

拘束圧の違いが砂の排水せん断挙動に及ぼす影響

山口大学工学部 正会員 中田幸男 兵動正幸 村田秀一
 (財) 大阪土質試験所 正会員 下野段朋恵
 山口大学大学院 学生会員 ○林勝彦

1.はじめに 実地盤は、重力作用下で堆積するため初期に構造的な異方性を有している。一方、盛土や掘削などの外力の作用に伴い、その実地盤内における応力状態は、その境界条件によって主応力が様々な方向を向くことが知られている。主応力方向は、堆積過程における地盤の異方性に起因して、土のせん断剛性や強度定数の低下、ダイレイタンスー量の変化を引き起こすことが明らかにされている¹⁾。そのため、これらのことを考慮して異方性を有する地盤の変形や安定の問題を精度よく検討することが重要であるといえる。しかし、これまで初期構造異方性の影響を拘束圧に着目して行われた研究成果は十分であるとは言い難い。以上のような背景を踏まえ本研究では、中空ねじりせん断試験機を用いてカーボネイト砂、秋穂砂、豊浦砂について、異なる拘束圧の下で主応力方向固定排水せん断試験を行い、排水せん断挙動からその初期構造異方性の影響と拘束圧依存性について検討を行う。さらに、その結果から砂のダイレイタンスー特性を明らかにし、せん断強度特性との関係を考察する。

2.試料および実験方法 本研究で用いた試料は、貝殻等の生物の遺骸を多く含むカーボネイト系の Dogs Bay 砂と、角張った粒子で石英・長石を主成分としたシリカ系の秋穂砂と豊浦砂である。用いた試験機は、自動制御・計測可能な中空ねじりせん断試験機である。供試体は内径 6 cm・外径 10 cm・高さ 20 cm の中空円筒形である。供試体の作成は、Dogs Bay 砂については相対密度 65% を目標に水中落下振動法、秋穂砂については 65%、豊浦砂については 60% の相対密度を目標に空中落下法を用いて行った。初期状態の $p=29\text{kPa}$ から初期拘束圧 p_c (Dogs Bay 砂・秋穂砂： $p_c=49,98,196,294\text{kPa}$ 、豊浦砂： $p_c=49,98,294\text{kPa}$) まで等方圧密を行う。その後せん断排水条件のもと、平均有効主応力 $p=p_c$ 、中間主応力係数 $b=0.5$ 、および主応力方向角 $\alpha_0=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ に固定して、ひずみ制御方式で行った。ここで、主応力方向角は鉛直軸と主応力方向角とのなす角として定義される。

3. 実験結果と考察

〔1〕主応力方向が砂のせん断挙動に与える影響

Dogs Bay 砂について異なる 2 つの拘束圧 ($p_c=49, 196\text{kPa}$) における応力比 η - 軸差ひずみ γ - 体積ひずみ ε_v 関係を図-1 (a), (b) に示す。いずれの拘束圧においても主応力方向角 α_0 が増加するにつれピーク時の応力比 η が減少し強度が低下している。拘束圧の違いに着目すると (a) よりも拘束圧の大きい (b) の方が体積ひずみ ε_v の収縮量が増加しており、また、主応力方向角の違いによる応力比の挙動の差が小さくなっている。

〔2〕砂のダイレイタンスー特性とせん断強度

図-2 (a), (b) は、ピーク時の内部摩擦角 ϕ_p - 平均有効主応力 p_c 関係を示している。両試料についても主応力方向角 α_0 の増加に伴って ϕ_p が減少し初期構造異方性の影響を示している。また、拘束圧の違いに着目すると拘束圧の増加と共に ϕ_p が減少していることが分かる。特に、Dogs Bay 砂の $\alpha_0=15^\circ$ では、 p_c の増加と共に ϕ_p が大きく減少しており強い拘束圧依存性を示している。また、Dogs Bay 砂は、拘束圧の増加に伴い異方性の影響が次第に薄れており、低い拘束圧では、Dogs Bay 砂の方が秋穂砂よりも異方性の影響が強く現れているのに対し、高い拘束圧では若干ではあるが、秋穂砂の方が影響が強い。図-3 (a), (b) は、ピーク時における体積ひずみ増分比 $(-d\varepsilon_v/d\gamma)_p$ - 平均有効主応力 p_c 関係を示している。いずれの試料においても主応力方向角 α_0 の増加に伴い $(-d\varepsilon_v/d\gamma)_p$ は減少している。ただし、拘束圧が増加することによる $(-d\varepsilon_v/d\gamma)_p$ の低下量は試料により異なり、主応力方向角 α_0 が 15° の結果を見ると、Dogs Bay 砂では、0.4~0.0、秋穂砂では 0.4~0.25 付近を示しており、Dogs Bay 砂は拘束圧依存性が強いことを示している。

