

しらすの静的・動的強度に及ぼす細粒分の影響

Effects of fines on static and dynamic strength of Shirasu

山脇 大輔	Daisuke YAMAWAKI	(山口大学大学院)
兵動 正幸	Masayuki HYODO	(山口大学工学部)
吉本 憲正	Norimasa YOSHIMOTO	(山口大学工学部)
加登 文学	Yoshinori KATO	(山口大学大学院)
中田 幸男	Yukio NAKATA	(山口大学工学部)
岡林 巧	Takumi OKABAYASHI	(鹿児島高専)

本研究では、鹿児島県始良で採取したしらすの静的・動的強度特性に及ぼす細粒分の影響を調べるため、原粒度と細粒分を取り除いた試料を用いて、圧密排水・非排水三軸圧縮試験及び非排水繰返し三軸試験を行った。一連の試験結果から細粒分を取り除くことにより、静的強度は、低拘束圧下では、角張った母粒子同士がかみ合うことで強度が増大したが、高拘束圧下では母粒子の角張りが破碎を起こし、強度が減少した。動的強度は細粒分を取り除くことにより増加し、初期せん断応力下では、原粒度のしらすは初期せん断応力の影響をあまり受けなかったが、細粒分を取り除くと初期せん断応力の影響を受けた。

キーワード：しらす，細粒分，粒子破碎，動的，静的，液状化 (IGC: D07, E08)

1. はじめに

しらすは、弱溶結火山流堆積土であり、南九州に広く分布している。通常しらすは、崖錐を形成して堆積しており、粒子間に固結力を持ち軟岩に相当する強度を有するが、掘削すると活性のない砂質土の様相を呈す。平野部では、このようなしらすが河川の運搬による2次堆積として緩い地盤を構成している所も多く、また近年、掘削した地山しらすを水搬送工法により沿岸部の埋立に用いることもあり、飽和した緩いしらす地盤の力学的解明が急務となっている。1968年えびの地震や1997年鹿児島県西部地震において数カ所のしらす地盤で液状化が発生しており、今後の地震によってさらなる大きな被害が危惧されている。しらすは、火山ガラスを主体としているが、総じて粒子表面は粗く脆弱であり、破碎性土として知られている¹⁾。また、しらすには母粒子の破碎により生じた細粒分が含まれており、この細粒分の存在がしらす地盤の挙動を支配していることが推察される。

細粒分が液状化強度に及ぼす影響については、今までにも砂にシルトや粘土を混入させた試料の液状化強度に関する研究結果^{2), 3), 4), 5)}が報告されている。古関ら⁶⁾は、豊浦標準砂に種類の異なる細粒分を混入させて三軸液状化試験を行い、細粒分の塑性指数が高いものほど液状化強度は高くなること、低塑性の細粒分の場合には、細粒分が増すとかえって液状化強度が低下する例があることを示した。細粒分含有率が増えると液状化強度が大きくなる理由は粘土の粘着力成分に起因すると言われている。

しかし、低塑性の細粒分が増加すると、粗粒子同志のかみ合いが弱くなり、液状化強度が低くなると考えられている。小瀬木ら⁷⁾は細粒分含有率の増加に伴う砂粒子の間隙の状況について調べる目的で、砂を骨格とし細粒分と空隙部分を間隙とみなして、骨格間隙比⁸⁾を定義し、細粒分含有率との関係を示した。彼らによれば細粒分含有率20%の骨格間隙比はほぼ細粒分含有率0%の最大間隙比に相当することから、それ以上の含有率では砂の粒子が細粒分中に浮いたような状態となり、供試体の強度は砂粒子の間隙を埋める細粒分に支配されてくると考えた。黄ら⁹⁾は、豊浦標準砂に非塑性シルトの含有率を変化させ混合し、液状化強度特性に及ぼす細粒分の影響を調べた。彼らは、砂と砂の粒子の間に砂より小さいシルト粒子が含まれると粗粒子間のかみ合いが弱くなり液状化強度は低下したが、シルト分含有率30%以上になると、砂を囲むマトリックスとしてのシルトの性質が卓越し、液状化強度が上昇していくと考えた。

一方、地盤材料の中で粒子破碎が生じやすいのは主として砂、粗石に分類される材料である。例えば、まさ土やしらすや石灰質土などは地盤工学で経験する応力範囲(0.1~数MPa程度)では、豊浦砂などのシリカ系の土に比べると粒子が破碎しやすい。応力範囲が広がればすべての土粒子は破碎するわけだが、対象とする応力を地盤工学で経験する範囲(0.1~数MPa)に限定し、この応力範囲でシリカ系の土粒子に比べて粒子破碎を起こしやすい土を破碎性土、破碎性土が大半を占める地盤を破碎性土と定義している¹⁾。破碎性土は、元々脆弱な粒子で構成されるものと、堅固な粒子が風化により一部もしくはは

全体が脆弱になったものに分けられる。土粒子を構成する鉱物は風化を起こすと、表面に無数の亀裂が生じて表面から脆弱になり、外力を受け破碎を起こす。破碎した粒子は表面が粗く角張り、さらなる外力の作用で破碎を繰り返す。その際、破碎により生じた細かい破砕片に応力が集中しやすい⁹⁾ことから細粒分が増加し、土は次第に均等係数の高いなだらかな粒度分布へと変化していく。一般に破碎性土のほうが非破碎性土より締固め効果に優れているのは、このように粒度分布が良いことと突固め時の粒子接触部分の破碎により粒子の再配列が容易であることによるものと考えられる¹⁰⁾。

石原ら^{11), 12)}は、緩詰めと密詰め豊浦砂において常圧域で繰返し三軸試験を行った。その結果、豊浦砂においては、いずれの密度においても液状化強度は拘束圧の影響をほとんど受けないことを示した。これに対し、岡林ら¹³⁾は破碎性土であるしらすを用い、豊浦砂とほぼ同様の条件で繰返し三軸試験を行ったところ、緩詰めでは拘束圧の増加に伴い液状化強度は増加したが、密詰めでは緩詰めとは傾向が逆で拘束圧の増加に伴い液状化強度は、著しく減少するという結果を得た。このように破碎性土であるしらすの液状化強度の拘束圧依存性の現れ方が初期密度によって異なるという特性が認められた。中田ら¹⁴⁾は破碎性土である Dogs Bay 砂を用い、圧密非排水三軸圧縮試験を行った。その結果、常圧域における拘束圧の増加に伴い負のダイレイタンスが増加し、収縮傾向が発揮され、液状化抵抗が減少することを示唆した。また、この現象は初期密度が高いほど強い傾向を示す結果となった。

荒牧ら¹⁵⁾は、2~0.45mm で粒度調整を行ったしらすに対して一面せん断試験を行った。この時しらすの着色粒子を用いせん断前後に粒子の写真撮影をして粒子形状の変化について観察を行った。その結果、表面剥離・形状変化・破断の割合が増加した。特に、緩詰めでは細粒分の増加する表面剥離や形状変化という粒子破碎が顕著となり、密詰めでは粒子が破断するような破碎が顕著となる結果を得た。

以上のような過去の研究成果を踏まえ本研究では、緩詰めしらすの静的及び動的強度に及ぼす細粒分の影響を調べるために、しらすの原粒度試料と細粒分を取り除いた試料を用いて、圧密排水・非排水三軸圧縮試験及び非排水繰返し三軸試験を行った。

