

# 透水性海浜における砕波帯の浸透流

## Seepage Flow in a Breaker Zone

柿沼太郎<sup>1</sup>・大石 静<sup>2</sup>・山本洋平<sup>3</sup>・中村和夫<sup>4</sup>・北村良介<sup>5</sup>

Taro KAKINUMA, Shizuka OHISHI, Youhei YAMAMOTO

Kazuo NAKAMURA and Ryosuke KITAMURA

Seepage velocity in a breaker zone was measured with dye for visualization. Pressure sensors were also installed to obtain pore water pressure. Three cases of different incident wave periods were treated in laboratory experiments. The time-averaged pore water pressure was higher nearer to the shore, resulting in seepage flows, whose velocity was larger as the incident wave period was longer, generally running from onshore to offshore. The penetrated water flowed out from the permeable seabed at a bar top or on the rather offshore side of the bar top if a bar was remarkably developed. The pore water pressure in the breaker zone showed time variation depending on the wave phase including wave breaking and bore propagation. There was a phase where the pore water pressure decreased locally below the bar.

### 1. 序論

海浜の堆積物表層において、明条件下では、光合成により酸素が生成され、逆に、暗条件下では、無機化のために酸素が消費される。透水性海浜において、波動の作用により底質内間隙水と水底直上水との交換が助長される場合 (Precht・Huettel, 2004)、堆積物表層における酸素の生成と消費が、浅海域における水質や生態系に対して、より重要な意味を持つことになる (桑江ら, 2006)。

ところで、砕波帯では、水底上の振動流、波の遡上、砕波に伴う wave set-up や、流れによる底層の洗掘等を通して、透水層内の水の運動が波動の影響を受ける。その結果、砕波を伴う波の各位相で変動する外力が、時間平均的な流れとして現れる浸透流に関与するであろう。

そこで、本研究では、透水性海浜における、間隙水を含む水の運動のメカニズムを解明するための基礎的研究として、砕波帯の透水層に存在する間隙水の運動を可視化し、浸透流の流速ベクトルを求め、更に、間隙水圧を測定して、浸透流の特性に関して検討を行なう。陸田ら (2001) は、砕波形式の違いが海浜浸透流に与える影響に着目し、入射波周期を固定して水理実験を行ない、浸透流の流速と、水底における時間平均圧力とを求めた。本実験では、周期の異なる3通りの入射波条件を対象と

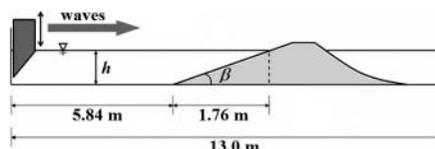


図-1 造波水槽

して、海浜浸透流を可視化し、砂中の間隙水圧の空間分布及び時間変化を測定することを試みる。

### 2. 造波水槽及び入射波条件

図-1のような長さ13m、幅0.4mの造波水槽内に、豊浦標準砂を用いて、斜面勾配 $\beta$ が異なる斜面を作成する。斜面前後の一律静水深を $h=0.22\text{m}$ とし、斜面勾配を $\beta=1/8$ とする。

入射波は、周期 $T$ が異なる3通り、すなわち、Case A (入射波周期 $T=0.48\text{s}$ 、入射波波高 $H=3.7\text{cm}$ )、Case B ( $T=0.83\text{s}$ 、 $H=5.3\text{cm}$ )及びCase C ( $T=1.20\text{s}$ 、 $H=3.0\text{cm}$ )の規則波とする。

### 3. 浸透流の可視化実験

#### (1) 実験の方法

浸透流の可視化のために、砂中の間隙水を染料で着色する。染料は、ウラニンとし、写真-1に示す長い針を有する注射器を用いて、造波水槽側壁のガラス面に沿った砂中に注入する。染料注入時における各着色部の直径を約3mmとし、砕波帯における波動下の浸透流を広い範囲で把握できるよう、合計50箇所程度にわたり間隙水を着色する。なお、染料によって、間隙水が着色されており、砂粒子が着色されていないことを確かめている。

1 正会員 博(工) 鹿児島大学大学院准教授  
理工学研究科 海洋土木工学専攻  
2 株式会社平成建設  
3 学生会員 鹿児島大学大学院  
理工学研究科 海洋土木工学専攻  
4 鹿児島大学大学院専任専門技術職員  
理工学研究科 技術部  
5 正会員 工博 鹿児島大学大学院教授  
理工学研究科 海洋土木工学専攻

