

波浪による砂地盤の沈下・硬化化と液状化

山下 俊彦*・南村 尚昭**・阿久津孝夫***・谷 野 賢 二****

1. はじめに

波浪により砂地盤は高密度化と低密度化を繰り返し、緩い砂地盤は徐々に沈下し締め固められる。Krausら(1994)は締め固められた海浜は波浪による侵食が少ないことを実験により明らかにしている。また、西ら(1996)は現地調査により砂浜の締め度度が砂丘、海浜の堆積・侵食と関係していることを報告している。一方、Hodginら(1992)は海亀の営巣に砂浜の締め度度が関係していること、阿久津ら(1996)は締め固められた海浜では、アサリが潜砂しにくいことため生息数が少ないことを現地調査より報告している。このように波浪による砂地盤の沈下・締め固めは、工学的、生物的両面から重要と考えられるが、系統的な研究はあまり行われていないのが現状である。

一方、波浪により砂地盤が液状化した場合は沈下が激しくなることが知られている(善ら, 1987)。

そこで本研究では、変動水圧型液状化試験装置を用いて、変動水圧による緩い砂地盤の沈下、硬化化、液状化特性を系統の実験により把握し、次に3者の相互関係を定量的に明らかにする。

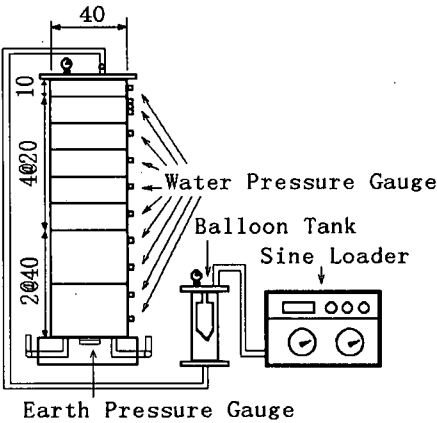
2. 実験装置及び方法

実験は、図一1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40 cm、高さ40 cmの円筒リングと20 cm、10 cmのリングを積み重ねて全高を2.0 mとしたものである。砂地盤は粒径 $d=0.15\text{ mm}$ の珪砂で間隙比0.85の緩い砂地盤である。砂地盤の全層厚は、 $L=0.7\text{ m}$ 、 1.2 m 、 1.5 m 、 1.8 m 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、各々の全層厚に作成した。地盤特性には、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。実験条件は表一1の通りであり全てのCaseで周期は $T=5\text{ s}$ である。また、いずれの場合にも平均水圧として10 mをかけている。ここで、 $H=1.2\text{ m}$ は砂地盤が液状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。間隙水圧の理論解析は、善ら(1987)の理論式を用いて行った。水中の水圧及び砂地盤中の間隙水圧については、図一1に示す11ヶ所でサンプリング間隔0.01秒で測定した。沈下量については、深さ10 cmもしくは20 cmごとに色づけした砂(マーカー)の位置

表一1 実験条件

Case	全層厚 $L(\text{m})$	全水圧振幅 $H(\text{m})$	伝達係数 α	圧密係数 $C(\text{cm}^2/\text{s})$
1	0.7	1.2	1.15	0.35
2	0.7	6	1.15	0.35
3	1.2	1.2	1.15	0.35
4	1.2	6	1.15	0.35
5	1.2	1.2	1.2	0.35
6	1.2	6	1.2	0.35
7	1.5	1.2	1.15	0.35
8	1.5	4	1.15	0.35
9	1.5	6	1.15	0.35
10	1.5	1.2	1.25	0.35
11	1.5	6	1.25	0.35
12	1.8	1.2	1.3	0.35
13	1.8	6	1.3	0.35



図一1 実験装置

* 正 会 員 工 博 北海道大学助教授 工学研究科環境資源工学専攻
** 学生会員 北海道大学大学院工学研究科
*** 北海道開発局
**** 正 会 員 工 博 北海道東海大学教授 工学部海洋開発工学科

を測定することにより求めた。表面の砂地盤の硬さは、コーンペネトルメーター（重量 800 g）を先端が地表面に接する位置から自由落下させ、その時の貫入量として求めた。上記の 3 項目の測定は 3000 波の変動水圧作用中 6 回計測した。

