

透水層埋設による前浜付近の浸透流特性

宮武 誠*・近藤 俣郎**・藤間 聡***・川森 晃****

1. はじめに

自然海浜において、砂浜内の地下水位上昇が前浜付近の侵食機構に影響を及ぼすことに着目し、その水位上昇を軽減させる工法が開発されてきた (Parks, 1989, 1991)。現在、提案されている砂浜内に透水層を埋設する海浜保全工法 (片山ら, 1992) は、平均海面と地下水位の水位差により浸透した海水を沖側に自然排水させて地下水位を低下させる工法であり、海浜景観上への配慮に加え、運転コストの面でも有効な工法である。この工法については、模型実験・現地実証実験等が数多く行われ、地下水位の低下、前浜侵食の抑制等の海浜安定化に加え、海水浄化効果等が確認されている (柳鳴ら, 1995, 1997)。また、佐藤ら (1995, 1996, 1998) は前浜の波浪変形と砂層内の浸透流解析を結合させた数値モデルを提案し、前浜の侵食に深く関与する地下水位変動や透水層内の流速分布の検討を行い、有用な知見を得ている。

しかし、透水層の配置や規模等の決定の多くは経験的な知見に基づくものであり、これらを合理的に定める手法は少ない。本論文では、実海浜に透水層を埋設するにあたり、砂浜内の地下水流に関する詳細な模型実験と数値解析を行い、砂浜内の地下水流動特性と前浜の侵食機構の関係を明らかにする。また、得られた知見に基づき透水層の効率的な配置及び層厚等について検討するものである。

2. 前浜斜面上の侵食及び地下水位変動に関する実験

(1) 実験装置及び方法

実験は図-1 に示すフラップ式造波機を有する 1600×95×75 cm の 2 次元造波水槽で行った。水槽左端には粒径 0.1 mm, 比重 2.67 の均一珪砂を用いて、天端幅 1 m, 斜面勾配 1/10 の砂浜模型を作成した。この砂浜には中央粒径 10 mm の碎石を透水層として埋設した。ここに透水層の配置及び層厚を図-2 に示す。透水層は、層厚をそれ

ぞれ 10 cm 及び 5 cm とし、いずれも水槽左端壁から 150 cm 地点で勾配を 1/10 から 1/30 に変化させた。設置位置は勾配変化点で透水層上方の砂層厚を 10 cm とし、砕波帯付近に設置した出口部は、碎石が斜面上に露出するように設置した。なお、砂層と透水層の境界には砂の混入防止のため、フィルタ材としてプランクトンネットを使用した。

斜面上の波変形、地下水位変動及び前浜侵食に関する実験は、透水層がない場合と埋設した場合について行った。入射波は、波高 8.5~9.25 cm, 周期 1.17~1.28 s の規則波とし、4 時間連続作用させたのち、砂浜斜面上の平均水位分布、地形断面変化及び地下水位をそれぞれ測定した。透水層を埋設した場合、その出口部には磁気流速計を設置し、浸出速度の測定を行った。斜面上の水位変動量は、図-1 に示す 4 本の容量式波高計及び 2 台の 8 mm デジタルビデオカメラにより測定を行った。平均水位分布は、各測点の水位変動量を角波数で除して算出した。砂浜内の地下水位は、内径 6 mm のガラス製マンメータを汀線から岸方向に 20 cm 間隔で、水槽底部から高さ 20 cm に 10 本設置し測定した。また、地形断面変化は水槽奥行き方向に測線を 37 cm 等間隔に 3 本設け、各測線上 5 cm 間隔で侵食深を測定し、侵食量及び堆積量を算定した。

(2) 前浜斜面上の侵食・堆積過程

図-3(a) は透水層がない場合の海浜地形断面変化図である。砕波帯は岸沖距離 340~370 cm 間にあり、渦の発生する巻波型の砕波が発生する。実験開始 60 分後には砕波により 350 cm 地点で、初期地形から最大 6.3 cm の深さまで洗掘される。その後、地形変化に伴い砕波形式は崩れ波型へと変化し、120 分経過後、砕波帯での洗掘はほぼ停止する。遡上域での侵食範囲は遡上高の上昇に伴い、さらに後浜まで拡大する。最大侵食深は初期汀線地点で 5.1 cm に達する。実験終了時における砕波帯から遡上域に至るほぼ全域の侵食深は 4~6 cm 程度である。一方、岸沖距離 400 cm 地点より沖側では、60 分後から堆積が生じ砂州が形成される。この砂州は、時間経過とともに規模を拡大し沖側に移動する。

