

浮防波堤の消波機能に関する研究 特に透過率に関する考察

金山 和雄*・藤原 輝男*・杉山 裕一**

Studies on the Transmission of the wave past a rigid Surface obstacle

Kazuo KANAYAMA, Teruo FUJIWARA and Hirokazu SUGIYAMA

Abstract

A theory is presented for the transmission of the wave past a rigid surface obstacle extending from above the water surface to some distance below the surface.

This theory is based on the consideration of momentum transportation. Laboratory data are presented to show that this theory is useful from the engineering design standpoint.

1. まえがき

海岸工学の^{1),2)}分野において、消波は最も重要な要素の一つと言える。消波を目的とした構造物は数多く見られる。たとえば離岸堤、捨石堤、潜堤、カーテン防波堤、浮防波堤などである。しかし消波機構の複雑さからこれら構造物の消波機能が適正に評価されているとは言い難い現状である。そこで著者らは浮防波堤をとりあげこの消波機能について考察を進めた。

消波機能の適正な評価はこれら構造物の規模決定の上には有用である。そこで一般に良く知られている有限振幅波理論を用い、有限水深の下で規則波を入射させ、運動量保存則の観点から理論を展開し興味ある結論を得たのでここに報告する。

2. 理論的解析

2-1 有限振幅浅水波による運動量輸送^{6),7),8)}

流体は非圧縮性完全流体とし、流体運動は非回転と仮定する。速度ポテンシャル ϕ および流れ関数 ψ は Fig. 1 の座標の下では次式を満足する。

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} = -\frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = \frac{\partial \phi}{\partial y} = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (1)$$

式(1)を満足しかつ水底の条件 $V = (\partial \phi / \partial y)_{y=-h} = 0$ を満たす ϕ , ψ に対し次式を得る。

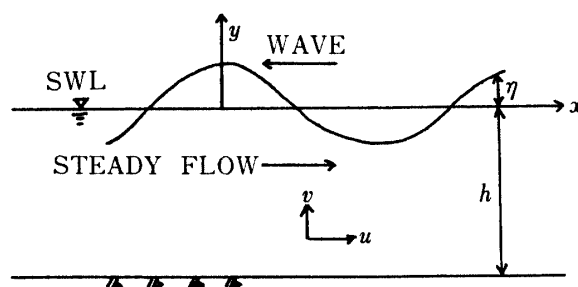


Fig. 1 Notation and definition of symbols

$$\phi = Cx - CB \cosh k(h+y) \sin kx \quad (2)$$

$$\psi = Cy - CB \sinh k(h+y) \cos kx \quad (3)$$

(3)式において水表面の条件 $y = \eta$ で $\phi = 0$ を考慮し η をべき級数に展開すると次式を得る。

$$\begin{aligned} \eta &= \beta \sinh k(h+y) \cos kx \\ &= (\sinh kh + k\eta \cosh kh \\ &\quad + \frac{k^2 \eta^2}{2!} \sinh kh + \dots) \beta \cos kx \quad (4) \end{aligned}$$

式(4)は定常波形流の式であり、 x の正方向へ進行する波を考えると水面波形に対して次式を得る。

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{1}{2} ka^2 \coth kh + a \cos k(x-ct) \\ &\quad + \frac{1}{2} ka^2 \coth kh \cos 2k(x-ct) \\ &\quad + \frac{1}{4} k^2 a^3 \left(\coth^2 kh + \frac{1}{2} \right) \cos 3k(x-ct) + \dots \quad (5) \end{aligned}$$

同様に $y = -d (d < h)$ に対応する水中波形は(3)式に

* 土木工学科

** 山口県庁

において $y = \eta' - d, \psi = cd$ とおく事により次式のようにもとまる。

$$\eta' = \beta \sinh k(h-d + \eta') \cos kx \quad (6)$$

(4), (6) 式の対比により, 同様の方法で水中波形 η' は次式となる。

$$\begin{aligned} \eta' = & \frac{1}{2}kr^2 \coth k(h-d) + r \cos ku \\ & + \frac{1}{2}kr^2 \coth k(h-d) \cos 2kx \\ & + \frac{1}{4}k^2r^3 \left\{ \coth^2 k(h-d) + \frac{1}{2} \right\} \cos 3kx \end{aligned} \quad (7)$$

ここに $r = a \{ \sinh k(h-d) / \sinh kh \}$

よって $\psi = 0, \psi = cd$ なる波の間で, 正方向への一様流れの有する運動量は一波長当り次式で与えられる。

$$\begin{aligned} M_U = & \rho cdL + \frac{1}{2}ka^2\rho cL \\ & \times \left\{ \coth kh - \frac{\sinh k(h-d) \cosh k(h-d)}{\sinh^2 kh} \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

同様に定常波形流のそれは次式となる。

$$M_{S\omega} = - \int_0^L \int_{\psi=cd}^{\psi=0} \rho \frac{\partial \psi}{\partial y} dx dy = \rho cdL \quad (9)$$

ゆえに C なる速度で伝播する波が水表面と $y = d$ の間で有する一波長当りの運動量は式(8)(9)より次式の様になる。

$$M' = \pi \rho a^2 c \left\{ \coth kh - \frac{\sinh k(h-d) \cosh k(h-d)}{\sinh^2 kh} \right\} \quad (10)$$

全水深にわたっての一波長の有する運動量は次式となる。

$$M = \pi \rho a^2 C \coth kh \quad (11)$$

有限振幅浅水波は一波長当り波の進行方向に式(11)なる運動量を有しているのである。この運動量の分布は(12)式より次式となる。

$$m' = \frac{\pi \rho c k a^2}{\sinh^2 kh} \cosh 2k(h-d) \quad (12)$$

この種の波は一周期後には水の実質を波の進行方向に移動せしめるのであって, その移動速度は一波長について次式で表示される。

$$u' = \frac{1}{\rho L} \frac{\partial M'}{\partial d} = ck^2 a^2 \frac{\cosh 2k(h-d)}{2 \sinh^2 kh} \quad (13)$$

よって水表面から水底の間で一周期の間に輸送される運動量は $m'u'$ を積分する事により次式で与えられる。

$$M_I = \frac{\rho c^2 k^2 H^4}{256 \sinh^4 kh} (\sinh 4kh + 4kh) \quad (14)$$

一方水底と任意水深 d との間を通して輸送される運動量 M_T は同様の方法で次式となる。

$$M_T = \frac{\rho c^2 k^2 H^4}{256 \sinh^4 kh} \{ \sinh 4k(h-d) + 4k(h-d) \} \quad (15)$$

又水表面と任意水深 d との間を通して輸送される運動量 M_R は次式となる。

$$\begin{aligned} M_R = & \frac{\rho c^2 k^2 H^4}{256 \sinh^4 kh} \\ & \{ \sinh 4kh - \sinh 4k(h-d) + 4kd \} \end{aligned} \quad (16)$$

