Partial CT 画像の DIC 解析による不飽和砂三軸供試体の微細せん断帯の可視化

京都大学大学院　正会員　佐藤　朋弥
京都大学大学院　正会員　肥後　陽介
京都大学大学院　学生会員　松島　祥樹
京都大学大学院　フェロー会員　岡　二三生
京都大学大学院　正会員　木元　小百合

１．はじめに

粒状材料である地盤材料のひずみの局所化の研究において，内部構造の変化は重要な研究課題である。本研究で用いた μ フォーカス X 線 CT（KYOTO-GEOμXCT）[1)]はミクロンレベルの分解能を持ち，三軸セルをワークテーブルに搭載できるため，三軸試験中の土供試体内部を高分解能で可視化する事ができる。また，X 線 CT において対象物の関心のある部位だけをスキャンする事を partial CT scan と呼ぶが、本研究ではこの partial CT scan により三軸圧縮試験下における不飽和砂の粒子構造変化を可視化し、得られた CT 画像から同一粒子を追跡することによりせん断帯の推定を行った。さらには、デジタル画像相関法(Digital Image Correlation、以下 DIC)を用いたひずみ場の定量化により、微細なせん断変形が発生している事を明らかにした。

2. 試験条件および試験結果

試料には豊浦砂を用いた。豊浦砂の平均粒径は 0. 19mm、最大間隙比は 0. 98、最小間隙比は 0. 61 となっている。供試体は Moist-tamping 法を用いて作成しており、初期の間隙比は 0. 67、飽和度は 60. 4%、含水比は 15. 2%である。また、X 線 CT の撮影位置を決めるため、マーカーとして供試体下部から 3/5 および 4/5 の位置に砂鉄層を作成した。この砂鉄は豊浦砂に含まれているもので、掻きほぐした締固め面全体を覆うように砂鉄を 0.5g 撒くことにより作成した。三軸圧縮試験は排気-排水条件、拘束圧は 5 0kPa、ひずみ速度は 0.5%/min とした。

試験結果を図-1 に示す。なお、試験中に X 線 CT 撮影を行う際は載荷を一時中断しているため、撮影の行われる軸ひずみ 0%、2%、4%、8%、15%、20%では応力緩和が生じている。また、体積ひずみは三次元可視化ソフト VGStudioMAX1.2(アイティティー㈱製)を用いて供試体部分の Voxel を集計することにより求めている。試験結果を見ると、軸ひずみ 2%に応力ピークを迎え、その後は緩やかに応力が減少するという脆性的挙動を示した。体積ひずみに関しては軸ひずみの進展に伴い単調に膨張した。

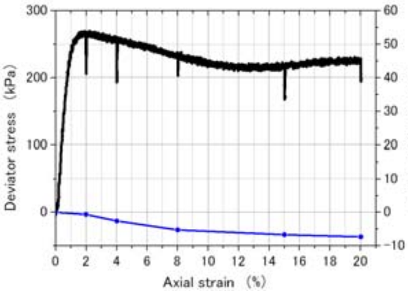

図-1 試験結果

Partial CT scan により得られた CT 画像を図-2 中下段に示す。撮影時の拡大率は 33. 2 倍、Voxel サイズは 7.6^2×12. 0μm である。供試体全体画像との対応関係を見ても分かるように、縦断面像は向かって右が供試体外側、左が供試体内側となっており、水平断面像は向かって上が供試体外側、下が供試体内側となっている。

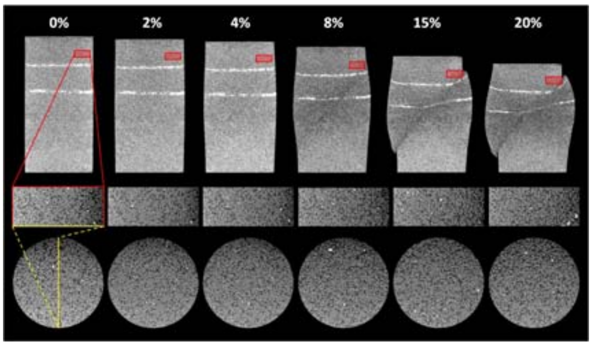

図-2 CT 画像

3.　二次元 DIC 条件および結果

図-2 で示した CT 画像をもとに土粒子追跡し、二次元 DIC[2)]を行い、変位ベクトルおよびせん断ひずみ分布を求めた結果を図-3 に示す。変位ベクトルに注目すると、すべてのケースにおいて供試体中央側の領域は相対的に鉛直変位が卓越しているが、供試体外側に向かうにつれて鉛直変位は減少し外側へ向かう水平変位が増加している。特に 4%-8%間のケースでは画像左部と右部で変位方向が大きく変わる境界が画像中央付近の左下から右上にかけて存在していること

キーワード　Partial CT scan，不飽和砂，せん断帯，内部構造
連絡先　〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 4 C クラスターC1 棟　Tel: 075-383-3193

がわかる。なお、2%-4%間のケースの右下で顕著に見られる散乱した変位ベクトルは、供試体の変形が大きいため画像解析ができなかった点と考えられる。

せん断ひずみ分布に注目すると、初期のケースでは供試体中央側に微量ではあるがせん断ひずみの局所化が確認できる。これは初期状態において存在していた団粒化した粒子群が載荷により割裂したものを評価していると考えられ、このような局所化は最終的にせん断帯内部でメニスカスが切れる事にもつながると考えられる。2%-4%間のケースでは初期に見られたようなせん断ひずみの局所化は確認できないが、 4%-8%間のケースでは初期よりもやや外側にせん断ひずみが局所化している。また、観察されたこれらの微細なせん断ひずみは CT 画像で確認できるせん断変形と対応していることも分かった(図-4)。