図-3(b) は層厚 10 cm の透水層を埋設した場合の地

* 学生会員 室蘭工業大学大学院建設システム工学専攻
** フェロー 工博 室蘭工業大学教授 建設システム工学科
*** 正会員 工博 室蘭工業大学教授 建設システム工学科
**** 正会員 工博 アルファ水工コンサルタンツ(株)

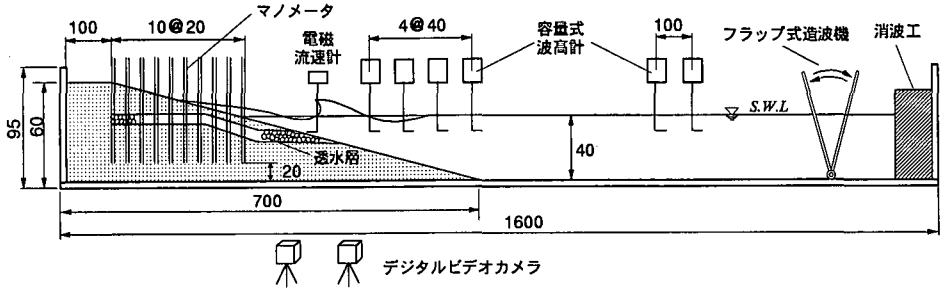


図-1 実験水槽及び装置の概要図 (単位: cm)

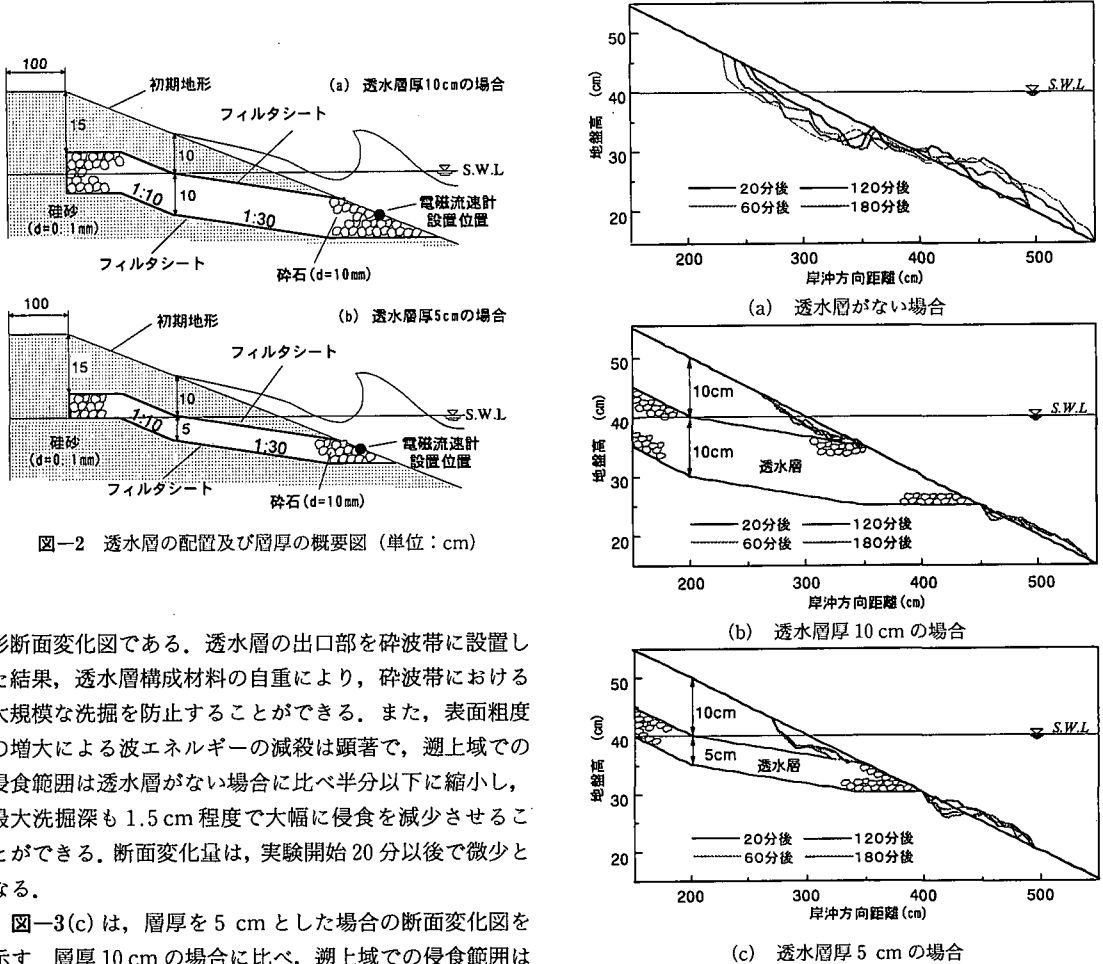


図-2 透水層の配置及び層厚の概要図 (単位: cm)

