

# 透水層工法における排水口土被りと排水流量の関係

柳 鳴 慎 一\* ・ 加 藤 一 正\*\* ・ 荒 田 昌 潔\*\*\*  
松 本 茂\*\*\*\* ・ 平 戸 誠 一 郎\*\*\*\*\* ・ 堀 謙 吾\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

透水層工法に関する 4 年間の現地調査の結果, 本工法における排水能力は排水管内への砂詰まり, 排水口フィルターの目詰まり, 排水口自体の埋没により低下することが分かった(柳鳴ら, 1998)。そして, 排水口が砂に埋まった状態でも砂のクイックサンド化, 波による液状化によって排水能力は回復することが分かった。

そこで, 砂層がクイックサンド状態になることを積極的に期待して排水口の構造を変更し, 排水能力を維持するための条件を調べた。得られたデータをもとにその排水特性を, 地下水位, 排水流量, 排水口における水位, 砂面高(土被り), 波高の関係に注目して検討した。

## 2. 調査方法

調査は, 茨城県の鹿島灘に面する砂浜海岸にある波崎海洋研究施設(図-1, 以後 HORS と呼ぶ)で 1998 年 6 月から 1999 年 1 月まで行った。

もともとの排水口は, 長さ 144 m の砂中に埋設した排水菅の先端を水中に立ち上げたものであった(柳鳴ら, 1995)。この排水菅を汀線から 40 m のところで切断し, 切断口を, 中に 5 号砕石を詰めたエキスパンダメタル枠中に差し入れて排水口とした(図-2)。枠内側の側面および底面は防砂シートで覆った。枠上面には, 粒径 1.5~2 mm の天然樹脂舗装材(厚さ 2 cm, 透水係数 = 0.27 cm/s)を設置し, その上には, 5 号砕石を詰めた袋状ネットを置いた(厚さ 35 cm)。

以下の項目について測定を行った(図-2)。

a) 排水口位置での水面変動を観測棧橋上に取り付けた超音波式波高計によって 1 時間毎に 20 分間測定した。波高計設置位置の地盤高は休日を除く 1 日 1 回測定した。得られたデータをもとに, 平均水位を計算するとともに, 有義波高  $H_{1/3}$  は波形の一次モーメントから求め

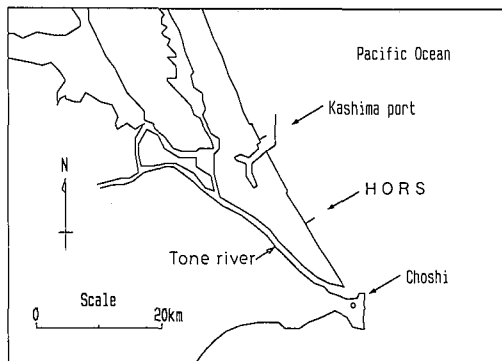


図-1 調査位置図

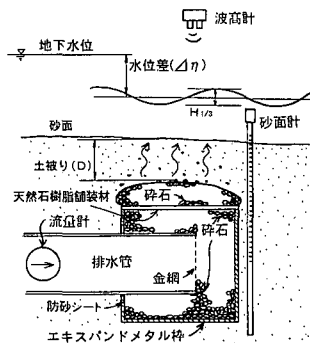


図-2 排水口の構造および調査概略図

た。またスペクトル解析を行い, その結果得られた周波数スペクトル  $S(f)$  を用いて, 長周期波の波高  $H_L$  を求めた(加藤・柳鳴, 1992)。ただし, 測定地点の実水深が 50 cm 以浅になると, 一時的に海底面の干出が生じる可能性がある(加藤ら, 1989)ため, 解析対象から外した。

b) 超音波流量計によって排水管内の流量を測定した。

c) 透水層内の地下水位と透水層から沿岸方向に 27 m 離れた自然海浜の地下水位を地下水位計によって測定した(図-5, ●印)。透水層周辺の地下水位は, 5~10 m 間隔で設置した簡易井戸内(径 4 cm)にフロート付きメジャーを挿入し, 随時測定した。

