

造粒石炭灰の排水せん断特性

山口大学大学院 学生会員 ○中村裕樹 古森幸作

山口大学工学部 正会員 吉本憲正 村田秀一 兵動正幸 中田幸男

日本国土開発（株）正会員 大上敏弘

宇部興産（株）正会員 本郷孝 大中昭

1. はじめに 原子力に次ぐエネルギー源として用いられる石炭は、発電のための燃焼過程において必然的に副産物としての石炭灰が産出される。発生する石炭灰を大量に有効利用する方法として、地盤材料の代替材としての利用が挙げられる。さらに、その石炭灰を有効利用するための一つの方法として、石炭灰に少量の固化材（セメント）や水などを加えて混合し、砂礫大に造粒化して利用する方法がある¹⁾。この造粒石炭灰は既に盛土材料としての利用が進められつつある²⁾が、更なる利用用途の拡大が期待される材料である。本研究では、この造粒石炭灰の地盤材料としての利用用途の拡大を念頭において、まず、基本的な力学特性を把握するために、数種類の造粒石炭灰に対し排水単調三軸圧縮試験を実施した。そして、得られた結果を自然砂とも比較することで、造粒石炭灰の基礎的特性を把握することを目的とした。

2. 用いた試料の特性 本研究では、2mm 以下に粒度調整した造粒石炭灰 A～D の 4 種類と比較のため数種類の自然砂を用いた。造粒石炭灰の配合と造粒設備、養生状態を表-1 に示す。なお、各試験では事前に自然乾燥したものを用いた。また、各造粒石炭灰の物理的性質を表-2 に、粒径加積曲線を図-1 に示す。造粒石炭灰は、石炭灰自身が気泡を有していることに加え、造粒化によって気泡が混入されるため、土粒子密度は自然砂と比べ低い値を示し、最大間隙比、最小間隙比ともに大きな値を示す特徴を持つ。また、粒径加積曲線から、造粒石炭灰は比較的まき土(Masado)と類似した良い粒度分布を示しており、造粒石炭灰 D が最も細粒分が多くなっていることがわかる。また、別途実施した単粒子破碎試験の結果より、造粒石炭灰の単粒子破碎強度は自然砂の 1/10～1/50 倍程度と低く、比較的低い応力域で破碎する破碎性材料であり固化材の配合や材齢の影響により単粒子破碎強度は異なることが報告されている³⁾。

3. 排水単調せん断特性 前述したように、造粒石炭灰は自然砂と比べて粒子強度が低いいため、集合体においても比較的低压域から粒子破碎が生じるものと推察される。そこで排水単調三軸圧縮試験を実施し、せん断挙動について検討した。ここでは B～D の 3 種類の造粒石炭灰を用いて、水中落下法により供試体(直径 5cm, 高さ 10cm)を作製した。なお、実験は供試体の目標初期相対密度を $D_{r0}=50, 70\%$ とし、ひずみ速度 0.1%/min, 有効拘束圧を $\sigma'_c=50 \sim 400\text{kPa}$ の 5 種類で側圧一定条件にて行った。図-2(a), (b) に一例として応力比 $\eta(=q/p) \sim$ 軸ひずみ $\varepsilon_a \sim$ 体積ひずみ ε_v 関係を示す。なお、(a) は造粒石炭灰 C における $D_{r0}=70\%$ の結果であり、(b) は過去の研究で行われた Silica_{1.4-1.7} に対する排水三軸圧縮試験の結果⁴⁾である。まず、(a) をみると、 $\sigma'_c=100\text{kPa}$ 程度までは応力比に明確なピークが現れ、有効拘束圧の増加に伴いこのピークは次第に消失する傾向が認められる。ここで、残留強度に着目すると、密度や拘束圧の違いに関わらずほぼ一定の値を示していることがわかる。また、初期接線勾配は拘束圧の増加に伴って低下していく傾向がみとれる。さらに、体積ひずみ挙動は、応力比に明確なピークが

