

透過式潜堤に関する研究

佐藤 稔夫*・三橋 宏次*・秦 英樹*

1. はじめに

従来、潜堤は養浜、侵食防止などの目的で海岸に設置されることが多かったが、最近では水産増養殖施設における海水交流を妨げない程度の消波工としての利用などが考えられている。これらはおのその目的とするところにより波浪減殺の程度が異なるので、あらかじめ潜堤の性質、特に消波効果について知っておく必要がある。潜堤の消波効果については従来多くの研究がなされているがそれらは不透波堤に関するものが大部分であって異形ブロックを使用した透過堤についてはほとんど行われていない。しかし、実際に現地において潜堤を施工する場合は施工の容易さ、洗掘に対する安定性などの問題から単塊堤で施工されることより、石積あるいは異形ブロックによって施工される場合の方が多く、この傾向は石材が払底しつつある現状から今後ますます強くなって行くものと考えられる。

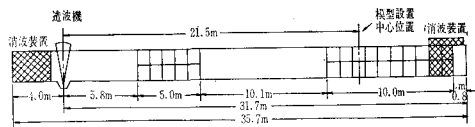
この実験は、このような現状から考え、異形ブロック潜堤の種々の性質について明らかにする目的で行なったものである。なお本実験は天端が静水面と等しい潜堤に重点をおいている。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

この実験に使用した造波水路は幅 1.5 m、深さ 1.2 m、長さ 35 m の図-1 のごときものであり、波高測定はアルミわくに銅線を 2 本平行に張った抵抗線式波高計を用い、計測技研(株)製作の水位計増幅器により増幅し、三栄測器製の無現像式電磁オシログラフにより記録している。

図-1 実験水路

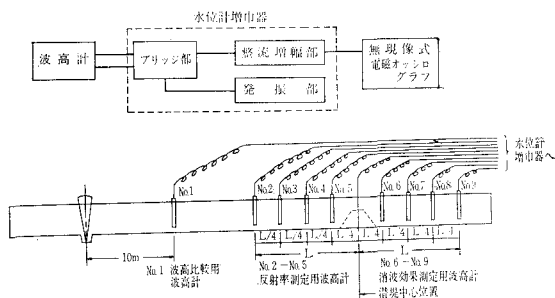


(2) 観測方法

a) 波高測定

(i) 入射波高 (H_i): 図-2 のように波高計を設置

図-2 波高計配置図



し潜堤設置前の No. 6~No. 9 まで 4 点の波高計の記録の平均値をもって入射波高とした。

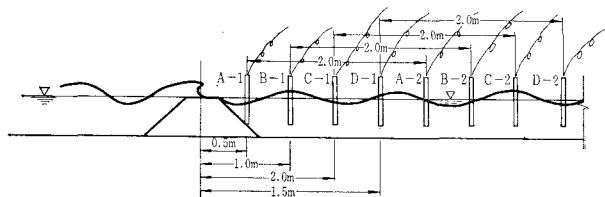
(ii) 透過波高 (H_t): 潜堤設置後の No. 6~No. 9 の 4 点の波高記録の平均値をもって透過波高とした。したがって透過率(消波効果)は $\frac{H_t}{H_i}$ で表わされる。

(iii) 反射率 (K_R): 潜堤設置後の No. 2~No. 5 までの波高記録ののうち最大のものを H_1 、最小のものを H_2 とし、ヒーリーの方法 $K_R = \left(\frac{H_1 - H_2}{H_1 + H_2} \right)$ により算出した。

以上いずれの場合も波高は最初の波から 7 波目~11 波目までの 5 波の平均値によっている。

b) 波長、周期の測定 後述のように潜堤設置に

図-3 波長・周期測定用波高計の配置



よる潜堤通過後の波長および周期の変化を調べるために実験を行なったその測定法はつぎのとおりである。

(i) 波長: 図-3 のごとく 8 台の波高計をならべ (A-1) と (A-2) というように 2 台 1 組で計 4 組を作り記録紙上の 2 組の波高計を通過する同一の波の山と山との距離と実際の波高計の設置距離および記録紙の送り速度とから波長を測定した。

