

縦スリット壁式直立消波工のエアレーション機能

角野 昇八^{*1}・小田 一紀^{*2}・藤田 孝^{*3}
天野 健次^{*4}・貫上 佳則^{*5}

1. 緒 言

いわゆる直立消波構造物は、元来、消波という防災の観点から提案され、これまでもその目的に沿って設計・施工がなされてきた。ところで、この種の構造物の消波効果は、スリットなどの開孔部での水塊の流出入にともなって生ずるエネルギー逸散によって発現するものであるが、この水塊の流出入はまた、エアレーション（曝気：空気中から水中への酸素の溶解と拡散の現象）を促すものであり、それゆえ消波構造物設置の副次的効果としてエアレーション効果を期待することができるはずである。このエアレーション効果からは、水中の汚染物質を分解する好気性バクテリアへの酸素供給が期待でき、ひいては海水の浄化も期待することができる。このような意味から、直立消波構造物は消波を主目的として設置されるものの、そのエアレーション機能の程度を評価することはあながち無意味なことではないように思われる。

この種の研究例としては、既に、傾斜堤などの各種海岸構造物のエアレーション機能を実験的に検討したものがいくつかみられ、堀江ら(1980, 1987)や細井ら(1988)などがある。なかでも細井らは、各種消波構造物のエアレーション機能に関する実験的研究を実施するとともに、それらの再曝気係数（エアレーション機能評価の一指標）の予測式を提案している。予測式では、再曝気係数をエネルギー逸散量の関数の形で表しており、エアレーション効果はエネルギー逸散量に依存するものとしている。

このように、各種海岸構造物のエアレーション機能に関してはある程度明らかにされているものの、研究例は透過堤や曲面スリット堤に関するものが多く、現実に施工例の多い縦スリット直立消波工に関してはほとんどない、あるいはあってもデータ数が十分ではない現状にある。

一方、著者らはこれまで縦スリット直立消波工の種々の水理特性について理論的に解析し、各種水理量を正確に評価できる理論式を提示した(角野ほか, 1988)。以上に鑑み、本研究では縦スリット直立消波工のエアレーション機能の理論的評価を最終的な目的として、その前面板列数を含む構造諸元および波浪条件を変えてエアレーション機能に関する実験を行い、各種水理量の理論値との相関の程度について検討するとともに、エアレーションの機構について考察を加えたものである。

2. 実験方法

(1) 実験装置

実験は、図-1に示すような、長さ20m、幅0.5m、高さ0.6mのステンレス製片面ガラス張り二次元造波水槽を用いて行い、水深は水路内全域において0.3mで一定とした。水路内には模型より沖側に2本の容量式波高計と、図-2に示すように4台の溶存酸素(DO)計が設置されている。なお、DO計のセンサー部分周辺の水塊はセンサーに対して常に流動させておく必要があるため、実験ではセンサー部を静水面下-7cmの位置を中心にして±2cmだけ鉛直の往復運動をさせて周辺水との間に相対運動を与えた。

直立消波工模型としては、開口率を変えた4種類の縦

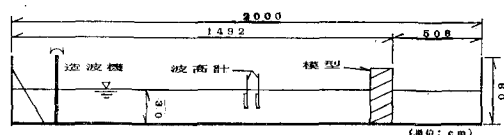


図-1 20m 造波水槽

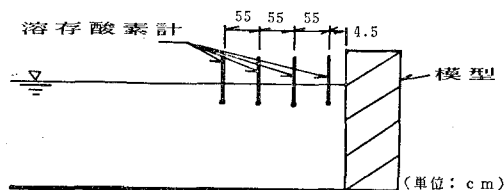


図-2 溶存酸素計の設置位置

*1 正会員 工博 大阪市立大学助教授 工学部土木工学科
*2 正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科
*3 学生員 大阪市立大学大学院 工学研究科
*4 学生員 大阪市立大学大学院 工学研究科
*5 正会員 工修 大阪市立大学助手 工学部土木工学科

スリット壁と1枚の不透過壁を用意し、その枚数や組合せを変えることによって、1重壁式縦スリット直立消波工を2種類および2重壁式を3種類、3重壁式を2種類製作した。これらの構造諸元の一覧を表-1に示す。また、表-2には実験ケースごとの波浪条件を示した。

