

累積ひずみを生ずる飽和砂の液状化特性

名古屋大学工学部 正会員 松澤 宏
正会員 杉村 昌広

まえがき

従来の土の動的特性に関する実験的研究は、そのほとんどが、繰返し载荷応力の平均値が変化しない「両振り载荷」および「片振り载荷」状態で行われたものであった。実地盤を考えると、構造物を有する斜面地盤や土留め構造物背後の地盤では、地震時に一方への大変形を伴いつつ、動的载荷を受けることが予想され、このような地盤の動的性質は、従来の「両振り载荷」および「片振り载荷」試験によるものとは異なると考えられる。そこで筆者らは、動的三軸試験装置を用いて、繰返し载荷と同時に静的圧縮载荷を行った場合（以下、「静的+繰返し载荷」と呼ぶ）の、飽和砂の動的特性について調べてきているが、得られた特性は、平均応力やせん断応力レベルを考慮に入れても、「両振り载荷」や「片振り载荷」時の特性では説明できないものであった¹⁾。ここでは、「静的+繰返し载荷」時の飽和砂の非排水せん断特性について報告する。

飽和砂の非排水「静的+繰返し载荷」試験

試験に用いた試料は豊浦砂であり、その粒径加積曲線と物理定数は図-1に示す通りである。供試体は、空中落下法により所定の乾燥密度で成形した後、CO₂置換法によって飽和させた。間隙水圧係数Bは、背圧2.0kgf/cm²で0.98以上であった。試験装置の概略は図-2の通りであるが、「静的+繰返し载荷」試験においては、軸方向に静的大変形と微小振幅の繰返し変形が同時に生ずるため、通常の軸変位計測方法では、高精度の計測が不可能である。そこで、軸

方向変位の微小繰返し成分を高精度で計測する必要から、図-3のような微小変位検出器を試作した。セル上板に設置された微小変位検出器の可動軸先端に非接触型変位計を取り付け、可動軸上端を不動点に固定する。静的载荷はセルのジャッキアップにより、繰返し载荷はセル上方のアクチュエータによって行うため、微小変位検出器は、静的変位が除去された繰返し载荷に対応する変位のみを検出するようになっている。

载荷は、等方圧密状態から、軸方向に静的圧縮ひずみ（軸ひずみ速度2.82%/min）と繰返し応力（周波数0.2Hz）を同時に作用させた。载荷の開始時は、圧縮载荷である。なお、軸力、間隙水圧の計測値については、メンブレン力およびメンブレンペネトレーションの補正を行っている。

