

波浪による底質の液状化に及ぼす浸透流の影響

中野 晋*・大村 史朗**・高橋 努**・三井 宏***

1. はじめに

海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会の報告(1994)にも述べられているように海底地盤の波浪による液状化現象やそれと漂砂現象との関連についての研究は近年活発に行われている。その中でも課題とされている底質の液状化と漂砂(特にシートフロー)との関連について検討することが本研究の目的の一つである。

シートフロー現象の発生のためには、大きなせん断力を作り出せる振動流発生装置が使われたり、比重の小さな底質(たとえば、プラスチック粒子など)が用いられることがあるが、本研究では上向きの浸透流(定常的な過剰間隙水圧)を与えて、実質的な水中重量を小さくする方法を用いた。この手法は現地でのブロックの沈下状況を再現するために高橋ら(1994a, 1994b)も用いており、その際、上向き浸透流が少しでもあると液状化が起こりやすくなることを指摘している。また、浸透流の存在は漂砂とは密接な関係があることは従来から知られており、浸透流の制御による漂砂制御工法は実用段階に達している。一方、底質内部応力変動の深部への伝播過程に及ぼす浸透流の影響については高橋らの研究などに限られており、あまり調べられていない。

そこで、本研究では新たに波動水槽の砂層内に上向き浸透流の発生装置を設置し、底質内部応力変動に及ぼす浸透流の影響について検討するとともに、砂層の液状化とシートフロー状漂砂の関係についても調べた。

2. 実験装置と方法

実験は、長さ27 m、幅0.8 m、高さ1.0 mの波動水槽の岸側より6 mの位置に長さ3 mの底質床部を設け、その下に図-1に示す浸透流発生装置を設置して実施した。図-2に示すように、底質床の中央の深さ2 cm, 10 cm, 20 cmに受感部直径が10 mmの土圧計及び間隙水圧計を、砂表面に底面圧測定用の土圧計を設置した。この浸透流発生装置は、ステンレス平織金網(網目0.1

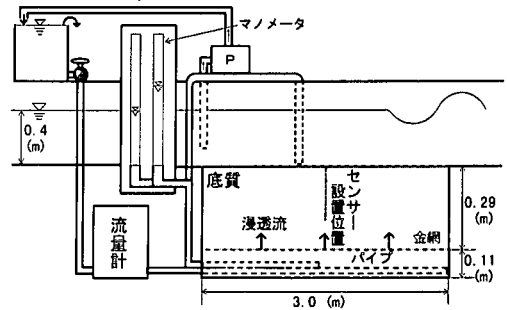


図-1 浸透流発生装置

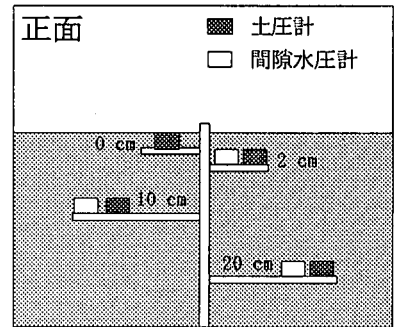


図-2 圧力センサーの設置状況

mm)で仕切った底質床下部の区画に水供給用のパイプ(内径16 mm)を通し、水槽上部に設置したタンクと水槽内の水位差を利用して底質内に上向き浸透流を起こそうとするものである。底質には軽量骨材(石川ライト6号、表乾比重 $G_s=2.08$, $d_{50}=0.14$ mm)を用いた。実験は水深を0.4 mとして、浸透流量を $Q=0\sim 210$ l/h(浸透流速 $0\sim 0.0243$ mm/s)、波浪条件を周期 $T=1.2$ と 1.4 s、波高 $H_w=5\sim 13$ cmと変化させ、計70ケースについて行った。なお、有効応力変動は同時記録された土圧変動から間隙水圧変動を差し引いて求めた。

3. 浸透流場での間隙水圧変動解析

3.1 基礎式

波浪下における底質内部の間隙水圧や応力の変動解析

* 正会員 工博 徳島大学助教授 工学部建設工学科
 ** 学生会員 徳島大学大学院 工学研究科博士前期課程
 *** 正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科

