

初期せん断応力が液状化破壊と発生ひずみに及ぼす影響について の中空ねじりせん断試験

新井 良太郎¹, 國生 剛治², 日下 拓哉³

1 中央大学大学院・理工学研究科土木工学専攻

2 中央大学・理工学部都市環境学科 教授

3 東海旅客鉄道株式会社・技術開発部

概 要

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。本研究では、中空ねじりせん断試験機により相対密度30、50%で非塑性細粒分を0~30%混ぜた砂供試体の水平面に排水条件で初期せん断応力を加えたのち、非排水条件で繰返しせん断を加えて液状化試験を行った。その結果、砂の細粒分含有率 F_c や相対密度 D_r による体積収縮特性の違いにより液状化破壊が5種類に分類でき、そのうち特に脆性的な流動破壊が設計上重要であることを指摘した。そして、非排水単調せん断試験との比較によりこの流動開始点を有効応力経路上で統一的に決定する降伏面の角度 ϕ_y' に着目し、 ϕ_y' と F_c 、 D_r との関係を求め、脆性的流動破壊が初期せん断応力の大小によらず角度 ϕ_y' の降伏面によって一意的に決まることを示した。

キーワード：液状化、初期せん断応力、破壊タイプ、細粒分、相対密度

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。しかし、液状化による地上構造物の被害は水平地盤の単純な K_0 圧密応力下で起きているわけではない。斜面や盛土、構造物などの自重により基礎地盤に静的な力（初期せん断応力）が継続的に加わっている状態で被害が発生している。つまり液状化被害の多くは地震による慣性力が構造物被害に直結しているわけではなく、地震により基礎地盤の強度が低下し、斜面や盛土、構造物の自重により過大な変形が引き起こされるためと言えよう。従来より液状化の研究は K_0 圧密状態の水平地盤を主な対象としてきたが、このように構造物近傍や傾斜地盤のような初期せん断応力を受けている地盤に対する液状化メカニズムの研究も重要である¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。

こうした初期せん断応力を考慮した液状化の研究としてVaid and Chern⁵⁾、Hyodoら⁶⁾の研究が挙げられる。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・伸張での単調荷重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たものである。このように、既往の液状化研究の多くでは三軸試験機が用いられてきたが、圧縮側と伸張側での応力状態が対称的でなく、伸長側で破壊しやすいという問題点が報告されている⁷⁾。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ため、こ

うした問題を回避できる試験機を用いた試験が望まれる。

そこで、筆者らは中空ねじりせん断試験機を用い、これまで緩い細粒分含有砂に初期せん断応力 τ_s を加えた条件で振幅 τ_a の動的応力を加える非排水繰返しせん断試験と非排水単調せん断試験を行ってきた⁸⁾。

相対密度 $D_r \approx 30\%$ の限られた供試体条件の下で初期せん断応力 τ_s と有効直応力 σ_m' の比を初期せん断応力比 α とし、 α の大きさや細粒分含有率の違いが破壊性状や液状化特性に与える影響について検討し、その結果、以下の4つの主要な知見を得ている⁸⁾。

- 1) 地盤の液状化破壊を初期せん断応力との関係で4タイプに分類した。 $\alpha=0$ での繰返しひずみ破壊（CFタイプ）、 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）、 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タイプ）、 α が大きく応力無反転だが体積収縮性が大きいためにひずみが急増する脆性的破壊（BSFタイプ）である。
- 2) 初期せん断応力比 α が大きくなるほど、砂の体積収縮性が小さい場合には液状化強度が増加し、体積収縮性が大きい場合にはBSFタイプの破壊が生じて強度が低下する。
- 3) 単調せん断試験での応力経路がひずみ軟化を示す場合には、繰返しせん断時に脆性的BSF破壊が起きる。それに対し、ひずみ硬化を示す場合には繰返しせん断

時に延性的 BGF 破壊が生じる。

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。

本稿では、上に示したこれまでの試験に加えて、新たに $D_r \approx 50\%$ の中密な細粒分含有砂を含む多種の条件の砂について非排水繰返しせん断試験と非排水単調せん断試験を同一条件の供試体で行った。そしてこれらの対比により初期せん断応力が液状化破壊性状に与える影響についての考察の幅を広げると共に、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のうち特に脆性的破壊 BSF タイプが生じる条件を明らかにすることを目指している。

2. 試験試料, 実験方法, 試験条件

試料は千葉県埋立地で採取した富津砂を用いたが、2011 年東北地方太平洋沖地震のように、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。

試験装置は前論文⁸⁾と同じく供試体内径 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製した供試体を通水後、背圧 196 kPa 負荷により飽和させ B 値が 0.95 以上であることを確認した後、有効拘束圧 $\sigma'_c = 98$ 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供試体水平面に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_d 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、せん断ひずみ速度約 0.5% /min に行う。

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。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、今回は構造物の自重によるせん断応力 τ_s が供試体水平面に加わっている状態で、同じ面に地震時の SH 波による繰返しせん断応力 τ_d が作用するパターンについて初期せん断応力が及ぼす影響を調べる。なお、前論文と同様に初期せん断面に加える初期せん断応力と有効直応力の比を初期せん断応力比 α とし、 $\alpha = \tau_s / \sigma'_m$ と定義した⁸⁾。

表-2 は試験条件の一覧である。目標相対密度 $D_r \approx 30\%$ と

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
5	2.739	1.717	1.323	1.070	0.595
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

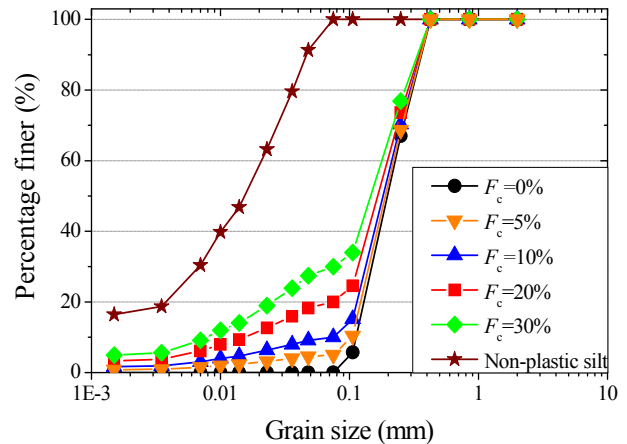


図-1 試料の粒径加積曲線

表-2 試験条件一覧

Test condition	目標 D_r (%)	F_c (%)	圧密後 D_r	α
Cyclic loading	30	0	26～31	0～0.35
		5	20～30	
		10	27～35	
		20	24～34	
		30	31～38	
	50	0	46～53	
Monotonic loading	30	10	26	0.125
		20	25～35	0～0.35
		30	37	0.125
		10	40～44	
		20	44～57	

