

土の繰返し三軸試験における過剰間隙水圧の挙動に関する一検討

土質試験, せん断ひずみ, 変形特性

中部土質試験協同組合 正会員 ○久保 裕一
 // 正会員 坪田 邦治

1. はじめに

兵庫県南部地震以降, レベル2地震動が考慮されるようになり, 実務面でも地震応答解析が多く適用されるようになった。このため, 解析に必要な $G-\gamma$, $h-\gamma$ 関係を求める「地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験」(以降, 繰返し三軸試験) が実務でも多用されるようになってきた。繰返し三軸試験は, 中空ねじり試験と比較して試験方法が簡単で, 試験費用も経済的などの利点がある。しかし, せん断ひずみ(γ)が 0.1%以上となる中ひずみ領域では, 応力-ひずみ関係が定常化しなくなるとともに, ステージ間排水の影響により供試体が密実化していくなどいくつかの問題点が指摘されている¹⁾。これらは, 繰返し载荷中に発生する過剰間隙水圧が主たる原因と考えられている。この過剰間隙水圧については, 現在の学会基準では, データシートに記入欄がないことからほとんど報告されておらず, 挙動に関する報告も少ないのが実情である。本報では, 濃尾平野から採取された沖積粘性土, 沖積砂質土について, 繰返し三軸試験の過剰間隙水圧の挙動について検討するとともに, その試験結果の報告内容についても課題を提起したい。

2. 試験試料及び試験方法

(1) 検討に適用した試験試料

今回使用した試料は, 濃尾地域で採取された乱れの少ない沖積粘性土 14 試料(表-1), 沖積砂質土 14 試料(表-2)である。

(2) 試験方法

試験は, 地盤工学会基準 JGS 0542-2009 に準拠し, 周波数 0.1Hz の荷重制御で実施した。

表-1 検討に用いた粘性土データ

| 試料 | w _n (%) | ρ_s (g/cm ³) | F _c (%) | ρ_t (g/cm ³) | σ_{rc} (kN/m ²) | E _{eq} (MN/m ²) |
|----|--------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 68.5 | 2.744 | 97.8 | 1.598 | 140 | 67 |
| 2 | 64.1 | 2.725 | 97.4 | 1.620 | 180 | 86 |
| 3 | 46.6 | 2.753 | 96.9 | 1.753 | 220 | 127 |
| 4 | 72.2 | 2.713 | 96.1 | 1.574 | 140 | 70 |
| 5 | 53.7 | 2.689 | 83.2 | 1.661 | 190 | 116 |
| 6 | 50.6 | 2.730 | 97.6 | 1.720 | 230 | 119 |
| 7 | 63.0 | 2.722 | 96.3 | 1.608 | 210 | 110 |
| 8 | 48.8 | 2.704 | 93.2 | 1.706 | 220 | 125 |
| 9 | 63.8 | 2.694 | 98.5 | 1.610 | 240 | 116 |
| 10 | 65.6 | 2.697 | 97.3 | 1.602 | 260 | 117 |
| 11 | 58.3 | 2.700 | 90.9 | 1.646 | 100 | 97 |
| 12 | 60.6 | 2.703 | 96.7 | 1.643 | 140 | 110 |
| 13 | 61.6 | 2.763 | 96.7 | 1.635 | 200 | 122 |
| 14 | 60.4 | 2.744 | 96.6 | 1.623 | 230 | 132 |