(2) 実験手順

まず、実験開始前に亜硫酸ナトリウム(触媒として塩化コバルトを使用)を用いて水中の溶存酸素濃度を0.1~2.0 ppm程度まで下げ、その状態より規則波を連続して約3時間作用させた。そしてこの間の水中の溶存酸素

濃度の時間的回復の程度をDO計を用いて10分間隔で測定した。また、実験中は容量式波高計による同時波高記録から、入・反射波の分離推定法によって入射波高の算定をおこなうとともに作用波の定常状態の確認もおこなった。この他、一定時間毎に水温測定を行って実験中の水温変化も記録した。

3. 実験結果

(1) 溶存酸素濃度の時間的、場所的变化

図-3(a), (b), (c)に模型沖合いでの溶存酸素濃度の場所的变化の様子を例を経過時間毎に示した。図中、縦軸の C^* は溶存酸素濃度 C を飽和溶存酸素濃度 C_S と初期溶存酸素濃度 C_0 を用いて、

$$C^* = \frac{C - C_0}{C_S - C_0} \quad \dots\dots\dots (1)$$

と無次元化したものである。また、横軸は沖側スリット壁からの距離(x)を消波室幅(l)で除したものである。これらの図より、1重壁式の場合には C^* は場所的にはほとんど変化することなく、時間とともに回復していく様子がよみとれる。一方、2重壁式および3重壁式の場合には、時間の経過とともに多少の場所的変動が現れてくるものの、その程度は消波工近傍においては比較的緩やかである。これらの傾向は構造諸元や波浪条件が異なっても変わらなかった。なお、溶存酸素濃度が場所的に変化することなく時間とともに回復していくこの傾向は、曲面スリットケーソンについても観察されることが堀江ら(1987)によって既に明らかにされている。

表-1 模型の構造諸元

模型形状	ケース	開口率 2a/D	角柱辺長 d(cm)	スリット壁間 隔 l_2 (cm)	消波室幅 l (cm)
3重壁式	C-1	0.29 沖側	2.5	6.7	18.9
		0.24 ↓	2.5	6.6	
		0.10 岸側	1.4	5.6	
	C-2	0.40 沖側	2.5	6.7	18.9
		0.24 ↓	2.5	6.6	
		0.10 岸側	1.4	5.6	
2重壁式	C-3	0.24 沖側	2.5	8.8	18.0
		0.10 岸側	1.4	9.2	
	C-4	0.29 沖側	2.5	9.2	18.9
		0.10 岸側	1.4	9.7	
	C-5	0.40 沖側	2.5	8.6	18.9
		0.24 岸側	2.5	10.3	
1重壁式	C-6	0.10	1.4	17.5	17.5
	C-7	0.24	2.5	18.0	18.0

