

異方性砂の三次元強度特性

長崎大学工学部 正 落合美俊・学・石橋裕之
 衛藤雄二・諫山輝二

河川砂、砂丘砂、砂浜砂など自然の砂地盤は粒子長軸の定方向配列による構造異方性を有しており、この構造異方性は砂の応力・ひずみ関係や強度特性に影響を与えることが実験的に明らかにされている。近年、構造異方性をもつ砂のせん断挙動に関する実験的研究が数多く行われているが、次のような点で、必ずしも系統だった一般的研究と言いきれない面がある。(1)供試体作成法は示されているが、供試体の構造異方性が確認されていない。(2)応力条件が軸対称三軸、平面ひずみ条件に限定され、一般的三次元応力状態ではない。(3)応力制御方式で行われているため、破壊時の応力状態が明確でない。

本研究は、構造異方性をもつ砂供試体について、一般的三次元応力下におけるせん断挙動を実験的に調べたものである。供試体は自然の砂地盤と同じような粒子の定方向配列を有するように作成された立方体供試体であり、試験装置への供試体セットを容易にし、所望の方向から応力を載荷できるようにするため、供試体は一時凍結させた。試験は、三主応力を独立に制御できる立方体三軸試験機、平面ひずみ試験機および三軸圧縮試験機を用いて、排水状態で行った。

～試料、供試体作成法および構造特性～

試験に用いた試料は、粒径 $0.8\phi \sim 2.00 \text{ mm}$ の水洗いした川砂である。図-1(a)は、2台の顕微鏡を用いて測定した粒子(250個)の三次元的な形状を示したものであり、この砂はいくぶん長めで、扁平であるといえる。また、この砂の比重は2.708、最大および最小間けき比はそれぞれ0.80、0.51である。供試体寸法は $76 \times 76 \times 76 \text{ cm}$ の立方体であり、特別に製作したモールド内に試料を pouring と shaking を併用して詰め込み、一晩冷凍庫の中で凍結させることによって作成した。供試体の間けき比は0.53~0.54であり、相対密度は98~90%である。

図-1(b)は、供試体の水平および鉛直断面において、それぞれ任意に抽出した280個の粒子の長軸方向を拡大写真上で測定し、ローズ図として示したものである。本研究で用いた供試体は、鉛直断面において粒子の顕著な定方向配列があり、水平断面においてはほぼランダムな粒子配列となっていることがわかる。言い換えると、この供試体は水平面内で等方な二軸直交異方性体とみなせる。

～応力およびひずみの表示と試験方法～

応力およびひずみはすべて圧縮を正とし、以下、X軸を供試体の pouring の方向と一致させた三次元直交座標軸(X, Y, Z)を用いる(図-2)、三次元応力状態において、中間主応力の相対的大きさを表すために、次の2つのパラメータを用いる。

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (1)$$

$$\tan \theta = \sqrt{\frac{\sigma_Y - \sigma_X}{(\sigma_X - \sigma_Y) + (\sigma_X - \sigma_Z)}} \quad (2)$$

