

潜堤の越波機構と波高伝達率について

筒井 茂 明*・河野 二 夫**

1. 緒 言

海岸波浪の制御を目的とする各種の消波構造物が考えられている。その中にあって潜堤、特に不透過潜堤については、その天端を静水面より高くしないと波浪減衰効果が少ないこと、さらに最近の海域汚染に対する海水交換の問題や堤内水位上昇の問題などにより見捨てられがちであった。しかし、沖縄におけるリーフ内外の波の様子を観察すると、風浪に対してかなりの波浪減衰効果が認められる。また、潜堤と空気防波堤などの他の消波構造物との併用により欠点を相補うことも考えられるので、この種の構造物の波浪減衰効果について再検討する必要があると考える。

潜堤のような水深急変部における波の反射・伝達についてはこれまで多くの実験的・理論的研究^{1),2),3)}が成されてきた。これらの理論的研究における主要な境界条件は、水深急変部での流速および水位が連続であるとしていることである。しかし、潜堤の天端が高く静水面近くまで達すると水位は不連続となり、越波的な様相を呈してくる。このときの伝達波には倍周波数成分波が発生している。規則波のみを表わす上述の理論はこれらの実状に合致しない。したがって、越波的な波の伝達現象を考慮した理論的な取扱いを行う必要がある。

本研究はこのような観点から、水深急変部の基本型の1つである天端幅の小さい潜堤が設置され、かつその天端が静水面近くまで達している場合について考え、周知のFuchs⁴⁾の理論を補正し、潜堤構造物の波浪減衰機構について検討するものである。

2. 2次元モデル

(1) 理論解析

進行波によって単位時間に単位幅を横切って輸送される平均のエネルギー量は、

$$W_t = E_t C_g \cdot [1 + O\{(H/L)^2\}] \dots \dots \dots (1)$$

で表わされる。ここに、 E_t ；単位面積当りの平均エネ

ギ一、 C_g ；群速度、 H 、 L ；入射波の波高および波長、 O ；Landau の記号である。

図—1 に示すような潜堤を考える。反射・伝達されるエネルギー量は、Fuchs によるとそれぞれ次式で表わされる。

$$W_r = E_t C_g \cdot (2kh_c + \sinh 2kh_c) / (2kh + \sinh 2kh) \dots \dots \dots (2)$$

$$W_t = E_t C_g \cdot [1 - (2kh_c + \sinh 2kh_c) / (2kh + \sinh 2kh)] + O\{(H/L)^2\} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $k=2\pi/L$ ；波数である。

このように Fuchs の理論では $O\{(H/L)^2\}$ の項が無視されている。より低次の項が存在すればそれを考慮する必要がある、これが次に述べる部分重複波の越波によるエネルギー輸送量である。

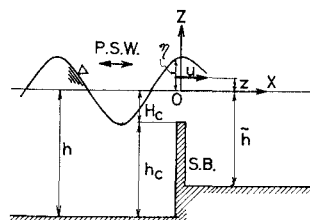
潜堤の比堤高 $h_c/h \approx 1$ のときには、潜堤前面で部分重複波が生じ、潜堤の両側で水位不連続となり波は越波的な様子となるので、鉛直壁に対する越波量を求めるときと同様に次式⁵⁾が成立すると仮定する。

$$\eta + (u_w^2 + w_w^2) / (2g) = u^2 / (2g) + z \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 η 、 u_w 、 w_w はそれぞれ重複波の波形、水平および鉛直方向の水粒子速度、 g ；重力の加速度である。この式に微小振幅重複波理論による諸量を代入すると、次式がえられる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{u^2}{2gH} &\approx \frac{1}{2}(1+K_r) \cos \sigma t - \frac{z}{H} \\ &+ \lambda \{ (1-K_r)^2 \cdot \coth^2 kh \cdot \cos^2 \sigma t \\ &+ (1+K_r)^2 \cdot \sin^2 \sigma t \} \\ \lambda &= (\pi/4) \cdot (H/H_0) \cdot (H_0/L_0), \quad |x| \leq 1 \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

