

初期せん断応力を受ける 細粒分含有砂の液状化特性 — 繰返し・単調載荷ねじりせん断試験による検討 —

日下 拓哉¹・國生 剛治²・新井 良太郎³

^{1,3}非会員 中央大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

¹E-mail: t-kusaka@hotmail.co.jp

²正会員 中央大学教授 理工学部都市環境学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

E-mail: kokusho@civil.chuo-u.ac.jp

斜面や構造物近傍などの地盤の液状化において、初期せん断応力の影響は重要である。本研究は、中空ねじりせん断試験機により初期せん断応力を水平面または45°傾いた面に排水条件で加え相対密度30～50%で非塑性細粒分を0～30%混ぜた砂の液状化試験を行った。その結果、液状化破壊を4種類（水平地盤での繰返し破壊CF、初期せん断応力比 α が小さい範囲での繰返し破壊CBF、 α が大きな範囲での延性的破壊BGFと脆性的破壊BSF）に分類できることを示した。特に非塑性細粒分を含む緩い砂では、繰返しせん断による水圧上昇の途中で初期せん断応力によりひずみが急増する脆性的破壊BSFの重要性を指摘した。そして、初期せん断応力下での体積圧縮性の違いから脆性的破壊と延性的破壊に分かれるメカニズムを非排水単調せん断試験との比較より明らかにした。

Key Words : *liquefaction, initial shear stress, relative density, fines content, hollow cylindrical torsional shear test*

1. はじめに

従来、液状化に関する研究の多くは水平地盤を想定して行われてきた。K₀状態で異方圧密された水平地盤は初期にはせん断応力が存在するが、液状化とともに消滅し等方状態に移行する。それに対し、斜面や盛土、構造物近傍の基礎地盤には、液状化した後も自重によるせん断応力が持続的に加わり続ける。このような地盤では、水平地盤の単純なK₀圧密応力下での液状化被害とは異なり、地震の繰返しせん断による直接的影響よりは、斜面や盛土、構造物の自重による一方向への過大なせん断変形が被害を引き起こすと言えよう。このように、初期せん断応力を受けている地盤に対する液状化の研究が重要であるにもかかわらず、従来の大半の研究では取り扱いの容易な水平地盤が対象とされてきた。

初期せん断応力を考慮した初期の研究としては構造物基礎近傍地盤の応力状態をリングせん断試験機で模擬したYoshimi and Oh-okaの研究¹⁾が挙げられ、初期せん断応力と繰返し応力振幅の大小関係により繰返しせん断が応力反転を起こすか否かで液状化し易さが大きく異なることを指摘した。また、Vaidら^{2,3)}の三軸試験機を用いた

研究により、初期せん断応力は砂の相対密度が大きい場合には強度増加の作用をし、相対密度が低い場合には強度低下の作用をすることが示された。さらにVaid and Chem⁴⁾、Hyodoら⁵⁾は相対密度の小さな砂について初期せん断応力下での非排水繰返し三軸試験を行い、圧縮・伸張での単調載荷試験との対比により、砂が流動破壊を生じる条件を検討している。

ところで、液状化研究の多くで三軸試験機が用いられてきたが、その問題点としては、圧縮側と伸張側で応力状態が対称的でなく、伸張側で破壊しやすいことが挙げられる。特に、初期せん断応力を加える試験ではその方向が液状化強度に大きく影響する可能性がある。実際に吉嶺・西田⁶⁾の研究によると、圧縮側に初期せん断がある場合には液状化強度が大きくなり、伸張側に初期せん断がある場合には液状化強度が小さくなるといった結果が得られている。

このような問題を回避し、初期せん断応力を考慮した液状化の研究に適した試験装置に中空ねじりせん断試験機がある。また、この試験機は三軸試験機と比べて応力状態再現の自由度も大きく、異方応力状態にある土要素の力学試験に適している。

中空ねじりせん断試験機を用いて初期せん断応力を考慮した既往の研究の一例としては、密な砂地盤を対象とした國生・加藤の研究⁷⁾があげられる。これによると、初期せん断応力を負荷するほど、密な砂の体積膨張傾向により液状化強度は明らかに増加している。一方、極めて緩い砂や細粒分を含んだ緩い砂はせん断時に体積収縮性が表れやすく⁸⁾、初期せん断応力が液状化強度を低下させる可能性が考えられるが、これらの砂を対象とし、中空ねじりせん断試験機で初期せん断応力の影響を調べた研究は筆者らの調べた範囲では極めてまれである。とくに近年 2011 年東北地方太平洋沖地震のように、細粒分を多く含んだ砂地盤の液状化事例が増加しており、このような研究の重要性は増している。

本研究では、初期せん断応力を考慮した液状化研究の必要性と問題点を受け、相対密度が 50% 以下の緩い細粒分含有砂の液状化特性や破壊形態に与える影響を中空ねじりせん断試験機により調べた。その際、初期せん断応力 τ_s を与える面を 2 種類選び、 τ_s の大きさをゼロから段階的に変化させて非排水繰返しせん断試験を行った。また、地震時に対応した非排水繰返しせん断試験での破壊メカニズムを理解するためにいくつかの条件で非排水単調せん断試験も行い、両者の対比も行った。

2. 試験試料, 実験方法

試料は千葉県の埋立地で採取した富津砂を用いたが、最近の地震による液状化が非塑性、低塑性細粒分を多く含む砂地盤で起きていることを考慮し、これに非塑性 (NP) な細粒分として石粉を加えた。表-1 に試料の物理特性、図-1 に試料の粒径加積曲線を示す。試料の細粒分含有率は $F_c=0\sim 30\%$ である。JIS 規格に準じた砂の最小密度、最大密度試験⁹⁾では $F_c=5\%$ を適用上限としているが、今回はこの試験法をこの上限を超えて適用した。

試験装置は供試体内径 60 mm, 外径 100 mm, 高さ 100 mm の空圧制御式中空ねじりせん断試験機である。ウェットタンピング法 (WT 法) により所定の相対密度となるように作成した供試体を通水・飽和させ B 値が 0.95 以上であることを確認した後、有効拘束圧 $\sigma'_c \approx 98$ kPa, 背圧 196 kPa で等方圧密する。等方圧密終了が確認された後、供試体に排水条件で初期せん断応力を加えて過剰間隙水圧が消散するまで約 1~2 時間放置する。非排水繰返しせん断試験では、応力制御にて一定振幅 τ_a の繰返しせん断応力を周波数 0.1 Hz の正弦波で加える。一方、非排水単調せん断試験ではひずみ制御により、せん断ひずみ速度 0.5%/min 以下にて行う。

表-1 試料の物理特性

F_c (%)	ρ_s (g/cm ³)	ρ_{dmax} (g/cm ³)	ρ_{dmin} (g/cm ³)	e_{max}	e_{min}
0	2.741	1.632	1.316	1.083	0.680
10	2.742	1.777	1.302	1.106	0.543
20	2.739	1.886	1.261	1.172	0.452
30	2.729	1.902	1.171	1.330	0.435

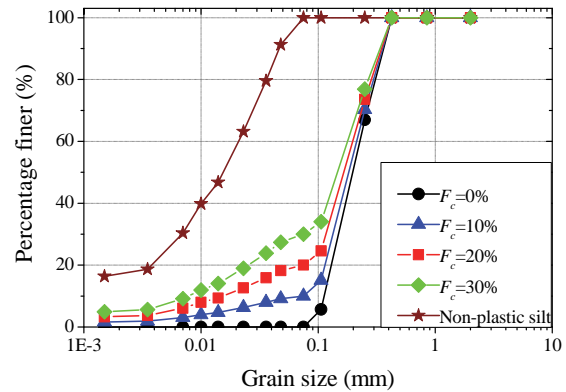


図-1 試料の粒径加積曲線

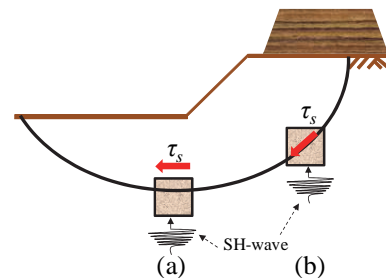


図-2 構造物・斜面の直下や近傍の応力状態

表-2 異なる初期せん断面の比較表

Initial shear plain: θ_0	0°	45°
Stress condition		
Initial shear stress ratio : $\alpha = \frac{\tau_s}{\sigma'_h}$	$\frac{\tau_s}{\sigma'_c}$	$\frac{\sigma'_{vc} - \sigma'_{hc}}{2\sigma'_h}$

