

大水深緩斜面捨石潜堤に関する研究

永井 荘七郎*・小田 一紀**・倉田 克彦***

1. 緒 言

海岸近くの丘陵地に原子力発電所等大規模な土木構造物を建設する際にはしばしば大量の掘削岩石が産出され、現場の土木技術者はその処理問題に苦慮する。

著者らは、このような掘削岩石を水深 20m 程度の大水深の海中に設置される潜堤の材料として用いた場合の波浪減衰効果について研究する機会をもったので、その結果をここに発表する次第である。

一般に掘削岩石はその大部分が重量 100kg 以下の小さなものであるため、外りを従来の潜堤のように 1:2 前後の急勾配にするとほとんどの入射波は外り肩で碎波し、小重量の岩石は容易に散乱し、潜堤の崩壊を招くことは明らかである。

それゆえ、今回の研究においては、入射波をなるべく水深が深い外り面上で碎波させ、岩石に働く波力をできるだけ小さくするため、外り勾配が 1:5~1:20 の緩斜面捨石潜堤をとりあげ、その防波効果について検討を行った。

潜堤に関する従来の研究は、ほとんどが鉛直堤^{1),2)}か、あるいは 1:2 前後の法を有する小規模の捨石堤またはブロック^{3),4),5)}積堤を対象としたものであって、ここで対象とするような外りの勾配が非常に緩い大規模の潜堤を対象として研究された例はないようである。

この研究においては、緩斜面捨石潜堤の波浪減衰効果および外り肩の安定性について検討を行ったが、この論文においては主として波浪減衰効果について述べる。

2. 実験施設および方法

(1) 実験施設

実験に用いた水槽は図-1に示すように、長さ 100m、幅 1.2m、高さ 2.0m の鋼板製、片面ガラス張り風洞付波浪水槽である。

実験波は低慣性直流電動機によって駆動するフラップ型造波装置によって発生させた。

この造波装置によって発生させ得る規則波の周期の範囲は、水深 1.0m のとき、 $T=0.5\sim 3.5$ sec、波高の最大値は $T=3.5$ sec のときでほぼ 40cm である。

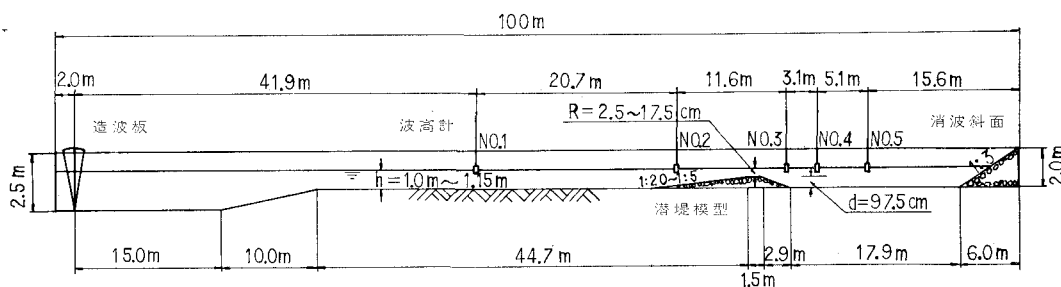


図-1 波浪水槽および潜堤模型、波高計の位置

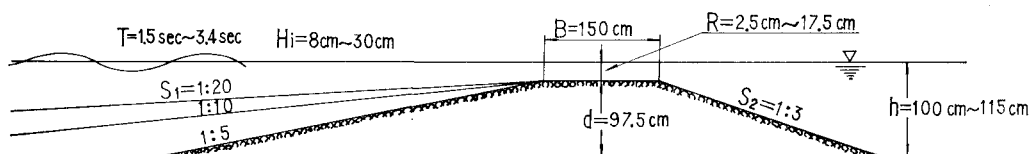


図-2 潜堤模型の断面形状

* 正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 大阪市立大学講師 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 大阪市立大学助手 工学部土木工学科

