

## 初期間隙比がせん断中の不飽和砂質土の変形特性に与える影響

## Influence of Void Ratio on the Shear Deformation Characteristics of Unsaturated Sandy Soil

笹原克夫 Katsuo SASAHARA (高知大学農学部)  
田村圭司 keiji TAMURA ((独)土木研究所土砂管理研究 G)

不飽和砂質土のせん断に間隙比が与える影響を調べるため、様々な初期間隙比の供試体に対するサクシオン制御方式の三軸圧縮試験を行った。その結果密な供試体ではダイレイタンシーの影響により最大主応力差が大きくなるのに対して、限界状態では間隙比に関わらず、サクシオンにより定められる同一の限界状態線が存在することがわかった。そこでダイレイタンシーに起因するせん断応力をエネルギーの釣り合いより定め、それと現在の間隙比と限界状態曲線の距離として示される状態変数の関係を求めると、破壊時から限界状態にかけては間隙比のみならず、サクシオンにも影響を受けない同一の線形関係で表されることが判明した。

キーワード：不飽和土，せん断強度，ダイレイタンシー，間隙比，限界状態  
(IGC : D03, D06)

## 1. はじめに

日本では豪雨に起因する土砂災害のうち、しらすのような火山灰質砂質土やまさ土のような風化残積土、そして水成堆積物起源などの砂質土より構成される自然斜面の表層部（深さ 1~2m）で発生する表層崩壊の発生件数が多い<sup>1)</sup>。また崩壊した自然斜面表層部の土の間隙比は大きいことが報告されている<sup>2), 3)</sup>が、それが降雨浸透に伴い変形・破壊する過程における間隙比の変化は大きいと考えられる。最近砂防行政においては斜面崩壊の前兆現象を検知することにより、斜面崩壊の発生を察知しようという動きがある<sup>6)</sup>が、降雨による斜面の崩壊前の前兆現象は、降雨浸透に伴う斜面の変形に伴って発生する。このため前兆現象は斜面変形の予測と関連させて考えることが重要であるが、降雨浸透過程においては、斜面内に地下水位が形成されるまでは斜面内は不飽和の状態である。以上より降雨による砂質土斜面の崩壊発生予測のためには、不飽和砂質土の変形・破壊に間隙比が与える影響が大きいと考えられ、それを明らかにする必要がある。

砂質土のせん断挙動への間隙比の影響に関する研究は飽和砂質土を対象にしたものが多い。飽和した砂を排水状態でせん断すると、同一の拘束圧の下では、せん断前の初期間隙比が小さいほど破壊時の主応力差が大きく、せん断中の体積変化が膨張傾向になることは多くの研究事例<sup>5), 6)</sup>で明らかにされている。しかし破壊以降の大ひずみ領域までせん断すると、主応力差と体積がほぼ一定の限界状態となるが、この時の主応力差は供試体の初期間隙比に関わらず一定であること、またこの時の間隙比は荷载された平均主応力により決定されることもわかっている<sup>6)</sup>。これらの

ことより Been and Jefferies<sup>7)</sup>や Wood<sup>8)</sup>は現在の供試体の間隙比と、現在の平均主応力に対応する限界状態の間隙比の差を状態変数 (State parameter) と定め、これが破壊時における摩擦角やダイレイタンシー係数と関係づけられることを示した。

これに対して不飽和土のせん断時の挙動に間隙比が与える影響については、笹原・南による初期間隙比を系統的に変えた砂質土に対して、同一サクシオン及び拘束圧の下で不飽和三軸圧縮試験を行った事例<sup>9)</sup>や、緩詰め及び密詰めの DL クレーに対して不飽和三軸圧縮試験を行った向後・森山の事例<sup>10)</sup>、飽和に近い高含水比でサクシオンの低い礫混じり土の三軸圧縮試験を行った Toll<sup>11)</sup>の事例がある。前 2 者の研究からは、飽和土の場合と同様に、間隙比が小さいほど破壊時のせん断強度が大きくなるが、限界状態のせん断応力は初期間隙比に関わりなく、平均主応力により決定されることを示している。また Toll の事例からは、限界状態における有効平均主応力と主応力差の関係と、有効平均主応力と間隙比の関係は、初期間隙比に影響されず、それらは飽和供試体の限界状態線と等しいとした。また Wheeler and Sivakumar<sup>12)</sup>は、不飽和土の限界状態線は、応力経路に影響されず、サクシオンのみにより決定されるとした。また笹原・田村<sup>13)</sup>は正のダイレイタンシー（膨張）が発生する密詰めの不飽和砂質土において、Been and Jefferies<sup>7)</sup>や Wood<sup>8)</sup>と同様な定義の状態変数を定め、せん断中の状態変数とダイレイタンシーによるせん断応力増分の関係を求め、破壊時以降のひずみ軟化過程の状態変数とダイレイタンシーによるせん断応力増分の関係は一定であることを示した。このように不飽和土であっても、飽和土と同様に、せん断中の供試体の間隙比の影響を、状態変

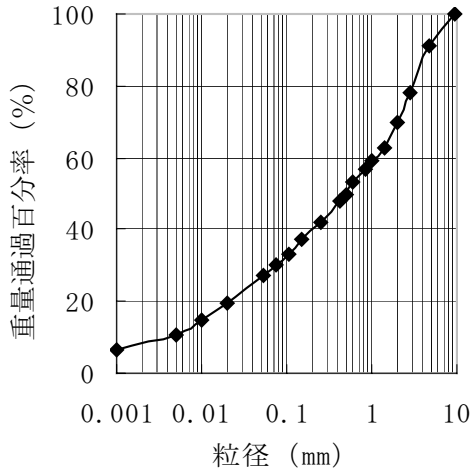


図-1 試料の粒度分布

数を通して、せん断中のせん断応力に反映させることができることが示された。ここで密詰め土は正のダイレイタンス（体積膨張）を示すが、緩詰め土は逆に負のダイレイタンス（体積収縮）を示す。よって破壊時以降のせん断応力を支配する、ダイレイタンスに起因するせん断応力増分の発揮のメカニズムが、正のダイレイタンスを示す密詰め土と、負のダイレイタンスを示す緩詰め土とは異なることも考えられる。先の研究<sup>13)</sup>では、密詰め土の場合に破壊時以降のひずみ軟化過程の状態変数とダイレイタンスによるせん断応力増分の関係は一定であることを示したが、このような関係が負のダイレイタンスを示す緩詰め土の場合にも成立するとは限らない。