ただし、 $\sigma=2\pi/T$ (T ；周期)、 K_r ；反射率とし、添字



図—1 座 標 系

* 琉球大学助手 理工学部 土木工学科

** 琉球大学教授 理工学部 土木工学科

。は深海波の諸量を表わす。

ここで、潜堤上部を x の正方向に通過するエネルギー流束を考える。式 (4) の成立する範囲を $z \approx [0, \eta]$ とし、 $O\{(H/L)^2\}$ より低次の項の初項のみを求めるときは、波動による項は省略することができ、越波エネルギー輸送量は次式で与えられる。すなわち、

$$W_{ov} \approx \iint u \left(\frac{1}{2} \rho u^2 + g z \right) dz dt \quad \dots\dots\dots (6)$$

から、

$$\left(\frac{W_{ov}}{T} \right) / (E_i C_g) \approx \frac{32}{5} \cdot \left\{ \frac{\sqrt{\pi}}{\Gamma(1/4)} \right\}^2 \cdot (1 + K_r)^{5/2} \times \left(\frac{H}{H_0} \right)^{5/2} \cdot \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{1/2} \left\{ 1 + O \left(\frac{H_0}{L_0} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

がえられる。ここに、 Γ : ガンマ関数である。

静水面より上側では越波によるエネルギー輸送があり、これと静水面下に対する Fuchs の理論によるエネルギー輸送とが共存すると仮定すると、入射波のエネルギー輸送量 $W_i = \text{const.}$ の条件から次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \Sigma \tilde{W}_r &= \tilde{W}_r - \tilde{W}_{ov} \\ \Sigma \tilde{W}_t &= \tilde{W}_t + \tilde{W}_{ov} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 Σ はエネルギー輸送量の総和を表わし、 $\tilde{W}_r, \dots$ は入射波のエネルギー輸送量 $E_i C_g$ で無次元化したものである。さらに、右辺の $\tilde{W}_r, \tilde{W}_t$ は Fuchs の理論からえられるエネルギー輸送量である。

伝達率 K_t を伝達波高と入射波高との比で表わし、エネルギー損失係数などを用いると、反射・伝達率を表わす式として式 (8) から最終的に次式がえられる。

$$K_r^2 = C^{(1)} \cdot \frac{2kh_c + \sinh 2kh_c}{2kh + \sinh 2kh} - C^{(2)} \cdot (1 + K_r)^{5/2} \times \left(\frac{H}{H_0} \right)^{5/2} \cdot \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$K_t^2 = B \left\{ (1 - k^{(1)}) \cdot \left(1 - \frac{2kh_c + \sinh 2kh_c}{2kh + \sinh 2kh} \right) + (1 - k^{(2)}) \cdot C^{(2)} \cdot (1 + K_r)^{5/2} \right\} \times \left(\frac{H}{H_0} \right)^{5/2} \cdot \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$B = \left(\frac{\cosh k\tilde{h}}{\cosh kh} \right)^2 \cdot \frac{2kh + \sinh 2kh}{2k\tilde{h} + \sinh 2k\tilde{h}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 $C^{(1)}$: 鉛直壁の反射率に関する係数、 $C^{(2)}$: 越波エネルギー量係数、 $k^{(1)}$: 潜堤上部で生ずる乱れなどによるエネルギー損失係数、 $k^{(2)}$: 越波した水塊が落下するときのエネルギー損失係数であり、これらは実験的に決定される係数である。

(2) 各種の係数の決定

ここでは実験値との比較により係数 $C^{(1)}$ 、 $C^{(2)}$ 、 $k^{(1)}$ 、 $k^{(2)}$ を決定するが、その際に用いられる実験値⁶⁾ は、一様水深 ($h = \tilde{h}$, $B = 1$) の場合に対する実験によるもので

