

変動圧付加振動流場での間隙水圧と砂移動に関する実験的研究

Experimental Study on Pore Water Pressure and Sediment Transport by Oscillatory Flow with Pressure Change

山下俊彦*・伊藤慎一***・山本明***・南村尚昭***・黒木幹男*

Toshihiko Yamashita, Shinichi Ito, Akira Yamamoto, Takaaki Minamimura and Mikio Kuroki

Abstract

Pore water pressure and sand transport occurred by oscillatory flow with pressure change, oscillatory flow and pressure change are experimentally studied. The pressure propagations into sand beds by oscillatory flow with pressure change are better than by merely pressure change. The wave height of sand ripples generated by oscillatory flow with pressure change decreases with increase of pressure change.

keyword Pore Water Pressure, Sediment Transport, Oscillatory Flow, Pressure Change

1. はじめに

波による漂砂現象を取り扱う際に砂粒子に作用する外力としては、底面近傍の流れによるせん断応力の他に波の圧力変動が考えられる。従来から漂砂現象は主に前者に着目して研究されてきた。一方、後者の影響によって海底地盤内に過剰間隙水圧が発生し鉛直方向に圧力勾配が発生することが知られているが、これについては近年海底地盤の液化化等の地盤工学的な研究が活発に行われている（例えば名合（1982）、善ら（1987））。過剰間隙水圧の発生による地盤内の有効応力の低下は地盤表面で大きく影響が現れるため漂砂現象には何らかの影響を与え、一方で砂移動も間隙水圧に影響を及ぼすと考えられる。この様な観点からの研究としては、前野ら（1989）、酒井ら（1989）、鶴谷ら（1990）、山下ら（1993）、山下ら（1994）、酒井ら（1995）等がある。しかし、この過剰間隙水圧と漂砂現象を同時に考慮した研究はまだ限られており定量的把握は十分に行われていない。そこで本研究では変動圧付加振動流装置を用いて変動圧場、振動流場、変動圧付加振動流場について実験を行い、砂移動が間隙水圧の伝達に及ぼす影響と、変動圧が漂砂現象、特に砂漣形状に及ぼす影響を実験的に調べた。

2. 実験装置

実験装置の概略を図-1に示す。本装置は閉鎖型の振動流装置に圧力変動を付加させる装置を加えたもので、ピストン1により振動流を発生させ、ピストン2により圧力変動を発生させることができる。バルブ1、バルブ2を閉じてバルブ3を開くことによって振動流場を発生させ、バルブ1を閉じ、バルブ2を開き、バルブ3を閉じることによって変動圧付加振動流場を発生させることができる。後者の場合、ピストン2の振幅をゼロにすることで変動圧場を発生させることが

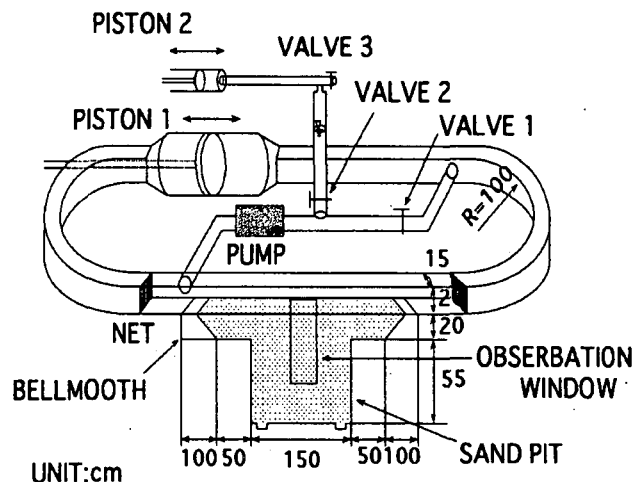


図-1 実験装置

* 正会員 北海道大学工学部 (060 札幌市北区北13条西8丁目)

