

## 平面ひずみ圧縮下における破碎性材料のせん断帯傾斜角の考察

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  
 山口大学大学院 正会員 梶山 慎太郎

## 1. 序論

著者ら<sup>1)</sup>は、破碎性材料の平面ひずみ圧縮挙動におけるせん断帯の形成について破碎性の影響を検討してきた。本研究では、破碎性材料の平面ひずみ圧縮挙動について、ダイレイタンシーや関連する強度、その時に形成されるせん断帯傾斜角の関係について考察する。特にこれらの関係で表わされるせん断帯傾斜角の算出について考察した。

## 2. 用いた試料と平面ひずみ試験装置

用いた試料は、表1に示しているように、破碎性材料の2種類のサンゴ砂(AとB)、非破碎材料として豊浦砂の3種類である。これらの試料に対し、単粒子破碎試験を行った。ここでは、単粒子破碎強度の特性値として、 $P_s=0.37$ の値を基準破碎強度 $\sigma_0$ として整理している、この基準破碎強度は、豊浦砂、サンゴ砂A、サンゴ砂Bの順に小さく、147MPa、40MPa、20MPaとなった。また、単粒子破碎強度の変動量を表す指標として、Weibull係数 $m$ を用いた。 $m$ は、それぞれ1.5、1.1、1.0となった。

試験は、平面ひずみ圧縮試験を行った。供試体作製は、相対密度 $Dr=65\%$ 、 $75\%$ 、 $88\%$ を目標に空中落下法を用いて行った。次に圧密は側圧が100、200kPaとなるよう载荷した。PIV解析を行うために、軸ひずみ0.1%毎に供試体の写真を撮影した。PIV解析結果は局所的なひずみ量を取得することができ、詳細を得るために用いられる。

## 3. 平面ひずみ圧縮挙動およびせん断帯傾斜角の評価

図1は3種類の試料の側圧200kPaで行った平面ひずみ圧縮試験結果を示している。初期の剛性は、豊浦砂、サンゴ砂B、サンゴ砂Aの順に小さくなる。最大の主応力比は、サンゴ砂B、サンゴ砂A、豊浦砂の順に低くなる。この最大値に達するまでに必要な軸ひずみは、サンゴ砂A、サンゴ砂B、豊浦砂の順に少なくなる。せん断中の体積変化についてみると豊浦砂では体積膨張を示し、密な砂の挙動を示すが、サンゴ砂Aやサンゴ砂Bは体積収縮を示す。図2は、拘束圧100kPaの相対密度75%の豊浦砂の主応力比が最大値に達したときの画像と最大せん断ひずみ増分コンターを示す。このコンターから、水平面とせん断帯とのなす角と定義されるせん断帯傾斜角を測定すると $68.1^\circ$ となった。同様にサンゴ砂Aおよびサンゴ砂Bのせん断帯傾斜角は、 $64.5^\circ$ 、 $64.1^\circ$ となった。ダイレイタンシー抵抗角 $\Delta\phi$ の評価式<sup>2)</sup>は、せん断抵抗角 $\phi_{max}$ 、限界抵抗角 $\phi_{crit}$ を用いて、以下のように書くことができる。

$$\Delta\phi = \phi_{max} - \phi_{crit} = A \cdot I_R \quad (2)$$

$$I_R = I_D (-\ln p/p_{crit}) \quad (3)$$

表1 3種類の試料の物性表

| 試料                      | 豊浦砂  | サンゴ砂A | サンゴ砂B |
|-------------------------|------|-------|-------|
| $G_s$                   | 2.65 | 2.77  | 2.79  |
| $U_c$                   | 1.65 | 1.70  | 2.24  |
| $D_{50}$                | 0.22 | 0.48  | 1.1   |
| $e_{min}$               | 0.61 | 0.67  | 0.68  |
| $e_{max}$               | 0.97 | 1.04  | 1.04  |
| 基準破碎強度 $\sigma_0$ (MPa) | 147  | 40    | 20    |
| Weibull係数 $m$           | 1.47 | 1.12  | 0.98  |
| 安息角( $^\circ$ )         | 33.4 | 35.1  | 35.3  |

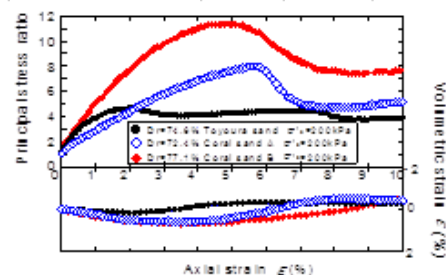


図1 3種類の試料の平面ひずみ圧縮挙動

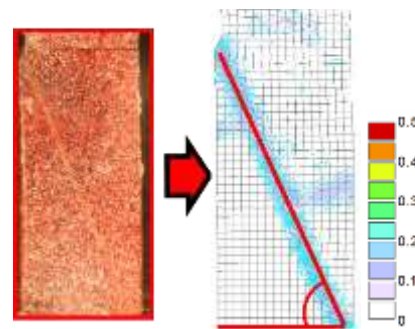


図2 画像解析結果によるコンター図を用いたせん断帯傾斜角の決定方法

キーワード PIV解析 平面ひずみ圧縮 せん断帯 粒子破碎 ダイレイタンシー 支持力理論

〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1

TEL (0836) 85-9300

ここで、 $I_D$  は相対密度である。また、 $p$  は拘束圧、 $p_{crit}$  は限界拘束圧である。この式は、 $p = p_{crit}$  のとき、 $I_R = 0$  となり、ダイレイタンシー抵抗角が  $0^\circ$ 、つまりダイレイタンシー強度がなくなる拘束圧に達したことを意味する。ここでは、この  $p_{crit}$  が基準破砕強度に関連付けられているとして、 $I_R$  を以下の式で与えることを考える。

