

変動水圧場における護岸裏込め土砂の流出機構に関する研究 Flow-out of a Back-filling Sand behind Revetment under Cyclic Loading of Water Pressure

名合宏之*・前野詩朗**・小谷裕司***・西平福宏****

By Hiroshi NAGO, Shiro MAENO, Yuji KOTANI and Fukuhiro NISHIHARA

The cavity behind bank protection occurs under stormy waves and flooding. In this study, we investigated the flow-out mechanism of back-filling sand under cyclic loading of water pressure experimentally and theoretically. As a result, it is clarified that cyclic seepage force which occurs around revetment under water pressure variation plays an important role to the movement of sand around revetment and also clarified by visualization technique that the sand around revetment moves like a circular arc. Furthermore, the effect of pressure distribution behind revetment and the effect of the porosity of bed on the flow-out phenomena are examined.

Keywords : liquefaction, pore pressure, back-filling sand, water pressure variation, visualization technique

1. まえがき

洪水時における河川構造物周辺の流れや、また冬期風浪時や台風時に海岸構造物に作用する波浪は、強度の水面変動を伴う状態にある。このような場においては、構造物周辺地盤上に絶えず変動水圧が作用するため、地盤内に過剰間隙水圧が発生し、地盤の有効応力が時間的に変化することにより、極端な場合には地盤が液状化することが明らかにされている^{1),2)}。このような変動水圧場に置かれる構造物の安定性を検討する場合には、構造物に直接作用する流体力のみならず、構造物周辺地盤の動的安定性をも考慮する必要があるとの観点から、名合ら^{3),4)}、善⁵⁾、間瀬ら⁶⁾、酒井ら⁷⁾によって、変動水圧場における地盤-構造物系の動的応答問題を取り扱った研究が盛んになされてきている。これらの研究により、防波堤の損壊や消波ブロックの沈下などの災害の発生機構が明らかにされつつあり、今後は、構造物周辺地盤の流動モデルを開発することにより、災害の発生予測あるいは災害防止策の確立を図る必要がある。

以上のようなことを考慮して、著者らは、これまで、変動水圧場において発生すると考えられる災害の発生形態の一つである護岸の裏込め土砂の流出に伴う空洞化に着目し、その発生機構を検討してきており、長期の変動水圧の作用を受けて裏込め土砂が徐々に流出することやその流動機構をある程度明らかにしてきて

*正会員	工博	岡山大学教授	環境理工学部環境デザイン工学科	(〒700 岡山市津島中 2-1-1)
**正会員	工博	岡山大学講師	環境理工学部環境デザイン工学科	(同 上)
***正会員	工修	岡山大学大学院	自然科学研究科システム科学専攻	(同 上)
****正会員	工博	西松建設株式会社	技術研究所	(〒242 大和市下鶴間 2570-4)

いる8),9),10)。これらの研究においては、図-1.(a)に示すように、裏込め土砂が高飽和状態で密閉されている状態でしかも地盤がかなり閉め固まっている状態を対象としていた。しかし、実際の河川や海岸に設置される護岸においては、図-1.(b)に示すように、護岸裏込め土砂の内部には自由水面が存在し、そこでの圧力は通常は大気圧に開放されている。また、現地調査の結果より、現地地盤がかなり緩い状態で堆積している場合もあることが確認された¹¹⁾。したがって、このような緩い堆積状態の地盤の挙動も把握しておく必要がある。

これらのことを考慮し、本研究においては、堤防や護岸の裏込め土砂が大気圧に開放されている場合と密閉されている場合ならびに地盤の間隙率を変化させた場合の裏込め土砂の流出特性を検討するとともに、構造物周辺地盤の流動化予測、護岸裏込め土砂流出に伴う裏込め部の空洞化による構造物破壊の予測ならびに空洞化防止対策工法を確立するための基礎的な資料を得ることを目的として研究を行った。

2. 実験方法

実験には、図-2に示す幅 80cm、奥行き 30cm の鉛直 2 次元砂層模型を用い、砂層構成材料は、豊浦標準砂 ($d_{50} \approx 0.25\text{mm}$ 、透水係数： 0.01cm/s) を用いた。また、護岸周辺部の砂の流動を可視化するため、標準砂を高温で焼いた着色砂（透水係数、比重：同一条件）を層状に設置し、変動水压を 1000 分間作用させた後の着色砂の移動量を計測した。

