

1.はじめに 土などの粒状体における圧縮性やせん断強さなどの力学特性は、土粒子の大きさや形状、間隙比などの基本物性や圧力レベルに依存して変化することが知られている。特に圧力レベルの変化は、ある応力空間において圧縮指数の増加、ダイレンタンシーの膨張挙動から収縮挙動への変化、ピーク時の内部摩擦角の低下など力学定数に変化を引き起こすことが明らかにされており^{1)~3)}、その要因として砂の粒子破碎の影響が挙げられている。地盤の支持力問題を検討する上で、粒子破碎が力学特性に影響を及ぼす応力域を考慮することは重要なことであり、そのため応力空間に存在するその領域を把握しておくことは工学的に意味のあることである。本報は以上のことを念頭に置き、応力経路の異なる様々な試験を行い、供試体内でなされる仕事や着色粒子の微視的観察および表面積の増加を表わす指標を用いて、粒子破碎特性を把握し、さらに広範な応力域におけるシリカ砂の排水せん断強度との関連性について検討を行うものである。

2.試料および試験方法 本研究では、粒子が破碎し始める応力や粒子破碎の程度が把握しやすいという理由から、比較的堅固なシリカ砂を 1.4~1.7mm に粒度調整したもの ($G_s:2.639$, $e_{max}:0.881$, $e_{min}:0.699$) を用いた。直径 50mm、高さ 100mm の円筒形の供試体を作成し、応力比一定 ($\eta=0, 0.5, 0.75, 1.0$) 圧縮試験は応力制御にて、側圧一定排水せん断試験はひずみ制御 (0.1%/min) にて行った。

3.結果および考察 図1は応力比一定で圧縮試験を行い、応力とひずみの関係から得られる全仕事 $W^{1)}$ を求め、全仕事コンターを平均有効主応力 - 軸差応力平面に示したものである。本研究では、砂の粒子破碎と全仕事との関係を調べるために、図1中に プロットで示す3本の等方圧縮試験 c1、c3、c4 ($W=2.6, 1.6, 0.7 \text{ J/cm}^3$)、 $\eta=1.0$ の異方圧縮試験 c2 ($W=2.6 \text{ J/cm}^3$)、さらに3種類のせん断試験、それぞれ拘束圧 10MPa のせん断時において軸ひずみ 10%で圧縮を中断した s1 ($W=1.50 \text{ J/cm}^3$) 拘束圧 1.5MPa で、せん断時において軸ひずみ 24%まで圧縮を行った s2 ($W=0.92 \text{ J/cm}^3$) 拘束圧 2MPa の試験についてピーク強度を発揮した時点で試験を終了した s3 ($W=0.41 \text{ J/cm}^3$) を行った。それぞれの供試体には着色粒子を上、中、下部に各6個ずつ配置しており、試験終了後にふり分析及び着色粒子の観察⁴⁾を行った。

図2は各試験終了時における修正比表面積増加量 $S'^{1)}$ 及び着色粒子の観察結果と全仕事との関係を示したものである。ここで S' は試験前後の粒径加積曲線から得られる

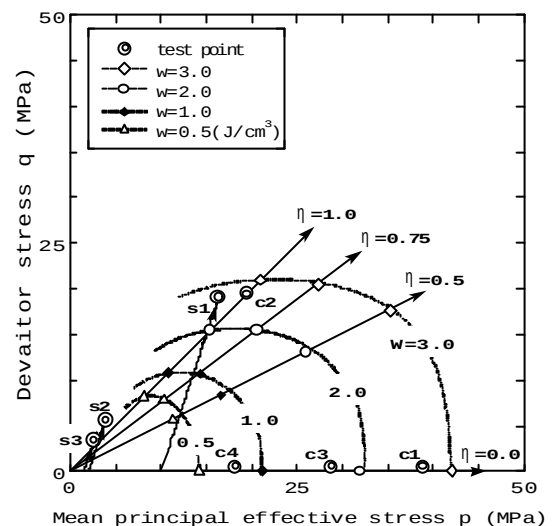


図1 全仕事コンターおよび試験経路

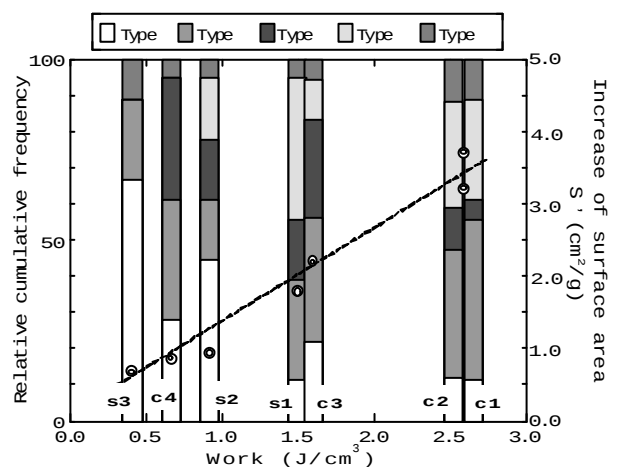


図2 粒子破碎状況と全仕事関係

キーワード：砂、粒子破碎、全仕事、せん断強度、応力経路

連絡先：〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1 山口大学工学部 TEL(0836)22-9724 FAX(0836)35-9429

