砂の平面ひずみせん断挙動における粒子形状の影響

山口大学大学院	学生会員	梶原	拓也	庄	麗		
山口大学大学院	正会員	中田	幸男	兵動	正幸	吉本	憲正

1. **はじめに** 砂の変形・破壊挙動は土粒子個々の特性に依存することがわかっている.その中でも粒子形状の影響が大きいといわれており¹⁾,その定量的な評価が必要である.本研究では粒子形状の異なる3種類の砂質 土を用いた平面ひずみ圧縮試験を行い,画像解析手法の1 つであるPIV (Particle Image Velocimetry:粒子画像流速測定法)解析法から得られる 変形・破壊挙動と粒子形状の関係について検討した.

2. 用いた試料とその粒子特性 本研究では粒子形状の異なる砂質土とし て宇部硅砂,豊浦砂およびガラスビーズの3種類を用いた.これらの試料 の粒子形状の複雑さを定量的に評価するために,それぞれの平均粒径の粒 子に対し顕微鏡による観察を行った.図-1に今回用いた宇部硅砂,豊浦 砂およびガラスビーズの撮影画像を示す.観察は平らな面に最も安定する 状態に粒子を置き,顕微鏡を用いた画像解析システムにより,上から投影 される像に対して行った.今回,粒子形状の表現方法には真円度R。と縦横 比Arを用いた.真円度R。及び縦横比Arは

$$R_c = \frac{L^2}{4\pi A}$$
 , $A_r = \frac{a}{b}$ $(b \ge a)$

で表される.ここに,Lは投影粒子の周囲長であり,Aは投影粒子の断面 積である.そして,bは投影粒子の相当楕円(投影粒子と同面積かつ一次、 及び二次モーメントの等しい楕円)の長軸長さ,aは短軸長さである.真 円度の値が1に近いほどその形状は円に近く,逆に

値が大きくなるほど形状が角張っていることを示している.表-1に各試料の真円度および縦横比の平均値を示す.この表から,宇部硅砂は角張っており, ガラスビーズはほぼ円であることがわかる.そして, 豊浦砂はその中間に位置している.



図 - 1 粒子の撮影画像 粒子の直円度及び縦横比

Sample	Ube silica sand 6A	ToyouraSand	Glassbead					
d(mm)	0.075 ~ 0.355	0.106 ~ 0.25	0.85 ~ 1.18					
d50(mm)	0.22	0.2	1.12					
Uc	1.53	1.25	1.15					
Av.(Rc,Ar)	(1.48, 1.53)	(1.34,1.39)	(1.01, 1.04)					



3. 用いた試験装置と試験方法 今回用いた試験装置はPIV解析手法を 適用可能な平面ひずみ試験装置²⁾であり,供試体サイズは断面 60mm×80mm,高さ160mmの矩形である.本試験装置により,平面ひ ずみ試験時の供試体のデジタル画像を取得し,PIV解析手法を適用す ることができ,供試体の変形・破壊挙動の観察が可能である.供試体 は目標密度を1.4~1.6g/cm³に設定し,5層にわけて自由落下により作 成し,背圧を50kN/m²として飽和化した.拘束圧としての有効最小主 応力 ₃'を空気圧により50,100,200kN/m²に設定し,1時間の圧密後, 排水条件で鉛直方向にひずみ速度0.1%/minとして軸ひずみ10%とな るまで単調載荷した.等方圧密および単調載荷中の体積変化は低容量 の差圧計を用いて供試体からの排水量により計測し,軸ひずみ1%ご





とに供試体をデジタルカメラで撮影した.

4. 試験結果およびPIV解析 図-2 は軸ひずみと応力比および体積ひずみの関係を示した図である. ピーク強度を発揮する応力比は拘束圧の増加とともに宇部硅砂では8.05,7.83,7.21,豊浦砂では6.76, 6.44,6.06,ガラスビーズでは4.02,3.50,3.44となり,どの試料においても減少することがわかっ た.また,体積ひずみにおいては,どの試料においても最初収縮した後,膨張していることが見て とれ,粒子形状がほぼ一定で粒径が大きいガラスビーズにおいて強い膨張傾向が現れた.これは密 な砂質土において正のダイレイタンシーが起きやすいためだと考えられる.図-3は真円度R。および 縦横比Arとピーク応力比の関係を表している.R。およびArの値が小さくなるほど応力比のピーク値 は小さくなっていることがわかり,ほぼ一次の相関関係が見られる.

ピーク時の最大主応力と最小主応力から各拘束圧におけるせん断抵抗角 φ を求め,主応力方向角 α を求めた.拘束圧が増加するとともに,主応力方向角 α は宇部硅砂では 70.7°, 70.6°, 69.6°, 豊浦砂 では 69.1°, 68.9°, 68.3°, ガラスビーズでは 63.4°, 61.9°, 61.7°となり,どの試料においてもピーク 応力比と同様に減少傾向を示すことがわかった.

次に供試体中央部の画像を切り出し、PIV画像解析を行い,現在の画像と1分後の画像の変位増分 を求め,速さ(pixel/min)とした.切り出した画像の速さ(速度ベクトルの大きさ)分布を図-4 に 示す.この速さ分布図の速度が急激に変化している部分をせん断帯の端とみなし,各試料のせん断 帯の角度および幅を求めた²⁾.図-5 は図-4 に示すせん断帯と平行になるようX 軸を置き,それ と直行するようにY 軸を定め,各試料のせん断帯の両端を示したものである.図-5 から粒子形状 が複雑でU_cの大きい宇部硅砂のせん断帯の幅は,最も不均一で,球に近くU_cが1 に近いガラスビー ズのそれは,均一であることがわかる.図-6 および図-7 に各試料のピーク応力比発揮直後におけ るせん断帯角度と拘束圧の関係,せん断帯幅を平均粒径で正規化したものと拘束圧の関係を示した. 図-6 より,せん断帯の角度は拘束圧の増加に伴い大きく減少し,R_cおよびA_rの値が大きいほどせ ん断帯の角度は大きくなることがわかった.正規化せん断帯幅は,過去に報告されたもの³⁾よりも 小さい値を示し,拘束圧の増加とともに正規化幅が減少した.

5. 結論 本研究では,粒子形状の異なる3種類の砂質土を用いた平面ひずみ圧縮試験を行い,粒子 形状と,せん断変形および破壊について検討した.真円度および縦横比で,粒子形状を検討した。 これらの指標の値が大きいほど,応力比のピーク値は高く,せん断帯の角度が大きくなること,ま た,これらの値は,拘束圧の増加とともに小さくなることがわかった.また,粒子形状が複雑で均 等係数の大きい宇部硅砂は,不均一なせん断帯幅を示し,球に近く均等係数が1に近いガラスビー ズは,均一なせん断帯幅を示すことがわかった.

参考文献 1) 松島亘志・前田健一・石川達也:粒子特性の評価と工学的意義4.粒子形状の評価と土の力学 挙動,土と基礎.55-6(593),2007.2) 梶原拓也・喬 奔・中田幸男・兵動正幸・吉本憲正: PIV 解析手法 を適用可能な砂の平面ひずみ試験装置の開発,第62回土木学会中国支部研究発表会 3) Yoshida, T. and Tatsuoka, F.: Deformation property of shear band in sand subjected to plane strain compression and its relation to particle characteristics, Proc. 14th Int. conf. on SMFE, Hamburg, Vol.1 pp.237-240, 1997.