

遊水部をもつ消波護岸の周波数特性と斜め入射波 に対する反射率

REFLECTION OF NORMAL AND OBLIQUE INCIDENT WAVES AT PERFORATED QUAYWALL WITH RESERVOIR

奥 蘭 英 明*・吉 田 明 徳**・井 島 武 士***
By Hideaki OKUZONO, Akinori YOSHIDA and Takeshi IJIMA

1. はしがき

著者らは前論文¹⁾において、遊水部をもつ直立消波構造物について検討を行い、波長が長い波の場合には、堤体全高にわたって透過壁と遊水部がある基本型よりも、堤体下部をある程度の高さ不透過にして遊水部内水深を浅くした棚式の方が経済的であることを示した。本論文ではこれに引き続き、有孔壁の場合の周波数特性と、斜め入射波に対する反射率、および縮尺効果について検討した。

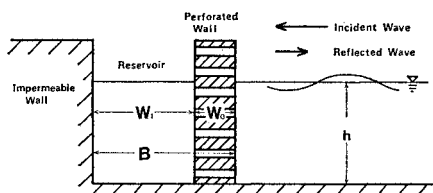
周波数特性の検討の場合には、前論文¹⁾と同様に長波近似理論と実験値により抵抗係数を求め、グリーンの公式を用いた理論解析法²⁾により計算し、周期が変化したときの反射率の特性を明らかにした。

斜め入射波に対する反射率については、Terrett ら³⁾、著者ら⁴⁾の研究があるが、いずれも長波近似理論によるものであり、特に棚式の場合の検討が不十分であった。ここでは、遊水部を隔壁で区切った場合とそうでない場合について、2次元の場合¹⁾と類似の方法による境界値問題としての理論解析法を示し、計算結果を水平スリット壁の実験値⁴⁾と比較した。次に、有孔壁の場合の計算結果を示し、入射角が変化したときの反射率について述べ、斜め入射の場合には隔壁が重要であることを明らかにした。

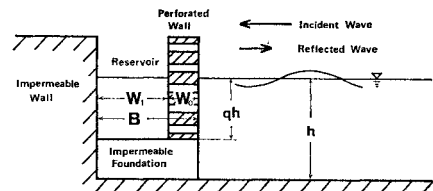
2. 周波数特性

(1) 周期が変化したときの抵抗係数

a) 長波近似理論による μ_1 と μ_2 の表示式



(a) 基本型



(b) 棚式

図-1 遊水部をもつ消波護岸

図-1(a)のように壁厚が W_0 、空隙率が V の有孔壁に対して遊水部幅を W_1 、全堤体幅を B とすると、反射率 K_r は特定の遊水部幅のとき最小となる。このときの W_1 、 B 、 K_r をそれぞれ最適遊水部幅 (W_1^*)、最適全堤体幅 (B^*)、最小反射率 (K_r^*) とよぶことにする。

孔内の流速および加速度に比例する抵抗の係数をそれぞれ μ_1 、 μ_2 とすると、長波近似理論により、前論文¹⁾で示したように基本型の場合、次の関係式が得られ、 B^*/L と K_r^* が得られれば抵抗係数が決まることになる。

$$\mu_2 = \frac{V}{2\pi(W_0/L)\tan[2\pi(B^*/L - W_0/L)]} - 1 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_1/\sigma &= \frac{V(1-K_r^*)}{2\pi(W_0/L)(1+K_r^*)} \\ \text{または、} \mu_1/\sigma &= \frac{V(1+K_r^*)}{2\pi(W_0/L)(1-K_r^*)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 σ は角周波数 ($\sigma=2\pi/T$ 、 T は周期)、 L は水深 h での波長であり、式 (2) の μ_1/σ は、 $\partial K_r^*/\partial V > 0$ のときは第1式、 $\partial K_r^*/\partial V < 0$ のときは第2式を用いる。

* 正会員 九州大学助手 工学部水工土木学科
** 正会員 工博 九州大学助教授 工学部水工土木学科
*** 正会員 工博 九州大学教授 工学部水工土木学科

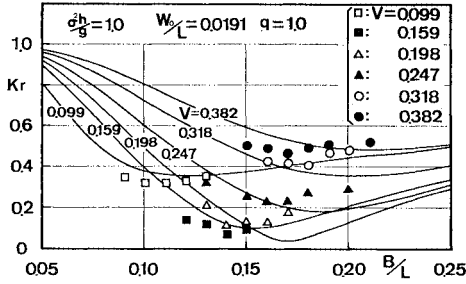


図-2 遊水部幅を変化したときの反射率

b) 実験による B^*/L と K_r^*

実験は長さ 22 m, 幅 80 cm, 高さ 80 cm のフラップ式造波装置をもつ 2 次元水路において, 水深 $h=50$ cm とし, $\sigma^2 h/g=1.0, 1.5$ ($T=1.42, 1.16$ 秒, g は重力の加速度), 入射波高 $H_i=5.0$ cm の波について, 容量式波高計を用いて Healy の方法により反射率を測定した. 有孔壁は孔径 $d_0=4.8$ cm の穴を開けたベニヤ板と発泡スチロール板からなり, 壁厚を $W_0=2.4, 5.0, 10.0, 15.0$ cm, 空隙率を $V=0.099, 0.159, 0.198, 0.247, 0.318, 0.382$ とした. 背後不透過壁は鋼材で補強した厚さ 22 mm の合板を用い, これを移動することにより遊水部幅 W_1 を変化した.

