

種々の粒子形状を有する砂の繰返しせん断特性

山口大学大学院 学生会員 ○長井健作

山口大学工学部 正会員 兵動正幸 中田幸男 吉本憲正

首都高速道路公団 正会員 松岡昇

山口大学大学院 学生会員 水木崇文

1. はじめに 1964年の新潟地震以来、砂地盤の液化化は世界中で注目されてきた。これまで、そのメカニズムを解明するために主として海浜や河口付近に堆積する比較的堅固な砂を対象に研究が精力的に行われてきた。しかしながら、兵庫県南部地震、鹿児島県北西部地震で液化化した砂は、しらすやまさ土などの破砕性土で埋め立てられた地盤であった。破砕性土とは、通常想定される応力域において粒子が破砕する土のことであり、元々脆弱な粒子からなる土あるいは堅固な粒子であったものが自然堆積中に風化を受け一部または全体が脆弱になったものである。このような土で構成される地盤は载荷により粒子の一部または全体の破砕によって圧縮性が増し、強度の低下が懸念される。一般に破砕性土は表面形状が粗く角張り破砕し易いため、それらで構成される土の強さを把握するためには粒子の形状や表面の粗さを知る必要があると考え、本研究では粒子の表面形状に着目することによって砂の非排水繰返しせん断特性に及ぼす粒子形状の影響について検討を行った。

2. 試料及び試験方法 本研究では、鹿児島県始良郡で採取した始良しらすの2mmふるい通過分のうち0.074mm以下を除去したもの、山口県秋穂町で採取した秋穂砂、兵庫県神戸市ポートアイランドで採取したP.I.まさ土、福井県若狭湾岸で採取した若狭砂を用いて実験を行った。供試体は、空中落下法及び空中落下漏斗法により初期相対密度 $D_{ri}=50\%$ を目標に作製した。その後、通水し飽和供試体を作製し、所定の拘束圧で圧密した後、非排水条件で繰返し三軸試験を行った。表-1に用いた試料の物理的性質、図-1に粒径加積曲線を示す。表-1中のパラメータの真円度 R_c は粒子形状の角張りや滑らかさを表し式は、 $R_c = L^2/4\pi A$ で表され値が大きい程角張っている事を表す¹⁾。縦横比 A_r は扁平さを表し式は、 $A_r = b/a$ ($b \geq a$) で表され値が大きい程扁平である事を表す。 R_c^* は、粒子の表面形状のみを表し $R_c^* = R_c - (R_c)_{ellipse}$ で表される。 $(R_c)_{ellipse}$ は、楕円の真円度で式は $(R_c)_{ellipse} = 1 + (A_r)^2/2(A_r)$ となる。ここで、 L は投影粒子の周囲長、 A は投影粒子の断面積、 a は投影粒子を楕円とみなした時の短軸長さ、 b は長軸の長さである。

3. 繰返しせん断挙動に及ぼす粒子形状の影響

図-2に初期相対密度 $D_{ri}=50\%$ 、拘束圧 100kPa におけるしらす、秋穂砂の軸差応力-軸ひずみ関係を示す。図(a)のしらすは、繰返し回数の増加に伴い軸ひずみが徐々に発達し破壊に至っているが、(b)の秋穂砂は、ある繰返し回数から軸ひずみが急激に発達し破壊に至っている。しらすの軸ひずみが発達しにくいのは、粒子の表面が粗く角張っているために粒子同士のインターロッキング効果が顕著に発揮され軸ひずみの発達が抑制されたためと考えられる。一方、秋穂砂の表面形状は滑らかで丸みを帯びているために粒子同士の噛み合いが少なく軸ひずみの急激な発達が認められた。図-3に対応する有効応力経路を示す。どちらも繰返し回数の増加に伴い過剰間隙水圧が上昇していることがわかる。しらすは秋穂砂より表面形状が角張っているためインターロッキング効果が発揮されること