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 0～35% の傾斜地盤に対応している。なお、砂の締め具合を表す指標として使われる相対密度 D_r 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 $F_c = 10 \sim 30\%$ の範囲で変化させた試料について、初期せん断応力比 $\alpha = 0 \sim 0.35$ に設定し試験を行った。

ところで、今回用いた一部の試験結果では 40% 程度のせ

ん断ひずみが生じているものもある。本来であれば、これらの実験結果についてはメンブレン張力の影響を考慮する必要があるが、本論文で注目しているせん断ひずみの急増点、並びにせん断応力のピーク付近への影響は少ないと判断し、メンブレン張力に対する補正は実施していない。加えて、単調せん断試験における終局状態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と疑われるが、こちらについてもせん断ひずみの急増点、並びにせん断応力のピーク付近への影響は小さいと判断している。

3. 繰返しせん断試験結果

(1) 初期せん断応力による破壊性状のタイプ分け

図-2は $D_r \approx 30\%$ 、 $F_c = 0 \sim 10\%$ における5条件の試験から得られた有効応力経路(上段)、せん断応力～せん断ひずみ関係(中段)、せん断ひずみの時刻歴(下段)を例示し、初期せん断応力比 α の大きさや細粒分含有率 F_c による収縮性の大きさの違いが発生残留ひずみに与えられる影響を(a)～(e)で比較している。

なお「体積収縮性」については「体積膨張性」と共に前論文から用いてきた用語である。Vaid and Chernの論文⁵⁾でも用いられている”contractive”と”dilative”に相当しており、定量的な定義ではないが、飽和砂を非排水せん断した時の応力～ひずみ関係にせん断応力のピークが現れ、そのあとも水圧上昇に伴いひずみ軟化する場合が体積収縮性の一応の目安と考えられる。

これまでは液状化破壊を4タイプに分類し検討を行ってきたが⁸⁾、新たに後述のBSLFタイプを定義することで、5タイプへ分類し直した。それぞれの破壊タイプについては前論文と重なる部分もあるが、改めてここに記述する。

(a) $F_c=0\%$ 、 $\alpha=0$ 、繰返し応力比 $R = \tau_d / \sigma'_m = 0.17$ は、繰返しせん断応力 τ_d が $\tau=0$ の中立軸から正負に均等に加わる場合

である。これは通常の液状化試験に相当し、せん断ひずみ γ 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けるせん断ひずみはゼロとなり、片側への残留ひずみはほぼ生じない。これはいわゆる水平地盤での繰返しせん断による破壊に対応しており、ここではCF (Cyclic Failure: 繰返し破壊)と名付けてタイプ分けする。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、初期せん断応力が作用していないため、初期せん断応力によるひずみは残留しない。

次に(b) $F_c=0\%$ 、 $\alpha=0.125$ 、 $R=0.23$ 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0を跨ぎ正負に変化(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。

これに対し、3番目の(c) $F_c=0\%$ 、 $\alpha=0.25$ 、 $R=0.17$ では $\tau_d < \tau_s$ の場合であり、 $\tau_s + \tau_d$ 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過剰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 の作用方向に地震の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、すなわち延性的に起きることとなる。このタイプをBGF (Biased Gradual Failure: 偏向延性破壊)と名付ける。

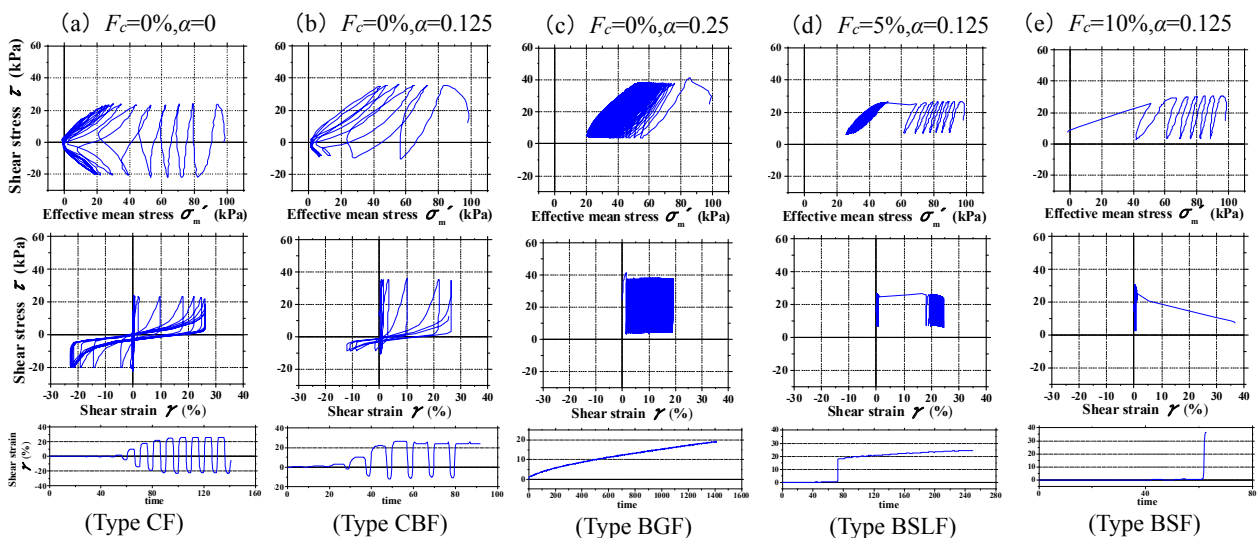


図-2 有効応力経路(上段)、せん断応力-せん断ひずみ関係(中段)、せん断ひずみの時刻歴(下段)($D_r \approx 30\%$)

(d) $F_c=5\%$, $\alpha=0.125$, $R=0.10$ も(c)と同じく $\tau_d < \tau_s$ の場合であるが、細粒分が存在することで体積収縮性が増加し、
 载荷の初期段階で初期せん断応力の作用方向に 15%以上の急激な残留ひずみが生じていることがわかる。しかし、
 その後は(c)と同様に、有効応力経路上で破壊線に接近した
 辺りから過剰間隙水圧の発生が頭打ちとなる。そして、
 それに伴う形で残留せん断ひずみの発生に歯止めがかかる
 傾向へと転じている。この破壊タイプを BGF と区別し、
 今回新たに BSLF (Biased Sudden Limited Failure : 偏向限定的脆性破壊) と名付ける。次に述べる BSF までの極限的
 破壊には至らないものの、残留ひずみは大きく発生するも
 ので、Vaid and Chern⁹⁾の研究ではこの破壊タイプを主な検
 討対象にとり上げている。

そして、(e) $F_c=10\%$, $\alpha=0.125$, $R=0.11$ は上記の(c) ,
 (d)と同じく $\tau_d < \tau_s$ の場合である。細粒分含有率が増加した
 ことにより、供試体の体積収縮性が(d)よりもさらに増し、
 有効応力が 40%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
 タイプを前論文と同じく 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。なお、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⁾。しかし、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
 りでダイレートしやすく、本来、せん断応力=0 の条件下
 で発生し易い水膜が現れにくい状態になっているためと思
 われる。

