

砂浜海岸における海岸地下水の挙動

土屋 義人*・山元 淳史**・山下 隆男***・赤村 重紀****

1. 緒 言

砂浜海岸の地下水は、波浪による wave set-up、潮汐および背後地の地下水位変動の影響を同時に受けており、この地下水の挙動を正しく評価することは、海岸構造物や海浜の安定性を検討するためにきわめて重要とされる。特に、海底面で生じる上向きの浸透流は、底質の移動を助長する方向にあり、海岸侵食の一要因になっている可能性がある。波浪が海浜に來襲すると砕波するまでは wave set-down が、砕波点の内側においては wave set-up が生じ、海底面での圧力勾配による浸透流が砕波帯のスケールで発生して、陸地の地下水位へも影響を与える。また、潮汐は陸方向へ地下水位の変動として伝播し、逆に降雨などの要因で陸地の地下水位が海面より上昇する場合には、内陸から沖方向へ向う浸透流が発生する。

従来、陸地側のみを対象として、潮汐を周期境界条件とする地下水位変動の伝播の簡単な理論解が、準一様流の仮定のもとに誘導されて、広く実用に供されてきた。また、wave set-up によっておこる砕波帯の浸透流については、すでに Longuet-Higgins (1983) が一定勾配の簡単な場合についてその理論解を示している。

本研究では、海底と陸地の砂層の両方を解析対象領域とし、実際の海底地形を与えて波浪による wave set-up の空間分布を求め、それと潮汐または陸地の地下水位条件を組み合わせる三次元の浸透流解析を行い、その流速分布および浸透水圧分布を計算して、それらの特性を明らかにする。

2. 浸透流の基礎方程式と境界条件

(1) 基礎方程式

流体、土粒子および構造骨格の非圧縮性を仮定すると、浸透流の基礎方程式は連続式と、Darcy 則による抵抗則を用いた運動方程式によって構成され、次式で与えられる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -\frac{n}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{ng}{k} u, & \frac{\partial v}{\partial t} &= -\frac{n}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{ng}{k} v \\ \frac{\partial w}{\partial t} &= -ng - \frac{n}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{ng}{k} w \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 u 、 v および w はそれぞれ x 、 y および z 方向の平均流速、 p は圧力、 ρ は流体密度、 n は間隙率、 g は重力加速度および k は透水係数である。また、座標系は汀線に原点をとり、水平方向に x および y 、鉛直上方に z をとる。

さて、鉛直流速を無視する準一様流の仮定を与えると、潮汐を周期境界条件とする不圧地下水の伝播の理論解は、次式のように求められる。

$$\eta = \eta_0 \exp\left(-m_1 \frac{x}{h}\right) \sin\left(\sigma t - m_2 \frac{x}{h}\right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 η は水面の鉛直変位で η_0 は $x=0$ での値を示し、 σ は角周波数 $2\pi/T$ 、係数 m_1 および m_2 はそれぞれ次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= \sqrt{\frac{1}{2} \frac{\sigma^2 h}{g} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{ng}{k\sigma}\right)^2} - 1 \right)} \\ m_2 &= \sqrt{\frac{1}{2} \frac{\sigma^2 h}{g} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{ng}{k\sigma}\right)^2} + 1 \right)} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

一方、井島ら (1971) が提案した速度ポテンシャル接続法を用いれば、鉛直流速を考慮した断面二次元の浸透流解析が可能である。図-1 は、周期 $T=12.4$ hr の潮汐による周期境界条件において、浸透層厚 $h=10$ m の場合の不圧地下水面を位相 30° 毎に示したものである。ただし、実線は井島が提案した速度ポテンシャル接続法による理論解、点線は長波近似 (準一様流の仮定) による理論解である。透水係数が小さくなると、地下水面の変動が遠方まで及ばなくなるが、両理論解の差は大きくなることから、潮汐による周期境界条件を与える場合でも、透水係数によっては鉛直流速を考慮した二次元解析が必要であることがわかる。