造波装置と反対側の水槽端に最大寸法 10 cm 程度の碎石を用いた 1:3 勾配の消波斜面を設け、水槽端からの反射波を防いだ。

緩斜面捨石潜堤の模型は 図-2 に示すように、外りのり勾配が $S_1=1:5, 1:10$ および $1:20$ の 3 種類のものを用い、その外りのり肩が造波板から約 70 m の位置になるように設置した。

堤高、天端幅および内りのり勾配はそれぞれ、 $d=97.5\text{ cm}, B=1.50\text{ m}, S_2=1:3$ と一定である。

潜堤の模型材料には、実際の掘削岩石の重量分布にほぼ一致する 表-1 に示すような重量分布で、空隙率 48% の碎石を用いた。碎石の重量は Froude 則を用いて実物

表-1 模型実験に用いた碎石の重量分布

重量区分	割合
0~3.7 g (0~30 kg)	20%
3.7~12.5 g (30~100 kg)	76%
12.5 g 以上 (100 kg 以上)	4%

の掘削岩石から換算した。実験の幾何学的縮尺は 1/20 である。

また伝達率におよぼす潜堤の表面粗度の影響を調べる目的で、前述の碎石を用いた 3 種類の潜堤模型の他に、外りのり勾配が 1:10 の碎石潜堤と同一断面の不透過板張り潜堤をも用いた。

波の計測には容量式波高計(計測技研製)を使用し、その出力電流を増幅器で増幅して、電磁オシログラフ(共和電業製)に記録し、解析に用いた。

(2) 実験方法

波高の計測は 図-1 に示したように、合計 5 個所で行った。一樣水深部の波高計 No. 1 によって計測した波浪のうち、波高がほぼ一定になった後、潜堤からの反射波の影響が入らない連続 5 波の波高の平均値 H_i を入射波高と定め、波高計 No. 3, No. 4 および No. 5 によって計測した波のうち、ほぼ同じような波形が繰返されるようになってからの連続 5 波の波高の平均値 H_3, H_4 および H_5 の平均値 $H_t=(H_3+H_4+H_5)/3$ を伝達波高と定義した。

波高計 No. 3~No. 5 によって計測された伝達波の波形は 図-3 に示すように、入射波の周期 T_i とほぼ等しい周期 T_t を有する波と、入射波の周期より短い周期の擾乱波が重なったものとなっている。

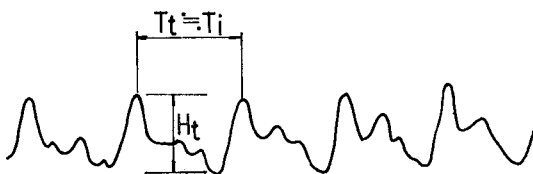


図-3 伝達波高 H_t の定義

このような場合、伝達波の波高を適確に定め難いので、周期 T_i の間隔で生ずる相隣り合う最高点の間を 1 つの波と見なし、この波の水位の最高点から最低点までの鉛直距離を伝達波高とした。

また波高計 No. 2 によって外りのり面上における波を計測したが、今回の解析には用いなかった。

実験における変量の範囲は次の如くである。

外りのり勾配 $S_1=1/5, 1/10, 1/20$

天端上水深 $R=2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5$ および 17.5 cm

上記の天端上水深に対応するのり先水深(一樣水深)
 $h=100.0, 102.5, 105.0, 107.5, 110.0$
 および 115.0 cm

ただし $S_1=1/10$ の板張り潜堤の場合は、 $R=2.5, 10.0$ および 17.5 cm ($h=100.0, 107.5$ および 115.0 cm) の 3 種類のみであった。

入射波の周期 $T=1.5, 1.8, 2.2, 2.9$ および 3.4 sec 、入射波の波高はすべての周期に対してはほぼ $H_i=8\sim 30\text{ cm}$ を基準として、周期の長短に応じて基準値よりも増減させた。