2. 試料及び試験方法

(1) 試料

本研究では、鹿児島県始良郡隼人町で採取した1次しらすを用いた。原位置のしらすには約5%の礫分が混入していたが、実験では礫の影響を除くため礫分は除去した。実験においては、しらすの細粒分に着目し、細粒分を含む

表-1 試料の物理的性質

	ρ_s (g/cm ³)	e_{max}	e_{min}	U_c
秋穂砂	2.633	0.958	0.582	2.74
しらす	2.489	1.494	0.775	11.75
しらす (細粒分カット)	2.307	1.551	1.027	3.35

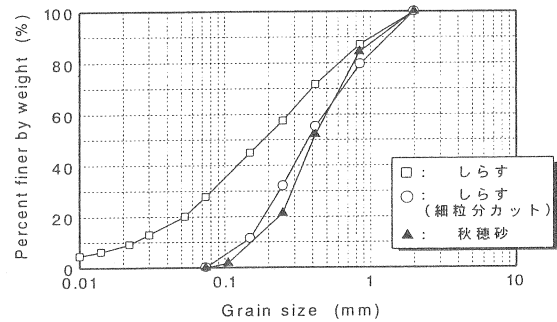


図-1 試料の粒径加積曲線

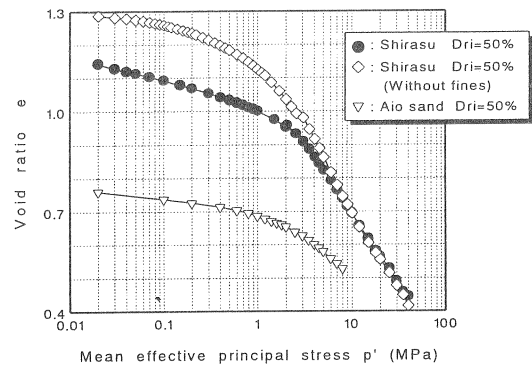


図-2 等方圧縮試験結果

試料と細粒分を除去した試料の二種類を用い、圧密排水・非排水三軸圧縮試験及び非排水繰返し三軸試験を行った。なお、細粒分は、74 μ m ふるい目のふるいをを用い、水洗いすることにより取り除いた。

表-1 に試験で用いた試料の物理的性質を示す。しらすの平均的な比重は 2.30~2.50 であり、通常の砂に比べて小さい¹⁶⁾。これは、軽石破砕片の混在としらす粒子自体に微気泡が含まれているためだと考えられる。最大・最小間隙比は細粒分を取り除くことにより大きくなっている。これは、細粒分の存在によるものだと考える。均等係数ではしらすは大きな値を示し、細粒分を取り除くと大きく減少していることがわかる。秋穂砂は比較として用いたが、山口県吉敷郡秋穂町で採取した天然の海砂であり、石英、長石を主成分としたシリカ系の比較的堅固な粒子を持つ砂である。

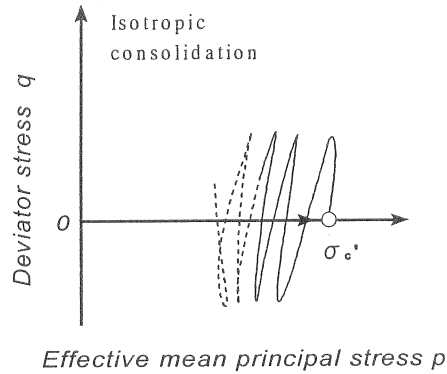
図-1 は原粒度のしらすと細粒分を取り除いたしらす及び秋穂砂の粒径加積曲線を示している。しらすは細

粒分を約 30% 含み、非常に粒度分布の良い砂である。また、細粒分を取り除くことにより秋穂砂とほぼ同様の粒度分布を示した。

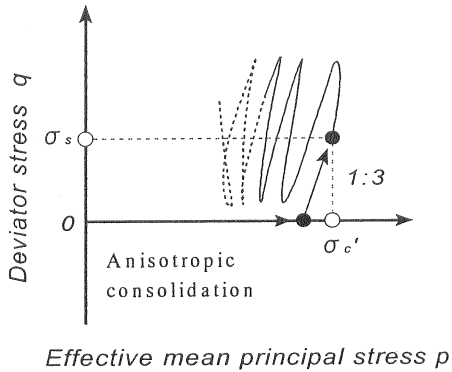
図-2 に相対密度 50% の等方圧縮試験より得られた e - $\log p$ 関係を示している。原粒度のしらすは、1MPa までは直線的に間隙比が減少しており、その後明確な折れ曲がり点を示し、急激に間隙比が減少していることがわかる。細粒分を取り除いたしらすは、初期の間隙比は大きいが応力の増加に伴い間隙比は大きく減少している様子が認められる。また、応力が増加するに伴い、しらすと細粒分を取り除いたしらすの間隙比が接近し、7MPa 付近以降では同一の線上をたどっている。粒子の堅固な秋穂砂は 2MPa 付近の高圧域に至るまで間隙比の減少はあまり見られないことより、常圧域においても圧縮性はほとんど見られないが、しらすは常圧域において間隙比の減少が著しいことより、圧縮性の大きい砂であることがわかる。これは、しらすの単粒子強度が、秋穂砂のそれに比べて小さいためと考えられる。

(2) 試験方法

試験に用いた供試体の作製方法は、しらすの細粒分の飛散を防止するために、空中落下漏斗法を採用し、空気乾燥した試料を漏斗により、できるだけ低い位置から落下させ、モールド側面を所定の回数で、打撃することにより



(a) 等方圧密

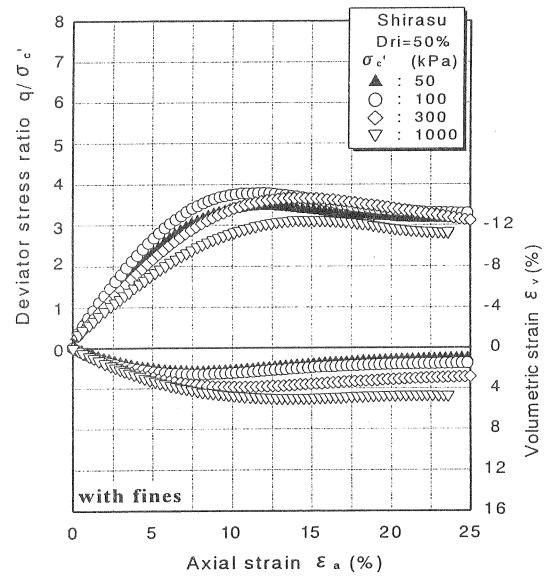


(b) 異方圧密

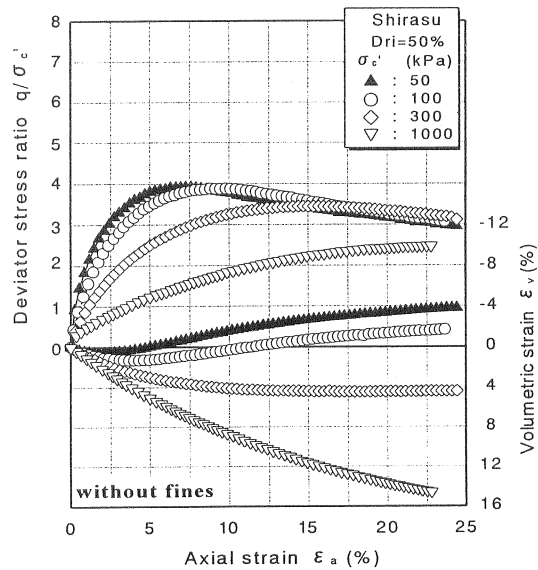
図-3 圧密経路の概念図

密度を調整するものである。供試体の寸法は、直径 50mm、高さ 100mm で、メンブレンの厚さは 0.2mm とした。供試体の密度は、水搬送工法により、緩く堆積した地盤を想定して、初期相対密度 $D_{ri} = 50\%$ とした。なお、本論文では、初期相対密度を基準に検討を行っているため、初期相対密度 D_{ri} を用いている。