手法はこれまで数多く提案されており、海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会(1994)でも各手法の特徴が比較検討されている。ここでは境界条件の設定が容易で不規則波や定常浸透流場の解析にも適する方法であることを考慮して善ら(1987, 1989)が用いた間隙水圧変動に対する差分法を用いることとした。

善らによると間隙水圧変動 p_m に関する基礎式は

$$\frac{k_d}{\gamma_w m_v} \frac{\partial^2 p_m}{\partial z^2} = \alpha \frac{\partial p_m}{\partial t} - \frac{\partial p_b}{\partial t} \quad (1)$$

のようになる。ここで、 γ_w は水の単位体積重量、 m_v は底質骨格構造の圧縮率、 p_b は海底面の圧力変動、 α は

$$\alpha = 1 + n \frac{m_w}{m_v} \quad (2)$$

で、間隙率 n 、間隙流体の圧縮率 m_w の関数である。また m_w は間隙流体の飽和度 S_r の関数である。式(1)の各項を無次元化して

$$C \frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial \bar{z}^2} = \alpha \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{t}} - \frac{\partial \bar{p}_b}{\partial \bar{t}} \quad (3)$$

ここで、 $\bar{z} = z/h_2$ 、 $\bar{t} = t/T$ 、 $\bar{p} = p_m/p_0$ 、 $C = k_d T / \gamma_w m_v h_2^2$ 、 p_0 は底質厚さ、海底面の波圧振幅である。

3.2 境界条件

海底面 ($\bar{z}=0$) では

$$\bar{p} = \bar{p}_b \quad (4)$$

で、 $\bar{p}_b = \sin(\alpha t)$ とするか、波圧振幅で無次元化された実測波形が与えられる。本研究では正弦波形を与えて計算した。一方、底面の境界条件は、 $V = k_d i$ の一定流速で底面 ($\bar{z}=1$) から浸透流が供給されている場合には

$$\partial \bar{p} / \partial \bar{z} = (\gamma_w h_2 / p_0) i \quad (5)$$

として与えられる。一方、流量の出入りがない固定境界面では $\partial \bar{p} / \partial \bar{z} = 0$ として扱われるが、本実験では浸透流がない場合にも底部がステンレス金網をはさんで圧力管路に接続されているので、水の出入りがあるので厳密には $\partial \bar{p} / \partial \bar{z} = 0$ が成立しない。現段階で圧力管路内部の応答も考慮した解析は困難であるので、浸透流なしの場合には不透水面が存在する条件 $\partial \bar{p} / \partial \bar{z} = 0$ を適用した。

4. 実験結果と考察

4.1 諸パラメーターの決定

(1) 透水試験

波浪実験を行う前の予備実験として、砂層底部から上向き浸透流を生じさせ、浸透流速と動水勾配の関係について調べた。図-3によると $i < 0.5$ ではダルシー則に従い、 v と i は比例する。この勾配より透水係数 $k_d = 0.0075$ (cm/s) が得られる。この実験では i が $0.40 \sim 0.45$ 付近で部分的なパイピングが生じはじめ、 $i = 0.53$ で激しいパイピング状態に達した。この時の動水勾配を限界動水勾配 i_{cr} とすると

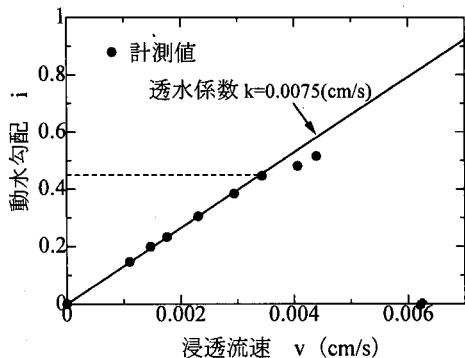


図-3 上向き浸透流試験

$$i_{cr} = (G_s - 1)(1 - n) \quad (6)$$

の関係から、間隙率が $n = 0.51$ と計算される。波浪実験時には砂層の変形運動や圧密により、透水係数や間隙率は徐々に減少することが予想され、この測定から得られた値と波浪実験時の値は必ずしも一致しないが、透水係数、間隙率はこの値を用いることにする。

