

防波堤屈曲部付近の波高・波圧分布

鴻上雄三*・藤木信之**・堤敏郎***・上原泰正****

1. まえがき

港湾の拡張に伴って、港外側で凹な屈曲部を持つ防波堤法線を計画する場合がある。この屈曲部に波が進入した場合、通常の直線部と異なりいかなる波力を受けるかという問題は、設計者にとって重要であるが取扱いが困難であるため現状では特別の考慮は払われていない。

波形の安定した重複波的な波の場合には規則波の条件のもとに理論的な取り扱いが可能であり、ある種の開角度のものに対して有用な研究がなされている。しかし波形が重複波的でなくなる場合、つまりマウンドの影響などで防波堤前面で波形を保てず砕波する場合の波高・波圧分布は理論的な取り扱いが困難であり、実験の積み重ねが必要であろう。

この実験は、防波堤屈曲部とマウンドによって波が不安定状態となった場合の波高・波圧分布を実験的に検討し、あわせて最大波圧合力と同時最大波圧合力の比較を行なったものである。

2. 重複波の理論式

水深が一樣で、防波堤前面において重複波的な波形を保ついくつかの場合は詳しく解かれている¹⁾。屈曲部に左右対称形に波が入射した場合の防波堤沿いの波高分布は、概略を示すと次のとおりである。

$\alpha=120^\circ$ の場合

$$H'/H = \sqrt{(1+r')^2 + r'^2 + 2r'(1+r')\cos(3/2 \cdot \rho)}$$

反射率 $r'=1$ のとき $H'/H = \sqrt{5.0 + 4.0 \cos \frac{3}{2} \rho}$

$\alpha=90^\circ$ の場合

$$H'/H = \sqrt{(1-r'^2)^2 + 4r'(1+r')^2 \cos^2 \frac{\rho}{\sqrt{2}}}$$

$r'=1$ のとき $H'/H = 4 \cos \frac{\rho}{\sqrt{2}}$

ここで $\rho=r/L$, r : 屈曲点からの距離, H' : 前面波高, H : 進入波高

$\alpha=150^\circ$ の場合

この場合は上記2つの場合と異なり、入射波、反射波と半無限堤の回折との重ね合わせで解いたものであ

る^{2), 3), 4)}。

3. 実験装置

実験水槽は図-1に示すような長さ14.50m×幅5.95m×深さ0.50mのものをを用い、造波機はフラッター式である。

模型防波堤は図-2に示すようなマウンドを設けたものである。重複波的な波形を得る時はマウンドを取りはずした。

波圧計は波高の極大点、極小点に取り付けることとし、図-2の左側が極大点を測定するためのものであり、上下4cm間隔に5個の波圧計を取り付けてある。右側は極小点を測定するためのもので、静水面と静水面下7.5cmの2個所に取り付けてある。

防波堤の開角度は $\alpha=150^\circ, 120^\circ, 90^\circ$ の3種類で入射角は左右の防波堤に対称となるようにした。

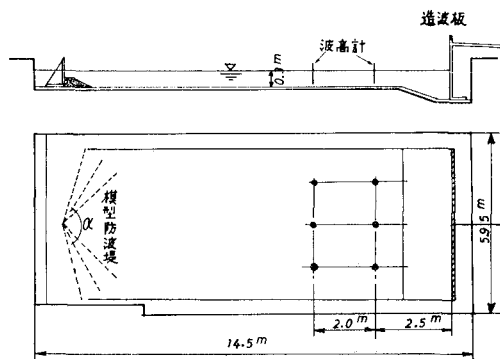


図-1 実験水槽

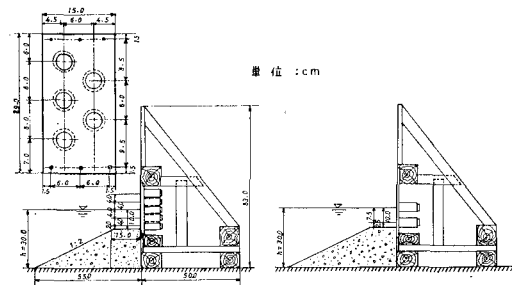


図-2 模型防波堤と波圧計

4. 実験方法

屈曲部の波圧については次元解析的な考察より、

* 正会員 北海道開発局土木試験所港湾研究室
 ** 正会員 北海道開発局室蘭開発建設部苫小牧港湾第3工事課長
 *** 正会員 工修 北海道開発局土木試験所港湾研究室
 **** 正会員 北海道開発局土木試験所港湾研究室

$$P(r)/wH(H+d)=\phi(H/L, h/L, r/L, H/d, B/L, \alpha, \beta, \gamma) \dots\dots (1)$$