形断面変化図である。透水層の出口部を砕波帯に設置した結果、透水層構成材料の自重により、砕波帯における大規模な洗掘を防止することができる。また、表面粗度の増大による波エネルギーの減殺は顕著で、遡上域での侵食範囲は透水層がない場合に比べ半分以下に縮小し、最大洗掘深も1.5 cm程度で大幅に侵食を減少させることができる。断面変化量は、実験開始20分以後で微少となる。

図-3(c)は、層厚を5 cmとした場合の断面変化図を示す。層厚10 cmの場合に比べ、遡上域での侵食範囲はほぼ同規模であるが、最終侵食深は、初期汀線で2倍程度に達する。350 cm付近では透水層上方の砂層の大部分が侵食され、一部透水層が斜面上に露出する。一方、透水層下方の斜面上では、小さな砂州が形成される。

実験開始60~240分間に得られた断面変化量に基づき台形公式により算定した侵食量および堆積量を図-4に示す。透水層がない場合、実験期間中に侵食量は増加する傾向にあるが、増加率は減少し、侵食量に対する堆積

量の比率は64%程度とほぼ一定になる。堆積量が増加するため、斜面下方で砂州が形成され、その規模を沖側へ拡大する。透水層を埋設した場合は、ない場合に比べ極端に侵食量が減少し、特に層厚10 cmの場合、侵食量は透水層がない場合の20%程度に抑制できる。また、侵食量と堆積量はほぼ同量であり、岸沖漂砂を抑制する。こ

図-3 透水層の有無による海浜地形断面変化

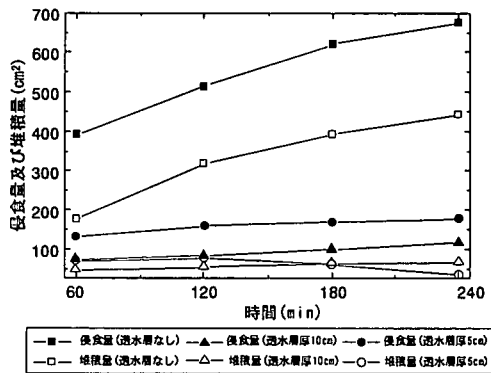


図-4 侵食量及び堆積量

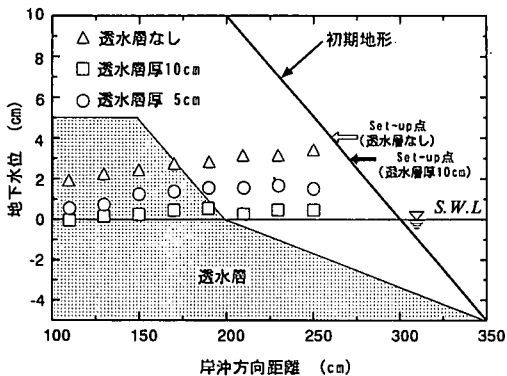


図-5 透水層の有無による地下水位

これは、波の遡上により一度巻き上げられた底質砂が、透水層の集水効果により再度前浜に堆積するためであると考えられる。しかし、層厚を5cmにした場合、その侵食量は層厚10cmの透水層の場合の約1.5倍となり、堆積量の増加率は減少し、砂州の発達は停止する。層厚を薄くすると、透水層の集水機能が低下し、侵食量を増大させる。

(3) 透水層の層厚による地下水位上昇の変化

図-5は地下水位の変化がほぼ定常状態に達した12分後の透水層の有無による地下水位分布を示す。透水層がない場合は、遡上高の増加とともにset-up量は実験開始1分までに急激に上昇し、10分後には図中矢印で示す地点に達しほぼ定常状態となる。前浜付近の地下水位はそれに追従する形で上昇し、その上昇量は岸沖距離250cm地点で3.1cmとなりset-up量3.8cmにほぼ一致する。一方、後浜では前浜に比べやや遅れ上昇し、その上昇量は110cm地点で1cm程度小さく、実験開始12分後には地下水位の変動量は0.1cm程度となる。この前浜の地下水位上昇は底質を浮遊させ、遡上域での戻り流れによる侵食を助長させると考えられる。層厚10cmの透水層を埋設した場合は、set-up量が透水層のない場合

