

衡方程式は佐藤ら(1992)と同様な方法を用いて解いた。

次に、透水層を埋設していない自然海岸での wave set-up の分布は、ラジエーションストレスの沿岸方向の変化は小さいと仮定して、次の一次元の運動方程式により求めた。

$$\rho g(d+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} = 0 \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに、 η は平均水位の上昇量(wave set-up)、 d は静水時水深、 S_{xx} はラジエーションストレス成分、 g, ρ は重力加速度、海水密度である(図-1)。なお、wave set-up の平面分布を精度良く求めるためには、海浜流分布を求める際の基礎方程式である連続式とラジエーションストレス項を含む運動方程式とを連立して解いて流れと同時に求める必要がある。

片山ら(1992)は透水層の効果として、汀線での wave set-up がほとんど生じないこと、透水層内は砂中の約1000倍速い浸透流速が生じたこと等を水理模型実験に基づき明かにしている。現在、透水層埋設部での wave set-up 抑制効果を推定する方法はないので、次の2つの方法で推定を試みた。第1の方法は、片山ら(1992)と同様に、水中の岸向きの流量の補償流が透水層内で発生していると仮定して、式(3)、(4)を連立して繰り返し計算で、平均水位分布を求めて方法である。

$$\rho g(d+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho U^2(d+\eta) + S_{xx}) = 0 \quad \cdots \cdots (3)$$

$$U(d+\eta) = -U_d H_d = k_d \frac{\partial \eta}{\partial x} H_d \quad \cdots \cdots (4)$$

ここに、 U は水中の岸向きの平均流速、 U_d は透水層内の浸透流速であり、ダルシー則で求められるとした。また、 H_d は透水層厚さ、 k_d は透水層の透水係数である。

方法2では、ラジエーションストレス項を水中および透水層内の圧力勾配と釣り合うと仮定して、式(5)より平均水位分布を推定した。なお、透水層内の圧力勾配項は本来浸透流による損失と釣り合うべき項である。

$$\rho g(d+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \rho g H_d \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad \cdots \cdots (5)$$

図-2は、片山ら(1992)の水理模型実験のケース1とケース11を対象に2つの方法で求めた wave set-up の分布を比較したものがある。方法1では透水層の透水係数を1.0 m/s と非常に大きく設定したにもかかわらず、透水層埋設部での wave set-up 抑制効果は汀線付近を除いてほとんど現れていない。一方、方法2では、仮定に問題はあるが、自然海岸に対して30%程度まで wave set-up が抑制されている。他の実験ケースについても2つの方法で求めた wave set-up の分布の傾向は同じで、方法2では透水層埋設海浜では50~70%程度の減少が見られた。しかし、両方法とも水理実験で得られた透水層の

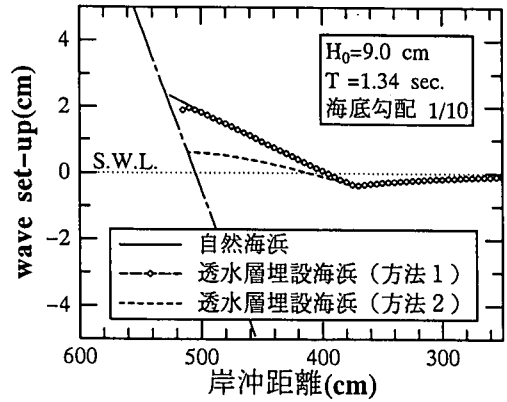


図-2 透水層埋設部での wave set-up 抑制効果の推定

効果として汀線での wave set-up がほとんど生じない現象を説明するには不十分であった。透水層埋設部での wave set-up の推定方法については今後の改良が必要と考えられる。

長周期成分波の遡上の影響を考慮するため、本計算モデルでは、図-3に示すように、静水時汀線での wave set-up 位置から長周期成分波による遡上点までを直線で結んだレベルを平均水位とした。静水時汀線より沖側については wave set-up をそのまま平均水位とした。

長周期成分波による遡上高さは、加藤ら(1989)の研究結果を参考に次のように決めた。加藤ら(1989)は、波崎海洋研究施設(HORS)における観測結果より、有意な地形変化を引き起こす波のその高さ R_{max} を表す次の経験式を導いた。

$$R_{max} = (\eta)_0 + 0.96 \cdot (H_L)_0 + 0.31 \quad (\text{m}) \quad \cdots \cdots (6)$$

