

波浪エネルギーから位置エネルギーへの 効率的な変換に関する実験的研究

小松利光¹・岡田知也²・松永信博³・榎田 操⁴・藤田和夫⁵

¹正会員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科 (〒812-81 福岡市東区箱崎6-10-1)

²学生員 工修 九州大学大学院 工学研究科博士課程 日本学術振興会特別研究員 (同上)

³正会員 工博 九州大学助教授 大学院総合理工学研究科 (〒816 春日市春日公園6-1)

⁴正会員 工修 日本文理大学教授 工学部土木工学科 (〒870-03 大分市一木1727)

⁵正会員 九州大学技官 工学部建設都市工学科 (〒812-81 福岡市東区箱崎6-10-1)

波浪エネルギーの有効利用の一つとして、3次元構造物を用いて波を効率的に越波させることにより獲得された水位差を利用して、一方向流れを発生させる技術が提案されている。3次元構造物は一様法面勾配をもつ越波堤部とV字状集波堤部から構成されている。波浪エネルギーから効率良く位置エネルギーを獲得するには、入射波に対して構造物の最適寸法を決定することが重要となる。入射波が規則波の場合と不規則波の場合に対して構造物の形状と寸法を広範囲に変える実験を行い、越波量と獲得される位置エネルギーを定量的に評価した。さらに設計波に対し所要越波量を得るための構造物の設計指針を提案した。

Key Words : wave energy utilization, wave overtopping, sea water exchange, purification system

1. 序論

波浪エネルギーを有効に利用するための技術の開発やその実用化に向けての努力が、多くの研究者や技術者によって行われてきた。高橋¹⁾は「波浪エネルギー変換装置の現状について」と題し、その歴史を詳細に報告している。越波を利用して波浪エネルギーを位置エネルギーに変換する技術の開発も活発に行われてきた^{2)~6)}。しかしながら、この技術開発の主眼は獲得された水位差をさらに電気エネルギーに変換して利用しようというものであるため、安定供給が必要とされる電力に対し、波浪エネルギーの不安定さと装置の複雑さが、実用化の大きな障害となっている。本研究では、発電というプロセスを介さず、得られた越波量と水位差を直接利用して、一方向流を作り水質環境の改善を図ろうとするものである。例えば、半島や岬を横切って外海の海水を湾内に流入させたり、貧酸素化した底層部に溶存酸素の豊富な表層水を送り込んで水質浄化を図ることなどが考えられる(図-1参照)。また、ここで開発された技術は、水位差を利用して栄養塩の豊富な深海水を表層付近に汲み上げて、人工的に漁場を造成することにも利用可能である。

著者らが行ってきた越波に関する一連の研究^{7)~9)}

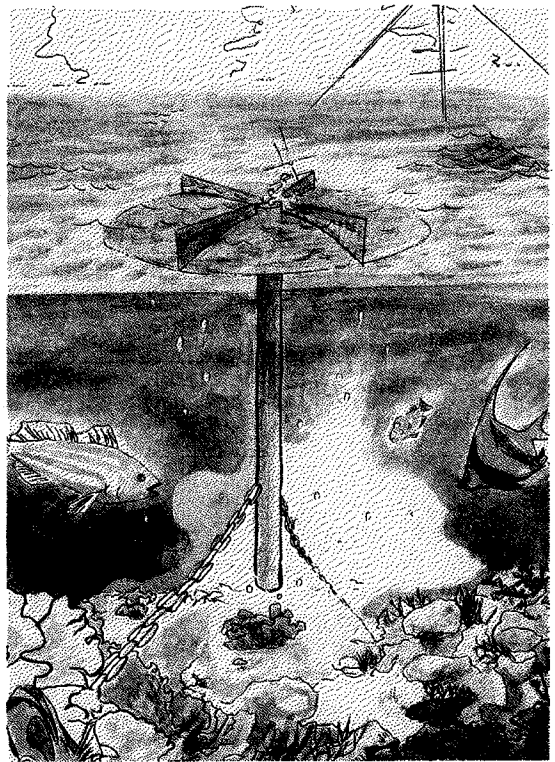


図-1 浮体構造物による底層水へのDO供給の概念図

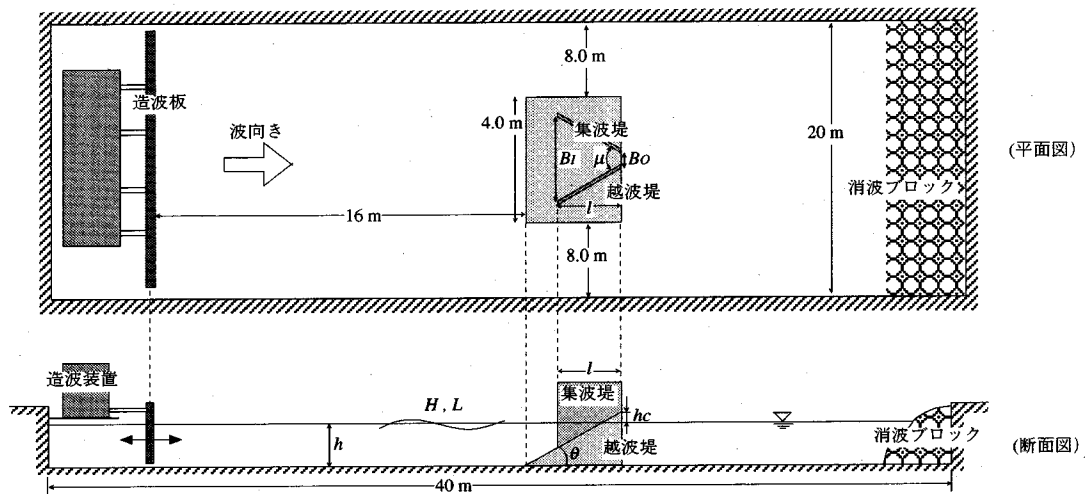


図-2 実験装置の概略および3次元越波構造物の諸量

は、最も効率的に水位差と越波量を獲得するための工学的な知見を得ることを目的としている。これまでの研究^{7), 8)}では、一様勾配斜面をもつ構造物(越波堤)に2次元規則波を入射させる実験を行った。その結果、越波量獲得に最適な越波堤の寸法の決定及び越波量の算定が可能となった。本研究では、広範囲に分布している波浪エネルギーを集めるために越波堤にV字状集波堤を取り付け(以下、3次元越波構造物と呼ぶ)、その構造物に対し、種々の2次元規則波、2次元不規則波を系統的に入射させる実験を行った。測定結果に基づき、獲得された越波量及び水位差を定量化し、設計波に対して所要越波量を得るための3次元越波構造物の設計指針を提案している。

2. 規則波による越波量

(1) 実験装置及び実験方法

実験は長さ40m、幅25m、深さ1.0mの大型平面造波水槽を用いて行われた。横幅4mの越波構造物を造波板から16mの位置に設置し、2次元規則波を入射させた。実験装置の概略及び代表諸量の定義を図-2に示す。