表-1 造粒石炭灰の配合・造粒設備・養生状態

試料	配合(%)			造粒設備	養生状態
	石炭灰	固化材(セメント)	造粒助材		
A	85	5	10	パイロット	自然乾燥状態
B	80	10	10		
C	85	5	10	実証	含水比 40～50%
D	85	5	10		

表-2 用いた試料の物理的性質

試料	ρ_s (g/cm ³)	e_{max}	e_{min}	d_{50} (mm)
A	2.35	2.544	1.916	0.385
B	2.36	2.679	1.968	0.467
C	2.41	2.222	1.522	0.561
D	2.28	2.280	1.512	0.368
Masado	2.59	1.353	0.811	0.509
Silica _{1.4-1.7}	2.64	0.881	0.632	1.550
Silica _{0.18-2.0}	2.655	0.936	0.588	0.736
Toyoura	2.643	0.973	0.635	0.200
Chibishi	2.821	1.574	0.983	0.613

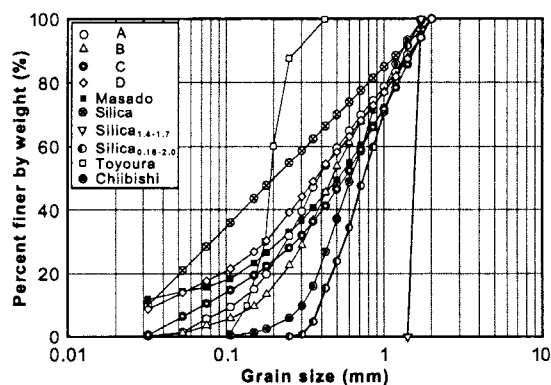


図-1 粒径加積曲線

現れる応力域においては若干の膨張挙動を示すものの、拘束圧の増加に伴い収縮挙動を示すことがわかる。なお、他の造粒石炭灰および $D_{ri}=70\%$ の場合においても同様の傾向を示した。次に、(b)をみると、自然砂においても拘束圧の増加に伴い粒子破碎を生じ初期接線勾配が低下することや体積ひずみが収縮一方に転じることがわかる。これは粒子破碎に起因していることが報告されており⁴⁾、応力レベルは異なるものの、造粒石炭灰のせん断挙動はこれに類似しているというこ