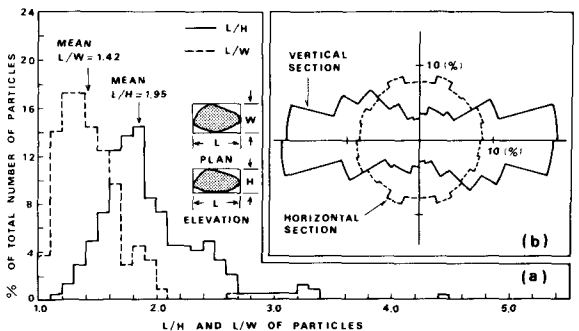


図-1 使用粒子の三次元形状と供試体の構造特性

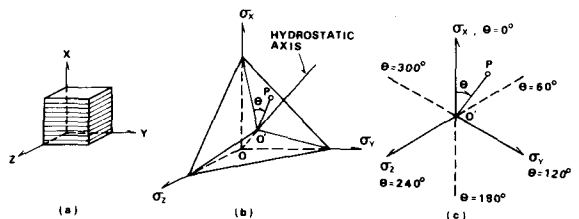


図-2 座標系の説明図

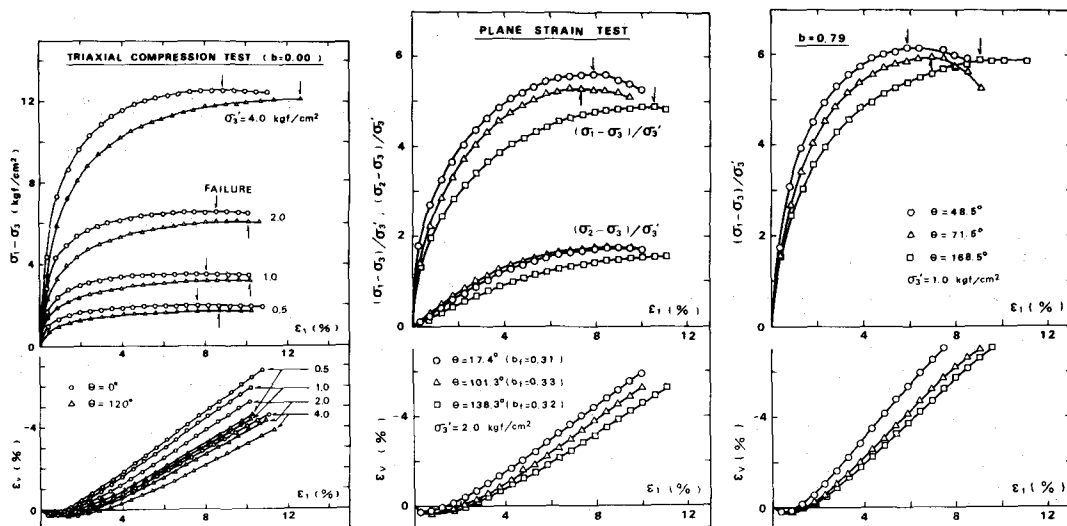


図-3 応力-ひずみ-体積変化曲線

は、 θ は応力経路を八面体上に投影したとき、 x 軸から時計回りに、せん断応力の方向である。試験はすべて最小主応力 σ_3 が一定の条件で、ひずみ制御方式の排水試験である。また、立方体三軸試験は、 $b =$ 一定の条件で行った。

～試験結果とその考察～

図-3は、 $b = 0.00$ 、 0.79 および平面ひずみ試験での応力ひずみ曲線である。同じ b 値に対して、八面体面上の各 60° の放射角部分で、応力・ひずみ挙動が一定の傾向をもって明らかに異なることがわかる。図-4は、 b 値と内部摩擦角 ϕ ($=\sin^{-1}(\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 + \sigma_3)$) の変化を示したものである。 ϕ の値は、 $b = 0$ の軸対称三軸圧縮状態でもっとも小さく、 b 値がほぼ 0.50 から 0.75 に達するまで中間主応力の増加とともに大きくなる。そして、 $b = 1.0$ の軸対称三軸伸張状態に近づくにつれて、 ϕ の値がわずかに減少する傾向がすべての場合で認められる。このような破壊面の形は、Lade による次の三次元破壊規準によって表わすことができる。

$$\eta_1 = (I_1^3/I_3 - 27)(I_1/p_0)^m \quad (3)$$

ここに、 I_1 、 I_3 は一次および三次の不変量、 p_0 は応力と同じ単位で表わした大気圧であり、 η_1 と m は定数で、 $\theta = 0^\circ$ の三軸圧縮試験のみから定められる。この砂の場合、 $\eta_1 = 50$ 、 $m = 0.17$ であった。図-5は、 $I_1 = 10 \text{ kgf/cm}^2$ の八面体面上に投影した実験結果である。図には、 $\theta = 0^\circ$ の試験に対応する Mohr-Coulomb の規準も示しているが、摩擦性材料に対して提案されている式 (3) が初期構造異方性を有する砂の三次元強度特性を非常に良く表わしていることがわかる。

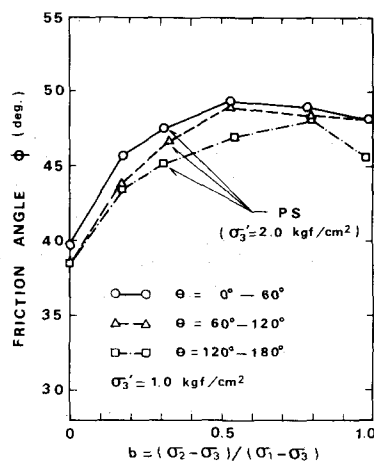


図-4 ϕ - b 関係図

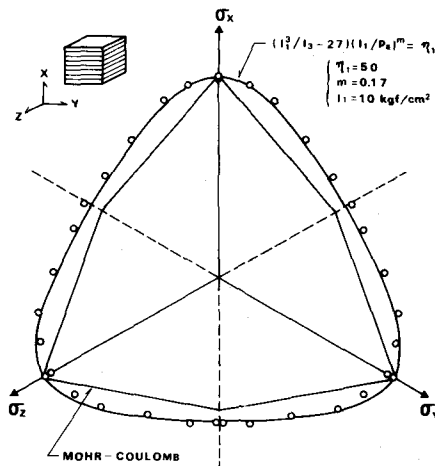


図-5 実験結果と計算値の比較