

防波堤上の直柱に作用する水平波力に関する実験的研究

(前) 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所次長 正会員 ○永井 紀彦
 (運輸省港湾技術研究所海洋水理部主任研究官)
 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所調査課長 正会員 守屋 義一
 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所調査課 木村 克利
 株式会社日本港湾コンサルタント水理部 野沢菊三郎

1. はじめに

近年海洋性レジャーの要請を受けて、港湾施設を市民一般者向けに開放するための、魚釣場などの設置が求められるようになった。特に、防波堤などの波の作用を受ける場所を開放する際には、手すり、柵などの安全施設が必要となる。こうした安全施設の設計にあたっては、防波堤上の直柱に作用する水平波力を適正に算定することが不可欠である。防波堤上における越波した水塊の挙動およびそれに伴って生ずる波力に関しては、越波流量の算定¹⁾や海中あるいは岩礁上の円柱に働く波力の算定^{2, 3)}等の研究成果が報告はされているものの、適切な算定手法がまだ確立されていないのが現状である。本報告は、防波堤上の直柱に作用する水平波力の算定に資することを目的とした水理模型実験結果を紹介したものである。

2. 実験

2.1 水路および模型床

図-1に水路と模型床を示す。この水路は、運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所水理実験場内にあり、ピストン型不規則波造波装置を備えている。造波板は、任意の造波信号に従って前後に移動するが、本実験では、実験条件およびデータ解析を単純にするため、規則波だけを作用させた。水路の延長は38m、幅は1.0mであり、水深は図中に示すように波の進行方向に変化させた。すなわち、防波堤型設置位置における水深を50cmとし、防波堤前面9mの区間に1/50の海底勾配を設置した。

2.2 防波堤および直柱の模型

図-2に防波堤模型と水位測定点を示す。防波堤は混成堤とし、碎石の上にアクリル製矩形ケーソン模型を設置した。ケーソン模型の高さは51cm(天端高10cm)、幅は40cmである。図中に示すように、防波堤上における越波した水塊の挙動を把握するため、前面から0cm、15cm、30cmの位置にそれぞれ容量式波高計を設置した。直柱の模型は、図中に示すように天端上前端部から2cmの位置に設置した。直柱模型はアルミ製とし、3種類の円柱($\phi=10\text{mm}$ 、 15mm および 20mm)と辺長15mmの角柱模型を用いて実験を行った。本実験は基礎的な実験であり、特定の防波堤を対象としたものではないため縮尺は定めてはいないが、仮に1/10縮尺と仮定すれば、水深5m、天端高1m、天端幅4m、直柱の径は、円柱では10cm、15cmおよび20cmということになる。

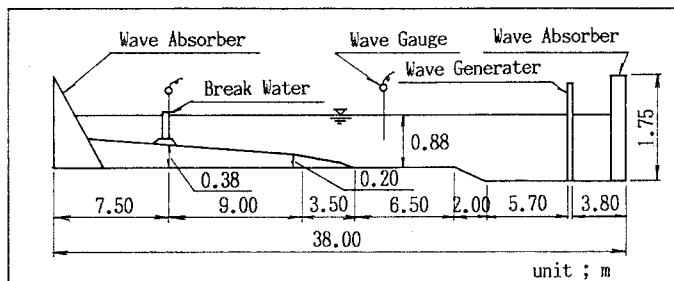


図-1 水路と模型床

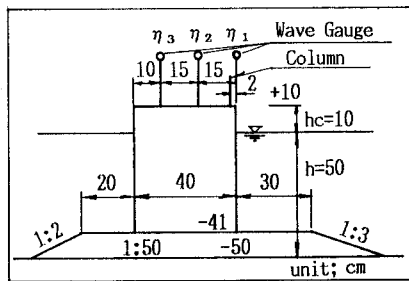


図-2 防波堤模型と水位測定点

2.3 実験波の検定

実験水路中の波の伝播については、波速、群速度等を考慮し、また水路端部における反射、および造波板における再反射も考慮した上で、適切な有効測定時間を決定しなければならない⁴⁾。本実験では、防波堤模型設置に先だって、同じ位置に容量式波高計を設置し、実験波を検定し実測値から有効測定時間を求めた。