ここで、 $(\eta)_0$ は汀線での平均水位、 $(H_L)_0$ は汀線での長周期波の波高である。式(6)の右辺各項は潮位と wave set-up の和、短周期成分波による遡上高さ、長周期成分波による遡上高さそれぞれに対応している。長周期成分波による遡上高さ R_L は右辺第2項を用いて求めることとした。なお、汀線での長周期成分波の波高は加藤

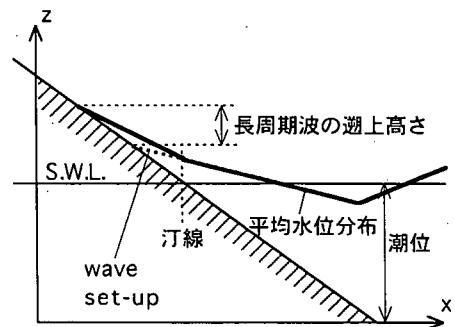


図-3 平均水位分布の与え方

(1993)の経験式を用いて入射波浪のエネルギー E より推定した.

$$R_L = 0.96 \cdot (H_L)_0 = 0.96 \cdot (0.23 E^{0.51}) \dots\dots\dots (7)$$

(2) 砂浜内の浸透流計算モデル

砂浜内の浸透流, 地下水位の平面分布は, 佐藤ら (1995) の二次元断面浸透流モデルを三次元に拡張して求めた. つまり, 飽和・不飽和を含む多孔質媒体内の連続式とダルシー法則より得られる次式で表される赤井ら (1977) による飽和・不飽和の基礎式を解いて求めた.

$$(C + \alpha S_s) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial h}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (8)$$

ここに, $h = (\psi + z)$ は全水頭で, ψ は圧力水頭, z は位置水頭, C は比水分容量, S_s は比貯留係数, α は飽和時は 1.0, 不飽和時に 0.0 の係数, k は透水係数である. 浸透流の流速成分は, ダルシー則より次の式で表される.

$$(u, v, w) = - \left(k \frac{\partial h}{\partial x}, k \frac{\partial h}{\partial y}, k \frac{\partial h}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (9)$$

なお, 地下水面は圧力水頭がゼロの点を連ねた面で表される.

圧力水頭 (ψ) の計算は差分法で行い, 境界条件として

- 1) 流体層と接する湿潤面: 平均水位分布計算より求めた実水深 D より, $h = D + z$ を与えた.
- 2) 岸側の境界で地下水位が既知の場合は圧力水頭の時系列を境界条件として与えた.
- 3) その他の境界: 境界に垂直方向流速がゼロ ($v_n = 0$) を与えた.

また, 初期条件としては

$$h = 0, \quad \psi = -z$$

を与え, 浸透流がゼロの状態とした.

なお, 本研究では透水層は周辺の砂浜に比較して透水係数の 3 ~ 4 オーダー大きい領域として取り扱った.

現在の浸透流計算は境界条件の設定が容易なように, 図-4 に示す海底面と座標軸が一致する座標系 (x', y, z') で行った. なお沿岸方向を表す y 軸について一致させた. 式 (8), (9) の計算座標での変換式はそれぞれ次のようになる.

$$\begin{aligned} a \frac{\partial \psi}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(k \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} - \sin \delta \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z'} \left(k \left(\frac{\partial \psi}{\partial z'} + \cos \delta \right) \right) \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

$$(u', v, w') = - \left(k \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} - \sin \delta \right), k \frac{\partial \psi}{\partial y}, k \left(\frac{\partial \psi}{\partial z'} + \cos \delta \right) \right) \dots\dots\dots (11)$$

ここに, $a = C + \alpha S_s$, δ は x 軸と海底面が成す角度である.