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、地盤の液状化における地盤の破壊形態は、繰返し
 ひずみと残留ひずみの観点から、5 タイプすなわち、CF
 タイプ、CBF タイプ、BGF タイプ、BSLF タイプ、BSF
 タイプに分類できることを示した。このような破壊形態そ
 ぞれの定義は決して新しいものではないが、初期せん断応
 力の影響の観点から統一的に分類する試みは新しく、液状
 化に対する構造物設計を考えるうえで参考になると考え
 られる。また、このように中空ねじりせん断試験による試
 験データを用いると、三軸試験データとは異なり圧縮・伸
 張異方性が関わらない形で初期せん断応力の影響が読み
 取れる。

(2) 初期せん断応力が液状化強度に及ぼす影響

図-3、図-4 は縦軸の繰返し応力比 $R=\tau_d/\sigma'_m$ に対するせん
 断ひずみ $\gamma=7.5\%$ に達するときの繰返し载荷回数 N_c の関係
 (液状化強度曲線) を目標相対密度 $D_r \doteq 30\%$ と 50% につい
 て示す。ただし、応力比 R を規定するせん断ひずみは両振
 幅 γ_{DA} あるいは片振幅 γ_{max} のいずれかが規定値に達した時
 点をとっている。なお、試験結果を前出の 5 種類の破壊タ

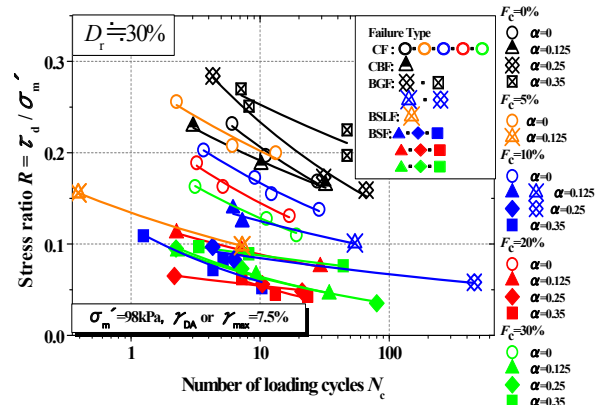


図-3 液状化強度曲線 ($D_r \doteq 30\%$)

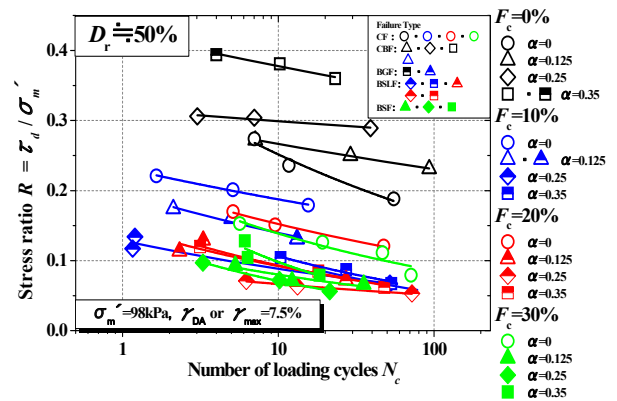


図-4 液状化強度曲線 ($D_r \doteq 50\%$)

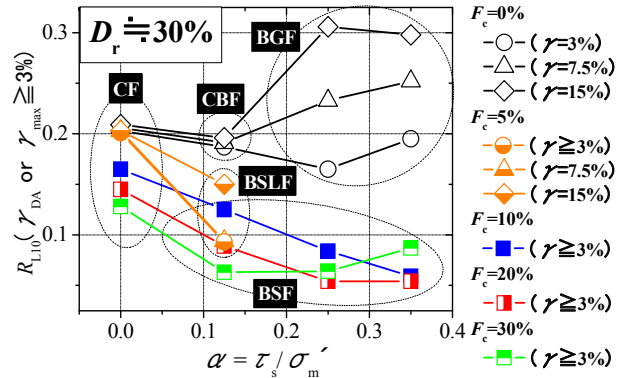


図-5 α に対する液状化強度の変化 ($D_r \doteq 30\%$)

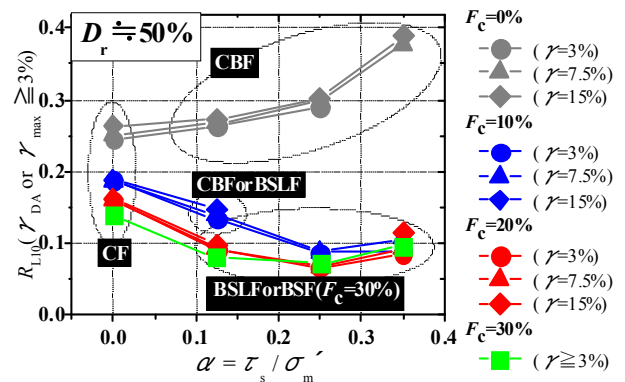


図-6 α に対する液状化強度の変化 ($D_r \doteq 50\%$)

イプ CF, CBF, BGF, BSLF, BSF に対応する異なる記号で示した。

これより、 $\alpha \neq 0$ の初期せん断応力が存在する場合について着目すると、 $F_c=0\%$ のクリーンサンドでは $D_r=30, 50\%$ の両条件共に破壊タイプは CBF か BGF になることがわかる。次に、 $D_r=30\%$ では $F_c=5\%$ 、 $D_r=50\%$ では $F_c=10\sim 20\%$ で BSLF の破壊タイプが生じるようになる。そしてさらに F_c が大きくなると BSF の脆性的破壊が生じるようになることがわかる。

ここで、 $N_c=10$ 回でせん断ひずみ $\gamma=3, 7.5, 15\%$ に達する繰返し応力比 τ_d/σ'_m を液状化強度 R_{L10} と表記し、液状化強度曲線から算出された液状化強度 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 γ の大きさの違いごとに $D_r=30\%$ と 50% についてそれぞれ図-5、図-6 に示す。

$F_c=0\%$ のクリーンサンドでは、 $D_r=50\%$ はもちろん、 $D_r=30\%$ でも体積収縮性が限定的なため、 α の増加とともに R_{L10} は増大する場合が多く見られた。また、その傾向は R_{L10} を定義するせん断ひずみ γ を大きくするほど明瞭となる。これは図-2 で例示したように、 $F_c=0\%$ の供試体が初期せん断応力の作用下では CBF あるいは BGF の破壊タイプとなっていることにより、段階的にひずみが増加する延性的な変形特性を反映しているためである。なお、図-5、図-6 の $F_c=0\%$ かつ $\alpha > 0$ の試験結果で、破壊を定義する γ ごとの R_{L10} が $D_r=30\%$ の方が $D_r=50\%$ より大きく変化しているのは、 $D_r=30\%$ では動的応力振幅 τ_d が初期せん断応力 τ_s より小さいために前述のように応力反転無反転条件 (BGF) となるのに対し、 $D_r=50\%$ では両振り条件で応力反転条件 (CBF) で水圧上昇が起こり易く、ひずみが急増するためである。

