

海底面における排水条件の非一様性の地盤内間隙水圧分布 に与える影響

酒井哲郎*・後藤仁志**・森川 淳***

1. ま え が き

波圧変動を受ける砂質海底地盤上に設置された構造物の端部周辺地盤では洗掘現象が顕著となり、不等沈下、転倒などの構造物災害の誘因となっている。一般に、洗掘孔の発達過程は漂砂現象と構造物周辺の局所流（構造物の脚部に形成される馬蹄渦）との相互作用により規定されるが、洗掘孔の発生過程には漂砂現象に加えて地盤中の砂の吸い出し（いわゆる『噴砂現象』）の関与が無視できない。最近、外洋に面した沿岸域での開発が頻繁に行われるようになり、比較的水深の大きいところに防波堤や人工リーフなどの消波構造物が設置されるようになってきた。このような場合、特に荒天時の高波浪下では、波浪の伝搬に伴う水圧変化が有意となり、構造物周辺の地盤で噴砂現象が生じ易い状況となる。このような噴砂現象の重要性は、これまでにも、波圧変動を受ける構造物（ブロック）周辺地盤の挙動に関する観察および可視化実験を通じて指摘されてきた（例えば、名合ら、1991；名合ら、1993；酒井ら、1993）が、噴砂現象の駆動力となる波圧変動下の海底地盤内間隙水圧の時空間分布に関する計測にはあまり例がない。

本研究では、構造物が周辺地盤の間隙水圧分布にもたらす影響の支配要因として、構造物による海底地盤面の排水条件の非一様性に注目し、地盤表面の排水条件が排水から非排水に急変する点の周辺における地盤内間隙水圧の応答過程の実験的把握を通じて、噴砂現象の発生過程について考察する。

ところで、実際の構造物の周辺地盤について考える際には、3次元的な現象が無視できない場合もあるが、ここでは、構造物の端部周辺の局所的な地盤の挙動に着目し、鉛直2次元場を対象とする。また、名合ら（1993）が対象としたような長期間の波浪の繰り返しによる砂地盤の流動ではなく、一波内の位相別の間隙水圧の特性に着目して短時間の現象を詳細に検討する。従って、構造物の影響は不透水壁としてのみ考慮し、構造物の荷重が

地盤に与える影響や構造物自体の沈下が地盤に与える影響については取り扱わない。

2. 実験装置および実験条件

2.1 実験装置

本研究では、波圧変動を受ける海底地盤を模擬するため、シリンダー式の加減圧装置を取り付けた鋼製の砂層水槽（図-1参照）を用いて、地盤内間隙水圧の変動特性の計測を行った。実験装置は、鋼製の砂層水槽（幅30 cm、深さ90 cm、長さ140 cm）の両端に、プロペラと加減圧用シリンダーを取付けた閉管路を接続したもので、振動流と水圧変動を同時に発生させることができるが、今回は振動流を発生させず、圧力変動のみを生じさせて実験を行なった。計測部の幅は30 cm、砂層の深さは、60 cmである。また、砂層水槽の上面にはハッチがあり、砂の補給、地盤面の敷均し、不透水壁の移動などの作業が行なえる。加減圧はシリンダーを油圧制御することにより実現されるが、砂層水槽の側方に取付けられた圧力計により検出された作用圧力が専用のパーソナルコンピュータに送られてフィードバック制御が行なわれるので、任意の水圧変動波形を再現することが可能である。ここでは外力の変動波形を単純化して議論の焦点を明確なものとするため、正弦波型の圧力変動をあたえることとした。

地盤材料としては、中央粒径 $d=0.25$ mm の砂（株）林化成コニカル硅砂6号）を用い、砂層水槽の中央断面での地盤内間隙水圧を計測した。地盤表面には可動式の仕切り板（不透水壁）が設置されており、地盤面における排水・非排水の境界点を移動させることにより、砂層中央に固定された間隙水圧センサーにより排水条件の急変点周辺の地盤内間隙水圧が計測できる（図-2参照）。