図-3は、実験波の検定結果の一例を示したものであり、周期 $T=1.3$ 秒の場合の検定結果を波高 H 毎に示している。はじめの10波程度は、防波堤設置位置には波のエネルギーが十分に到達していないため、波高は小さくその値も安定していない。本実験では、有効測定波として図中黒塗りでプロットした5波を設定し、この5波に関する平均値を用いてデータ整理を行った。実験波の波高は水路端部からの反射によって若干変動することは避けられないが、図に示すように、5波の平均値に対する変動率は5%以内に設定することができた。

2.4 防波堤上の水位および流速の測定

防波堤上の水位分布および流速は、図-2に示す3台の容量式波高計の記録(η_1 、 η_2 および η_3)から求めた。すなわち、 η_1 と η_2 および η_2 と η_3 の同時記録から、越波水塊の先端およびピーク水位の移動速度を求め、それぞれの区間の平均流速と考え

た。流速の測定にあたっては、フロート($\phi=1\sim2$ mmのプラスチック製)および中立粒子(四酸化炭素とトルエンの混合液)の移動をビデオによって追跡する方法も試みたが、解析が困難で、かつ、データのバラツキも大きかったため、採用には至らなかった。

2.5 水平波力の測定

直柱に働く水平波力は、図-4に示すように、三分力計を用いて測定した。すなわち、直柱下端を防波堤上面から1mm程度持ちあげた状態で、

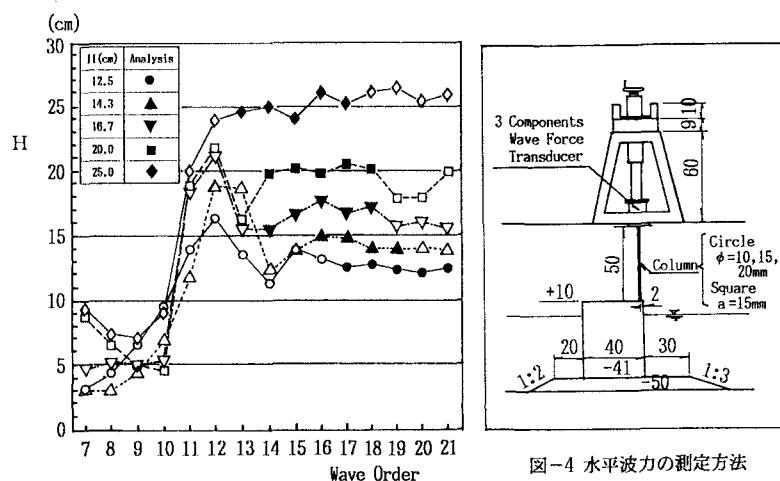


図-3 実験波の検定

図-4 水平波力の測定方法

表-1 直柱に作用する水平波力の実験ケース

CASE	T (s)	H (cm)	h (cm)	d (cm)	h c (cm)	η	U	Wave Force by 3 Components Wave Force Transducer				Wave Force by Strain Gauge	
								Circle (ϕ)		Square(a)		Circle (ϕ)	
								10.0mm	15.0mm			10.0mm	15.5mm
1-1	1.3	12.5	50.0	41.0	10.0	○	○						
1-2	"	14.3				○	○						
1-3	"	16.7				○	○	○	○	○	○	○	○
1-4	"	20.0				○	○	○	○	○	○	○	○
1-5	"	25.0				○	○	○	○	○	○	○	○
2-1	2.0	12.5				○	○						
2-2	"	14.3				○	○						
2-3	"	16.7				○	○	○	○	○	○		
2-4	"	20.0				○	○	○	○	○	○		
2-5	"	25.0				○	○	○	○	○	○		
3-1	2.7	12.5				○	○						
3-2	"	14.3				○	○						
3-3	"	16.7				○	○	○	○	○	○	○	○
3-4	"	20.0				○	○	○	○	○	○	○	○
3-5	"	25.0				○	○	○	○	○	○	○	○

