

海岸地下水の滲出による前浜の砂流失

佐藤 道郎*・浦上 博行**・西原 克夫***

1. ま え が き

内海の波が穏やかなところの侵食性の海浜にその保全のために養浜を行っても砂が定着せず流出することがある。鹿児島市の北東の磯海水浴場はその一つの例である。この海岸は南側の稲荷川からの排出土砂によって養われていたと考えられるが、その間の部分が埋め立てられて砂ならびにその運び役である鹿児島湾の湾口からの最も発達した波が遮られてしまった。その後砂浜はやせ始めて昭和 55 年から海水浴シーズンの前に砂を投入して維持してきている。しかし、投入してあまり時日を経なくても大雨の後で砂が流されてしまっていたりで毎年のように問題になってきた。

養浜砂の流出しやすい原因の一つは養浜材料の不適切と考えられたが、もう一つの理由として砂浜内部の地下水位が平均的に平均海面よりも高くなっていることが関係していると考えられた。

ある程度の潮差があると干潮時には海面と砂浜内部の地下水面の間に水位差が生じ、地下水面が前浜斜面と交わるあたりから下側の砂浜表面は滲出した地下水によって無数の細流が形成され、前浜の砂が流される。これは決して大量の砂が一気に流されるというような現象でなく、適度な波があるときは上げ潮時に波の遡上とともに砂が戻り、平均的にはあまり変化を生じさせないものと考えられる。

しかし、地下水位が平均的に海側より高くなっておりしかも波が穏やかであると十分な戻りもなく流される方が多くてその累積の結果として養浜砂が定着しないという結果になってくることが考えられる。もしそうであるとすると対策も通常とられる種々のものを考えるよりもまず砂浜内部の地下水位を下げるといったことが必要となり、波の荒い外海でとられるような侵食対策工法はあまり効果を期待できないであろう。

本研究はこのような現象について簡単にモデル化して砂浜内部の地下水位が前浜の砂流失にどんな影響を与え

るか検討しようと試みたものである。

2. 潮位変化に伴う地下水位の変化と前浜の砂移動に及ぼす影響に関する既往の研究

砂移動に潮位変化の及ぼす影響としては、水位の変化とそれに伴う碎波位置の変化など海浜の一地点で見た場合の外力条件の時間的変化によるものと、汀線を横切る断面での地下水面の潮位に伴う変化に起因するものが考えられる。前者については近年では服部ら¹⁾が実験的に検討している。本研究の主題は後者と関連する。これについては既にいろいろと論じられてきている。Emery と Foster²⁾ や Grant³⁾ は落潮時に砂浜表面から出てくる水はシルト分を流しふるい分け作用に関連するとともに砂粒の締りをゆるくし、backwash の水に加わって流れを加速して浜の侵食を強めたり促進したりすることを指摘した。Emery²⁾らは低潮時の波の遡上高よりも上の方から排水が始まり無数の細流が浜表面にでき rillmark として知られる小さな水路をきざむことを述べている。Grant³⁾は高潮時には逆に前浜への堆積が強められることを示している。これは、地下水面が海面より低く swash の浸透によって backwash は減速されるからである。したがって、潮位変動の一周期の平均を考えれば、通常はあまり変化がないことが考えられる。潮位に伴う前浜の地形や底質特性の変化について Duncan⁴⁾, Otvos⁵⁾, Strahler⁶⁾, Schwartz⁷⁾, Harrison⁸⁾ が現地観測に基づいて論じている。それらによれば 1 tidal cycle 内での侵食、堆積は基本的には可逆的なものであり、平均すればあまり顕著な地形変化をもたらすものではない。現地で測った場合、最初に述べた二つの効果の複合された結果を見ることになる。Emery²⁾らや Grant³⁾が指摘しているような落潮時の backwash の加速による侵食の促進や上げ潮時の堆積の促進といったことは考えられることではあるが、それ自体がどの程度 1 tidal cycle 内での地形変化に寄与しているものかは必ずしも明らかにされたこととは言えないように思われる。そこで砂浜の地下水面の状況によって前浜地形の変化にどんな差異が生じるものなのかという点を調べるべく次のような実験を行った。