P : 波圧合力 d : マウンド水深
 H : 進入波の波高 B : マウンド幅
 L : 進入波の波長 α : 防波堤開角度
 h : 水深 β : 進入波の入射角
 r : 屈曲点からの距離 γ : マウンドのり角度

(図-3 参照)

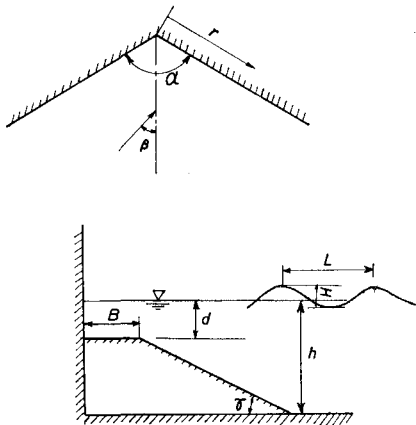


図-3

と示され、波圧は 8 個の無次元因子に影響されると考えられる。この実験では周期を固定することにより波長をほぼ一定に保ち、波高を変化させ波形勾配、比水深の波圧におよぼす影響を調べた。実験波の諸元は表-1 に示すとおりである。

表-1 実験波の諸元

波高 H (cm)	周期 T (sec)	波長 L (cm)	H/L	d/H	h/L
4.0	1.13	164.3	0.0243	2.50	0.183
6.0	1.13	166.0	0.0361	1.67	0.181
8.0	1.13	168.4	0.0475	1.25	0.178
10.0	1.13	171.7	0.0582	1.00	0.175

式 (1) の左辺は平均波圧強度を指標するものと考えて良く、広井の波圧公式 $p=1.5wH$ において、波圧が静水面上 $1.0H$ まで作用すると考えた場合、これは広井公式の係数 1.5 に対応する。

波圧の測定点を決定するに当たっては、あらかじめ防波堤沿いの波高分布をビデオコーダーで測定し、その極大点、極小点を選んだ。極大点は屈曲点を含めて 3 点、極小点は 2 点である。

5. 実験結果と考察

(1) 防波堤沿いの波高分布

重複波的な波形の波高分布は図-4 のとおりである。図中の曲線は 2. の理論式である。 $\alpha=90^\circ, 120^\circ$ のものは良い一致をしているが、 150° のものは大きさに開き

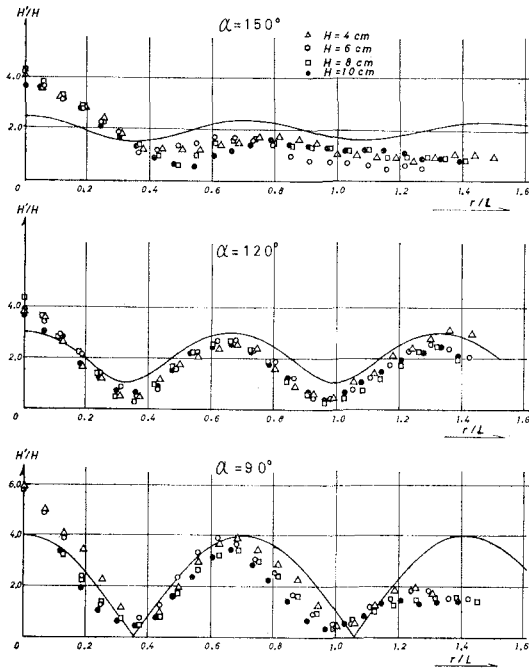


図-4 重複波的な波形の波高分布

が認められる。 $\alpha=90^\circ$ で r が大きくなるに従って実験値が理論曲線から離れているのは、実験条件が無限堤でないため防波堤前面で波高の不連続面を生じることによると考えられる(図-5)。

