

数値波動水槽における抵抗力算定手法の波力への影響

Influence of Resistance Calculation Method in Numerical Wave Tank on Wave Force

琴浦 毅¹・川崎浩司²・有川太郎³・秋山 実⁴

Tsuyoshi KOTOURA, Koji KAWASAKI, Taro ARIKAWA and Minoru AKIYAMA

CADMAS-SURF/3D is a three-dimensional numerical wave tank under development, which has recently been applied to some studies of wave-structure interaction. However, some problems have been pointed out: for example, it is difficult to determine the reasonable drag coefficient, and grid dependency of resistance is remarkable. In this study, we clarified grid dependency of resistance using a conventional resistance calculation method and examined the influence of drag coefficient on wave force. Next, the applicability of the CADMAS-SURF/3D with a Dupuit-Forchheimer method was investigated through the comparison between experimental and numerical results of wave pressures acting on the superstructure of sloping breakwater.

1. はじめに

近年では計算機の性能向上に伴い、数値計算が実務においても活用されつつある。例えば数値波動水路CADMAS-SURF/2Dは多くの構造物に適用され、その適用性の高さが示されている（財団法人沿岸技術研究センター，2008）ものの、断面的な検討に留まるため、スリットを有する構造物などに適用する場合にはポーラス構造物でモデル化するなどの検討が必要であった（小竹ら，2007）。また、抵抗力算定手法の格子依存性やノイズの処理などが課題として指摘されてきた（榊山，2003；鈴木ら，2003；琴浦ら，2007）。一方、有川ら（2005）は3次元性を有する数値波動水槽CADMAS-SURF/3Dを提案し、ケーソンの法線のずれによる波圧への影響、堤頭部周辺の被覆材移動に関する検討など平面的に波浪場が変化する箇所での検討が可能となった（有川・山野，2008；近藤ら，2009）。また、高橋ら（2009）はスリットと遊水室を有する複雑な構造物に適用するなど、CADMAS-SURF/3Dの適用性の高さが明らかにされつつある。

しかし、現状では捨石や消波ブロックのような多孔質体をポーラスモデルとする抵抗力計算で、格子依存性が指摘されており、さらに、実務上は波力のピーク値やその継続時間が重要となるが、波圧時系列に発生するマイナス方向のノイズの除去はいまだ未解決である。

そこで、本研究では新たな抵抗力算定手法とノイズ除去手法を取り入れて改良したCADMAS-SURF/3Dを海岸

保全施設の重要な構造物として施工実績の多い捨石傾斜堤に適用し、捨石傾斜堤上部工に働く波力の算定を例としてモデルの妥当性を検証する。

2. 水理模型実験および数値解析の概要

CADMAS-SURF/3Dの捨石構造物への基本的な適用性を過去に行われた直立堤、傾斜堤の透過波実験で検証した後に、捨石傾斜堤上部工に働く波力実験への適用性を検討する。

(1) 水理模型実験の概要

a) 捨石直立堤透過率実験（富永・坂本，1969）

図-1に捨石直立堤透過率実験の概要を示す。水深40cmに高さ60cm、幅10cm～30cmの直立堤（粒径4cm）を設置し、波が直立堤の天端を超えることがないように波高、周期条件を変化させた実験から透過率を得ている。

b) 捨石傾斜堤透過波実験（鈴木ら，2003）

図-2に捨石傾斜堤透過波実験の概要を示す。水深60cmに高さ99.8cmの捨石傾斜堤（粒径4.1cm，6.9cm）を設置し、波高、周期条件を変化させ、前、中央、後に設置した波高計で水位時系列を計測している。

c) 捨石傾斜堤上部工波圧実験（谷本・小島，1983）

図-3に捨石傾斜堤上部工波圧実験の概要を示す。水深30cmに高さ25cm～35cmの捨石傾斜堤（粒径2.0cm）に波圧計を取り付けた上部工を設置し、波高、周期条件を変化させながら波圧時系列（P1～P3は前面波圧，P4～P6は揚圧力）を計測している。

d) 捨石傾斜堤上部工波圧実験（追加実験）

図-4に捨石傾斜堤上部工波圧実験の概要を示す。水深25cm～30cmに高さ25cm～35cmの捨石傾斜堤（砕石①粒径1.5cm）に波圧計を取り付けた上部工を設置し、波高、周期条件を変化させながら波圧時系列（P1～P2は前面波圧，P3～P4は揚圧力）を計測した。