次に Wiegeler の理論と著者らの理論との対比の意味を含めて, 波のエネルギー分布, および運動量の分布に

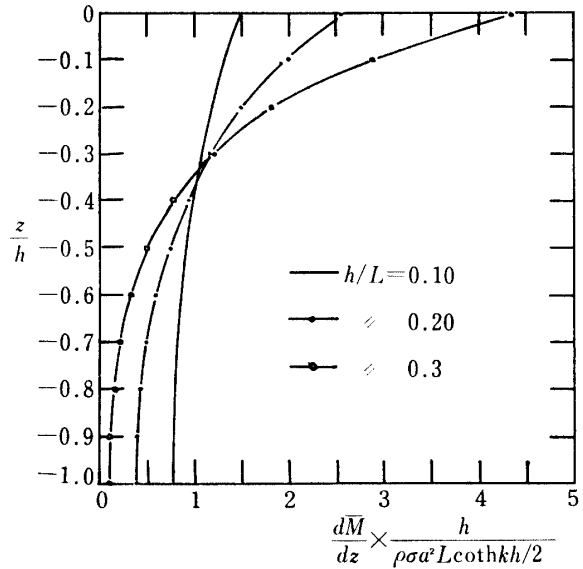


Fig. 2 Momentum distribution

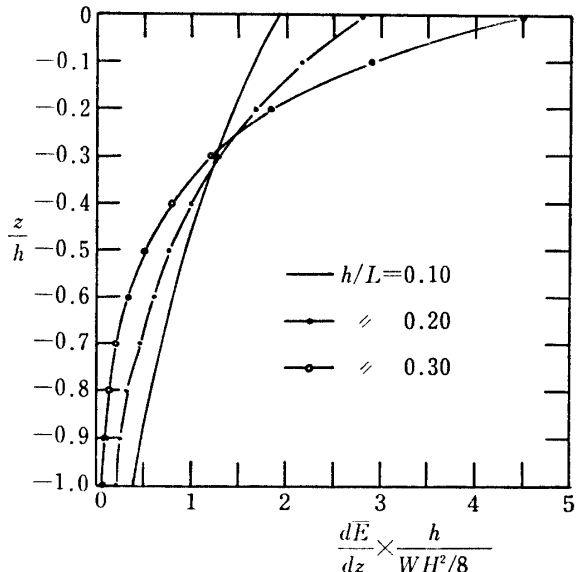


Fig. 3 Energy distribution

ついて考察する。

Fig.2, 3 はおのこの運動量, エネルギーの分布を相対水深 h/L をパラメータとして無次元表示したものである。これによると相対水深が大きいほど, 運動量, エネルギーともに表面集中度が大きい, 長波性の波においては両者とも分布が平滑化され表面集中度が弱くなる。しかし運動量分布に比しエネルギー分布は長波性の波においても表面集中度が強い。このエネルギー分布の性状からエネルギー保存則にもとづく *Wiegel* の理論値が長波性の波において小さな透過率を与える事が理解できると同時に, 運動量保存則を適用する事によりこの欠点が補えることが推察できる^{2), 4)}。

(2) 透過率および反射率の定義⁵⁾。

2-(1)で述べた理論にもとづき Fig. 5 に示す構造物による波の反射率および透過率について考察する。

まず次の仮定をもうける。

1. 入射波は規則波とする。
2. Fig. 4 に示す様に入射波が構造物壁面 (0~ d) で保有する運動量はすべて反射され反射波を形成する。
3. 構造物背後域に形成される透過波は自由空間を通して輸送された運動量 (M_T) によるものとする。
4. 構造物による運動量の保存係数を f とする。

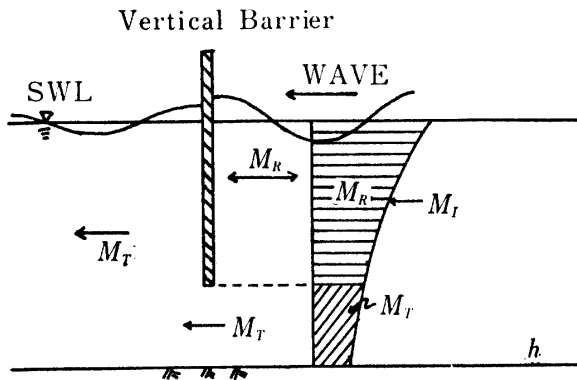


Fig. 4 Notation and definition of symbols

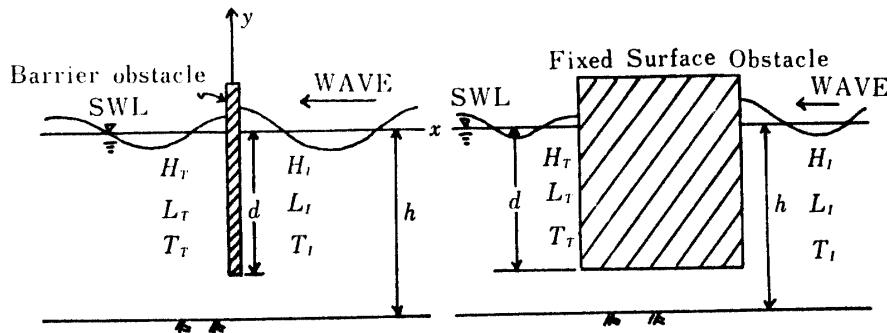


Fig. 5 Definition Sketch of Surface Obstacle

Fig. 5 なる構造物に波が入射した場合について考察する。入射波高 H_I , 反射波高 H_R , 透過波高を H_T とする。入射波, 反射波, 透過波の運動量輸送量をおのこの M_I, M_R, M_T とすれば(14)式よりそれぞれ次式で表示される。

$$M_I = \frac{\rho c^2 k^2 H_I^4}{256 \sinh^4 kh} (\sinh 4kh + 4kh) \quad (17)$$

$$M_R = \frac{\rho c^2 k^2 H_R^4}{256 \sinh^4 kh} (\sinh 4kh + 4kh) \quad (18)$$

$$M_T = \frac{\rho c^2 k^2 H_T^4}{256 \sinh^4 kh} (\sinh 4kh + 4kh) \quad (19)$$

式(18), (19)に示す反射波, 透過波のもつ運動量輸送量を仮定, 2, 3, により入射波高 H_I を用いて示すと, 式(15), (16)より次式を得る。

$$M_R = \frac{\rho c^2 k^2 H_I^4}{256 \sinh^4 kh} \{ \sinh 4kh - \sinh 4k(h-d) + 4kd \} \quad (20)$$

$$M_T = \frac{\rho c^2 k^2 H_I^4}{256 \sinh^4 kh} \{ \sinh 4kh - d \} + 4k(h-d) \quad (21)$$

運動量保存則より M_I, M_T, M_R の間には次の関係が成立する。

$$M_I = M_T + M_R + fM_I \quad (22)$$

$$(1-f) = \frac{M_T}{M_I} + \frac{M_R}{M_I} \quad (23)$$

上式に式(17), (18), (19)を用いれば次式を得る。

$$(1-f) = \left(\frac{H_T}{H_I} \right)^4 + \left(\frac{H_R}{H_I} \right)^4 = K_T^4 + K_R^4 \quad (24)$$

ここに K_T は透過率, K_R は反射率, である。

ゆえに

$$K_T = \sqrt[4]{\frac{M_T}{M_I}}, \quad K_R = \sqrt[4]{\frac{M_R}{M_I}} \quad (25)$$