式 (10) は直交格子を用いた LOD (local one dimen-

平均水位分布計算座標 (x, y, z)

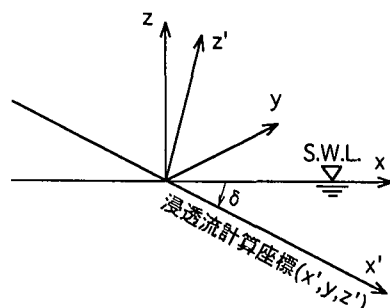


図-4 浸透流計算座標系

sional)法により以下の 1 次元の差分式に分け, これを順次解いて圧力水頭の分布を求めた (例えば, 矢嶋・野木, 1977).

$$\begin{aligned} & a_{i,j} (\psi_{i,j,k}^* - \psi_{i,j,k}^n) / \Delta t \\ & - \{ k_{i+1/2,j,k} ((\psi_{i+1,j,k}^* - \psi_{i,j,k}^*) / \Delta x' - \sin \delta) \\ & - k_{i-1/2,j,k} ((\psi_{i,j,k}^* - \psi_{i-1,j,k}^*) / \Delta x' - \sin \delta) \} / \Delta x' = 0 \\ & a_{i,j} (\psi_{i,j,k}^{**} - \psi_{i,j,k}^*) / \Delta t \\ & - \{ k_{i,j+1/2,k} (\psi_{i,j+1,k}^{**} - \psi_{i,j,k}^{**}) / \Delta y \\ & - k_{i,j-1/2,k} (\psi_{i,j,k}^{**} - \psi_{i,j-1,k}^{**}) / \Delta y \} = 0 \\ & a_{i,j} (\psi_{i,j,k}^{n+1} - \psi_{i,j,k}^{**}) / \Delta t \\ & - \{ k_{i,j,k+1/2} ((\psi_{i,j,k+1} - \psi_{i,j,k}) / \Delta z' + \cos \delta) \\ & - k_{i,j,k-1/2} ((\psi_{i,j,k} - \psi_{i,j,k-1}) / \Delta z' - \cos \delta) \} / \Delta z' = 0 \end{aligned}$$

ここに, 下添え字 i, j, k 等は 3 次元の格子位置を示し, 上添え字 $n, n+1$ は時間ステップを表し, *, * * が付いている量は中間値であることを表している. $\Delta x', \Delta y, \Delta z'$ は各方向の格子間隔である. これらの式は適当な境界のもとでトーマスアルゴリズムで解かれる.

(3) 計算手順

計算の手順は次のようである.

- 1) 地形, 底質条件の設定
- 2) 潮位, 波浪変形計算の沖側境界条件の設定
- 3) 波浪変形計算を行い, wave set-up 分布の計算
- 4) 長周期波のそ上高さを考慮して平均水位分布を計算
- 5) 浸透流計算の海底面境界条件, 陸側地下水位条件 (圧力水頭) の設定
- 6) 砂浜内の圧力水頭分布の計算 (浸透流計算)
- 7) 砂浜内の地下水位, 浸透流速の計算 (浸透流計算)
- 8) 予め設定した計算時間を終えるまで, 2) から 7) を繰り返す.

3. 適用性の検討

開発された計算モデルを用いて台風第 9512 号来襲時 (最大有義波高 6.0 m) に波崎海洋施設 (HORS) に於いて測定された透水層周辺の地下水位分布を対象に再現計