1	正会員	修(工)	五洋建設(株)技術研究所
2	正会員	博(工)	名古屋大学准教授 大学院工学研究科 社会基盤工学専攻
3	正会員	博(工)	(独)港湾空港技術研究所耐波研究チーム 主任研究官
4		修(理)	みずほ情報総研(株)サイエンスソリューション部

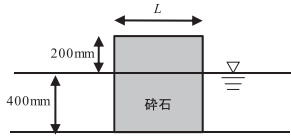


図-1 実験 a) 捨石鉛直堤断面図 (富永・坂本, 1969)

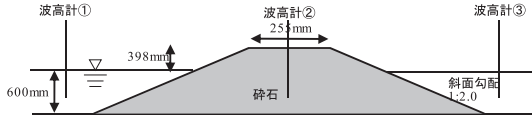


図-2 実験 b) 捨石傾斜堤断面図 (鈴木ら, 2003)

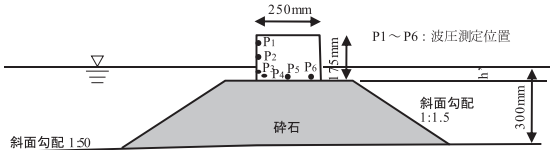


図-3 実験 c) 捨石傾斜堤上部工断面図 (谷本・小島, 1983)

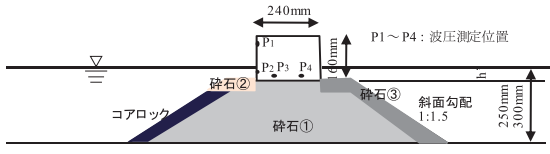


図-4 実験 d) 捨石傾斜堤上部工断面図 (追加実験)

(2) 数値解析の概要

a) 抵抗力算定手法

数値波動水槽CADMAS-SURF/3Dの基礎方程式は、3次元非圧縮粘性流体を対象とした連続式およびNavier-Stokes方程式をポーラスモデルに基づいて拡張した運動方程式から構成されており、有川ら (2005) に詳しい。この中で、流体が多孔質体から受ける抵抗力 R は式 (1) のように流速の2乗に比例する乱流の抵抗が支配的であるとして計算される。なお、抵抗力は3次元性を有するが、ここでは x 方向を代表として R_x を示した。また、抵抗力には慣性力と抗力が含まれるものの、本論文における抵抗力は抗力のみを示している。

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

ここで、 C_D は抵抗係数、 Δx は水平方向の格子間隔、 γ_x は x 方向の面積透過率、 u 、 v 、 w は x 、 y 、 z 方向の流速成分である。

CADMAS-SURF/3Dは構造物周辺を細格子とする可変格子の計算が可能となっているが、 $C_D/\Delta x$ を一定に保つ必要があり、格子サイズにより C_D を適切に設定する必要がある (神山, 2003)。なお、このモデルを以下ではCDMと記述する。

そこで、流体が多孔質体からの受ける抵抗力は、

表-1 実験条件および計算条件

実験ケース	a)	b)	c)	d)
構造物形状	直立	傾斜堤	傾斜堤	傾斜堤
実験目的	透過率	透過波	波圧	波圧
海底勾配	—	—	1/50	—
水深 (cm)	40.0	60.0	30.0	25.0 30.0
波高 (cm)	2.0, 4.0 6.0, 8.0	18.5	21.0	15.0
周期 (s)	1.1 1.7	3.5	2.24	1.57 2.24 2.91
粒径 (cm)	4.0	4.1, 6.9	2.0	1.5
空隙率	0.395	0.50, 0.53	0.43	0.43
その他	$L=10, 30\text{cm}$		—	$h'=-5.0, 5\text{cm}$
慣性力係数 C_M	1.2			
α_0, β_0	捨石: 1500, 3.6 ブロック: 2100, 2.2			
格子 (cm)	Δx	1.0	3.0	3.0
	Δy	1.0	3.0	3.0
	Δz	2.5	2.5	2.5
格子 数	x	1400	1000	3670
	y	15	10	5
	z	60	20	83

式 (2) に示す層流のおよび乱流の抵抗の和で表現される Dupuit-Forchheimer則 (Sollit, C.K. and R.H. Cross, 1972) を導入し、式中の α 、 β は近藤・竹田 (1983) に倣い、Engelundの表現 (式 (3) ~ 式 (4)) を採用した。

$$R_x = \gamma_v (\gamma_x u) \left(\alpha + \beta \sqrt{(\gamma_x u)^2 + (\gamma_y v)^2 + (\gamma_z w)^2} \right) \quad \dots\dots (2)$$

