

# クリンカアッシュの強度特性に及ぼす単粒子強度の影響

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○末島朝海 Michael James Winter 野田翔兵  
 復建調査設計(株) 正会員 若槻好孝  
 中国電力(株) 正会員 吉岡一郎 中下明文 中村芳弘

**1. まえがき** 近年、世界のエネルギー利用において石炭への依存が高まっております。石炭灰の産出は年々増加する傾向にある。しかし埋立処分地の確保が困難になっている状況にある中、石炭灰は「特に再生資源として有効利用を促進しなければならない指定副産物」として位置付けられている。石炭灰の中のクリンカアッシュは施工性に優れ有用な地盤材料になると考えられるが、その工学的性質に関する研究はまだ少なく、その中で著者らのグループによるもの<sup>1),2)</sup>がいくつか挙げられる。クリンカアッシュはその複雑な表面形状から高いせん断抵抗角を持つ一方、粒子破碎を起こしやすいことから、それらの粒子特性を評価したうえでの強度特性を調べることは、設計パラメータを設定する上で極めて重要なことと考えられる。そこで本研究では、単粒子破碎試験、圧密排水三軸圧縮試験を行うことにより、粒子特性とせん断強度の関係性を明らかにすることを目的とした。

## 2. 用いた試料と実験概要

**2-1 用いた試料** 用いた試料は全国の6ヶ所の発電所から採取されたクリンカアッシュである。(図ではC.A.(a)~(f), と省略)図1より、どのクリンカアッシュも粒度分布は良好であるが、製造された発電所により、つまり、炭種ごとにその性質は異なることがわかる。

**2-2 三軸圧縮試験** 写真1に三軸圧縮試験の様子を示す。クリンカアッシュは粒子形状が複雑で粒子内部へ通ずる空隙も存在するため、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、試料は脱気槽で十分に脱気させたものを用いた。供試体作製方法は、緩詰めでは水中落下法、密詰めではメンブレンの破損防ぐためにセル以外のモールドで突固めにより作製した供試体を凍結しセルにセットする方法をとった。供試体サイズは、直径10cm、高さ20cmとし、突固め法では、モールド内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、2.5kgのランマーで落下高さ30cm、1層あたりの突固め回数を24回で突固め作製した。試験方法は圧密排水三軸圧縮試験を行い、測圧を50, 100, 200kPa, 400kPaで試験を行った。図2に三軸圧縮試験結果、また、図3にせん断試験後の粒度分布を示しているが、せん断後粒子破碎が確認される。

**2-3 単粒子破碎試験** 単粒子破碎試験は各試料を標準ふるいで、0.5mm~1mm, 1mm~2mm, 2mm~4.75mmの階級に分け、各ふるいに残った試料に対して行った。それぞれ各ふるいに残った試料の色の構成割合を130粒調べ、その構成割合を試験対象個数20粒に換算し、それぞれの階級ごとに20粒、つまり1炭種で60粒、単粒子破碎試験を行った。単粒子破碎試験は粒子を最も安定するように下盤に配置し、上盤を下降させるこ

