

構造異方性を有する砂の三次元応力変形特性

九州大学 工学部 村崎慎一 九州大学 工学部 正 落合英俊
九州大学 工学部 林 重徳 九州大学 工学部 辻 哲

1. まえがき

河川、砂浜、砂丘などの自然の砂地盤は粒子長軸の定方向配列による異方的な構造を有しており、このような構造異方性は、砂の応力変形挙動に大きな影響を及ぼす。本文は、軸対称応力状態、平面ひずみ状態を含む一般的な三次元応力状態において、砂の応力変形挙動に及ぼす構造異方性の影響が拘束圧とせん断変形の進行に伴い、どのように変化していくかを検討したものである。

2. 応力パラメーターについて

図-1(a)に示すように、x軸を堆積方向と一致させた三次元直交座標軸(x, y, z)を用いる。また、三次元応力下における中間主応力 σ_2 の相対的な大きさを表すために、次の2つのパラメータを用いる。

$$\tan \theta = \sqrt{3} \cdot \frac{\sigma_y - \sigma_z}{(\sigma_x - \sigma_y) + (\sigma_x - \sigma_z)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad \dots\dots\dots (2)$$

θ は図-1(b),(c)に示すように、応力経路を正八面体面に投影したとき、x軸から反時計回りに測った角度である。なお、図-1を参照して、 θ に関して次の3つの領域を規定する。

領域 I : $\theta = 0^\circ \sim 60^\circ$ ($\sigma_x = \sigma_1, \sigma_y = \sigma_2, \sigma_z = \sigma_3$)

領域 II : $\theta = 60^\circ \sim 120^\circ$ ($\sigma_x = \sigma_2, \sigma_y = \sigma_1, \sigma_z = \sigma_3$)

領域 III : $\theta = 120^\circ \sim 180^\circ$ ($\sigma_x = \sigma_3, \sigma_y = \sigma_1, \sigma_z = \sigma_2$)

以下に検討する実験結果¹⁾は、堆積面内でランダムな粒子配列を持ち、それと直角な面内で顕著な粒子の定方向配列を持つように作成された密な砂供試体についての、三主応力制御試験(σ_3 一定, b値一定の排水試験)である。

3. 拘束圧と構造異方性の影響

同じ応力が作用する場合でも、その方向の構造特性が異なれば、生ずるひずみも異なり、なされる仕事も異なる。

そこで、構造特性が異なる二方向がともに最小主応力方向となる $b=0, \theta=120^\circ$ ($\sigma_y > \sigma_z = \sigma_x$)での軸対称三軸圧縮試験において、軸差応力($\sigma_1 - \sigma_3$)が二つの方向になす仕事 $W_{yz} (= \int (\sigma_y - \sigma_z) \cdot (d\varepsilon_y - d\varepsilon_z))$ と $W_{yx} (= \int (\sigma_y - \sigma_x) \cdot (d\varepsilon_y - d\varepsilon_x))$ に着目し、整理した結果の一例が図-2である。一般に、堆積面に垂直な方向では平行な方向と比べて、圧縮されにくく、膨張しやすい変形特性を持っているので、x方向への仕事がz方向への仕事よりも大きくなり、その差が構造異方性の影響の差であると考えられる。この $W_{yx} \sim W_{yz}$ 関係の初期部分の接線勾配

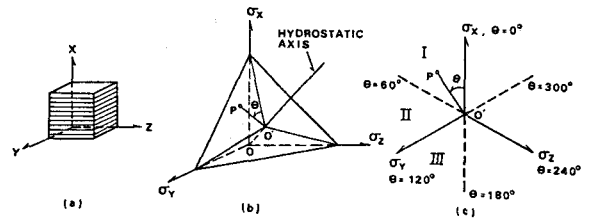


図-1 座標系の説明図

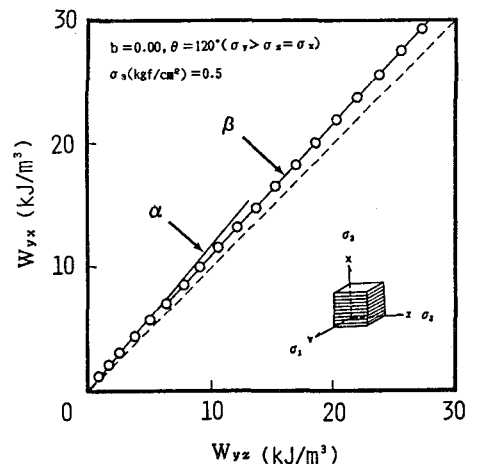


図-2 W_{yz} と W_{yx} の関係

を α 、仕事量が大きくなりほぼ直線的な関係になる部分の傾きを β とし、拘束圧 σ_3 との関係を示したのが図-3である。

α, β はともに、拘束圧の増大とともに減少し、1に近づく。このことは拘束圧が大きくなると、応力ひずみ曲線に構造異方性の影響は現われにくいことを示しており、したがって、高压下ではその影響はさほど問題にする必要はないと言える。また、すべての拘束圧において、 α は β より常に大きく、構造異方性の影響はせん断の初期に顕著であることを示している。