上式に(17), (20), (21)式を用いると透過率, 反射率

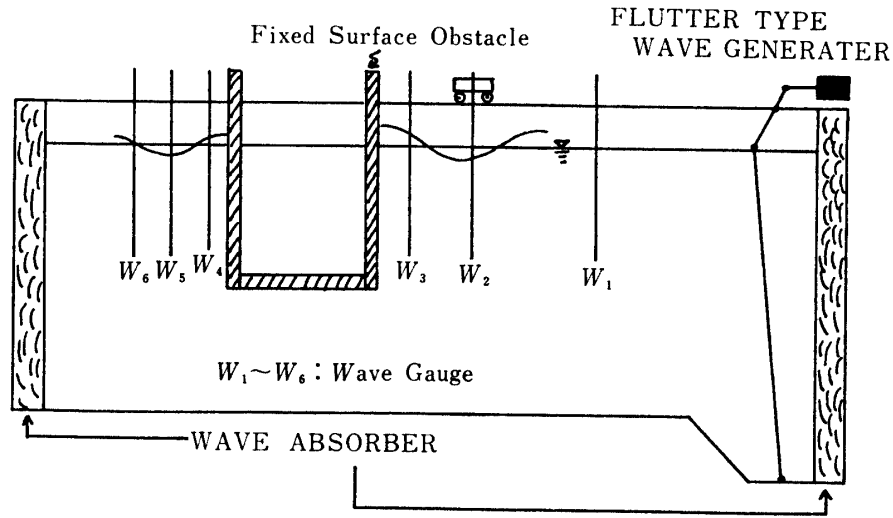


Fig. 6 Arrangement for the Test Channel

に対して次式を得る.

$$K_T = \sqrt{\frac{\sinh 4k(h-d) + 4k(h-d)}{\sinh 4kh + 4kh}} \quad (26)$$

$$K_R = \sqrt{\frac{\sinh 4kh - \sinh 4k(h-d) + 4kd}{\sinh 4kh + 4kh}} \quad (27)$$

3. 透過率と反射率に関する実験的考察

3-1 実験装置及び方法

実験に供した装置を Fig. 6 に示す. 造波水路の大きさは長さ 20m, 幅 0.7m, 深さ 0.95m の二次元水路であり, 造波機はフラッター型である. 波高の測定は容量型の波高計によった. その位置は Fig. 6 に示すとうりである. 記録はペンオシログラフによった.

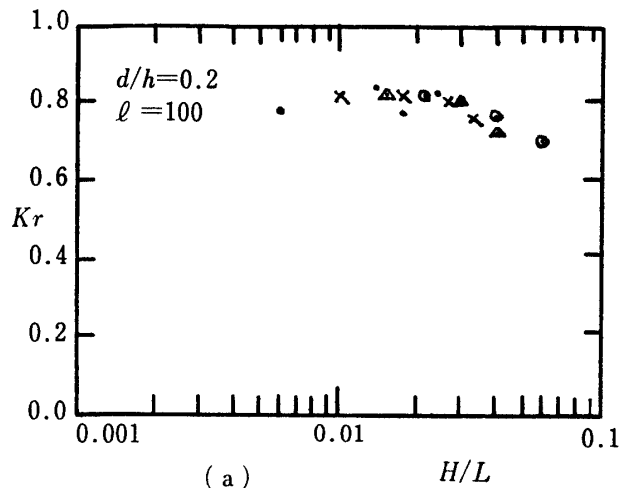
浮防波堤としては 100, 50, 25cm の 3 種類のものを用い水面下の長さ d を自在に変化できる箱型のものを用いた. d の長さは 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36cm の 9 種類, 前面水深 h は 40cm として行った. これら l, d, h の各組合せの下に波を入射させた. 入射波の波形勾配 H/L , 相対水深 h/L , はそれぞれ 0.004~0.073, 0.101~0.382 の範囲である. 実験に際しては造波水路両端の壁による反射の影響が及ばぬ様に測定時間には十分の注意を払った. 入射波, 透過波の波高, 周期は記録波の 3 波の平均値により得た. 反射波の測定は Healy の法により行った.

