

自然海浜安定化に関する帯状透水層の平面配置

藤 間 聡*・宮 武 誠**・山口 俊哉***・川 森 晃****

透水性に優れた層を砂浜内に埋設し、地下水位を低下させる透水層工法は、天然の砂浜海岸と同様な海浜利用及び環境を保持しつつ海浜保全を行う有効な工法である。本研究は、沿岸方向に帯状に埋設される透水層工法の最適な平面配置に関して、特に荒天時波浪を対象として検討したものである。帯状透水層の層幅や設置間隔を変化させた模型実験及び数値解析を用いて、埋設密度や単位長本数と侵食軽減量との関係に加え、前浜地下水の水理特性を明らかにした。この結果、荒天時における帯状透水層の平面配置は、埋設密度を 83% とし、単位長本数を 0.83 本/m とするのが最適であることを見出した。

1. はじめに

透水層埋設海浜は、波の遡上により浸透した海水を透水層に導き沖側に自然排水させ、前浜侵食を軽減させる地下水位低下による海浜保全工法である。透水層は砂浜内に埋設されるため、従来の海岸保全工法に比べ、漂砂を遮断することなく、天然の砂浜海岸と同様な海浜利用及び環境を保持しながら汀線前進を促進させる有効な工法である。この透水層の断面配置に関して、著者ら(1999)は透水層埋設による前浜浸透流特性や海浜保全効果を検討し、層厚、設置深や排水位置などの最適諸元について考察してきた。一方、透水層の平面配置に関しては、加藤ら(1999)による帯状透水層の埋設密度に関する論文を除いて、帯状透水層の層幅や設置間隔の規模を詳細に検討したものは見当たらない。

本研究では実海域への適用に向け、特に荒天時の波浪を対象とした帯状透水層の平面配置に関する模型実験及び数値解析を行い、帯状透水層埋設による侵食軽減機構を明らかにする。更に埋設密度及び単位長本数といった特性量と侵食軽減量との関係を見出し、前浜地下水の水理特性との両面から、荒天時における帯状透水層の最適な層幅及び設置間隔を検討するものである。

2. 帯状透水層の平面配置に関する海浜変形実験

2.1 実験条件

本研究では、実験に用いる砂浜模型の底質材料や入射波の波浪条件等を北海道開発局土木試験所編「日高・胆振海岸における海岸侵食の現況とその成因について」(1970)に基づき決定する。図-1は、苫小牧港から南東に 40 km 離れた富浜海岸で観測された 1966~1969 年の汀線経時変化を示す。同海岸の汀線は、夏期において一時的に後退するが、冬期になると前進し砂浜が回復するビーチサイクルが成り立っている。しかし、毎年 9~11

月に生起する異常気象による荒天時波浪が、汀線を大きく後退させ、同海岸は年々侵食される傾向にあることが認められる。

本実験では、この荒天時波浪による海岸侵食現象を模型実験で再現するため、スネーク式ピストン造波機を有する長さ 20 m、幅 5 m、高さ 70 cm の水槽内に縮尺 1/40 の砂浜模型を製作する。模型実験に用いる底質材料は砂浜への浸透を考慮し、透水係数に関する相似律を用いて底質砂粒径を決定する。始めに現地の平均的な前浜域の中央粒径 $d_{50}=0.36$ mm に対する透水係数 K を、下記の Kozeny 式を用いて算出する。

$$K = \frac{C}{36\nu} \frac{\lambda^3}{(1-\lambda)^2} d_m^2 \dots\dots\dots (1)$$

次に、砂浜模型の底質材料は、透水係数の縮尺 $(1/40)^{1/2}$ より、中央粒径 $d_{50}=0.1$ mm の珪砂に決定する。ここに、 d_m は平均径、 λ は空隙率、 C は形状定数、 ν は動粘性係数であり、上式中の $C/36\nu$ の値は Donat の実験値を用いる。

荒天時の波浪条件に関しては、1966~1969 年の現地における異常波浪時の詳細な観測が行われていない。そこで本実験では、1970 年 9 月に苫小牧港で観測された異常波浪時の有義波を入射波 I、最大波を入射波 II として準用する。ここに、入射波 I と II に関する観測値とフルード則に従った模型実験の値を表-1 に示す。実験に用いる沖波波高及び周期は、表中 2 種の入射波に関する模型実験の値とし、規則波を直角入射させる。波作用時間は