表-2 検討に用いた砂質土データ

| 試料 | w _n (%) | ρ_s (g/cm ³) | F _c (%) | ρ_t (g/cm ³) | σ_{rc} (kN/m ²) | E _{eq} (MN/m ²) |
|----|--------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 23.6 | 2.683 | 20.3 | 1.929 | 60 | 111 |
| 2 | 23.1 | 2.658 | 14.1 | 1.836 | 80 | 135 |
| 3 | 24.5 | - | 2.0 | 1.870 | 70 | 103 |
| 4 | 23.3 | - | 11.0 | 1.858 | 70 | 120 |
| 5 | 25.0 | - | 9.2 | 1.871 | 120 | 155 |
| 6 | 30.1 | - | 9.2 | 1.806 | 120 | 139 |
| 7 | 29.4 | 2.719 | 24.5 | 1.935 | 110 | 169 |
| 8 | 27.1 | 2.699 | 34.2 | 1.938 | 120 | 182 |
| 9 | 15.1 | 2.709 | 12.5 | 2.005 | 50 | 164 |
| 10 | 28.9 | 2.667 | 25.7 | 1.853 | 250 | 216 |
| 11 | 22.7 | 2.665 | 19.8 | 1.891 | 100 | 128 |
| 12 | 31.6 | 2.720 | 9.3 | 1.808 | 50 | 149 |
| 13 | 26.0 | 2.627 | 14.6 | 1.873 | 120 | 172 |
| 14 | 13.2 | 2.670 | 22.1 | 1.831 | 300 | 266 |

供試体径は, 粘性土・砂質土ともに直径 5cm, 高さ 10cm とし, 供試体をセルに設置後に, CO₂ と背圧 200kN/m² を作用させ B 値を高めた。粘性土では, 等方圧密後に B 値 0.95 以上を確認している。ただし, 今回のデータは当組合で実施した試験データを用いて考察しているため, 試験結果の判読には, 拘束圧条件が一定でないことに留意が必要と考える。

3. 繰返し载荷回数の違いによる過剰間隙水圧比の変化

(1) 粘性土

粘性土の繰返し载荷回数による過剰間隙水圧比の挙動を図-1 に示す。過剰間隙水圧比 ($\Delta u/\sigma'_c$) は, せん断ひずみ (γ) が 0.02% 付近から上昇し始め, $\gamma=0.1\%$ 付近では $\Delta u/\sigma'_c$ が 5~10% 程度まで上昇している。また, $\gamma \geq 0.1\%$ になると, 繰返し载荷回数ごとに上昇する割合に差が生じ, $\gamma=1\%$ 付近で比較すると, 载荷回数 10 の $\Delta u/\sigma'_c$ 値が, 载荷回数 2 の約 1.5 倍になっている。これは, $\gamma \geq 1\%$ の領域になると, 繰返し载荷回数ごとに過剰間隙水圧が上昇し, せん断ひずみが徐々に増加していくことによると考えられる。繰返し载荷回数 10 回の $\gamma=2\%$ 付近では, $\Delta u/\sigma'_c \approx 50 \sim 65\%$ 付近まで上昇している。

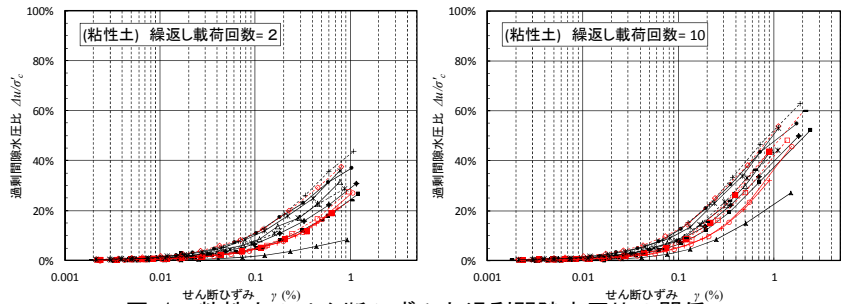


図-1 粘性土のせん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係

(2) 砂質土

粘性土と同様に, 砂質土の状況を図-2 に示すが, $\gamma=0.01\%$ 付近から $\Delta u/\sigma'_c$ が上昇し始めており, 粘性土より上昇開始が早いことが判る。 $\gamma=0.03\%$ 付近から粘性土と同様に, 繰返し载荷回数ごとに $\Delta u/\sigma'_c$ の上昇に差が生じる。繰返し载荷回数 10 回の $\gamma=0.2\%$ 付近の $\Delta u/\sigma'_c$ は, 繰返し载荷回数 2 回の 1.5~2 倍程度に上昇し, $\gamma=2\%$ 付近では $\Delta u/\sigma'_c = 90\%$ 程度まで上昇していることが判った。砂質土の特徴として, 繰返し载荷回数ごとの過剰間隙水圧の上昇割合が大きいために,

