

ブロック式直立消波構造の水理特性

竹田 英章*・赤塚 雄三**・河口 隆明***

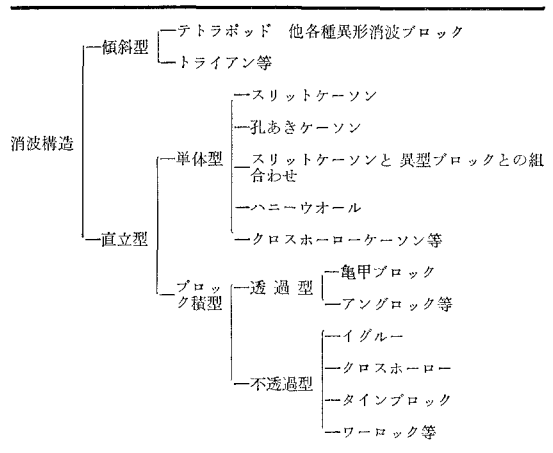
1. 直立消波機能を備えた構造物の要請

港内の自然浜や船揚場の斜路が、静穏度の保持に重要な役割を果たしていることは古くより認識されていた。しかし、近年経済の急成長時代における係船岸の早急な整備、拡張の結果として、港内の自然浜や斜路が消失し、水際線のほとんどが直立構造物で築造されるようになった。それに伴って、港口からの侵入波とか港内発生波の多重反射現象や副振動への対策が緊急課題になった。このような情勢を背景として、消波機能を備えた構造物は護岸の越波防止および反射波の軽減、ならびに係船岸の船舶接岸性向上の要請に応じて開発されたものである。更に最近は、護岸や係船岸に限らずその波力減殺効果や経済性と相まって波除堤にも採用される等、著者らの所属する運輸省第二港湾建設局管内とか隣接する地域においても施工例が多くなっている。例えば、港内の反射波軽減と越波減少を目的とした静岡県沼津港の消波岸壁のイグルーや、茨城県鹿島港の亀甲ブロック、福島県小名浜港消波護岸のクロスホロー、係船岸の船舶接岸性向上に用いた茨城県大洗港-5m 岸壁のワーロック、波除堤として用いた、宮古港藤原地区や横須賀新港地区のワーロック等がある。また、上述の各種の機能を全面的に採用した例としては、青森県浅虫港のヨットハーバーがある。直立消波構造物の経済性に関しては設計条件によっても相違するが、波除堤等の場合には傾斜堤に比較して有利な場合も少なくない。また、係船岸の場合には直立の重力式構造に比べても大差のない設計事例もあり、消波機能による港内静穏度の向上を考慮するとその優位性は否定し難いといえよう。

2. ブロック式直立消波構造に関する水理実験の必要性

消波機能を有する構造物は、表-1 のように傾斜型と直立型、ブロック積型と単体型、透過型と不透過型とに

表-1 消波構造の分類



分類できる。本報告では、係船岸とか波除堤に使用可能なブロック積型で、かつ直立不透過型のブロックを取りあげた。表-2 は各社のパンフレットによる直立消波構造物の設計方法であって、その設計法が重複波と碎波で異なるだけではなく、各ブロック別にも異なる方法が提案されている。各項目についてブロック4種の中の最大値と最小値の差を求めると、消波率10%、反射率10%、空隙率5%である。碎波の場合の波圧強度は $1.0 \sim 1.5 w_0 H$ 、遡上高は $0.7 \sim 1.0 H$ 、揚圧力は $1.0 \sim 1.2 w_0 H$ であり、さらに重複波の場合の波圧式、遡上高、揚圧力式は各ブロックごとに異なる。このように直立消波構造の一般的な設計法はいまだ各社提案の域を出ていないのが実情である。これは直立消波構造の水理特性が複雑なことがその一因を成していると思われるが、各社の消波構造物の水理特性を同一条件下で把握しようとする試みがなされなかったことにもよるものであろう。そこで共通の設計法の確立を目的とし、これらの直立消波構造物4種の水理特性について水路実験を実施した。実験は想定縮尺 $1/25$ とし、波形勾配 $H_0/L_0 = 0.016 \sim 0.086$ の範囲について反射率、前面水位（うちあげ高さ）、越波水塊の落下点および越波による伝達波高を測定して消波効果を求めた。また、堤体の挙動および破壊状況を観察

