

# 砂の液状化にともなう固有異方性の変化

地盤工学研究室 文岩 秀貴  
指導教員 豊田 浩史

## 1. はじめに

実地盤の土粒子構造は、その構造物の応力履歴・堆積履歴・構築過程に起因して異方的であることがほとんどである<sup>1)</sup>。土構造物においてはこの異方性の影響が無視できず、合理的な設計を行うためにはこれを考慮する必要がある。土の異方性には堆積時の粒子の配向性による固有異方性、異方応力状態による誘導異方性があり、本研究では固有異方性に着目した。

地盤の液状化強度は一般に年代効果(応力履歴、堆積構造、セメンテーションなど)によって大きく左右されることがわかっている。筆者らのこれまでの研究により、液状化すると過圧密効果が喪失し、さらに、供試体の密度が増加しているにもかかわらず、応力履歴の喪失以上に液状化強度比は低下することが示されている<sup>2)</sup>。これは堆積構造の変化によってもたらされたものとして考えることができる。液状化による「堆積構造の変化」=「固有異方性の変化」と考えることで、液状化によって堆積構造が変化することを捉えられる可能性がある。

そこで、本研究では豊浦砂を対象に堆積方向の異なる供試体を作製し、三軸試験機を用いて液状化履歴による固有異方性への影響を調べた。さらに供試体作製方法を変えることで堆積構造がもたらす影響について様々な視点から検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 用いた試料

本研究では、標準砂である豊浦砂を使用した。試料の物理特性と粒径加積曲線を Fig.1 に示す。豊浦砂は比較的粒径が揃っており、粒子形状は少し扁平である。

### 2.2 供試体作製方法

供試体作製方法は、土粒子の配向性の影響を確認するために「空中落下法で作製したケース」と「水中落下法で作製したケース」、「湿潤締固め法

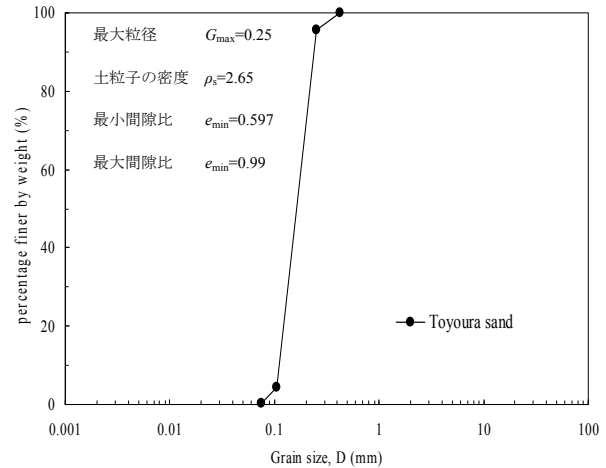


Fig.1 使用した試料の物性

で作製したケース」の3ケースを行った。

空中落下法による作製方法はモールド内に一定の高さよりふるいを通して自然落下、堆積させる方法である。また、ふるいの落下高さは供試体採取領域(約12.5cm)の相対密度の変化が $D_r \pm 1\%$ となる範囲を事前に予備試験として求め、供試体の相対密度を均一とした。その後、水槽内にモールドを設置し下部より一定の流速で通水し、一定の水位を保った。その後、脱水のために水槽内からモールドを取り出し一定時間放置した。これにより土粒子間にサクションが働き、供試体の自立を可能にした。

水中落下法による作製方法は水を張ったモールド内に試料を落下させて堆積させる方法である。これによって、空中落下法より密度が低い状態に供試体を作製できる。密度が低く自然脱水では十分な自立強度が確保できなかったため、真空ポンプを用いて負圧を供給し脱水することとした。

湿潤締固め法による作製方法はモールド内に詰める試料の量を10層に分けて1層当たりの分量を決めて堆積させる方法である。これによって、突き固めの影響による固有異方性の変化を調べた。本作製方法では適度な含水比で締固めており、供試体は自立可能なため通水・脱水は行わない。

各作製方法で試料を自立させた後、トリミング法

により直径 50mm, 高さ 125mm の寸法に成形した. 相対密度  $D_r$  は, 空中落下法より作製したケースが  $D_r \doteq 90\%$ , 水中落下法より作製したケースが  $D_r \doteq 60\%$ , 湿潤締固め法で作製したケースが  $D_r \doteq 65\%$  となった.

