

# 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 ○CHAVEZ GARCIA CARLOS ALAIN  
長岡技術科学大学大学院 正会員 豊田浩史  
長岡技術科学大学大学院 正会員 高田晋

## 1. はじめに

一般的に自然地盤は、様々な種類の粒子形状で構成され、多くの種類の堆積方法によって形成されている<sup>1)</sup>。よって、地盤の挙動は、等方応力状態を適用した場合でも、異方性を示す場合があることが実証されている。そこで、Casagrande and Carillo<sup>2)</sup>は、固有異方性及び誘導異方性の2種類に分けて定義した。その中で、固有異方性とは、形成履歴である沈降堆積プロセスを通じて発生する性質を指す。固有異方性は、砂など凝集力の弱い粒子を含む地盤でしばしば確認される。粒子の形状と沈降のパターンは、固有異方性に重要な役割を果たし、固有異方性に関する力学特性、せん断強度特性の違いについての研究は既に行われている。

また、砂質地盤の重要な力学特性には、液状化が挙げられる。2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、関東地方の広い範囲にわたり地盤の液状化現象が発生し、多大な被害が発生した。液状化の要因としては、密度や年代効果、粒子配向性による異方性など様々なものが挙げられる。密度や年代効果については色々な検討が行われ、異方性については砂のせん断強度対して研究が行われているが、液状化に対する異方性については明らかになっておらず、異方性が液状化に与える影響について調べる必要がある。<sup>3)</sup>

## 2. 試験概要

本研究は、砂の液状化抵抗に着目し、砂の異方性について明らかにすることを目的とする。そこで、液状化特性を調べるために飽和供試体（豊浦砂）に対し、室内要素試験である液状化試験、三軸圧

縮・伸張試験、局所微小ひずみ試験及びベンダーエレメント試験を行った。以上の試験より得られた結果から、砂の粒子配向性による液状化強度特性について検討する。

## 3. 実験装置

本研究で用いた三軸試験装置の概略を図1に示す。試験装置は、長時間（24時間以上）の試験の際にも飽和度を確保できるように、三軸セルを完全水浸させ、別セルからバルーンを介してセル圧を載荷できる。

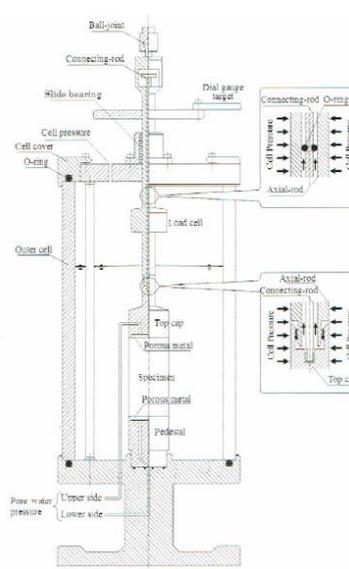


図1 三軸試験機の概略図

## 4. 実験方法

### 4.1 液状化試験

本研究では、通常圧密に加え、将来的に長期圧密を行うことを視野に入れた試験方法を用いた。長期圧密する際、停電等によりコンプレッサーが停止すると、所定の圧力を保つことができないため、本研究では、背圧を载荷せずに試験を行っている。間隙圧係数  $B > 0.95$  を満たすことで飽和していると判断し、自動制御により平均有効主応力  $p' = 50 \text{ kPa}$  で等方圧密を行う。圧密開始から排水が終了するまでの圧密を通常圧密として、圧密終了後、繰返片振幅  $\sigma_d$  を設定し、軸ひずみ速度  $0.1 \text{ mm/min}$  一定で繰返し载荷を行う。

### 4.2 ベンダーエレメント試験

本研究では、キャップおよびペDESTAL中央に送受信用ベンダーエレメントを設置して試験を行う。圧密期間に応じて適宜、せん断波を送信して供試体中を伝播する波を測定し、せん断波速度  $V_s$  を求めることができる。また、せん断波速度  $V_s$  から初期せん断剛性  $G_0$  を求め、せん断波の伝播速度  $V_s$  と初期せん断剛性  $G_0$  は次式より算出できる。

$$V_s = \frac{L}{\Delta t}$$
$$G = \rho_t \times V_s^2$$

$V_s$  : せん断波速度 (m/s)、 $L$  : BE 間距離 (mm)、 $\Delta t$  : せん断波到達時間 (msec)、 $G_0$  : 初期せん断剛性 (kPa)、 $\rho_t$  = 湿潤密度 ( $\text{g/cm}^3$ )

$L$  はキャップとペDESTALの BE 先端間距離をとる tip-to-tip 法を、 $\Delta t$  は送受信波形の立ち上がり点を結ぶ start-to-start 法を用いた。図2にベンダーエレメントの設置状況を示す。

