

捨石堤背後の伝達波高について

久保 弘 一*・井田 康 夫**

1. 概 説

捨石やブロックなどで構築された防波堤、離岸堤のような透過性構造物によってしゃへいされた水域に伝達される波浪は、開口部からの侵入によるもの、風によって水域内に発生するものなど3次元的な要因を除けば、

(1) 越波によるエネルギー伝達

(2) 堤体透過によるエネルギー伝達

が主な成因であると考えられる。しかしこの両者のしめる割合は天端高（あるいはその無次元量）によって著しく異なる。すなわち、計画潮位に対して比較的天端の高い構造物については、堤体透過エネルギーの影響は越波の影響に比べて無視できない大きさである。一方天端が低く、計画潮位付近にある場合には、透過エネルギーの影響は小さくなり、越波のエネルギーが支配的になるが、この越波エネルギーを支配するのは天端上の波の挙動であって、碎波形態はもちろん天端の粗度が波形ならびにエネルギー伝達におよぼす影響、天端から堤体内へのエネルギー透入などがそれを支配する要因となる。さらに天端が低くなると、天端の粗度による波浪の変形がエネルギー伝達を支配するおもな要因となる。このように潮位と天端高の関係によって波浪伝達の形態ならびに波高伝達率は異なり、したがってその利用目的も異なる。

すなわち、天端の高いものは防波堤として、計画潮位付近あるいはそれ以下にあるものは離岸堤あるいは潜堤としてその機能を果たすことになる。

天端高と波高伝達率の関係については、従来から防波堤あるいは潜堤を対象とした多くの研究が行なわれ、その成果が発表されているが^{1),2),3)}、主として不透過堤を対象としたものが多く、捨石堤形式その他の透過堤を対象としたものは、防波堤としては港研、三港建の実験的研究の結果^{4),5)}があるに過ぎず、また潜堤についても非常に少ない⁶⁾。またこれらの結果はいずれも波形勾配、天端幅などの影響についてはあまり触れていない。しかし海岸構造物周辺に生ずる水理現象にはすべて波形勾配が関係するはずであり、波浪の伝達についてもその例外

ではないと考える。

また天端幅も実用的な観点からはあまり広い範囲に変化するものではないが、透過性の構造物で、特に天端が静水面付近にあるものについては、天端上の摩擦あるいは堤体内への透入によるエネルギーの変化は波高伝達率と密接な関係があるものと考えられるので、天端幅の影響は無視することができない。

以上のような観点から、筆者らは昭和45年以来、捨石堤背後への波高伝達に関する実験的研究を行ない、適宜その成果を発表してきた⁷⁾。本文はこれらの成果をとりまとめたもので、次の諸点について検討したものである。

- (1) 天端高と波高伝達率の関係 — 特に波形勾配の影響について
- (2) 天端幅と波高伝達率の関係
- (3) 越波量と波高伝達率の関係
- (4) 天端上の波浪の変形および伝達について
- (5) 天端の透過性の影響について

なお離岸堤については開口部からの波浪の侵入を含めた3次元の検討が必要であるが、本文では全体を通じて2次元の検討のみにとどめる。

2. 実験設備および方法

実験に用いた水槽は長さ30 m、幅0.6 m、高さ0.8 mの片面ガラス張り鋼製水路で造波装置はフラップ型である。この水槽のほぼ中央に粒径10~20 mmのほぼ一様な碎石を用いて港内外とも1:2勾配の捨石堤模型を設置した。この堤体の空けき率は約40%である。なお堤体の表のり面は実験波による崩壊を防ぐため目の細かい金網で被覆した。