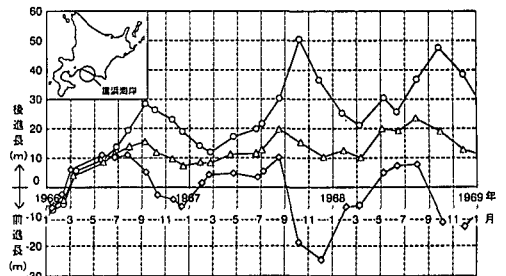


図-1 富浜海岸の汀線経時変化

* フェロー 工 博 室蘭工業大学 教授 建設システム工学科
 ** 学生会員 工 修 室蘭工業大学大学院 建設工学専攻
 *** 学生会員 室蘭工業大学大学院 建設システム工学専攻
 **** 正 会 員 博(工) (株)アルファワークスコンサルタンツ

予め行った自然海浜に関する実験より、前浜地形が平衡断面に達する4時間とする。

砂浜模型の海底勾配は、荒天時波浪により汀線を急激に後退させる侵食型海岸を再現するため、現地の平均海底勾配1/150に対し、1/10に調整する。

2.2 実験装置及び方法

砂浜模型内に埋設する透水層は、フィルタ材により被覆した中央粒径10mmの砕石からなり、その最下端部には塩化ビニール製パイプを用いて排水部を構成する。この構造を有する透水層は、沿岸方向に層幅と設置間隔を有し帯状に埋設される。ここに帯状透水層の詳細な平面配置を図-2に示す。本研究では、帯状透水層の層幅 b や設置間隔 D を決定するにあたり、下記の2つの特性量を用いて検討する。

①埋設密度：透水層を設置する沿岸長 L に対する透水層の占める割合を示し、図中の記号を用いて下記の式で表す。

$$P.D(\%) = (n \cdot b / L) \times 100 \dots\dots\dots (2)$$

埋設密度は、透水層なしの場合と設置間隔 D を固定し、33.3%、66.7%、83%と変化させた表-2中のCase-1~8について検討する。

②単位長本数：透水層を設置する沿岸長1mあたりに埋設した透水層の設置本数を示し、図中の記号を用いて下記の式で表す。

$$L.P(\text{本/m}) = n / L \dots\dots\dots (3)$$

単位長本数は、埋設密度を66.7%、83%と固定し、表-2中のCase-9~16のように変化させる。これより①の埋設密度のみでは検討できない透水層の層幅 b は、②の設置本数 n により規定される。

前浜域の波高分布、透水層内の岸沖方向地下水位分布、排水管内流速の時系列は、それぞれ容量式波高計、水位計、電磁流速計により同期させて測定する。また、前浜地形変化は沿岸方向に3測線設け、各測線ごとに砂面計を岸沖方向に移動させて計測する。侵食量は、得られた地形変化から台形公式を用いて算定する。

2.3 埋設密度による侵食率の変化

図-3は、侵食率と埋設密度の関係を示す。侵食率とは、透水層なしの場合の侵食量に対する透水層埋設時の侵食量の割合を示す。同図は、入射波I及びIIを作用させた場合の結果を表示している。侵食率は、両波浪条件下において埋設密度の増加に伴い軽減する。この侵食軽減効果は埋設密度が66.7%以上で顕著に表れ、埋設密度83%時では透水層なしの場合に比べ、侵食量を50~60%程度に抑制することができる。この結果、荒天時波浪条件下において、十分な侵食軽減効果を得るためには、埋設密度を66.7%より大きめに設定しなければならない。

一方、入射波IとIIとの間には、埋設密度33.3%を超

表-1 入射波の波浪条件

		波高 H_0 (m)	周期 T_0 (sec)	波形勾配 H_0/L_0
入射波 I	現地	4.10	8.10	0.040
	模型	0.10	1.28	0.040
入射波 II	現地	6.10	7.00	0.079
	模型	0.15	1.10	0.079

