

造粒石炭灰の液状化特性

山口大学大学院 学生会員 ○古森幸作 中村裕樹
 山口大学工学部 正会員 吉本憲正 兵動正幸 中田幸男 村田秀一
 宇部興産 正会員 本郷孝 大中昭
 日本国土開発(株) 正会員 大上敏弘

1. はじめに

近年、リサイクルを促進するという社会的背景を受けて地盤工学の分野でも石炭灰を地盤材料として有効利用するための研究が様々な機関で行われている。筆者らは、特に石炭灰に固化材を混ぜて砂礫大に造粒化された造粒石炭灰に着目している。そして、造粒石炭灰の力学特性を把握するために種々の検討を進めてきた¹⁾。埋立材として用いる場合に懸念されることとして液状化に対する検討が挙げられる。そこで、本研究では非排水繰返し三軸試験を行い、種々の圧密履歴を受けた造粒石炭灰の液状化特性を他の自然土と比較することで把握することを目的とした。

2. 試料の物理的性質および試験方法

本研究では、最適含水比 40～50%のもとで屋外養生された造粒石炭灰を自然乾燥させ 2mm 以下に粒度調整して用いた。ここで、造粒石炭灰および比較のために用いた自然土の物性値を表-1 に示す。なお、しらすは比較のために細粒分含有率 $F_c=10\%$ に粒度調整したものである(以下しらすと称する)。また、表中の R_c (真円度)および A_r (縦横比)は粒子形状を表す指標であり、それぞれ値が大きくなるにつれ、粒子の表面形状が複雑になる。次に、用いた試料の粒径加積曲線を図-1 に示す。この図より、造粒石炭灰は P.I. まさ土およびしらすの粒度分布と類似しており、豊浦砂よりも粒度分布がよいことがわかる。供試体は埋め立て地盤を想定して、水中落下法により、相対密度 $D_r=50\%$ となるように作成し、想定される応力条件として、有効拘束圧 $\sigma'_c=50\sim 400\text{kPa}$ の間で変化させた。加えて、過圧密による液状化対策を想定して、過圧密履歴 ($OCR=2.0, 4.0$ $\sigma'_c=100\text{kPa}$) を与えた試験も実施した。なお、比較に用いた自然土は $\sigma'_c=100\text{kPa}$ の一定条件であり、砂試料においては、相対密度 $D_r=50\%$ の同条件、岩国粘土は予圧密 50kPa で作成されたものである。いずれの試験も荷重振幅一定の応力制御下で、粘土試料以外は載荷周波数を 0.1Hz とし、粘土は 0.02Hz とした。

3. 造粒石炭灰の液状化特性

図-2 に造粒石炭灰における軸ひずみ両振幅 $\varepsilon_{DA}=5\%$ 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。図より造粒石炭灰の液状化特性には拘束圧の増加とともに液状化曲線が下側にシフトする拘束圧依存性が見られる。また、特に繰返し回数の少ない領域においてこのことが顕著であることがわかる。この原因を検討するために、造粒石炭灰の試験中の粒子破碎に着目した。図-3 に圧密後・せん断後の粒子破碎量を定量的に評価できるとされている表面積増加量を各有効拘束圧ごとに整理したものについて示す。表面積は粒度試験より平均粒径 d_m ($d_m = \sqrt{(d_1 \cdot d_2)}$ 、 d_1 および d_2 は 2 つのふるい目寸法) を求め、次式により算出した²⁾。

$$S = \sum \frac{F}{100} \cdot \frac{4\pi(d_m/2)^2}{(3/4)\pi(d_m/2)^3 G_s \gamma_w} \gamma_d \quad (\text{cm}^2/\text{cm}^3) \quad (1)$$