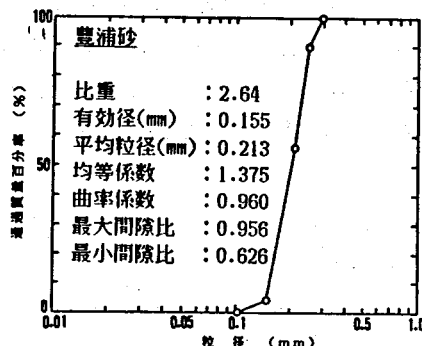


図 - 1

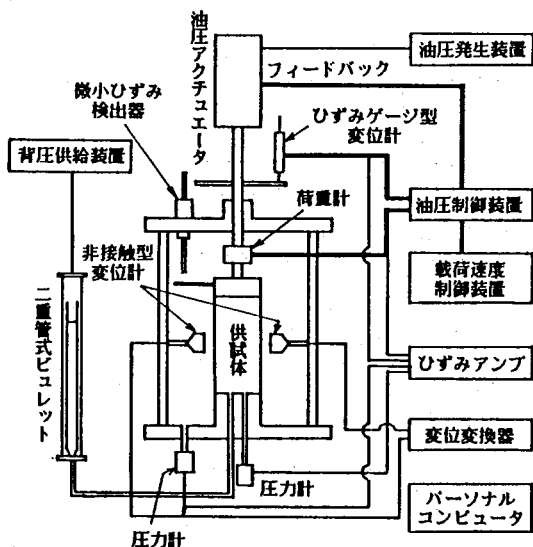


図 - 2

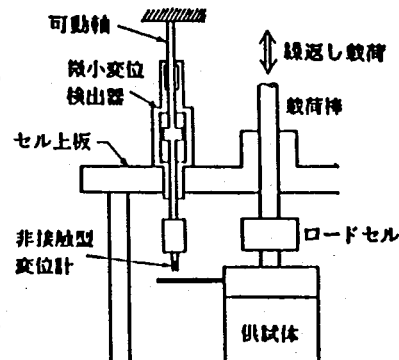
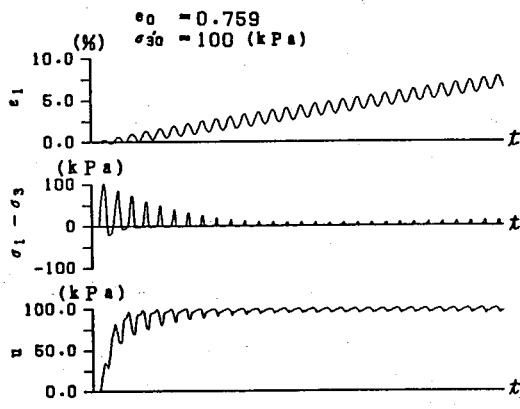


図 - 3

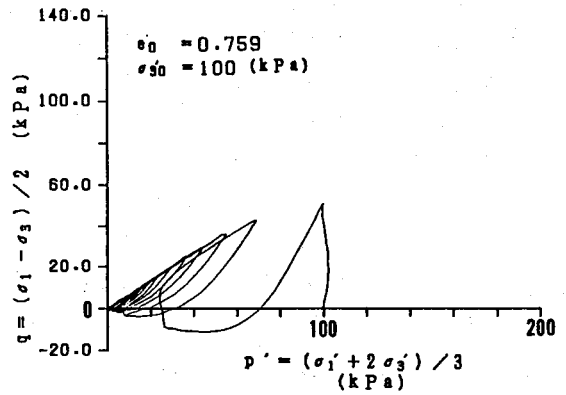
Liquefaction Behavior of Saturated Sand Subjected to Accumulative Strain,
H. Matsuzawa and M. Sugimura (Nagoya University).

「静的+繰返し載荷」時の飽和砂の非排水特性

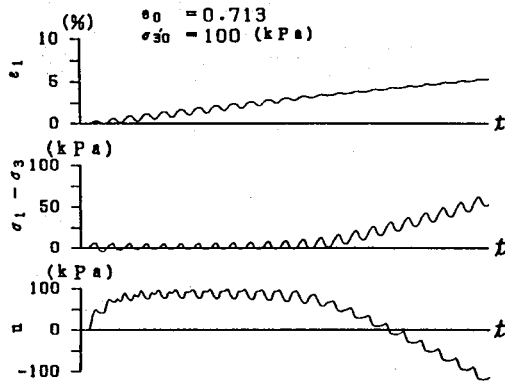
非排水「静的+繰返し載荷」試験における代表的な軸ひずみ、せん断応力、間隙水圧の時間変化と有効応力経路図を図-4(a)~(f)に示すが、非排水「静的+繰返し載荷」試験の結果は、次の3つのケースに分けられる。すなわち、①液状化を生じ、強度を失う場合(図-4(a)および(d))、②液状化を生ずるが、その後ダイレイタンシー効果により間隙水圧が減少し、強度を回復する場合(図-4(b)および(e))、③液状化を生じない場合(図-4(c)および(f))であり、①の現象は比較的緩詰めめの供試体で、②の現象は比較的密詰めめの供試体で確認された。以下では、繰返しせん断応力振幅および供試体の密度と、非排水「静的+繰返し載荷」時の液状化発生および強度回復の有無との関連について検討する。



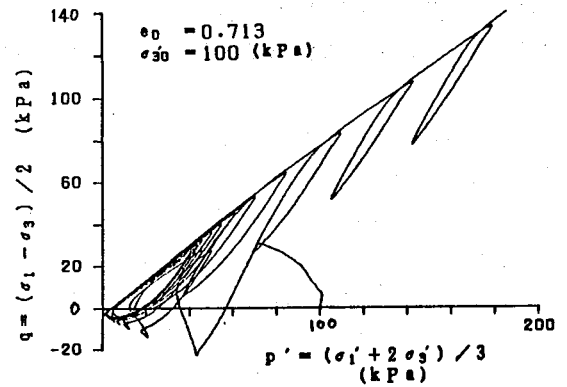
(a)



