

変動水圧下での液状化地盤中の軽量球の浮上機構

山下 俊彦*・南村 尚昭**・新山 雅紀***
北原 繁志****・佐々木 秀郎*****

1. はじめに

開放性砂浜域にはウバガイ、ハマグリ等の潜砂性の二枚貝が生息し、重要な水産資源であり増殖技術の開発が求められている。二枚貝の資源量を減少させる重要な要因として波浪による貝の減耗が指摘されている（例えば渡辺, 1982）。山下ら（1994, 1995, 1997）の研究によると、潜砂性二枚貝の波浪による減耗の第 1 段階として潜砂している貝が波により水中に放出される過程があり、貝の潜砂速度より大きい速度の地形侵食が貝の潜砂している場所で起こると貝は水中に放出されることが明らかにされている。一方、波により砂地盤が液状化した場合にも比重の軽い二枚貝は浮力により水中に放出させられると考えられる。しかし、砂地盤の液状化に伴う軽量物の浮上過程については、善ら（1987）のピンポン球、山下ら（1996）のウバガイ死貝、ピンポン球を用いた研究以外ほとんど行わ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、貝の代わりに比重及び大きさの異なる球の液状化地盤中の浮上過程を系統的実験により明らかにする。次に、変動水圧下での砂地盤中の間隙水圧変動及び過剰間隙水圧変動を実験的・理論的に調べ、球の浮上機構を考察する。

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、後述の様に砂地盤中の空気量を制御するために恒温室で行った。試験用円筒部はアクリル製で直径 40 cm、高さ 40 cm、20 cm、10 cm の円筒リングを積み重ねて全高を 2.0 m としたものである。砂地盤の層厚 $L=1.5$ m で、粒径 $d=0.15$ mm の珪砂で間隙比 0.85 の緩い砂地盤を作成した。浮上実験の際の地盤条件は地盤内の空気量を制御することにより、常に伝達係数 $\alpha=1.25$ 、圧密係数 $C=0.35$ とした。変動水圧条件は、全振幅水頭 $H=1.5$ m

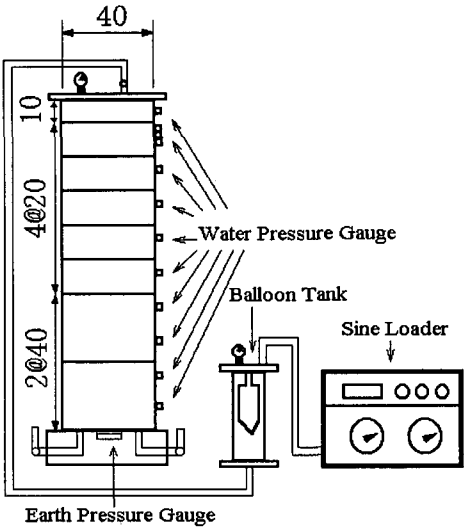


図-1 実験装置

と 6.0 m、周期 $T=5$ s で、平均水圧水頭 10 m をかけている。ここで、 $H=1.5$ m は砂地盤が液状化しない条件であり、砂地盤の特性を把握するためにすべての実験の最初に行った。 $H=6.0$ m は地盤に液状化が発生する条件で、この条件で球の浮上実験を行った。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。間隙水圧の理論解析は善ら（1987）の理論を用いて行った。浮上実験では、球の大きさと比重の効果を調べるため、比重 $S=1.1$ で直径 $R=0.65, 1.27, 2.55, 3.8$ cm と $R=3.8$ cm で $S=0.8, 1.4$ の 6 種類の軽量球を用いた。これらの球を種々の深さに埋め、 $H=6.0$ m の水圧変動を作用させ、液状化地盤中の球（球に付いた細い針金で位置を検出）の挙動を測定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 地盤内の空気量制御

