

透水層埋設による前浜付近の波浪、浸透流予測計算

佐藤 勝弘*・Patricia G. Pena-Santana**・金 圭 漢***・竹内 聖一****

1. はじめに

前浜付近の地下水位の変動が、海浜変形に影響を及ぼすことが知られており、最近、この点に着目して、揚水による地下水位の強制低下、透水層埋設による自然低下等の地下水位制御による海浜安定化工法の研究がなされている。透水層埋設による海浜安定化工法は、海浜中に透水層を埋設し地下水位面と砕波帯内の平均水位の水頭差により前浜付近の地下水を海中に排出し前浜付近の地下水位を自然低下させる工法であり、前浜の侵食を抑え海浜の安定化に効果があることが確認されている（例えば、柳嶋ら、1991、片山ら、1992、塩見ら、1995）。しかし、その効果は主に模型実験により検討確認されたものであった。最近、現地実験により透水層を埋設した海浜における

前浜付近の来襲波浪特性、wave set-up、浸透流と地下水位の分布とがどのように関連しているか解明されつつある（柳嶋ら、1995）。

しかし、いずれも限られた範囲の条件での検討であり、透水層埋設による海浜安定化工法を実海域で計画・設計するには必ずしも十分とはいえない。これらの情報を補完する手段として、数値シミュレーションの利用が有効な方法の1つと考えられるが、現在まだ十分な予測精度を持つ計算モデルは提案されていない。そこで、本研究では透水層埋設による海浜安定化工法を実海域で計画・設計する際の基礎資料を得ることを目的として数値シミュレーションモデルの開発を行った。その第一段階として、前浜付近の波浪、浸透流を計算するために、従来の波浪変形計算と浸透流計算を組み合わせた2次元モデルを開発した。これを用いてモデル地形の前浜付近の波浪・浸透流・地下水位分布を計算し、モデルの特性、適用性を調べた。また、実海域実験における地下水位分布の観測結果と計算結果を比較することにより透水層設置による効果の再現性を検討した。

2. 数値シミュレーションモデル

本研究では、wave set-up 等平均的な分布と供に、来襲波の波形、地下水位、浸透流の短期的な時間変化も予測できる様に、以下に述べる従来から用いられていた波浪変形計算モデルと浸透流計算モデルとを組み合わせた計算モデルを開発した。

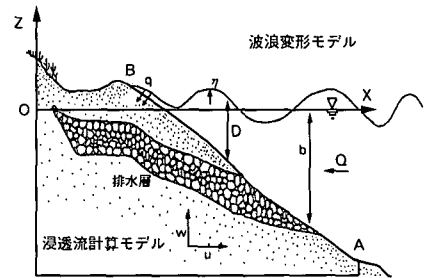


図-1 モデルの概要

(1) 波浪変形計算モデル

波浪変形計算は、水深方向に積分された量による1次元モデルを用いて行った。このモデルでは、砂浜への浸透流量 q を考慮した連続の式と砕波によるエネルギー減衰項を付加した運動方程式を連立して解くことにより、時々刻々の水位と流速分布を求めることができる。従来提案されているPackwood (1983), Kobayashiら (1989), 佐藤ら (1990) 等の砕波帯内を含めた波浪変形計算方法を参考に、次の連続式と運動方程式を基礎方程式として波浪変形計算を行った。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = -q \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \nu_e \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 x は水平座標軸、 t は時間、 g は重力加速度、 η は水面変動量、 Q は線流量($=uD$)、 u は平均流速、 $D(=d+\eta)$ 、 d は静水時の水深は全水深、 q は単位面積当りの浸透流量、 ν_e は砕波によるエネルギー減衰係数である。

沖側および岸側の境界条件としては、入射波形の時系列

* 正会口 工修 日本テトラポッド(株)応用水理研究所
 ** 工博 前日本テトラポッド(株)
 *** 正会口 工博 韓国関東大学校 前日本テトラポッド(株)
 **** 工修 日本テトラポッド(株)応用水理研究所

