

高圧三軸試験装置を用いた砂の力学的異方性に関する実験的研究

福岡大学 学生会員 伊賀洋輔 東城彰宏
正 会 員 山田正太郎 佐藤研一

1. はじめに

これまで砂のような粒状材料の力学的異方性は、堆積時に獲得するいわゆる固有異方性と、塑性変形を伴う応力履歴と共に発達する誘導異方性とに分けて考えられてきた。本研究では、両異方性が砂の力学挙動に与える影響について高圧三軸試験機を用いて調べると共に、異方性をこのように分けて考えることの妥当性について議論する。

2. 実験概要

高圧三軸試験機装置（許容セル圧 10MPa）を用いて実験を行った。試料には豊浦砂（密度 $\rho_s = 2.646\text{g/cm}^3$ 、最大間隙比 $e_{\max} = 1.000$ 、最小間隙比 $e_{\min} = 0.646$ ）を用いた。供試体の大きさは直径 5.0cm、高さ 10.0cm である。供試体作成法は、基本的には空中落下法とし、一部の試験では等方的な供試体を作成する目的で、棒突き法も用いた。供試体作成時の目標相対密度は 80%とした。全ての試験で $\pm 3\%$ の範囲内でこの密度に近い供試体を作ることができた。個々の载荷条件については、該当する箇所で説明を加える。

3. 非排水せん断挙動に与える力学的異方性の影響

3-1 いわゆる固有異方性（初期異方性）の影響

まず、いわゆる固有異方性が非排水せん断挙動に与える影響について示す。空中落下法にて作成した供試体に対し、圧縮側と伸張側に単調非排水せん断を行った。実験結果を図 1 に示す。軸差応力 - 軸ひずみ関係から分かるように、空中落下法で作成した供試体は圧縮せん断する場合よりも伸張せん断する場合に剛性が低い。また、図 2 に示す密度を変化させた豊浦砂の非排水せん断挙動と比較すると、図 1 の挙動は圧縮側に比べ伸張側でゆるい砂に似た挙動を示していることが分かる。つまり、高い剛性を示すせん断方向には相対的に密な砂に似た挙動が現れ、低い剛性を示すせん断方向には相対的にゆるい砂に似た挙動が現れている。砂の場合、せん断方向に応じた“硬さの違い”は“疑似的な密度の違い”として表れると言える。

3-2 誘導異方性の影響

3-2-1 非排水せん断履歴を与える場合

次に、誘導異方性が非排水せん断挙動に与える影響について示す。異方性の状態を変化させるために、伸張側に一旦せん断した後に、除荷して等方応力状態に戻してから、圧縮側と伸張側に単調非排水せん断を行った。実験結果を図 3 に示す（せん断履歴を与える過程は破線で示した）。除荷後の単調非排水せん断挙動(実線部分)は、圧縮側に比べ伸張側で密な砂に似た挙動を示している。せん断履歴を受けることで圧縮側、伸張側どちらで密な砂に似た挙動が現われるかが容易に変化することが分かる。このような変化は、もちろんせん断履歴を受けることで異方性の状態が変化したことを意味する。また、はじめにも述べた通り、砂の異方性は固有異方性と誘導異方性に分けて考えられがちだが、いずれもせん断方向の違いに応