地盤中の間隙水圧伝達及び液状化発生には、地盤内の微量な空気量が大きな影響を及ぼす。本実験では、まず恒温室で 5℃ の条件で、温度 5℃ の砂と水の入った砂容

* 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
** 正会員 工修 大林組(株)
*** 北海道大学大学院 工学研究科環境資源工学専攻
**** 正会員 北海道開発局開発土木研究所 水産土木研究室
***** 北海道開発局

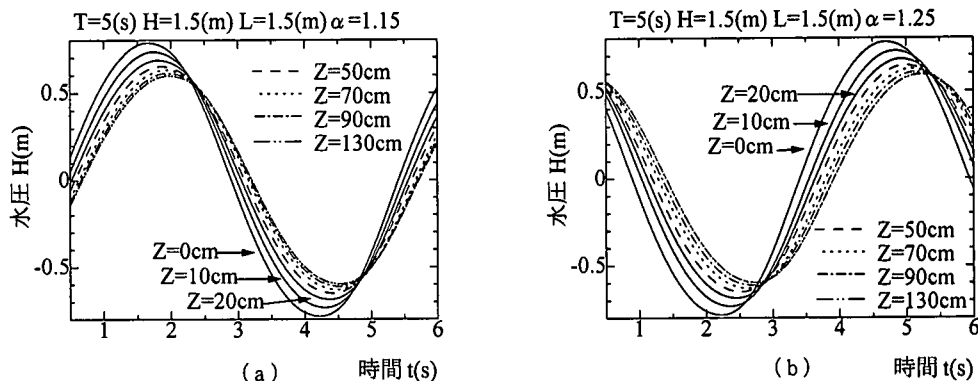


図-2 主流水圧と間隙水圧

器を実験容器よりも高い位置に設置し、直径 20 mm の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）で実験容器に水と砂を同時に入れて、層厚 $L=1.5$ m の砂地盤を作成する。このような方法により、ほぼ決まった特性（伝達係数 $\alpha=1.15$ 、間隙比 0.85）を持つ初期砂地盤（空気量の少ない砂地盤）を作成することが可能である。次に、室温を上昇させて地盤中の水温を 15°C に上昇させ、水中に溶解している空気を溶出（温度が高いほど水中の空気溶解量は少ない）することにより所定の特性を持つ地盤（ $\alpha=1.25$ ）を作成した。

図-2 に $H=1.5$ m で非液状化の場合の両地盤の地表面水圧 ($Z=0$) と間隙水圧の実測データを示す。図-2(a) が $\alpha=1.15$ 、図-2(b) が $\alpha=1.25$ である。 Z は地表面をゼロとし下向きを正とした。両条件とも Z が大きくなるほど圧力振幅が小さく、位相が遅れており、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、空気量の多い $\alpha=1.25$ の地盤の方が水圧の減衰と位相遅れが大きいことがわかる。

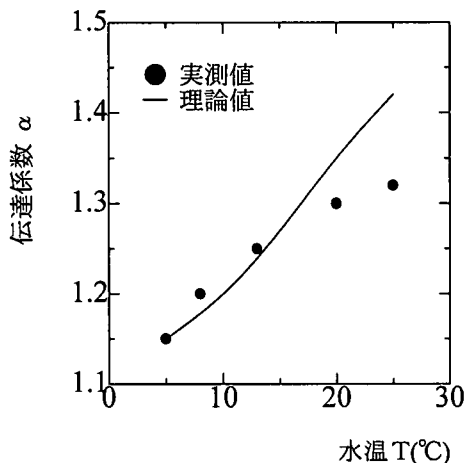


図-3 水温と伝達係数

図-3 は、初期地盤作成温度 5°C から温度を上昇させた場合の空気容出量より計算した伝達係数 α の理論値と実験値を比較したものである。水温変化が小さい 15°C までは実験値と理論値はよく一致し、水温が 20°C より高くなると実験値の方が少し α が小さくなるのがわかる。水温が高くなると空気容出量が増加し、個々の小さい気泡相互の合体が起こることが、実験値の α が小さくなる要因の 1 つと考えられるが正確な原因は現在のところ不明である。ただし、水温が高い場合にも実験値の理論値からのずれの割合は常に同じであり、このように恒温室で水温を制御することにより種々の地盤特性を持つ地盤の作成が可能である。