(規則波)を沖側で与え、岸側の境界条件は前浜への波の遡上に伴う移動境界として取り扱った。移動境界の処理は岩崎・真野 (1979) の方法を用いた。

連続式中の浸透流量 q は後述の浸透流計算モデルより計算されるものを与えた。砕波によるエネルギー減衰係数 ν_e は、佐藤・鈴木 (1990) による次式により計算した。

$$\nu_e = \frac{gd}{\sigma^2} f_D \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 σ は角周波数、 d は平均水深であり、 f_D は次式で表される。

$$f_D = \alpha_D s \sqrt{\frac{g}{d} \frac{\hat{Q} - Q_r}{Q_s - Q_r}} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 α_D は砕波帯で 2.5 となる係数、 s は海底勾配、 $\hat{Q}$ は線流量の振幅であり、 Q_s 、 Q_r はそれぞれ次式で計算される。

$$Q_s = 0.4(0.57 + 5.3s)\sqrt{gd^3}, \quad Q_r = 0.135\sqrt{gd^3} \dots\dots (5)$$

となる。砕波開始点の位置は合田の提案式 (1975) により決めた。

計算法としては、砕波によるエネルギー減衰係数 (ν_e) の値が大きくなるため、計算の安定性を考慮して次のような陰解法を使用した。スタガード格子配列で式 (1)、(2) の差分式を使用した。なお、未知の時間を表す量には * を付けた。また、既知量による差分は偏微分形のみを示した。

$$\frac{\eta_i^* - \eta_i}{\Delta t} + \theta_1 \frac{Q_{i+1/2}^* - Q_{i-1/2}^*}{\Delta x} + (1 - \theta_1) \frac{\partial Q}{\partial x} = -q_i \dots\dots (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{Q_{i+1/2}^* - Q_{i+1/2}}{\Delta t} + \theta_1 g D \frac{\eta_{i+1}^* - \eta_i^*}{\Delta x} + (1 - \theta_1) g D \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{D} \right)' - \nu_e \theta_2 \frac{Q_{i+3/2}^* - 2Q_{i+1/2}^* + Q_{i-1/2}^*}{\Delta x^2} \\ & - \nu_e (1 - \theta_2) \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0 \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

ここに、下添え字 i 等は 1 次元の格子位置を示し、 Δx 、 Δt は格子間隔、時間ステップ間隔であり、 θ_1 、 θ_2 は時間重みである。移流項は一次の風上差分、拡散項は中央差分を使用した。これより、

$$\eta_i^* = -\theta_1 \frac{\Delta t}{\Delta x} (Q_{i+1/2}^* - Q_{i-1/2}^*) + A_i \dots\dots\dots (8)$$

$$\begin{aligned} & Q_{i+1/2}^* - \theta_2 \nu_e \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (Q_{i+3/2}^* - 2Q_{i+1/2}^* + Q_{i-1/2}^*) \\ & + \theta_1 \frac{\Delta t}{\Delta x} g D (\eta_{i+1}^* - \eta_i^*) = B_{i+1/2} \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

となる。ここに、 A 、 B は既知量による値である。精度、安定性を上げるために既知項の内の移流項と未知の水位勾配項の水深 D について次の繰り返し計算形を導入した。

$$D_{i+1/2}^* = \theta_1 D_{i+1/2}^* + (1 - \theta_1) D_{i+1/2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{D} \right)' = \theta_2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{D} \right)^* + (1 - \theta_2) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{D} \right)$$

ここで、左辺の * を付けた量は前回の繰り返し計算で求められた未知量である。 θ_2 は時間重みである。式 (8)、(9) より η^* 消去すると Q^* だけの式となるのでこれをトーマスアルゴリズムで解いて Q^* を求め、次に式 (8) より η^* を求めた。