(2) 未知パラメータの同定

式(3)の計算を行う上で、透水係数をはじめ、多くのパラメータの同定が必要である。前述の透水試験で得られた透水係数をそのまま用いることには疑問が残るが、波動場での変動間隙水圧の振幅減衰には間隙流体の圧縮係数に関係する飽和度が最も大きく影響するため、ここでは飽和度のみを $95 \sim 99\%$ の間で変化させて実験結果と比較した。構造骨格の圧縮係数は善らの研究を参考に $m_v = 1.0 \times 10^{-3}$ (cm²/kgf) の一定と仮定した。図-4がその結果であるが、 $S_r = 95\%$ の計算結果が最も実験値との一致が良い。しかし、善ら(1987)の実験では平均的に $S_r = 99\%$ 程度であり、これに比べるとかなり小さい値となっている。こうした違いは底部が圧力管路に接続しているため、砂層内と管路内の水圧変動が相互に干渉して圧力変動が小さくなることも原因の1つと考えられ

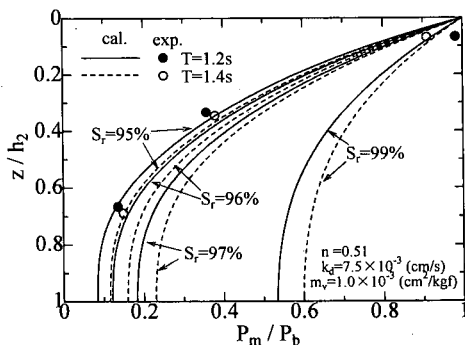


図-4 間隙水圧変動振幅の鉛直変化(浸透流なし)

る。

4.2 底質内部応力変動に及ぼす浸透流の影響

(1) 間隙水圧変動の伝播特性

図-5は間隙水圧変動振幅の深さ方向への減衰が浸透流の存在により、どの程度影響を受けるかを調べたものである。浸透流の大小を表す指標として底質の沈降速度($W_f=0.79\sim0.87$ cm/s)で無次元化した浸透流速 V を横軸にとった。図中の水平線は上から深さ2 cm, 10 cm, 20 cm に対する上向き浸透流作用時の間隙水圧変動振幅の計算値である。このように、式(3)~(5)を計算する限り、浸透流は間隙水圧変動振幅の減衰には寄与しない。式(5)の境界条件では、浸透流が無い場合に比べて、動水勾配に応じて各位置で平均間隙水圧の上昇は生じるが、変動分の振幅変化が無いことを示している。計算結果とは異なり、実験結果では底部に近いほど、浸透流速の増加に伴い、間隙水圧変動振幅は大きくなっており、深さ方向への振幅の減衰は小さくなっている。なお、同じ浸透流速ごとに4~5個のデータを重ねてプロットしているのは、各浸透流速ごとに波高を段階的に変化させているためである。また周期1.2 sの結果のみを示したが、周期1.4 sの結果もほぼ同様である。

図-6は間隙水圧変動の3秒間の時間波形を $S_r=95\%$ に対する計算値とともに示している。波高は13.3~13.8 cm、周期1.2 sとほぼ同一で、動水勾配 i が0, 0.387, 0.524と異なっている。この内、 $i=0.524$ のケースでは表面から約20 cmまでの砂層の波動運動が観察され、全体的な液状化に達したと判断された。

振幅の減衰特性は上述した通り、浸透流が大きくなるほど実測値が計算値より大きくなる傾向がはっきりと見受けられる。また実験での位相遅れは計算値に比べて小さく、特に $z=20$ cmでは逆に位相が進んでいるなど大きく食い違っている。液状化が生じたケースでは $z=2$ cmと10 cmで峰が通過した直後に間隙水圧が上昇する