圧密排水及び非排水三軸圧縮試験では、この供試体作製方法で、供試体を三軸セル内に設置し、炭酸ガス、脱気水を通した後に、200kPa の背圧を負荷し、飽和させ、間隙水圧係数 B 値が 0.96 以上の値を示したものののみ試験を実施した。図-3 (a), (b) にあるように等方圧密条件においては、所定の拘束圧 σ_c' まで等方圧密を行う。異方圧密条件においては、異方圧密後の平均有効主応力 σ_c' が所定の値になるように等方圧密した後に、排水状態で所定



(a) しらす



(b) しらす(細粒分カット)

図-4 軸差応力比-軸ひずみ-体積ひずみ

の初期せん断応力 σ_s に至るまで軸荷重を載荷させて異方圧密を行った。圧密終了後、排水条件に応じて排水状態を設定し、側圧一定のせん断試験を行った。軸力の載荷は軸ひずみ速度 0.1%/min のひずみ制御で行い、軸ひずみが 24% になった時点で載荷を終了した。また、圧密時の平均有効主応力は、地盤工学で経験する応力範囲 (0.1~数 MPa) を基に、 $\sigma_c' = 50, 100, 300, 1000 \text{ kPa}$ とした。初期せん断応力比についても同様な理由から想定される $\sigma_s / 2 \sigma_c' = 0, 0.2, 0.4$ とした。

非排水繰返し三軸試験は、供試体作製から圧密までは圧密排水及び非排水三軸圧縮試験と同様の手順で行い、圧密終了後、非排水状態にし、周波数 $f=0.1 \text{ Hz}$ の正弦波荷重を側圧一定・荷重振幅一定条件のもとで圧縮側から繰返し荷重を載荷した。試験の精度を向上させるために、波形の対称性を示す P_c/P_E を 5% 以内に、変動性 P_c+P_E を 10% 以内に納めた。ここで、 P_c および P_E は圧縮側、伸張側の荷重である。異方圧密条件では、初期せん断応力を基準とする圧縮側、伸張側の荷重である。実験が両振りまたは、片振りになることもあることから、試験の終了は、軸ひずみ両振幅 ε_{DA} もしくはピーク軸ひずみ ε_p のいずれかが 10% 以上生じた時点とした。

3. 実験結果

(1) 排水せん断強度に及ぼす細粒分の影響

図-4 (a), (b) にそれぞれ、原粒度と細粒分を取り除いたしらすの初期平均有効主応力で正規化された軸差応力-ひずみ関係を示す。図(a)より、いずれの拘束圧においても収縮一方の挙動を示すが、1000 kPa において有意な差が認められ、高拘束圧下での粒子破碎の影響が考えられる。細粒分を取り除いた図(b)において $\sigma_c' = 50, 100 \text{ kPa}$ では、図(a)と比べピーク強度は若干増加し、軸ひずみの発達が小さいところで発現している。しかし、拘束圧が増加し $\sigma_c' = 300 \text{ kPa}$ になると図(a)に比べ、ピーク強度は減少し、ピーク強度の発現までに、大きな軸ひずみの発達を必要とすることがわかる。また、 $\sigma_c' = 1000 \text{ kPa}$ においては、軸ひずみの発生が 22.5% の段階でも、ピーク強度の発現は認められない。一方、体積ひずみに着目すると、図(a)においては、すべての拘束圧で収縮挙動を示しているのに対し図(b)は、 $\sigma_c' = 50, 100 \text{ kPa}$ のような低拘束圧域では収縮から膨張挙動に転じているが、拘束圧が増加し $\sigma_c' = 300, 1000 \text{ kPa}$ になると収縮一方の挙動を示している。特に、 $\sigma_c' = 1000 \text{ kPa}$ において、収縮挙動が顕著になっている。以上のような結果が得られた理由として、細粒分を取り除くことにより、低拘束圧下では、角張った母粒子同士がかみ合うことで強度が増大したが、高拘束圧下では母粒子の角張り部分が破碎を起こし、強度が減少したためと考えられる。

図-5 (a), (b) に、 $\sigma_c' = 100, 1000 \text{ kPa}$ の拘束圧下においてしらすと秋穂砂の初期平均有効主応力で正規化され

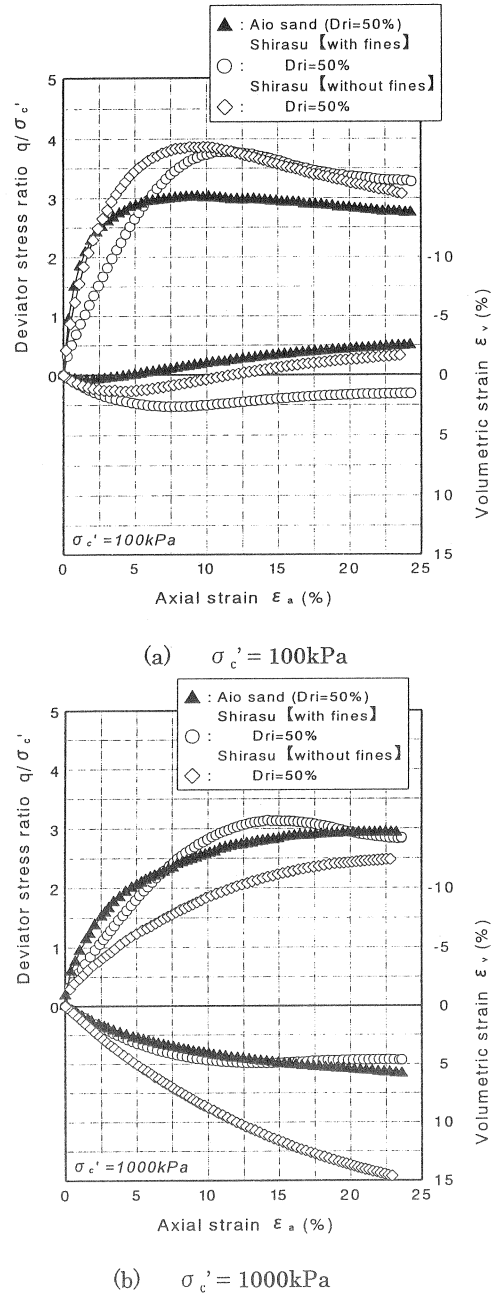


図-5 軸差応力比-軸ひずみ-体積ひずみ

た軸差応力-ひずみ関係を示す。 $\sigma_c' = 100 \text{ kPa}$ の条件下で図(a)において、初期平均有効主応力で正規化された軸差応力-軸ひずみ関係に着目すると、原粒度しらすはせん断初期における接線勾配から判断される剛性は低い、細粒分を除去することで、剛性は増加する傾向があり、ピーク強度も若干増加する結果となった。一方、粒度分布が細粒分を除去したしらすと類似している秋穂砂において、初期剛性は細粒分を除去したしらすと同程度であるが、ピーク強度については、秋穂砂のほうが小さい傾向を示した。体積ひずみと軸ひずみの関係において原粒度しらすは、収縮挙動を示した。これに対し、細粒分を除去したしらすは軸ひずみ 10% 付近まで収縮挙動であるが、それ以降、膨張挙動を示した。また、秋穂砂は軸ひずみの発生が初期の段階で収縮挙動から膨張挙動に転じている。次に、