波高の測定は港内側の3点で行なってその平均値を伝達波高 H_T とし、無堤時の同点の平均波高 H との比、 $H_T/H=K_T$ を波高伝達率とした。

実験に用いた波および構造物の諸元は表-1のとおりである。越波水量の測定は図-1に示すような幅30 cmの集水枘を用いて行ない、3波の平均をとった。まず(a)の方法で各天端幅についての越波量 Q_B を測定し、また(b)の方法で測定した越波量 Q_0 を天端幅 $B=0$ の越波量として越波水量比 Q_B/Q_0 を求めた。

* 正会員 大阪工業大学助教授 土木工学科

** 正会員 大阪工業大学講師 土木工学科

表-1 実験の諸元

波		構 造 物	
入射波高 H	2.5~10cm	水深 h	40cm
周期 T	1.3, 1.5, 2.0, 2.5sec	天端高 R	0, 1, 5, 5, 10, 15 cm 2.5, -5, -7.5, -10, -12.5, -15 cm
波長 L	200~480cm	天端幅 B	10, 20, 30, 40, 50, 60 cm
波形勾配 H/L	0.005~0.047	勾 配	1 : 2

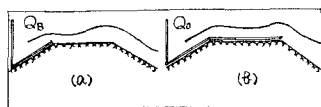


図-1

捨石堤天端周辺における波浪の変形, 伝達機構を明らかにするためにビデオカメラ(ソニー, AVC-3500)による撮影を行なった。すなわち, 直径 30 cm の実験用時計装置(1 r.p.s)を画面に入れて波の変化状況をビデオコーダーとモニターテレビを用いて録画, 再生し, 0.2 sec ごとの波形を調べ, 波の変形, 伝播速度の変化などを求めた。その一例は後の図-9 に示すとおりである。

3. 相対天端高 R/H と波高伝達率 K_T の関係

R/H と K_T の関係は天端幅 B あるいはその無次元量の値によって異なるが, いま天端幅 $B=10$ cm の場合について R/H と K_T の関係を示すと 図-2 のとおりで, $R/H \approx 1$ を境としてその傾向は著しく異なる。すなわち $R/H < 1$ の範囲では R/H の増加に伴って K_T はほぼ直線的に減少するが, $R/H \geq 1$ になると R/H に関係なくほぼ一定の値を示す。すなわち $R/H \geq 1$ になると越波の影響が消滅し, 伝達波高はもっぱら透過エネルギー

ギーによることは明らかである。

いまこの分布を巨視的に判断して $R/H \geq 0$ の場合について, 最小自乗法を用いて R/H と K_T の関係を式で表わすと次のようになる。

$$0 \leq R/H < 1 \text{ の場合}$$

$$K_T = 0.42 (1 - 0.76 R/H) \dots (1)$$

$$1 \leq R/H \text{ の場合 } K_T = 0.10 \dots \dots \dots (2)$$

式(1), (2)は図-2 に直線で表わす。式(1)を $R/H < 0$ の範囲に延長すると, プロットした点群のほぼ平均的な位置を通るから, $R/H < 0$ の場合についても式(1)が適用できることが明らかである。ただし, この範囲の K_T は R/H 以外の要素にも支配されるから, 点の散らばりがかなり著しい。

4. 波形勾配 H/L が K_T におよぼす影響について

R/H と K_T の関係は式(1), (2)に示したとおりであるが, これを詳細に見ると, パラメーター H/L によって K_T が異なっており, しかも H/L の大きいほど K_T の小さくなることが明らかであり, K_T を R/H と H/L の関数式として表わすことができる。

その結果は式(3), (4)のとおりである。

$$0 \leq R/H < 1 \text{ の場合}$$

$$K_T = 0.56 (1 - 0.63 R/H - 0.97 H/L) \dots (3)$$

$$1 \leq R/H \text{ の場合}$$

$$K_T = 0.25 (1 - 24.8 H/L) \dots \dots \dots (4)$$

式(3), (4)の計算値を実験値と比較すると, K_T が比較的大きい場合はほぼ $\pm 10\%$ 前後の誤差である。

$R/H \geq 0$ の場合には H/L の影響は不明瞭であるが, これは天端が静水面付近およびそれ以下の場合には, K_T は H/L よりもむしろ碎波形態, 碎波後の波の変形などの因子に大きく支配されるためであると考えられる。