浸透流は、写真-2のように、間隙水の着色部をブラック・ライトで照らし出すことによって可視化する。そして、デジタル・カメラを用いて、浸透流を15s間隔で自動撮影する。実験中に、着色部の色が希薄になり始めたら、一旦、造波を停止して染料を注入してから、実験を再開する。水底地形がある程度安定して、浸透流が定常流に近づくまで実験を行なう。

一定時間間隔で断続的に撮影された写真を用いて、浸透流の速度ベクトルを求める。すなわち、ある時間 $t_1 \leq t \leq t_2$ にわたって間隙水の各着色部を追跡し、時刻 $t_1$ 及び $t_2$ における各着色部の位置を結び、これをこの軌道上における浸透流の $t_1 \leq t \leq t_2$ の時間平均の速度ベクトルとする。なお、染料が、時間の経過と共にやや拡散する場合があるが、その場合には、着色部の進行方向の先端部を追跡する。

## (2) 砕波帯における浸透流

Case A, B及びCに対する実験結果をそれぞれ図-2, 3及び4に示す。これらの図には、上記の方法で求められた浸透流の時間平均の速度ベクトル、水粒子追跡の開始時刻 $t_1$ 及び終了時刻 $t_2$ における水底の形状、そして、砕波点の存在範囲が描かれている。図示された水位は、静水位である。なお、入射波の周期によって、浸透流の速度が大きく異なるため、時間平均の速度ベクトルの算出時間間隔( $t_2 - t_1$ )をCase A, B及びCにおいて、それぞれ、3,000, 1,500及び150sと変えている。

Case A～Cのいずれの場合においても、間隙水は、概ね岸から沖へと流れる傾向のあることがわかる。

入射波の周期が最も短いCase Aにおいて、浸透流の速度の最大値は、約 $1.5 \times 10^{-3}$ m/sであった。この場合、図-2に示されているように、 $0.4\text{m} \leq X \leq 0.5\text{m}$ 周辺にbarが形成されている。浸透流は、 $0.8\text{m} \leq X \leq 0.9\text{m}$ 周辺で透水層内に流入し、barに向かいながら徐々に進行方向を上向きへと変え、そして、barの頂点付近から水底上に流出している。

Case Aよりも入射波の周期が長いCase Bでは、図-3に示されているように、barが2箇所形成されている。この場合、浸透流の流速の最大値は、約 $4.0 \times 10^{-3}$ m/sであった。浸透流は、 $0.9\text{m} \leq X \leq 1.0\text{m}$ 周辺と、二つのbarに挟まれた $0.25\text{m} \leq X \leq 0.4\text{m}$ 周辺で透水層内に流入し、二つのbarの頂点付近及びそのやや沖から水底上に流出している。

入射波の周期が最も長いCase Cでは、浸透流の流速の最大値は、約 $3.0 \times 10^{-4}$ m/sであり、これは、入射波の周期が最も短いCase Aの20倍に達する。浸透流は、 $0.9\text{m} \leq X \leq 1.1\text{m}$ 周辺で透水層内に流入している。Case Cでは、明確なbarが形成されず、 $0.45\text{m} \leq X \leq 0.75\text{m}$ といった比較的広い範囲にわたって間隙水が水底上に流出している。

また、Case Cでは、 $X \leq 0.4\text{m}$ において砂漣が形成された。この砂漣形状は、sand waveのように、 $7.3 \times 10^{-5} \sim 2.6 \times 10^{-4}$ m/s程度の速度で岸向きに移動した。砂漣下の砂中において、浸透流は、上方へと向かうが、砂漣の岸向きの移動速度が比較的大きいため、浸透流は、砂漣の頂点の移動に追従できない。従って、間隙水の進行は、砂漣の頂点付近に向かう方向に限定されない。これは、barの頂点付近、または、そのやや沖から間隙水の流出が見られたCase AやCase Bと異なる現象である。

## 4. 透水層の間隙水圧測定

### (1) 実験の方法

波浪下における透水層の間隙水圧測定の例として、高垣ら(1987)による現地観測が挙げられる。ここでは、図-1に示す室内造波水槽を用いた間隙水圧測定を実施し、砕波帯内で発生する浸透流の圧力に着目する。