このことから本研究においては、密詰めから緩詰めに対応する幅広い間隙比で供試体を作成し、サクシオン制御条件下の三軸圧縮試験を実施して、ダイレイタンスに起因するせん断応力と、供試体の間隙比の関係を検討する。これにより様々な間隙比を有する不飽和砂質土のせん断強度への間隙比の影響を定式化することを目的とする。

## 2. 実験方法

今回の検討では、文献<sup>13),14)</sup>で実施した調整土のサクシオン制御による排気・排水三軸圧縮試験の試験データを用いた。調整土は  $D_{50} = 0.5\text{mm}$ 、 $U_c = 244.4$  で、粒度分布は図-1の通りである。初期間隙比の最大・最小値は砂の最大・最小密度試験 (JIS A-1204)<sup>15)</sup>により求められた最大・最小密度に対応する。文献<sup>13)</sup>ではこのうち最大密度の供試体を用いた試験結果のみ用いたが、今回はすべての供試体の試験結果を用いた。ここで砂の最大・最小密度試験 (JIS A-1204)<sup>15)</sup>の対象は細粒分含有率が5%以下であるのに対して、今回用いた調整土の細粒分含有率は約30%とこの試験方法の適用範囲より大きいことに留意する必要がある。実際今回の試験でも最大密度に対応する密な初期

間隙比の供試体でも、飽和状態のせん断中に体積圧縮が生じたことを記しておく。供試体の作成方法は、まず目標含水比をサクシオン 98.1(kPa)に対応する含水比である8.4(%)と定め、それを目標に試料と水を混ぜ合わせ、その後静的締固め(JGS 0812-2000)<sup>15)</sup>により締め固めた。供試体の標準的な寸法は直径5cm、高さ10cmである。

また試験装置の特徴としては、二重セル方式で内セルの水面高の変化から供試体の体積変化を計測している。供試体へのサクシオン载荷は、供試体上部の撥水性ガラスフィルターから正の間隙空気圧を加え、下部のセラミックディスクから間隙水圧を大気圧に解放することで与えた。試験中は側圧、間隙空気圧を一定として、軸ひずみ速度0.017(%/min.)でせん断を行った。また主応力差及び体積一定の限界状態を達成するために、軸ひずみが25%までせん断を行った。ただしせん断中に側方への膨張が著しく、内セルに接触しそうな場合は、それ以前にせん断を終了している。また試料の最大粒径が10mmであるのに対して供試体直径が5cmと、JGS0520-2000<sup>15)</sup>で定められた「供試体の直径は試料の最大の粒径の20倍以上」に比べて供試体直径が小さい。このためひずみの局所化が心配されたが、試験中の供試体の形状は軸方向の圧縮の進行と共にほぼ均一に側方に膨張し、局所的なひずみの集中は見られなかった。

試験条件と結果を文献<sup>14)</sup>より引用して表-1に示す。

本研究においてはこれまでの不飽和土のせん断強度・変形特性<sup>16), 17)</sup>を参考に、以下に定義する応力・ひずみを用いる。

$\sigma_1, \sigma_3$  : 全応力表示の最大, 最小主応力

$p$  : 平均主応力

$u_a, u_w$  : 間隙空気圧, 水圧

$s = u_a - u_w$  : サクシオン

$\sigma_3 - u_a$  : 基底側方応力。ここで側圧  $\sigma_c$  が最小主応力  $\sigma_3$  に等しい。

$p_{net} = p - u_a$  : 基底平均主応力。

$q = \sigma_1 - \sigma_3$  : 主応力差。

$\varepsilon_1, \varepsilon_3$  : 最大, 最小主ひずみ。

$\varepsilon_a = \varepsilon_1$  : 軸ひずみ。

$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3$  : 体積ひずみ。

なお主応力差最大時、せん断終了時の諸量は、右下に  $f, s$  の添え字を付けて表すこととする。

## 3. 実験結果

図-2に基底側方応力が98.1(kPa)の場合の、試験中の軸ひずみと主応力差、そして体積ひずみの関係を、初期間隙比が異なるケースを比較して示す。

文献<sup>14)</sup>でも指摘したように、初期間隙比の異なる場合の試験結果を比較すると、サクシオンが同一の場合は初期間隙比が小さいほど主応力差の立ち上がり勾配が大きく、体積膨張が著しい。またサクシオンが39.2(kPa)以上で、初期