一方で、 $D_r=30, 50\%$ で $F_c=5\sim 30\%$ の場合ではいずれも

α を増加させると R_{L10} が単調に減少する傾向が目立つ。特に $D_r=30\%$ の $F_c=10\%$ 以上もしくは $D_r=50\%$ の $F_c=30\%$ の条件では、 R_{L10} を定義するせん断ひずみの大きさのすべて ($\gamma=3\sim 15\%$) についての $R_{L10}\sim\alpha$ 関係を一本のカーブで表わすことができる。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りひずみが一方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。これに対し、 $\alpha > 0$ の初期せん断が働いている場合については図-2 (e) に例示したように、BSF タイプにより一瞬にして破壊を定義する最大せん断ひずみを越えてしまうためこのような結果となる。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。そのため、設計上このタイプの発生可能性について特に留意することが必要となる。また、BGF と BSF の中間として今回 BSLF を新たに加えたが、BSF に比べ限定的ではあるが、BGF よりも残留ひずみが飛躍的に大きくなるのが特徴である。

4. 繰返しせん断・単調せん断試験結果の比較

これまで述べてきたように、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。

特に脆性的となる場合については危険性が大きいので、これが起きる条件に焦点を当て、非排水繰返しせん断試験と同条件の非排水単調せん断試験と比較し検討した。

既に、前論文⁸⁾ではその時点で明らかになった基本的特性

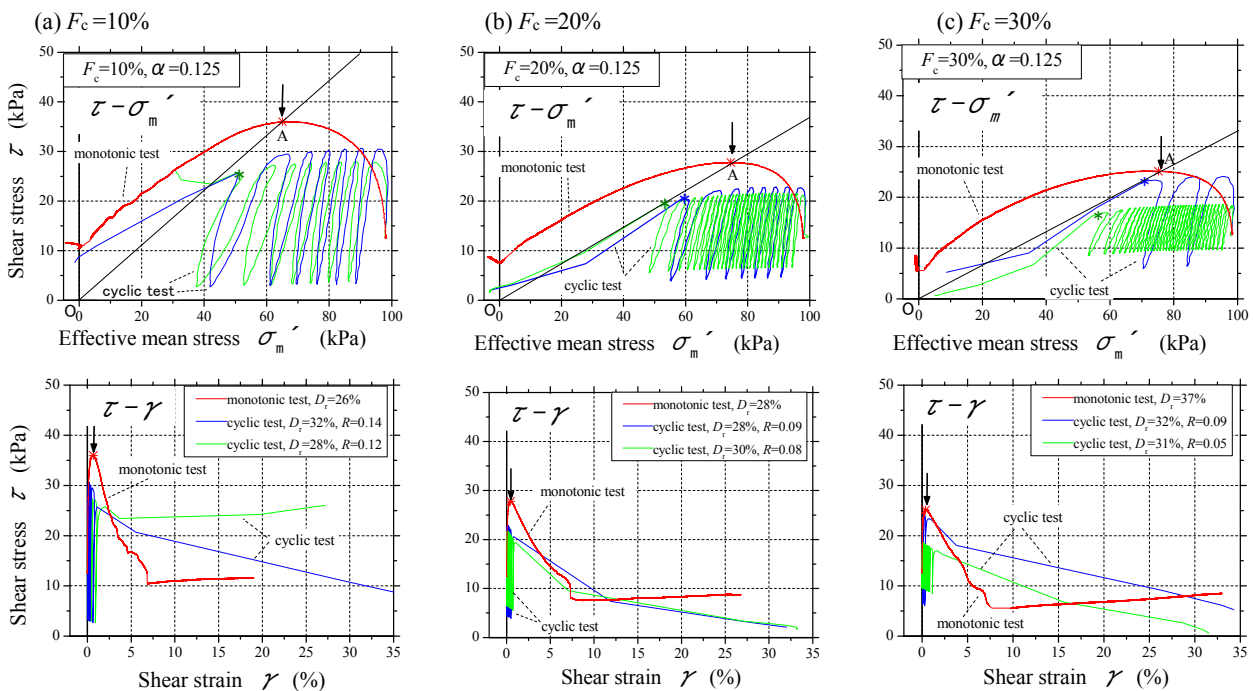


図-7 繰返し・単調せん断試験での $\tau\sim\sigma'_m$ (上) と $\tau\sim\gamma$ (下) の比較 ($D_r=30\%$, $\alpha=0.125$)

について述べた。特に前述のように単調せん断試験での有効応力経路がひずみ軟化を示す場合に脆性的破壊を起こすことを明らかにしている。ここでは、今回加えた広範な試験条件でのデータを含め、この破壊メカニズムについて再度検討を加える。

図-7は脆性破壊BSFに分類される $D_r \approx 30\%$, $\alpha=0.125$ での試験条件における、繰返し・単調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⁸⁾。その際、供試体の細粒含有率は(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相互比較している。上段グラフの単調せん断試験における $\tau \sim \sigma_m'$ 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、下段の $\tau \sim \gamma$ 関係を見ると、 $\gamma \approx 1\%$ の矢印と*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 $\tau \sim \sigma_m'$ 平面上での矢印と*印のピーク点に対応している。

そして、このせん断応力ピークについては、Vaid and Chern⁵⁾ やHyodoら⁶⁾ 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CSR (Critical Effective Stress Ratio) に、そして、これと原点を結んだ直線OAがCSRラインに相当していると考えられる。

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、ピーク強度だけでなくピークに対応したせん断ひずみが減少して変形性にも違いが現れている。

次に、繰返しせん断試験の結果から、図-7 (a) (b) (c) いずれについても繰返しせん断応力が加わることによって σ_m' が減少し、グラフに示す*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。しかも*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。このOAラインはIshihara ら¹¹⁾ が砂の非排水単調三軸試験に基づき定義した等せん断ひずみ線 (equi- γ line)あるいは降伏面に相当することは既に前論文⁸⁾ で述べたとおりである。有効応力経路がこの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。

図-8(a)～(f)は図-7と同様に脆性破壊 BSF に分類される $D_r \approx 30\%$, $F_c=20\%$ の条件もとて $\alpha=0 \sim 0.35$ と変化させ、得られた単調・繰返し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たものである。なお、 $\alpha=0$ については前述の通り、初期せん断応力の作用によって、せん断ひずみの急増が生じるBSFタイプとは破壊のメカニズムが異なるが、連続性を持たせた議論を行うために、ここでは $\alpha > 0$ の試験結果と一連の比較を行った。また、 $D_r \approx 30\%$, $F_c=20\%$, $\alpha=0.125$ については図-7(b)に示されている。