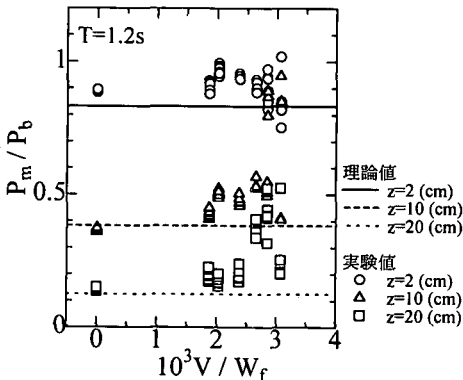


図-5 間隙水圧変動振幅の浸透流による変化

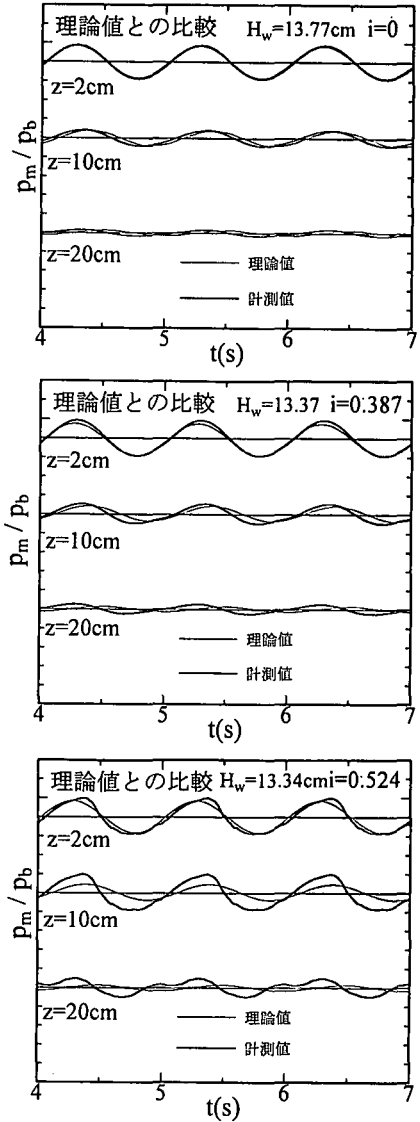


図-6 間隙水圧変動の時間波形

状況が見られるが、これは前野ら(1993)が指摘しているように上部の砂層が浮遊状態になったための圧力上昇と考えられる。一方、底部に近い $z=20$ cmの間隙水圧は大きな流体運動に起因する擾乱などにより波形の分裂が生じている。

図-7は間隙水圧変動の水面波に対する位相差を浸透流速に対して示したものである。位相差はどのデータも $\pm 40^\circ$ の範囲に収まるほど小さな値を示す。 $z=2$ cmでは浸透流の有無に関わらず位相差はほぼ0であるが、 $z=10$ cmと20 cmはいずれも浸透流速の増加に伴い、波に対する遅れが小さくなる状況が見られ、特に $z=20$ cmでは浸透流速が大きな場合に位相遅れが負になっている。計算結果は振幅減衰や位相変化の特性を表現できて

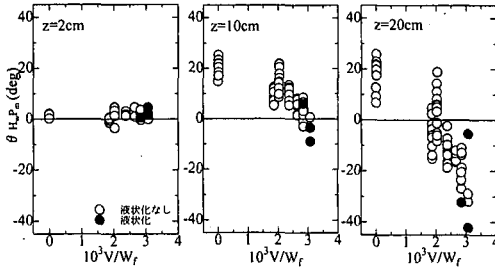


図-7 間隙水圧変動の水面波に対する位相遅れ

いない。特に上向き浸透流速が大きく1周期間で部分的液状化が生じるようになると、底質骨格構造の変形量が大きくなるため、間隙率や透水係数が変化することや圧力管路との相互干渉効果も大きくなるため、式(3)～(5)では表現できなくなるものと考えられる。従って、境界条件の取り扱いも含めてさらに検討する必要がある。

(2) 底質の液状化と内部応力変動

図-8と図-9は部分的及び全面的に液状化に達したケースの変動間隙水圧 p_m と有効応力 $(\gamma'z + p_e)$ の時間波形を示したものである。ここで、 γ' は水中における底質の見かけの単位体積重量、 p_e は有効応力変動である。特に液状化の進行を見るために第1波の到達直後の変化を示している。