表-1 物理的性質

	$\rho_s(g/cm^3)$	e_{max}	e_{min}	U_c	R_c	A_r	R_c^*
Shirasu	2.307	1.511	1.027	3.38	1.402	1.657	0.272
Aio sand	2.633	0.958	0.582	2.74	1.274	1.557	0.174
P.I. Masado	2.624	0.967	0.491	7.00	1.248	1.412	0.188
Wakasa sand	2.649	1.105	0.680	1.66	1.272	1.506	0.187

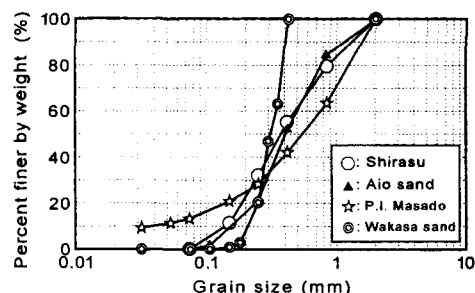


図-1 試料の粒径加積曲線

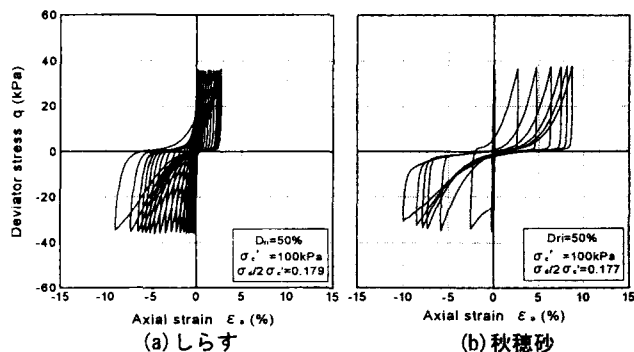


図-2 軸差応力-軸ひずみ関係

で平均有効主応力の一波に対する減少量は少ない。

4. 繰返しせん断強度に及ぼす粒子形状の影響

図-4 の(a)(b)に示す、秋穂砂の $D_{50}=50\%$ 、軸ひずみ両振幅 $\varepsilon_{DA}=5\%$ を繰返し破壊と定義しその液状化強度曲線を示す。図(a)のしらすは、拘束圧が 50kPa から 100kPa の増加により密になることでインターロッキング効果を発揮し易い構造になり強度が高くなったと考えられる。しかし、300kPa になると繰返し回数 3 回以下では $\sigma'_c=50, 100\text{kPa}$ より

強度が下がり、繰返し回数 7 回以上では $\sigma'_c=50, 100\text{kPa}$ の強度より高く発揮された。これは、しらすの粒子が脆弱で表面形状が角張っているため高い拘束圧で大きな繰返し応力の作用下では粒子の角張りが破碎するために他の拘束圧における強度より低くなったと考えられる。つまり、粒子の破碎による影響が結果に含まれている

と考えられる。その結果緩やかな強度曲線が得られた。秋穂砂は、拘束圧の変化にかかわらずほとんど同じ強度を示した。図-5 に 4 試料の $\sigma'_c=100\text{kPa}$ 、 $\varepsilon_{DA}=5\%$ における液状化強度曲線を示す。最も粒子の表面形状の粗いしらすの強度が一番高く発揮され立ち上がった強度曲線が得られた。次に、図-6 に繰返し回数 20 回時の繰返し応力比と粒子の表面形状のみを表す R_c^* の関係を示す。 R_c^* の値が大きいものほど破壊に至るのに大きな繰返し応力比を必要としている。しらすの R_c^* が最も大きく、最も大きな繰返し応力比を必要としている。破碎性土であるしらすは、拘束圧の増加に伴って強度の増加が顕著に現れた。これは、表面形状が角張っているために拘束圧の増加によって角張りがより噛み合うことにより強度が発揮されたのではないかと考えられる。同じく破碎性土である P.I. まさ土の強度は、 R_c^* が同程度であり細粒分の少ない若狭砂に比べ強度が低く現れることが確認された。この結果は、風間らの研究²⁾により細粒分が母粒子表面に付着していることで液状化抵抗が低下すると報告されているものと同様の結果となった。同様にしらすにおいても細粒分が含まれていることによって強度が低下することが報告されている³⁾。また、比較的堅固である若狭砂や丸みを帯びている秋穂砂は拘束圧の依存性はほとんど認められなかった。