以上は $B=10$ cm の場合であるが, B がさらに大きい場合にも, R/H と K_T の関係は同一の傾向を示す。もちろん K_T は B の増加とともに減少し, かつその傾向は不明確となる。

5. 天端幅 B と K_T の関係

波形勾配 H/L をパラメーターにとり, B/L と K_T との関係を示すと 図-3 のようになる。同図

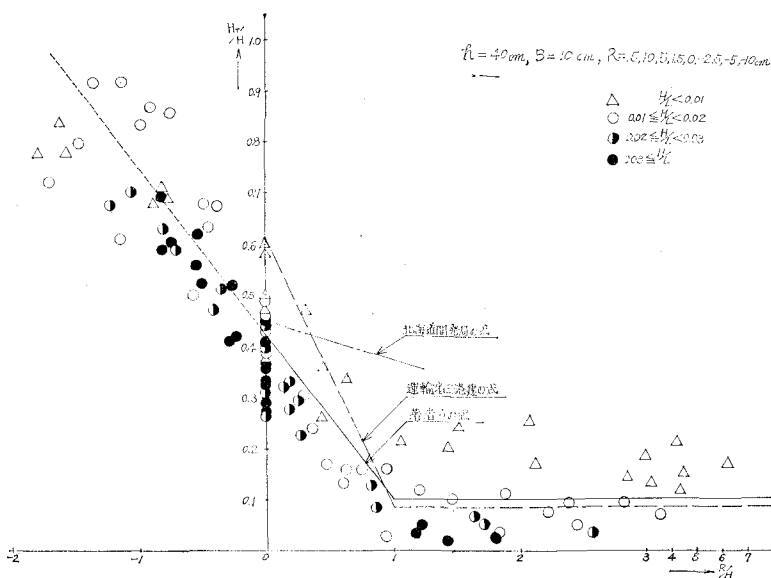


図-2

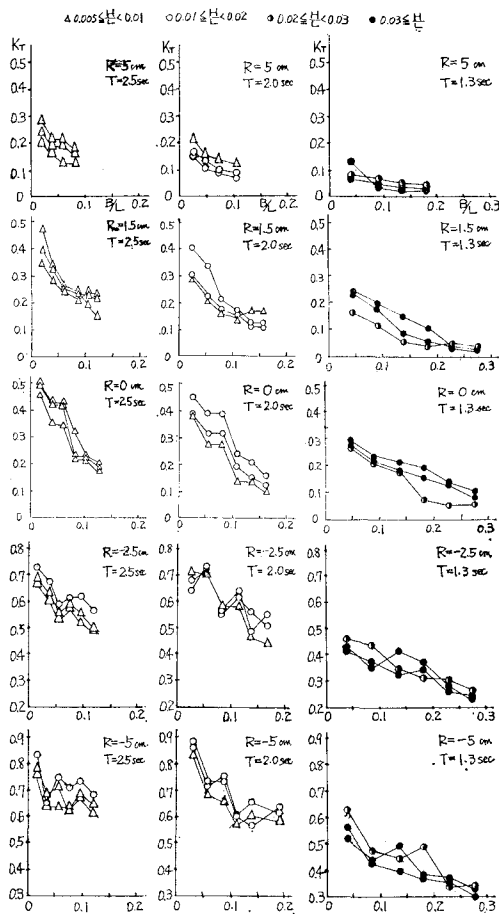


図-3

は $R = 5, 1.5, 0, -2.5$ および -5 cm の順に上から下へ、周期 $T = 2.5, 2.0, 1.3$ sec の順に左から右へ配列したものである。図から次のような点が明らかに認められる。