H と L は構造物設置予定位置における入射波の波高と波長である。3次元越波構造物に関する諸量 B_l 、 B_o 、 hc 、 h 、 l 及び θ は、それぞれ集波堤の入口幅、集波堤の出口幅、静水面からの天端高、法先水深、集波堤の波の進行方向長さ及び越波堤の法面勾配である。越波量は、実験開始後入射波が安定してから、水槽末端の消波ブロック面からの反射波の影響が入

射波に現れるようになるまでの波に対して計測された。この測定を3~5回繰り返して越波量の平均値を求めた。1波が入射することによって得られる単位幅当たりの越波量 Q_{R3} (cm²/波)は、測定越波量の平均値を入射波数と集波堤の出口幅 B_o で割ることにより求められた。越波量 Q_{R3} で示されるように、以下、諸量の添え字Rは入射波が2次元規則波であることを、添え字3は構造物が越波堤と集波堤から成る3次元構造物であることを意味する。 Q_{R3} は波と構造物の諸量に依存するので、これらの関係を次元解析を用いて無次元表示すると、無次元越波量 Q_{R3}/HL は、

$$\frac{Q_{R3}}{HL} = f\left(\frac{H}{L}, \frac{hc}{H}, \frac{h}{L}, \cot\theta, \frac{B_l}{B_o}, \frac{B_o}{l}, \frac{l}{L}\right) \quad (1)$$

で表わされる。

宮江ら³⁾は、2次元越波構造物において越波量が最大となる法面の最適勾配 θ は、天端高 hc や法先水深 h によって異なる値をとり $20^\circ \sim 30^\circ$ の範囲であることを指摘した。一方、著者らの研究⁸⁾では、最適勾配 θ は入射する波の沖波波形勾配 H_0/L_0 のみに依存し、 $H_0/L_0 = 0.0202 \sim 0.0659$ の範囲で $22^\circ \sim 30^\circ$ の値をとることが明らかとなった。また、 H_0/L_0 が大きくなるにつれ θ は 30° に漸近する傾向があることも示された。3次元構造物に波が入射する場合、集波堤の影響によって堤内の波の波形勾配は2次元越波構造物の場合に較べ大きくなることが予想される。この点を考慮し、3次元構造物における越波堤の法面勾配 θ に対しては 30° を採用することとした。また、相対水深 h/L_0 が0.052以上においては、 Q_2/H_0L_0 は h/L_0 に依存しないという著者らの結

表一 規則波に対する実験条件

周期 T (sec)	法先水深 h (cm)	h の波長 L (cm)	相対水深 h/L	波高 H (cm)	波形勾配 H/L	天端高 hc (cm)	相対天端高 hc/H	集波堤 の寸法
1.3	50.0	231.0	0.217	4.8	0.0210	1.3	0.27	a ~ g
						2.6	0.55	〃
						5.2	1.09	〃
						7.9	1.64	〃
				7.3	0.0314	2.0	0.27	〃
						4.0	0.55	〃
						8.0	1.09	〃
						12.0	1.64	〃
				9.7	0.0419	2.6	0.27	〃
						5.3	0.55	〃
						10.6	1.09	〃
						15.9	1.64	〃
				12.1	0.0524	3.3	0.27	〃
						6.7	0.55	〃
						9.9	0.82	〃
						13.2	1.09	〃
16.6	1.37	〃						
19.8	1.64	〃						

集波堤 の 寸法	集波堤の 波の進行 方向長さ l (cm)	相対集 波堤長 l/L	集波堤 の 出口幅 B_0 (cm)	集波比 B_l/B_0							
				1	4*	6	8	10	11*	12	14
				開角度 μ (°)							
				0	33.4	53.1	70.0	84.0	90.0	95.5	104.9
集波堤の入口幅 B_l (cm)											
a	26.3	0.114	5.3	5.3	21.2	31.8	42.4	53.0	58.3	63.6	74.2
b	39.5	0.171	7.9	7.9	31.6	47.4	63.2	79.0	86.9	94.8	110.6
c	52.9	0.229	10.6	10.6	42.4	63.6	84.8	106.0	116.6	127.2	148.4
d	66.1	0.286	13.2	13.2	52.8	79.2	105.6	132.0	145.2	158.4	184.8
e	79.2	0.343	15.8	15.8	63.2	94.8	126.4	158.0	173.8	189.6	221.2
f	100.0	0.433	20.0	20.0	80.0	120.0	160.0	200.0	220.0	240.0	280.0
g	121.5	0.526	24.3	24.3	97.2	145.8	194.4	243.0	267.3	291.6	340.2

* $B_l/B_0 = 4, 11$ の実験は $H/L = 0.0524$ の波に対してのみ行われた。

果⁸⁾に基づいて、 $h = 50$ cm, $T = 1.3$ s ($h/L_0 = 0.19$) の条件の下で実験を行うことにした。ここで、 Q_2 は 2 次元越波構造物により得られる越波量である。2 次元越波構造物に関する著者らのこれまでの研究^{7), 8)} では、 H_0 と L_0 をパラメータとして越波量を定量的に評価してきた。しかしながら浅海域に構造物を設置する場合、設置予定位置における卓越波高と波長が直接的なパラメータとなる。本論文ではこのような考えに基づき法先水深に対する波高 H と波長 L を用いて越波量を定量化している。従って、文献⁸⁾ で示された「相対水深 h/L_0 が 0.052 以上においては、 Q_2/H_0L_0 は h/L_0 に依存しない」という知見は H と L を用いて整理し直すと「相対水深 h/L が 0.096 以上においては、 Q_2/HL は h/L に依存しない」という知見になることを改めて記述しておく。

さらに Q_{R3}/HL の B_0l に対する依存性を調べるために、式 (1) で示された 7 つのパラメータのうち B_0l を除いた全てのパラメータを固定して予備実験を行った。その結果、 Q_{R3}/HL は B_0l にそれほど強くは依存しないが、 B_0l が 0.2 のとき極大値をとることが分かった。従って、今回の実験では最適値として $B_0l = 0.2$ を用いることとした。 $\theta = 30^\circ$, $h/L \geq 0.096$, $B_0l = 0.2$ という条件の下では式 (1) に含まれる無次元パラメータは 5 つに減少し、

$$\frac{Q_{R3}}{HL} = f\left(\frac{H}{L}, \frac{hc}{H}, \frac{B_l}{B_0}, \frac{l}{L}\right) \quad (2)$$

