

地下水位低下工法による海浜安定化のメカニズムに関する一考察

福島雅紀*・西村仁嗣**・木村孝次***

1. 序 論

日本の海岸は全国的に慢性的な侵食問題を抱える現状となっている。近年の環境問題と相俟って、景観に配慮した海浜保全法として地下水位低下工法が注目されている。地下水位を低下させるいくつかの工法のうち本研究で対象としているのは、前浜の地下水を強制的にポンプアップすることにより、地下水位を低下させ海浜の安定化を図るものである。これまでにこの工法の効果を確認するために、いくつかの実験結果が報告されてきた(Machemehlら, 1975)。また、遡上波の戻り流れや碎波帯の流れの場に及ぼす影響も論じられているが(佐藤ら, 1995),以下に示す実験では地下水吸水に伴う砂の締め固めが重要な要因と考えられた。

本研究では、断面実験により前浜地下水位の状態が海浜変形に及ぼす影響を調べてきた(福島ら, 1996)。比較的細粒の砂を実験に用いたこともあって、実験の継続とともに吸水流量の減少が見られたが、海浜安定化の効果は持続された。そこで、砂の締め固まりと海浜過程の関連に目を向け、この現象について考察を加えた。その際、砂浜内部の状況を把握するために、浸透流の流況および間隙水圧の分布を数値計算により再現した。

2. 実 験

2.1 概 要

実験装置としては、全長17 m、幅0.1 m、高さ0.6 mの波浪水槽内に中央粒径0.14 mm、均等係数1.37の砂を用い、勾配1/20の砂浜を設けた。地下水位を測定するために、マノメータを用いた。マノメータは水槽底面から5 cm上方に、岸沖方向30 cmの間隔で34箇所に設置した。陸側地下水位を沖側の平均水位と独立に設定できるように、陸側の水槽は沖側とは分離してある。

実験では、地下水位の状態および沖波条件を制御して、波を作用させ始めてから1時間毎に海浜形状、地下水位、およびドレインから吸水している場合は吸水量を測定し

た。地形の測定間隔は5 cmである。実験は約5時間にわたって継続した。図-1に制御した地下水位の状態の概念図を示す。Case A, B, Cは陸側の地下水位が平均水面に対して、それぞれ高い、同じ、低い場合、Case D, Fはそれぞれ汀線直下、碎波点付近で水を吸水した場合に相当する。Case Eの地下水位が盛り上がっているのは、ドレインから砂中に水を吐き出(排水)した場合である。

沖波条件について整理すると、表-1のようになる。表最右列のCsは実験室における海浜プロファイルのタイプ分けを表す式 $H_0/L_0=C_s(\tan \beta)^{-0.27}(d/L_0)^{0.67}$ 中に現れる無次元定数である。ここで、 H_0 は沖波波高、 L_0 は沖波波長、 d は底質の粒径、 $\tan \beta$ は初期の海浜勾配を表す。以上の条件を組み合わせる実験が行われたが、Case Fに対してはNo. 2およびNo. 4、Case Eに対してはNo. 4の沖波条件のみを適用した。

2.2 実験結果

代表的な結果として、侵食型の沖波条件No. 2および堆積型の沖波条件No. 4の実験結果を示す。図-2およ

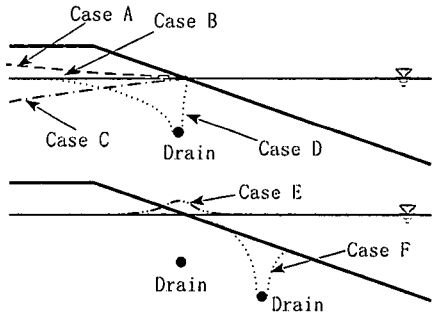


図-1 地下水位の状態

表-1 沖波条件

No.	波高(cm)	周期(s)	波形勾配	Cs
1	2.6	1.0	0.019	4.1
2	5.0	1.0	0.038	7.8
3	7.5	1.3	0.038	9.8
4	1.8	1.6	0.008	2.4