表-2 入射波の相対水深と波形勾配の範囲

h/L_i	H_i/L_i
0.10~0.11	0.006~0.026
0.12~0.13	0.007~0.036
0.17~0.19	0.010~0.055
0.22~0.24	0.011~0.074
0.30~0.34	0.024~0.11

実験における入射波の相対水深 h/L_i とそのときの波形勾配 H_i/L_i の範囲は 表-2 に示すごとくである。

3. 緩斜面捨石潜堤の波高伝達率

(1) 伝達率 K_t に関する次元解析

緩斜面捨石潜堤の伝達波高 H_t に影響をおよぼす主な因子は、 図-4 に示すように、入射波の波長 L_i 、波高 H_i 、のり先水深 h 、外りのり勾配 S_1 、天端上水深 R (あるいは堤高 d)、および天端幅 B である。

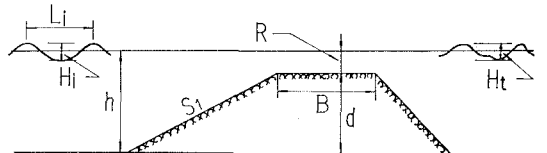


図-4 伝達波高 H_t に影響をおよぼす主な因子

内りのり勾配 S_2 は伝達波にほとんど影響をおよぼさないと考えてさしつかえない。

また堤体の表面粗度、空隙率などの影響は 2 次的なものとして無視すると、伝達波高 H_t と他の諸元との関係は式 (1) のように表わすことができる。

$$H_t=f(L_i, H_i, h, S_1, R, B) \dots\dots\dots(1)$$

式 (1) を次元解析することによって、伝達率 K_t は 5 つの無次元量の関数として式 (2) のように表わすことができる。

$$K_t = H_t/H_i = f(R/H_i, S_1, B/d, h/L_i, H_i/L_i) \dots\dots\dots (2)$$

式 (2) 右辺の R/H_i は潜堤の天端上水深と入射波高との関係を表わし、これを相対天端上水深と呼ぶことにする。

また S_1 と B/d は潜堤の形状特性を表わし、 h/L_i と H_i/L_i は入射波の特性を表わす無次元量である。

今回の実験においては、伝達率 K_t と R/H_i , S_1 および h/L_i , H_i/L_i の関係を調べた。

天端幅と堤高は一定であるので、 B/d は一定値 ($B/d = 1.57$) となる。伝達率におよぼす B/d の影響は次回に検討する予定である。

(2) 相対天端上水深 R/H_i と伝達率 K_t の関係

外りの勾配が $S_1 = 1/5$, $1/10$ および $1/20$ のときの相対天端上水深 R/H_i と伝達率 K_t の間の関係を表わすと、それぞれ 図-5, 図-6 および 図-7 に示すごとくである。

図-5~図-7 によると、実験値は相対水深によって多少ばらつきを示しているが、いずれの外りの勾配の場合でも実験の範囲内では相対天端上水深と伝達率の間にはほぼ直線的な関係が認められる。

図中の実線は相対天端上水深がほぼ $0 < R/H_i < 2.0$ の範囲において、相対水深および波形勾配がほぼ $0.10 < h/L_i < 0.34$, $0.006 < H_i/L_i < 0.11$ の範囲のすべての波に対する R/H_i と K_t の間の平均的な関係を示したものである。

これらの関係を式で表わすと、各外りの勾配の潜堤に対して次のように表わすことができる。

$$S_1 = 1 : 5 ; K_t = 0.32 R/H_i + 0.28 \dots (3)$$

$$S_1 = 1 : 10 ; K_t = 0.40 R/H_i + 0.10 \dots (4)$$

$$S_1 = 1 : 20 ; K_t = 0.44 R/H_i + 0.07 \dots (5)$$

いずれの外りの勾配の潜堤に対して、 R/H_i がほぼ $1.5 \sim 1.6$ よりも大きくなると、 $0.006 < H_i/L_i < 0.11$ の範囲では入射波は潜堤上で碎波しないで堤内