表-1 試験条件と結果

| e <sub>0</sub> | s<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | σ <sub>3</sub> -u <sub>a</sub><br>(kPa) | 供試体作成時 |       | 主応力差最大時              |                     |                     | せん断終了時                |                      |                      |
|----------------|---------------------------|---|--------|-------|----------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
|                |                           |   | e      | Sr(%) | q <sub>r</sub> (kPa) | ε <sub>af</sub> (%) | ε <sub>vf</sub> (%) | q <sub>cs</sub> (kPa) | ε <sub>acs</sub> (%) | ε <sub>ves</sub> (%) |
| 0.45           | 0                         | 19.6                                    | 0.440  | —     | 69.5                 | 24.8                | 0.87                | 69.3                  | 25.0                 | 0.88                 |
|                |                           | 58.8                                    | 0.422  | —     | 185                  | 19.5                | 3.10                | 181                   | 25.0                 | 3.25                 |
|                |                           | 98.1                                    | 0.414  | —     | 308                  | 23.0                | 4.20                | 306                   | 25.0                 | 4.23                 |
|                | 19.6                      | 19.6                                    | 0.448  | 78.6  | 125                  | 6.18                | -1.00               | 112                   | 21.0                 | -3.10                |
|                |                           | 98.1                                    | 0.432  | 80.9  | 335                  | 17.4                | 1.21                | 327                   | 25.0                 | 1.37                 |
|                | 39.2                      | 19.6                                    | 0.435  | 68.7  | 187                  | 3.00                | -0.70               | 157                   | 12.4                 | -5.20                |
|                |                           | 58.8                                    | 0.420  | 64.8  | 305                  | 8.00                | -1.30               | 283                   | 21.1                 | -3.30                |
|                |                           | 98.1                                    | 0.425  | 67.8  | 372                  | 16.2                | 0.43                | 363                   | 25.0                 | 0.43                 |
|                | 68.6                      | 19.6                                    | 0.438  | 45.1  | 301                  | 13.2                | 0.02                | 157                   | 14.4                 | -9.30                |
|                |                           | 98.1                                    | 0.421  | 53.2  | 495                  | 7.44                | -0.80               | 434                   | 21.5                 | -3.40                |
|                | 98.1                      | 19.6                                    | 0.436  | 43.4  | 304                  | 1.29                | -0.00               | 161                   | 11.3                 | -8.80                |
|                |                           | 58.8                                    | 0.433  | 51.7  | 349                  | 2.93                | -0.20               | 288                   | 20.1                 | -4.40                |
| 98.1           |                           | 0.425                                   | 49.6   | 496   | 7.08                 | -0.80               | 437                 | 22.0                  | -3.30                |                      |
| 0.61           | 0                         | 19.6                                    | 0.532  | —     | 70.9                 | 25.0                | 6.61                | 70.9                  | 25.0                 | 6.61                 |
|                |                           | 58.8                                    | 0.457  | —     | 192                  | 23.9                | 6.02                | 192                   | 25.0                 | 6.07                 |
|                |                           | 98.1                                    | 0.425  | —     | 290                  | 24.4                | 5.72                | 289                   | 25.0                 | 5.72                 |
|                | 19.6                      | 19.6                                    | 0.592  | 56.8  | 108                  | 24.7                | 4.33                | 99.3                  | 25.0                 | 4.00                 |
|                |                           | 98.1                                    | 0.482  | 68.1  | 340                  | 25.0                | 9.40                | 340                   | 25.0                 | 9.40                 |
|                | 39.2                      | 19.6                                    | 0.601  | 41.3  | 110                  | 9.97                | 0.30                | 104                   | 21.4                 | -0.30                |
|                |                           | 58.8                                    | 0.572  | 48.0  | 235                  | 24.5                | 7.28                | 234                   | 25.0                 | 8.84                 |
|                |                           | 98.1                                    | 0.563  | 46.4  | 354                  | 24.8                | 8.86                | 354                   | 25.0                 | 8.84                 |
|                | 68.6                      | 19.6                                    | 0.608  | 39.9  | 119                  | 15.0                | -0.60               | 114                   | 21.0                 | -0.90                |
|                |                           | 98.1                                    | 0.574  | 45.1  | 357                  | 25.0                | 7.34                | 357                   | 25.0                 | 7.36                 |
|                | 98.1                      | 19.6                                    | 0.591  | 38.4  | 111                  | 5.40                | -1.00               | 106                   | 20.8                 | -4.20                |
|                |                           | 58.8                                    | 0.568  | 41.8  | 250                  | 15.2                | 1.34                | 240                   | 25.0                 | 0.82                 |
| 98.1           |                           | 0.558                                   | 43.5   | 372   | 24.6                 | 4.54                | 371                 | 25.0                  | 4.57                 |                      |
| 0.96           | 0                         | 19.6                                    | 0.533  | —     | 66.6                 | 24.7                | 5.89                | 66.4                  | 25.0                 | 5.92                 |
|                |                           | 58.8                                    | 0.514  | —     | 184                  | 24.8                | 6.25                | 184                   | 25.0                 | 6.25                 |
|                |                           | 98.1                                    | 0.474  | —     | 292                  | 24.9                | 6.36                | 291                   | 25.0                 | 6.36                 |
|                | 19.6                      | 19.6                                    | 0.843  | 39.2  | 81.1                 | 25.0                | 10.5                | 80.7                  | 25.0                 | 10.5                 |
|                |                           | 98.1                                    | 0.604  | 50.8  | 341                  | 25.0                | 9.52                | 341                   | 25.0                 | 9.52                 |
|                | 39.2                      | 19.6                                    | 0.881  | 33.9  | 88.7                 | 25.0                | 9.22                | 88.7                  | 25.0                 | 9.22                 |
|                |                           | 58.8                                    | 0.741  | 41.8  | 235                  | 25.0                | 10.5                | 235                   | 25.0                 | 10.5                 |
|                |                           | 98.1                                    | 0.618  | 45.7  | 358                  | 25.0                | 11.2                | 358                   | 25.0                 | 11.2                 |
|                | 68.6                      | 19.6                                    | 0.868  | 30.4  | 85.8                 | 24.4                | 7.79                | 84.7                  | 25.0                 | 7.74                 |
|                |                           | 98.1                                    | 0.661  | 39.5  | 358                  | 25.0                | 11.0                | 358.4                 | 25.0                 | 11.0                 |
|                | 98.1                      | 19.6                                    | 0.876  | 30.1  | 89.6                 | 25.0                | 6.03                | 89.2                  | 25.0                 | 6.02                 |
|                |                           | 58.8                                    | 0.731  | 32.5  | 240                  | 24.9                | 9.68                | 240                   | 25.0                 | 9.72                 |
| 98.1           |                           | 0.675                                   | 39.1   | 360   | 25.0                 | 11.0                | 360                 | 25.0                  | 11.0                 |                      |

間隙比が 0.45 の場合は主応力差がピークを示し、その後ひずみ軟化を起こす。しかしせん断終了時の主応力差は、一部のケースを除いて、初期間隙比に関わりなくサクシオン毎に一定値に収束するようである。一部のケースとはサクシオンが 68.6, 98.1(kPa)と高く、初期間隙比が 0.45 と低いケースであるが、これらはせん断中の側方への膨張が著しく、軸ひずみが 25%になる前に試験終了したため、体積膨張が収束しなかった。このため体積膨張に伴うせん断