ある。

16 mm カメラにより部分重複波形を撮影し、Healy の方法により反射波高を求めた。伝達波に倍周波数成分波が現われる場合には、この成分波の影響はかなり大きいと考えられる。また、このときには伝達波形は観測地点により異なるので、倍周波数成分波の最も顕著に観測される 2~3 地点に波高計を設置し、得られた波形記録を Neumann⁷⁾ が平衡領域での海洋波のスペクトルを求める際に用いた見かけの周期とそれに対する波高という考えに基づき伝達波を求め、そのうちの最大値を用いた。

a) 反射係数 $C^{(1)}$

$C^{(1)}$ は Greslou-Mahe⁸⁾ による鉛直壁に対する反射率の実験から、次の近似式を採用する。

$$C^{(1)} = \begin{cases} 1.0 & H_0/L_0 \leq 0.005 \\ 0.984 - 2.07 \cdot (H_0/L_0) & 0.005 < H_0/L_0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (12)$$

b) 越波エネルギー量係数 $C^{(2)}$

式 (9) からえられる関係

$$\left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{1/2} \propto \varphi^{(2)} \equiv \left(C^{(1)} \cdot \frac{2kh_c + \sinh 2kh_c}{2kh + \sinh 2kh} - K_r^2 \right) \times (1 + K_r)^{-5/2} \cdot \left(\frac{H}{H_0} \right)^{-5/2} \quad \dots\dots\dots (13)$$

を両対数紙上に表わすと 図-4 となる。実験値は勾配

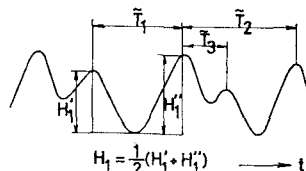


図-2 伝達波高の定義

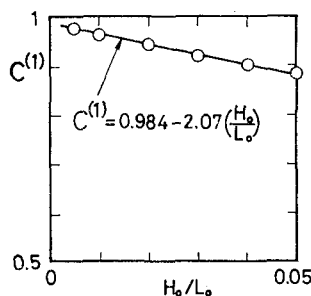


図-3 反射係数 $C^{(1)}$

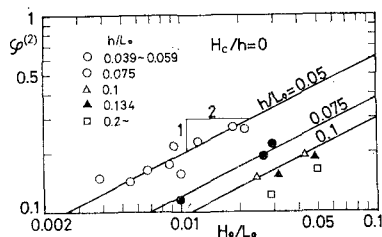


図-4 $\varphi^{(2)}$ と H_0/L_0 との関係

1/2 の直線上に存在し、式(13)が成立することを示している。他の比水深 H_c/h についても同様の結果がえられ、 $C^{(2)}$ は図-5 のようになる。

c) 越波した水塊の落下時のエネルギー損失係数 $k^{(2)}$

$h_c/h=1$ のときには式(10)から、

$$\left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{1/2} \propto \psi^{(2)} \equiv K_L^2 \cdot (1+K_r)^{-5/2} \cdot \left(\frac{H}{H_0}\right)^{-5/2} \quad \dots\dots\dots(14)$$

となり、図-6 がえられる。前項と同様に上式がほぼ成立することを示している。このときの $k^{(2)}$ を $k_0^{(2)}$ とおくと表-1 がえられる。

次に、 $h_c/h < 1$ のときには以下のようにして $k^{(2)}$ を定める。 $0 < k^{(1)} < 1$ となるような $k^{(2)}$ の存在範囲は式(10)から図-7の斜線部となる。また、 h_c/h が小さくなると越波的な様相を呈しなくなるので、エネルギー損失係数 $k^{(2)}$ は急激に小さくなると考えられ、次式を仮定することができる。

$$k^{(2)} = k_0^{(2)} \cdot \exp \{-\alpha(H_c/h)^2\} \quad \dots\dots\dots(15)$$

$k_0^{(2)}$ は h/L_0 により変化するから $\alpha = \beta \cdot (h/L_0)$ とすると次式がえられる。

$$k^{(2)} = k_0^{(2)} \cdot \exp \{-\beta(H_0/h) \cdot (H_c/\sqrt{H_0 L_0})^2\} \quad \dots\dots\dots(16)$$

$\beta=120$ に対して図-8 がえられる。

d) 潜堤上部での乱れによるエネルギー損失係数 $k^{(1)}$
前項 b), c) の係数 $C^{(2)}$, $k^{(2)}$ が定められると、式(10)から $k^{(1)}$ を求めることができる。実験値と良い一致を示すように $k^{(1)}$ を定めると図-9 がえられる。

(3) 越波エネルギー量と反射・伝達率

a) 越波エネルギー量

まず、式(9)から K_r を求め、越波エネルギー量、

$$\tilde{W}_{ov} = C^{(2)} \cdot (1+K_r)^{5/2} \cdot \left(\frac{H}{H_0}\right)^{5/2} \cdot \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots(17)$$