砕波帯における透水層の間隙水圧測定では、図-5に示す砂中の8箇所に、圧力計(KYOWA PGM-02KG, 定格容量: 20kPa)を固定する。図中に記した記号①～⑧のそれぞれの中央位置に、Ch. 1～8の圧力計の受圧面が設置されている。各受圧面は、砂に直接接触することのないよう、透水性のフィルタで覆われている。「上段」に設置されたCh. 1, 3, 5及び7の圧力計の受圧面は、静水面より約6.0cm下方に、他方、「下段」に設置されたCh. 2, 4, 6及び8の圧力計の受圧面は、静水面より約12.5cm下方に位置する。また、下段の圧力計は、造波水槽側壁近くに置かれた上段の圧力計より、約5.0cm造波水槽の内寄りの地点に配置されている。すべての圧力計は、受圧面を鉛直上向きにして設置する。

本実験では、静水状態の圧力水頭を0mとして、各点における圧力変動を測定し、受圧信号をセンサ・インタフェイス(KYOWA PCD-300A)を用いて増幅する。

### (2) 砕波帯における間隙水圧の時間平均

Case A～Cにおける間隙水圧の、5分間にわたる時間平均値を図-6に示す。なお、本論文では、各点の「間隙水圧」として、「静水時からの圧力水頭の変化」を示す。

Case A～Cのいずれの場合においても、岸に近いほど間隙水圧が大きく、このため、沖向きの間隙水の流れが形成されることがわかる。そして、入射波周期が長いほど、 $0.55\text{m} \leq X \leq 0.8\text{m}$ 間の岸沖方向の間隙水圧差が大きく、浸透流の速度も大きくなる。

このうち、Case Bにおける間隙水圧の時間平均値を見ると、上段の圧力計で測定された静水面下約6.0cmの深さにおける間隙水圧は、下段の圧力計で測定された静水面下約12.5cmの深さの間隙水圧より、 $0.58\text{m} < X \leq 0.8\text{m}$ で低く、 $0.5\text{m} \leq X < 0.58\text{m}$ で高くなっている。時間平均的には、前者では、鉛直上向きの、また、後者では、鉛直下



写真-1 染料と染料を砂中に注入する注射器

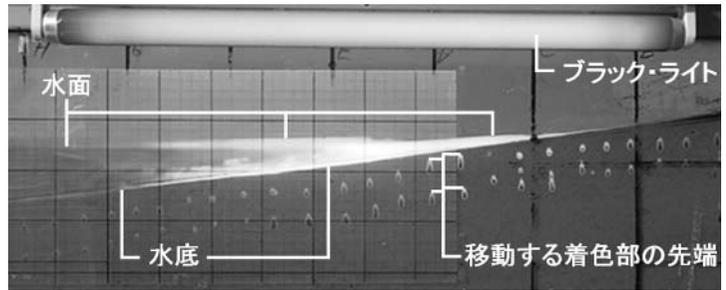


写真-2 ブラック・ライトの照射により可視化された浸透流

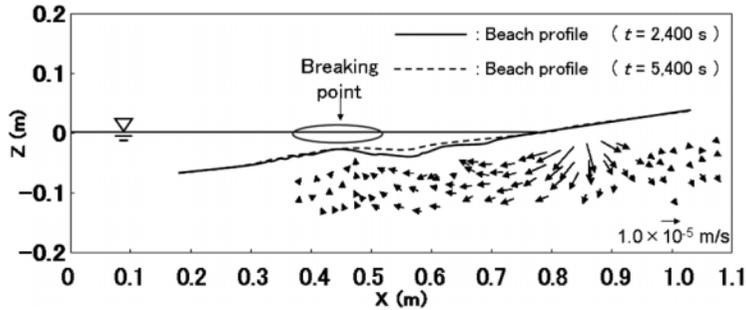


図-2 Case Aの浸透流の速度ベクトル及び水底地形 (T=0.48s)