3. 実験結果及び考察

3.1 変動間隙水圧

図-2(a) (b) に圧力振幅比 P_m/P_0 (= 間隙水圧振幅/地表面水圧振幅) と位相遅れ $\Delta T/T$ (= 地表面水圧ピークと間隙水圧ピークの時間差/周期) の深さ方向分布を示す。深さ Z は地表面をゼロとし下向きを正とした。また、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圧振幅によらない。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 $H=1.2$ m の場合の間隙水圧の実験結果によく一致するように $\alpha=1.25$, $C=0.35$ とした。図を見ると、間隙水圧計の位置が深くなるほど圧力振幅比が小さくなり、位相遅れが大きくなっ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。また、 $H=1.2$ m の液状化が発生しない場合には、 Z の増加とともに P_m/P_0 が減少し、 $\Delta T/T$ が大きくなる実験値の特性が善らの理論とよく一致することが確かめられた。 $H=6.0$ m の液状化が発生する場合には、 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。これは、地盤に液状化が発生すると、その影響により間隙水圧の伝達特性が良くなったためと考えられる。

間隙水圧の伝達特性への全層厚の効果を見るために、図-3(a) (b) に非液状化地盤 ($\alpha=1.15$, $C=0.35$) の場合の圧力振幅比と位相遅れの深さ方向分布を各全層厚ごとに示す。図-3(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、砂地盤の全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-3(b) から位相遅れ $\Delta T/T$ も深さ方向に位相遅れが増大し、全層厚が大きいか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、全層厚が大きいかほど間隙水圧の伝達特性に大きく影響することがわかる。

3.2 過剰間隙水圧分布

図-4(a) (b) に、波高 $H=6.0$ 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-4 は全層厚 $L=1.5$ m である。図-4(a) は、 $\alpha=1.15$ で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大きいこともわかる。

図-4(b) をみると、土圧と過剰間隙水圧を比較すると位相 $180^\circ \sim 270^\circ$ 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