* 正会員 工博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木開発工学科

** 正会員 工修 中部電力 KK

*** 鹿児島大学大学院 工学研究科

3. 岸沖漂砂に及ぼす地下水位の影響に関する実験

3.1 実験装置および方法

長さ 13 m, 幅 0.4 m の造波水路に 1/10 の勾配の海浜模型を設置し, 周期 1 秒と 1.5 秒, 波高 1 cm と 5 cm の波を作用させた。底質は 0.2 mm, 0.7 mm のほぼ一様な粒径の場合と, 0.7 mm の斜面に 2 cm 厚さで 0.2 mm の砂を覆った場合の 3 種類の場合について実験した。海側水深は 25 cm とし, 海浜模型の背後の水位をそれより +20 cm, +10 cm, 0 cm, -10 cm とし波を 4 時間作用させて地形変化を調べた。

3.2 結果と考察

Emery²⁾ や Grant³⁾ が指摘したような機構がかなり効くものとすれば同じ周期・波高の波を作用させても地形変化は異なってくることが考えられる。そこで波高周期, 底質の組み合わせで 12 ケースにつき 4 種類の水位差のもとで調べてみた。結果は図-2 に示す。この結果を見ると期待されたような水位差の違いによる地形変化の差異は認め難い。図中に波の作用しているときの地下水位を実線で, また, 波を作用させる前の地下水面を破線で示した。これを見ると波の作用時には特に周期なら

びに波高が大きいと地下水面が波のないときとは異なってくる。また内部の水の動きも背後の水位が低い場合には波が無ければ水位の高い方から低い方へ流れるだけであるが, 波が作用している場合には全く異なってくる(図-3)。このような定常状態のもとでの実験では実際の落潮時のように水際線よりかなり上方で地下水面が砂浜表面を交差するような状況を作り出すことはできないため, そのような状況のときのことは何ともいえないが, 砂浜内部に多少の地下水面の勾配があっても波の作用下ではそれに埋もれて現れてこないような要因にすぎないように思われる。なお, 砂浜内部の水位は底板に取り付けた 10 個のポーラスストーンを介してマンメーターで測った。