3. 初期せん断応力と試験条件

この研究では構造物や斜面等の自重による初期せん断応力の影響に着目している。初期に最大せん断応力 τ_a が加わる面のことを初期せん断面と呼ぶことにし、供試体水平面との角度を θ_0 で表す。構造物・斜面の直下や近傍の地盤が地震時に受ける応力状態は多岐にわたり複雑であるが、それらを図-2 のように 2 種類に単純化して考えることとする。一つは、図-2(a) に示すように構造物の自重によるせん断応力 τ_s がほぼ水平面 ($\theta_0=0^\circ$) に加わっている状態で、同じ水平面に地震時の SH 波による繰返

せん断応力 τ_0 が作用するパターンである。もう一つは図-2(b)のように構造物のごく近傍において、構造物の鉛直荷重により最大せん断応力 τ_0 が水平面からほぼ 45° に傾いた面 ($\theta_0=45^\circ$) に加わった状態で水平面に τ_0 が作用するパターンである。これら2種類の異なる初期せん断面について初期せん断応力が及ぼす影響を調べる。

すなわち、表-2のように $\sigma'_c=98$ kPaにより等方圧密した供試体の水平面に初期せん断応力を作用させる条件 ($\theta_0=0^\circ$) と、軸応力 σ'_c と側方応力 σ'_{hc} を変えて平均有効主応力 $\sigma'_m=(\sigma'_c+2\sigma'_{hc})/3=98$ kPa で異方圧密し水平面から 45° 傾いた面に初期せん断応力 $\tau_0=(\sigma'_c-\sigma'_{hc})/2$ を作用させる条件 ($\theta_0=45^\circ$) を考える。ここで、初期せん断面に加える有効直応力と初期せん断応力の比を初期せん断応力比 α と定義する。 $\theta_0=0^\circ$ の場合は、 $\alpha=\tau_0/\sigma'_c$ であり、 $\theta_0=45^\circ$ の場合では 45° 傾いた面上での有効直応力 $\sigma'_m=(\sigma'_c+\sigma'_{hc})/2$ と初期せん断応力 τ_0 との比として $\alpha=\tau_0/\sigma'_m$ となる。

表-3は試験条件の一覧である。 $\theta_0=0^\circ$, $\theta_0=45^\circ$ のそれぞれにおいて、目標相対密度 $D_r \approx 30\%$ と 50% の条件で細粒分含有率 $F_c=0\sim 30\%$ の範囲で変化させた試料について、初期せん断応力比 $\alpha=0\sim 0.35$ に設定し、一定応力振幅の

表-3 試験条件一覧

Test condition	$\theta_0(^\circ)$	Nominal D_r (%)	F_c (%)	D_r (%)	α
Cyclic loading	0	30	0	26~31	0~0.25
			10	27~35	0~0.35
			20	27~34	
			30	31~38	
			50	46~53	0~0.35
	45	30	0	31~35	0.125~0.35
			10	27~34	
			20	30~33	
			30	30~36	
			50	45~51	
Monotonic loading	0	30	0	29	0.125~0.25
			10	26	0.125
			20	28	
			30	37	

正弦波を加える非排水繰返しせん断試験を行った。ちなみに $\alpha=0\sim 0.35$ の初期せん断応力比は勾配 $0\sim 35\%$ の傾斜地盤に対応していることになる。なお、砂の締め具合を表す指標として使われる相対密度は細粒分含有率が増すにしたがい適用性が低下するが、ここではクリーンサンドから細粒分を含む砂までの変化を連続的に議論するため、従来からよく使われてきたこの指標を用いている。

また、同じ材料の基本的せん断特性を把握するため、ひずみ制御による非排水単調せん断試験も行った。目標相対密度 $D_r \approx 30\%$ の条件で細粒分含有率 $F_c=0\sim 30\%$ の範囲で変化させた試料について、初期せん断応力比 $\alpha=0.125$ と 0.25 に設定し試験を行った。

4. 繰返しせん断試験結果

(1) 初期せん断応力による破壊形態のタイプ分け

図-3は $\theta_0=0^\circ$ で $D_r \approx 30\%$, $F_c=0\sim 10\%$ の場合の4条件の試験から得られた $\tau-\sigma'_m$ 平面上での有効応力経路(上)とせん断応力 τ - せん断ひずみ γ 関係(下)を例示し、初期せん断応力比 α の大きさによる破壊形態の違いを(a)~(d)で比較している。ここにせん断応力 τ とせん断ひずみ γ は繰返しせん断応力 τ_0 を加える水平面について定義している。

(a) $F_c=0\%$, $\alpha=0$, $R=0.17$: Type CF では、繰返しせん断応力 τ_0 が中立軸から正負に均等に加わる場合であり、通常の液状化試験に相当し、せん断ひずみも正負にほぼ均等に増加する。また、せん断応力の振動の中心においてはせん断ひずみはゼロとなり、片側への残留ひずみはほぼゼロと見なせる。これはいわゆる水平地盤での繰返しせん断による破壊であり、ここでは CF (Cyclic Failure: 繰返し破壊) と名付けてタイプ分けす

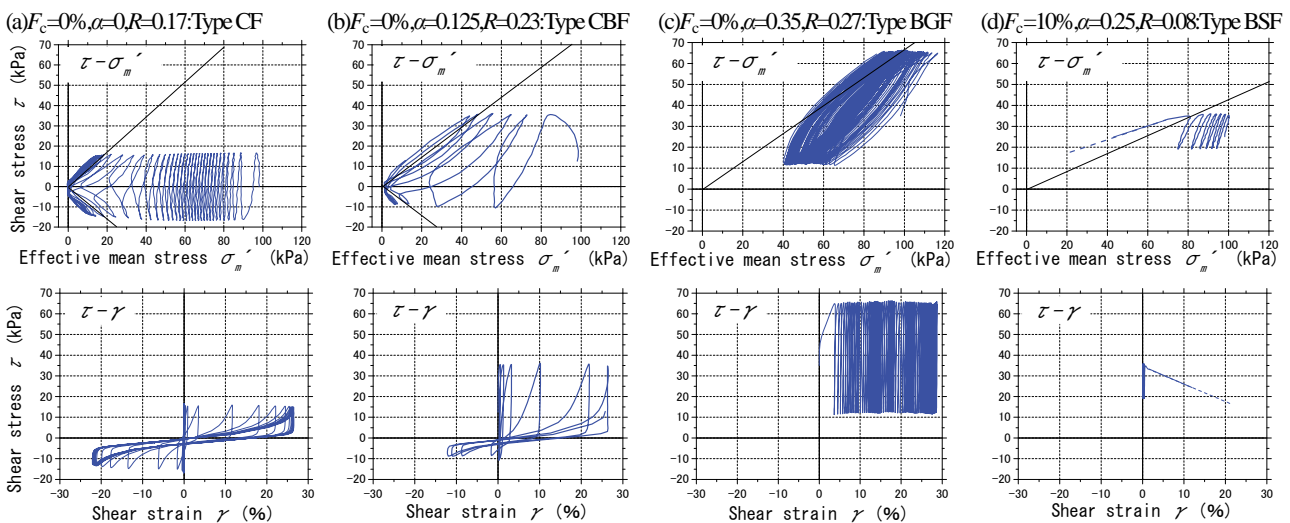


図-3 有効応力経路(上), せん断応力-せん断ひずみ関係(下) ($\alpha=0$ または $\theta_0=0^\circ$, $D_r \approx 30\%$)