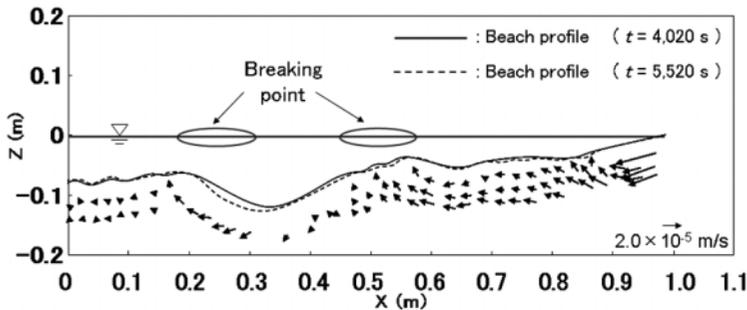


図-3 Case Bの浸透流の速度ベクトル及び水底地形 (T=0.83s)

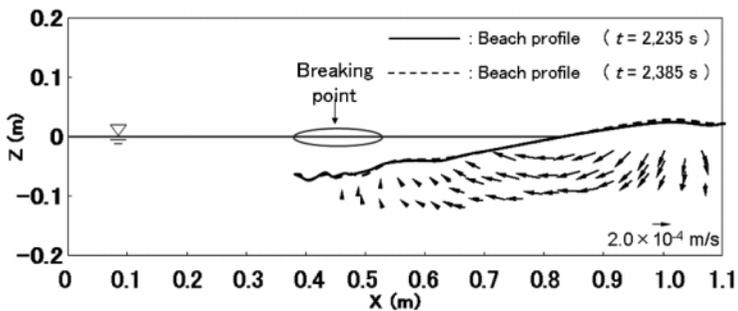


図-4 Case Cの浸透流の速度ベクトル及び水底地形 (T=1.20s)

向きの力が、それぞれの区間の静水面下6.0~12.5cmの深さ周辺の間隙水に働く。前者の区間は、図-3に示す通り、bar 頂部より岸側の水深の浅い領域であり、水底上の振動流の流速が比較的大きく、水底付近の間隙水圧が時

間平均的に低下すると考えられる。

他方、大きなbarが形成されないCase Cでは、 $0.5m \leq X \leq 0.8m$ にわたって、上段の圧力計で測定された静水面下約6.0cmの深さにおける間隙水圧が、下段の圧力計で測定

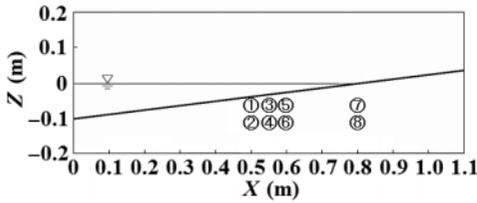


図-5 圧力計の設置位置

された静水面下約 12.5cm の深さの間隙水圧より高い。

(3) 砕波帯における間隙水圧の位相変化

入射波の周期が最も長い Case C における、砕波帯の透水層における間隙水圧の位相変化に着目する。本論文のこれ以降の記述では、実験開始時刻と異なるある同一時刻を  $t=0s$  に設定する。

Case C における、ある 1 波の砕波後の水面形及び水底地形を図-7 に示す。この波の砕波は、図-7 の第 1 図に示すように、時刻  $t=1.9s$  に開始した。砕波形式は、plunging 型であり、砕波において前方に投げ出された水塊は、図-7 の第 2 図のように、 $t=2.1s$  に水面に落下した。時間  $2.3s \leq t \leq 2.4s$  において、水底の漂砂の運動を撮影したビデオ映像より、水中に落下した砕波の plunge が水底に水塊を押し付けていることがわかる。時刻  $t=2.4s$  における水面形は、図-7 の第 3 図のようであるが、このとき、砕波に伴う大規模渦が形成されている。そして、図-7 の第 4 図の時刻  $t=2.65s$  では、斜面を遡上した波が沖向きに引いて行った。

図-8 に、Case C における、 $X=0.55m$  の地点に設置された Ch. 3 及び 4 の間隙水圧の測定値の時間変化を示す。図-7 に、両者の圧力計の設置位置③及び④が、+ の記号で示されているが、この地点は、図-7 の第 2 図よりわかる通り、対象としている波の plunging 点である。また、破線で示した時刻は、図-7 の各図を描いた時刻である。図-8 で、水深の違いによる間隙水圧の位相差は、殆ど見られない。しかし、波形に違いがあり、特に、間隙水圧のピーク値の差が、Ch. 3 と Ch. 4 の間で大きい。