へ通過し、ほぼ $R/H_i < 2.0$ になると伝達率はほぼ 1 に近づいて行くと考えられる。

図-5~図-7 に示した各点には、碎波か非碎波、また碎波点が外りの肩から外りの面上であるか、あるいは天端上であるかを区別して表示した。

これらの表示によると、 $S_1 = 1 : 5$ の場合はほぼ $R/H_i < 1.5$ の範囲において、大部分の入射波が外りの肩あるいは外りの面上 (観察によれば外りの肩を中心とする狭い範囲での碎波が特に多い) で碎波し、 $S_1 = 1 : 10$ あるいは $1 : 20$ と外りの勾配が緩くなると、 $R/H_i < 1.0 \sim 1.3$ の範囲で碎波 (外りの肩より沖側の法面上碎波が多い) し、 R/H_i の値がそれ以上になると潜堤上で碎波しなくなる。

しかし 図-5~図-7 から明らかのように、碎波点の位置、あるいは碎波か非碎波のいかにかわらず、すべての実験値が式 (3)~式 (5) で表わされる直線の近傍

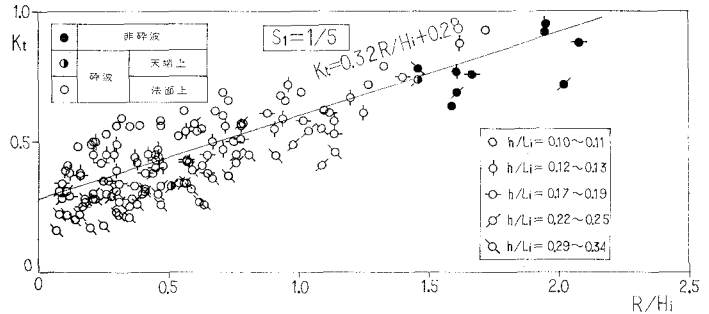


図-5 $S_1 = 1 : 5$ のときの R/H_i と K_t との関係

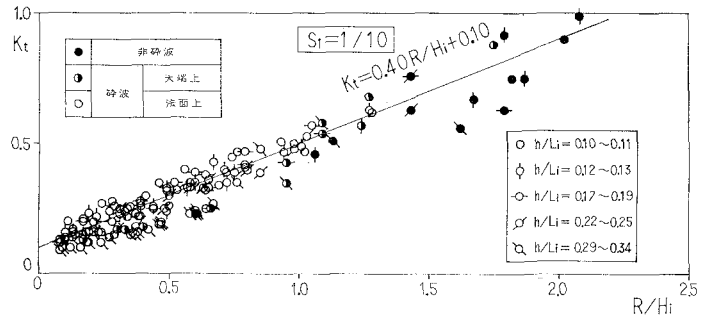


図-6 $S_1 = 1 : 10$ のときの R/H_i と K_t との関係

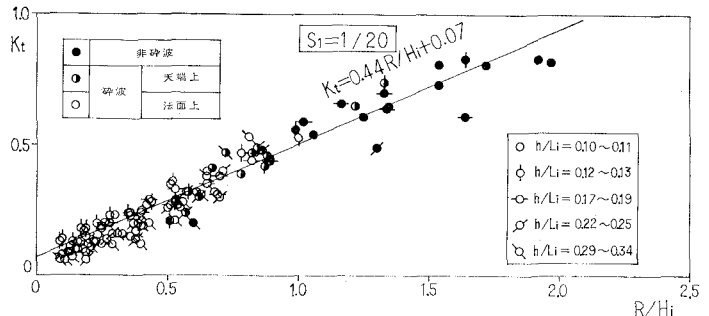


図-7 $S_1 = 1 : 20$ のときの R/H_i と K_t との関係

に分布し、 K_t は潜堤上における波の状態に余り関係なく、 R/H_i によって一義的に定まるようである。

(3) 外りのり勾配 S_1 と伝達率 K_t の関係

図-5~図-7 あるいは式 (3)~式 (5) から明らかなように、外りのり勾配が 1:5 の場合は 1:10 あるいは 1:20 の場合に比べて伝達率は大きい。

