

変動水圧による砂地盤内の間隙水圧と液状化への層厚の影響

Effects of the thickness of sandy beds on pore water pressure and liquefaction by pressure fluctuation

山下俊彦*・南村尚昭**・阿久津孝夫***・谷野賢二****
Toshihiko Yamashita, Takaaki Minamimura, Takao Akutu, Kenji Yano

Abstract

Effects of the thickness of sandy beds on the properties of transmission of pore water pressure and liquefaction were experimentally investigated using a fluctuating pressure-type liquefaction test apparatus. The attenuation of the pressure amplitude in sandy beds increases as the thickness of sandy beds is bigger and the phase delay of pressure change becomes maximum at which the thickness of sandy beds is about 2.0m. The thickness of liquefaction layer increases as the thickness of sandy beds is bigger and experimental values become smaller than theoretical values as the thickness of liquefaction layer increases.

Keywords : wave, pore water pressure, liquefaction, thickness of sandy beds

1. はじめに

近年、波浪により海底砂地盤が液状化することが明らかにされている¹⁾。海底砂地盤の液状化は、波浪の水位変動による砂地盤内の間隙水圧変動と密接な関係があるため、砂地盤内の間隙水圧の伝達特性の把握が必要である。間隙水圧の伝達特性は、間隙水の圧縮性（つまり、砂地盤中のわずかな空気量）が大きな影響をもつことが従来の研究で明らかにされている。一方、砂地盤の幾何学的特性である地盤の層厚も間隙水圧の伝達に影響することが理論的に明らかにされている²⁾。しかし、間隙水圧の伝達特性や液状化への層厚の効果は実験的にはほとんど調べられていないのが現状である。そこで本研究では、変動水圧型液状化試験装置を用いて、砂地盤の層厚が間隙水圧の伝達特性及び液状化へ与える影響について実験的に明らかにする。

2. 実験装置及び方法

実験は、図-1に示す変動水圧型液状化試験装置を用いて行った。試験用円筒部はアクリル製で直径40cm、高さ40cmの円筒リングと20cm、10cmのリングを積み重ねて全高を2.0mとしたものである。砂地盤は粒径 $d=0.15\text{mm}$ の硅砂で間隙比0.85の緩い砂地盤である。砂地盤の層厚は、 $L=0.7\text{m}$ 、 1.2m 、 1.5m 、 1.8m に変化させた。この砂地盤は、実験容器よりも高い位置に水を入れた砂容器を設置し、ホースを用いて両容器の水頭差による吸引力（サイフォン方式）で円筒部に水と一緒に砂を入れて、各々の層厚に作成した。地盤特性には、前述した砂地盤中の空気量が大きな影響を与えるが、このような作成方法によりほぼ決まった特性を持つ砂地盤（空気量の少ない砂地盤）を作ることができた。実験条件は周期が $T=$

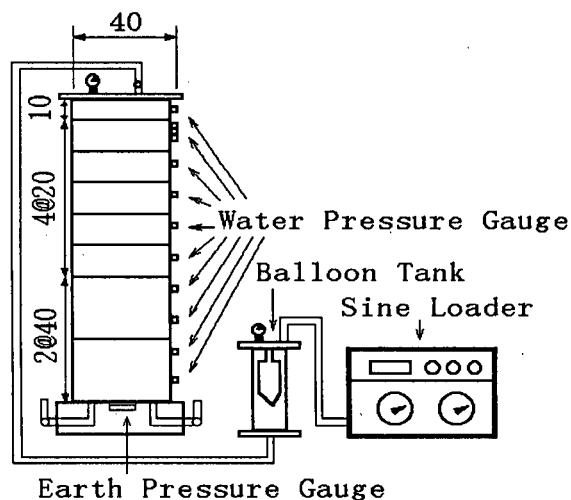


図-1 実験装置

- * 正会員 北海道大学大学院工学研究科 (060 札幌市北区北13条西8丁目)
- ** 学生員 北海道大学大学院工学研究科
- *** 北海道開発局
- **** 正会員 北海道東海大学