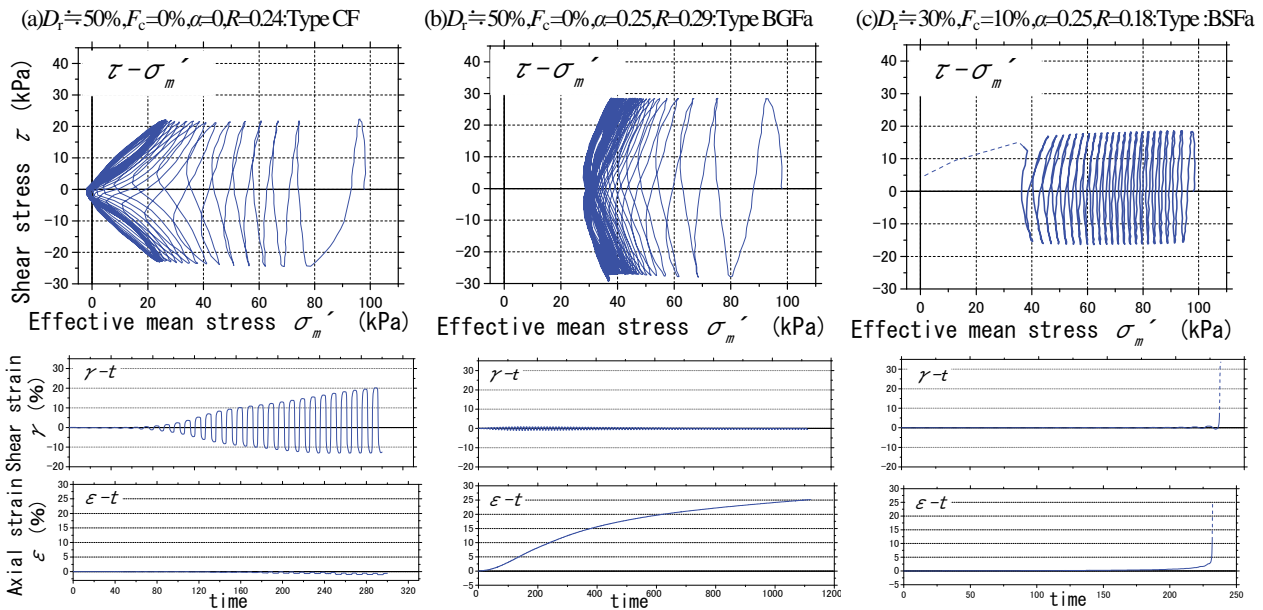


図4 有効応力経路(上), せん断ひずみ(中)と軸ひずみ(下)の時刻歴 ($\alpha=0$ または $\theta_0=45^\circ$)

る。繰返しひずみ振幅は大きく発生するため埋設構造物などの破壊につながるが、地震波の不規則性によるある程度の残留ひずみは生じて地震動が終わればせん断力はゼロとなり、初期せん断応力によるひずみは残留しない。

次に (b) $F_c=0\%$, $\alpha=0.125$, $R=0.23$ では、繰返しせん断応力振幅 τ_d よりも小さな初期せん断応 τ_s が働いている場合 ($\tau_d > \tau_s$) である。 $\tau_s + \tau_d$ が正負に変化 (応力反転: Stress reversal) するため 100% の水圧上昇が可能であり、上記 CF タイプと同じく繰返しひずみ振幅は大きく発生する。一方で、 τ_s が働いている側に繰返しひずみの中心移動による残留ひずみが発生するため、繰返しひずみだけでなく初期せん断応力に起因した残留ひずみによる被害の可能性が出てくる。このタイプを CBF (Cyclic Biased Failure: 繰返し偏向破壊) と名付ける。

3番目の (c) $F_c=0\%$, $\alpha=0.35$, $R=0.27$ では $\tau_d < \tau_s$ の場合で、 $\tau_s + \tau_d$ の符号が反転しない (応力無反転: Stress non-reversal) ため有効応力経路が原点に近付かず間隙水圧の上昇に歯止めがかかり、大きな繰返しひずみは発生できない。その一方で、残留せん断ひずみは τ_s の作用方向に繰返しに伴って徐々に発生する。この場合の残留ひずみは徐々に延性的に起きることになり、このタイプを BGF (Biased Gradual Failure: 偏向延性破壊) と名付ける。

さらに (d) $F_c=10\%$, $\alpha=0.25$, $R=0.08$ では上記 (c) と同じく $\tau_d < \tau_s$ の場合である。細粒分が入ることにより供試体の体積収縮性が増し、有効応力が 20% 程度減少した段階で、繰返しひずみ振幅は非常に小さいにも関わらず、初期せん断応力の作用方向に残留ひずみが急増し明瞭な脆性的破壊を起こす。この破壊タイプを BSF (Biased Sudden Failure: 偏向脆性破壊) と名付けるが、原地盤で起

きれば他の破壊形態に比べて危険である。これと類似した破壊形態が水膜現象によっても引き起こされる可能性については以前の研究で指摘されている¹⁰⁾。今回の実験での BSF タイプの脆性的破壊が水膜生成を伴っていないかについて注意深く観察したが、その徴候は認められなかった。これは以前の研究とは異なり、繰返しせん断応力が完全片振りダイレートしやすい状態になっているためと思われる。

図4 は $\theta_0=45^\circ$ の場合について、3つの異なる条件の試験から得られた有効応力経路(上)、せん断ひずみ γ (中) と軸ひずみ ϵ (下) の時刻歴を比較している。

(a) の $D_r=50\%$, $F_c=0\%$, $\alpha=0$, $R=0.24$ については、等圧密状態の通常の液状化試験と変わらず、せん断ひずみがほぼ対称的に成長し(中段)、軸ひずみはほとんど発生しない(下段)。つまり図3での CF タイプと同じ破壊形態である。

次に、(b) $D_r=50\%$, $F_c=0\%$, $\alpha=0.25$, $R=0.29$ については水平面から 45° 傾いた面に初期せん断応力を加えているため、有効応力経路は破壊包絡線に接近するが、有効応力はそれ以上小さくならないことが分かる。せん断ひずみの繰返し振幅と同時に初期せん断応力の作用方向に残留軸ひずみが大きく成長する。しかし、軸ひずみの成長は段階的で、前出の BGF と同様に徐々に延性的に起きることになり、このタイプを BGFa (BGF-axial) と名付けることとする。

一方、(c) の $D_r=30\%$, $F_c=10\%$, $\alpha=0.25$, $R=0.18$ では図4(b)とは大きく異なり、20回余りの载荷繰返しと 60% 程度の水圧上昇により急激な圧縮ひずみとせん断ひずみが発生する。同時に軸応力が低下し、異方圧密状態が維持されなくなり、急激な軸ひずみの増加を伴った前出の

BSF と類似の脆性的破壊を起こす。 $D_r \approx 30\%$ の緩い密度に細粒分が入ったことにより供試体の収縮性が大きくなり、過剰間隙水圧が多少増加した段階で、応力の異方性が保持されなくなったためと考えられ、この破壊タイプを BSFa (BSF-axial) と名付けるが、原地盤で起きれば危険な破壊形態である。

以上のように、初期せん断応力比 $\alpha=0$ と $\alpha > 0$ の条件を通じて、地盤の液状化による地盤破壊形態は、繰返しひずみと残留ひずみの観点から以下のように整理できる。

