

潜堤の消波効果におよぼす天端幅の影響

永井 莊七郎*・倉田 克彦**・長谷川 恵一***

1. 緒 言

原子力発電所等の大規模な土木構造物を海岸寄りの丘陵地に建設する場合、その建設用地の造成工事においてしばしば大量の掘削岩石が産出される。この多量の岩石の有用な処理方法の1つとして、岩石を工事用港湾施設や物揚場等の防波施設である防波堤の建設材料として用いることが考えられる。この岩石は、そのほとんどが造成工事において掘削される重量 100 kg 以下の比較的小さな砕石である。そのため、波力に対する安定性を考えれば、この掘削岩石を用いた防波堤の構造形式として緩斜面潜堤が適している。

著者らは、外法勾配を変化させた緩斜面潜堤の消波効果に関する研究¹⁾の一部をすでに報告しており、その結果を要約すると次のようである。

(1) 潜堤の消波効果は、その断面形状が一定のとき、すなわち潜堤外法勾配および天端幅が一定のとき、比水深 h/L_i および入射波の波形勾配 H_i/L_i にほとんど関係なく、波高伝達率 $K_t = H_t/H_i$ と相対天端上水深 R/H_i との関係によって検討できる。

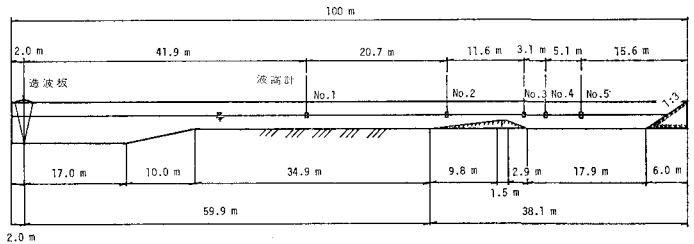
(2) 潜堤外法勾配が 1:10 より急である場合には、勾配が緩いほど波高伝達率 K_t は小さくなるが、外法勾配が 1:10 より緩やかになると、勾配による波高伝達率 K_t の相違はほとんどなくなる。

(3) 捨石潜堤の消波効果に関する模型実験においては、堤体模型として捨石潜堤の代りに不透過板張り潜堤を用いても実用上問題がない。

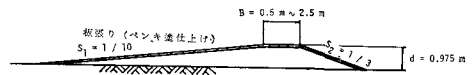
本研究においては、上に述べた(2)および(3)の結果を考慮して、外法勾配が 1:10 の不透過板張り潜堤を用いて、波高伝達率 K_t におよぼす潜堤天端幅の影響について模型実験によって検討を加えた。

2. 実験施設および実験方法

実験は、大阪市立大学工学部河海工学実験場の 図一1 に示すような長さ 100 m、幅 1.2 m、高さ 2.0 m の片面ガラス張り風洞付波浪水槽を用いて行なった。



図一1 波浪水槽および潜堤模型、波高計の位置



図一2 潜堤模型の断面形状

水槽の一端には、高さ 2.8 m のフラップ型造波板をもつ造波装置が、他端には、反射波を防ぐために粗い砕石を用いた消波用斜面(勾配 1:3)が設けられている。

緩斜面板張り潜堤模型は、図一2 に示すように、外法勾配 S_1 および内法勾配 S_2 をそれぞれ 1:10 および 1:3、潜堤高 d を 0.975 m と一定にし、天端幅 B を 0.5 m、1.5 m および 2.5 m に変化させた 3 種類のものを用いた。

入射波および伝達波の計測には、抵抗線式波高計および容量式波高計(いずれも計測技研製)を使用し、これらの波高計からの出力電流を増幅器(計測技研製)により増幅して直視式電磁オシログラフ(共和電業製)に記録し、解析に用いた。

