

PIV 解析による平面ひずみ圧縮下における砂のせん断帯の把握

山口大学大学院 学生会員 ○宮本 涼太
山口大学大学院 正会員 中田 幸男

1. 序論

地盤が大きな塑性変形を受けて破壊する現象は、不安定な変形の局所化が集中する事で起こる。局所化が集中する領域はせん断帯と呼ばれる。破壊現象を捉える上で、このせん断帯の詳細な検討が力学的に重要である。せん断帯の把握には、平面ひずみ圧縮試験機を使い、平面ひずみ条件下における強度変形特性を測定することが必要である。そこで本研究では、平面ひずみ圧縮下の砂のせん断帯の把握することを目的として、一連の実験的検討を行うものである。

PIV (Partical Image Velocimetry : 粒子画像流速測定法) 解析を導入し、せん断帯の角度や、せん断帯の幅について考察する。

2. 平面ひずみ圧縮下の砂のせん断帯

平面ひずみ試験機は砂質地盤材料の平面ひずみ条件下における強度変形特性を精度よく測定することが可能である。平面ひずみ試験は拘束板を供試体の前後に設置し、中間主応力方向への変形を防ぐことで、実地盤の応力状態に近い条件で実験することが可能である¹⁾。そのため本研究室では、これまで多くの研究で平面ひずみ圧縮試験機が用いられた²⁾。本研究でも平面ひずみ圧縮試験を用いる。

本研究は 2 種類のサンゴ砂と豊浦砂を用いる。このサンゴ砂の違いは粒径の大小である。土の粒度分布を図-1 に示す。平均粒径 D_{50} は、サンゴ砂 A では 0.48mm 、サンゴ砂 B では 1.10mm 豊浦砂では 0.22mm である。サンゴ砂 A と豊浦砂の目標相対密度を $Dr=75\%$ と設定し、サンゴ砂 B の目標相対密度を 88% とし、空中落下法を用いて供試体を作成する。供試体の寸法は、高さ 160mm 、横 60mm 、奥行き 80mm である。供試体の作成後、 25kPa の負圧で自立させ、拘束圧に置換する。その後、拘束圧 100kN/m^2 200kN/m^2 で圧密し、ひずみ速度 $0.1\%/\text{min}$ で静的せん断を行う。試験は軸ひずみが 10% に達したところで終了とする。なお軸ひずみ 0.1% おきに供試体全体の画像を取得し PIV 解析を行った。実験結果として図-2 に応力ひずみ関係を示す。サンゴ砂 B のピーク主応力比は拘束圧 100kN/m^2 で 11.8 、拘束圧 200kN/m^2 で 11.2 であった。これに対し豊浦砂は拘束圧 100kN/m^2 で 6.7 、拘束圧 200kN/m^2 で 6.1 であった。サンゴ砂 B と豊浦砂では、ピークまでに生じる軸ひずみが異なり、サンゴ砂では軸ひずみ $5\sim 6\%$ 前後であり、豊浦砂では $1.7\sim 3.5\%$ であった。サンゴ砂