しらすの静的・動的強度に及ぼす細粒分の影響

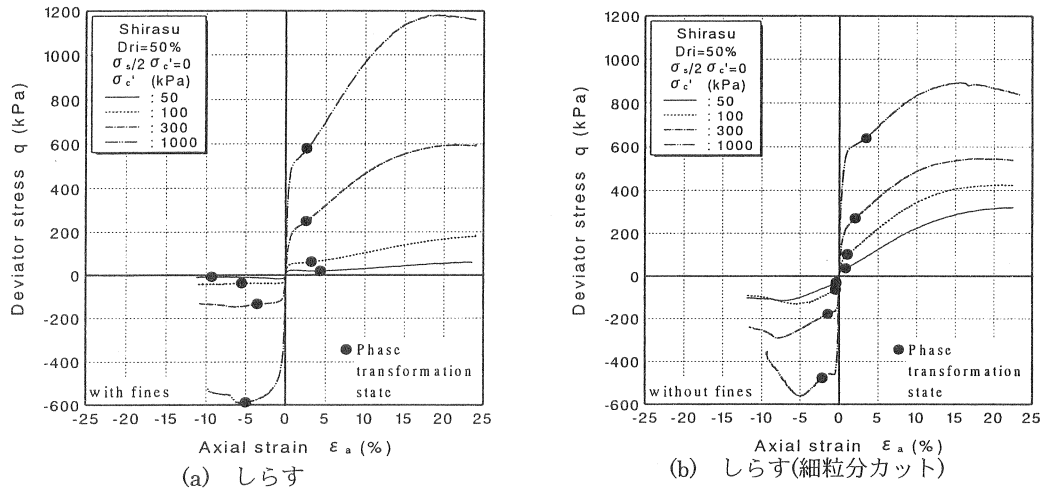


図-6 軸差応力-軸ひずみ関係

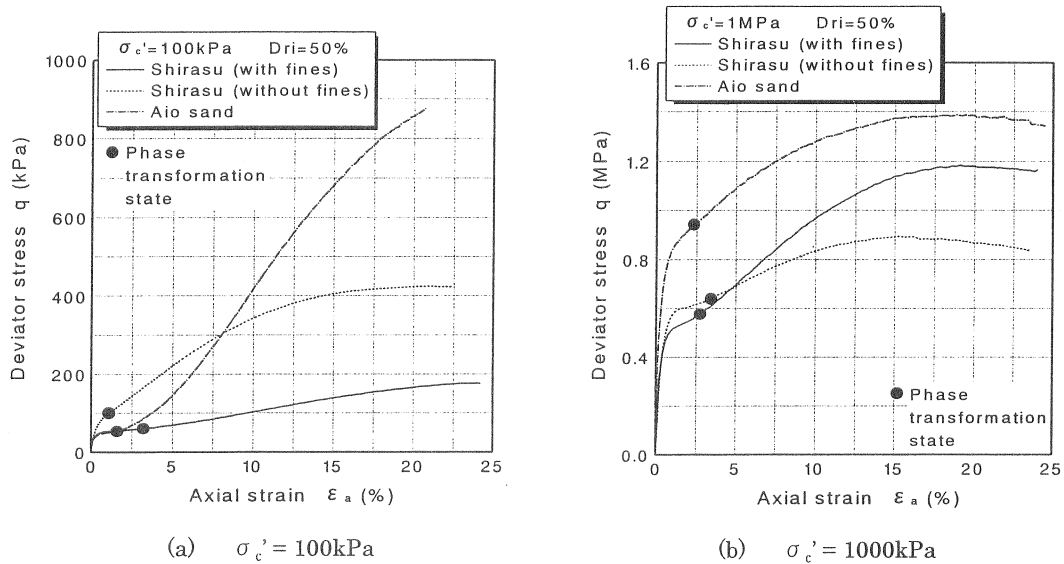


図-7 軸差応力-軸ひずみ関係

図(b)の $\sigma'_c = 1000 \text{ kPa}$ において、軸差応力比-軸ひずみ関係に着目すると、原粒度のしらすは細粒分を除去したしらすと比較し、初期のせん断剛性は強く発揮されている。細粒分を除去したしらすはピーク強度を示さない結果となった。秋穂砂の初期剛性はしらすと比較して、高い結果を示したが、軸ひずみ 22.5%発生するまでの間では、ピーク強度は現れていない。体積ひずみでは、すべての試料において収縮挙動を示しており、特に細粒分を除去したしらすが最も強い収縮性を示した。このように、同じ相対密度において排水せん断挙動は、粒子形状・細粒分の有無・粒子の脆弱さの違いにより、大きく異なる結果を示した。以上のような結果が得られる理由として以下のことが考えられる。しらすと秋穂砂との挙動の違いは、各々の粒子形状、粒子の強さが異なることによるものと考えられる。高拘束圧の試験結果では、原粒度と比べると細粒分を除去した場合、粗粒子同士の接触により粗粒子の角がかかるように破碎し、その粗粒子の小片が間隙を埋めたために収縮挙動がより顕著に表れたと考えられる。

(2) 非排水せん断強度に及ぼす細粒分の影響

図-6(a), (b)に、それぞれ, $D_{ri} = 50\%$ のしらすと細粒分を取り除いたしらすの、軸差応力-軸ひずみ関係を示す。また、どの程度のひずみでダイレイタンスー変化が生じるかを調べる目的で変相点の位置を図中に黒丸で示す。細粒分を除去した図(b)では、低拘束圧において図(a)と異なり、軸ひずみがほとんど発生しない状態で変相点を迎えている。圧縮側において $\sigma'_c = 50, 100 \text{ kPa}$ では、図(b)のほうがピーク強度は高く発生しているが、拘束圧が増加し $\sigma'_c = 300, 1000 \text{ kPa}$ に増加すると、逆に図(a)のほうがピーク強度は高く発生している。一方、伸張側においては図(b)では、変相点以降、軸差応力が増加傾向を示している。

以上のような結果が得られる理由として、低拘束圧域では細粒分を除去することで粗粒子同士のかみ合いにより、原粒度と比較して強度は増加するが、拘束圧が増加すると粗粒子の角張りが破碎し、それらが粗粒子の間隙を