3-2 反射率, 透過率と波の性質

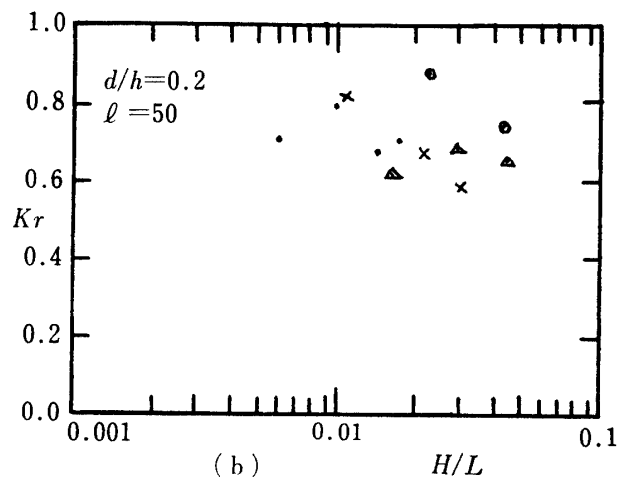
3-2-1 反射率と波の性質

Fig. 7 は反射率 K_r と波形勾配の関係を d/h , およ

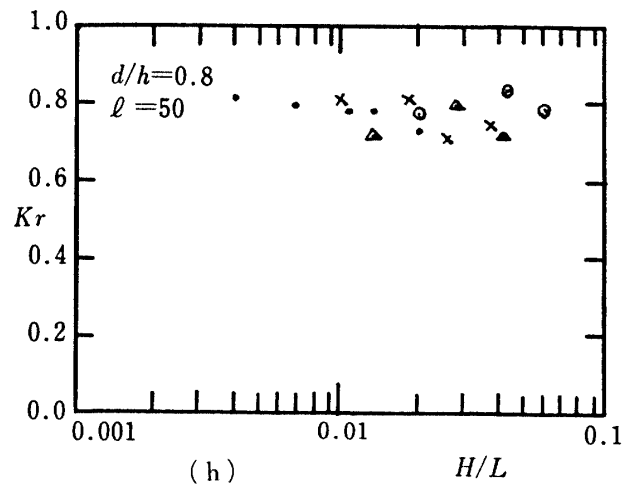
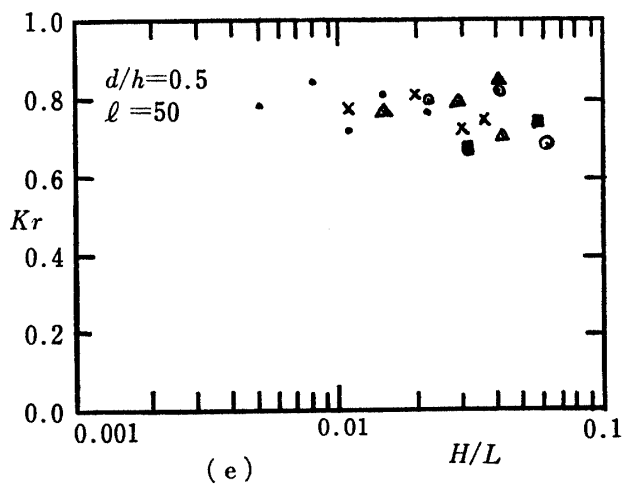
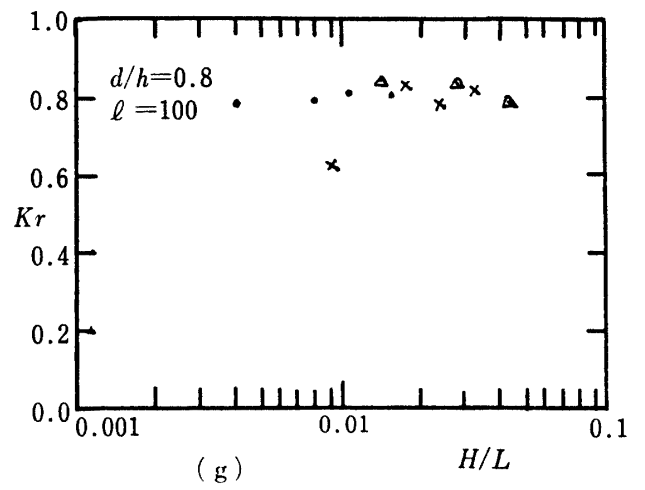
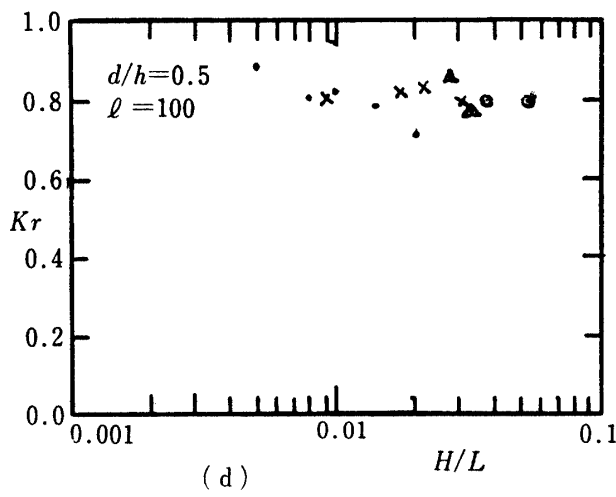
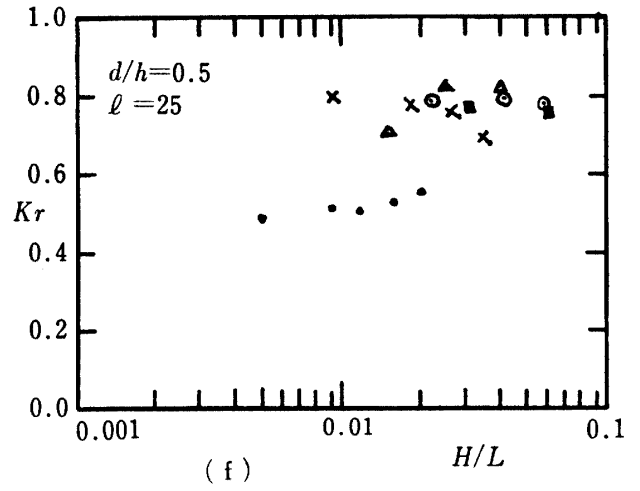
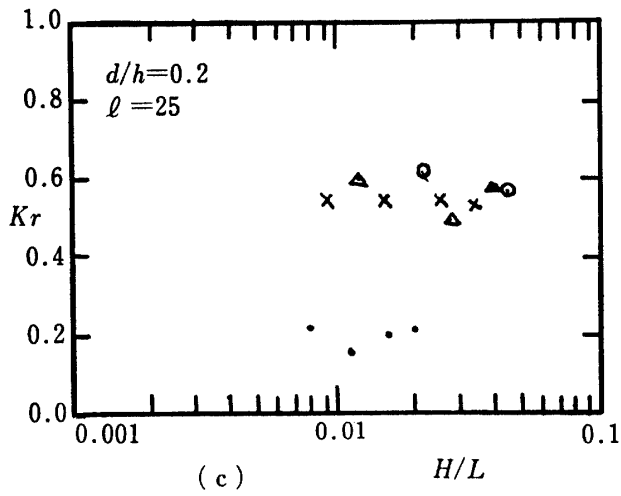
び l をパラメータとして表示したものである.

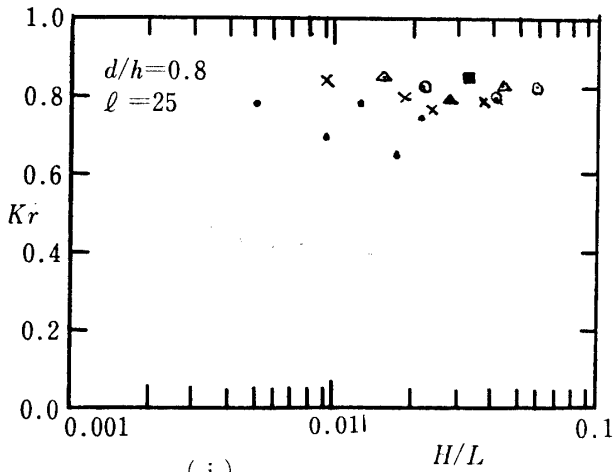


(a)

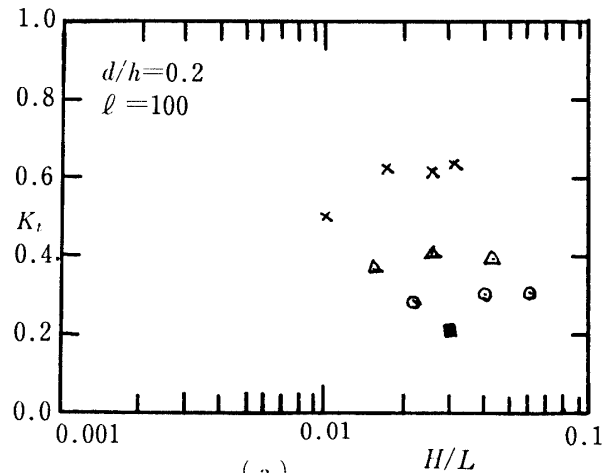


(b)





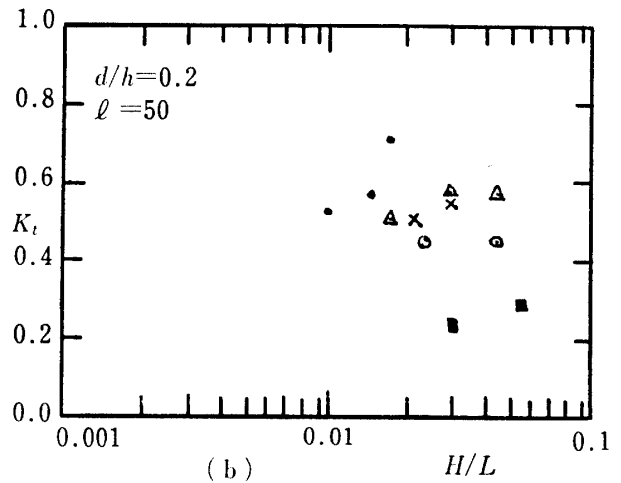
(i)



(a)

Symbols

- $h/L=0.11$
- ✕ $h/L=0.15$
- △ $h/L=0.20$
- ⊙ $h/L=0.25$
- $h/L=0.30$



(b)

Fig. 7 Relationship between Wavesteeptness and Reflection Coefficients

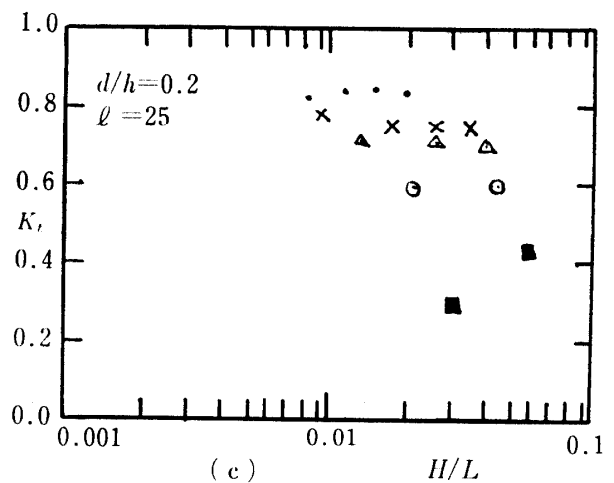
これらより次の事が言える。

カーテン防波堤の場合には相対水深が大きい程、反射率が大きくなる傾向が顕著であったが、浮防波堤においてはその傾向が顕著でなくなる。当然ながら l の小さいもの程、その傾向は顕著にあらわれる。