* 正会員 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所次長
** 正会員 工博 前運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所所長
*** 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所 建設専門官

表-2 各社の直立消波構造設計法

項目	イグルー		クロスホーロー		タインブロック		ワーロック	
	砕波	重複波	砕波	重複波	砕波	重複波	砕波	重複波
消波率	70%		60%		60%		70%	
反射率	20~47%		30~50%		31~52%		20~40%	
空隙率	53%		49%				47%	
波圧式	$P \approx 1.0w_0H$	サンフルー公式	$P = 1.0w_0H$	サンフルー公式 $\times 80\%$	$P = 1.5w_0H$	サンフルー公式	$P = 1.0w_0H$	$P = 0.7w_0H$
遡上高	—	—	水面上 1.0H	$(H+\delta) \times 80\%$	—	—	水面上 0.7H	水面上 0.6H
揚圧力	$1.2w_0H$ (長方形分布)	$0.8w_0H$ (長方形分布)	$P_u = 1.0w_0H$	サンフルー公式 $\times 80\%$	通常の防波堤に同じ	通常の防波堤に同じ	$P_u = 1.0w_0H$ (三角形荷重 最下端作用)	$P_u = 0.7w_0H$ (三角形荷重)
各層毎の安定計	堤体全体の計算に同じ	堤体全体の計算に同じ	水平波圧 $P = 1.0w_0H$ 浮力衝撃 $P = 1.0w_0H$ (三角形荷重)	堤体全体の安定計算に同じ	衝撃波圧 $P = 1.5w_0H$ を考慮し、他は通常の防波堤に同じ	通常の防波堤の計算に同じ	堤体全体の安定計算に同じ	堤体全体の安定計算に同じ

し、作用波力を逆算して堤体の安定性を求めた。なお、本実験では方塊を直に積み上げた直立壁堤、および前面を異形消波ブロックで被覆した方塊積堤、すなわち、異形ブロック被覆堤との比較検討を試みた。

3. 実験の方法

(1) 水槽、模型浜および測定方法

実験は図-1に示す長さ30m、高さ1.5m、幅1.0mの二次元水槽の中央を鋼板隔壁で二分割した一方のガラス面側で行った。造波機はフラップ型で、入射波、伝

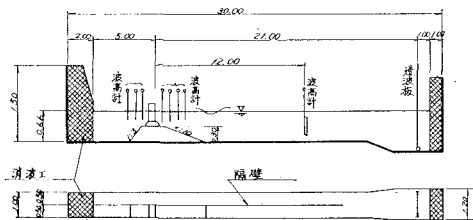


図-1 実験水槽 (単位: m)

達波、沖波波高の測定には容量式波高計を合計8台使用し、ビジュグラフに記録した。模型浜は、造波機から21mの地点に水路床から30cmの高さで天端幅1.77m、港外側1:10、港内側1:3ののり勾配で作成した。実験対象構造物は、この模型浜上に設置した。反射波の測定は、造波機からの再反射が入らない波とし、構造物前から1波長以内に生じる節と腹を4か所測定し、反射率はヒーリーの方法で算出した。遡上高さは、構造物前面に沿う垂直法線上を波が横切る高さとした。また、越波水塊の到達距離は、堤体を越波した連続流体の最も遠く落下した距離の平均値である。さらに、伝達波高は、堤体背後に3本の波高計を設置し、1本は越波水塊の落下点、2本目は堤体から1/2波長目、3本目は1波長目の位置に設置し、反射波測定の対象となった波が越波して発生させた波を測定した。

(2) 水深

実験水深は、水平床から66cmで、これは想定縮尺1/25として現地換算すると16.5mに相当する。

(3) 実験波の諸元

実験波の諸元を表-3に示す。周期は1.0secと2.2secの2種で、波高がおおのの周期について4種類、合計8種類の波について行った。模型浜の設置によって波高は周期が1.0secのとき1~8%、周期2.2secのとき14~25%大きくなりウィーゲルの数表から換算した値より大きくなった。本報告のデータ処理は、模型浜がある場合の通過波高 H を使用した。したがって、換算沖波波高は H を用いて計算した値である。

