

PIV 解析を適用した平面ひずみ圧縮試験における砂のせん断挙動

山口大学大学院 正会員 ○中田 幸男 兵動 正幸 吉本 憲正
山口大学大学院 学生会員 喬 卉 梶原 拓也

1. 序論

近年画像解析手法が発展しその中でも流速分布を調べる方法の 1 つである PIV (Particle Image Velicimetry: 粒子画像流速測定法) 解析法の地盤工学への応用例が多くなってきている¹⁾。これまで本研究室でも三軸試験などへの PIV 解析手法の適用²⁾を行っており、平面ひずみ試験装置へも応用できると考えた。本研究で PIV 解析手法を適用可能な平面ひずみ試験装置の開発を行い、砂のせん断挙動、特に局所変形特性について検討した。

2. 開発した砂の平面ひずみ試験装置

供試体サイズは断面 60mm×80mm、高さ 160mm の矩形である。特徴として、拘束板が観察窓を兼ねており中間主ひずみ方向の側面全体を観察することができる。本試験装置により、平面ひずみ試験時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、供試体の局所変形を求めることが可能となった。用いた試料は豊浦砂である。供試体は目標相対密度 $Dr=90\%$ となるよう 5 層にわけて自由落下により作成した。有効拘束圧は空気圧により調整し 50kN/m²、100kN/m²、150kN/m² とした。試験条件は、PIV の精度検証を行うため飽和排水条件とした。また、1 時間の圧密後、せん断軸ひずみ 1% ごとにデジタルカメラで撮影し、せん断軸ひずみ 10% となるまでひずみ速度 0.1%/min でせん断を行った。

3. 本装置を用いた平面ひずみ挙動

図 - 1 は初期間隙比 0.68 前後の豊浦砂の軸ひずみと応力比及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 6.7、6.6、5.90 と減少し、拘束圧が大きくなるにつれピーク強度を発揮する軸ひずみは大きくなるのがわかる。また、体積ひずみについて最初収縮した後、膨張に向かうが、拘束圧が大きくなると膨張傾向が小さくなるのがわかる。図 - 2 は最大主応力比 R_{max} と主ひずみ増分比 D_{max} の関係である。両者の関係は線形であり、傾き $K=3.50$ に近い結果となった。既往の研究³⁾により豊浦砂の $K=3.50$ ということがわかっていることから、試験結果は妥当であるといえる。また、最大主応力と最小主応力から各拘束圧における内部摩擦角 ϕ を求め、主応力方向角 α を求めた。 α は拘束圧が大きくなるにつれ、69.1°、68.8°、67.7° と減少傾向にあることがわかった。

実験中に撮影した画像に対して PIV 画像解析を行った。PIV 解析では、ある時刻の画像と、それからある時間経過したときの画像を用いて、画像上での変位 (pixel) を求め、それに画像倍率 (mm/pixel) をかけて、実値 (mm) を算出した。PIV による縦方向ひずみ及び体積ひずみは、供試体のふちの標

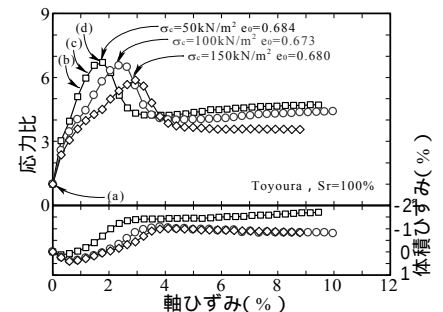


図 - 1 軸ひずみと応力比及び体積ひずみの関係

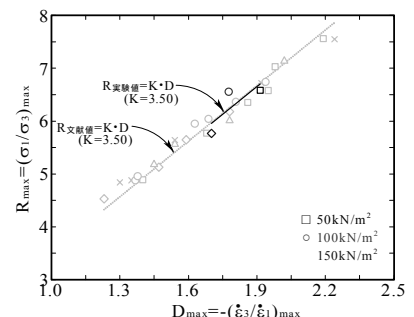


図 - 2 R_{max} - D_{max} 関係

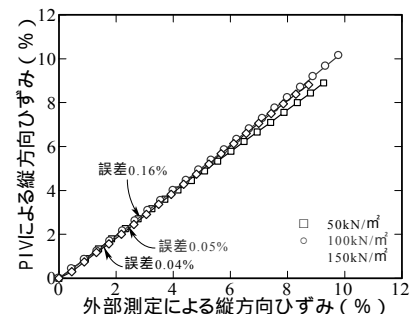


図 - 3 PIV 画像解析結果と外部測定
の比較 (縦方向ひずみ)

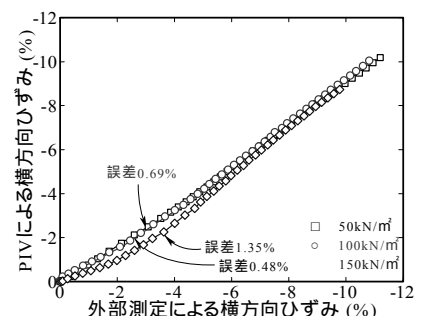


図 - 4 PIV 画像解析結果と外部測定
の比較 (横方向ひずみ)