** 正会員 新潟県

*** 学生員 北海道大学大学院

できる。なお本研究では行っていないが、バルブ1を開いてポンプを作動させることで一方向流付加振動流場を発生させることも可能である。ピストン1とピストン2は同一のモーターで駆動されており周期、両者の位相及びそれぞれのストロークが任意に設定可能である。波による底面の流速変動と圧力変動の位相は同じであるためにピストン1の位相をピストン2の位相よりも $1/2\pi$ 遅くすることによって海底地盤面に作用する波の外力を再現した。砂ピット部の中央部前面には透明アクリル板の観測窓があり砂粒子の移動状況等が観測できる。また観測窓の反対側には間隙水圧計が設置可能である。砂層の深さは70cmで本実験では図-2に示すように底質表面を原点として深さ方向に z 軸を取り $z = -15\text{cm}$ 、 2cm 、 12cm 、 28cm 、 38cm 、 58cm の6ヶ所に間隙水圧計を設置し水圧及び間隙水圧を測定した。使用した砂の粒径は 0.15mm 、比重は 2.65 である。

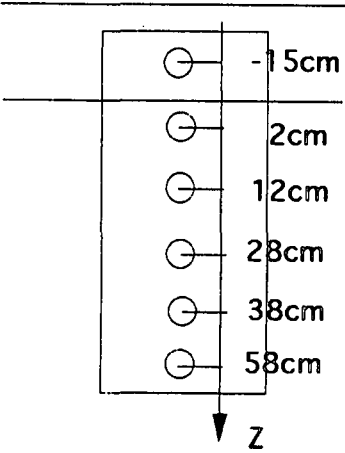


図-2 水圧計の位置

3. 間隙水圧伝達に及ぼす振動流の影響

3.1. 実験条件及び方法

実験条件を表-1に示す。実験ケースは合計で5ケースである。各ケースは周期と変動圧の振幅を一定にし、振動流の最大流速を変えて実験を行った。変動圧の振幅に若干のばらつきがあるのは実験装置内に残存する空気量が等しくないために同じピストンの振幅で作動させても同じ圧力変動が得られないためである。ここでは間隙水圧の伝達に振動流の有無がどのような影響を及ぼすか調べることを目的とするために、各ケースは圧力変動のみを作用させる変動圧場と圧力変動と振動流を同時に作用させる変動圧付加振動流場の実験を行った。地盤内への間隙水圧伝達特性は地盤内に存在する僅かな気泡の量で大きく変化することが指摘されている。そこで地盤内の気泡をできるだけ取り除き各ケースごとの条件を同じにするために実験の前に流水で実験地盤を攪拌した。よって、実験地盤は非常に緩い状態であると考えられる。また一つのケースでは変動圧場と変動圧付加振動流場の実験を周期、圧力振幅、最大流速を変えずに交互に7ステージ行った。これは、緩い地盤に繰り返し繰り返し載荷を加えた場合地盤骨格に変化が生じ、間隙水圧の伝達特性が変化することも考えられるため繰り返し同じ条件で実験することで地盤変化の傾向をふまえて変動圧場と振動流場の比較を行うためである。1ステージごとの実験時間は2分間である。流速は光ファイバーLDVを用いて観測窓から測定した。また同時にビデオを用いて底質粒子の移動状況を撮影した。

表-1 実験条件

Case	T(sec)	Pb(m)	um(cm/sec)
1	5	1.067	19.1
2	5	1.15	23.7
3	5	1.167	46.7
4	5	1.33	55.9
5	5	1.166	60.7

3.2. 実験結果及び考察

図-3にケース4の変動圧付加振動流場の主流水圧と間隙水圧の実測データを示す。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分かる。これより主流水圧が減衰と位相の遅れを伴って

