

密な砂供試体の限界状態に至るまでの非排水せん断挙動と破壊モードの観察

名古屋大学 正会員 中野正樹、野田利弘、浅岡顕
建設省 正会員 淡中泰雄

1. はじめに

密な砂供試体の非排水せん断において、しばしば背圧の限界により破壊時の軸差応力が影響を受けてしまう。本研究では十分に背圧を与えた非排水3軸圧縮試験を実施し、背圧の影響を受けない時のせん断挙動と変形形状、破壊モードを観察し、不十分な背圧での試験結果と比較する。その結果、十分高い背圧を与えると、せん断の進行に伴い発生する負の過剰水圧は、破壊時には一定値に漸近し、軸差応力もそれに伴って一定値に漸近した。また砂供試体の破壊モードは、供試体中央部を中心に、高次の「ダイヤモンドパターン」を形成し、破壊に至った。背圧が不十分な時は、せん断と伴に発生した負の過剰水圧も頭打ちとなって破壊に至り、その時の軸差応力も十分背圧を与えた時に比べ小さくなった。破壊形状もダイヤモンドパターンを形成するが、十分に背圧を与えた時に比べて低次モードとなった。

2. 十分に高い背圧の下での密な砂の3軸圧縮試験

砂試料には豊浦砂を用い、間隙比 e を 0.65 でそろえた供試体を作製した。砂供試体は、直径 5.0cm、高さ 10.0cm の円柱形で、作製後の B 値は 97 以上である。十分な背圧を得るため、高拘束三軸圧縮試験機を用いて、側圧を $98\text{kPa}(1.0\text{kgf/cm}^2)$ で一定として、軸ひずみ制御非排水せん断試験(変位制御 $0.2\%/\text{min}$)を行った。本研究では、背圧を以下の3種類に設定した。すなわち、test3B : $1862\text{kPa}(19.0\text{kgf/cm}^2)$ 、test3C : $2842\text{kPa}(29.0\text{kgf/cm}^2)$ 、test3D : $3332\text{kPa}(34.0\text{kgf/cm}^2)$ である。もちろん上記側圧を得るため、それぞれのセル圧は背圧に $98\text{kPa}(1.0\text{kgf/cm}^2)$ を加えたものである。図 1(a)、(b)に示すように、背圧 $1862\text{kPa}(19.0\text{kgf/cm}^2)$ を与えた test3B の場合には、負の過剰間隙水圧が $-1911\text{kPa}(-19.5\text{kgf/cm}^2)$ で「頭打ち」になり、それに伴い軸差応力も $6321\text{kPa}(65.0\text{kgf/cm}^2)$ 以上増加しなかった。初期背圧よりも発生する負圧の値が大きくなり、したがって供試体内の水圧が大気圧よりも低くなり、真空を基準とする絶対圧力がゼロに近づいたため破壊に至ったと考えられる。一方、初期背圧が test3B より十分に大きい test3C、test3D の場合、過剰間隙水圧～軸ひずみ関係は、両試験ともに同じ経路をたどり、負の過剰水圧が $-2205\text{kPa}(-22.5\text{kgf/cm}^2)$ に漸近し、破壊に至った。また軸差応力～軸ひずみ関係も両試験で同じ経路をたどり、破壊時には軸差応力も一定値 $6880\text{kPa}(70.0\text{kgf/cm}^2)$ に漸近していった。試験後に砂粒子を観察したが、粒子破碎の形跡はなかった。このように十分に背圧を与えると、密な砂供試体の非排水せん断において、限界状態に達して破壊に至ると考えられる。