(2) 砂浜内の浸透流計算モデル

砂浜内の浸透流、地下水位の分布は、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赤井ら (1977) による飽和・不飽和の基礎式を解いて求めた。この方法では、全水頭 h を圧力水頭 ψ と位置水頭 z の和で仮定し、飽和領域では圧力水頭を正、不飽和領域では圧力水頭を負で表すと、自由水面 (地下水面) は圧力水頭がゼロの点を連ねた面で表される。鉛直二次元の場合、基礎方程式は次のように表される。

$$(C + \alpha S_s) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial h}{\partial z} \right) \dots\dots (10)$$

ここに、 $h (= \psi + z)$ は全水頭で、 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。また、浸透流の流速成分は、ダルシー則より次の式で表される。

$$(u, w) = - \left(k \frac{\partial h}{\partial x}, k \frac{\partial h}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (11)$$

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：波浪変形計算より求めた D より、 $h = D + z$ を与えた。
- 2) 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。

なお、岸側の境界で地下水位が既知の場合は圧力水頭を境界条件として与えた。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。

このモデルでは、前浜付近の遡上波による砂層内への浸透は、砂浜に遡上した波形に対応する圧力水頭が境界条件として与えられた結果生じた圧力水頭差による不飽和域の砂層に浸透する流れとして表されている。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が 2～3 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のように、図-2 に示す海底面と座標軸が一致する座標系 (x', z') で行った。式 (10)、(11) の計算座標での変換式はそれぞれ次のようになる。

$$\begin{aligned} \alpha \frac{\partial \psi}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(k \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} - \sin \delta \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + \cos \delta \right) \right) \\ & \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

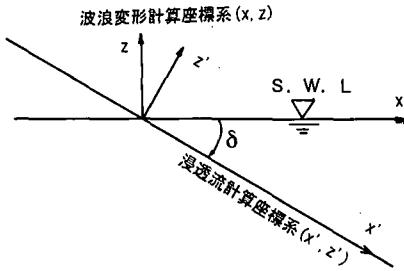


図-2 浸透流計算の座標と格子

$$(u', w') = - \left(k \frac{\partial \Psi}{\partial x'} - \sin \delta, k \frac{\partial \Psi}{\partial z'} + \cos \delta \right) \dots \dots (13)$$

ここに, $a = C + aS_s$, δ は x 軸と海底面が成す角度である。式 (12) を直交格子を用いた ADI 法で解き, 圧力水頭の分布を求めた。 x' 方向の差分式は次の様に表される。

$$a_{i,j} (\Psi_{i,j}^* - \Psi_{i,j}) / \Delta t \\ - \{ k_{i+1/2,j} ((\Psi_{i+1,j}^* - \Psi_{i,j}^*) / \Delta x' - \sin \delta) \\ - k_{i-1/2,j} ((\Psi_{i,j}^* - \Psi_{i-1,j}^*) / \Delta x' - \sin \delta) \} / \Delta x' = F_x \dots (14)$$

ここに, 下添え字 i, j 等は 2 次元の格子位置を示し, $\Delta x' (= \Delta x / \cos \delta)$ は x' 方向の格子間隔, F_x は既知量による係数である。こ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。 z' 方向についても同様な差分式が得られる。

境界条件の設定を容易にするため, 浸透流計算用の最上部の圧力計算点位置は海底面と一致させた。また, 波浪変形計算での連続式中の浸透流量 q は, 砂浜内の圧力水頭分布より求められた浸透流成分の中で海底面に最も近い計算点の値を用いて与えた。

3. 適用性の検討

(1) モデル地形への適用

開発されたモデルの特性, 適用性, 問題点を明らかにするために一定勾配海浜 (透水層有りとなし) の試算を行い, 波形, wave set-up, 砂浜中の浸透流について検討した。

海底勾配 1/10 の砂浜に波高 (H) 2.5 m, 周期 (T) 9 s の規則波が入射する条件で波浪変形計算を行った。計算は格子間隔 (Δx) 1.0 m, 時間ステップ間隔 (Δt) 9/60 s で行い, 水深 18 m の地点より正弦波を入射させ 10 周期間の計算を行い, 解析解と比較した。