注：角柱はすべて正方形断面角柱

表-2 波浪条件と実験結果

ケース	周期 T (s)	波高 H (cm)	波形勾配 H/L	反射率 K_R	E_d (kgf) ($\times 9.8$ N)	E_d/E	$\frac{U_{max}^{(1)}}{u_{max}}$	$\frac{qT^{(1)}}{(\times 10^{-2})}$ (cm ³ /cm)	再電気係数 $k_2 T$ ($\times 10^4$)
C-1	1.40	5.9	0.028	0.69	0.408	0.52	0.95	5.91	0.85
	0.96	2.2	0.017	0.24	0.049	0.94	1.53	2.18	0.31
	0.87	2.0	0.018	0.11	0.034	0.99	1.55	1.72	0.20
	0.70	1.6	0.021	0.50	0.010	0.75	1.30	0.79	0.18
C-2	1.40	4.3	0.022	0.80	0.170	0.36	1.04	5.45	0.72
	0.96	2.4	0.019	0.37	0.056	0.86	1.62	2.46	0.31
	0.87	2.3	0.021	0.18	0.042	0.97	1.66	2.09	0.30
	0.70	1.1	0.015	0.54	0.005	0.71	1.52	0.61	0.16
C-3	1.40	4.5	0.021	0.61	0.277	0.63	0.83	4.00	0.85
	0.96	2.6	0.020	0.21	0.067	0.96	1.07	1.81	0.22
	0.87	2.1	0.019	0.09	0.038	0.99	1.10	1.28	0.25
	0.70	1.6	0.021	0.24	0.013	0.94	1.02	0.62	0.17
C-4	1.40	4.8	0.022	0.62	0.300	0.62	0.86	4.50	0.76
	0.96	2.6	0.020	0.23	0.068	0.95	1.12	1.89	0.37
	0.87	2.1	0.019	0.09	0.036	0.99	1.17	1.36	0.28
	0.70	1.7	0.022	0.15	0.014	0.98	1.07	0.70	0.30
C-5	1.40	4.8	0.022	0.82	0.159	0.33	1.02	5.34	0.93
	0.96	2.9	0.023	0.48	0.071	0.77	1.51	2.76	0.49
	0.87	2.2	0.020	0.41	0.033	0.83	1.65	2.00	0.43
	0.70	1.5	0.020	0.49	0.009	0.76	1.53	0.86	0.30
C-6	1.40	4.3	0.020	0.55	0.264	0.70	0.52	2.40	0.64
	0.96	2.7	0.021	0.36	0.062	0.87	0.63	1.09	0.25
	0.87	2.2	0.020	0.33	0.036	0.89	0.66	0.80	0.19
C-7	1.40	5.1	0.024	0.64	0.345	0.59	0.85	4.61	0.49
	0.96	2.2	0.017	0.32	0.047	0.90	1.24	1.77	0.16
	0.87	2.2	0.020	0.24	0.038	0.94	1.24	1.50	0.12
	0.70	1.5	0.020	0.55	0.008	0.70	1.14	0.64	0.14

1) 2, 3重壁式に対する値は各スリットを通過するものの自乗和の平方根である。

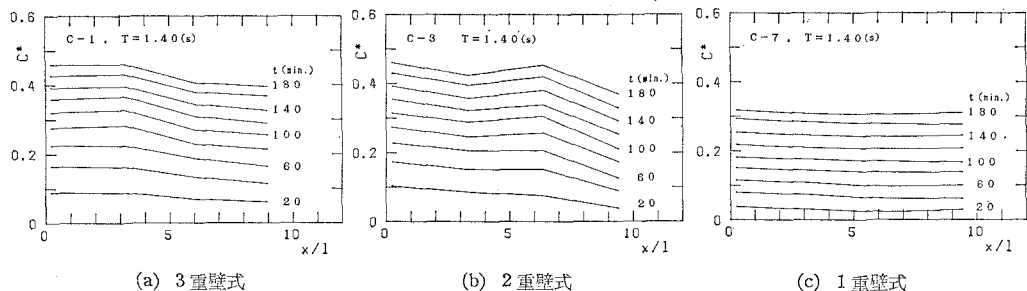


図-3 無次元溶存酸素濃度の場所的变化

以上のことより、以下の議論では、溶存酸素濃度のデータは前面スリット壁に最も近い測定点（前面板より沖側 4.5 cm）で得られたものを用いることにする。

つぎに図-4 (a), (b) に上記の測定点において得られた C^* の時間的回復状況の例を示した。ここで、図の横軸は実験開始後の経過時間 (t) を作用波の周期 (T) で無次元化したものである。この図より、いずれの場合にも溶存酸素濃度は時間とともに順調に、しかも時間にはほぼ比例して回復していく様子がよみとれる。

(2) エアレーション機能の評価

酸素の水中への吸収の現象を Fick の第2法則を適用してモデル化すれば次式で表すことができる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = k_2(C_s - C) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 k_2 は再曝気係数と呼ばれ、溶存酸素の回復の速度を表し、この値が大きいくほど溶存酸素濃度の時間に伴う上昇の割合が速いことになる。

つぎに、式 (1) の関係を考慮しながら式 (2) を解けば以下の関係式を得る。

$$k_2 \cdot t = -\ln(1 - C^*) \dots\dots\dots (3)$$

上式からも明らかのように、再曝気係数 k_2 (1/時間) は $-\ln(1 - C^*)$ の値を時間に対してプロットした直線の傾きより求めることができる。

また、式 (3) は、

$$k_2 T \cdot t/T = -\ln(1 - C^*) \dots\dots\dots (4)$$

と書き換えることができるので、 $-\ln(1 - C^*)$ の値を t/T (作用波の数) に対してプロットした直線の傾きより、いわば1波当りの再曝気係数 $k_2 T$ (無次元) を求めることができる。以後、本論文においては k_2 の代わりにこの $k_2 T$ を用いて議論を進めることにする。このようにして求められた実験各ケースの $k_2 T$ の値を表-2に示した。表より、同一波浪条件の波に対して、全般的に1重壁式の $k_2 T$ は2重壁式および3重壁式のそれと比べると小さく、2重壁式と3重壁式とではほぼ同程度の値を示していることが読み取れる。したがって一般に、複数列の前面板を有する直立消波工は1重壁式のものよ