図-9 に、Case C における、Ch. 3 と Ch. 4 の間隙水圧の測定値の差の時間変化を示す。ここで、図-5、または、図-7 の、下段の④の位置の間隙水圧から、上段の③の位置の間隙水圧を引いた値を示している。破線で示した時刻は、図-7 の各図を描いた時刻である。時間  $2.3s \leq t \leq 2.4s$  において、上段の位置の間隙水圧が下段より大きくなっており、鉛直下向きの浸透流を起こそうとする力が働いていることがわかる。この時間において、砕波の plunge が水底に押し付けた水塊により、このような力が働いたのである。

Case C における、Ch. 1～8 の圧力計で囲まれた領域内の間隙水の等圧線の時間変化を図-10 に示す。この領域

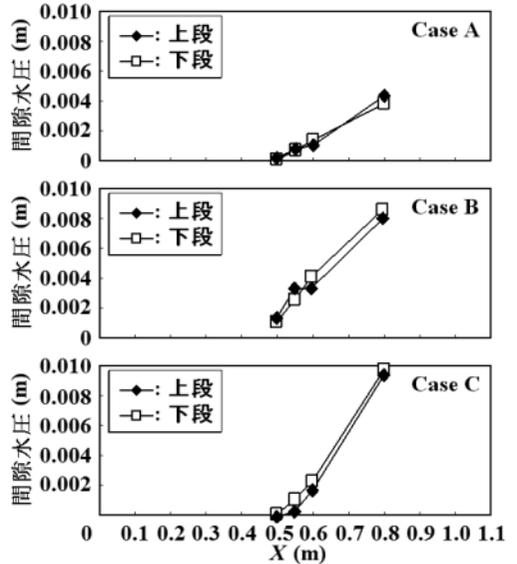


図-6 Case A～C における各点の間隙水圧の時間平均値

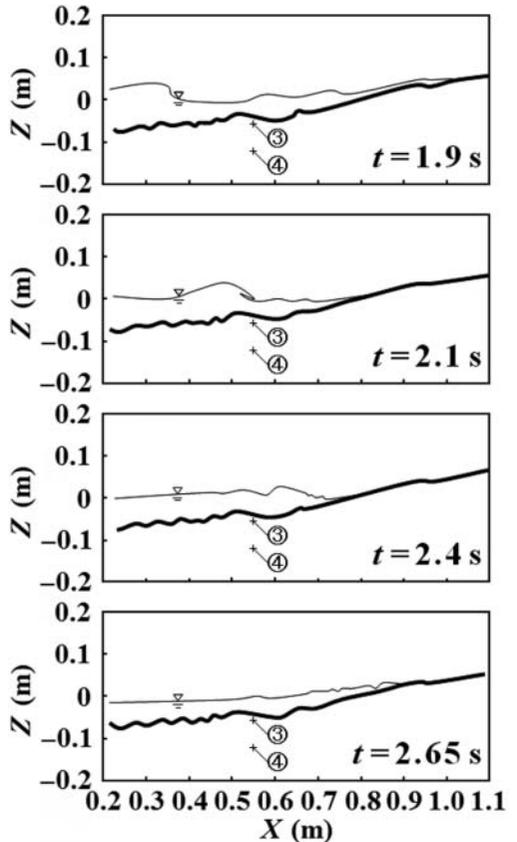


図-7 Case C におけるある 1 波の砕波後の水面形

内では、 $1.6s \leq t \leq 2.8s$  において、概ね岸側の間隙水圧が沖側より高くなっている。しかしながら、 $t=2.2s$  において、

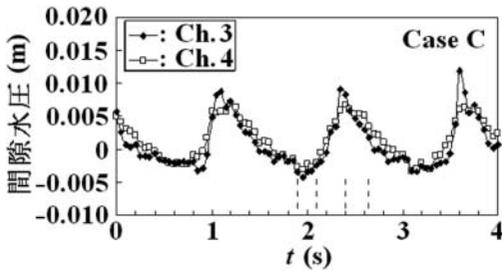


図-8 Case CのCh. 3及び4における間隙水圧の時間変化

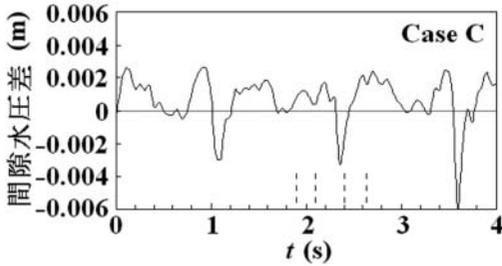


図-9 Case CのCh. 3とCh. 4における間隙水圧の差の時間変化 (図-5の④の位置の間隙水圧から③の位置の間隙水圧を引いた値を示している.)