直柱上端を三分力計に固定した。

なお、歪ゲージを用いた水平波力の測定も試みたが、出力歪量が微小であったので採用には至らなかった。

2.6 実験ケース

表-1に実験ケースを示す。ここに、 T は実験波の周期、 H は波高、 h は防波堤の設置水深、 d はマウンド水深、 h_c は静水面からの防波堤の天端高、 η は防波堤上部の水位測定、 U は防波堤上部の流速の解析を意味している。3通りの実験波周期に対して、それぞれ5通りの波高の実験波を作用させたので、本実験における h/L は0.088、0.123および0.216、 h_c/H は0.4、0.5、0.6、0.7および0.8となる。

3. 実験結果

3.1 防波堤上の水位・流速・流量

表-2は、防波堤上の水位の測定結果を示したものである。水位 η_1 、 η_2 および η_3 は、図-2に示す各点で測定された水位の最大値(有効測定5波の平均値)であり、 $\overline{\eta_{12}}$ と $\overline{\eta_{23}}$ は、それぞれの平均値を意味している。 $\overline{U_{12}}$ と $\overline{U_{23}}$ は、それぞれ、測点1と2、2と3の区間の流速であり、各区間における越波水の先端部の到達時間差から求めたものである。各区間の流量 $\overline{Q_{12}}$ と $\overline{Q_{23}}$ は、水位と流速の積としてそれぞれ、 $\overline{\eta_{12}} \overline{U_{12}}$ および $\overline{\eta_{23}} \overline{U_{23}}$ として定義された量である。 η_1 、 η_2 、 η_3 は、波高の増加に対応して大きく増加するが、周期が異なってもほぼ同様の値を示していることは注目値する。