実験は、表-1に示す 4 ケースについて行った。左側容器には鉄製護岸模型を設置し、上部は蓋を取付け密閉できる構造としている。CASE 1 は護岸のみを設置し大気圧に開放された条件で、CASE 2 はこれに対し上部に蓋をして密閉された条件となっている。CASE 3 は、CASE 1 の装置の護岸先端に 5cm の鉄製の根入れを取付け、間隙率 0.40 と締め固まった条件にしており、CASE 4 はCASE 3 と同一の装置で間隙率を 0.43 と緩めの地盤を想定した実験条件となっている。その他の条件としては、変動水压振幅：25cm、周波数：1Hz の正弦波形に近い周期的変動水压を全ケースに作用させている。

3. 実験結果および考察

3.1 護岸背後地の内部圧力状況の違いによる砂の流出特性

一般的な河川や海岸に設置された護岸は、図-1.(b)に示すように、護岸裏込め土砂の内部に地下水面が存在し、そこでの圧力は、通常は大気圧状態で開放されている。この場合を想定した実験ケース (CASE 1)

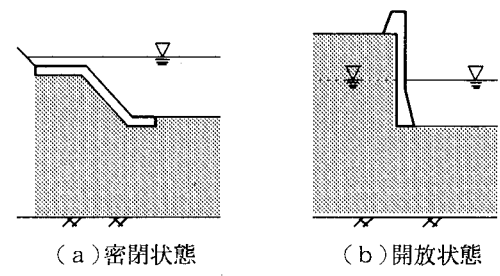


図-1 護岸背後地の概念図

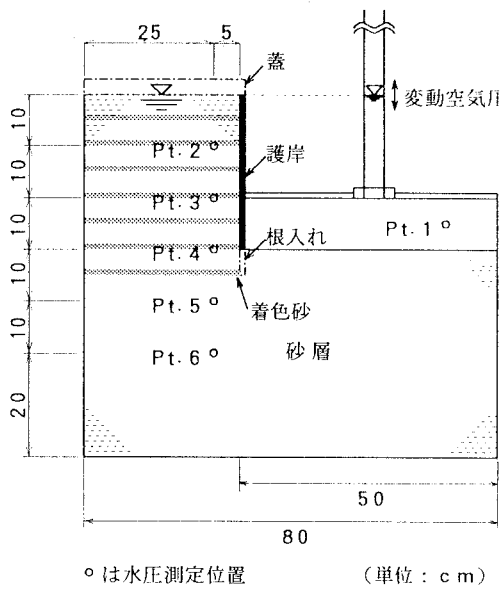


図-2 実験装置の模式図

表-1 実験条件

No	間隙率	構造物の諸元	圧力状況
CASE 1	0.40	護岸のみ	開放
CASE 2	0.40	護岸のみ	密閉
CASE 3	0.40	護岸＋不透水根入れ	開放
CASE 4	0.43	護岸＋不透水根入れ	開放

の裏込め土砂の流動特性を示したのが写真-1である。護岸内に設置された層状の着色砂は、長期的変動水圧の作用を受けて流出しており、その範囲は護岸裏法面から 10cm 程度であることがわかる。とくに護岸下から 3 層目（約 15cm）の範囲で着色砂が護岸法先部を中心に回り込むように護岸前面に流出していることがわかる。なお、護岸鉛直下方向の流動範囲は 5cm 程度以内と推定された。また、上層部の着色砂は、護岸前面への流出は見られないものの、裏込め土砂が円弧滑り状に崩壊していることが確認された。

次に、複断面河道の低水護岸部や山裾部の海岸護岸など（図-1. (a)）においては、背後地の地下水の影響により護岸背後地は高飽和状態で密閉されている状況にある。この場合を想定した実験ケース（CASE 2）の流動特性は写真-2に示すとおりであり、CASE 1 と同様に裏込め土砂が円弧滑り状に崩壊し護岸前面に流出している。実験終了時（1000分後）の裏込め土砂の流出量を計測した結果、図-3に示すように流出量全体のボリュームとしては顕著な差異は認められず、今回の実験からは護岸背後地内の内部圧力状況の違いによる裏込め土砂の流出特性の違いは把握できなかった。

