

Ⅲ - A133

波浪による地盤の液状化とその後の塑性変形
- 液状化特性に与える波浪履歴の影響 -京都大学大学院 学生会員 佐々真志
京都大学防災研究所 フェロー会員 関口秀雄

はじめに

著者らは、波浪による地盤の液状化特性及びその発生メカニズムを、緩詰め砂地盤($Dr = 37 \sim 38\%$)に対する一連の遠心力場波浪実験及び理論的考察を通じて、明らかにしている[1][2]。その主要なポイントは次の通りである。(1) 緩詰め砂地盤は、厳しい波浪負荷の下で残留間隙圧の上昇により、完全液状化に至る。(2) 液状化がそれ以下の応力比では発生しない、限界応力比が存在する。(3) 地盤液状化のプロセスは、液状化フロントが鉛直下方に進展していく意味の「進行性液状化」である。(4) 液状化フロントの進展に伴い、過剰間隙圧の変動成分が増幅する。

本報では、液状化特性に与える波浪履歴の影響に着目して、遠心力場における繰返し波浪載荷実験により得られた知見を述べる。具体的には、液状化後の塑性変形の発達、及び再液状化特性を明らかにする。

細砂地盤に対する遠心力場波浪実験

用いた試料はLeighton Buzzard 砂($D_{50} = 0.15\text{mm}$, $e_{max} = 1.066$, $e_{min} = 0.642$)である。流体としては、波浪伝播と圧密に関する二つの時間相似則を同時に満足させるために、高粘性のシリコンオイルを採用した。遠心加速度は $50g$ 、液深は 90mm 、造波板の加振周波数は 11Hz に固定した。一定の遠心加速度 $50g$ の下で、緩詰め砂地盤($Dr = 37.5\%$)に対して、波浪載荷実験PWL7を行った。波浪載荷後、圧密消散過程が終了したことを確認したのち、 $1g$ 場に戻して地表面平均沈下量を計測し、それより地盤の平均相対密度 Dr を算出した。その後再び、遠心加速度を $50g$ まで上げた状態で、同一地盤に対して波浪載荷実験PWL7Aを行った。以上のサイクルを繰返し、3度の再載荷を実施した(PWL7A, PWL7AA, PWL7AAA)。各実験ケースを通して地盤表面における液圧変動振幅 u_0 は、 6.9kPa と一定に保っている。

主要な実験結果

ここでは、代表的なケース(Test No. PWL7AA)を取りあげる。波浪載荷前の地盤の相対密度 Dr は、 75.0% である。入力液圧変動と鉛直方向3地点における過剰間隙圧の測定時刻歴を図-1に示す。ここに鉛直座標 z は、空間に固定した座標(鉛直上向きが正の方向)であり、 $z = 0$ のレベルが最初の地盤表面に対応する。図中の実線は実測の生波形を表わす。点線はその移動平均をとったものであり、残留間隙圧の時刻歴を表わす。残留間隙圧が初期有効土被り圧 σ'_{v0} に一致すると液状化の発生となる。まず地盤浅部($z = -29\text{mm}$; 地盤表面($z = 8\text{mm}$)より 21mm の深さ)における過剰間隙圧応答に着目すると、波浪載荷の初期段階において残留間隙圧が上昇し、6波目において液状化に至ったことがわかる。また液状化状態はその後の計測時間を通して継続している。

次に地盤中部($z = -70\text{mm}$)における応答に着目する。残留間隙圧は 27.0kPa のレベルまで上昇し、その後計測時間内に若干の消散を経験している。すなわち本地点の土は液状化(流体化)には至っていない。注目すべき事象は、残留間隙圧の上昇過程における過剰間隙圧変動成分の変化である。すなわち、波浪載荷4波目以降、過剰間隙圧変動成分には際だった増幅現象がみられる。ここに当該波形の卓越周期を調べることで、増幅前後の時点において、変動成分の周波数が 11Hz から 22Hz と2倍になっていることを確認している。飽和砂の繰返し塑性変形特性を考えた場合、変相後は1つの応力サイクルが2サイクルの過剰間隙圧変動に対応する。従って上述の現象は、サイクリックモビリティの発現の可能性が高い。興味深いことは、このサイクリックモビリティが計測時間を通して継続していることである。また対照的に波浪履歴(液状化)を経ていない緩詰め砂地盤(Test No. PWL7)では、過剰間隙圧変動成分は、残留間隙圧の上昇過程において、いったん2倍の周波数 22Hz になった後、元の周波数 11Hz に戻り、その後、液状化に至っている。

図-1に戻り、地盤底部($z = -93\text{mm}$)における間隙圧波形に注目すると、初期有効土被り圧 $\sigma'_{v0} = 40.0\text{kPa}$ に対し、最大残留間隙圧 u_{max} は 26kPa にとどまっており、液状化には至っていない。