図-5は、防波堤上部における水位の測定結果をプロット

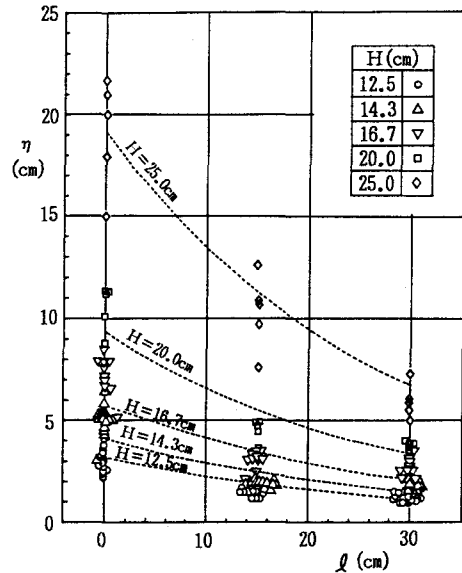


図-5 天端上の水位変化

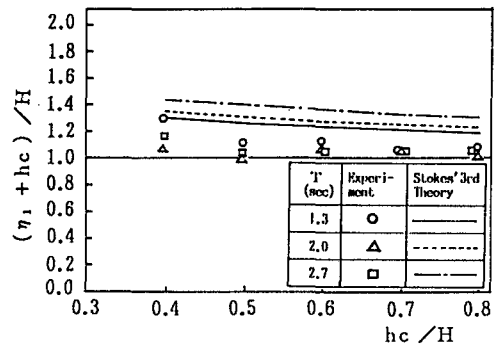


図-6 $(\eta_1 + h_c) / H$ と相対天端高の関係

表-2 水位の測定結果

CASE	T (S)	H (cm)	h (cm)	d (cm)	h _c (cm)	Water Level					Velocity		Discharge	
						η_1 (cm)	η_2 (cm)	η_3 (cm)	$\overline{\eta_{12}}$ (cm)	$\overline{\eta_{23}}$ (cm)	$\overline{U_{12}}$ (cm/s)	$\overline{U_{23}}$ (cm/s)	$\overline{Q_{12}}$ (cm ² /s)	$\overline{Q_{23}}$ (cm ² /s)
1-1	1.3	12.5	50.0	41.0	10.0	3.7	1.6	1.1	2.6	1.4	60.0	89.7	155	126
1-2		14.3				5.0	1.8	1.5	3.4	1.7	63.1	106.4	239	199
1-3		16.7				8.8	2.6	2.2	5.7	2.4	61.6	165.0	353	443
1-4		20.0				13.7	4.1	2.9	8.9	3.5	59.2	300.0	526	880
1-5		25.0				22.4	12.3	6.5	17.4	9.4	60.1	221.4	1,095	1,769
2-1	2.0	12.5	50.0	41.0	10.0	2.9	1.5	1.1	2.2	1.3	54.1	87.7	122	115
2-2		14.3				5.1	2.0	1.8	3.6	1.9	61.0	102.8	218	194
2-3		16.7				7.8	3.2	2.6	5.2	3.0	65.8	119.5	345	343
2-4		20.0				9.7	4.4	3.5	7.1	4.0	67.0	134.1	478	535
2-5		25.0				16.7	8.6	5.4	12.7	7.0	67.1	189.8	859	1,319
3-1	2.7	12.5	50.0	41.0	10.0	3.2	1.5	1.3	2.3	1.4	52.9	84.3	125	118
3-2		14.3				4.8	1.8	1.7	3.3	1.8	57.9	98.6	192	174
3-3		16.7				7.2	2.6	2.8	4.9	2.7	60.6	120.4	302	325
3-4		20.0				10.5	4.5	3.7	7.5	4.1	64.7	141.8	488	586
3-5		25.0				19.3	10.3	5.9	14.8	8.1	68.2	181.8	1,001	1,484

トしたものであり、横軸に前面からの水平距離 ℓ (cm)をとり、実験波高 H (cm)毎に整理したものである。水位 η は ℓ の増加と共に指数関数的に減少している状況が分る。

実値値を最小自乗法により整理すると式(1)のように表わされる。

$$\eta = 0.533 \exp(0.143H - 0.0325\ell) \quad \dots\dots\dots (1)$$

なお、表-2からも分るように、周期 T による差は顕著でなかった。

図-6は、防波堤先端部における静水面からの波峰高($\eta_1 + h_c$)を入射波高 H で無次元化した値を縦軸にとり、無次元先端高 h_c/H に対してプロットしたものである。 $T=1.3$ 秒と比較的周期が短く、 $h_c/H=0.4$ と比較的波高が大きいケースでは(ケース1-5)、縦軸の値は1.3程度と比較的大きいが、それ以外のケースでは1.1程度の一様な値になっている。図中には、完全重複波と仮定したときのStokesの3次理論から求まる縦軸の値をあわせて実線、破線、一点鎖線で示している。すべての実験値の縦軸の値は、1.0とStokesの3次理論との中間の値を示している。このことは、防波堤上の水位の最大値は、重複波として仮定して求まる値から推定できることを意味している。Stokesの3次理論よりも縦軸の値が若干小さくなっているのは、越波によって反射率が1.0よりも小さくなっているためであろう。ただし、ここで示される最大水位とは容量式波高計によって検出された値なので、飛翔した水塊に関しては十分に評価されていないと考えられる。

一方、表-2から $\overline{U_{12}}$ の値を見ると、各周期に共通して波高の増加に対応して若干の増加傾向が読み取られるものの、その増加量は10~20%にとどまっている。また、周期のちがいによる影響は顕著にはあらわれていない。

$\overline{U_{23}}$ は、 $\overline{U_{12}}$ にくらべて波高の増大に対応して、増加量が大きくなっているが、やはり、周期のちがいによる影響は顕著ではない。

3.2 直柱に働く水平波力

表-3は、水平波力の測定結果を示したものである。直柱模型は防波堤上の端部から2cmの位置に設置したため、ここで測定された水位 η の値は、表-2に示す防波堤先端部の η_1 よりも、若干小さい値となっている。表中の F_H は、1本の直柱に働く総波力の最大値であり、やはり、有効測定波5波の平均値をとったものである。 f_H は投影面に対する単位面積当りの波力であり、 F_H を直柱の径 ϕ (角柱の場合は一辺の長さ a)とその積で除した値である。

すべての周期に対して、 F_H は、波高の増大に対応して増大している。しかし、 f_H と H との関係は周期によって異なっており、 $T=2.0$ 秒と2.7秒の場合にはやはり H とともに増加する傾向を示すが、 $T=1.3$ 秒の場合には逆に減少している。これは図-6に対応しており、 $T=1.3$ 秒の場合には、波高の増大とともに前面における水位 η が顕著に大きくなるためである。

