

透水層埋設海浜における長周期波による浸透流計算

佐藤 勝弘*・野口 雄二**・長谷川 巖***

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いる。この点に着目して、透水層埋設による地下水位を自然低下させる海浜安定化工法が提案されている。この工法に関して現地実験、水理模型実験による研究が最近精力的に行われており、海浜安定化効果に加えて景観上への配慮、海水浄化効果等も期待できる非常に有効な工法であることが報告されている（例えば、柳嶋ら, 1991, 1995, 1996, 1997, 1998；片山ら, 1992；塩見ら, 1995；細貝ら, 1997）。

また、実海域の透水層位置、長さ、平面配置を計画する際の基本情報を得ることを目的として、数値計算モデルにより透水層を埋設した海浜内の浸透流・地下水位分布をシミュレーションする手法が提案されている（佐藤ら, 1995, 1996；酒井ら, 1997）。

しかし、従来提案されているモデルは、短周期波浪の波形を外力とした 2 次元断面モデルや海側の平均的な平面水位分布と 3 次元浸透流モデルを組み合わせたモデルに限られる。このため、前浜付近の地下水位の変動に強く影響すると指摘されている不規則波浪に伴う長周期波の効果が考慮されていないか考慮されていてもその効果が簡単化されているため、従来モデルでは予測精度が必ずしも十分とは言えない。

そこで、本研究では、外力として長周期波の影響を考慮した計算モデルを開発し、これを用いて実海域実験における時化時波浪を対象とした透水層周辺の浸透流・地下水位の計算を行いモデルの適用性を調べた。

2. 数値シミュレーションモデル

(1) 波浪変形計算モデル

佐藤ら (1995) は、時々刻々の波形の伝播を計算する非線形長波式を用いた波浪変形計算と浸透流計算を組み合わせることにより、wave set-up 等の平均的な分布とともに来襲波の波形、浸透流、地下水位分布の短期的な

時間変化も検討できる二次元断面モデルを提案した。

従来の波浪変形計算モデルの基礎式を、例えばブシネスク方程式に変更し、時々刻々の波形の伝播を計算しながら浸透流計算を組み合わせることにより、不規則波浪に伴う長周期波の影響を自動的に含んだ計算が可能である（例えば、金山ら, 1994）。しかし、透水層の平面配置の検討に必要となる地下水位・浸透流の 3 次元モデルでの適用を想定した場合には、波浪の周期に比べて充分時間スケールの長い平均的な地下水位の分布を予測対象とするため、この方法は計算時間、容量の面から必ずしも効率的ではない（例えば、合田, 1995）。

このため、本研究では計算効率に優れた長周期波成分だけを取り出した非線形長波方程式を用いた長周期波波浪計算と浸透流計算を組み合わせた計算モデルを開発した。

つまり、wave set-up や前浜への遡上を含めた長周期波波形を短周期波の計算結果から求めたラディエーションストレスの時空間分布を外力とする非線形長波式より求め、浸透流・地下水位計算の境界条件とした。

本研究の長周期波の計算は、次式で表される連続式と浅海長波の運動方程式にラディエーションストレスの項を加えた運動方程式を基礎方程式とした。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = q \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial u Q_x}{\partial x} + \frac{\partial v Q_x}{\partial y} + g D \frac{\partial \eta}{\partial x} + T_x + F_x + M_x = 0 \dots\dots\dots (2)$$

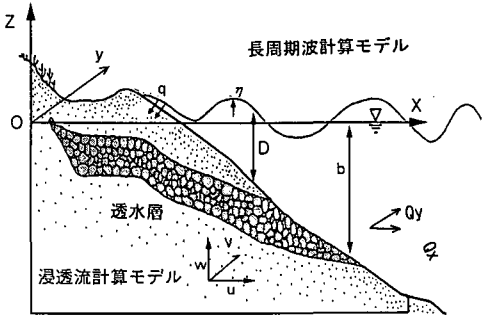


図-1 モデルの概要

* 正会員 工修 (株)テトラ 環境技術センター
** 正会員 (株)テトラ 環境技術センター
*** 正会員 (株)エコ 環境水理部

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial u Q_x}{\partial x} + \frac{\partial v Q_x}{\partial y} + g D \frac{\partial \eta}{\partial y} + T_x + F_x + M_x = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 x, y は水平座標、 t は時間、 g は重力加速度、 η は長周期波の水位、 Q_x, Q_y は水平線流量成分 ($=uD, vD$)、 u, v は平均流速成分、 q は単位面積当たりの浸透流量、 $D(d+\eta, d$ は静水時の水深) は全水深、 T_x, T_y はラディエーションストレス項、 F_x, F_y は底面摩擦項、 M_x, M_y は水平混合項である。