表-3 実験波の諸元

項目 番号	実 験 値			H/H'	$h=36\text{cm}$ の H を深海波 に換算(ウィーゲル)	H_0'/L_0
	周 期	通 過 波 高				
	T'	模型浜なし $h=66\text{cm}$ H'	模型浜あり $h=36\text{cm}$ H			
		cm	cm		cm	
1	1.0	5.0	5.40	1.08	5.0	0.032
2		10.0	10.45	1.05	9.7	0.062
3		12.5	12.60	1.01	11.7	0.075
4		15.0	14.50	0.97	13.4	0.086
5	2.2	10.0	11.42	1.14	11.8	0.016
6		15.0	17.90	1.19	18.4	0.024
7		17.5	21.85	1.25	22.5	0.030
8		20.0	25.03	1.25	25.8	0.034

(4) 模型

実験に用いた模型構造物は、直立壁堤(図-2)、直立消波構造物として、イグルー、クロスホーロー、タインブロック、ワーロックの4種類(図-3)、および異形ブロック被覆堤(図-4)の計6種類である。直立壁堤は-25.2cmのマウンド上に2列6段のブロックを積み上げ、ブロック天端には上部工を設置し天端高を+16.0

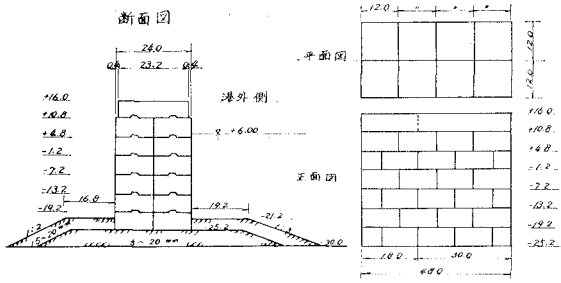


図-2 直立壁堤 (単位: cm)

cm とした。この天端高さは、他の構造物より 2 cm 高い。直立消波構造物は -16.4~20.2 cm のマウンド上に設置した床版上に 1 列 4 段のブロックを積上げ上部工を設置し、天端高 +14.0 cm とした。また、異形ブロック被覆堤は、-30 cm のマウンド上に 1 列 6 段の直方形ブロックを積上げ上部工を設置し、その天端を +14.0 cm に調整し、堤体前面に異形ブロックを天端幅 13.6 cm、天端高 +14.0 cm、のり勾配 1:4/3 で被覆したものである。この種の直立壁堤と異形ブロック被覆堤の水利特性は調べられている。既往の実験的研究によると越波しない状態での反射率は、直立壁堤では 80~100%，異形ブロック被覆堤では 20~40% である。また波力を $P=\alpha w_0 H$ として表わした場合の波圧係数 α は、直立壁堤については 1.4~1.5、異形ブロック被覆堤については 1.0 という値が求められている。

4. 消波効果

(1) 反射率

構造物前面から 1 波長以内に生じた重複波の節と腹 4 点の波高を連続的に測定し、ヒーリーの方法で反射率を計算した結果を図-5 に示す。反射率 K_R は水深波長比 h/L_0 と構造物をパラメーターとして、換算沖波波高 H'_0 と沖波波長 L_0 の比、すなわち波形勾配 H'_0/L_0 に対比して表わした。実験では、ほとんどのケースで越波し、 H'_0/L_0 が変わると越波量も異なる。したがって、これを連続現象と解するのは妥当ではなく、同一パラメーターを曲線で結ぶことは必ずしも意味のあることではない。しかし同一条件下の実験であることを前提に各構造物について見ると次のことがいえる。 $h/L_0=0.23$ の場合の K_R は、直立壁堤の 60~68% (平均 64%) に対し、直立消波構造は 10~51% (平均 30%)、異形ブロック被覆堤は 8~15% (平均 12%) とかなり小さい。越波がある状態を考慮しても、直立消波構造の K_R は直立壁堤の K_R の 0.2~0.8 倍 (平均 0.5 倍) とかなり小さな値になる。次に $h/L_0=0.047$ の場合の K_R は直立壁堤で 39~49% (平均 44%)、直立消波構造で 16~36% (平均 26%)、異形ブロック被覆堤で 25~35% (平均 30%) であって、全体として K_R が小さい。消波構造を備えた場合の K_R は直立壁堤のそれより 0.3~0.5 倍とかなり小さな値を示すが、直立消波構造と異形ブロック被覆堤の差はあまり認められない。本実験では越波量が