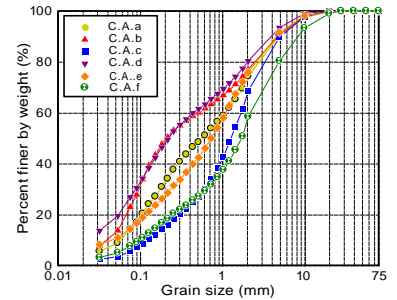


図1 C.A.の粒径加積曲線



写真1 三軸圧縮試験

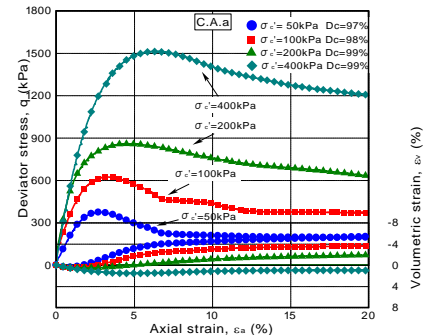


図2 軸差応力、体積ひずみ-軸ひずみ

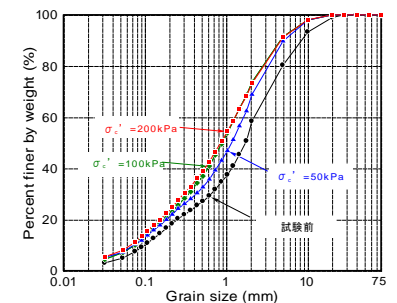


図3 せん断後の粒径加積曲線

表1 平均単粒子強度

試料	C.A.a	C.A.b	C.A.c	C.A.d	C.A.e	C.A.f
$\sigma'_{f1}$ (MPa)	4.27	1.99	2.56	1.04	4.75	3.12

とにより軸荷重を載荷し、粒子を破碎させる試験である。変位測定は測定精度  $1.0 \times 10^{-3}$  mm, 分解能が 0.098N であり, 最大  $4.9 \times 10^2$  N まで計測可能なロードセルにより計測を行った。

### 3. 試験結果と整理

**3-1 残留強度  $\phi_{res}$  の評価** 単粒子破碎試験で得られた, 各クリンカアッシュの平均単粒子強度を表 1 に示す。せん断試験の残留強度  $\phi_{res}$  と平均単粒子強度  $\sigma_f$  の関係を図 4 に示す。図のように, 平均単粒子強度  $\sigma_f$  との相関が高いことから, 両者の関係を次式で表す。

$$\phi_{res} = 0.4\sigma_f + 37 \quad (1)$$

これより, 平均単粒子強度  $\sigma_f$  を用いれば残留強度  $\phi_{res}$  はある程度予測可能であることが分かる。

**3-2 ピーク強度  $\phi_{peak}$  の評価** Bolton<sup>3)</sup>は, 砂のダイレイタンスを伴うせん断ピーク時の強度  $\phi_{peak}$  と定常状態の強度  $\phi_{cr}$  の関係を相対密度及び, 平均有効拘束圧の関数形として式(2)により提案した。ここで, 定常状態の強度  $\phi_{cr}$  の代わりに残留強度  $\phi_{res}$ , 相対密度  $D_r$  の代わりに締固め度  $D_c$ , 平均主応力  $p$  の代わりに拘束圧  $\sigma_c'$  を用いて, 式(2)を変形すると式(3)になる。

$$\phi_{peak} = \phi_{cr} + CD_r \ln\left(\frac{P_{cr}}{p}\right) \quad (2) \quad \frac{\phi_{peak} - \phi_{res}}{D_c} = C \ln\left(\frac{P_{cr}}{\sigma_c'}\right) \quad (3)$$

ここに,  $C$  は材料定数であり, 式(3)は拘束圧  $\sigma_c'$  が限界応力  $P_{cr}$  を超えると初期密度と拘束圧はピーク強度  $\phi_{peak}$  の発現に影響しなくなり, ピーク強度は残留強度  $\phi_{res}$  に等しくなることを意味している。このことから, 残留強度  $\phi_{res}$ , 材料定数  $C$ ,  $P_{cr}$  がわかれば, ピーク強度  $\phi_{peak}$  を予測することができる。図 5 に  $\phi_{peak} - \phi_{res}$  と拘束圧の関係を示す。 $\sigma_c'$  が  $P_{cr}$  を超えるとピーク強度と残留強度が等しくなることから,