このことは、外りのり勾配が 1:10 あるいは 1:20 の場合には、図-8 の写真で示すように、一般に碎波点が外りのり肩から少し沖側の外りのり面上にあるのに反して、

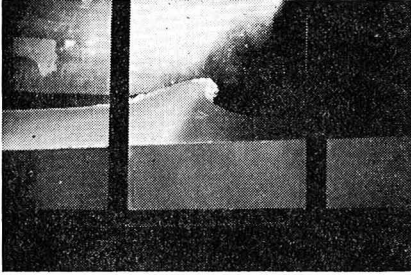


図-8 $S_1=1:20$ の場合の外りのり面上における碎波状況

1:5 の場合には、ほとんどの入射波が図-9(a)~(d)の一連の写真に示すように、外りのり肩のごく近傍で巻き波で碎波し、その落下点が堤内に比較的近いので、碎波後のエネルギー損失が少ないためであると考えられる。

1:20 の場合の碎波点は一般に、1:10 の場合に比べて沖側になるにもかかわらず両者の伝達率には余り相違が見られない。

これは、外りのり上で碎波して外りのり肩まで進む間に失うエネルギーが、天端上で失うエネルギーに比して余り

大きくないからであろうと考えられる。すなわち、相対天端上水深が碎波後のエネルギー損失に最も大きな影響を与えると考えられる。

また前述のごとく、ほぼ $R/H_i > 1.5 \sim 1.6$ になると、いずれの外りのり勾配の場合でも、入射波は潜堤上で碎波しないので、外りのり勾配に無関係に伝達率はほぼ等しくなるようである。

(4) 伝達率 K_t におよぼす相対水深 h/L_i の影響

図-5 から明らかなように、外りのり勾配が 1:5 のときは、相対水深によって多少伝達率に差が生じ、相対水深が小さいときは図中の直線で表わされる平均値よりも多少大きい目の伝達率を与える。

しかし図-6 および図-7 では相対水深による伝達率の違いはごくわずかであって、外りのり勾配がほぼ 1:10 以下になると伝達率におよぼす相対水深の影響は実用上無視できると言える。

(5) 伝達率 K_t におよぼす波形勾配 H_i/L_i の影響

図-5~図-7 に示した相対天端上水深と伝達率の関係を表わす各点は入射波の波形勾配がほぼ 0.01~0.10 のかなり広い範囲における実験値を表わしているにもかかわらず実験値に大きなばらつきが見られない。

したがって入射波の波形勾配は伝達率にほとんど影響をおよぼさないとと言える。

一定水深、一定周期の下で波高を増して行くと、波高が小さく、天端上水深が波高に比べて十分に大きいときは、潜堤上で碎波しないで波のエネルギーが堤内によく伝達されるため、伝達率は大きい。波高の増大に伴って次第に外りのり肩あるいは外りのり面上で碎波し、伝達率は減少して行く。

このことは、あたかも波形勾配の増大に伴って伝達率が減少するかののごとく見えるが、これはむしろ、相対天端上水深が減少すると碎波し、伝達率が減少することを示すものである。

(6) 伝達率におよぼす潜堤の表面粗度の影響

潜堤外りのり面および天端表面の粗度が波高伝達率におよぼす影響を調べるために、外りのり勾配が 1:10 の碎石潜堤と同一断面の不透過板張り潜堤について実験を行い、その波高伝達率、碎波状況