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

$$\beta = \beta_0 \frac{(1 - \gamma_v)}{\gamma_v^3} \frac{1}{d} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 α_0 、 β_0 は材料による係数、 γ_v は空隙率、 γ_x 、 γ_y 、 γ_z は y 、 z 方向の面積透過率、 ν は流体の動粘性係数、 d は石の代表径である。

式 (2) は格子サイズを含まないため格子依存性が無く、粒径の項が含まれることから粒径の違いを評価できる。このモデルを以下ではDFと記述する。

b) ノイズ処理手法

上部工の揚圧力出力時にマイナス方向のノイズが発生することがある。これは、水位上昇に伴い不透過格子と水面で囲まれた気体格子の圧力を液相単層モデルのCADMAS-SURF/3Dでは評価できないためである。有川・山野 (2008) はプラス方向のスパイクノイズ処理の3次元計算での適用性を検討しているが、発生原因が異なるマイナス方向のノイズの改善は望めない。そこで、

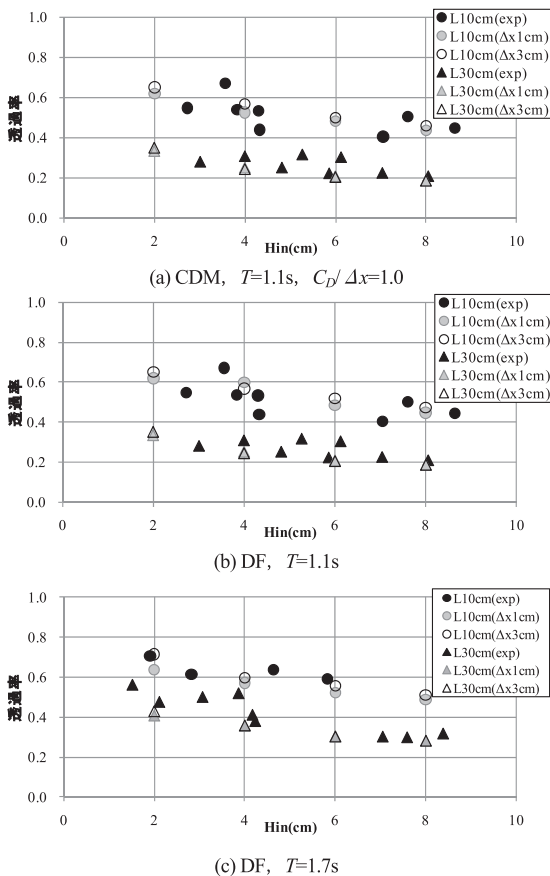


図-5 捨石直立堤の透過率

富士総合研究所編 (1993) に倣って、水位上昇による空気塊の体積が断熱状態で変化すると仮定し、式 (5) から空気塊の圧力を求める手法を取り入れた。

$$PV^\gamma = \text{一定} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 P は空気塊の圧力、 V は空気塊の体積、 γ は比熱比であり通常の空気では1.403である。

c) 計算条件

計算は表-1に示す実験条件を対象とし、入射波は流れ関数法B (19次) により造波ソースにて規則波を造波した。実験a), c) の計算では格子サイズの計算への影響を確認するため、構造物周辺を密にする不等間隔格子の計算も実施した。また、実験c) の計算では平面的等方性を確認するため、 y 方向の計算も実施した。なお、 α_0 , β_0 については近藤・竹田 (1983) を参考に設定した。