すなわち $\alpha=0$ の場合 (CF タイプ) は、間隙水圧の 100% 上昇により繰返しひずみ振幅が発達する。地震慣性力が収まればひずみを残留させるせん断力は存在しないため、その影響は震動中のひずみ振幅の範囲内である。一方 $\theta_0=0^\circ$ の場合に α がゼロでない小さい値の範囲では、応力反転により間隙水圧の 100% 上昇が可能であり、繰返しひずみ振幅と片側への残留ひずみが同時発生するため (CBF タイプ)、繰返しひずみと残留ひずみの両者への考慮が必要である。 α が大きくなるにしたがい応力反転は起きなくなり、繰返しひずみ振幅に比べて片側への残留ひずみが重要となってくる。この時、相対密度 D_r や細粒分含有率 F_c などに支配される砂の体積収縮性がそれほど大きくなければ、徐々に残留ひずみが蓄積する延性的破壊 (BGF または BGFa) となる。一方、体積収縮性が非常に大きくなれば残留ひずみは一気に増加し脆性的破壊 (BSF または BSFa) となる。このうち、脆性的破壊では急激に大破壊にいたる危険性があり、初期せん断応力下の地盤の液状化を考える場合には、この破壊形態の発生可能性を事前に検討しておくことは重要と思われる。このような繰返し応力下で初期せん断を受けた緩い砂が急速破壊を生じる現象については、既に Hyodo ら⁵⁾の三軸試験機を用いた研究で指摘されている。ここでは初期せん断応力と繰返しせん断応力の作用面が一致する場合 ($\theta_0=0^\circ$) も異なる場合 ($\theta_0=45^\circ$) もこのような急速破壊が生じることが示された。

(2) 初期せん断応力が液状化強度比に及ぼす影響

図-5 (a), (b) はそれぞれ $D_r \approx 30\%$ の供試体の $\theta_0=0^\circ$ と 45° についての繰返し応力比 $R = \tau_d / \sigma'_m$ と繰返しせん断を加える水平面でのせん断ひずみが $\gamma = 7.5\%$ ($\theta_0=0^\circ$ の場合) もしくは軸ひずみが $\varepsilon = 5\%$ ($\theta_0=45^\circ$ の場合) に達するときの繰返し载荷回数 N_c の関係である。なお、 $\gamma = 7.5\%$ と $\varepsilon = 5\%$ は、非排水条件でのポアソン比を $\nu = 0.5$ として、式 $\gamma = (1+\nu)\varepsilon$ により関係付けられた値である。ただし (a) の $\theta_0=0^\circ$ の場合、せん断ひずみについては両振幅 γ_{DA} あるいは片振幅 γ_{max} のいずれかが上記の規定値に達した時点をとっている。初期せん断応力の加わっていない $\alpha=0$ の場合、 $\theta_0=0^\circ$ と 45° は同じ実験結果を使用しており、両振幅せん断ひずみ γ_{DA} が規定値に達するときの繰返し载荷回数 N_c

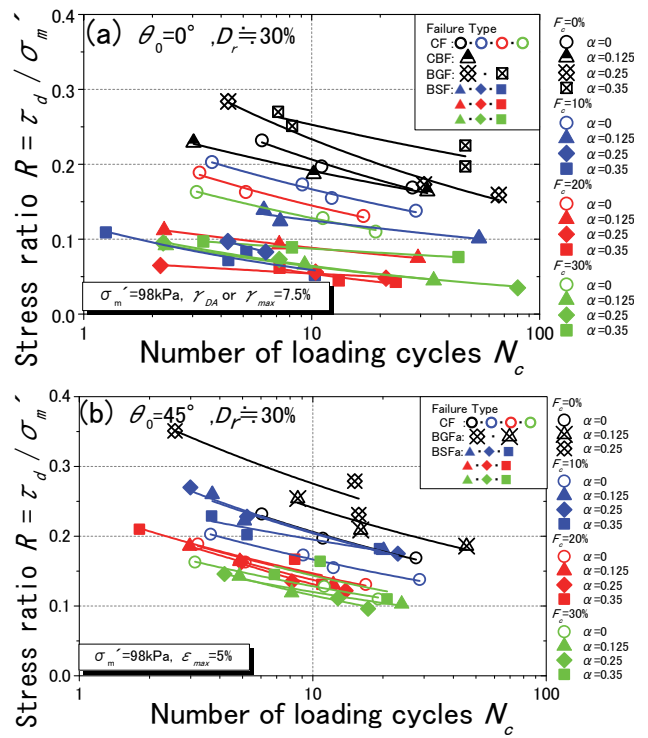


図-5 液状化強度曲線 ($D_r \approx 30\%$)

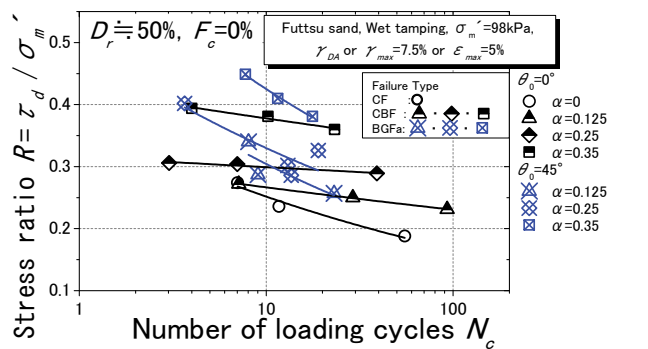


図-6 液状化強度曲線 ($D_r \approx 50\%$, $F_c = 0\%$)

で評価している。なお、このようなグラフでの応力比 R の定義としては水平面に加わる動的せん断応力 τ_d を鉛直有効応力 σ'_v で基準化することも考えられるが、ここでは図-3, 4 に示すような有効応力経路の表示との関連を重視し、等方応力 σ'_m で基準化している。

図-5 (a) の $\theta_0=0^\circ$ の試験結果は前出の 4 種類の破壊タイプ CF, CBF, BGF, BSF に対応した異なる記号で示されている。これより、まず $\alpha=0$ の場合には当然 CF タイプである。 $\alpha > 0$ の場合には $F_c=0\%$ では CBF か BGF になるが、 $F_c=10\%$ 以上では BSF の脆性的破壊となる。図-5 (b) の $\theta_0=45^\circ$ の試験結果でも前出の破壊タイプ CF, BGFa, BSFa による分類がされており、 $\alpha=0$ の場合には CF タイプ、 $\alpha > 0$ の場合には $F_c=0\%$ では BGFa、 $F_c=10\%$ 以上では BSFa となることが分かる。図-5(a), (b) から、細粒分含有率 F_c が増加するほど応力比 $R \sim N_c$ カーブの位置は下方に移動する明瞭な傾向が読み取れる。

図-6は $D_r=50\%$, $F_c=0\%$ の場合での同様な関係であるが、同一グラフに $\theta_0=0^\circ$ と 45° の結果を重ねている。図-5に示した $D_r=30\%$, $F_c > 0\%$ の場合に比べて体積収縮性が少ないため、BSFやBSFaの破壊形態は現れず、CF, CBF, BGFaに限られている。R~ N_c カーブの勾配は水平面に初期せん断応力を加えた場合($\theta_0=0^\circ$, $\alpha > 0$)には $\alpha=0$ あるいは $\theta_0=45^\circ$ に初期せん断を加えた場合より明らかに低い値をとることが読み取れる。同様の傾向は図-5(a)と(b)の比較からも読み取れ、せん断面角度の与える影響が共通的に表れている。

ここで、 $N_c=10$ 回で規定のひずみ($\gamma=3, 7.5, 15\%$ もしくは軸ひずみが $\varepsilon=2, 5, 10\%$)に達する繰返し応力比Rを液状化に対する抵抗値として液状化強度比 R_{L10} と表記する。図-7, 図-8はそれぞれ $\theta_0=0^\circ$ と 45° の条件での $D_r=30\%$, 50% の供試体の液状化強度曲線から読み取った液状化強度比 R_{L10} と初期せん断応力比 α の関係を、 F_c および R_{L10} を定義するひずみの大きさの違いごとに示したものである。 $F_c=0\%$ の試料では $D_r=50\%$ は勿論、 $D_r=30\%$ でも体積収縮性が限定的で、 $\theta_0=0^\circ$, 45° 共に α の増加とともに R_{L10} が増大する場合が多く、その傾向は R_{L10} を定義するひずみを大きくするほど明瞭となる。これは図-5, 6で説明したように、 $F_c=0\%$ の供試体が初期せん断応力の作用下では破壊形態CBFあるいはBGFにより段階的に破壊する特性を反映している。一方、 $D_r=30\%$, $F_c=10\sim 30\%$ では α の増加により R_{L10} が単調に増大する傾向は見られず、 $\theta_0=0^\circ$ ではむしろほぼ単調に減少する傾向が