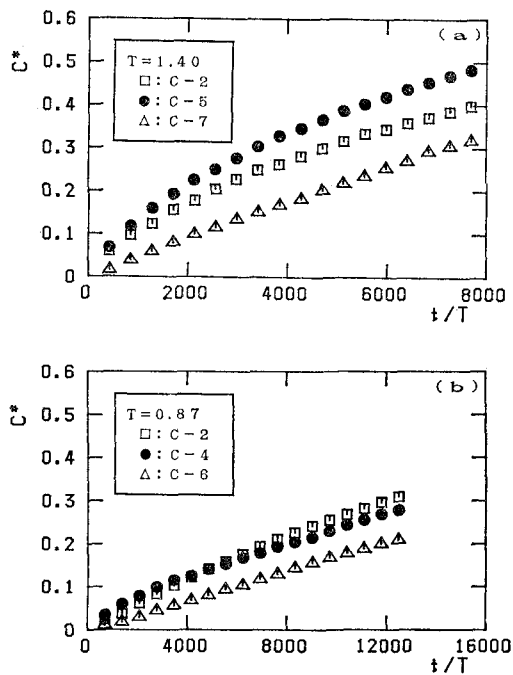


図-4 無次元溶存酸素濃度の時間的变化

りも良好なエアレーション機能をもつといえるが、2列以上の前面板を有する消波工では前面板の列数の効果は顕著には現れてこないことが結論づけられよう。

4. 結果の考察

(1) 逸散エネルギーと再曝気係数の相関

直立消波工に限らず消波構造物全般あるいは自然海浜におけるエアレーション効果は、そこで逸散される波のエネルギーと強い相関を有することはこれまでに認識され、ほとんどの研究では再曝気係数はこの量の関数としてデータの整理が行われている。ただ、細井ら(1988)はエアレーション機能を逸散エネルギーの絶対量 (E_d) と関係づけて考察しているのに対して、堀江ら(1980), (1987)は、この機能が E_d あるいは E_d の入射波のエ

エネルギー総量(E)に対する比 (逸散エネルギー率: E_d/E) のいずれで決定づけられているのか明確な判断を下していない。

著者らは既に、複数の縦スリットの前面板を有する直立消波工の反射率を正確に求めることができる理論式を提示している(角野ら, 1988)。そこで、消波工での波の逸散エネルギー量をこの反射率を通じて以下の式から算定し、それと再曝気係数との関係を検討してみる。

$$E_d = \frac{1}{8} \rho g H^2 (1 - K_R^2) n L \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 E_d は作用波1波当りの逸散エネルギー量、 ρ は流体の密度、 g は重力加速度、 H は波高、 K_R は反射率、 n は群速度と波速の比、 L は波長である。なお、表-2 には、このようにして得られた K_R と E_d の値を示した。

まず、図-5 は $k_2 T$ と E_d の関係を示したものである。この図より (あるいは表-2 より)、 E_d の増加とともに $k_2 T$ も増加することが確認でき、これまで指摘されてきたように両者の間にはば一定の関係が存在していることがわかる。

つぎに E_d を1波当りの入射波のエネルギー (E) で除して得られる逸散エネルギー率 ($E_d/E = 1 - K_R^2$) と $k_2 T$ の関係を図-6 に示す。図より、 $k_2 T$ と E_d/E との間には明確な関係は認められない。したがって、図-5 と図-6 の比較より、少なくとも消波工の場合には、 $k_2 T$ はエネルギー逸散率よりはむしろ逸散エネルギーの総量で決定づけられていることを指摘することができる。また E_d/E は消波工の消波特性を表す反射率と直接的に関係づけられるものでもあるので、 $k_2 T - E_d/E$ 間に明確な関係がみられないことは、消波工のエアレーション効果と消波特性とは強い相関をもたないことも意味している。

