

山口大学大学院	学生会員	○吉永祐二
山口大学大学院	学生会員	穴井隆太郎
山口大学大学院	正会員	吉本憲正
山口大学大学院	正会員	兵動正幸
(株) エネルギア・エコ・マテリア		池田陵志

1. はじめに

現在、石炭火力発電は石油火力、原子力発電とならび日本のエネルギー政策において重要な役割を果たしている。近年石炭による発電が増加すると同時に石炭灰の発生量も増加傾向にあり、そのうち相当量が埋立て処分されている現状にある。また、今後も石炭の消費量が増え、石炭灰の発生量の増大が確実視されている。この石炭灰は主に、フライアッシュとクリンカアッシュに大別される。クリンカアッシュとはボイラー底部の水槽にたまった石炭灰を砂状に粉砕したものである。フライアッシュについては研究が数多く行われ有効利用されているが、クリンカアッシュは再利用の傾向はあるものの、未だ多くは発電所敷地内で埋立て処分されている状況にある。また、再利用は進みつつあるが、使用目的に即した物性や力学特性が明確ではないことから、現状では用途は限定されている。本研究では、石炭灰であるクリンカアッシュの有効利用拡大（主に埋立て材）を目的とし、クリンカアッシュの物理的特性を調べると共に、埋立て材として有効利用した場合に懸念される液状化に着目し、非排水繰返し三軸試験を行い、クリンカアッシュの非排水繰返しせん断特性を調べた。また、併せてコーン貫入試験を実施し、繰返しせん断強度との関係について調べた。

2. 試料および試験方法

表-1 試料の物理特性と粒子特性

本研究に用いた試料は、各地の発電所から採取されたクリンカアッシュであり、表-1にそれらの物理的性質を示す。表中のアルファベットA～Fは、採取したそれぞれの発電所を示している。表には、クリンカアッシュと比較

	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	$e_{\max}$	$e_{\min}$	$d_{50}(\text{mm})$	Uc	Rc	Ar
A	1.773	1.518	0.768	2.228	12.808	1.665	1.398
B	1.949	1.368	0.754	0.562	16.912	2.004	1.412
C	1.864	1.173	0.589	1.174	16.450	1.508	1.508
D	1.926	1.779	0.920	1.832	69.137	1.572	1.550
E	1.914	1.203	0.628	1.077	15.493	1.798	1.478
F	2.046	1.349	0.737	1.409	18.267	1.783	1.532
Toyoura	2.635	0.977	0.609	0.189	1.973	1.454	1.203
UbeMasado	2.587	0.932	0.487	1.010	9.445	1.445	1.251
Masado(Hara)	2.640	0.743	0.334	1.150	13.100	—	—
Gravel(Hara)	2.655	0.585	0.303	1.150	13.100	—	—

のため用いた砂、まさ土、併せて原¹⁾によって使用されたまさ土と河床砂礫(表中、Masado(Hara)、Gravel(Hara)と示す)の物性値も示す。図-1に各試料の粒径加積曲線を示す。用いたクリンカアッシュは最大粒径が約20mmで礫分を含み10%程度の細粒分も含んでおり、粒度分布は宇部まさ土やまさ土(原)に類似し、豊浦砂に比べ良好であることがわかる。また、粒子特性として真円度 R_c 、縦横比 A_r ²⁾共にクリンカアッシュは豊浦砂や宇部まさ土より大きい値を示しており、粒子の表面形状が複雑であることがわかる。これはクリンカアッシュが、クリンカホッパー内で塊を粉砕して製造されることによると思われる。実験は、油圧サーボ式三軸繰返し三軸圧縮試験機を用い、直径10cm高さ20cmの円筒供試体に対し、拘束圧 $\sigma_c=50\text{kPa}$ で、載荷周波数

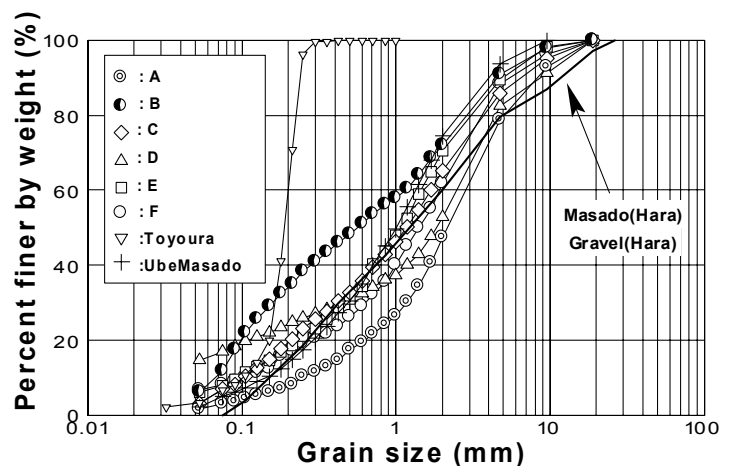


図-1 粒径加積曲線

0.1Hzの振幅一定の繰返し軸応力を応力制御で加えた。供試体は、深さ約1cmの水を張ったモールド内に漏斗から試料を排出しながらゆっくり引き上げる方法でより緩詰め状態となるよう作製した。

