

クリンカアッシュのせん断挙動に及ぼす締固め度および拘束圧の影響

クリンカアッシュ 高締固め セカントアングル

山口大学大学院

正 会 員 兵動正幸

吉本憲正

中田幸男

山口大学大学院

学生会員○大原直人

野田翔兵

佐藤 登

復建調査設計 (株) 正 会 員 若槻好孝

中国電力 (株)

吉岡一郎

(株) エネルギア・エコ・マテリア

中下明文

中村芳弘

1. まえがき

クリンカアッシュは石炭火力発電所から排出された石炭灰を破碎機で礫や砂程度の大きさに粉碎したものである。粒子形状が複雑であり、軽量で高いせん断強度を発揮する材料である。クリンカアッシュは経験的に盛土等現場においては高い締固め性能が確認されているが、その尖鋭な粒子形状から、室内での締固め供試体作製時にゴムスリーブを破損する等の理由から、現場と同等の高締固め時のせん断強度が明らかにされていない状況にあった^{1)~3)}。本研究は、締固め度 $D_c=95\%$ 以上に締固めたクリンカアッシュを凍結して三軸せん断試験機にセットし所定の拘束圧下でせん断試験を行い、得られたせん断特性をまとめたものである。

2. 試料および試験概要

本実験に用いた試料は、各発電施設から集めたものであり、平成 23 年度に新たに分取したものである。それ以前も同じ発電施設からの試料を用いたが、今回の試料と区別するため、以前の試料を 1、平成 23 年度の試料を 2 と称す。それらの物理的性質を表-1 に、粒径加積曲線を図-1 に示す。粒径加積曲線の図中のプロットのない黒い破線は、全国の 60 ヶ所の発電所から排出されたクリンカアッシュに対して調査した粒径加積曲線の範囲¹⁾を示している。本研究で用いたクリンカアッシュもその範囲内に入っていることが確認できる。C.A.b-2 と C.A.d-2 は $1\text{mm} \sim 300\text{ }\mu\text{m}$ のふるいを通すものが多く、範囲内ではあるがほぼ細粒側境界にある。締固め曲線を図-2 に示す。新しい試料の最大乾燥密度は、1 のものとさほど変わらない。図から、クリンカアッシュは締固め曲線は含水比の変化に対してなだらかな曲線を呈していることが観察できる。クリンカアッシュは粒子形状が複雑であることから、締固めに時に粒子の再配列がされにくい材料であるためと考えられる。しかし、含水比に関わらずほぼ一定の乾燥密度を得ることができることから、クリンカアッシュは締固め管理がしやすい材料ということもできる。

クリンカアッシュは粒子形状が複雑で粒子表面から内部へ連続するような空隙も存在するため、三軸試験を行うに当たって、飽和供試体の作製が非常に困難である。本研究では、飽和供試体の作製のため、試料はあらかじめ脱気水に浸し、2~4日間脱気槽内で水浸し、十分脱気されたものとした。また、三軸室内のモール

ドで突固めにより高締固め度の供試体を作製しようとするとその尖鋭な粒子形状から、供試体作製時にゴムスリーブを破損してしまうため、今回は別の突固めモールドで締固め供試体を作製し、凍結して三軸セル内に運搬、装着する方法をとった。締固め供試体は、直径 10cm 、高さ 20cm とし、これと同じモールドで締固め試験における $1E_c$ 以上となるように試料を5層に分け、1層あたりの突き固め回数24回でランマーを用いて突き固め作製した。ここで、供試体を凍結するが、水分が多いと凍結時に体積膨張を起こしてしまうことから、脱気水を十分に水切りした上で凍結を行った。三軸試験は有効拘束圧50、100、200kPaの3種類について、排水条件で軸ひずみ速度 $0.2\%/min$ で行った。

表-1 物理的性質

	ρ_s (g/cm^3)	F_c (%)		ρ_s (g/cm^3)	F_c (%)
C.A.a-1	2.072	14.1	C.A.a-2	1.954	3.0
C.A.b-1	2.151	22.9	C.A.b-2	2.066	11.8
C.A.c-1	2.173	5.5	C.A.c-2	2.079	7.1
C.A.d-1	2.132	26.8	C.A.d-2	2.092	8.2
C.A.e-1	2.151	14.2	C.A.e-2	2.197	6.2
C.A.f-1	2.110	7.5	C.A.f-2	2.240	4.3