波形が重複波的でなく、不安定な波形となる場合の波高分布は図-6 のとおりである。図中の曲線は重複波的な波形の理論式である。不安定な波形では極大

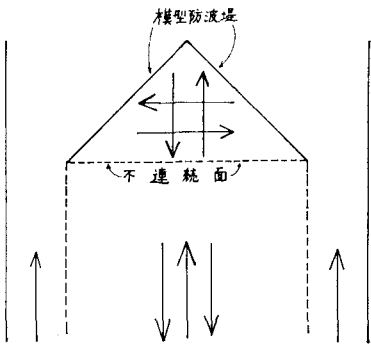


図-5 $\alpha=90^\circ$ における不連続面

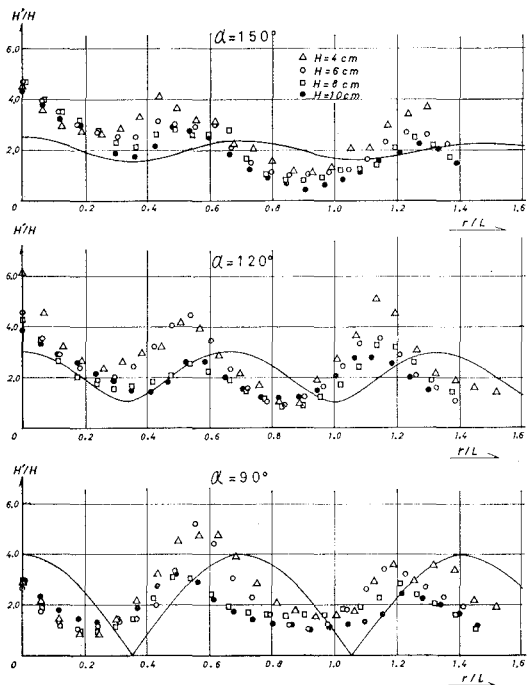
点で砕波するので、波高は波の実質部分の振幅より読み取った。重複波的な波形の波高分布(図-4)と比較すると、極大点が屈曲点側に寄っている。これは防波堤沿いの方向に反射された波の波長がマウンドの影響で短くなることに関係すると思われる。

極大点での H'/H の大きさは、重複波的な波のものより大きい。

(2) 波圧 (不安定な波形のもの)

a) 極大点における波圧の鉛直方向分布

① $\alpha=150^\circ$: $H=4\text{cm}$ では各極大点とも砕波的な波圧とはならないが $H=6, 8, 10\text{cm}$ では第 3 極大点を



図—6 不安定な波形の波高分布

除き完全な砕波圧となり、屈曲点(第1極大点)では静水面下 $d/2$ 、第2極大点では静水面に最大波圧が生じる波圧分布をし $P/wH(H+d)$ の値は2~3程度である。

② $\alpha=120^\circ$: $H=4\text{ cm}$ では各極大点とも重複波動的もしくは部分砕波動的な波圧であるが、それ以上の波高ではほとんどが砕波動的なものとなっている。最大波圧を生じる深さは波高によって異なり、 $H=6\text{ cm}$ では、屈曲点で $z=-d/2$ 、第3極大点でマウンド頂部($z=-d$)に生じているが、 $H=8, 10\text{ cm}$ では、屈曲点と第2極大点で $z=-d/2$ 、第3極大点で $z=-d$ に生じている。この時の最大波圧合力は後に述べるが第3極大点で最大となり、第2極大点、屈曲点の順となっている。

③ $\alpha=90^\circ$: $H=4\text{ cm}$ では砕波圧とはならない。それ以上の波高では第3極大点を除いて砕波圧となっており、最大波圧を生じる深さは第1、第2極大点ともにすべて $z=-d/2$ である。

以上まとめると表—2 のとおりである。

静水面下 $d/2$ に最大波圧を示すものが最も多く、他は静水面とマウンド頂部に現われている。マウンド頂部に最大波圧を生じるのは、この実験のマウンドがかなり高基なものであったためと、さらに、防波堤屈曲部の波の変形、砕波の形状が通常の防波堤の状態と異なっているためと思われる。

b) 平均波圧強度 $P/wH(H+d)$ の防波堤沿いの分布
各測点で、深さ方向の測定最大波圧を直線で結びその面積を最大波圧合力とし、この無次元量 $P/wH(H+d)$

