

圧縮性の異なる砂の単純せん断特性

山口大学工学部 正会員 中田幸男 兵動正幸 村田秀一
山口大学大学院 学生会員 ○豆田展崇 矢野修平 高橋徹

1. はじめに

地盤中の単純せん断モードを再現する試験機の一つに中空ねじりせん断試験機がある。ここではその装置を用いて、せん断中の体積変化傾向の異なる三種類の試料に対する中空ねじり単純せん断試験を行い、応力ひずみ挙動を把握するとともに、せん断面上の応力比と主応力比関係との関連についても検討した。

2. 試料および試験方法

試料は豊浦砂、カーボネイト系の Dogs bay 砂および岩国まさ土であり、その供試体は空中落下法により相対密度 80% を目標に作製した。試験機は供試体高さ $h=20\text{cm}$ 、外半径 $r_o=5\text{cm}$ 、内半径 $r_i=3\text{cm}$ の中空ねじりせん断試験機を用いた。圧密は $K=\sigma_z/\sigma_\theta=0.45$ を保ちながら応力制御により、鉛直方向応力 $\sigma_z=100\text{kPa}$ まで異方圧密を行った。せん断は排水条件のもと鉛直方向応力一定制御、内外圧を独立に制御することによる内外径一定制御、ひずみ制御で単純せん断試験を行った。

3. 試験結果および考察

図 1 にせん断面上の応力比 τ/σ_z と軸ひずみ ε_z - ねじりせん断ひずみ $\varepsilon_{z\theta}$ 関係を示す。三種類の試料とも明確なピークはみられない。ピークは豊浦砂については $\varepsilon_{z\theta}=8.7\%$ 、Dogs bay 砂では $\varepsilon_{z\theta}=11.8\%$ 、岩国まさ土では $\varepsilon_{z\theta}=10.8\%$ で迎えた。せん断初期 $\varepsilon_{z\theta}=1\%$ までに増加する応力比に着目すると、豊浦砂は最大応力比の 80%、Dogs bay 砂は 70%、岩国まさ土は 55% 程度となった。また、 $\varepsilon_{z\theta}=2\%$ 以降についても岩国まさ土は、豊浦砂と Dogs bay 砂に比べてゆるやかに応力比が増加している。これらから圧縮性が高い試料ほど応力比の増加が緩やかであるということがわかる。

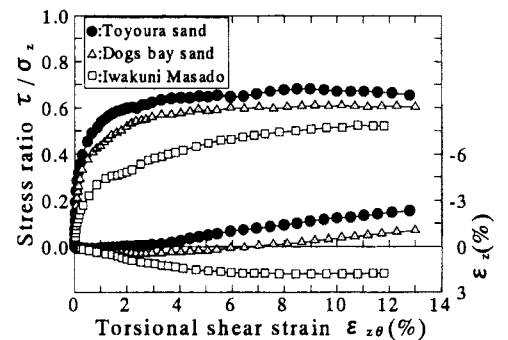


図 1 $\tau/\sigma_z, \varepsilon_z - \varepsilon_{z\theta}$ の関係

図 2 に半径方向ひずみ ε_r 、円周方向ひずみ ε_θ と三主応力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - ねじりせん断ひずみ $\varepsilon_{z\theta}$ 関係を示している。図(a)は豊浦砂、図(b)は Dogs bay 砂、図(c)は岩国まさ土の結果をそれぞれ示している。豊浦砂ではせん断初期 $\varepsilon_{z\theta}=1\%$ までに大きく膨張傾向を示し、その結果として内外径一定制御により中間主応力 σ_2 は増加している。大きなひずみ領域についても、 ε_r がやや膨張側に偏っており、その結果として、 σ_2 は常に増加傾向を示した。Dogs bay 砂と岩国まさ土についても、 ε_r は膨張・収縮傾向を繰返しているが、その傾向も豊浦砂のものに比べて小さく、 σ_2 の増加傾向がより小さなものとなっている。最小主応力 σ_3 は三種類の試料ともせん断初期にやや減少傾向にある。ピーク以降豊浦砂では緩やかな増加傾向にある。Dogs bay 砂では 7% 付近、岩国まさ土では 2% 付近からわずかな増加傾向を示している。

図 3 に応力比 σ_1/σ_3 と体積ひずみ ε_v - ねじりせん断ひずみ $\varepsilon_{z\theta}$ 関係を示す。豊浦砂は $\varepsilon_{z\theta}=4.8\%$ で明確なピークを示した。一方で、Dogs bay