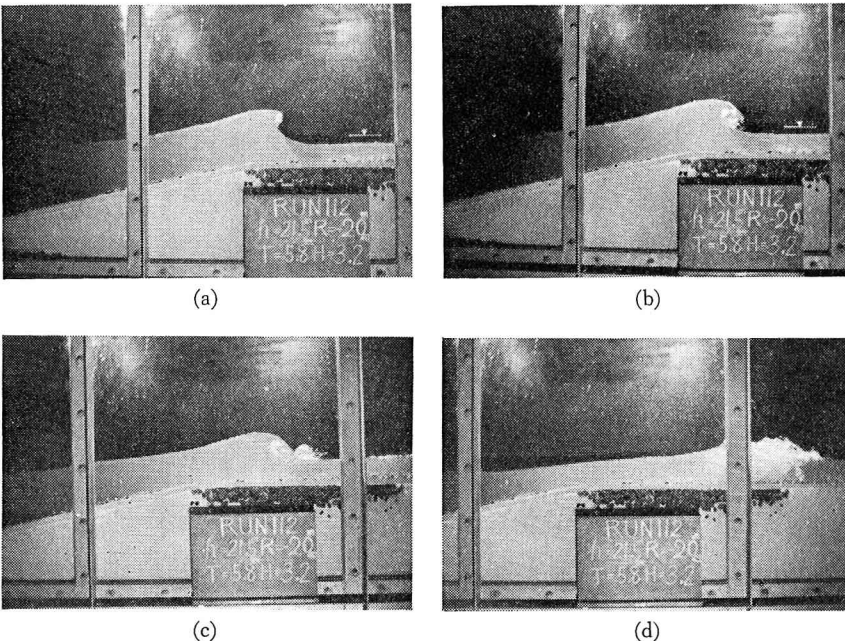


図-9 $S_1=1:5$ の場合の外りのり肩付近における碎波状況

などを調べた。

図-10 は 1:10 勾配の不透過板張り潜堤の相対天端上水深と伝達率との関係を示し、実線はこれらの間の平均的な関係を表わしたものである。また比較のために、同図に、図-6 に示した砕石潜堤の場合の相対天端上水深と伝達率の間の平均的な関係を破線で示した。

実線と破線とを比較すれば明らかなように、 $R/H_i > 0.5$ の範囲では、不透過板張り潜堤と砕石潜堤の伝達率の間にはほとんど差が認められない。

したがって、 $R/H_i > 0.5$ の範囲においては、波高伝達率 K_t には潜堤の表面粗度および透過性の影響はほとんど現われなないといえるであろう。

$R/H_i < 0.5$ の範囲では、砕石潜堤の場合の K_t は R/H_i にほぼ比例するのに対して、板張り潜堤の場合は R/H_i にあまり関係なく、 $K_t \approx 0.30 \sim 0.35$ とほぼ一定値を示す。

この違いは主として、砕波による潜堤のり面の洗掘の有無によるものであって、砕石潜堤の表面粗度および透過性による影響ではないと考えられる。

すなわち、砕石潜堤の場合は、特に $R/H_i < 0.5$ の範囲では砕波時に飛込んだ水塊によってのり面は洗掘され、砕石は移動し、砕波点およびその岸側では激しい渦乱が生じ、これらによって波のエネルギーは消費される。しかし板張り潜堤の場合は、のり面洗掘はなく、エネルギー消費は砕波時の渦乱運動のみによるため砕石潜堤の場合より少ないと考えられる。

以上のことから、砕石潜堤の表面粗度および透過性は、天端上水深が入射波高に比べてかなり小さい場合を除けば、波高伝達率にはほとんど影響を与えないと考えてもさしつかえないであろう。

またこのことから、今後捨石潜堤の波浪減衰効果に関する模型実験においては、堤体模型として不透過板張り模型を用いても実用上問題がないことが明らかになったので、今後の実験は時間と経費を削減するため板張りの模型を使用する予定である。