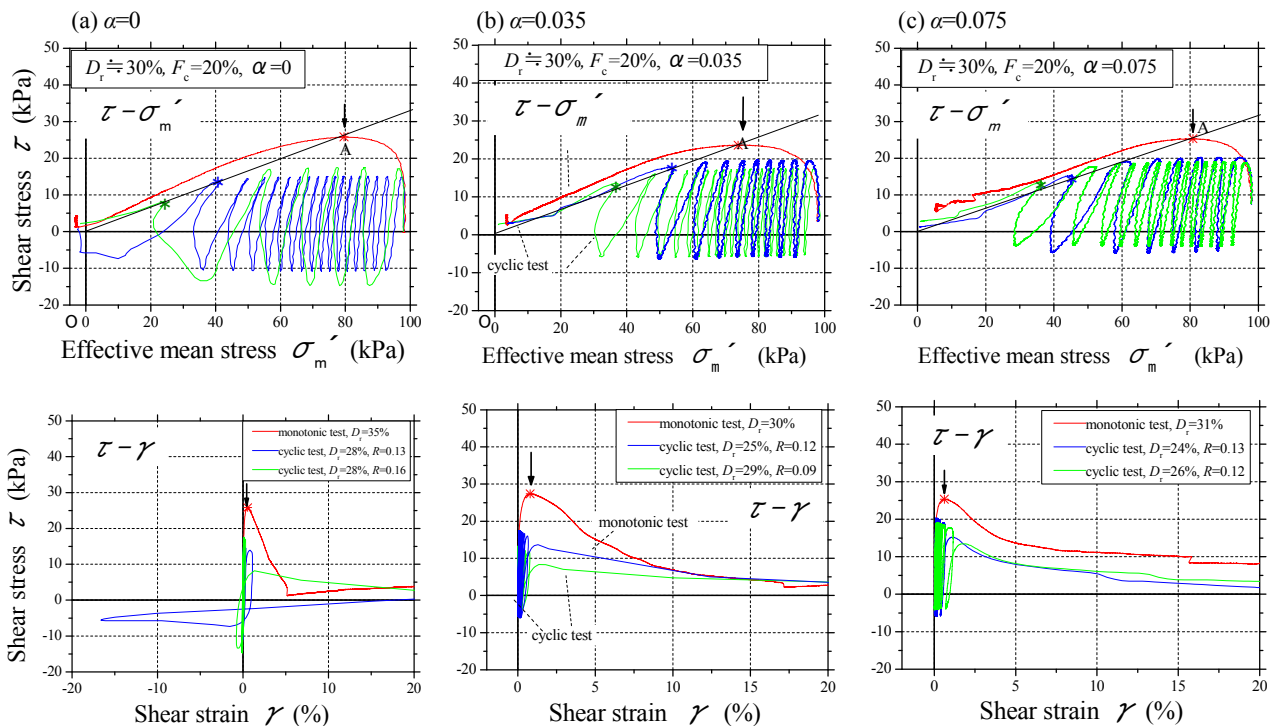


図-8 繰返し・単調せん断試験での $\tau \sim \sigma_m'$ (上)と $\tau \sim \gamma$ (下)の比較 ($D_r \approx 30\%$, $F_c=20\%$)

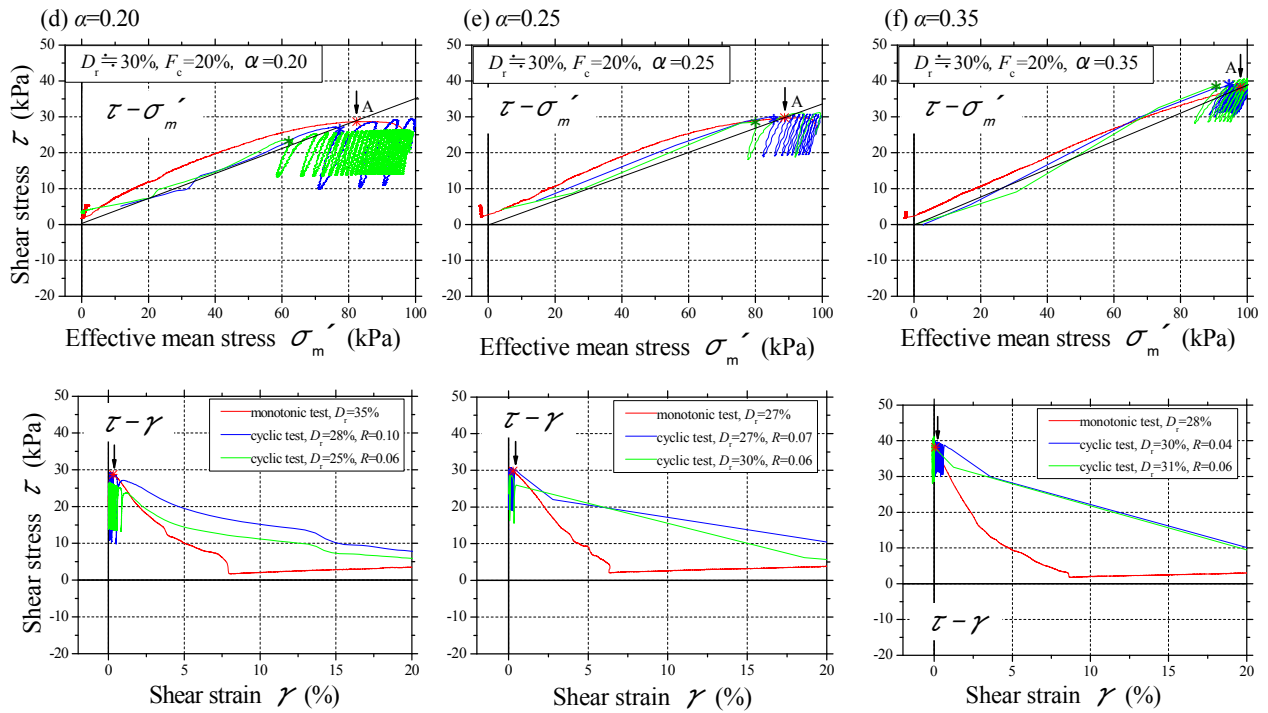


図-8 繰返し・単調せん断試験での $\tau \sim \sigma'_m$ (上) と $\tau \sim \gamma$ (下) の比較 ($D_r \doteq 30\%$, $F_c = 20\%$)

これより、 $\alpha=0 \sim 0.20$ までの繰返し載荷での応力経路が OA ラインに交わる辺りで急激な脆性的破壊が生じることが確認できる。このうち、 $\alpha=0.035$, 0.075 については応力反転が起きており、CBF タイプとなってもおかしくはないが、実際はBSFタイプの破壊が生じることもある。また、 $\alpha=0.25$, 0.35 についてはこの直線 OA に接近し流動が生じるというよりも、むしろ、この線を超えた辺りから急激な脆性破壊が生じている。これは、これらの初期せん断応力 τ_s が大きな条件では、 $\tau = \tau_s + \tau_d$ が荷重初期段階から OA ラインを超えるまで大きくなるためと考えられる。