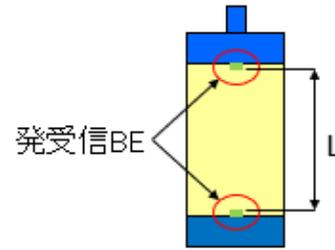


図2 ベンダーエレメント

### 4.3 三軸圧縮試験

この試験は三軸試験装置で行い有効応力  $p' = 50 \text{ kPa}$  を維持しながら、最大の圧縮強度まで圧縮する。この試験では軸差応力  $q$  (kPa) とせん断ひずみが求められる。なお、圧縮試験では  $q$  が正の値となり、次のように算出される。

$$q = \sigma'_a - \sigma'_r$$
$$\varepsilon_s = \frac{2}{3} (\varepsilon_a - \varepsilon_r)$$

### 4.4 三軸伸張試験

この試験は、圧縮と同様三軸試験装置で行い有効応力  $p' = 50 \text{ kPa}$  を維持しながら、最大の伸張強度まで続ける。このときでは軸差応力  $q$  (kPa) とせん断ひずみは圧縮と同じ式でまとめられる。しかし、伸張試験では  $q$  が負の値となる。

### 4.5 局所微小ひずみ試験

この試験では、ベディングエラーなどを取り除くため、直接、供試体のひずみを求める試験である。局所軸変位測定に二箇所、局所側方変位測定に一箇所設置する。

次式で計算を行う。

$$q = \sigma'_a - \sigma'_r$$
$$\varepsilon_s = \frac{2}{3} \times (\varepsilon_a - \varepsilon_r)$$
$$G = \frac{q}{3 \times \varepsilon_s}$$

ここで、 $\varepsilon_a$  : 軸方向ひずみ (%)、 $\varepsilon_r$  : 水平方向ひずみ (%)、 $\varepsilon_s$  : せん断ひずみ (%)、

$\sigma'_a$  : 軸方向応力 (kPa)、 $\sigma'_r$  : 水平方向応力 (kPa)、 $q$  : 軸差応力 (kPa)、 $G$  : せん断剛性率 (kPa) である。

## 5. 実験結果

### 5.1 三軸圧縮試験

本試験では、粒子配向  $0^\circ$  と  $90^\circ$  で行い、結果は図 3 に示すように、 $0^\circ$  の強度は粒子配向が 150.4 kPa、 $90^\circ$  が 128.1 kPa となった。圧縮試験のせん断ひずみ-応力関係及びせん断ひずみ-体積ひずみ関係は図 3 と図 4 に示すように、小さなひずみから軸差応力の差が出ている。同じように、体積ひずみの差も出ており、せん断ひずみは 5% 程度になると粒子配向  $0^\circ$  の体積ひずみが負の値となり、この時、供試体の体積が膨張したことになる。

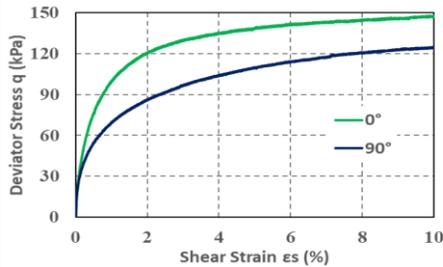


図 3 せん断ひずみ-応力関係

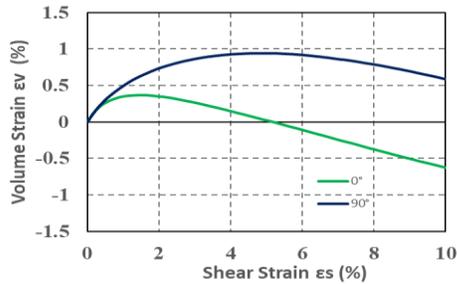


図 4 せん断ひずみ-体積ひずみ関係

### 5.2 三軸伸張試験

図 5 に示すように、単調伸張の強度は粒子配向  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  の順で上がった。図 5 と図 6 に示すように、粒子配向

$0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  のせん断ひずみ-軸差応力と体積ひずみ関係を見ると、各粒子配向影響が確認できる。しかしながら、粒子配向  $0^\circ$  は  $q_{max}$  が 32.2kPa、 $45^\circ$  が 36.1kPa、 $90^\circ$  が 40.7kPa となり、粒子配向  $90^\circ$  の伸張の強度が一番強く、これは圧縮試験と逆傾向である。

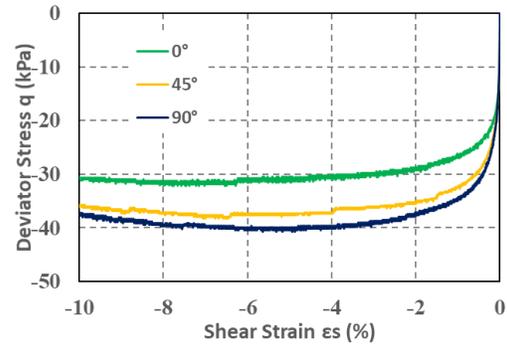


図 5 せん断ひずみ-応力関係

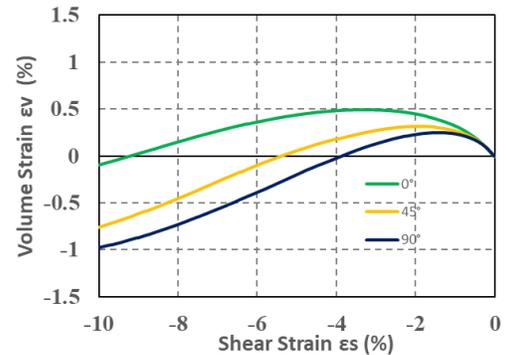


図 6 せん断ひずみ-体積ひずみ関係

### 5.3 局所微小ひずみ試験

微小ひずみ測定試験で得られた結果を図 7 に示す。なお、同じ供試体で局所ひずみ試験に加えてベンダエレメント試験も行い結果を整理した。初期ひずみに着目すると、粒子配向  $90^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $0^\circ$  の順で大きい結果となった。この結果から、供試体内の粒子配向が微小領域にも影響すると考えられる。今後、せん断剛性率のひずみ依存性についても確認していく必要がある。