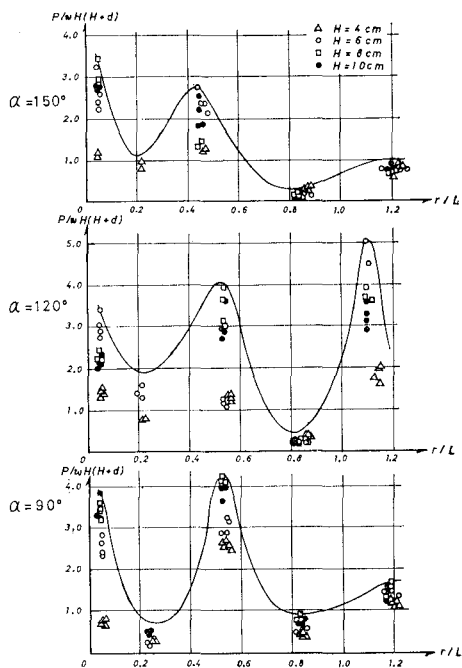
表—2

α	H (cm)	屈曲点 (第1極大点)	第2極大点	第3極大点
150°	4	—	—	—
	6	$-d/2$	0	—
	8	$-d/2$	0	—
	10	$-d/2$	0	—
120°	4	—	—	—
	6	$-d/2$	—	$-d$
	8	$-d/2$	$-d/2$	$-d$
	10	$-d/2$	$-d/2$	$-d$
90°	4	—	—	—
	6	$-d/2$	$-d/2$	—
	8	$-d/2$	$-d/2$	—
	10	$-d/2$	$-d/2$	—

— は砕波動的波圧とならないもの

を縦軸に、 r/L を横軸にとって示すと 図—7 のとおりである。

屈曲点では、すべての開角度において波の集中を生じ平均波圧強度の値は、 $H=4\text{ cm}$ のものは重複波動的であるからこれを除外して考えれば、2.0~4.5 まで分布している。第2極大点での値は、1.0~4.5 と広く分布し、第3極大点では $\alpha=90^\circ, 150^\circ$ と重複波動的なものとなり値は小さい。しかし、 $\alpha=120^\circ$ の第3極大点での値は 3.0~5.0 となり第2極大点、屈曲点のものより最大値が大きい。一般的に屈曲点から遠ざかるにつれて極大点の波圧も小さくなると考えられがちであるが、 $\alpha=120^\circ$ のものが異なった傾向を示しているのは興味深い。その原因について若干の考察を試みる。



図—7 平均波圧強度の防波堤沿いの分布

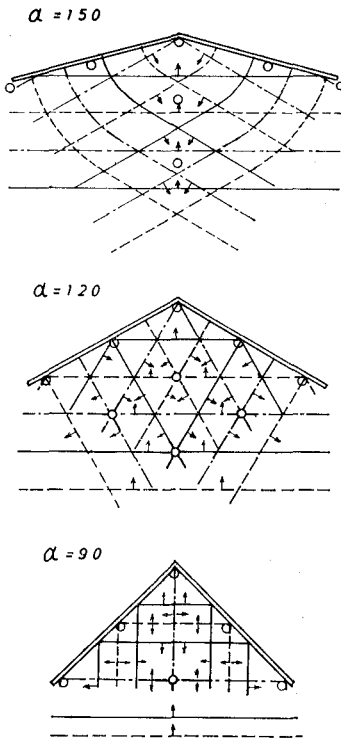


図-8 波の進行状況

波の進行方向を矢印で示している。○印は波が重なり、三角波となり波形を保てず碎波する点である。つまり進入波は防波堤に達する以前に部分的に碎波する。

碎波後にどのように変形していくかは明らかではないが、碎波する以上いくらかのエネルギーは失われるであろう。したがって、防波堤に達する前に波が碎波することにより波圧も減少すると思われる。

図によれば、碎波を起こす点は $\alpha=150^\circ$ では屈曲点の前面沖側、 $\alpha=120^\circ$ では屈曲点と第2極大点の前面沖側、 $\alpha=90^\circ$ では屈曲点前面沖側に生じている。ここで

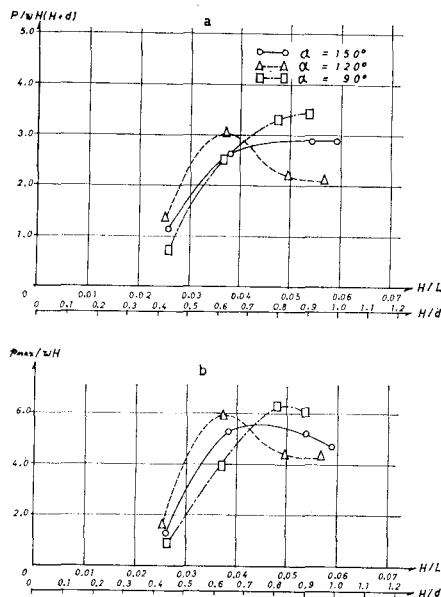


図-9 屈曲点の波圧

図-8はこの実験において波が、どのように進むかを幾何学的に描いたもので、3種類の線はそれぞれある瞬間の波峰である。波の進行方向を矢印で示している。○印は波が重なり、三角波となり波形を保てず碎波する点である。つまり進入波は防波堤に達する以前に部分的に碎波する。