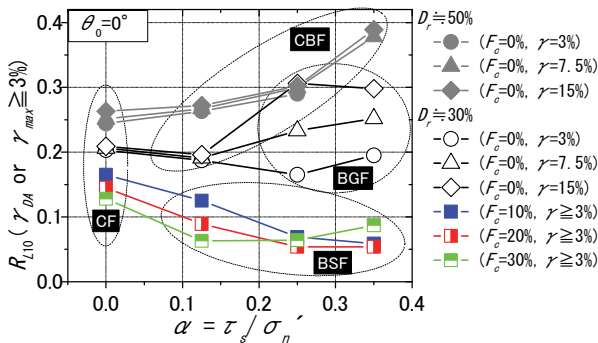


図-7 α に対する液状化強度の変化 ($\theta_0=0^\circ$)

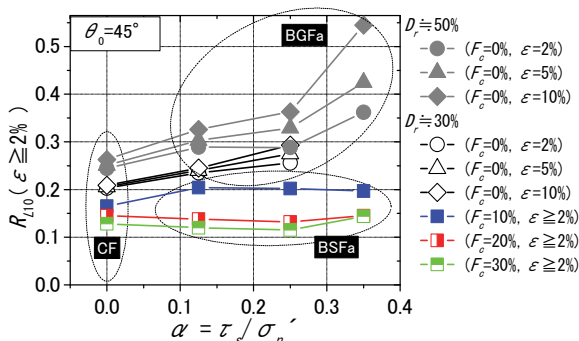


図-8 α に対する液状化強度の変化 ($\theta_0=45^\circ$)

目立つ。 $\theta_0=45^\circ$ の場合には α の増加による R_{L10} の明瞭な増減はなく、ほぼ一定値を示す。

$\theta_0=0^\circ$, 45° 両者の $F_c=10\sim 30\%$ の各結果について特筆すべきは、 R_{L10} を定義するひずみの大きさのすべてについて($\gamma \geq 3\%$ or $\varepsilon \geq 2\%$), $R_{L10} \sim \alpha$ 関係が重なってしまうため一本のカーブで表わされることである。このうち $\alpha=0$ については、CFタイプの破壊で繰返しひずみが急激に発達するためである。これは地中構造物や杭基礎の設計を考える上では重要であるが、初期せん断応力の作用による一方向に発達して構造物の沈下や斜面崩壊を引き起こす破壊形態とはメカニズムが異なる。一方 $\alpha > 0$ については、図-5に例示したように偏向脆性破壊(BSFまたはBSFa)を起こし一瞬にして最大ひずみを越えてしまうため $R_{L10} \sim \alpha$ 関係が一本のカーブで表わされることになる。これは、直接基礎構造物の沈下傾斜や斜面崩壊を引き起こすような液状化破壊が急激に生じることを意味している。

図-7, 8を比べると、 $\theta_0=0^\circ$ と $\theta_0=45^\circ$ の間で全体的傾向は類似しているものの、全ての条件について前者より後者の方が α の増加に伴って R_{L10} が増大する傾向が強まっている。これは初期せん断応力が作用する面が繰返しせん断応力が加わる水平面と一致する場合と 45° 隔たった場合で、初期せん断応力の増大が砂のダイレイタンシー特性に及ぼす影響が明らかに異なることを意味している。

5. 単調せん断試験結果

繰返し非排水せん断試験で得られた有効応力経路や応力・ひずみ関係の特性を基本的な理解するために、相対密度 $D_r=30\%$ の供試体について、 $\sigma'_c=98$ kPaで等方圧密した供試体の $\theta_0=0^\circ$ の面に初期せん断応力比 $\alpha=0.125, 0.25$ のねじりせん断を排水条件に加え、ひずみ制御による非排水単調せん断試験を行った。

図-9は単調せん断試験での(a) $D_r=30\%$, $F_c=0\%$, $\alpha=0.125\sim 0.25$, (b) $D_r=30\%$, $F_c=10\sim 30\%$, $\alpha=0.125$ の条件の試験より得られた $\tau-\sigma'_n$ 平面上での有効応力経路(上段)とせん断応力 τ -せん断ひずみ γ 関係(下段)を示し、相互に比較している。

(a)の $D_r=30\%$, $F_c=0\%$ の場合、上段の有効応力経路を見ると、いずれの α の条件でも载荷初期に正の過剰間隙水圧が発生し平均有効主応力が減少するが、その後、変相点¹⁰⁾で水圧増分が負に変化し、有効応力の増加とともに応力経路は破壊包絡線に沿って右上に移動する。せん断応力-せん断ひずみ関係に着目すると、 $\gamma < 1\%$ の矢印で示す位置で明瞭な折れ曲がりや降伏を示す。降伏点に対応した有効応力経路上の点を(a)のグラフに矢印で示しているが、変相点の少し手前に位置することが分

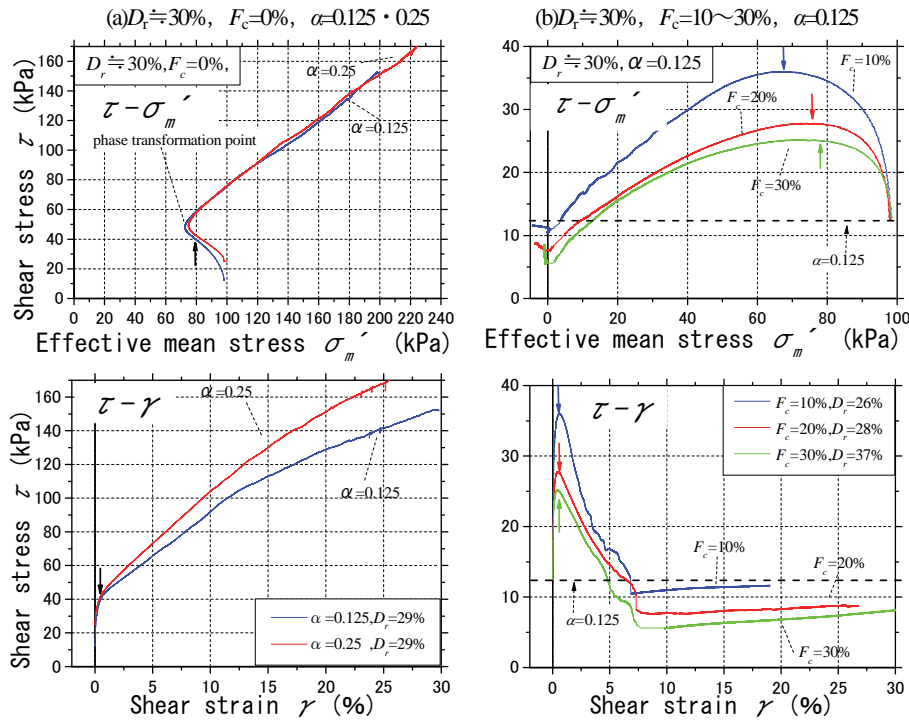


図-9 有効応力経路, せん断応力 - せん断ひずみ関係 (単調せん断試験, $D_r=30\%$)

かる。降伏後はせん断ひずみの増加に対してせん断応力も増加するひずみ硬化を示す。ちなみに、 $F_c=0\%$ の場合には供試体に明瞭なせん断面が見られた。その傾斜角より計算した内部摩擦角は $\phi \approx 38^\circ$ であった。 $\alpha=0.125$ と 0.25 を比較すると、有効応力経路は変相点に到達以降は差異はほとんど見られないにもかかわらず、 $\alpha=0.25$ の方が強いひずみ硬化特性を示している。これが有意な差であるか実験誤差によるものかについては、さらに実験データの追加が必要である。