3. 捨石構造物への適用性

ここでは、CADMAS-SURF/3Dの捨石構造物への適用性を実験結果と計算結果の比較から検討する。なお、時系列図はピークが一致するように表示した。

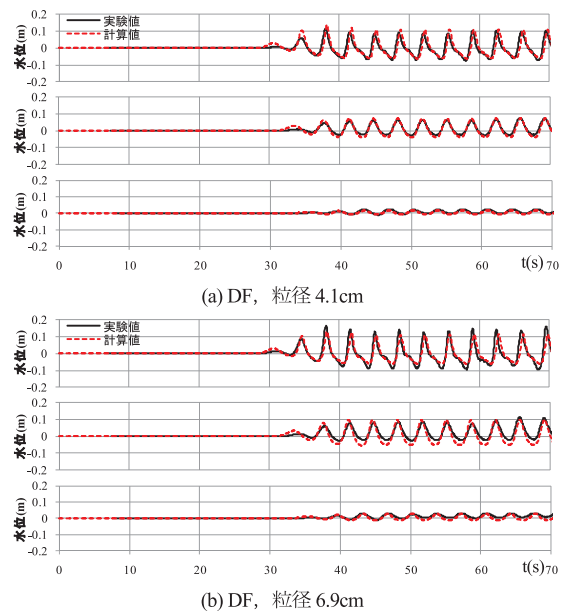


図-6 捨石傾斜堤の透過波高

(1) 捨石構造物の透過性能

図-5 (a) ~ (c) に実験a) 捨石直立堤の入射波高に対する透過率の変化について実験と計算の比較を示している。実験の透過率は、波高が大きく、周期が短く、捨石堤幅 L が大きい方が減少している。これは、波高が大きいと水面上に露出している捨石部での消波が促進されること、捨石堤幅 L が大きく、短周期であるほど、波長に対する消波区間が大きくなることが要因である。図-5 (a) はCDMで $C_D/\Delta x=1.0$ とした結果で、いずれのケースも実験値と良く対応しており、 $C_D/\Delta x$ が適切に設定できていると考えられる。また、図-5 (b), (c) の結果から、DFは格子サイズにより係数を変化させることなく、周期によらず高い精度で実験結果と一致しており、捨石堤の減衰効果を適切に評価できていると判断できる。

さらに、図-6からDFは実験b) 捨石傾斜堤において、小さい粒径ほど波高減衰が大きいなど、式中に粒径の項があることで、粒径による影響を適切に評価できた結果、高い精度で実験の水位時系列と一致する結果を得た。

以上より、捨石構造物を対象とした波浪計算において、DFは格子サイズ、周期、粒径によらず、波浪減衰を精度良く評価できることを確認した。

(2) 捨石傾斜堤上部工の波圧

図-7 (a) は実験c) 上部工波力実験のうち、上部工基面が水面上 ($h'=-5\text{cm}$) にある条件において、図-5 (a) と同様に $C_D/\Delta x=1.0$ とした時の $\Delta x=1\text{cm}$, 3cm のCDMの結果である。いずれのケースも同様の計算結果となっており、前面波力はピークから腰かけ部まで計算精度が高いもの

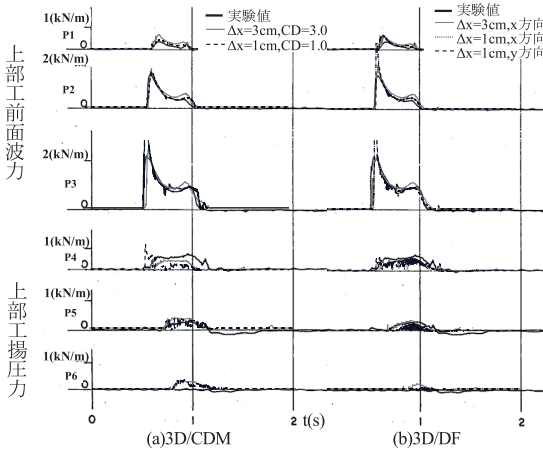


図-7 上部工波圧時系列 ($h'=-5\text{cm}$)

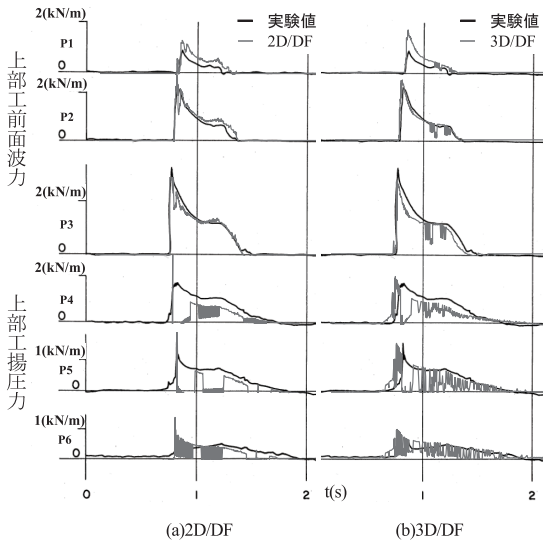


図-8 上部工波圧時系列 ($h'=0\text{cm}$)

の、実験では観測されなかった揚圧力P6において、計算では過大評価となっている。これは実験c)が実験a)の半分のサイズの粒径で構成された捨石堤となっており、波高減衰効果が大きくなると考えられるのに対し、 $C_D/\Delta x$ が適切でなかったため捨石マウンドの抵抗力を過小評価したと考えられる。つまり、粒径などにより変化する抵抗力に応じ、 $C_D/\Delta x$ を適切に変化させる必要がある。