さらに、運動方程式 (2) の加速度項を無視したときの解は、式 (3) において係数 m_1 および m_2 の代わりに

* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

** 正会員 工修 出光エンジニアリング(株) エンジニアリング室

*** 正会員 工修 京都大学助手 防災研究所

**** 正会員 工修 東京電力(株) 建設部

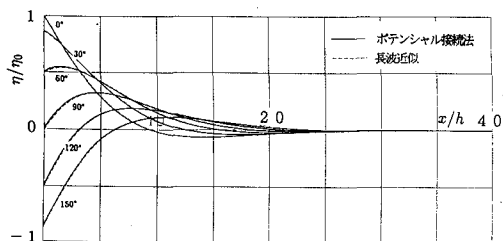
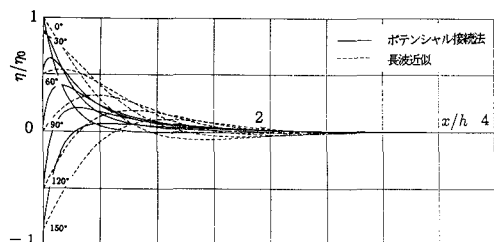
(a) 透水係数 $k=1$ cm/sec の場合(b) 透水係数 $k=0.01$ cm/sec の場合

図-1 不圧海岸地下水の伝播に与える鉛直流速の影響

次式で示される係数 m を用いる。

$$m = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{\sigma^2 h}{g} \frac{ng}{k\sigma}} \quad (5)$$

ただし、係数 m_1 および m_2 と係数 m との比較から、潮汐のような周期境界条件では、不圧地下水の伝播に関して加速度項の影響はほとんど無視できることがわかる。したがって、運動方程式 (2) の加速度項を無視し、次式で定義される速度ポテンシャル

$$\phi = k \left(z + \frac{p}{\rho g} \right) \quad (6)$$

を連続式 (1) に代入すると、基礎方程式としての次の Laplace の式が得られる。

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (7)$$

(2) 境界条件

図-2 のような解析領域を考えると式 (7) に対する境界条件は次のとおりである。

a) 面 AB および CD では水頭が一定であることから、次式となる。

$$\phi|_{AB} = k\eta_A, \quad \phi|_{CD} = 0 \quad (8)$$

ここに、 η_A は点 A の η の値を示す。

b) 不透水面 BC を横切る流れは存在しない。

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{BC} = 0 \quad (9)$$

c) 浸出面 EF の圧力 p は 0 であり、それは次式となる。

$$\phi|_{EF} = kz \quad (10)$$

d) 自由表面 FA では $z = \eta(x, y, t)$ の値は未知であ

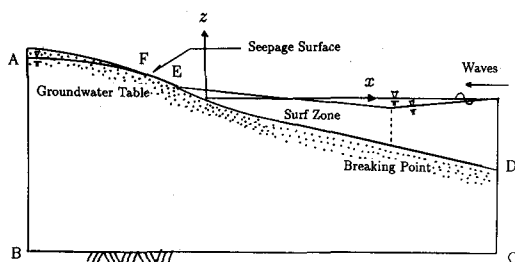


図-2 解析領域と座標の定義

るが、力学的、運動学的条件はそれぞれ次式で与えられる。

$$\phi|_{FA} = k\eta \quad (11)$$

$$n \frac{\partial \eta}{\partial t} = w - u \frac{\partial \eta}{\partial x} - v \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (12)$$

Liggett (1977) はこの運動学的条件を境界要素法に用いるために、次式のように書き換えている。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{k}{n} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2} \frac{\partial \phi}{\partial n_r} \quad (13)$$

ここに、 n_r は自由表面における外向き法線である。この運動学的条件は定常問題に対しては、次式のようになる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial n_r} \Big|_{FA} = 0 \quad (14)$$