図-8の場合、 $z=2\text{ cm}$ と 10 cm では波到達直後から、有効応力の極小値がほぼ0となっている。これに対して $z=20\text{ cm}$ では有効応力は常に正であり、液状化していないことが分かる。一方、図-9では $z=10\text{ cm}$ と 20 cm で有効応力が負となっており、砂層の骨格構造の変形が大きく、間隙率などの底質特性が初期状態から変化していることを示唆している。また液状化したと考えられる場

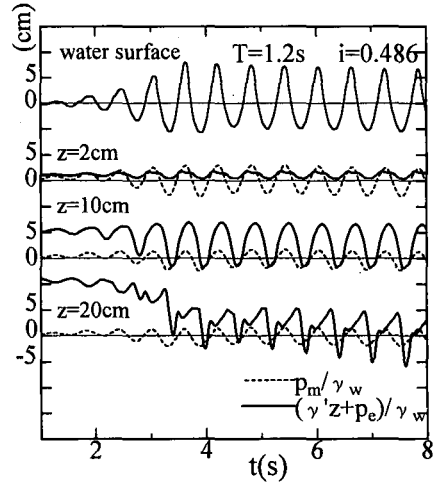


図-9 液状化発生時の応力変動波形

合には間隙水圧と有効応力の極小値がほぼ同時に波の谷位相で生じているのに対し、液状化に達していない位置ではその逆となっている。これは液状化時には水と砂の混合流体の運動が圧力発生の一因になるため、間隙水圧と有効応力がほぼ同位相になるのに対し、非液状化時には波の峰通過時の過剰間隙水圧の発生が有効応力の低下を誘起するため、逆位相になると考えられる。

(3) 液状化条件に及ぼす浸透流の影響

波浪による底質の液状化条件は Mei・Foda (1981) などにより、次式で与えられる。

$$\gamma'z + p_e \leq 0 \quad (7)$$

有効応力変動 p_e が正弦波で近似できる場合はこの最小値が $-P_e$ (ただし、 P_e は有効応力変動振幅) であるので

$$P_e/\gamma'z \geq 1 \quad (8)$$

となる場合には瞬間的にでも底質の一部が液状化することになる。

図-10に $z=2\text{ cm}$ での有効応力変動振幅比 $P_e/\gamma'z$ と Shields number ϕ との関係を示す。なお Shields number

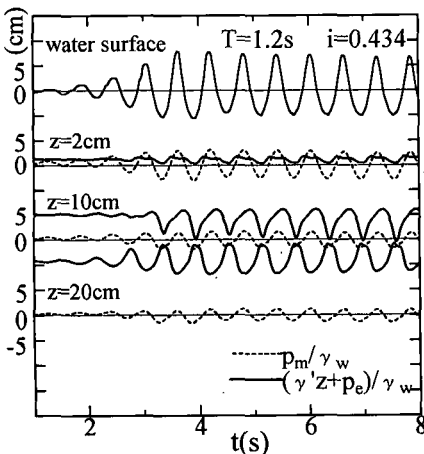


図-8 部分的液状化発生時の応力変動波形

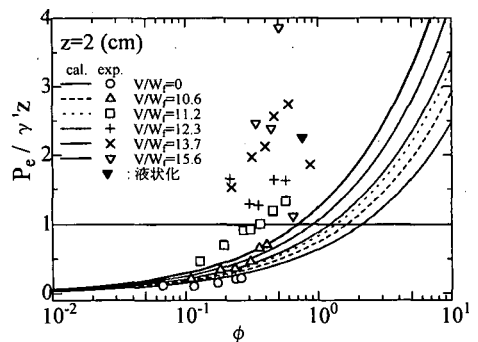


図-10 液状化条件に及ぼす浸透流の影響

ϕ を算定する際の摩擦係数を Swart (1976) の方法により求めた。また、この実験では浸透流に対応する動水勾配が浮力として作用するため、浸透流も考慮して見かけの単位体積重量 γ を、