図-9(a), (b)は $D_r \doteq 30\%$, $F_c = 20\%$, $\alpha = 0 \sim 0.35$ の条件における単調せん断試験から得られた有効応力経路(a)とせん断応力 - せん断ひずみ関係(b)を重ね書きし比較したものである。図-7, 図-8 と同様に、せん断応力ピーク点は図中

に*印で表した。(a)の有効応力経路を見てみると、 $\alpha=0 \sim 0.25$ までの試験結果のピーク点は $\alpha=0.125$ を除き、原点との角度 ϕ'_y がほぼ 18° の直線上に分布しており、前述のように脆性破壊を規定する CSR ラインに対応していると考えられる。なお $\alpha=0.125$ については 2° 程度とそれほど大きくはないが ϕ'_y に明瞭な差が生じており、試験の実施時期が 1 年程度異なっていることが何らかの影響を与えている可能性がある。また、 $\alpha=0.35$ では非排水せん断の出発点ですでに CSR ラインを超えており、最初から脆性破壊が始まっていることがわかる。

さらに、せん断応力 - せん断ひずみ関係について着目すると、 α が大きくなるにつれ、*印で示すせん断応力のピーク強度をより早いせん断ひずみ進行の時点で迎えるようになることがわかる。すなわち、初期せん断応力が加わるほど、

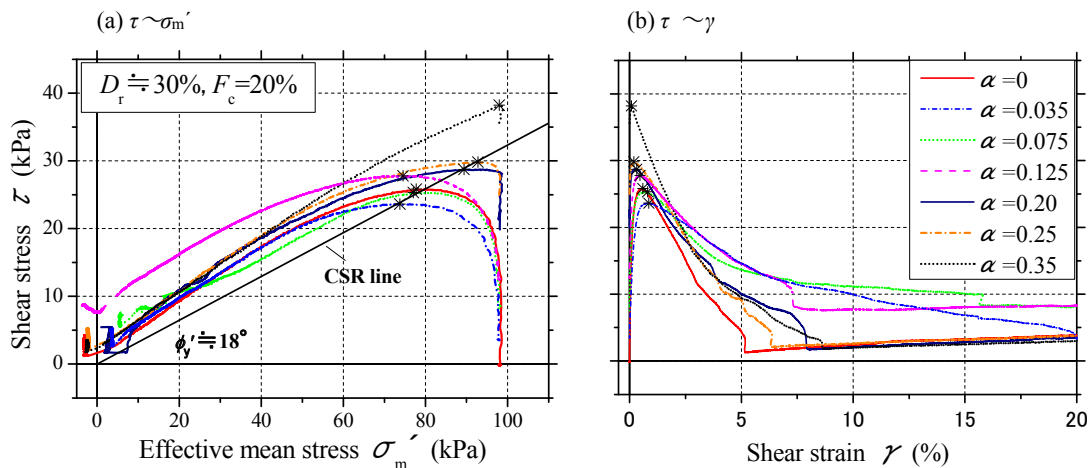


図-9 単調せん断試験での $\tau \sim \sigma'_m$ 関係と $\tau \sim \gamma$ 関係の重ね書きによる比較 ($D_r \doteq 30\%$, $F_c = 20\%$)

非排水単調せん断によって小さな限界ひずみで脆性破壊が起きることを意味している。また、非排水繰返しせん断についても単調せん断ほど明瞭ではないが類似の傾向を読み取ることが図-8で確認できる。すなわち、初期せん断による液状化破壊がBSFタイプとなる場合、 α が大きくなるほど脆性の破壊が小さなひずみで生じやすくなることを意味している。

5. 脆性破壊発生条件の検討

以上より、脆性的BSF破壊において流動が生じる条件は α によらず $\tau \sim \sigma'_m$ 平面上で地盤材料の条件ごとに概ね直線OA (CSRライン)によって一意的に決まる可能性が示唆された。以降では、有効応力経路上で脆性破壊を規定するこの直線OAの角度 ϕ'_y に着目し、広範な条件で行った単調・繰返しせん断試験の結果を整理・検討する。

図-10~13は $D_r \doteq 30, 50\%$ でBSFタイプの破壊形態となる試験結果について、初期せん断応力比 α と角度 ϕ'_y の関係を細粒分含有率 F_c ごとに示したものである。単調せん断試験は白抜きのプロット、繰返しせん断試験は塗りつぶしのプロットで表している。ただし、図-13は繰返し試験の結果のみ示している。なお、繰返しせん断試験ではBSF破壊タイプについて図-7~図-9に*印で例示したように、有効応力経路上でせん断ひずみの急増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、図-8に示したような直線OAの角度を求めそれを ϕ'_y とした。また、図中に示す線は繰返しせん断試験の平均値を結んだものである。

まず図-10より、 ϕ'_y は $D_r \doteq 30\%$ 、 $F_c = 10\%$ では $\alpha = 0.125 \sim 0.35$ においてばらつきはあるものの平均 $24 \sim 25^\circ$ で値はほぼ横ばいとなっていることが見て取れる。一方、図-11の $D_r \doteq 30\%$ 、 $F_c = 20\%$ に着目すると、両試験共に $\alpha = 0.25$ まではほぼ $19 \sim 20^\circ$ で横ばいとなっているものの、その後、繰返しせん断試験の ϕ'_y は増加する傾向となっており、単調せん断試験の結果と差が多少開く傾向が見てとれる。これは $\alpha = 0.35$ では先ほど述べたように $\tau = \tau_s + \tau_d$ が載荷開始段階でCSRラインを超えてしまっているためだと考察される。さらに、図-12の $D_r \doteq 30\%$ 、 $F_c = 30\%$ では $\alpha = 0.125$ までは $15 \sim 16^\circ$ 、図-13の $D_r \doteq 50\%$ 、 $F_c = 30\%$ では $\alpha = 0.25$ まで $19 \sim 21^\circ$ で ϕ'_y はそれぞれほぼ一定の値をとっており、それより α を増大させると増加に転じている。このことから $D_r \doteq 30\%$ 、 $F_c = 20\%$ と同様に $\tau = \tau_s + \tau_d$ がCSRラインをこの付近で超えているためと考えられる。

図-10~12より、 ϕ'_y の値は $D_r \doteq 30\%$ の条件で比較すると F_c の増加とともに明らかに減少していることがわかる。また、繰返しせん断試験から得られる角度 ϕ'_y と、単調せん断試験より得られる角度 ϕ'_y は $1 \sim 2^\circ$ 程度の誤差はあるもののほぼ一致していることが分かる。よって、前述の通り、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急激な脆性破壊を起こすと解釈できる。