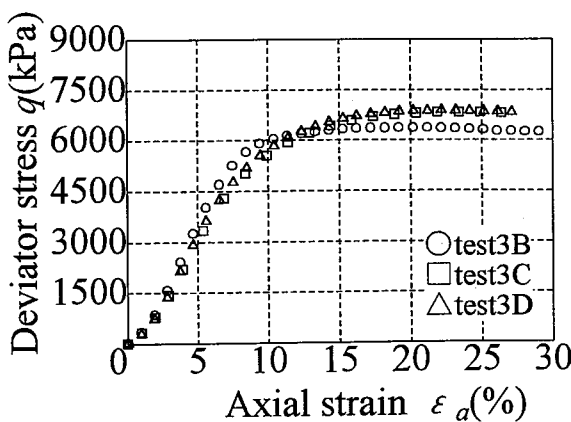


図 1(a) 軸差応力～軸ひずみ関係

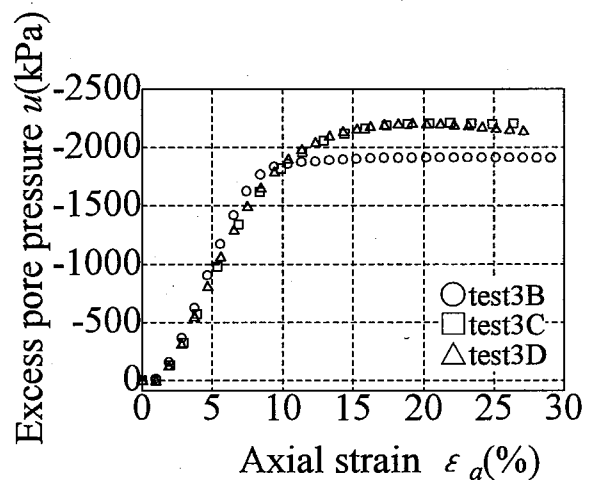


図 1(b) 過剰水圧～軸ひずみ関係

Undrained shear behaviour and failure mode of dense sand near/at critical state

Nakano, M., Noda, T., Asaoka, A. (Nagoya University) and Tan-naka, Y. (Ministry of Construction)

3. 砂供試体の変形・破壊モードの観察

密な砂を非排水せん断すると、破壊時には軸差応力が $6880\text{kPa}(70.0\text{kgf/cm}^2)$ にも達した。ここでは、このように高い軸差応力を発揮して破壊に至った砂供試体の変形形状・破壊モードを示す。図2はその変形形状の観察記録である。せん断とともに供試体中央部が膨れ始め、軸ひずみ10%付近で側面に無数の「しわ」が現れる。軸ひずみ16%から「しわ」よりも明瞭なせん断帯が現れ始める。せん断帯はほぼ等間隔に、その向きは左上から右下に、右上から左下に斜め方向である。これらせん断帯によって砂供試体にたくさんの「菱形」が形成される。軸ひずみ20%付近以降せん断帯はさらに明瞭になり、破壊に至った。試験終了の軸ひずみ27.5%では、供試体中央部が無数の「菱形」で埋め尽くされ、「ダイヤモンドパターン」を形成した。このように密な砂の非排水せん断では、限界状態において高次の破壊モードを形成し高い軸差応力を発揮することがわかった。

