

広範な応力域における強度異方性と粒子破碎について

中電技術コンサルタント（株） 正 員 ○児玉信
山口大学工学部 正 員 中田幸男 村田秀一 兵動正幸
山口大学大学院 学生員 足立剛 加登文学

1. まえがき 初期構造異方性を有する砂の変形強度特性に着目した研究は従来から多く行われているが、これらの実験的研究の多くは、500kPa 以下の比較的低い拘束圧に対するものであった。しかしながら、実地盤内の応力状態は、地表面付近の低拘束圧域から杭基礎先端部等に見られる数 MPa の高拘束圧域まで広範囲におよぶことが知られている。そこで、本報では、広範な拘束圧域において、秋穂砂と宇部まさ土の 2 種類の試料を用いて実験を行い、強度異方性に及ぼす拘束圧の影響および粒子破碎の影響について検討を行うものである。

2. 実験方法 用いた試料は秋穂砂 ($G_s=2.623$, $e_{max}=0.975$, $e_{min}=0.624$) と宇部まさ土 ($G_s=2.623$, $e_{max}=0.975$, $e_{min}=0.624$) である。まず、気乾状態の試料を多重ふるいを用いてプラスチック製の容器 (28×18×19cm) に空中落下させる。この時の水平面が堆積面となる。その後、浸水、脱水、凍結させることにより試料ブロックを作成する。この試料ブロックから、供試体の最大主応力面と堆積面とのなす角 δ が任意の角度になるようにコアビットとダイヤモンドソーを用いて供試体を作成する (図-1 参照)。実験は、この供試体を用いて、秋穂砂については 100kPa から 4MPa までの拘束圧域において平均有効主応力一定 (p 一定) 排水三軸圧縮試験を行い、宇部まさ土については 30kPa から 200kPa までの拘束圧域において側圧一定 (σ_r 一定) 排水三軸圧縮試験を行った。

3. 結果と考察 図-2 は、拘束圧の増加に伴う強度の変化を明らかにするために、各実験におけるピーク時の応力状態から求めたセカントアングル ϕ_s と平均有効主応力 p との関係を示したものである。ここで、 ϕ_s は次式によって与えられる。

$$\phi_s = \sin^{-1} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \dots\dots (1)$$

この図から、いずれの δ の結果についても、拘束圧の増加に伴い強度が低下していることがわかる。具体的に見ると、 ϕ_s の値は $p=0.2\text{MPa}$ から $p=4\text{MPa}$ の間で顕著に低下している。また、 δ が大きいほど ϕ_s は小さく、 $\delta=0^\circ$ と $\delta=90^\circ$ に注目すると、その差は $p=0.2\text{MPa}$ 程度までは約 6° であるが、 p の増加に伴い減少し、 $p=4\text{MPa}$ 以上では 0° となっていることがわかる。

図-3 は、 p 一定せん断試験において、ひずみ増分比が 0 となるような特性状態での内部摩擦角 ϕ_M と p の関係を示したものである。 ϕ_M は、特性状態における応力比 M を用いて次式のように表される。

$$\phi_M = \sin^{-1} \frac{3M}{(6+M)} \dots\dots (2)$$

図中には、秋穂砂の非排水試験によって得られた変相時のセカントアングル ϕ_M も重ねて示している。

図-3 から、排水試験と非排水試験の両試験において、 ϕ_M

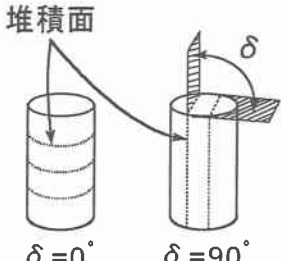


図-1 δ の概念図

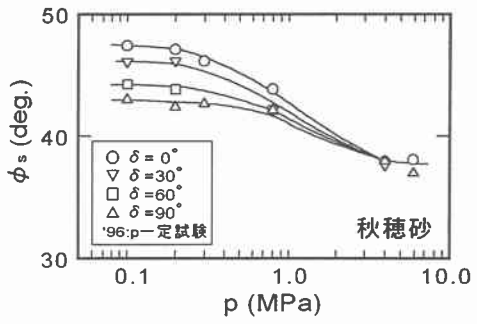


図-2 ϕ_s - p 関係

の値は、 p の増加に伴い増加していることがわかる。特に排水試験についてみると、 ϕ_s が顕著に減少し始める $p=0.2\text{MPa}$ 付近から顕著に増加し始め、 $p=4\text{MPa}$ 程度からは ϕ_s と一致し、一定値となっている。これまで ϕ_M の値は、正規領域において砂の密度、拘束圧、応力径路に依存しないことが多くの研究者によって指摘されてきた。しかし、それらの研究で行われてきた実験は、比較的低い拘束圧で実施されていた。これまでの研究成果と本研究の結果を踏まえると、 ϕ_M の値は比較的低い拘束圧では変化しないものの、粒子破碎を伴う高拘束圧域では、拘束圧の増加に伴い増加し、 ϕ_s の値に一致すると言える。

