

重複波堤前面に消波工を設置した場合の波力

赤塚 雄三*・竹田 英章**・蓮見 隆***

1. 消波工の必要性と実験の目的

本来、防波堤は港内を静穏に保つために設けられる港湾構造物であり、既設の防波堤は波浪に対する遮蔽効果を念頭において設計されたものが大部分である。しかしながら、近年、防波堤の配置によっては、生ずるところの反射波による港口部の擾乱とか、防波堤外側における養殖漁業の操業におよぼす悪影響が問題となって、反射波を軽減することを目的として、防波堤港外側前面に消波工の設置を求められる事例が次第に増加している。この傾向は重複波堤として設計された防波堤についても同様である。しかしながら、重複波堤前面に消波工としての異型ブロックを設置する場合、これが砕波の誘因となって、防波堤堤体に作用する波力が増大し、堤体の拡幅が必要となることが懸念される。

すなわち、重複波としての波力は、サンフルー公式によって求めた場合、伊藤らによれば、その値は平均的に式(1)で表わされるといわれている。

$$P=0.8\sim 1.0 W_0 H \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 P : 波圧強度、 W_0 : 水の単位体積重量、 H : 波高

一方、防波堤の前面に消波工を設置した場合の平均波圧強度は、 $P=1.0 W_0 H$ で求められ、重複波としての波力より多少、上まわる値となっている。この場合の波圧

は、砕波する波を堤前で砕くことにより、波力を減ずる目的で消波工を設けた場合のものである。多少異なった性質のものであるかもしれないが、重複波堤の前面に反射波を軽減するために異型ブロックを設置すれば、在来の設計手法による限りでは、波力が増大する結果、既設の堤体断面では不安定となり、堤体の拡幅を余儀なくされる事例も出てくる。

しかし、消波工を設置する上に、既設の堤体を拡幅することは、多額の経費を要するだけでなく、港内側の航路とか、泊地の配置によっては拡幅が物理的に困難な場合も少なくない。また、反射波を軽減する形式の重複波堤を新たに設計する場合についても、同様のことがいえる。そこで、本実験では重複波堤としての堤体前面に作用する波力と堤体前面に消波工を設置した場合の波力を測定し、両者を比較することにより、重複波堤前面に反射波を軽減するために消波工を設置した場合の設計法に関する基礎的な資料を提出することを目的として実施したものである。

2. 堤体滑動抵抗力の測定方法

(1) 実験施設

実験に使用した水路は、図-1 に示すようなフラップ式造波装置を有する造波水路である。この造波水路の諸元は、長さ 30 m、幅 0.5 m、深さ 1.5 m で、水路内の最大発生波高は 40 cm、発生波の周期は 1.0 sec~4.0 sec

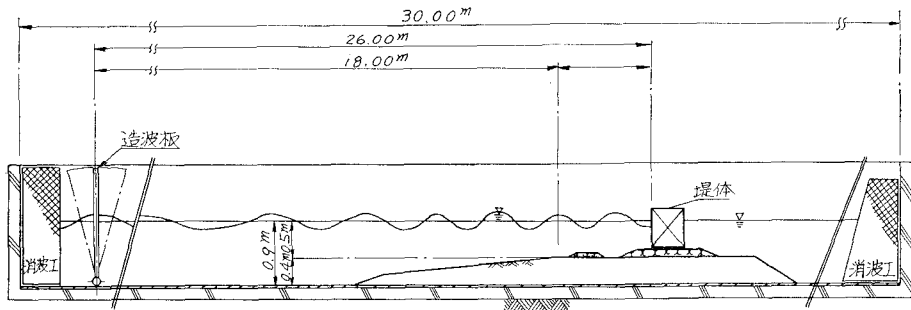


図-1 実験水路

* 正会員 工博 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所長
 ** 正会員 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所次長
 *** 運輸省第二港湾建設局工務課補佐官

