

透水層の位置と長さが間隙水浸出流速に及ぼす影響

酒井 哲郎*・間瀬 肇**・後藤 仁志***・中西 隆****

1. ま え が き

最近海浜安定工法の一つとして、砂浜内に透水層を設置して砂浜内からその表面への間隙水の浸出流速を減少させる工法が提案されている(加藤, 1996)。その海浜安定化の機構としては、長周期波などによる砂浜内の内部水面の上昇を透水層によって阻止し、その結果浸出流速が減少することが考えられている。この機構に関しては、既に数値計算によってシミュレーションする手法も提案され、現地観測結果(柳嶋ら, 1995)に適用されている(佐藤ら, 1995)。しかしより一般的に透水層の位置や長さの効果を議論した例はない。ここでは新たに波浪による砂浜内での間隙水の流動の数値計算モデルを開発し、透水層の位置および長さの浸出流速への影響を明らかにし、透水層工法の実用化への参考となることを目的としている。

2. 基礎式と斜面上での変動水圧

(1) 基礎式

これまでも砂浜内の間隙水の流動に関しては多くの数値計算モデルが提案されている。まず現象を定常か非定常のいずれと考えるかで分けられる。波浪の1周期内での変化を議論する場合には非定常として扱うが、佐藤ら(1995)のモデルは多孔質媒体内の連続式とダルシー則より得られる赤井ら(1977)の基礎式を用いている。この場合には地盤骨格の変形は無視され、有効応力の変動は計算出来ない。地盤骨格の変形や有効応力の変動は、波浪による砂浜内の間隙水の流動の現象においては第一義的に重要とは考えられないが、その適用性をより一般的にする目的で、ここでは地盤骨格の変形も考慮したモデルを用いる。

具体的には、間瀬ら(1991)が波浪によるケーソン防波堤の基礎地盤内での間隙水圧、骨格変位および有効応力変動を数値計算によって求めた際に用いた Biot (1941)

の圧密理論を用いた。従属変数は、変動間隙水圧と地盤骨格変位である。

(2) 斜面上の変動水圧

ケーソン防波堤の基礎地盤の場合には、地盤は常に海面下にあるが、透水層を設置する砂浜の場合は砂浜の一部は海面上にある。従って砂浜内部に自由水面が存在する。間瀬ら(1992)はケーソン防波堤の計算モデルを捨石防波堤の内部およびその基礎地盤の計算に拡張した際、図-1に示すような変動水圧を斜面上で与えた。

すなわち水面が静水面より上の場合(図の(b))は、水面上では0、水面下静水面上では斜面上の水面の高さに比例、静水面以下では静水面上の水位に比例すると仮定した。また水面が静水面より下の場合(図の(a))は、静水面上では0、静水面下水面下では斜面の深さに負号を付けたものに比例、水面下では水位(静水面上の、値は負)に比例すると仮定した。

これは、以下の様考えたことと同じである。すなわち、静水状態では間隙水圧は静水面下ではその深さに比例し、静水面上では0とした。一方波浪下では捨石防波堤前面斜面には、水面上では0、水面下では静水面上の水位に斜面の深さを加えたものに比例する水圧が加わると考

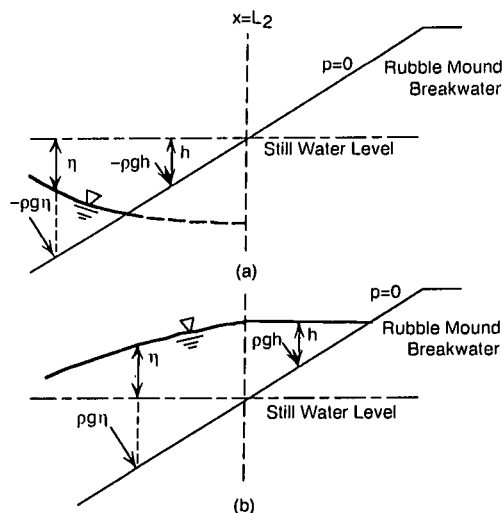


図-1 間瀬ら(1992)が用いた斜面上の変動水圧

* 正会員 工博 京都大学教授 工学研究科土木工学専攻
 ** 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所
 *** 正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科土木工学専攻
 **** 工修 大成建設