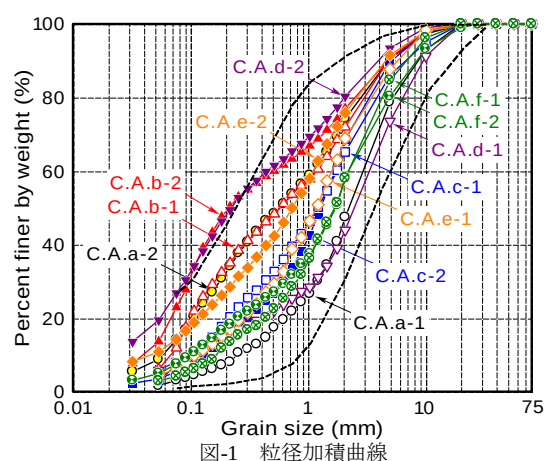


図-1 粒径加積曲線

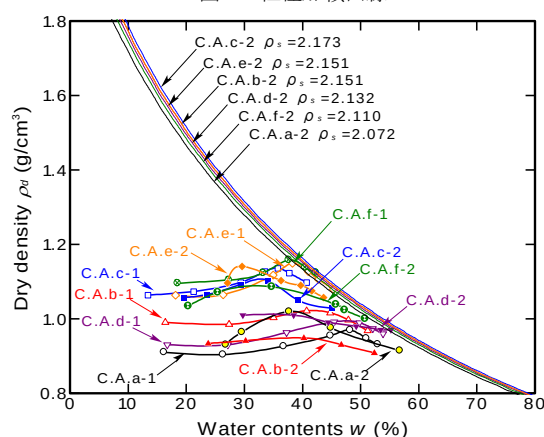


図-2 締固め曲線

3. 三軸試験結果

3-1. 軸差応力, 体積ひずみ-軸ひずみ関係 図-3 に C.A.d-2 の軸差応力 q と軸ひずみ ε_a の関係および体積ひずみ ε_v と軸ひずみ ε_a の関係を示す。軸差応力・軸ひずみ関係において、いずれの拘束圧下においても明瞭なピークを示した後軟化挙動をとる密な砂の挙動を示している。また、体積ひずみと軸ひずみの関係においては、有効拘束圧 50kPa の結果では大きな膨張挙動を示すが、拘束圧の増加と共に膨張挙動は和らぐ傾向を示している。

3-2. モールの応力円 図-4 に C.A.d-2 のモールの応力円を示す。破壊包絡線と各モール円に対して原点から描いた直線であるセカントアングライン $\phi_s = \sin^{-1}((\sigma'_a - \sigma'_r)/(\sigma'_a + \sigma'_r))$ も描いている。クリンカアッシュは砂質土あるいは礫質土に分類され、粘着力 c は 0 のはずであるが、破壊包絡線を描くと粘着力 c が得られる結果となる。これは、有効拘束圧が増加することによって粒子破砕量が増加し、せん断強度が低下したためと考えられる。この傾向は今回試験を行った全ての試料に共通し、このことから、クリンカアッシュは有効拘束圧ごとに内部摩擦角が変化すると考えられる。

3-3. セカントアングルと締固め度の関係 クリンカアッシュの締固め度依存性を明確に見るために、縦軸にセカントアングル ϕ_s 、横軸に締固め度 D_c の関係を図-5 に示す。図中比較のために、広島まさ土 (H.masado) の結果も示した。図-5 より、クリンカアッシュは H.masado と同様に、締固め度の増加に伴い、セカントアングルも上昇していることが確認できる。いずれのクリンカアッシュの結果も H.masado と同等以上のセカントアングルを示す。そして、 $D_c=95\%$ 以上では、 45° 以上を確保することが可能である。

