

防波堤基礎での洗掘量の推定について

鈴木高二郎*・大寄菜々子**・山本泰司***

捨石や消波ブロック下部で発生する洗掘量の予測を可能とするため、捨石やブロック内の流速を計算できる数値計算プログラム (CADMAS-SURF) を用いて捨石、消波ブロック内部の流速を求め、これにより洗掘量の算定を試みた。この際、CADMAS-SURF で捨石の粒径を考慮できるようにするため、Dupuit-Forheimer 式を適用した。数値計算から得られる流速を一般的な漂砂量式である渡辺式、Dibajnia・Watanabe 式に代入して洗掘量の推定を試みた。捨石内部の局所的な速い流速によって、洗掘量が大きくなる傾向にあり、このような洗掘量の増大を評価するため、流速拡大係数 C_d を導入することで、実験値と計算値で良い一致がみられた。

1. はじめに

これまで混成防波堤の洗掘問題としては直立堤法先の重複波の節で発生する L-type 法先洗掘に焦点が当てられてきた。しかし、最近の鈴木ら (2002) の大規模な移動床実験によって、これ以外にも洗掘が捨石で被覆された防波堤マウンド下部の砂地盤においても発生しており、このような洗掘による消波ブロック被覆堤の消波ブロックやケーソンの沈下が重要であることが明らかになっている。

このような捨石や消波ブロック下部で発生する漂砂現象については、岩崎ら (1966)、上野ら (1989) が防波堤マウンド下部の吸い出しについて検討を行っているが、検討例は少ない。また、数値波動水路と組み合わせて榊山・鈴木 (1998) が吸い出し発生限界を検討しているが、実験データの少なさからその検討に限界が見られる。このため、捨石や消波ブロック下部の洗掘量についてはほとんど明らかになっていないのが現状である。

そこで、本研究では、捨石やブロック内の流速を計算できる VOF 法を用いた数値計算プログラム (CADMAS-SURF) を用いて捨石やブロック内部の流速を求め、これによりシールズ数や漂砂量を算定し、洗掘量の予測が可能か検討することとした。ただし、CADMAS-SURF ではポラスメディア (捨石や消波ブロック) 内の流速を算定する際、抵抗係数 C_D 値を入力する必要があるが、①捨石粒径と C_D 値との関係が不明である、②格子間隔が変化すると計算結果が異なるという問題がある。

一方、捨石下部の砂の動きについてみると、捨石背後では渦ができるなどして流れが乱され、砂の舞い上がりが大きくなる。このため、捨石の無い条件で得られた既存の漂砂量式では、捨石や消波ブロック下部での漂砂量の算定ができない。以上のことから本研究では、ポラ

スメディアモデルを改良するとともに捨石や消波ブロック下部での漂砂量の算定法を検討することとした。

2. 捨石内部の流速の数値計算による推定

(1) CADMAS-SURF への Dupuit-Forheimer 式の導入

CADMAS-SURF の基礎方程式は、透過性構造物を取り扱えるようにするため、Navier-stokes 方程式がポラスメディアモデルにもとづいて拡張されたもので (榊山ら, 1991)、基礎式等の詳細は数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会 (2002) に記されている。

本論文で取り上げるのは、 C_D を抵抗係数として多孔質体から受ける抵抗力 R_x , R_z の項であり、流速の 2 乗に比例する形で以下のようにモデル化されている。

$$R_x = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + w^2} \dots\dots\dots (1)$$

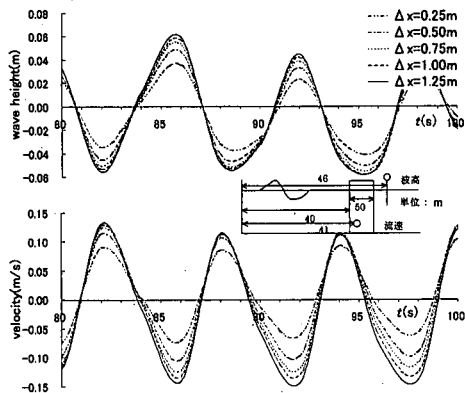
$$R_z = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta z} (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + w^2} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 x, z : 水平、鉛直座標、 u, w : 流速の水平、鉛直成分、 γ_x, γ_z : 水平、鉛直方向の面積透過率、 $\Delta x, \Delta z$ は水平、鉛直方向の格子間隔である。