図-7(b)はDFの結果であり、多少ノイズを含むものの、格子サイズによらず、実験と前面波圧のピークから腰かけ部、P6の揚圧力が観測されない点など良い対応をしている。さらに、y方向の計算においてもx方向と良く整合した結果となっている。これらから、波圧時系列においても3次元のDFには格子依存性、平面的な方向依存性がないことを確認できた。

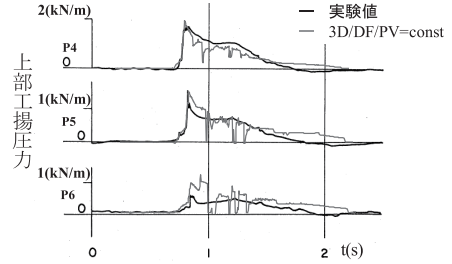


図-9 上部工波圧時系列 ($h'=0\text{cm}$) ($3\text{D}/\text{DF}/\text{PV}=\text{const}$)

図-8(a), (b)はDFのCADMAS-SURF/2D, 3Dの比較である。いずれも前面波圧は精度良く計算できているが、さらに3Dでは揚圧力のノイズが改善されている。これは、ノイズの要因となる上部工下部の気泡が2Dでは奥行き一様であるのに対し、3Dでは室内実験と同様に3次元的に分散するためと考えられる。つまり、3Dの計算を行うことで、2Dと比較してノイズ低減が期待できる。

図-9は上部工下部の気体格子の圧力計算に式(5)を導入したDFの結果である。ダブルピークの発生、圧力波形の不連続など未だ問題点は残るが、図-8(b)と比較すると空気塊の圧力計算を考慮することでノイズ対策の一助になりえることが判明した。

図-10(a), (b)は実験d)の上部工波圧時系列についてDFとの比較を示している。周期1.57秒のP1は計算が過大評価しているものの、それ以外はピーク、腰かけ部に至るまで計算精度は良い。周期2.91秒は計算で前面波圧のピークが明確ではないものの、前面波圧、揚圧力ともに良好な再現性を示している。この結果から、DFは水位時系列のみならず、波圧時系列においても周期、粒径によらず、精度の高い計算をできることが明らかとなった。

(3) 滑動安全率

図-11に実験d)の9ケースを対象として式(6)から算出した滑動安全率の比較を示している。

$$F_s = \frac{\mu(W - F_v)}{F_H} \quad \text{.....(6)}$$

ここで、 F_s は滑動安全率、 μ は静止摩擦係数(0.7)、 W は上部工重量、 F_v は揚圧力、 F_H は水平波力である。

図-11(a)は $C_D/\Delta x=1.0$ とした時のCDMとDFとの比較であり、それぞれの滑動安全率はほぼ同程度である。CDMは上部工後部の揚圧力において過大評価する傾向があるものの、滑動安全率が低下するのは波浪が上部工前面に作用する初期段階であるため、上部工後部の揚圧力を過大評価しても滑動安全率には有意な差が出なかったと考えられる。また、 $h'=0\text{cm}$, $+5\text{cm}$ でも滑動安全率に大きな差はないことから、DFは $C_D/\Delta x$ を適切に設定したCDMと同様の結果が得られることが分かった。

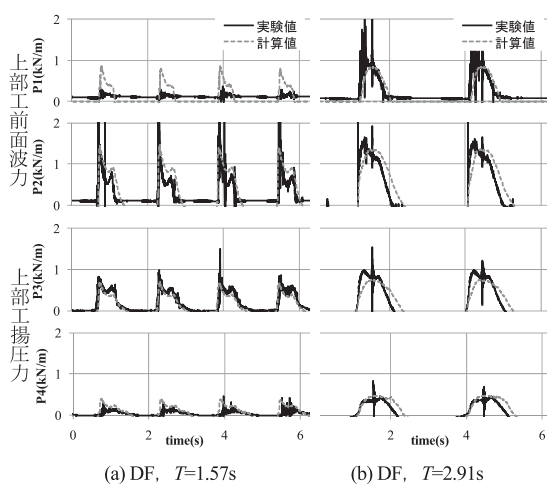
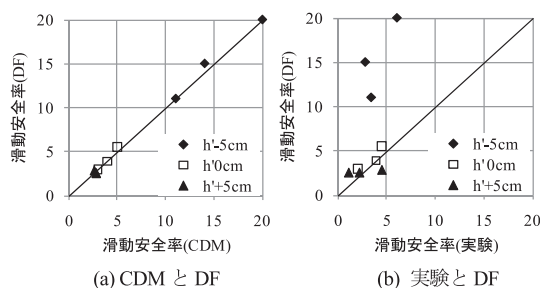
図-10 上部工波圧時系列 ($h' = +5\text{cm}$)