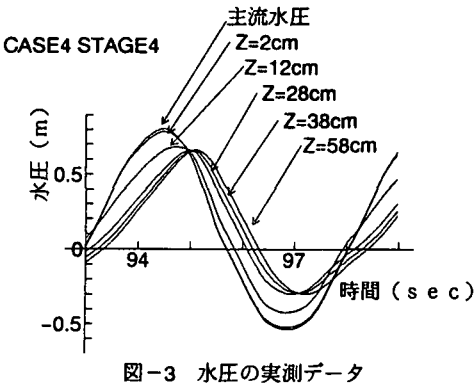


図-3 水圧の実測データ

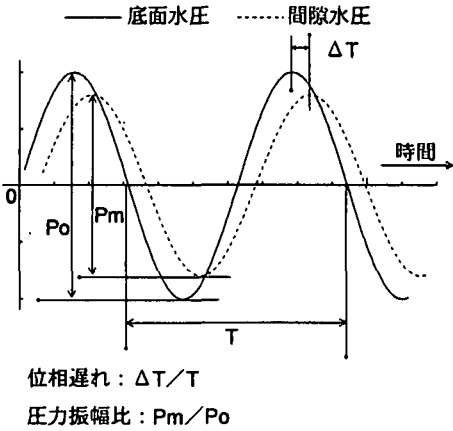


図-4 位相遅れと圧力振幅比の定義

地盤中に伝達する事が分かる。以後、本研究では間隙水圧の伝達特性を表す指標として位相遅れと圧力振幅比を用いる。二つの定義を図-4に示す。位相遅れは主流水圧がある深さまでに伝達するのに要した時間を周期で除すことで無次元化したものであり、圧力振幅比はある深さの間隙水圧の振幅を主流水圧の振幅で除して無次元化したものである。図-5, 6に一例としてケース3の変動圧場と変動圧付加振動流場の位相遅れと圧力振幅比を示す。ステージ1, 3, 5, 7は変動圧場での実験で2, 4, 6は変動圧付加振動流場の実験である。変動圧場と変動圧付加振動流場を比較すると変動圧付加振動流場の方が位相遅れが減少し圧力振幅比が増加する傾向が見られる。他のケースにおいても同様な結果が得られている。位相遅れが小さくなり圧力振幅比が大きくなると言うことは間隙水圧の波形が主流水圧に近づくことを意味し、圧力が地盤中に伝わり易くなるという事を表す。次に振動流の振幅の影響を調べるため、図-7に各ケースごとの変動圧場と変動圧付加振動流場の位相遅れの値を示す。ここでは各ケースで変動圧場よりも変動圧付加振動流場の方が位相遅れが小さくなり、振動流の振幅が大きいケースになる程その傾向が大きく表れている。図-8に同じく圧力振幅比の値を示す。変動圧場よりも変動圧付加振動流場の方が圧力振幅比が大きくなっており、位相遅れの時と同様に振動流の振幅が大きい程その傾向が大きく表れていることが分かる。これは振動流を加えることで地盤表面の砂粒子がせん断的な運動をするため透水係数等が変化し地盤中に圧力が伝わり易くなるためと考えられる。振動流の振幅が大きい程地盤表面の砂移動が激しくなるため地盤の特性の変化も大きくなりより圧力が伝わり易くなるものと思われる。実験中に底質粒子の移動状況を観察した結果からケース1, 2の流速の小さい条件の場合底質粒子はほとんど移動しておらず図-7, 8でもケース1, 2は変動圧場と変動圧付加振動流場の違いはあまり見られない。図-7, 8で深さ12cmと38cmでの振動流の影響を比較すると12cmの方が振動流の影響を大きく受けている。これは振動流が表面付近の底質粒子を動かすため、より浅い位置の方が影響を受けるためと考えられる。