応力が付加されたことにより他の初期間隙比よりせん断終了時の主応力差がやや大きかったと考えられる。以上より初期間隙比が異なっても、大ひずみ領域までせん断が進行すれば、サクシオン及び基底平均主応力が等しいならば終局状態での強度が初期間隙比に依存しない限界状態<sup>9)~12)</sup>に到達する。また初期間隙比が 0.45 と小さい供試体では、破壊付近では正のダイレイタンスに伴うせん断応力が付加されて、他の初期間隙比より最大主応力差が大きくな

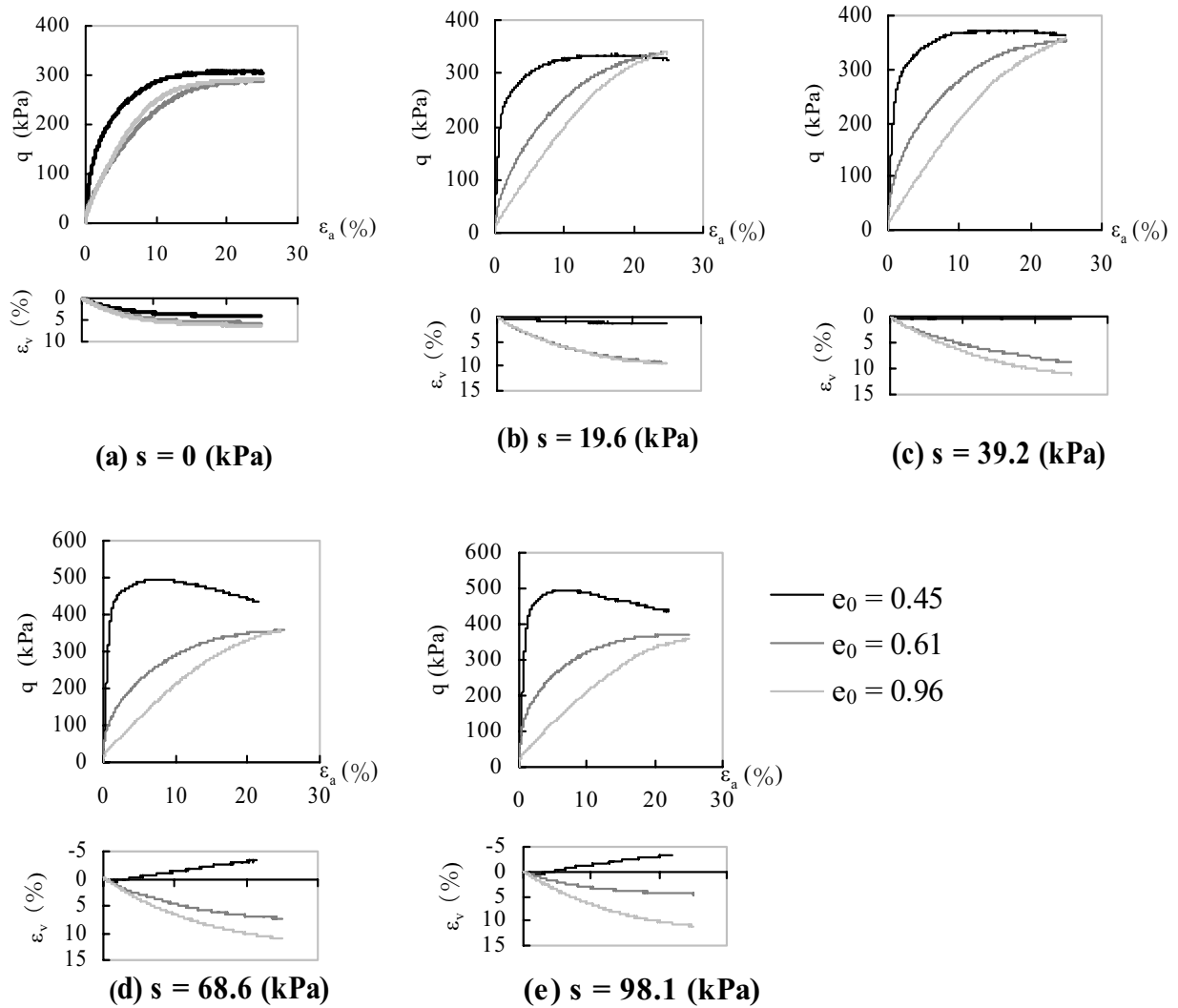


図-2 サクシオン別の軸ひずみ—主応力差，体積ひずみ ( $\sigma_3 - u_a = 98.1(\text{kPa})$ )

ることがわかる。

#### 4. ダイレイタンシーに起因するせん断応力

##### 4.1 ダイレイタンシーに起因するせん断応力のモデル化

前章で間隙比の小さな供試体では，せん断中の正のダイレイタンシーに起因する付加的なせん断応力が発生すると考えた。笹原・田村<sup>13)</sup>は間隙比の小さな密な不飽和砂質土の正のダイレイタンシーに起因する付加的なせん断応力は，特に破壊以降のひずみ軟化過程においては，現在の供試体の間隙比と限界状態曲線の距離を表す状態変数の値と線形関係を持ちながら減少することを示した。このように破壊時以降のダイレイタンシーに起因するせん断応力（以降ダイレイタンシー応力と呼ぶ）が状態変数により

表されれば，現在の間隙比よりダイレイタンシー応力を求めることができる。しかし間隙比の大きな砂質土の場合にはせん断に伴い負のダイレイタンシー（圧縮）が発生するため，せん断中に先のような関係が成立するかどうかは不明である。ここでは笹原・田村<sup>13)</sup>の方法に習い，正のダイレイタンシーを示す密な供試体のみならず，負のダイレイタンシーを示す緩い供試体も対象に，せん断中のダイレイタンシー応力について検討する。