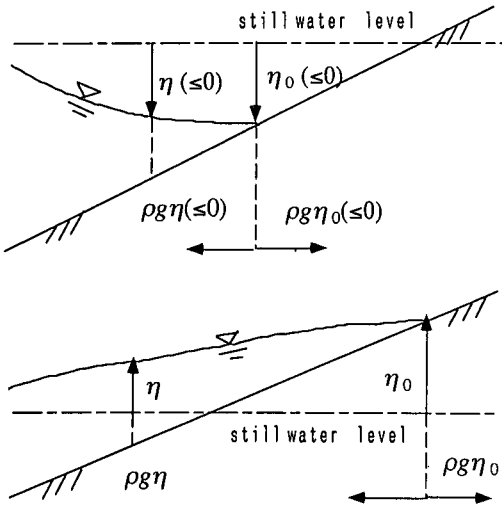


図-2 本研究での斜面上の変動水圧

えたことと同じである。

この考えでは、斜面上での水圧は、水面上の場合は0、水面下の場合は正の値をとることになる。内部の水面も水圧が0となる高さを連ねると決定出来るが、実際にはその高さを決める精度は低い。

そのためここでは佐藤ら(1995)と同様、赤井ら(1977)の考えにならない、静水状態では間隙水圧は静水面下の深さに比例すると仮定した(静水面上では負)。一方波浪下では捨石防波堤前面斜面には次のような水圧が加わるとする。すなわち水面下では、静水面上の水位に斜面の深さを加えたものに比例すると仮定する。水面上では、時々刻々の汀線の静水面上の高さに斜面の深さを加えたものに比例する。従って水面上では水圧は負になる。この場合には内部の水面の高さは間隙水圧が正から負に変化する高さとして定義でき、精度よく決定出来る。

静水圧を差し引いた変動水圧は、図-2に示すように、水面下では静水面上の水位に、また水面上では時々刻々の汀線の静水面上の高さに比例することになる。

3. 砂浜、透水層および波浪

ここでは柳嶋ら(1995)の現地観測結果を念頭に置いて、その場合の砂浜と波浪を簡単にした状況を考える。なお既に佐藤ら(1995)は、同様のことを行っており、しかも波浪そのものも数値計算し、砂浜内の間隙水の流動の計算と斜面上で接続させている。ここでは透水層の位置及び高さの効果を検討することが目的のため、波浪は簡単な斜面上の解析解を与えることにする。

砂浜は、図-3に示すように、底辺312 m、高さ10.4 m、斜面勾配1/30の直角三角形とし、その下辺は不透過な境界とする。実際の計算は間瀬ら(1991)と同様の有限要

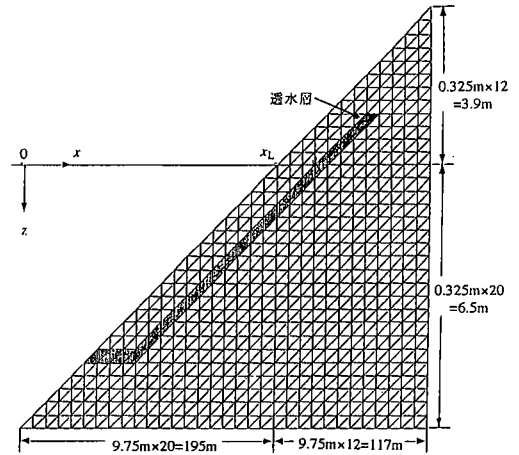


図-3 砂浜、透水層およびその要素分割

素法を用いた。その要素分割も図に示している。三角形要素の底辺は9.75 m、高さは0.325 mである。静水時の砂浜前面水深は6.5 mである。Biot (1941)の式中の土質定数は砂地盤の平均的な値を用い、ポアソン比は0.33、間隙率は0.28、せん断弾性係数は $1.5 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 、間隙水の有効弾性係数は $1.0 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 、透水係数は $1.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ とした。