現行 CADMAS-SURF の多孔質体の抵抗力 (1), (2) 式では、分母に格子間隔 $\Delta x, \Delta z$ が含まれている。そのため、格子間隔を変えると計算結果が異なってくるという問題がある。図-1 は、水深 9 m、天端 3 m の直立した透水堤に周期 6 s、波高 1.5 m の波を作用させた場合の、堤体内部の流速である。水平方向の格子間隔 Δx を 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25 m と変えて計算すると、流速や波高が変化してしまうのが分かる。なお、基礎の運動方程式から、非定常項、移流項、拡散項、エネルギー減衰項、ソース項を省略し、圧力勾配が変化しないとすると、流速 u は式 (3) のように格子間隔の平方根に比例する形となるが、図-1 の波高や流速値はちょうど水平方向格子間隔 Δx の平方根に比例している。

$$u = \sqrt{\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{2\gamma_x}{C_D(1-\gamma_x)}} \Delta x \dots\dots\dots (3)$$

* 正会員 工修 (独法) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部
** (独法) 港湾空港技術研究所 耐波研究室
*** 正会員 工修 (独法) 北海道開発土木研究所港湾研究副室長

図一 水平方向格子間隔 Δx と透水堤の伝達波，内部流速

また，捨石内部の流速は，空隙率 γ が一定でも，捨石の粒径によって変わるはずであり，捨石粒径が小さければ流速が小さくなり，大きければ流速が大きくなる必要がある。しかし，式 (1)，(2) では，捨石の粒径を評価することができない。 C_D 値を捨石粒径によって変化させることも考えられるが，その場合， C_D 値を求めるための捨石粒径を従属変数とした関数が必要となる。

したがって，本研究では，これらの問題を解決するため，以前から研究例の多い多孔質体からの抵抗力の算定式を用いることとした。多孔質体からの抵抗力の算定には，Sollit・Cross (1972) が用いた Ward (1964) の式が使用される場合も多いが，粒径 d の効果を容易に取り込むことが可能な Dupuit-Forheimer 式といわれる式 (4) ～ (6) を用いることとした。

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = u(\alpha + \beta|u|) \quad (4)$$

$$\alpha = \alpha_0 \frac{(1 - \gamma_v)^3}{\gamma_v} \frac{\nu}{d^2} \quad (5)$$

$$\beta = \beta_0 \frac{(1 - \gamma_v)^3}{\gamma_v} \frac{\nu}{d} \quad (6)$$

ここで， p ：水圧， ρ ：水の密度， ν ：水の動粘性係数， d ：捨石粒径， γ_v ：空隙率である。

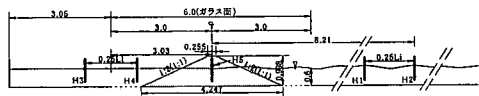
近藤 (1981) が，富永・坂本 (1968) の実験結果をもとに導いた石とテトラポッドに対しての α_0 ， β_0 は，それぞれ 800～1500，1.8～3.6 (石)，2100，2.2 (テトラポッド乱積) である。しかし，後述する傾斜堤の実験結果によると石の場合， α_0 ， β_0 が 734，1.04，テトラポッド乱積の場合 426，0.7 程度が良いようであり，本研究ではこれらの値を用いて計算を行っている。ただし， α_0 ， β_0 については，さらに多くの実験により汎用的な値にすべきである。

3. Dupuit-Forheimer 式の適用性(実験との比較)

上述の Dupuit-Forheimer 式の適用性を調べるため，傾斜堤の反射率と伝達率，および消波ブロック被覆堤マウンド内部の流速の実験結果と Dupuit-Forheimer 式を適用した CADMAS-SURF による計算結果を比較することとした。