まず不飽和土のダイレイタンシー応力を，Cam-clayモデル<sup>18), 19)</sup>の考え方に従い，軸対称状態のせん断におけるエネルギーのつりあい式より導く。

応力として，基底平均主応力  $p_{net}$  及び主応力差  $q = \sigma_1 - \sigma_3$  を，塑性ひずみ増分としては体積ひずみ増分  $d\varepsilon_v^p = \varepsilon_1^p + 2\varepsilon_3^p$  および軸差ひずみ増分  $d\varepsilon_d^p = \frac{2}{3}(\varepsilon_1^p - \varepsilon_3^p)$

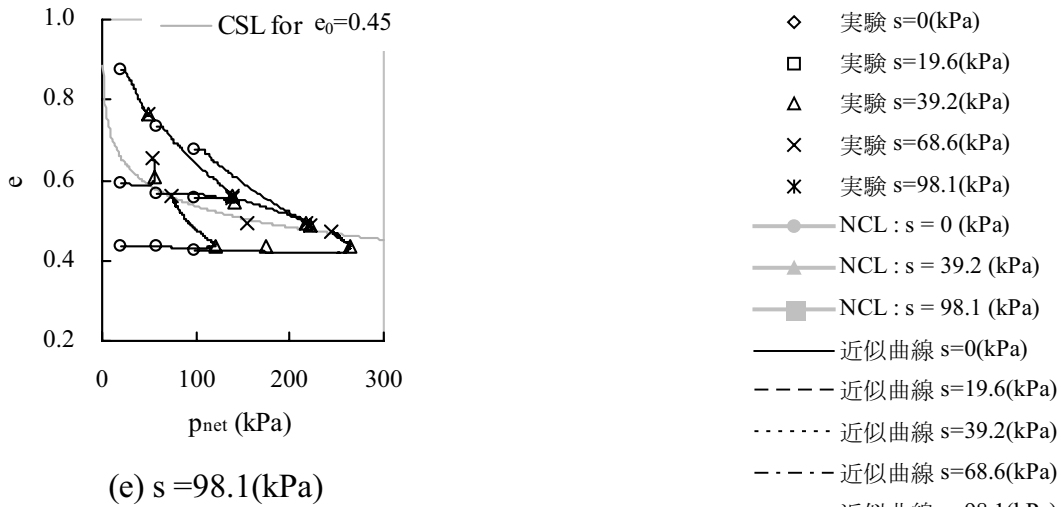


図-3 せん断中の基底平均主応力と間隙比の関係 (s=98.1(kPa))

を用いて、不飽和土における塑性仕事増分が以下のように表せると仮定する。

$$dW^p = p_{net} \cdot d\epsilon_v^p + q \cdot d\epsilon_d^p = M' \cdot p_{net} \cdot d\epsilon_d^p \quad (1)$$

ここで  $M'$  は不飽和土の限界状態における基底平均主応力と主応力差の関係を示す直線(限界状態線)の傾きである。式(1)の第2等号の仮定より以下の式が導かれる。

$$q = M' \cdot p_{net} + p_{net} \cdot \left( -\frac{d\epsilon_v^p}{d\epsilon_d^p} \right) \quad (2)$$

上式よりある時点での主応力差は、右辺第1項で表される、限界状態における主応力差に、右辺第2項に示される、ダイレイタンスに起因して付加される主応力差を加えたものになることがわかる。

#### 4.2 限界間隙比を用いた状態変数

既往の研究<sup>12)</sup>によると、終局状態(限界状態)の間隙比  $e_{cs}$  と基底平均主応力  $p_{net}$  の関係は、サクシジョンのみにより決定される。ここではあるサクシジョンの下での限界状態曲線上の基底平均主応力  $p_{net}$  に対応する間隙比  $e_{cs}$  を Roscoe<sup>20)</sup>らに習って限界間隙比  $e_{cs}(p_{net})$  と呼ぶ。笹原・田村<sup>13)</sup>によると、せん断中の供試体は、その時の基底平均主応力  $p_{net}$  に対応する限界間隙比  $e_{cs}(p_{net})$  より密な場合は限界間隙比  $e_{cs}(p_{net})$  に向けて膨張し、逆に限界間隙比  $e_{cs}(p_{net})$  より緩い供試体の場合は限界間隙比  $e_{cs}(p_{net})$  に向けて収縮する。例として図-3 にサクシジョン 98.1(kPa) の下でせん断した供試体の、せん断中の基底平均主応力と間隙比の関係を示す。図中の○はせん断開始時、△は主応力差最大(破壊)時、×は終局状態を表す。また図中の曲線は初期間隙比 0.45 の限界状態曲線である。一部の供試

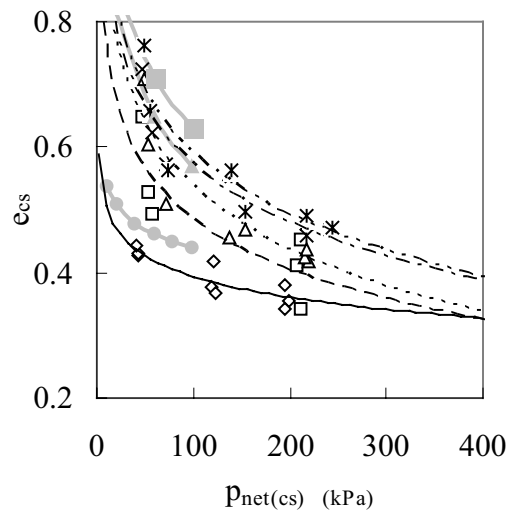


図-4 サクシジョン別の限界状態曲線

体を除いて、初期の間隙比が限界間隙比より大きな供試体は収縮し、逆に初期の間隙比が限界間隙比より小さな供試体は膨張して、終局状態では限界間隙比に至ることがわかる。このことから Been and Jefferies<sup>7)</sup>と同様に、現在の間隙比  $e$  から、現在の基底平均主応力  $p_{net}$  に対応する限界間隙比  $e_{cs}(p_{net})$  を差し引いた値を、供試体の現在の状態を表す状態変数  $P_e$  と表す。

$$P_e = e - e_{cs}(p_{net}) \quad (3)$$

#### 4.3 せん断中の供試体の状態変数とダイレイタンス応力との関係

次にせん断中の、状態変数  $P_e$  とダイレイタンスに起因する主応力差(ダイレイタンス応力)との関係を求める手順を以下に示す。

まずせん断中の基底平均主応力  $p_{net}$  に対応する限界間隙比  $e_{cs}(p_{net})$  を求める。各供試体の終局状態の基底平均主応力と間隙比の関係から、既に図-4 に示すようなサク