図-2 は実験例で, $\sigma^2 h/g=1.0, W_0/L=0.0191$ のときの反射率を, 全体幅と波長の比 B/L を横軸として示したものである. 曲線は計算値であるがこれについては後で述べる. このほかの実験結果のいずれも $B/L=0.09\sim 0.22$ で反射率は最小となる. このときの B^*/L と K_r^* を示すと表-1 のようになる.

c) 抵抗係数 μ_1/σ と μ_2 の推定

表-1 と前論文りに示した $\sigma^2 h/g=0.5$ の実験値より, B^*/L と K_r^* は V と W_0/L に対して以下のように表わされ, 周期が変化したときの μ_2 と μ_1/σ が決定できる.

表-1 V と W_0/L に対する最適全体幅と最小反射率

0.382	—	0.17	0.16	0.15	0.382	—	—	—
0.318	—	0.18	0.16	0.14	0.318	—	—	0.15
0.247	0.22	0.17	0.16	0.13	0.247	0.20	0.17	0.14
0.198	0.20	0.16	0.13	0.13	0.198	0.19	0.15	0.12
0.159	0.19	0.14	0.11	0.11	0.159	0.17	0.13	0.11
0.099	0.14	0.11	0.09	0.09	0.099	—	—	—
V					V			
W_0/L	0.009 2	0.019 1	0.038 2	0.057 3	W_0/L	0.012 4	0.025 8	0.051 6
	B^*/L ($\sigma^2 h/g=1.0$)					B^*/L ($\sigma^2 h/g=1.5$)		
0.382	—	0.47	0.43	0.34	0.382	—	—	—
0.318	—	0.42	0.38	0.31	0.318	—	—	0.23
0.247	0.30	0.23	0.18	0.11	0.247	0.16	0.12	0.06
0.198	0.14	0.11	0.08	0.12	0.198	0.05	0.03	0.08
0.159	0.05	0.08	0.10	0.15	0.159	0.12	0.15	0.19
0.099	0.29	0.33	0.36	0.39	0.099	—	—	—
V					V			
W_0/L	0.009 2	0.019 1	0.038 2	0.057 3	W_0/L	0.012 4	0.025 8	0.051 6
	K_r^* ($\sigma^2 h/g=1.0$)					K_r^* ($\sigma^2 h/g=1.5$)		

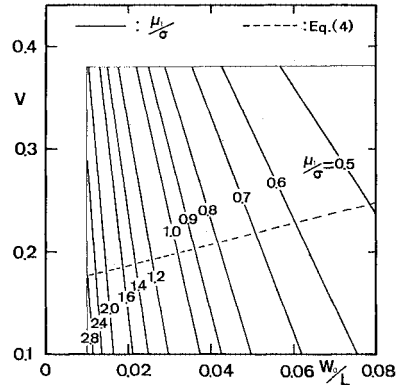


図-3 流速に比例する抵抗の係数 μ_1/σ

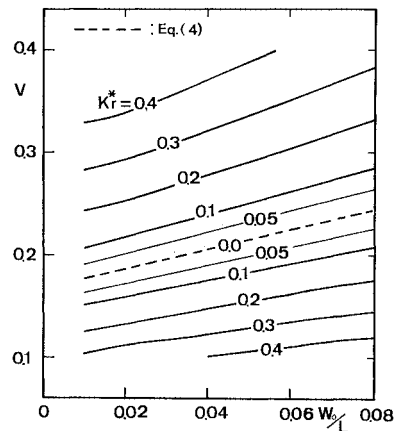


図-4 V と W_0/L に対する最小反射率

B^*/L は $\sigma^2 h/g$ によって変化せず, 式 (1) で $\mu_2=0$ と置いた次式でほぼ表わされる.

$$B^*/L = \frac{1}{2\pi} \tan^{-1} \left[\frac{V}{2\pi(W_0/L)} \right] + W_0/L \tag{3}$$

すなわち, 有孔壁の場合の加速度に比例する抵抗の係数 μ_2 は, いずれの周期についても近似的には 0 でよいことになる.

次に, K_r^* は各 W_0/L に対して, ある V で 0 となるのが推定されるが, この $K_r^*=0$ となる V は $\sigma^2 h/g=0.5^{(1)}, 1.0, 1.5$ の実験値により $\sigma^2 h/g$ によらずほぼ次式で近似される.

$$V = W_0/L + 0.167 \dots \dots \dots (4)$$

K_r^* は, この直線から離れるに従って大きくなる (表-1, 図-4 参照).