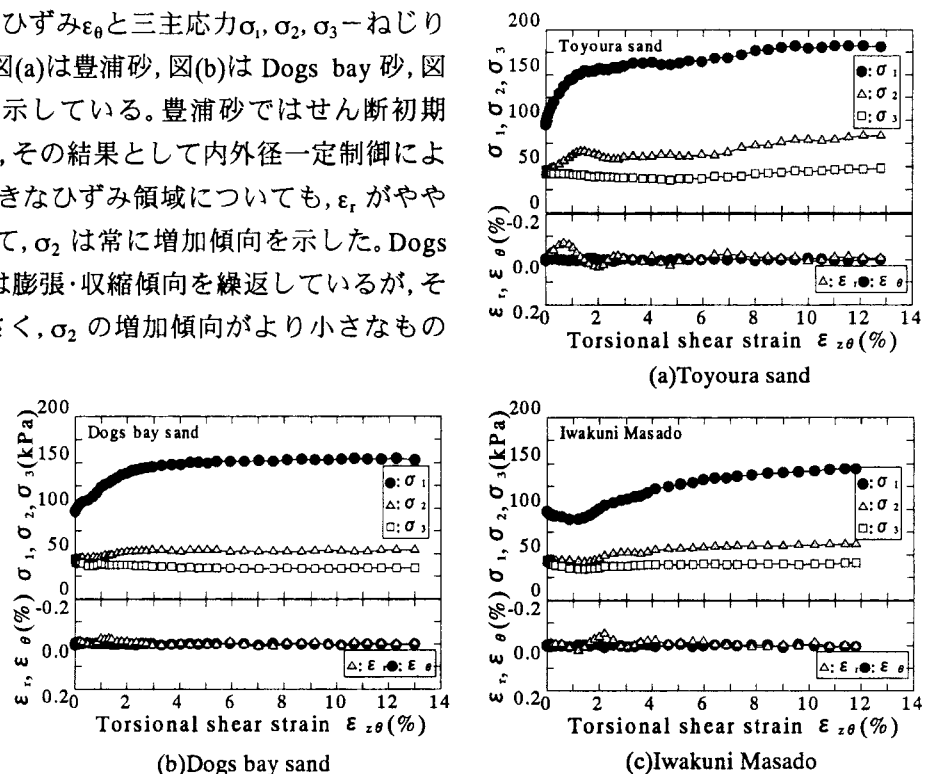


図 2 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ と $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta - \varepsilon_{z\theta}$ の関係

砂と岩国まさ土はゆるやかに応力比が増加し、Dogs bay 砂のピークは $\varepsilon_{z\theta}=9.4\%$ 、岩国まさ土は $\varepsilon_{z\theta}=10.2\%$ で迎える。Dogs bay 砂やまさ土が豊浦砂に比べ大きなひずみ領域でピークを迎えるのは、粒子自体のもつ間隙、粒子の破碎性、細粒分などが要因として挙げられ、粒子による噛み合いによる強度が遅れて発揮されたためだと考えられる。また、ピーク時に得られるせん断抵抗角 ϕ_p は、豊浦砂 39.5° 、Dogs bay 砂 40° 、岩国まさ土 34° を示し、豊浦砂と Dogs bay 砂においては明確な差は認められない。また、残留強度 ϕ_{cv} は豊浦砂 27.6° 、Dogs bay 砂 31.7° 、岩国まさ土 32.1° を示し、Dogs bay 砂と岩国まさ土は近い値を示した。

図 4 に中間主応力係数 b (三主応力における中間主応力 σ_2 の相対的な大きさ) - ねじりせん断ひずみ $\varepsilon_{z\theta}$ の変化を示す。豊浦砂ではせん断初期 $\varepsilon_{z\theta}=1\%$ までに σ_2 が大きく増加したことから、せん断初期からより大きな値を示した。ピーク時で $b=0.21$ を示し、 $\varepsilon_{z\theta}=3\%$ 以降三主応力の変化に伴い b 値は上下しながら徐々に増加していく傾向を示した。Dogs bay 砂では、ピーク時で $b=0.18$ を示し、 $\varepsilon_{z\theta}=3\%$ 以降、三主応力がほぼ一定を保っていたことから、 b 値も一定となった。岩国まさ土はゆるやかな増加傾向を示した後、Dogs bay 砂より高めの値となる $b=0.21$ でピークに至った。

図 5 に主応力方向角 α_σ (鉛直軸と最大主応力 σ_1 のなす角) - ねじりせん断ひずみ $\varepsilon_{z\theta}$ の変化を示す。せん断初期 $\varepsilon_{z\theta}=0.5\%$ に着目すると、豊浦砂、Dogs bay 砂ともに最大回転角の 80% 以上回転している。一方、岩国まさ土については 50% 程度であった。ピーク時において、豊浦砂は $\alpha_\sigma=45^\circ$ を示し、以後更に緩やかに回転する傾向がみられた。Dogs bay 砂は $\alpha_\sigma=42^\circ$ 程度を保ったまません断が進行し、それ以上回転しない傾向がみられた。岩国まさ土の最終的な主応力方向角 α_σ は 41° であり、若干ではあるが回転が続く傾向にある。