\* 正会員 運輸省港湾技術研究所海洋環境部主任研究官  
\*\* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部長  
\*\*\* 運輸省第二港湾建設局東京空港工事事務所次長  
\*\*\*\* 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所企画調整係長  
\*\*\*\*\* (株)テトラ土木本部土木技術部工法開発課長  
\*\*\*\*\* 正会員 日鐵建材工業(株)土木商品開発部開発第二室係長

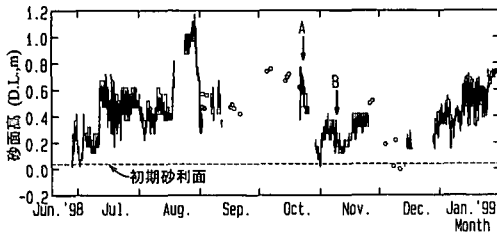


図-3 土被り厚の変化

d) 排水口脇に砂面計を設置し、砂面高を測定した。

e) 排水口周囲の表面底質を随時採取し、ふるい分け分析を行った。砂の透水係数  $k$  は粒径加積曲線の10%粒径  $D_{10}$  を用いて式(1)の Hazen の式(山口, 1980)で計算した。

$$k = 100(D_{10})^2 \dots\dots\dots (1)$$

その結果によると、透水係数は、通常は 0.02 cm/s 程度であり、12月に 0.12 cm/s 程度になった。

### 3. 排水口土被り厚の変化

図-3は排水口位置の砂面高の変化を示している。データが連続していないのは、断続的に砂面計が故障したためである。図中の矢印 A, B については、後で図-11を説明するときに触れる。

碎石を詰めた袋状ネットを設置したときの上面(砂利面)のレベルが、D.L.+0.04 mであったので、砂面高の変化はほぼ土被り厚の変化と見なすことができる(図-2参照)。土被り厚は、調査期間中に 0.0 m~1.13 m の範囲で変化しており、最も土被りが厚かったのは、8月下旬である。土被り厚が少なかったのは、10月下旬と、12月初旬から下旬までの間で、12月10日および12月25日前後は碎石を詰めた袋状ネットが完全に露出していた。排水口付近にインナーバーのトラフが形成されたためである。ただし、土被りがなくなる状態は、全期間に較べてわずかの時間であり、大部分の時間は、排水口上に砂が堆積した状態であった。なお、データを詳細に見ることによって土被り厚は、このような長期的な変化に加え、干潮時に高く、満潮時に低くなる日周期的な変化があることが確認されている。

排水という観点からは、排水口上に砂の堆積がないほうが好ましい。ところが、ほとんどの場合、砂が堆積していたことになる。

### 4. 逆流時の流れ

排水口の位置が水中にあったとき、波(あるいは長周期波)の峰が排水口のところを通過する際に水位が透水層内の地下水位以上に上昇し、排水管内に海水が逆流することがあった(柳嶋ら, 1998)。その結果、浮遊砂が排

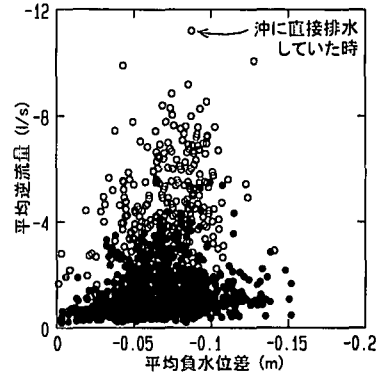


図-4 平均負水位差と平均逆流流量の関係

水管内へ運ばれて堆積し、排水管の砂づまりが発生したのである。そこで、今回の排水口構造について、まず逆流を調べることにした。

ここでの解析に用いたデータは、排水流量、透水層内の地下水位、排水口位置の水面変動(波形)の生データを調べてみると、流量は水位変動に数秒遅れて追従していることが分かった。そこで、マクロな視点でとらえるために、20分間の平均値を計算することにした。まず、水位差(地下水位-排水口水位)が負になっているデータだけを累計した後に、カウントしたデータ数で除して平均負水位差を計算した。次に排水流量について、逆流しているときの流量だけについて累計し、平均逆流流量を計算した。

