に、島根県浜田市三隅町の建設工事現場から建設発生土として産出した自然土（三隅町で発生したことや地盤材料の工学的分類より、細粒分礫質砂（SFG）に分類されることから、試料名は、三隅SFG とした。）も混合試料として用いた。採取時には、19mm 以上の礫も若干含まれていたが、力学特性に大きく影響を与えるほどではないと思われたことから、試験装置などに対応させるため、19mm 以下に粒度調整を行った。

本研究では、クリンカアッシュは、地盤材料の力学特性の改善のために用いている。そのため、クリンカアッシュと自然土の乾燥質量の混合率（混合試料全体の乾燥質量に対するクリンカアッシュの乾燥質量）を、それぞれクリンカアッシュ 0%, 10%, 20%, 30%, 50%, 100%の6パターンとした。

2.2 物理特性

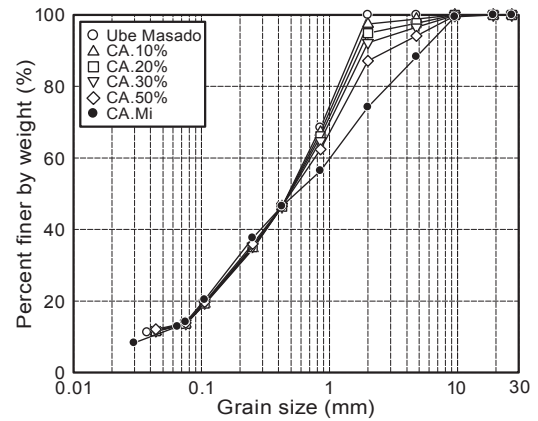
2.2.1 物理的性質

用いた試料の物理的性質を表-1 に示す。表中には、土粒子の密度 ρ_s 、液性限界 w_L 、塑性限界 w_p 、塑性指数 I_p を示す。土粒子の密度試験は、JIS A 1202（土粒子の密度試験）に準じ、9.5mm ふりを通過した試料に対して行っている。表に示すように、クリンカアッシュの土粒子密度は2.1g/cm³程度で、一般的な自然土より小さい値を示している。これは、上述したように、クリンカアッシュの粒子内部にある外部と連結していない閉じた空隙の影響によるものと考えられる。

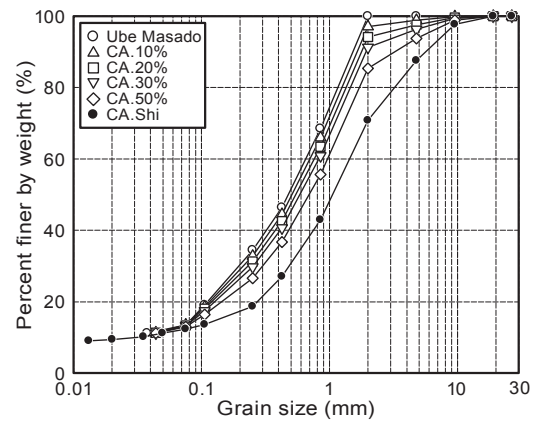
液性限界・塑性限界試験は、JIS A 1205（土の液性限界・塑性限界試験）に準じて行っている。CA. Mi, CA. Shi, 宇部まさ土が、非塑性であるのに対し、三隅SFG は、わずかであるが塑性指数があり、塑性を有している。

2.2.2 粒度分布

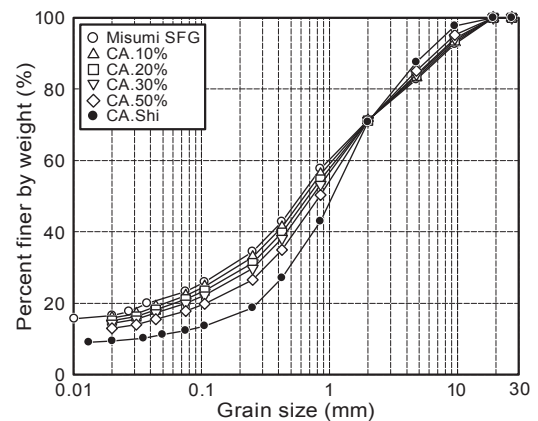
図-1 (a)～(c)に、用いた試料及びそれらとクリンカ



(a) Ube Masado + CA. Mi



(b) Ube Masado + CA. Shi



(c) Misumi SFG + CA. Shi

図-1 粒径加積曲線

アッシュ混合土の粒径加積曲線を示す。粒径加積曲線は、JIS A 1204（粒度試験）に準じた方法で求めた。図より、いずれもクリンカアッシュの混合率に対応して粒度が変化していることが確認できる。