ション毎の限界状態曲線が求められている<sup>13)14)</sup>。ここで基底平均主応力  $P_{net}$  が 400(kPa)と大きくなると、サクシヨンの低い限界状態曲線同士が交差するが、実験データの  $P_{net}$  の上限が 200(kPa)であることから、近似曲線の外挿による近似誤差の可能性はある。図中のサクシヨン毎の式にせん断中に変化する基底平均主応力  $P_{net}$  の値を代入して限界間隙比  $e_{cs}(P_{net})$  を求め、それと現在の間隙比  $e$  との差である状態変数  $P_e$  を、式(3)により求める。

次にせん断中のダイレイタンスー応力を求める。ダイレイタンスー応力は式(2)より以下のように定められる。

$$P_{net} \cdot \left( -\frac{d\varepsilon_v^P}{d\varepsilon_d^P} \right) = q - M' \cdot P_{net} \quad (4)$$

上式の右辺第1項は実測の主応力差  $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$  である。次に右辺第2項  $M' \cdot P_{net}$  であるが、これは同じ実験結果から既に導かれた図-5 に示される限界状態線（基底平均主応力  $P_{net(cs)}$  - 主応力差  $q_{cs}$ ）<sup>14)</sup>を用いて求める。限界状態線はサクシヨンが大きいほど縦軸切片が大きくなり、勾配もやや大きくなるようである。これらの効果を現すため式(5)右辺第2項で表されるサクシヨン毎の限界状態線を以下の式で表す。

$$M' \cdot P_{net} = M \cdot P_{net} + p_{int.} \quad (5)$$

上式で  $M$  及び  $p_{int.}$  は図-5 におけるサクシヨン毎の限界状態線の傾き及び縦軸切片（見かけの粘着力）である。式(4)に式(5)を代入することによって、ダイレイタンスー応力  $q_{dil.}$  が以下のように表される。

$$q_{dil.} = P_{net} \cdot \left( -\frac{d\varepsilon_v^P}{d\varepsilon_d^P} \right) = q - (M \cdot P_{net} + p_{int.}) \quad (6)$$

この式(6)に、せん断中の時々刻々の基底平均主応力  $P_{net}$ 、主応力差  $q$  を代入して、ダイレイタンスー応力  $q_{dil.}$  を求める。

#### 4.4 解析結果

以上のようにして求めた、各試験ケースのせん断中の、状態変数とダイレイタンスー応力比の関係を図-6, 7, 8 に示す。これらは各々初期間隙比 0.45, 0.61, 0.96 の場合に対応する。ダイレイタンスー応力比はダイレイタンスー応力を基底平均主応力で除した値である。ここで、せん断中に側方膨張が著しく、主応力差および体積ひずみ一定の限界状態に達していないケースは除外した。ケース毎にせん断開始時には○、主応力差最大（破壊）時には△、終局（限界）状態には×をつけている。図-6 は初期間隙比 0.45 の場合であり、これはすでに笹原・田村<sup>13)</sup>により示されて

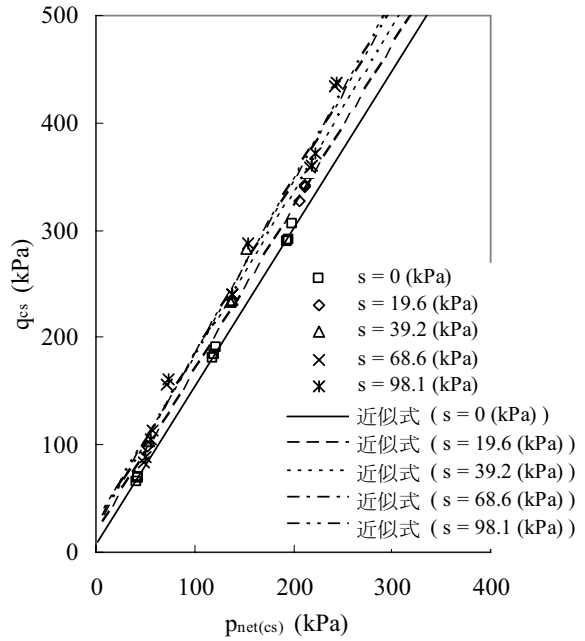


図-5 限界状態における基底平均主応力と主応力差の関係（サクシヨン毎）

いる。密な供試体であるので大部分の供試体はせん断中に正のダイレイタンスーを発生させて膨張していくため、現在の間隙比  $e$  は最初は限界間隙比  $e_{cs}(P_{net})$  より小さく、せん断の進行と共に限界間隙比  $e_{cs}(P_{net})$  に近づいていく。そのため状態変数は負の値をとり、せん断と共に 0 に近づく。その過程でせん断初期は状態変数の増加に連れてダイレイタンスー応力比も増加するが、破壊時から限界状態にかけてのひずみ軟化過程では状態変数の増加と共にダイレイタンスー応力比は減少する。サクシヨンおよび基底側方応力が異なってもこのひずみ軟化過程におけるダイレイタンスー応力比と状態変数の関係は、すべてのケースにおいて同一である。いくつかせん断中に負のダイレイタンスーを示すケースがあり、それらは状態変数が正の値から 0 に減少していくが、この場合もダイレイタンスー応力比は増加し、限界状態において破壊を起こし 0 となる。よってこの場合も限界状態においては、状態変数とダイレイタンスー応力比の関係は、正のダイレイタンスーを起こすケースと同一の線形関係を示す。この初期間隙比 0.45 の場合の破壊時および限界状態時の状態変数とダイレイタンスー応力比の線形関係が図-6, 7, 8 の中に直線で示されている。それでは初期間隙比が異なる場合はどうか。図-7 が初期間隙比 0.61、図-8 が初期間隙比 0.96 の場合である。これらを見ると初期間隙比が大きくなるほど、せん断中の体積変化が膨張傾向から圧縮傾向に移るため、状態変数が負でせん断中に 0 へ向かって増加するタイプ

