

造粒化した石炭灰および粘性土の力学特性

山口大学大学院 学生会員 徳永諭史 山下智 長坂一宏
 山口大学 正会員 中田幸男 吉本憲正 村田秀一
 山口大学大学院 正会員 兵動正幸

1. まえがき 現在，増大する石炭灰の処理に対応するため，大量消費が期待できる地盤材料としての有効利用の促進が求められている．また，建設工事において港湾の浚渫時に排出される建設残土は，埋立処分場の確保が困難なことからリサイクル技術の開発が急務とされている．さらに近年，地盤材に用いる良質な天然砂質土の枯渇が深刻な問題となっており，それに伴って採取の制限もなされている．このような現状において，造粒化技術を用いて石炭灰に固化材等を添加し作製された粒状体を，地盤材料として利用する案が検討されている¹⁾⁻³⁾．そこで，この造粒化技術が石炭灰のみでなく粘性土に対しても適用し，人工砂質系地盤材料の作製を検討した．さらに，各造粒砂に対して単粒子破碎試験，排水単調三軸圧縮試験，非排水繰返し圧縮試験を実施した．本論文では，その実験結果を通して作製した造粒砂の地盤力学特性を考察する．

2. 試料および試験概要 本研究で用いた試料は，微粉炭燃焼火力発電所より排出された石炭灰，および浚渫土を想定した岩国沖合より採取された粘性土である．また，固化材に高炉セメント B 種，助剤にベントナイトを使用した．粉体原材料の合計質量が 500g となるよう原料：固化材：助剤 = 75：10：15，又は 85：5：10 の配合割合で攪拌造粒法により作製した．前者の配合割合で作製した石炭灰造粒砂，粘性土造粒砂，混合造粒砂をそれぞれ F75，C75，M75 と表記し，後者を F85，C85，M85 と表記する．混合造粒砂は自然含水状態の粘性土を用い，乾燥時の粘性土：石炭灰が 30：70 となるように配合した．粘性土造粒砂は事前に乾燥処理し，粉末状に磨り潰されたものを使用した．各造粒砂の物理的性質を表 1 に，粒径加積曲線を図 1 に示す．なお，原材料の粒度分布も図中に付記している．これより，造粒砂は粒径が大きくなっていることが確認できる．

3. 単粒子破碎特性 本研究で行った単粒子破碎試験は，粒子が最も安定する状態で試験機下盤に配置し，上盤を下降させることにより粒子を破碎させる試験である．試験結果より得られる荷重と変位の関係から最大荷重値 F_f を粒子の初期高さ d_0 の二乗で除したものを破碎強度と定義し，同一条件で行った結果の平均値を単粒子破碎強度 σ_{fm} とした．なお，各造粒砂に対してそれぞれ粒子 30 個を試験した．図 2 は単粒子破碎強度と初期粒径の関係を示したものである．図中には，代表的な自然砂の結果も併せて示している．既往の研究より，自然砂は試料によらず初期粒径が大きくなると単粒子破碎強度は小さくなり， $1:0.79$ のような勾配を持つと報告されている．これは，自然砂は粒径が小さくなるほど異種鉱物間の境界がとれて単一鉱物化し，強く均質な内部構造を持つためと考えられる．一方造粒砂は自然砂ほど粒径の影響を受けない．これは，造粒砂はどの粒子サイズにおいても水和物が比較的均等に出来ており，内部構造が均一であるためと考えられる．また，各造粒砂において固化材添加量増加に伴い，単粒子強度は高くなっているものの，いずれの造粒砂も同一粒径付近の自然砂の単粒子強度

表 1 各造粒砂の物理的性質

	s (g/cm ³)	e_{max}	e_{min}	d_{50} (mm)	U_c	U_c'	A_r	R_c
F75	2.612	2.610	1.676	0.210	3.091	0.602	1.362	1.882
F85	2.576	2.610	1.694	0.410	3.563	0.685	1.224	1.621
C75	2.679	2.281	1.436	0.380	8.133	0.460	1.389	1.745
C85	2.661	2.376	1.488	0.330	6.625	0.462	1.223	1.594
M75	2.569	2.630	1.554	0.175	3.651	0.736	1.411	1.638
M85	2.587	2.413	1.560	0.182	2.860	0.552	1.347	1.608