(ii) 周期: 波長測定時の記録から記録紙上の同一波高計における山と山の間の距離を測定し記録紙の送り速度との関係から求めた。

表-1 記号の説明

$H_1, H_2,$	潜堤前面の部分重複波の最大波高および最小波高
$H_A, L_A,$	透過式潜堤の内部透過波高および波長
$H_B, L_B,$	透過式潜堤の天端通過波高および波長
$H_D,$	潜堤による損失波高 ($=\sqrt{H_1^2-H_2^2-H_R^2}$)
$H_i, L_i, T_i,$	入射波の波高, 波長, 周期, (潜堤のない場合の波)
$H_t, L_t, T_t,$	潜堤通過後の波高, 波長, 周期
$H_R,$	潜堤による反射波高 ($=K_R \cdot H_i$)
h	実験水深
K_R	潜堤による反射率 ($=\frac{H_1-H_2}{H_1+H_2}$)
R	潜堤高

なお、本文に用いた記号の説明は表-1 のとおりである。

3. 各形式の潜堤の消波効果の比較

潜堤は構造により、

- ① 直立単塊式潜堤
- ② 台形単塊式潜堤
- ③ 石積式潜堤
- ④ 透過式潜堤

などに分けられ透過式潜堤はさらに、a) 全断面異形ブロックの場合、b) 表層のみ異形ブロックの場合、c) 直立式単塊堤に穴をあけたもの(実用化されていない)などに分けられる。この中でどの形式のものが最もよいかは現地の状況とか目的によって異なると思われるので実験はすべての形式の潜堤について行なえば一番いいわけであるが、ここではそのうち直立式単塊堤、台形式単塊堤、透過式潜堤(全断面異形ブロック)の3種類についての比較実験を行なった。

本実験における実験諸元は表-2 のとおりであるが透過堤のような複雑な断面をした模型の実験の場合、その持っている空けきやブロックの大きさ、堤体表面の粗度などがどのように実験に影響するかがわからず、縮尺の

大小が実験結果に大きく影響するかも知れないと考えたので模型の大きさを5種類に変えて実験を行なった。この場合の縮尺比は仮に現地水深 8 m, 現地周期 7 sec, 9 sec とすると表-2 のごとく 1/12~1/30 ぐらいであり、一般に造波水路で行なわれる模型実験の縮尺の範囲内であるが、この程度の縮尺の相違ではわれわれの実験の場合、縮尺の影響と考えられるような実験値の有意な変動は直立式単塊堤、台形式単塊堤、透過式潜堤のいずれにおいても見いだせなかった。

また、実験は比較の目安として単塊堤の場合も透過堤の場合も天端幅が同じになるようにして実験を行ない参考のため各断面の所要コンクリート量の比を算出してある。実験結果は図-4, 5, 6 のとおりであり、実験値にバラツキはあるが全体の傾向として消波効果(透過率 $=H_t/H_i$)は直立式単塊堤が一番よく透過式潜堤が一番悪い。

また、単塊堤の場合は波形勾配の小さい時に透過率が小さいが、透過堤の場合は逆に波形勾配が小さい時に透過率が大きいのは両者の潜堤として機能の違いを示すものとして興味深い。