となる。

波形勾配 H/L , 相対天端高 hc/H , 集波比 B_l/B_0 , 相対集波堤長 l/L をそれぞれ独立に広範囲に変化させ

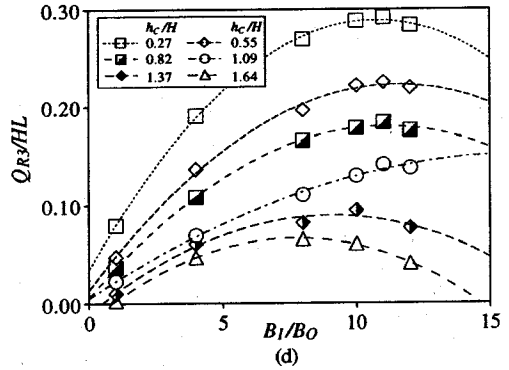
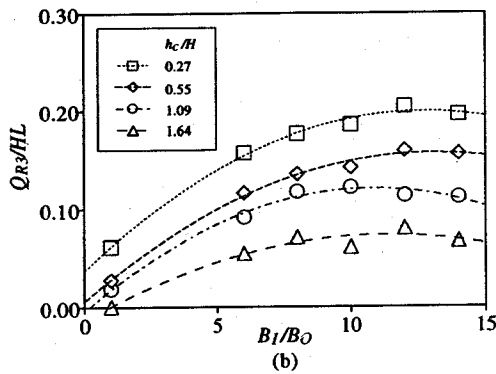
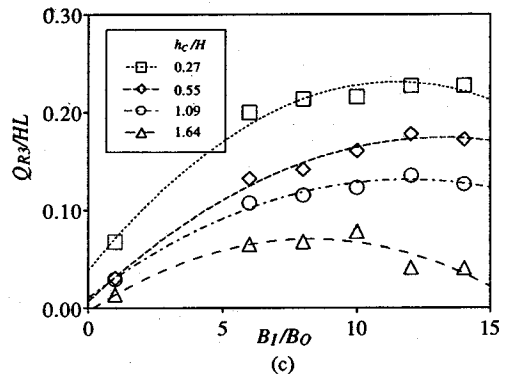
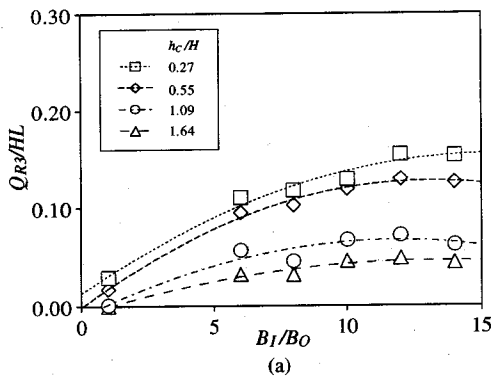


図-3 Q_{R3}/HL と B_1/B_0 の関係 ($VL=0.286$, (a) $H/L=0.0210$, (b) 0.0314 , (c) 0.0419 , (d) 0.0524)

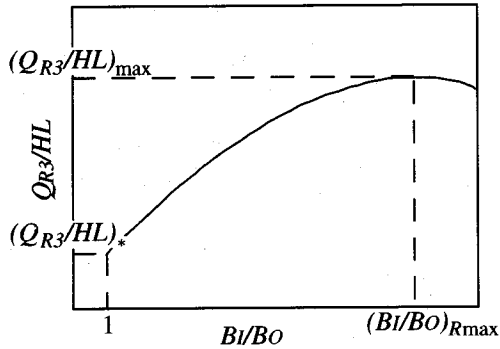


図-4 無次元越流量を普遍表示するための代表諸量

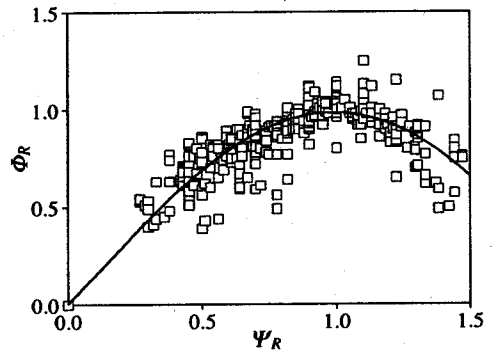


図-5 Φ と Ψ の関係 ($H/L=0.0210 \sim 0.0524$, $hc/H=0.27 \sim 1.64$, $VL=0.114 \sim 0.526$)

ることにより Q_{R3}/HL の定量化のための実験を行った (表-1 参照). H/L は $0.0210 \sim 0.0524$ の間で変えられ, hc/H は天端高 hc を系統的に調節することにより 5 段階で変えられている. また B_1/B_0 の値も 1 から 14 の間で系統的に変えられている. この範囲を集波堤の開角度 μ で表わすと $0^\circ \sim 104.9^\circ$ に対応する. 本実験において B_1/B_0 と μ の値が 1 対 1 に対応しているのは $B_0/l=0.2$ という固定された条件の下で実験が行われているためであり, $\mu = 2 \tan^{-1}(0.2(B_1/B_0 - 1)/2)$ なる関係がある. l の最大長さは半波長程度のものを対象とし, VL を 0.114 から 0.526 の範

囲で変えた. 集波堤の寸法 a ~ e の実験においては集波堤は越波堤上にあり, f と g の実験では集波堤は越波堤よりも長くなっている.

(2) 実験結果とその考察

図-3 (a)~(d) は, $VL=0.286$ の条件の下で H/L の値を $0.0210 \sim 0.0524$ の間で変化させた場合における Q_{R3}/HL と B_1/B_0 の関係を hc/H をパラメータとして示したものである. 図中の曲線は, それぞれの hc/H の値のときのデータに対して描かれた近似曲線である. 本論文で示される以下の図中に描かれた近似

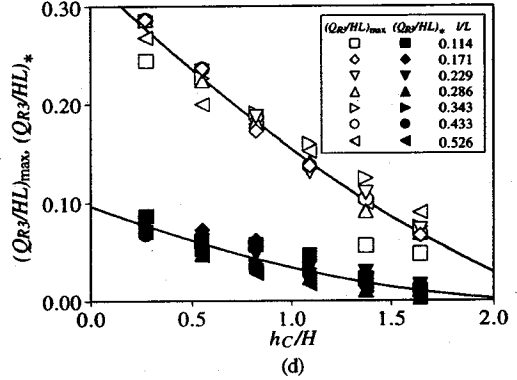
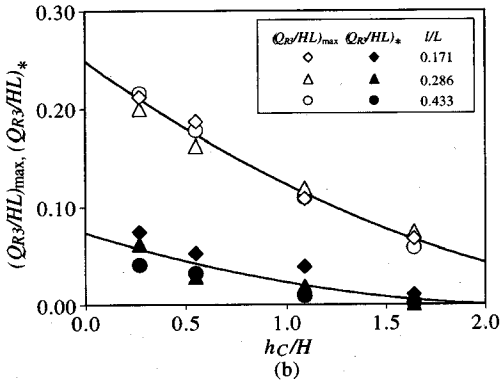
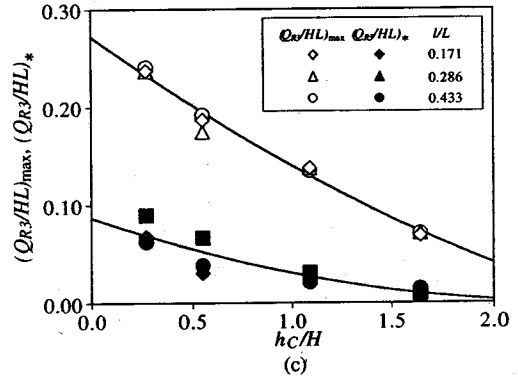
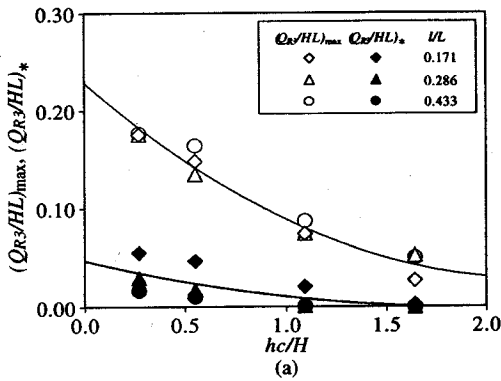


