

# 三軸液状化試験により変化する砂粒子配向性と液状化強度の関係

長岡技術科学大学大学院 CHAVEZ GARCIA CARLOS ALAIN

指導教員 豊田浩史

## 1. はじめに

液状化は、地震やその他の振動が原因で、主に飽和した砂質土壌で発生する現象である。砂粒子配向性及び液状化に関する研究は、地震時に砂質土が液状化するメカニズムを理解し、被害を予測し防止する方法を探ることを目的としている。砂粒子の配向性は、土のせん断強度や圧縮性に影響を及ぼし、液状化のしやすさに影響する。微小ひずみ及び液状化に関する研究は、地震などの外部からの力によって引き起こされる土の微小なひずみから液状化に至るまでのプロセスを解明することである。これらの研究成果は、液状化現象のメカニズムを解明し、地震による被害を防ぐための予測手法の高度化に利用できる。

## 2. 試験内容

### 2.1 三軸非排水繰返し試験機について

本研究で用いる試験機は、セル内完全浸水式三軸試験機である。本試験機の、供試体上部のキャップ、供試体下部のペデスタルにベンダーエレメントを内蔵しており、供試体内部に  $\sin$  波を発信し、非破壊のせん断波測定試験を行うことができる。また、本試験機には供試体に局所微小ひずみ測定装置を設置することができ、せん断過程において、軸方向と水平方向のひずみを測定することができる。

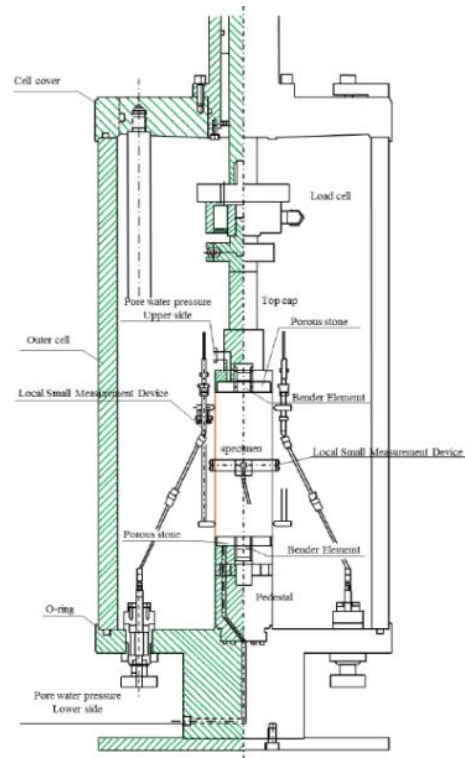


図 1 三軸試験機

### 2.2 供試体作製方法

本研究では、空中落下法で堆積角度  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  供試体を作製した。空中落下法は試料をふるいから自然落下させて供試体を作製する方法である。その際に、モールドの角度を変えることで堆積角度を決めることができる。本研究では供試体の相対密度  $D_r$  を均一に作製するために、落下高さが常に一定となるように調整を行った。モールド内に乾燥試料を一定量入れた後、水槽内に一定の流速で通水し、試料を水浸させ、一定の水位を保った。水槽の水を取り除いた後、水槽内からモールドを取り出し、負圧により脱水し、直ナイフとトリマーにより直径 50 mm、高さ 125 mm の円柱供試体を成形した。

## 2.3. 試験手順

本研究では、漏斗堆積法で供試体を作製し、三軸室に設置した後、供試体を飽和させる。飽和の確認をしたのちに、背圧を作用させ、供試体は平均有効主応力  $p'=50\text{kPa}$  で圧密を行う。その後、非排水繰返し載荷を行い、供試体の液状化を行う。繰返し載荷終了後には供試体内の間隙水を排水しながら平均有効主応力  $p'=50\text{kPa}$  で再圧密を行う。

## 3. 試験結果

### 3.1 マイクロスコープ分析

#### 3.1.1 粒度配向性 $0^\circ$

$0^\circ$  の配向の場合、液状化後に  $90^\circ$  付近で増加傾向が観察されて VM の値が落ち行くことが確認できました (図 2 と図 3)。