表—1 実験波の諸元

	原 型	模 型
周 期	8 sec	1.46 sec
	10	1.83
	12	2.19
波 高	4 m	13.3 cm
	5	16.7
	6	20.0

である。波高計としては、容量式波高計を用いた。

(2) 模型縮尺および実験諸元

模型縮尺は、鉛直・水平ともに1/30とし、それぞれ、フルードの相似則に従うものとして実験結果を整理した。実験水位は±0.0mとし、実験波として表—1に示すような波高および周期を用いて行った。

(3) 模型断面

模型の断面は 図—2 に示すように、水深—50cm (原型—15.0m) (注：以下カッコ内は原型寸法) の海底面上に、10cm (3.0m) 厚の直径 3~5cm の石を並べたマウンドを設置し、その上に幅 50cm (15.0m)、高さ 60cm (18.0m) の堤体を設置した。堤体はモルタル製の中空箱で、中に鉛の重りを入れて重量を変化させることが出来る水密性の箱 (高さ 60cm×幅 50cm×長さ 38cm) である。この堤体の前面に原型で 16 トンの異型ブロックを堤体の天端高+20cm (+6.0m) と同一の高さまで積み上げ、天端幅 14.4cm (4.3m) を確保し、のり勾配を 1:1.33 で海底にすりつけた断面とした。

(4) 実験方法

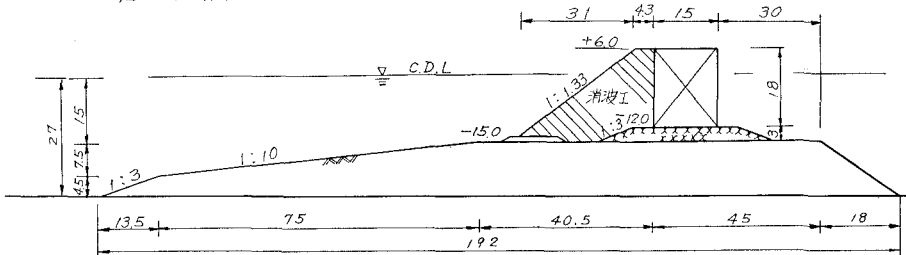
波力の測定方法としては、伊藤らの提案による式(2)を用い、堤体の重量を連続的に変化させ、ある波力を受けた場合、堤体が滑動しはじめる限界の重量を求め、あらかじめ測定済みの堤体底面とマウンド石面との静止摩擦係数 μ を用いて堤体に作用する波力を算定した。

$$P = \mu(W - U) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 P : 波力、 μ : 摩擦係数、 W : 堤体重量、 U : 浮力または揚圧力

摩擦係数は水中に設置したばねばかりで堤体の底部を

模型縮尺 1:30
現地寸法、単位: m



図—2 模型断面

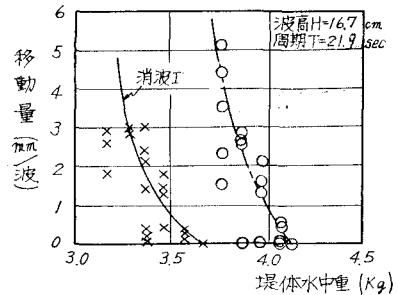
引張り、50回の平均値から求めた。その結果は $\mu=0.62$ で、その標準偏差は 0.020 であった。港湾構造物の設計には、従来よりコンクリートと捨石の摩擦係数として、 $\mu=0.60$ を用いているが実験値はこれとよく一致しているので、実験の整理に用いる摩擦係数としては実験値の 0.62 を用いた。

波力の測定に用いた実験対象波は、本実験装置と実験波の諸元によって求めた有効測定時間および波形記録から波の最も安定する第7波から第11波の5波を実験対象波とした。

堤体の滑動現象は目測で判定した。すなわち、水路に基準点を設け、堤体には 1mm 刻みの物指を張りつけて、実験波 5波に対して 2.5mm 以上の移動 (=0.5mm/波) をもって滑動と判定した。その上、同一重量で3回実験を繰返して滑動限界重量を確認した。堤体の滑動限界値は、相当のばらつきが予想されたので、予測した波力に比し、極端に重い重量から測定を始め、順次軽量化し滑動の開始した堤体重量からさらに数 cm の堤体移動の認められた堤体重量までの、それぞれについて連続的に測定し、たとえば、 図—3 のように堤体の移動量と重量の関係を図上にプロットして堤体の滑動限界重量を求めた。