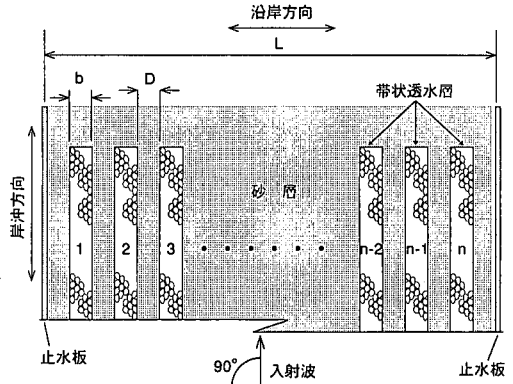


図-2 帯状透水層の平面配置

表-2 帯状透水層の埋設条件

ケース	沖波波形勾配 H_0/L_0	透水層の有・無	埋設密度 $P.D(\%)$	単位長本数 $L.P(\text{本/m})$
Case-1	0.040	なし	—	—
Case-2	0.040	あり	33.3	3.33
Case-3	0.040	あり	66.7	1.67
Case-4	0.040	あり	83	0.83
Case-5	0.079	なし	—	—
Case-6	0.079	あり	33.3	3.33
Case-7	0.079	あり	66.7	1.67
Case-8	0.079	あり	83	0.83
Case-9	0.040	あり	66.7	0.83
Case-10	0.040	あり	66.7	6.67
Case-11	0.040	あり	83	2.5
Case-12	0.040	あり	83	7.5
Case-13	0.079	あり	66.7	0.83
Case-14	0.079	あり	66.7	6.67
Case-15	0.079	あり	83	2.5
Case-16	0.079	あり	83	7.5

えた範囲で侵食率に明確な差異が認められる。この差異は埋設密度の増加に伴い増大し、最大差は15%に達する。透水層による侵食軽減効果は、波形勾配の小さい入射波Iの場合に対して、有効に働くことが認められる。図-4は透水層なしの場合と埋設密度83%時における前浜地下水位の岸沖方向分布を示す。図中の(a)及び(b)はそれぞれ入射波I、IIを作用させた場合を表示している。透水層を埋設した場合、地下水位は両波浪条件下においてほぼ静水位まで低下し、両波浪条件による地下水位の低下位置には明確な差異が見られない。しかし、透

水層なしの状態を基準とした埋設後の地下水位低下量は、入射波 I において大きくなる。この時の排水管内の平均流速は入射波 II の 0.53 cm/s に対し、入射波 I では 2.6 倍の 1.31 cm/s に達する。これより波形勾配が小さい入射波 I において、透水層の排水効果が有効に働き、地下水位低下量が増大した結果、入射波 II よりも前浜域の侵食を抑制することが認められる。

2.4 単位長本数による侵食率の変化

図-5 は、入射波 I を作用させた場合の侵食率と単位長本数の関係を示す。図中には埋設密度が 66.7%, 83% の場合を表示している。侵食率は、埋設密度が同一であっても設置する透水層の本数によって大きく変化する。侵食率は、単位長本数を減じて埋設すると減少する。各埋設密度において、侵食率が最小となる単位長本数は図中より、埋設密度 66.7% で 1.66 本/m, 83% で 0.83 本/m 程度となる。この結果、埋設密度 83% では 66.7% の場合に比べ、設置本数を 50% 減じることができるのに加え、侵食量を 20% 程度抑制させることができる。

図-6 は、入射波 II 作用時の埋設密度 66.7%, 83% における侵食率と単位長本数の関係を示す。入射波 I に比べ侵食率の全体的な増加が見られるが、侵食率は入射波 I の場合と同様に、単位長本数を減じると減少する。侵食率を最小にする単位長本数は、両埋設密度でともに同様な 0.83 本/m 程度となる。

以上の結果、荒天時波浪条件下での透水層の埋設密度及び単位長本数は、海浜保全効果を考慮すると、それぞれ 83%, 0.83 本/m とするのが最適である。

3. 帯状透水層埋設による前浜浸透流に関する数値解析

上述の実験においては、異なる波浪条件下による透水層の侵食軽減効果が岸沖方向の地下水位低下量に起因することを明らかにした。しかし、埋設密度や単位長本数による地下水位の岸沖方向分布には顕著な差がなく、両特性量による侵食率の変化を説明する明確な水理特性を把握することができなかった。本研究では、両特性量による水理特性を詳細に検討するため、遡上波と浸透流を接続させた数値解析を行い、帯状透水層埋設による地下水位分布特性と侵食軽減効果の関係を解明する。