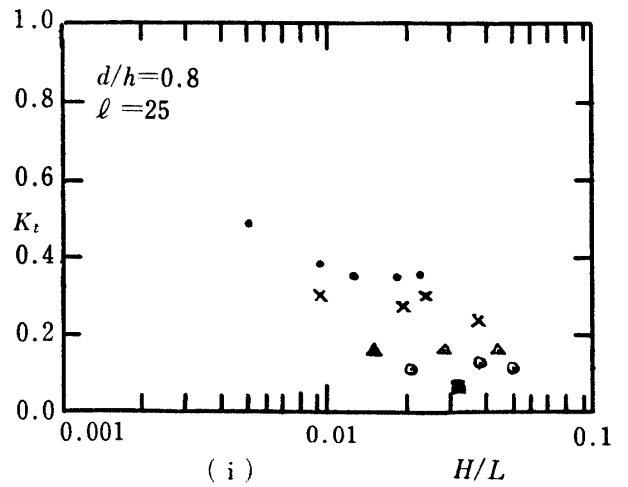
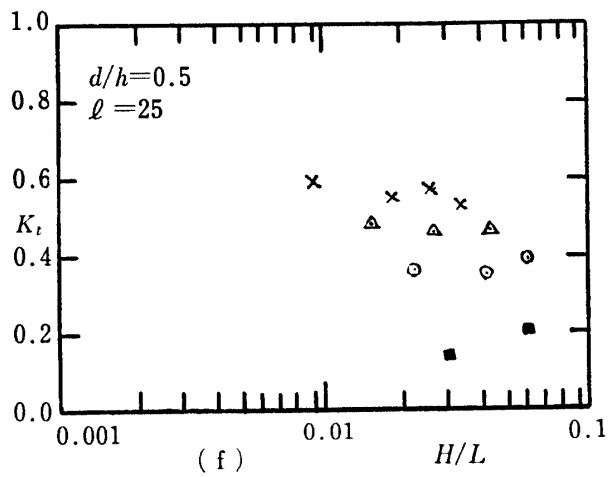
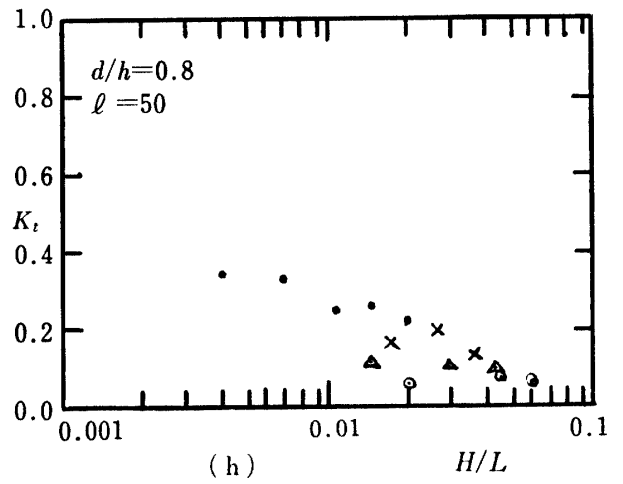
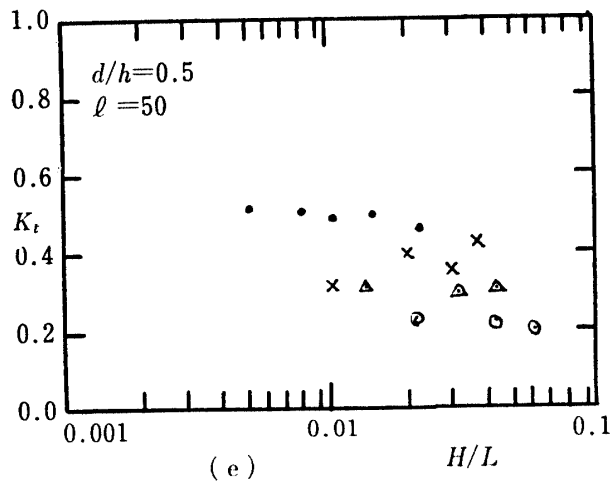
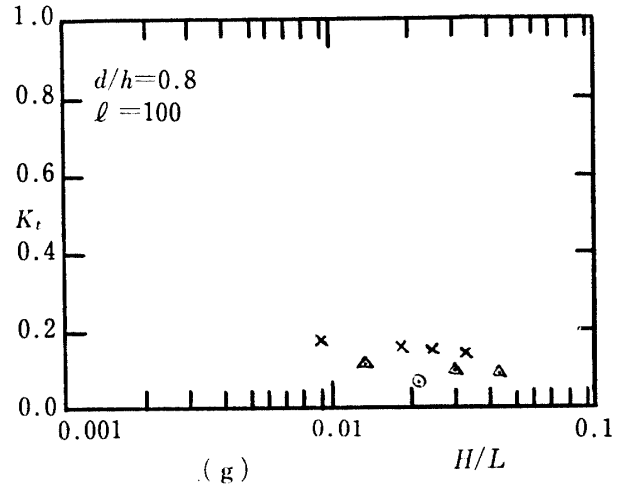
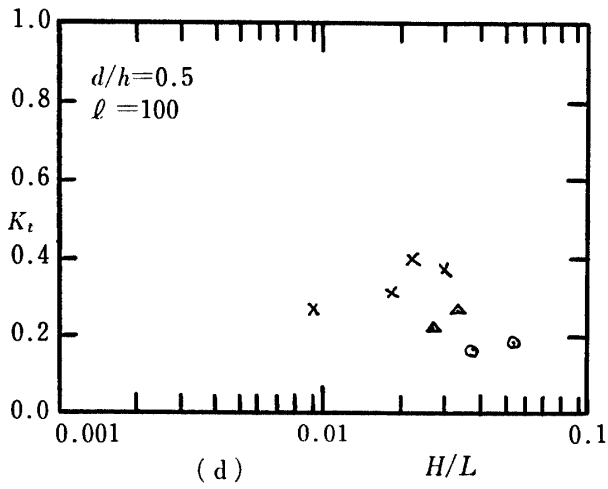
$l=100, 50\text{cm}$ については d/h が小的时候 ($d/h < 0.5$) 波形勾配の増大に伴い Kr は減少するが d/h がそれよりも大きくなると横ばいの傾向を示す。 $l=25\text{cm}$ においては d/h が小の範囲でも横ばいの傾向を示し、 d/h が大きい範囲では H/L が大きくなるにつれて Kr は大きくなる傾向を示す。一方、 d/h が小的时候 ($d/h = 0.1, 0.2, 0.3$) は l が小程 Kr は小さいが d/h が大きくなると、 l による Kr の差は小となってくる。

3 2 2 透過率と波の性質

Fig. 8 は透過率 Kr と H/L の関係を d/h と l をパラメータとして表示したものである。



(c)



- Symbols
- $h/L=0.11$
 - × $h/L=0.15$
 - △ $h/L=0.20$
 - ⊙ $h/L=0.25$
 - $h/L=0.30$

($d/h \leq 0.4$) は H/L の増加により Kt は増加あるいは横ばいの傾向を示すが d/h が大きくなると ($d/h \geq 0.5$) H/L の増加により Kt は減少する傾向を示す。この傾向は l が小さいもの程、顕著にあらわれる。