各試料の均等係数 U_c 及び曲率係数 U_c' 、平均粒径 D_{50} 、細粒分含有率 F_c の結果を、表-2 (a)～(c)に、各試料の均等係数 U_c 及び曲率係数 U_c' とクリンカアッシュ混合率の関係を図-2 に、各試料の平均粒径 D_{50} 及び細粒分含有率 F_c とクリンカアッシュ混合率の関係を図-3 にそれぞれ示す。なお、均等係数や曲率係数を求める際に必要となる D_{10} が結果から得られない場合は、

表-2 用いた試料の物理的性質

(a) Ube Masado + CA. Mi

	混合率 %	U_c	U_c'	D_{50} mm	F_c %
Ube Masado	0	26.0	2.34	0.48	13.5
CA10%	10	22.0	1.84	0.48	13.6
CA20%	20	24.3	1.96	0.48	13.6
CA30%	30	33.5	1.71	0.48	13.7
CA50%	50	33.5	1.87	0.50	13.8
CA. Mi	100	25.6	0.74	0.54	14.1

(b) Ube Masado + CA. Shi

	混合率 %	U_c	U_c'	D_{50} mm	F_c %
Ube Masado	0	26.0	2.34	0.48	13.5
CA10%	10	23.3	2.10	0.51	13.4
CA20%	20	25.3	2.32	0.54	13.3
CA30%	30	32.0	2.54	0.58	13.2
CA50%	50	32.0	3.13	0.69	12.9
CA. Shi	100	48.3	5.52	1.06	12.3

(c) Misumi SFG + CA. Shi

	混合率 %	U_c	U_c'	D_{50} mm	F_c %
Misumi SFG	0	1000.0	26.57	0.60	23.2
CA10%	10	668.8	19.99	0.63	22.1
CA20%	20	376.7	13.64	0.69	21.0
CA30%	30	320.0	13.14	0.73	19.9
CA50%	50	320.0	18.77	0.84	17.7
CA. Shi	100	48.3	5.52	1.06	12.3

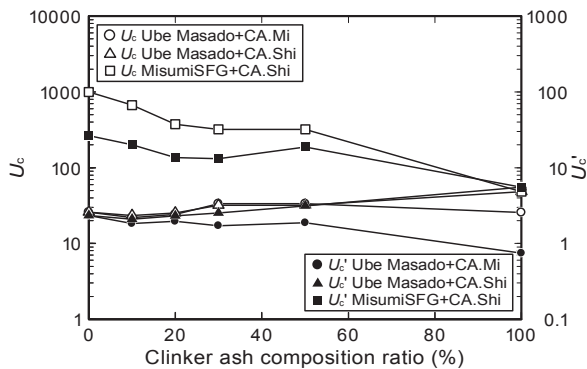


図-2 均等係数 U_c 及び曲率係数 U_c' とクリンカアッシュ混合率の関係

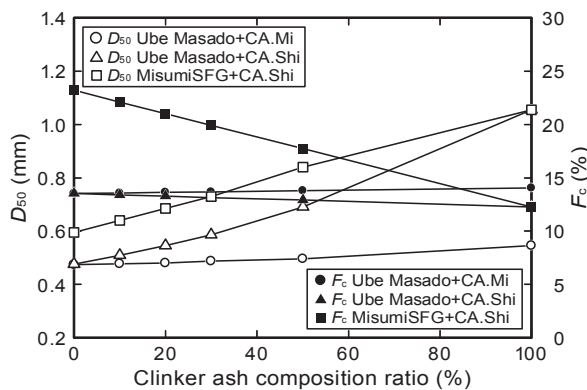
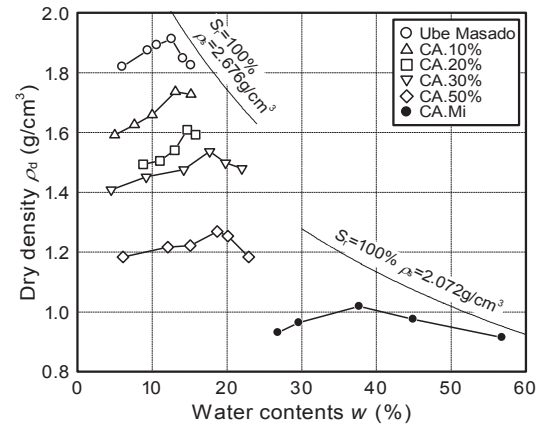
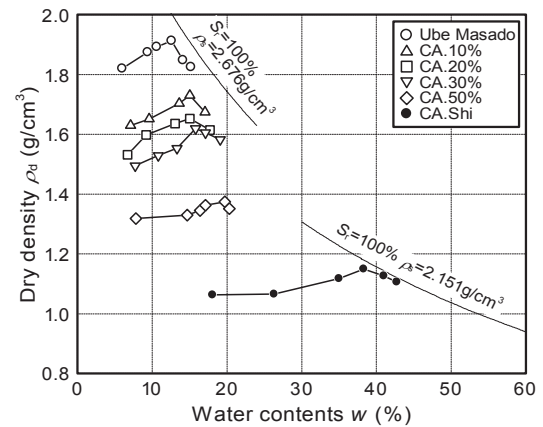