3.1 遡上波に関する基本方程式

前浜浸透流と接続する砂浜斜面上の遡上波に関する基本方程式は、砂浜内への浸透・浸出を考慮した下記の非線形分散長波方程式を用いる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

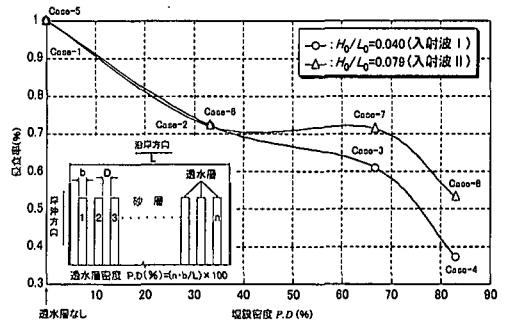


図-3 埋設密度による侵食率の比較

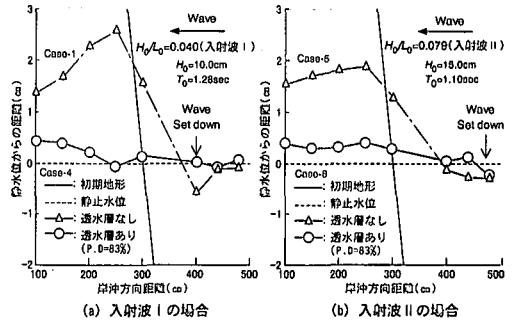


図-4 波浪条件による岸沖方向の地下水位分布

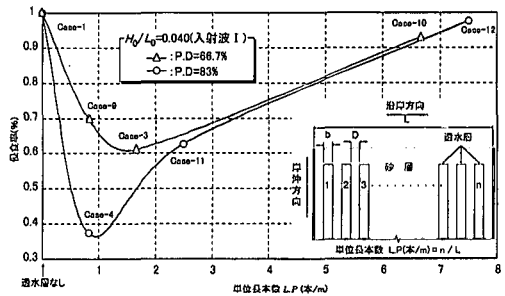


図-5 単位長本数による侵食率の比較 (入射波 I)

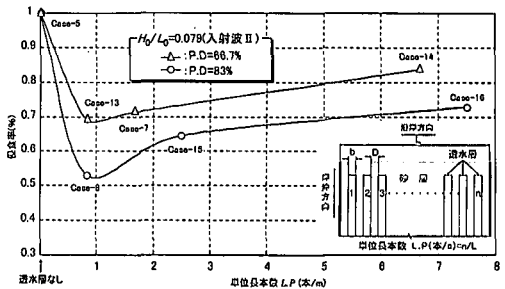


図-6 単位長本数による侵食率の比較 (入射波 II)

$$= \frac{d^2}{3} \left(\frac{\partial^3 M}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3 N}{\partial x \partial y \partial t} \right) \dots\dots\dots (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ & = \frac{d^2}{3} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x' \partial y' \partial t} + \frac{\partial^2 N}{\partial y'^2 \partial t} \right) \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

ここに、 x' 及び y' は図-7において、静水位上の G 点を原点とする岸沖方向及び沿岸方向にとった座標系、 η は水面変動量、 M, N はそれぞれ x' 及び y' 軸方向の線流量、 q は地下水の浸透・浸出流束、 $D (= d + \eta)$ は全水深、 d は静止水深、 g は重力加速度である。

3.2 前浜浸透流に関する基本方程式

前浜浸透流の基本方程式には、飽和—不飽和浸透流方程式を用いる。図-7 において浸透流に関する座標系は、E 点を原点とする岸沖方向に x 軸、沿岸方向に y 軸、鉛直上向き方向に z 軸として、下記の方程式を得る。

$$(u, v, w) = -Kk_r(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y}, \frac{\partial h}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (7)$$

$$\begin{aligned} (S_w S_s + C(\theta)) \frac{\partial h}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(Kk_r(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(Kk_r(\theta) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(Kk_r(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