図一1 に示したように、潜堤模型を造波板より約 60 m の位置に設置した。入射波は、一様水深部に設けた波高計 No. 1 によって測定し、潜堤からの反射の影響を受けず、しかもほぼ一様な波高を示す連続 5 波の波高の平均値を入射波高 H_i とした。

潜堤の堤内側の水域への伝達波は、図一3 に示すように、周期 T_t が入射波の周期 T_i とほぼ等しい波と T_i よ

* 正会員 工博 大阪市立大学名誉教授

** 正会員 工修 大阪市立大学助手 工学部土木工学科

*** 学生会員 工修 大阪市立大学大学院 工学研究科研究生

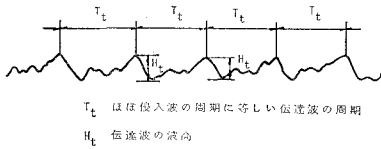


図-3 潜堤上通過後の波形(伝達波形)

りも周期の短い波とが合成された波形を示すため、伝達波高 H_t を適確に定め難い。そのため、本研究においては、入射波の周期 T_i とほぼ等しい周期 T_t で繰返されるほぼ同じ波形の最高点と最低点との間の鉛直距離を堤内側への伝達波の波高 H_t と定め、波高計 No. 3~No. 5 によって測定された波高がほぼ一様となった連続5波の波高の平均値を $H_3 \sim H_5$ とし、これらの平均値 $H_t = (H_3 + H_4 + H_5)/3$ を伝達波高とすれば、波高伝達率は、 $K_t = H_t/H_i$ として求めることができる。

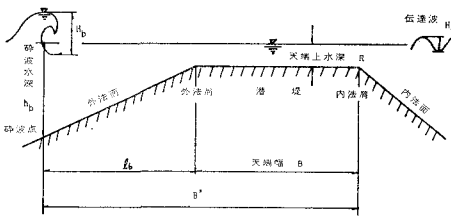


図-4 潜堤上の砕波

図-4 に示すように、入射波が潜堤上で砕波する場合には、砕波波高 H_b および外法肩から砕波点までの距離 l_b を目視観測した。

入射波の周期および波高は、 $T_i = 1.5 \text{ sec}, 1.8 \text{ sec}, 2.2 \text{ sec}, 2.9 \text{ sec}, 3.4 \text{ sec}$ および $H_i = 4.0 \text{ cm} \sim 32.0 \text{ cm}$ である。

なお、表-1 に本実験における実験条件を示す。

表-1 実験の諸元

波 浪		潜 堤	
入射波高 H_i (cm)	4.0~32.0	水深 h (m)	1.00, 1.08, 1.15
周 期 T_i (sec)	1.5, 1.8, 2.2, 2.9, 3.4	潜堤高 d (m)	0.975
波 長 L_i (m)	3.46~10.2	天端幅 B (m)	0.5, 1.5, 2.5
波形勾配 H_i/L_i	0.004~0.080	勾 配	$S_1 = 1/10, S_2 = 1/3$

3. 波高伝達率 K_t におよぼす潜堤天端幅 B の影響

(1) 波高伝達率 K_t と相対天端上水深 R/H_i との関係

— $B = 0.5 \text{ m}, 1.5 \text{ m}, 2.5 \text{ m}$ の場合—

潜堤天端幅 B が $0.5 \text{ m}, 1.5 \text{ m}$ および 2.5 m の場合の波高伝達率 K_t と相対天端上水深 R/H_i との関係は、それぞれ図-5、図-6 および 図-7 に示すとおりである。