間隙水圧の測定は、図-3に示すように金属板に取付けられた5個の間隙水圧センサーにより行われ、最上部のセンサーの中央を地盤表面に一致させると深さ10 cmまでの水圧測定が可能である。また、センサーを固定している金属板は側壁の溝に埋め込まれており、上下に移動可能であるが、今回の計測では、センサー取付け部を下方に移動させ、深さ24.5 cmにわたって計測を行なった。鉛直方向に配置された5個のセンサーによる測定を

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室

** 正会員 工博 京都大学助手 工学部土木工学教室

*** 学生会員 京都大学大学院 工学研究科土木工学専攻

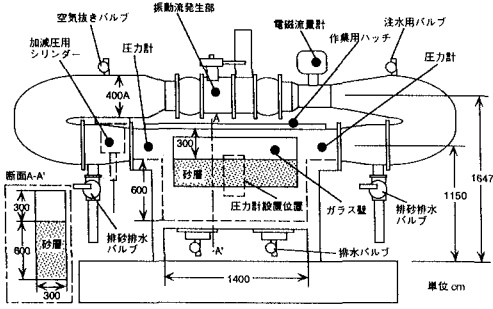


図-1 実験装置—同時加減圧振動流装置

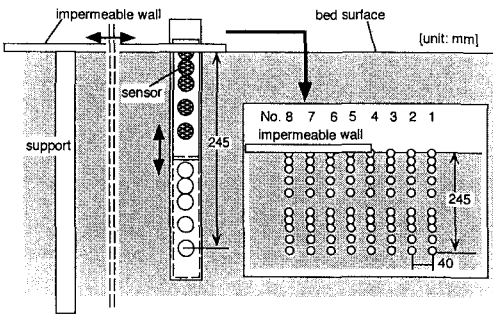


図-2 測点配置

合計 16 回実施して得られた 80 測点の計測結果を、シリンダー制御用の水圧センサーからの出力を基準に集計して間隙水圧の時空間分布が推定された。

2.2 実験条件

実験では地盤表面の透水性の急変(不透水から透水へ)だけを考慮するため、地盤は平坦とする必要がある。そこで、不透水壁の端部に洗掘孔が出現し始めたら一端実験を中止し、直ちに砂地盤を敷きならして地盤を平坦化する必要がある。一般に、圧力振幅が大きいほど噴砂現象も顕著となるが、洗掘孔の発達も顕著であり、平坦な地盤を保持したまま実験を継続するのに多大の困難を伴う。本研究ではこの点に鑑み、圧力全振幅 $\Delta p/\rho g = 0.5 \text{ m}$ の状態を対象に、表-1 に示す実験条件下での地盤内間隙水圧の時間変化の計測を行ったが、この条件でも不透水壁の端部での噴砂現象は明瞭に確認されている。

3. 地盤内間隙水圧の時空間分布

3.1 圧力振幅と位相差

図-4 は、計測された間隙水圧の時系列の一例を示したものであるが、測点が深くなるにつれて圧力振幅が減少し、位相差が増加している様子が分かる。変動波形については、若干のずれはあるものの、概ね正弦波で近似できると判断される。そこで、圧力振幅と位相差に関して断面ごとの深さ方向の分布特性をまとめたのが、図-1

表-1 実験条件

水圧変動の最大値 $P_{max}/\rho g \text{ (m)}$	2.2
水圧変動の最小値 $P_{min}/\rho g \text{ (m)}$	1.7
水圧変動周期 $T \text{ (s)}$	3.0

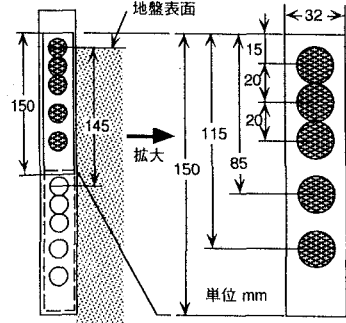


図-3 センサーの配置

5 および図-6 である。なお、圧力振幅については地盤表面の作用圧力の最大値で規格化した表示 A_R で示している。圧力振幅については断面ごとの差はそれほど顕著ではない。