(b) $D_r=30\%$, $F_c=10\sim 30\%$, $\alpha=0.125$ の条件では $\tau \sim \sigma'_m$ 関係を見ると、いずれも正の過剰間隙水圧が発生し σ'_m が大きく減少している。また、 $\tau \sim \gamma$ 関係を見ると、 $\gamma < 1\%$ の矢印で示す点でせん断応力がピーク強度をとるが、その時の応力状態は $\tau \sim \sigma'_m$ 平面上での矢印のピーク点に対応している。ちなみに、このピークについては、Vaid and Chem⁴⁾やHyodoら⁵⁾が流動的液状化の発生条件に関わる条件として重視している。その後、せん断応力が減少するひずみ軟化を示し、最終的にはひずみの増加に対しせん断応力がほぼ一定値を保つ塑性流動状態に達する。これらの定性的傾向に細粒分含有率による目立った違いはないが、 F_c が多いほど発生せん断応力は小さくなり強度や変形性に違いが現れている。ところで、 $\tau \sim \sigma'_m$ 関係や $\tau \sim \gamma$ 関係は初期せん断応力比 $\alpha=0.125$ の水平ライン以下の範囲で図-9 (b) に示すような結果が得られているが、本来、平均有効主応力が $\sigma'_m=0$ に至る前に大流動破壊が生じ、せん断応力は $\tau=0$ にまで低下するはずである。残留強度付近の応力～ひずみ関係については試験機の機械的

摩擦による計測誤差が混入している可能性が疑われる。ただし、本論文で注目している有効応力経路のピーク付近については計測誤差の影響は小さいと考えられる。

6. 繰返しせん断・単調せん断試験結果の比較

地盤の液状化時に初期せん断応力によって起きる構造物破壊が延性的か脆性的かは、耐震設計を考える上で極めて重要である。特に脆性的破壊となる場合には危険性が大きいので、これが起きる条件に焦点を当て、初期せん断応力の作用下での非排水せん断試験での繰返しせん断と単調せん断の比較を行った。

図-10は脆性破壊BSFに分類される $D_r=30\%$, $\alpha=0.125$ での試験条件において、両試験での有効応力経路(上段)、せん断応力～せん断ひずみ関係(下段)を、それぞれ重ね書きしている。その際、供試体の細粒分含有率は(a) $F_c=10\%$, (b) 20% , (c) 30% の3段階に変化させ、それぞれについて応力比 $R = \tau_d / \sigma'_m$ の異なる2つの繰返しせん断試験結果を示している。(a) (b) (c) いずれについても繰返しせん断によって σ'_m が減少し、*印の点で初期せん断方向にひずみが急増し急激なせん断破壊を起こすことが分かる。図-9(b)において既に述べたように、単調せん断試験で $\tau \sim \gamma$ 関係にピークが現れる時の応力点を $\tau \sim \sigma'_m$ カーブ上のAで表わし、点Aと原点Oとを結んだ直線を描いている。すると前述の*印のひずみが急増する点は、いずれも直線OAに極めて近接していることに気がつく。

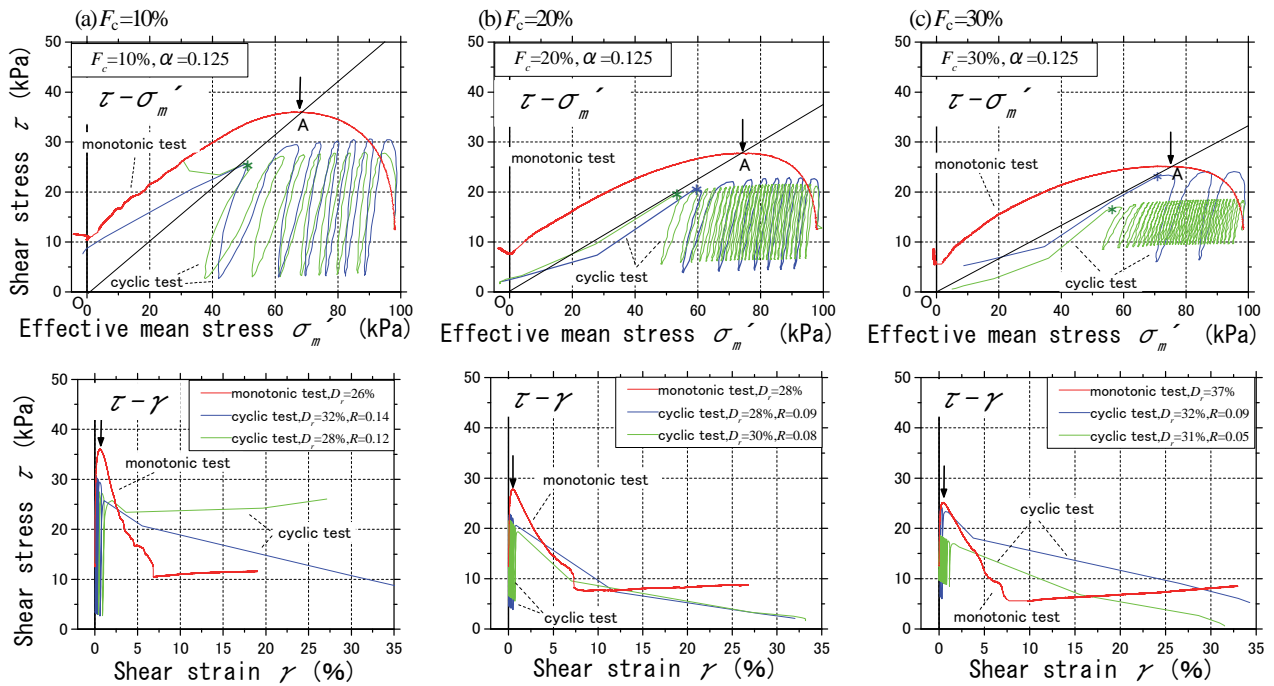


図-10 繰返しせん断試験と単調せん断試験での有効応力経路(上)とせん断応力-せん断ひずみ関係(下)の比較 ($D_r \approx 30\%$, $\alpha = 0.125$)

Ishihara ら¹¹⁾は砂の非排水単調三軸試験に基づき、 $\tau - \sigma'_m$ 面上で原点から引いた勾配 (τ/σ'_m) 一定の直線が同じせん断ひずみに対応した等せん断ひずみ線 (equi- γ line) を表し、応力経路にあまり依らずに決まること、かつ降伏面にも相当することを見出した。この知見に基づいて図-10の結果を見ると、直線OAは細粒分を含んだ体積収縮性の大きな砂がピーク強度を示した後にひずみ軟化を起こす降伏面に相当していると考えられる。そして有効応力経路が降伏面を通過することにより単調・繰返しせん断に関わらずひずみ軟化と急激なひずみ増加が起きると解釈できる。

一方、図-11には、延性破壊BGFに分類される $D_r \approx 30\%$ 、 $\alpha = 0.25$ 、 $F_c = 0\%$ の単調せん断試験および2つの繰返しせん断試験から得られた $\tau - \sigma'_m$ 関係(上段)と $\tau - \gamma$ 関係(下段)をそれぞれ重ね書きしている。既に図-9(a)でも述べたとおり、 $\tau - \gamma$ 関係は矢印で示す降伏点 ($\tau - \gamma$ カーブ上に表れる明確な折れ曲がり点)を過ぎたあとはひずみ硬化を示し、 $\tau - \sigma'_m$ 関係は降伏点に対応した応力点Aを通り変相点を経て破壊線に沿って上昇するため有効応力が上昇に転ずることは $F_c = 10\%$ 以上の砂との大きな違いである。繰返しせん断試験の応力経路は、直線OAに近接した一波目に大きなせん断ひずみが発生しているが、その後はひずみ硬化傾向を反映し、残留せん断ひずみが徐々に発生するBGFの延性的破壊を起こすことになる。