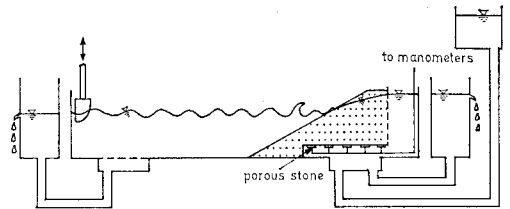


図-1 実験装置

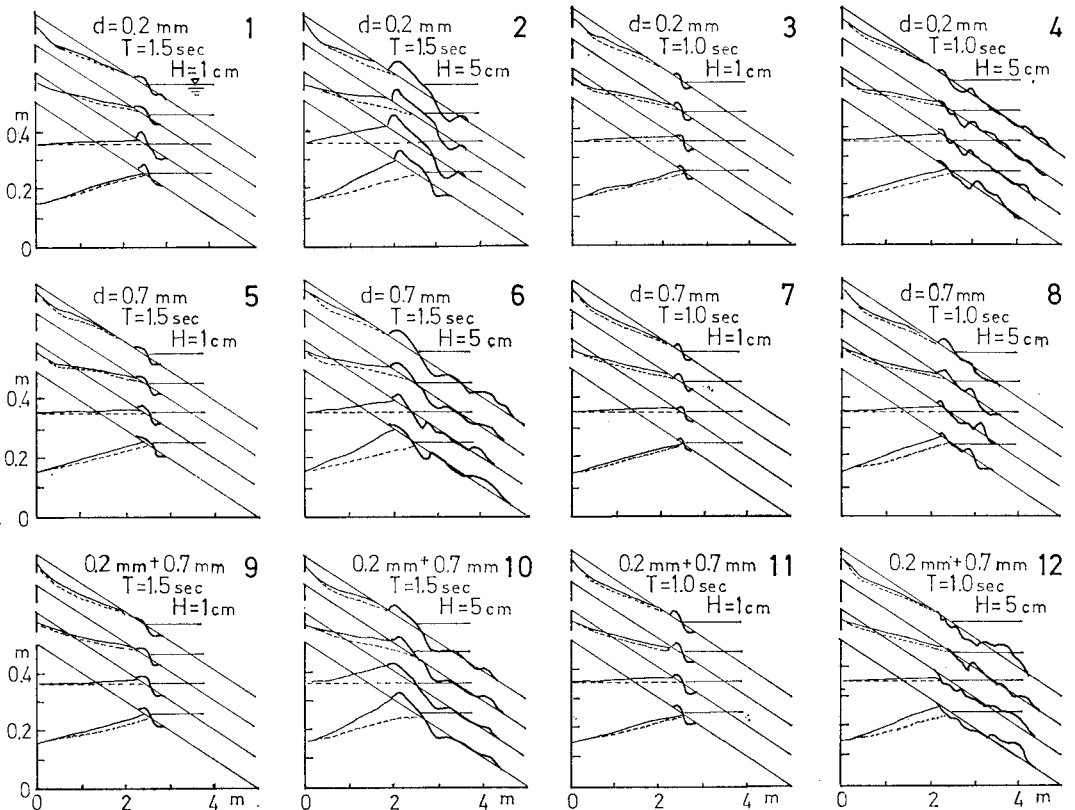


図-2 実験結果

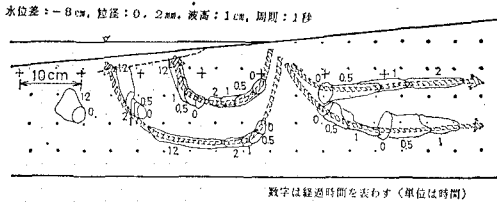


図-3 染料による砂浜内部の水の動き

4. 数値モデルによる検討

実験から砂浜地下水位は波の作用下ではあまり影響するようには考えられず、むしろこれが問題になることがあるとすれば波が無い、あるいは、弱すぎるという条件下であろう。磯海水浴場は年間の半分以上が静穏で波があっても殆んど 0.5 m 以下、0.6 m 以上は 3 % 程度の穏やかな海岸である。この海岸での地下水位の変化を 1982 年 9 月 22 日 18 時から 24 日 10 時まで 1 時間毎に調べてみた。結果は図-4 に示した。なお、この間に台風 8219 号が接近し幾分強い風が吹いたが波は 0.2~0.3 m 程度のものではあった。

この結果を見ると干潮時には砂浜内部の地下水面は十分に下がり切れず、図中の高さ 0 m あたりから水が滲み出すようになる。そして最干潮時には水際までほぼ 20 m の区間にわたって滲み出た水は細流となり無数の細い水路を刻み、それらの水路は蛇行し交差し合流したりして流下していく。その際に砂を海側に流して行く。観測点の最も陸側の平均水位は平均海面より数十センチメートル程高くなっている。これは背後に山がせまっておりしかも、地下水がこのあたりに収束しやすいような地形であることによるものと思われる。集中豪雨のあとに砂が無くなったという報道もあり上述のようなことが強く現れたためと考えられそうである。海側に流された砂は時には戻ることもあるようであるが、長期的には北