図-3 は $\sigma^2 h/g=0.5, 1.0, 1.5$ の実験値 K_r^* に基づき, μ_1/σ を式 (4) の条件で $K_r^*=0$ となるように, 点 (x_0, y_0) を中心とした放射線 [式 (5)] で近似したものである.

$$\mu_1/\sigma = \frac{(ax_0+b)V - ay_0(W_0/L) - by_0}{2\pi\{x_0V - (y_0-b)(W_0/L) - bx_0\}} \dots (5)$$

ただし、

$$\begin{cases} x_0=0.003, \\ y_0=0.720 \end{cases} \begin{cases} a=1.00 \\ b=0.167 \end{cases} \dots (6)$$

式(5)を式(2)に代入すれば 図-4 の実線のように V と W_0/L に対する K_r^* の近似曲線が得られ、表-1 と前論文¹⁾の 図-18 に示す実験値とよく一致している。すなわち、抵抗係数 μ_1/σ は σ^2h/g の値に関係なく式(5)で与えられる。

(2) 計算値と実験値との比較および考察

a) 周期を一定として遊水部幅を変えた場合

式(5)の μ_1/σ と $\mu_2=0$ を用いて、前論文¹⁾で示したグリーンの公式による計算方法により反射率を計算すると 図-2 の曲線のようになり、計算値と実験値はよく一致している。このほか、実験を行ったすべてのケースについても計算したが、計算値と実験値の一致の度合は 図-2 の例と同程度であった。

図-5 は遊水部内水深と堤体前面水深の比 q が 1.0 すなわち基本型の場合、 $W_0/L=0.03$ 、 $\sigma^2h/g=1.0$ で、 V が変化したときの計算値 K_r を示したもので、横軸は B/L である。 B^*/L は V が大きいほど大きく、 K_r^* は $V=0.20$ のとき最も小さい(このことは式(3)と式(4)からもわかる)。このほかに、 $q=1.0$ 、 $W_0/L=0.03$ で $\sigma^2h/g=0.5, 1.5$ の場合も計算したが、3 ケースとも K_r はほとんど同じであった。すなわち、有孔壁の基本型の場合、空隙率を式(4)、全体幅を式(7)により定めれば最も低い反射率が得られる(式(7)は式(4)を式(3)に代入して得られる)。

$$B^*/L = \frac{1}{2\pi} \tan^{-1} \left[\frac{W_0/L + 0.167}{2\pi(W_0/L)} \right] + W_0/L \dots (7)$$

図-6 は $q=0.4$ (棚式)、 $W_0/L=0.03$ で $\sigma^2h/g=1.0$ のときの反射率である。 σ^2h/g が 0.5, 1.5 の場合はここに示さないが、 K_r^* が最も小さくなる V は $\sigma^2h/g=0.5, 1.0, 1.5$ のとき、それぞれ $V=0.34, 0.30, 0.28$

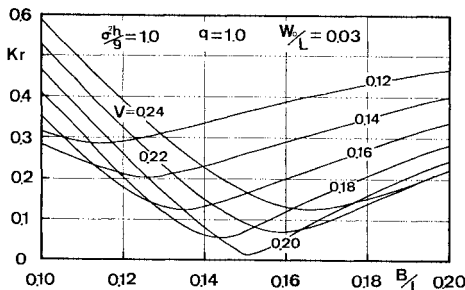


図-5 遊水部幅を変化したときの反射率 (基本型)

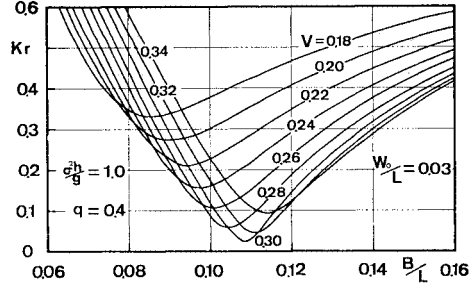


図-6 遊水部幅を変化したときの反射率 (棚式)

と σ^2h/g が大きくなるに従って小さくなり、棚式の場合、 W_0/L と V および B/L を一定としたときの K_r は σ^2h/g によって変化する。

b) W_0/L と B/L を一定として波長を変えた場合

図-7, 8 は a) の検証実験で、 W_0/L と B/L を一定として σ^2h/g を変化した(すなわち、 L が変わることにより W_0 と B を変えた)ときの反射率であり、それぞれ $q=1.0$ 、 $W_0/L=0.03$ 、 $B/L=0.150$ で $V=0.198, 0.247, 0.318$ と $q=0.4$ 、 $W_0/L=0.03$ 、 $B/L=0.110$ で $V=0.247, 0.318, 0.382$ の場合である。ここで、 $B/L=0.150, 0.110$ はそれぞれ $q=1.0, 0.4$ のときの最適全体幅の値である。

図-7 の $q=1.0$ の場合は、各 V の K_r は σ^2h/g に対して変化せずほぼ一定値となり、 K_r は $0.3 \leq \sigma^2h/g$