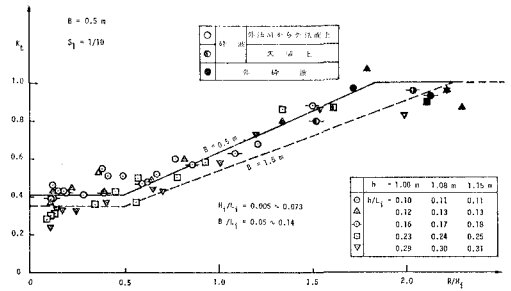


図-5 波高伝達率 K_t と相対天端上水深 R/H_i との関係

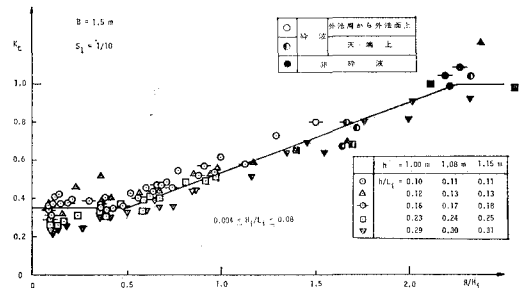


図-6 波高伝達率 K_t と相対天端上水深 R/H_i との関係

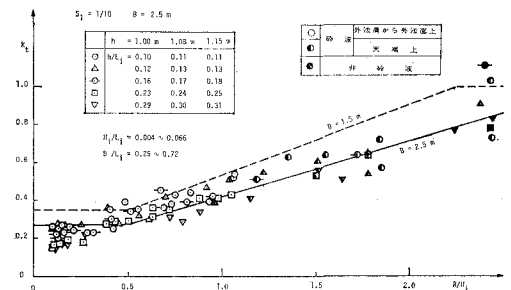


図-7 波高伝達率 K_t と相対天端上水深 R/H_i との関係

図中の ○ 印等は、波高伝達率の実験値で、実線は、 K_t と R/H_i との平均的な関係を示す直線である。また、○●●は、それぞれ潜堤上での入射波の状態(潜堤外法面上砕波、天端上砕波および非砕波)を表わす。

図-5~図-7 によると、実験の範囲内において、波高伝達率 K_t の実験値は、比水深 h/L_i が大きいほど、すなわち入射波の周期が短いほどわずかに小さな値を示すが、実用的にはその差は無視できる。また、入射波の波形勾配 H_i/L_i にはほとんど関係なく、 K_t と R/H_i との間の平均的な関係を示す図中の実線の近傍に分布している。

したがって、天端幅が一定の場合、波高伝達率 K_t は、相対天端上水深 R/H_i によってほぼ一義的に定まるといえる。

図一5～図一7の実線で表わされる K_t と R/H_i との平均的な関係は、次式で表わされる。

1) $B=0.5\text{ m}$ の場合

$$\left. \begin{array}{ll} 0 < R/H_i \leq 0.5 & K_t \doteq 0.40 \\ 0.5 < R/H_i < 1.8 & K_t = 0.46(R/H_i) + 0.17 \\ 1.8 \leq R/H_i & K_t \doteq 1.0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

2) $B=1.5\text{ m}$ の場合

$$\left. \begin{array}{ll} 0 < R/H_i \leq 0.5 & K_t \doteq 0.35 \\ 0.5 < R/H_i < 2.2 & K_t = 0.38(R/H_i) + 0.16 \\ 2.2 \leq R/H_i & K_t \doteq 1.0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

3) $B=2.5\text{ m}$ の場合

$$\left. \begin{array}{ll} 0 < R/H_i \leq 0.5 & K_t \doteq 0.27 \\ 0.5 < R/H_i < 3.0 & K_t = 0.29(R/H_i) + 0.13 \\ 3.0 \leq R/H_i & K_t \doteq 1.0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

図一5～図一7および式(1)～式(3)に示すように、天端幅 $B=0.5\text{ m} \sim 2.5\text{ m}$ の場合、 K_t の値は、 R/H_i にしたがってほぼ直線的に変化するようである。

天端幅 B が一定の場合、波高 H_i が天端上水深 R に比して大きい、すなわち R/H_i の値が比較的小さい場合には、入射波は、潜堤外法面上で砕波して急激にエネルギーを失う。砕波後の波は、激しい渦乱をともなって白く泡立ちながら外法肩まで進行し、天端上を内法肩方向へ渦乱をともなう段波状の波となって進行した後、内法肩上を通過して新たな波動運動を呈するようになる。このとき、入射波は、砕波点から潜堤内法肩までの間の渦乱によりさらにエネルギーの一部を消耗する。