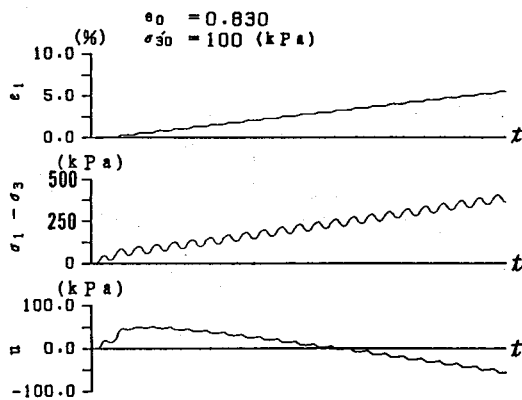
(d)



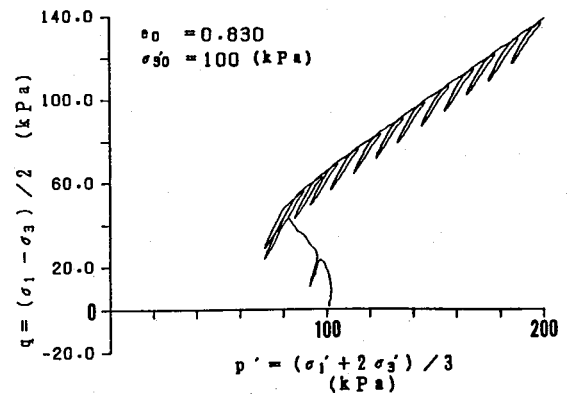
(b)



(e)



(c)



(f)

図-4

いま、図-4(c)の $u \sim t$ 関係で、载荷中に最大となった過剰間隙水圧の値を最大過剰間隙水圧 u_{max} と定義する。最大過剰間隙水圧比 u_{max}/σ_{30}' (σ_{30}' :初期有効側圧) と繰返しせん断応力比 $\Delta\sigma_d/2p_0'$ (p_0' :初期有効平均応力) との関係を示す。図-5に示す。 u_{max}/σ_{30}' の値は、 $\Delta\sigma_d/2p_0'$ が 0.1程度より小さければ、非排水静的圧縮試験 ($\Delta\sigma_d/2p_0'=0$) の場合とほぼ同じ値であり、この範囲では、繰返し载荷の影響に比べ、静的载荷の影響がかなり卓越していると考えられる。 $\Delta\sigma_d/2p_0'$ が 0.1を越えると、 u_{max}/σ_{30}' の急激に増大し、緩詰め砂では $\Delta\sigma_d/2p_0' \geq 0.17$ で、密詰め砂では $\Delta\sigma_d/2p_0' \geq 0.20$ で、 $u_{max}/\sigma_{30}' = 1.0$ となって、液状化が生じる。ただし、図中●で示した密詰め砂のデータで $u_{max}/\sigma_{30}' = 1.0$ となったものは、前述のように、液状化後ダイレイタンスー効果によって間隙水圧が減少し、強度を回復している。

次に、非排水「静的+繰返し载荷」試験において液状化を生ずる場合の、繰返しせん断応力比 $\Delta\sigma_d/2p_0'$ と繰返し载荷回数 N の関係を、図-6(a)~(c)に示す。なお図中には、比較のため共通液状化試験²⁾における $\Delta\sigma_d/2p_0' \sim N$ 関係も示してある。緩詰め砂の場合(図-6(a))、○印で示す「静的+繰返し载荷」試験での $\Delta\sigma_d/2p_0' \sim N$ 関係は、「両振り载荷」試験の場合と同様右下がりの傾向を持つが、液状化強度は「両振り