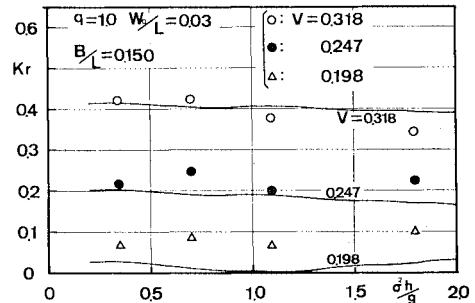


図-7 W_0/L と B/L を一定として σ^2h/g を変化したときの反射率 (基本型)

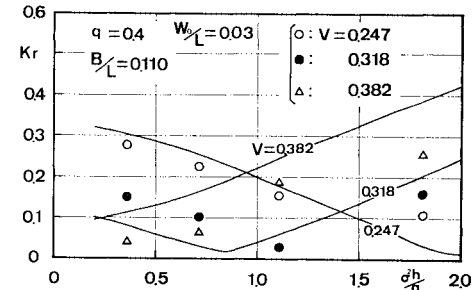


図-8 W_0/L と B/L を一定として σ^2h/g を変化したときの反射率 (棚式)

≤ 2.0 の範囲で常に $V=0.198$ のとき最小になる。

一方、図-8 の $q=0.4$ の場合は、 V に対する K_r の値は $\sigma^2 h/g$ に対して変化し、実験値の $\sigma^2 h/g=0.35, 1.09, 1.79$ での K_r はそれぞれ $V=0.382, 0.318, 0.247$ のとき最も小さくなる。また、図-7, 8 の実験値と計算値はほぼ一致している。

すなわち、 W_0/L と B/L を一定としたとき K_r を最も小さくする V は基本型の場合は $\sigma^2 h/g$ によって変化せずほぼ一定であるが、棚式の場合は $\sigma^2 h/g$ が大きくなるに従って小さくなる。また、図には示していないが、この傾向は q が小さくなるほど顕著になる。

c) 護岸断面を一定として周期を変えた場合

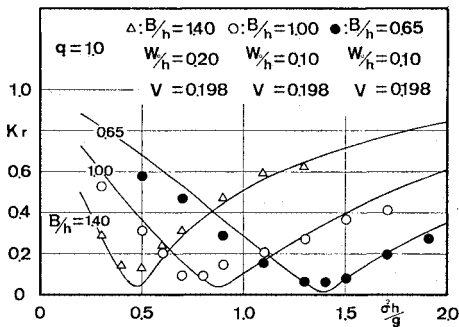


図-9 堤体断面を一定として $\sigma^2 h/g$ を変化したときの反射率 (基本型)

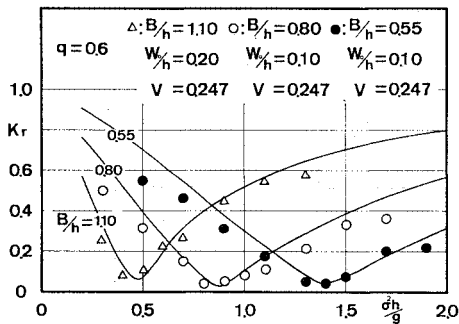


図-10 堤体断面を一定として $\sigma^2 h/g$ を変化したときの反射率 (棚式)

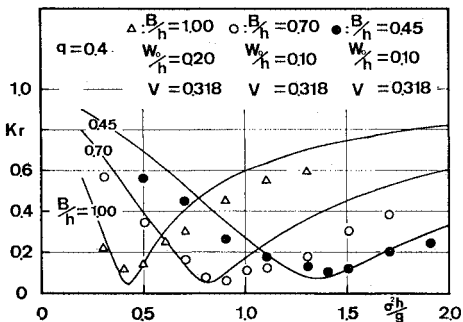


図-11 堤体断面を一定として $\sigma^2 h/g$ を変化したときの反射率 (棚式)

図-9~11 は K_r が $\sigma^2 h/g=0.4, 0.8, 1.4$ 付近で最も小さくなる断面の堤体9個に $\sigma^2 h/g=0.2\sim 2.0$ の波が作用した場合の計算値と実験値を示したもので、それぞれの図は $q=1.0, 0.6, 0.4$ の場合である。各図の $\sigma^2 h/g=0.8$ 付近で K_r が極小となる場合について比較すると、実験の K_r の極小値はいずれも 0.10 以下であり、 K_r の $\sigma^2 h/g$ に対する変化も q に関係なくほぼ同じである。次に、上記の条件での堤体断面についていえば、 W_0/h が 0.10 と一定のとき、 q が $1.0, 0.6, 0.4$ と小さくなるに従って、 B/h は $1.00, 0.80, 0.70$ と小さく、 V は $0.198, 0.247, 0.318$ と大きくなっていく。