$\phi_{peak} - \phi_{res} = 0$  になる拘束圧  $\sigma_c'$  が各試料の  $P_{cr}$  となる。図 6 に  $D_c$  で正規化した  $\phi_{peak} - \phi_{res}$  と拘束圧  $\sigma_c'$  で正規化した  $P_{cr}$  の関係を示す。図 6 に示す近似線の傾きが材料定数  $C$  であり, この材料定数に及ぼす要因を調べた結果, 平均単粒子強度  $\sigma_f$  に相関が見られ, 次式の関係を得た。

$$C = 0.4\sigma_f + 3.5 \quad (4)$$

図 7 に, 拘束圧ごとのピーク強度  $\phi_{peak}$ , 図 8 に, 締固め度  $D_c$  ごとのピーク強度  $\phi_{peak}$  の予測線と実験値を比較したものを示す。両者とも多少ばらつきは見られるが, 全体的に見れば予測線と実験値は近い。

**4. まとめ** 締固めたクリンカアッシュのピーク強度を評価する式として Bolton の式に基づいた式を提案した。すなわち, 残留強度  $\phi_{res}$  材料定数  $C$ , 限界応力  $P_{cr}$  を求めることにより, 締固め度に応じてピーク強度  $\phi_{peak}$  が予測可能となった。

**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, pp271~285 2007. 2) 若槻好孝, 兵動正幸他: 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) Bolton, M. D. :The Strength and dilatancy of sands, Geotechnique, Vol. 36, No.1, pp. 65-78, 1986.

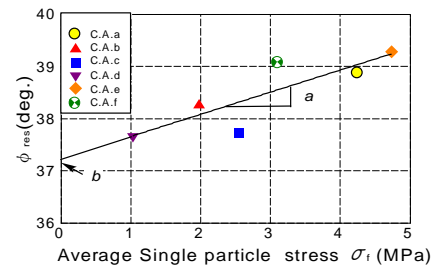


図 4 残留強度  $\phi_{res}$  と  $\sigma_f$  の関係

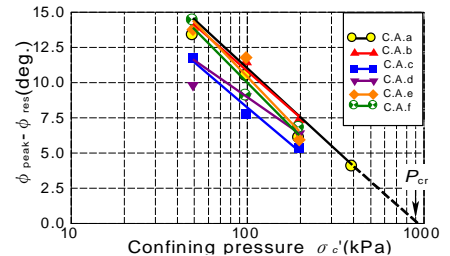


図 5  $\phi_{peak} - \phi_{res}$  と拘束圧  $\sigma_c'$  の関係

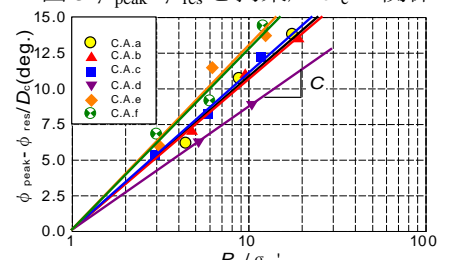


図 6  $\phi_{peak} - \phi_{res} / D_c$  と  $P_{cr} / \sigma_c'$  の関係

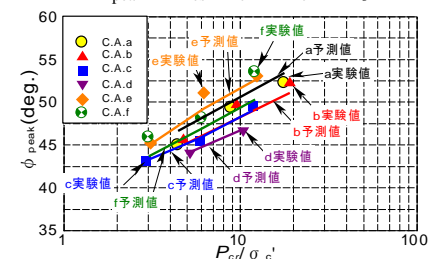


図 7 ピーク強度  $\phi_{peak}$  と拘束圧  $P_{cr} / \sigma_c'$  の関係

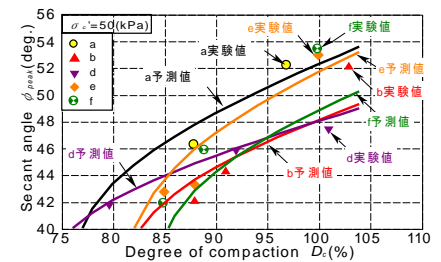


図 8 ピーク強度  $\phi_{peak}$  と締固め度  $D_c$  の関係