摩擦項および水平混合項は、西村 (1984) に習って与えた。

ラディエーションストレス項は、次式で表され、通常の海浜流計算の場合と同じであるが、ラディエーションストレスの項 (外力項) が波群の伝播に伴い時間的にも変化する点異なる。

$$M_x = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right), \quad M_y = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

不規則波波群によるラディエーションストレスの時空間分布は仲座ら (1988, 1993) に習い与えた。

つまり、拘束波群の波高 H が次式で表されるように波群の平均波高 H_{mean} を中心として変調部振幅 ΔH で波群周期 T_0 で正弦的に変化するとモデル化し、この波群が沖から伝播するとした。

$$H(x, y, t) = H_{\text{mean}} + \Delta H \sin(\sigma t + \varepsilon) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $H(x, y, t)$ は波群波高、 $H_{\text{mean}}, \Delta H, \varepsilon$ はそれぞれ波群の平均波高、変調成分振幅、伝播に伴う位相差であり、場所 (x, y) の関数である。また、 $\sigma = 2\pi/T_0$ 、変調率 α は $\Delta H/H_{\text{mean}}$ である。

波群を構成している最大波と最小波が決まると平均波高と変調率が次の様に表されると仮定する。

$$H_{\text{mean}} = \frac{1}{2}(H_{\text{max}} + H_{\text{min}}), \quad \Delta H = \frac{1}{2}(H_{\text{max}} - H_{\text{min}}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

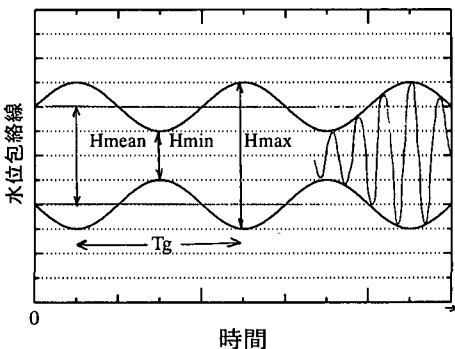


図-2 波群のモデル化

逆に、平均波高と変調率を設定した場合には次の関係となる。

$$H_{\text{max}} = (1 + \alpha) H_{\text{mean}}, \quad H_{\text{min}} = (1 - \alpha) H_{\text{mean}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

これより、対象領域内の波群の最大波高、最小波高の分布は、平均波高と変調率を仮定して決めた波群最大波高、最小波高を沖側の入射境界条件として通常の短周期波に対する波浪変形計算より計算し、求められた各場所での最大波高、最小波高の分布から式 (7) より平均波高と変調率の分布が計算される。

また、位相差の分布は、波群が短周期波の波向方向に (短周期波の) 群速度 C_g で伝播するとして求められる。つまり、波群の伝播により等位相の位置 (x, y) の移動は次式で表されるので、図-3 に示すように計算対象点から沖に向かって逆伝播経路上でこれらの式を数値積分して到達時間を求め、計算領域内の波群の伝播に伴う位相差分布が計算される。

$$\frac{dx}{dt} = C_g \cos \theta, \quad \frac{dy}{dt} = C_g \sin \theta \quad \dots\dots\dots (8)$$

なお、山本ら (1994) や中村 (1997) は、本研究と同様にラディエーションストレスの項を加えた浅海長波式を基礎方程式として長周期波の計算を行っている。彼らのモデルでは、時々刻々与えられる沖側の波群波高に対してこの波高を境界条件として領域内の波高分布を計算し、この計算結果よりラディエーションストレス項を与えている。今回のラディエーションストレス項の取り扱いとは彼らのモデルに比べより簡単化されたものである。また、流れとの干渉を考慮していない点などが異なる。

本研究で用いた長周期波の計算手順をまとめると以下の様になる。

- 1) 沖側での波群の諸元 (平均波高、変調率、周期、進行方向、位相差) を設定する。
- 2) 最大波高、最小波高を入射境界条件として波浪変形計算。領域内の平均波高と変調率の分布の設定する。
- 3) 短周期波の波向、周期より沖側境界の位相差分布を