$\sigma^2 h/g=0.4$ および 1.4 付近で K_r が極小となる場合についても同様であり、いずれの場合にも実験値と計算値はよく一致し、棚式の場合にも抵抗係数 μ_1/σ は式 (5) の値でよいことを示している。

すなわち、 $1.0 \geq q \geq 0.4, 0.3 \leq \sigma^2 h/g \leq 2.0$ の範囲では、入射波と設置水深に対して、有孔壁の壁厚と空隙率、および全堤体幅を適切に選べば反射率を十分小さくできる。また、反射率を小さくするためには、遊水部内水深を浅くするに従って空隙率は大きく、全堤体幅は狭くする必要がある。

3. 縮尺効果

今までに述べた実験値はすべて水深が 50 cm の場合のものであった。ここでは縮尺効果を明らかにするために九州大学工学部水工土木学科に有する造波水路で実験可能な最大水深である $h=90\text{ cm}$ と最小水深である $h=30\text{ cm}$ において行った実験の結果を示す。

水深 $h=90\text{ cm}$ と $h=30\text{ cm}$ の実験においては、壁厚 W_0 と全堤体幅 B および孔径 d_0 はすべて $h=50\text{ cm}$ の実験のそれぞれ 1.8 倍、 0.6 倍のものとし、それに孔径と入射波高の比 d_0/H_i を 0.96 と一定値に維持して $\sigma^2 h/g=0.3\sim 1.7$ の波を作用させ、Healy の方法により反射率を測定した。図-12 は $q=1.0, W_0/h=0.1, V=0.198, B/h=1.00$ の基本型、図-13 は $q=0.4,$

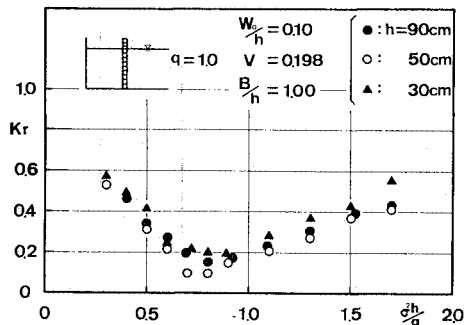


図-12 縮尺効果 (基本型)

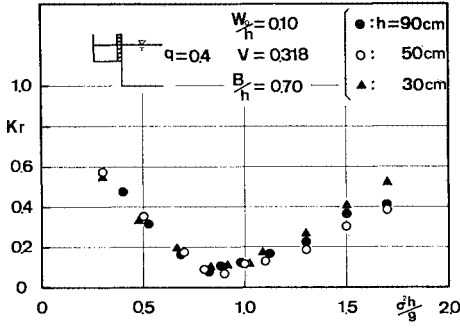


図-13 縮尺効果 (棚式)

$W_0/h=0.1$, $V=0.318$, $B/h=0.70$ の棚式の場合の実験値である。両図とも $\sigma^2 h/g$ の大きい (周期の短い) ところで $h=50$ cm, 90 cm, 30 cm の順で K_r はやや大きくなる傾向があるが、全体的には3ケースの実験値はほぼ同じ値を示している。また、図には示さないが、堤体前面から node までの距離をそれぞれの水深の波長で無次元化した値もほぼ同じであった。

試みに、前論文¹⁾で示した長波近似理論により、水深 $h=50$ cm ($H_t=5.0$ cm, $d_0=4.8$ cm) での孔内の水平流速 U を計算すると、 $q=1.0$, $\sigma^2 h/g=0.76$, $W_0/L=0.03$, $V=0.200$, $B/L=0.160$ の条件で $U=64$ cm/s となり、レイノルズ数は $Re=3.1 \times 10^4$ となる (ただし、 $K_r=0.01$)。 Re 数は縮尺の $3/2$ 乗倍になるから、 $h=30$ cm, 90 cm, 5 m ではそれぞれ $Re=1.4 \times 10^4 \approx 10^4$, $7.5 \times 10^4 \approx 10^5$, $9.8 \times 10^6 \approx 10^6$ 程度となる。ゆえに厳密にはさらに大縮尺の実験を必要とすることになるが、ここで行った実験と $h=5$ m とした現地での Re 数の比は1桁程度に止まり、また、 μ/σ は Re 数によって変化しないという実験結果⁵⁾ も得られており、本実験による結果は実際の場合に適用しても大きな誤りを生ずることはないと思われる。

4. 斜め入射波に対する反射率^{6),7)}

(1) 計算式

a) 隔壁がある場合

図-14のように静水面上に原点 O 、水平および鉛直上方に X , Y 軸と Z 軸をとり、 $OC'B'A'$ を不透過面、 $BB'C'C$ をその上に設置された有孔壁または水平スリット壁とすると、 X 軸と θ の角度をもつ斜め入射波が作用する場合の流体運動を考える。ここで、遊水部は隔壁で間隔 l ごとに区切られているものとし、 l を入射波の波長に対して十分小さく取ることによれば、遊水部内の流体運動は入射角 θ によらず X 方向の成分のみをもつと仮定される。