一方、位相差については、 $15 < z < 25 \text{ cm}$ 程度の領域の分布特性に明確な相違が認められる。まず、透水・不透水境界点よりかなり外側(透水側の端に近いすなわち測点番号の小さい)断面では、位相差の深さ方向分布は、深さの増加とともに下に凸の曲線を描いて増加した後、変曲点を通して上に凸の曲線へと遷移し、位相差の増加率が鈍化する。これに対して、透水壁の内側の断面では、全領域で下に凸の曲線となり、深さの増加に伴う位相差の増加率の鈍化は認められない。

3.2 間隙水圧の時空間分布特性

前節では、圧力振幅と位相差の面から地盤表面の透水条件の急変が地盤内間隙水圧に及ぼす影響を検討したが、地盤の挙動に対する直接的影響を把握するには、各位相における間隙水圧の空間分布を知る必要がある。図-7 は、間隙水圧変動の時系列を集計して求めた位相別の間隙水圧の空間分布であり、等値線の値は、地盤面に作用する水圧の振幅で規格化された間隙水圧 p/p_{max} である。図中の L は計測点の最大深さを表す。また、図-8 は、圧力勾配 ($\text{grad } p$) の位相別変化を示しており、この図から間隙水圧分布が地盤に及ぼす力の大きさと向きを知ることができる。以下では、図-7 および図-8 を参照しながら、間隙水圧の空間分布の位相別変化について考察する。

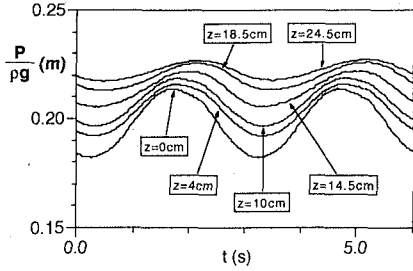


図-4 間隙水圧変動の時系列

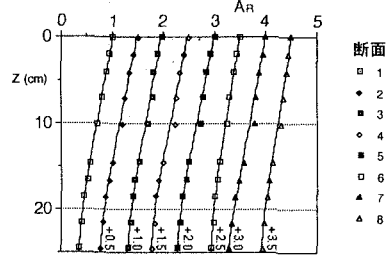


図-5 圧力振幅

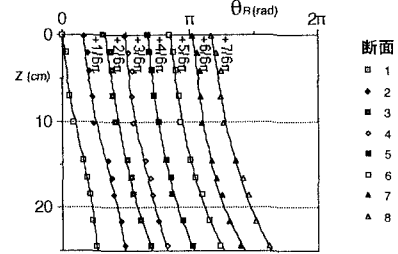


図-6 位相差

位相 $(1/5)\pi$ には、図-7で地表面へ近づくにつれての圧力増加(図-8ではベクトルが全て下向きの状態で、以下では、『順圧力勾配』と呼ぶ)が全領域で認められる。詳細に見ると非排水領域(地盤表面が不透水壁で覆われた領域)に残留する高圧部($p/p_{max}=0.8$ の等値線)が見られ、位相遅れが認められる。

次に、位相 $(2/5)\pi$ には、排水領域と非排水領域とでかなり異なった圧力分布を呈する。図-7によると、この位相での圧力の最大値は非排水側の比較的浅い領域($z/L=0.3$ 付近)に存在し、非排水側では地盤表面付近の僅かの領域を除いて概ね順圧力勾配となっている。一方、排水領域では $z/L=0.4$ 付近に尾根を有する山状の分布を呈し、地表面付近では地表面へ近づくにつれての圧力減少(以下では、『逆圧力勾配』と呼ぶ)が見られる。同様のことは、図-8のベクトルの向きが $z/L=0.4$ 付近を境に上下逆転していることから理解できる。この位相は、順圧力勾配から逆圧力勾配への移行期にあたり、排水領域では計測された深さの半分程度の深さまで既に逆圧力勾配に変化しているのに対して、間隙水圧の応答が遅れる非排水領域では、地盤表面近傍を除く大部分の領域で順圧力勾配が残留している。