堆積面の定義として, Fig.2 に示すように堆積面が水平方向の場合を  $\alpha=0^\circ$  として定義する.

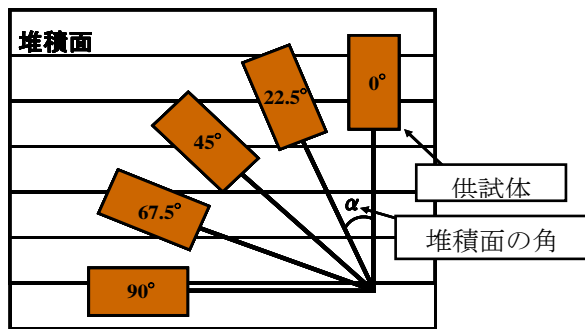


Fig.2 堆積面の定義

## 2.3 圧密排水試験

三軸試験は, 二重負圧のもと供試体下部から脱気水を通水し, 平均有効主応力  $p' = 50\text{kPa}$  の状態で背圧  $200\text{kPa}$  を載荷する方法で供試体の飽和化を促進させ, 間隙圧係数  $B > 0.95$  を確認した後, 有効拘束圧  $p' = 150\text{kPa}$  の圧密応力で等方圧密を行い, その後排水条件のもと軸速度  $0.05\%/mm$  で軸ひずみ  $15\%$  までせん断を行った.

## 2.4 飽和非排水繰返し三軸試験

圧密過程までは 2.3 項と同様の手順で行い, その後ひずみ制御のもと, 初期平均主応力  $p' = 150\text{kPa}$ , 軸ひずみ速度  $0.1\%/min$  で非排水繰返しせん断する方法で行った. また, 繰返し載荷過程では軸ひずみ  $DA=5\%$  に達した段階を液状化したものとみなし試験を終了することとした.

## 2.5 試験手順

各供試体作製方法で供試体を作製した後, 堆積方法が固有異方性に与える影響を調べるため, 排水条件でせん断を行った. さらに, 液状化履歴が固有異方性に与える影響を調べるために水中落下法と湿潤締固め法で作製した供試体に対して繰返し載荷を行い, 液状化させた後, 排水条件でせん断を行った.

## 3. 試験結果

### 3.1 堆積方法の違いが固有異方性に与える影響

#### 3.1.1 供試体条件の比較

空中落下法, 水中落下法, 湿潤締固め法で作製したケースの相対密度  $D_r$ 、堆積面の角度  $\alpha$  関係を Fig.3 に示す. 空中落下法で作製したケースの方が密詰めとなることから分かる. また, 堆積面の角度の大小関係による相対密度  $D_r$  の変化はほとんど見られなかった.

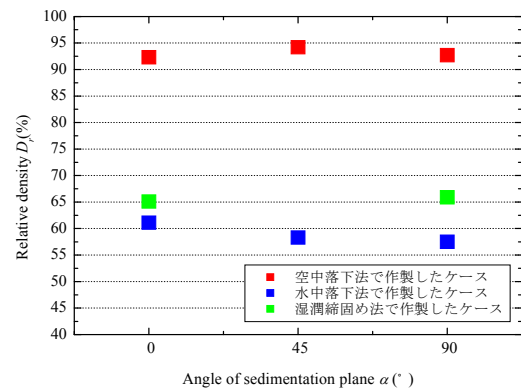


Fig.3 相対密度  $D_r$ -堆積方向の角度  $\alpha$  関係

#### 3.1.2 強度特性

##### (a) 空中落下法で作製したケース

空中落下法で作製したケースの軸差応力  $q$ -軸ひずみ  $\varepsilon_a$  関係を Fig.4 に示す. 軸ひずみ  $0.5\%$  付近から角度ごとに勾配が変化し, 排水強度  $q_{max}$  (最大軸差応力) で大きな強度差をもたらしている.