3.2 間隙水圧分布と過剰間隙水圧分布

図-4(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) の深さ方向分布の例を示す。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圧によらない。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 $H=1.5$ 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。 $H=1.5$ m の液状化が発生しない場合には、 Z の増加とともに圧力振幅比 P_m/P_0 が減少し、位相遅れ $\Delta T/T$ 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レ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。

図-5(a) (b) に各々 $H=1.5$ m と 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

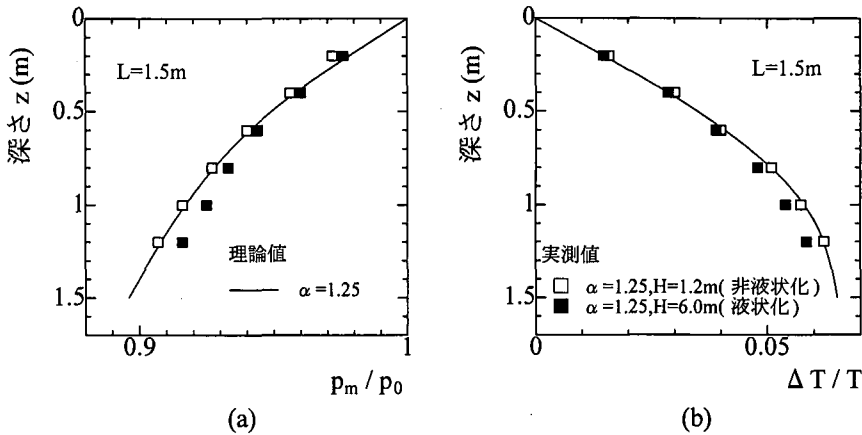


図-4 圧力振幅比と位相遅れ

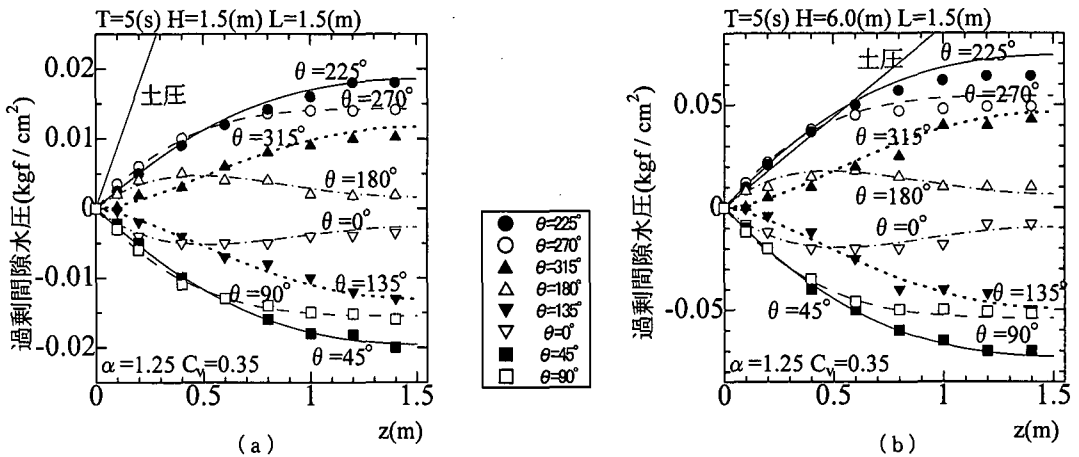


図-5 過剰間隙水圧分布の深度分布

示してある。図-5(a)は、 $H=1.5\text{ m}$ の場合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。このケースの場合の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-5(b)は、 $H=6.0\text{ m}$ の場合で過剰間隙水圧は位相 $225^\circ, 270^\circ$ で土圧より大きく、地盤に液状化が発生していることがわかる。この場合の液状化深さは約 60 cm である。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る。