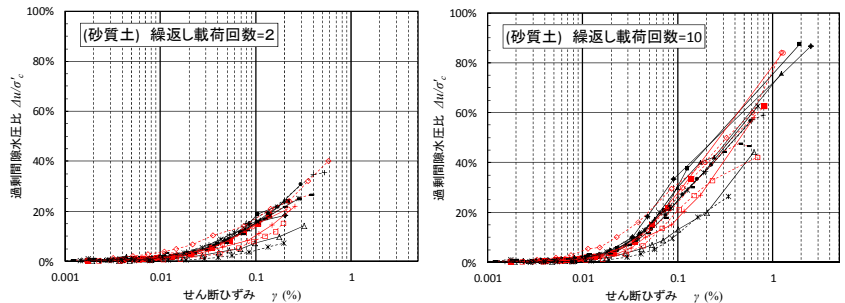


図-2 砂質土のせん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係

γ が増加していく割合も大きいと考える。この傾向は、 γ が増加していくごとにより顕著となり、繰返し載荷回数10回の $\gamma=2\%$ は、繰返し載荷回数2回の場合($\gamma=0.2\sim 0.4\%$)と比較すると、せん断ひずみが1桁増加していることが判った。

4. せん断ひずみ $\gamma=1\%$ 付近の供試体の状態

砂質土と粘性土において、 $\gamma=1\%$ 付近の代表的な供試体の状態を図-3に示し、その特徴を以下に記述した。

(1) 過剰間隙水圧比～繰返し載荷回数関係

砂質土では、繰返し載荷回数11回で $\Delta u/\sigma'_c = 90\%$ 付近まで上昇しており、7回以降では上端が凹になる曲線が得られている。これは、繰返し三軸試験でよく見られる現象であり、ほぼ液状化していると考えられる。これに対して、粘性土では、砂質土と比較して上昇の割合が小さく、砂質土で見られる上端が凹になる曲線も出現してこないことが判った。

(2) 軸差応力～平均有効応力関係

砂質土では、繰返し回数ごとに $\Delta u/\sigma'_c$ が上昇し、平均有効応力が減少(左に移動)し、(1)と同様に、この関係からも、繰返し載荷回数7回から曲線の形が変化し変相していることが判る。この変相は、繰返し三軸試験でよくみられる現象で、ダイレイタンスー特性が変化する場合に起ると考えられる。また、この現象は、密な試料ほど発生しやすく、緩い試料では変相に至らず液状化することが多いことから、ここに表示した供試体はやや密な状態であったと考えられる。

粘性土では、繰返し回数ごとに過剰間隙水圧が上昇し、曲線の間隔も徐々に狭くなる。しかし、砂質土のように大きく形が変化することはない。同じような形で平均有効応力が減少する人が多い。このことから、供試体の応力状態が大きく変化しているとは考えにくい。このように、有効応力経路図があれば、供試体の状態をよく把握できると考える。

(3) 応力～ひずみ関係

砂質土では、繰返し回数ごとにせん断ひずみが極端に増加する。この場合、増加していくのは引張方向で、圧縮方向はほとんど増加していないといえる。粘性土でも、繰返し回数ごとにせん断ひずみが増加するが、砂質土と比較してせん断ひずみの増加割合が小さく、また、圧縮側でもせん断ひずみが増加していることが特徴といえる。

5. まとめ

繰返し三軸試験における過剰間隙水圧の挙動について検討を加えた。

a.繰返し載荷回数10回の $\gamma=2\%$ 付近では、粘性土で約50～60%、砂質土で約85～90%程度まで $\Delta u/\sigma'_c$ が上昇しているこ