図-6 $(Q_{R3}/HL)_{max}$ および $(Q_{R3}/HL)_*$ と hc/H の関係 (a) $H/L = 0.0210$, (b) 0.0314 , (c) 0.0419 , (d) 0.0524)

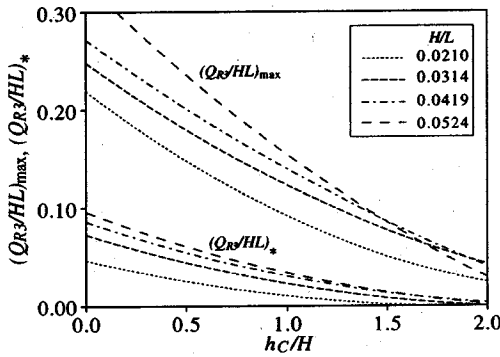


図-7 $(Q_{R3}/HL)_{max}$ および $(Q_{R3}/HL)_*$ と hc/H の関係

曲線は、データに二次関数をあてはめ最小二乗法近似に基づいて決定されたものである。パラメータ H/L , VL , hc/H の値が固定された場合、 B_1/B_0 が増加するにつれて Q_{R3}/HL は増大し、極大値をとった後に減少する傾向があることが分かる。また、当然の結果とも言えるが、ある H/L , VL , B_1/B_0 の値に対しては、 hc/H が大きくなるにつれて Q_{R3}/HL は小さくなっている。なお、 H/L が大きくなると Q_{R3}/HL は全体的に大きな値をとる傾向が見られる。このような傾向は図-3 では示されていない他の VL の値に対するグラフにおいても共通に見られた。

Q_{R3}/HL と B_1/B_0 の関係を普遍表示する為に、 Q_{R3}/HL と B_1/B_0 に関する代表諸量を図-4 のように定義する。 $(Q_{R3}/HL)_{max}$ は最大無次元越波量であり、その値における集波比を $(B_1/B_0)_{Rmax}$ とする。また、 $B_1/B_0 = 1$ 、つまり集波効果がない場合の越波量を $(Q_{R3}/HL)_*$ と定義する。

図-5 は、 Q_{R3}/HL と B_1/B_0 の関係を示した全てのグラフから図-4 で定義された代表諸量を読み取り、 Q_{R3}/HL 及び B_1/B_0 を規格化して示したものである。ここで Φ_R と Ψ_R は、

$$\Phi_R = \frac{(Q_{R3}/HL) - (Q_{R3}/HL)_*}{(Q_{R3}/HL)_{max} - (Q_{R3}/HL)_*} \quad (3)$$

$$\Psi_R = \frac{(B_1/B_0) - 1}{(B_1/B_0)_{Rmax} - 1} \quad (4)$$

と定義されている。 $\Psi_R = 0.5$ 付近では多少のばらつきが見られるものの、 Q_{R3}/HL は近似曲線で十分普遍的に表示されることが分かる。この普遍曲線を用いて任意の B_1/B_0 , hc/H , H/L , VL における無次元越波量 Q_{R3}/HL を評価するためには、定義式 (3) と (4) で用いた代表量 $(Q_{R3}/HL)_{max}$, $(Q_{R3}/HL)_*$, $(B_1/B_0)_{Rmax}$ と hc/H , H/L , VL の関係を定量化する必要がある。

図-6 (a) ~ (d) は H/L のそれぞれの値に対して

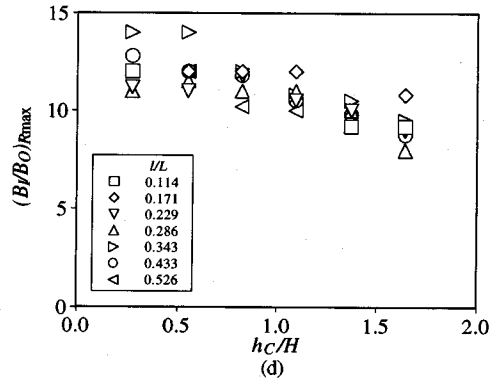
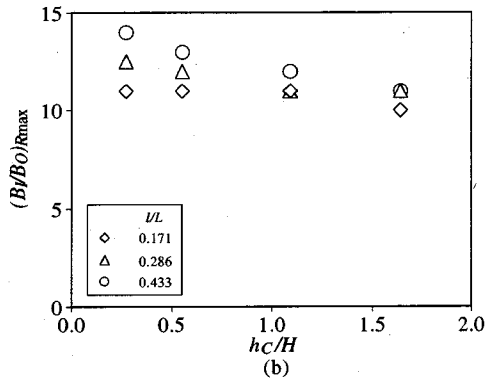
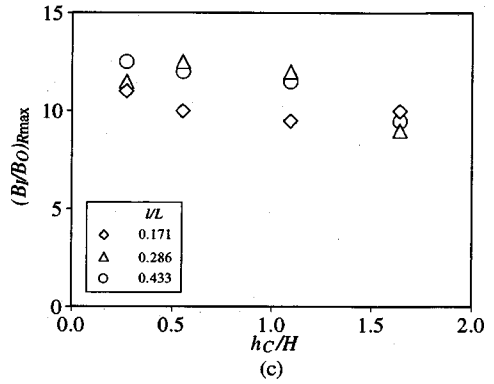
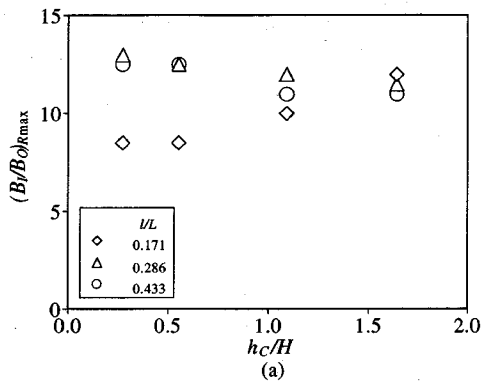


図-8 $(B/Bo)_{Rmax}$ と hc/H の関係 (a) $H/L = 0.0210$, (b) 0.0314 , (c) 0.0419 , (d) 0.0524)