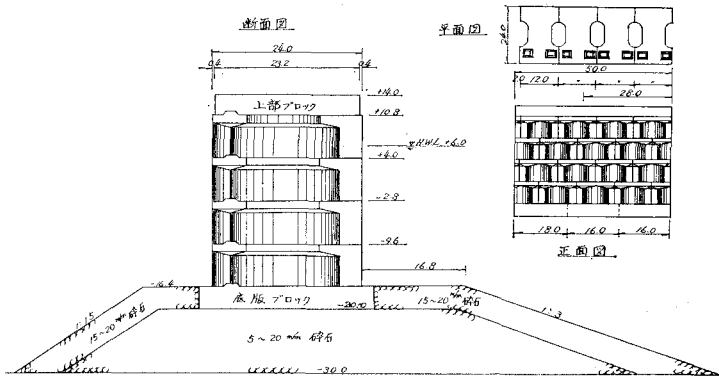


図-3 直立消波構造の一例(単位: cm)

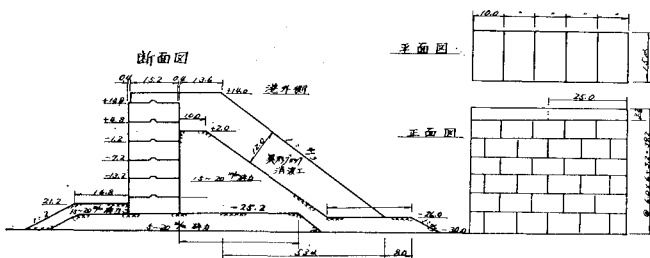


図-4 異形ブロック被覆堤 (単位: cm)

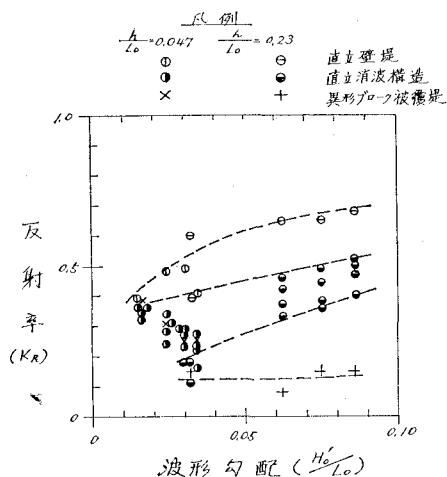


図-5 反射率

大きいため、 K_R は全ケース共 50% 以下であったが、このときでも直立消波構造の K_R は直立壁堤よりも小さい。反射率 K_R は一般に H_0'/L_0 の増加に伴って減少するとされているが、本実験では図-5に示すように H_0'/L_0 の増加に伴って K_R も若干増加する傾向が認められた。

(2) うち上げ高

堤体前面の波のうち上げ高さは、堤体天端高の決定に重要な役割を果たす。図-6に h/L_0 および構造物をパラメータとして、相対天端高 h_c/H_0' に対するうち上げ高さ R/H を示す。 $h/L_0=0.23$ の場合の R/H の平均値は直立壁堤が 1.2 (1.19~1.24) 直立消波構造が 1.0 (0.93~1.13) 異形ブロック被覆堤が 0.7 (0.62~0.77) である。この値は各社提案の設計法によって示された値の上限である。次に $h/L_0=0.047$ の場合、 R/H は直立壁堤が 1.0 (0.89~1.09)、直立消波構造が 1.0 (0.89~1.1)、異形ブロック被覆堤が 0.7 (0.6~0.7) である。この場合のうち上げ高さは直立壁堤と直立消波構造では、ほぼ同等の $1.0H$ に近く、これに対し、異形ブロック被覆堤は $0.7H$ であった。以上から R/H の平均的な値は波形勾配によらず直立消波構造で $1.0H$ 、異形ブロック被覆堤で $0.7H$ 程度であって、越波が少ない場合には、直立消波構造の R/H は直立壁堤に比べて 20% 程度小さい。一方、異形ブロック堤に比べると 20% 程度大きい。また、直立壁堤の R/H は h/L_0 および h_c/H_0' の増加に応じて増大する傾向が認められる。以上を要約すると直立消波構造の反射率、うち上げ高さともに直立壁堤より小さく、反射率で 50% 前後、うち上げ高さでも 20% 前後減少する。しかし、異形ブロック被覆堤に比べると、反射率、うち上げ高さともに大きい。したがって、その消波機能は直立壁堤と異形ブロック被覆堤の中間的な特性を持っている