透水層は図-3に示すものを基本とした。砂浜斜面表面から約1 m下に厚さ約30 cmで、静水面上1.3 mから静水面下約4.9 mにわたって設置した。柳嶋ら(1995)の現地実験では透水層下部は排水管に接続して排水口を沖側に設置しているが、ここでは簡単のために透水層下端を水平に曲げ、斜面表面に出している。傾斜部の長さは約185 m、水平部は約40 mである。透水係数は $1.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ とした。

斜面上の波浪については、簡単のため非現実的ではあるが、式(1)で与えられる斜面上の重複波の解析解を

$$\eta(x, t) = H \left(\frac{\pi^2 \omega^2 x_L}{sg} \right)^{1/4} J_0 \left(2\omega \sqrt{\frac{x_L - x}{sg}} \right) \sin \omega t \cdots (1)$$

用いた。ここで ω は角周波数($\equiv 2\pi/T$)、 x_L は静水汀線の x 座標(図-3)、 s は斜面勾配、 J_0 は0次のベッセル関数である。周期 T は12 s、 H は1.0 mとした。内部水面の上昇は、ここでは簡単に波浪による水位上昇によるとし、合田の式に基づいて与えた。実際の水位は、式(1)による水位と波浪による水位上昇の和として与えた。

境界条件は、斜面上では図-2の変動水圧を与え、底面では不透過の条件を、波浪の影響を受けない砂浜背後では変動水圧、骨格変位とも条件を与えなかった。計算は2周期にわたって1/24周期毎に行い、安定した2周期目の結果を用いる。

4. 透水層の効果

図-4は、透水層のない場合と図-3の基本形の透水層が設置された場合の、汀線付近に波の峯が到達した後の重複波の水位が0となり水位が波による水位上昇のみになった位相 ($t = T/2$) と、さらに位相が進んで汀線付近の水位が静水面下になる位相 ($t = 18T/24$) での、砂浜内部の間隙水の流速ベクトルを示している。鉛直座標を水平座標の10倍に拡大しており、透水層内の流速は大きすぎるため示していない。図中左端に示した単位ベクトルは、 $2.5 \times 10^{-2} \text{ mm/s}$ である。流速そのものはかなり小さい事が分かる。

一般に、透水層がない場合、斜面上の水位が静水面下になっている部分では流速ベクトルは鉛直下方、静水面下になっている部分では鉛直上方になる。ただし汀線付近に波の峯が到達した後の重複波の水位が0となり水位が波による水位上昇のみになった位相 ($t = T/2$) では、最上図に示すように汀線付近では鉛直上方を向く。