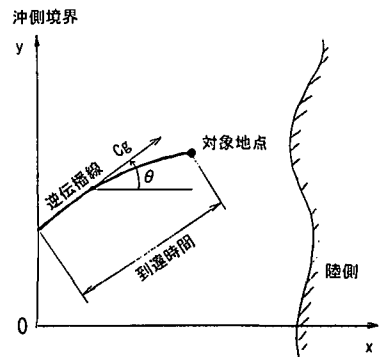


図-3 位相差分布の求め方

設定する。

- 4) 沖側から順次逆伝播計算を行い到達時間から位相差分布を計算する
- 5) 長周期波水位、流速の初期値を設定する。
- 6) 沖側境界条件の長周期波水位を設定する
- 7) 対象時刻の波高分布より、ラディエーションストレス項の分布を計算する
- 8) 連続式・運動方程式より水位・流量を計算する
- 9) 予め設定した計算時間が終わるまで、6)～8)の計算を繰り返す。

なお、変調率をゼロとした場合は通常の実海浜計算と同様になる。計算の安定のために、山本ら (1993) と同様に予めこの wave set-up 量を静水時の水深に加えた水深を計算時水深とし、ラディエーションストレス項も平均からの偏差分を与えて計算した。したがって、計算された長周期波の水位に wave set-up を加えたものが実際の水位である。また、流量についても同様である。計算の初期値は長周期波の水位、流量をゼロとした。また、沖側の水位の境界条件は山本ら (1993) に習って Longuet-Higgins・Stewart の理論式による波群拘束波を与えた。

沖側での波群中の最大波高、最小波高に対する波浪変形計算は高山ら (1991) の砕波減衰を考慮したエネルギー平衡方程式を用いる方法で行った。

なお、長周期波の計算は、ADI 差分法を用いて行った。

(2) 砂浜内の浸透流計算モデル

砂浜内の浸透流・地下水位分布は、佐藤ら (1995, 1996) と同様に、赤井らの基礎式を解いて求めた。

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。

$$(C + \alpha S_s) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial h}{\partial z} \right) \dots \dots \dots (9)$$

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 は飽和時に 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、ダルシー法則より次の式で表される。

$$(u, v, w) = - \left(k \frac{\partial h}{\partial x}, k \frac{\partial h}{\partial y}, k \frac{\partial h}{\partial z} \right) \dots \dots \dots (10)$$

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。

佐藤ら (1995) の計算結果では、実海域規模の波浪諸元を与えているにもかかわらず、浸透流速の値は透水層で高々数 mm/s の値、砂浜中ではさらに 2 オーダー小さく、

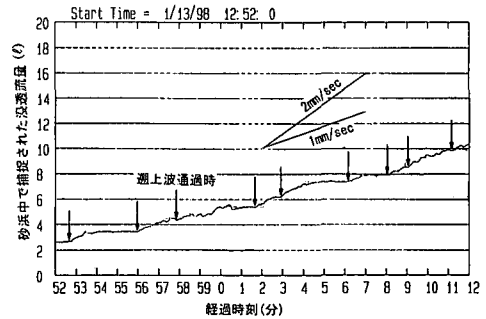


図-4 浸透流観測結果例 (柳嶋, 1998)

く、水理実験、現地観測結果と比べ小さい値であった。このため、図-4 に示す遡上域の砂浜中の浸透流速に関する現地観測結果 (柳嶋, 1998) を踏まえ、遡上域での境界条件を遡上域で海水がある場合は水位によらず常に一定の流速で海水が砂浜に浸入するように改良することとした。

圧力水頭 Ψ の計算では境界条件を次のように与えた。

- 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。遡上域は海水がある場合は一定の浸透流速を与えた。
- 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、本研究では透水層については周辺の砂浜に比較して透水係数が 3～4 オーダー大きい領域として取り扱った。

式 (9) の計算は佐藤ら (1995, 1996) と同様な方法で行った。

4. 適用性の検討

新たに改良した遡上域での境界条件の効果を検討するために、透水層が埋設された海浜の浸透流計算を行い佐藤 (1995) の計算結果と比較した。検討は、海底勾配 1/10 の砂浜に実海域の時化時波浪に対応する波高 (H) 2.5 m、周期 (T) 9 s の波が入射する条件で行った。なお、計算には長周期波の効果は含んでいない。図-5 に 1 周期平均した浸透流速分布の計算結果を示す。この計算では汀線位置からはい上がり高さまでの遡上域区間で 2 mm/s の浸透流速を境界条件として与えた。排水口の位置や水位分布が異なり必ずしも同一条件ではないが、従来モデルの計算結果と比べ透水層中および砂浜中の浸透