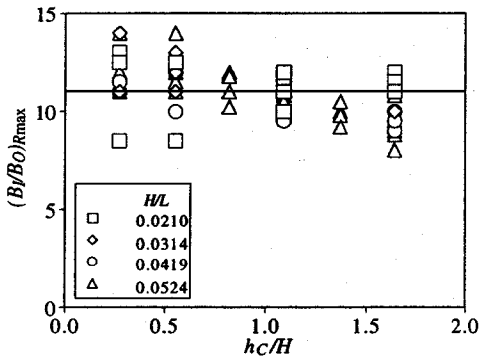


図-9 $(B/Bo)_{Rmax}$ と hc/H の関係

I/L をパラメータとして $(Q_{R3}/HL)_{max}$ と hc/H の関係および $(Q_{R3}/HL)_*$ と hc/H の関係をプロットしたものである。両者とも hc/H の増加とともに単調に減少するが、 $0.0114 \leq I/L \leq 0.0526$ の範囲においては、 I/L にほとんど依存せず図中の曲線で十分近似できることが分かる。

次に $(Q_{R3}/HL)_{max}$ および $(Q_{R3}/HL)_*$ の H/L への依存性を調べるために、図-6 で得られた近似曲線を H/L をパラメータとして示したものが図-7 である。両者とも H/L の値が大きいくら大きな値を取っており、近似曲線の間にはわずかではあるが系統的な

H/L への依存性が認められる。

図-8 (a) ~ (d) からは、それぞれの H/L に対して $(B/Bo)_{Rmax}$ は hc/H の増加とともに若干の減少傾向がみられるが、全体的にみるとそれほど明瞭ではなくほぼ一定値をとるように思われる。また、パラメータ I/L への明瞭な依存性も認められない。図-9 は図-8 で示されたデータを一緒にして、 H/L をパラメータとしてプロットしたものである。 $(B/Bo)_{Rmax}$ は I/L 及び H/L の値に対し、際だった依存性は認められず図中の実線 $(B/Bo)_{Rmax} \approx 11$ でほぼ近似できるものと思われる。 Bo/l が 0.2 に固定されていること及び $(B/Bo)_{Rmax} \approx 11$ であることを考慮すれば、本実験の範囲においては集波堤の開角度 μ が約 90° の場合に最大無次元越波量が生ずることになる。

結論として、規則波の場合に与えられた 3 次元越波構造物によって獲得される越波量は、図-7, 9 で得られた $(Q_{R3}/HL)_{max}$, $(Q_{R3}/HL)_*$, $(B/Bo)_{Rmax}$ を用いて式 (3), (4) から Φ_R , Ψ_R を計算することにより、算定可能となる。

表-2 不規則波に対する実験条件

周期 $T_{1/3}$ (sec)	法先水深 h (cm)	h の波長 $L_{1/3}$ (cm)	相対水深 $h/L_{1/3}$	波高 $H_{1/3}$ (cm)	波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}$	天端高 hc (cm)	相対天端高 $hc/H_{1/3}$	集波堤の寸法
1.2	50.0	231.8	0.216	5.1	0.0217	1.3	0.25	a ~ c
						3.8	0.75	〃
						6.4	1.25	〃
1.3	50.0	272.3	0.183	12.6	0.0464	3.2	0.25	d ~ f
						9.8	0.75	〃
						15.8	1.25	〃

集波堤の寸法	集波堤の波の進行方向の長さ l (cm)	相対集波堤長さ $l/L_{1/3}$	集波堤の出口幅 B_0 (cm)	集波比 B/B_0						
				1	4	6	8	10	12	14
				開角度 μ (°)						
				0	33.4	53.1	70.0	84.0	95.5	104.9
集波堤の入口幅 B_l (cm)										
a	34.1	0.145	6.8	6.8	27.2	40.8	54.4	68.0	81.6	95.2
b	60.0	0.242	12.0	12.0	48.0	72.0	96.0	120.0	144.0	168.0
c	86.4	0.367	17.3	17.3	69.2	103.8	138.4	173.0	207.6	242.2
d	39.6	0.145	7.9	7.9	31.6	47.4	63.2	79.0	94.8	110.6
e	66.0	0.242	13.2	13.2	52.8	79.2	105.6	132.0	158.4	184.8
f	100.0	0.367	20.0	20.0	80.0	120.0	160.0	200.0	240.0	280.0

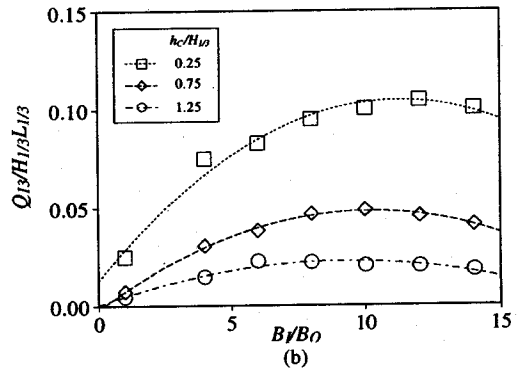
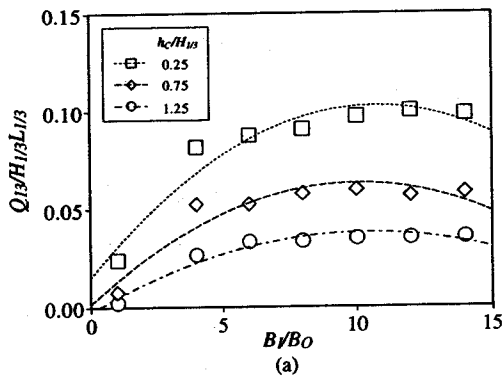


図-10 $Q_{13}/H_{13}L_{1/3}$ と B/B_0 の関係 ($l/L_{1/3} = 0.242$, (a) $H_{13}/L_{1/3} = 0.0217$, (b) 0.0464)

3. 不規則波により獲得される越波量

(1) 実験装置及び実験方法

前章の規則波に関する実験と同様に3次元構造物を設置し(図-2参照), 2次元不規則波を堤内に入射させた。入射波の条件は2種類とし, 構造物設置予定地点における有義波高 $H_{1/3}$ は 5.1, 12.6 cm, 有義波周期 $T_{1/3}$ は 1.2, 1.3 s (波形勾配 0.022, 0.046) で, スペクトル形状が Bretschneider・光易型となる不規則波を用いた。水深 h は全実験を通じて 50 cm に固定された。越波量の採取は1分間にわたって行

われた。この測定を3~5回繰り返すことにより, 越波量の平均値を求め, 得られた平均値から単位時間, 単位出口幅当たりの越波量を求めた。越波量に有義波周期を掛けることにより, 有義波1波当たりの越波量 Q_{13} (cm²/波)を算定した。そして, Q_{13} を波群の有義波高と有義波長で割った値を1波当たりの無次元越波量 $Q_{13}/H_{13}L_{1/3}$ と定義した。ここで添え字 I は入射波が2次元不規則波であることを意味する。無次元越波量 $Q_{13}/H_{13}L_{1/3}$ は規則波の場合と同様に7つの無次元量に依存し