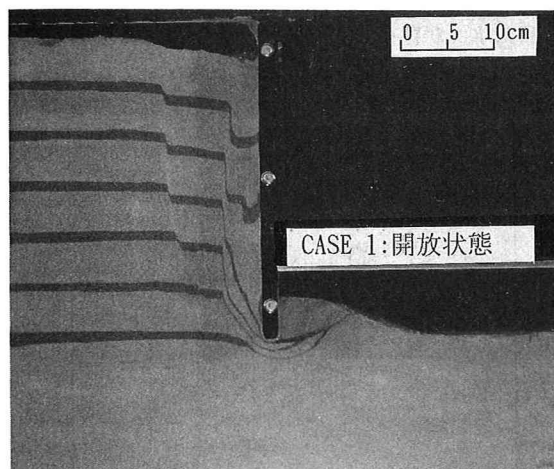


写真-1 1000 分後の流出状況 (CASE 1: 開放)

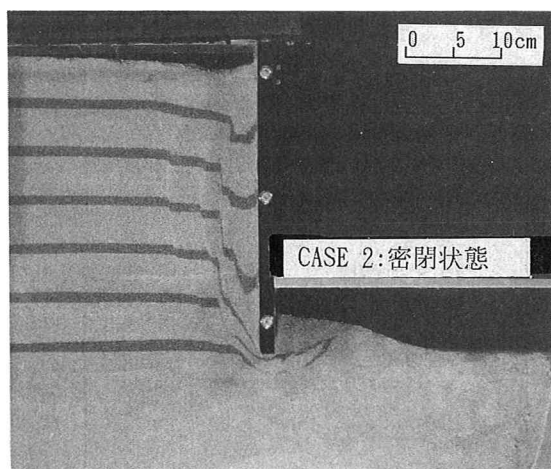


写真-2 1000 分後の流出状況 (CASE 2: 密閉)

図-4および図-5は、それぞれ CASE 1 および CASE 2 の場合の実験条件を考慮して得られた等間隙水圧線および浸透水圧の数値解析結果を示している。これらの図は、砂層面上の変動水圧が最も小さくなる時間帯を示したものであり、裏込め土砂が最も流出しやすい状況である。なお、浸透水圧については $50(\text{N/m}^2)$ 以上の値についてのみ示している。

これらの図より、両ケースとも裏込め土砂を流出させようとする浸透水圧が発生しており、とくに、護岸先端部において顕著となることがわかる。これは、可視化の結果から得られた護岸先端部での土砂の移動状況をよく説明している。なお、護岸先端部における両者の浸透水圧の違いはほとんどないが、護岸内部において CASE 1 の場合の方が浸透水圧がやや大きくなることがわかる。したがって、CASE 1 の場合の方が土砂の流出量は多くなるはずであるが、実験で両者の流出量に変化がなかったのは以下のように説明できる。すなわち、変動水圧場における液化化特性に大きな影響を与える位相の遅れ (dt/T : dt は位相の遅れ時間, T は変動水圧の周期) 及び振幅減衰 (P_n/P_1 : P_n は各点の間隙水圧) を表した図-6に示すように、護岸内部の

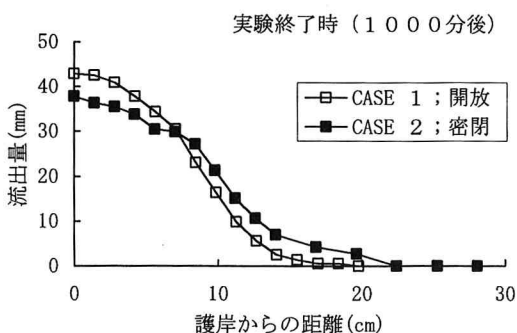


図-3 裏込め土砂の流出量

測点 Pt.2 および Pt.3 では、位相の遅れについては、CASE 2 の密閉した場合の方が大きかったのに対し、振幅については CASE 1 の開放した場合の方が大きく減衰しており、今回の実験条件下では、これらの因子の影響が出て、両者の土砂の流出量が同程度になったものと考えられる。そこで、ここでは、密閉した場合と開放した場合の両者の違いを明確にするために液状化特性に大きく影響を及ぼす幾つかの因子のうち、透水係数を取り上げ、数値実験的に検討することにした。図-7は、透水係数を実験条件の約3倍にした場合 ($k=0.03\text{cm/s}$) の位相の遅れと振幅減衰ならびに図-6に示した実験値とを合わせて示している。同図より、位相の遅れについては、Pt.2 では両者とも位相の遅れは少なくなっているが、減少量は CASE 2 の密閉した場合の方が大きく、Pt.3 では CASE 2 の場合は減少しているが、CASE 1 の開放している場合は変化していないことがわかる。つぎに、振幅減衰についてみると、CASE 1 の場合はほとんど変化していないが、CASE 2 の場合には、透水係数が大きくなると振幅減衰は少なくなることがわかる。これらのことから、透水係数が大きくなり液状化し難くなるという条件下においても、裏込め内に自由水面が存在する場合には依然として振幅減衰が大きくなっており、砂地盤の支持力の低下が、砂層内部に伝播する変動水圧および位相の遅れに影響されることを考慮すると、護岸裏込め土砂の内部に自由水面が存在し大気圧状態で開放されている場合の方が、密閉されている場合よりも裏込め土砂の流出の面からは危険側にあるものと判断される。