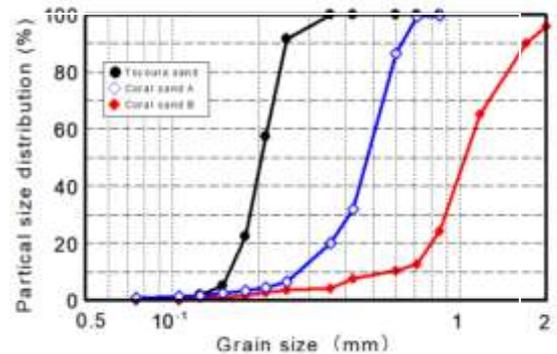


図-1 粒度分布

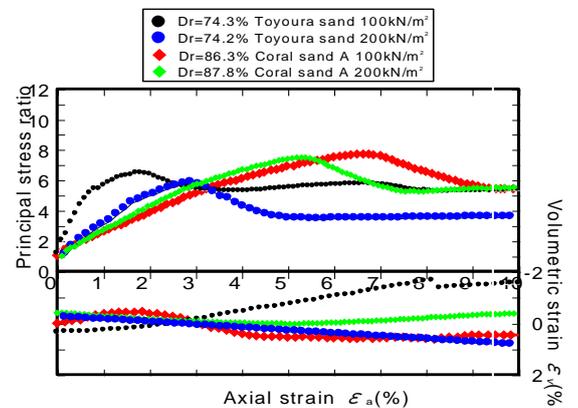


図-2 サンゴ砂 B と豊浦砂の応力ひずみ関係

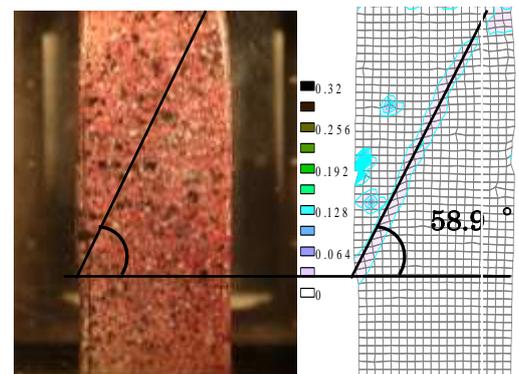


図-3 豊浦砂拘束圧 100kN/m^2 に対する
コンター図によるせん断傾斜角の決定

キーワード PIV 解析 平面ひずみ圧縮 せん断帯 サンゴ砂 ダイレイタンスー 支持力理論

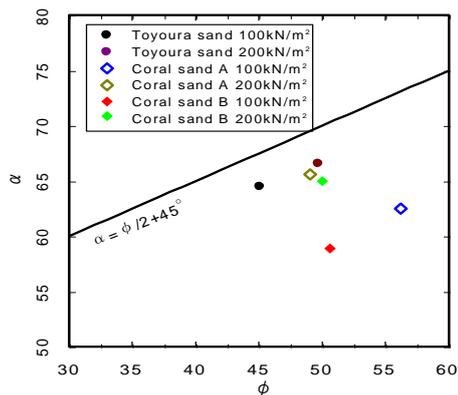


図-4 せん断傾斜角とせん断抵抗角の関係

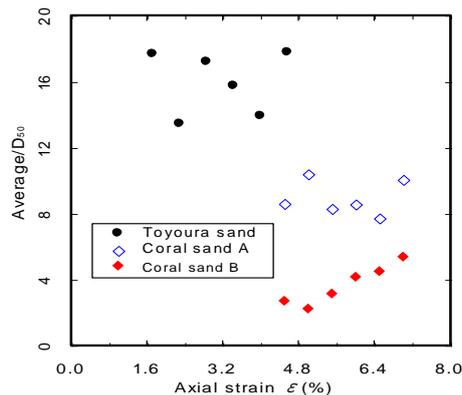


図-5 平均粒径に対してのせん断帯幅の平均値

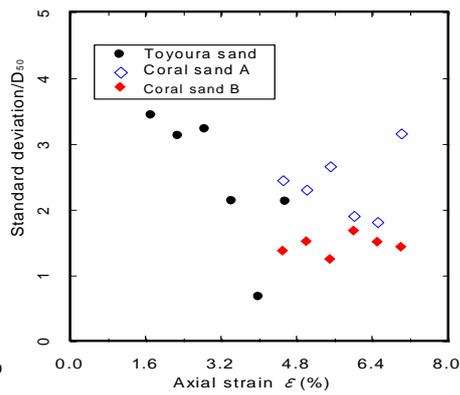


図-6 平均粒径に対してのせん断帯幅の標準偏差

Bのダイレイタンスは収縮的であり，豊浦砂のダイレイタンスは膨張的であった。

3. PIV 解析によるせん断帯傾斜角の測定とせん断帯抵抗角との関係

PIV 解析は画像領域の変位量を任意に得ることができ，局所変形及びひずみを詳細に捉えられる。図-3 に豊浦砂の主応力比がピークの時の画像と最大せん断ひずみ増分コンター図を示す。画像だけではせん断帯を視認できないため，コンター図を用いてせん断帯傾斜角を同定した。また，モール円を作成し，粘着力 0kN/m^2 としてクーロンの破壊線からせん断抵抗角を求めた。せん断帯傾斜角とせん断抵抗角の関係を図-4 に示す。このグラフから，豊浦砂と比べ，サンゴ砂は $\alpha = \phi/2 + 45^\circ$ の直線と離れていることがわかる。豊浦砂の拘束圧 200kN/m^2 のプロットと $\alpha = \phi/2 + 45^\circ$ の直線の α の差は 4.2° である。次にサンゴ砂 B の拘束圧 200kN/m^2 の α の差は 12.5° であり，豊浦砂と比べ 8.3° 大きい。さらに 2 種類のサンゴ砂は 100kN/m^2 のケースの方が 200kN/m^2 のケースより α の差があった。サンゴ砂の α の差が大きいことは， ϕ の値が高いものの α が低いことによる。 α と ϕ が大きく関係している支持力理論からみると， ϕ によって推定される α が低い場合，実験で観測される極限支持力が想定よりも低く現れると考えられる。つまりサンゴ砂では，一般的な支持力公式に適用した極限支持力は過大評価されることになる。そのため， ϕ から α の推測には，サンゴ砂の破砕性や圧縮性を考慮することが必要であるといえる。

PIV 解析によって得られた最大せん断ひずみ増分コンター図から，せん断帯幅の平均値を平均粒径で除した値を図-5 と，標準偏差を平均粒径で除した値を図-6 に示す。サンゴ砂 A サンゴ砂 B 豊浦砂の順に，平均粒径に対しての平均値は 7~10 倍，5~8 倍，10~20 倍となった。一般的なせん断帯幅は，平均粒径の約 10~20 倍であるため，豊浦砂よりサンゴ砂の方が，平均粒径に対してのせん断帯の幅が狭いといえる。平均粒径に対しての標準偏差は 1.8~3.3 倍，1.1~1.8 倍，0.5~3.5 倍となった。つまりサンゴ砂は豊浦砂と比べ，平均粒径に対してのせん断帯の幅のばらつきが少ない。さらに粒径が大きいほど，ばらつきが少ないといえる。

4. 結論

本研究では平面ひずみ圧縮下の砂のせん断帯の把握することを目的として，一連の実験的検討を行った。3 種類の砂を用いた平面ひずみ圧縮試験結果および，平面ひずみ圧縮試験中に撮影した画像を用いて行った PIV 解析結果に基づいた見解を述べる。豊浦砂と比べ，サンゴ砂はせん断抵抗角が高いもののせん断帯傾斜角が低い。また豊浦砂よりサンゴ砂の方が，平均粒径に対してのせん断帯の幅が狭く，平均粒径に対してのせん断帯の幅のばらつきが少ない。さらに粒径が大きいほど，ばらつきが少ない。

<参考文献>

- 1) 池田清宏ら (2004) : 土木学会論文集, No. 757/III-66, pp.167~172
- 2) L Zhuang, et al (2014);, Acta Geotechnica 9:241-255 DOI 10.1007/s11440-013-0253-4.