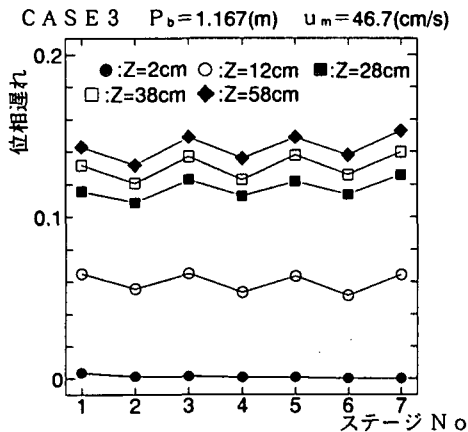


図-5 各ステージの位相遅れ

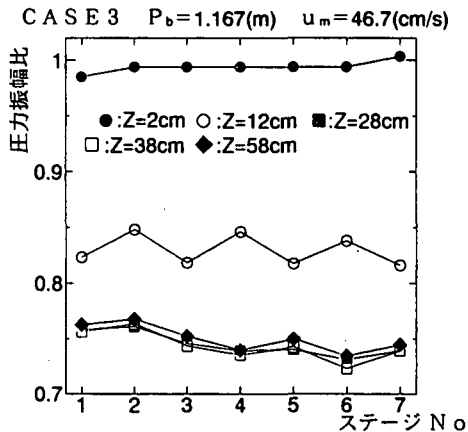


図-6 各ステージの圧力振幅比

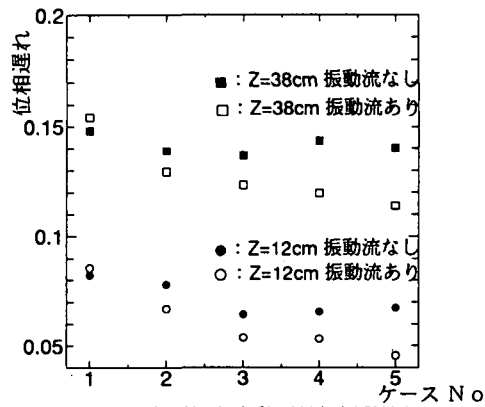


図-7 変動圧場と変動圧付加振動流場の位相遅れの比較

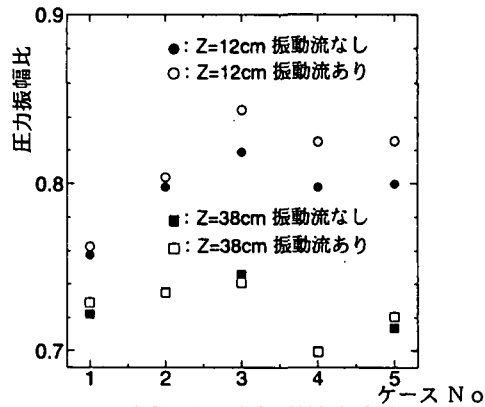


図-8 変動圧場と変動圧付加振動流場の圧力振幅比の比較

4. 砂移動への変動圧の影響

4.1. 実験方法及び条件

実験条件を表-2に示す。実験は全て同じ周期で2種類の振動流の振幅にそれぞれ変動圧の振幅を変えて合

計8ケース行われた。実験を始める前に実験中に繰り返し载荷の影響が現れるのを防ぐために約1時間変動圧を加えた。実験は同じ実験地盤に連続して各ケースの振動流及び変動圧を作用させ砂漣形状が安定した時点で砂漣の波長と波高を測定した。

4.2. 実験結果及び考察

図-9に変動圧による砂漣波高への影響を示す。変動圧の振幅が大きくなるに従って砂漣の波高が小さくなる傾向が見られる。この結果は山下ら (1994)、酒井ら (1995) と同様な結果である。また図-10に変動圧による砂漣波長への影響を示す。この図より、砂漣波長は変動圧振幅が大きくなるにつれて少し減少することが分かる。酒井ら (1995) は d_o/d (d_o : 水粒子移動振幅, d : 砂の粒径) が1500から2500の範囲で砂漣波長が変動圧振幅の増加につれて減少することを報告している。今回の実験では $d_o/d = 640$ と850であるが同じ傾向であることが分かる。地盤表面に作用する変動圧は圧力減衰と位相遅れを伴って地盤内に伝達するため過剰間隙水圧が発生する事で有効応力が減少し、砂粒子自体の結びつきは弱くなる。そのために砂漣の波形勾配が大きくなり、砂漣波高が変動圧振幅の増加とともに減少したと考えられる。変動圧を加える事によって砂漣形状が変化することから砂の移動量も変動圧の影響を受けている事が考えられる。変動圧を加える事で砂漣波高が小さくなるため砂の巻き上げ量は減少するが、振動流場では底質の表面のみが移動するのに対して変動圧付加振動流場では深い位置の底質粒子まで移動しているのが確認されている。このため変動圧の影響により砂の移動量が増加するか減少するかについては単純に議論できない。また変動圧付加振動流場の地盤内部の砂粒子は対称に移動しておらず変動圧が負となる位相の砂移動量が正となる位相に比べて大きくなっていることが確認され、変動圧の振幅が大きくなるほどその傾向が現れていた。変動圧が負となる位相付近では地盤内に発生する過剰間隙水圧が正の値をとり地盤の有効応力を減少させる。そのために振動流による水平方向の圧力勾配やせん断応力の影響を受け易く移動量も大きくなるものと思われる。一方、変動圧が正となる位相付近では過剰間隙水圧が負となって地盤の有効応力が大きくなり高密度化が発生するために移動量が小さくなると考えられる。この事は対称振動流であっても変動圧が加わる場合には正味の砂移動が生じることになる。しかし、今回は使用した底質粒子が0.15mmと小さいため砂移動の強さに関して定量的に論じる事はできなかった。