ここに、 h はピエゾ水頭、 u, v, w は x, y, z 軸方向の浸透流速、 K は飽和透水係数、 $k_r(\theta)$ は透水係数比、 S_w は飽和度、 S_s は比貯留係数、 $C(\theta)$ は比水分容量、 θ は毛管水頭 ψ に対する水分量を表す。不飽和領域内の比水分容量及び透水係数比の算定に必要な $\theta-\psi$ 関係は、土柱法より求めた実験砂に関する水分保持特性曲線の値を用いる。透水係数比は、下記に示す一般化 Kozeny の式により算定する。

$$k_r(\theta) = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^n \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 θ_s は飽和水分量、 θ_r は残留水分量であり、べき数 n は 3.0 を採用する。

3.3 計算方法及び境界条件

遡上波ならびに浸透流に関する基本方程式 (4) 式から (8) 式の計算には、差分法を用いる。 x' 及び y' 軸方向の線流量 M, N は、(5) 式及び (6) 式を ADI 法により計算し、水面変動量 η は得られた各軸方向の線流量を用いて、(4) 式を陰的に差分化させて求める。また、ピエゾ水頭 h は、(8) 式を 1 次元化して計算する LOD 法により行う。砂層内の地下水位は、圧力水頭が零となる点を連ねた線として計算する。浸透流速 u, v, w は得られた水頭値を使用して、(7) 式を中央差分化させて求める。

図-7 に示す遡上波と浸透流に関する境界条件は、以下のように与える。

①遡上波と接する境界 (AF 面)：斜面上の全水深 D を圧

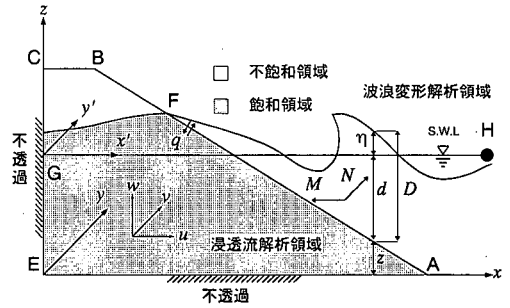


図-7 解析座標系及び境界条件

力水頭とし、位置水頭 z との和を斜面上の浸透流格子に与える。また、(4) 式中の q は、砂層内地下水位と遡上波先端水位が常に連続するものとし、下記の浸透・浸出流束を与える。

$$q = -S_y \frac{\partial \eta}{\partial t} \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 S_y は比浸出量を表す。

②遡上波と接していない境界 (CF 面)：遡上波先端 (F 点) からの鉛直距離を負の圧力水頭として、位置水頭 z との和を斜面上の浸透流格子に与える。

③底部及び左端の境界 (AE・CE 面)：境界と法線方向の浸透流速成分を零とする。

④入射波境界 (H 点)：入射波は実験波と同一の波高及び周期を正弦波として与える。

3.4 帯状透水層埋設における地下水位分布特性

図-8 は、数値解析より得られた地下水位空間分布を示す。図中には、入射波 I 作用時における埋設密度 83% の場合を表示している。透水層を埋設した場合、地下水位は透水層埋設部で低下し、その間の砂層部で上昇する。従って、地下水位は沿岸方向に波状分布となり、透水層とその間の砂層には水位差が生じる。この水位差は、透水層の集水効果に寄与する沿岸方向の浸透流を発生させ、砂層内全域の地下水位低下を促進している。この地下水位低下により前浜侵食が軽減する要因は、以下の 2 つの事項によるものと推察される。