さらに位相が進んで $(3/5)\pi$ には、全領域で逆圧力勾配となる。また、図-7によると、圧力の最小値は排水領域の地表面付近に存在し、排水領域の間隙水圧の応答が早いことが分かる。非排水領域の圧力の等値線は左上がりとなっており、非排水領域の地盤は全体として右上方向に押し上げられることとなる(図-8参照)。また等値線の間隔は、深さが増加するほど大きくなり、圧力勾配の絶対値が深さとともに減少する(図-8ではベクトルの長さが短くなり、矢印が小さくなる)ことが示されている。

次に、位相 $(4/5)\pi$ には、等値線の間隔がさらに密となり、圧力勾配の絶対値が位相 $(3/5)\pi$ に比べて増加しており、地盤を右上に押し上げる力も増加している。さらに、位相 $(5/5)\pi$ の場合には分布傾向は位相 $(4/5)\pi$ の場合と余り顕著な違いはないが、地盤表面と計測部最深部との圧力差は増大し、地盤が上向きに受ける力の絶対値も増

加している。

位相 $(6/5)\pi$ では、逆圧力勾配であるものの等値線の間隔が大きくなり、地盤を押し上げる力は低下している。この位相の等値線のパターンは位相 $(1/5)\pi$ と類似のものであるが、圧力の大小関係が正負逆転した分布となっている。このような関係は互いに位相が π だけずれた全ての間隙水分布間で成立している。

次に、位相 $(7/5)\pi$ では、位相 $(2/5)\pi$ とは逆に逆圧力勾配から順圧力勾配への移行期にあたり、圧力の最小値は非排水側の比較的浅い領域($z/L=0.3$ 付近)に存在し、非排水側では地盤表面近傍を除いて概ね逆圧力勾配となっている。これに対して、排水領域では $z/L=0.4$ 付近を谷とする分布を呈し、これより深いところでは逆圧力勾配、浅いところでは順圧力勾配となっている。位相 $(8/5)\pi$ では、全領域で順圧力勾配となり地盤は下向きに押されるが、特に非排水領域では左下に押し込む方向の力が作用している。さらに、位相の進行とともに圧力は増加し、位相 $(10/5)\pi$ でピークとなり、その後減少に転じる。

一連の間隙水圧分布の変化は、排水・非排水境界部の周辺での間隙水圧の応答遅れに起因する付加的な力の存在を示唆している。すなわち、地盤面作用水圧の減少期には非排水領域の地盤を排水領域に押し出す方向の力が生じ、地盤面作用水圧の増加期には排水領域の地盤を非排水領域に押し込む方向の力が生じる。したがって、排水・非排水境界部周辺の地盤は地盤面作用水圧の減少期には排水領域側に押し出され、地盤表面での鉛直方向の