図-3 平均粒径 D_{50} 及び細粒分含有率 F_c とクリンカアッシュ混合率の関係

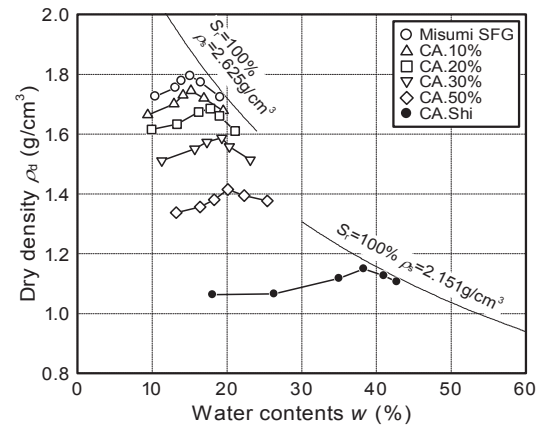
直前の粒径加積曲線の勾配を延長して、外挿により求めている。クリンカアッシュと自然土の粒径分布が異なるため、混合試料の均等係数及び曲率係数の値は異



(a) Ube Masado + CA. Mi



(b) Ube Masado + CA. Shi



(c) Misumi SFG + CA. Shi

図-4 締固め曲線

なり、線形的ではないが、混合率に対応して変化することが確認できる。平均粒径や細粒分含有率は、クリンカアッシュと自然土の混合率に応じて、その値がほぼ線形的に変化する。

2.3 締固め特性

締固め試験は、JIS A 1210 (突固めによる土の締固め試験) に準じた方法で実施した。クリンカアッシュや宇部まき土は、破碎しやすい特性があること、三隅SFGは、若干の塑性を有することから、それら試料の特性を考慮し、2種類のクリンカアッシュと宇部まき土及

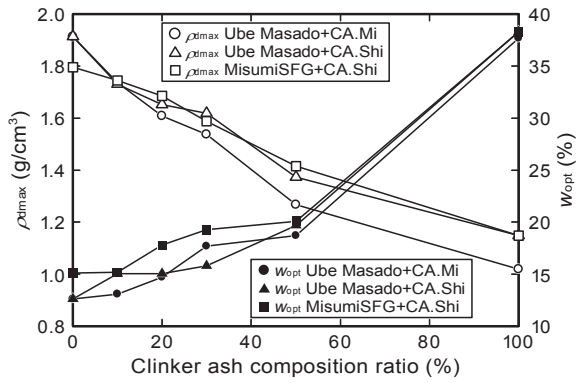


図-5 最大乾燥密度 ρ_{dmax} 、最適含水比 w_{opt} とクリンカアッシュ混合率の関係

びそれらの混合試料は、A-b 法を、三隅 SFG と CA. Shi の混合試料は、A-c 法をそれぞれ適用した。

図-4(a)～(c)に用いた試料及びそれらの混合試料の締固め曲線を示す。図より、クリンカアッシュの締固め曲線は自然土のように鋭く立ち上がることはなく、広い含水比範囲でなだらかな曲線を呈している。これは、クリンカアッシュの粒子形状が複雑であることから、締固め時に粒子の再配列を起こしにくい材料であるためと考えられる。このことから、クリンカアッシュの締固めが含水比に大きく影響されないことがわかる。混合試料の締固め曲線は、クリンカアッシュの混合率に応じて、クリンカアッシュの締固め曲線の方へと移動していることがわかる。

各試料及びそれらの混合試料の最大乾燥密度 ρ_{dmax} 、最適含水比 w_{opt} とクリンカアッシュ混合率の関係を図-5に示す。混合率が増加するに従い、最大乾燥密度が低下するのに対して最適含水比が高くなることが読み取れる。これにより、混合率が大きくなると、軽量材料としてのクリンカアッシュの特性が顕著に表れる事が確認できる。

3. 圧密及びせん断特性

3.1 圧密排水三軸圧縮試験の概要

本研究で対象となる混合土を含む試料は、2mm 以上の礫を含み、均等係数が 10 以上の粒径幅の良いものである。そのため、直径 100mm、高さ 200mm の供試体サイズで実験が可能な三軸試験装置を用いて、圧密排水三軸圧縮試験を実施した。なお、拘束圧 σ'_c は、想定される盛土の高さを踏まえて、50, 100, 200kPa とした。軸ひずみ速度は、0.1%/min の条件で実施した。

道路土工の盛土工指針に記載の締固め度の管理基準値は、締固め度が 90%以上⁸⁾とされている。そのため、供試体の締固め度 D_r は 90%を目標に作製した。なお、不飽和時のサクシオンによる強度増加の影響を省くため、供試体は飽和条件とした。クリンカアッ