図-3 は, 海浜への海水の浸透がないとして求めた 10 周期目の波形を示しものである。波形分布には砕波点付近に波形に分散傾向が見られ幾分不安定な波形となっている。この場合の波浪変形計算の時間重み θ はいずれも 0.51 である。

図-4 は計算された水位を 1 周期間平均して求めた平

均水位の分布を示したものである。図中には, 次の式より得られる平均水位の上昇量 ($\bar{\xi}$) の解析解も併せて示した。

$$\bar{\xi} = - \frac{H^2}{8} \frac{k}{\sinh 2kh} \quad \text{砕波前} \\ = K(h_b - h) + \bar{\xi}_0 \quad K = 1 / (1 + r / (3\gamma^2)) \quad \text{砕波帯内}$$

ここに, H は波高, k は波数, h は水深, γ は砕波帯内の波高水深比, 添え字 ' b ' は砕波点の値の意味。なお, 合田提案式より求められる砕波点までは微小振幅波理論で浅水係数を算定して波高を求めた。図から定量的には解析解に比べて計算で求められる setdown 量が幾分小さいが, wave setup の最大位置, 量等はよく一致しており, 解析解の平均水位の分布を概ね再現している。

次に, 透水層を埋設した場合としない場合について, 海水の砂浜への浸透を考慮した波浪変形, 浸透流計算を行った。浸透流の計算の鉛直方向格子間隔 $\Delta z'$ は 0.1 m とし, 海底面した 3 m までとした。水平方向の格子間隔は $\Delta x' = 1.0$ m とし, 計算領域を静水時の汀線位置をはさんで約 120 m の範囲 (沖側約 80 m, 岸側約 40 m) とした。波浪変形は浸透流計算領域の沖側位置から約 180 m 程度沖側に延長した位置から計算を始めた。また, 分散波の発生を抑えるために時間重み θ を 0.75 とした。海底面から 1 m の位置に厚さ 1 m の透水層を埋設し, 沖側の排出口を wave setdown が最大となる砕波点付近 (40 m 付近) に設けた。砂浜の透水係数は 1.0×10^{-5} m/s と

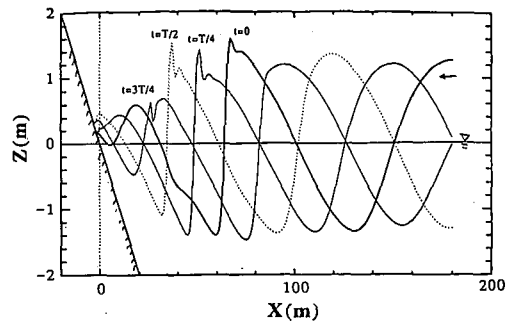


図-3 モデル地形への適用例 (波形計算結果)

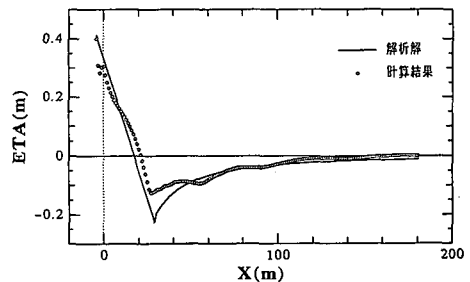
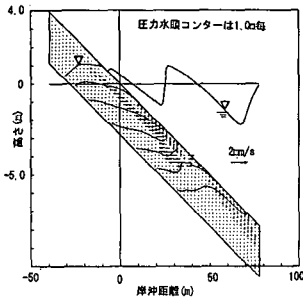
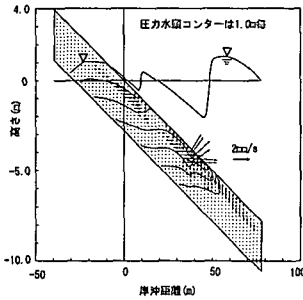