##### (b) 水中落下法で作製したケース

水中落下法で作製したケースの軸差応力  $q$ -軸ひずみ  $\varepsilon_a$  関係を Fig.5 に示す. 空中落下法と同じく, 軸ひずみ  $0.5\%$  付近から勾配が変化し, 排水強度  $q_{max}$  で強度差をもたらしている. しかし, 空中落下法よりも強度差は小さく, これは供試体密度が低いためだと考えられる.

##### (c) 湿潤締固め法で作製したケース

水中落下法で作製したケースの軸差応力  $q$ -軸ひずみ  $\varepsilon_a$  関係を Fig.6 に示す. 他の 2 ケースと違ってこのケースでは堆積角ごとの強度差はあまり見られず, 突き固めは固有異方性にあまり影響しないことがわかった.

##### (d) 排水強度 $q_{max}$ の比較

各ケースの排水強度  $q_{max}$  を堆積面の角度  $\alpha$  別にまとめたグラフを Fig.7 に示す. すべてのケースにお

いて堆積角が大きくなるにつれて強度が低下する傾向が見られた。これは土粒子の配向性によるものだと考えられる。配向性のメカニズムについては後述する。また、空中落下法で作製したケースでは堆積面の角度が大きくなるにつれて、著しい強度低下が見られるのに対し、水中落下法で作製したケースでは大きな強度低下は見られない。これより、供試体の密度と強度異方性には関連性があると推測できる。また、一般的に密度と強度には関連性があると言われているが、**Fig.3**の相対密度と堆積面の角度関係を照らし合わせると、強度は密度のみではなく、固有異方性にも大きく依存していることが分かる。

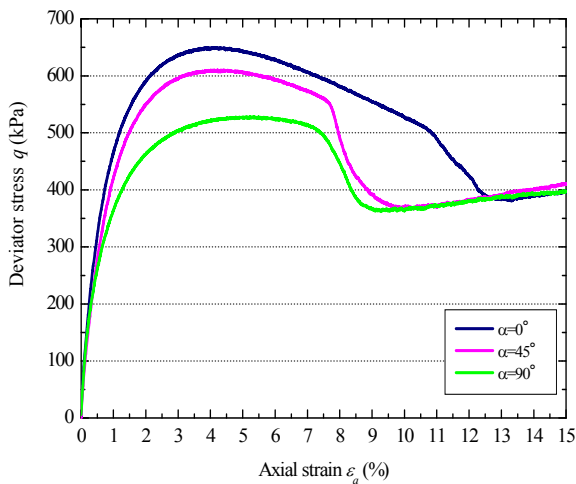


Fig.4 軸差応力  $q$ -軸ひずみ  $\epsilon_a$  関係(空中落下法)

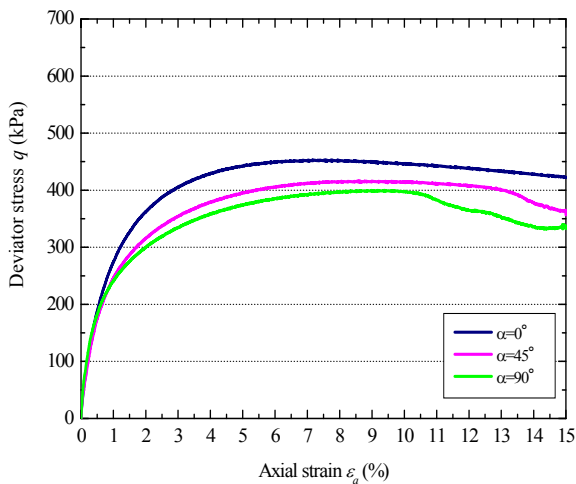


Fig.5 軸差応力  $q$ -軸ひずみ  $\epsilon_a$  関係(水中落下法)