図-4 直立式単塊堤の透過率

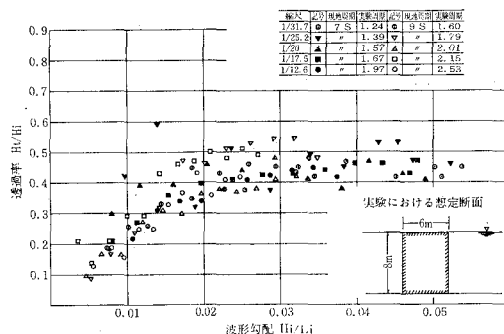


表-2 消波効果実験諸元

波の諸元			堤体の種類		直立単塊式潜堤				台形単塊式潜堤						透過式潜堤									
水深		周期	波高	天端高	天端幅	構築材料	m当り材料所要量	天端高	天端幅	斜勾	面配	底幅	構築材料	m当り材料所要量	天端高	天端幅	斜勾	面配	底幅	構築材料	空げき	m当り材料所要量		
現地条件		7 sec																						
縮尺		m 8.0	9 sec	0.3~3m	8.0m	6.0	コンクリート	48.0m	8.0m	6.0m	1:1	22.0m	コンクリート	m³ 112	m 8.0	m 6.0	1:1		22.0m	コンクリート中空三角ブロック(8t型)	50%	56 m³		
模型条件	1/12.6	64	sec 2.53	cm 2.0~17.3	cm 64	cm 48	"	m 0.307	cm 64	cm 48	"	176	"	m³ 0.717	cm 64	cm 48	"		cm 176	(4K型)	"	m³ 0.358		
	1/17.5	46	1.67 2.15	1.5~16.0	46	34	"	0.156	46	34	"	126	"	0.368	46	34	"		126	(1.5K型)	"	0.184		
	1/20.0	40	1.57 2.01	1.5~14.3	40	30	"	0.120	40	30	"	110	"	0.280	40	30	"		110	(1.0K型)	"	0.140		
	1/25.2	32	1.39 1.79	1.5~12.0	32	24	"	0.077	32	24	"	88	"	0.179	32	24	"		88	(0.5K型)	"	0.090		
	1/31.7	25	1.24 1.60	1.5~9.2	25	19	"	0.048	25	19	"	69	"	0.110	25	19	"		69	(0.25K型)	"	0.055		
								台形単塊式潜堤 直立単塊式潜堤						m当り所要材料比 = 2.3		透過式潜堤 直立単塊式潜堤							m当り所要材料比 = 1.2	

図-5 台形式単塊堤の透過率

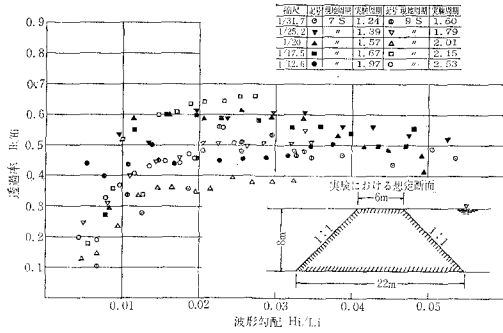
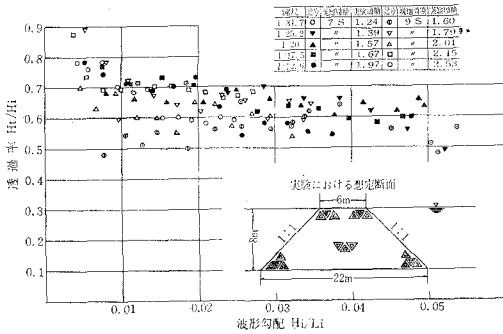


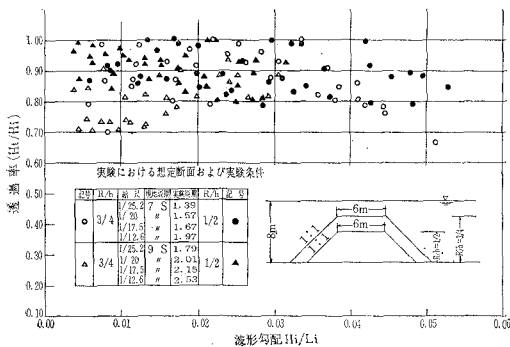
図-6 透過式潜堤の透過率



なお、消波効果の実験値の整理方法として横軸に波高水深比 (H/h) をとる整理方法も考えられるが全体の傾向は横軸に波形勾配をとった場合と同じ傾向を示すのでここでは省略した。

また、横軸に水深と潜堤の堤高との比 (R/h) をとって表示する方法¹⁾もあるが透過式潜堤の場合は異形ブロックを使っている関係で堤高を単塊堤のように連続的に変化させることはできないし、図-7 のように実験の結果では $R/h=0.75$ でも透過率は0.8以上であり、 $R/h=0.5$ では潜堤の前後で波高はほとんど変わらない場合もあり消波効果を問題にする潜堤としてはあまり意味がないのでここでは潜堤の天端と静水面が等しい ($R/h=1$) 場合だけに実験結果をしばっている。したがって、そのような表示法はここでは用いていない。

図-7 透過式潜堤の堤高と透過率の関係



4. 各形式潜堤の反射率の比較

潜堤としては堤体背後への透過率は小さいにこしたことはないが、潜堤前面に航路などがある場合や潜堤前面の洗掘などを考えると、それと同時に反射率も小さいことが望ましく、透過率が小さくてしかも反射率も小さいような潜堤があればそれが潜堤として優れているといえると考えられる。