4. 結 論

砕石および板を用いて行った緩斜面捨石潜堤に関する今回の実験によって次のことが明らかになった。

(1) 外りのり勾配が一定な場合には、伝達率 K_t は相対天端上水深 R/H_i によってほぼ一義的に決定され、 $0 < R/H_i < 2.0$ の範囲では、 $0.10 < h/L_i < 0.34$ 、 $0.01 < H_i/L_i < 0.10$ のすべての波に対して、両者の関係はほぼ直線的であり、外りのり勾配が 1:5, 1:10, および 1:20 の場合に対して、それぞれ式 (3), 式 (4), および式

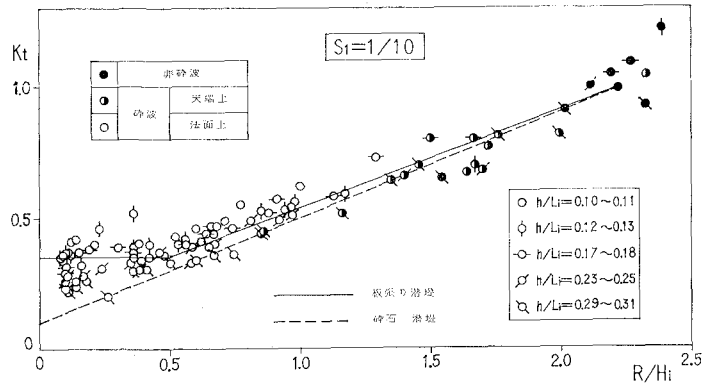


図-10 板張り潜堤の R/H_i と K_t との関係 ($S_t = 1:10$)

(5) で与えられる。

(2) 外りのり勾配が 1:10 までは、勾配が緩いほど伝達率は小さくなるが、1:10 以下になると勾配による伝達率の相違はほとんどなくなるようである。

またほぼ $R/H_i > 1.5 \sim 1.6$ になると、外りのり勾配の大きにかかわらず、伝達率はほぼ等しくなるようである。

(3) 入射波の特性 (h/L_i , H_i/L_i) による伝達率の相違はあまり大きくなく、実用上無視してもよい。

(4) 砕石堤の表面粗度および透過性は、天端上水深が入射波高に比べてかなり小さくない限り、伝達率にはほとんど影響を与えない。

なお、紙数の制限上この論文においては外りのり肩の洗掘については述べなかったが、実験結果によれば、掘削岩石が小重量であるため、外りのり勾配が 1:5 の場合は外りのり肩がかなり洗掘された。外りのり勾配が 1:20 の場合はどのような入射波に対してもほとんど洗掘を受けなかった。1:10 の場合は、1:5 の場合に比べて洗掘を受け難いが、 R/H_i が小さいときはかなり洗掘された。

したがって小重量の掘削岩石を用いて 1:10 より急な外りのり勾配を有する潜堤をつくる場合には、外りのり肩付近の洗掘防止策を十分に施す必要がある。

最後に、本研究は文部省自然災害特別研究「海岸における波の制御に関する研究」(代表者; 岩垣雄一 京都大学教授) による研究の一部でもあることを付記するとともに、実験に協力していただいた天野茂秀君 (現五洋建設), 水野正博君 (現パシフィックコンサルタント), 井上武司君 (現五洋建設), および長谷川恵一君 (現大学院学生) に謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 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, pp. 87-92, 1966.
- 2) 堀川清司・小森修蔵: 潜堤による風波の減衰機構について, 第15回海岸工学講演会講演集, pp. 340~348, 1968.

- 3) 加藤重一・上林征男: ブロック積消波堤の消波効果について, 土木学会論文報告集, 第165号, 1969年5月.
- 4) 久保弘一・井田康夫: 捨石堤背後の伝達波高について, 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 49~54, 1973.
- 5) Johnson, J.W., Fuchs, R.A. and Morison, J.R.: The Damping Action of Submerged Breakwater, Trans. A.G.U., Vol. 32, No. 5, pp. 704~718, 1951.
-