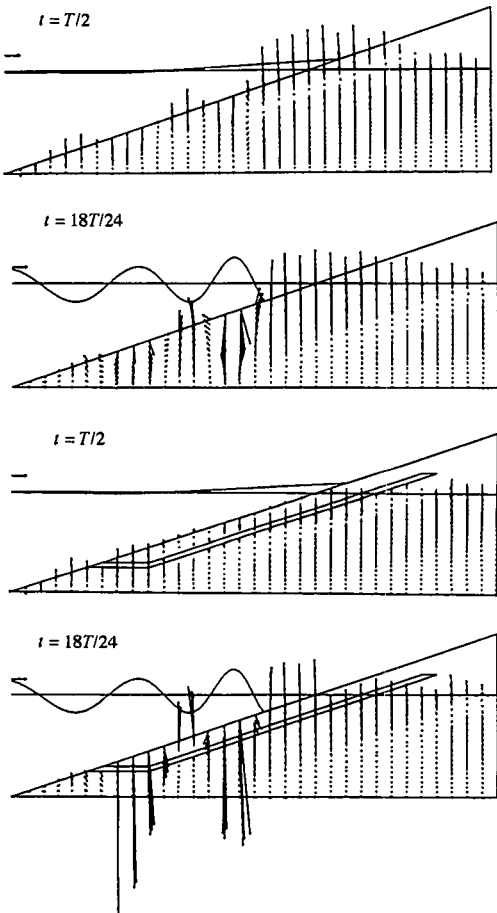


図-4 間隙水の流速ベクトル

一方透水層を設置すると、汀線付近に波の峯が到達した後の重複波の水位が0となり水位が波による水位上昇のみになった位相 ($t = T/2$) では流速ベクトルが汀線付近では鉛直下方を向き、透水層による間隙水の没出を抑制していることが分かる。

5. 透水層の位置の影響

透水層の砂浜表面からの深さによって、間隙水の流速とくに表面からの浸出の程度がどのように変わるかを検討するため、透水層の位置を、図-3の基本形のままで、2要素分水平方向に平行移動させた。表面に近付けた場合は表面からの深さが約30 cmに、遠ざけた場合は深さが約1.6 mとなる。

地形変化は汀線付近で激しいと考え、ここでは斜面上静水汀線から1要素分すなわち約30 cm下方の位置での、間隙水の浸出速度 f_z の位相変化を図-5に示している。縦軸の負の値が浸出を意味する。 $t=0$ は、汀線付近に波の谷が到達した後の重複波の水位が0となり水位が波による水位上昇のみになった位相である。この位相では静水面下約30 cmの斜面上の点は水面下にあり、その後波の峯が到達した後再び水位が低下して水面より上になるためそこで図が終わっている。

図から分かるように、いずれの場合も斜面表面から没出するのはわずかの時間であるが、透水層がない場合に比べて、表面下1.6 m、1.0 mと透水層の深さが浅くなるにつれて浸出速度が減少するとともに浸出時間も短くなることが分かる。ただし深さが0.3 mとなると浸出時間は短くなるものの速度はむしろ増加することが分かる。

図-6は、内部水面の位置を示している。汀線付近に波の峯が到達した後の重複波の水位が0となり水位が波による水位上昇のみになった位相 ($t = T/2$) と、さらに位相が進んで汀線付近の水位が静水面下になる位相 ($t = 15T/24$) での、深さ1.6 mに透水層がある場合および深さ0.3 mにある場合である。 $t = T/2$ では深さ1.6 mに透水層がある場合は斜面表面付近の内部水面は透水層がない場合と同様沖向きに水位が低下していて間隙水は没

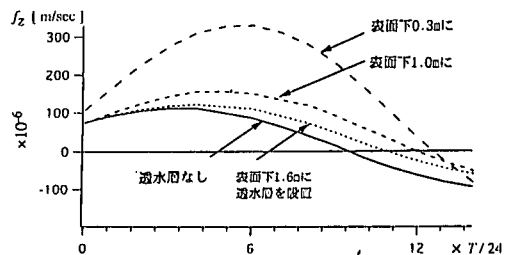


図-5 透水層の位置による間隙水没出流速の変化(静水汀線下約30 cm)