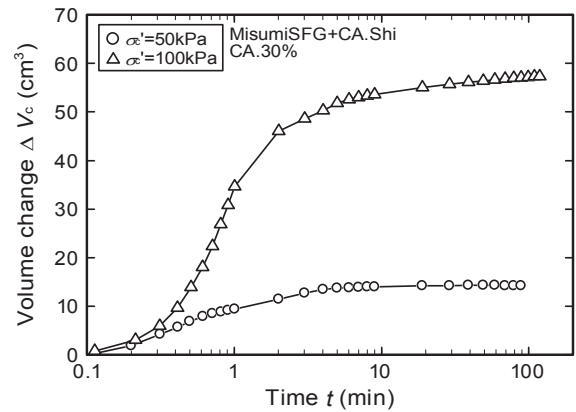


図-6 圧密による体積変化と時間の関係 (混合率 30%)

シュの飽和化には工夫が必要なため、それぞれの混合土に対して、以下のような手順で供試体を作製した。

宇部まさ土とクリンカアッシュ混合試料の供試体は、事前に所定の混合率で混合後、水浸状態で脱気した試料を、メンブレンを取り付けたモールド内に、5層にわけ飽和状態を保ちながら堆積させ、ランマーで突き固めて、上述の密度となるように作製した。三隅 SFG とクリンカアッシュ混合試料の供試体は、最適含水比程度の水を加え湿潤状態にした三隅 SFG 試料と水浸状態で脱気したクリンカアッシュ試料を、所定の混合率で混合後、メンブレンを取り付けたモールド内に5層にわけ所定の高さから落下堆積させ、ランマーで突き固めて上述の密度を満足するように作製した。

3.2 圧密挙動

クリンカアッシュと宇部まさ土は、砂質土系の試料であり、細粒分含有率も低いことから、それらのみ及びそれらの混合土は、圧密が短時間で終了した。一方で、三隅 SFG は、わずかではあるが塑性を有し、細粒分含有率も 20%程度含む試料であることから圧密に時間を要した。そのため、ここでは三隅 SFG のみと CA. Shi との混合試料の圧密挙動について説明する。

圧密による体積変化と時間の関係について、例として、三隅 SFG と CA. Shi の混合率 30%の結果を図-6に示す。図より、一般的な体積変化と時間の関係を示しており、拘束圧の増加により、体積変化量も大きくなっていくことが確認できる。圧密の終了の判断は、この体積変化時間曲線に対して、3t 法により行い、各混合率の圧密終了時間と圧密終了時の体積変化を取得した。なお、拘束圧 $\sigma'_c=200\text{kPa}$ については、圧密時のデータ保存が出来なかったケースが存在したため、ここでは割愛している。

図-7に、拘束圧ごとの、三隅 SFG と CA. Shi の混合試料の圧密終了時の体積変化とクリンカアッシュ混合率の関係を示す。図より、拘束圧が大きいほど体積変化量は大きくなっており、実験結果に若干のばらつきが認められるものの、クリンカアッシュの割合が増え