(2) スリット通過水粒子速度と再曝気係数との相関

消波工のエアレーション機能は、エネルギーの逸散の成因となる水面の乱れや渦の生成と関連していることは容易に想像でき、事実、それが逸散エネルギー量との間にある一定の相関を有しているのは既に示したとおりである。一方、スリット式直立消波工のスリット壁近傍で

の乱れや渦の規模は、スリットを通過する水粒子速度に大きく影響され、したがってエネルギー逸散の程度もこのスリット通過水粒子速度と強い関わりを持っていることを既に明らかにした(藤田ら, 1988)。それゆえ、 $k_2 T$ とスリット通過水粒子速度との間にもなんらかの関係が存在するはずであることが予想される。そこで、開口率 $2a/D$ を介して任意の水深におけるスリット通過水粒子速度 $V(z)$ と $U(z) = V(z) \times (2a/D)$ の関係にあるスリット壁近傍の一樣流の水平水粒子速度 $U(z)$ の理論値(藤田ら, 1988)を用いて、スリット通過水粒子速度と $k_2 T$ との相関の程度を検討してみる。

まず、図-7 には上記の一樣流の水平水粒子速度の振幅 $U_{max}(z)$ を入射波の水平水粒子速度振幅 $u_{max}(z)$ で除した相対水粒子速度振幅 (U_{max}/u_{max} 、水深によらず一定値をとる) と $k_2 T$ の関係を示す。なお、2重壁式および3重壁式の消波工では2枚あるいは3枚のスリット壁があるため、図中の $U_{max}(z)$ としては、各スリット壁の U_{max} の自乗和の平方根をとっている。この図からは、 U_{max}/u_{max} と $k_2 T$ の間にも E_d/E と $k_2 T$ の間と同様、顕著な関係は存在していないことがわかる。なお、 U_{max} の算定法として、上記の方法のほか各スリット壁における U_{max} の単純和をとったものを U_{max} とする方法でもデータを整理したが、この図同様、両者の間には顕著な関係は見いだされなかった。

このように、相対水粒子速度振幅と $k_2 T$ の間には顕著な関係は見いだされなかった。そこで、次にはスリット通過の水粒子速度との関係をみてみる。ただし水粒子速度は水深方向に変化するので、その水深方向の積分値、すなわちスリットを流出入する水塊の総流量 q との関係を見る。本論文では、この q として、次式より算定される値を便宜的に用いる。

$$q = \frac{U_{max}}{u_{max}} \cdot \int_{-h}^0 u_{max}(z) dz \\ = \frac{U_{max}}{u_{max}} \cdot \frac{HL}{2T} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 h は水深である。ただし、 $k_2 T$ との比較に用いる q は、周期 (T) をかけて1波当りの流れの総量 qT とする。

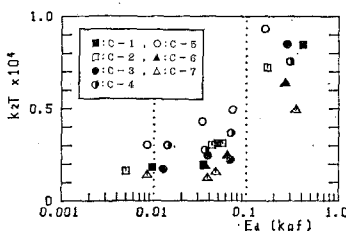


図-5 $E_d - k_2 T$

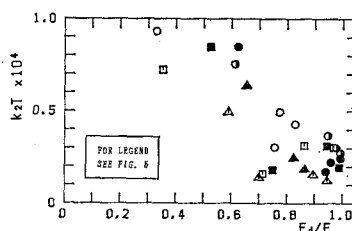


図-6 $E_d/E - k_2 T$

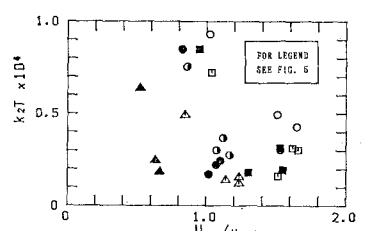


図-7 $U_{max}/u_{max} - k_2 T$

図-8 はこのようにして算定された qT と k_2T との関係を示したものである。また表-2 には、 qT の値を示した。なお、ここでも複数のスリット壁における qT の算定法として、各スリット壁における qT の単純和を用いる方法と自乗和の平方根値を用いる方法を採用し、それぞれの結果を図-8 (a) および図-8 (b) に示した。