図-4 モデル地形への適用例 (平均水位分布計算結果)

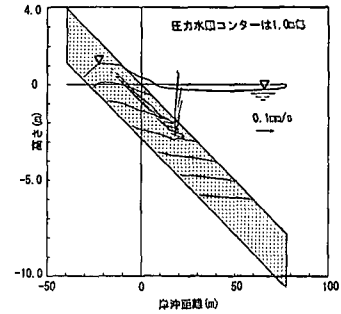
図一五 浸透流と波形の計算例 ($t=0$)図一六 浸透流と波形の計算例 ($t=162 T$)

し、透水層内の透水係数は2オーダー大きい値を与えた。また、比水分容量と比貯留係数は同じ値 $1.0 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ を与えた。なお、不飽和領域では θ に対して C , k が変化し基礎式は強い非線形を示すが、ここでは、計算の安定性の面から全域一定で与えている。

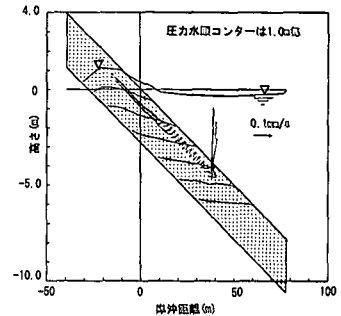
図一五、図一六は、透水層を埋設した場合のある時刻での波形、浸透流、圧力水頭の分布の計算例である。これらの図より、透水層中の浸透流流速は周辺砂浜中の流速に比べて2オーダー大きくなっていることが分かる。流速値は非常に小さいため、波浪変形計算時の海底面での浸透流量 q は無視できると考えられる。浸透流は波の峰から谷方向に向かって流れており、透水層の排出口付近に波の谷がある場合に透水層の流出が大きくなることが分かる。

図一七に、1周期間平均した浸透流速、圧力水頭、平均水面を示す。透水層内の1周期平均の流れは沖向きになっている。なお、透水層を埋設しない場合の計算結果と平均水面、地下水面の位置はほとんど差が見られず、片山ら(1992)による水理実験で観測された透水層を埋設による地下水位の低下を再現することはできていない。

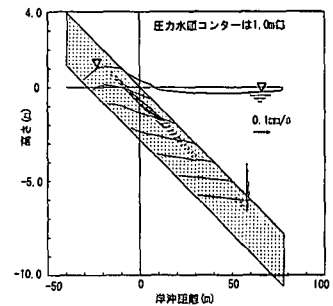
図一八、図一九は、排出口をそれぞれ20 m づつ沖側、岸側に移動した場合の1周期平均した水面位置と浸透流分布の計算結果である。これらの図によれば、排出口を碎波付近にした場合に比較して、圧力水頭、平均水面、浸透流流速ともにほぼ同程度ある。しかし、排出口付近の沖向き流速が約10%程度減少しており、排出口を碎波付



図一七 平均水面位置と浸透流分布 (排出口: wave setdown 最大付近)



図一八 平均水面位置と浸透流分布 (排出口: 沖側移動)



図一九 平均水面位置と浸透流分布 (排出口: 岸側移動)

近にすると1周期平均の沖向き流れは最大となる傾向があることが分かる。

(2) 現地海岸への適用

実海域でのモデルの適用性を検討するために、波崎海洋施設(HORS)に於いて測定された1994年9月台風24号による時化時の自然海浜と透水層を埋設した海浜の地下水位分布の再現計算を行った。再現対象は海底勾配が一定に近い図一十に示す9月18日16:00に測定された地下水位とした。図ではこの時間帯の汀線を鉛直、水平方向の原点として表している。自然海浜に比べ透水層断面では最大80 cm程度の地下水面の低下が観測されている。なお、透水層の形状、地下水位の測定方法等は柳島ら(1995)に詳しいのでここでは省略する。浸透流計算は汀線をはさんで約400 mの範囲について格子間