と H_c/h との関係を図-10 に示す。波形勾配 H_0/L_0 が大きく、波長水深比 h/L_0 の小さい波ほど越波エネルギー量が大きい。このエネルギー輸送量の一部が乱れ

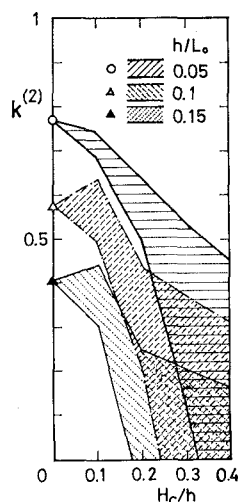


図-7 $k^{(2)}$ の存在範囲

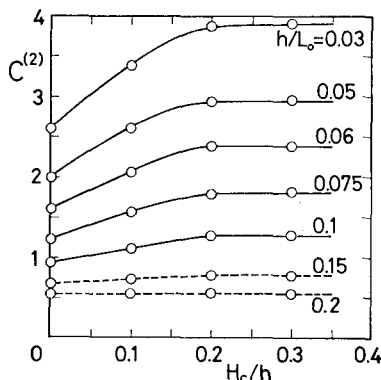


図-5 越波エネルギー量係数

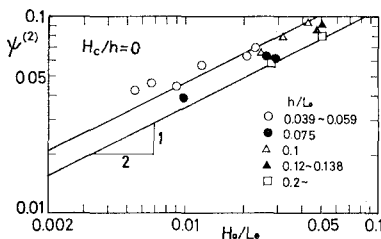


図-6 $\psi^{(2)}$ と H_0/L_0 との関係

表-1 $k_0^{(2)}$ の値

h/L_0	$k_0^{(2)}$
0.05	0.770
0.075	0.673
0.10	0.574
0.15	0.403

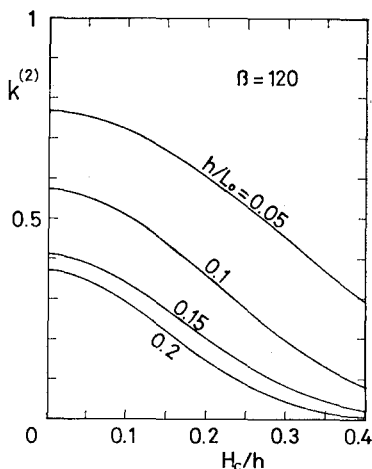
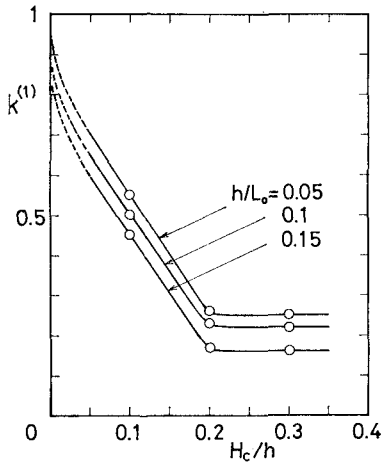
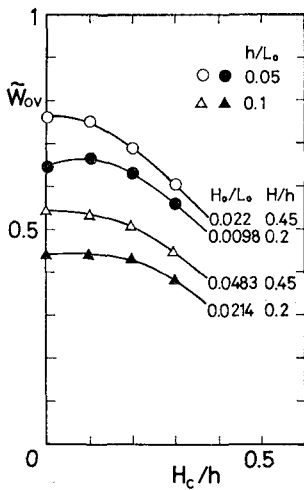
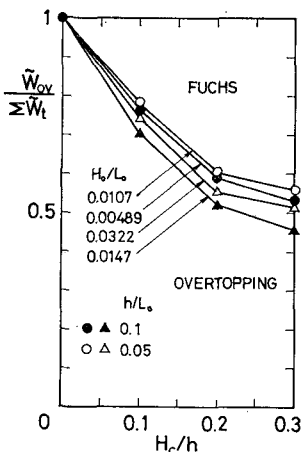