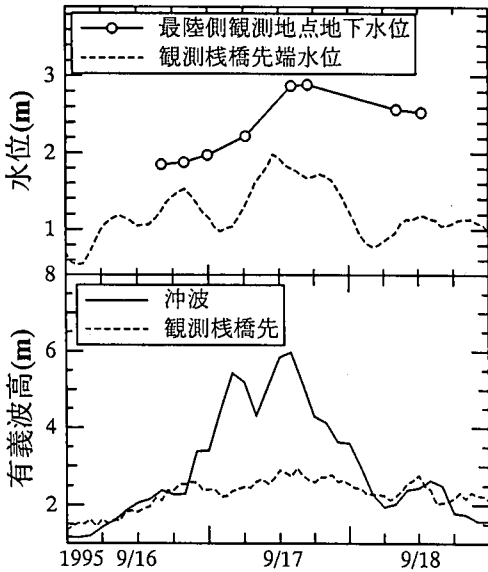


図-5 台風第9512号来襲時の波浪、水位の時系列

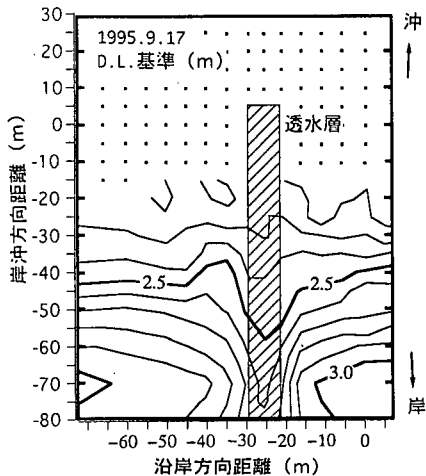


図-6 地下水位の観測結果

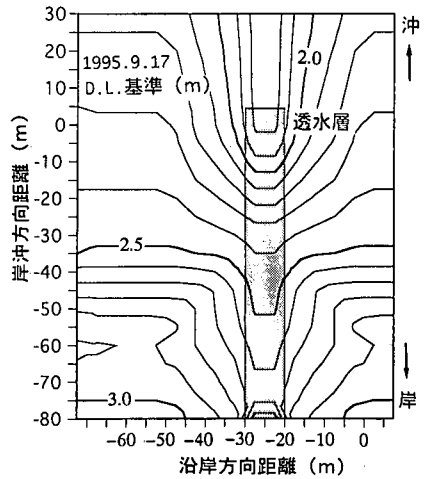


図-7 地下水位の計算結果

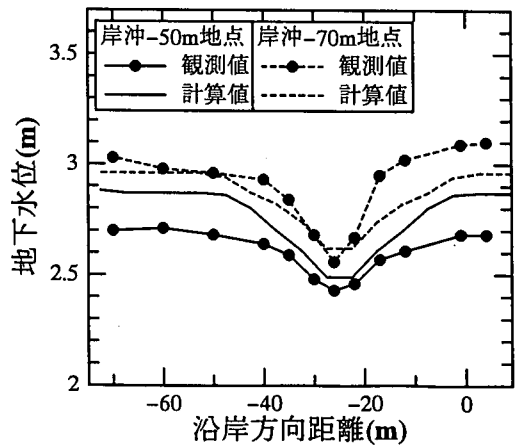


図-8 地下水位の沿岸方向分布

算を行い、モデルの適用性を調べた。

図-5は、台風通過前後の波高(沖波、観測棧橋先端)、観測棧橋先の平均水位、陸側地下水位の時系列を示したものである。図-6は、最大波高が来襲した期間に相当する9月17日14時に測定された透水層周辺の地下水位分布であり、この地下水位分布を計算の再現対象とした。この期間には前浜の急激な侵食が生じ前浜勾配はほぼ1/40になっている。なお、透水層の形状、地下水位の測定方法、地下水位、地形変化の解析結果については柳嶋ら(1995, 1996)により詳しい記述されている。

図-6によれば、透水層埋設部分の地下水位低下により地下水位のコンターは透水層を中心に海側に向かって

凹形になっている。この期間の透水層埋設部分の地下水位低下量は自然海岸と比較して最大50 cm程度であった。

計算は、岸沖約300 m、沿岸約100 mの範囲について格子間隔を $\Delta z=20$ cm, $\Delta x=5.0$ m, $\Delta y=5.0$ mとして、図-5に示したこの期間の棧橋先端の波高、水位を沖側の境界条件として平均水位分布の計算を行った。海底地形は沿岸方向に一樣な一定勾配地形(1/40)とし、波浪は直角入射させた。なお、片山ら(1992)の水利模型実験結果を参考に、透水層埋設部のwave set-upはゼロとして計算した。浸透流計算での陸側の境界では、図-6の最も陸側測線での透水層埋設部と自然海岸部の2点について観測結果を境界条件として与え、その間の格子点はこの2点から補間して境界値を与えた。陸側境界の地下水位は、透水層埋設部を中心として対称分布とした。

佐藤ら(1995)の計算例を参考に、砂浜の透水係数は

$1.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ とし、透水層内の透水係数は4オーダー大きい値とした。また、透水層先端部が排水用パイプに接続しているので、計算においても排出口の水位より求められる圧力水頭を透水層先端部の境界条件として与えた。