側へ移動し海水浴場のあたりには無くなってしまう。

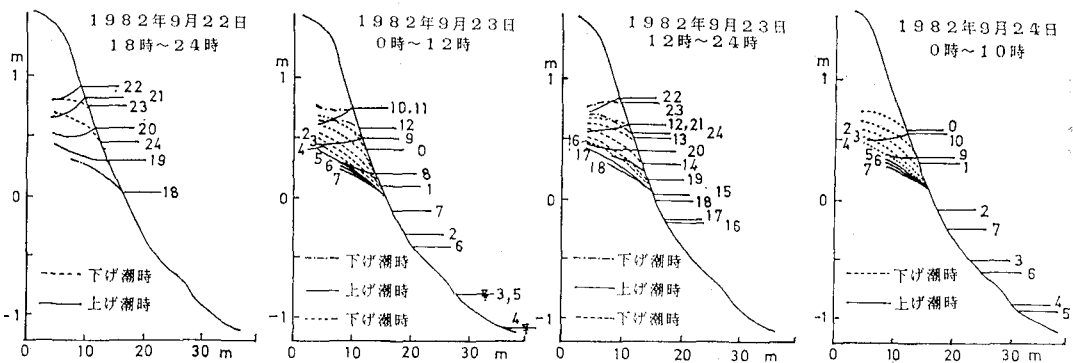
実験的に最干潮時に見られるような現象を調べるのは著者らのところではできそうにないので簡単なモデルで数値的に検討することを考えて次のような計算を行ってみた。

潮位変動に伴う地下水位の変化と砂浜内部の水の動きについて、砂層内での水頭 h は (1) のラプラスの方程式を有限要素法を用い、自由地下水面の高さ η の変動の計算は式 (2) を差分法を用いて計算した⁹⁾。

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\beta}{k} \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial y} \quad \dots\dots\dots (2)$$

β は貯留係数、 k は透水係数、 x は岸から沖へとった水平座標、 y は上向きを正にとった鉛直座標である。潮位変動は振幅 1 m、周期 12.5 時間の余弦変動を与えた。地下水位変動の計算結果の例を図-5 に示した。A は平均地下水面が平均海面と同じ場合、B は 1 m 高い場合のものである。この計算例の場合、A では地下水が滲出して前浜表面を流れる時間は 5 時間程度であるが、平均地下水面の高い B の場合 10 時間程で約 2 倍程になっている。また、流下距離も B の方がかなり長くなる。砂浜内の地下水の流れの計算例を図-6 に示した。平均地下水面が高い場合の干潮時のものである。X=70 m あたりから水が出てくるが、上端で滲出速度が大きく海側に向かって次第に流速が小さくなっていく。この点について以前に図-7 に概略を示すような小道具を使って調べたことがあったが、同様の傾向が見られた。前浜表面における滲出水によって流れが形成されるが、この流れは現地では滲出の強さの不均一性などによりかなり複雑な様相を呈する。これをそのまま解析することは現段階ではできないので、二次元に単純化した場合について斜面上で底面からの滲出によって形成される流れの方程式を求めた¹⁰⁾。滲出速度を w_b 、単位幅当りの表面流の流量



(注) 潮位が 0 m 以下になると海浜斜面より地下水の滲出があった。(0 cm の地点より)