図-8 エネルギー損失係数 $k^{(2)}$


 図—9 エネルギー損失係数 $k^{(1)}$


図—10 越波エネルギー量



図—11 伝達波の全エネルギー輸送量と越波エネルギー量との関係

などにより逸散され、残部が伝達波のエネルギー輸送量に寄与する。全伝達エネルギー量と越波エネルギー量の関係は 図—11 のようになり、比堤高が小さくなると後者が急激に減少することがわかる。

b) 反射率と伝達率

図—12 に反射・伝達率を示す。反射率は h/L_0 によりやや分布幅をもっているが、伝達率の分布幅は小さい。また、長周期の波はど通過しやすく反射率は小さいが、このときには 図—8, 9 に示したようにエネルギー損失係数が大きいため、結果として伝達率はやや小さい値となる。結局、式 (9), (10) からわかるように伝達率に及ぼす影響因子としては波形勾配 H_0/L_0 が重要であり、図—12 を H_0/L_0 をパラメーターとして取りまとめると図—13 がえられる。

(4) 倍周波数成分波の発生限界

伝達波に倍周波数成分波が発生する原因は、主に越波した水塊の落下に起因するものであるから、前述のエネルギー損失係数 $k^{(2)}$ と密接な関係がある。式 (16) 中の変数 $H_c/\sqrt{H_0 L_0}$ は以前に著者の 1 人⁹⁾ が倍周波数成分波の発生を特性づけるパラメーターとして提示したものである。合田¹⁰⁾ らも伝達波形の分類を行っているが、波長の影響が加味されていないので十分とはいえない。式 (16) 中の 2 変数 H_0/h と $H_c/\sqrt{H_0 L_0}$ との関係から、倍周波成分波の発生限界を示すと 図—14 のとおりである。

3. 有限長潜堤に関する実験

ここでは、潜堤の法線長が反射・伝達率に対してどの程度の影響を及ぼすかを実験により検討する。

(1) 実験条件

実験に用いた水槽は、琉球大学理工学部石嶺水理実験所の有効長約 40m、幅 22m の平面水槽であり、図—15 に示すようにコンクリート製の模型潜堤が設置されている。6 台の容量式波高計（計測技研製）を潜堤の中心線上に設置し、No. 1, No. 2, No. 3~6 の波高計によりそれぞれ入射波高、潜堤前面での部分重複波高、および伝達波高を同時測定した。実験波としては、周期 0.69 ~ 2.01 sec., 入射波高 1 ~ 5.8 cm, 潜堤設置点での水深波長比 $h/L = 0.0305 \sim 0.261$ となる合計 77 個の波を用いた。