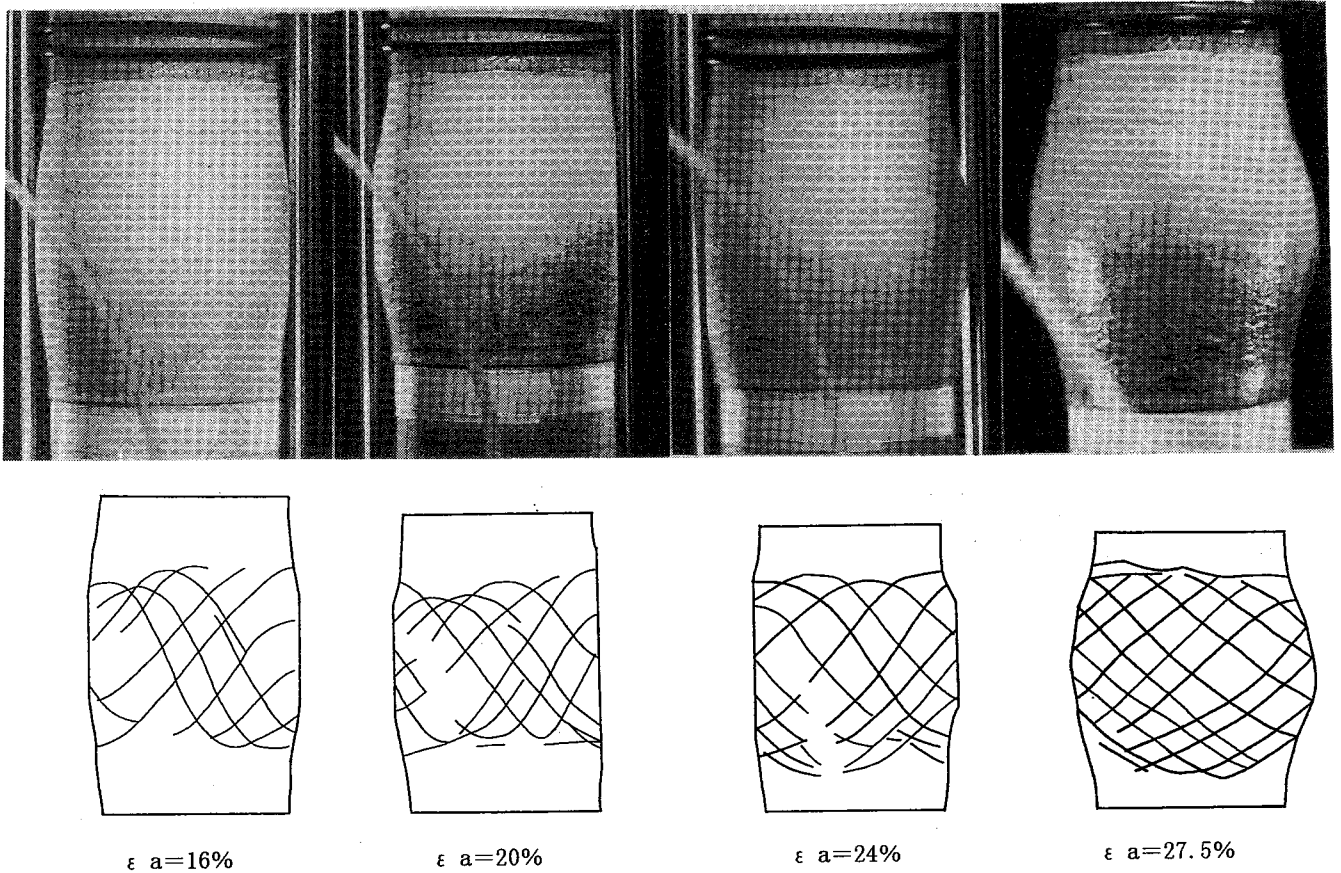


図2 変形・破壊モードの観察記録

4. 不十分な背圧の下での3軸圧縮試験との比較

密な砂の非排水せん断において、背圧を十分に与えていないと、発生する負圧が「頭打ち」になり、破壊を引き起こすことを述べた。ここでは、故意に背圧を十分に与えずに排水せん断を実施し、破壊に至るまでのせん断挙動や変形形状・破壊モードを調べ、限界状態に達して破壊した砂供試体と比較する。

試験方法は以下の通りである。供試体作製方法は2.と同じだが、載荷方法が異なり、応力制御方式である。セル圧 $294\text{kPa}(3.0\text{kgf/cm}^2)$ 、背圧 $196\text{kPa}(2.0\text{kgf/cm}^2)$ で側圧を $98\text{kPa}(1.0\text{kgf/cm}^2)$ で一定とし、載荷速度 $4.9\text{kPa}(0.05\text{kgf/cm}^2/\text{min})$ で非排水せん断を実施した。図3(a)、(b)に試験結果を示す。