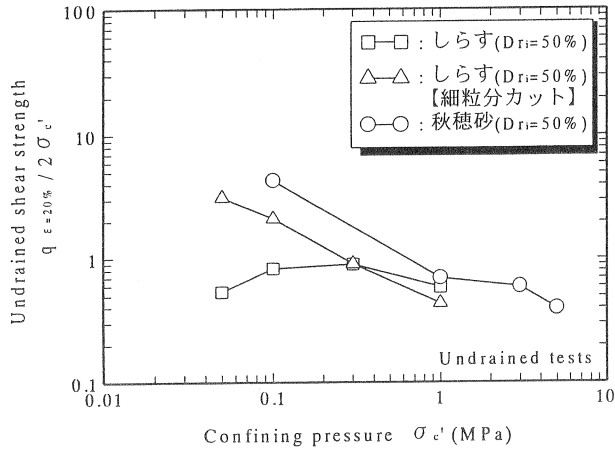


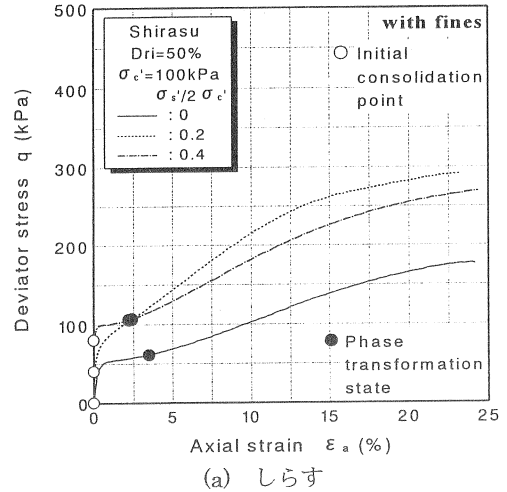
図-8 軸ひずみ 20%時における拘束圧で正規化した静的せん断強度比と初期有効拘束圧の関係

埋めるためにインターロッキングの効果が低減し、原粒度と比較して強度は減少したと考えられる。一方、原粒度しらすは低拘束圧では、細粒分が粗粒子を取り囲むため、粗粒子同士の接触点が少なく強度は発現しにくい。拘束圧が増加すると粗粒子を取り囲む細粒子は、粗粒子と比べ粒子同士の接触点が少なく応力が集中することにより、粒子破碎し、細粒子で形成された構造が収縮され、粗粒子の接触点が増し、強度を発現しやすい構造に至ったと考えられる。そして、その結果、高拘束圧域では原粒度しらすのほうが強度が高い結果になったと考えられる。

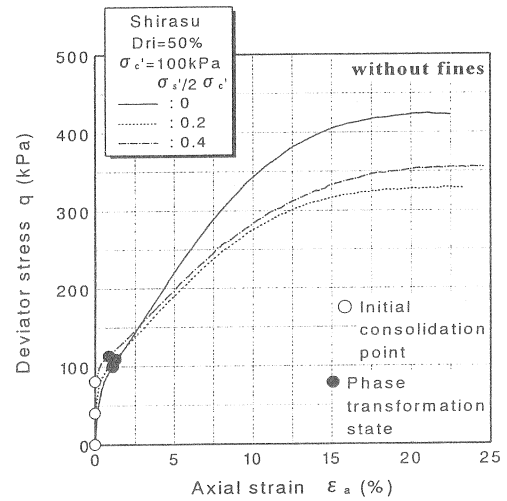
図-7(a), (b)に $\sigma'_c = 100, 1000$ kPaの拘束圧下においてしらすと秋穂砂の非排水単調せん断における軸差応力-軸ひずみ関係を示す。図(a)において原粒度と細粒分を除去したしらすは共に変相点以降、硬化挙動を示した後時間的に軸差応力が変化しない定常状態に至っている。秋穂砂は変相点以降、非常に強い硬化挙動を示した。拘束圧が増加した図(b)では、しらす、秋穂砂ともに変相点以降、硬化挙動を示した後定常状態に至っている。いずれの拘束圧においても秋穂砂が最も大きな強度を発揮した。

図-8にしらすと秋穂砂の軸ひずみ 20%時における強度を拘束圧で正規化した静的せん断強度比と初期有効拘束圧の関係を示す。原粒度しらすのみ拘束圧の増加に伴いせん断強度比がいったん増加し、その後減少するという特異性を示しているのに対し、他の条件の試料は拘束圧の増加に伴い単調にせん断強度比は減少一方の傾向を示している。細粒分を除去するとしらすは、低拘束圧域ではせん断強度比は原粒度しらすより大きな値を示しているが、 $\sigma'_c = 300$ kPaを超えたあたりで強度は逆転している。秋穂砂は、どの拘束圧においても原粒度、細粒分を除去したしらすより、高い強度比を示している。

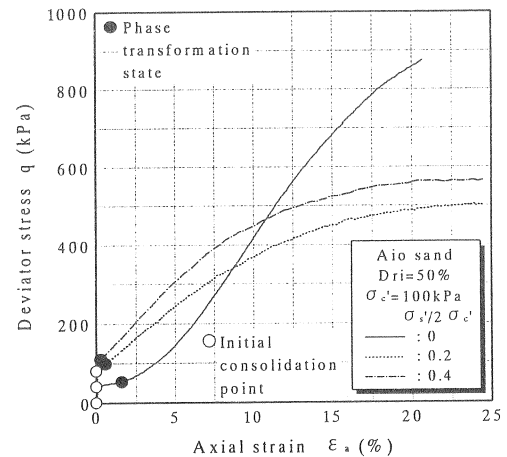
図-9(a)~(c)に初期せん断応力下における $\sigma'_c = 100$ kPaの軸差応力-軸ひずみ関係について検討する。図(a)の原粒度しらすでは、すべての初期せん断応力比において変相点を示し単調にひずみ硬化傾向を示した後、定常状態に至っている。また、初期せん断応力比 0.4 でやや



(a) しらす



(b) しらす(細粒分カット)



(c) 秋穂砂

図-9 軸差応力-軸ひずみ関係($\sigma'_c = 100$ kPa)

減少しているものの初期せん断応力が載荷されると初期せん断応力比 0 よりせん断強度は大きく発揮されている。図(b)の細粒分を除去したしらすは、すべての初期せん断応力比において、ひずみは単調に硬化傾向を示した後、定常状態を示している。また、初期せん断応力が載荷

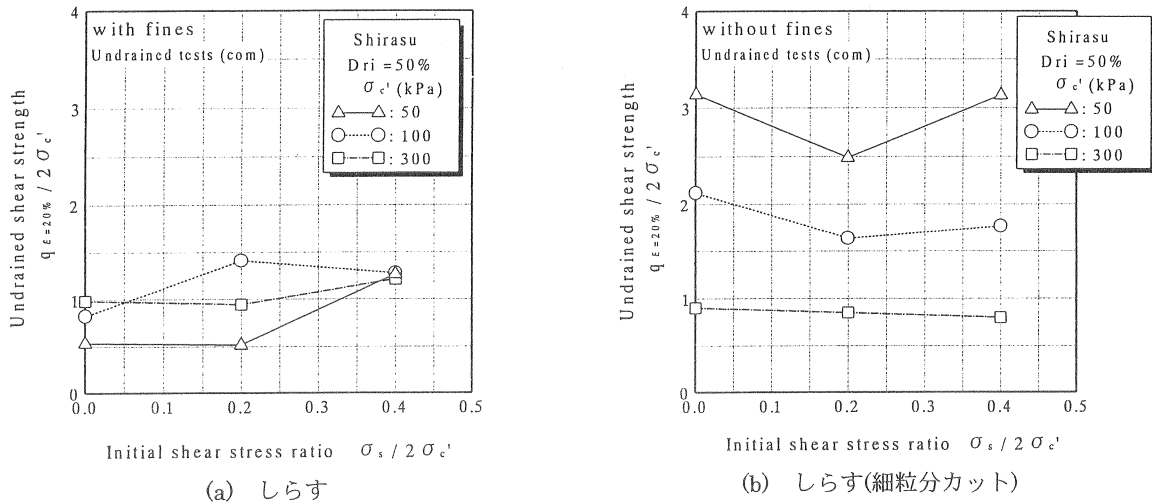


図-10 軸ひずみ 20%時における拘束圧で正規化した静的せん断強度比と初期せん断応力比の関係

されると図(a)とは逆にせん断強度は低減している. 図(a), (b)におけるせん断強度を比較すると, 細粒分を除去したほうが全体的に強度が強く発揮されている. 次に比較として用いた図(c)の秋穂砂について述べる. 等方応力状態では, 変相点をむかえるまで, ひずみ硬化傾向は顕著には現れないが, その後急激なひずみ硬化傾向を示している. $\sigma_s / 2\sigma'_c = 0.2, 0.4$ の時, 等方応力状態と比較して緩やかにひずみ硬化傾向を示した後, 定常状態に至っている. また, せん断強度についてはしらすと比較し, 秋穂砂はいずれの初期せん断応力比においても大きく発揮されている. 図(a)~(c)の比較は, 細粒分の有無, 粒子形状の違い, 単粒子強度の違いとして対応づけられる.

