

九州大学工学部 正員 山内 豊聡  
 学生員 坂井 晃  
 未滿 隆一

1. まえがき

飽和砂の液状化強度は、初期有効拘束圧・せん断応力・初期間隙比だけで決定されるものではなく、応力履歴によっても影響を受けることが知られている。特に、液状化に至らない微小応力履歴を受けた場合には、液状化強度はかなり増加することが、 $F_{mn}^{(1)}$ らや月岡石原<sup>2)</sup>により、報告されている。これらは、水圧上昇や水圧消散による履歴効果により、土粒子の構造変化もしくは塑性硬化が誘発されるため液状化強度が増加するに至るとしている。また、間隙水圧上昇過程は各載荷毎に異なり、水圧上昇量を示していることから、微小応力履歴による構造変化は間隙水圧の消散した割合、すなわち間隙水圧の減少量によって各々異なった変化傾向を持つことが考えられる。本研究は、間隙水圧の上昇および消散が土粒子の構造変化に対応していることから、液状化に至らない段階において間隙水圧を任意の量だけ消散させ、液状化強度に与える履歴効果を調べたものである。

2. 実験方法

振動三軸試験装置(側圧一定、軸圧変動)を用い、周波数0.5Hzの正弦波を載荷して実験を行なった。試料は、豊浦標準砂( $e_g=2.64, e_{min}=0.982, e_{max}=2.582$ )を使用した。供試体は、煮沸した試料を水中落下法により作成し、水頭差で脱気水を通じた後、バックプレッシャーBPを1 kg/cm<sup>2</sup>加えた。相対密度 $D_r=55\%$ で一定とし、初期有効拘束圧 $\sigma'_v=1 \text{ kg/cm}^2$ 、応力比 $\sigma'_v/\sigma'_h$ は液状化回数 $N_L=30$ 回での $\sigma'_v/\sigma'_h=0.255$ を用いた。

本実験は、間隙水圧の消散による履歴効果を調べる目的で、発生した間隙水圧 $u_b=0.25, 0.50, 0.70 \text{ kg/cm}^2$ の各段階に対して任意の量だけ間隙水圧を減少させた後、液状化試験を続行した。間隙水圧の減少による相対密度の変化は、非常に小さいことから、バックプレッシャーを所定の水圧に調整した後、供試体の間隙水と連結する方法を採用した。間隙水圧の減少量 $\Delta u$ は、以下の通りである。

$u_b = 0.25 \text{ kg/cm}^2$	$\Delta u = 0.05, 0.15, 0.25 \text{ kg/cm}^2$
$\sigma'_v = 0.50$	$\sigma'_v = 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50$
$\sigma'_v = 0.70$	$\sigma'_v = 0.10, 0.30, 0.50, 0.70$

図-1は、実験を行なった間隙水圧の経路を載荷回数比 $N/N_L$ と間隙水圧比 $u/u_b$ の関係において示した模式図である。

3. 実験結果と考察

本実験では、初期液状化(わずかに急増点)後あたりから載荷応力が減少し、応力制御が保たれないことから、本研究では初期液状化に至るまでの間隙水圧上昇過程と初期液状化強度について考察した。図-2は、間隙水圧減少の履歴を加えない場合の $N/N_L$ と間隙水圧比 $u/u_b (=u/u_b)$ との関係を液状化回数の異なるものに対してプロットしたものである。ただし、 $u_b$ は初期液状化での残留間隙水圧であり、 $u_b=0.85\sim 0.70 \text{ kg/cm}^2$ であった。この図から、 $N/N_L$ と $u/u_b$ の関係は液状化回数が異なっても同一の上昇過程を示すことがうかがえる。

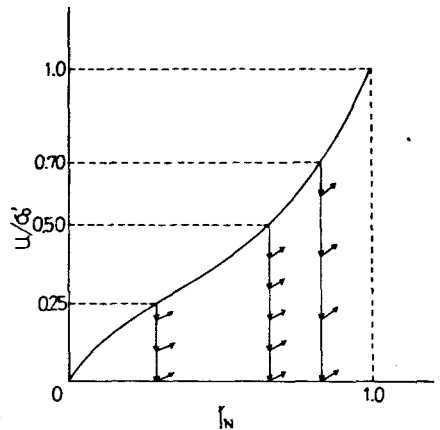


図-1 間隙水圧経路の模式図

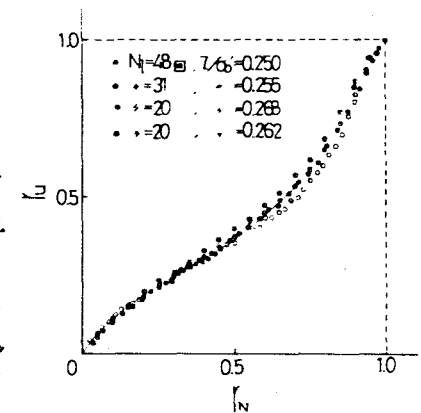


図-2 応力履歴のない $N/N_L \sim u/u_b$ 関係

同一の応力比においても、液状化回数 $N_L$ には幾分かのバラツキが見られる。そこで、履歴を受けた場合の液状化回数の決定に際しては、図-3に示す方法をとった。まず、初期液状化における間隙水圧 $u_0$ から履歴を加える地点Bでの $u_0$ を計算し、その時の $u_0$ の値を図-2から読み取って履歴を受けない場合の $N_L$ を求めた。その後、Cまで間隙水圧を減少させた履歴A→B→Cにおいて、Aでの荷重回数比 $u_0$ から履歴前の荷重回数 $N_1$ を求め、C以後の荷重回数 $N_2$ との和をもって液状化回数 $N_L+N_2(=N_1+N_2)$ を算出した。