波高 H_i が天端上水深 R に比してしだいに小さくなると、入射波の砕波点は、外法面上の外法肩近くに移り、ついには天端上へ移動していき、入射波が砕波してから堤内側水域において新たな波動運動を呈するまでに失うエネルギーは、しだいに小さくなるので、 R/H_i が大きくなるにしたがって K_t の値は大きくなる。

さらに R/H_i が大きくなると、入射波は潜堤上を砕波せずに通過し、 $K_t \doteq 1.0$ を示すようになる。

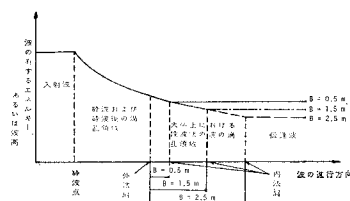
図一5および図一7に示した破線は、式(2)あるいは図一6に実線で示した $B=1.5\text{ m}$ の場合の K_t と R/H_i との平均的な関係を示すものであり、天端幅 $B=2.5\text{ m}$ の場合には、実験値は破線より小さく、また、 $B=0.5\text{ m}$ の場合には、実験値は破線より大きく、天端幅 B が大きくなるほど同じ相対天端上水深 R/H_i の値に対する波高伝達率 K_t の値は小さくなり、 K_t の違いは、 R/H_i が大きくなるにしたがって増大している。

図一5～図一7に示すように、 $B=0.5\text{ m}$ の場合には、 $R/H_i \geq 1.7$ になると入射波は砕波せずに潜堤上を通過す

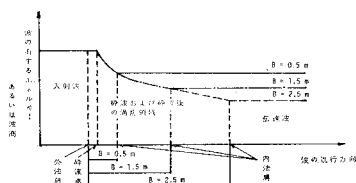
るが、 $B=1.5\text{ m}$ の場合には、 $R/H_i \geq 2.0$ 、 $B=2.5\text{ m}$ の場合には、 $R/H_i \geq 2.5$ にならないと入射波は潜堤上で砕波する。すなわち、潜堤天端幅が大きくなると、潜堤天端幅が小さい場合に砕波せずに通過する波も砕波するようになる。

いずれの天端幅 B の場合においても入射波が砕波する $R/H_i < 1.7$ の範囲では、天端幅が大きくなるほど入射波の砕波点は沖側に移り、砕波した後の波が潜堤内法肩まで進行する間に渦乱によって失われるエネルギーの量が大きくなるので、 K_t の値は小さくなる。

$R/H_i \geq 1.7$ になれば、天端幅 B が小さい場合には砕波しないで潜堤上を通過する波高 H_i の比較的小さい波も、天端幅 B が大きくなると潜堤上で砕波するようになるため、天端幅が大きいくほど K_t は小さな値を示すようになる。



図一8 外法面上砕波の場合のエネルギー変化



図一9 天端上砕波の場合のエネルギー変化

図一8および図一9に、波のもつエネルギーの変化あるいは波高変化を模式的に示す。

入射波高 H_i が天端上水深 R に比して大きい $R/H_i \leq 0.5$ の範囲では、入射波が外法肩よりかなり沖側の外法面上で砕波するので、図一8に示すように、天端幅 B が大きくなることによる渦乱のエネルギー損失の増加量は、全エネルギー損失に比して小さいが、 R/H_i が大きくなり入射波が天端上で砕波するようになると、図一9に示すように、エネルギー損失の比がしだいに大きくなるため、天端幅の違いによる K_t の差もしだいに大きくなる。