3. 重複波堤に作用する波力

重複波堤に作用する波力の実験結果を表—2に示す。



図—3 堤体滑動限界の判定に用いた堤体重量と移動量との関係 (○消波工なし、×消波工あり)

同表には、伊藤式(3)および合田式²⁾(4)を用いて求めた波力と、それぞれの静水面上での波圧強度、および平均波圧係数を示した。

$$P = Pl = \mu \left(W - P \frac{B}{2} \right) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、B: 堤体幅、本実験では B=50cm

$$P = \mu(W - U) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

$$U = 1/2 P_u B$$

$$P_u = \alpha_1 \alpha_3 W_0 H$$

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right]^2$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left[1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \right]$$

h': 防波堤直立部底面から静水面までの高さ

h: 防波堤の設置水深

L: 波長

表-2 によれば、合田式より求めた平均波圧係数は、伊藤式によるものよりやや大きめであるが、その範囲はどちらも 0.4~0.7 の範囲となっている。

4. 重複波堤に消波工を設置した場合の波力

重複波堤前面に消波工を設けた場合の堤体に作用する波力は、表-3 に示すとおりである。同表には前節にお

けると同様に伊藤式と合田式を用いて求めた波力、波圧強度および平均波圧係数を示した。これによると伊藤式をもとにして求めた平均波圧係数は 0.34~0.52 の範囲にあり、合田式をもとにして求めた平均波圧係数 0.30~0.57 とほぼ同様で、0.3~0.6 の範囲にある。

5. 重複波領域における波力減殺効果

表-4 は、重複波堤に作用する波力と重複波堤に消波工を設けた場合の波力との比を波高と周期ごとに対比して整理したもので、さらに、波力比と波形勾配との関係を示したものが 図-4 である。これによると、重複波堤においても消波工を設置した場合の波力は、設置しない場合に比して、8~26% 減少している。また消波工の

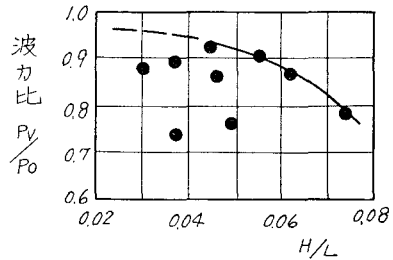


図-4 消波工の有無による波力比と波形勾配
P₀: 消波工ある場合の波力、P₀: 消波工ない場合の波力

表-2 重複波堤に作用する波力

実験 番号	波 浪				堤体水中重量		波 力 P		波 圧 強 度		平均波圧係数	
	波 高 H		周 期 T		W (kg)	W' (g/cm)	伊藤式 (g/cm)	合田式 (g/cm)	伊藤式 P (g/cm ²)	合田式 P ₁ (g/cm ²)	伊藤式 P/W ₀ H	合田式 P/W ₀ H
	原型 (m)	模型 (cm)	原型 (sec)	模型 (sec)								
1	4.0	13.3	8.0	1.46	30.2	794	387	396	6.83	7.69	0.51	0.52
2	4.0	13.3	10.0	1.83	36.6	963	469	525	8.28	11.48	0.62	0.70
3	4.0	13.3	12.0	2.19	34.6	911	443	499	7.83	11.33	0.59	0.66
4	5.0	16.7	8.0	1.46	37.7	992	489	493	8.15	9.22	0.49	0.49
5	5.0	16.7	10.0	1.83	43.7	1150	566	602	9.44	13.03	0.57	0.62
6	5.0	16.7	12.0	2.19	41.1	1082	533	588	8.88	12.78	0.69	0.59
7	6.0	20.0	8.0	1.46	39.7	1045	515	502	8.58	9.21	0.43	0.42
8	6.0	20.0	10.0	1.83	48.0	1263	622	675	10.37	13.84	0.52	0.56
9	6.0	20.0	12.0	2.19	49.7	1308	644	712	10.74	15.14	0.54	0.59