と判った。このことから、砂質土ではほぼ液状化している状態と考えられる。このことから、荷重制御で沖積砂質土を試験する場合、計測範囲が $\gamma=2\%$ 付近が限界であると考えられる。なお、荷重ステップを極端に小さくすれば、計測は可能になるが、ステージごとに供試体が密実化することが考えられ、適切な試験方法ではないと考えられる。

b.粘性土でも、 $\Delta u/\sigma'_c$ が50～60%まで上昇することから、次のステージ載荷の過剰間隙水圧消散に十分注意が必要である。

c.ここで指摘したように、試験中に発生する過剰間隙水圧情報は重要で、データシートで報告することが望ましいと考える。また、試験の簡易さから、荷重制御方式で試験を実施しているが、荷重制御方式はひずみ間隔を制御できないため、ひずみ制御方式と比較して、試験者の技量の差による試験結果への影響が生じる可能性が高いと考える。

最近の地震応答解析では、入力地震動が大きくなり、併せて、大ひずみ領域の計測が必要とされてきていることから、上記も含めて、試験方法、報告事項などについて、見直しや再検討する時期に来ていると考えている。

最後に、本検討に際し、試験結果を提供して下さいました組合員の技術者の皆様方に、深謝の意を表します。

(参考文献) 1) 吉田望・三上武子:時代の要請に応える土の繰返しせん断変形特性試験の確立を,地盤工学会誌, vol.58-2, pp.1～5, 2010.

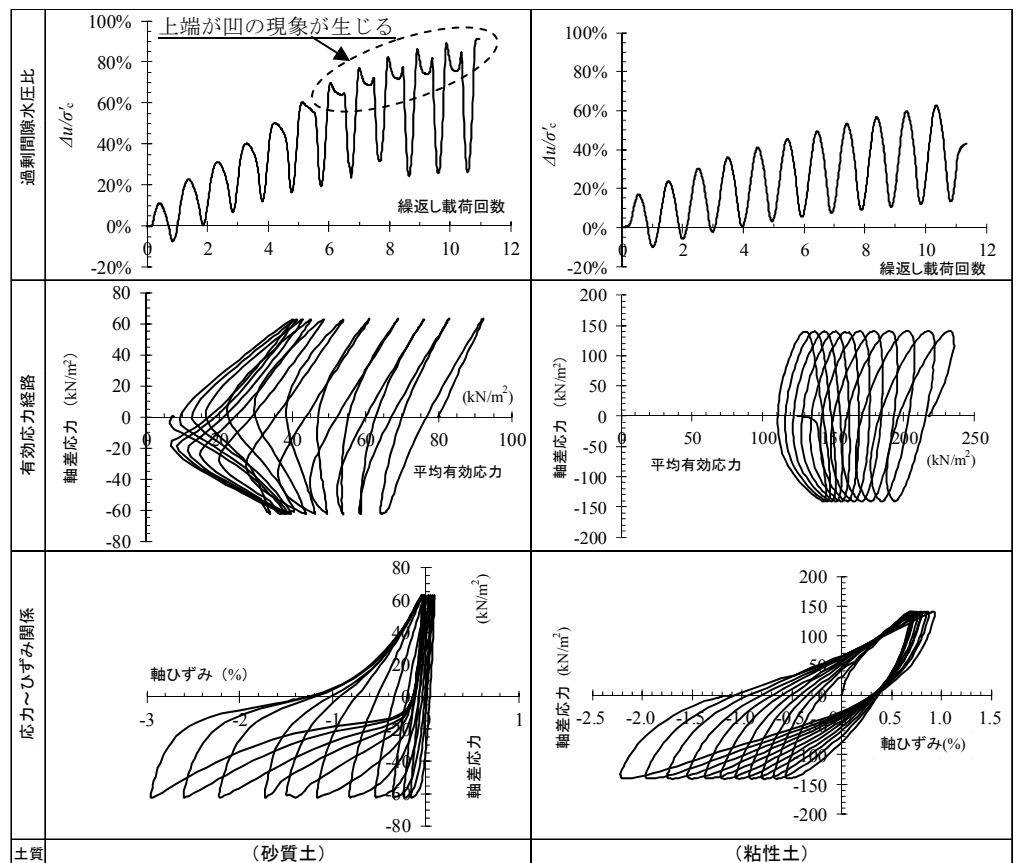


図-3 せん断ひずみ1%付近の供試体状況