表-3 直柱に作用する水平波力(分力計による測定)

T (sec)	H (cm)	h (cm)	d (cm)	h _c (cm)	Column	ϕ (mm)	η (cm)	F_H (gf)	f_H (gf/cm ²)
1.3	16.7	50.0	41.0	10.0	Circle	10.0	6.7	20.2	3.02
	20.0						12.9	27.0	2.09
	25.0						18.2	35.9	1.97
2.0	16.7						6.1	15.3	2.51
	20.0						8.3	24.4	2.94
	25.0						16.3	49.9	3.06
2.7	16.7						6.3	16.2	2.57
	20.0						10.0	34.2	3.42
	25.0						16.4	59.2	3.61
1.3	16.7	"	"	"	Circle	15.0	6.6	27.8	2.81
	20.0						11.5	36.2	2.10
	25.0						19.7	56.1	1.90
2.0	16.7						5.5	19.2	2.33
	20.0						8.8	35.8	2.71
	25.0						15.4	73.2	3.17
2.7	16.7						6.1	25.3	2.77
	20.0						9.8	52.2	3.55
	25.0						15.5	85.6	3.68
1.3	16.7	"	"	"	Circle	20.0	7.6	50.5	3.32
	20.0						11.4	49.0	2.15
	25.0						20.9	84.0	2.01
2.0	16.7						6.0	29.9	2.49
	20.0						8.6	47.3	2.75
	25.0						16.7	108.9	3.26
2.7	16.7						6.1	31.5	2.58
	20.0						9.7	64.8	3.34
	25.0						14.8	125.2	4.23
1.3	16.7	"	"	"	Square	15.0	8.5	48.1	3.77
	20.0						10.9	60.7	3.71
	25.0						20.0	77.1	2.57
2.0	16.7						6.0	29.8	3.31
	20.0						8.6	47.5	3.68
	25.0						15.9	117.1	4.91
2.7	16.7						6.3	32.1	3.40
	20.0						10.3	67.8	4.39
	25.0						17.4	166.5	6.38

4. 考察

水中の部材に働く波力は、通常Morison式⁵⁾で表わされ、これは抗力と質量力の和として表現されている。今回の実験は抗力が支配的な領域となるので、直柱に働く波力は次式で示される。

$$F_H = \frac{1}{2} C_D \rho A U^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 F_H は抗力(dyn)、 C_D は抗力係数、 ρ は水の単位体積質量(g/cm^3)、 A は流れの方向に対する投影面積(cm^2)、 U は流速(cm/s)である。

図-7は、横軸に表-2から求まる $\rho \bar{U}_{12}^2/2$ を、縦軸に表-3から求まる f_H を示し、式(2)における C_D の値を検討したものである。○は円柱に対する実験結果を示し、□は角柱に対する実験結果を示している。

図中には、 $C_D=1.2$ および 2.0 の直線を併せて示しているが、これらの値はレイノルズ数が $10^3 \sim 10^4$ に対応する定常流に対する C_D の値である。実験値と図中の直線とは比較的良く対応しており、式(2)における C_D の値としては、定常流に対する値を用いても大きな差を生じないことを示している。

図-8(a)および(b)は、それぞれ、 $\phi=15\text{mm}$ の円柱および $a=15\text{mm}$ の角柱に対して、実測水平波力から式(2)を用いて逆算した流速と、 η_1 と η_2 の同時記録から得られた表-2に示す流速とを比較したものである。ここに、 C_D の値としては、図-7に示したように、円柱に対しては 1.2 、角柱に対しては 2.0 と仮定した⁵⁾

図-8(a)、(b)に共通して、換算値と実測値はきわめてよい一致を示しており、直柱に働く水平波力は、防波堤上を越波する水塊の水位と流速がわかれば、十分な精度で算定できることを意味している。