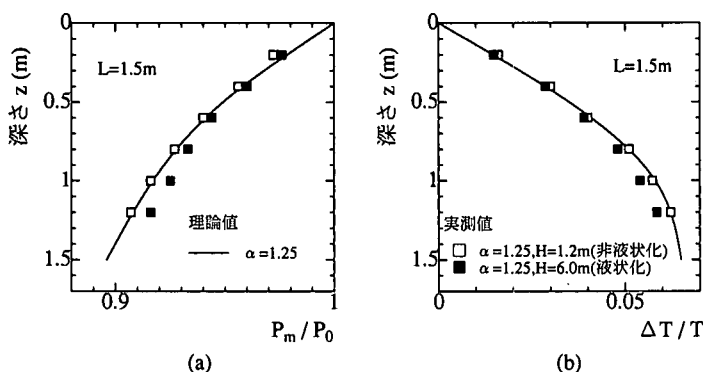


図-2 圧力振幅比と位相遅れの深さ分布（液状化の効果）

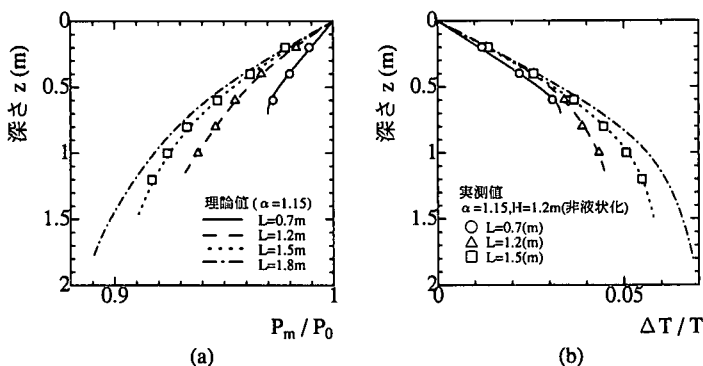


図-3 圧力振幅比と位相遅れの深さ分布（全層厚の効果）

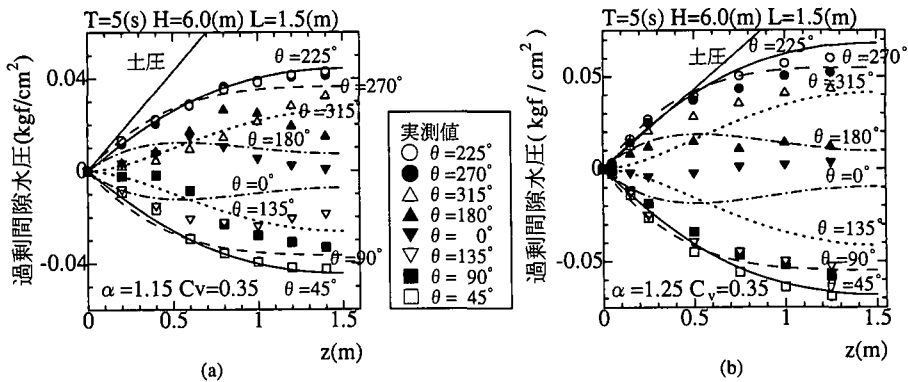


図-4 過剰間隙水圧の深さの分布

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り、この位相では実測値と理論値はほぼ一致している。しかし、液状化が発生する位相 $225^\circ, 270^\circ$ では理論値より実測値の方が小さくなっている。これは、前述の様に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 $225^\circ, 270^\circ$ では地盤に液状化が発生していることが推定される。この図より、位相 $225^\circ, 270^\circ$ で深さ 40 cm まで液状化が発生していることがわかる。

3.3 沈下特性

図-5 に、各全層厚について変動水圧を 3000 波作用させた場合の各深さでの沈下量の実験結果を示す。図中の矢印は過剰間隙水圧の実験値より求めた液状化深さを示す。まず、地盤に液状化が発生しない場合（白抜き記号）は、全層厚が大きい程表面の沈下量は大きくなるが、平均沈下率 $\Delta L/L$ （全層厚の減少量/全層厚）は全層厚にかかわらずほぼ同じになることがわかる。これは、 $\alpha=1.15$ と小さく図-3 からわかる様に各深さでの圧力振幅比が 0.9 以上であり、圧力の地盤への伝達が良いため各層で同程度の沈下が発生したためと考えられる。もう少し詳しく沈下率 $\Delta l/l$ （各層厚の減少量/各層厚）の深さ方向分布を見てみると、全層厚 $L=1.2$ m の場合は $Z \geq 40$ cm、 $L=1.5$ m の場合は $Z \geq 70$ cm（最下層を除く）で沈下率が少し小さくなっていることがわかる。これらの領域は、図-3 の位相遅れあるいは図-4 の過剰間隙水圧（例えば $\theta=225^\circ$ ）の深さ方向増加が小さくなる領域と一致していることもわかる。次に、液状化地盤（黒塗り記号）と非液状化地盤を比較すると、液状化領域（矢印より上）では、非液状化の場合よりも 2 倍程度沈下率が大きくなるがわかる。これは、地盤の液状化により沈下が促進されたためと考えられる。沈下率の増加領域と過剰間隙水圧から求めた液状化領域はよく一致しており、沈下率の深さ分布からも液状化領域を推定できることもわかる。また、矢印より下の非液状化領域では両地盤

で沈下率はよく一致していることがわかる。これは、図-2、図-4 の様に地盤表面にこの程度の厚さで液状化が発生してもより深い層への間隙水圧の伝達特性にはあまり影響しないためと考えられる。

図-6 に、非液状化地盤の場合と液状化地盤の場合の各全層厚ごとの平均沈下率の波数変化を示す。なお、液状化地盤については液状化領域のみの平均沈下率である。この図を見ると、今回の砂層厚 1.8 m までの実験の範囲では、平均沈下率は非液状化地盤も液状化地盤も全層厚によらないが液状化領域の方が約 2 倍大きくなっている。また、非液状化地盤と比較して液状化領域では 100 波程度までの平均沈下率の増加が大きく、地盤の液状化により沈下が促進され、沈下が早く完了に向かいその後の沈下率の増加が小さくなるがわかる。