土の応力ひずみ関係において $d\varepsilon_v/d\varepsilon=0$ を満足する時に発揮される摩擦角を ϕ_{cv} と呼ぶ。この ϕ_{cv} について、ここでは体積ひずみが収縮から膨張に転ずる時の応力比 $\eta(=q/p')$ を求め、その値から算定した。試験結果より豊浦砂では $\sin\phi_{cv}=0.467$ 、Dogs bay 砂は 0.525 、岩国まさ土は 0.479 であった。また、応力比 τ/σ_z と主応力方向角 $\tan\alpha_\sigma$ の関係について、小田・小西ら (1974)¹⁾ は側圧一定の三軸圧縮試験における砂の強度変形特性とその微視的構造の関係に関する提案をもとに式(1)を与えた。

$$\tau/\sigma_z = \kappa \cdot \tan\alpha_\sigma \quad \cdots (1)$$

更に、落合ら²⁾は式(1)を用いて、砂の直接せん断試験における応力状態について検討し、式(1)の κ は ϕ_{cv} により式(2)で表されることを示した。

$$\kappa = \sin\phi_{cv} \quad \cdots (2)$$

式(1)を用いて、得られる実験結果に対する $(\tau/\sigma)/\tan\alpha_\sigma = K$ の傾向を図 6 に示す。図中の破線は、上述したようにして求めた ϕ_{cv} から得られるそれぞれの試料の $\sin\phi_{cv}$ である。三種類の試料ともに、せん断初期には $\sin\phi_{cv}$ 線から離れていく傾向にある。大きなひずみ領域において、Dogs bay 砂と岩国まさ土は約 0.15 程度の差を保ちながらせん断が進行している。一方、豊浦砂は 6% 以降 $\sin\phi_{cv}$ に近づいているのがわかる。図 1 と図 6 から、せん断中の圧縮性の違いはせん断応力比 τ/σ_z および主応力方向角 α_σ の回転に与える影響が大きいといえる。

[参考文献] 1) Oda, M. (1972): "Deformation mechanism of sand in triaxial compression tests" Soils and Foundations, Vol.12, No.4, pp.45-63. 2) 落合英俊 (1975): "直接せん断試験における砂の挙動", 土質工学会論文報告集, 第 15 巻, 第 4 号, pp.93-100

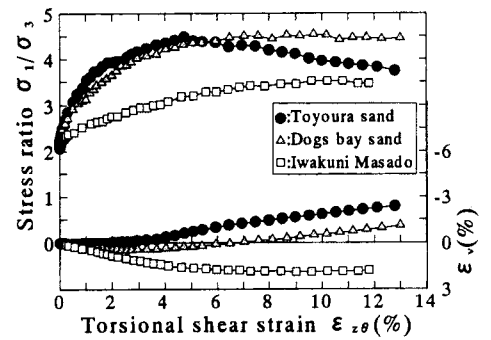


図 3 $\sigma_1/\sigma_3, \varepsilon_v - \varepsilon_{z\theta}$ の関係

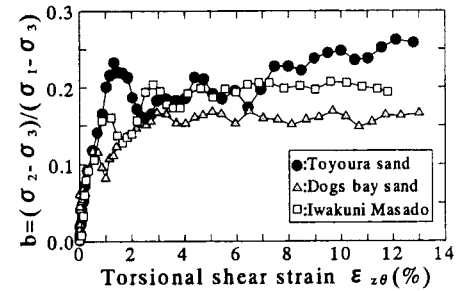


図 4 $b - \varepsilon_{z\theta}$ の関係

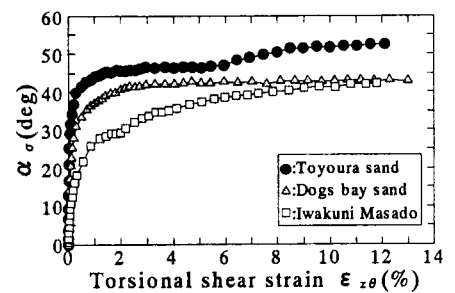


図 5 $\alpha_\sigma - \varepsilon_{z\theta}$ の関係

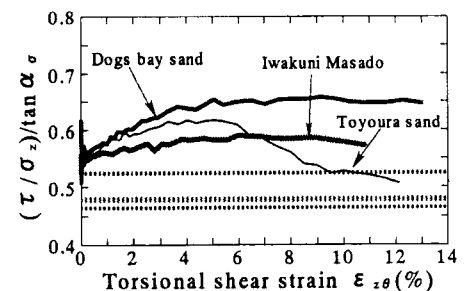


図 6 $(\tau/\sigma_z)/\tan\alpha_\sigma - \varepsilon_{z\theta}$ の関係