5秒で変動水圧全振幅が $H=1.2\text{m}$ 、 6.0m の2種類で層厚 $L=0.7\text{m}$ 、 1.2m 、 1.5m 、 1.8m を2回ずつ実験を行い合計8回行った。また、いずれの場合にも平均水圧水頭として 10m をかけている。ここで、 $H=1.2\text{m}$ は砂地盤が液化しない条件で砂地盤の特性を把握するためのものでありすべての実験の最初に行った。理論解析は、簀ら(1987)³⁾の理論式を用いて計算を行った。水中の水圧及び砂地盤中の間隙水圧については、図-1に示す11ヶ所でサンプリング間隔 0.01 秒で測定した。

3. 実験結果及び考察

3. 1 変動間隙水圧

図-2、図-3に周期5秒の地表面水圧と間隙水圧の実測値データの2つの例を示す。図-2は、層厚が $L=0.7\text{m}$ の場合であり (a) は変動水圧全振幅水頭 $H=1.2\text{m}$ 、(b) は $H=6.0\text{m}$ である。図-3は、層厚が $L=1.5\text{m}$ の場合であり (a) は変動水圧全振幅水頭 $H=1.2\text{m}$ 、(b) は $H=6.0\text{m}$ である。なお、後述の地盤特性を表すパラメータ α は、両層厚とも $\alpha=1.15$ である。 Z は地表面を原点とし下向きを正とした。両層厚条件とも間隙水圧計の位置が深くなるほど圧力振幅が小さくなり、ピークの位置が遅れて現れていることがわかる。これより地表面水圧が減衰と位相遅れを伴って地盤中に伝達していることがわかる。図-2 (a) (b) と図-3 (a) (b) を比較すると図-2 (a) (b) より図-3 (a) (b) の方が地表面水圧の減衰と位相遅れが大きくなっているのがわかる。これは、図-3 (a) (b) の方が砂地盤の層厚が大きいためと考えられる。つまり、層厚が大きい方が、間隙水圧への伝達特性に大きく影響を与えると考えられる。

3. 2 圧力振幅減衰比と位相遅れ

図-4 (a) (b) (c) (d) に圧力振幅比 P_m/P_0 (=間隙水圧振幅 / 地表面水圧振幅)、図-5 (a) (b) (c) (d) に位相遅れ $\Delta T/T$ (=地表面水圧ピークと間隙水圧ピークの時間差 / 周期) の深さ方向分布を層厚 $L=0.7\text{m}$ 、