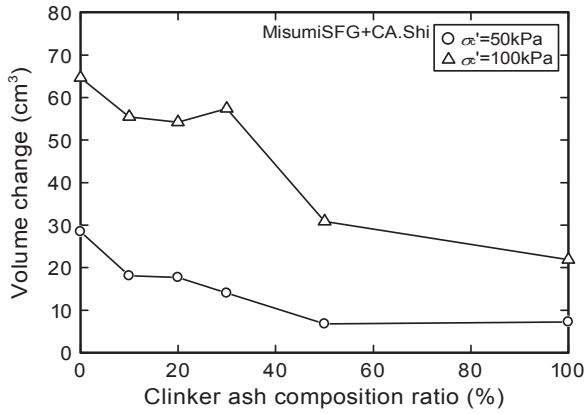


図-7 圧密終了時の体積変化とクリンカアッシュ混合率の関係

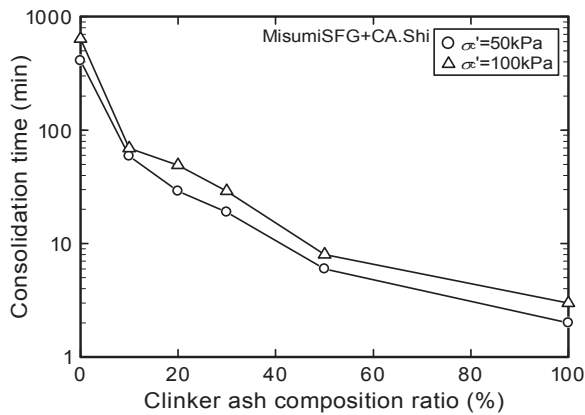


図-8 圧密終了時間とクリンカアッシュ混合率の関係

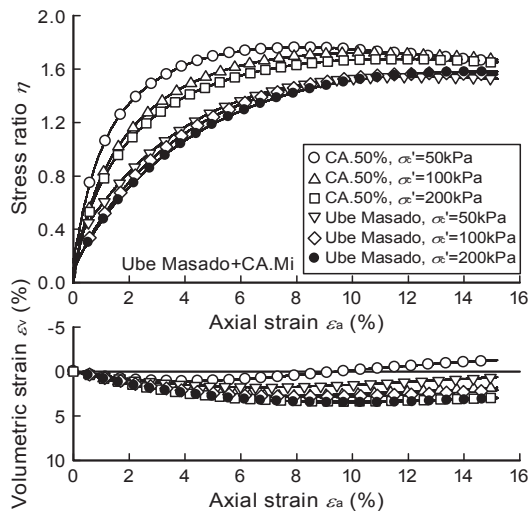
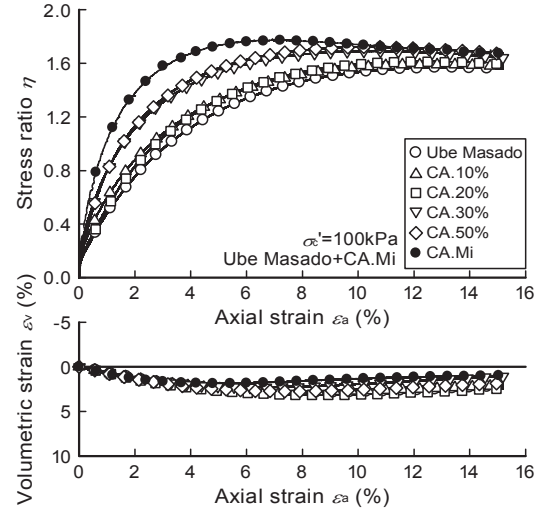


図-9 応力比及び体積ひずみと軸ひずみの関係 (Ube Masado + CA. Mi, 混合率 50%)

ると体積変化量は減少している。

図-8 に、拘束圧ごとの、三隅 SFG と CA. Shi の混合試料の圧密終了時間とクリンカアッシュ混合率の関係を示す。図より、拘束圧が大きくなることで圧密終了時間が長くなっていることがわかる。三隅 SFG のみでは、圧密終了時間は、50kPa の時、約 400 分、100kPa の時、約 640 分とかなり時間を要することがわかる。しかしながら、クリンカアッシュ CA. Shi をわずか 10%



(a) Ube Masado + CA. Mi

図-10 応力比及び体積ひずみと軸ひずみの関係 (拘束圧 $\sigma'_v=100\text{kPa}$)

混合するだけで、いずれの拘束圧においても終了時間が約 1/8 以上に短縮している。それ以降は、クリンカアッシュの割合が増えるにつれ、緩やかに終了時間が短縮している。これより、三隅 SFG にクリンカアッシュを加えることで、透水性が大幅に改善されることがわかる。このことは、実施工においても、工期の短縮に繋がるなどが期待できると考えられる。

3.3 せん断挙動

3.3.1 拘束圧依存性

図-9 に、宇部まさ土に CA. Mi を 50% 混合した混合試料と宇部まさ土のみの応力比 $\eta (=q/p')$ 及び体積ひずみ ε_v と軸ひずみ ε_a の関係を示す。いずれの拘束圧においても宇部まさ土に比べて CA. Mi 混合試料の応力比 η が大きく発揮されていることがわかる。また、それは低い拘束圧であるほどより顕著に認められ、クリンカアッシュによる改良効果が確認できる。体積ひずみの挙動に着目すると、混合試料の拘束圧 $\sigma'_v=50\text{kPa}$ において、収縮から若干膨張に移する挙動が確認される。クリンカアッシュは、その粒子特性から拘束圧 $\sigma'_v=200\text{kPa}$ 程度において、粒子破碎を生じ、拘束圧の影響を受けると言われている⁶⁾。50%の混合試料でも、その影響を受け、応力比の若干の低下、体積ひずみ挙動の膨張から収縮のみへの挙動の変化が現れたものと思われる。

3.3.2 混合率の影響

クリンカアッシュの混合率がせん断挙動へ与える影響を観察するために、クリンカアッシュ及び自然土とそれらの 4 種類の混合率の混合試料の応力比 η 及び体積ひずみ ε_v と軸ひずみ ε_a の関係を、図-10(a) ~ (c) に示す。なお、ここでは代表例として、拘束圧 $\sigma'_v=100\text{kPa}$ の結果についてのみ示す。(a) に、Ube Masado + CA. Mi, (b) に、Ube Masado + CA. Shi, (c) に、Misumi SFG + CA. Shi の結果を示している。