3. 砂浜海岸における浸透流解析

まずはじめに、wave set-up と陸地の地下水位条件による浸透流の応答を断面二次元で計算し、その特性を明らかにする。ついで、新潟県糸魚川海岸を例として、現地海岸における浸透流の挙動を解析する。

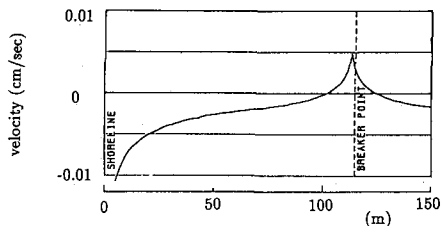
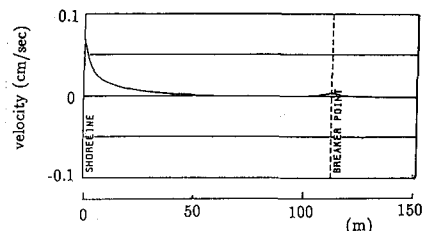
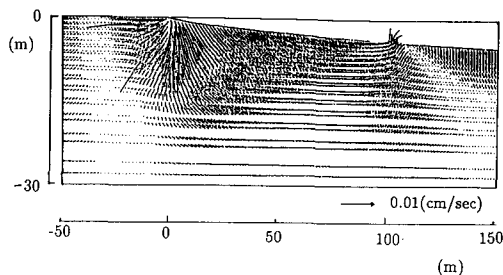
(1) Wave set-up および陸地の高地下水位条件による流速分布

前述したように、浸透流は wave set-up、潮汐および陸地の地下水位条件の影響を同時に受けている。そこで、まずそれぞれの外力に対する浸透流の応答を調べるために、wave set-up のみによる場合と、それに陸地の高地下水位条件が加わった場合について、有限要素法を用いて断面二次元の定常浸透流計算を行う。

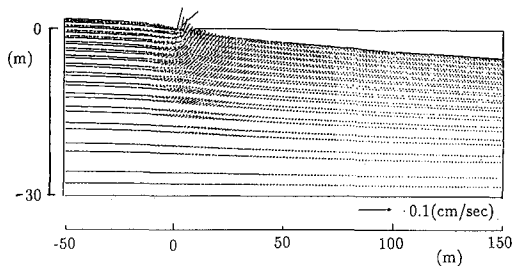
計算条件は、透水係数 $k=1$ cm/s、浸透層厚 $h=30$ m とし、水深は次式で与える。

$$d = Ax^\alpha \quad (15)$$

ここに、 d は静水深、 A は一定定数であり、 α は $2/3$ とする。海底面での境界条件は、wave set-down を無視し、wave set-up による圧力勾配を砕波点から汀線まで一律 $0.5/100$ で与える。陸地の地下水位条件は、A 点 ($x=-100$ m) における地下水位 η_A を境界条件式 (14) で与える場合と、 $\eta_A=3$ m とする場合の二通りとする。後者は陸地の地下水位が海面より上昇し、汀線での wave set-up

(a) 海底面における法線方向流速 v_n の沖方向分布(a) 海底面における法線方向流速 v_n の沖方向分布

(b) 流速ベクトルの空間分布



(b) 流速ベクトルの空間分布

図-3 Wave set-upのみ考慮した場合

図-4 Wave set-upと陸地の高地下水位条件を考慮した場合

に対して2.5 mの水位差をもつことを意味する。得られた結果を図-3および4に示す。

これより次のことが明になる。a) wave set-upのみ考慮したときは、汀線付近では流入方向の流速が、砕波点では流出方向の流速が現われる。b) 与えられた条件では、海底面から流出する浸透流の流速値は0.01~0.1 cm/sであり、陸地における高地下水位の条件の方がwave set-upに比べて浸透流により大きな影響を与えている。