さらに R/H_i が大きくなり、 $1.7 \leq R/H_i < 2.0 \sim 3.0$ になると、先に述べたように、天端幅 B が小さい場合に砕波せずに潜堤上を通過した入射波も天端幅 B が大きくなると砕波するようになる場合があるため、天端幅 B の違いによる K_t の差は、さらに大きくなると考えられる。

天端幅 B が異なる場合にも、それぞれの天端幅を有する緩斜面潜堤について、潜堤の消波効果は、波高伝達率 K_t と相対天端上水深 R/H_i との関係をを用いて検討することができる。このことは、外法勾配を変化させた捨石潜堤に関する実験の結果¹⁾と一致しており、潜堤の断面形状が一定であれば、波高伝達率 K_t は R/H_i によってほぼ一義的に定められると言える。

(2) 波高伝達率 K_t におよぼす潜堤天端幅 B の影響

久保・井田²⁾は、外法勾配 S_1 が 1:2 の潜堤の波高伝達率 K_t と相対天端幅 B/L_i との関係を検討しているが、 S_1 が 1:10 の潜堤については、 K_t と B/L_i との関係は明確に得られなかった。

潜堤の外法勾配 S_1 が 1:10 の場合、入射波の波高 H_i と天端上水深 R との比によって、すなわち、相対天端上水深 R/H_i の値より入射波の砕波点が大きく変動するため、砕波後の渦乱によって失うエネルギーを表わすには、たんに天端幅 B と波長 L_i との関係を表わす B/L_i は不適當である。 S_1 が 1:2 の潜堤の場合は、砕波点は外法肩の近傍であり、砕波後の波の渦乱の距離が R/H_i の値にほとんど関係なく天端幅 B とほぼ等しくなるので、波高伝達率 K_t におよぼす潜堤天端幅 B の影響を B/L_i を用いて表わすことができると考えられる。

天端幅 B が 0.5 m, 1.5 m および 2.5 m の場合の $h/L_i=0.10\sim0.31$, $H_i/L_i=0.004\sim0.08$ におけるすべての実験値を用いて、入射波の砕波点から潜堤内法肩までの距離 $B'=B+l_b$ (図-4) の入射波の波長 L_i に対する比 B'/L_i と K_t との関係を表わしたものが、図-10 である。

実験値にばらつきがあるが、波高伝達率 K_t は、 B'/L_i によってほぼ一義的に表わされ、 K_t と B'/L_i との平均的な関係は、図中の実線および式 (4) によって与えられる。

$$\left. \begin{array}{l} K_t = (17 \cdot B'/L_i)^{-1/2} \\ \text{ただし、} \\ B'/L_i \geq 0.10 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

0.10 ≤ B'/L_i < 0.6 の範囲では、 B'/L_i の値が大きく

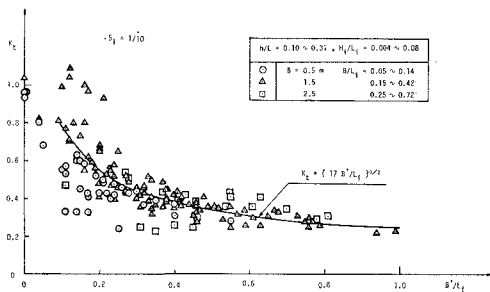


図-10 波高伝達率 K_t と B'/L_i との関係

なるにしたがって K_t の値は急激に小さくなり、 $0.6 \leq B'/L_i < 1.0$ の範囲では、 $K_t=0.25\sim0.35$ となって B'/L_i の増加にともなう K_t の減少の割合は小さい。すなわち、入射波の砕波点から潜堤内法肩までの距離 B' が $(0.5\sim0.6)L_i$ 以上であれば、 K_t の値は、 $K_t=0.25\sim0.35$ となり、 B'/L_i による変化は小さい。

式 (4) に示すように、 K_t が B'/L_i のみの関数として表わせることより、入射波の砕波および砕波後の渦乱の継続距離が波高伝達率を決定する大きな要因であることを示すものであると解釈される。