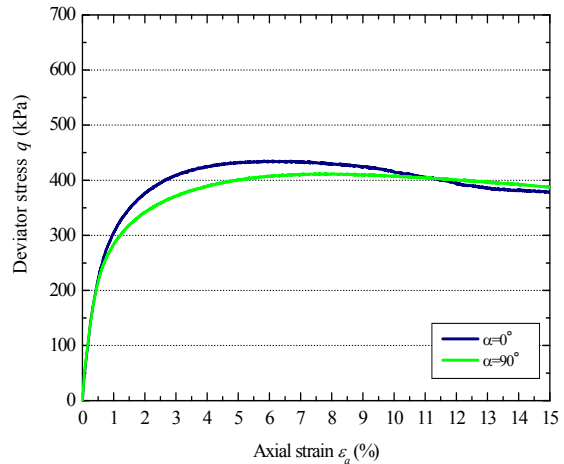


Fig.6 軸差応力  $q$ -軸ひずみ  $\epsilon_a$  関係(湿潤締め法)

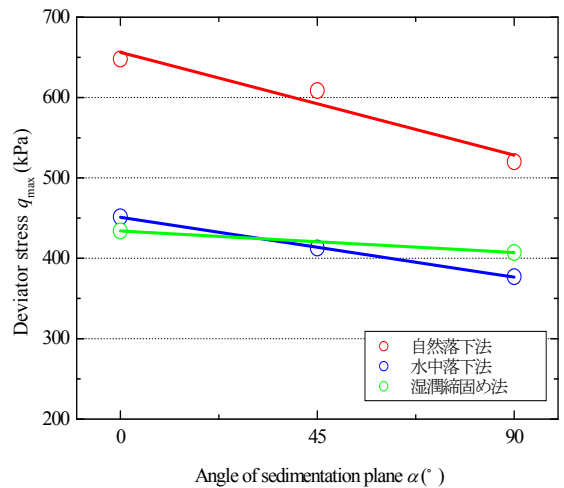


Fig.7 排水強度  $q_{max}$ -堆積面の角度  $\alpha$  関係

### 3.2 液状化履歴が固有異方性に与える影響

#### 3.2.1 供試体条件の比較

水中落下法，湿潤締め法で作製したケースの相対密度  $D_r$ ，堆積面の角度  $\alpha$  関係を **Fig.8** に示す。液状化による変化を，液状化履歴を与えない場合のケースと比較する必要があるため初期相対密度は同一条件に揃えることとした。

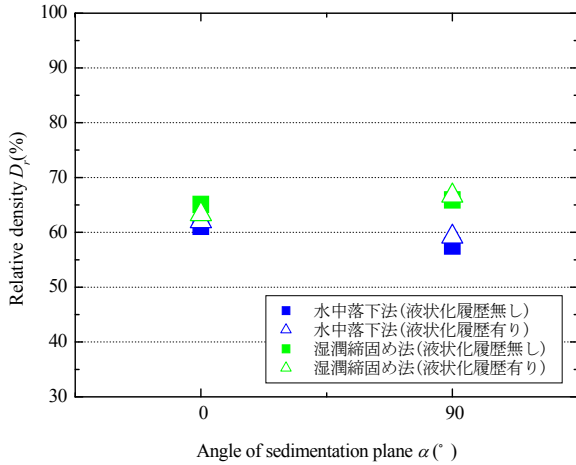


Fig.8 相对密度  $D_r$ -堆積方向の角度  $\alpha$  関係

### 3.2.2 強度特性

Fig.9 に水中落下法で作製したケースの軸差応力  $q$ -軸ひずみ  $\epsilon_a$  関係, Fig.10 に湿潤締め法で作製したケースの軸差応力  $q$ -軸ひずみ  $\epsilon_a$  関係を示す. この結果より液状化履歴を与えると両ケースともひずみレベル毎で異なる傾向が見られた.