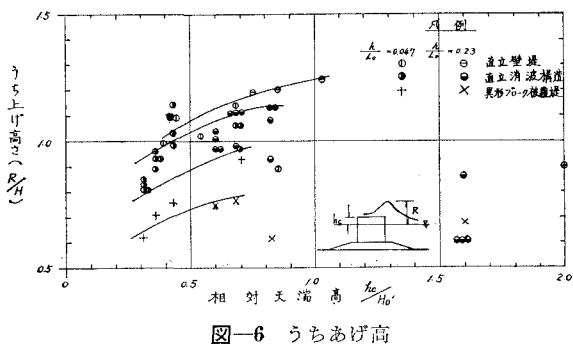


図-6 うちあげ高

といえよう。

5. 越波特性

(1) 越波水塊の到達距離

越波した水塊の堤背面から落下地点までの距離 S は、堤高と波高との比 h_c/H_0' で図-7のように表示することが可能である。同一の h_c/H_0' に対する S/h_c は直立壁堤の場合に最も大きく、直立消波構造と異形ブロック被覆堤とはほぼ同じ値である。直立壁堤の場合の S/h_c は h_c/H_0' の減少に伴って増加するが、直立消波構造の場合には $h_c/H_0'=0.5$ より小さい領域ではほぼ一定値をとる。換言すれば、波高が堤高の 2 倍を越えると、直立壁堤と直立消波構造とは、その越波特性に明瞭な差が認められ、後者の場合の越波水塊の到達距離は堤高のほぼ 2 倍になることが認められた。

(2) 波高伝達率

伝達波高は、堤体前面のうち上げ高さや越波量に影響される。図-8に相対天端高さ h_c/H_0' に対する波高伝達率 K_T を示す。 K_T 値は h_c/H_0' の増加に伴って減少する。減少の割合は $K_T/(h_c/H_0')=0.83$ で波高が堤高の 2 倍付近での波高伝達率は 20% 程度である。伝達率は直立壁堤の場合に最大で、異形ブロック被覆堤の場合最小であり、直立消波構造の場合には両者の中間の値を示す。

(3) 越波水塊の落下地点における発生波高

越波した波は、落下地点で最大となり港内に分散伝播

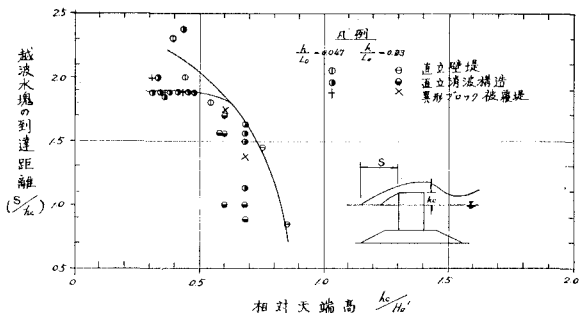


図-7 越波水塊の到達距離

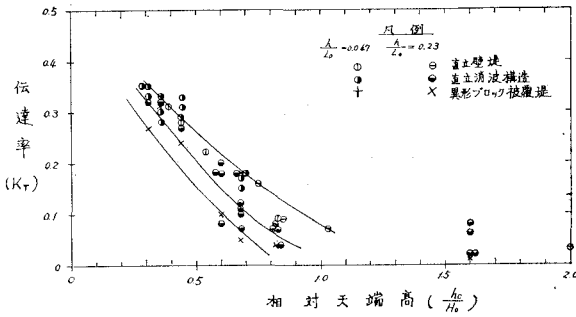


図-8 伝達率

する。落下地点での波高と伝達波高との比を表-4 に示す。これによると、落下地点の波高は構造様式の差に余り影響されず、伝達波高の 30~40% 大きな値を示している。