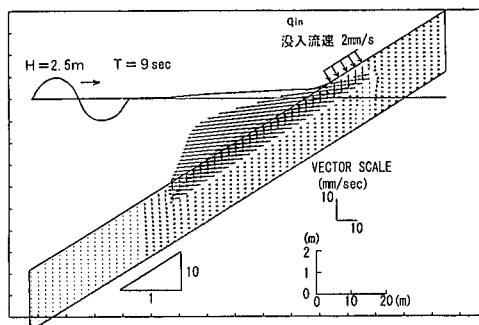


図-5 遡上域の浸透流速を境界条件として計算された浸透流分布 (一周期平均)

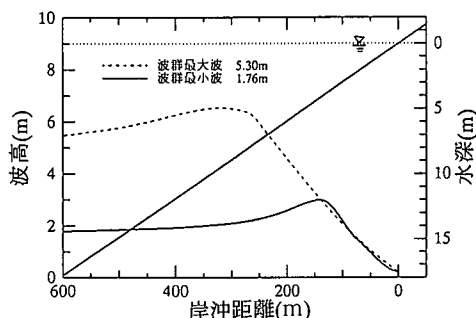


図-6 波群最大波と最小波の波高分布

流速は大きくなり、透水層中では数 cm/s の値となっている。この値は柳嶋ら (1995) により現地で測定された透水層中の流速のオーダーとほぼ同じであり、従来のモデルと比較して透水層周辺の浸透流速の計算精度が向上することが分かる。

次に、外力として長周期波の影響を考慮した計算モデルの適用性を調べるために、波崎海洋研究施設 (HORS) に於いて測定された 1994 年 9 月台風 24 号による時化時波浪 ($H_{1/3}=5$ m, $T_{1/3}=15$ s) を想定して自然海岸と透水層を埋設した海岸の浸透流計算を行った。

長周期波計算での波群周期は Nakamura・Kato (1992) の提案式を参考に短周期波周期の 10 倍の 150 秒、波群の平均波高はエネルギー平均波高として有義波高より 3.5 m、変調率は山本 (1993) の研究成果を参考に 0.5 とそれぞれ設定した。また、地形条件等は佐藤ら (1995) とほぼ同じ条件とした。

図-6 は計算された波群最大波および最小波に対応する波高分布を示す。図-7 はこの波高分布を用いて計算された 1/8 周期毎の長周期波形である。

図-8 は透水層埋設海岸での長周期波の引き波時における浸透流分布の計算結果である、汀線付近においても 7 mm/sec 程度の浸出流速値に達している。一方、透水層

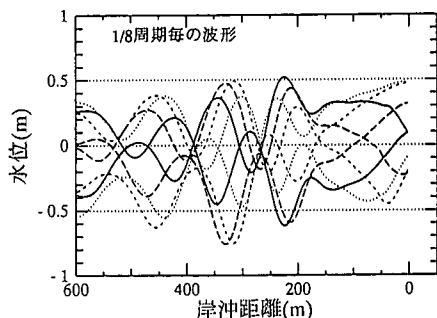


図-7 長周期波波形の計算結果

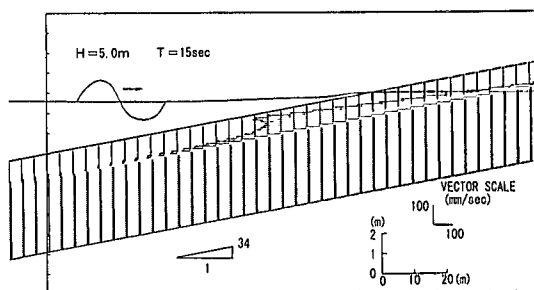


図-8 浸透流分布計算結果 (引き波時)

がない場合は汀線付近に海浜から浸出する領域が集中し、最大流速で 10 mm/s 程度となり、透水層埋設効果により、前浜付近の浸出流速が自然海岸に比べ数 mm/s 減少していることが分かった。