表-1 試料の物理的性質

Sample	$\rho_s (\text{g/cm}^3)$	$e_{\max}$	$e_{\min}$	R_c	A_r	$d_{50} (\text{mm})$
Granulated fly Ash	2.28	2.280	1.512	1.287	1.249	0.368
P. I. Masado	2.62	0.967	0.491	1.251	1.445	0.509
Shirasu ($F_c=10\%$)	2.38	1.459	0.799	1.402	1.657	0.323
Toyoura	2.64	0.973	0.635	1.203	1.454	0.200
Iwakuni clay	2.61	-	-	-	-	0.007

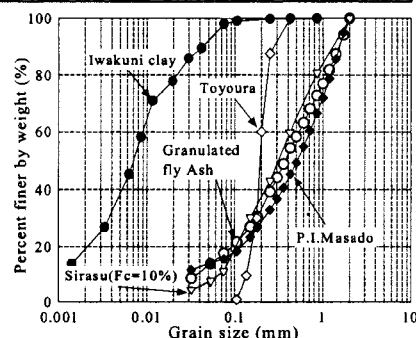


図-1 粒径加積曲線

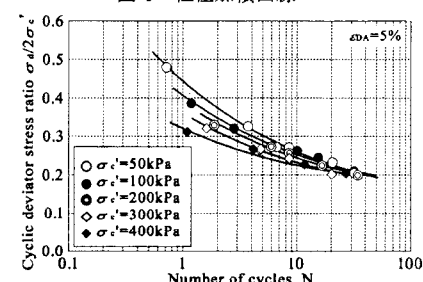


図-2 液状化強度曲線

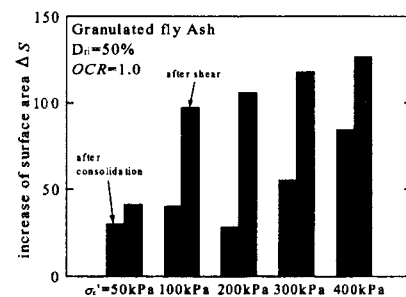


図-3 各有効拘束圧における圧密・せん断後の表面積増加量

ここで、 F は各粒径の試料の残留率を表し γ_w は、水の単位体積重量(kN/m^3)、 γ_d は、乾燥単位体積重量(kN/m^3)である。また、表面積増加量 ΔS は試験前後の表面積の差であり、次式で算出される。

$$\Delta S = S_{\text{after}} - S_{\text{before}} \quad (\text{cm}^2/\text{cm}^3) \quad (2)$$

ここで、式(2)中の添字はそれぞれ試験前・後を表す。また、せん断後の表面積増加量は圧密後からの増加量としている。図-3 より、造粒石炭灰の表面積増加量は圧密時より、繰返しせん断時において多く、その傾向は、拘束圧が高いほど顕著である。表面積の増加量は粒子の破砕量と関連していることから、造粒石炭灰に見られる拘束圧依存性は繰返しせん断中の粒子破砕が影響しているものと考えられる。図-4 に造粒石炭灰および自然土の液状化強度曲線を示す。なお、図中には過圧密履歴を受けた造粒石炭灰の液状化曲線も併せて示している。この図より、造粒石炭灰の液状化強度は比較したいずれの砂の結果をも上回っており、豊浦砂の液状化強度と比較すると約1.7 倍もあることがわかる。一般に液状化強度は、試料の粒度分布や密度、粒子の形状の影響を受けることが知られている。また、既往の研究より粒度分布がほぼ同じで相対密度をそろえた場合、粒子の形状が複雑(R_c や A_r が大きい) なものほど液状化強度が高くなることが明らかにされている³⁾。

このことより、本研究で比較対象として用いたしらすは造粒石炭灰と諸条件がほぼ同じであるため、液状化強度が高くなると予想される。しかしながら、図-4 より、造粒石炭灰の液状化強度はしらすを上回っていることがわかる。両者の間で認められる違いは粒子破砕特性であり、比較した拘束圧において、造粒石炭灰は顕著な粒子破砕を示し、しらすは破砕を示さない材料である。以上を踏まえると、造粒石炭灰は適度に粒子破砕を起こすことによって骨格構造が安定化されたため、しらすの液状化強度を上回るのではないかと考えられる。また、図-4 より、造粒石炭灰は過圧密履歴を受けることにより液状化強度が顕著に増加していることがわかる。そこで、過圧密による液状化強度の増加率を調べるために次式により過圧密による強度増加率を算出し、自然砂と比較を行う。

$$R_{OC} = \frac{\sigma_d / 2\sigma'_c(OC)_{N=20}}{\sigma_d / 2\sigma'_c(NC)_{N=20}} = OCR^n \quad (3)$$