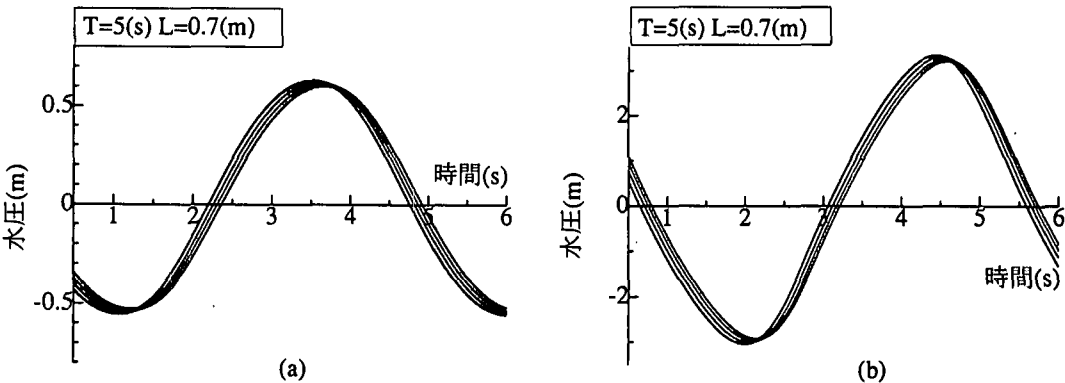


図-2 主流水圧と間隙水圧

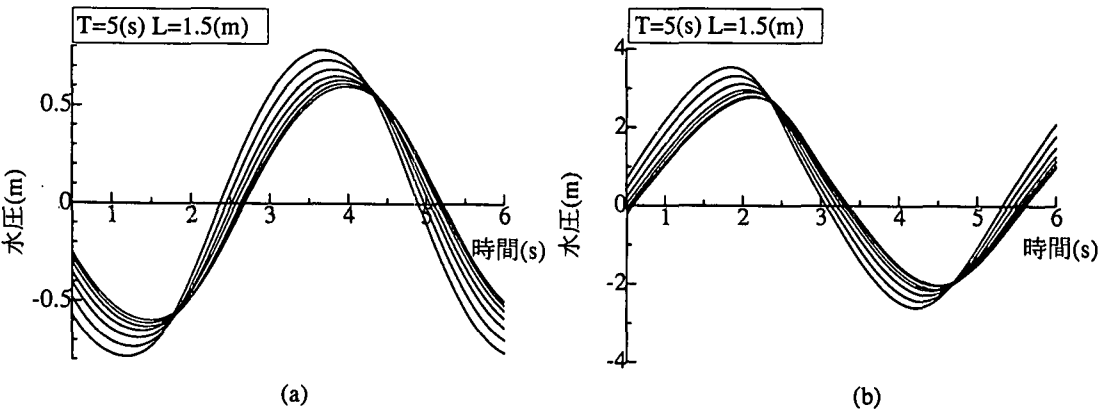


図-3 主流水圧と間隙水圧

1.2m、1.5m、1.8mごとに実測値と理論値を示す。図中の理論値は善ら（1987）の理論による計算結果である。周期が同じ場合には理論値は変動水压振幅によらない。理論計算の際に必要なパラメータは伝達係数 α と圧密係数 C であるが、液状化が発生しない $H=1.2\text{m}$ の場合の間隙水压の実験結果によく一致するように α と C を求めた。 α と C は、図-4（a）、図-5（a）では各層厚ともに $\alpha=1.15$ 、 $C=0.35$ である。図-4（a）から、圧力振幅比 P_m/P_0 の深度分布を見ると、深さ方向に圧力振幅比が減少し、砂地盤の層厚が大きくなるほど圧力振幅比が小さくなる特性が実験と善らの理論でよく一致することが確かめられる。一方、図-5（a）から位相遅れ $\Delta T/T$ も深さ方向に位相遅れが増大し、層厚が大きいくほど大きくなる特性が実験と理論でよく一致することが確かめられる。つまり、層厚が大きいくほど間隙水压の伝達特性に大きく影響することがわかる。図-4（a）、図-5（a）で、 $\alpha=1.15$ の場合に実測値と理論値の一致が確かめられたので、 α の異なる他の条件についても同様に示すと、図-4（b）、図-5（b）は $\alpha=1.2$ 、 $C=0.35$ 、図-4（c）、図-5（c）は $\alpha=1.25$ 、 $C=0.35$ 、図-4（d）、図-5（d）は $\alpha=1.3$ 、 $C=0.35$ となる。これらの図から伝達係数 α を変化させても、同様に圧力振幅比は深さ方向に減少し、砂地盤の層厚が大きくなるほど小さくなること、一方位相遅れも深さ方向に位相遅れが増大し、層厚が大きいくほど大きくなることが実験と理論で良く一致することがわかる。