図-4は、平均負水位差と逆流流量の関係をプロットしたものである。図中の黒丸が今回の排水口構造で得られたデータを解析した結果であり、白丸は排水口を水中に立ち上げて直接排水していた1996年9月30日から10月21日の間のデータについて同じ解析をした結果である。この図を見て明らかなように、今回の排水口構造では、直接沖に排水していたときに比べると逆流が発生しにくくなっている。

### 5. 土被りと排水流量の関係

図-5は、1999年1月13日の地下水位の平面分布を示している。地下水位は、岸沖方向距離10 mから-50 mの範囲で透水層に向かって沿岸方向の両側から急激に低くなっている。透水層内の地下水位は、1.2 mであり、周囲と比べると約0.5 mの差が生じている。図中には、水位計によって地下水位が連続的に測定されている2地点が黒丸で示されている。この測定点と地下水位の平面分布を対比すると、透水層内の測定点は地下水位が最も低下している地点に対応しており、一方沿岸方向(銚子方向)へ27 m離れた地点では、地下水位が高く、自然海浜の地下水位に近くなっていることが分かる。

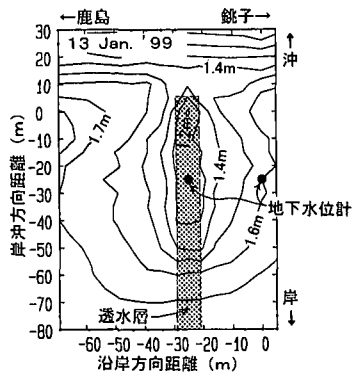


図-5 地下水位の平面分布 (1999年1月13日)

沖への排水流量は、地下水位と排水口水位の水位差に大きく依存するはずである。ところが、ここで水位差を計算しようとしたとき、地下水位のデータとして図-5の2地点で測定されたもののどちらを使用するのがよいか、あるいは、2つのデータを同時に用いるのがよいか不明である。

図-6は日最大排水流量と、そのときの水位差の経日変化を示したものであり、いずれも20分間の平均値である。水位差は、2つの方法で計算した。つまり、[透水層地下水位-排水口水位]と[自然地下水位-排水口水位]である。図-6によると、7月～8月の間は、[自然地下水位との水位差]と[透水層地下水位との水位差]は同程度であるのに対し、10月以降は後者の方が40cm程度小さい。この違いが排水流量にどのように現れているかを調べるために、前半と後半において土被り厚が同じ程度の時期、つまり7月中旬と1月中旬(図-3参照)を比較することにした。まず、排水流量は7月中旬に比べて、1月中旬のほうが多い。一方、透水層地下水位で計算した水位差は7月中旬に比べて1月中旬のほうが低くなっていて、流量の変化との対応が悪い。このようなことから、以下の解析では、水位差を自然海浜で測定した地下水位を用いて計算することにした。

図-7は、水位差と流量の関係を示している。バラつきはあるものの水位差の増加にともなって流量は増大している。ちなみに、透水層地下水位との水位差を用いて同様のデータ整理を行った結果では、データが大きくバラついた。

さて、図-8は、1999年1月13日の1時から10分間の流量、排水口水位、自然地下水位の生データを示している。この図において、流量変動と水位変動を対応させるために、右側縦軸の流量値を下向き正にしていることに留意されたい。まず、地下水位はほとんど変動していないことが分かる。この地下水位のレベルから、このときの土被りD(56cm)だけ下がったレベルを破線で表示し