表-4 越波した水塊の落下する地点における波高

防波堤の種類	水塊落下地点の波高/伝達波高(注)
直立壁堤	1.33
直立消波構造 A	1.30
B	1.07
C	1.44
D	1.35
異形ブロック被覆堤	1.32

注) 堤背後から半波長および1波長の位置における計測波高の平均値をもって伝達波高とした。

6. 波浪エネルギーの損失

波が構造物に作用すると、構造物との摩擦、堤体前面での遡上、越波等によりエネルギーを失う。ここに堤体入射エネルギーを E_I 、反射エネルギーを E_R 、伝達エネルギーを E_T 、堤体で損失される見かけのエネルギーを E_L とすれば、

$$E_I = E_R + E_T + E_L \dots \dots \dots (1)$$

が成り立つ。いま伝達波が入射波と同じ特性を持つと仮定すれば、エネルギー損失率 E_f は、

$$E_f = 1 - (K_R)^2 + (K_T)^2 \dots \dots \dots (2)$$

で表わすことができる。 E_f の H_0'/L_0 に対する値を図-9 に示す。越波が少ない場合は、構造物の差が明瞭に現われ、直立壁堤の場合エネルギーの損失率が最も小さく 0.5~0.6 である。これに対し、直立消波構造では 0.7~0.9 の範囲にあって、エネルギーの損失がかなり大きい。異形ブロック被覆堤についてはさらに大きく、この値はほとんど 1.0 に近い。しかし、越波が大きくなると構造物の差が不明瞭になり、エネルギー損失率はほぼ 0.8~0.9 の範囲であった。

7. 堤体に作用する波力

(1) 堤体の安定性

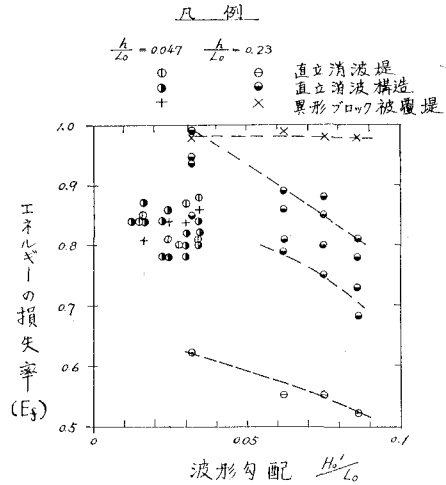


図-9 波浪エネルギーの損失

表-5 に実験結果を示す。周期 1.0 sec の場合、 $H \leq 12.6$ cm では全ケース安定であるが、 $H=14.5$ cm では 2 ケースを除き堤体が動揺する等、この付近に安定限界があることを示している。周期が 2.2 sec では $H=11.42$ cm で異形ブロック被覆堤がやや不安定になるが、他のケースは安定である。しかし、 $H=17.9$ cm では全ケースが不安定になり、直立壁堤の他は全て転倒または倒壊し、この付近に安定限界があることがわかる。ブロックの転倒および倒壊に至るパターンは全ケースとも類似しており、まずブロックがホゾの遊びだけ滑動し、ホゾがかみ合うと上部工がホゾからはずれ、次いで上段から下段に向かって次々とブロック相互のホゾが外れ倒壊に至る。波力が強いときはブロックが分離しないうちに転倒した。

(2) 上部工に作用する揚圧力

安定実験の結果から、上部工がホゾからはずれる時の波高を基に式 (3) を用いて等分布荷重としての揚圧力を求めた。

$$P = \alpha w_0 H \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 P は波力、 H は安定限界波高、 w_0 は水の単位体積重量、 α は波圧係数である。表-6 は上部工を空中重量として計算した α の値である。これによると、 α は 0.3~0.5 の範囲にある。各社の設計法に換算すると 0.54~0.9 で各社の 0.7~1.2 の値よりやや小さかった。今回の実験では直立壁堤の揚圧力値数は、直立消波構造とほぼ同じであった。本来、直立壁堤の上部工と下段のブロックの間にはほとんど空隙がなく、揚圧力は直立消波構造の場合より小さいはずのものである。これは、直立壁堤については床版ブロックを設けず、マウンド上に直に積上げたために波力の作用時にブロック両端のマウンドが沈下し、これに伴ってブロックのかみ合いが次第にゆるみ、空隙が生じたためと考えられる。この