実験値と理論値が良く一致することがわかったので、より層厚の効果を見るために図-6（ $\alpha=1.2$ 、 $C=0.35$ ）図-7（ $\alpha=2.0$ 、 $C=0.35$ ）に計算結果を示す。図-6（a）（b）と図-7（a）（b）を対応する層厚で比較すると、層厚が大きいくほど圧力振幅比 P_m/P_0 は大きく減少するが、位相遅れ $\Delta T/T$ は $L=2.0\text{m}$ で最大となりそれ以上あるいはそれ以下の層厚では小さくなることがわかる。位相遅れ $\Delta T/T$ は、 L が 2m 以上の場合は深さ 2m 付近で最大値をとることもわかる。また、 α が大きいくほど圧力振幅比 P_m/P_0 が大きく減少し、位相遅れ $\Delta T/T$

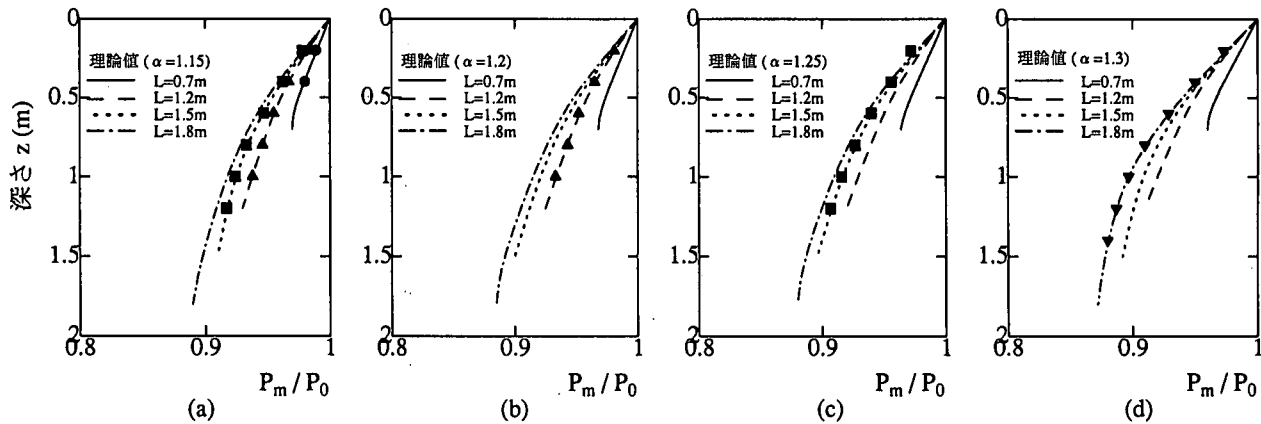


図-4 圧力振幅比の深さ分布

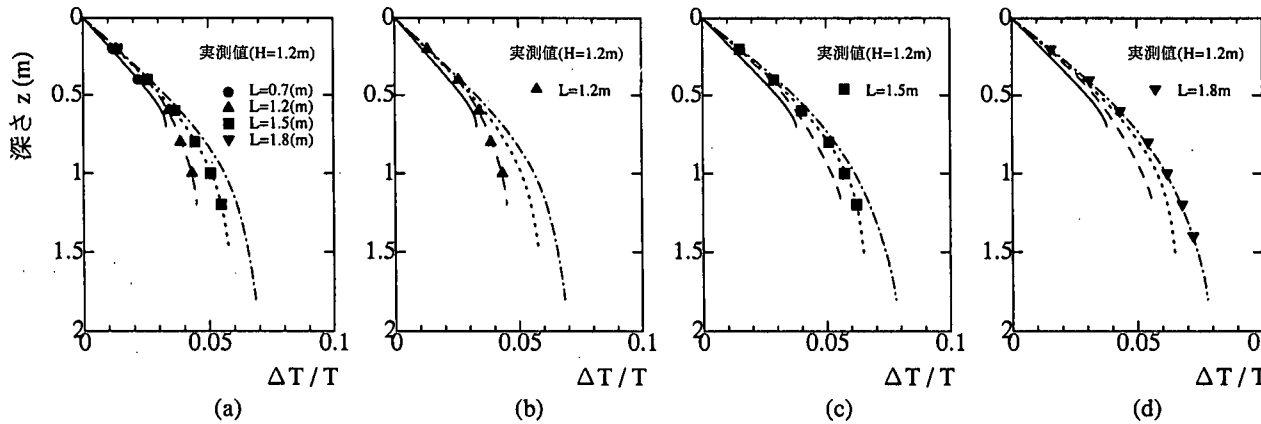


図-5 位相遅れの深さ分布

Tが増大することがわかる。さらに α の効果をより見るため、図-8 (a) (b) で層厚 $L = 2.0\text{m}$ の場合の理論値を伝達係数 $\alpha = 1.1, 1.2, 1.4, 2.0$ ごとに調べた。この図より、 α が大きくなるほど圧力振幅比 P_m/P_0 が減少し、位相遅れ $\Delta T/T$ が増大することがわかる。

図-9 (a)、(b) に液状化が起る場合の圧力振幅比 P_m/P_0 、位相遅れ $\Delta T/T$ の深さ方向分布を各層厚ごとに示す。この図から、この場合には z の増加に伴う P_m/P_0 の減少と $\Delta T/T$ の増大の傾向が理論値よりも少し小さくなっていることがわかる。つまり、この条件では砂地盤に液状化が発生し、その影響により間隙水圧の伝達性が良くなったためと考えられる。

