

砂の粒子破碎と三軸圧縮強度の拘束圧依存性との関連

山口大学
山口大学
中央復建コンサルタンツ(株)

正会員 中田幸男・兵動正幸・村田秀一
学生会員 ○加登文学
正会員 足立 剛

1.はじめに

基礎の支持力などの設計法を確立する上で、地盤の強度定数をどのように取り扱うかや、その強度としてピーク状態あるいは残留状態のいずれを用いるかは、重要なポイントとなる。加えて、特に破碎を生じやすい材料を取り扱う場合には、せん断過程における破碎状況、強度そして拘束圧との関連性を把握しておくことは、強度定数を決定する上で大きな意義をもつものといえる。ここでは、2種類の材料を用いて行った排水三軸圧縮試験結果と試験後に行ったふり分析結果をもちいて、砂の粒子破碎と強度の拘束圧依存性との関連性を明確にするものである。

2.三軸圧縮試験における応力ひずみ挙動

図-1 および図-2 は、秋穂砂および珪砂を用いて行った排水三軸圧縮試験結果¹⁾を応力ひずみ関係についてまとめたものである。秋穂砂の供試体は、0.074~2mm に粒度調整したものを相対密度 80%を目標に、珪砂の供試体は、1.4~1.7mm に粒度調整したものを相対密度 85%を目標にしてそれぞれ作成したものである。この図から、今回用いた2つの試料が、これまで多くの研究者^{2), 3)}によって明らかにされた応力ひずみ挙動の拘束圧依存性と類似の傾向を示すことがわかる。

3.ピーク直後の粒子破碎と強度の拘束圧依存性

図-3 は、図-1 の秋穂砂の応力ひずみ関係におけるピーク応力点でのセカントアングルとその時の平均有効主応力との関係および図-1 で示した試験終了後のふり分析結果から得られる粒子破碎係数とピーク時の平均有効主応力との関係を示したものである。ここで、粒子破碎係数は、試験前の試料の最小粒径における通過重量比で定義され、今回用いた秋穂砂の場合、細粒分含有率と等価となる。この図から、(1)ピーク点のセカントアングルはおおむね 0.2MPa から 5MPa の範囲で 47°から 35°に低下していること、(2) $p=0.2\text{MPa}$ における粒子破碎係数はほぼ 0 となっており、この付近の拘束圧下のピーク応力点までのせん断過程においては破碎が生じないこと、(3) $p=1.0\text{MPa}$ より高い拘束圧下において粒子破碎が生じていること、(4) $p=5\text{MPa}$ の粒子破碎係数は約 0.1 となっていること、などがわかる。

4.残留状態での粒子破碎と強度の拘束圧依存性

図-4 は、図-2 に示した初期粒径が 1.4~1.7mm の珪砂の応力ひずみ関係から得られるピーク応力点(○)およびひずみが 25%に達したとき(△)のセカントアングルをそれぞれの状態での平

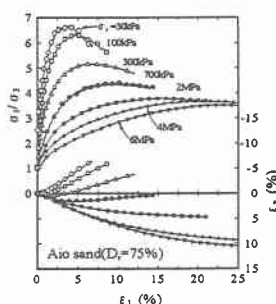


図-1 秋穂砂の応力ひずみ挙動

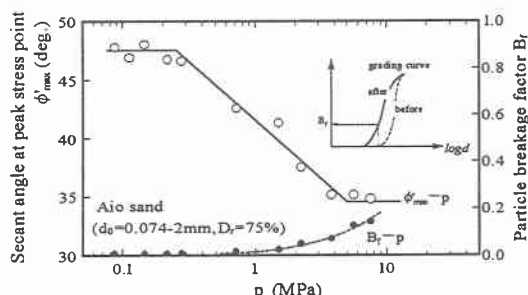


図-3 秋穂砂におけるピーク強度の拘束圧依存性と粒子破碎係数-平均主応力関係

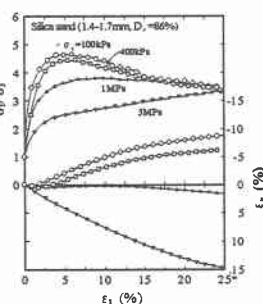


図-2 珪砂の応力ひずみ挙動

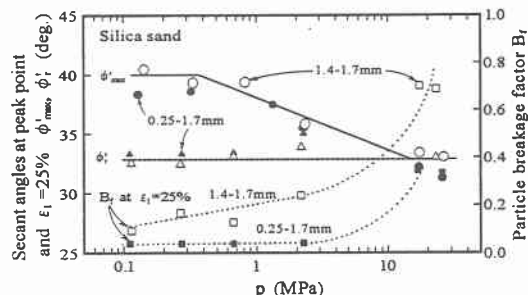


図-4 珪砂における強度の拘束圧依存性と粒子破碎係数-平均主応力関係

均有効主応力との関係で示したものである。また、試験後のふり分析から得られる粒子破碎係数($\square$)とひずみが25%に達したときの平均有効主応力との関係も示している。加えて、初期粒径が0.25~1.7mmの珪砂を対象に行った試験結果についても $\phi'_{\max}$ - p 関係、 ϕ'_r - p 関係そして B_r - p 関係を示している。この図から、(1)1.4~1.7mmについてのピーク点のセカントアングルは、おおむね $p=0.2\text{MPa}$ から $p=10\text{MPa}$ の範囲で 40° から 33° に低下し、秋穂砂の結果と類似の傾向を示していること、(2)ひずみが25%に達したときのセカントアングルは、拘束圧の大きさによらずほぼ 33° 程度を示していること、(3)粒子破碎係数についてみると、その値は、今回の実験の範囲において最も低い拘束圧下の実験結果においても、0ではなく、1.4~1.7mmの結果については、およそ0.1となっていることがわかる。