以上によれば、初期せん断応力作用下の地盤の液化化破壊が脆性的BSFか延性的BGFかは、

1) 単調非排水せん断での降伏点に対応する応力点A通

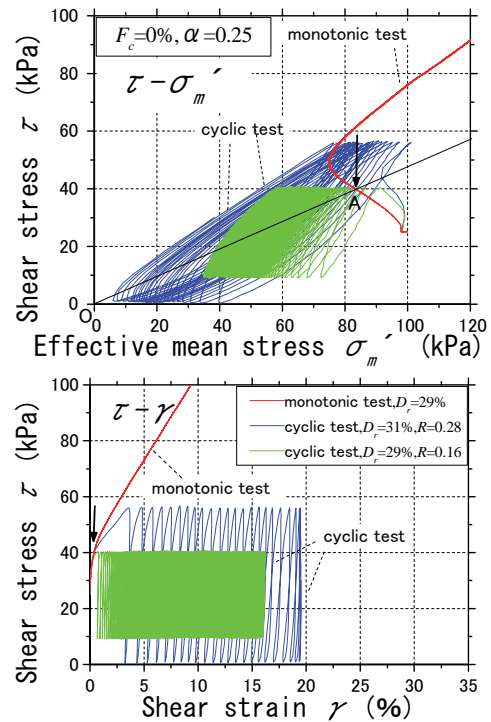


図-11 繰返しせん断試験と単調せん断試験での有効応力経路(上)とせん断応力-せん断ひずみ関係(下)の比較 ($D_r \approx 30\%$, $\alpha = 0.25$, $F_c = 0\%$)

過後に、有効応力が単調に減少しひずみ軟化を起こすか否か、

2) 応力点A通過後に変相点において有効応力が上昇に転じひずみ硬化を起こすか否か、

により判別できることになる。1)では直線OAが繰返し

載荷での脆性破壊を規定する。ちなみに、この線はVaid and Chemが流動破壊の生じる条件として注目したCSRライン⁴⁾に相当していると考えられる。この線の角度を ϕ_y で表わすこととする。また2)では図-3(b) (c)の例から分かるように原点を通る破壊線(内部摩擦角 ϕ)が繰返し載荷での延性破壊を規定することになる。そこで $\tau \sim \sigma_m'$ 平面上の原点Oと単調せん断試験で τ が最大となる点Aを通る直線OAの角度 ϕ_y や破壊線の角度 ϕ' に着目して、初期せん断応力作用下での他の繰返しせん断試験の結果も含め整理した。

図-12は $D_r \doteq 30\%$ で $\alpha > 0$ の試験結果について、細粒分含有率 F_c と角度 ϕ_y や ϕ' の関係を初期せん断応力比 α ごとに示したものである。繰返しせん断試験結果の図中の記号は、初期応力の下での破壊形態; CBF, BGF, BSFにより区別されている。タイプCBFとBGFについてはせん断ひずみが徐々に発達し、最終的には有効応力経路が破壊線にほぼ一致する経路をたどる。そこで、図-3 (a)~(c)に示すように γ が20%以上に発達した時点での応力経路上の座標点と原点Oを結んだ直線の角度を求め、それを内部摩擦角 ϕ' と見なしている。BSFについては図-10に*印で例示したように脆性的大ひずみが起きる時点での座標と原点を結んだ線より求めた角度を ϕ_y と見なした。

一方、単調せん断試験については、応力-ひずみ関係がひずみ硬化を示す場合は有効応力が破壊線に沿って右上方に至る経路を辿るため、終局状態の応力点の角度から内部摩擦角 ϕ' を算定している。またひずみ軟化を示す場合は、図-10に例示したように直線OAの角度を求めそれを ϕ_y とした。

図-12より $F_c = 0\%$ で $\alpha = 0.125$ と 0.25 のCBFとBGFの延性的破壊形態を示す繰返し載荷試験から得られる ϕ' は多少の値のバラツキはあるものの $38 \sim 42^\circ$ の範囲で近い値であることが分かる。またこれらを単調せん断試験から得られた ϕ' と比べると繰返し試験の方が $1 \sim 2^\circ$ ほど低い値となるが、その差は小さい。これは前述のようにすべり面の測定角度 $\phi \doteq 38^\circ$ ともほぼ一致している。

一方で、 $F_c = 10 \sim 30\%$ 、 $\alpha = 0.125$ の条件で見られたBSFの脆性的破壊形態を示す繰返しせん断試験から得られる角度 ϕ_y は単調せん断時の降伏点に対応した降伏ひずみ角 ϕ_y とほぼ一致していることが分かる。すなわち、単調・繰返しせん断ともに同じ降伏条件でひずみ軟化に移行し、変相点において有効応力が上昇に転じなければ急激な脆性破壊を起こすと解釈できる。

今回、初期せん断応力作用下で繰返しせん断試験のみ行ったほかの条件の試験結果についても、同じグラフ上にプロットしている。これより、 $D_r \doteq 30\%$ の砂について、 $F_c = 0\%$ の場合には有効応力経路が内部摩擦角 ϕ' の破壊包絡線に近づきながら延性的破壊が起きるのに対し、 $F_c = 10\%$ 以上の場合には有効応力経路が ϕ' よりかなり低い角

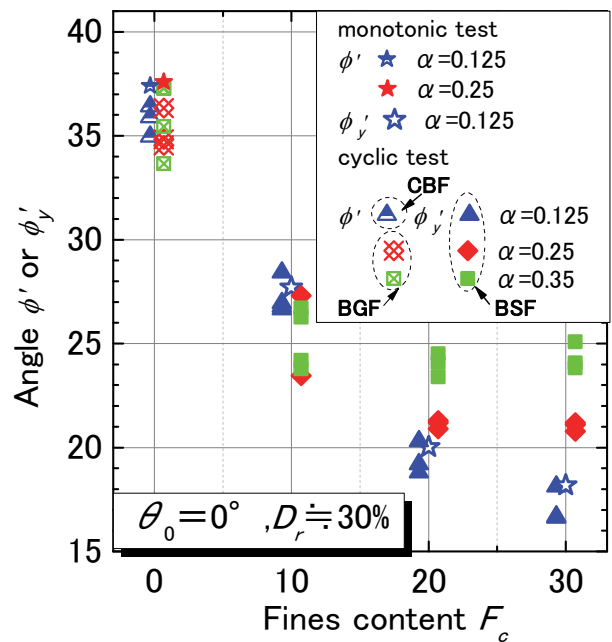


図-12 初期せん断応力作用下のせん断抵抗角 ϕ' 、 ϕ_y の細粒分含有率 F_c に対する変化 ($\theta_0 = 0^\circ$, $\gamma \geq 20\%$)

ϕ_y の降伏面に達すると脆性的破壊が起きることになる。そして、 ϕ_y は F_c が増加するほど低下する傾向が明瞭に見られる。また、 $F_c = 10\%$ ではその低下傾向に大きな違いはないが、 $F_c = 20\%$ 、 30% と増加するほど、初期せん断応力比 α が大きい方が ϕ_y の低下割合は小さくなっている。ちなみに今回試験に用いた材料では、 $\alpha > 0$ 、 $F_c = 10\%$ 以上の条件ですべてBSFタイプの破壊となったが、BGFとBSFの境界は $D_r \doteq 30\%$ の場合には $F_c = 0 \sim 10\%$ の間にあると考えられる。

以上より、繰返しせん断試験と単調せん断試験との比較から、初期せん断応力作用下の地盤の液状化破壊のうち、特に危険度の高い脆性的破壊が起きる条件を図-12における内部摩擦角 ϕ' と降伏面の角度 ϕ_y との比較により明らかにした。これより、細粒分を含んだ緩い砂については内部摩擦角 ϕ' よりかなり低い角度 ϕ_y の降伏面OAに有効応力経路が達すれば、急激なせん断変形により構造物の傾斜倒壊や斜面の滑り破壊がおきるメカニズムが定性的にはあるが明らかにされた。今後、さらに実際に近い地盤条件や応力条件により、定量的な検討を進め、初期せん断応力を考慮した液状化対策につなげていく必要がある。