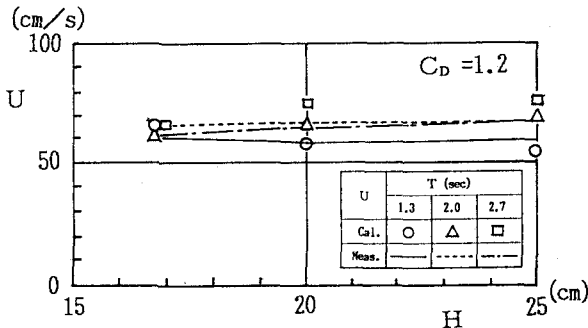
図-9は、表-2に示した $\bar{Q}_{12}$ と $\bar{Q}_{23}$ を比較したものである。周期が比較的短く($T=1.3$ 秒)、波高の大きいケースでは波のうちあげ現象が見られるため、 $\bar{Q}_{23}$ の方が $\bar{Q}_{12}$ よりみかけ上かなり大きい値を示しているが(ケース1-4および1-5)、他のケースでは両者の値はほぼ一致している。このことは、表-2で示した流速 $\bar{U}_{12}$ および $\bar{U}_{23}$ の推定方法がおおむね妥当であったことを間接的に証明しているものである。

図-10は、横軸に η_1 を用いてセキの流量公式

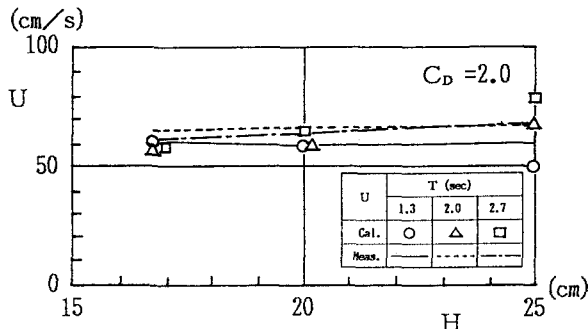
$$Q = 0.43 \sqrt{2g} \eta^{3/2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

をもとに推定された超波流量¹⁾を示し、縦軸に図-9に示した $\bar{Q}_{12}$ 、 $\bar{Q}_{23}$ を示したものである。

$\bar{Q}_{23}$ は横軸と極めて良い一致を示している。しかし、超波



(a) Circle $\phi=15\text{mm}$



(b) Square $a=15\text{mm}$

図-8 波力による換算流速と実測流速の比較

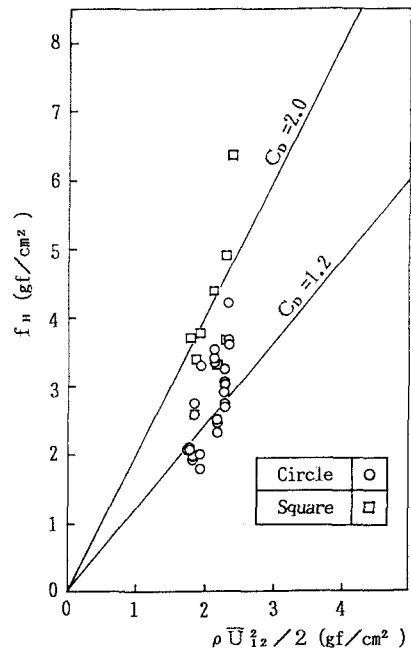


図-7 f_H と $\rho U^2 / 2$ の関係

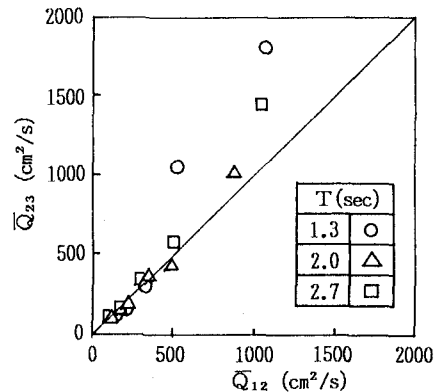


図-9 天端上の流量の比較

流量の多いところでは $\overline{Q_{12}}$ は図-9に対応して横軸よりも小さい値となっている。このことは $\overline{Q_{23}}$ の値の妥当性を検証しているのと同時に、流量の多いところでは $\overline{Q_{12}}$ の値も過小評価していることを示している。

この原因としては $\overline{Q_{12}}$ は $\overline{\eta_{12}}$ と $\overline{U_{12}}$ の積であることから、以下のようなことが考えられるが、今後一層の検討が必要であらう。