に比べ1.5cm程度低下し、地下水位上昇量は0.2mm以下の微量となる。地下水位はほぼ静水位に一致し、波の遡上で浸透した地下水量は、透水層により速やかに排水されると推定される。電磁流速計の測定による透水層出口部の平均流速は1.1cm/s程度であり、流向は沖向きである。透水層が速やかに浸透水を排出するため、砂層内の流向は鉛直方向に卓越し、斜面上の侵食を抑制するものと考えられる。層厚5cmの場合、地下水位は上昇し、その上昇量は0.9~1.2cmで透水層がない場合の約1/2に相当する。透水層出口部では波の周期的な変動に影響され、平均流速は0.5cm/sである。層厚10cmの場合に比べ、流出速度及び透水層断面がともに1/2になった結果、排水機能が低下する。従って、浸透した海水を十分に排水できないため、遡上域での侵食を抑制できないと考えられる。

3. 砂浜内の地下水流動解析

(1) 解析概要

実験において透水層がない場合、砂浜内では地下水位が上昇し、碎波帯から遡上域に至る区間は激しい侵食を受ける。一方、透水層を埋設した場合、地下水位の上昇が抑制され侵食量を大幅に減少させることができる。透水層の有無による地下水の流動特性を詳細に把握するため、模型実験では測定が困難な地下水の流速及び流向について数値解析により検討を行う。

(2) 基本方程式

解析領域はすべて飽和状態と仮定して、浸透流速・流向及び地下水位分布の算定には、下記の鉛直2次元地下水流動方程式を適用し、浸透流速・流向、水位分布を求める。

$$S \cdot \partial h / \partial t = K \cdot \nabla^2 h \dots\dots\dots (1)$$

$$V = -K \cdot \nabla h \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 h は位置水頭と圧力水頭との和で与えられるピエゾ水頭、 S は比貯留係数であり、圧力水頭の変化に対する空隙率の変化の割合を表わす、 V は浸透流速、 K は透水係数である。

(3) 基本方程式の差分化

各時間ごとの砂浜内の地下水位及び浸透流速の算定は、直交格子を用いた差分法により行う。本研究では波変形と浸透流解析を結合させるため、独立した座標系を設定する。ここに使用する座標系を図-6に示す。浸透流解析に関しては、境界左端底部D点を原点にとり水平方向をx軸、鉛直方向をz軸とする。設定した座標系に基づき(1)式のx及びz方向の差分方程式は、以下のよう

$$S(h_{i,j}^{k+1} - h_{i,j}^k) / \Delta t = K(h_{i,j}^{k+1} - 2h_{i,j}^k + h_{i,j}^{k-1}) / \Delta x^2 + K(h_{i,j+1}^k - 2h_{i,j}^k + h_{i,j-1}^k) / \Delta z^2 \dots\dots\dots (3)$$

$$S(h_{i,j}^{k+2} - h_{i,j}^{k+1}) / \Delta t = K(h_{i,j}^{k+2} - 2h_{i,j}^{k+1} + h_{i,j}^k) / \Delta x^2 + K(h_{i,j+1}^{k+1} - 2h_{i,j}^{k+1} + h_{i,j-1}^{k+1}) / \Delta z^2 \dots\dots\dots (4)$$

ここに下添え字 i, j は 2 次元格子の位置, 上添え字 k は時間格子の位置, $\Delta x, \Delta z, \Delta t$ はそれぞれ x 及び z 方向の格子間隔及び時間ステップを表示する。