図-7 に各全層厚ごとの波数 1000 波における平均沈

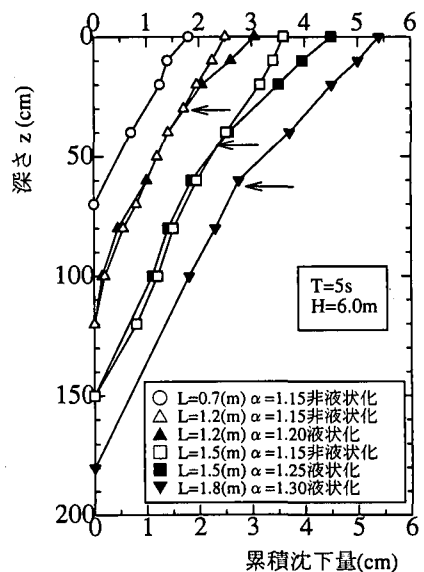


図-5 累積地下量の鉛直分布

下率と全水圧振幅 H との関係を示す。この図から、平均沈下率は非液化化地盤でも液化化地盤でも H が同じ地盤ではどの全層厚についてもほぼ同じ値になっているので、砂層厚1.8 mまでの範囲では平均沈下率は全層厚によらないことがわかる。また、非液化化地盤では平均沈下率は H にほぼ比例していることがわかる。また、前述のように液化化領域の平均沈下率は非液化化地盤の約2倍である。

3.4 間隙水圧の伝達特性への沈下の影響

間隙水圧の伝達特性への地盤の沈下の影響を見るために、図-8(a) (b)に圧力振幅比と位相遅れの波数変化の例を示す。この例は、地盤に液化化が発生し、波数3000波において地盤表面が4.5 cm沈下した場合である。図からみると、圧力振幅比も位相遅れも波数によらずほぼ一定であるので、沈下による間隙水圧の伝達特性への影響は極めて少ないことがわかる。この点に関しては、善ら(1987)、山下ら(1996)で指摘されており今回の実験でも同様のことが確かめられた。

3.5 液化化領域

図-9に、過剰間隙水圧分布の実測値と理論値からの液化化深さ(図-4参照)と砂地盤の沈下量からの液化化深さ(図-5参照)を示す。なお、理論では $\alpha=1.15$ の場合には層厚 $L=1.8$ m以下では液化化は発生しない。この図を見ると過剰間隙水圧の理論値による液化化深さは、全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。過剰間隙水圧の実測値と沈下量からの液化化深さは、ほぼ同じ値となることがわかる。また、実測値(過剰間隙水圧と沈下量)と理論値を比較すると、液化化深さが小さいときは両者は良く一致しているが、液化化深さが大きくなると(例えば $L=1.8$ 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化化深さが大きいほど大きいこともわかる。これは、液化化深さが大きい(液化化する位相も長い)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。

3.5 地盤硬さ

図-10に非液化化地盤と液化化地盤の場合の地盤表層の間隙比 e とコーンペネトルメーターの侵入深さの関係を示す。間隙比 e は地盤表層の沈下率から求めた。図から侵入深さは、液化化地盤と非液化化地盤での差はほとんどなく、間隙比 e のみで決定されることがわかる。すなわち、地盤は沈下(間隙比が減少)とともに侵入深

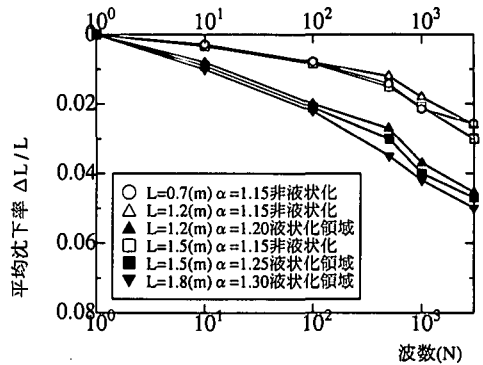


図-6 平均沈下率の波数変化

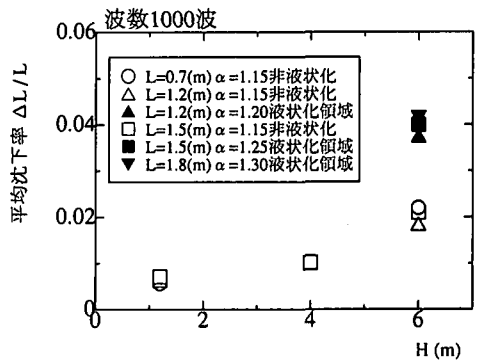
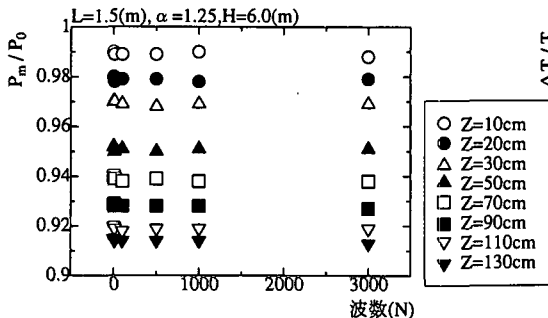
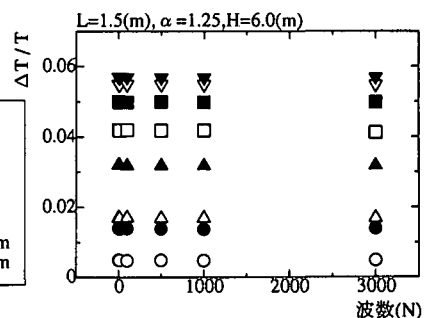