#### (a) 排水強度の異方性

Fig.11 に水中落下法で作製したケースの排水強度  $q_{max}$ -堆積面の角度  $\alpha$  関係, Fig.12 に湿潤締め法で作製したケースの排水強度  $q_{max}$ -堆積面の角度  $\alpha$  関係を示す. 両ケースにおいて液状化履歴を与えても液状化履歴を与えないケースと排水強度の強度異方性の程度はほぼ同じになる結果となった. また, 液状化履歴を与えると排水強度は増加しているがこれは液状化後, 再圧密を行ったことによる密度増加の影響であると考えられる.

#### (b) ひずみが小さい領域での変形特性の異方性

液状化強度は, せん断ひずみレベルが 0.01%程度の割線せん断弾性係数と相関がよいことが示されている<sup>3)</sup>. そこで, ひずみが小さい領域におけるせん断挙動をしてみる. Fig.13 に水中落下法における軸ひずみ 1%までの軸差応力  $q$ -軸ひずみ  $\epsilon_a$  関係, Fig.14 に湿潤締め法における軸ひずみ 1%までの軸差応力  $q$ -軸ひずみ  $\epsilon_a$  関係を示す. 両ケースとも液状化履歴を与えると堆積角  $\alpha=0$  度では初期勾配が増加し, 堆積角  $\alpha=90$  度では初期勾配が減少する結果となった. この結果より, 液状化履歴を与えることによって供試体の堆積構造が変化したことが推測される.

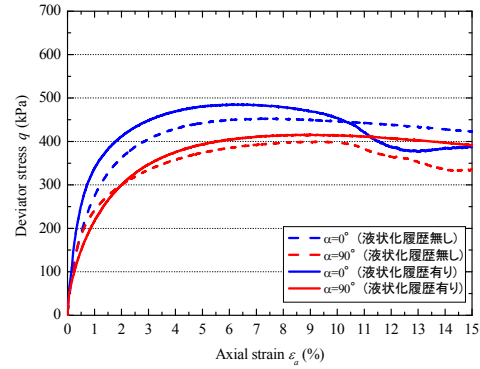


Fig.9 軸差応力  $q$ -軸ひずみ  $\epsilon_a$  関係(水中落下法)

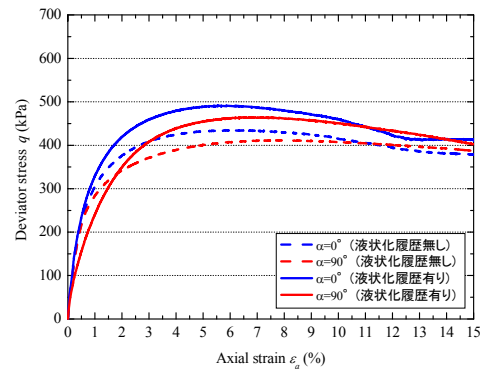


Fig.10 軸差応力  $q$ -軸ひずみ  $\epsilon_a$  関係(湿潤締め法)

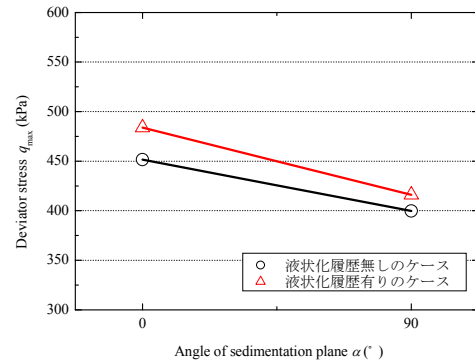


Fig.11 排水強度  $q_{max}$ -堆積面の角度  $\alpha$  関係(水中落下法)