過剰間隙水圧はせん断とともに、ごく初期に正の圧力が生じるが、その後、負圧に転じその値が増加する。負圧が $-280\text{kPa}(2.85\text{kgf/cm}^2)$ まで増加すると、負圧の上昇が極めてゆっくりになってほぼ一定値をとる。背圧を $196\text{kPa}(2.0\text{kgf/cm}^2)$ と設定しているため、この時点では絶対圧力が $17.3\text{kPa}(0.176\text{kgf/cm}^2)$ で、ほとんどゼロの値になっているため、過剰水圧が「頭打ち」になった。軸差応力は最初、「上に凸」のカーブを描き、過剰間隙水圧が負に転じたあたりから、「下に凸」なカーブを描きながら上昇する。過剰水圧が $-200\text{kPa}(2.04\text{kgf/cm}^2)$

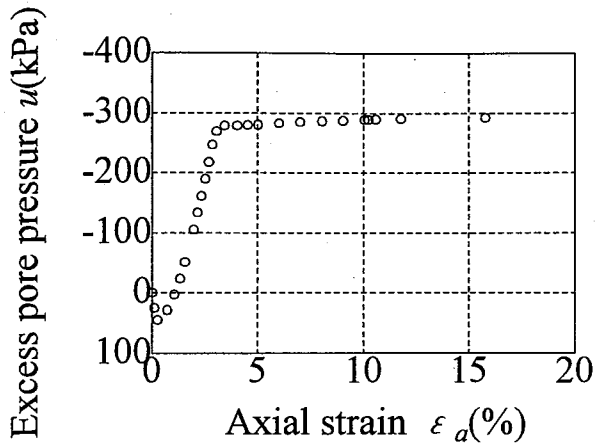


図3(a) 軸差応力～軸ひずみ関係

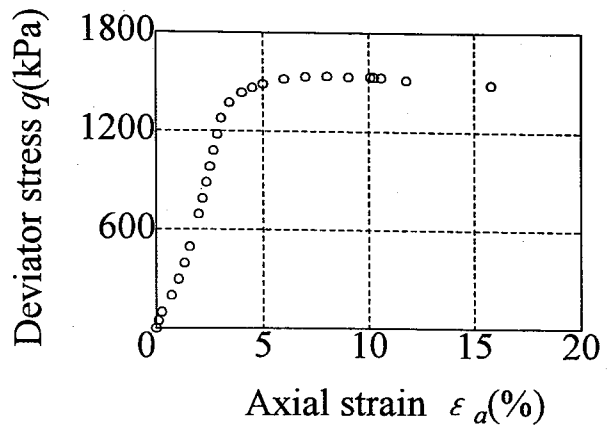


図3(b) 過剰水圧～軸ひずみ関係

を越すあたりから、軸差応力が 1535kPa (15.7kgf/cm²)で「頭打ち」になり破壊に至る。

破壊に至るまでの供試体の変形形状を図4に示す。せん断とともに供試体中央部が膨らみ始め、軸ひずみ10%付近で側面に「しわ」が寄り始める。せん断の進行とともに、「しわ」はさらに太いせん断帯を形成し、その方向は左上から右下に、右上から左下に斜めとなる。最終的にはせん断帯で構成する格子(菱形)がいくつも形作られるダイヤモンドパターンとなって、軸ひずみ17%でせん断を終了する。格子の大きさは大きく、また格子を構成するせん断帯もかなり太い「雁行モード」となっていた。応力制御試験のため軸ひずみの増加スピードは速くなり、所定の軸ひずみに対しての供試体の観察はできなかった。背圧が小さく、背圧の限界により破壊に至る密な砂の非排水せん断試験の場合は、供試体の破壊モードとして、現れるせん断帯は太く菱形は大きくなり、低次の破壊モードを示した。

つまり、砂供試体の破壊時の軸差応力とその時の破壊モードには関係があり、十分な背圧を与えた試験では、密な砂供試体は高次モードで破壊に至るため、高い軸差応力を発揮するが、不十分な背圧のもの背圧の限界により破壊した砂供試体は、低い軸差応力に応じた低次の破壊モードを形成する。