* 学生会員 工修 筑波大学大学院 工学研究科
** 正 会 員 工博 筑波大学教授 構造工学系
*** 学生会員 筑波大学大学院 理工学研究科

図-3 はそれぞれのケースについて、海浜形状の経時変化を地下水位の状態ごとに比較したものである。両図には、灰色および黒色の各線種で地下水位と地形の経時変化が示されている。図-2 の (b) と (c), (f) と (g) および図-3 の (b) と (c) とではそれぞれ吸水量が異なる。図-3 の (g), (h) の排水量は測定されなかったが、測定された地下水位により排水量の多少は判断された。

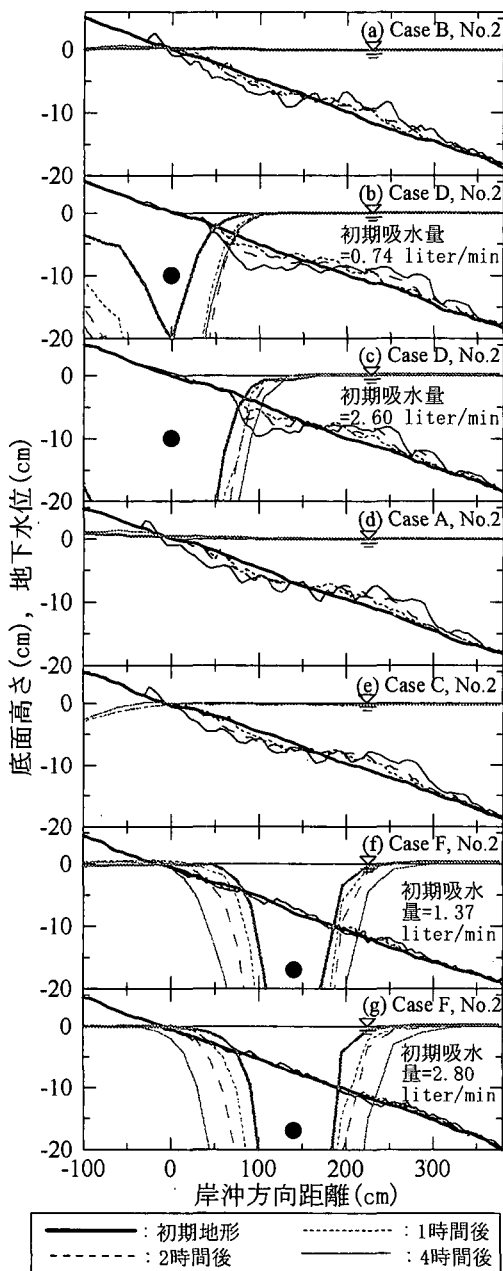


図-2 海浜形状および地下水位の経時変化
(沖波条件: No. 2)