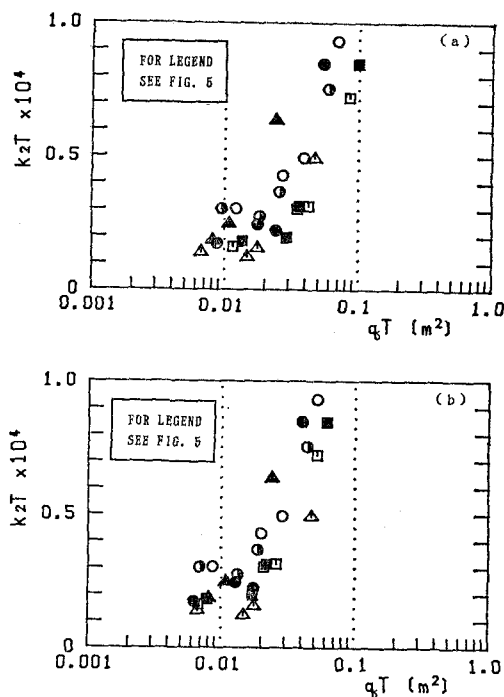


図-8 $qT-k_2T$

図より (あるいは表-2 より)、 k_2T-E_d の関係でみられたのと同様に、 k_2T は qT の増加とともに増加するような関係を有しており、この2つの量の間にも一定の関係が存在していることがわかる。図-8 (a) と図-8 (b) からは、 qT の算定法の違いによるこの傾向の差異は顕著ではないものの、自乗和の平方根値によって整理したものの方がわずかによくデータを整理できるといえることがわかる。

ところで、 k_2T-qT 間の関係を表す図-8 と k_2T-E_d 間の関係を表す図-5 を比較するとき、 k_2T とより強い相関を有しているのは qT であることが認められる。すなわち、縦スリット直立消波工のエアレーション機能を決定づける主因としては、既往の研究において指摘されているような逸散エネルギーよりもむしろスリッ

トを通過して流出入する水粒子の総量であることが示唆されている。このことは、消波工周辺の水利挙動に関する考察からも理解される。すなわち、エネルギー逸散と連関しあっているのは渦や乱れなど、流体内部の機構に関するものであるのに対し、流出入する水塊の総量値はまさしく、取り込まれた空気を含んで消波工周辺を移流する流体量そのものを評価した値と考えられるからである。

以上の観点にたつて理論の展開を進めれば、より実際の現象に即した縦スリット直立消波工の k_2T の予測式を立てることが可能であると思われる。

5. まとめ

本研究では、縦スリット直立消波工の構造諸元および波浪条件をさまざまに変えてエアレーション機能に関する実験を行うとともに、消波機能との相関について検討を加えた。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 同一波浪条件では、1重壁式よりも2重壁式あるいは3重壁式消波工の方がエアレーション効果がよく、2重壁式と3重壁式とではほぼ同程度である。

(2) 従来からの指摘通り、消波工のエアレーション機能は逸散エネルギー量との間にある一定の関係を有するようである。ただし、エネルギー逸散率との関係はみられない。

(3) 縦スリット直立消波工の場合のエアレーション機能は、スリットを通過する水塊の総量と強い相関を有し、この関係は逸散エネルギー量との関係よりも強い。

最後に、本研究は文部省科学研究費 (一般研究 [C]、代表者：小田一紀) による補助を受けたことを付記する。

参考文献

- 角野昇八・小田一紀・重松孝昌・芳田利春 (1988): 広周波数帯域にわたって低反射機能を有する直立消波工の開発, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 557~561.
- 藤田 孝・角野昇八・小田一紀・重松孝昌 (1988): 直立消波工の前面板枚数がスリット通過水粒子速度特性に与える影響, 第43回年次学術講演会講演概要集, pp. 658~659.
- 細井由彦・村上仁士・三井 宏 (1988): 各種海岸構造物の曝気効果と再曝気係数の予測式, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 812~816.
- 堀江 毅・細川恭史・三好英一 (1980): 護岸の曝気能比較に関する実験, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 527~531.
- 堀江 毅・細川恭史・三好英一・関根好幸 (1987): 構造物によるエアレーション効果比較模型実験, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 651~655.