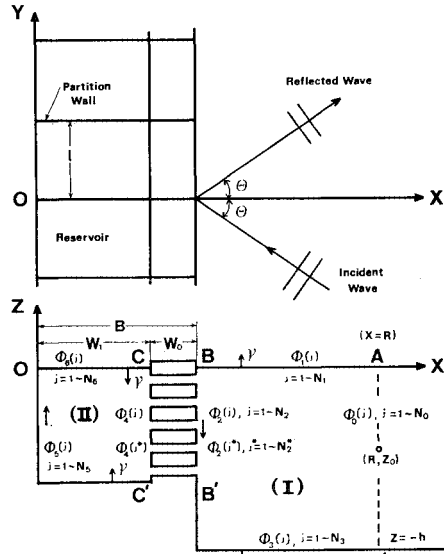


図-14 遊水部をもつ消波護岸に作用する斜め入射波

$ABB'A'$ を領域 (I)、 OCC' を領域 (II) とし、各領域の境界面でのポテンシャル ϕ および法線 ν の方向を図-14 のように定める。 AA' は有孔壁から十分離れた一様水深 h の場所 ($X=R$) にとった仮想境界面である。

入射波の角周波数を σ 、振幅を A とし、 h により $x=X/h$, $y=Y/h$, $z=Z/h$ (8)

として無次元座標 (x, y, z) を用いる。

自由表面および不透過面では前論文¹⁾と同じ条件が成り立つ。次に、仮想境界面 $X=R$ 付近では水深一定であるから、入射波の波数を k 、反射波の振幅を KA (K は複素反射率) とすると、ポテンシャル関数 $\phi_0(x, y, z)$ は $r=R/h$, $\lambda=kh$ (9)

とおいて次式のように表わされる。

$$\phi_0 = e^{-i\lambda y \sin\theta} [e^{i\lambda(x-r)\cos\theta} + Ke^{-i\lambda(x-r)\cos\theta}] \frac{\cosh \lambda(z+1)}{\cosh \lambda} \dots (10)$$

ゆえに、境界面 $x=r$ においては次式となる。

$$\phi_0(x=r) = e^{-i\lambda y \sin\theta} (1+K) \frac{\cosh \lambda(z+1)}{\cosh \lambda} \dots (11)$$

$$\frac{\partial \phi_0}{\partial x} (x=r) = i\lambda \cos\theta \cdot e^{-i\lambda y \sin\theta} (1-K) \frac{\cosh \lambda(z+1)}{\cosh \lambda} \dots (12)$$

また、領域 (I)、(II) での速度ポテンシャルは次式のようになる。

領域 (I) では

$$\phi_I = \frac{gA}{\sigma} e^{-i\lambda y \sin\theta} \phi_I(x, z) \cdot e^{i\sigma t} \dots (13)$$

領域 (II) では、隔壁がある場合には

$$\phi_{II} = \frac{gA}{\sigma} \phi_{II}(x, z) \cdot e^{i\sigma t} \dots (14)$$

また、有孔壁の孔の両端の ϕ と $\partial\phi/\partial\nu$ には、前論文¹⁾と同様にして次の関係式が得られる。

$$e^{-i\lambda y \sin\theta} \bar{\phi}_2(j^*) = \bar{\phi}_4(j^*) \\ = \frac{1}{b_1 V(\alpha - i\beta)} [\phi_4(j^*) - \phi_2(j^*) \cdot e^{-i\lambda y \sin\theta}] \dots\dots\dots(15)$$

ここで、 $b_1 = W_0/h$ であり、バーは $\bar{\phi} = \partial\phi/\partial\nu$ を意味する。 α, β は次式のようなものである。

$$\alpha = (1 + \mu_2)/V, \beta = (\mu_1/\sigma)/V \dots\dots\dots(16)$$

図-14 のように積分方向を矢印の向きにとり、各領域の境界面での分割数を N_1, N_2, \dots とし、境界条件式(15), (11), (12) を考慮して、各領域にグリーンの式を適用すると次式を得る。

領域 (I) では

$$\sum_{j=1}^{N_1} [D_{ij} - \Gamma C_{ij}] \phi_1(j) \\ + \sum_{j=1}^{N_2^*} \left[D_{ij} + \frac{1}{b_1 V(\alpha - i\beta)} C_{ij} \right] \phi_2(j^*) \\ - \frac{e^{i\lambda y \sin\theta}}{b_1 V(\alpha - i\beta)} \sum_{j=1}^{N_2^*} C_{ij} \phi_4(j^*) + \sum_{j=1}^{N_3} D_{ij} \phi_2(j) \\ + \sum_{j=1}^{N_3} D_{ij} \phi_3(j) + K e^{-i\lambda y \sin\theta} \sum_{j=1}^{N_3} [D_{ij} \\ + i\lambda \cos\theta \cdot C_{ij}] \frac{\cosh \lambda(z_j + 1)}{\cosh \lambda} \\ = -e^{-i\lambda y \sin\theta} \sum_{j=1}^{N_1} [D_{ij} \\ - i\lambda \cos\theta \cdot C_{ij}] \frac{\cosh \lambda(z_j + 1)}{\cosh \lambda} \dots\dots\dots(17)$$