図-4 は図-2, 3 において汀線直下もしくは砕波点付近で吸水を行った場合の吸水量の経時変化を示す。排水のケースについては水量の計測は行っていない。図-2 を

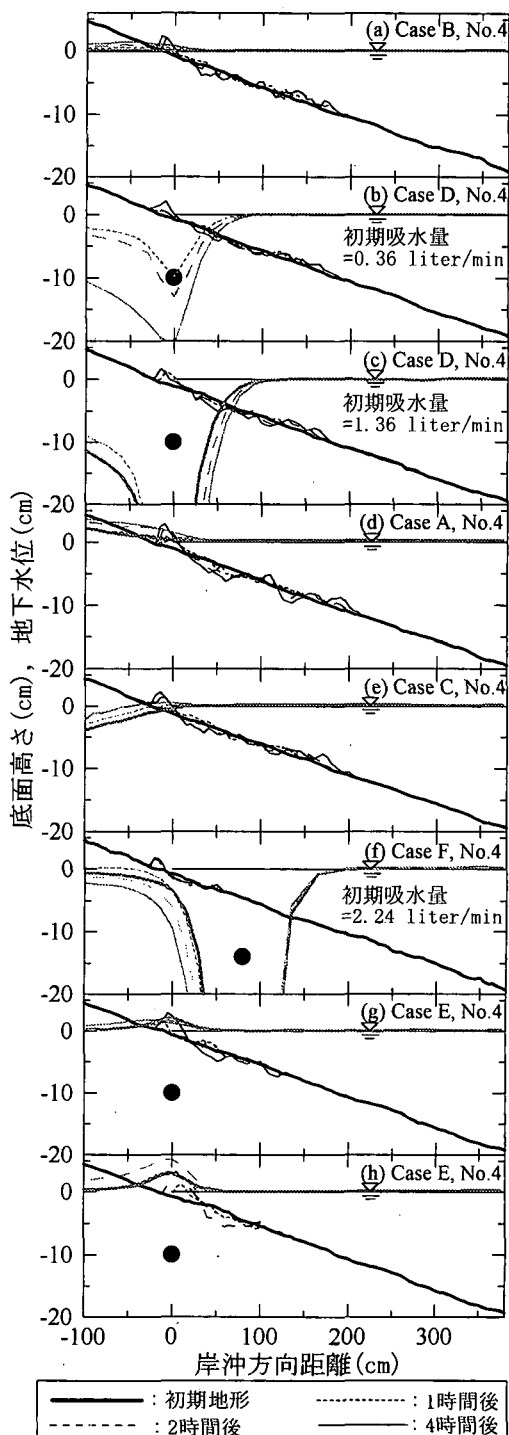


図-3 海浜形状および地下水位の経時変化
(沖波条件: No. 4)

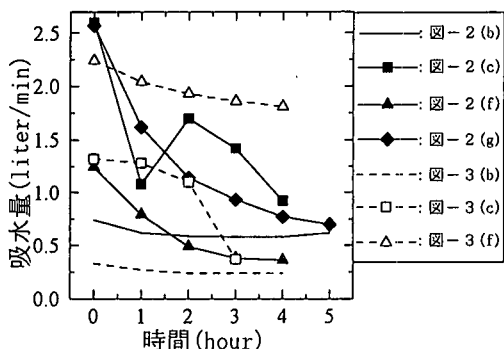


図-4 吸水量の経時変化

見ると、ドレインを汀線直下に設置して吸水した場合には(図-2(b), (c)), その近傍の海浜縦断形状だけが保持され、吸水量の増加に伴ってその領域が広がる。これに対して、ドレインを砕波点付近に設置した場合(図-2(f), (g))には、砕波帯が全域にわたって安定に保たれ、初期の形状が維持されている。波作用直後の比較的吸水量が多い段階では砂連の発達が抑制されると同時に、漂砂量の減少が目視により確認された。図-3を見ると、地形変化に対する汀線下での吸水の影響はほとんど見られず、むしろ陸側地下水位が高い場合に(図-3(d)), 堆積が速やかに進み堆積量も増加することがわかる。この結果に基づき、汀線直下のドレインから排水するケースの

実験を行ったが(図-3(g), (f)), その場合バームが他のケースより大きく発達している。図-5は、排水量の異なる4ケースについて、初期地形からの変化量を示したものである。比較のために、排水を行わない場合の結果も示した。ここで、1, 2時間後のデータのみ示したのは、時間経過に伴いセットアップ等の影響で地下水位が自然に高くなってしまったためである。この図より、排水量の増加に伴い、堆積速度が増加することがわかる。

本工法のメカニズムを考える上で注目したいのは、時間経過とともに吸水量が減少するにもかかわらず、海浜が安定に保たれるということである。これは、浸透流だけが海浜の安定化に寄与するわけではないということを示唆している。

3. 数値解析

海浜安定化の要因を探るために、砂浜内部の浸透流の状況を数値解析により再現した。ただし、波浪の影響は考慮していない。吸水量が減少する状況は、透水係数および間隙率を適宜に小さくすることにより表現した。