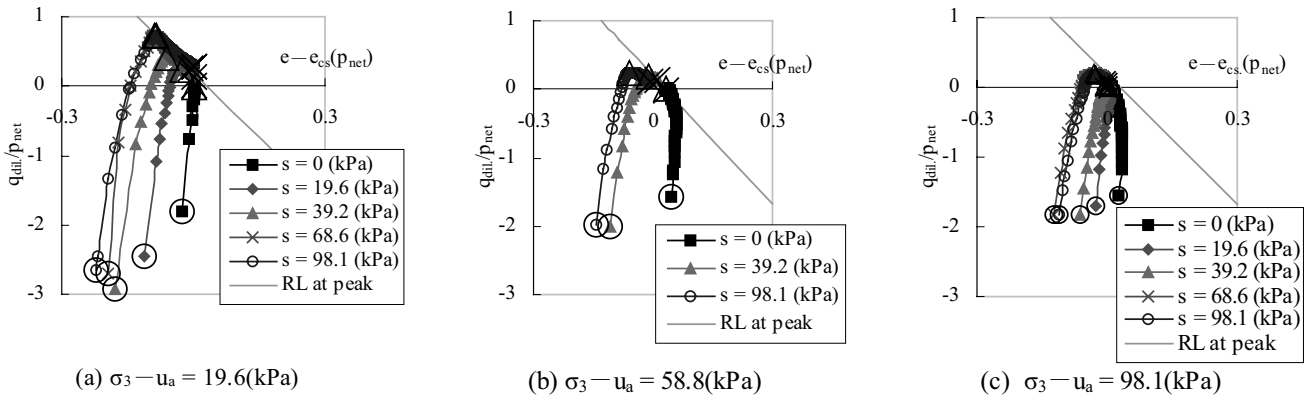


図-6 せん断中のダイレイタンシー応力比と状態変数の関係 ( $e_0=0.45$ )

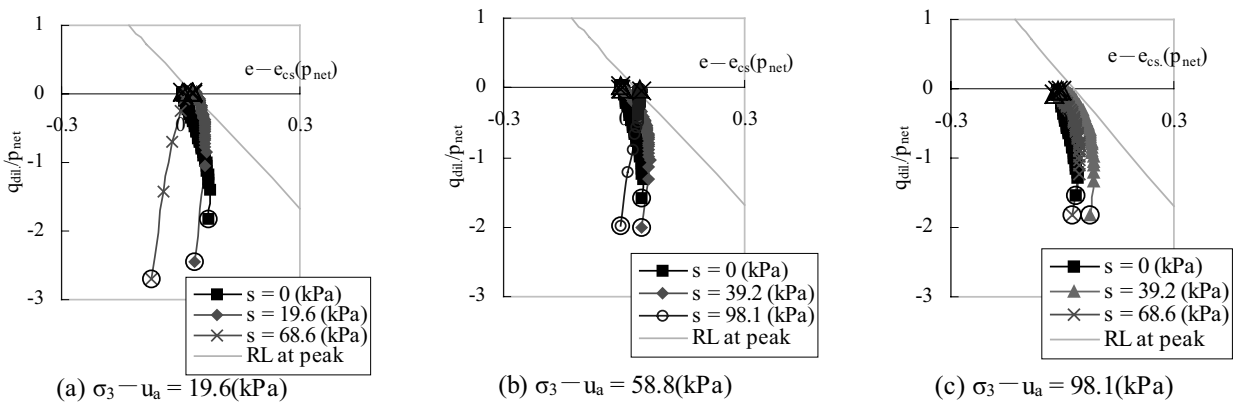


図-7 せん断中のダイレイタンシー応力比と状態変数の関係 ( $e_0=0.61$ )

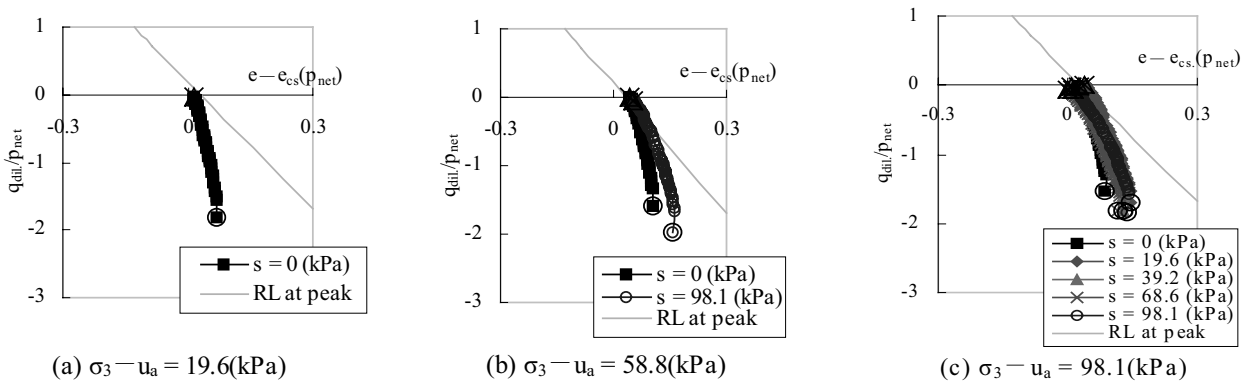


図-8 せん断中のダイレイタンシー応力比と状態変数の関係 ( $e_0=0.96$ )