ただし、

$$\Gamma = \sigma^2 h/g, D_{ij} = -\delta_{ij} + \bar{C}_{ij}, i=1 \sim N_1, 1 \sim N_2, \\ 1 \sim N_2^*, 1 \sim N_3, (r, z_0)$$

領域 (II) では

$$\sum_{j=1}^{N_3} F_{ij} \phi_4(j) + \sum_{j=1}^{N_3^*} \left[F_{ij} - \frac{1}{b_1 V(\alpha - i\beta)} E_{ij} \right] \phi_4(j^*) \\ + \frac{e^{-i\lambda y \sin\theta}}{b_1 V(\alpha - i\beta)} \sum_{j=1}^{N_2^*} E_{ij} \phi_2(j^*) + \sum_{j=1}^{N_1} F_{ij} \phi_5(j) \\ + \sum_{j=1}^{N_6} [F_{ij} + \Gamma E_{ij}] \phi_6(j) = 0 \dots\dots\dots(18)$$

ただし、

$$F_{ij} = \delta_{ij} + \bar{E}_{ij}, i=1 \sim N_2, 1 \sim N_2^*, 1 \sim N_3, \\ 1 \sim N_6$$

式(17), (18) を連立方程式として解いて K を求めることができる。このとき、 y は任意の値を代入すればよく、 y の値の変化によって ϕ の値は変動するが K の絶対値と偏角は一定値を取り変わることはない。

ここで、

$$\left. \begin{aligned} C_{ij} &= -\frac{1}{\pi} \int_{ds_j} K_0(\lambda R_{ij} \sin\theta) ds \\ \bar{C}_{ij} &= -\frac{1}{\pi} \int_{ds_j} \frac{\partial}{\partial\nu} K_0(\lambda R_{ij} \sin\theta) ds \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(19)$$

δ_{ij} はクロネッカーのデルタ、 K_0 は 0 次の変形ベッセル関数である。

また、 E_{ij}, \bar{E}_{ij} は前論文¹⁾と同じである。

b) 隔壁がない場合

隔壁がない場合には領域 (II) の速度ポテンシャルは次式のようなになる。

$$\phi_{II} = \frac{gA}{\sigma} e^{-i\lambda y \sin\theta} \phi_{II}(x, z) \cdot e^{i\sigma t} \dots\dots\dots(20)$$

そこで連立方程式は領域 (I) では式(17)の第3項の $\exp(i\lambda y \sin\theta)$ を 1 とおいた式になる。

領域 (II) では次式のようなになる。

$$\sum_{j=1}^{N_1} D_{ij} \phi_4(j) + \sum_{j=1}^{N_2^*} \left[D_{ij} - \frac{1}{b_1 V(\alpha - i\beta)} C_{ij} \right] \phi_4(j^*) \\ + \frac{1}{b_1 V(\alpha - i\beta)} \sum_{j=1}^{N_2^*} C_{ij} \phi_2(j^*) + \sum_{j=1}^{N_3} D_{ij} \phi_5(j) \\ + \sum_{j=1}^{N_6} [D_{ij} + \Gamma C_{ij}] \phi_6(j) = 0 \dots\dots\dots(21)$$

ただし、

$$D_{ij} = \delta_{ij} + \bar{C}_{ij}, i=1 \sim N_2, 1 \sim N_2^*, 1 \sim N_3, 1 \sim N_6$$

隔壁がある場合と同様に、連立方程式を解いて K を求めることができる。

(2) 透過壁が水平スリット壁の場合の実験値と計算値の比較

透過壁が水平スリット壁のときの直立消波構造物に斜め入射波が作用する場合の反射率実験⁴⁾が運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所において行われている。ここでは、この実験値と計算値の比較を行った。

a) 斜め入射波に対する直立消波構造物の消波特性実験⁴⁾の概要

実験は、長さ 31 m、幅 26 m、高さ 1.2 m の平面造波水槽で、水深一定 $h=52.7$ cm、入射波高 $H_i=4.0$ cm、周期 $T=1.0, 1.4, 1.8$ 秒、入射角 $\theta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ について行われた。堤体模型は木製のもので、透過壁は壁厚 $W_0=5.2$ cm、空隙率 $V=0.20, 0.30, 0.40$ 、開口幅がそれぞれ $d=9, 14, 18$ mm、不透過部の幅が 31 mm の水平スリット壁であり、全堤体幅は一定 $B=26.1$ cm、遊水部内水深と堤体前面水深の比 q は 0.25, 0.50, 0.75、隔壁の間隔は $l=25$ cm である。反射率は容量式波高計により、水面波形を測定し、高速フーリエ変換法を用いた入・反射波の分離推定法により求めている。

b) 水平スリット壁 2 次元実験による抵抗係数 μ_1, μ_2 の推定

計算に使用する抵抗係数 μ_1, μ_2 を得るために、九州大学工学部水工土木学科で 2 次元実験を行った。

実験は、長さ 22 m、幅 80 cm、高さ 80 cm の 2 次元造波水路において、透過壁を a) の 3 次元実験とまったく同じ断面に作った水平スリット壁とし、水深、入射波