(1) 一般的に K_T は B/L の増加に伴って直線的または指数関数的に減少する。

(2) $R \geq 0$ の場合には R の増大に伴って K_T の値およびその減少する割合は小さくなる。

(3) $R < 0$ の場合には R の絶対値の増大に伴って K_T の値は増大する傾向にあるが、天端が比較的高い場合 (-2.5 cm, -5 cm) には R/H の値によって碎波形態ならびに波形の変形が支配されるので、その傾向は単純ではない。

(4) 天端が高くあまり越波しない場合 ($R \geq 5$ cm) または天端が低くて波形にあまり大きな変形を与えない場合 ($R \leq -5$ cm) は、波形勾配 H/L の増大に伴って K_T は減少するが、これに比して B/L の K_T におよぼす影響はあまり大きくない。

6. 越波量 Q と K_T の関係

(1) 越波状況

天端高 R はいずれも越波を伴う低いもの (ただし $R \geq 0$) を選んだが、天端上における越波水流の挙動はほぼ次の3種類に分類できるようなのである (図-4)。

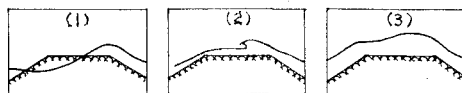


図-4

(1) 水流が天端上から堤体内に透入して行くような状態であって、越波水による港内水面へのエネルギー伝達はほとんどない。越波水量の少ない場合、天端幅の広い場合に生ずる。

(2) 天端上で摩擦、透入によって相当減衰し、港内水面へ流入する。したがって越波水による伝達エネルギーは比較的小さい。 H/L の大きい場合にはだいたいこのような傾向を示す。

(3) 天端上でほとんど減衰せず、直接港内水面へ飛込むタイプのもので、波高伝達率は最も大きく、かつそのエネルギーの大部分は越波によって供給されたものである。これは H/L が小さく、かつ天端幅の小さい場合に最も激しい。

(2) 越波量の算定

波浪として孤立波を考え、その捨石堤天端以上の部分が越波するものと仮定すれば、

$$\frac{V}{V_0} = \left(1 - \frac{R}{H}\right)^{1/2} - \frac{R}{H} \sec^{-1} \left(\frac{R}{H}\right)^{1/2} \dots \dots \dots (5)$$

が得られる。ただし、 V_0 : 孤立波の全容積、 V : 静水面より R 以上の部分の孤立波の容積。

近藤らは実験値との対応から、天端上の波浪の容積の占める割合は計算値の $1/2$ であるとして、 V/V_0 を式 (5) の $1/2$ にとった²⁾。 $V_0 = Q_0$ ($B=0$ の時の越波量) として、 V/V_0 と R/H の関係をプロットすると図-5のとおりで、実験値はほぼ両式の間に入るようである。

(3) 越波水量比

各天端幅ごとに天端を越えて港内水面へ流入する越波

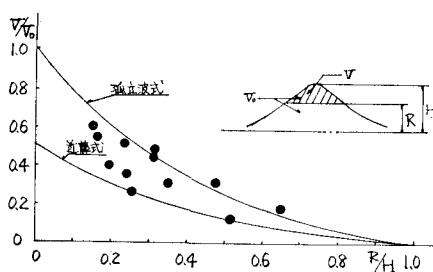


図-5

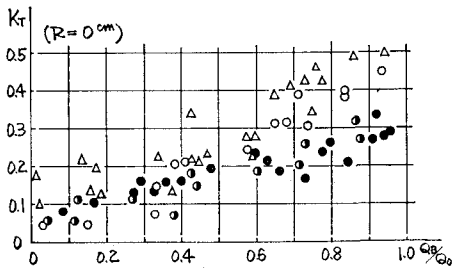


図-6

量 Q_B と天端幅 0 の時の越波量 Q_0 の比 Q_B/Q_0 と K_T の関係を示すと図-6のとおりである。図から明らかなように Q_B/Q_0 が大きくなるにしたがって K_T はほぼ直線的に増加する傾向にあるが、特に Q_B/Q_0 の同一値に対しては H/L の小さい波の方が K_T が大きくなっている点は非常に興味がある。この傾向は $R=1.5$ cm の方がより顕著である。