したがって潜堤の機能を考えるうえで透過率だけ考えたのでは片手落ちであるので潜堤の反射率 (K_R) についても求めたのが図-8, 9, 10 である。

なお、実験の諸元は透過率と同じく表-2 のとおりである。反射率においては透過率の実験結果とは反対に透過堤が一番小さく、直立堤が一番大きい。また、その傾

図-8 直立式単塊堤の反射率

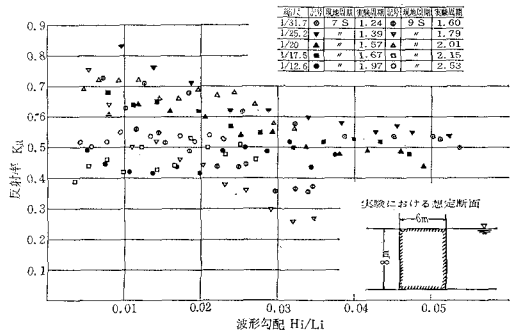


図-9 台形式単塊堤の反射率

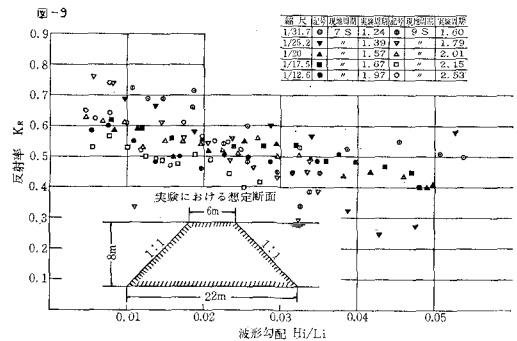
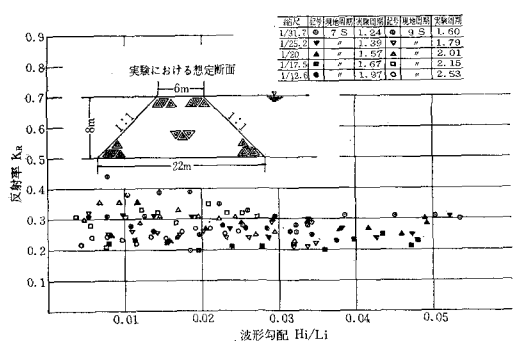


図-10 透過式潜堤の反射率



向は直立堤、台形堤の場合は波形勾配の小さいほど反射率が大きく、透過堤においては波形勾配にそれほど影響しないが全体的に反射率は小さいという結果がでてゐる。

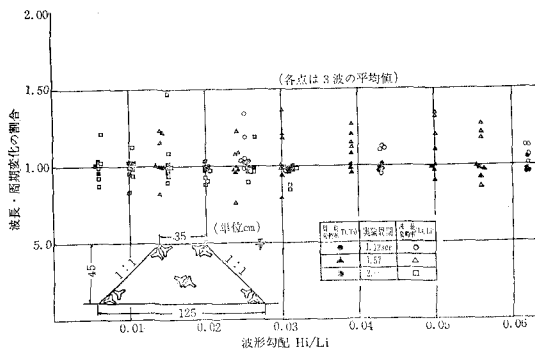
5. 透過式潜堤の一般的性質

洗掘やブロックの安定などの問題を別にすると潜堤について消波効果(透過率)と反射率がわかれば実用的には十分であるが、さらに透過式潜堤の一般的性質について明らかにするために種々の実験を行なってみた。

(1) 波長, 周期の変化

単塊式潜堤においては入射波の波長および周期は潜堤通過後は短くなることが実験的にわかっている^{2), 3)}が透過式潜堤の場合も同じような現象が表われるかどうかを見るために図-3の実験装置により図-11の断面のテトラ堤で実験を行なった。

図-11 透過式潜堤通過後の波長・周期変化の割合



実験結果は図-11 のとおりであり、これから、

(i) 周期は潜堤通過前後でほとんど変動がない。

(ii) 波長は潜堤通過後短くなる場合もあるし、長くなる場合もあるが、ここに表わされた結果からは天端幅の広い単塊堤のように潜堤通過後に短くなるとはいえない。

ただし、この結果は波の山の最高点からつぎの波の山の最高点までを一周期と考え測定したものであり、実際には潜堤通過後の波は単純な波ではないからその一周期の間にさらに周期あるいは位相の異なった波が重なっているわけであるが、ここではそれは考慮していない。