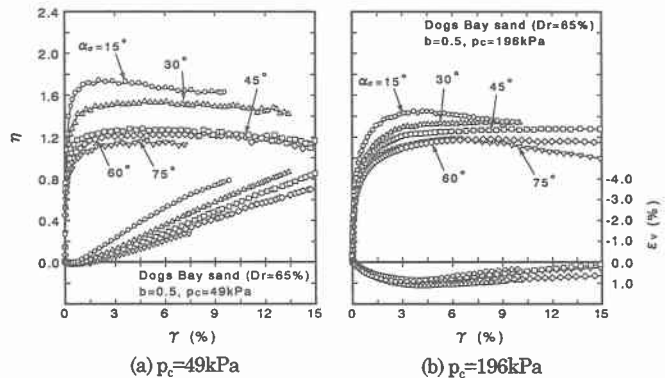


図-1 応力比-軸差ひずみ-体積ひずみ関係

また、 $(-d\varepsilon_v/d\tau)_p$ は低い拘束圧ではDogs Bay 砂の方が秋穂砂よりも異方性の影響が大きく現れているのに対し、拘束圧が高くなるとDogs Bay 砂では異方性の影響が急激に低下し秋穂砂の方が強く現れている。この図は、前述した ϕ_p-p_c の関係(図-2)と類似していることから砂のダイレタンシー特性とせん断強度との間には密接な関係があることが伺える。この関係について塑性ひずみ増分比と応力比の関係を示す式として、カムクレイ モデルのストレス・ダイレタンシー式が示されている。

$$\left(-\frac{d\varepsilon_v}{d\tau}\right)_p = \eta_p - \eta_{crit} \quad (1)$$

式(1)において、 η_{crit} は限界状態における応力比である。この式は、ピーク時における応力比と限界状態における応力比の差($\eta_p - \eta_{crit}$)は、塑性体積ひずみ増分比で表されることを示している。式(2)は、応力比 η と内部摩擦角 ϕ の関係式を示しているが、 $\phi_p - \phi_{crit}$ についても $(-d\varepsilon_v/d\tau)_p$ と関連があるといえる。

$$\eta = \frac{\sqrt{0.75}}{0.5} \sin \phi \quad (b=0.5) \quad (2)$$

排水せん断試験結果において、式(1)の関係が成り立つかを検討するために、Dogs Bay 砂の $(-d\varepsilon_v/d\tau)_p - (\eta_p - \eta_{crit})$ 関係を求めたものが、図-4である。 $(-d\varepsilon_v/d\tau)_p$ と $(\eta_p - \eta_{crit})$ のプロットは、概ね $(\eta_p - \eta_{crit}) = (-d\varepsilon_v/d\tau)_p$ の直線に沿っており式(1)を満足した結果が得られた。図-5(a), (b)は、それぞれDogs Bay 砂、秋穂砂について $(\phi_p - \phi_{crit}) - p_c$ 関係を示したものである。この図の $(\phi_p - \phi_{crit})$ は、前述したことからダイレタンシー特性に関係しているといえる。図を見てわかるように、いずれの主応力方向角 α_p の場合の結果も、それぞれを一つの直線で表すことができる。さらに、それらの直線は $\phi_p - \phi_{crit} = 0$ において一点で交わるという関係が得られた。この交点には、秋穂砂に比べDogs Bay 砂の方が低い応力域に至っている。また、以上のような関係は試料の違いに関わらずいえることが明らかとなった。