キーワード：PIV, 局所変形, せん断帯, 平面ひずみ

連絡先：〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1 山口大学大学院理工学研究科

TEL：0836-85-9344 FAX：0836-85-9301

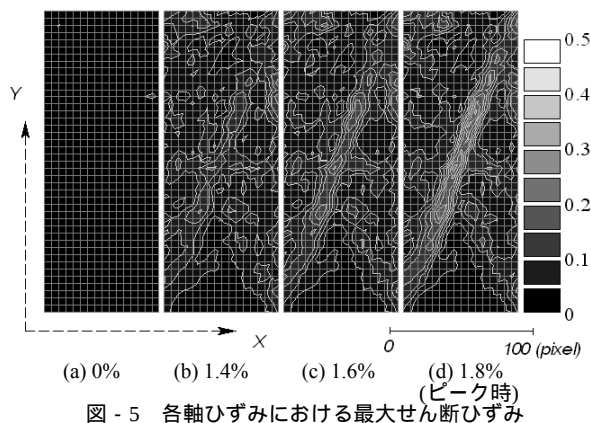


図 - 5 各軸ひずみにおける最大せん断ひずみ

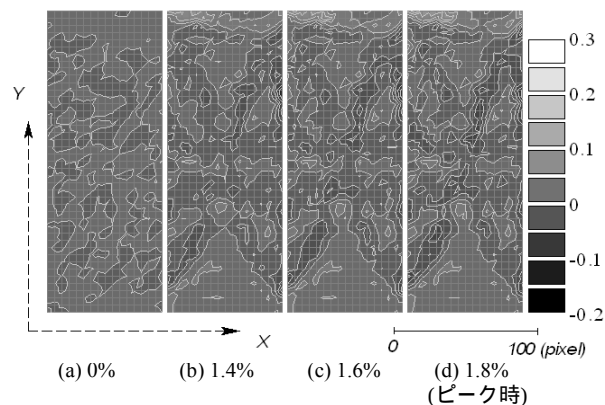


図 - 6 各軸ひずみにおける体積ひずみ

点の変位量から求めた。縦方向ひずみは供試体最上部の標点の変位量により算出した。体積ひずみは、奥行きが一定であるとみなして、供試体の外周の標点によって囲まれた部分の面積を算出し、その変化量から体積ひずみを算出した。図 - 3 は横軸に外部測定による縦方向ひずみ、縦軸に PIV による縦方向ひずみを示したものである。この曲線の傾きが 1 に近いほど PIV の精度が高い。ピーク強度時の PIV と外部測定の誤差は 50kN/m²で 0.04%、100kN/m²で 0.05%、150kN/m²で 0.16%であり、ピーク時における PIV の精度は十分期待できるという。また、縦方向ひずみが大きく

なると PIV の誤差が大きくなることがわかった。図 - 4 は横方向ひずみを比較したものである。ここで、横方向ひずみは体積ひずみから縦方向ひずみを引くことで算出した。この図も図 - 3 同様、曲線の傾きが 1 に近いほど PIV の精度が高いといえる。ピーク強度時の誤差は 50kN/m²で 0.45%、100kN/m²で 0.69%、150kN/m²で 1.35%であり、縦方向ひずみよりも大きい結果となった。この横方向ひずみにおいても拘束圧が大きくなると、拘束板とラバーメンブレン間の摩擦が強くなるため、観察面から見られる供試体の動きを制限してしまうことが考えられる。

図 - 5、図 - 6 は図 - 1 中の 50kN/m²における(a)～(d)地点の PIV 解析手法による結果である。図 - 5 は最大せん断ひずみのコンター図であり、50kN/m²においては軸ひずみ 1.4%から供試体中央部にせん断ひずみの大きな領域が現れ始め、ピーク強度発揮時にはせん断帯が形成されていることがわかる。図 - 6 は体積ひずみのコンター図であり、せん断が進んでいくにつれ、せん断帯内部の膨張の度合いが高くなるが見て取れる。このように PIV 解析手法を用いることで、肉眼では確認できないような供試体の変化を確認できる。次にせん断帯についての分析を行った。この際、速度ベクトルが急激に変化している箇所をせん断帯として抽出した。図 - 7 はせん断帯の幅を抽出し、拘束圧との関係でまとめたものである。拘束圧が大きくなると、せん断帯の幅は減少した。また、せん断帯の傾斜角も拘束圧の増加とともに減少し、主応力から求めた主応力方向角と同じ傾向を示した。

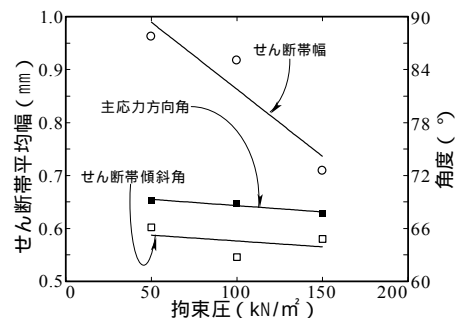


図 - 7 せん断帯の幅及び角度

4. 結論

今回開発した平面ひずみ試験装置により高精度の PIV 解析結果を得ることができた。これにより、供試体の局所変形が確認でき、さらに拘束圧がせん断帯の幅、傾斜角に与える影響を明らかにすることができた。

5. 参考文献

- 1) White, D.J., Take, W.A. & Bolton, M.D. : Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. Geotechnique 53, No. 7, 619-631, 2003
- 2) 吉川直孝, 中田幸男, 兵動正幸, 村田秀一, 西尾伸也 : 画像処理技術を用いた三軸試験における砂質土の専断層の評価, 土木学会論文集 C, Vol.63, No.1, pp.59-71, 2007.
- 3) 龍岡文夫ら : 土の強さと地盤の破壊入門, pp.71-72, 1987