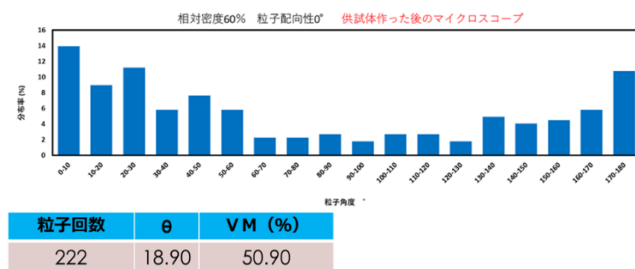


図 2 配向性  $0^\circ$  液状化前マイクロスコープ分析

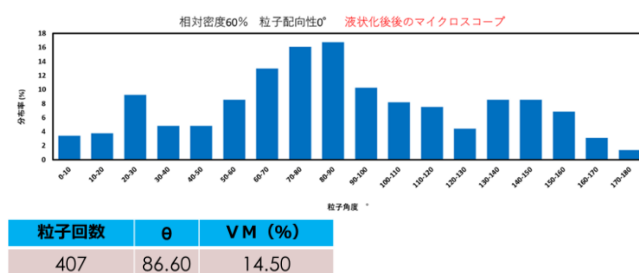


図 3 配向性  $0^\circ$  液状化後マイクロスコープ分析

#### 3.1.2 粒度配向性 $45^\circ$

$45^\circ$  の配向の場合、液状化前と比べて、液状化後に  $90^\circ$  から  $100^\circ$  付近で粒子配向の分布が増加傾向を示します (図 4 と図 5)。しかし VM に関してはほぼ同じ値がでました。

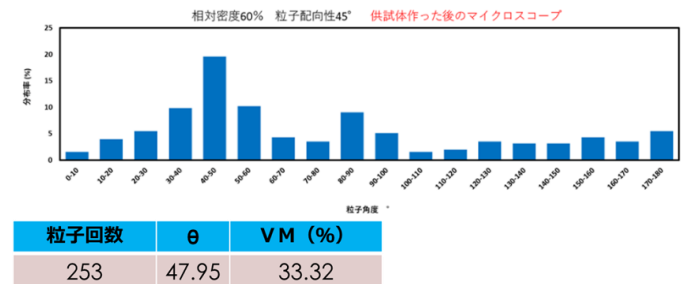


図 4 配向性  $45^\circ$  液状化前マイクロスコープ分析

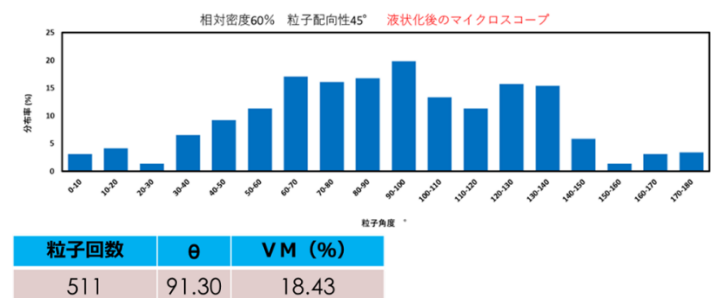
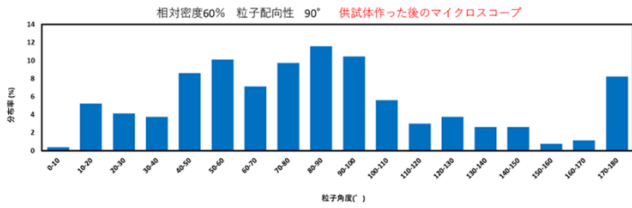


図 5 配向性  $45^\circ$  液状化後マイクロスコープ分析

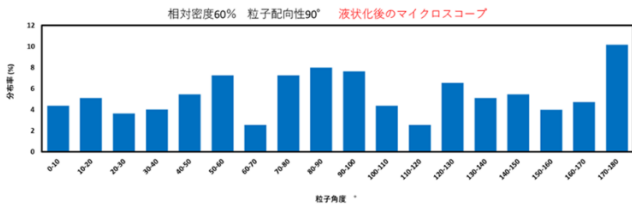
#### 3.1.3 粒度配向性 $90^\circ$

$90^\circ$  の配向の場合、粒子配向の分布で減少傾向および角度の減少を示します。図 7 はこれらの観察をさらに支持し、液状化後に  $0^\circ$  および  $45^\circ$  の  $\theta$  値が増加するが、 $90^\circ$  の配向の角度 ( $^\circ$ ) は減少することを示しています。これらの結果は、液状化プロセスが粒子の配向に影響を与え、分布パターンの変化を引き起こすことを示唆しています。グラフィカルな比較と分析は、液状化が土試料の織物異方性に与える影響を理解するのに役立ちます。