(1) 傾斜堤実験

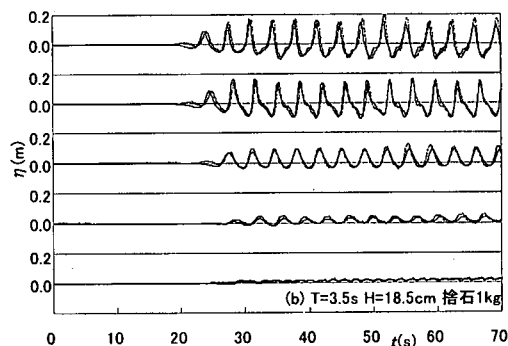
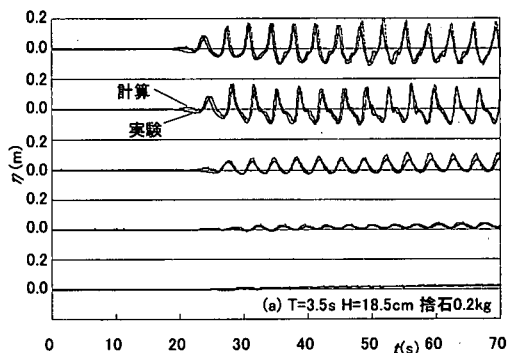
傾斜堤の実験は，図一2に示すような水深 0.6 m の条件で，碎石とテトラポッドで作成された傾斜堤に対して行っており，堤体中央から 6 m 背後に仕切壁が置いてある。作用させた波は規則波で周期 2，3，3.5 s，波高 8～23



図一2 傾斜堤実験断面

表一 碎石，テトラポッドの諸元

	密度 ρ (kg/m ³)	質量 M (kg)	中央粒径 d (m)	空隙率 γ
砕 石	3000	0.2	0.04055	0.50
	3100	1.0	0.06858	0.53
テトラポッド	2300	4.3	0.12319	0.50



図一3(a)，(b) 傾斜堤前後の水面変位時系列波形

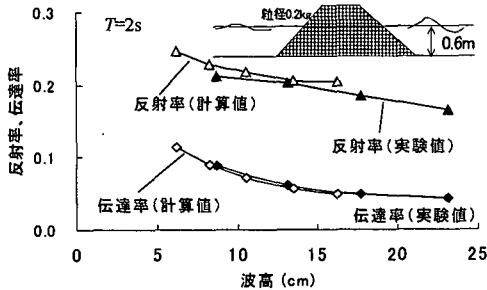


図-4 実験と数値計算の比較 (反射率と伝達率)

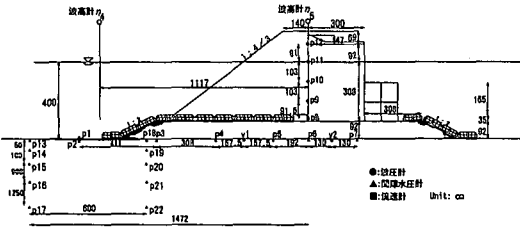


図-5 消波ブロック被覆堤の実験断面図

cmであり、碎石、テトラポッドの諸元は、表-1に示すとおりである。

図-3(a), (b)は周期 $T=3.5$ s, 波高 $H=18.5$ cmでの実験と数値計算から得た水面変位の時系列波形であり、捨石 0.2 kgと 1 kgのケースである。造波条件が異なっていたため最初の数波は異なっているが、全体に実験と数値計算結果はよくあっており、堤体背後の水位が徐々に上昇しているのも再現されている。また、粒径が小さいほど伝達波高が小さくなっており、Dupuit-Forheimer式により粒径の違いが評価できるようになっていることが分かる。

図-4は、波高・周期と反射率、伝達率である。反射率は、沖の波高計1, 2を入射波分離して求めており、伝達率は波高計3, 4の波高の平均値を沖の入射波分離して得られた入射波高で割ることで求めている。全体的に、実験と計算結果がよくあっており、Dupuit-Forheimer式の適用性が高いことが分かる。

(2) 消波ブロック被覆堤のマウンド内流速

消波ブロック被覆堤については、鈴木ら(2002)の大型水理模型実験で得られたマウンド内部の流速、圧力と数値計算結果を比較することとした。図-5は消波ブロック被覆堤の実験断面図であり、マウンド内部には流速計、水圧計が設置されている。

実験は規則波を作用させて行われているが、周期 5 s, 7 sの場合は波高が 2 mを越えると砕波する傾向にあり、数値計算が不安定となって流速がうまく再現できなかった。また、周期 3 sの場合も全般的に不安定であり、こ