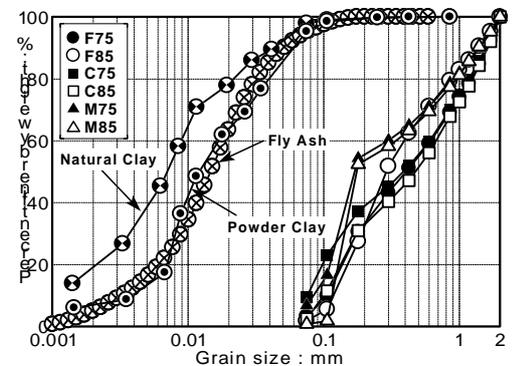


図 1 各原料と造粒砂の粒径加積曲線

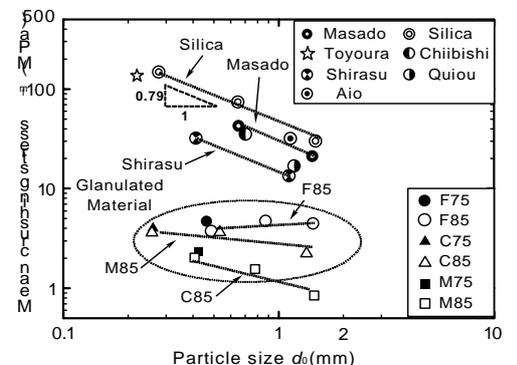


図 2 単粒子破碎強度 σ_{fm} -初期粒径 d_0 関係

キーワード 造粒 石炭灰 粒子破碎 排水単調三軸圧縮試験 液状化強度

連絡先 〒755 - 8611 山口県宇部市常盤台 2 - 16 - 1 山口大学大学院理工学研究科

に比べ、非常に弱いことが確認できる。原料別に見ると、石炭灰造粒砂が最も強く次いで混合、粘性土造粒砂の順となっている。

4. 排水単調せん断特性 いずれの造粒砂においても自然砂と比べて粒子の強度が弱いことから、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行い粒子特性との関連を検討した。F75, C75, M75はサンドコンパクションの中詰め材, F85, C85, M85は埋立柱材としての利用を想定して、前者をタッピング法により目標乾燥密度 $\rho_d = 0.96\text{g/cm}^3$ 、後者を水中落下法により目標相対密度 $D_r = 50\%$ で供試体作製を行った。図3に拘束圧50kPaおよび400kPaにおける各造粒砂の応力比 η 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。いずれの造粒砂に対しても、初期剛性は拘束圧が増加すると低下しており、自然砂と同様の傾向が認められる。また体積ひずみ挙動は、応力比に明確なピークが表れる50kPaのF85に限り若干の膨張挙動を示すが、他は全て収縮挙動を示している。今回、比較的low拘束圧域において試験を実施しているが、造粒砂自体の粒子強度が低いため、このような応力レベルにおいても破碎が生じていると考えられる。