粒子回数	$\theta$	VM (%)
264	69.65	35.9

図 6 配向性 90° 液状化前マイクロSCOPE分析



粒子回数	$\theta$	VM (%)
270	62.12	24.26

図 7 配向性 90° 液状化後マイクロSCOPE分析

### 3.2 BE試験と微小ひずみ結果

ここで行う試験条件は表 1 と表 2 に示す。

配向性	w (%)	液状化前				
		BE Go	LSS Go	$D_r$ (%)	$N_c/1$ $\epsilon a=1\%$	$\sigma_d / 2\sigma'_c$
0°	26.42	60.000	63.00	62.60	15.5	0.20
	25.75	61.000	61.00	64.89	6.5	0.25
	26.18	62.000	61.00	63.87	2.5	0.30
45°	25.60	61.000	64.00	65.65	20.5	0.20
	26.55	65.000	64.00	61.83	10.5	0.25
	25.41	62.000	61.00	68.45	4.5	0.30
90°	26.25	71.000	70.00	58.27	33.5	0.20
	25.41	73.000	72.00	68.70	18.0	0.25
	26.09	73.000	71.00	62.34	9.5	0.30

表 1 液状化前試験条件

配向性	w (%)	液状化後				
		BE Go	LSS Go	$D_r$ (%)	$N_c/2$ $\epsilon a=1\%$	$\sigma_d / 2\sigma'_c$
0°	26.42	75.000	73.000	64.63	27.5	0.20
	25.75	72.000	72.000	66.92	8.5	0.25
	26.18	71.000	74.000	66.16	4.5	0.30
45°	25.60	76.000	77.000	67.94	23.0	0.20
	26.55	78.000	76.000	63.87	11.5	0.25
	25.41	77.000	74.000	76.00	9.0	0.30
90°	26.25	65.000	66.000	60.31	20.5	0.20
	25.41	69.000	63.000	70.74	13.5	0.25
	26.09	65.000	64.000	65.39	3.5	0.30

表 2 液状化後試験条件

図 8 と図 9 からわかるように、0° 配向では、液状化前の Go は 61MPa から液状化後に 72MPa になる増加傾向があった。これは、表 1 からわかる密度の増加の他、粒子の配置が影響していると考えられる。45° 配向でも、液状化前の Go は 65MPa から液状化後 78MPa と増加している。90° 配向では、0° および 45° 配向と比較して液状化前の Go が大きく、液状化後は、0° および 45° 配向で Go が増加したのに対して、90° 配向では減少した。密度が増加したにもかかわらず Go が減少したのは、粒子の配向が変化したからと考えられる。さらに、図 2 と図 3 から、ベンダーエレメント試験と微小ひずみ LSS 試験の結果は一致していることがわかる。

液状化により粒子の配向が変化すると、その土の剛性や強度が変わります。0° 配向の場合、液状化前の剛性 (Go) が 61MPa から液状化後に 72MPa に増加しており、これは粒子がより効率的に配向し、より密な構造を形成していることを示している可能性があります。45° 配向でも同様に、液状化後に Go が 65MPa から 78MPa へと増加しており、粒子の密度が増加していることが考えられます。

一方で、90° 配向では、液状化前後で Go が減少しています。これは、液状化によって粒子が 90° 付近で減少するため、配向が変化した、粒子

間の接触が減少して土の剛性が低下したと考えられます。つまり、 $0^\circ$  および  $45^\circ$  の配向では粒子が液状化によってより密な配向へと変化し、剛性が増加するのに対し、 $90^\circ$  配向では粒子の減少による接触の喪失が剛性の低下を招いているのです。

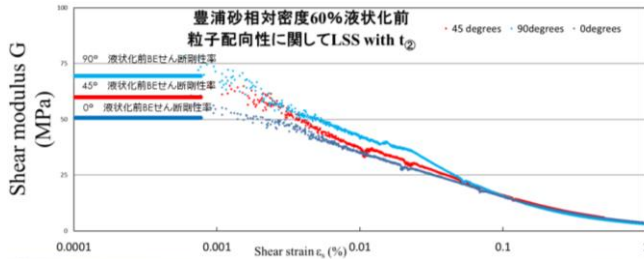


図8 液状化前微小ひずみと BE 試験比較

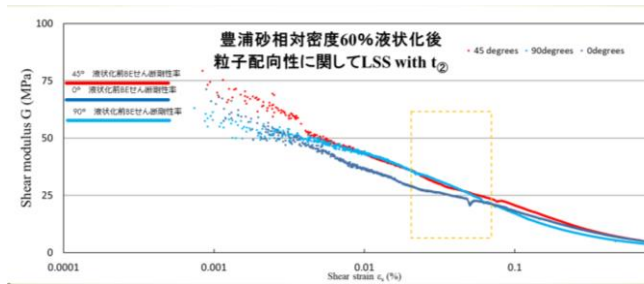


図9 液状化後微小ひずみと BE 試験比較

### 3.3 液状化強度特性

軸方向ひずみ ( $\epsilon_a$ ) を水平軸に、偏差応力 ( $q$ ) を垂直軸にとった応力-ひずみ曲線と、平均有効主応力 ( $p'$ ) を水平軸にとった応力経路を図 10 から図 27 までに示す。