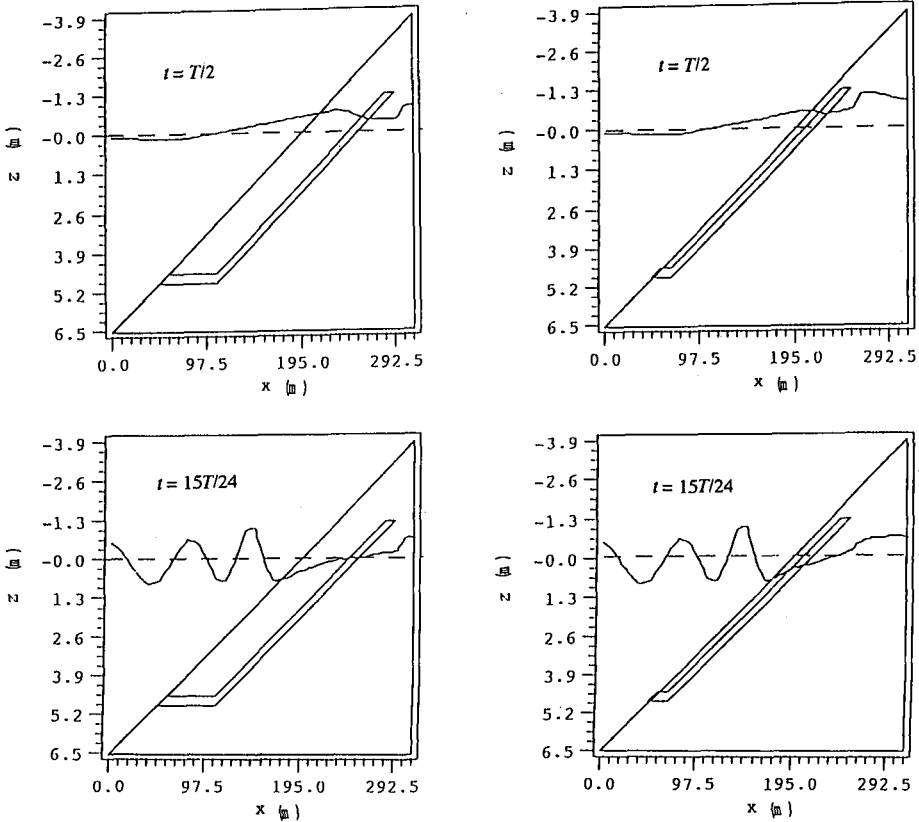


図-6 透水層の位置による内部水面の変化

出するが、深さ 0.3 m に透水層がある場合は岸向きに水位が低下して間隙水は未だ浸出していない。しかし $t = 15T/24$ ではいずれの場合も斜面表面付近の内部水面は沖向きに低下しており間隙水は浸出しているが、その勾配は深さ 0.3 m に透水層がある場合の方がわずかに急でその分流速も速いと考えられる。

6. 透水層頂部高さの影響

次に透水層の長さ特にその頂部の高さの影響を調べるために、その基本形(図-3)の頂部を静水面まで下げた場合およびさらに下げて静水面下約 1.3 m とした場合について、斜面上の静水汀線位置での間隙水の浸出速度の位相変化を図-7 に示す。

図には透水層のない場合および基本形の場合の結果も示している。図から明らかに、透水層の設置された場合は、いずれの場合もあまり差はなく、透水層のない場合に比べて、浸出流速およびその時間ともに減少している。特に頂部を静水面下約 1.3 m と下げた場合でも、静水汀線での浸出速度を効果的に抑制している。

図-8 は同じく静水汀線から約 30 cm 上方の斜面表面での浸出速度の位相変化を示している。この位置では、

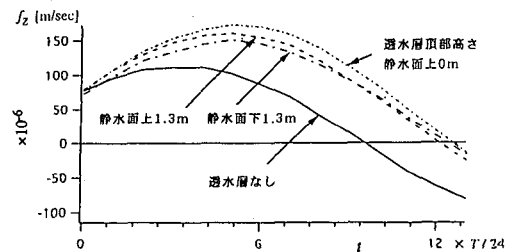


図-7 透水層頂部高さによる間隙水浸出流速の変化(静水汀線位置)

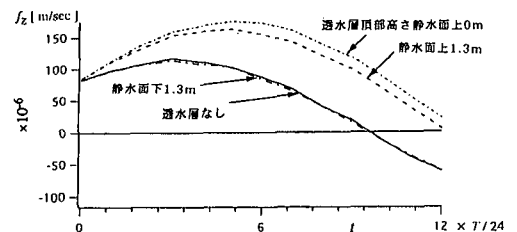


図-8 透水層頂部高さによる間隙水浸出流速の変化(静水汀線上約 30 cm)