Fig. 8 Relationship between Wavesteeplness and Transmission Coefficients

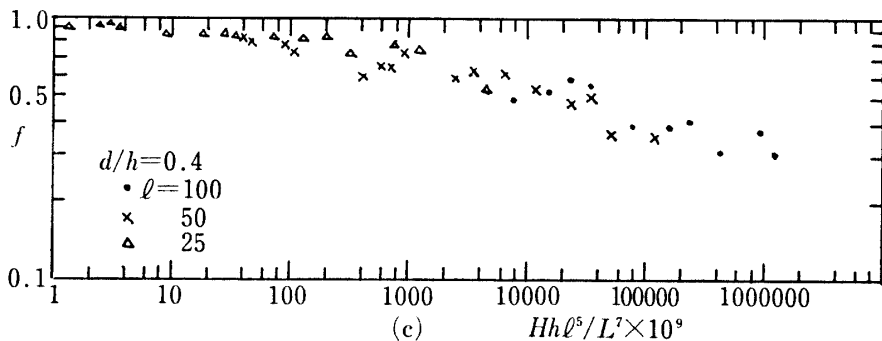
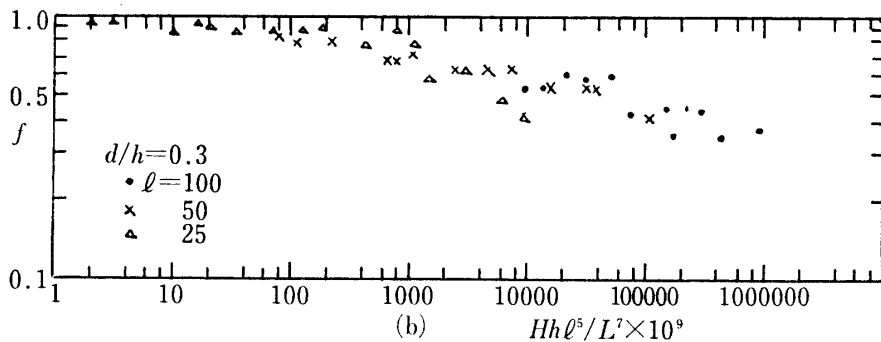
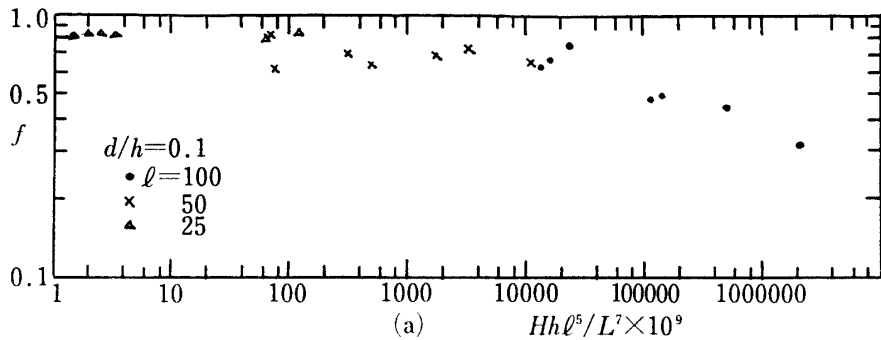
これらより次の事が言える。

- (1) h/L が大きくなると Kr は減少する。
- (2) l が小さくなると Kr は増大する。
- (3) H/L との関係は次の様である。 d/h が小の時

3-3 運動量保存係数

浮防波堤下部の自由空間を通して背後域へ伝達される運動量のうち、壁のマサツなどにより消費されず、背後域に透過波を形成するにいたる迄、この系に保存される運動量の割合を運動量保存係数と定義する。これを f とおけば (19) 式に実験値を用いて透過波の有する運動量が、(21)式により自由空間を通して伝達される運動量が各々もとまり f が決定される。

この f と $H/L, h/L, d/h, l/L$, 等の関係を考察し f に対する最適な無次元積として $Hh\ell^5/L^7$ を得た。これらを表示したのが Fig. 9 である。



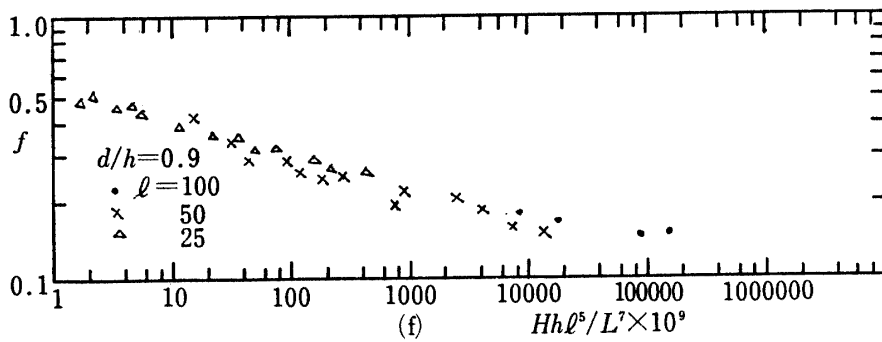
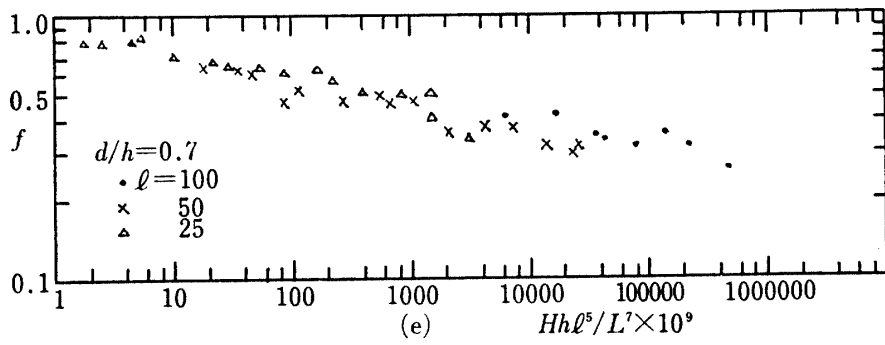
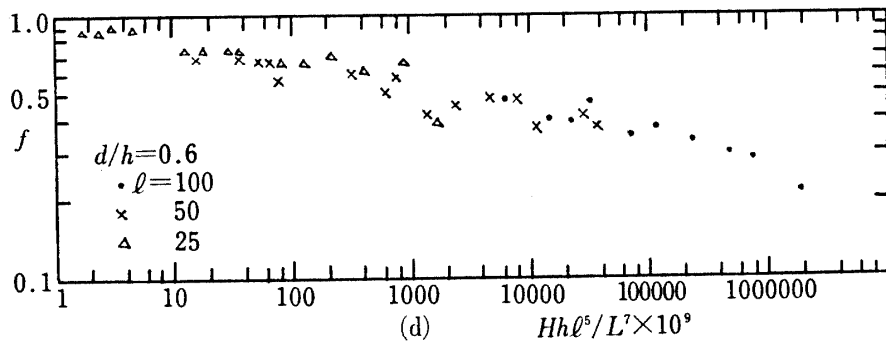