#### 3.3.1 粒度配向性 $0^\circ$ $q = 20\text{kPa}$

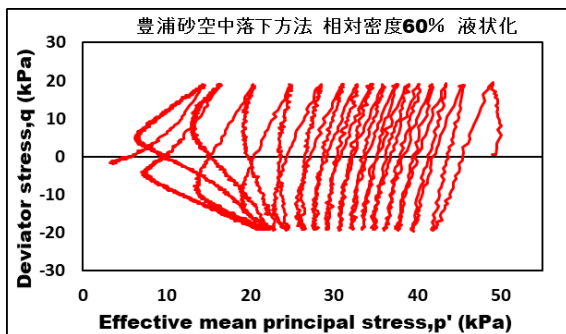


図10 平均有効主応力 ( $p'$ ) と偏差応力 ( $q$ )

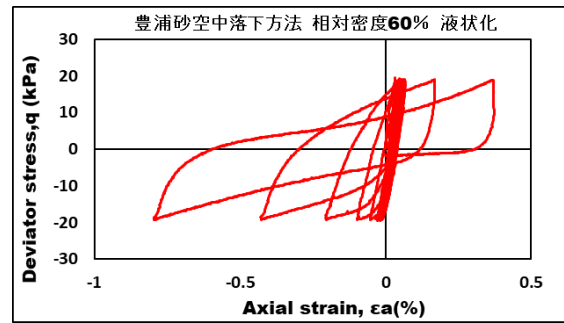


図11 軸方向ひずみ ( $\epsilon_a$ ) と偏差応力 ( $q$ )

#### 3.3.2 粒度配向性 $0^\circ$ $q = 25\text{kPa}$

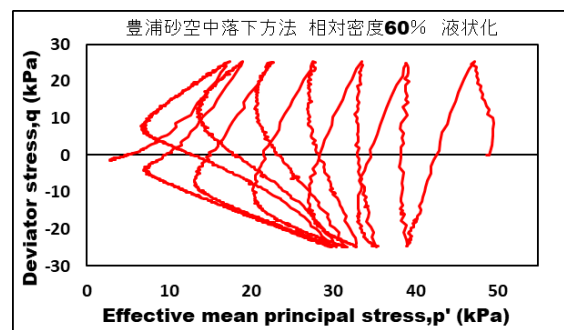


図12 平均有効主応力 ( $p'$ ) と偏差応力 ( $q$ )

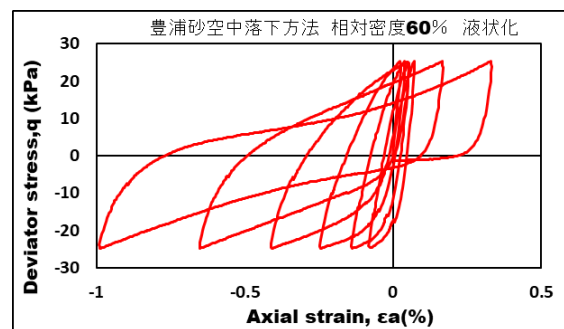


図13 軸方向ひずみ ( $\epsilon_a$ ) と偏差応力 ( $q$ )

### 3.3.3 粒度配向性 0° q = 30kpa

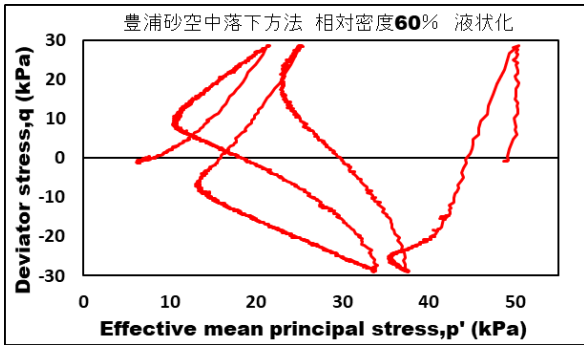


図 14 平均有効主応力 (p') と偏差応力 (q)