- a) 2点間の平均水位の算定に伴う問題(超波流量の大きいケースでは $\overline{\eta_1}$ と $\overline{\eta_2}$ の値は大きく異なっている)
- b) $\overline{U_{12}}$ の算定に伴う問題(防波堤前面で飛翔する水塊の影響)

直柱に働く支点曲げモーメントMは、式(4)によって算定される。

$$M = e F_H \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、eは波力の作用高さであり、eの値は、水位 η に比例するものと考えることができる。この関係と、式(4)とをあわせて考えると、式(5)が成立することになる。

$$M \propto F_H \eta \propto (\eta U)^2 \propto Q^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

すなわち、支点に対する曲げモーメントは、防波堤上を越流する水の流量によって決まるため、流量の連続性が保たれるのであれば、防波堤上部のどの位置でも一定の値を示すこととなる。

なお、類似の研究として、合田らによる岩礁上の円柱の設計波力に関する研究がある³⁾

この研究では、設計波圧(P_D)は式(6)の形で与えられるとされている。

$$P_D = \alpha \omega_0 H_{max} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 α ；波圧係数であり、平均値に標準偏差の1倍値を加えた程度とし、 $\alpha = 0.5$ と提案されている。今回の実験で得られた波力を式(6)の形でまとめると、 $\alpha = 0.1 \sim 0.2$ 程度となり、合田による岩礁上の円柱の設計波力に比べてかなり小さい。これは合田らによる研究は進行波中の円柱に関して行われたものであるのに対して、今回の実験は重複波領域において越流した水塊によるものであることによると思われる。碎波領域における波力は今回の実験結果よりかなり大きいものとなる可能性があるため、今後更に検討を要する。

5. おわりに

以上、防波堤上の直柱に作用する水平波力は、越流水の水位と流速が分かれば、適切な抗力係数を設定することにより算定出来ることを示した。また、天端上の越流水に対しては、流量の連続性が成立するようであり、セキの流量公式による流量と水位から直柱に働く水平波力が算定できる可能性を示した。今後の課題として、実験の範囲を重複波領域から碎波領域まで含めること、また、防波堤形状として直立堤の他、特に直立消波タイプについての検討、更に、マウンド形状、海底勾配等の影響について検討する必要がある。

最後に、運輸省港湾技術研究所水工部の高山知司波浪研究室長および運輸省第二港湾建設局の森好生前横浜調査設計事務所長(現京浜港工事事務所長)には、本研究の計画段階からとりまとめに至るまで、終始、御指導をいただき、また、横浜調査設計事務所調査課の横山健次前水工係長(現東京空港工事事務所工事専門官)、利光久信技官、阿部弥四男監督技術員には、実験の実施にあたって多大な御協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 合田良実：防波護岸の越波流量に関する研究，港湾技術研究所報告，Vol. 9, No. 4, PP. 3~41, 1970.
- 2) Goda, Y.: Wave Forces on a Vertical Circular Cylinder. Experiments and Proposed Method of Wave Force Computation; Report of Port and Harbour Tech. Res. Inst., No. 8, 1964.
- 3) 合田良実・池田龍彦・笹田正・岸良安治：岩礁上の円柱の設計波力に関する研究，港湾技術研究所報告 Vol. 11, No. 4, PP. 47~81, 1972.
- 4) 高山知司・神山豊：実験水路における波の伝播について，第23回海岸工学論文集，土木学会，PP. 381~385, 1976.
- 5) 土木学会：水理公式集，PP. 87~88, 1985.

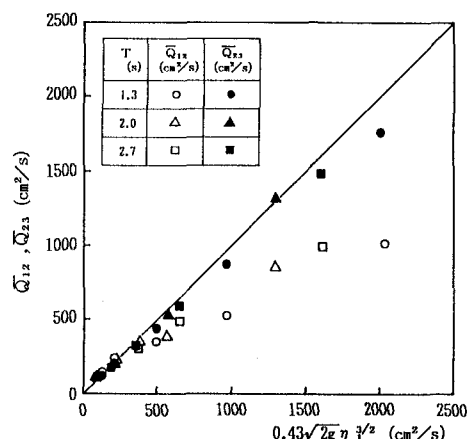


図-10 セキの流量公式から推定される流量と実験値との比較