図-10(a), (b)にそれぞれ $D_{ri} = 50\%$ の原粒度しらすと細粒分を除去したしらすの軸ひずみが 20%発生した時の強度を拘束圧で正規化した静的せん断強度比と初期せん断応力比の関係を示す. 図(a)では, $\sigma'_c = 50$ kPaにおいて初期せん断応力が加わるにより, せん断強度比は増加している. また, 拘束圧の増加に伴う強度比の変化は図(b)に比べあまり見られない. 一方図(b)では, $\sigma'_c = 50, 100$ kPaにおいては, 強度比が $\sigma_s / 2\sigma'_c = 0.2$ で一度減少し $\sigma_s / 2\sigma'_c = 0.4$ で回復しているが, $\sigma'_c = 300$ kPaになると拘束圧の増加に伴い初期せん断応力比が増加するとせん断強度比は減少している. また, 拘束圧の増加に伴うせん断強度比は, 大きく減少している. $\sigma'_c = 50$ kPaでは, 細粒分を除去したしらすのほうが強度比は大きい. $\sigma'_c = 300$ kPaになると原粒度しらすのほうが若干, 大きい強度比を示した. 軸ひずみが 20%発生した時の静的せん断強度がこのような理由として以下のように推察される. 原粒度しらすは, 初期せん断応力の増加に伴い平均有効主応力による等方的に圧縮されるだけでなく, ダイレクタンシーによる変形も生じるため, 細粒子が間隙を埋め, 安定した構造へと推移したため, せん断強度は増加傾向を示した. 一方, 細粒分を除去したしらすは, 初期せん断応力または拘束圧の増加に伴い粒子の接触点が

破碎し, インターロッキング効果が低減したため, せん断強度は減少傾向を示したものと考えられる.

(3) 繰返しせん断強度に及ぼす細粒分の影響

軸ひずみ両振幅 ϵ_{DA} あるいはピーク軸ひずみ ϵ_p が 5%になる時を破壊と定義し, 等方状態における $D_{ri} = 50\%$ の原粒度, 細粒分を除去したしらすについて破壊に至るに必要な繰返し応力比と繰返し回数と関係である液状化強度曲線を図-11(a), (b)にそれぞれ示す. 図(a)では, 拘束圧の増加に伴い繰返しせん断強度は増加している. また, 少ない繰返し回数では, 拘束圧の増加に伴いやや立ち上がった曲線性状をしている. 細粒分を取り除いた図(b)は, 繰返し回数が 8 回以上では拘束圧の増加に伴い繰返しせん断強度も増加している. しかし, 繰返し回数 8 回以下では $\sigma'_c = 300$ kPa において強度が $\sigma'_c = 50, 100$ kPa よりも減少に転じている. また, $\sigma'_c = 300$ kPa の液状化強度曲線は勾配の緩い曲線を示している. これは, 細粒分を除去すると低拘束圧では, 粗粒子のかみ合いによりインターロッキング効果が発揮され, せん断強度は原粒度しらすより強く発揮される. しかし, $\sigma'_c = 300$ kPa になると粒子の接触部において破碎が生じ始めたためと考えられる.

図-12(a), (b)に初期せん断応力下における $\sigma'_c = 100$ kPa の原粒度と細粒分を取り除いたしらすの液状化強度曲線をそれぞれに示す. 原粒度のしらすでは初期せん断応力の増加に伴う強度変化はほとんどみられない. 細粒分を除去したしらすでは初期せん断応力比が 0.0, 0.2 では強度変化がほとんどみられないのに対し, 0.4 では強度の増加が認められる. また, 細粒分を除去したしらすは, 原粒度のしらすと比較して強度が大きい. これは, 細粒分を除去することで粗粒子同士の接触が多くなり, さらに初期せん断応力の増加に伴いより粒子がかみ合ったためと推察される.

図-13(a), (b)に繰返し回数 20 回で軸ひずみ両振幅ま

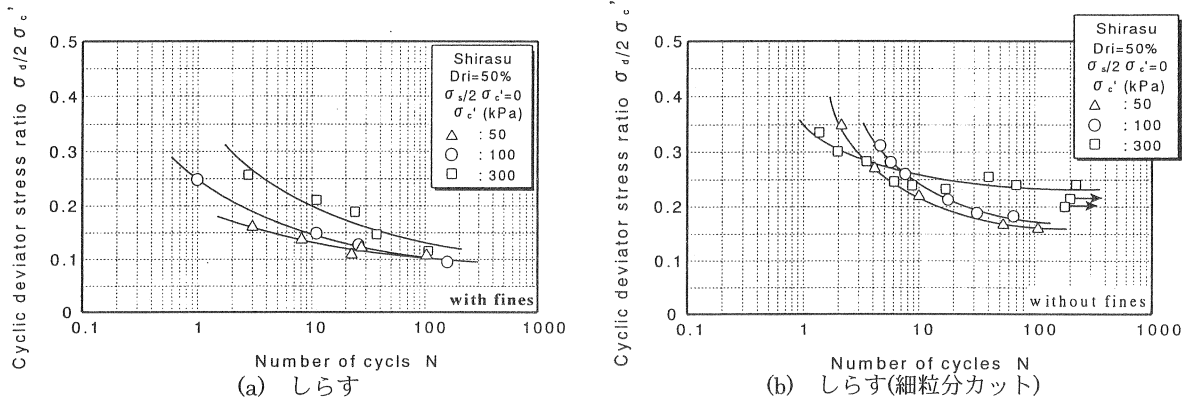


図-11 $\epsilon_{DA}=5\%$ または $\epsilon_p=5\%$ に至るに必要な応力比と繰返し回数の関係(等方圧密)

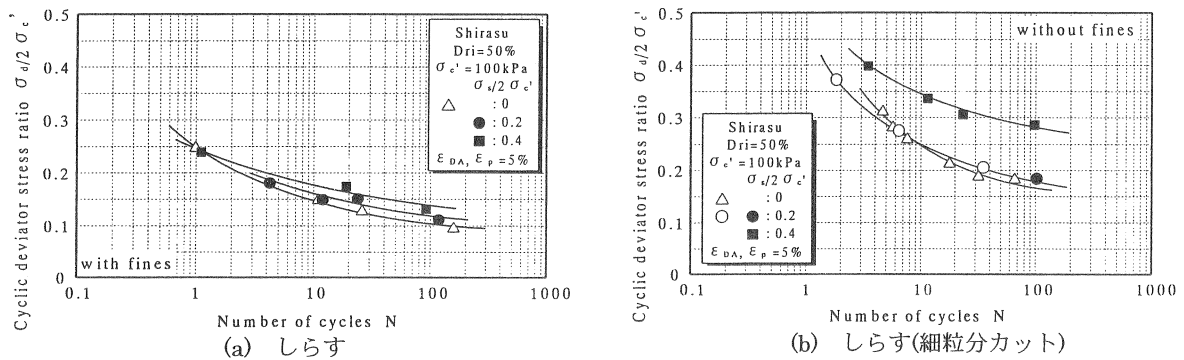


図-12 $\epsilon_{DA}=5\%$ または $\epsilon_p=5\%$ に至るに必要な応力比と繰返し回数の関係(初期せん断)