(2) 現地海岸への適用例

次に、新潟県糸川海岸を例として、現地海岸における三次元の非定常浸透流解析を行う。

糸川海岸は姫川河口の東側に位置し、姫川港から海川にいたる約3.7 kmの海岸である。かつて姫川からの流送土砂による河口デルタとして形成された礫浜であったが、1964年以来継続して施工してきた姫川港西防波堤の延長に伴って漂砂源が遮断され、しだいに侵食海岸へと変貌してきた。さらに、1970年1月の異常波浪により著しい海岸侵食を受け護岸が各所で倒壊し、姫川に近い西側では特に甚大な被害を被っている。このときの汀線の変化を図-5に示す。1947年から1965年までは海川側で汀線が前進しているが、1970年の冬期災害を含む1965年から1974年までは一部を除いてほぼ全域で汀線後退がみられる。

また、この海岸の中央付近には図-6に示すように海谷が迫っており、沿岸部における波浪の集中、発散箇所が波状に出現して海岸侵食をより複雑なものとしてい

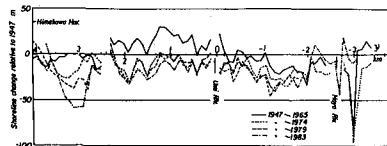


図-5 空中写真に基づく汀線の変化

る。ここではwave set-up、潮汐および陸地の地下水位条件を考慮した三次元の浸透流解析を行い、浸透流と海岸侵食との関連について考察する。

Wave set-upの空間分布は、山下ら(1992)によって開発された波浪の変形・海浜流の数値モデルを用いて計算する。すなわち、波と流れとの相互作用および砕波や海底摩擦によるエネルギー逸散を考慮した放物型緩勾配方程式により波浪場を計算し、各格子点上の波高および波向きを求める。つぎに、radiation stressを媒介として、波向きを考慮した水平拡散項を導入した水平2次元モデルにより海浜流場を計算し、静水深からの平均海面の空間変化量を求める。

波浪条件は1970年の災害時の波浪条件を用い、周期11 sおよび沖波波高6 mとし、波向きはNNWまたはNWを与える。図-7に波浪の変形計算の結果を示す。波浪の集中箇所がいくつか現れており、波向きNWの場合はNNWに比べてその集中箇所が海川側に移動していることがわかる。また、図-8に波向きNNWの場合の海浜流の計算結果を示す。海浜流の流速分布も沿岸方向に大きく変化していることがわかる。

浸透流の計算には計算時間および記憶容量の点で有利

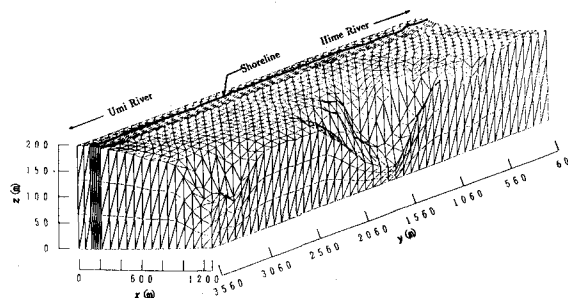
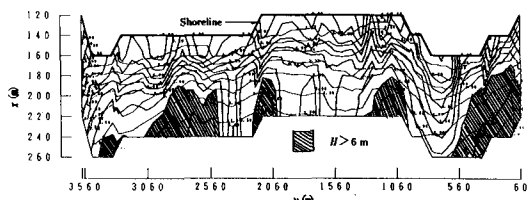
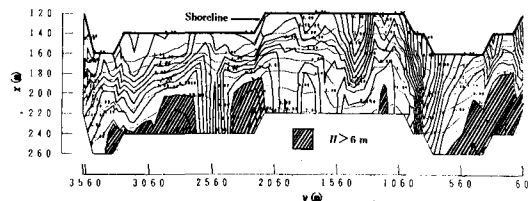