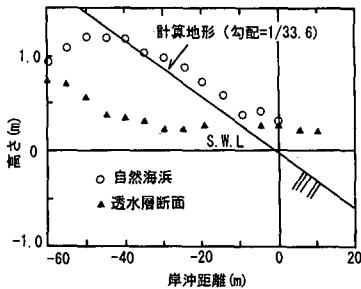


図-10 地下水位の現地観測結果

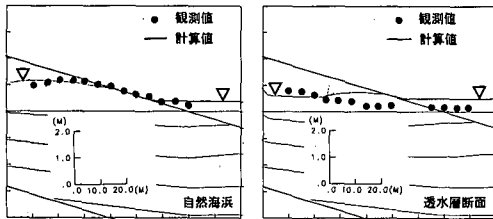


図-11 現地海浜での地下水位計算結果の比較

隔を $\Delta x' = 5 \text{ cm}$, $\Delta x = 2.0 \text{ m}$ として行った。砂浜の透水係数は $1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ とし、透水層内の透水係数は 4 オーダー大きい値を与えた。他の計算条件はモデル地形の適用に際して用いたものとほぼ同じである。なお、最も岸側で観測された地下水位より得られる圧力水頭を岸側の境界条件として与えた。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-11 に、自然海浜と透水層断面における地下水位分布の計算結果と実測値の比較を示す。この図より、自然海浜における地下水位の計算結果と実測値はよく一致しており計算の再現性が良好であることが分かる。これは、岸側の地下水位を固定した効果が現れたものであり、背後地の地下水位分布の影響が適切に取り入れることが地下水位の再現性を高めるために重要であることを示している。一方、透水層断面については、観測結果に比較してやや小さいが最大 50 cm 地下水位の低下が計算されており、透水層の透水係数を調整することにより実海域での適用も可能と考えられる。

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) 前浜付近の波浪、浸透流を計算するために、従来の波浪変形計算と浸透流計算を組み合わせた断面 2 次元

モデルを開発した。

2) 開発された計算モデルを用いて行った一様勾配海岸での試算結果より、透水層なしの自然海浜の wave set-up は解析解と良く一致した。透水層中の流速は周辺に比べて 2 オーダー近く大きく、排出口付近に波の谷の部分通過する際に冲向きの流れが強まることや排出口を wave set-down 最大地点付近とすると 1 周期平均の冲向き流れは最大となる傾向にあることが分かった。

3) 透水層内の透水係数、圧力水頭の境界条件等を調整することにより、実海域での地下水位分布を概ね再現できることが分かり、モデルの再現性が示された。

今後は、数値シミュレーションモデルを平面モデルに拡張する予定である。

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)、日本テトラポッド(株)の4者による「ドレイ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.
- 岩崎敏夫・真野 明 (1979): オイラー座標による二次元津波遡上の数値計算, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 70-74.
- 合田良実(1975): 浅海域における波浪の碎変形, 港湾技術研究所報告, 第 14 巻, 第 3 号, pp. 59-106.
- 片山 忠・黒川 誠・柳嶋慎一・加藤一正・長谷川巖 (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.
- 佐藤慎司・鈴木秀典 (1990): 碎波帯における底面流速変動波形の評価法, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 51-55.
- 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, 投稿中.
- 塩見雅樹・戸引 典・松川文彦・津川昭博・長谷川巖 (1995): 透水層埋設による海浜安定化効果の定量的評価, 海岸工学論文集, 第 42 巻, 投稿中.
- Packwood A. R. (1983): The influence of beach porosity on wave uprush and backwash, Coastal Engineering, Vol. 7, pp. 29-40.
- Kobayashi N., A. Wurjanto (1989): Armor stability on rough permeable slopes of marine structures, Proc. 23rd Conf. of I. A. H. R., pp. C. 407-C. 414.