

締固めたクリンカアッシュ混合土の静的せん断挙動

山口大学大学院 学生会員 ○TIAN PENGYU 正会員 吉本憲正 兵動正幸
中国高压コンクリート工業(株) 正会員 中下明文

1. はじめに

クリンカアッシュは、石炭火力発電所から排出された微粉ではない石炭灰を破砕機で礫や砂程度の粒径に粉碎されたものである。これまでの研究¹⁾から、クリンカアッシュは砂に近い粒度分布で軽量かつ高いせん断強度、透水係数を有することが明らかとなっている。そのため、盛土材、路盤材、排水材などを中心に多く利用されており、徐々に社会的な認知度も高まっている材料である²⁾。しかし、クリンカアッシュは石炭灰の発生量の10~15%程度とそれ程多くなく、地盤材料として利用するには、十分な量が得られないケースも存在する。そこで、クリンカアッシュの利点を活かし有効利用を拡大するため、自然土と混合する事によるせん断挙動を改善することについて検討することとした。また、盛土への適用を念頭において、様々な異なる配合割合の締固めたまき土とクリンカアッシュ混合土を作製し、それに対して、種々の物理試験や締固め試験、三軸圧縮試験を実施し、せん断挙動を明らかにすることを目的とした。また、クリンカアッシュ混合土中のクリンカアッシュのせん断挙動への影響についても調査することとした。

2. 供試体作製方法および試験条件

実験に用いた土試料およびクリンカアッシュは、それぞれ、宇部市から採取された購入した宇部まき土(2mmふるいにより、2mm以下に粒度調整している)、および火力発電所から採取されたクリンカアッシュを用いた。混合土は、自然乾燥状態における宇部まき土とクリンカアッシュをそれぞれ質量比、10:0, 1:9, 2:8, 3:7, 5:5, 0:10で混合し、それらをクリンカアッシュ混合率として、0, 10, 20, 30, 50, 100%と表示する。宇部まき土とクリンカアッシュ、混合土に対して、地盤工学会基準³⁾に記載されているJIS A 1210に準じた方法で締固め試験を実施した。

図-1に、宇部まき土およびクリンカアッシュとそれらの混合土の締固め曲線を示す。図より、混合率が増加すると、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分かる。日本高速道路の盛土の締固め度の管理基準は、締固め度が90%以上⁴⁾と規定されている。これに従って、三軸試験に用いる供試体は、直径10cm、高さ20cmとし、モールド内で試料を5層に分け、各層ごとに空中落下法で試料を投入した後、ランマーで所定の回数突き固めて、目標の90%の締固め度となるように作製した。背圧は、200kPaとし、数時間放置し、飽和度を高めた。有効拘束圧は、 $\sigma'_c=50, 100, 200\text{kPa}$ で等方圧密した後、排水条件で軸ひずみ速度を0.1%/minでせん断を行った。

3. 実験結果および考察

図-2に、宇部まき土およびクリンカアッシュ、4種類の混合割合の混合土の応力比 $\eta (=q/p')$ および体積ひずみ ϵ_v と軸ひずみ ϵ_a の関係を拘束圧ごとに示す。図より、いずれの拘束圧においても宇部まき土に比べてクリンカアッシュ及びクリンカアッシュ混合土の応力比 η が大きく、せん断強度も高いことがわかる。それはクリンカアッシュの混合率が高い程、また、低い拘束圧である程より顕著に見られる。これは、クリンカアッシュ