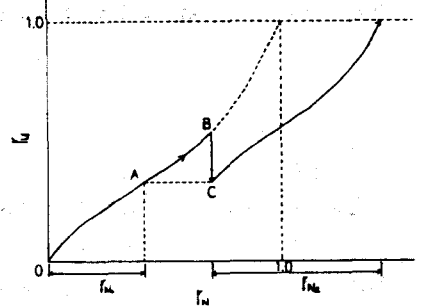


図-3 液状化回数の算定図

図-4は、 $u_0/c' = 0.50$ から任意の段階まで間隙水圧を減少させた場合の間隙水圧上昇過程を示したものである。各段階とも履歴硬化によって水圧上昇率が減少しており、その傾向は再荷荷の初期に大きく、間隙水圧減少量の多いものほど著しい。このことは、 $u_0/c' = 0.25, 0.70$ の場合にも同様のことが確認された。

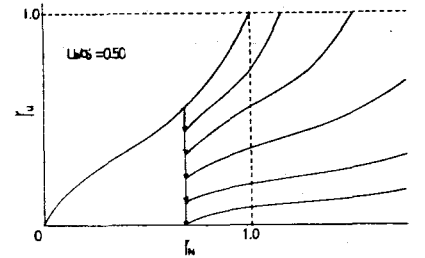


図-4 応力履歴を受けた場合の $u \sim N$ 関係

液状化強度の変化については、図-5に示す。この図は、間隙水圧の減少率 $u_0/c'$ に対する液状化強度の増加率 $R_2 [(u_0 + u_{0L})/u_0]$ の変化をプロットしたものである。液状化強度は、減少率が増加していくほど大きくなっている。特に、減少率が50%程度までは $u_0/c'$ の値のいかんにかかわらず、わずかな増加率しか示さないが、それ以上の減少率になるとはじめて大きく強度が増加し始め、100%近くになると最も急激になる。これらのことから、間隙水圧の減少率が小さい状態では、間隙水圧減少による土粒子の構造変化はほとんど見られず、初期有効拘束圧と等しくなる付近から大きな影響を受けること、すなわち、間隙水圧が完全消散に近い状態になるとはじめて大きな履歴硬化を生ずる。

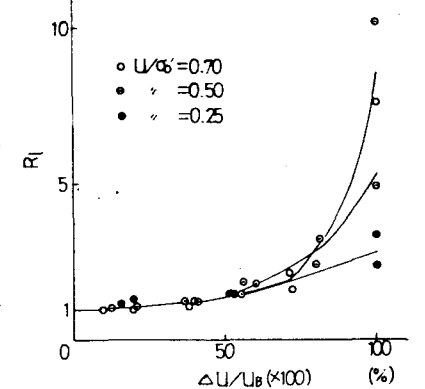


図-5  $u_0/c'$ と $R_2$ の関係

図-6は、初期有効拘束圧に対する間隙水圧の減少率 $u_0/c'$ と液状化強度の増加率 $R_2$ との関係を示したものである。この図から、履歴による液状化強度の変化傾向がはっきり補えられ、同じ間隙水圧減少量においては $u_0$ が小さくなるほど大きな強度を示すことが判別できる。また、完全消散における $u_0$ と $R_2$ の関係は、式(1)のような直線関係が得られた。 $R_2 = 10 u_0/c' + 1$  ----- (1)

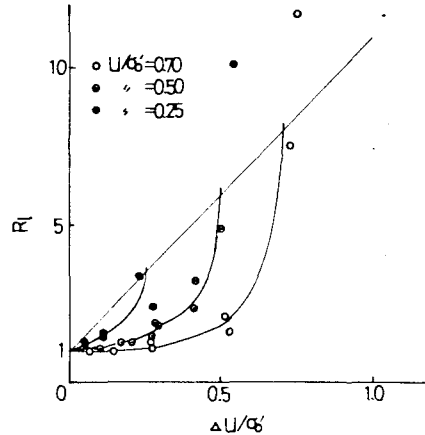


図-6  $u_0/c'$ と $R_2$ の関係

#### 4. まとめ

間隙水圧上昇過程に着目して液状化に至らない応力履歴の影響を調べた結果は、以下の通りである。(1)間隙水圧の減少量が多いほど履歴硬化は大きくなるが、減少率が50%以下ではその影響は小さい。(2)間隙水圧がすべて消散した場合、履歴前の間隙水圧上昇量と液状化強度の増加率とは比例関係にある。

今後、数回の応力履歴を受けた場合にも検討を加えていきたい。

参考文献 1) Finn Bransby, Pickering, (1970) "Effect of Strain History on Liquefaction of Sand", Proc. ASCE, Vol. 96, No. 5, pp. 1177-1183. 2) 阿部 石雄 (1977) "応力履歴の砂の液状化特性におよぶ影響", 土木学会第32回年次学術講演会発表要旨集, pp. 213-214