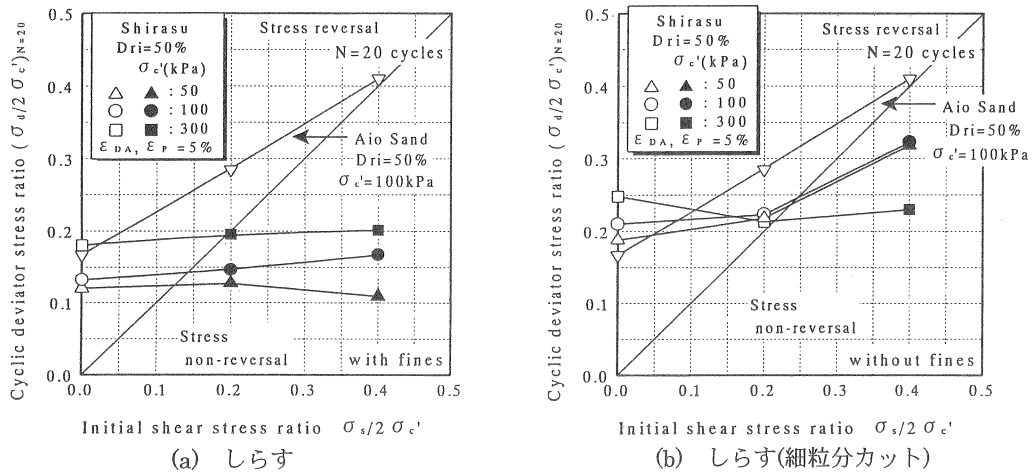


図-13 繰返し回数 20 回で $\epsilon_{DA}=5\%$ または $\epsilon_p=5\%$ に至るに必要な応力比と初期せん断応力比の関係

たはピーク軸ひずみ 5%を生じるに必要な繰返し応力比と初期せん断応力比の関係を原粒度および細粒分を除去したしらすについてそれぞれ示した。なお、図中に比較として $\sigma'_c = 100$ kPaの秋穂砂についても示した。図(a)の原粒度しらすでは、いずれの拘束圧においても初期せん断応力比の増加に伴うせん断強度の増減が認められない。また、伸張側への応力反転が無い領域においても破壊に至っているのが分かる。さらに、拘束圧の増加に伴いせん断強度は増加の傾向を示している。一方、細粒分を除去した図(b)では、 $\sigma'_c = 50, 100$ kPaにおいて初期せん断応力比の増加に伴いせん断強度は増加したが、 $\sigma'_c = 300$ kPaでは逆にせん断強度は減少した。これは、細粒分を除去

し、300kPaの拘束圧においては、初期せん断応力の増加に伴い、母粒子同士の接触点が破碎したためと考えられる。一方、秋穂砂では、初期せん断応力比の増加に伴いせん断強度は増加し、すべて応力反転を伴い破壊に至った。

4. しらすの細粒分および粗粒子の構造に関する考察

以上の実験結果を踏まえ、せん断中の粒子の様子を概念図を用い、以下に示す。図-14は緩詰め状態の原粒度しらすと細粒分を除去したしらすの圧密前の初期状態からせん断試験後までの粒子の破碎状態を模式的に表したものである。圧密開始前の(1)では、原粒度しらすは非常に緩