(2) 実験結果

a) 反射率に及ぼす相対潜堤長 l/L の影響

反射率は、潜堤直前での部分重複波高と入射波高とから求めた。これと l/L の関係を 図—16 に示す。

部分重複波の測定点は潜堤の中央であるから、 l/L の値により潜堤の両端からの攪乱波のその点での位相関係が定まり、同位相のときには部分重複波高は最大とな

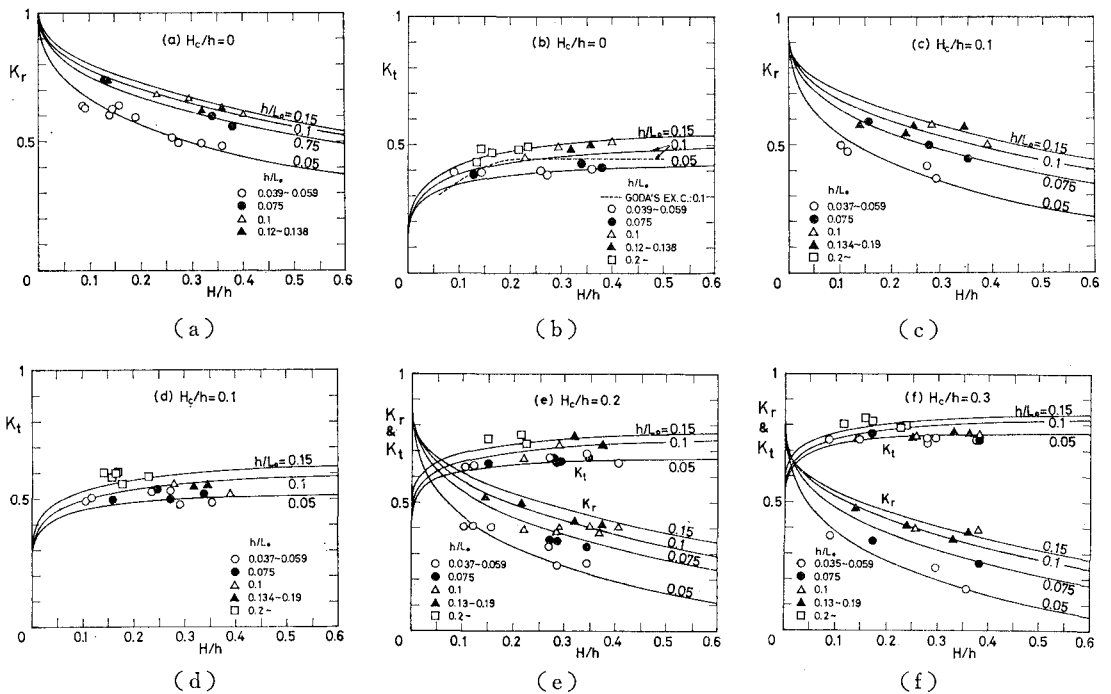


図-12 反射率および伝達率

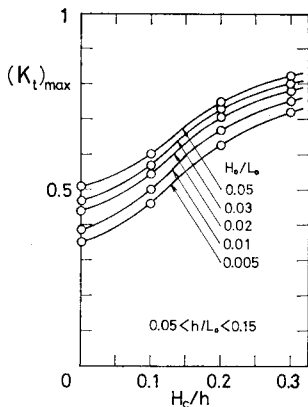


図-13 伝達率

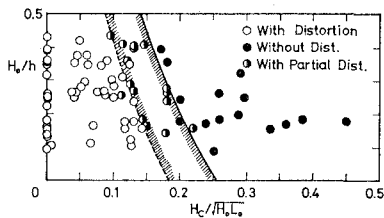


図-14 倍周波数成分波の発生限界

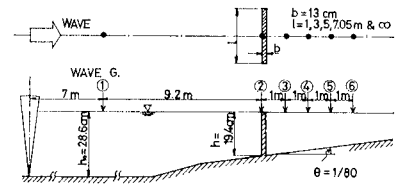


図-15 実験条件

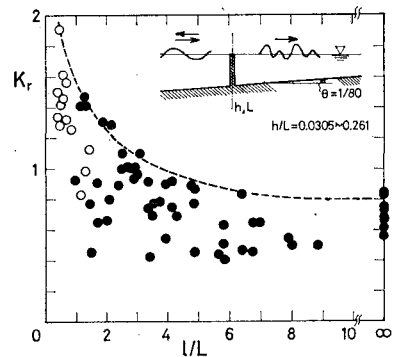


図-16 反射率におよぼす相対潜堤長の影響

る。したがって、図-16 に示した実験値の包絡線は、潜堤中央で起こりうる最大波高に対する反射率を表わすと考えることができる。 $l/L < 4 \sim 5$ においては潜堤長の有限性の影響が顕著であり、 $l/L > 4 \sim 5$ では $l/L \rightarrow \infty$

のときの値に漸近することがわかる。島堤に対する合田¹¹⁾らの研究によると、 $l/L \geq 4.4$ のときには両端からの散乱波の影響は 10% である。潜堤の場合にもほぼこれに対応するようである。

b) 伝達率に及ぼす相対潜堤長 l/L の影響
伝達波高は 2. (2) と同様にして求めたものである。

これを潜堤設置点での入射波高との比を伝達率として l/L との関係を示すと、図-17 のようになる。ただし、○印は波高計 No. 3 の観測値であり、次項で述べる減衰領域の境界付近に位置する。このように $l/L < 1.3$ のときには、潜堤両端からの攪乱波の影響が大きいことがわかる。また、減衰領域内での伝達率は $1.3 < l/L < 4 \sim 5$ の範囲で $l/L \rightarrow \infty$ のときの値より約 15~20% 程度大きくなる。