図-4 磯海水浴場における砂浜地下水面の変化

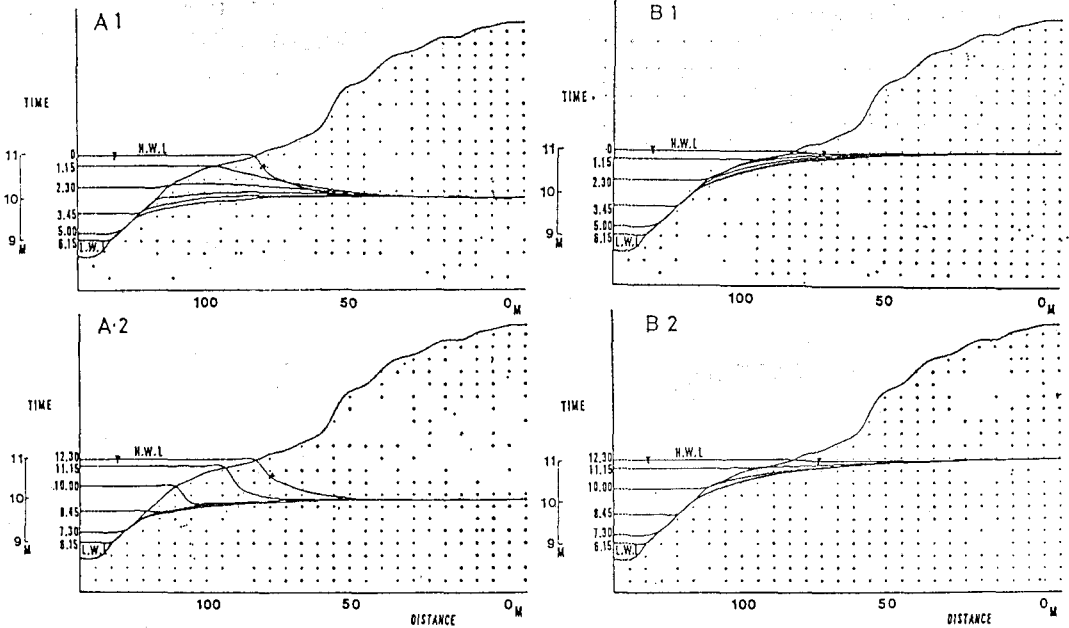


図-5 潮汐に伴う地下水面変化の計算結果

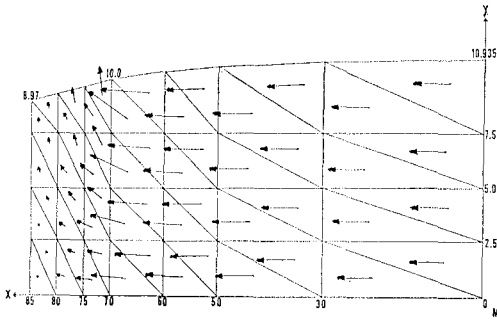


図-6 砂浜内部の流れの計算例

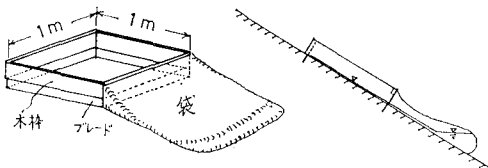


図-7 滲出量測定器具

を q , 勾配を i , 水深を d , 重力加速度を g , 水平基準面から測った水面高さを H として

$$q = \int_0^x w_b dx \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{dd}{dx} = \frac{i - \frac{q^2}{c^2 d^3} + \frac{H w_b}{q} - \frac{q w_b}{g d^3}}{1 - \frac{q^2}{g d^3}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

で表される。ここに、 C はシェジの定数である。有限要素解による w_b を用いて各点での w_b を補間し、(3) 式から q を求め、(4) を Runge-Kutta-Gill 法で解いて水深 d を得た。これから前浜各点での平均流速 $v = q/d$ が得られる。そして、この v がある値を越えると砂を流し始めることになると考えられる。浸透水圧によって表面の砂はいく分膨れた状態で通常の場合よりも流れやすい状態にあると考えられるが、これをどう解析にとり込むべきか今のところ考えがないので、単に岩垣公式で限界掃流力を求め、それを越える流れで砂は動くと考えた。

図-5 に示した場合について満潮時からの経過時間と流下距離ならびに流速の関係について計算結果を図-8 に示した。平均地下水面と平均海面が同じ場合には表面流の発生する区間は小さく流れの生じている時間も短くて流れは定常的であるが、平均地下水面が 1 m 高くなると満潮からあまり時間が経ってなくても砂を流し得るような流れが生じ始め、流れの生じている時間は長くなり、流下距離もずっと長くなって流れの発生している前浜の面積もはるかに広がることがこの結果からも知れる。流れは時間とともに弱くなるが流下距離は長くなっている。このようなことから砂浜内部の地下水面が平均的に高くなっているところではそうでないところとくらべて滲出水が流す砂の量はずっと多くなることがわかる。流されても適度な波があれば戻ることになると考えられるが、あまり穏やかであるとその作用も十分でなく