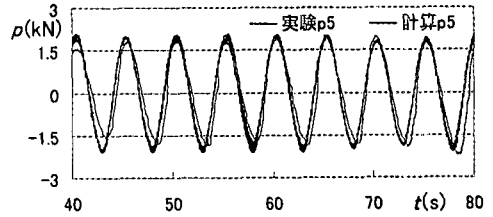
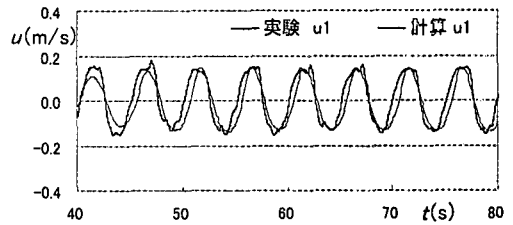
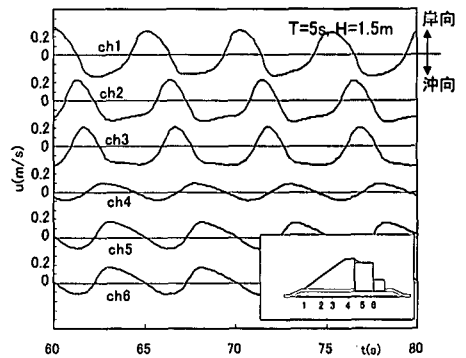
図-6 マウンド内部の圧力時系列波形 ($T=5$ s, $H=0.5$ m)図-7 マウンド内部の流速時系列波形 ($T=5$ s, $H=0.5$ m)

図-8 消波ブロック被覆堤マウンド内流速

では、周期 5 s, 7 sの 0.5 , 1.0 , 1.5 mの場合について実験と計算を比較した。また、捨石とテトラポッドの質量(粒径)はそれぞれ、 $1.3 \sim 8.8$ kg ($0.08 \sim 0.15$ m), 0.5 t (0.58 m)であり、ここでは、捨石を 4.7 kg (0.12 m)として計算した。

図-6, 7は、周期 $T=5$ s, 波高 $H=0.5$ mでの圧力と流速の時系列波形であり、実験と計算を比較している。マウンド内部の圧力、流速ともに実験と計算であっているのが分かる。なお、実験では、できる限り碎石を通る平均的な流れを計測できるよう、流速計を直径 14.5 cmの塩ビパイプの中に入れて計測を行っており、図-7の流速は式(1), (2)の断面平均水平流速 u に相当する。

図-8は、数値計算から求められたマウンド内部の流速の時系列波形であり、周期 $T=5$ s, 波高 $H=1.5$ mの場合である。波高が大きくなると消波ブロック前面で砕波するようになり、マウンド下部の流速 ch2, 3の冲向き

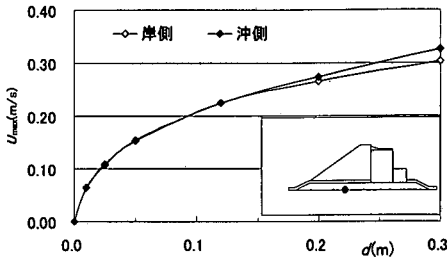


図-9 粒径とマウンド内流速

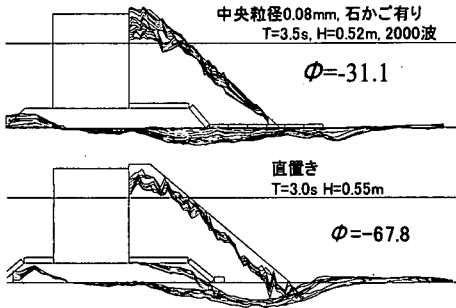


図-10 捨石、消波ブロック下部の漂砂量

流速の継続時間が、岸向き流速の継続時間より長くなっているのが分かる。鈴木ら (2002) は、このような非対称な流速波形により、消波ブロック下部の砂が洗掘されるという現象を実験と現地の被災事例から明らかにしている。今回の数値計算により、このような流速の特徴も再現できることが分かる。

図-9 は、粒径を変えてマウンド内の流速を計算したものである。マウンド内流速の曲線は粒径の平方根に近い形状となっているのが分かる。

4. 捨石、消波ブロック下部の漂砂量

(1) 消波ブロック被覆堤下部での漂砂量

上述のとおり、マウンド内流速は、数値計算によって良く再現できることが分かった。そこで、この流速値を用いて、捨石や消波ブロック下部の漂砂量を予測することとする。ただし、捨石や消波ブロック下部の漂砂量に関する実験結果がほとんど無いことから、ここでは鈴木ら (2002) の中規模移動床実験結果から、捨石下部の漂砂量の実験値を得ることとした。

図-10 は、移動床実験の一例である。漂砂量は波の作用時間中に洗掘された砂の全量を、波を作用させたトータルの時間(この場合は、2000 波:7000 s)で割って求めている。実際は、ある程度洗掘が進むと洗掘量が頭打ちになってくる等、時間的にも空間的にも漂砂量は一定ではないが、今回は全体的な傾向を捉えることを目的として、上記のようにおおよその漂砂量を実験から得る