4. せん断に伴う構造異方性の影響の変化

構造異方性を持つ密な砂供試体の三主応力試験における応力ひずみ関係の一例を図-4に示す。構造異方性の影響を受けて、応力ひずみ関係は、 θ の各 60° の範囲(領域Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ)でかなり異なる。ところで、3.で述べたように、応力ひずみ挙動に及ぼす構造異方性の影響は、せん断初期において顕著であり、その変形の進行とともに小さくなる。このことをさらに詳細に検討するために、最大主ひずみ ε_1 と、そのときの応力ひずみ曲線の接線の勾配 $d\{(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_3\}/d\varepsilon_1$ の関係を整理した結果が図-5である。ほぼピーク応力に対応する変形の範囲内で、変形が小さいときは、3つの領域Ⅰ,Ⅱ,Ⅲにおける差は大きい、変形が進むと各領域における差はほとんどなくなる。このような傾向は、 b 値が異なる他の試験でも同様であり、せん断変形が大きくなると、応力の主軸と材料の主軸方向の差が異なることによる変形挙動の差(領域Ⅰ,Ⅱ,Ⅲの差)も次第に小さくなることを意味している。

一般に、载荷に伴う内部応力によって構造の変化が誘発されることを誘導異方性と呼んでいる²⁾。この中には、载荷以前の構造が等方的であるものが载荷によって異方的になる場合と、異方的であるものが等方的になる場合の2つの意味を含んでいと解釈される。上で示した例は、後者の場合に相当するものと考えられる。

5. まとめ

以上のことをまとめると、次のようになる。

1)拘束圧が大きくなると、応力ひずみ挙動に構造異方性の影響は現われにくくなる。

2)载荷以前に顕著な構造異方性を持つ場合、せん断変形が進行すると、次第にその影響が小さくなる。

(参考文献) 1)落合英俊・棚橋由彦;土木学会論文報告集,第399号(1983),pp.147~154, 2)佐武正雄;土と基礎(1984) Vol.32-11,pp.5~12.

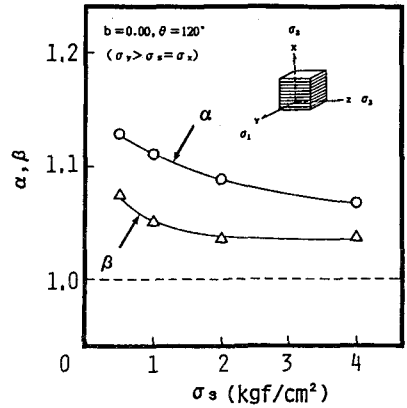


図-3 拘束圧 σ_3 と α, β の関係

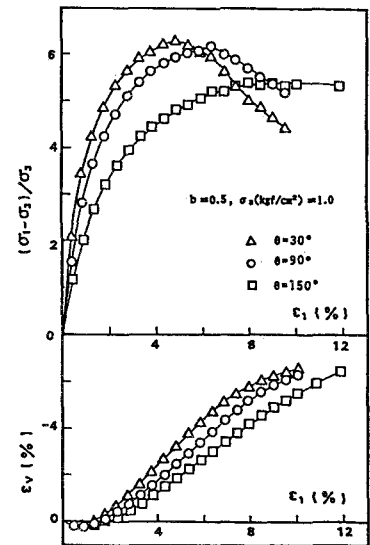


図-4 応力ひずみ曲線

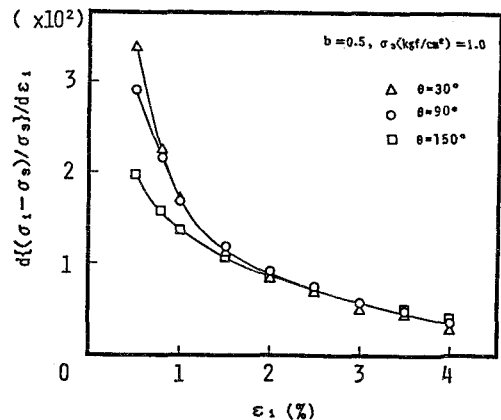


図-5 ε_1 と $d\{(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_3\}/d\varepsilon_1$ の関係