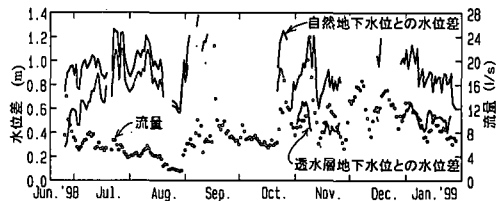


図-6 水位差、排水流量の変化

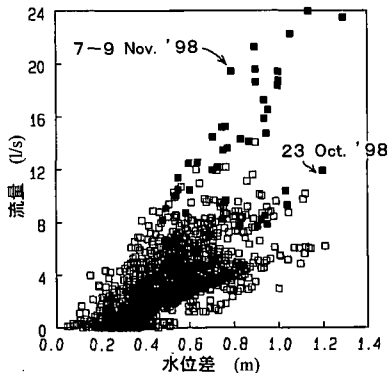


図-7 水位差と流量の関係

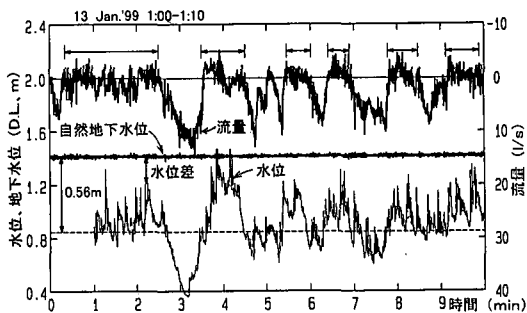


図-8 流量、水位、地下水位の変動 (1999年1月13日)

た。図において、地下水位と排水口水位の差が水位差であり、この変化と流量の変化に注目すると以下のことが分かる。排水口水位が破線より下側にあるとき、言い換えると水位差が土被りDより大きいときは、大きな流量が発生している。しかし、水位差が土被りDより小さくなると、水位差としては正の値であっても、流量はほぼゼロである。この状態は、最上段に両端矢印で示した時間帯に発生している。つまり、流量は必ずしも水位差に比例して流れているのではなく、水位差が土被りより大きくなると流れやすくなるということである。水位差と土被りが同じという状態は、砂中の動水勾配が1であり、これはクイックサンド状態になる限界動水勾配に相当する(山口, 1980)。したがって、流量が多くなるのは、排水口上の砂がクイックサンド状態になってためであると

いえる。

クイックサンド状態を考慮して、排水流量と水位差の関係を簡単なモデルで表現する。図-9に、地下水位、排水口の平均水位、波形、土被り厚さの関係を模式的に示す。地下水位は20分程度の時間スケールでは一定であると見なし、水面変動を正弦波で近似すると地下水位と排水口位置の水位差の時間変化  $\Delta h(t)$  は、

$$\Delta h = \Delta \eta - \left(\frac{H}{2}\right) \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここで、 $\Delta \eta$  は水位差の平均値である。水位差  $\Delta h$  が排水口上の土被り厚さ  $D$  より大きいときはクイックサンド状態になり、小さいときは浸透流になると仮定すると、以下の3つの状況が考えられる。

1) 水位差  $\Delta h$  が常に土被り厚  $D$  より小さいとき、すなわち

$$\Delta \eta + (H/2) < D \dots\dots\dots (3)$$

のときはクイックサンド状態にはならない。したがって、排水口からの地下水は砂層の中をダルシー則に従う流れで排水される。このときの流量は、

$$Q = k_1 \frac{\Delta h}{D} A \dots\dots\dots (4)$$

となる。ここで、 $k_1$  は砂の透水係数 (=0.02 cm/s)、 $A$  は排水断面積である。

2) 水位差  $\Delta h$  が常に土被り厚  $D$  より大きいとき、すなわち

$$\Delta \eta - (H/2) > D \dots\dots\dots (5)$$

のときは常にクイックサンド状態となる。しかしながら、図-2に示したように、排水口の上には厚さ2cmの天然石樹脂舗装材が取り付けられており、この版によって流量は規制されるはずである。そこで、流量を

$$Q = a k_2 \frac{\Delta h}{d} A \dots\dots\dots (6)$$

で計算することにした。ここで、 $d$  は舗装材厚 (=2 cm)、 $k_2$  は舗装材の透水係数 (=0.27 cm/s)、 $a$  は係数である。係数には2つの意味があり、一つは  $d$  に対する補正である。つまり、天然石樹脂舗装材の上下には碎石が詰められており、これらも含めた厚さを考慮することである。もう一つの意味は、 $A$  の補正である。水中ビデオで観察したところによると、エキスパンドメタル枠上面全体(この面積が  $A$ ) の砂ではなく、中央部の狭い範囲でクイックサンド状態が生じていたからである。