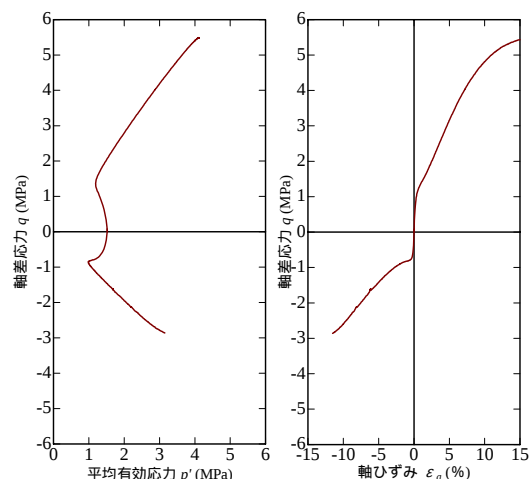


図 1 空中落下法で作成した供試体の単調非排水せん断挙動

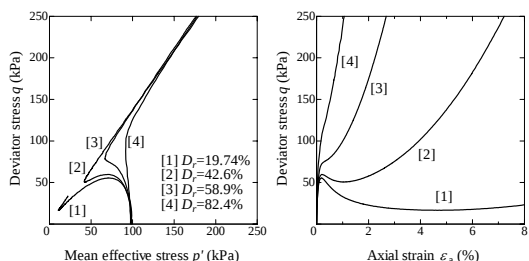


図 2 密度の異なる砂の単調圧縮非排水せん断挙動

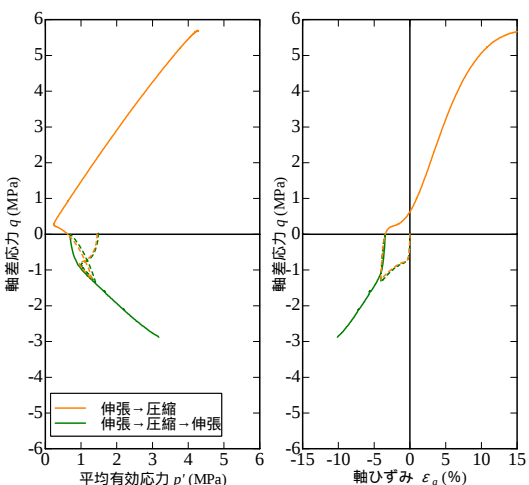


図 3 非排水せん断履歴を受けた供試体の単調非排水せん断挙動

じた“硬さの違い”が、“疑似的な密度の違い”として表れるという点において違いがない。両異方性の間には本質的な差がないと言える。

3-2-2 等方圧縮履歴を与える場合

図4に等方圧縮履歴を受けた供試体の単調非排水せん断試験結果を示す。0.2MPaで等方圧縮した場合と1.5MPaで等方圧縮した場合とでは、等方圧縮履歴を受けても圧縮側と伸張側の違いが消えず、あまり異方性が変化していないことが分かる。1.5MPaもの大きな力で圧縮されても異方性が消えないことから、砂の異方性はせん断時に比べ等方圧縮時には変化しにくいといえる。ただし、それでも5.0MPaまで圧縮するとかなり等方的になっている。図5に初期相対密度80%の供試体の等方圧縮曲線を示す（図4に示す実験の拘束圧を破線で示す）。等方圧縮時に塑性変形を伴うようになると異方性が消滅し始めることが分かる。

4. 限界状態に与えるいわゆる固有異方性（初期異方性）の影響

いわゆる固有異方性と誘導異方性の間に本質的な違いがなく、いわゆる固有異方性を誘導異方性の初期状態として位置付けることができるのであれば、初期に異方性を有していても圧縮側と伸張側で最終的にはほぼ同じ限界状態に達するように思えるが、図1ではそうはなっていない。そこで、初期に等方的な供試体でも圧縮側と伸張側で同じような差が生じるか調べる。図6に空中落下法及び、棒突き法で作成した供試体の単調非排水せん断試験結果を示す。棒突き法で作成した供試体はせん断初期に等方的な挙動を示している。しかし、このような初期に等方的な供試体でも、限界状態では、圧縮側と伸張側で初期に異方的な供試体と同様な差を生じている。次に、液状化によりいわゆる固有異方性を破壊させた供試体でも同じ限界状態に達するか確かめる。図7に液状化試験を途中で単調非排水せん断に切り替えたときのせん断挙動を示す。液状化履歴を与えた供試体でも、最終的には単調にせん断した供試体と同じ限界状態に達していることが分かる。以上で見たように、限界状態で生じる圧縮側と伸張側の差は、いわゆる固有異方性の影響ではないことが分かる。なお、このような圧縮側と伸張側の限界状態の差が、等方圧縮履歴を与えることで小さくなっていくことが図4から読み取れる。圧縮せん断と伸張せん断で限界状態に差が生まれる原因として、中間主応力による影響が第一に考えられるが、その他に異方性の発達限界が密度や応力条件によって変化する可能性が示唆されているようにも思える。