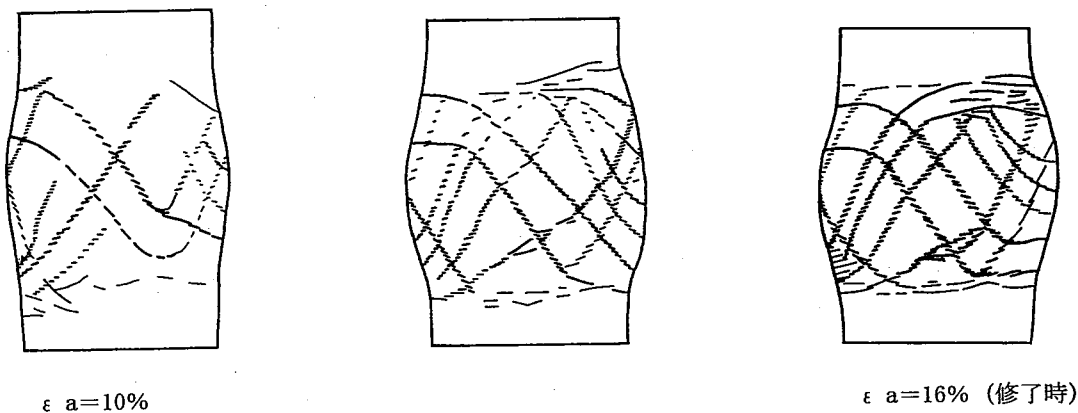


図4 変形・破壊モードの観察記録

5. 限界状態に達した後、非排水除荷履歴を与えた時の挙動

限界状態に達した砂供試体のその後の挙動を調べるため、以下に示す試験を行った。e65の供試体を用い、セル圧 2940kPa(30.0kgf/cm²)、背圧 2842kPa(29.0kgf/cm²)で側圧を 98kPa (1.0kgf/cm²)で一定とし、載荷速度 39.2kPa (0.4kgf/cm²/min) で非排水せん断を実施し、限界状態に達したら非排水条件を保ったまま、除荷するというものである。図5(a)～(d)に試験結果を示す。供試体の挙動は、非排水条件載荷過程までは、3.の test3C とほとんど同じである。限界状態に達した時の最大軸差応力は 7095.2kPa(72.4kgf/cm²)であり、その時の軸ひずみは 20%であった。非排水条件で除荷する過程では、はじめ 20.8%まで軸ひずみは進行し、その後除荷とともに軸ひずみは減少する(図5(a))。過剰間隙水圧は除荷とともに負圧は減少する(図5(c))。図5(b)の平均有

効応力～軸ひずみを見ると、載荷時と同じ経路で戻ってきている。その後、負の過剰間隙水圧の減少がとまり、平均有効応力～軸差応力は1対3の関係を保って降下する。軸差応力が3920kPa(40kgf/cm²)付近まで除荷すると、再び負の過剰間隙水圧が減少し始める。平均有効応力～軸差応力は1対3の関係から崩れ、「下に凸」の曲線を描きながら傾きを緩やかにする。図5(d)には過剰間隙水圧の経時変化を示した。限界状態に達した後の砂供試体の挙動は、このように弾性除荷挙動を示していない。