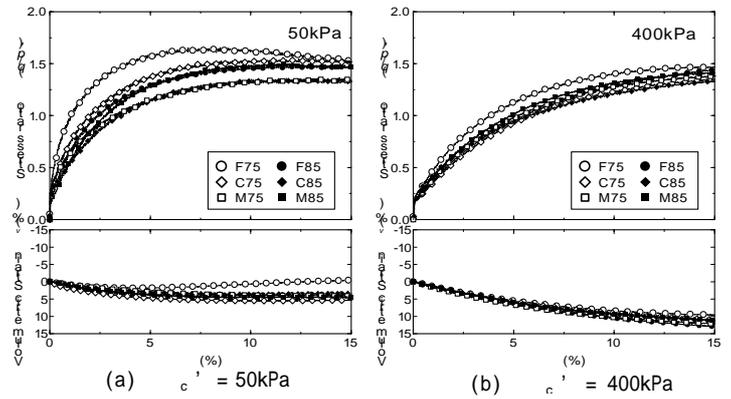


図3 応力比 - 軸ひずみ - 体積ひずみ関係

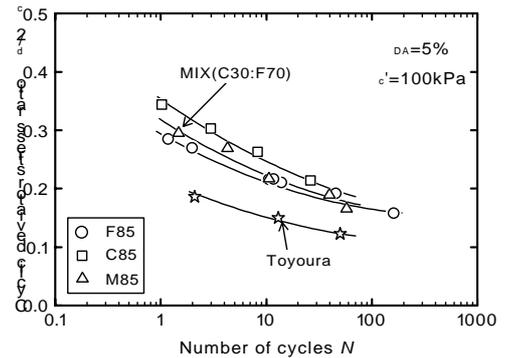


図4 各造粒砂の液状化強度曲線

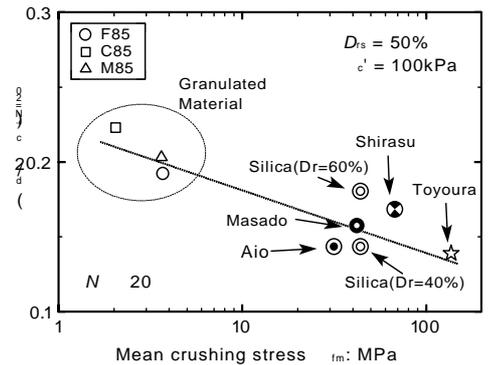


図5 N 20の繰返しせん断強度 - 単粒子破碎強度関係

5. 非排水繰返し三軸挙動 試験に用いた造粒砂はF85, C85, M85である。供試体作製方法は水中落下法であり、初期相対密度 $D_{rs} = 50\%$ 、拘束圧100kPa、載荷荷重周波数0.1Hzである。図4に各造粒砂における軸ひずみ両振幅 $\varepsilon_{DA} = 5\%$ を繰返しせん断破壊と定義した時の液状化強度曲線を示す。なお、図中には代表的な自然砂としてToyouiraの結果も併せて示した。図より、全ての造粒砂において液状化強度線がToyouiraの強度線よりも上方に位置する結果となった。この傾向は繰返し回数が少なくなるにつれて特に顕著に表れている。また造粒砂のなかで比較すると、供試体の繰返し回数20回時の繰返しせん断強度比は、C85が最も液状化抵抗力の高く、続いてM85, F85の順となっている。しかし、繰返し回数が多くなるにつれ、いずれの造粒砂も同等の液状化抵抗を有することが確認できる。図5は繰返し回数20回の繰返しせん断強度比と単粒子破碎試験より得られた単粒子破碎強度の関係について示したものである。これより、単粒子破碎強度が増加するほど繰返しせん断強度は低下することが確認できる。つまり、単粒子破碎強度が小さい材料ほど粒子が脆いため、繰返し載荷中粒子が破碎する可能性が高く、このことが液状化強度に関連していることを示唆している。

5. まとめ 今回作製した造粒砂において、排水三軸圧縮中の体積変化挙動は、試料の密度に依存するが、比較的low圧力レベルから収縮一方の挙動を示す。各造粒砂の液状化強度曲線は自然砂よりも5割程度上方に位置しており、造粒砂の液状化に対する高い抵抗性が確認できた。造粒砂の液状化強度は単粒子破碎強度と対応していることが認められた。

[参考文献] 1)天野公人, 西川純一, 佐藤享子, 小梁啓則: 造粒石炭灰の地盤材料への適用性, 第37回地盤工学研究発表会, pp.701-702, 2002.
 2)車田佳範, 浜田純夫, 斎藤直, 櫻井和俊, 新谷登: 石炭灰を活用した海州代替材の品質特性 ~長期安定性について~, 土木学会第50回年次学術講演会要集, B-234, 2000.
 3)吉本憲正, 兵衛加幸, 中田幸男, 村田秀一, 本郷孝, 大沼昭: 地盤材料としての造粒石炭灰の粒子特性, 第6回地盤改良シンポジウム論文集, pp.235-240, 2004.9.