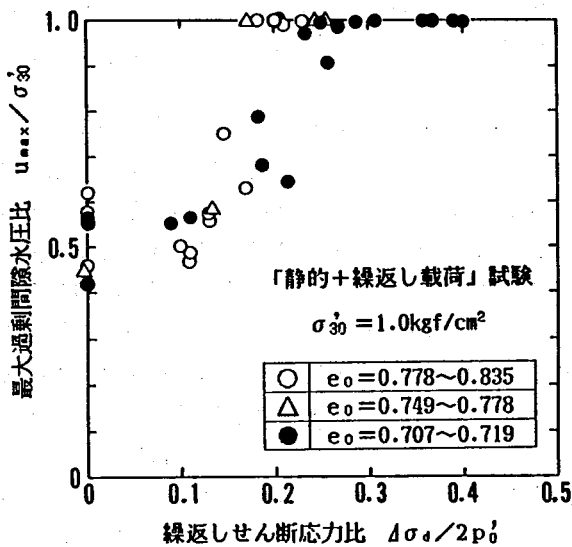


図 - 5

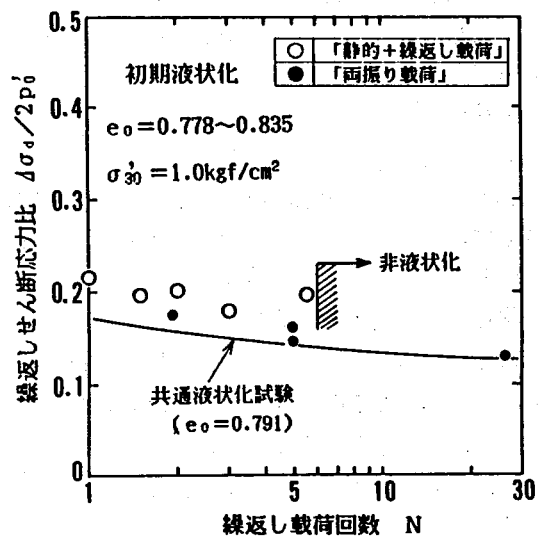


図 - 6 (a)

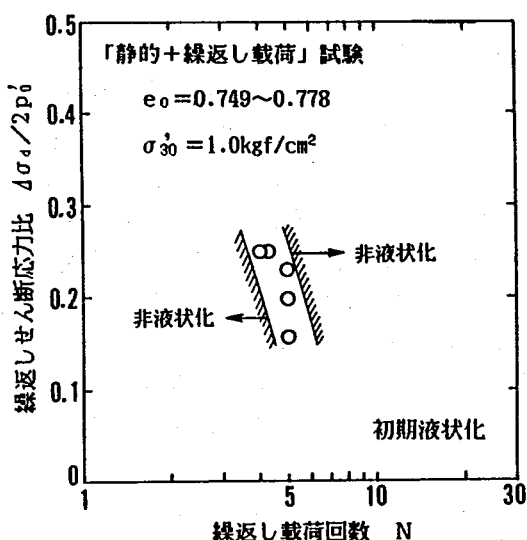


図 - 6 (b)

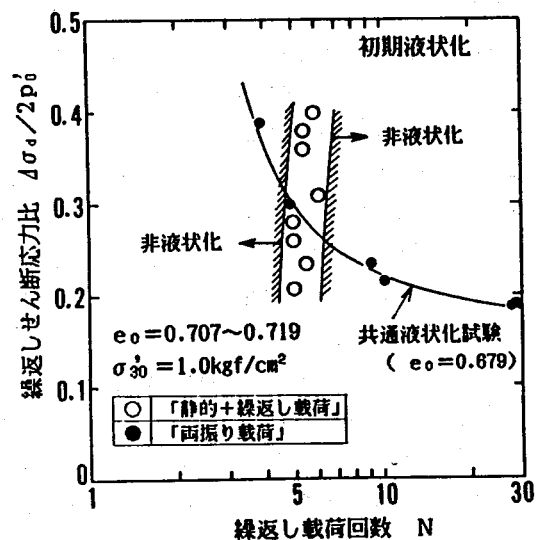


図 - 6 (c)

「静的+繰返し載荷」試験のものより若干大きな値をとる。さらに注目すべきことは、今回採用した静的載荷速度と繰返し載荷周波数の条件下では、繰返し載荷回数 N が6回以上で液状化を生ずることはなく、 $N \leq 5$ で必ず液状化を生じたという点である。一方、図-6(c)に示す密詰め砂の場合には、緩詰め砂の場合とはまったく異なった傾向を持つ。「静的+繰返し載荷」時の $\Delta\sigma_v/2p'_0 \sim N$ 関係は、急な右上がりの傾向、すなわち、繰返しせん断応力が大きくなると、液状化を生じるための繰返し載荷回数も若干増加するという傾向を持っている。また、液状化を生じるための N の値は、密詰め砂の場合