$$\gamma = \gamma_s - \gamma_w(1+i) \dots\dots\dots (9)$$

のように補正している。浸透流がない場合に比べ、浸透流がある場合には理論値、実験値において有効応力振幅比 $P_e/\gamma z$ が 1 を越えるケースが多く液状化が発生しやすくなっていることがわかる。また、実験時に深さ約 20 cm まで液状化が観察されたケースは図に示した 1 ケースだけであるが、図-10 を見てもわかるように Shields number ϕ が 0.3 を越えた付近から有効応力振幅比 $P_e/\gamma z$ が 1 を越えるようになる。つまり、部分的にでも液状化が起きていると考えられるケースが増加している。

酒井ら (1995) は水圧変動と振動流共存場において漂砂形態に及ぼす地盤内間隙水圧変動の影響を調べる実験を行い、波圧振幅の増加が底質内部に付加的な揚力を生じさせるためにシートフローの発生が促進されることを明らかにしている。シートフローの発生限界については実験装置の規模や底質特性によって異なり、未だ明確にはなっていないが、小さな実験室規模では Shields number ϕ が 0.2~0.6 程度である。今回の実験結果によると部分的液状化が発生しはじめる ϕ の範囲と従来報告されているシートフローの発生限界とはほぼ一致しており、液状化現象とシートフロー現象とはほぼ同時に生じる現象であることがわかる。

5. おわりに

本研究では、底質内部に段階的に浸透流を発生させることにより、波浪場での底質内部の圧力変動に及ぼす浸透流の影響を調べた。その結果より、波浪による液状化とシートフローの関連についても言及した。本研究で得られた内容をまとめると次のようである。

1) 間隙水圧変動に及ぼす浸透流の影響

上向きの浸透流速が大きいほど、間隙水圧変動振幅の減衰は小さく、位相遅れも小さくなる。しかし、その伝

播特性は善の方法による差分解とはあまり一致せず、境界条件などをさらに検討する必要がある。

2) 液状化と内部応力変動波形

部分的な液状化が生じたケースでは $z=10$ cm までの深さで瞬間的に有効応力が 0 となる状況が把握できた。一方、全面的な液状化が生じる場合には砂層の変形が大きく、底質特性が変化することが示唆された。

3) 液状化条件に及ぼす浸透流の影響

浸透流を発生させた場合の有効応力変動振幅比 $P_e/\gamma z$ は、浸透流を発生させない場合に比べて大きく、浸透流が波浪による海底地盤の液状化を発生させやすくすることがわかった。部分的液状化とシートフロー現象の発生する領域はほぼ一致しており、両現象に密接な関係があることが示唆された。

参 考 文 献

- 海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会 (1994): 海岸波動, 第 V 編, 波浪と海底地盤の相互干渉, pp. 433-490.
- 酒井哲郎・後藤仁志・柏村真直・川崎順二 (1995): 波圧変動の海底床形態に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 486-490.
- 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, 港湾技研報告, Vol. 26, No. 4, pp. 125-180.
- 善 功企・山崎浩之・渡辺 篤 (1989): 海底地盤の波浪による液状化一現地観測および解析一, 港湾技研報告, Vol. 28, No. 3, pp. 29-57.
- 高橋重雄・下迫健一郎・山本 悟・三浦祐信 (1994a): 液状化した砂地盤の特性とそれらによる消波に関する基礎実験, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 611-615.
- 前野賀彦・唐内仁司・鈴木芳博・矢部興一 (1993): 波浪による海底地盤の液状化と底質浮遊の現地観測, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 576-580.
- Mei C. C. and M. A. Foda (1981): Wave-induced responses in a fluid-filled poro-elastic solid with a free surface-a boundary theory, Geophys. J. Res. Astro. Soc. Vol. 66, pp. 597-631.
- Swart, D. H. (1976): Coastal sediment transport, Computation of longshore transport, Delft Hydraulic Lab. Report, R968, Part 1.
- Takahashi, S, S. Yamamoto and H. Miura (1994b): Fundamental characteristics of a new wave absorbing system using sand liquefaction, Proc. ICCE, pp. 2698-2711.