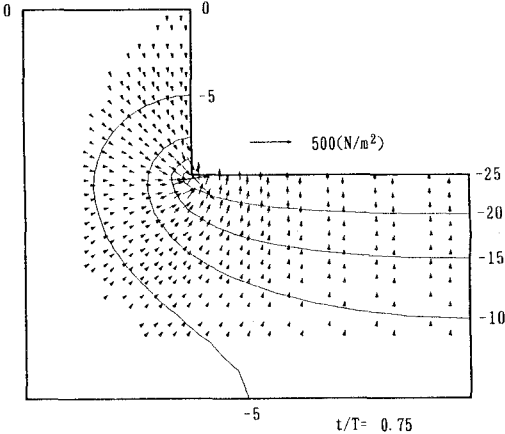


図-4 等間隙水圧および浸透水圧分布(CASE 1:開放)

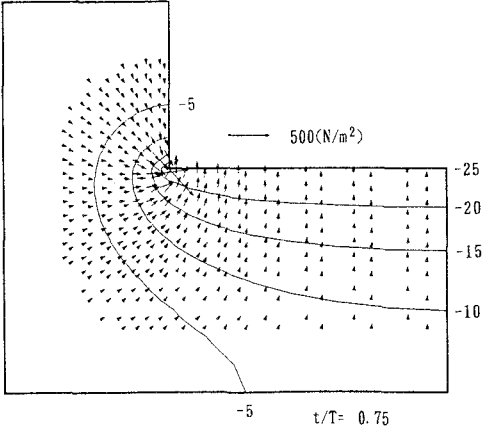
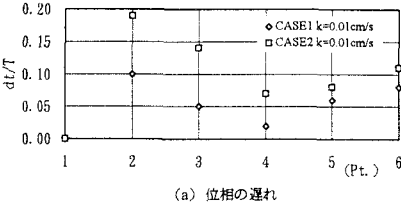
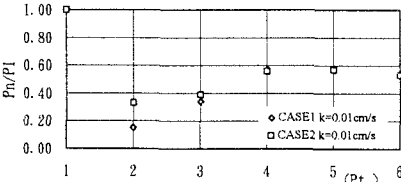


図-5 等間隙水圧および浸透水圧分布(CASE 2:密閉)

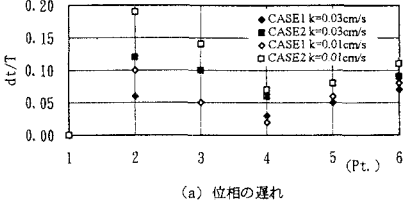


(a) 位相の遅れ

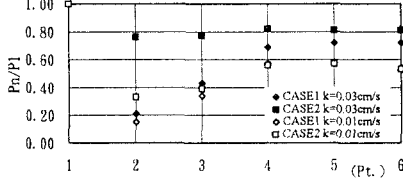


(b) 振幅の減衰

図-6 間隙水圧の位相遅れと振幅減衰(実験値)



(a) 位相の遅れ



(b) 振幅の減衰

図-7 透水係数の変化による位相遅れと振幅減衰

3.2 間隙率の違いによる砂の流出特性

写真-3及び写真-4は、裏込め土砂の流出の影響が大きいと考えられる開放状態で、吸い出し防止対策とな

る根入れを設置し、構造物周辺地盤の間隙率を 0.40(CASE 3), 0.43(CASE 4) と変えた場合の裏込め土砂の流出状況を示している。なお、これらの実験で護岸先端部に取り付けた根入れ長さは、CASE 1, 2 の実験結果より、根入れ先端部での流動範囲が 5cm 程度以内であったことを考慮して、5cm としている。これらの写真より、構造物周辺地盤がある程度締め固まった状態 (CASE 3 : 間隙率=0.40) では、変動水圧を 1000 分間作用させた後においても CASE 1, 2 のような顕著な砂の流出は見られなく、根入れを設置すると裏込め土砂の流出防止効果はかなりあることがわかる。しかし、写真-3に示すように、最下層の着色砂は、根入れ先端部を回り込みつつあり、今回の実験よりもさらに長期にわたって変動水圧が作用すると、裏込め土砂が根入れ先端部をさらに回り込んで流出が進行し、空洞化につながる可能性がある。図-8は、等間隙水圧及び浸透水圧分布の解析結果を示している。同図より、CASE 1, 2 の場合と同様に根入れ部分を回り込むように浸透水圧が作用していることがわかる。この場合、流出量が減少したのは根入れ前面の土砂のかぶりが抑え効果として働いたのと、土砂の流出経路が長くなったためであると考えられる。