3.3 球の浮上過程

図-6に、直径 R の効果を見るため、比重 $S=1.1$ で $R=3.8\text{ cm}, 2.55\text{ cm}, 1.27\text{ cm}, 0.65\text{ cm}$ の球の浮上過程、図-7に、比重 S の効果を見るため、直径 $R=3.8\text{ cm}$ で $S=0.8, 1.1, 1.4$ の球の浮上過程を示す。球の深さは球の下端を示す。両図より、各球には浮上限界深さがあることがわかる。例えば、図-6で $R=3.8\text{ cm}$ の球は、球の深さが 4 cm より浅い場合は浮上するが 6 cm より深い場合は浮上しないことがわかる。この場合の浮上限界深さは 4 cm から 6 cm の範囲にある。浮上限界深さは、直径 R が大きいほど、比重 S が小さいほど深いことがわかる。浮上する球は、最初浮上速さが遅く、水圧変動が 50 度程度作用するまで浮上速さが増加し、その後ほ

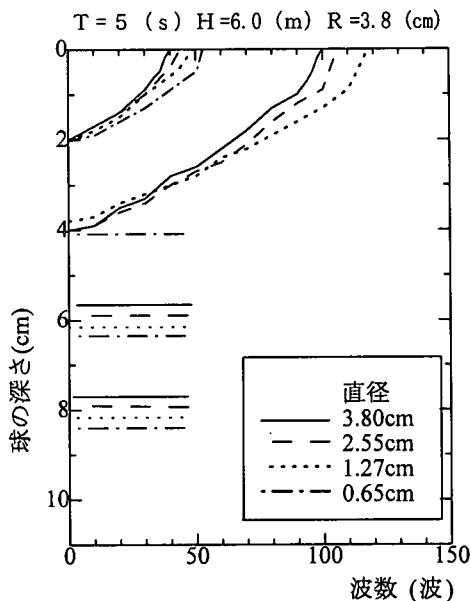


図-6 球の浮上過程 (Rの効果)

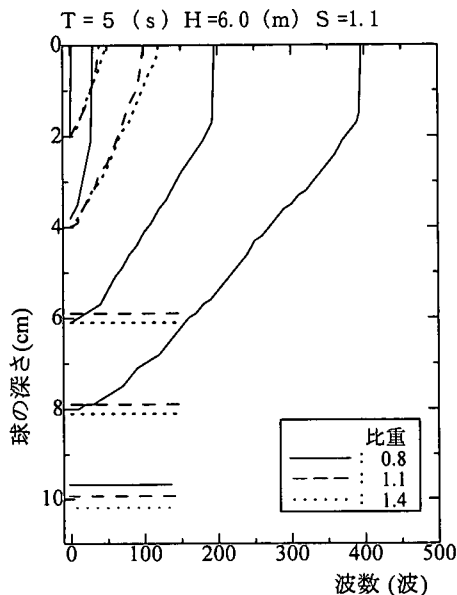


図-7 球の浮上過程 (Sの効果)

ば一定の速さで浮上し、ある深さに達すると急激に浮上する場合があることがわかる。同じ深さに埋められた浮上する球では、直径 R が大きいほど比重 S が小さいほど速いスピードで浮上することもわかる。また、同じ球でも深いところに埋められた球の方が浮上速度が遅いこともわかる。