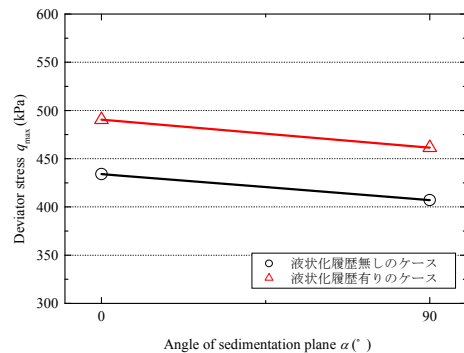


Fig.12 排水強度  $q_{max}$ -堆積面の角度  $\alpha$  関係(湿潤締め法)

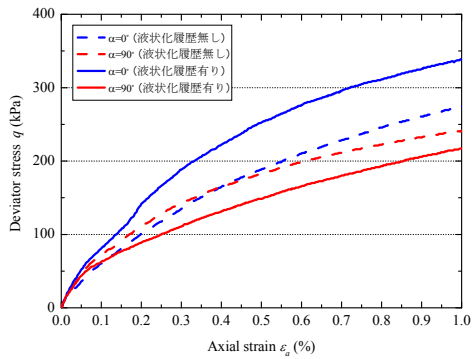


Fig.13 軸ひずみ 1%までの軸差応力  $q$ -軸ひずみ  $\varepsilon_a$  関係  
(水中落下法)

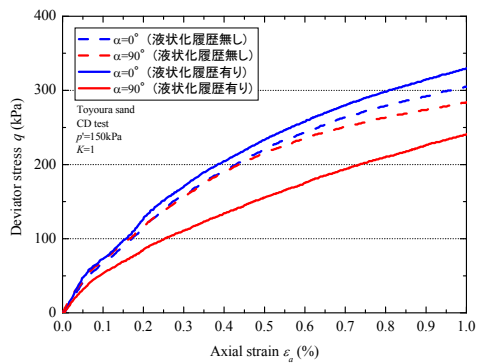


Fig.14 軸ひずみ 1%までの軸差応力  $q$ -軸ひずみ  $\varepsilon_a$  関係  
(湿潤締め法)

### 3. 結論

本研究では、液状化が固有異方性に与える影響について調べるために、豊浦砂を用いて堆積面の角度を変え、液状化履歴を与えることで固有異方性の変化を調べた。

本研究より得られた知見を以下に示す。

- 1) 排水強度  $q_{max}$  に着目すると、空中落下法で作製したケースでは、水平方向から堆積方向の角度が大きくなるにつれて、著しい強度低下が確認できたが、水中落下法で作製したケースでは、堆積方向の角度が大きくなっても強度低下はそれほど著しくはなかった。このことから、強度特性と供試体の密度は大きく関係していることがわかった。
- 2) 液状化履歴を与えると液状化後の密度増大に伴って排水強度は増加するが、強度異方性は液状化前と同程度の大きさを示すことが実験より確認できた。このことから液状化が生じても排水強度については、密度の影響のみ考慮すればよいことがわかった。

- 3) ひずみが小さい領域 (1%以下) では堆積角  $\alpha = 0$  度 (水平方向堆積) で初期勾配が増加し、 $\alpha = 90$  度 (鉛直方向堆積) で減少する結果となった。これより、液状化によって堆積構造の変化が生じたことが考えられる。しかし、ひずみが大きくなると液状化前の異方性を取り戻すことから、液状化履歴による堆積構造の変化は小さいものであったのではないかと推測できる。

今後は、本研究で得られた液状化による異方性の変化が、再液状化強度にどのように影響してくるか調べる必要がある。

### 【参考文献】

- 1) 中田幸男, 兵動正幸, 吉本憲正, 村田秀一: 締め固め土の強度・変形特性に及ぼす異方性の影響, 土木学会論文集C, Vol62, No.2, 360-370, 2006.
- 2) 森田雅也: 砂の液状化による過圧密効果の喪失, 長岡技術科学大学修士論文, 2012.
- 3) 檀原志織: 礫混じり砂のせん断弾性係数と液状化強度に与える礫粒度の影響, 長岡技術科学大学修士論文, 2012.