(4) 相対越波量

$R=0, 1.5$ cm の場合について、相対越波量 ($2\pi q/HL$) と B/L の関係を H/L をパラメーターとしてプロットしたものが図-7である。図から、

(1) H/L の大きな波ほど相対越波量は B/L の増加に伴ってゆるやかに減少する。 H/L の小さい波ほど減少の割合が大きい。

(2) H/L の大きい波の方が相対越波量は常に多い。

次に相対越波量が波高伝達率におよぼす影響を波形勾配をパラメーターとして示すと図-8(a),(b)のとおりである。図から H/L のいかにかわらず ($2\pi q/HL$) が

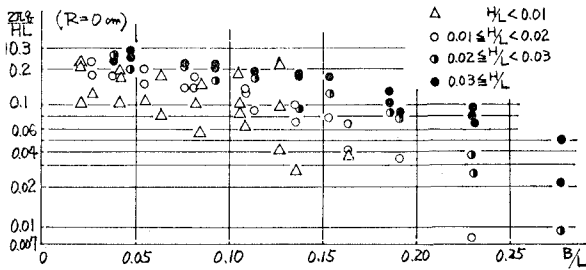


図-7

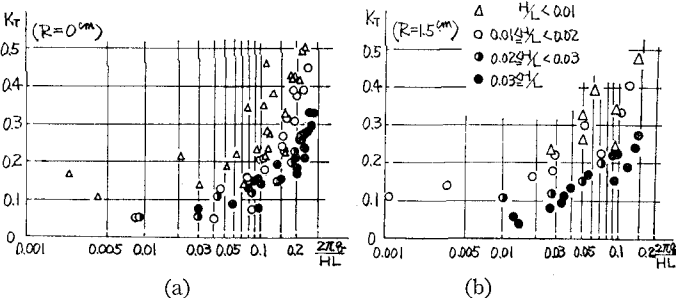


図-8

増大すると K_T の大きくなることは明らかで、かつ ($2\pi q/HL$) が同じ値の場合には H/L の小さい波の方が波高伝達率は大きく、特に $R=1.5$ cm の場合はこの傾向が著しく、 K_T は 1.5~2.5 倍にも達する。

以上のような現象は明らかに捨石による減勢機能の一効果であり、相対越波量としては同等であっても、堤体内を透過するエネルギーの差が伝達率の大小としてとらえられており、 H/L の大きい波の方が減勢されやすいことを示している。

7. 天端上の波の変形と伝達

$R=0, -2.5$ cm, -5 cm, 天端幅 $B=20, 40$ cm の場合について VTR の記録から 0.2 sec ごとの波形の変化を調べた。その一例を示すと図-9(a),(b)のとおりであ

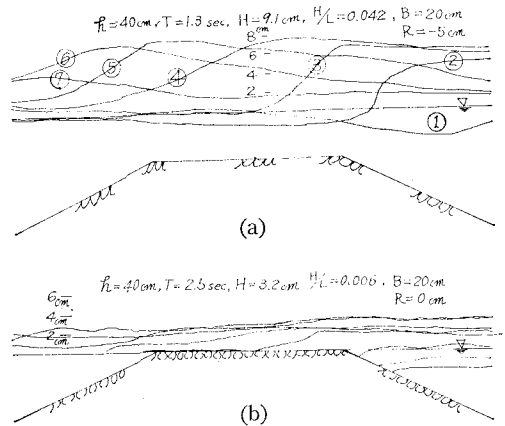


図-9

る。図-9(a)は波形勾配の大きな波の代表的な例で表のり肩付近で碎波し、天端上で碎波後のじょう乱、変形を起こしながら港内側へ伝わる。また図-9(b)は波形勾配の小さな波の代表的な例で、天端上で十分、碎波を起こさない状態で港内側へ伝達される。図-9などを用いて、天端周辺の各点における波の平均伝播速度 V を計算し、縦軸に $V=\sqrt{g(-R+H)}$ 、横軸に x/B (x は表のり肩から港内側へ測った距離) をとって両者の関係を図示すると図-10(a),(b)のとおりで、図から次のようなことがわかる。