$$I_R = I_D (-\ln p/\sigma_0) \quad (4)$$

この考えのもと、拘束圧を  $\sigma_0$  で除した正規化拘束圧とダイレイタンシー抵抗角との関係を図 3 に表す。ここで、ダイレイタンシー抵抗角を求めるため必要となるせん断抵抗角は、最大主応力比を用いて求められるセカントアングルとし、限界抵抗角は試験終了時のセカントアングルとした。いずれの試料についても、ダイレイタンシー抵抗角は正規化拘束圧が増加するほど低下し、また相対密度が大きいとダイレイタンシー抵抗角は高い。図中の直線は、それぞれの材料の平均的な結果となりつつ、3つの直線と x 軸との交点が同じ  $p/\sigma_0$  となるように描いた。から、ダイレイタンシー抵抗角が  $0^\circ$  となる拘束圧は、 $p/\sigma_0$  が 0.1 となる値となった。さらに、豊浦砂のダイレイタンシー抵抗角はサンゴ砂と比べて極端に低い。ここで、ダイレイタンシー角  $\psi$  と  $p/\sigma_0$  の関係を図 4 に表す。ダイレイタンシー角は主応力比が最大値に達したときの主ひずみ増分比から求めた。

$$\psi = -(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3)/(d\varepsilon_1 + d\varepsilon_3) \quad (5)$$

サンゴ砂の  $\psi$  は、正規化拘束圧が大きくなるにつれ低下する。図 5 にせん断帯傾斜角の実験の測定値と計算値を示す。計算によるせん断帯傾斜角  $\alpha$  は、以下のように記述することができる。

$$\text{クーロンの式 } \alpha = \phi/2 + 45^\circ \quad (6)$$

$$\text{ロスコーの式 } \alpha = \psi/2 + 45^\circ \quad (7)$$

図 5(a) は、測定値とクーロンの式による計算値とが示されている。豊浦砂の計算値は測定値に対応している。一方で、2つのサンゴ砂の計算値は測定値よりも高い値となっていることがわかる。図 5(b) は、測定値とロスコーの式による計算値とが示されている。図 5(a) と異なり、サンゴ砂の計算値は測定値に比較的対応し、豊浦砂の計算値は測定値よりも低い値となっている。つまり、破砕性材料のせん断帯傾斜角は、ダイレイタンシー抵抗角に依存している傾向にあるといえる。

#### 4. 結論

本研究では破砕性土の平面ひずみ圧縮条件下におけるせん断帯形成について実験的に把握することを目的として、一連の検討を行った。結果、今回用いた破砕性土はダイレイタンシー強度およびダイレイタンシー角が高く、さらに、せん断帯傾斜角も大きいことを示した。その上で、せん断帯傾斜角の評価について、破砕性土の場合、ダイレイタンシー角を用いるロスコーの式の方がより適切な推定式であることを示した。

<参考文献> 西原尚輝, 中田幸男 (2018): 平面ひずみ圧縮試験における砂のせん断帯形成に与える破砕性の影響, 第 53 回地盤工学会論文集, III-66, pp.167-168. Bolton, M. D. (1986): The strength and dilatancy of sands, Geotechnique 36, No.

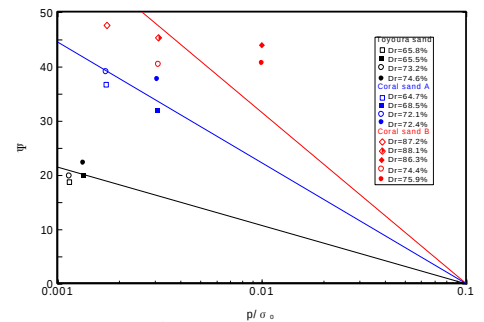


図 3 ダイレイタンシー抵抗角と正規化拘束圧の関係

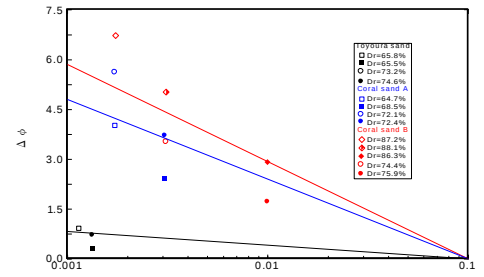


図 4 ダイレイタンシー抵抗角と正規化拘束圧の関係

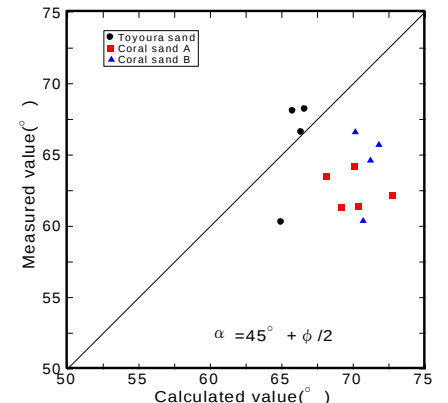


図 5(a) クーロンの式による計算値

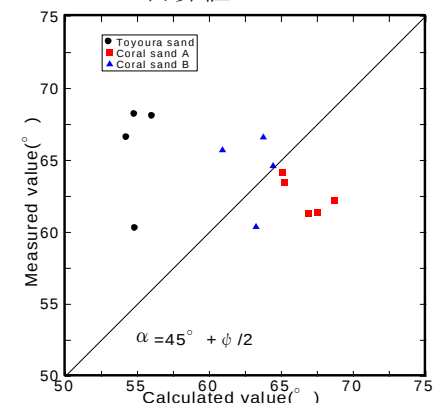


図 5(b) ロスコーの式による計算値

図 5 せん断傾斜角に対する測定値と計算値