から、状態変数が正で0に向かって減少するタイプへと移っていく。せん断中の状態変数の変化に伴ってダイレイタンシー応力比は負の値から増加していき、破壊時以降の状態変数とダイレイタンシー応力の関係は、ばらつきはあるものの図中の直線上（初期間隙比 0.45 の場合の両者の関係）に収束するとみなせる。つまり初期間隙比が異なっ

ても、破壊時以降の両者の関係は同一となるといえる。よって初期間隙比の大小によってダイレイタンシーが正負の値を取るものの、破壊時以降のダイレイタンシー応力比と状態変数の関係は、初期間隙比やサクシオンに影響されることなく、同一の関係を有することが示された。限界状態時の主応力差は初期間隙比に影響されず、サクシオンによ

り一義的に決定されることを考え併せると、破壊時およびそれ以降の軟化過程における主応力差は、サクシオン値と現在の間隙比より一義的に定められることになる。つまり今回導かれた成果は不飽和砂質土のダイレイタンシーによる強度増分を現在の間隙比から定めるものであり、これに限界状態線を併せることによって、破壊強度および軟化強度を現在の間隙比より定めることができる。

## 5. おわりに

本研究では様々な初期間隙比を有する砂質土に対して、サクシオン制御による三軸圧縮試験を実施した。その結果以下の事項が判明した。

- (1) 初期間隙比が小さな供試体ほど、せん断中の正のダイレイタンシー（膨張）が著しく、せん断初期の主応力差の増加が著しい。終局状態ではサクシオンと基底平均主応力が等しければ、初期間隙比に関わりなく、主応力差はほぼ一定となると共に、体積変化もなくなる。しかし破壊時には、初期間隙比の小さな供試体の場合は、せん断に伴う正のダイレイタンシーに伴ってせん断応力が付加され、主応力差が大きくなる。
- (2) せん断中のエネルギーの釣り合い式をもとにダイレイタンシー応力を求める式を導いた。またせん断中の現在の間隙比と限界状態曲線の距離として定義される状態変数を定義し、それとせん断中のダイレイタンシー応力を基底平均主応力で除したダイレイタンシー応力比との関係を求めた。すると破壊時から限界状態の両者の関係は、初期間隙比およびサクシオンの値に影響されない同一の直線上にのることが示された。つまり不飽和砂質土の破壊時以降のダイレイタンシー応力比は、サクシオンや初期間隙比にかかわらず、現在の間隙比と限界状態曲線の位置関係により求められることがわかった。これは不飽和砂質土の破壊時以降の主応力差と間隙比の関係を示す関係であり、現在の供試体の間隙比より、ダイレイタンシーに伴う主応力差を求めることを通じて、破壊強度を定めるものである。

## 参考文献

- 1) 門間敬一、武士俊也：がけ崩れ災害の実態，土木研究所資料第 3484 号，1997。
- 2) 笹原克夫、海老原和重：不飽和砂質土の強度特性とそれに基づく急勾配斜面崩壊機構に関する研究，砂防学会誌，Vol.50, No2, p.6, 1997。
- 3) 地盤工学会平成 11 年広島県豪雨災害緊急調査委員会：平成 11 年の広島県豪雨災害調査報告書，p.65, 2000。
- 4) 国土交通省河川局砂防部：土砂災害警戒避難ガイドライン，<http://www.mlit.go.jp/river/sabo/pdf/keikaihinan.pdf>, 2007。
- 5) 松岡元：地盤工学の新しいアプローチ，pp.174-177，京都大学学術出版会，2003。
- 6) Verdugo, R. and Ishihara, K.: The steady state of sandy

- soils, *Soils and Foundations*, Vol.36, No.2, pp.81-91, 1996.
- 7) Been, K. and Jefferies, M. G.: A state parameter for sands, *Geotechnique*, Vol.35, No.2, pp.99-112, 1985.
- 8) Wood, D. M.: *Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
- 9) 笹原克夫、南哲行：粒度分布及び間隙比の異なる砂質土の不飽和せん断強度特性，土木学会論文集 C, Vol.62, No.1, pp.227-239, 2006。
- 10) 向後雄二、森山英樹：不飽和シルトおよび砂・粘土混合土の三軸応力条件下での体積変化およびせん断挙動，農業土木学会論文集，No.193, pp.35-49, 1998。
- 11) Toll, D. G. : A framework for unsaturated soil behaviour, *Geotechnique*, Vol.40, No.1, pp.31-44, 1990.
- 12) Wheeler, S. J., Sivakumar, V. : An elast-plastic critical state framework for unsaturated soil, *Geotechnique*, Vol.45, No.1, pp.35-33, 1995.
- 13) 笹原克夫、田村圭司：密詰め不飽和砂質土のダイレイタンシー特性への間隙比の影響，土木学会論文集 C, Vol.64, No.1, pp.30-42, 2008。
- 14) 笹原克夫、酒井直樹、栗原淳一：初期間隙比を変えた不飽和砂質土の破壊時及び限界状態付近のせん断強度と間隙比，土木学会論文集 C, Vol.64, No.2, pp.197-208, 2008。
- 15) (社)地盤工学会：土質試験の方法と解説—第一回改訂版—，2000。
- 16) Toyota, H., Sakai, N. and Nishimura, T. : Effects of Stress History due to Unsaturation and Drainage Condition on Shear Properties of Unsaturated Cohesive Soils, *Soils and Foundations*, Vol.41, No.1, pp.13-24, 2001.
- 17) 加藤正司、榊原辰雄、畑中憲彦：三軸試験時の不飽和砂の変形強度特性に与えるサクシオンの影響に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.785/III-70, pp.93-106, 2005。
- 18) Roscoe, K. H., Schofield, A. N. and Thurairajah, A.: Yielding of clay in states wetter than critical, *Geotechnique*, Vol.13, No.3, pp.211-240, 1963.
- 19) 関口秀雄：カムクレイモデル，土質技術者のための構成式入門，(社)土質工学会関西支部，pp.4-6, 1993。
- 20) Roscoe, K. H., Schofield, A. N. and Wroth, C. P.: On yielding of soils, *Geotechnique*, Vol.8, No.1, pp.22-53, 1958.

(2009年6月29日 受付)