また、潜堤の天端幅をもっと広げれば結果は異なるかも知れないが実用的な範囲では透過式潜堤は潜堤通過後も波長、周期は変わらないと考えてよいと思われる。

なお、この実験は電磁オシロの紙送り速度 10 cm/sec で記録し、各実験値は造波機始動後 7 波から 9 波までの 3 波の平均値をとっている。

(2) 透過式潜堤におけるエネルギー伝達の割合

単塊式潜堤の場合は潜堤背後に伝わるエネルギーはすべて潜堤の天端を通過するものに限られるが、透過式潜

堤の場合は波のエネルギーは潜堤天端からのみでなく潜堤堤体内部も透過して行く。

そのため、透過式潜堤においては内部透過エネルギーと天端通過エネルギーの比がどのくらいであるかという問題がある。

この点を説明するために図-12 のような堤体断面の模型を作った。この堤体の諸元は表-2 の縮尺 1/20 の透過堤の場合と変わりはないが天端から背後にエネルギーが通過することがないように天端に 3 cm 程度の間詰モルタルをしたうえで上部にコンクリート壁を作っている。したがって潜堤背後へは堤体内を透過したエネルギーしか到達しない。このようにして実験した結果は図-13 のとおりであり、透過式潜堤の場合はかなりのエネルギーが堤体内を通過することがわかる。

図-12 内部透過率実験堤体断面図

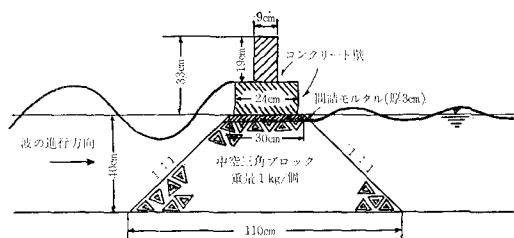
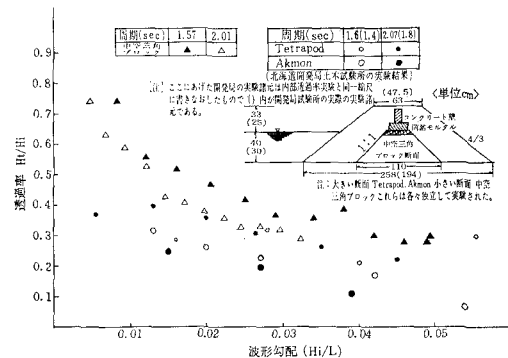


図-13 内部透過率実験における透過率



なお、図-13 には参考のため実験条件もブロックの種類も異なるが堤体断面積の違いによる透過率の相違の一例として北海道開発局土木試験所の研究結果⁴⁾を併記した。

透過式潜堤の堤体内を通過するエネルギーはこれであったが、それでは天端を通過するエネルギーはどの程度のものであろうか。

簡単のため微小振幅波のように波の重ね合わせができるものと仮定すると式(1)が成立する。

$$H_t^2 L_t = H_A^2 L_A + H_B^2 L_B \quad \dots\dots\dots (1)$$

5. (1) の実験結果から

$$L_t \div L_A \div L_B$$

と考えると

$$H_t = \sqrt{H_A^2 + H_B^2} \dots\dots\dots (2)$$

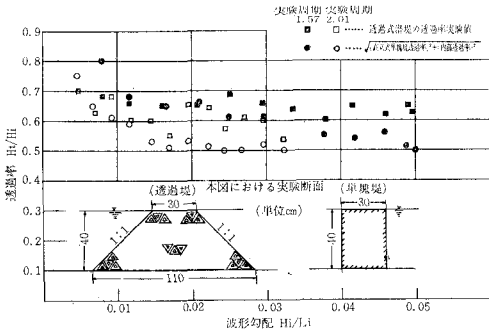
したがって、式(2)から H_B の値は計算できることになる。

また、潜堤の機構上から透過式潜堤の天端を通過するエネルギーは単塊堤の天端を通過するエネルギーとさほど違いはないのではないかと推定される。

そこで潜堤通過後の波長は単塊堤でも本実験のように堤幅のせまい ($B/L \leq 0.1$) 場合は波長がほとんど変わらないと考えると H_B として単塊堤の透過波高を使用することにより H_A と H_B が既知の値となるので式(2)により H_t を計算できる。