①地下水位低下は、前浜砂層内の飽和領域を減少させ、浮遊砂の発生を軽減する。

②前出の図-4 において、地下水位と沖側の平均水位 (同図中の ↓) との水位差が減少するため、浮遊砂の沖側流出を抑制する。

本解析では埋設密度や単位長本数による侵食軽減効果を、初期汀線より 200 cm 後浜地点の沿岸方向地下水位分布 (図中の鉛直面 A) を用いて詳細に検討する。

3.5 埋設密度の変化に伴う地下水位分布特性

図-9 は、図-8 中の鉛直面 A における沿岸方向地下水位分布を示す。図中には、入射波 I 作用時の透水層な

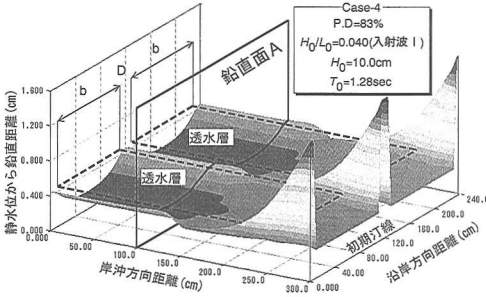


図-8 带状透水層埋設における地下水空間分布

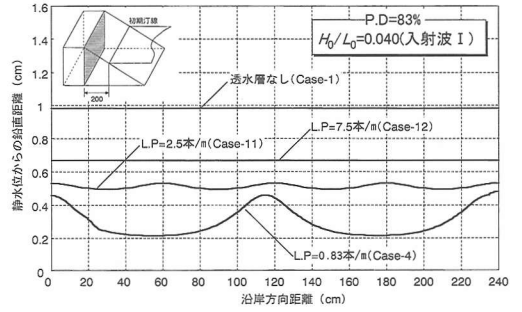


図-10 単位長本数の変化に伴う沿岸方向地下水分布

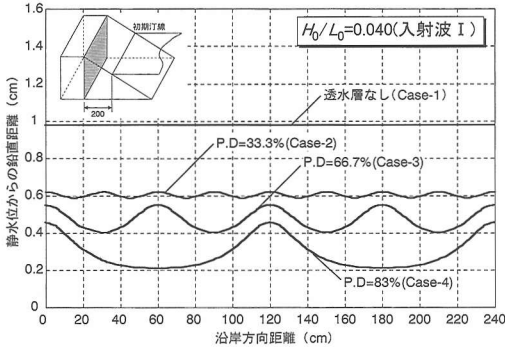


図-9 埋設密度の変化に伴う沿岸方向地下水分布

しの場合と設置間隔 D を固定し、埋設密度を $P.D.=33.3\%$, 66.7% , 83% と変化させた場合を表示している。透水層なしの場合、地下水位は、沿岸方向に均一に上昇する。透水層を埋設した場合、同一の設置間隔の条件下で埋設密度を増加させると、それに伴い透水層とその間の砂層に生じる水位差は増加し、その結果、透水層による沿岸方向の集水効果は高まる。以上の水理特性を考慮すると、荒天時波浪条件下において侵食を抑制するのに十分な集水効果を有するのは、埋設密度 83% となる。

3.6 単位長本数の変化に伴う地下水水位分布特性

図-10 は入射波 I 作用時における透水層なしの場合と埋設密度を 83% と固定し、単位長本数を変化させた場合の沿岸方向地下水水位分布を示す。埋設密度を固定し設置本数を変化させた結果、同一の埋設密度にも関わらず地下水位の沿岸方向分布には明確な差異が認められる。透水層とその間の砂層に生じる水位差は、単位長本数を

減じるに従い増加し、透水層による沿岸方向の集水効果は大きくなる。以上の結果、荒天時波浪条件下において単位長本数は 0.83 本/m とし、埋設密度は 83% にするのが最適である。

4. 結 論

本研究で得られた結論を要約すると下記の通りである。

- (1) 带状透水層埋設による地下水位の低下は、前浜砂層内の飽和領域を減少させ、浮遊砂の発生を抑制すると同時に、地下水位と平均水位との水位差を減少させ、浮遊砂の沖側流出の抑制する。
- (2) 带状透水層の埋設密度や単位長本数による侵食軽減効果は、沿岸方向の集水効果に寄与する透水層と砂層間の水位差に起因する。
- (3) 荒天時波浪条件下に透水層工法を適用する場合、海浜保全効果や水理特性を考慮すると、埋設密度は 83% とし、単位長本数 0.83 本/m とした带状透水層を埋設するのが最適である。

参 考 文 献

加藤一正・出口一郎・灘岡和夫・佐藤恒夫・山縣彦彦・佐藤幸夫・石本健治 (1999): 人工海浜への透水層埋設工法適用に関する検討, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 716-720.
 北海道開発局土木試験所 (1970): 日高・胆振海岸における海岸侵食の現況とその成因について, pp. 6-90.
 宮武 誠・近藤俊郎・藤間 聡・川森 晃 (1999): 透水層埋設による前浜付近の浸透流特性, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 706-710.