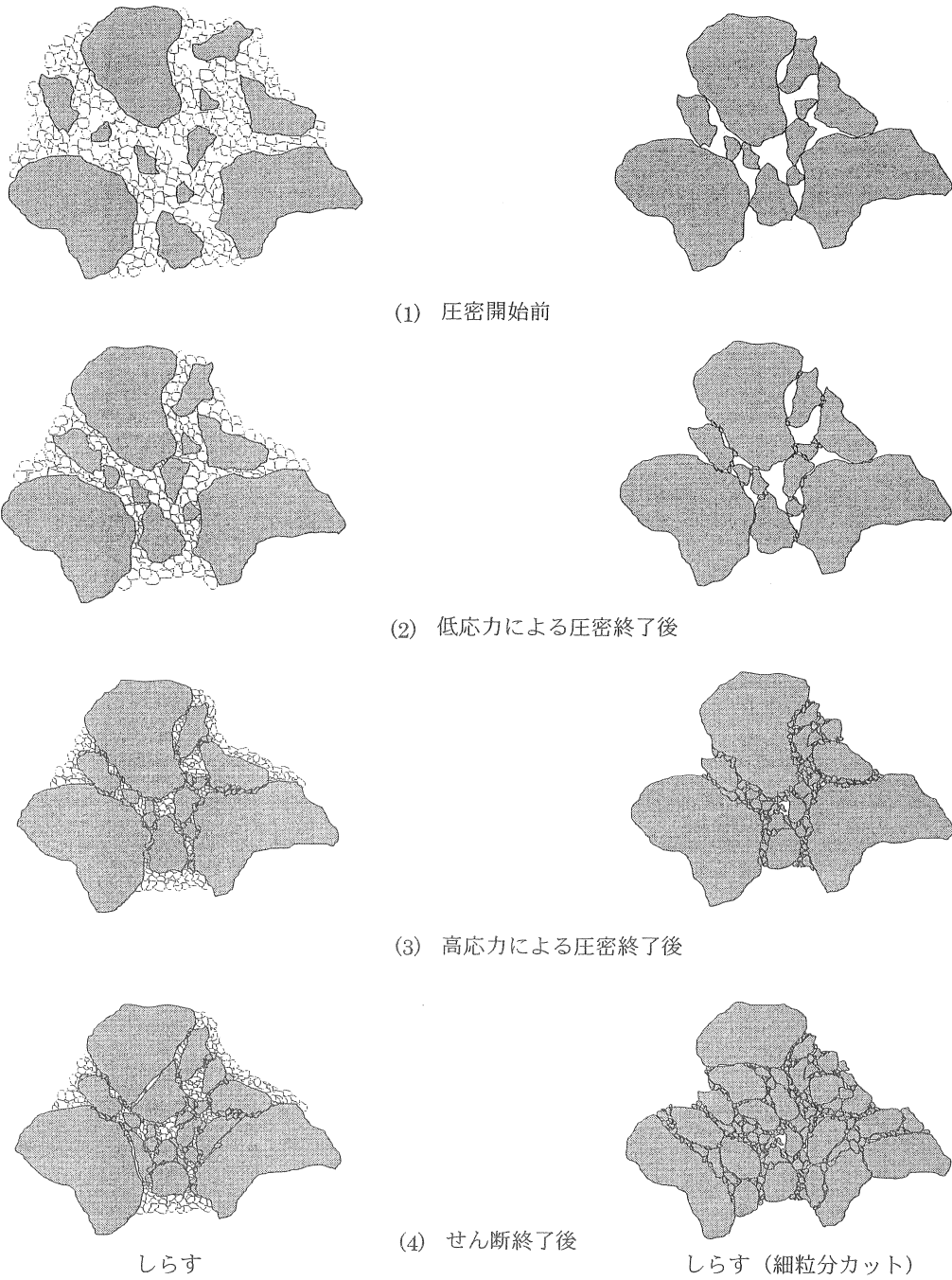


図-14 せん断による粒子構造の予想図

い構造をしており、粗粒子同士の接触は見られず、細粒子によってマトリックスが作られている。一方、細粒分を除去したしらすでは、角張った粗粒子同士が接触しあう構造を示している。次に、低い拘束圧をかけた(2)の状態では、原粒度しらすは粗粒子同士の接触はほとんどなく、初期の間隙が細粒分によって埋められただけであり、いまだ細粒子によってマトリックスが形成され緩い構造を示している。一方、細粒分を除去したしらすでは、角張った粗粒子同士のインターロッキング効果が顕著に現れている。次に、高い拘束圧をかけた(3)の状態では、原粒度しらすは試験前後の粒度分布から、 $72\mu\text{m}$ 以下の細粒子が多く破碎していることにより、細粒子に応力が集中し、粗粒子が

より多くの接触点を持ったことでより安定な構造へと推移したと考えられる。一方、細粒分を除去したしらすでは、試験前後の粒度分布から、 $420\mu\text{m}$ の破碎が多くみられることより、粗粒子表面の角張りや粗粒子が破碎していくことにより、インターロッキング効果が低減し、不安定な構造へと推移したと考えられる。最後に、その状態でせん断をした後の(4)の状態では、原粒度しらすは細粒子に応力が集中し、細粒子がより多く破碎する。また、細粒子が粗粒子にまわりついているため粗粒子自体はさほど破碎することなく、インターロッキング効果が顕著になる。一方、細粒分を除去したしらすは、粗粒子の粒子表面だけでなく、それ自体も破碎し、比較的大きい粒径の粒子が小さい

粒径へと推移したと考えられる。

これより、粒子構造が強度に与えた影響を以下に述べる。図-14、(2)に示すような低い拘束圧で圧密した後、せん断を行うと、原粒度しらすは粗粒子がほとんど接触していないため強度はそれほど発揮されない。しかし、細粒分を除去したしらすでは、粗粒子同士が接触し粒子表面の形状によりインターロッキング効果が顕著に現れ、せん断強度は原粒度しらすより大きく発揮されると思われる。一方、拘束圧が増加されて、せん断を行った(4)では、原粒度しらすは粗粒子の接触点が増え安定な構造に落ち着くことにより、インターロッキング効果が顕著に現れ、低拘束圧状態よりも強度は大きく発揮されると思われる。しかし、細粒分を除去したしらすでは、粗粒子表面の角張りや粒子自体が破碎したことによりインターロッキング効果がほとんど期待できないため、低拘束圧状態よりも強度が減少したと推察される。

5. まとめ

本研究では、しらすは水搬送工法により、緩く埋立てられた地盤が多く存在している。そこで、 $D_{r1} = 50\%$ の原粒度と細粒分を取り除いたしらすに対して排水、非排水単調せん断試験及び非排水繰返し三軸試験を実施し、静的及び動的強度に及ぼす細粒分の影響を調べた。本研究より得られた主要な結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 静的強度において、細粒分を取り除くことにより、低拘束圧下では、角張った母粒子同士がかみ合うことで強度が増大したが、高拘束圧下では母粒子の角張りが破碎を起こし、粒子同士がかみ合いにくい形状に変化することにより、強度が減少した。

初期せん断応力作用下において、しらすの細粒分は、母粒子の周りに付着し、母粒子を保護する役目を果たしたために、初期せん断応力が作用すると強度が発揮されたが、細粒分を取り除くと逆に強度は減少した。

- 2) 動的強度において、しらすの細粒分を取り除くと強度が発揮された。実際には水搬送工法によって細粒分を含んだまま緩く埋立てられているが、細粒分が強度を弱めている一要因と考えられる。

初期せん断応力下において、しらすの細粒分は、強度にほとんど影響を及ぼさなかった。細粒分を除去すると、 $\sigma_c' = 50, 100 \text{ kPa}$ の拘束圧下においては、初期せん断応力の増加に伴いせん断強度は増加したが、 $\sigma_c' = 300 \text{ kPa}$ の拘束圧下では、逆にせん断強度は減少した。

参考文献

- 1) 北村良介：破碎性土の力学特性と破碎性地盤の工学的諸問題，土と基礎，Vol.48, No.10, pp.3~6, 2000.

- 2) 黄大振・柳沢栄司・菅野高弘：シルトを含む砂のせん断特性について，土木学会論文集，No.463/Ⅲ-22, pp.25~33, 1993.
- 3) 佐藤正行・小田匡寛・風間秀彦・小瀬木克己：細粒分が埋立地盤の液状化特性に及ぼす影響に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.561/Ⅲ-38, pp.271~282, 1997.
- 4) 足立雅樹・安原一哉：細粒分を含む砂質土の液状化特性(2)一過圧密比および細粒分の種類の検討，土木学会第50回年次学術講演会講演概要集/Ⅲ, pp.500~501, 1995.
- 5) 桑野二郎・飯村博忠・中沢博志・杉原弘一：カオリンを含む砂の液状化強度，土木学会第50回年次学術講演会講演概要集/Ⅲ, pp.506~507, 1995.
- 6) 古関潤一・石原研而・藤井光久：細粒分を含む砂の三軸液状化試験，第21回土質工学研究発表会講演集，pp.595~596, 1986.
- 7) 小瀬木克己・佐藤正行・小田匡寛・風間秀彦：埋立地盤の液状化特性に及ぼす細粒分の影響(その2)，第31回地盤工学研究発表会，pp.487~488, 1996.
- 8) 大嶺聖：中間土の圧縮及び強度特性に関する基礎的研究，九州大学学位論文，1992.
- 9) McDowell, G.R., Bolton, M.D. and Robertson, D.: The fractal crushing of granular materials, Journal of Mech. Phys. Solids, pp.2079~2102, 1996.
- 10) 兵動正幸：破碎性地盤の工学的性質，土と基礎，Vol.49, No.3, pp.4~7, 2001.
- 11) 石原研而・菊地喜昭・堤康一：低拘束圧における砂の変形挙動，第18回土質工学研究発表会講演集，pp.353~354, 1983.
- 12) 石原研而・柚木祐二・関元治・米田吉博：密な砂の三軸せん断挙動に与える初期有効拘束圧の影響，第17回土質工学研究発表会講演集，pp.1649~1652, 1982.
- 13) 岡林巧・兵動正幸・安福規之・村田秀一：乱した一次しらすの非排水単調および繰返しせん断挙動，土木学会論文集，499/Ⅲ-28, pp.97~106, 1994.
- 14) 中田幸男・兵動正幸・村田秀一：粒子破碎を伴う拘束圧における砂質土の非排水せん断挙動，第32回地盤工学研究発表会，pp.33~34, 1997.
- 15) 荒牧憲隆・廣瀬裕一・村田重之・兵動正幸・岡林巧：粒度調整したしらすの力学特性および粒子破碎の評価，土木学会第54回年次学術講演会，pp.718~719, 1999.
- 16) 山内豊聡監修：九州・沖縄の特殊土-しらす，九州大学出版会，pp.145~169, 1983.