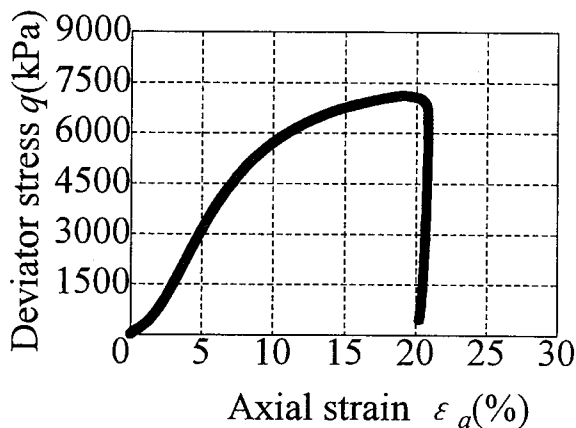


図5(a) 軸差応力～軸ひずみ関係

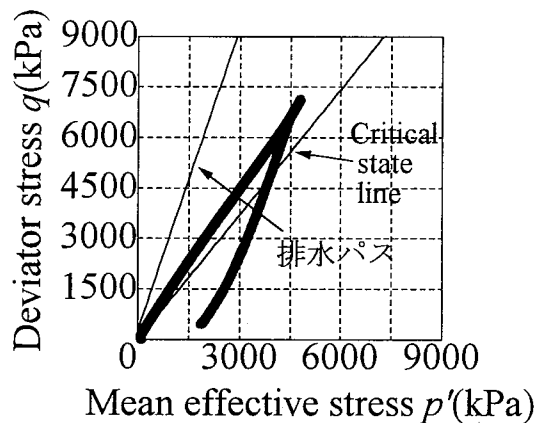


図5(b) 有効応力経路

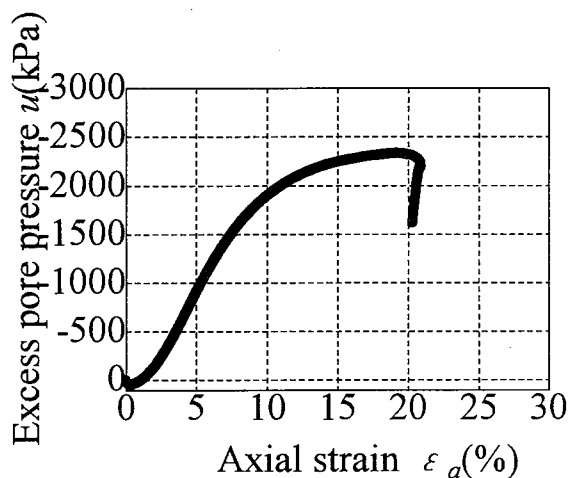


図5(c) 過剰水圧～軸ひずみ関係

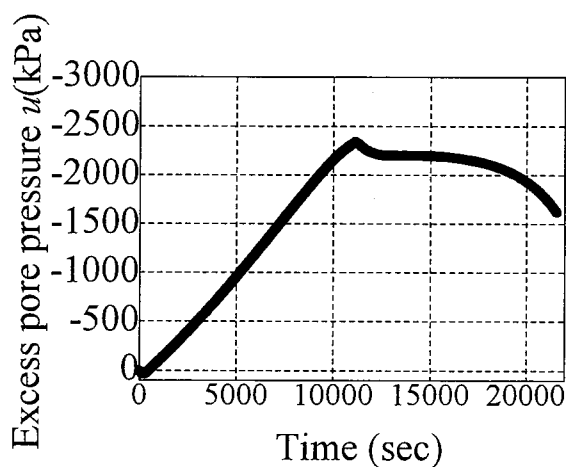


図5(d) 過剰水圧の経時変化

6. おわりに

超過圧密粘土を近似するモデルの一つとして、現在著者らは橋口の提案した下負荷面の概念¹⁾をCam-clayモデルに適用している²⁾。このモデルでは、下負荷面が等方硬化に従い拡大、縮小するというもので、このモデルによれば、超過圧密粘土の限界状態は、下負荷面と正規降伏面が一致し、限界状態に達した状態と定義される。この状態では超過圧密状態であった土はすでに正規圧密状態に戻っていて、過剰水圧や軸差応力の増加もなく、軸ひずみのみが進行する。本試験結果から、非排水単調載荷においては、密な砂が破壊に至るまでの挙動を、このモデルにより説明できた。しかし、限界状態に達した後の非排水除荷過程には、その適用性に限界があることがわかった。このようなサイクリックな載荷にも対応しうるモデルとして、新たに下負荷面が「回転硬化則」に従い拡大、縮小してゆくモデルが橋口により提案されている。今後サイクリックな載荷についての詳細な試験を行ってゆく予定である。

7. 参考文献

- 1) Hashiguchi, K. (1989): Subloading surface model in unconventional plasticity, International Jour. of Soilds and Structures, Vol.25, pp.917-945. 2) Asaoka, A. et al. (1997): Soil-water coupled behavior of heavily overconsolidated clay near/at critical state, Soils and Foundations, Vol.37, No.1, pp.13-39.