3) クイックサンド状態と浸透流が交互に発生するのは、

$$\Delta \eta - (H/2) < D < \Delta \eta + (H/2) \dots\dots\dots (7)$$

のときである。この場合、 $\Delta h < D$  のときは式(4)で流量を計算し、 $\Delta h > D$  のときは式(6)で計算する。

なお、以上のモデルでは、波の一周期間の平均流量は

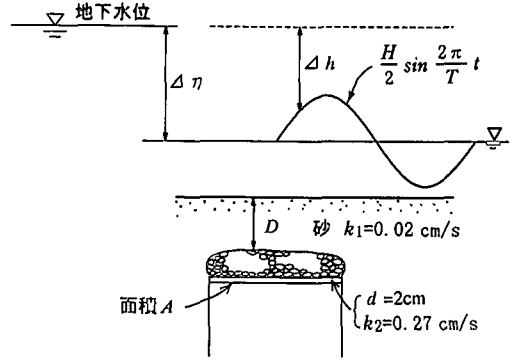


図-9 計算における諸量の定義図

波の周期に無関係となるので、波の諸元としては波形の一次モーメントから求めた有義波高だけで計算できる。

図-10は、式(6)の係数の値を  $a=1/16$  として計算した流量と実測流量を比較したものである。データは、1対1の関係を示す直線のまわりにバラついている。ただし、■印で示す11月7~9日の間のデータは1対1の関係から外れ、実測値が計算値よりも大きい。

次に、実測流量が計算流量より大きくなる(図-10の■印データ)原因について検討する。図-11は、観測期間中の排水口位置における日平均の有義波高と長周期波の波高である。図中データが連続していないところは、欠測および海底面が高くなり実水深が0.5m以下になったところである。今注目している期間は図中に矢印Bで示しているときであり、長周期波の波高が非常に大きくなっていくことが分かる。矢印Aの日(10月23日)にも同様に長周期波の波高が大きくなっていくが、このときは実測流量は計算流量にほぼ等しい(図-10参照)。一方、図-11に示した矢印A、Bを見ると前者の日の土被りが40~50cmであるのに対し、後者では10~20cmである。つまり、実測流量が大きくなったときは、長周

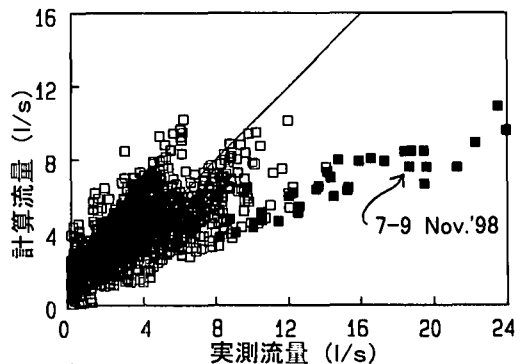


図-10 実測流量と計算流量の比較

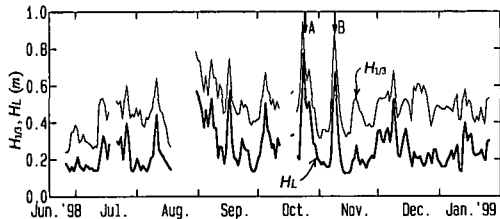


図-11 有義波高  $H_{1/3}$ 、長周期波の波高  $H_L$  の変化

期波の波高が大きかつ土被り厚が少ないという状況であった。

図-12は、11月6日から11月9日までの間について、上段に計算流量と実測流量、下段に自然地下水位との水位差と長周期波の波高を示したものである。11月7日8時頃までは長周期波の波高が小さく、実測流量は計算流量とほぼ一致している。しかし、14時以降長周期波の波高が0.8m程度になった後は、実測流量は計算流量の1.5~2倍になっている。このように、長周期波の波高が大きくなったときには浜の高いレベルまで波が遡上し、浜に浸透する海水量も多くなることが知られている(加藤・柳嶋, 1992)。