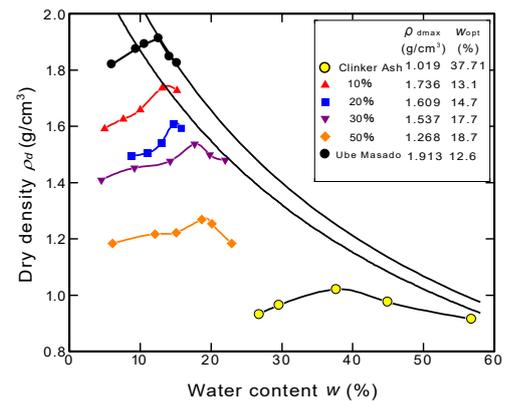


図-1 締固め曲線

キーワード クリンカアッシュ, 混合土, 変形係数

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1 山口大学 大学院創成科学研究科

TEL 0836-85-9344

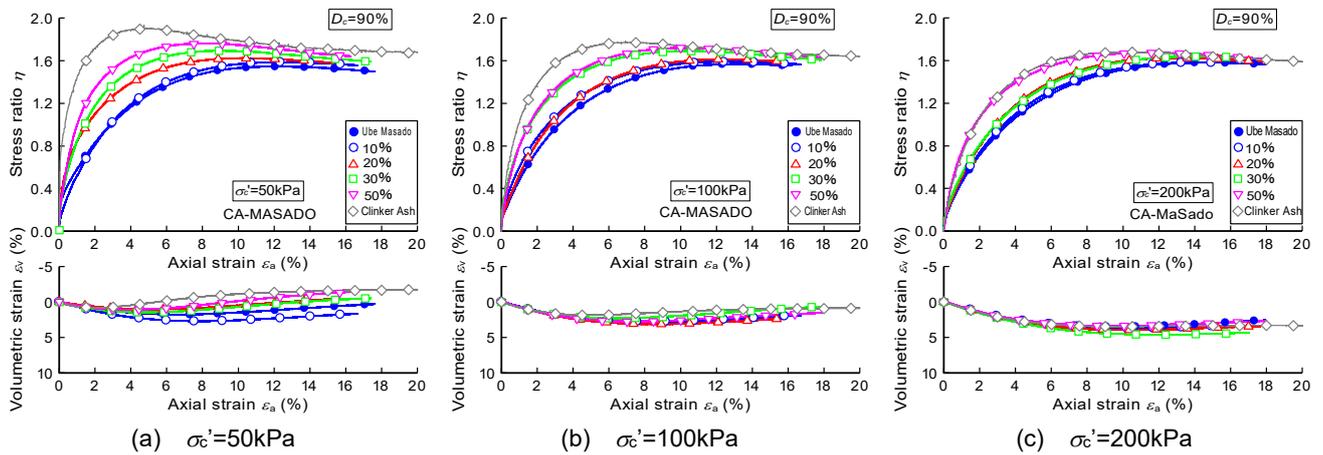


図-2 応力比および体積ひずみと軸ひずみの関係

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高いせん断強度の影響を受けるためと考えられる。また、宇部まさ土は明確なピークを示さず、硬化挙動を示すが、クリンカアッシュおよび混合土は、強度がピークに達した後、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。体積ひずみ ϵ_v と軸ひずみ ϵ_a の関係においては、有効拘束圧が高くなる程、より顕著な体積収縮を起こしている。クリンカアッシュ混合土は、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。このような有効拘束圧の増加に伴うピーク応力比の低下および供試体の顕著な体積収縮は、粒子の再配列

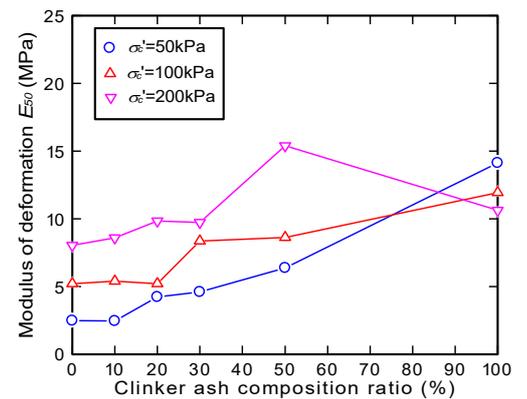


図-3 クリンカアッシュの混合割合と変形係数の関係

も一つの要因として挙げられるが、クリンカアッシュの単粒子破碎強度の低さや、過去の砂の粒子破碎の研究成果⁵⁾を踏まえると、粒子破碎に起因して生じていることを示唆するものといえる。また、これらの現象は、三浦・山内⁶⁾によって、自然砂において高拘束圧域で確認された粒子破碎の挙動に類似するものであり、通常の拘束圧域においても同様な現象がクリンカアッシュにおいて顕著に発生したことが原因と考えられる。

図-3に、クリンカアッシュの混合割合と変形係数の関係を示す。図より、有効拘束圧 50kPa において、クリンカアッシュ混合試料は、混合率の増加に伴い変形係数が急激に上昇していることがわかる。一方、有効拘束圧 100kPa の場合は、50kPa ほどではないが、混合割合の増加に伴い変形係数が増加することがわかる。有効拘束圧 200kPa の場合は、高い拘束圧の影響を受けて、クリンカアッシュ単体の変形係数が大きく低下していることが確認できる。そのため、他の有効拘束圧とは、異なる結果が得られた。これは、クリンカアッシュが拘束圧の影響をより強く受けることによると考えられる。

混合土の力学特性に関する理論および解析的研究は、一般的には 2 種混合体のマクロな力学的特性の研究にさかのぼることができ、不均質材料の巨視的力学挙動を微視的な観点から予測する研究が多い。本研究では、李基豪ら⁷⁾の研究に基づいて、混合土内部をクリンカアッシュと宇部まさ土の 2 種から構成されると考え、混合土の変形係数特性について、まさ土のみおよびクリンカアッシュのみの特性からどの程度説明できるかを検討し、せん断中のクリンカアッシュの変形特性へ及ぼす影響について考察した。

混合土中に占めるクリンカアッシュのみの体積の割合を示すクリンカアッシュの体積比を $N_v = V_o/V_e$ と定義した。ここで、 V_e は、せん断終了後の試料全体の体積、 V_o は、クリンカアッシュのみの体積である。ピーク時における混合土の軸差応力 q_{m_peak} がまさ土部分の実験から得られた軸差応力 q_s とクリンカアッシュのみの実験から得られた軸差応力 q_c の和で表され、それらの比率が混合する試料の体積比に対応すると仮定すれば、 q_{m_peak} は、 $q_{m_peak} = (1-N_v)q_s + N_vq_c$ が成立する。しかし、混合土中のクリンカアッシュの影響度が体積に比例するとは限らないと考えると、上式は一般的に成立しない。そこで、これを補正する補正係数 α を導入する。ま