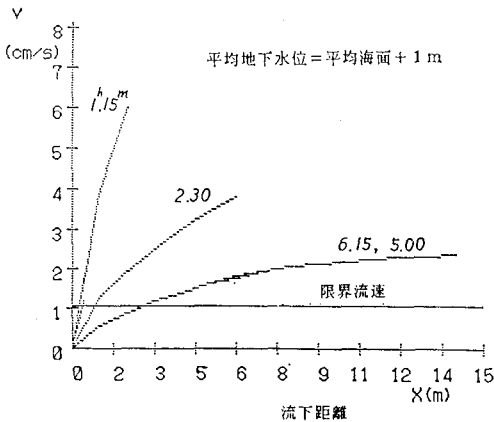
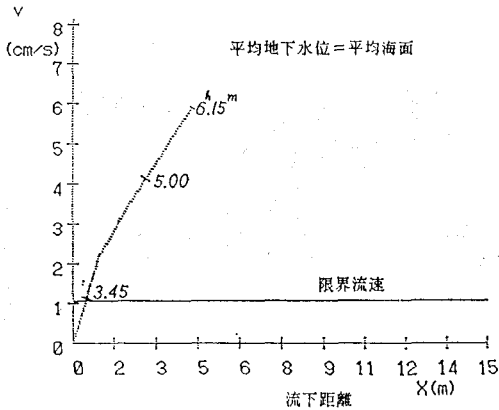


図-8 表面流速と流下距離の計算結果

累積の結果として砂流失という結果をもたらすことになる。

5. あとがき

内海の波が穏やかなところで砂浜地下水位が平均的に高くなっているような場合に、前浜から滲出した地下水が砂を流し砂流失の原因になり得ることを示した。ここでとりあげた問題はかなり特殊な事例と考えられる。

般に砂流失といった問題に対してコンクリート構造物で囲うといった手当をとりがちであるが、波穏やかなところではある程度の波の作用はできるようにしておく方がよいように思われる。そうでないところで取りあげたような通常は minor な要因として無視されるような要因が効いてきたり、場合によっては逆にヘドロがたまるといった問題をひきおこすことがある。

本文の実験データは新山千尋、飯野広次の両氏が在学中に行ったものの一部である。また、磯海岸の実測は鉾賀一博氏によるものである。地下水の計算については宮崎大学工学部の杉尾 哲先生に御教示頂いた。実験、実測では中村和夫技官の助力を得た。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 服部昌太郎・井崎嘉幸: 平均水面変動下での岸沖漂砂と海浜地形, 第28回海岸工学講演会論文集, 202~206, 1981.
- 2) Emery, K.O. and J.F. Foster: Water tables in beaches, J. Mar. Res., 7(3), 644~654, 1948.
- 3) Grant, U.S.: Influence of the water table on beach aggradation and degradation, J. Mar. Res., 7(3), 655~660, 1948.
- 4) Duncan, J.R.: The effects of water table and tide cycle on swash-backwash sediment distribution and beach profile development, Mar. Geol., 2, 186~197, 1964.
- 5) Otvos, E.G.: Sedimentation-erosion cycles of single tidal periods on Long Island Sound Beaches, J. Sedimentary Petrology, 35(3), 604~609, 1965.
- 6) Strahler, A.N.: Tidal cycle of change in an equilibrium beach, Sandy Hook, New Jersey, Jour. of Geology, 74, 247~268, 1966.
- 7) Schwartz, M.L.: Littoral zone tidal-cycle sedimentation, J. Sedimentary Petrology, 37(2), 677~709, 1967.
- 8) Harrison, W.: Empirical equations for foreshore changes over a tidal cycle, Mar. Geol., 7, 529~551, 1969.
- 9) 杉尾 哲: 砂浜での浸透水量の評価, 昭和56年度土木学会西部支部研究発表会講演集, 127~128, 1981.
- 10) 佐藤道郎・浦上博行・西原克夫: 地下水滲出による前浜の砂流失に関する一考察, 昭和60年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 268~269, 1986.