(4) 境界条件

図-6 に示す境界条件は以下のように与える。ただし、波変形に関する座標系は、静水時の汀線を原点とし、鉛直方向を η 軸、水平方向を ξ 軸とする。

① 海域と接する斜面境界 (AE 面) : 水位変動量 $\pm w$ と静水時の水深 d との和を圧力水頭 φ として、位置水頭 z との和で与える。

$$h = \varphi + z \dots\dots\dots (5)$$

② 大気と接する境界 (BC, BE 面) : E 点からの鉛直距離を負の圧力水頭 $-\varphi$ とし、位置水頭 z との和で与える。

$$h = -\varphi + z \dots\dots\dots (6)$$

③ 左端境界及び底部境界 (AD, CD 面) : 境界に対して法線方向の流速を零とする。

平均水位分布は断面変化が少ない実験開始 12 分までで得られた値を用いる。欠測している計算点に対しては、3 次スプライン関数で補間した値を使用する。

(5) 計算条件

本解析では $\Delta x = 10$ cm, $\Delta z = 1$ cm, $\Delta t = 0.5$ s とし、初期条件は静水時を考え、すべての格子点に水頭値を与えて計算を行う。砂浜内の圧力水頭分布は、(3) 式及び (4) 式により行い、流速・流向の計算は得られた水頭値を用い中央差分で求める。地下水位は、圧力水頭が零の点を連ねた線で表示する。砂層の比貯留係数は $S =$

0.0096 cm^{-1} とし、透水係数 K は、定水位透水試験による実験値 $K = 1.44 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ を用いる。一方、透水層の比貯留係数は砂層と同一とし、透水係数 K は Forchheimer (1901) が提示した実験式により $K = 1.287 \text{ cm/s}$ とした。

(6) 透水層がない場合の海浜内地下水流動特性

図-7 は、透水層がない場合の地下水位分布の計算及び実験結果を示す。計算値は、20 分経過後ではほぼ定常状態となり、実験値をほぼ妥当な精度で再現していることが認められる。地下水位分布は、両者とも前浜付近で高く、後浜で低いことを示している。図-8 は、計算地下水位がほぼ定常状態になった 20 分後の浸透流速分布図である。平均水位は岸沖距離 280~360 cm の区間で通減する。この区間での砂層内では、斜面上に平行な流れが生じ、斜面上では地下水が再び表面に現れる復帰流が発生する。この復帰流の流速は、砂浜全体の平均流速 10^{-6} cm/s の 100 倍の 10^{-4} cm/s に達し、特に碎波帯に相当する 360 cm 付近に地下水が集中することが認められる。