比較のため式(2)により求めた H_t ($=\sqrt{H_A^2 + H_B^2}$) と実際に実験によって求めた透過波高 H_t についての透過率 H_t/H_i を示したのが図-14 であり、実験値も計算値もさほど違いはない。

図-14 透過率の実験と重ね合わせによる比較
(直立堤により計算した場合)

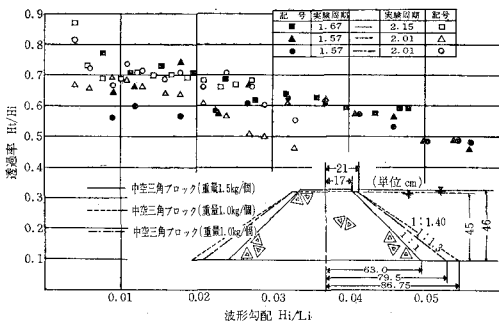


したがって透過式潜堤の天端通過エネルギーは単塊堤の天端通過エネルギーとほぼ等しいと考えてよいと思われる。

(3) のり勾配の影響

本実験はいずれのり勾配 1:1 で行なわれているが、実際に異形ブロック潜堤を築堤する場合は 1:1.3~1:1.5 ぐらいのり勾配をとることが多いと思われる。このり勾配の違いによりどの程度消波効果および反射率に違いがあるかを調べるためには勾配を換え、ほ

図-15 のり勾配の相違による透過率の違い
(透過堤)

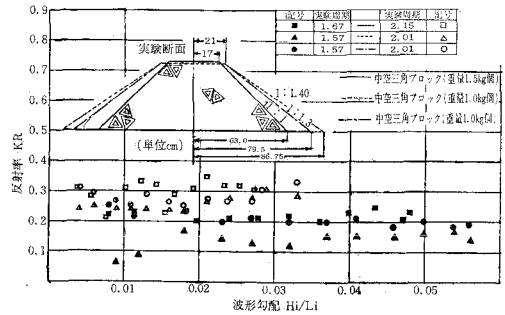


ぼ同一断面で行なった実験の結果が図-15 である。

常識的に考えて勾配のゆるい方が堤体断面積も大きく消波効果は優れていると思われるが、この実験からはのり勾配の大きい方がややよい程度でありのり勾配の影響と考えられる明確な結果は表われていず、のり勾配 1:1 の場合の実験結果をのり勾配 1:1.3~1:1.5 の潜堤に適用してもさほど大きな誤りはないと思われる。

また、反射率については勾配の急な場合の方がやや大きいというものの、この点でも勾配の緩急によりさほどの差はない(図-16)。

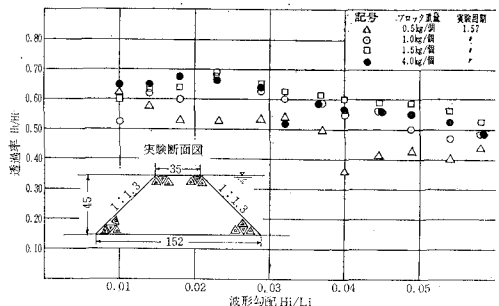
図-16 のり勾配の相違による反射率の違い
(透過堤)



(4) 異形ブロックの大きさの影響

透過式潜堤を築堤する場合材料となる異形ブロックの一個当りの大きさが違う場合、消波効果が異なるのではなかろうかと考え 0.5 kg, 1 kg, 1.5 kg, 4 kg の 4 種類の中空三角ブロックについて堤体の断面積は同じにして実験を行なった。実験結果は図-17 のとおりである。

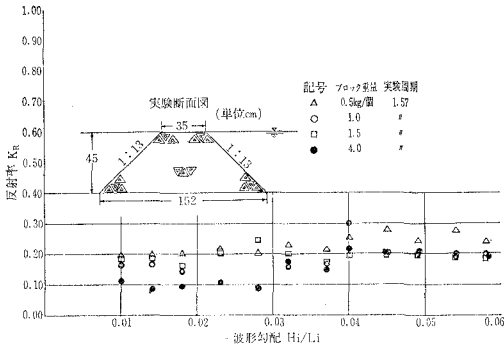
図-17 異形ブロックの大きさの相違による透過率の違い



この図では 0.5 kg のブロックの場合は透過率がややよくなっているが、その他の種類のブロックについては消波効果はほとんど変わらない。

したがって、堤体断面積に対しブロックの大きさがあまり小さくない限りはブロックの大きさによる消波効果の違いは考慮しなくてよいと思われる。なおこの場合の反射率を求めてみると図-18 のようになり、透過率の小さい場合は反射率が大きくなっている。