3.4 浮上限界深さ

図-8に球の浮上に関する力の模式図を示す。球を

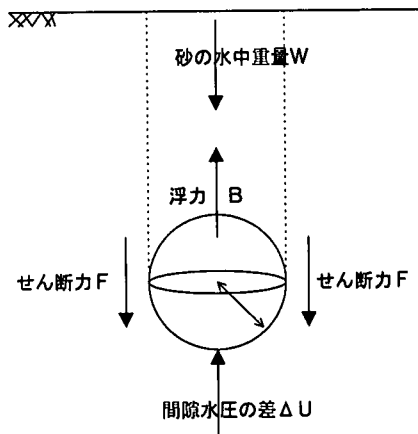


図-8 球の浮上に関する力

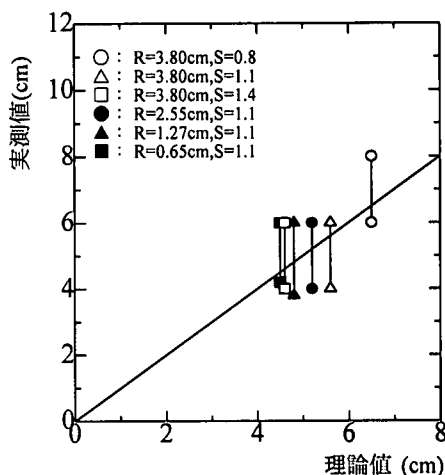


図-9 浮上限界深さ

浮上させる力は、球の浮力 B と間隙水圧を球の上下面で積分した時の力の差 ΔU である。一方、球の浮上に抵抗する力は、球の浮上に伴って排除しなければならない砂量(球の体積 V に比例)と球の位置での砂粒子のせん断応力(球の上にある砂の水中重量 W と球の投影面積 S の比 W/S に比例)の積と考える。浮上力と抵抗力の比 $\Psi_b = (B + \Delta U) / (K \cdot V \cdot W/S)$ を考える。ここに K は比例定数であり、実験値に最も良く合うように決定する。ここで問題となるのは物体周りの間隙水圧の見取りである。本研究では第一歩として、山下ら(1996)と同様、善ら(1987)の物体なし、液状化なしの場合の潜在的な間隙水圧が物体の上下面に作用するとして求めた。計算に用いた間隙水圧の位相は、液状化が発生する 225° と 270° である。

図-9は、 $K=130$ とした場合に $\Psi_b=1$ で求める浮上限界深さの理論値と実験値を比較したものである。この図より、 $K=130$ とすれば、 $\Psi_b=1$ で種々の球の浮上限界

深さを推定できることがわかる。

130) で推定できる。

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 恒温室で初期砂地盤を作成し、次に水温を上昇あるいは下降させ、水中の空気量を制御（増加あるいは減少）することにより、種々の特性を持つ砂地盤の作成が可能である。

② 変動水圧により液状化した砂地盤中の球の浮上過程には、浮上限界深さが存在し、それより浅い位置にある球は浮上力により表面まで浮上させられることがわかった。

③ 球は直径が大きく、比重が軽い程、変動水圧により、より深い位置の球まで浮上させられ、浮上速さも速いことがわかった。

④ 浮上限界深さは、浮上力と抵抗力の比 $\psi_0=1(K=$

参 考 文 献

- 善 功企・山崎浩之・渡辺 篤 (1987): 海底地盤の波浪による液状化及び高密度化, 港研報告, 第 26 巻, 第 4 号, pp. 125-180.
- 山下俊彦・松岡 学 (1994): 波浪による二枚貝の挙動と減耗に関する実験的研究, 海洋開発論文集, Vol. 10, pp. 119-122.
- 山下俊彦・和田 彰・松岡 学・谷野賢二・明田定満 (1995): 振動流場での二枚貝の挙動に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 506-510.
- 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.
- 山下俊彦・金子寛次・和田 彰・山本 明・北原繁志・谷野賢二 (1997): 砂澱形成時の地形侵食速度と潜砂性二枚貝の放出確率, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 701-705.
- 渡辺栄一 (1982): 波浪によるホッキ貝の減耗に関する実験的研究, 北海道開発局土木試験所月報, No. 351, pp. 3-15.