図-7に透水層周辺の地下水位分布(海側は平均水位分布)の計算結果を示す。また、図-8に地下水位の沿岸方向分布について計算結果と観測結果との比較を示す。

これらの図より、計算結果についても、地下水位のコンターが透水層を中心に海側に向かって凹形になっている点や透水層の地下水位などは観測値とよく合っており、本計算モデルにより全体的な分布傾向を概ね再現できることが分かった。岸沖-70 m 地点での地下水位分布の計算結果は観測された分布を比較的再現できているが、岸沖-50 m 地点での計算結果は透水層から離れた自然海滨の地下水位を過大評価しており、差が大きくなっている。このため、計算による透水層による地下水位低下範囲は現地観測結果に比較して同程度かやや大きめとなっている。この原因は、計算では波のそ上によりこの付近まで海側の平均水位が上昇しているためであり、今後平均水位の予測精度を向上させる必要がある。

4. おわりに

本研究で得られた結論は以下の通りである。

1) 潮位、透水層埋設による wave set-up の減少効果、長周期成分波の影響を考慮した海側の平均水位分布と3次元浸透流モデルを組み合わせた計算モデルを開発した。この結果、透水層周辺の地下水位の平面分布の予測が可能になり、透水層の平面配置決定の際の情報が得られるようになった。

2) 透水層埋設部での wave set-up を推定する2つの方法について検討した。しかし、自然海滨部の wave set-up の30~50%程度の減少する結果が得られたが、透水層埋設部での wave set-up をほとんど生じないという水理模型実験で得られた結果に比べて不十分であった。このため、透水層埋設部での wave set-up を精度良く推定する方法の研究が今後の課題となった。

3) 実海域を対象とした時化時の地下水位分布の再現計算より、計算による求められた透水層による地下水位低下範囲は現地観測結果に比較して同程度かやや大きめ

であったが、全体的な分布傾向を概ね再現できることが分かった。地下水位の予測精度を上げるためには、海側の平均水位の予測精度をさせる必要がある。

本研究は、運輸省港湾技術研究所、運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所、日鐵建材工業(株)、(株)テトラの4者による「ドレーン層を用いた砂浜安定化の施工法の開発」に関する共同研究の一部として行われたものである。運輸省港湾技術研究所漂砂研究室加藤室長、柳嶋主任研究員をはじめとする研究会の関係者には終始有益なご助言を頂いた。記して謝意を表す。

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—不飽和浸透流解析, 土木学会論文報告集, 第264号, pp. 87-96.
- 片山 忠・黒川 誠・柳嶋慎一・加藤一正・長谷川 徹 (1992): 透水層設置による前浜地下水位の制御, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 871-875.
- 加藤一正 (1993): 緩勾配海岸と急勾配海岸の前浜に作用する外力の違い, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 421-425.
- 加藤一正・柳嶋慎一・栗山義昭・磯上知良 (1989): 荒天時のバーム地形の侵食—長周期波に注目した現地観測—, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 354-358.
- 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.
- 佐藤勝弘・首藤伸夫 (1992): 洪水による河口砂州崩壊過程の数値計算, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 396-400.
- 塩見雅樹・戸引 勲・松川文彦・津川昭博・長谷川 徹 (1995): 透水層埋設による海滨安定化効果の定量的評価, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 721-725.
- 矢嶋信夫・野木達夫 (1977): 発展方程式の数値解析, 岩波書店, 232 p.
- 柳嶋慎一・加藤一正・片山 忠・磯上知良・村上裕幸 (1991): 地下水位低下の前浜地形変化におよぼす影響, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 266-270.
- 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量と前浜地形変化, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 726-730.
- 柳嶋慎一・加藤一正・望月徳雄・金澤 寛・平井宣典 (1996): ストライプ状透水層の前浜地形変化に及ぼす三次元的効果, 海岸工学論文集, 第43巻, 投稿中.
- Battjes J. A., J. P. F. M. Jansen (1978): Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proc. 16th Conf. of I. C. C. E., pp. 569-587.
- Rakha K. A., J. W. Kamphuis (1995): Numerical and hydraulic model study of wave decay on a shelf beach, Coastal Engineering, Vol. 24, pp. 275-296.