7. まとめ

中空ねじりせん断試験機を用いて砂の相対密度 D_r および細粒分含有率 F_c を変化させ、非排水繰返しおよび単調せん断試験を行い、初期せん断応力比が液状化による破壊形態に与える影響を検討した。初期せん断を加える面

がねじりせん断を加える水平面に一致する場合 ($\theta_0=0^\circ$) と、45度異なる場合 ($\theta_0=45^\circ$) を考慮した。その結果、以下の主要な知見が得られた。

- 1) 地盤の液状化破壊形態を初期せん断応力との関係で4タイプに分類することができる。すなわち、(i) $\alpha=0$ での繰返しひずみ破壊 (CF タイプ)、(ii) α が小さい範囲での応力反転を伴う繰返し・残留ひずみ破壊 (CBF タイプ: $\theta_0=0^\circ$)、(iii) α が大きく応力無反転状態で徐々にひずみが蓄積する延性的破壊 (BGF: $\theta_0=0^\circ$ 、または BGFa タイプ: $\theta_0=45^\circ$)、(iv) α が大きく応力無反転で地盤材料の体積収縮性が大きい場合に繰返し载荷途中でひずみが急激に発達する脆性的破壊 (BSF: $\theta_0=0^\circ$ 、または BSFa タイプ: $\theta_0=45^\circ$) である。このうち、一気に破壊にいたる危険性がある BSF または BSFa の発生可能性に留意することは重要である。
- 2) 初期せん断応力比を $\alpha=0\sim 0.35$ に変化させ、 D_r 、 F_c をパラメータとして材料の体積収縮性の違いによる液状化強度の変化傾向を明らかにした。砂の体積収縮性が限定的な場合には (今回用いた材料では $D_r=30\%$ の低い密度でも $F_c=0\%$ であれば)、 α の増大により液状化強度が増加する。この場合、初期せん断応力下で起きる破壊形態は CBF または BGF・BGFa となる。一方、体積収縮性が大きい条件 ($D_r=30\%$ で $F_c=10\%$ 以上) では α の増大による強度低下がとくに $\theta_0=0^\circ$ の場合に顕著に現れ、破壊形態は BSF・BSFa となる。 α の増加に伴う液状化強度の変化傾向は $\theta_0=0^\circ$ と $\theta_0=45^\circ$ で明らかに異なっており、初期せん断面の違いが砂のダイレイタンス特性に影響を与えることが分かる。
- 3) $\theta_0=0^\circ$ の場合について、非排水単調せん断試験との比較検討により脆性的な BSF の破壊形態の発生メカニズムを調べた。単調せん断試験での応力経路が終始有効応力減少方向に向かい、応力~ひずみ関係はピーク強度発現後にひずみ軟化を示す場合に、繰返しせん断時に脆性的 BSF 破壊が起きる。それに対し、有効応力経路に変相点が現れて有効応力が増加に転じ、応力~ひずみ関係がひずみ硬化を示す場合には繰返しせん断時に延性的 BGF 破壊となることを明らかにした。
- 4) BSF 破壊は、単調せん断試験での応力~ひずみ曲線にピークが現れる時点に対応した有効応力経路上の応力点と原点を結ぶ降伏面により規定され、繰返しせん断試験での有効応力経路がその降伏面に近接した時に起きることを示した。
- 5) 各繰返しせん断試験で BSF 破壊が起きた時点の応力

状態から ϕ_y を求め、単調せん断試験での降伏面の角度 ϕ_y や CBF や BGF 破壊から求めた内部摩擦角 ϕ とともに整理した結果、 F_c の増加とともに ϕ_y は ϕ に比べて大幅に減少することが示された。

以上より、BSF タイプの破壊が初期せん断応力作用下の細粒分を含む緩い砂地盤の液状化において設計上注意を要すべき破壊形態であることが示された。これらは室内要素試験結果から見た極めて基本的・定性的な知見であり、今後、さらに広い条件をカバーした実験により設計に適用できるレベルに高めていく必要がある。

参考文献

- 1) Yoshimi, Y. and Oh-oka, H.: Influence of degree of shear stress reversal on the liquefaction potential of saturated sand, *Soils and Foundations*, Vol. 15, No. 3, pp. 27-40, 1975.
- 2) Vaid, Y. P. and Finn, W. D. L.: Static shear and liquefaction potential, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 195, GT10, pp. 1233-1246, 1979.
- 3) Vaid, Y. P. and Chern, J. C.: Effect of Static Shear on Resistance to Liquefaction, *Soils and Foundations*, Vol. 23, No. 1, pp. 47-60, 1983.
- 4) Vaid, Y. P. and Chern, J. C.: Cyclic and Monotonic Undrained Response of Saturated Sands, *Advances in the art of testing soils under cyclic conditions*, ASCE Convention, Detroit, Mich, pp. 120-147, 1985.
- 5) Hyodo, M., Tanimizu, H. and Yasufuku, N.: Undrained cyclic and monotonic triaxial behavior of saturated loose sand, *Soils and Foundations*, Vol. 34, No. 1, pp. 19-32, 1994.
- 6) 吉嶺充俊, 西田徹: 砂の非排水三軸繰返し試験に及ぼす異方性の影響, 第35回地盤工学研究発表会, No.1, pp. 761-762, 2000.
- 7) 國生剛治, 加藤進: 嶋田光明: 初期せん断を受けた密な砂の非排水くり返しせん断特性, 第16回土質工学研究発表会, D-7, 146, pp. 581-584, 1981.
- 8) Ishihara, K.: Sand behavior under monotonic loading, *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*, Oxford University Press, Chap. 11, pp. 245-281, 1996.
- 9) 地盤工学会編: 土質試験の方法と解説 (第一回改訂版), 第2編 物理試験, 第8章 砂の最小密度・最大密度試験, pp. 136-145, 2000.
- 10) Kokusho, T.: Current state of research on flow failure considering void redistribution in liquefied deposits, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier, Vol. 23, pp. 585-603, 2003.
- 11) Ishihara, K., Tatsuoka, F. and Yasuda, S.: Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses, *Soils and Foundations*, Vol. 15, No.1, pp. 29-44, 1975.

(2012. 3. 30 受付)

LIQUEFACTION BEHAVIOR OF LOOSE SAND CONTAINING NON-PLASTIC
FINES UNDER INITIAL SHEAR STRESSES—INVESTIGATION BY CYCLIC
AND MONOTONIC LOADING TORSIONAL SHEAR TESTS—

Takuya KUSAKA, Takaji KOKUSHO and Ryotaro ARAI

Initial shear stress induced by nearby slopes, embankments and structures causes shear deformation in the ground, leading to sliding, tilting and uneven settlement of the structures due to liquefaction. In this study, a hollow torsional shear apparatus is used to study the effect of initial shear stress acting either on horizontal plane ($\theta_0=0$) or on inclined plane ($\theta_0=45$) on liquefaction behavior of medium to loose sand of relative density $D_r \doteq 30, 50\%$ and fines content $F_c=0\sim 30\%$. A series of test results have revealed that the liquefaction failure is categorized into four types; Cyclic Failure for $\alpha=0$, Cyclic Biased Failure for small α ($\theta_0=0$), Biased Gradual Failure and Biased Sudden Failure both for larger α . Among the 4 failure types, it is important to pay special attention to BSF type, which may develop abrupt strain increase due to initial stress in the process of pore-pressure build-up by cyclic loading. In comparing with undrained monotonic loading tests, the mechanism how the abrupt BSF type failure differs from the gradual BGF type failure has been clarified, in view of the difference in volume contractility of loose sand containing NP fines under initial shear stress.