ここで、 $\sigma_d / 2\sigma'_c(OC)_{N=20}$ は過圧密履歴を受けた供試体の液状化強度比であり、 $\sigma_d / 2\sigma'_c(NC)_{N=20}$ は正規圧密状態の供試体の液状化強度比である。過圧密による強度増加率 R_{oc} と過圧密比 OCR の関係を図-5 に示す。なお、図中の自然砂の結果は Ishihara(1979)⁴⁾、Tatsuoka(1998)⁵⁾の結果を引用し、併せて示している。この強度増加率は大きいほど過圧密履歴を受けた際の強度が増加するというものであり、一般に R_{oc} は OCR の n 乗で表現できることが参考文献で報告されている。図-5 より造粒石炭灰の R_{oc} はいずれの自然砂の R_{oc} よりも大きいことがわかる。これより、造粒石炭灰は過圧密履歴を与えることにより大きな液状化強度の増加を期待できる材料であると言える。

4. まとめ

本研究より、造粒石炭灰の液状化強度は拘束圧依存性による液状化強度の低下があるものの、自然砂の液状化強度を大きく上回った。さらに、過圧密履歴を与えることにより、液状化強度が大きく増加することがわかった。これは、造粒石炭灰の液状化強度の増加には、適度な破砕による骨格構造の安定化が強度増加の要因であると考えられる。以上より、造粒石炭灰を埋立て材として用いる場合には液状化に対して十分な強度を期待できることや、プレローディングなどを適用することで、より大きな液状化強度が期待できることが示された。

<参考文献>

1) 大上敏弘: 石炭灰を用いた人工造粒材料の粒子特性と単調および繰返しせん断特性、山口大学修士論文、2) 荒牧憲隆: 破砕性土の非排水単調および繰返しせん断特性と粒子破砕の評価に関する研究、山口大学博士論文、1997 3) 山脇大輔: 砂の単調および繰返しせん断特性に及ぼす粒子形状の影響、山口大学修士論文、2002 4) Ishihara, K. and Takatsu, H.: Effects of Overconsolidation and K_0 Conditions on The Liquefaction Characteristics of Sands, Soils and foundations, Vol.19, No.4, pp.59-68, 1979. 5) Tatsuoka, F., Kato, H., Kimura, M. and Pradhan, B.S.T.: Liquefaction Strength of Sands Subjected to Sustained Pressure, Soils and Foundations, Vol.28, No.1, pp.119-131, 1988.

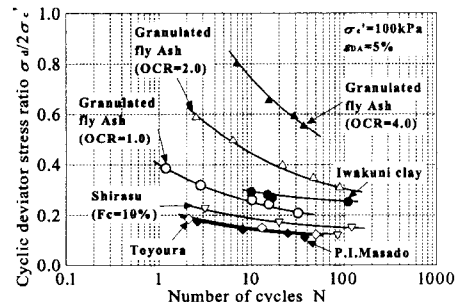


図-4 繰返し応力比と繰返し回数との関係

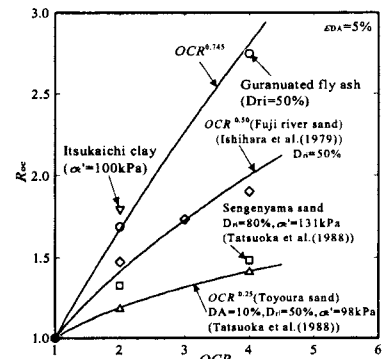


図-5 強度増加率と過圧密比の関係