波の伝播に伴い  $0.5m \leq X \leq 0.58m$  で間隙水圧が増加し、 $X=0.6m$  付近の間隙水圧がその岸側及び沖側より低くなり、 $X=0.6m$  付近への流れの集中を生む。この  $X=0.6m$  の地点は、図-4より、僅かに生じたbarの頂部のやや岸側に位置する。そして、砕波後の波が通過する  $t=2.4s$  では、この領域の全域で間隙水圧がほぼ一樣になる。その後の  $t=2.6$  及び  $2.8s$  において、引き波が発生しており、 $0.5m \leq X \leq 0.7m$  で上向きの浸透流を起こそうとする力が生じている。

5. 結論

透水性海浜における砕波帯を対象とし、浸透流の可視化実験及び透水層の間隙水圧測定を行なった。間隙水圧の時間平均は、岸に近いほど大きく、これを起因力とした概ね岸から沖に向かう浸透流が形成される。この流速は、入射波周期が長いほど大きい。明確なbarが形成される場合、浸透流は、barの頂部、または、そのやや沖側で水底上に流出する。砕波やboreを伴う波の各位相において、間隙水圧は、時間変動を示す。砕波のplungeが水底に水塊を押し付ける位相では、間隙水において、鉛直下向きの浸透流を起こそうとする力が働き、その後、barの頂部付近で間隙水圧が局所的に低下する位相が現れる。

このように時間変動する間隙水圧と、wave set-upとい

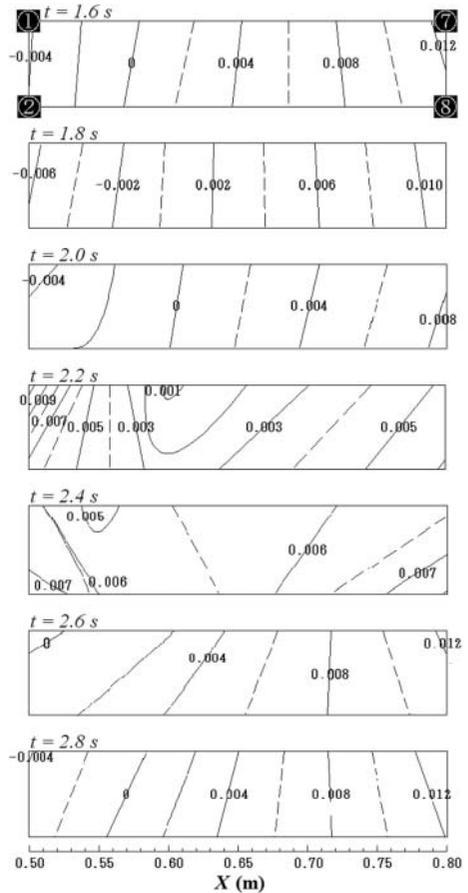


図-10 Case Cにおける等圧線の時間変化 (各等圧線の値は、間隙水圧 (単位: m) を表わす.)

った波動の位相平均的な効果の各々が、どのような役割を演じるのかを考慮して、今後、砕波帯内における浸透流発生メカニズムに関して明らかにしていきたい。

参考文献

桑江朝比呂・神尾光一郎・井上徹教・三好英一・内山雄介 (2006): 堆積物による酸素消費と生成—渦相関法を適用した新たな測定手法の開発—, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 1411-1415.  
 高垣泰雄・宮本卓次郎・吉永 茂・春木芳男・佐藤峰雄 (1987): 海底砂地盤の間隙水圧の波浪変動に関する計測装置の開発と現地観測結果について, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 276-280.  
 陸田秀実・土井康明・森川真一・三宅里奈 (2001): 砕波帯の海浜浸透水挙動と砕波形式の関係, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1206-1210.  
 Precht, E. and M. Huettel (2004): Rapid wave driven advective pore water exchange in a permeable coastal sediment, J. Sea Res., Vol. 51, pp. 93-107.