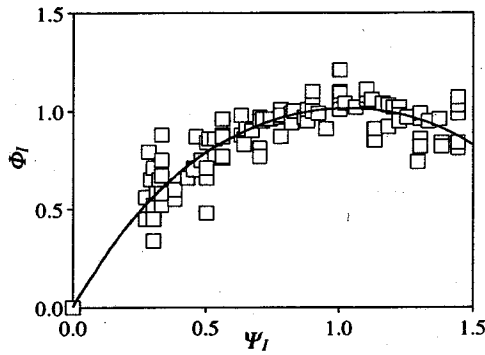


図-11 不規則波に対する Φ_1 と Ψ_1 の関係

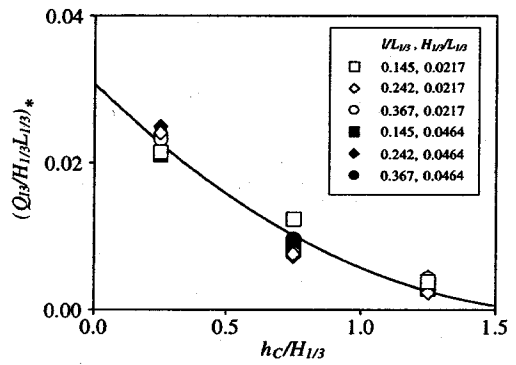


図-13 $(Q_{13}/H_{1/3}L_{1/3})_*$ と $hc/H_{1/3}$ の関係

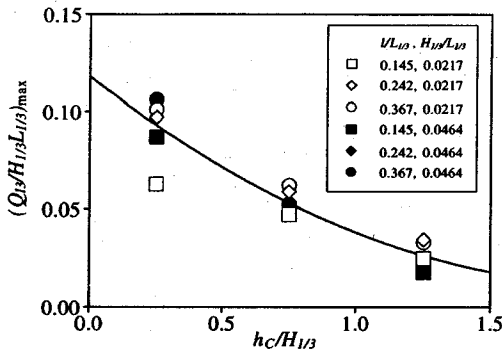


図-12 $(Q_{13}/H_{1/3}L_{1/3})_{max}$ と $hc/H_{1/3}$ の関係

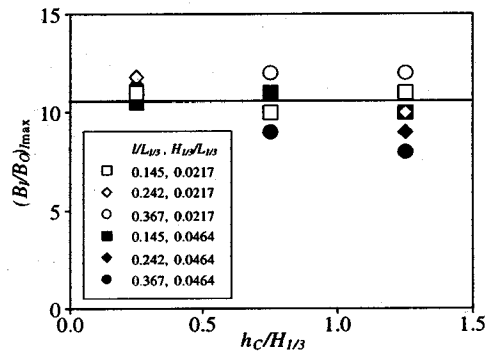


図-14 $(B_1/B_0)_{max}$ と $hc/H_{1/3}$ の関係

$$\frac{Q_{13}}{H_{1/3}L_{1/3}} = f\left(\frac{H_{1/3}}{L_{1/3}}, \frac{hc}{H_{1/3}}, \frac{B_1}{B_0}, \frac{l}{L_{1/3}}, \cot\theta, \frac{h}{L_{1/3}}, \frac{B_0}{l}\right) \quad (5)$$

と表される。ここで、規則波の実験と同様、越波堤の法面勾配 θ は 30° に固定した。また、相対水深 h/L が 0.096 以上であれば越波量は h/L にほとんど依存しないこと、 $B_0/l = 0.2$ 近傍で越波量は極大値を取ることを考慮して、 $h/L_{1/3} = 0.184, 0.212$, $B_0/l = 0.2$ の条件の下で実験を行った。従って、この場合式(5)は簡単化され

$$\frac{Q_{13}}{H_{1/3}L_{1/3}} = f\left(\frac{H_{1/3}}{L_{1/3}}, \frac{hc}{H_{1/3}}, \frac{B_1}{B_0}, \frac{l}{L_{1/3}}\right) \quad (6)$$

で表される。式(6)中の4つのパラメータをそれぞれ独立に変化させて実験を行った。実験条件を表-2に示す。

(2) 実験結果とその考察

図-10 (a), (b) は $H_{1/3}/L_{1/3} = 0.0217, 0.0464$, $UL_{1/3} = 0.242$ の値に対して、 hc/H をパラメータとして $Q_{13}/H_{1/3}L_{1/3}$ と B_1/B_0 の関係を示したものである。入射波が不規則波の場合でも、 B_1/B_0 が増加するにつれ $Q_{13}/H_{1/3}L_{1/3}$ は増加するが、ある B_1/B_0 で極大値を取った

のち減少する傾向がある。また、 $hc/H_{1/3}$ が大きくなると $Q_{13}/H_{1/3}L_{1/3}$ は全体的に小さくなっている。このような特徴は規則波において得られた結果(図-3参照)とよく一致している。しかしながら $Q_{13}/H_{1/3}L_{1/3}$ の $H_{1/3}/L_{1/3}$ への依存性はそれほど顕著ではない。これらの結果を規則波の結果と比較すると、 $Q_{13}/H_{1/3}L_{1/3}$ は全体的に小さい値をとり、ピークはそれほど明瞭ではなくなっている。

規則波の場合に図-4で定義した代表量と同様に代表量を定義して、 $Q_{13}/H_{1/3}L_{1/3}$ と B_1/B_0 の関係を普遍表示する。 $Q_{13}/H_{1/3}L_{1/3}$ と B_1/B_0 を規格化するために次式で定義される無次元量 Φ_1 , Ψ_1 を導入する。

$$\Phi_1 = \frac{(Q_{13}/H_{1/3}L_{1/3}) - (Q_{13}/H_{1/3}L_{1/3})_*}{(Q_{13}/H_{1/3}L_{1/3})_{max} - (Q_{13}/H_{1/3}L_{1/3})_*} \quad (7)$$

$$\Psi_1 = \frac{(B_1/B_0) - 1}{(B_1/B_0)_{max} - 1} \quad (8)$$

$(Q_{13}/H_{1/3}L_{1/3})_{max}$ は不規則波に対する最大無次元越波量の値であり、その時の集波比を $(B_1/B_0)_{max}$ とする。また集波効果のない $B_1/B_0 = 1$ の場合の不規則波に対する無次元越波量を $(Q_{13}/H_{1/3}L_{1/3})_*$ とする。図-11は Ψ_1 に対して Φ_1 の値をプロットしたものである。入射波が不規則波の場合に対しても、近似曲線が十

基本設定 設置基数：1 基
 条件 設計波 : $H_0 = 0.55 \text{ m}$, $T = 4.0 \text{ s}$, $L_0 = 25.0 \text{ m}$ ($L_0 = gT^2/2\pi$)
 所要送水量 : $q = 0.35 \text{ m}^3/\text{s}$ (3.0 (万 t/day))
 必要水位差 : $h_C = 0.40 \text{ m}$