c) 波高減衰領域と相対潜堤長 l/L との関係

波高減衰領域は、波高計 No. 3~6 での観測値と 35 mm フィルムによる写真撮影の結果とを併せて検討して決定した。その結果は 図-18 に示すとおりであり、波高減衰領域の長さ l_d/L は潜堤長 l/L により一義的に決定されることがわかる。

$$l_d/L = (1/1.87) \cdot (l/L)^{1.11} \dots\dots\dots (18)$$

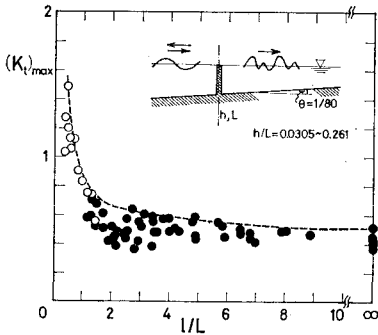


図-17 伝達率におよぼす相対潜堤長の影響

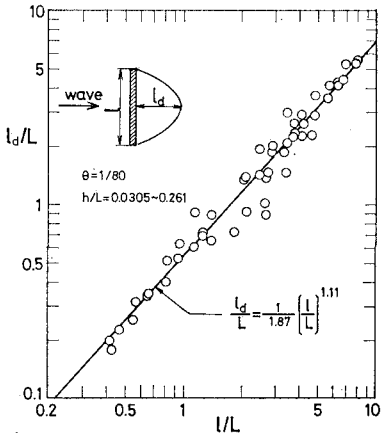


図-18 波高減衰領域

4. 結 言

以上、水深急変部に対する 1 モデルとして潜堤を考え、波のエネルギー伝達機構について調べた結果を要約

すると次のようになる。

まず、2 次元モデルについては簡単な越波モデルを用いて越波によるエネルギー輸送量は $O\{(H_0/L_0)^{1/2}\}$ であることを示した。これを考慮して Fuchs の理論を補正し、さらに、越波エネルギー量係数、エネルギー損失係数などを用いると妥当な結果がえられることがわかった。このことは、水深急変部での水粒子速度の的確な評価が重要であることを示している。なお、本研究では一様水深、 $B=1$ の場合に対して述べたが、この方法は潜堤両側での水深が異なる場合、 $B \neq 1$ にも適用することができるものである。

また、3 次元モデルに対して、潜堤の法線長の有限性が反射・伝達率に及ぼす影響は相対潜堤長 $l/L < 4 \sim 5$ のとき顕著であり、潜堤背後の波高減衰領域は l/L により一義的に決定されることがわかった。

なお、ここでは潜堤構造物において重要な問題である堤内水位上昇について触れることができなかった。

最後に、本研究にあたり 2 次元モデルに対する実験資料の使用を許された徳島大学工学部三井宏教授に深謝の意を表わすとともに、この研究は文部省科学研究費補助金(奨励 A)によるものであることを明記する。

参 考 文 献

- 1) Miles, J.W.: Surface-wave scattering matrix for a shelf, J. Fluid Mech., Vol. 28, pp. 755~767, 1967.
- 2) Mei, C.C. and J.L. Black: Scattering of surface waves of rectangular obstacles in water of finite depth, J. Fluid Mech., Vol. 38, pp. 499~511, 1969.
- 3) 日野幹雄・山崎丈夫: 垂直板による波の反射率、透過率およびエネルギー損失, 土木学会論文報告集, No.190, 1971.
- 4) Johnson, J.W., R.A. Fuchs and J.R. Morison: The damping action of submerged breakwaters, Trans. A.G.U., Vol. 32, pp. 704~717, 1951.
- 5) 岩佐義明: 水理学, 朝倉書店, pp. 210~215, 1967.
- 6) 筒井茂明・武内哲司・越智 裕: 潜堤の防波効果についての一考察, 第 28 回年講概要集, (II), pp. 65~66, 1973.
- 7) 井島武士: 波浪予知論, 水工学シリーズ, B-6, 1964.
- 8) 土木学会編: 水理公式集, p. 478, 1963.
- 9) 前出 6)。
- 10) 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 回年講講演集, pp. 87~92, 1966.
- 11) 合田良実・吉村知司・伊藤正彦: 島堤による波の反射および回折に関する研究, 港湾技術研究所報告, Vol. 10, No.2, pp. 3~51, 1971.