表—5 堤体の安定実験結果

実 験 波		直 立 壁 堤	直 立 消 波 構 造				異形ブロック 被 覆 堤
周 期	波 高		A	B	C	D	
1.0 sec	12.60	堤体微動	安 定	安 定	安 定	安 定	安 定
	14.50	堤体動揺	堤体動揺	堤体動揺 (上部工が浮上るが ホゾからは外れない。)	安 定	やや不安定	安 定
2.2 sec	11.42	安 定	安 定	安 定	安 定	安 定	堤体動揺
	17.90	堤体動揺	堤体傾斜	堤体動揺 (上部工がホゾから 外れる。最下段ブ ロックが浮上る。)	転 倒	堤体分離破壊 (上部工がホゾから 外れる。最下段ブ ロックがホゾの上 に乘る。)	転 倒 (1 体となって転倒)
	21.85	堤体破壊 (最下段の前縁と後 縁がめり込む。上 部工が外れる。堤 体が前方と後方に 倒れる。)	傾斜による転倒	堤体分離破壊			
	25.03	転 倒 (上部工が持上る)					

表—6 平均波圧係数

項 目	ブロック名	波 圧 係 数		
		I	II	III
上部工に作用 する揚圧力	直 立 壁 堤		0.47	0.54
	B型ブロック	0.34	0.42	0.52
	D型ブロック	0.33	0.41	0.50
転倒時の作用 波 力	直 立 壁 堤		1.24	1.42
	異形ブロック被 覆 堤		0.79	
	A型ブロック		0.97	1.18
	C型ブロック		1.02	

注) I は大きい方の波高から求めた値
II は限界波高から求めた値
III は小さい方の波高から求めた値

ことは床版ブロックが堤体全体の安定性保持にきわめて重要なことを意味している。

(3) 転倒から求めた作用波力

表—6 の波力は静水時における堤体有効重量より求めた波圧係数である。直立消波構造の値はほぼ 1.0~1.2 で、各社提案の設計値とほぼ一致した。また、直立壁堤の値は 1.2~1.4 で直立消波構造物に作用する波力は、直立壁堤の 0.85 倍程度と考えて良いようである。

各ブロックの滑動が始まってから堤体全体が破壊または転倒するまでの間に大きな耐波力の差が観察結果から認められた。すなわち堤体を構成する各ブロックが動き始め、ホゾの遊びだけ滑動し、ホゾがかみ合うことによ

って堤体に一体性ができ、耐波性が大きくなった。これはホゾの効果がきわめて大きいことを示すものである。

8. 結 論

市販のブロック積型直立消波構造4種を取り上げ、その水理特性を直立壁堤および異形ブロック被覆堤との対比において実験的に調べた。本実験の範囲内で次のことが言い得ると思われる。

反射率……4種の直立消波構造の種類別の差は15%以内とかなり小さく、資料のばらつきの程度を考慮すると種類別間に有意な差は認め難い。

うち上げ高……越波の少ない場合の直立消波構造の平均うち上げ高さ R は $1.0H$ 程度で、直立壁堤の $1.2H$ 、異形ブロック被覆堤の $0.7H$ の中間的な値を示している。

越波水塊の到達距離……直立消波構造と異形ブロック被覆堤はほぼ同等の値を示し直立堤に比べると概して小さい。

波高伝達率……直立消波構造の波高伝達率は直立壁堤と異形ブロック被覆堤との中間に位置する。

越波水塊の落下地点における発生波高……越波水塊の落下地点における発生波高はこの実験では伝達波高の1.3~1.4倍であった。

堤体に作用する波力……それぞれの直立消波ブロックごとに提案されている設計法に基づいて算定した堤体の安定度は相互に異なった値を示すが、本実験ではそのような差は認められなかった。