図-14は図-10~13に示した繰返しせん断試験の平均値を

結んだ線を一枚のグラフに重ね書きしている。これより、 ϕ'_y は同じ $D_r \doteq 30\%$ に対し F_c が増加するほど小さくなり、 $\phi'_y \doteq$ 一定の α の範囲が短くなり、 $F_c = 30\%$ 一定の条件では $D_r \doteq 50\%$ に比べ $D_r \doteq 30\%$ の方が ϕ'_y が系統的に小さくなる。すなわち、 F_c や D_r の変化による砂の体積収縮特性に対応して ϕ'_y が変化する傾向が読み取れる。

図-15は、 $D_r \doteq 30, 50\%$ 、 $F_c = 10 \sim 30\%$ 、 $\alpha = 0 \sim 0.35$ の条件の繰返しせん断試験のうち、脆性的破壊形態を示す結果より得られた ϕ'_y を細粒分含有率 F_c に対してプロットしたものである。これらのプロットのうち、 $D_r = 30\%$ で $\alpha = 0.125, 0.25, 0.35$ については $F_c = 10, 20, 30\%$ のデータそれぞれの平均値を折れ線で結んでいる。

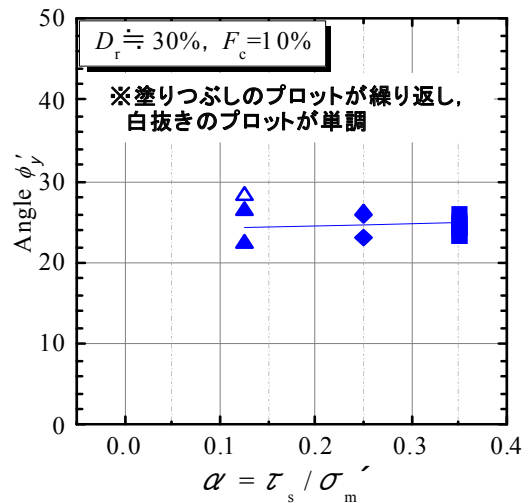


図-10 α に対する ϕ'_y の変化 ($D_r \doteq 30\%$ 、 $F_c = 10\%$)

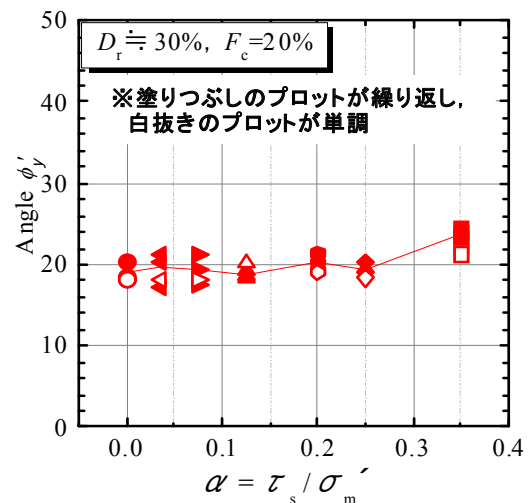


図-11 α に対する ϕ'_y の変化 ($D_r \doteq 30\%$ 、 $F_c = 20\%$)

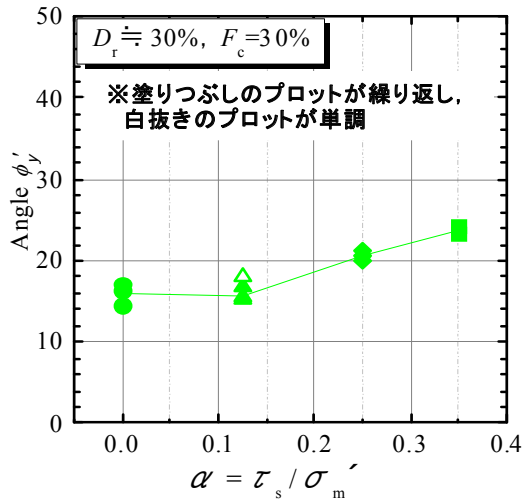


図-12 α に対する ϕ'_y の変化 ($D_r=30\%$, $F_c=30\%$)

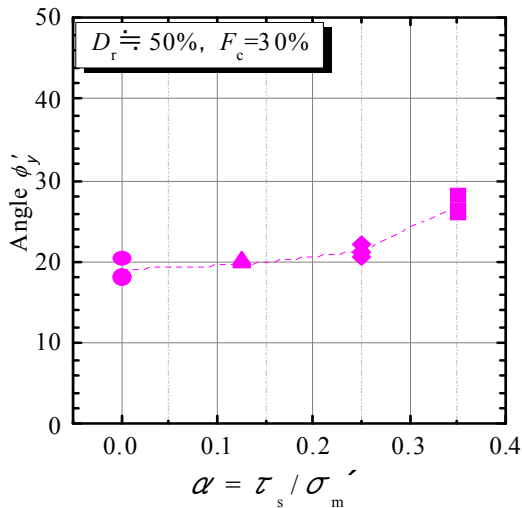


図-13 α に対する ϕ'_y の変化 ($D_r=50\%$, $F_c=30\%$)

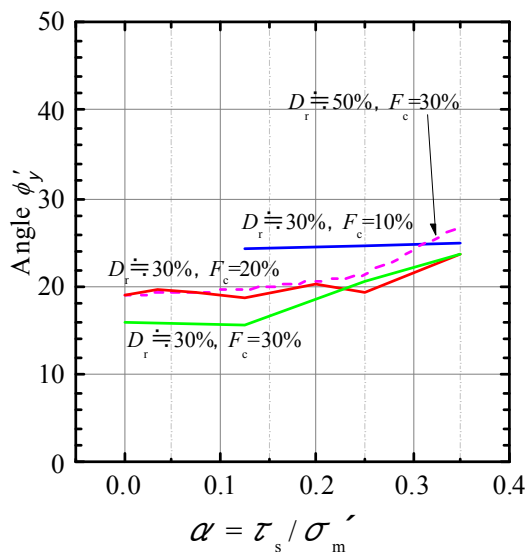


図-14 α に対する繰返し試験の ϕ'_y の平均値の変域

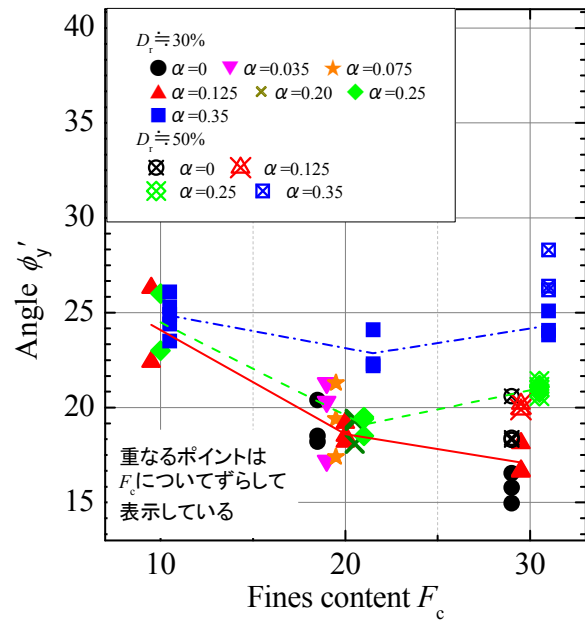


図-15 繰返しせん断試験での F_c 及び α に対する ϕ'_y の変化 (BSF タイプ)