修正比表面積 S_w の差で表される指標であり、粒子破碎を評価しているものである。着色粒子の観察は粒子破碎の程度を5段階評価で評価し整理している。その5段階評価は、Type : 試験前後で変化の見られないもの、Type : 粒子の角が1つでも欠けたり、一部分が削れた様な破碎を示したものの、Type : 数ヶ所の角が欠けるか、削れるような破碎を起こしたものの、Type : 粒子が2つか3つに割れるような完全な破碎を示したものの、Type : Type の完全な破碎を示した後、更に破碎したと認められるものである。図2中の棒グラフは各 Type の累積度数分布を各仕事に対応させたものである。圧縮試験の結果についてみると、応力径路の異なる場合においても全仕事はほぼ等しければ、 S' も、着色粒子の破碎の度合いもおおむね類似した結果となることがわかる。せん断および圧縮試験で同じ仕事となる $s1$ と $c3$ を比べると弱冠 $s1$ の方が破碎が大きくなっていることがわかる。しかし、全体的には圧縮とせん断によらずほぼ全仕事に一義的に破碎が進行するといえる。

図3は広範な応力域において行ったせん断試験から得られたピーク時のセカントアングル ϕ'_{peak} と平均有効主応力 p との関係およびピーク時の全仕事と平均有効主応力との関係である。 ϕ'_{peak} は p の増加に伴い、ほとんど変化しない領域 ($p < 1\text{MPa}$) から、徐々に低下する領域 ($1 < p < 10\text{MPa}$)、そして最小 ($p = 10\text{MPa}$) となった後、再び増加する領域 ($10\text{MPa} < p$) が現れることがわかる。そして、全仕事は $p=0.5\sim 1\text{MPa}$ 、 $5\sim 10\text{MPa}$ において急激に変化していること、 ϕ'_{peak} と p の関係において異なる特性を持つそれぞれの領域において異なる傾きのもと増加していることなどがわかる。また、図2の着色粒子の観察結果から $W=0.4\text{J/cm}^3$ では主として Type 、の微視的破碎が、 $W=1.50\text{J/cm}^3$ では Type 、の破碎が40%以上起こることを示している。このことは、 ϕ'_{peak} は粒子の角が欠けるような破碎が生じている応力域において低下し、粒子の完全な破碎を起こす応力域において最小値を示すことを示唆している。

図4はせん断試験後の S' と全仕事 W との関係である。この関係から、 $W = 5\text{J/cm}^3$ 前後で傾きが大きく変化していることがわかる。 $W = 5\text{J/cm}^3$ 後は傾きが0.058と $W = 5\text{J/cm}^3$ 前に比べ S' の増加割合が極端に小さくなっている。このことから、粒子破碎の進行はほぼ収まっている状態にあるといえる。そして、図3からこのような応力域においてピーク時のセカントアングル ϕ'_{peak} の値は増加していることがわかる。

4.まとめ 本報では、シリカ砂を用いた応力径路の異なる様々な試験を行い、粒子破碎特性を把握し、さらに広範な応力域における排水せん断強度との関連性について検討を行った。その結果、以下の結論を得た。

1. 圧縮、せん断など応力経路によらずほぼ全仕事に一義的に破碎が進行する。
2. ピーク時のセカントアングル ϕ'_{peak} は粒子の角が欠けるような破碎が生じている応力域において低下し、粒子の完全な破碎を起こす応力域において最小値を示し、粒子破碎の進行がほぼ収まっている応力域において再び増加する。

<参考文献> 1) 三浦, 山内 (1971): 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, pp531-532 2) 安福 (1990): 広範な応力域における異方性砂の降伏特性と弾塑性構成式に関する研究, 山口大学学位論文 3) 中田ら (1996): 広範な拘束圧下における砂の強度異方性について, 第31回地盤工学会研究発表概要集, pp679-689 4) Nakata, Y. et al. (1999): A probabilistic approach to sand particle crushing in the triaxial test, Geotechnique

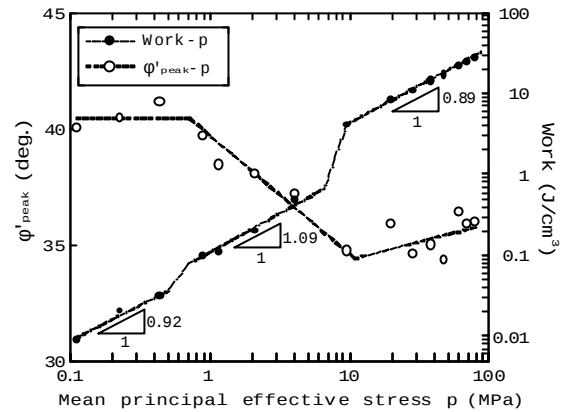


図3 ϕ'_{peak} および W と p との関係

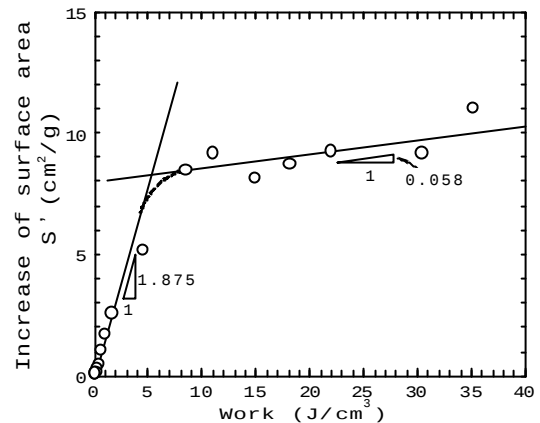


図4 S' と全仕事 W との関係