式 (4) および相対砕波水深 h_b/H_0 と沖波の波形勾配 H_0/L_0 との関係をを用いれば、実験の範囲内における任意の天端幅に対する K_t の値を次のように算定することができる。

(I) 入射波の周期 T_i および波高 H_i から沖波の波高 H_0 とその波長 L_0 を計算し、砕波指標³⁾を用いて砕波水深 h_b を求める。

(II) 潜堤の外法肩から砕波点までの距離 $l_b=10(h_b-R)$ の値を求める。

ただし、 $h_b < R$ の場合には、 $K_t \equiv 1.0$ とする。

(III) $B'/L_i=(B+l_b)/L_i$ の値を計算し、式 (4) から波高伝達率 K_t の値を求める。

(3) 潜堤の消波効果に関する纏め

久保・井田²⁾および合田他⁴⁾らの矩形あるいは S_1 が 1:2 の実験においても、 K_t は R/H_i によってほぼ一義的に定められている。したがって、潜堤の断面形状を表わす諸元 (S_1, S_2, B, d) が一定のとき、潜堤の消波効果、すなわち、波高伝達率 K_t は、相対天端上水深 R/H_i によってほぼ一義的に定められ、一般に次式のような形で与えられる。

$$K_t = a(R/H_i) + b \quad (a, b \text{ は実験により定まる係数})$$

$S_1=1:10$ の緩斜面潜堤の天端幅が変化する場合には、 K_t は B'/L_i を用いてほぼ一義的に表わせる。

K_t は R/H_i によってほぼ一義的に定められるが、 R/H_i の値は入射波の砕波位置を決定する値、すなわち、入射波が外法面上あるいは天端上において砕波するか、砕波せずに潜堤上を通過するかを示すものであって、砕波点と内法肩との間の距離、すなわち、入射波が砕波後に渦乱によって失うエネルギーを表わすものではない。したがって、外法勾配や天端幅が変化すれば、同じ R/H_i の値であっても、砕波点から内法肩までの距離、すなわち、渦乱によるエネルギー損失が生じる区間の長さが変化する。そのため、潜堤の断面形状が変化すれば、 K_t と R/H_i との関係は、 $K_t=a(R/H_i)+b$ の形の 1 つの式で表わせなくなる。一方、 B'/L_i は砕波および砕波後の渦乱の継続する距離を表わす値であるため、天端幅が異なる場合についても K_t と B'/L_i との間にはある 1 つの関係式が成り立つと考えられる。

4. 結 論

緩斜面板張り潜堤の消波効果に関する実験の結果は、次のように纏められる。

(1) 潜堤の天端幅あるいは外法勾配が変化する場合には、それぞれの断面について、潜堤の消波効果は、比水深 h/L_i および入射波の波形勾配 H_i/L_i にほとんど関係なく波高伝達率 K_t と相対天端上水深 R/H_i との関係で表わされ、その関係は、一般に次式のように書ける。

$$K_t = a(R/H_i) + b$$

ここで、 a, b は、潜堤天端幅あるいは外法勾配によって異なる定数

(2) 緩斜面潜堤の天端幅のみが変化し、その他の諸

元が一定のとき、 K_t は、 B'/L_i の関数として次式のよう
に表わすことができる。

$$K_t = (17 \cdot B'/L_i)^{-1/2}$$

ただし、

$$B'/L_i \geq 0.10$$

参 考 文 献

- 1) 永井莊七郎・小田一紀・倉田克彦：大水深緩斜面潜堤に関する研究，第22回海講論文集，pp. 409-414, 1975.
- 2) 久保弘一・井田康夫：捨石堤背後の伝達波高について，第20回海講論文集，pp. 49-54, 1973.
- 3) 土木学会編：水理公式集，p. 506, 1971.
- 4) 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回海講講演集，pp. 87-92, 1966.