Fig. 9 Relationship between f and $Hh\ell^5/L^7$

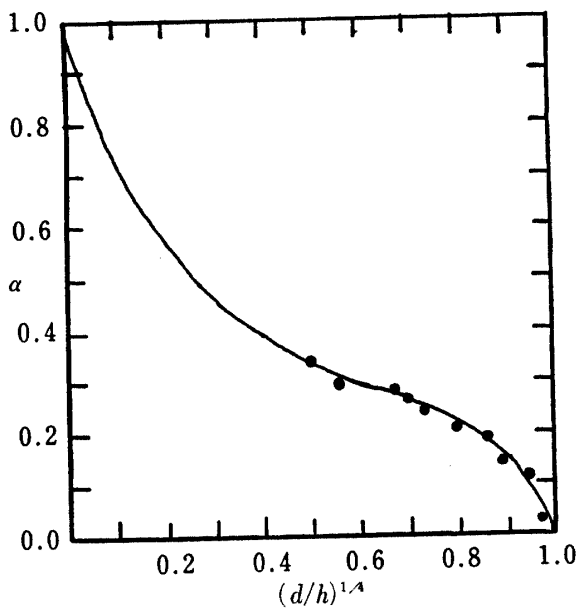


Fig. 10 Relationship between α and $(d/h)^{1/4}$

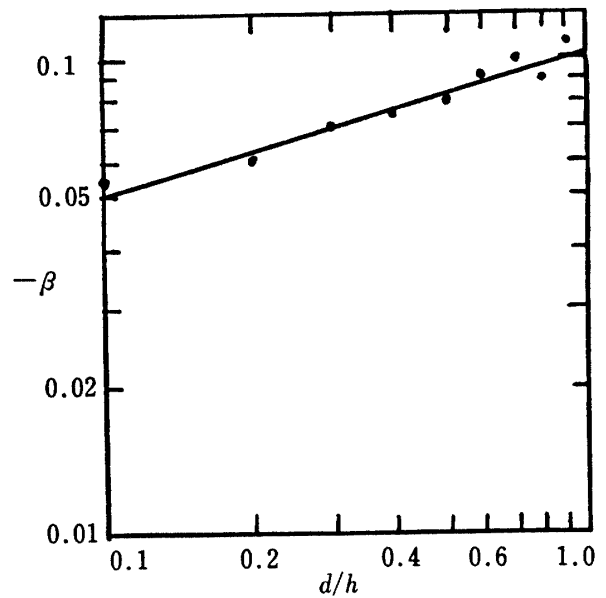


Fig. 11 Relationship between β and d/h

これらより f と Hh^5/L^7 との関係は両対数紙上でほぼ直線関係にあると言える。この事より次式による近似が可能である。

$$f = \alpha \left(\frac{Hh^5}{L^7} \right)^\beta \quad (28)$$

Fig. 9 の各グラフにより得られる α, β と各無次元量との関係を考察しそれぞれに対して $(d/h)^{1/4}$, (d/h) なる最適無次元量を得た。それらを示したのが Fig. 10, 11 である。

Fig. 10, 11 より α, β に対して次式を得る。

$$\alpha = -1.552\{(d/h)^{1/4}\}^4 + 1.127\{(d/h)^{1/4}\}^3 + 1.648\{(d/h)^{1/4}\}^2 - 2.223(d/h)^{1/4} + 1.0 \quad (29)$$

$$\beta = -0.0866(d/h)^{0.2143} \quad (30)$$

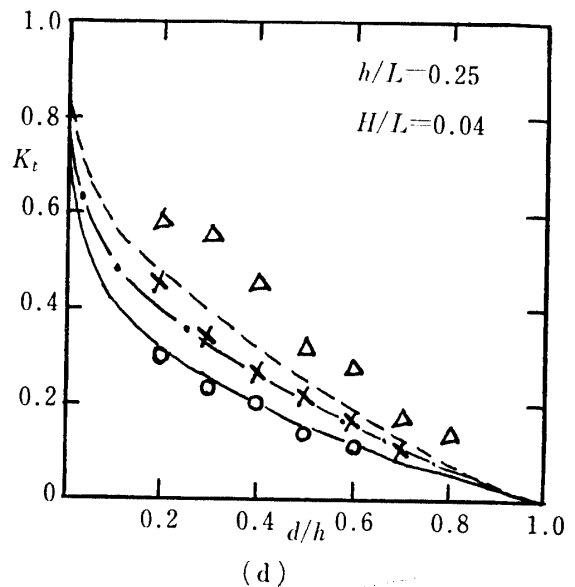
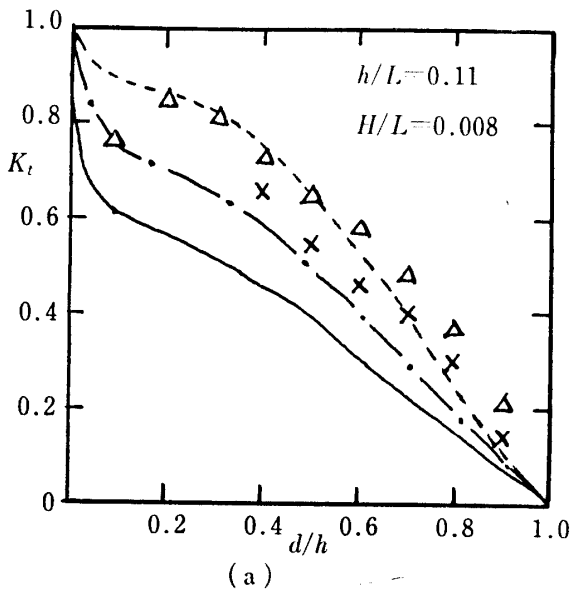
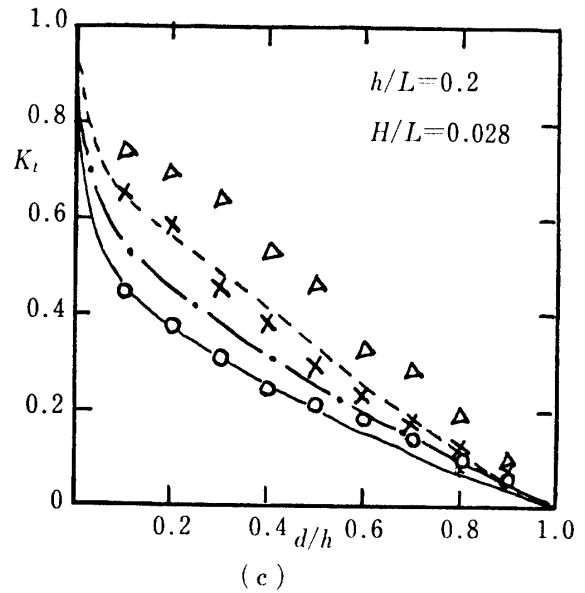
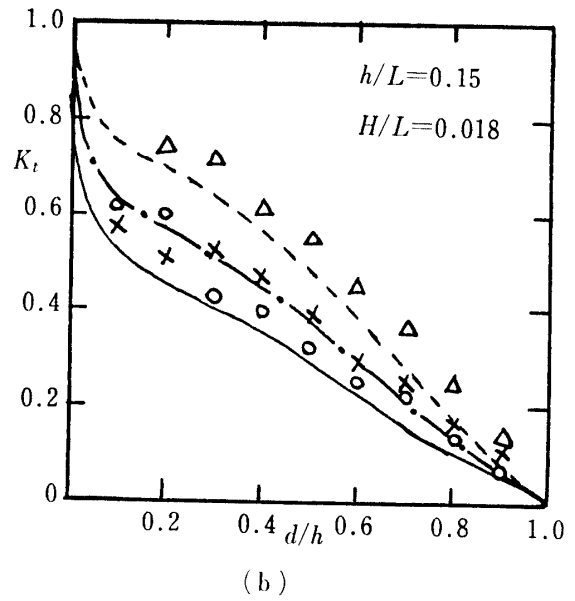
したがって(28), (29), (30)式により $H/L, h, l, d$ が与えられれば運動量保存係数 f が一義的に決まり、浮防波堤の背後域への波の透過率 K_t は次式で求められる。