図-7 平均沈下率と全水圧振幅



(a)



(b)

図-8 圧力振幅比と位相遅れの波数変化

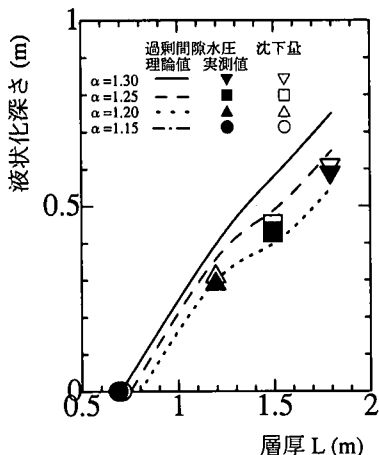


図-9 液状化領域

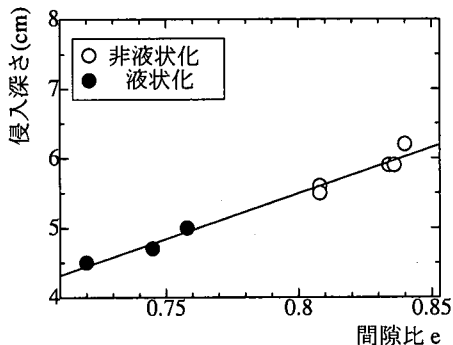


図-10 地盤硬さと間隙比

さが小さくなり、硬化化することを定量的に明らかにした。

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 変動水圧による砂地盤内の間隙水圧は、液状化が発生しない条件では善ら (1987) の理論とよく一致することが確かめられた。

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 $225^\circ, 270^\circ$ 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 砂地盤の沈下率は液状化領域の方が非液状化領域よりも2倍程度大きくなり、液状化により砂地盤の沈下が促進されることが定量的にわかった。

④ 非液状化地盤の平均沈下率は、砂層厚 1.8 m までの実験の範囲では、砂層厚によらずほぼ全水圧振幅に比例することがわかった。

⑤ 沈下による間隙水圧の伝達特性への影響は極めて少ないことが確かめられた。

⑥ 過剰間隙水圧の理論値からの液状化深さは、全層厚が大きい程、 α が大きい程大きくなることを定量的に示した。

⑥ 過剰間隙水圧の実測値と沈下量の実測値から求めた液状化深さは、ほぼ一致することがわかった。

⑧ 液状化深さの実測値 (過剰間隙水圧と沈下量) 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。

⑨ コーンペネトルメーターの侵入深さは、液状化地盤や非液状化地盤によらず間隙比 e のみで決定され、沈下 (間隙比が減少) に伴う地盤の硬化化を定量的に明らかにした。

参 考 文 献

- 阿久津孝夫・谷野賢二・明田定満 (1996): 寒冷地におけるアサリ漁場の底質環境について, 海洋開発論文集, Vol. 12, pp. 473-478.
- 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, 港研報告, 第 26 巻, 第 4 号, pp. 125-180.
- 西 隆一郎・大見真治・佐藤道郎・宇多高明・N. C. Kraus (1996): 海浜と砂丘の締まり度に関する研究, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 681-685.
- 山下俊彦・南村尚昭・伊藤慎一・谷野賢二・明田定満 (1996): 変動水圧下での潜砂性二枚貝の浮上機構, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 1076-1080.
- Derek A. Hodgins, Clifford Truitt and Jerris Foote, (1992): Beach compactness regulatory criteria for nesting sea turtles on the Southwest Florida SHoreline, Proc. of 5th Annual National Conference On Beach Preservation Association Technology, pp. 325-339.
- Kraus, N. C. and J. M. Smith, (1994): SUPERTANK laboratory data collection project, Technical Report CERC-94-3, US Army Corps of Engineers.