図一18 異形ブロックの大きさの相違による反射率の違い



6. 潜堤による波のエネルギー消失の割合

前述のように潜堤として透過率と同時に反射率も小さいものが望ましいということは、堤体および、その付近において波のエネルギーの一部が消失するが、その消失の割合が大きなものほど潜堤としてすぐれているということである。5. (2) の場合と同様に波長はこの実験における3種類の潜堤の前後でいずれも変わらないとすると潜堤によるエネルギーの配分比は式(4)で表わされる。

$$H_i^2 = H_t^2 + H_R^2 + H_D^2 \dots\dots\dots(4)$$

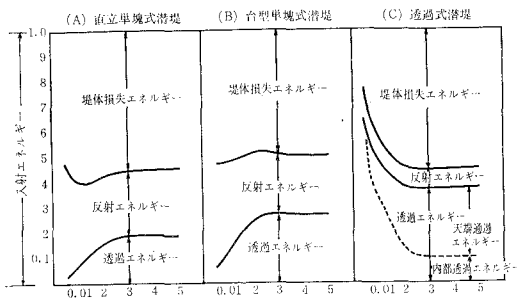
式(4)における H_i , H_t , H_R は実験により求めたから式(5)により H_D を求められる。

$$H_D = \sqrt{H_i^2 - H_t^2 - H_R^2} \dots\dots\dots(5)$$

このようにして求めた H_D , H_i , H_t , H_R に基づき各形式の潜堤についてエネルギーの配分を比較してみるとだいたい図一19 のようになる。

この図からわかるように反射率、透過率は各潜堤構造によって異なるが堤体付近におけるエネルギーの損失率

図一19 各種潜堤のエネルギーの配分率



(H_D/H_i) についてはほとんど変わらない。

このことから透過式潜堤は断面が複雑であり堤体および堤体付近における波のエネルギーの損失が大きいように思われるが実際にはこのような形状のためにエネルギーを特別に消失させるようなことはないと考えられる。

7. 結 論

以上の実験によって明らかになったことを要約するとつぎようになる。

(1) 透過式潜堤は単塊式潜堤を比較すると透過率が大きく反射率が小さいが単塊式潜堤は透過率が小さく、潜堤として対照的な機能をもつ。

(2) 透過式潜堤においては実用的な範囲の断面では潜堤の前後において波長周期に変わりはない。

(3) 透過式潜堤も単塊式潜堤も天端を通過するエネルギーはほぼ等しい。

(4) 実用的な範囲での透過式潜堤ののり勾配とブロック重量の変化は潜堤の特性にさほど大きな影響を与えない。

(5) 透過式潜堤も単塊式潜堤も堤体および堤体付近におけるエネルギーの損失割合は同じである。

なお、本実験において実験施設の関係上波高が小さいほど波形勾配が小さくなっているが、単塊堤の場合には波形勾配にはほとんど影響されず H/R によって定まるという報告もあり⁹⁾、本報告のような実験方法および整理方法で必ずしも十分であるとはいえない。また潜堤前後における波のエネルギーの問題でも実際には波形が複雑で単純な波の重ね合わせはできないといった問題があるが、それらの点について今後さらに検討し、研究して行きたい。

参 考 文 献

- 1) 細井正延・富永正昭：離岸堤による波高減衰について、第6回海岸工学講演集，p. 121～123，1959。
- 2) 中村充・白石英彦・佐々木泰雄・伊藤三甲雄：潜堤による消波について，第13回海岸工学講演集，p. 76～79，1966。
- 3) 堀川清司：潜堤による風浪の減衰について，第18回土木学会年次学術講演会講演概要，p. 115～118，昭和38年。
- 4) 鴻上雄三：2, 3の異形ブロックの消波安定特性について，第21回土木学会年次学術講演会講演概要，p. 79-1～79-2，昭和41年。
- 5) 合田良実・竹田英章：越波による防波堤背後への波高伝達率，第13回海岸工学講演会講演集，p. 87～92，昭和41年。