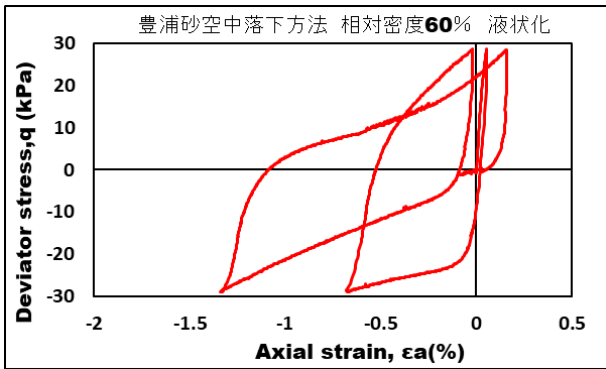


図 15 軸方向ひずみ (εa) と偏差応力 (q)

### 3.3.4 粒度配向性 45° q = 20kpa

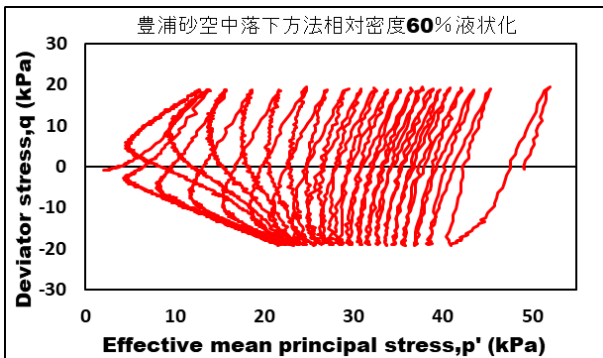


図 16 平均有効主応力 (p') と偏差応力 (q)

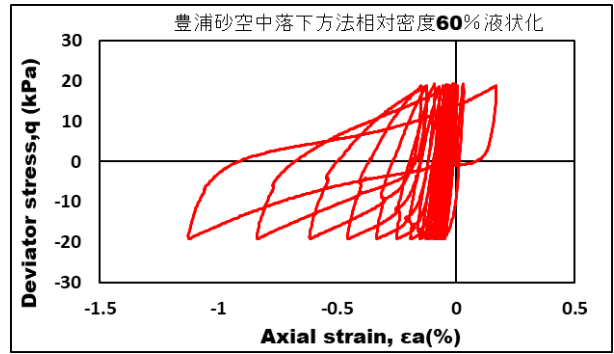


図 17 軸方向ひずみ (εa) と偏差応力 (q)

### 3.3.5 粒度配向性 45° q = 25kpa

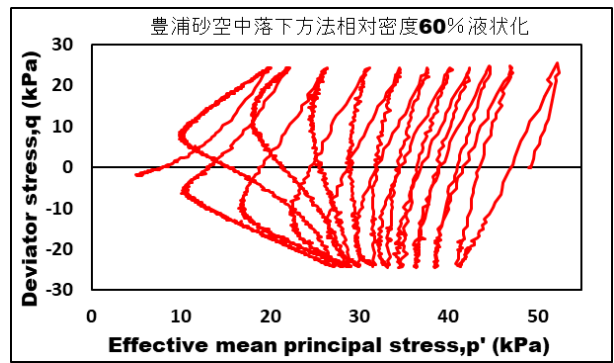


図 18 平均有効主応力 (p') と偏差応力 (q)

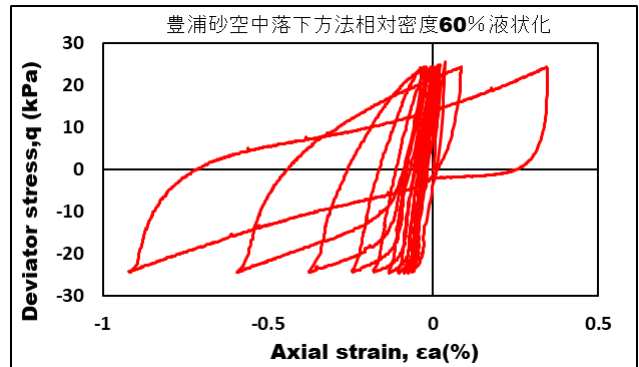


図 19 軸方向ひずみ (εa) と偏差応力 (q)

### 3.3.6 粒度配向性 45° q = 30kpa

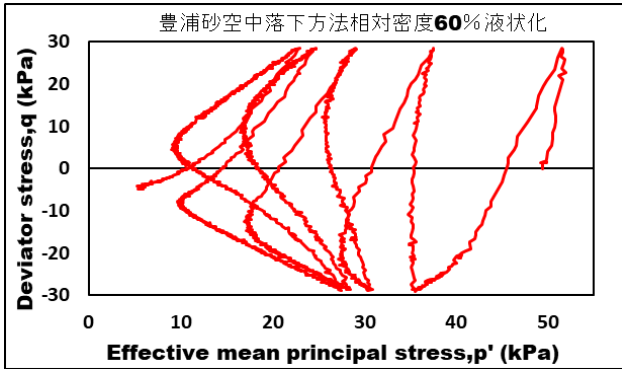


図 20 平均有効主応力 (p') と偏差応力 (q)