3.1 基礎方程式

ドレイン近傍およびその陸側砂中では間隙水の飽和領域が発生するので、解析には飽和/不飽和両領域を含む多孔質体中の2次元浸透流計算モデルを用いた。基礎式は、質量保存則

$$\frac{\partial(\rho\theta)}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) \quad (1)$$

および Darcy 則

$$\vec{v} = -K(\theta)\vec{\nabla}h \quad (2)$$

から導かれる次式である。

$$(c(\psi) + \alpha S_s) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot K(\psi) \vec{\nabla}(\psi + z) \quad (3)$$

ここで、 $\vec{\nabla} = (\partial/\partial x, \partial/\partial z)$, x : 水平座標, z : 鉛直座標, t : 時間, θ : 体積含水率(砂の単位体積中に含まれる水の体積), $\vec{v}$: 見かけの流速, h : 全水頭($=\psi+z$), ψ : 圧力水頭, ρ : 水の密度, K : 透水係数, S_s : 比貯留係数, $c(\psi)$: 比水分容量($=d\theta/d\psi$)である。 α は飽和時は1.0, 不飽和時は0.0となる係数である。自由水面は圧力水頭ゼロの位置を連ねた線で表される。式(3)の導出においては、圧力水頭変化に伴う水の圧縮を無視し、不飽和領域において圧力水頭変化に伴う間隙率の変化が生じないことを仮定している(赤井ら, 1977)。

不飽和領域を含む計算を行う際に問題となるのは、不飽和領域における海水の浸透特性をどのように決定するかということである。実際に計測するのは困難であるので、van Genuchten 式

$$S_e(\psi) = [1/(1 + (a|\psi|)^n)]^m \quad (4)$$

$$K(\psi) = K_s S_e(\psi)^{1/2} [1 - \{1 - S_e(\psi)^{1/m}\}^2] \quad (5)$$

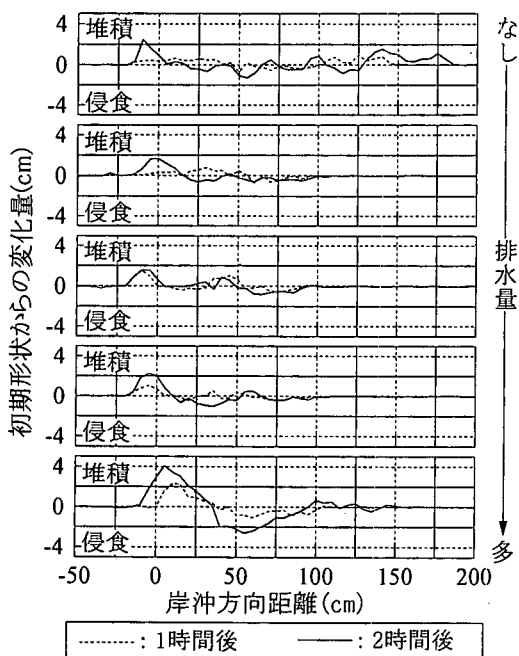


図-5 地形変化に及ぼす排水量の影響

を用いた。\$S_e\$は有効飽和度、\$K_s\$は飽和状態での透水係数、\$a\$、\$m\$、\$n\$は係数、\$m=1-1/n\$である。計算では、いくつかの試料の浸透特性をまとめた文献（土質工学会，1991）を参考にして、\$a=0.0632(\text{cm}^{-1})\$、\$n=1.405\$、\$S_s=2.0\times 10^{-5}(\text{m}^{-1})\$とした。飽和状態での透水係数および間隙率については、定水位透水試験および密度試験により実際に計測し、それぞれ\$1.3\times 10^{-2}(\text{cm/s})\$、\$0.48\$を得た。

3.2 数値計算法

対象としている現象が一様な砂中で生じていること、および砂浜地形が複雑な場合に境界の記述が容易にできることを考慮して、格子形状を任意とする一般座標系を用いた差分法により計算を行った。一般座標系の形成方法としては、楕円型形成法を用いた。基礎方程式を差分する際には、式（3）をデカルト座標系から一般座標系に変換する必要がある。一般座標表示された式（3）を時間的にはCrank-Nicolson型、空間的には中央差分で近似し（日野ら，1989），ADI法によって解いた。