以上に述べた地盤応答は、液状化フロントの鉛直下方への進展が地盤浅部にとどまったことを意味して

波浪履歴、再液状化、塑性変形

〒611、宇治市五ヶ庄、TEL 0774-38-4176、FAX 0774-38-4180

いる。また、本ケースの波浪載荷後の地盤の相対密度は $D_r = 84\%$ に達していた。

繰返し波浪載荷実験結果のまとめ

各波浪実験後の地表面沈下量及び D_r の値をまとめて表-1に示す。これより累積沈下量は、波浪載荷実験毎に増加し、最終的に11mmに到達したことがわかる。この値は、地盤層厚が100mmでトレンチ地盤であるため、塑性体積ひずみ11%に相当する。また地盤の相対密度 D_r は、90%まで達している。各波浪実験における各深度の最大残留間隙圧値 u_{max} をその深度における σ'_{v0} の値で除した値の深さ方向のプロフィールを、図-2に示す。初期載荷PWL7において、地盤全層が完全液状化に至っていることがわかる。その後の波浪載荷PWL7Aに着目すると、液状化フロントの進展は地盤中部までとなっている。再々載荷PWL7AAは上述の過剰間隙圧波形に対応するものであり、液状化の発生は地盤浅部にとどまっている。この傾向は次のPWL7AAAにも反映されていることがわかる。上述の結果で、特に留意すべきことは、液状化フロントの最終到達深さが、ケース毎に浅くなっていることである。さらに地盤底部において誘起された不安定化の程度が、波浪載荷を経るごとに低くなっていることにも注目したい。

以上をまとめると、(1) 波浪による地盤の液状化により、地盤は高いレベルの塑性変形を経験する。(2) 波浪履歴に関わらず、地盤は再液状化するが、同液状化領域は地盤浅部にとどまる。

参考文献 [1] Sekiguchi, H., Sassa, S and Kita, K. : 'Liquefaction of cohesionless sediments under fluid wave trains', submitted to IS-NAGOYA'97, 1997. [2] 佐々真志、関口秀雄(1997): '波浪による砂質地盤の進行性液状化のメカニズム', 第32回地盤工学研究発表会概要集(投稿中)

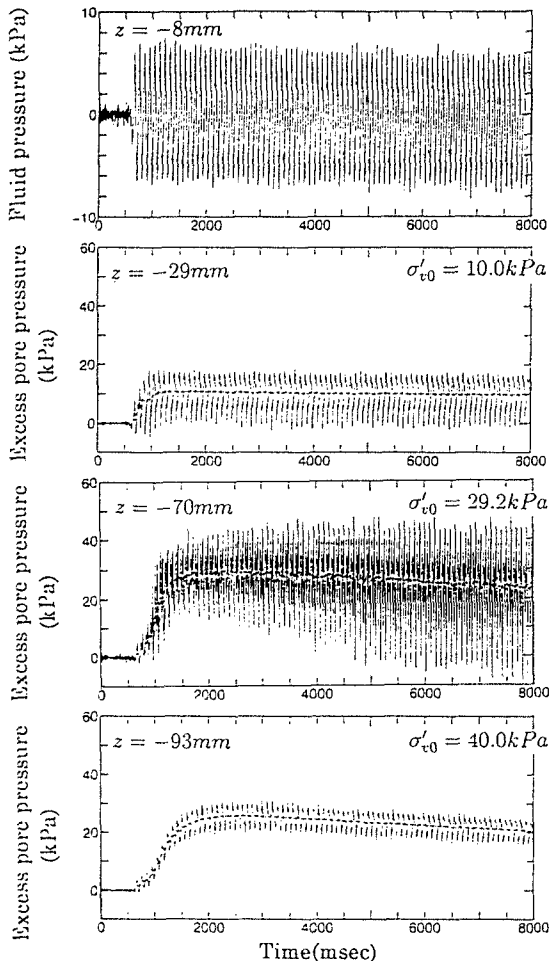


図-1 PWL7AAにおける計測液圧及び間隙圧の時刻歴

表-1 波浪履歴にともなう地盤の塑性変形の発達

Description	Settlement (mm)	ϵ_v (%)	e	D_r (%)
Initial	0	0	0.91	37.5
PWL7	5.0	5.0	0.81	60.0
PWL7A	8.0	8.0	0.75	75.0
PWL7AA	10.0	10.0	0.71	84.0
PWL7AAA	11.0	11.0	0.68	90.0

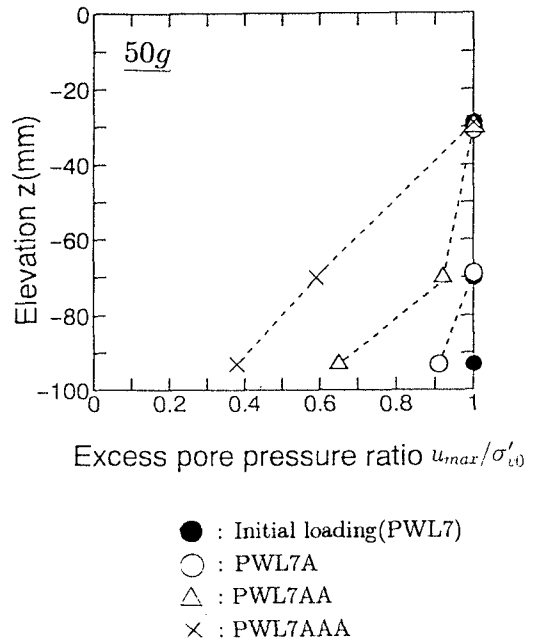


図-2 波浪による地盤の再液状化特性