5. 粒子破碎特性と残留強度

以上のことをまとめたものが、図-5である。ピーク点のセカントアングルにおいて最大値を示す低い拘束圧領域では、ピーク点までの破碎はないものの、ピーク応力点から残留状態に至る間に破碎を起こすものと考えられる。ピーク点のセカントアングルが減少する応力域では、ピーク応力点に達するまでに既に破碎が生じ、さらに、ピーク点から残留状態に至る間においても破碎を起こすものと考えられる。ピーク応力点のセカントアングルが残留時のそれと等しくなる高い応力域の破碎は、ピーク応力点までに起こると考えられる。粒子の破碎は、粒子に作用する力が破碎強度を越えた場合に生じるといえる。砂供試体内の上述するような条件を満足し破碎を起こすには、①供試体に高い圧力が作用する場合、②間隙比が高くなる場合、③②と密接な関係があるが粒子の接触点数が減少する場合、が主に考えられる。ピーク前の破碎が、主として①により供試体全体で平均的に生じるものと考えられるのに対し、ピーク応力点から残留状態に至る間の破碎が②あるいは③の条件を満足し、せん断帯内あるいはせん断帯の近傍で局所的に生じているのではないかと考えられる。それは、(1)ピーク以後の変形がせん断帯内に集中して生じ、せん断帯部分の膨張量が著しく、その結果、局所的に粒子径の2から3倍の間隙が観察されたという報告⁴⁾があること、(2)せん断帯の幅やせん断帯のせん断変位が、一次元圧縮時の応力-ひずみ関係から得られる降伏応力、つまり砂の破碎強度と密接な関係があるという報告⁵⁾があること、(3)実験終了後に供試体を分割して行ったふり分析で、局所的に粒子破碎を示しているという傾向がある程度みられたこと、などの理由からである。図-6は、珪砂を用いた三軸圧縮試験から得られた残留状態でのセカントアングル ϕ'_r と一次元圧縮試験から得られた降伏応力 p_y との関係を示したものである。図中には、文献5)において示された400kPa以下の応力域における平面ひずみ圧縮試験から得られた残留状態でのセカントアングルと一次元圧縮試験から得られた降伏応力との関係も示している。この図から試験条件によらず ϕ'_r は降伏応力の増加とともに一義的に減少する傾向にあることがわかる。降伏応力が砂の粒子破碎に関係づけられるとすると残留時のセカントアングルは、砂の粒子破碎特性に密接に関連しているものと推察される。

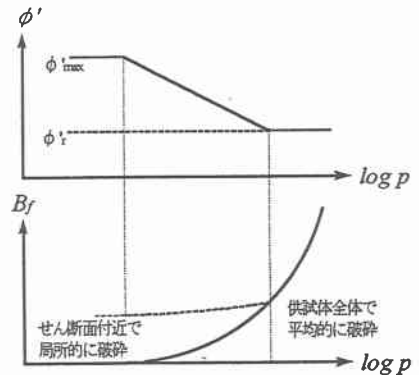


図-5 強度の拘束圧依存性と粒子破碎の概念図

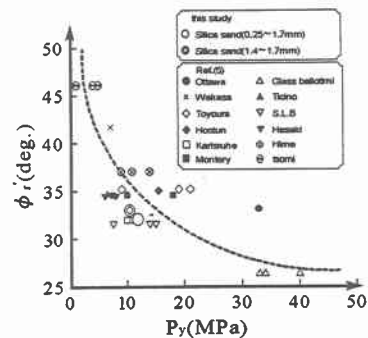


図-6 残留状態での ϕ'_r と降伏応力の関係

参考文献 1)中田・兵動・村田・児玉・足立：“広範な拘束圧下における砂の強度異方性について”，第31回地盤工学研究発表会講演集，pp.697-698，1996。2)三浦・山内：“砂のせん断特性に及ぼす粒子破碎の影響”，土木学会論文報告集，Vol.30, No.1, pp.531-532。3)安福：“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”，九州大学学位請求論文，1993。4)M. Oda, F. Tatsuoka and T. Yoshida, “Void ratio in shear band on dense granular soils”, Proceeding of Deformation and progressive failure in geomechanics, IS-Nagoya97, pp.157-162, 1997。5)T. Yoshida and F. Tatsuoka, “Deformation property of shear band in sand subjected to plane strain compression and its relation to particle characteristics”, Proceeding of the 14th ICSMFE, Vol.1, pp.237-240, 1997