には5~7回に限られ、 $N < 5$ および $N > 7$ での液状化現象は見られなかった。中密度の砂の場合(図-6(b))には、緩詰め砂と密詰め砂の中間的な傾向を持ち、やはり液状化を生ずる繰返し載荷回数は限定されるようである。

最後に、繰返しせん断応力比 $\Delta\sigma_v/2p'_0$ と初期間隙比 e_0 を軸にとり、非排水「静的+繰返し載荷」時の液状化の有無について整理した結果を、図-7に示す。図中の○印は液状化して強度を失った場合、●印は液状化を生じ、その後強度を回復した場合、×印は30回の繰返し載荷において液状化しなかった場合をそれぞれ表す。また、「静的+繰返し載荷」試験で液状化が生じる繰返し載荷回数を考慮して、共通液状化試験における $N=5$ と $N=30$ の曲線を示してあるが、筆者らの行った「両振り載荷」試験においても、同様の曲線が得られた。図より、液状化・非液状化の境界線は、 $N=30$ の「両振り載荷」の曲線より上方に位置していることがわかる。このことは、「静的+繰返し載荷」時には、静的載荷の影響による間隙水圧の減少によって、 $N=30$ のときの液状化強度が増大したことを表している。一方、「静的+繰返し載荷」時の液状化のほとんどは、前述のように $N=5$ 付近で生じていることから、 $N=5$ の「両振り載荷」の曲線と比べると、緩詰め砂の場合には総じて液状化強度は大きくなるが、密詰め砂では、両振り載荷時の液状化強度よりも低くなる場合もあることがわかる。さらに、今回の試験では、液状化後の強度回復・非強度回復の境界線は、 $e_0=0.76$ あたりに現れた。

あとがき

「静的+繰返し載荷」試験における飽和砂の非排水挙動は、①液状化を生じ、強度を失う場合、②液状化を生ずるが、その後強度を回復する場合、③液状化を生じない場合の3ケースに分かれることが明らかになった。また、「静的+繰返し載荷」状態での液状化強度など、飽和砂の非排水特性は、「両振り載荷」時のものとは異なることがわかった。液状化後の強度回復については、静的載荷による密詰め砂のダイレイタンシー効果の影響であると考えられるが、この現象が、要素としての三軸供試体の中で生じているかどうかについては、検討を要する。しかしながら、まえがきで述べたように、構造物を有する斜面地盤や土留め構造物背後の地盤のように、地震時に一方向への大変形を伴いつつ、動的載荷を受けることが予想される場合、液状化の後、構造物近傍の地盤において、数回の繰返し載荷の間に強度が回復する可能性があることは、興味深い。今後は供試体の要素性の検討や構造試験としての解釈を進め、さらに、静的載荷速度と繰返し載荷周波数および初期せん断応力などとの関連を考慮に入れつつ、「静的+繰返し載荷」時の飽和砂の非排水特性を明確にする予定である。

<参考文献> 1) 松澤・杉村: 累積ひずみを生ずる飽和砂の動的特性, 第24回土質工学研究発表会, 1989.

2) Toki, S. et al.: Cyclic Undrained Triaxial Strength of Sand by Cooperative Test Program, Soils and Foundations, Vol. 26, No. 3, 1986, pp. 117-128.

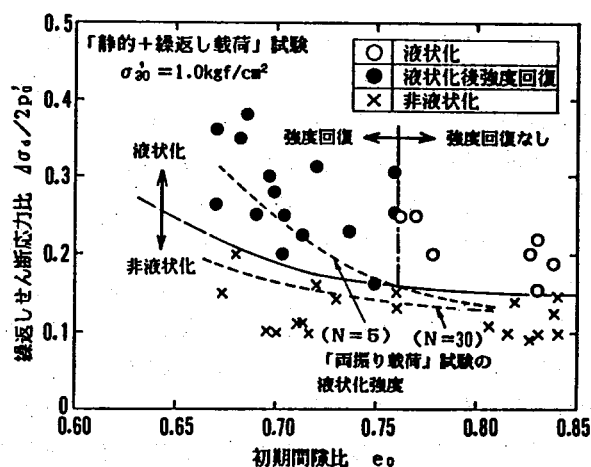


図-7