表-2 移動床実験から得た無次元漂砂量

	T (s)	H (m)	d (mm)	ϕ
マウンド延長	3.5	0.52	0.08	18.1
石籠	3.5	0.52	"	31.1
	"	"	0.15	13.7
	"	"	0.30	3.0
直置き	3.0	0.10	0.08	0.0
	"	0.20	"	24.9
	"	0.35	"	43.4
	"	0.55	"	67.8
直置き	5.0	0.10	"	0.0
	"	0.20	"	30.0
	"	0.35	"	50.7

こととした。なお、図-10 の ϕ は無次元漂砂量を意味しているが、マイナス(冲向き)となっており、図-8 のような継続時間の長い冲向き流速が砂を沖へ運んでいることを示している。また、どの実験ケースも砂が沖へ運ばれていたため、以降、無次元漂砂量は沖側をプラスとする。

(2) 渡辺式、Dibajnia-Watanabe 式の応用

ここでは、一般的な水平床上の漂砂量式である渡辺式(7)と Dibajnia-Watanabe 式(8)を、捨石、消波ブロック下部の漂砂量式へ応用することとした。

ここで、 ϕ は無次元漂砂量、 q_{net} は単位幅・単位時間あたりの漂砂量(空隙を含むみかけの体積)、 λ_v は砂の空隙率、 w_0 は沈降速度、 d は粒径、 $\Psi_m = fu^2/2sgd$ はシールズ数である。 Ψ_c は限界シールズ数であり、今回の計算では 0.11 とした。また、 s は砂の水中比重、 g は重力加速度、 f は Jonnson の摩擦係数である。

$$\phi_m = \frac{q_{net}(1-\lambda_v)}{w_0 d} = a \cdot \text{sign}(\Gamma) \cdot |\Gamma|^b \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\Gamma = \frac{u_c T_c (\Omega_c^2 + \Omega_i^2 - u_i T_i (\Omega_i^2 + \Omega_c^2 + \Omega_c^2))}{(u_c + u_i) T} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$u_c = \sqrt{\frac{2}{T_c} \int_0^T u^2 dt} \quad u_i = \sqrt{\frac{2}{T_c} \int_0^T u^2 dt} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 a と b は係数であり、それぞれ $a=0.0025$, $b=0.55$ を用いた。 T は振動流(波)の周期、 T_c と T_i は正・負の流速の継続時間、 u_c と u_i は式(10)で定義される正・負の流速の代表値である。また、 Ω_c , Ω_i , Ω_i , Ω_i は次式で与えられる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{if } \omega_j \leq \omega_{cr} \left\{ \begin{array}{l} \Omega_j = \omega_j \cdot \frac{2w_0 T_j}{d} \\ \Omega_j' = 0 \end{array} \right. \\ \text{if } \omega_j > \omega_{cr} \left\{ \begin{array}{l} \Omega_j = \omega_{cr} \cdot \frac{2w_0 T_j}{d} \\ \Omega_j' = (\omega_j - \omega_{cr}) \cdot \frac{2w_0 T_j}{d} \end{array} \right. \end{array} \right. \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 $\omega_j = u_j^2 / sgw_0 T_j$ であり、 ω_{cr} は全てのケースで $\omega_{cr}=1$ として計算している。

これらの式を応用する上で、数値計算から得られる断

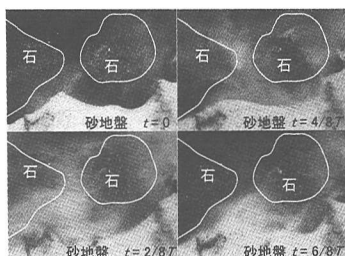
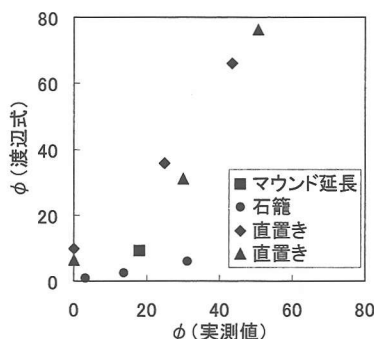
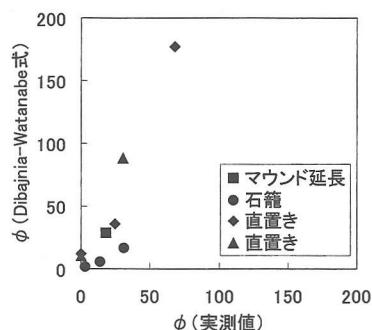