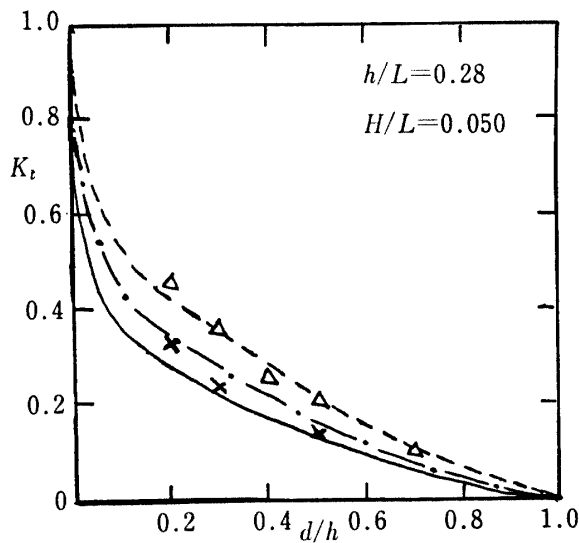
$$K_t = f^4 \sqrt{\frac{\sinh 4k(h-d) + 4k(h-d)}{\sinh 4kh + 4kh}} \quad (31)$$

4. 考 察

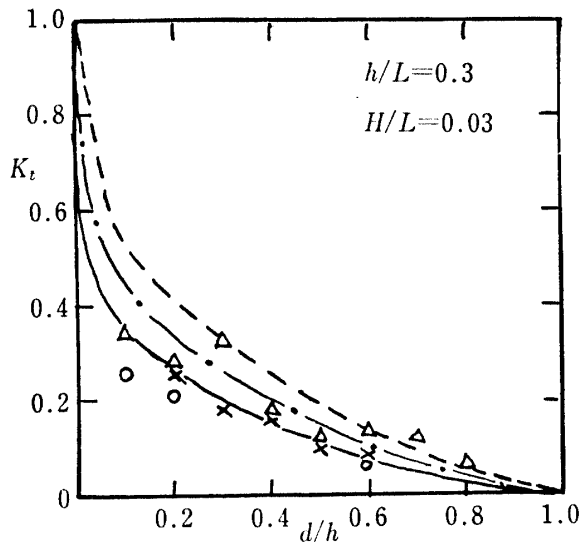
Fig. 12 は理論値と実験値との対応を相対水深 h/L と H/L をパラメータとして表示したものである。これによると近似は全般にわたり十分とは言えぬが、透過率の変化の傾向を良く示していると言える。

$d/h=0.1$ について考えると、 $H/L, h/L$ 共に小の

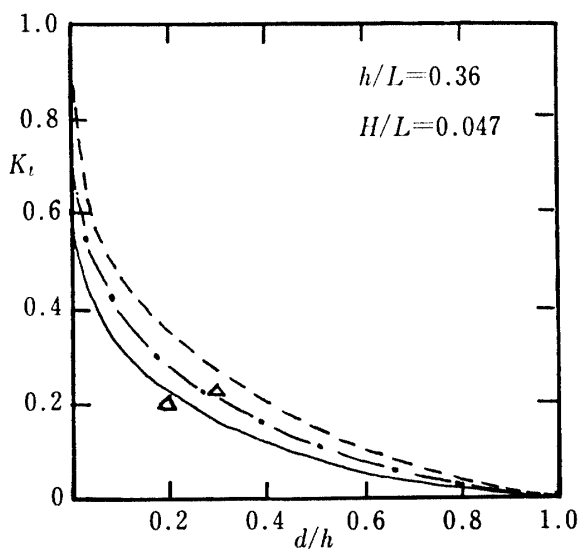




(e)



(f)



(g)

Symbols	l (cm)	
————	100	CAL
- · - · -	50	
- - - -	25	
○	100	EXP
×	50	
△	25	

Fig. 12 Comparison of the Experimental Results with Calculated Results

時,たとえば $h/L=0.11, H/L=0.008$ の時 Kt は $l=25$ で $0.879, l=50$ で $0.732, l=100$ で 0.609 となり Kr は急激に変化しない。しかし $H/L, h/L$ 共に大である時,たとえば $h/L=0.3, H/L=0.03$ では Kt は $l=25, 50, 100$ の時各々 $0.524, 0.436, 0.363$ と Kt は非常に小さくなっている。この事より大きい波に対しては $d/h=0.1$ でかなりの防波効果が期待できると言える。

実際の波は $H/L > 0.025 \sim 0.030$ のものが多い事から(風浪型), 実際においても $d/h=0.1$ で防波効果の期待がもてる言える。また堤長の変化と防波効果について考えて見ると次の事が言える。

相対水深, 波形勾配が共に小さい時 ($h/L=0.11, H/L=0.08$) に $\frac{1}{5}$ 波長分だけ l を大きくすると透過率は 0.879 から 0.609 となる。一方相対水深, 波形勾配とらに大きい時 ($h/L=0.3, H/L=0.3$) では Kt は 0.524 から 0.436 となる。すなわち $h/L, H/L$ が小の時は l を大にする事による防波効果は大であるが, $h/L, H/L$ が大の時は l を大きくする事による防波効果は余り期待できない事が言える。

5. 結 論

(1) 浮防波堤において透過率, 反射率は相対水深, 波形勾配, 堤長, および堤防浸水長による事がわかった。

すなわち, h/L が大きくなると Kt は減少し, H/L が大きくなるにつれて Kt は横ばい又は減少する傾向を示す。

(2) 浮防波堤の防波効果について次の点を明らかにした。 $H/L, h/L$ 共に大きい波においては $d/h=0.1$ でかなりの防波効果が期待できる。一方

$H/L, h/L$ 共に小さい波に対しては l を $1/5$ 波長分だけ長くしても相当の効果がある。

すなわち、小さい波に対しては l を、大きい波に対しては d を大きくする事により効率良く防波効果をたかめる事ができる。

(3) 浮防波堤の透過率の表示について次式を得た。

$$K_t = f \sqrt[4]{\frac{\sinh 4k(h-d) + 4k(h-d)}{\sinh 4kh + 4kh}}$$

ここに

$$f = \alpha \left(\frac{Hh l^5}{L^7} \right)^\beta$$

$$\alpha = [-1.552\{(d/h)^{1/4}\}^4 + 1.127\{(d/h)^{1/4}\}^3 + 1.648\{(d/h)^{1/4}\}^2 - 2.223(d/h)^{1/4} + 1]$$

$$\beta = -0.08660(d/h)^{0.2143}$$

参考文献

- 1) 久宝雅史・大橋一彦・牧野勝典 海岸工学論文集 1968, pp. 288.
- 2) Ursell, F. Proc, Cambridge Phil. Soc, Vol. 43, Par. 3, July 1947, pp. 374~382.
- 3) 森平倫正 etc 港湾技術研究所報告 Vol. 3, No 1, April 1964, pp. 1~27.
- 4) Wiegel, R.L. Proc, ASCE, Waterway and Harbors Div, Vol. WWI, March 1960, pp. 1~12.
- 5) 金山和雄 etc 海岸工学論文集 1974, pp. 393~399.
- 6) 井島武士: 海岸工学, 朝倉土木工学講座 (1973), pp. 25~33.
- 7) 永井壮七郎: 水理学, コロナ社 (1968), pp. 323~328.
- 8) 佐藤清一: 水理学, 森北出版 (1961), pp. 328~337.