つぎに、構造物周辺地盤が緩い状態 (CASE 4 : 間隙率=0.43) においては、CASE 3 の場合よりも最下層の着色砂がはっきりと根入れ前面部に回り込んでいる状況 (写真-4) が確認された。また、実験終了時の裏込め土砂の流出量を計測すると、図-9に示すように、裏込め土砂の流出現象がわずかながら生じていることから、この場合も、時間経過につれて裏込め部の空洞化に進展する危険性が認められた。現地での緩い堆積状態を想定した、間隙率が 0.43(CASE 4) の場合の方が流出量が多くなったのは、長期の変動水圧の作用に

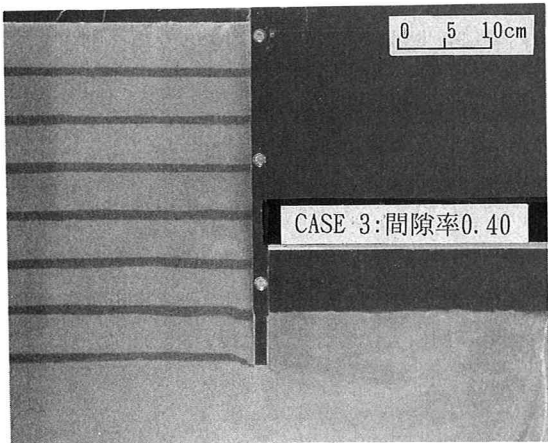


写真-3 1000 分後の流出状況 (CASE 3)

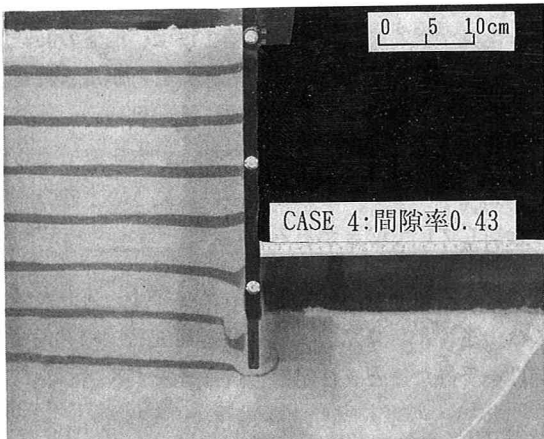


写真-4 1000 分後の流出状況 (CASE 4)

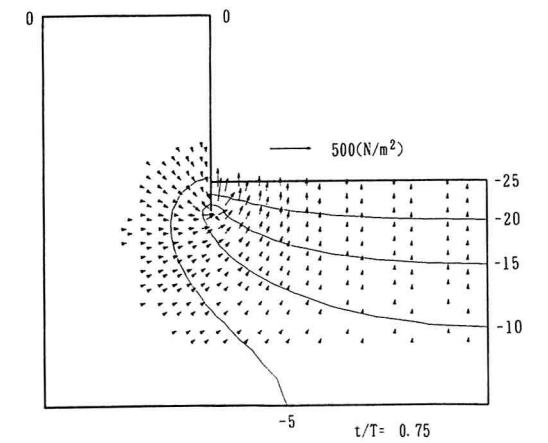


図-8 等間隙水圧および浸透水圧分布(CASE 3)

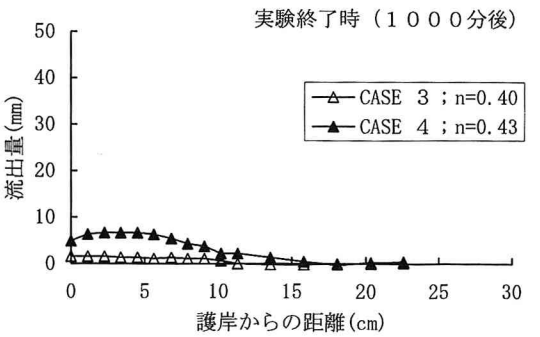


図-9 裏込め土砂の流出量(根入れ付)