写真-1 捨石内部の砂の浮遊状況

図-11 実測値と渡辺式 ($C_s=4.0$) の比較図-12 Dibajnia・Watanabe式 ($C_s=4.0$) の比較

面平均流速をそのまま式に代入すると、表-2に示される漂砂量よりはるかに小さな推定値となった。このように漂砂量を過小に見積もるのは、砂を移動、浮遊させる捨石内の流れの流速が、断面平均で得られる流速より大きいからである。写真-1は、鈴木ら(2002)の大規模実験で見られた捨石内の砂の浮遊状況を示すものである。捨石の隙間を通して流れる流速は、断面平均流速より大きく、また、捨石背後には、速い流速によって渦ができるなどして、砂が舞い上がりやすくなっているのが分かる。

そこで、これらの影響を考慮するため、式(7)、(8)に代入する流速 u として、数値計算から得られる断面流速 u_{cal} に以下のような係数 C_s をかけることとした。

$$u = C_s^* u_{cal} \quad \dots\dots\dots (12)$$

図-11, 12はこれらの式を用いて、実験値と比較したものである。ラフな推定ではあるが、今回の計算では、いずれの場合も $C_s=4.0$ という値を使うと比較的実験値とよく一致する。消波ブロック直置きの場合、計算値が実験値を上回る傾向にあるが、これは、図-10のように断面が消波ブロックと捨石の複合断面のようになっており、実験では捨石マウンドによって、砂の舞い上がりがおこされていたためと考えられる。

5. おわりに

本研究では、捨石やブロック下部で発生する洗掘量の予測を可能とするため、捨石やブロック内の流速を計算できる数値計算プログラム(CADMAS-SURF)を用いて捨石、消波ブロック内部の流速を求め、これにより洗掘量の算定を試みた。この際、CADMAS-SURFで捨石の粒径を考慮できるようにするため、Dupuit-Forheimer式を適用し、その妥当性を確かめた。さらに数値計算から得られる流速と渡辺式、Dibajnia・Watanabe式を用いて洗掘量を推定できるようにした。この際、捨石内部の局所的な速い流速を評価するため、流速拡大係数 C_s を導入し、 $C_s=4.0$ とすると実験値と計算値が良い一致をみることが分かった。

参考文献

- 岩崎敏夫・沼田 淳・長谷直樹 (1966): 防波堤の沈下に関する実験, 土木学会年講義集, 23回, pp. 75-78.
- 上野成三・小山文男・石野和男・宇多高明・村井慎美 (1989): 斜板消波潜堤 (SURF) のマウンド内の浸透流場と洗掘特性について, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 424-428.
- 近藤敏郎 (1981): 直立消波構造物の水理的特性, 水工学シリーズ, 81-B-1-1~16.
- 榊山 勉・鹿島遼一・阿部宣行 (1991): 傾斜堤周辺の波動場解析へのポラスモデルの適用性, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 546-550.
- 榊山 勉・鈴木一広 (1998): 数値波動水路による放水口ケーソンマウンド内の底質の吸い出し評価, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 566-570.
- 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会 (2002): 海域施設の耐波設計に適用できる数値波動水路 (CADMAS-SURF) の研究・開発とその将来展望, 土木学会論文集, No. 705/II-59, pp. 1-17.
- 鈴木高二朗・高橋重雄・高野忠志・下迫健一郎 (2002): 砂地盤の吸い出しによる消波ブロック被覆堤のブロックの沈下被災について一現地調査と大規模実験一, 港空研報告第41巻第1号, pp. 51-89.
- 富永正照・坂本忠彦 (1968): 異形ブロックの抵抗係数について, 土木学会年講義集(2), 25回, pp. 69-70.
- 渡辺 晃 (1996): 海岸過程の研究の展望, 第32回水工学に関する夏季研修会講義集, Bコース, B-6-1~B-6-16.
- Sollitt, C. K. and R. H., Cross (1972): Wave transmission through permeable breakwaters, Proc. of 13th Coastal Engineering Conference, pp. 1827-1846.
- Ward, J. C. (1964): Turbulent flow in porous media, Proc. of ASCE, HY5, pp. 1-11.