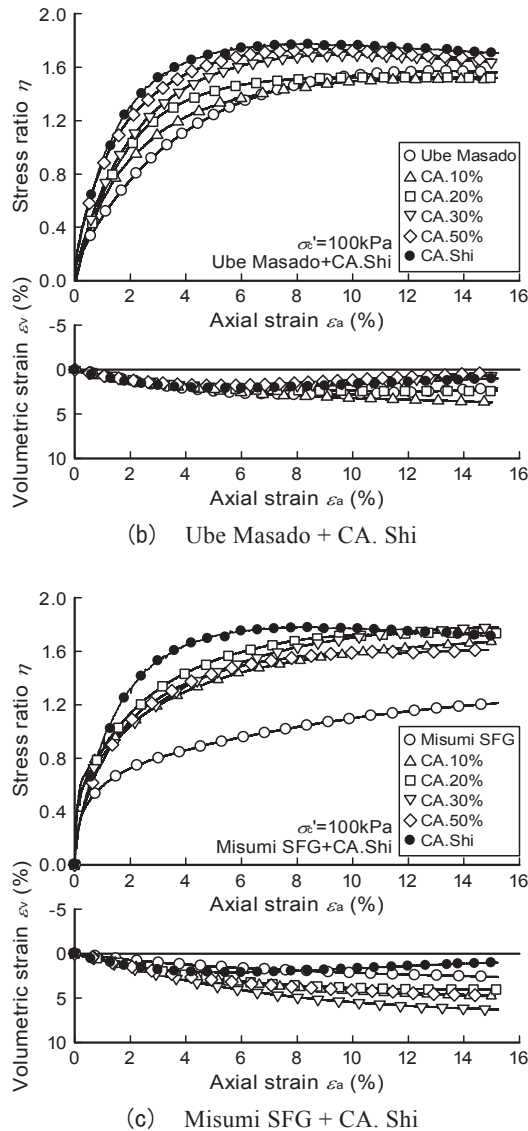


図-10 応力比及び体積ひずみと軸ひずみの関係
(拘束圧 $\sigma'_v=100\text{kPa}$)

図より、いずれの混合試料においても、自然土のみよりも、クリンカアッシュの混合率が大きい試料程、応力比が大きく発揮されていることがわかる。これは、クリンカアッシュの複雑な粒子形状により、粒子同士が噛み合うことで発揮される特性が影響しているためと考えられる。自然土は明確なピークを示さず、硬化挙動を示すが、クリンカアッシュ及び混合率の高い混合試料は、応力比がピークを示した後、軟化挙動を示し、その後、定常状態に至っている様子が見られる。一方、体積ひずみ ε_v と軸ひずみ ε_a の関係においては、クリンカアッシュ混合試料は、混合率の増加に伴いクリンカアッシュのみと類似した挙動へと推移している様子がみられる。

(c)の三隅 SFG のみの応力比が他の混合試料に比べて著しく低い結果を示している。これは、前述の圧密挙動で示したように、試料の透水性の悪さが影響していると思われる。つまり、透水性が悪いため排水が十分に行えておらず、過剰間隙水圧が発生し、純粋な排

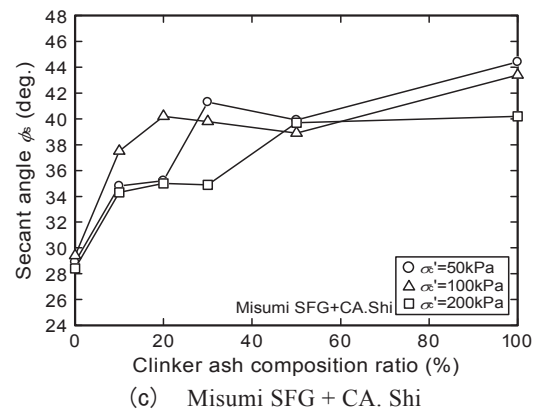
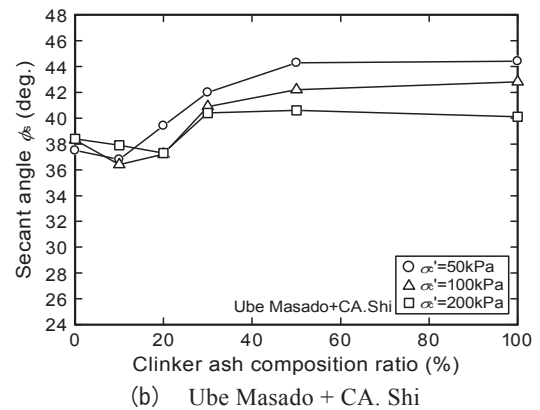
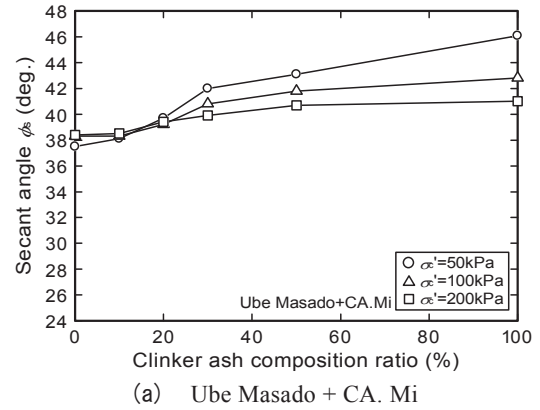