5. まとめ

- 1) いわゆる固有異方性と誘導異方性は、いずれもせん断方向の違いに応じた“硬さの違い”が、“疑似的な密度の違い”として表れるという点で共通している。少なくとも砂では、両異方性の間に本質的な差はなく、これまで固有異方性と称されてきた異方性は誘導異方性の一状態（初期状態）に過ぎない。
- 2) 砂の（誘導）異方性は、せん断履歴を受けることで容易に変化する一方で、等方圧縮履歴を受けてもなかなか変化しない。
- 3) 圧縮と伸張で限界状態は異なるが、これはいわゆる固有異方性（初期異方性）による違いではない。

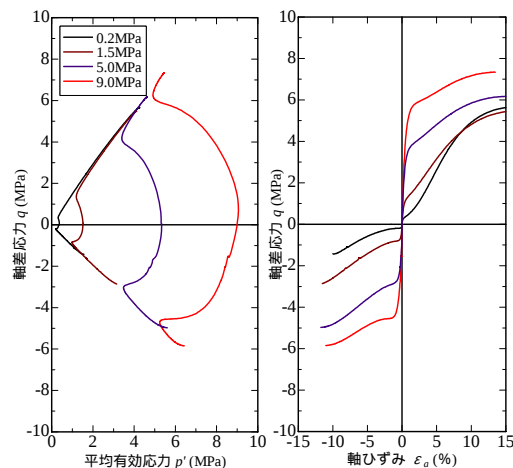


図4 等方圧縮履歴を受けた供試体の単調非排水せん断挙動

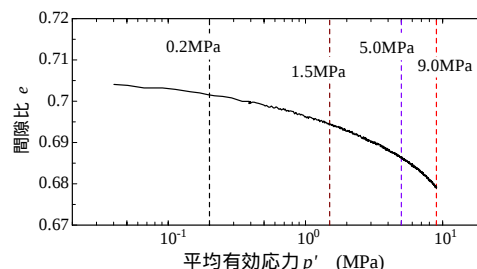


図5 等方圧縮試験結果

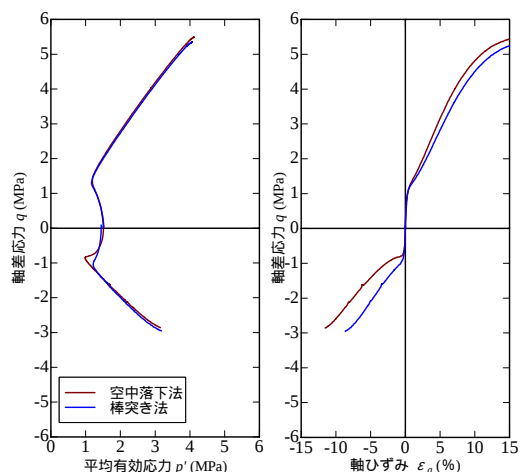


図6 空中落下法で作成した供試体と棒突き法で作成した供試体の単調非排水せん断挙動

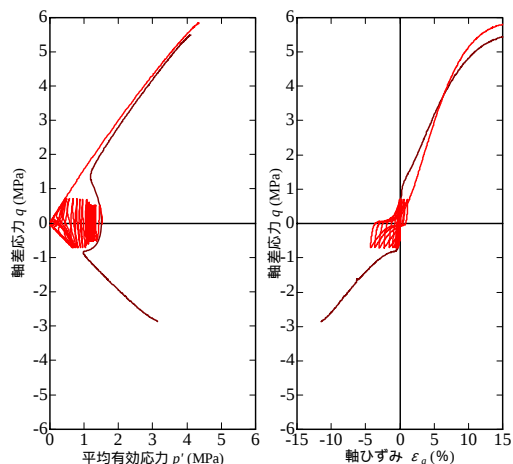


図7 液状化履歴を受けた供試体の単調非排水せん断挙動