図-6 糸魚川海岸の海底地形と要素分割

な境界要素法を採用し、3次元解析を可能とすることができた。計算精度を向上させるため、かど点はすべて二重節点とし、境界近傍の内点計算には数値的に補正を行なう。また、図-6に示すように岸沖方向の分割は砕波帯内で20 m間隔、砕波帯外で80 m間隔とし、汀線方向の分割は一律80 m間隔として三角形の線形要素を用いる。陸地の自由表面FAは、その座標自体が未知であるため繰り返し計算を必要とする。定常問題では、仮定した自由水面形のもとで基礎式(7)を境界条件式(8),(9),(10)および(14)を用いて解き、式(11)でその位置の

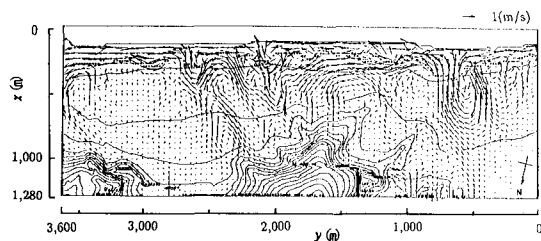


(a) 波向き NNW の場合



(b) 波向き NW の場合

図-7 波高の空間分布

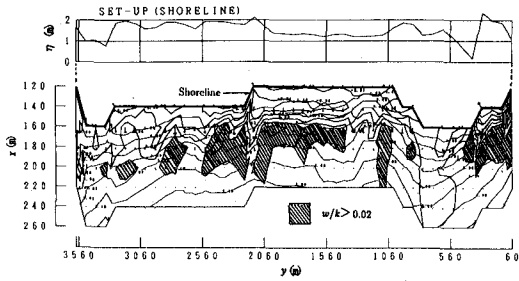
図-8 海浜流の流速ベクトルの空間分布
(波向き NNW, 波高 6 m および周期 11 s)

適否を判定し修正することのできる逐次近似解法とする。非定常問題では、初期条件としての自由水面形と境界条件式(8),(9),(10)および(11)を用いて基礎式(7)を解き、各時間ステップ毎に式(13)により陰解法で次の節点座標を求める。

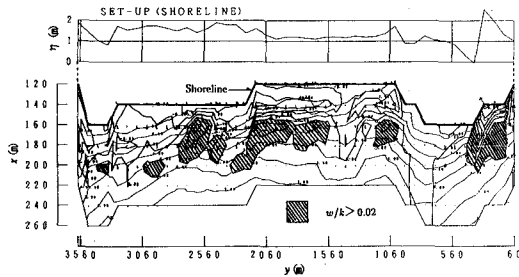
土質調査の結果海面下約28 mまでは細砂層で、それ以深はN値50以上の砂礫層が数m確認されている。明確な不浸透面が確認されていないため、浸透流が不浸透面の影響をあまり受けないように浸透層厚は200 mとし、簡単のために透水係数 k は一定とする。

図-9はwave set-upによる定常浸透流の計算結果で、汀線から砕波帯内100 m間の海底面における鉛直方向の動水勾配(=鉛直流速 w /透水係数 k)および汀線でのwave set-upの沿岸方向分布を、波向き NNW および NW について示したものであり、図-10(a)は波向き NNW, $y=1260$ mにおける断面流速分布を示す。一方、図-10(b)は汀線より120~160 m離れた陸地の地下水位が海面より3 m高くなった場合の定常浸透流の計算結果であり、図-10(c)は満潮時から12時間後に潮位が一定の割合で50 cm下がる条件を与え、透水係数 $k=0.01$ cm/sとして非定常浸透流計算を行った結果である。