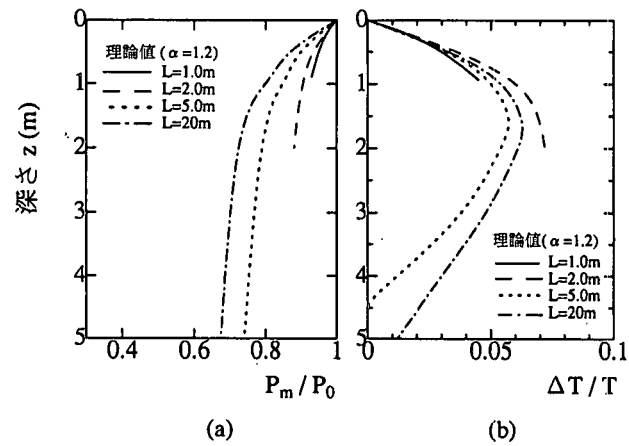


図-6 圧力振幅比と位相遅れの深さ分布（層厚の効果）

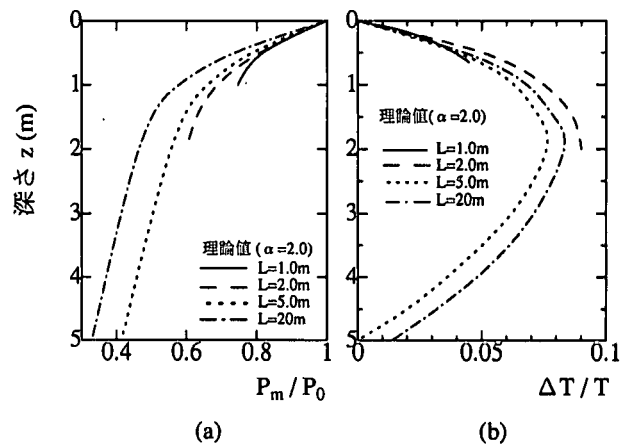


図-7 圧力振幅比と位相遅れの深さ分布（層厚の効果）

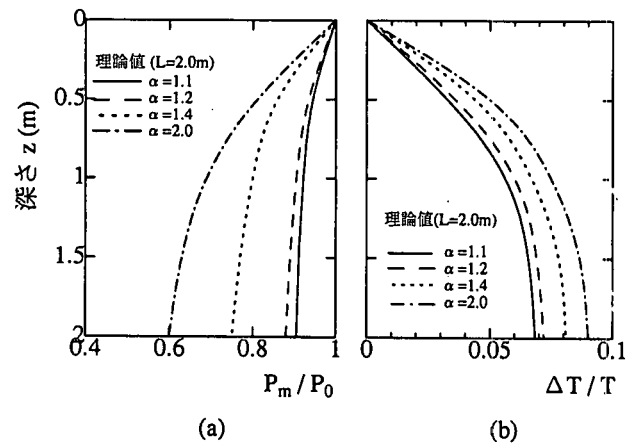


図-8 圧力振幅比と位相遅れの深さ分布（ α の効果）

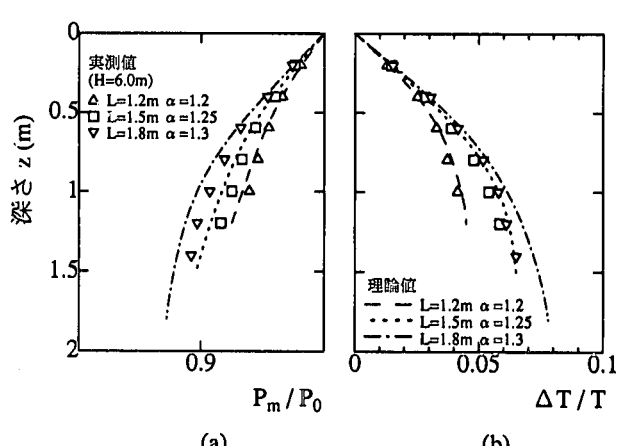


図-9 圧力振幅比と位相遅れの深さ分布（液状化時）

3. 3 過剰間隙水圧分布

図-10 (a) (b) に、波高 $H=1.2\text{m}$ の場合の過剰間隙水圧分布の実測値（図中の点）と善ら（1987）の方法による理論値（図中の線）の例、図-11 (a) (b) に、 $H=6.0\text{m}$ の場合の過剰間隙水圧分布の例を示す。位相は変動水圧が負から正になる位相をゼロとした。図中には土圧 σ の分布も示してある。図-10 (a) 図-11 (a) は層厚 $L=0.7\text{m}$ 、図-10 (b) 図-11 (b) は $L=1.8\text{m}$ である。図-10 (a) (b)、図-11 (a) は、過剰間隙水圧は土圧よりも小さく地盤に液状化は発生しない条件である。この場合には、実測値と理論値はどの位相でもほぼ一致することがわかる。位相 $180^\circ \sim 270^\circ$ の地表面変動水圧がゼロから減少する位相で正の過剰間隙水圧が大きくなっていること、位相 $0^\circ \sim 90^\circ$ の地表面変動水圧がゼロから増加する位相で負の過剰間隙水圧が大きくなっていることがわかる。このケースの場合最大の過剰間隙水圧が発生するのは位相 225° である。また、これらの過剰間隙水

圧は深い層ほど、また層厚が大きいほど大きいこともわかった。

図-11 (b) をみると、土圧と過剰間隙水圧とを比較すると位相 $180^{\circ} \sim 270^{\circ}$ で過剰間隙水圧の方が大きくなっており、地盤に液状化が発生することが推定される。位相 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ は負の大きな過剰間隙水圧により地盤の高密度化が進む位相である。この高密度化が起こる位相 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ では実測値と理論値はほぼ一致しているが、液状化が発生する位相 225° 、 270° では理論値より実測値の方が小さくなっている。これは、液状化により間隙水圧の伝達特性がよくなったために発生したと考えられ、このことから位相 225° 270° では地盤に液状化が発生していることが確かめられる。この図より、位相 225° 、 270° で深さ 52cm まで液状化が発生していることがわかる。