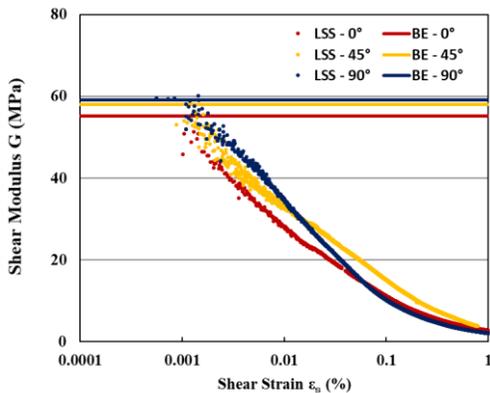


図7 せん断ひずみ-せん断剛性率関係

#### 5.4 配向性による砂のせん断剛性率

ベンダーエレメントで測定した初期せん断剛性率  $G_0$  を図8に示す。粒子配向角が大きくなると  $G$  も大きくなっている。この原因として、粒子配向  $90^\circ$  のケースは粒子配向  $0^\circ$  のケースより鉛直方向粒子接点数が少なくなり、接点のない粒子部分が大きくなるのでせん断波速度が大きくなり、初期せん断剛性率も大きくなると考えられる。

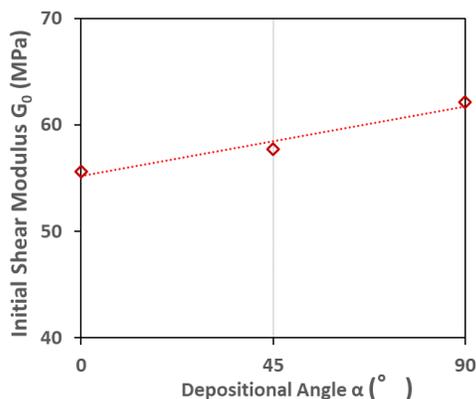


図8 せん断剛性率の変化

#### 5.5 配向性による液状化強度特性

相対密度  $D_{Rc}=40\%$  の豊浦砂における飽和非排水繰返し三軸試験結果を図9に示す。なお、液状化強度比  $R$  は、両振幅軸ひずみ  $DA=5\%$  における繰返し载荷荷回数  $N_c=20$  回で定義する。  $45^\circ$ 、 $90^\circ$  の場合は液状化曲線の傾きは同じだが、粒子配向  $0^\circ$  のときは少し傾いている線となっ

た。液状化強度強度  $R$  は、粒子配向角が大きいはほど大きい結果となった。

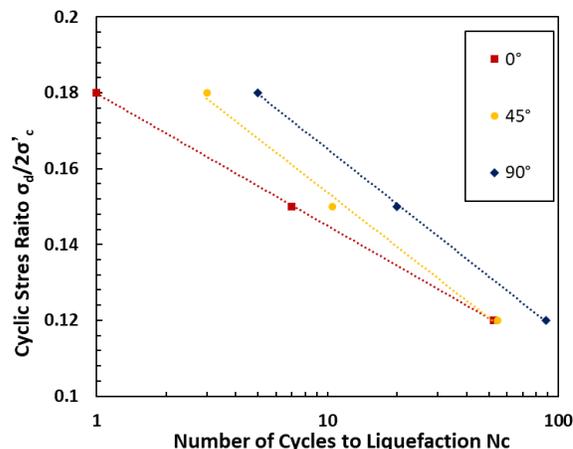


図9 液状化強度曲線

#### 6. まとめ

- ① 圧縮試験と伸張試験で粒子配向性による強度の増加傾向が逆転している。液状化試験においても、圧縮载荷と伸張载荷があるので、液状化強度に影響すると考えられる。
- ② 粒子の接触数が小さくなる粒子配向  $90^\circ$  では、接点のない粒子部分が大きくなるのでせん断波速度が大きくなり、初期せん断剛性率も大きくなると考えられる。
- ③ 液状化強度は、粒子配向角が大きくなるほど大きくなる傾向がある。

#### 7. 参考文献

- 1) 社団法人地盤工学会：地盤材料の方法と解説-二分冊の2, pp. 730-736, 2009.
- 2) Casagrande, A. and Carrillo, N.: Shear failure of anisotropic material. J. Boston Soc. Civ. Env. 31(4), pp. 74-87, 1994.
- 3) LE HOANG KIM: 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, 2021.