図-11 滑動安全率の比較

図-11 (b) は実験とDFとの比較である。 $h' = -5\text{cm}$ ではDFの方が滑動安全率は大きい。これは、計算において水平波力のピークが明確でなかったことが影響している。 $h' = 0\text{cm}$, $+5\text{cm}$ ではばらつきがあるものの、概ね実験の滑動安全率と同程度の結果が得られている。図-11 (a) の結果と合わせると、 $h' = 0\text{cm}$, $+5\text{cm}$ ではCDMの滑動安全率も実験値と同程度となった。

4. おわりに

3次元に拡張したDF, 新しいノイズ除去手法を導入したCADMAS-SURF/3Dを捨石構造物へ適用した。その結果, $C_D/\Delta x$ を適切に設定したCDMと同様の結果が得られ, また, CDMでは粒径と $C_D/\Delta x$ の関係が明らかではないが, DFでは粒径を計算式に取り入れることが可能となった。そのため, 格子サイズ, 波浪条件, 捨石粒径によらず高精度の計算ができることを確認した。

波力計算上発生するマイナス方向のノイズは, 2Dと比較すると気泡の3次元的な分散が期待できるのに加え,

改良の余地はあるものの $PV = \text{一定}$ として気体格子の圧力を求める計算手法もノイズ対策として期待できる。

以上から, 斜め入射時の適用性や, α_0 , β_0 の検証などの課題はあるものの, DFを導入したCADMAS-SURF/3Dは捨石構造物の波浪場の解析, ならびに捨石傾斜堤上部工作用波力検討への適用性は極めて高いといえる。

謝辞: 本研究は「数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会 (事務局: 財団法人沿岸技術研究センター)」の協力を得ました。港湾空港技術研究所の鈴木高二朗氏には貴重な実験データを提供いただき, また, 関克己氏には追加実験の解析で多大なご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 有川太郎・山田文則・秋山 実 (2005): 3次元数値波動水槽における津波波力に関する適用性の検討, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 46-50.
- 有川太郎・山野貴司 (2008): 数値波動水槽を用いた衝撃波圧に関する大規模計算, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 26-30.
- 小竹康夫・小淵康義・高橋重雄 (2007): 直立消波堤に作用する波圧算定への数値波動水路の適用性検討, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 816-820.
- 琴浦 毅・佐藤 弘・藤井直樹・小竹康夫・森屋陽一 (2008): 傾斜堤上部工波力算定における抵抗力計算手法について, 海洋開発論文集, 第24巻, pp. 393-398.
- 近藤圭央・有川太郎・関 克己・村川はるみ (2009): 3次元数値波動水槽を用いた防波堤堤頭部の被覆材移動による被災の検討, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp. 861-865.
- 近藤俊郎・竹田英章 (1983): 消波構造物, 森北出版, 275 p.
- 柳山 勉 (2003): 数値波動水路 (CADMAS-SURF) の適用性, 水工学に関する夏期研修会講義集, 水工学シリーズ03-B-4, 財団法人沿岸技術研究センター (2008): CADMAS-SURF実務計算事例集, 数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会中間報告書, 沿岸開発技術ライブラリー No. 30, 306 p.
- 鈴木高二朗・大寄菜々子・山本泰司 (2003): 防波堤基礎での洗掘量の推定について, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 886-890.
- 高橋研也・安野浩一郎・西畑 剛・関本恒浩 (2009): 3次元数値波動水槽を用いた波力低減型海域制御構造物に関する数値実験, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp. 756-760.
- 谷本勝利・小島朗史 (1983): 傾斜堤上部工およびブロック式混成堤に働く波力, 港湾技術資料, No. 450, 32 p.
- 富永正照・坂本忠彦 (1969): 透過性構造物による波の変形に関する研究 (1) —鉛直捨石堤による波の反射率と透過率について—, 海岸工学論文集, 第16巻, pp. 309-319.
- 富士総合研究所編 (1993): 汎用流体解析システム—FUJIRIC/ α -FLOW—, 丸善株式会社, 446 p.
- Sollitt, C.K. and R.H. Cross (1972): Wave transmission through permeable breakwaters, Proc. 13th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 1827-1846.