(1) 天端上の波の平均伝播速度はほぼ $\sqrt{g(-R+H)}$ に等しい。

(2) 表のり肩付近で碎波する H/L の大きな波の場合には、ほぼ天端の中央付近で V が最大となり、港内側へ向うにしたが

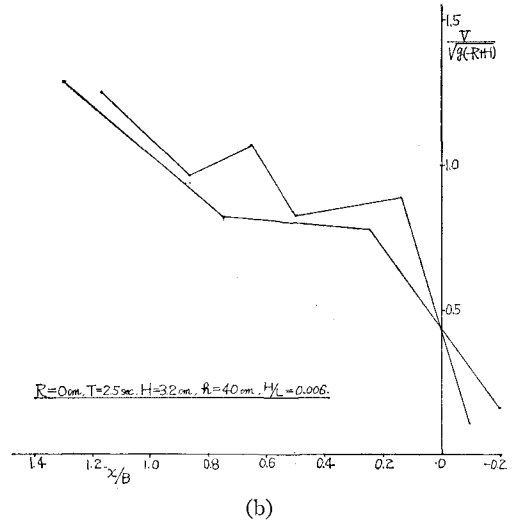
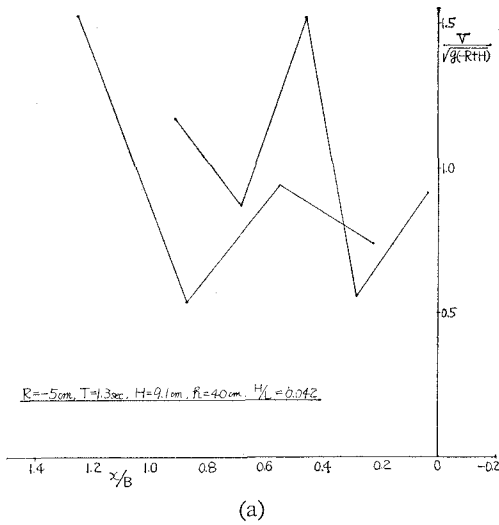


図-10

って減少する。

(3) 明瞭な碎波状態を示さない波形勾配の小さな波は表のり肩から港内側へ向って次第に速度を増す。

(4) 天端幅の広いほど伝播速度は大きくなるが、 H/L が小さい場合にはこの関係は不明瞭である。

8. 天端の粗度および透過性の影響について

天端の粗度および透過性が減勢におよぼす効果を明らかにするため、天端上に鉄板を敷きつめた場合について実験を行ない、透過性の場合と比較した。

VTR の波形変化の記録から比較すると、鉄板を敷いた方が概して波形が変化しにくいためエネルギーが伝わりやすく、したがって伝達波高が大きくなるような印象を受ける。しかしながら、この影響は天端高 R 、天端幅 B によってかなり異なってくることはもちろんである。いま $B=40\text{ cm}$ および 60 cm の場合について、鉄板に

表-2 天端被覆が伝播速度におよぼす効果

R cm	H/L	K ρ	
		B=40cm	B=60cm
0	0.042	1.4	2.5
	0.027	1.3	1.9
	0.016	1.1	1.6
	0.006	1.1	1.5
-2.5	0.042	1.1	1.3
	0.027	1.1	1.1
	0.016	1.0	1.0
	0.006	0.9	1.0
-5.0	0.042	0.9	1.0
	0.026	1.0	1.0
	0.016	1.1	0.9
	0.006	1.1	1.0