図-4 は、 σ_c 一定試験から得られた宇部まさ土のピーク時の応力状態におけるセカントアングル ϕ_s と平均有効主応力 p との関係を示している。この図から、 p の増加に伴い $\delta=0^\circ$ と $\delta=90^\circ$ における ϕ_s の差は徐々に減少しており、 $p=0.1\text{MPa}$ ($\sigma_c=50\text{kPa}$) 付近ではその差は 2° 程度で、 $p=0.4\text{MPa}$ ($\sigma_c=200\text{kPa}$) 付近では 1° 程度となっている。この図より、宇部まさ土においては、実地盤で想定できるような低い応力域で強度異方性が消失すると考えられる。

図-5 は、それぞれの試料について、ピーク時におけるセカントアングル ϕ_s と細粒分含有率の増加量 dF_c を、平均有効主応力 p を降伏点 p_y で除した p/p_y との関係で表したものである。ここで、秋穂砂の p_y は $p=3\text{MPa}$ 、宇部まさ土の p_y は $p=0.06\text{MPa}$ である。この図から、秋穂砂についてみると、 dF_c の増加に伴い ϕ_s は低下しており、 dF_c が急増するような $p/p_y=1$ 付近、すなわち降伏点付近で δ によらず ϕ_s が一致し、強度異方性が消失していることがわかる。宇部まさ土についてみると、 p/p_y の増加に伴う ϕ_s の低下や dF_c の増加はほとんど見られない。ただし、 dF_c は $p/p_y=1$ 付近、すなわち降伏点 $p=0.06\text{MPa}$ 付近で 15% 程度含まれていることがわかる。ここで、 $p=0.06\text{MPa}$ は、 $\sigma_c=30\text{kPa}$ における試験のピーク時の応力に一致しており、このことから、宇部まさ土では低い拘束圧域で降伏点に達し、粒子破碎が顕著に生じることにより強度異方性が消失すると考えられる。

4. あとがき 本研究では、広範な拘束圧域において実験を行い、砂の強度異方性に及ぼす拘束圧の影響および粒子破碎の影響について検討を行った。その結果、秋穂砂については、粒子破碎が顕著に生じるような応力域で強度異方性が消失し、宇部まさ土については、低拘束圧域において粒子破碎が顕著に生じており、強度異方性が消失していることが明らかとなった。

<参考文献> (1) Oda, M. (1972): "Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular material," Soil and Foundations, Vol. 12, No. 1, pp. 17-36. (2) Tatsuoka, F. et al. (1986): "Strength and deformation characteristics of sand in plane strain compression at extremely low pressures," Soil and Foundations, Vol. 26, No. 1, pp. 65-84. (3) 安福規之(1990) "広範な応力域における異方圧密砂の降伏特性と弾塑性構成式に関する研究," 九州大学博士論文

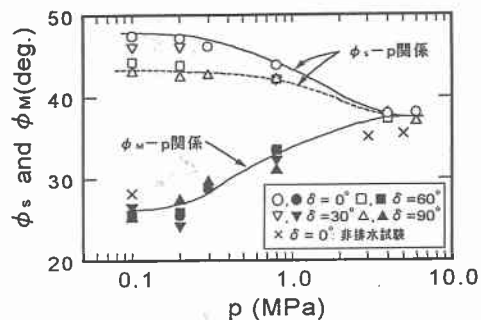


図-3 ϕ_s 、 ϕ_M - p 関係

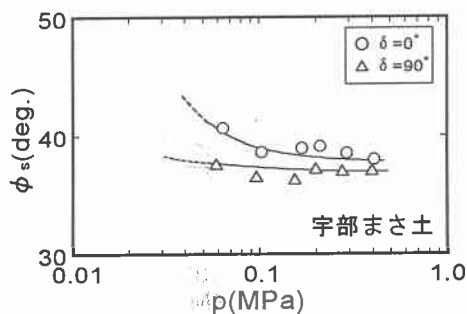


図-4 ϕ_s - p 関係

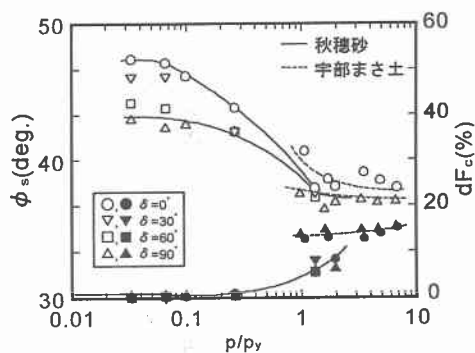


図-5 ϕ_s - p 関係