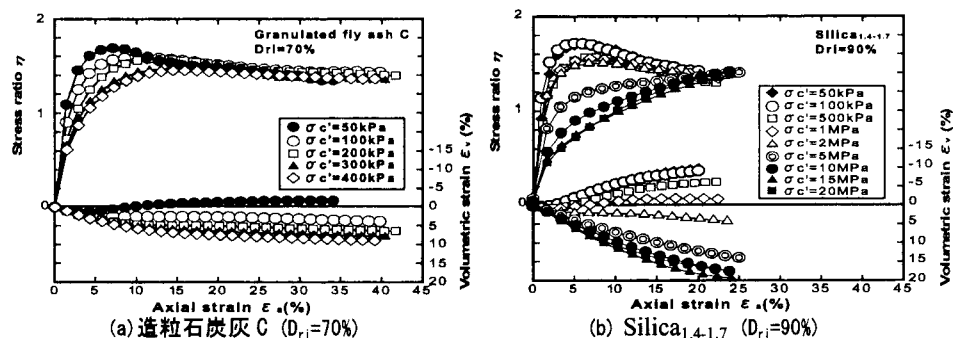


図-2 応力比～軸ひずみ～体積ひずみ関係

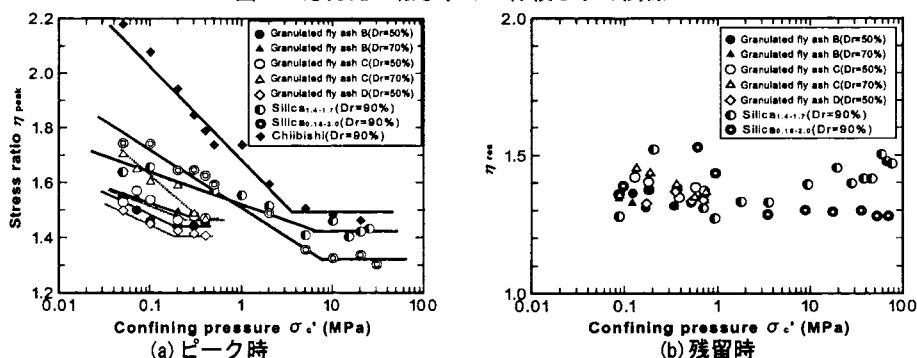


図-3 応力比～有効拘束圧関係

とを踏まえると、造粒石炭灰は粒子強度が自然砂よりも低く、比較的低圧域において粒子破碎を生じるため、上述したような挙動を示すものと考えられる。次に、図-3に、応力比と拘束圧の関係を示す。なお(a)はピーク時、(b)は残留時の応力比を示している。図中には自然砂の結果も併せて示した。(a)をみると、全ての造粒石炭灰において概ね右下がりの傾向が見てとれる。また、低い応力域では各造粒石炭灰の相対密度ごとの応力比のピークの差は顕著であり、ある拘束圧を越えた辺りからその差は狭くなりほぼ一定値を示す。この傾向が始まる応力域は、応力比～軸ひずみ関係において、明確な応力比のピークが現れなくなる拘束圧域とほぼ一致していることから、この辺りの応力域において粒子破碎が顕著に生じていると推察される。自然砂の結果をみると、造粒石炭灰と類似した傾向が得られ、応力比が一定値を示す応力域も、造粒石炭灰同様に応力比に明確なピークが現れなくなる拘束圧域と一致している。これらの結果と比較しても、造粒石炭灰は低圧域においても粒子破碎による強度低下がみられ、これは造粒石炭灰の粒子強度が自然砂よりも低いことに関連すると考えられる。一方、(b)の残留時では、応力比は初期相対密度に依存せず、ある一定の範囲内に応力比は収まっていることが確認できる。造粒石炭灰は比較的低圧域において粒子破碎による強度低下がみられる材料であると述べたが、図より、自然砂の結果と比較すると残留時の応力比に差はなく、造粒石炭灰は残留強度においては、同一の拘束圧において自然砂と同等程度の強度を発揮できる材料であることが確認できた。

4. おわりに 本研究では、産業副産物である石炭灰の有効利用の一環として、造粒化された石炭灰の排水単調せん断特性について検討を行なった。以下に得られた知見を以下に示す。

①排水単調三軸圧縮試験の結果から、造粒石炭灰は比較的低圧域において拘束圧の増加に伴うピーク強度の低下が認められた。しかしながら自然砂と同等程度の残留強度を確保していることが確認できた。②自然砂の排水せん断挙動と類似していることを踏まえると、造粒石炭灰の排水せん断挙動は、粒子破碎に起因していると考えられ、単粒子破碎強度が低い造粒石炭灰は、比較的低圧域においてこのことが生じたものと考えられる。

<参考文献> 1) 吉本憲正・中田幸男・藤井恵美・大上敏弘・鶴谷巖・大中昭：造粒石炭灰の粒子強度に着目した圧縮・せん断特性,第5回環境地盤工学シンポジウム発表論文集,pp235-240,2003.7 2) 宇野浩樹・檜垣貴司・鶴谷巖・大中昭：セメント処理で造粒化した石炭灰による盛土施工実験,第5回環境地盤工学シンポジウム発表論文集,pp251-254,2003.7 3) 吉本憲正・兵動正幸・中田幸男・村田秀一・藤井恵美・大上敏弘・大中昭：粒子強度に基づく造粒石炭灰の排水せん断特性,第38回地盤工学研究発表会発表論文集,pp681-682,2003.7 4) 加登文学：単粒子の形状および強度に基づく破碎性材料の力学特性に関する研究,山口大学博士論文,2002