より、護岸前面の砂層において高密度化現象も同時に発生したため、地盤が締め固まっている場合（CASE 3）よりも、裏込め土砂が流出しやすくなったためと推定される。

4. 結 論

本研究は、変動水圧場における護岸裏込め土砂の流出機構について、護岸裏込め土砂が高飽和状態で密閉されている場合と自由水面を有し開放されている場合の裏込め土砂の流出特性の相違、および護岸周辺地盤が緩く堆積している場合の流出特性を可視化実験ならびに数値解析により検討した。その結果、以下のよう

- なことを明らかにした。
- (1) 変動水圧の作用を受け、護岸裏込め部の土砂を流出させようとする浸透水圧が長期にわたって周期的に作用することにより、護岸裏込め土砂が円弧滑り状に崩壊し、護岸先端部を回り込むように護岸前面に流出する。
 - (2) 裏込め部が高飽和状態で密閉されている場合と自由水面が存在し大気圧に開放されている場合について実験を行ったが、今回の実験条件では、両者の違いは明確にできなかった。しかし、透水係数を大きくした数値実験の結果、裏込め部が大気圧に開放されている場合の方が、流動に大きな影響を与える振幅減衰が大きくなり、したがって、流出量も多くなる。
 - (3) 護岸先端部に根入れを設けることにより流出量はかなり軽減される。しかし、今回の実験条件程度の根入れ長においては、根入れ先端部では若干ではあるが土砂の流動がみられ、長期的には護岸裏込め部の空洞化につながる可能性がある。
 - (4) 地盤が緩く堆積している場合には、地盤の高密度化も同時に発生し、地盤が締め固まった場合よりも流出しやすく空洞化の危険性が大きいことが示された。

以上のように、本研究の結果、護岸裏込め土砂の移動状況や周辺地盤の間隙率の相違による裏込め土砂の流出特性が明らかにされた。今後は、本研究で得られた成果をもとに、変動水圧場における構造物周辺地盤の流動化予測モデルの確立ならびに裏込め土砂の流出による護岸背後の空洞化防止対策工法について、さらに検討していく必要がある。

謝 辞：本研究を遂行するにあたっては、岡山大学大学院山本哲雄君および同大学水工学研究室市川隆也君の協力を得た。また、文部省科学研究費国際共同研究（代表者 岡山大学名合宏之教授、No.04044121）の補助を受けたことを付記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 名合宏之：変動水圧による砂層の液状化に関する研究，水理講演会論文集，第26巻，pp.589-594，1982.
- 2) Nago, H. and Maeno, S. : Pore pressure and effective stress in a highly saturated sand bed under water pressure variation on its surface, Natural Disaster Science, Vol.9, No.1, pp.23-35, 1987.
- 3) Maeno, S. and Nago, H. : Numerical analysis on the dynamic behavior of sea bed around break-water, GEO-COAST'91, pp.591-595, 1991.
- 4) 名合宏之・前野詩朗・清水雄一：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.516-520，1993.
- 5) 善 功企：海洋開発における波と海底地盤の動的問題，昭和59年度港湾技術研究所講演会講演集，pp.77-133，1984.
- 6) 間瀬肇・酒井哲郎・西村喜弘・前野賀彦：多孔質弾性体理論による防波堤に作用する揚圧力および周辺地盤内の変動間隙水圧の解析，土木学会論文集，第411号Ⅱ-12，pp.217-225，1988.
- 7) 酒井哲郎・間瀬肇・山本哲也：水圧変動による地盤表面付近の間隙水圧変動，海岸工学論文集，第40巻，pp.586-590，1993.
- 8) 名合宏之・前野詩朗：変動水圧作用下における護岸の裏込め土砂の吸い出しに関する研究，水理講演会論文集，第32巻，pp.595-600，1988.
- 9) Nago, H. and Maeno, S. : Movement of sand around revetment under water pressure variation, Memoirs of Faculty of Engineering, Okayama Univ., Vol.24, No.2, pp.67-78, 1990.
- 10) Nago, H., Maeno, S. and Shimizu, Y. : Visualization of the movement of back-filling sand under the cyclic loading of water pressure, IAHR, pp.248-253, 1993.
- 11) 松本高之：変動水圧による砂地盤の動的挙動に関する研究，岡山大学修士論文，pp.77-114，1994.