表-3 重複波堤に消波工を設置した場合の波力

実験 番号	波 浪				堤体水中重量		波 力 P		波 圧 強 度		平均波圧係数	
	波 高 H		周 期 T		W (kg)	W' (g/cm)	伊藤式 (g/cm)	合田式 (g/cm)	伊藤式 P (g/cm ²)	合田式 P ₁ (g/cm ²)	伊藤式 P/W ₀ H	合田式 P/W ₀ H
	原型 (m)	模型 (cm)	原型 (sec)	模型 (sec)								
1	4.0	13.3	8.0	1.46	22.9	603	293	277	5.18	5.37	0.39	0.37
2	4.0	13.3	10.0	1.83	26.9	708	345	367	6.09	8.02	0.46	0.49
3	4.0	13.3	12.0	2.19	30.3	797	388	424	6.86	9.74	0.52	0.57
4	5.0	16.7	8.0	1.46	32.7	861	424	412	7.07	7.70	0.42	0.41
5	5.0	16.7	10.0	1.83	37.6	989	488	523	8.13	10.95	0.49	0.52
6	5.0	16.7	12.0	2.19	36.6	963	475	514	7.91	11.18	0.47	0.51
7	6.0	20.0	8.0	1.46	31.2	821	404	363	6.74	8.67	0.34	0.30
8	6.0	20.0	10.0	1.83	43.4	1142	563	600	9.83	12.30	0.47	0.50
9	6.0	20.0	12.0	2.19	45.6	1200	591	645	9.85	13.72	0.49	0.54

有無による波力の差は、波形勾配が小さくなるにしたがい、すなわち波高が同一であれば周期が長いほど、減少する傾向が認められる。

表一4 消波工の有無による波力比

実験 番号	波 浪		消波工有無の波力		波 力 比 P_0/P_0	水深波高比 d/H
	波高(m)	周期(sec)	P_0 : なし (g/cm)	P_0 : あり (g/cm)		
1	4.0	8.0	387	293	0.76	3.0
2	4.0	10.0	469	345	0.74	3.0
3	4.0	12.0	443	388	0.88	3.0
4	5.0	8.0	489	424	0.87	2.4
5	5.0	10.0	566	488	0.86	2.4
6	5.0	12.0	533	475	0.89	2.4
7	6.0	8.0	515	404	0.79	2.0
8	6.0	10.0	622	563	0.90	2.0
9	6.0	12.0	644	591	0.92	2.0

図一5 は、波力係数と水深・波高比 d/H の関係について、著者らの実験結果を伊藤¹⁾、堀川ら³⁾の実験結果および 48 年度に当事務所において行った実験結果とあわせて示したものである。これによると、 $d/H=0\sim 2.0$ 、すなわち、砕波領域では P/W_0H はおおよそ $0.6\sim 1.3$ の範囲にあるが、重複波領域では、 $0.4\sim 0.7$ 付近に分布して砕波領域とも比較的良好な連続性を示す。また、 d/H が負になる領域、すなわち、マウンドあるいは、消波工の天端が静水面上にある場合、その天端高が来襲波高と同一高さ以上であれば、波力係数は 0.5 以下で相当の消波効果が得られ、重複波堤として在来の設計方法によって設計しても危険はない。しかし、消波工や捨石マウンドの天端が来襲波高の $1/2$ 以下あるいは静水面付近にある場合には、これが砕波の誘因となり、波力係数 P/W_0H は 0.7 をはるかに越えて 1.0 以上となり、設計で考慮した以上の波力が作用する可能性を示している。この点は、設計だけでなく施工にさいしても、十分に注意すべきことであろう。