3.3 計算対象領域

計算対象領域は図-6に示すように、実験の際に設置した砂浜全領域を考えた。境界条件としては、ABを不透水境界とし、DE、EF、FGを流量ゼロの境界、BC、CD、

GAを定水位境界とした。初期条件としては静止平衡状態を想定して、静水圧分布を与えた。ドレインの条件は、その位置での圧力水頭を周囲よりも低く設定することで与えた。

3.4 計算結果

図-7は汀線から沖側1m、底面下0.1mの圧力水頭を\$-0.025\text{mH}_2\text{O}\$として計算を開始し、ほぼ定常状態に達したときの流速ベクトル、地下水面（点線）およびポテンシャルの分布（実線）を表す。同図中には、\$0.5\times 10^{-4}(\text{cm/s})\$以上の流速ベクトルのみ表示しており、等ポテンシャル線の間隔は\$0.02\text{m}\$である。実験結果図とは、座標

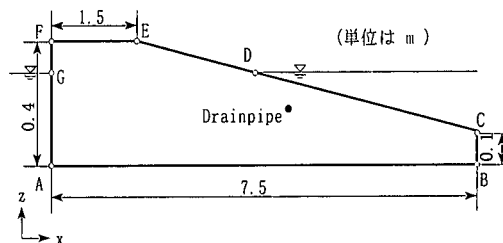
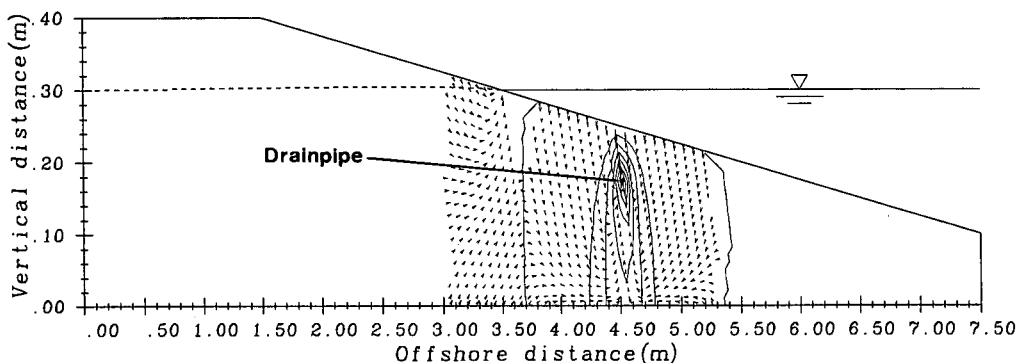
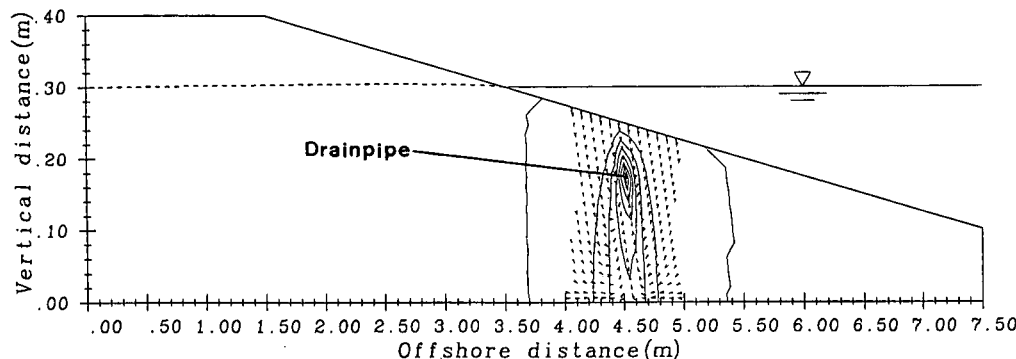