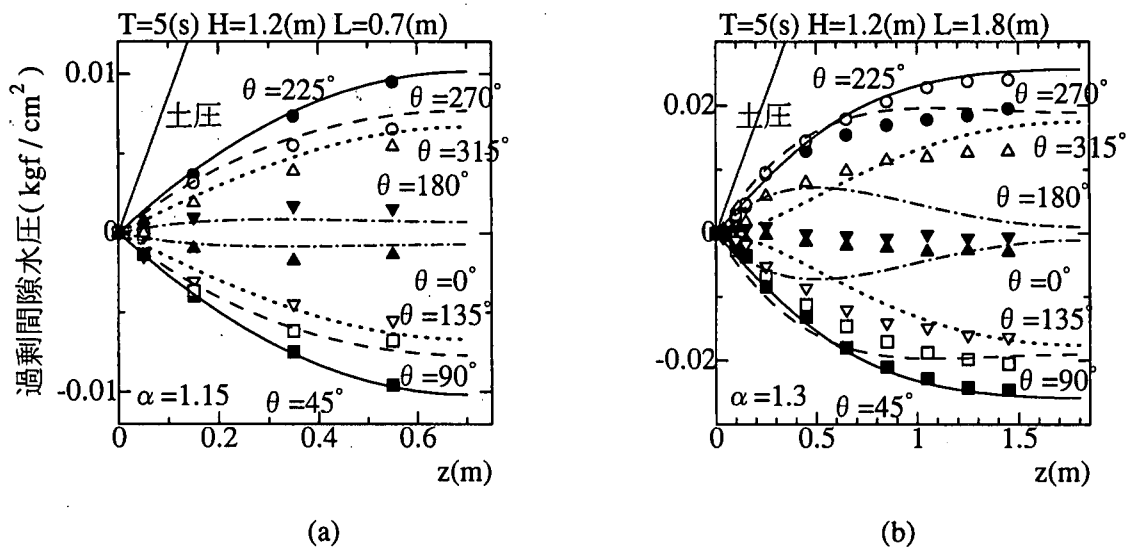


図-10 過剰間隙水圧分布 (H = 1.2 m)

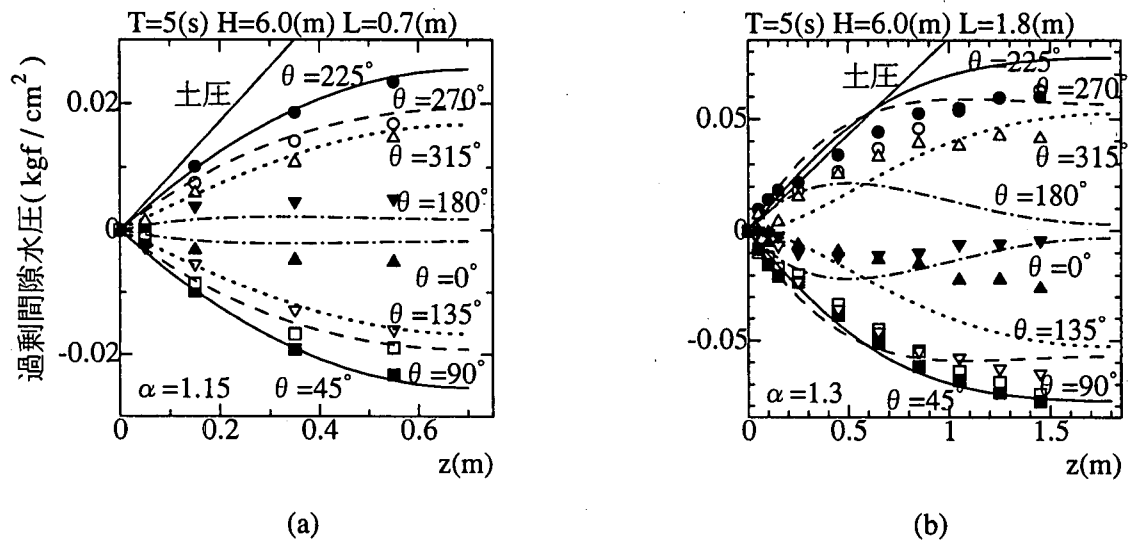


図-11 過剰間隙水圧分布 (H = 6.0 m)