表-2 実験条件

	Pb(m)	um(cm/sec)	T(sec)
CASE1	0.6	30	2
CASE2	0.7	30	2
CASE3	1.1	30	2
CASE4	1.5	30	2
CASE5	0.6	40	2
CASE6	0.8	40	2
CASE7	1.3	40	2
CASE8	1.8	40	2

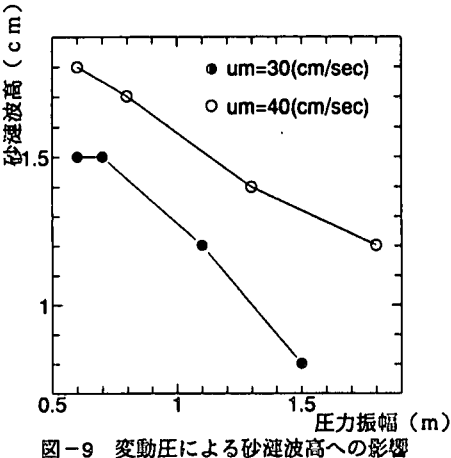


図-9 変動圧による砂漣波高への影響

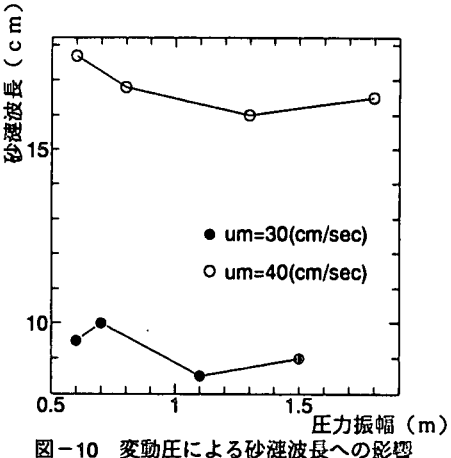


図-10 変動圧による砂漣波長への影響

5. 結論

間隙水圧の伝達特性に及ぼす振動流の影響と砂移動の特性に及ぼす変動圧の影響についての実験結果をまとめると以下ようになる。

- ① 変動圧場、変動圧付加振動流場とも変動圧は位相遅れと圧力減衰を伴って地盤内に伝達し、地盤下層になるに従って位相遅れも圧力減衰も大きくなることが分かった。
- ② 変動圧付加振動流場では変動圧場と比較して、間隙水圧の位相遅れが小さく圧力振幅の減衰も小さくなることが分かった。また、振動流の流速振幅が大きくなるほど変動圧場と変動圧付加振動流場の差が大きくなる

ことが分かった。

③ 振動流に変動圧を加えた場合、変動圧の振幅が大きくなるに従って砂漣波高は小さくなること、また、砂漣波長は少し小さくなることが分かった。

④ 振動流に変動圧を加えた場合に変動圧が負となる位相付近の砂の移動量に比べ、正となる位相付近の方が小さく、変動圧付加振動流場ではnetの砂移動が生じることが分かった。また、これは変動圧の振幅が大きい程その傾向が強く表れていることが分かった。

参考文献

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

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, 運輸省港湾技術研究所報告, 第26巻, 第4号, pp125~180

前野 賀彦・松岡 裕二・林田 洋明・間瀬 肇 (1989) : 砂漣形状と間隙圧発達特性との関係, 海岸工学論文集, 第36巻, pp789~793

酒井 哲郎・服部 明彦・間瀬 肇 (1989) : 波浪に対する砂浜地盤応答における海底摩擦の効果, 海岸工学論文集, 第36巻, pp794~798

鶴谷 広一・惟住 智昭 (1990) : 碎波帯における底質の流動化と浮遊について, 海岸工学論文集, 第37巻, pp289~293

山下 俊彦・染矢 武彦 (1993) : 変動圧付加振動流場での漂砂現象に関する実験的研究, 第12回混層流シンポジウム講演論文集, pp89~90

伊藤 慎一・染矢 武彦・山下 俊彦 (1994) : 変動圧付加振動流場での間隙水圧と漂砂現象に関する一実験, 土木学会第49回年次学術講演会概要集, 2-B, pp718~719

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, pp486~490