5. まとめ 1. R_c^* の値が大きく角張っている試料ほど粒子同士の噛み合いによって軸ひずみの発達が抑制される。
2. R_c^* の値が大きい試料ほど繰返しせん断強度が高く発揮され、破碎性土であるしらすは拘束圧の増加に伴って強度も増加する。

3. しらすは、脆弱で R_c^* が大きく角張っているため高拘束圧で大きな繰返し応力作用下では粒子の破碎による噛み合いの減少で低拘束圧時の強度より低くなり、強度曲線は緩やかな曲線を描く。

【参考文献】1) 吉村優治・小川正二: 砂のような粒状体の粒子形状の簡易な定量化法, 土木学会論文集, No. 463/III-22 pp. 95-103, 1993.3 2) 風間基樹, 加賀谷俊和, 柳沢栄司: まさ土の液状化抵抗の特殊性, 土木学会論文集, No. 645/III-50, P.I. まさ土 p153-166, 2000.3 3) 兵動正幸: しらすの非排水繰返しせん断強度に及ぼす細粒分の影響, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集第 3 部, pp92-93, 2000.9

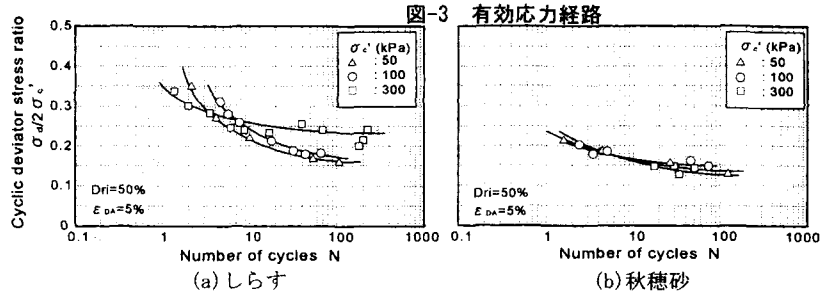
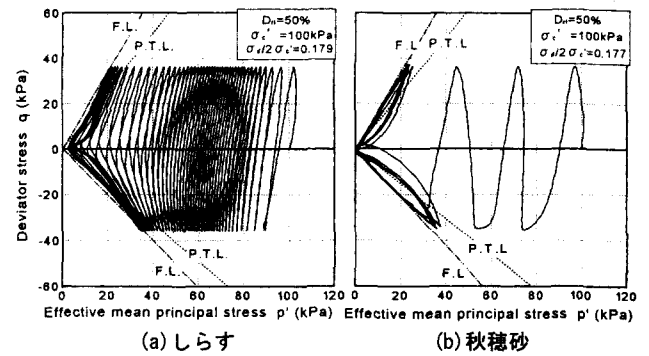


図-4 液状化強度曲線

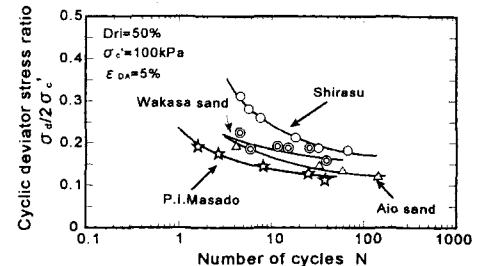


図-5 4 試料の液状化強度曲線 ($\sigma'_c=100\text{kPa}$)

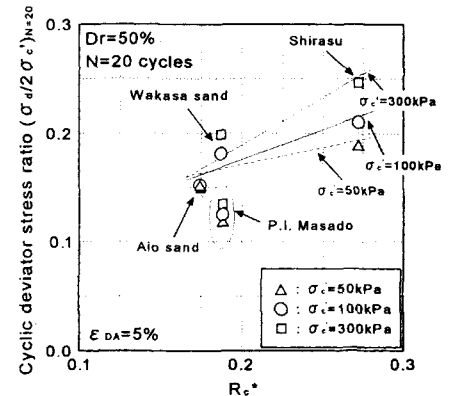


図-6 繰返し回数 20 回時の応力比と

R_c^* の関係