た、ピーク軸差応力における割線変形係数を $E_p = q_p / \varepsilon_p$ と定義し、この補正係数を用いれば、ピーク時の割線変形係数は次のように表現できる。

$$E_p = (1 - N_v)E_s + \alpha N_v E_c \quad (1)$$

式(1)から、未知の補正係数について解けば α は、

$$\alpha = (E_p - (1 - N_v)E_s) / (N_v E_c) \quad (2)$$

が得られる。このようにして得られた補正係数 α は、クリンカアッシュの応力分担割合を表すパラメータと考えられる。つまり、 α の値が大きいくほど、混合土の変形係数に対してクリンカアッシュが果たす役割が大きいくことを示している。

図-4 と図-5 は混合土のピーク時及び残留時の軸差応力における割線変形係数に対して、上述の計算により算出した補正係数 α のクリンカアッシュの混合割合に対する変化を示している。図より、拘束圧 50kPa の場合には、クリンカアッシュの混合割合に係らず補正係数が 1 より大きな値を示している。100kPa 及び 200kPa の場合では、混合割合が 10% の時、1 より小さな値を示すが、それ以外の混合割合では、50kPa 同様に 1 より大きな値を示している。このことから、混合割合が 10% では、クリンカアッシュは、まさ土の中に浮いたように存在し、変形特性への寄与がほとんど見られないと考えられる。20% 以上では、図-3 の変形係数の値にも変化がみられるように、クリンカアッシュの影響がまさ土との間でも少し発揮され、変形特性への寄与として表れていると考えられる。

4. まとめ

圧密排水三軸圧縮試験より、クリンカアッシュ混合土のせん断挙動は、拘束圧の影響を受け、低拘束圧から高拘束圧に推移するにつれて、応力比 η と軸ひずみ ε_a の関係の立ち上がりが緩やかとなる。体積ひずみ ε_v と軸ひずみ ε_a の関係からも有効拘束圧が高くなる程、体積収縮を示す傾向が強くなる。応力ひずみ関係から得られるピーク時および残留時の割線変形係数に着目し、変形係数に及ぼすクリンカアッシュの影響について、補正係数 α を用いて検討した。その結果、ピーク時および残留時共に、補正係数 α は、混合割合が 10% の時に、1 を下回る結果が得られるものの、それ以外の混合割合では、1~1.2 程度の値を示すことが明らかとなった。

謝辞

本研究に用いたクリンカアッシュは、中国電力にご提供頂きました。ここに記して、深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 一般財団法人 石炭エネルギーセンター: 石炭灰混合材料有効利用ガイドライン (統合改訂版) pp.1-14, 2018.
- 3) 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), pp.19-21, 2011.
- 4) 社団法人土質工学会: 土質工学ハンドブック, p.831, 1982.
- 5) 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.
- 6) 三浦哲彦, 山内豊聡: 砂のせん断特性に及ぼす粒子破碎の影響, 土木学会論文集, No.260, pp.109-118, 1977.
- 7) 李基豪, 風間基樹, 寺田賢二郎: カキ殻混合土の非排水せん断強度, 変形特性, 土木学会論文集 No. 701/III -58, pp. 303-314, 2002.

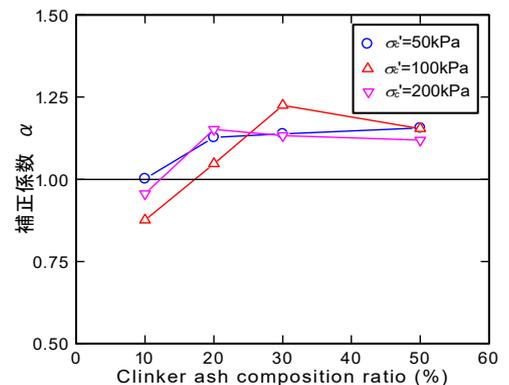


図-4 ピーク時の割線変形係数に対して計算された補正係数 α とクリンカアッシュの混合割合の関係

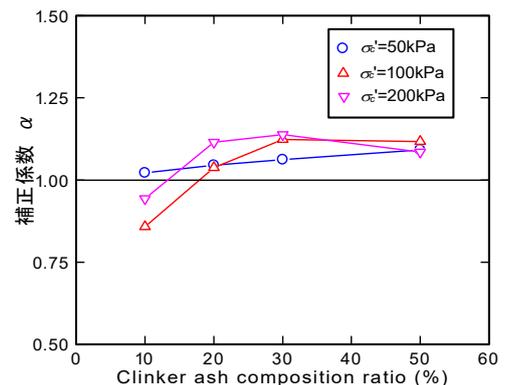


図-5 残留時の割線変形係数に対して計算された補正係数 α とクリンカアッシュの混合割合の関係