図-6 計算対象領域



(a) 透水係数が\$1.3\times 10^{-2}(\text{cm/s})\$の場合



(b) 透水係数が\$1.3\times 10^{-3}(\text{cm/s})\$の場合

図-7 浸透流の流速ベクトル、地下水面およびポテンシャル分布

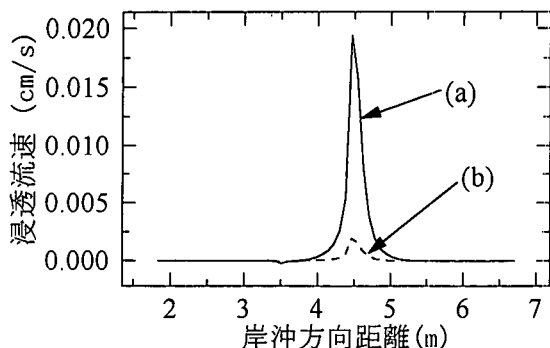


図-8 浸透流速の分布 (図-7(a), (b) に対応)

原点の位置が異なる点に注意されたい。同図 (b) は、透水係数を 1 オーダ下げ 1.3×10^{-3} (cm/s) とすることで、時間経過に伴う吸水量の減少を表現したものである。同図 (a) において、計算の安定性維持のため、吸水流量を実験と合致させることはできなかったが、ある程度流況等を推定することはできる。図-8 は、図-7(a), (b) の底面に垂直な浸透流速を比較したものである。図-7, 8 の (a), (b) を比較すると、浸透流速は明らかに低下しているが、ポテンシャルの分布、すなわち間隙水圧の分布には大きな変化が生じていない。ここで、実験結果と関連付けて考えると、吸水量が減少しても変化しない間隙水圧の分布が海浜安定化の効果に大きく寄与すると推察される。間隙水圧低下の影響として砂の締め固めが考えられ、一方では海浜の締め固まり度が増すと砂丘の侵食面が急勾配になることが報告されている (西ら, 1996)。本実験においても吸水を行った場合には急勾配の侵食地形が観察されている。

4. 結 論

地下水位低下工法を適用するにあたり、従来は地下水

位の低下による侵食の抑制のみを考えてきたが、沖波条件によって侵食性の場合には吸水、堆積性の場合には排水することで、より効果的な運用が図られることがわかった。また、吸水する場合には碎波点付近にドレインを設置した方が安定化の効果が大きい。

浸透流速が低下しても間隙水圧の分布に大きな変化が生じなければ、海浜安定化の効果は維持される。このことから、安定化のメカニズムとして、砂中の間隙水圧の低下が砂を締め固め、その移動に対する抵抗性を高める結果となることが挙げられる。

謝辞：本研究を進めるに当たり、中部電力株式会社および佐藤工業株式会社の方々の御協力を頂いた。特に、歌川紀之博士には貴重な示唆を頂いた。また、グラフ作成に当たり、筑波大学構造工学系風間聡講師に御協力頂いた。ここに記して謝意を表する。

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.
- 佐藤道郎・福島正寛・西隆一郎・福永雅彦 (1995): Coastal Drain による漂砂帯の流況変化と断面変化について, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 716-720.
- 土質工学会 (1991): 現場技術者のための土と基礎シリーズ 19「根切り工事と地下水-調査・設計から施工まで-」, pp. 356-374.
- 西隆一郎・N. C. Kraus (1996): 砂丘侵食機構とモデル化について, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 676-680.
- 日野幹雄・大田猛彦・砂田憲吾・渡辺邦夫 (1989): 洪水の数値予報〈その第一歩〉, 森北出版, 252 p.
- 福島雅紀・秋山成央・西村仁嗣 (1996): 地下水位低下工法による海岸侵食防止に関する実験, 水工学論文集, 第 40 巻, pp. 1015-1020.
- Machemehl, J. L., T. J. French and N. E. Huang (1975): New method for beach erosion control, Civil Eng. in the Oceans, ASCE, pp. 142-160.