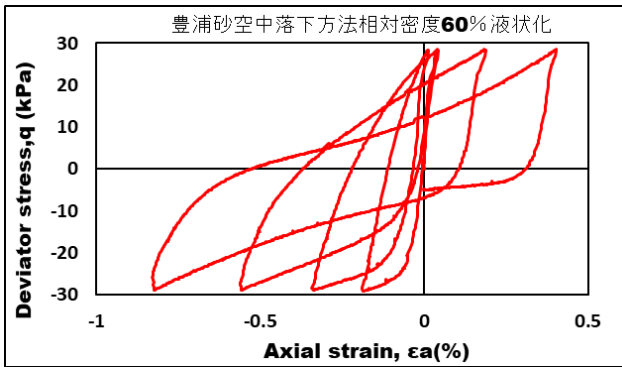


図 21 軸方向ひずみ (εa) と偏差応力 (q)

### 3.3.7 粒度配向性 90° q = 20kpa

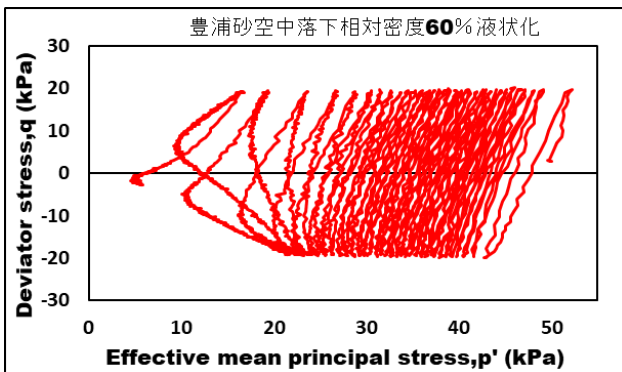


図 22 平均有効主応力 (p') と偏差応力 (q)

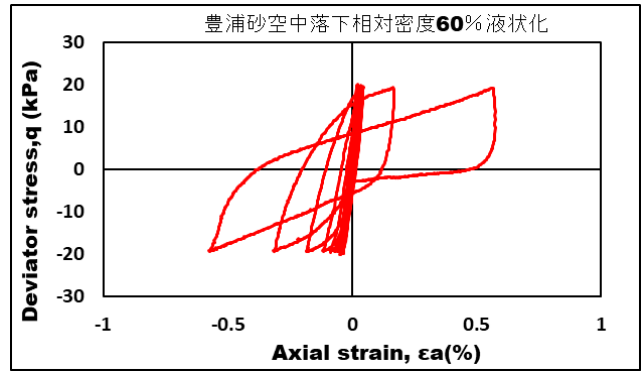


図 23 軸方向ひずみ (εa) と偏差応力 (q)

### 3.3.8 粒度配向性 90° q = 25kpa

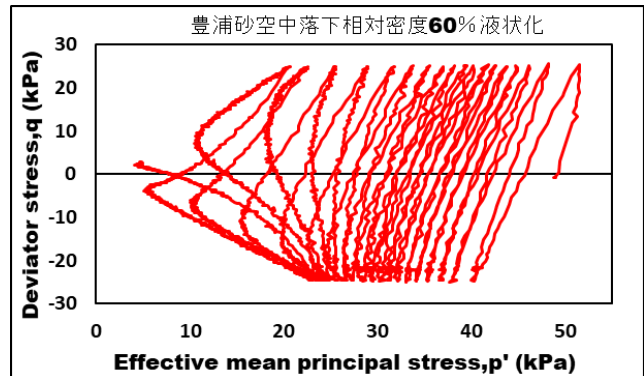


図 24 平均有効主応力 (p') と偏差応力 (q)