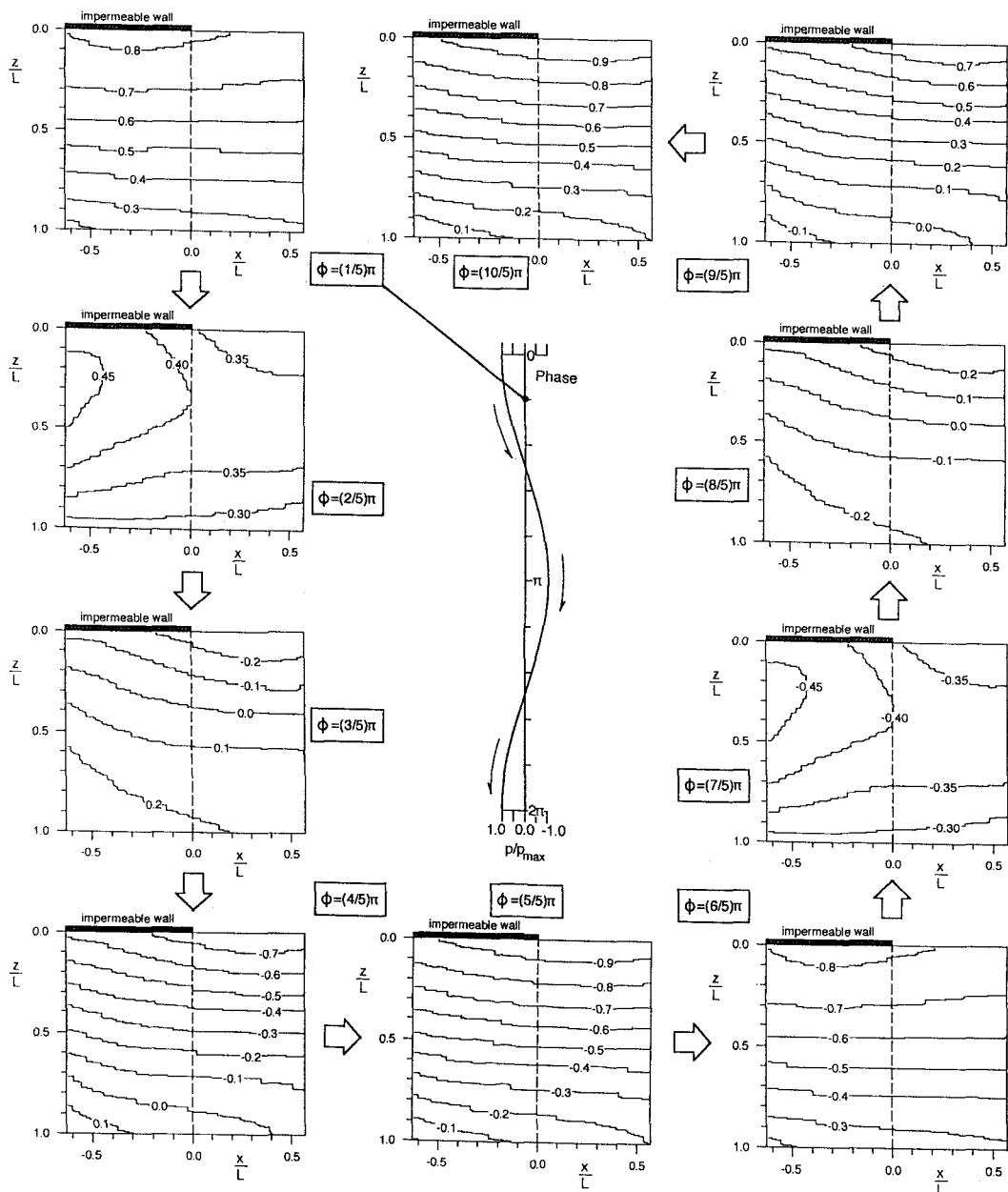


図-7 間隙水圧変動の時空間分布

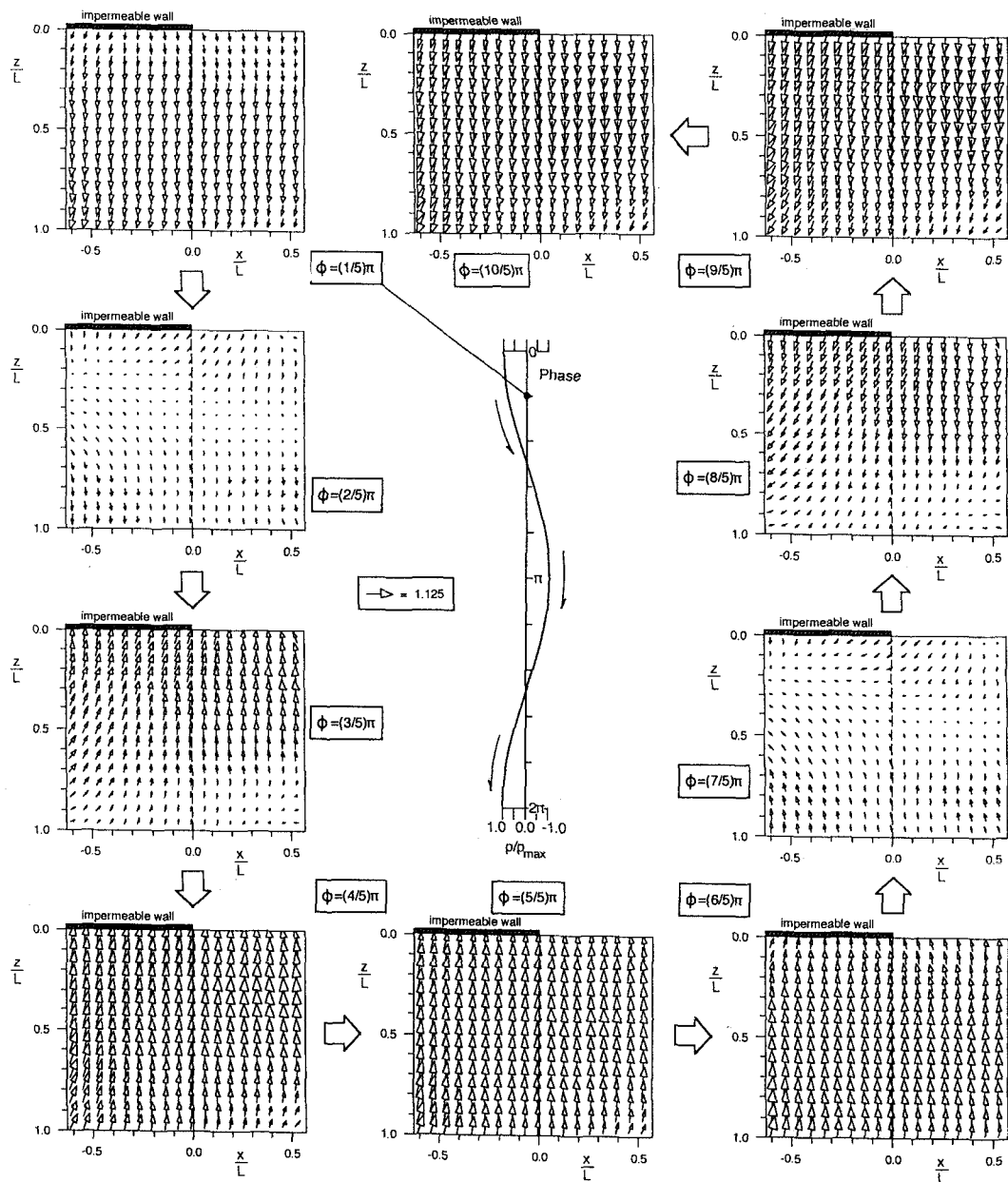
拘束がなくなる排水領域との接合部 ($x=0.0$ m) 付近での噴砂現象を誘発するものと推察される。

4. あとがき

本研究では、構造物周辺地盤における噴砂現象の発生機構について、地盤内間隙水圧の時空間分布の計測を通じて考察した。特に、構造物が地盤に及ぼす影響のうち地盤表面での排水条件の非一様性に注目し、地盤表面に

設置した不透水壁を移動させて、排水・非排水接合点周辺の地盤内間隙水圧を計測した。一連の位相別間隙水圧変動分布から、排水・非排水境界部周辺の地盤が地盤面作用水圧の減少期に排水領域側に押し出されて噴砂現象の発生が促されるというメカニズムが明らかとなった。

謝辞：本研究の遂行に当たり、京都大学大学院・柏村真直君、京都大学工学部4回生・永井秀樹君（現、東京大学大学院）の協力を得たことを付記して、謝意を表す



図一八 間隙水圧変動の勾配の時空間分布

る。

参考文献

酒井哲郎・後藤仁志・山本哲也・柏村真直 (1993): 水圧変動と振動流の同時作用下での砂地盤上のブロックの沈下, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 811-815.
 名合宏之・前野詩朗・佐々原秀史・西岡 操 (1991): 変動水圧

による構造物の沈下機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 826-830.
 名合宏之・前野詩朗・清水雄一 (1993): 変動水圧によるブロックの沈下にもなう周辺砂地盤の流動の可視化, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 516-520.