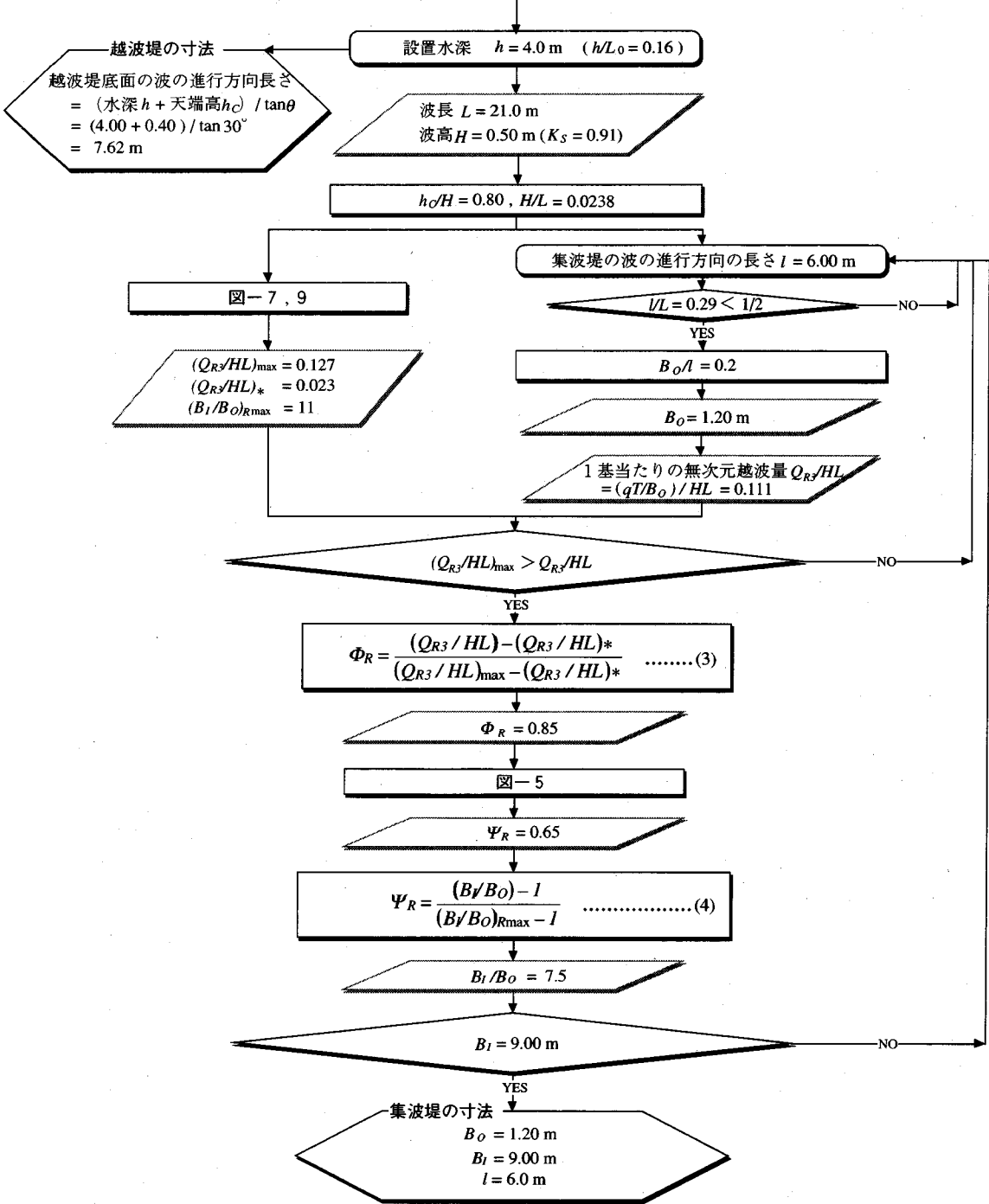


図-15 構造物の寸法を決定するためのフローチャート (規則波)

分普遍表示できることが分かる。その近似曲線の形状は規則波のものと比較すると、多少緩やかなものとなっている(図-5参照)。

図-12は $(Q_{13}/H_{13}L_{13})_{\max}$ を、図-13は $(Q_{13}/H_{13}L_{13})_*$ を、そして図-14は $(B_1/B_0)_{\max}$ を H_{13}/L_{13} と l/L_{13} をパラメータとして hc/H_{13} に対してプロットしたものである。 $(Q_{13}/H_{13}L_{13})_{\max}$ と $(Q_{13}/H_{13}L_{13})_*$ は、 H_{13}/L_{13} と l/L_{13} に対しそれほど強い依存性はなく hc/H_{13} のみに依存し、 hc/H_{13} が増加するにつれ規則波の場合と同様単調に減少する。なお規則波の場合の $(Q_{R3}/HL)_{\max}$ と $(Q_{R3}/HL)_*$ は H/L に依存したが、 $(Q_{13}/H_{13}L_{13})_{\max}$ と $(Q_{13}/H_{13}L_{13})_*$ は H_{13}/L_{13} にほとんど依存しないという結果になっている。

$(B_1/B_0)_{\max}$ は hc/H_{13} が増加するにつれ、規則波の場合と同様やや減少する傾向が見られる。また、そのばらつきも大きくなる。しかしながら、図-9の規則波の結果と同様、 $(B_1/B_0)_{\max} \approx 10.5$ ではほぼ近似できるものと思われる。

結論として、図-11, 12, 13, 14で示された結果から、与えられた3次元越波構造物による2次元不規則波の場合の越波量を算定することが可能となった。

4. 所要越波量に対する構造物寸法の決定

前節までの結果に基づいて、必要な越波量を獲得するための構造物の寸法を決定する手順を、フローチャートとして図-15に示す。設計波として2次元規則波を対象としている。

港内や閉鎖性の内湾の水質改善、人工漁場の開発等、目的と規模に応じて所要送水量 q (m^3/s)が与えられる。今、送水量 q (m^3/s)を 0.35 (m^3/s)(3.0 (万 t/day))であると仮定すると、用いる送水管の材質、長さ、管径等から、この q を流すために必要な水位差 hc が決められる。また、構造物の設置基数を n 基とすれば1基当たりの所要越波量は q/n となるが、ここでは $n=1$ として、1基当たりの所要越波量を q とする。以下に、必要水位差を $hc=0.40$ mと仮定して、 $q=0.35$ (m^3/s)を得る為の構造物の寸法を求める。

設計波は $H_0=0.55$ m, $T=4.0$ sとする。本実験結果は全て $\theta=30^\circ$, $h/L \geq 0.096$, $B_0/l=0.2$ の条件の下で得られたデータであり、本実験結果を実海域に適用する際には、この条件が満たされなければならない。 $h/L \geq 0.096$ ($h/L_0 \geq 0.052$)の条件は構造物の設置水深を決定するパラメータである。 $T=4.0$ sから