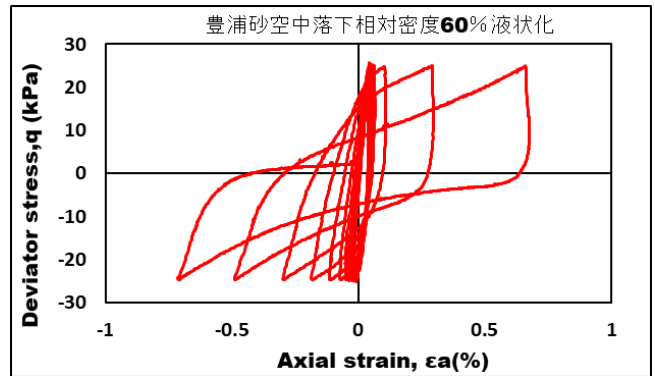


図 25 軸方向ひずみ (εa) と偏差応力 (q)

### 3.3.9 粒度配向性 90° q = 30kpa

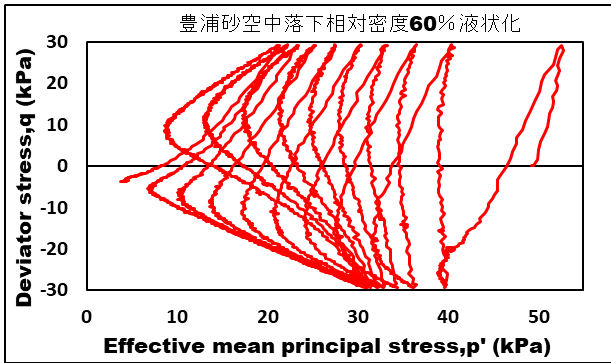


図 26 平均有効主応力 ( $p'$ ) と偏差応力 ( $q$ )

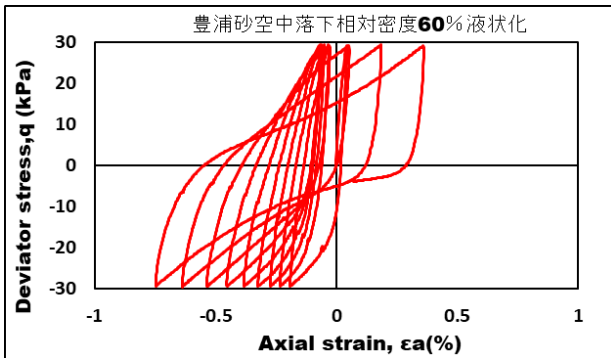


図 27 軸方向ひずみ ( $\epsilon a$ ) と偏差応力 ( $q$ )

これらの図10から図27までは、20kPa、25kPa、30kPa の偏差応力における応力-ひずみ経路を示しています。また、0°、45°、90° の方向性における応力経路を示しています。0° 方向の  $p'$  値が急速に減少することが観察され、90° 方向は0° や45° の方向に比べて時間がかかることがわかります。この結果より液状化時に90° の粒子配向は0° の配向より液状化強度が高いことが確認できた。

### 3.3.10 液状化強度曲線

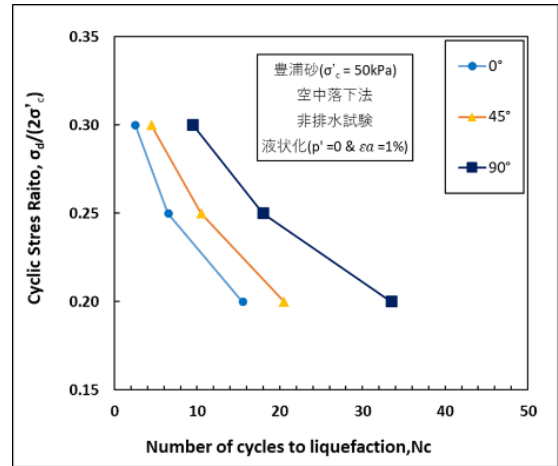


図 28 液状化強度曲線

### 3.3.11 液状化と再液状化比較

図 29, 30, 31 にそれぞれの配向角で、液状化強度と再液状化強度を示す。0° と45° では再液状化強度が上昇したのに対し、90° では低下している。

液状化強度試験結果から得られた知見は、90° の粒子配向が0° の配向よりも液状化強度が高いということです。これは、液状化する際に、90° 配向の粒子がより耐性がある構造を形成していることを示唆しています。再液状化強度が0° と45° で上昇し、90° で低下したという結果は、粒子の再配向が影響していると考えられます。具体的には、液状化と再液状化のプロセスにおいて、粒子配向がどのように変化するかが重要な役割を担っています。

初めに述べたように、マイクロ스코ープによる粒子配向性の読み取り結果からは、液状化後に0° と45° の粒子配向が90° 付近へ近づいた

こと、そして 90° のケースでは液状化後に 90° 付近の粒子数が減少したことが観察されました。これは、液状化によって粒子が特定の方向へ再配向し、その結果として液状化強度に影響を与えていると考えられます。