3. 繰返しせん断特性

図-2 に軸ひずみ両振幅 $\varepsilon_{DA}=5\%$ に至るに必要な繰返し応力比 $\sigma_d/2\sigma'_c$ と繰返し回数 N の関係を示す。併せて、既往の研究から得られた $Dr=80\%$ の豊浦砂の非排水繰返しせん断強度を示す。また、図中の凡例にクリンカアッシュA-Fの相対密度を示す。相対密度が負値を示しているのは、供試体の乾燥密度が礫の最大最小密度試験で求めた最小乾燥密度よりも低いためである。繰返しせん断強度の評価に際して、クリンカアッシュは礫サイズの粒子を含んでいることからメンブレンペネトレーションの影響が大きく、繰返しせん断強度が過大評価されたと考え、田中³⁾らによって提案された補正法と原¹⁾によって提案された補正試験によりメンブレンコンプライアンスの補正を行った。図より、クリンカアッシュの繰返しせん断強度は、相対密度が-10%~20%と低い値にも関わらず、 $Dr\approx 45\%$ の豊浦砂の繰返しせん断強度より高いことがわかる。また、クリンカアッシュは、その粒度分布がまさ土に類似しているにも関わらず、繰返しせん断強度はまさ土より高いことが認められる。クリンカアッシュは低い相対密度であるにも関わらず、その繰返しせん断強度曲線は $Dr=80\%$ の豊浦砂に近いことがわかる。これは、クリンカアッシュの粒子表面が粗いことに依るものと考えられる。

4. コーン貫入特性

図-3 にこれらの試料のコーン貫入指数 q_c と繰返しせん断強度 R_{20} の関係を示す。今回行った試験条件は、繰返しせん断強度との関連性を直接的に見るために、供試体は非排水繰返し三軸圧縮試験と同様に同じ密度条件となるように作製した。貫入速度は0.1cm/secでコーンは底面積6.45cm²、先端角30°のものをを用いた。図より、豊浦砂や宇部まさ土に比べ、クリンカアッシュの方がコーン指数が高めに現れていることがわかる。また、繰返しせん断強度が大きくなるほどコーン指数も高くなり、両者にほぼ直線的な関係が認められる。

5. まとめ

本論文は、クリンカアッシュの埋立て地盤材料としての妥当性を検討するための基礎的研究として、繰返しせん断特性とコーン貫入抵抗特性について検討したものである。得られた知見は以下の通りである。1)クリンカアッシュの粒子形状は、豊浦砂やまさ土に比べ複雑である。2)クリンカアッシュは非常にゆるい状態であっても、 $Dr\approx 45\%$ の豊浦砂や宇部まさ土より繰返しせん断強度が高い。これらは、クリンカアッシュの粒子形状に依るところが大きい。3)クリンカアッシュのコーン指数は豊浦砂や宇部まさ土よりも大きく、液状化強度 R_{20} との関係において直線的な関係を示す。以上、繰返しせん断強度の観点から、クリンカアッシュは密度が低い状態でも繰返しせん断強度が高いことから、豊浦砂やまさ土に比べ埋立て材として優れた材料である判断される。

【参考文献】

1)原 忠：砂礫の液状化特性に及ぼす粒度分布の影響に関する研究 pp.87-108, 2005. 2)加登文学, 中田幸男, 兵動正幸, 村田秀一：地盤材料の単粒子破碎特性, 土木学会論文集, No.673/III-54, pp.189-194, 2001. 3)田中敬三, 時松孝次：液状化試験結果に対する Membrane Penetration の簡便な評価方法, 土の非排水繰返し試験に関するシンポジウム発表論文集, pp.85-88, 1988.

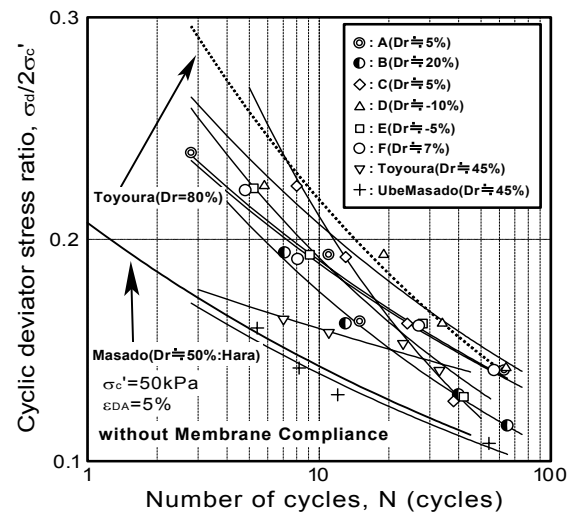


図-2 補正後の非排水繰返しせん断強度曲線

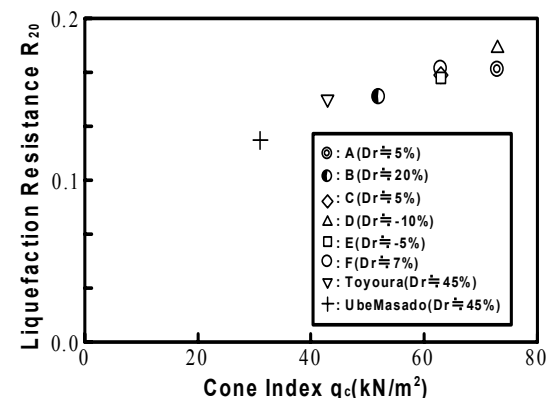


図-3 コーン指数と繰返しせん断強度の関係