土屋・河田 (1980) は浜漂砂に及ぼす吸水の効果を手理実験により検討し、砂の沈降速度の 1/100 程度の吸水速度があれば強制揚水により海浜の浸食抑制効果があると報告している。波崎砂の沈降速度は 2 cm/s 程度であるので 0.2 mm/s 程度の流速値がこの吸水速度に対応する。したがって、透水層埋設による浸出流速の減少分 (数 mm/s) は、対応する吸水速度の値と同程度であるので、範囲は汀線付近に限られるものの、透水層の埋設による海浜安定化効果を表すものと考えられる。

5. おわりに

本研究で得られた結論は以下の通りである。

1) 計算効率を考慮して、長周期波成分だけを取り出した非線形長波方程式を用いた長周期波モデルと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、不規則波浪に伴う長周期波による透水層周辺の浸透流・地下水位の計算が可能になった。

2) 遡上波による浸入速度を与えるように浸透流計算モデルの境界条件の設定方法を改良した。実海域の時化時波浪を対象とした計算では、透水層周辺の浸透流速の

計算精度が、従来のモデルと比較して向上することが確認された。

3) 透水層埋設海浜での引き波時における前浜付近の浸出流速は自然海浜に比べ抑制されることが分かった。この値は強制揚水による浸食抑制効果があると報告されている流速値と同程度であり、透水層の埋設による海浜安定化効果を表すものと考えられる。

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「透水層埋設による海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加藤特別研究官、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.
- 岩佐直人・堀 謙吾 (1998): 透水層設置海浜の地盤特性と透水層の長期排水性に関する調査研究, 海岸工学論文集, 第45巻, 投稿中.
- 合田良實 (1995): 不規則波に伴う長周期波の諸研究について, 水工学シリーズ 95-B-6, 土木学会水理委員会, pp. B-6-1-B-6-20.
- 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.
- 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.
- 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.
- 金山 進・清水琢三・磯部雅彦 (1994): プシネスク方程式を用いたサーフビート・水位上昇の平面二次元計算, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 61-65.
- 酒井哲朗・間瀬 肇・後藤仁志・中西 隆 (1997): 透水層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 (1995): 透水層埋設による地下水位低下に関する3次元予測計算, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 656-660.
- 塩見雅樹・戸引 勲・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, pp. 721-725.
- 高山知司・池田直太・平石哲也 (1991): 碎波および反射を考慮した波浪変形計算, 港湾技術研究所報告, 第30巻, 第1号, pp. 21-67.
- 土屋義人・河田恵昭 (1980): 浜漂砂に及ぼす吸水の影響について, 第27海岸工学講演会論文集, pp. 270-274.
- 山本吉満・谷本勝利 (1994): 波群性に起因する長周期波に及ぼす海底勾配の影響, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 81-85.
- 細貝正治・澤田晴彦・若崎 貴・斉藤 孝・加藤一正 (1997): 海浜感潮域の地下水位低下の透水層設置前後の影響について, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 671-675.
- 山本吉満・谷本勝利 (1994): 波群性に起因する長周期波に及ぼす海底勾配の影響, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 81-85.
- 柳嶋慎一 (1998): 「透水層埋設による海浜安定化の施工法の開発」に関する共同研究検討会資料, 未発表.
- 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, pp. 661-665.
- 柳嶋慎一・加藤一正・中官利之・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.
- 柳嶋慎一・加藤一正・中官利之・下川原銀二・野口雄二・岩佐直人 (1998): 透水層工法における排水能力低下要因, 海岸工学論文集, 第45巻, 投稿中.
- 仲座栄三・日野幹雄 (1988): 波群によって引き起こされる平均海面の共振応答, 第32回水理講演会論文集, pp. 571-576.
- 仲座栄三・津嘉山正光・田中 聡 (1993): 人工リーフ設置による長周期波の新たな発生, 琉球大学工学部紀要, 第46号, pp. 77-84.
- 中村 聡 (1997): 波のエネルギーとの干渉を考慮した長周期波数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 206-210.
- 西村仁嗣・丸山康樹・桜井 力 (1984): 海浜流の数値計算法について, 第31海岸工学講演会論文集, pp. 396-400.
- Nakamura S., K. Kato (1992): Generation of Infragravity Waves in Breaking Process of Wave Groups., Proc. 23rd Conf. of I. C. C. E., pp. 990-1003.