これより、 $D_r=30\%$ について見ると、 F_c を増加させると α が小さな場合ほど ϕ'_y は明瞭な減少傾向を示すのが目立つ。ただし、初期せん断応力比 α が大きくなるほど F_c の増加にともない途中から ϕ'_y が増加に転じる傾向も読み取れる。これには上でも述べた通り、せん断応力 $\tau = \tau_s + \tau_d$ とCSRラインの大小関係が関わっていると考えられる。一方、 $D_r=50\%$ のプロットは $F_c=30\%$ についてしかないが、すべての α で $D_r=30\%$, $F_c=30\%$ に比べて同程度かまたは大きな ϕ'_y を与えている。これより、前述のように ϕ'_y の値は F_c や D_r の大きさによって変化する供試体の体積収縮性の大きさによって決まると考えられ、その値は体積収縮性が大きいほど低くなると言えよう。

以上をまとめれば、単調せん断試験より求まる ϕ'_y は脆性的BSFタイプの破壊におけるせん断ひずみの急増点、つまり流動破壊の開始点を評価する上で有用な指標であることが示された。ただし、 α が大きく τ_{max} がCSRラインを超えてしまうような条件については破壊のメカニズムがそれ以下の条件とは異なると考えられ、こうした条件も合わせて評価を行うためには、さらなる検討が必要である。

6. 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 α が液状化破壊形態に与える影響を検討した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 地盤の液状化破壊を初期せん断応力との関係で 5 タイプに分類した。つまり $\alpha=0$ で初期せん断応力の加わら

ない水平地盤での液状化に対応した繰返し破壊 CF タイプ (Cyclic Failure), 初期せん断応力比 α が小さい範囲での両振り繰返し破壊 CBF タイプ (Cyclic Biased Failure), α が大きな範囲での片振り延性的破壊 BGF タイプ (Biased Gradual Failure) と破壊傾向が一時的脆性から延性的へと遷移する BSLF タイプ (Biased Sudden Limited Failure), 脆性的破壊 BSF タイプ (Biased Sudden Failure) 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。 $F_c=0\%$ で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), 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 タイプまたは BGF タイプの延性的なものとなる。一方で, $F_c\geq 5\sim 10\%$ で体積収縮性が大きい条件では, α の増大によって液状化強度は低下する。また破壊形態は, $D_r=30\%$ で $F_c=5\%$, あるいは $D_r=50\%$ で $F_c=10\sim 20\%$ では, BSLF タイプとなる。そして, さらに体積収縮性の増した $D_r=30\%$ で $F_c=10\%$ 以上もしくは $D_r=50\%$ で $F_c=30\%$ の条件では BSF タイプの脆性的破壊が生じる。
- 3) BSF 破壊は, 単調せん断試験での有効応力経路上のピークせん断強度の座標点 A と原点 O を結ぶ応力~ひずみ曲線の降伏面 OA (CSR ライン) 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。ただし, α が大きくせん断応力 $\tau=\tau_s+\tau_d$ が CSR ラインを超える条件ではこの降伏面を超えた後に破壊が生じる。
- 4) 繰返しせん断試験で BSF 脆性破壊が生じる条件を対象として, せん断ひずみの急増点の応力状態から ϕ_y' を求め, 単調せん断試験での降伏面の角度 ϕ_y' と合わせて初期せん断応力比 α に対して整理したところ, 単調・繰返しの両試験より求まる ϕ_y' はある程度の誤差は見られるものの良い整合性を示した。各条件での CSR ラインをせん断応力 $\tau=\tau_s+\tau_d$ が超えるまでは ϕ_y' は α に対し横ばいとなり, それ以降では繰返し試験の ϕ_y' は増加に転じる。
- 5) 繰返しせん断試験から求まる ϕ_y' は体積収縮性の増加 (細粒分含有率 F_c の増加や D_r の減少) に対して明瞭な低下傾向を示すが, α が大きくなると途中から増加に転じる傾向も表れる。

以上より, BSF タイプの脆性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はらうべき破壊形態であり, その破壊開始点は単調・繰返しのせん断方法によらず, 同一の降伏面により規定されることを異なる条件による多数の試験により示した。また, 降伏面の角度 ϕ_y' の初期せん断応力比 α や細粒分含有率 F_c による変化傾向を明らかにした。ただし, これらは室内要素試験結果から見た極めて基本的かつ定性的な知見であるため, さらに広い条件をカバーした実験や模型実験など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。

謝辞: 本研究を進めていく上で, 筆者らの研究室で精力的に試験に取り組んでくれた卒業研究生の日下芽衣さんに謝意を表します。

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) 國生剛治: 地盤地震動力学の基礎, 第 5 章 地盤の液状化, 鹿島出版 pp. 167-276, 2014
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 日下拓哉, 國生剛治, 新井良太郎: 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・単調せん断試験による検討-, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 69, No. 1, pp. 80-90, 2013.
- 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.

(2014. 5. 9 受付)

Effect of Initial Shear Stress on liquefaction failure and shear strain development by Hollow Cylindrical Torsional Shear Tests

Ryoutarou ARAI¹, Takaji KOKUSHO² and Takuya KUSAKA³

1 Graduate Student, Department of Civil & Environmental Engineering, Chuo University

2 Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Chuo University

3 Technical Development Department, Central Japan Railway Company

Abstract

Soil liquefaction under initial shear stress induced by nearby slopes, embankments and superstructures causes large shear failure in the ground, leading to sliding, tilting and uneven settlement of the structures. In this study, a hollow torsional shear apparatus is used to investigate the effect of initial shear stress acting on horizontal plane 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 five types; cyclic failure (CF) for $\alpha=0$, cyclic biased failure (CBF) for small α , biased gradual failure (BGF) and biased sudden limited failure (BSLF) and biased sudden failure (BSF) for larger α . Among the 5 failure types, it is important to pay special attention to BSF type, which may develop abrupt strain increase due to initial shear stress by cyclic loading. In comparing with undrained monotonic loading tests, the mechanism of the abrupt BSF has been clarified. The angle of a yielding surface ϕ_y' corresponding to the BSF has been studied under the effect of initial stresses for test specimens with different contractive behavior caused by parametrically changing fines content and relative density. It has been demonstrated that the BSF type failure is controlled by the angle ϕ_y' reflecting contractive behavior of sand, irrespective of the magnitude of initial stress.

Key words: liquefaction, initial shear stress, failure type, fines content, relative density