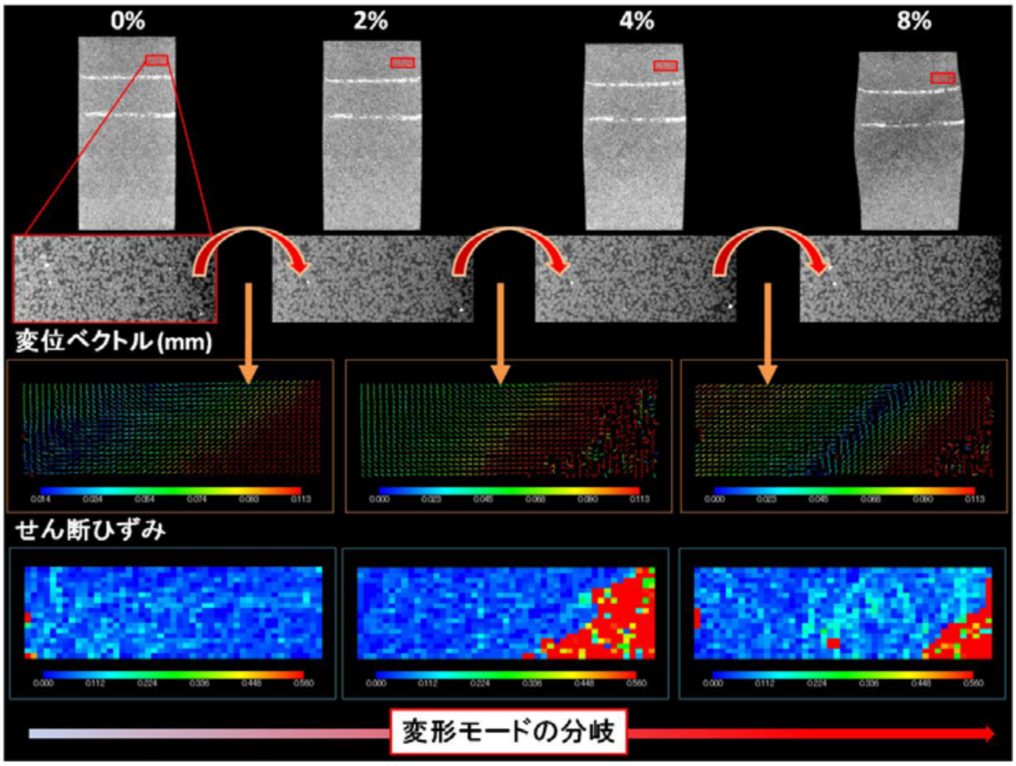

図-3 変位ベクトルおよびせん断ひずみ分布

このように応力-軸ひずみ関係のピーク応力前においても微細なせん断変形が発生していることを明らかにしたが、これら微細なひずみの局所化は弾塑性挙動すなわち徐々に応力-軸ひずみ関係の傾きが緩やかになる現象に寄与していると考えられる。さらに、ピーク後の軸ひずみ4%においても巨視的なCT画像には明確なせん断帯は見られないものの、応力-軸ひずみ関係にひずみ軟化挙動が発生しているが、これも微細なすべりに起因するものと考えられる。また、この微細なせん断変形は最終的に発達するせん断帯とは発生領域が異なる事から、変形モードが高次から低次へと分岐していることが分かる。

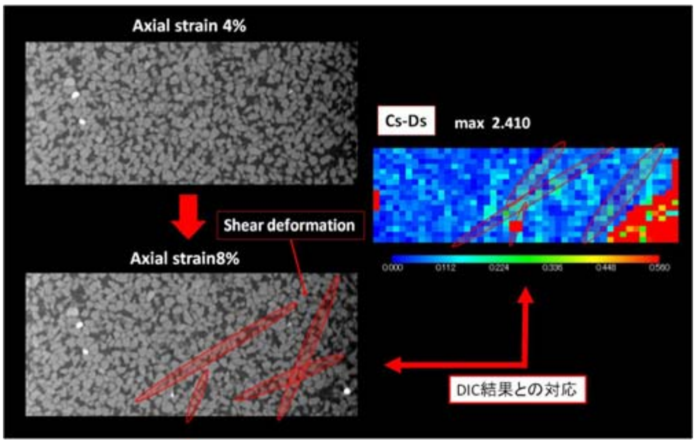

図-6 微細なせん断帯

５．まとめ

三軸圧縮試験下における不飽和豊浦砂の粒子構造変化をPartial CT scanにより可視化し、土粒子追跡を行って得られたCT画像をもとに2次元DICを行い、ひずみ場を定量化した。その結果、目視や供試体表面の画像解析あるいはX線CTを用いても巨視的な観察では見る事のできない微視的なすべりや内部構造の変化が発生している事について明らかにした。このようにPartial CT画像のDICを用いた解析は、微視構造変化の定量化および可視化に大きな貢献をもたらす事がわかった。

参考文献

1) Higo, Y., Oka, F., Kimoto, S., Sato, T., Sawada, M. and Sanagawa, T.: Proc. 21st KKCNN Symp. on Civil Engnrg., October 27–28, 2008, Singapore, pp. 444-447, 2008. 2) N.Lenoir : Volumetric Digital Image Correlation Applied to X-ray Microtomography Images from Triaxial Compression Test on Argillaceous Rock, 2007 Blackwell Publishing Ltd | Strain (2007) 43, 193-205