図-11 セカントアングルとクリンカアッシュ混合率の関係

水条件での結果ではない可能性があることから、このような結果に至ったと思われる。それが、クリンカアッシュ CA. Shi をわずか 10% 混合するだけで、応力比が著しく大きく変化することが確認できる。

3.4 せん断強度

クリンカアッシュは、拘束圧の影響を受けて、拘束圧が高くなるとピーク強度が低下する。その結果、モールの応力円が小さくなり、本来、有していない粘着力が見かけ上発生する⁹⁾。そのため、本研究では、せん断強度の評価を行うために、ピーク時の主応力により計算されるセカントアングル ϕ_s ($=\sin^{-1}((\sigma'_1 - \sigma'_3)/(\sigma'_1 + \sigma'_3))$) を用いた。

クリンカアッシュ及び自然土とそれらの混合試料

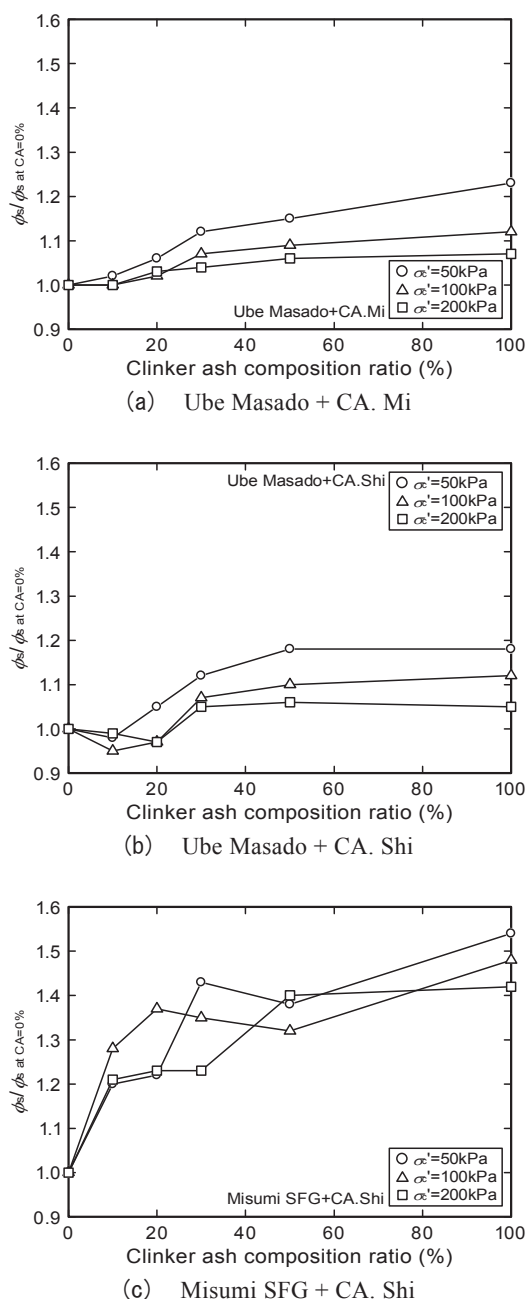


図-12 セカントアングルとクリンカアッシュ混合率の関係

のセカントアングル ϕ_s とクリンカアッシュ混合率の関係を図-11(a)~(c)に示す。宇部まさ土とクリンカアッシュの混合試料について、宇部まさ土のみのセカントアングルは約 38° であり、CA. Mi を 10%, 20%と加えてもあまり変化が認められないが、30%以上混合することでセカントアングルが 40° を超えている。CA. Shi の場合については、10%, 20%の混合率では、セカントアングルの低下がわずかに認められるものの、30%以上混合することでセカントアングルが 40° を超え、セカントアングルの改善効果が確認できる。三隅 SFG とクリンカアッシュの混合試料について、三隅 SFG のみのセカントアングルは約 29° であり、CA. Shi を 10% 混合することで、低くても 34° までセカントアングルが増加することがわかる。50%混合することで、すべ

での拘束圧で 38° を超えることも確認でき、 10° 程度、セカントアングルが改善したことが確認できる。

図-12(a)~(c)に、自然土のセカントアングルで正規化した正規化セカントアングルとクリンカアッシュの混合率の関係を示す。図(a), (b)に示されるように、宇部まさ土とクリンカアッシュの混合試料では、宇部まさ土のセカントアングルが高いため、セカントアングルの改善は、最大でも1.1~1.2倍程度となっている。それに対して、図(c)に示すように、三隅 SFG とクリンカアッシュの混合試料では、三隅 SFG のセカントアングルが低いこともあり、そのセカントアングルの改善は、1.4倍程度を示している。このような強度改善の違いは、宇部まさ土と三隅 SFG の粒度分布や細粒分含有率、塑性の有無などが影響していると考えられる。