考えておかなければならないことは、防波堤が有限長であるということである。もし防波堤が無限長なら、 $\alpha=90^\circ$ の第2、第3極大点の前面沖側でも、 $\alpha=120^\circ$ の第3極大点の前面沖側でも碎波する点を生じるが、この実験ではそれが生じない。したがって $\alpha=120^\circ$ では、進入波高は屈曲点や第2極大点に入射するものより第3極大点のものの方が大きくなると考えられる。これが $\alpha=120^\circ$ において、平均波圧強度の防波堤沿い分布が第3極大点で最大を示している原因であると思われる。このことは、実際の防波堤が有限長であることを考えれば興味深いことである。 $\alpha=90^\circ$ においても同様のことが考えられる。第2極大点では、前面沖側で碎波せず 図-5 の不連続面の影響も小さいので、波圧は屈曲点より多少大きくなっているようである。

c) 屈曲点での鉛直方向波圧分布

屈曲点での平均波圧強度および $p_{\max}/wH$ と H/L (または H/d) の関係を表わしたものが 図-9 である。

a, b 両図は非常に類似した傾向を示しているので、 P と $p_{\max}$ とは何らかの関係を有していると思われる。この関係を定量化すれば、 $p_{\max}$ を知ることににより P の算出が可能である。

縦軸に深さ方向の z/H 、横軸に p/wH をとったものが 図-10 である。図中の実線は測定値の平均値を結んだもの、破線は図中表示した分布式で両者はかなり良く一致している。この分布式は静水面下 $H/2$ に最大波圧 $p_{\max}$ を持ち

$$p = p_{\max} \left\{ 1 - \frac{1}{2H} \left| z + \frac{H}{2} \right| \right\}^2 \dots\dots\dots (2)$$

で表わされる。したがって波圧合力 P は、 p を z に関して、 $-d$ から $1.5H$ (式(2)において $p=0$) まで積分し、 $d=aH$ と表わせば

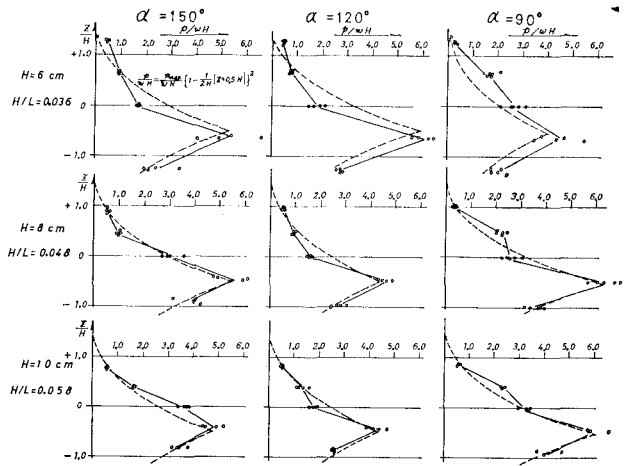


図-10 屈曲点での鉛直方向波圧分布

$$P = \int_{-a}^{1.5H} p dz = \int_{-aH}^{1.5H} p dz$$

$$= H \cdot p_{\max} \left\{ \frac{1}{32} + \frac{1}{48} (4a^3 - 30a^2 + 75a) \right\} \dots\dots (3)$$

となる。

$p_{\max}$ に実験値を代入し、式(3)より得られた結果を P の実験値と比較したものが表-3 である。

表-3

α	波高 (cm)	実 験 値				計 算 値	
		H (cm)	$p_{\max}/wH$	P (g/cm)	P/wH ($H+d$)	P (g/cm)	P/wH ($H+d$)
150°	6.0	6.30	5.30	271.6	2.65	245	2.55
	8.0	8.92	5.50	489.3	2.89	412	2.86
	10.0	9.85	4.71	554.0	2.83	495	2.48
120°	6.0	6.19	5.95	307.8	3.07	275	2.87
	8.0	8.29	4.40	335.5	2.21	330	2.29
	10.0	9.50	4.33	398.0	2.15	456	2.28
90°	6.0	6.20	3.97	254.2	2.53	184	1.91
	8.0	8.05	6.33	481.4	3.31	474	3.29
	10.0	9.06	6.05	590.2	3.42	636	3.18