3. 4 液状化領域

前述したように、土圧よりも過剰間隙水圧が大きい領域では砂地盤に液状化が起こっている。そこで、層厚の変化によりこの液状化領域がどのようになるかを、 $H = 6.0\text{ m}$ 、 $T = 5\text{ s}$ について実測値および理論値から調べた。図-12 に、液状化深さを実測値と理論値を示す。なお、理論では $\alpha = 1.15$ の場合には層厚 $L = 1.8\text{ m}$ 以下では液状化は発生しない。この図を見ると理論値による液状化深さは、層厚が大きいほど大きく、 α の値が大きいほど

大きくなることが定量的にわかる。実測値と理論値を比較すると、液状化深さが小さいときは両者は良く一致しているが、液状化深さが大きくなると（例えば $L=1.8\text{m}$ の実線と▼）実測値の方が小さくなることがわかる。この実測値が理論値に比べて小さくなる傾向は液状化深さ大きいほど大きいこともわかる。これは、液状化深さが大きい（液状化する位相も長い）と前述のように間隙水圧の伝達特性が良くなるためと考えられる。

4. 結論

本研究で得られた結果をまとめると以下の様である。

①圧力振幅比 P_m/P_0 は、深さ方向に減少し、砂地盤の層厚が大きくなるほど小さくなる特性が実験と善らの理論でよく一致すること、一方、位相遅れ $\Delta T/T$ は各層厚ごとの深さ方向特性が実験と理論でよく一致することが確かめられた。また、位相遅れ $\Delta T/T$ は、層厚 2m の場合が最も大きく、層厚が 2m より減少あるいは増加すると位相遅れは減少することがわかった。また、層厚が 2m 以上の場合位相遅れは深さ 2m 付近で最大値になることもわかった。

②液状化が発生する条件では、高密度化が起こる位相 $0^\circ \sim 90^\circ$ では善ら（1987）の理論と負の過剰間隙水圧はほぼ一致するが、液状化が発生する位相 225° 、 270° では過剰間隙水圧は実験値の方が小さくなることが確かめられた。

③液状化領域は、理論値より層厚が大きい程、 α が大きい程大きくなることがわかった。また、実測値は液状化領域が小さい場合は理論値とよく一致するが、液状化領域が大きくなるとともに実測値の方が理論値より小さくなることがわかった。

参考文献

- 1) 例えば、名合宏之（1982）：砂層内間隙水圧変動と液状化、水工学シリーズ82-A-9
- 2) 由比政年・矢富盟祥・石田啓・広部英一（1995）：海底地盤の波浪応答による間隙水圧の伝達特性に地盤の層厚が与える影響、土木学会第50回年次学術講演会、pp730-731
- 3) 善功企・山崎浩之・渡辺篤（1987）：海底地盤の波浪による液状化および高密度化、港湾技術研究所報告、第26巻、第4号、pp125-180

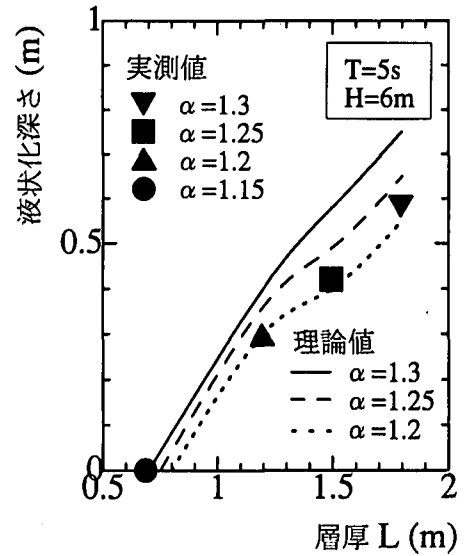


図-12 液状化領域