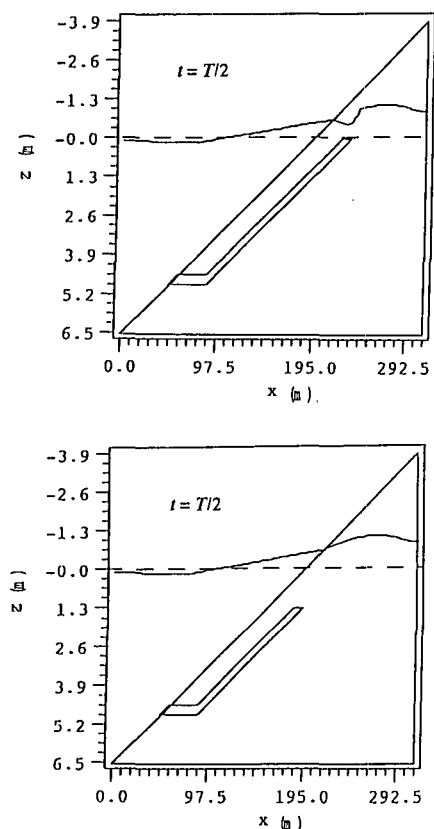


図-9 透水層頂部高さによる内部水面の変化

頂部を静水面下約 1.3 m と下げた場合は効果がなく透水層のない場合と同じ結果となっている。このように頂部の高さより下で透水層の効果が無いわけではなくある程度上方まで効果が発揮されるが、頂部高さが低いほど効果の生じる範囲が低下することが分かる。

図-9 は、汀線付近に波の峯が到達した後の重複波の水位が 0 となり水位が波による水位上昇のみになった位相 ($t = T/2$) で、頂部を静水面まで下げた場合およびさらに下げて静水面下約 1.3 m とした場合の内部水面の位置を示している。頂部を静水面まで下げた場合は斜

面表面付近の内部水面は沖向きに高くなっており間隙水は浸出しないが、静水面下約 1.3 m とした場合の透水層がない場合とほぼ同じ内部水面形となって沖向きに低下しているため、静水汀線より上では透水層の効果を発揮出来ないものと考えられる。

7. あとがき

既に 4. で述べたように、今回の計算では現地の条件で計算したにも拘わらず、計算された間隙水の流速は高々 1 mm/s のオーダーであり、斜面上の波による水粒子速度に比較してはるかに小さい。同様の計算を行った佐藤ら (1995) の結果でも計算された間隙水の流速は同程度である。このことは、透水層の侵食防止機能として考えられている引き波時の吸水による斜面上の流下速度の減少はあまり現実的ではないことが考えられる。従ってもう 1 つの機構として、浸出速度の低下による砂浜表面付近の砂層内の鉛直有効応力の増加が引き波による砂層の侵食をより少なくしていることが可能性として考えられる。

参考文献

- 赤井浩一・大西有三・西垣 誠 (1977): 有限要素法による飽和—不飽和浸透流の解析, 土木学会論文報告集, 第 264 号, pp. 87-96.
- 加藤一正 (1996): 透水層埋設による海浜保全, 土木学会誌 2 月号, pp. 18-21.
- 佐藤勝弘・Patricia G. Pena-Santana・金 圭漢・竹内聖一 (1995): 透水層埋設による前浜付近の波浪, 浸透流予測計算, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 731-735.
- 間瀬 肇・川迫郁夫・酒井哲郎 (1991): 混成堤基礎地盤の波浪応答に関する研究, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 821-825.
- 間瀬 肇・坂本雅信・酒井哲郎 (1992): 捨石防波堤内部と基礎海底地盤の波浪応答に関する研究, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 856-860.
- 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速と前浜地形変化, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 726-739.
- Biot, M. A. (1941): General theory of three-dimensional consolidation, J. Appl. Phys., Vol. 12, pp. 155-164.