ただし、 $K\rho$ = $\frac{\text{鉄板で覆ったときの伝達波高}}{\text{鉄板で覆わないときの伝達波高}}$

よる天端しゃへいが伝達波高におよぼす影響を表示すると表-2のとおりである。

表から明かなように、天端が静水面に近い場合には天端の透過性が伝達波高におよぼす影響はかなり顕著であり、かつ B が大きいほどその影響は著しい。しかしながら R が小さく、すなわち天端水深が深くなるにしたがってその影響は急に小さくなり、無視することが可能となる。

9. 結 論

以上種々の天端高の捨石堤を対象として、波高伝達率とそれに影響をおよぼす諸因子の効果について検討を加えてきた。得られた結論を要約すると次のとおりである。

(1) 相対天端高 R/H と波高伝達率 K_T の関係は $R/H=1$ を境として異なる。この関係を巨視的に見れば式(1)および式(2)で表わすことができる。また式(1)は天端が静水面以下にある場合にもそのまま適用できる。

(2) K_T を R/H と波形勾配 H/L の関数として式(3)および式(4)で表わすことができる。この式は実験値に対して約10%程度の誤差で計算できる。

(3) 天端幅 B あるいはそれを含む無次元量の増大に伴って K_T は直線的あるいは指数関数的な減少を示すが、その減少形態は相対天端高 R/H によってかなり異なる。

(4) 同一の R/H に対しては K_T は H/L および B によって影響を受ける。 R/H が大きくほとんど越波を生じない時には H/L が支配的であり、 R/H の絶対値が小さく多量の越波または走り波を生ずる時は B に関する

要素が支配的な影響を持つ。

(5) 天端が静水面以下にある場合は、 R/H の絶対値の増大に伴って H/L および B/L の影響は小さくなる。

(6) 相当の越波を伴う場合には越波水量比 Q_B/Q_0 と K_T は単純な一次関数的関係を示す。

(7) 相対越波量 ($2\pi q/HL$) の増大に伴って K_T も増大するが、 $2\pi q/HL$ が同一の場合には H/L の小さい方が明らかに K_T が大きくなる。

(8) 天端が静水面およびそれ以下にある場合の天端上の波の平均伝播速度はほぼ $\sqrt{g(-R+H)}$ に近く、のり肩付近で明瞭に碎波する波では天端中央付近で伝播速度が最大になるのに対し、明瞭に碎波しない波では表のり肩から港内側へ次第に伝播速度を増す。

(9) 天端から堤体内へのエネルギー透過によって伝達波高が減少するのは天端が静水面に近い場合のみで、天端高 R の絶対値がやや大きくなると、その効果は期待できなくなる。

天端が静水面付近にある時の波高伝達の機構は非常に多くの因子によって複雑に支配されるものであり、この

一群の実験からは十分明確な解答は得られなかった。今後機会があれば別の方法で検討して行きたいと考えている。

また透過層の構造特性による影響についても今回は触れていないので、今後の課題として行きたいと思う。

参 考 文 献

- 1) 細井・富永：離岸堤による波高減衰について，第6回海岸工学講演会講演集 (1959)
- 2) 近藤・佐藤：防波堤天端高に関する研究，北海道開発局土木試験所月報，No. 117 (1963)
- 3) 合田・竹田：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 (1966)
- 4) 伊藤・藤島・北谷：防波堤の安定性に関する研究，港湾技術研究所報告，Vol. 5, No. 14 (1967)
- 5) 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所：捨石防波堤背後への波高伝達率，(1967)
- 6) 佐藤・三橋・秦：透過式潜堤に関する研究，第14回海岸工学講演会講演集 (1967)
- 7) 久保・上田・井田：捨石堤背後の伝達波高について，第26, 27回土木学会年次学術講演会講演概要，第Ⅱ部 (1971, 1972)