これらの計算結果より、次のことがわかる。a) 汀線でのwave set-upは、海谷が前面に迫り急勾配の海岸中央部で小さくなる。また、波向き NW の場合は NNW に比べて全体的にやや小さい値を示すが、波向きの違いよりも場所の違いによる差の方が大きい。b) 海底面における浸透流の鉛直上向き流速が大きい範囲は汀線より20~80 mの位置であり、砕波点が汀線より100~240 mの位置であることを考慮すると、前節の結果よりもかなり汀線に近くなっている。これは前節の二次元計算では海底面に一定の圧力勾配を与えていたのに対し、三次元計算ではwave set-upの空間分布を計算した結果、実際の平均海面の勾配が砕波点よりも汀線付近で大きくなったことによる。c) 浸透流の鉛直上向き流速は、海谷の前面と姫川に近い西側で大きい値を示す。前者は波浪が海谷により発散する位置であるが、後者の場合は波浪も集中する場所であり、1970年の冬期災害ではこの位置で特に大きな被害を受けている。このことは、波浪の集中に加えて、鉛直上向きの浸透流が底質の移動に関連して海岸侵食を加速させた可能性を示している。d) 陸地の地下水位が海面よりも上昇するときは、汀線付近の水平流速および砕波帯内の鉛直流速が大きくなる。また、汀線直前に浸出面が現れ、その高さは約10 cmであった。e) 引潮時には一般的に陸地の地下水位が海面よりも高くなっており、図-10(c)に示すように陸地の自由表面付近で鉛直下向きの流速が現れる。しかし、満潮時の



(a) 波向き NNW の場合



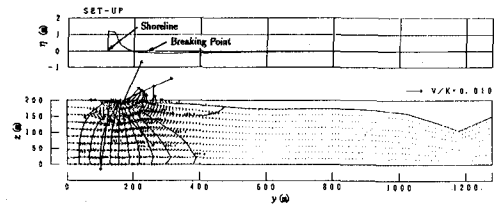
(b) 波向き NW の場合

図-9 海底面における浸透流速の空間分布と汀線における wave set-up の分布

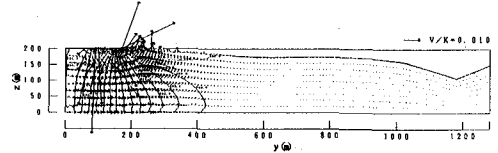
wave set-up は干潮時のそれとまったく同じではなく、本計算では場所により最大 20 cm の差が現れた。潮汐の影響を考慮するときには、それによる wave set-up の変化も同時に考慮する必要がある。

4. 結 語

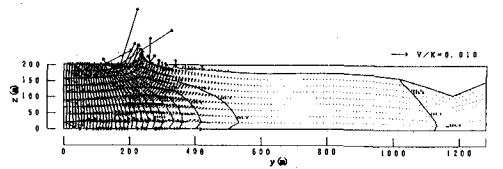
以上、波浪による wave set-up、潮汐および陸地の高地下水位を外力とした砂浜海岸における海岸地下水の挙動を、三次元の非定常浸透流計算により解析し、現地海岸に適用してその流速分布および圧力分布を求め、その特性を明かにした。その結果、浸透流の流速は非常に小さくそのみでは底質を移動させることはないが、鉛直上向きの流速が碎波帯内で現れ、それと波高分布や災害時の被災位置との関連から浸透流が海岸侵食の二次的要



(a) wave set-up のみ考慮した場合



(b) wave set-up と陸地の高地下水を考慮した場合



(c) 海浜断面における浸透流速ベクトル

図-10 海浜断面における浸透流速ベクトル

因である可能性を指摘した。

最後に、貴重な資料を提供して頂いた新潟県糸魚川土木事務所に感謝する。

参 考 文 献

- 井島武士・江口泰彦・小林 彰 (1971): 透過性防波堤と岸壁に関する研究, 第 18 回海岸工学講演会論文集, pp. 121-130.
- 山下隆男・土屋義人・阿曾克司 (1992): 長期海浜変形予測モデル, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 411-415.
- Liggett, J. A. (1977): Location of free surface in porous media, Proc. ASCE, Vol. 103, HY4, pp. 353-365.
- Longuet-Higgins, M. S. (1983): Wave set-up, percolation and undertow in the surf zone, Proc. R. Soc. Lond., A 390, pp. 283-291.