計算値と実験値とはそれほど大きな開きはなく、式(3)の有用性を示している。

しかし波圧の鉛直方向分布は、マウンド幅、高さなどの影響が強く、この実験はかなり高基なマウンドについてのものであり、低基なものについてはさらに実験の積み重ねが必要である。また $p_{\max}$ の大きさそのものについても明確でなく、この実験においては $p_{\max} = 4 \sim 6 w H$ 程度であった。

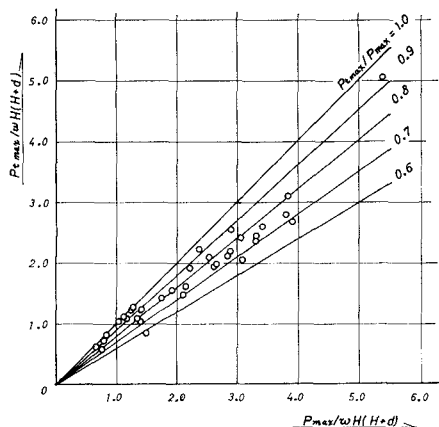
d) 最大波圧合力と同時最大波圧合力

現在まで行ってきた議論は最大波圧合力に関するものである。最大波圧合力とは、深さ方向に分布する波圧のそれぞれの最大を結んだものであり、それぞれが最大を示す時刻はわずかではあるがずれている。同時最大波圧合力とは、ある瞬間を考えた場合の最大波圧合力をいう。この瞬間にはすべての測点が最大波圧を示しているわけではないので、同時最大波圧合力は最大波圧合力より小さい。

構造物の安定に採用すべき設計波圧としてどちらを選ぶかは議論の要することである。ここでは、両者を比較する。

図-11 は横軸に最大波圧合力 ($P_{\max}$) の無次元量、縦軸に同時最大波圧合力 ($P_{t\max}$) の無次元量を取り各実験値の平均をプロットしたものである。

重複波領域 ($P/wH(H+d) \approx 0.8 \sim 1.3$) では $P_{t\max}/P_{\max}$ は $0.9 \sim 1.0$ 、砕波領域 ($P/wH(H+d) \approx 1.5$ 以上) では、 0.8 を中心とし $0.7 \sim 0.9$ の範囲にある。すなわち砕波圧の場合、同時最大波圧合力は最大波圧合力の $7 \sim 9$ 割であるといえる。



$P_{\max}$: 最大波圧合力
 $P_{t\max}$: 同時最大波圧合力

図-11 同時最大波圧合力と最大波圧合力の比較

~9 割であるといえる。

6. あとがき

この実験は、高基なマウンドを持つ防波堤屈曲部に左右対称形に波が進入した場合に限られた実験条件下のものであり、一般的な議論には遠いものであるが、不安定な波において得られた結果をまとめると次のとおりである。

(1) 平均波圧強度の防波堤沿い分布はかなり複雑で、一般的には屈曲点で最大の波力が作用すると考えられがちであるが、たとえば $\alpha = 120^\circ$ の第3極大点や $\alpha = 90^\circ$ の第2極大点のように、屈曲点より大きな波力が作用することがある。

(2) 極大点での鉛直方向波圧分布は、静水面下 $H/2$ に最大波圧を生じることが多く、特に屈曲点では

$p = p_{\max} \{1 - 1/2H \cdot |z + H/2|\}^2$ で表わされる。 $p_{\max}$ の値は明確でなく $p_{\max} = 4 \sim 6 w H$ 程度である。

(3) 同時最大波圧合力は最大波圧合力の $7 \sim 9$ 割である。

参 考 文 献

- 1) 三井宏他：海岸構造物不連続部の波高分布について第1~5報，第13~17回海岸工学講演会講演集，土木学会 (1966~1970)
- 2) 鴻上雄三他：防波堤屈曲部付近の波高・波圧分布に関する一実験，北海道開発局土木試験所月報第218号 (1971)
- 3) 尾崎晃他：屈曲部における波の変形に関する実験的研究，第21回年次学術講演会講演概要，土木学会 (1966)
- 4) 森平倫生他：海の波の回折計算法と回折図，港湾技研資料 No. 21，運輸省港湾技術研究所 (1965)