6. 結 論

本調査は重複波堤の前面に、反射波を軽減する目的で消波工を設置した場合に、堤体に作用する波力を実験的に検討し、その設計法に関する基礎資料を提出することを目的として実施したもので、本実験の範囲内で次のことがい得と思われる。

- (1) 重複波堤前面に消波工を設置することにより、堤体に作用する波力は、消波工を設置しない重複波堤に作用する波力より、おおよそ $10\%\sim 20\%$ 減少する。
- (2) 重複波堤に作用する平均波圧強度は、 $0.4\sim 0.7 W_0H$ であるのに対して、消波工を設けた場合の平均波圧強度は、 $0.3\sim 0.6 W_0H$ 程度である。

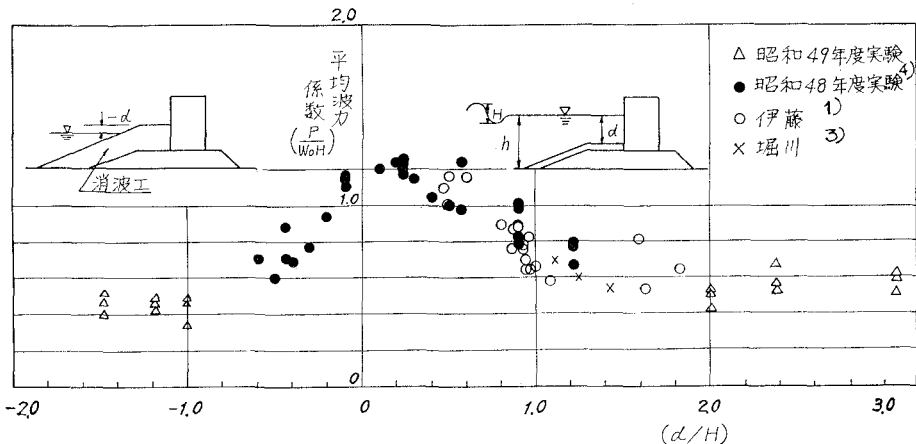
(3) 消波工の有無による波力の差は、波形勾配によって変化し、波形勾配が小さくなるにしたがって両者の差は減少する傾向を示している。

(4) 本実験結果とともに、伊藤、堀川らの実験結果を整理して、水深・波高比と平均波圧係数の関係を求めると重複波領域から砕波領域まで比較的良好な連続性を示す。また重複波堤前面の消波効果が消波工の設置高さによって著しく変化しており、波力の減少効果を期待するためには、消波工の高さを $0.6H$ 以上にすべきことが確かめられた。

7. あとがき

限られた条件の下ではあったが、重複波堤前面に反射波を軽減する目的で異型ブロックを設置する場合の波力について実験的に検討した。その結果、異型ブロックを堤体と同程度の高さまで積み上げた場合についての波力は、減少していることが判明し、在来の手法により重複波堤として設計しても安全側にあることがわかった。

今後は現地観測や施工例を通じて確認する予定である。また、同様の機能をもつ直立消波工を有する単塊構



図一5 平均波力係数と水深波高比の関係

造の重複波堤に対する適用性についても、今後検討する必要がある。

最後に本実験を行うにあたり、種々の助言をいただいた港湾技術研究所、波浪研究室の合田室長ならびに、同防波堤研究室の谷本室長に深く感謝します。なお、水路実験は日本港湾コンサルタントに委託して行った。

引用文献

1) 伊藤喜行・藤島 睦・北谷高雄：防波堤の安定性

に関する研究，港湾技術研究所報告，第5巻41号，1966年。

2) 合田良実：防波堤の設計波圧に関する研究，港湾技術研究所報告，第12巻3号，1973年。

3) 堀川清司・小沢保臣・高橋邦夫：高基混成堤直立部の期待滑動量について，第19回海岸工学講演会論文集，1972年。

4) 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所：（横調資料第127号），（小名浜港二次元断面実験報告書），昭和49年3月。