図-13は、11月8日8時5分から5分間(図-12中の○印)の流量、地下水位、排水口水位の生データを示したものである。この時の土被りは0.18mであり、それを考慮して地下水位より土被り厚相当低いレベルを破線で示した。水位は、周期2分の長周期波成分に周期12秒程度の入射波成分が重なり変動しているが、ほとんどの場合破線レベルより低いレベルになっている。つまり、水位差が土被り厚よりも常に大きく、クイックサンド状態が継続していると判断される。このため流量の波形は排水口水位の波形とよく似た形状になっている。そして、流量は8時7分30秒頃に41 l/sで極大になり、これは排水口での流速で0.33 m/sに相当する。しばしば発生するこのような速い流れによって、排水口直上の砂は簡単にフラッシュされると推察される。つまり、以前に直接排水していた時と同様の状況になり、実測流量は計算流量の2倍近くになったものと考えられる。

6. おわりに

本研究で得られた主要な結論は以下のとおりである。

- ① 波の峰通過時に負の水位差によって生じる逆流は、沖で直接排水していた構造にくらべ半減する。
- ② 排水流量と関係する水位差は、透水層周囲の地下水位と排水口位置の水位との水位差である。
- ③ 排水流量は、常に浸透流が生じている時、常にク

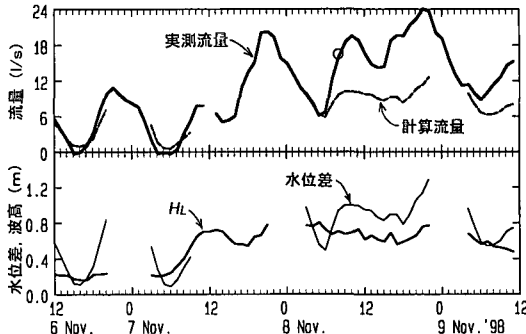


図-12 11月6日~9日の実測流量, 計算流量, 水位差, 長周期波の波高の変化

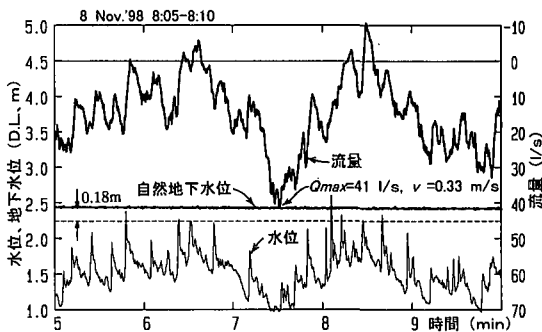


図-13 地下水位, 水位, 流量の変動 (1998年11月8日)

イックサンド状態にある時、それらが交互に生じている時の3状態のいずれかで量が異なる。

④ 長周期波の波高が大きかつ土被りが小さい時には、継続的なクイックサンド状態となり、排水口上の砂がフラッシュされるため、実測流量が大きくなると推察される。

最後に、底質のふるい分け分析においては、漂砂研究室中島剛技官の協力を得た。ここに記し謝意を表する。

参考文献

加藤一正・柳嶋慎一・磯上知良・村上裕幸 (1989): 波による汀線付近の水位上昇量, 港研報告, 第28巻, 第1号, pp. 3-41.  
 加藤一正・柳嶋慎一 (1992): 長周期波によるバームの侵食, 土木学会論文集, No. 452/II-20, pp. 41-50.  
 柳嶋慎一・加藤一正・天坂勇治・名城 整・望月徳雄 (1995): 現地海岸に埋設した透水層の排水流量と前浜地形変化, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 726-730.  
 柳嶋慎一・加藤一正・中官利之・下川原銀二・野口雄二・岩佐直人 (1998): 透水層工法における排水能力低下要因, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 641-645.  
 山口柏樹 (1980): 土質力学, 技報堂出版, 389 p.