3-4. セカントアングルと有効拘束圧の関係 クリンカアッシュのピーク強度の拘束圧依存性を明確に見るために、縦軸にピーク時のセカントアングル ϕ_s 、横軸に有効拘束圧 σ'_c の関係を図-6 に示す。図より、多少ばらつきは認められるものの、クリンカアッシュではセカントアングルが有効拘束圧に対して直線的に低下することが確認できる。また、最も小さなセカントアングルが得られた C.A.a の有効拘束圧 σ'_c が 400kPa の場合でも $\phi_s=40.8^\circ$ が確保されており、クリンカアッシュは密な状態であれば、 $\sigma'_c=50\sim 200\text{kPa}$ の範囲で、ほぼ 40° 以上のセカントアングルが得られることを示している。今回の締固め度 95% 以上の結果でも、拘束圧の依存性は認められるが、最大で 53.3° 程度、拘束圧が高い 200kPa の条件でも 40° 以上を確保しており、高いせん断強度を有していることがわかる。

4. まとめ クリンカアッシュは高締固め時でも、その複雑な粒子形状により高いせん断強度を発揮する。有効拘束圧の増加による粒子破砕により強度が若干低下傾向を示すが、締固め度 95% 以上、有効拘束圧 $\sigma'_c=50\text{kPa}$ ではせん断抵抗角 45° を超える高いせん断強度を発揮することが確認できた。

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) 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. 3) 藤島智絵, 吉本憲正, 兵動正幸, 中田幸男, 吉岡一郎, 中下明文, 中村芳弘, 若槻好孝: クリンカアッシュの圧縮及びせん断強度特性, 第 46 回地盤工学研究発表会論文, pp. 347-348, 2011.

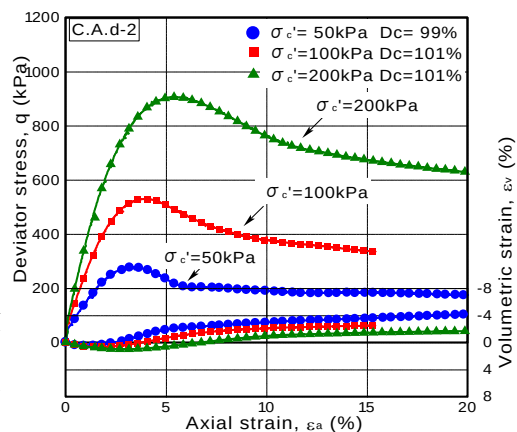


図-3 軸差応力,体積ひずみ-軸ひずみ

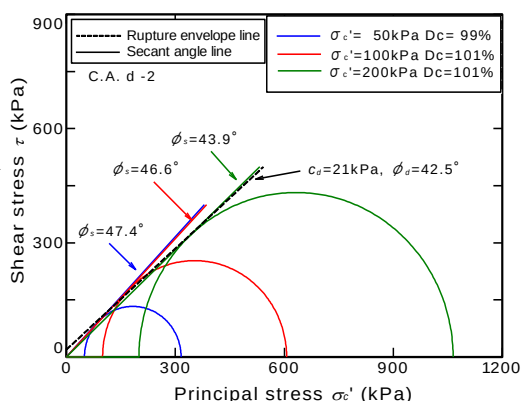


図-4 モール円

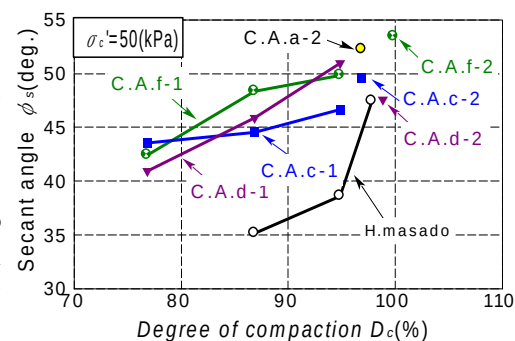


図-5 セカントアングル-締固め度の関係

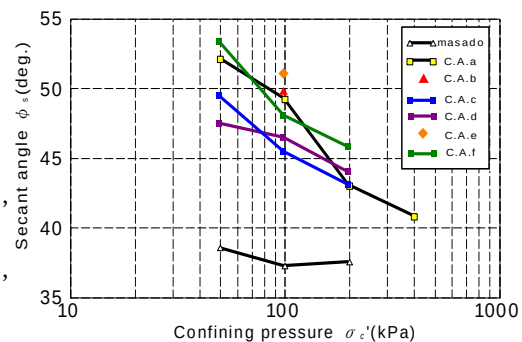


図-6 セカントアングル-拘束圧の関係