改善効果の大小はあるものの、いずれの自然土、いずれのクリンカアッシュにおいても、それらを混合することにより、せん断特性を改善する効果が明らかであり、改善した土の品質の向上が期待できるといえる。そして、いずれの拘束圧、いずれの混合試料においても、概ねクリンカアッシュ混合率の増加に伴い、セカントアングルが増加することがわかる。

一方で、クリンカアッシュおよびクリンカアッシュ混合試料は、有効拘束圧の影響を受けることが確認できる。有効拘束圧 200kPa においては、クリンカアッシュ混合率が30%以上で、概ねクリンカアッシュのみのセカントアングルと同程度の強度を発揮することも確認できる。

上述するように、自然土とクリンカアッシュを混合することにより、せん断特性を改善する効果が明らかであり、改善した土の品質の向上が期待できる。

4. まとめ

本研究では、自然土とクリンカアッシュの混合試料に対して、一連の締固め試験や圧密排水三軸圧縮試験を行い、締固め特性や圧密及びせん断特性を解明した。得られた主な知見をまとめると以下の通りとなる。

- (1) クリンカアッシュと自然土の粒径分布が異なるため、混合試料の均等係数及び曲率係数の値は異なり、線形的ではないが、混合率に対応して変化する。平均粒径や細粒分含有率は、クリンカアッシュと自然土の混合率に応じて、その値がほぼ線形的に変化する。
- (2) 混合試料の締固め曲線は、クリンカアッシュの混合率に応じて、クリンカアッシュの締固め曲線の方へと推移する。クリンカアッシュの混合率が増加すると、最大乾燥密度は低下するのに対して、最適含水比が高くなる。
- (3) クリンカアッシュ混合試料の圧密挙動は、クリンカアッシュの混合率が大きくなるにつれ、圧密終

了時間が大幅に改善される。これより、透水性が向上したことが示唆され、実施工においても、工期の短縮につながるなどが期待できる。

- (4) クリンカアッシュが拘束圧依存性を示すことから、クリンカアッシュの混合率が大きくなるほど、せん断挙動は、より拘束圧の影響を受ける。
- (5) クリンカアッシュ混合試料のせん断挙動は、クリンカアッシュの混合率が大きくなるにつれ、応力比が高く発揮される。クリンカアッシュの混合率が大きくなるにつれ、体積ひずみは、クリンカアッシュのみと類似した挙動へと推移する。
- (6) クリンカアッシュの混合率の増加に伴い、セカントアングルが増加し、クリンカアッシュによる強度の改善が確認された。その改善は、自然土やクリンカアッシュの種類に寄らず発揮され、概ね混合率が 30%以上で、クリンカアッシュと同程度の強度を発現することが明らかとなった。

今後、さらに低品質の自然土と混合し、力学特性やクリンカアッシュによる改善効果を明らかにするとともに、適用限界となる土質について検討する予定である。

謝辞

実験の実施にあたり、山口大学大学院修士生の田鵬宇氏、山口大学卒業生の高田侑希氏、佐藤悠貴氏に多大な協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 例えば、三木五三郎: 石炭灰による土地造成の問題点, 材料, Vol.19, No.205, pp.900-904, 1970.
- 2) 例えば、Yoshimoto, N., Hyodo, M., Nakata, Y., Orense, R. P., Hongo, T. and Ohnaka, A.: Evaluation of Shear Strength and Mechanical Properties of Granulated Coal Ash based on Single Particle Strength, Soils and Foundations, Vol.52, No.2, pp.321-334, 2012.
- 3) 高橋邦夫, 梅原靖文, 手塚真, 奥村樹郎, 小野純夫: 電力石炭灰の土質特性 (その 1) - 新生灰の物理・化学特性 -, 第 30 回土質工学研究発表会, pp.757-760, 1995.
- 4) 高橋邦夫, 梅原靖文, 手塚真, 今塩宏之, 小林正直, 浅田英幸: 電力石炭灰の土質特性 (その 2) - 新生灰の力学特性及び反応性 -, 第 30 回土質工学研究発表会, pp.761-764, 1995.
- 5) 若槻好孝, 田中等, 内田裕二, 入江功四郎, 兵動正幸, 吉本憲正: クリンカアッシュの材料特性と適用性の検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.2, No.4, pp.271-285, 2007.
- 6) 若槻好孝, 兵動正幸, 吉本憲正, 穴井隆太郎, 吉永祐二, 吉岡一郎, 中下明文: クリンカアッシュの粒子特性と緩詰め状態の強度・変形特性, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.4, pp.897-914, 2009.
- 7) Winter, M. J., Hyodo, M., Wu, Y., Yoshimoto, N., Nakashita, A., Hasan, M. B. and Matsui, K.: Influences of Particle Characteristic and Compaction Degree on the Shear Response of Clinker Ash, Engineering Geology, Vol.230, pp.32-45, 2017.
- 8) 日本道路協会: 道路土工 - 盛土工指針 (平成 22 年度版), p.219, 2010.

(2021 年 6 月 14 日 受付)