$L_0=25.0$ mとなる。設置水深の限界は $h/L_0=0.052$ で与えられるので、限界の水深は 1.3 mとなる。従って、設置水深 $h=4.0$ mとすると、波の浅水変形の関係式を用いて $L=21.0$ mを得る。また、波の浅水変形のグラフから $h=4.0$ mにおける波高 H は 0.50 mとなる。

法先水深 h 、天端高 hc 及び法面勾配 θ が与えられていることから、越波堤の寸法は決定される。また集波堤の寸法は以下に示す流れにより決定される。 $l=3.0$ mと仮に設定すると、 l/L は 0.14 になる。ここで、 $l/L < 1/2$ を満たしていなければならない。 $B_0/l=0.2$ であるから、集波堤出口幅 B_0 は 0.60 mになり、単位時間当たりの送水量 0.35 (m^3/s)に T を掛け、それを H, L 及び B_0 で割ると、1波当たり単位幅当たりの所要越波量 Q_{R3}/HL は 0.222 となる。ところで、 $hc=0.40$ m, $H=0.50$ mすなわち $hc/H=0.80$ のとき、この構造物で獲得できる最大の越波量 $(Q_{R3}/HL)_{\max}$ は図-7から 0.127 である。この時、 $Q_{R3}/HL > (Q_{R3}/HL)_{\max}$ となり、この l のままでは所要越波量は獲得できず、 l を大きくする必要がある。例えば l を2倍にすると $l=6.0$ m, $l/L=0.29$ ($l/L < 1/2$)となり、 $B_0/l=0.2$ から B_0 は 1.20 mになる。従って、 Q_{R3}/HL は 0.111 となり、 $Q_{R3}/HL < (Q_{R3}/HL)_{\max}$ の条件を満たす。

図-7と図-9から $(Q_{R3}/HL)_{\max}=0.127$, $(Q_{R3}/HL)_*=0.023$, $(B_1/B_0)_{\max}=11$ を得る。次に式(3)から $\Phi_R=0.85$ を得る。この値を図-5に代入すると $\Psi_R=0.65$ となり、式(4)から $B_1/B_0=7.5$ が得られる。 B_0 は 1.2 mであり、従って、 B_1 は 9.00 mとなる。もし、 B_1 の値に何らか設計上の制約がある場合は、それを満たすように l を変更することにより対処できる。例えば、 B_1 が大き過ぎる場合には、 l を大きくすることにより B_1 を小さくすることができる。以上で構造物の寸法を決定することができた。

設計波として不規則波を用いるときには、図-5, 7, 9, 式(3), (4)の代わりに図-11, 12, 13, 14, 式(7), (8)を用いれば、構造物の寸法は決定されることになる。

5. 結論

本研究では、2次元規則波および2次元不規則波に対する越波量を定量的に評価し、所要越波量を得るための構造物の設計指針を示した。主な結論は以下の通りである。

(1) 越波量は B_1/B_0 の増加に伴い増加するが、

極大値を取った後に減少する。

(2) 規則波に対しては代表量 $(Q_{R3}/HL)_{\max}$, $(Q_{R3}/HL)_{*}$, $(B/B_0)_{R\max}$ を, 不規則波に対しては代表量 $(Q_{I3}/HL)_{\max}$, $(Q_{I3}/HL)_{*}$, $(B/B_0)_{I\max}$ を用いて越波量と集波比を規格化することにより, 越波量と集波比の関係が実験的に明らかとなった。

(3) 規則波と不規則波に対する越波量の定量化に用いられた代表量が相対天端高, 波形勾配, 相対堤長にどのように依存するかを調べた。その結果, 与えられた水理条件のもとで越波構造物による越波量を算定することが可能となった。

(4) 入射波が規則波の時は, 代表量のうち $(Q_{R3}/HL)_{\max}$ と $(Q_{R3}/HL)_{*}$ は H/L に強く依存する。一方, H/L への依存性は3つの代表量の中ではそれほど顕著ではない。

(5) 入射波が不規則波の時は, $H_{1/3}/L_{1/3}$ と H/L は代表量にそれほど影響を及ぼさない。

以上の研究結果に基づき, 与えられた越波構造物による設計波に対する越波量の評価ならびに所要越波量を獲得する為の越波構造物の設計指針を提案した。

謝辞:最後に, 本研究を行うに当たり, 有益な御助言を頂いた九州大学建設都市工学科の朝位孝二助手, 熱心な協力を頂いた鹿島建設(株)の増輪一彦氏, (株)フジタの水井宏征氏, また実験において多大な協力をお願いした日本文理大学土木工学科海洋環境研究室の4年生, 及び九州大学建設都市工学科環境流体力学研究室の諸君に深く感謝致します。

なお, 本研究に対し文部省科学研究費(特別研究員奨励費)の補助を受けたことを付記します。

参考文献

- 1) 高橋重雄:波エネルギー変換装置の現状について, 水工学に関する夏季研修会講義集No. 29, pp. B-1-1-B-1-20, 1993.
- 2) 広瀬学, 加藤正進, 田中寛好:波流発電方式における越波特性について, 電力土木, No. 181, pp. 93-100, 1982.
- 3) 宮江伸一, 手操能彦:集波堤による波浪エネルギーの位置エネルギーへの変換実験, 第1回波浪エネルギー利用シンポジウム, pp. 145-154, 1984.
- 4) 山本守之, 宮崎弘志:沿岸波力発電に関する開発研究, 電力土木, No. 181, pp. 93-100, 1982.
- 5) 電源開発総合技術試験所試験報告書:波力発電システムに関する調査研究, 1990.
- 6) (財)エンジニアリング振興協会:波の津波力変換による揚水, 貯水及び定出力発電他に関する調査研究報告書, 1993.
- 7) 小松利光, 松永信博, 藤田和夫, 増輪一彦, 細山田得三, 樋田操:越波を利用した水位差獲得に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第35巻, pp. 549-554, 1991.
- 8) 小松利光, 松永信博, 増輪一彦, 樋田操, 藤田和夫:二次元越波堤による越波エネルギー獲得に関する基礎的研究, 海洋開発論文集, vol. 8, pp. 105-110, 1992.
- 9) 小松利光, 松永信博, 樋田操, 岡田知也, 藤田和夫:3次元構造物によって効率的に獲得された越波量, 水工学論文集, 第38巻, pp. 493-497, 1994.

(1995.10.9 受付)

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECTIVE TRANSFORMATION OF WAVE ENERGY INTO POTENTIAL ENERGY

Toshimitsu KOMATSU, Tomonari OKADA, Nobuhiro MATSUNAGA,
Misao HASHIDA and Kazuo FUJITA

How much the volume of wave overtopping and potential energy are gained has been investigated experimentally by propagating two-dimensional regular waves and irregular waves to a structure. The structure was composed of two parts. One is a sloping wall to promote the wave-overtopping and gain effectively the difference of water head. The other is V-shaped vertical walls to converge widely distributed wave energy. A relationship between the overtopping volume, head difference and the structure form has been obtained empirically. It enables us to determine the optimum form of a man-made structure to gain the required wave-overtopping volume and head difference.