まとめ

- ① 主応力方向が、鉛直軸から水平軸に傾くにつれピーク時の応力比が低下し、せん断ひずみが生じ易くなる。
- ② $(\phi_p - \phi_{crit}) - p_c$ 関係において、Dogs Bay 砂は秋穂砂よりも低い応力域で $\phi_p = \phi_{crit}$ に達し、強い拘束圧依存性を示した。これは、Dogs Bay 砂の構成粒子が秋穂砂のそれに比べ脆弱であることに起因するものと考えられる。
- ③ 秋穂砂に比べDogs Bay 砂の方が、排水せん断挙動における初期構造異方性の影響や拘束圧依存性を強く受ける。また、拘束圧の違いは初期構造異方性に影響を与え、その影響の程度も、Dogs Bay 砂の方が大きい。

【参考文献】 1)中田・安福・村田・兵動・永島(1995):“主応力方向固定条件下における異方性砂の非排水・排水せん断挙動” 土木学会論文集, No. 511/III-30, pp. 209-220. 2)Roscoe, K.H., Schofield, A.N. and Thurairajah, A. (1963): "Yielding of clays in states wetter than critical," Geotechnique, Vol. 13, No. 4, pp. 211-240

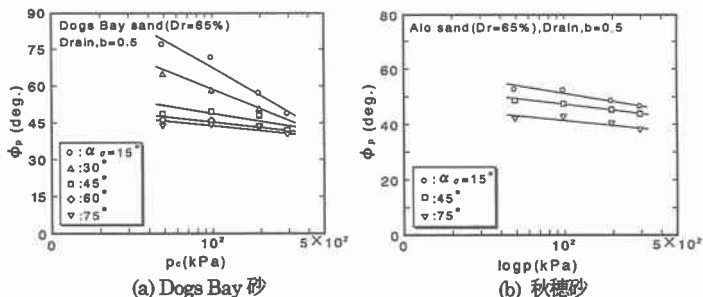


図-2 ピーク時の内部摩擦角-平均有効主応力関係

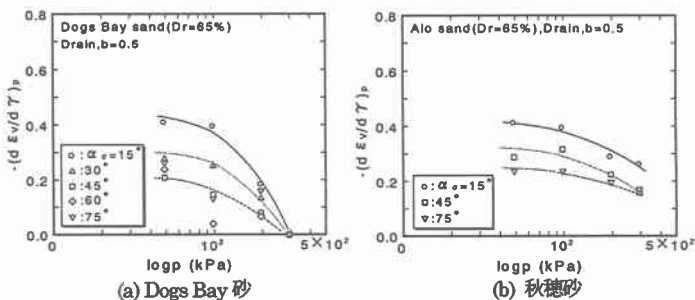


図-3 ピーク時のひずみ増分比-平均有効主応力関係

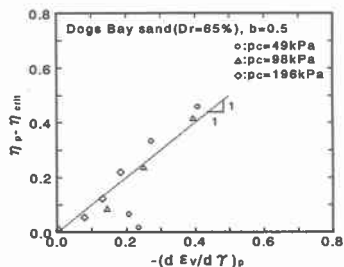


図-4 $(\eta_p - \eta_{crit}) - (-d\varepsilon_v/d\tau)_p$ 関係

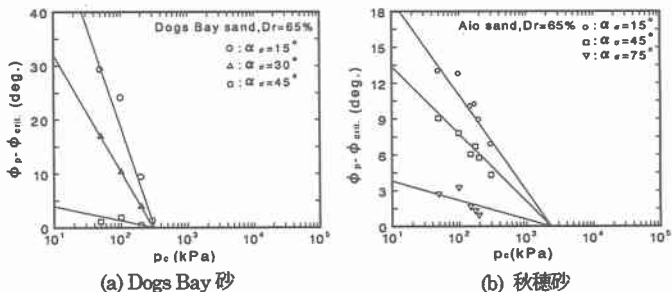


図-5 $(\phi_p - \phi_{crit}) - p_c$ 関係