(7) 透水層を埋設した場合の海浜内地下水流動特性

図-9 は透水層厚 10 cm の場合の地下水位分布の計算と実験結果を示す。計算値は透水層がない場合と同様な精度で実験値を再現している。透水層内の地下水位上昇

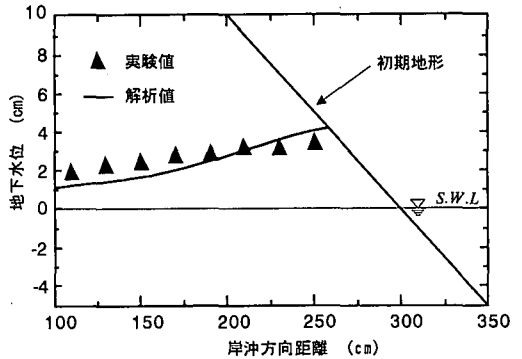


図-7 透水層がない場合の地下水位分布

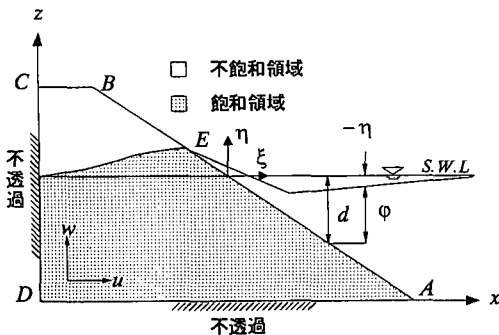


図-6 解析座標系及び境界条件

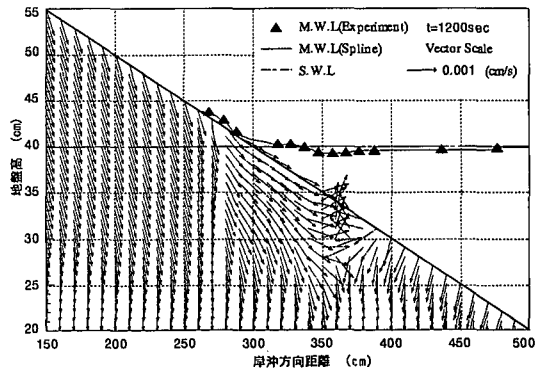


図-8 透水層がない場合の浸透流流速分布図

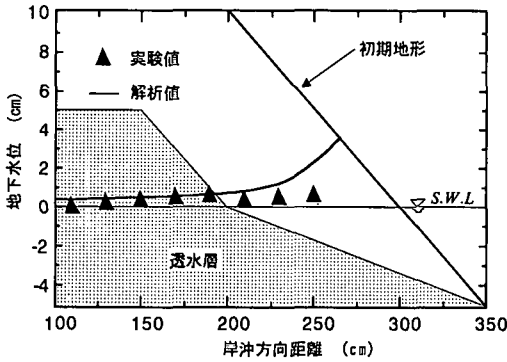


図-9 層厚 10 cm の場合の地下水位分布

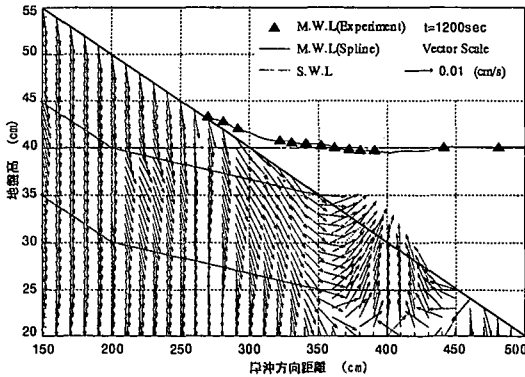


図-10 層厚 10 cm の場合の浸透流速分布図

は 1 cm 以下であるが、前浜付近の地下水位は急激に上昇する。これは境界条件として与えた平均水位と地下水位が連続性を保とうとしたため、上昇量は実験値に比較して大きな値となる。図-10は透水層厚 10 cm の場合の浸透流速分布図を示す。透水層内の流速は $10^{-2} \sim 10^{-1}$ cm/s であり、これは砂層全体の平均流速の 100~200 倍に相当し、浸透した海水を速やかに排出することが認められる。透水層の出口部では、上向き復帰流が生じ、流速は最大となる。これは、復帰流の流出地点が set-down の最小水深地点に一致し、流速が加速されることに起因するものと考えられる。出口部における復帰流の流速は $0.5 \sim 0.7$ cm/s であり実験値の 1.1 cm/s にほぼ一致した値となる。一方、岸沖距離 280~350 cm 間の透水層上方の砂層内では、流速は透水層がない場合に比べ 1.5~2 倍程度速く、その流向は鉛直方向が卓越する。この透水層の集水効果は、斜面に沿う平行流を抑制し、遡上域での侵食を抑制すると考えられる。

4. 結 論

本研究で得られた結論を要約すると下記の通りである。

(1) 透水層がない場合、前浜付近の地下水位の上昇により、砂層内では斜面に平行な流れと上向きの復帰流が発生する。これらの地下水流動特性は、砕波帯から遡上域に至る区間で砕波による洗掘や戻り流れによる侵食を助長させる。

(2) 透水層を埋設した結果、透水層上方の砂層内では、透水層の集水・排水機能により鉛直下向流が卓越する。その結果、地下水位上昇量を微小に抑制でき、遡上域での侵食を大幅に軽減することができる。

(3) 透水層厚を減少させると、それに伴い集水・排水機能が低下し、浸透した海水を十分に排水することができず地下水位は上昇する。その結果、透水層がない場合と同様な侵食現象が発生する。

参 考 文 献

- 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制御, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 871-875.
- 酒井哲朗・間瀬 肇・後藤仁志・中西 隆 (1997): 透水層埋設の位置と長さが間隙水浸出流速に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 676-680.
- 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・妻木木一秀・野口雄二・岩佐直人 (1996): 透水層埋設による地下水低下に関する 3 次元予測計算, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 656-660.
- 佐藤勝弘・野口雄二・長谷川巖 (1998): 透水層埋設海浜における長周期波による浸透計算, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 631-635.
- 塩見雅樹・戸引 勲・松山文彦・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, pp. 721-725.
- 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・中宮利之・金澤 寛・原田久志 (1997): 現地海岸に埋設した透水層の海水浄化効果, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 1171-1175.
- Forchheimer (1901): Wasserbewegung durch Boden, Z. Ver. Deutsch. Ing. 45, pp. 1782-1788.
- Parks, J. M. (1989): Beachface dewatering: A new approach to beach stabilization, THE COMPASS, Vol. 66, No.2, pp. 65-72.
- Parks, J. M. (1991): New "REDGING" technology for inlets and beaches move sand to the pump, Coastal Sediments'91, Vol. 2, pp. 1943-1954.