液状化前にせん断剛性率が堆積角度に応じて異なり (0°、45°、90° の順に大きくなる)、液状化後のせん断剛性率が液状化強度と同様の傾向を示したことは、液状化時の粒子の配向性と土の力学特性との間に直接的な関連があることを示しています。特に 90° のケースでせん断剛性率が少し減少したのは、液状化後の粒子数の減少によるものであり、再液状化における粒子の配向変化が剛性と強度に直接的な影響を与えていると解釈できます。

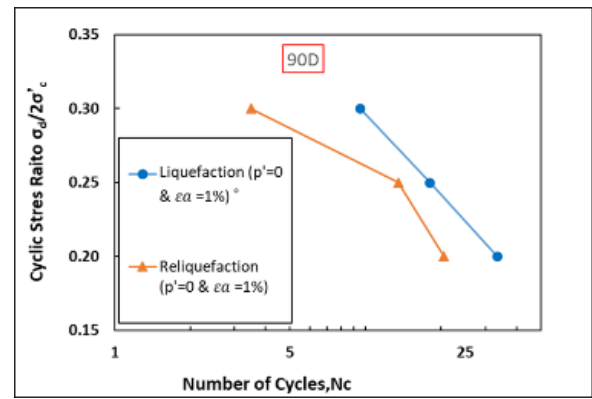


図 31 90° 液状化前後

#### 4. 結論

粒子配向性の変化: 液状化によって、0° と 45° の粒子配向が液状化後に 90° 付近へ近づきました。これは、液状化が粒子の配向を変化させ、それが土の力学特性に影響を与えることを示しています。

液状化強度: 90° の粒子配向は 0° の配向よりも液状化強度が高いことが確認されました。これは 90° 配向の粒子が液状化に対してより強い構造を形成していることを示唆しています。  
再液状化強度: 再液状化時には、0° と 45° の配向で強度が上昇する一方で、90° の配向では強度が低下しました。これは、液状化と再液状化のプロセスにおける粒子配向の変化が、土の力学特性に重要な影響を及ぼしていることを示しています。

せん断剛性率: 液状化前のせん断剛性率は堆積角度が大きいほど高く、液状化後も同じ傾向が維持されました。0° と 45° で剛性率が上昇し、90° で少し減少したことが、液状化強度と強い相関関係にあることを示しています。

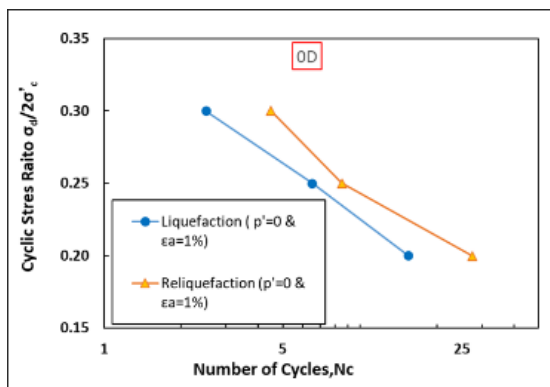


図 29 0° 液状化前後

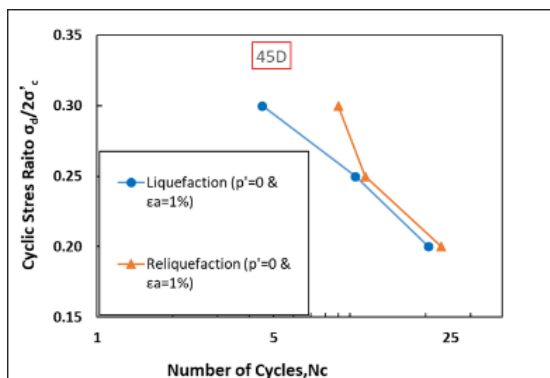


図 30 45° 液状化前後



これらの結果は、土の液状化挙動と粒子の配向性との間には密接な関連があり、液状化プロセスが粒子の配向に与える影響は土の力学的特性に大きな影響を及ぼすことを明らかにしました。また、液状化耐性の評価においては、粒子配向性を考慮することが非常に重要であると結論付けることができます。この研究は、土木工学や地震工学における土構造物の設計と安全評価において、粒子配向性を考慮するための実用的な指針を提供するものです。

## 5. 参考文献

1. 社団法人地盤工学会. (2009). 地盤材料の方法と解説-二分冊の  
2. pp. 730-736. 3. LE HOANG 2. KIM. (2021). 粒子配向性を考慮した砂の液状化特性. 長岡技術科学大学大学院工学研究科修士論文.