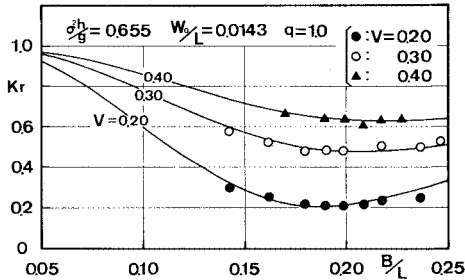


図-15 水平スリット壁の場合の反射率 (垂直入射)

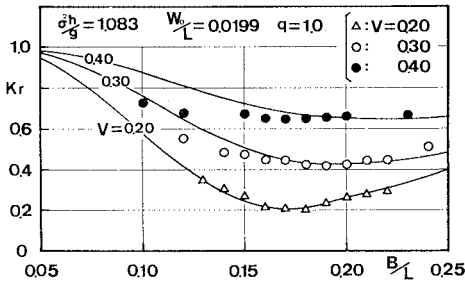


図-16 水平スリット壁の場合の反射率 (垂直入射)

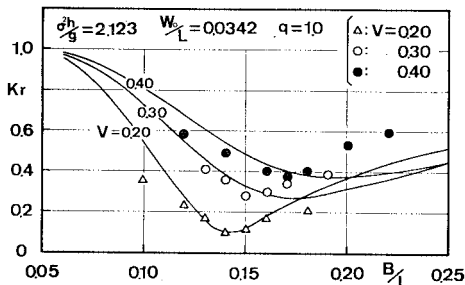


図-17 水平スリット壁の場合の反射率 (垂直入射)

高、周期もまったく同じ条件として、 $q=1.0$ で全堤体幅を $B/L=0.10\sim 0.25$ と変化したときの反射率を容量式波高計を用いて Healy の方法により測定した。

図-15~17 は $q=1.0$ で σ^2h/g がそれぞれ 0.655, 1.083, 2.123 ($T=1.8, 1.4, 1.0$ 秒) のときの反射率で、横軸は全堤体幅と波長の比 B/L である。曲線は実験値の K_r^* を式 (2) に代入して得られる μ_1/σ の値を用いて計算した値である。ただし、 $\mu_2=0$ とした。計算値と実験値はよく一致しており、水平スリット壁の場合にも、有孔壁の場合と同様にして μ_1/σ を推定できることがわかる。表-2 に水平スリット壁の μ_1/σ の値を示す。この値と有孔壁の図-3 の μ_1/σ と比較すると水平スリット壁の値の方がやや小さいものの、傾向はほぼ同じである。

c) 実験値⁹⁾と計算値の比較

表-2 の μ_1/σ の値を用いて K_r を計算すると図-18

~20 のようである。ただし、計算はすべて隔壁がある場合の式で行い、実験値は $l=25$ cm の場合の値である。なお、計算は $V=0.20, 0.30,$

0.40 について行ったが、ここではその一部を示す。

図 (a) は各周期と空隙率に対して、 q が 0.25, 0.50, 0.75 のときの実験値と計算値を、入射角 θ を横軸として示したものである。図 (b) は図 (a) の実験条件である B/L が、 $\theta=0^\circ$ のときの B^*/L に対して、どのような位置にあるかを示したものである (図中の矢印が (a) の B/L の値を示す)。

図-18 は $\sigma^2h/g=0.655$ ($T=1.8$ 秒), $W_0/L=0.0143$, $B/L=0.072$ で V が 0.30 の場合である。図 (a) において、入射角 θ によらず、 K_r は $q=0.75, 0.50, 0.25$ と q が小さいほど小さくなっている。これは図 (b) のように、各 q における B/L が対応する $\theta=0^\circ$ のときの B^*/L よりもすべて小さいためである。

図-19 は $\sigma^2h/g=1.083$ ($T=1.4$ 秒), $W_0/L=0.0199$, $B/L=0.100$ で V が 0.20 の場合である。図 (a) の K_r は $0^\circ \leq \theta \leq 54^\circ$ の範囲で、 $q=0.5$ のとき最も小さくなるが、これは図 (b) から明らかのように、図 (a) の実験条件である $V=0.20$ と $B/L=0.100$ が、それぞれ $\theta=0^\circ$ のときの K_r^* を最も小さくする V と最適全堤体幅 B^*/L に近いためである。図は示さないが、 $\sigma^2h/g=1.083$ の $V=0.30, 0.40$ では B/L が $q=0.25$ の B^*/L に最も近いので $\sigma^2h/g=0.655$ の場合と同じく q が小さいほど K_r は小さい。

ところが、図-20 の $\sigma^2h/g=2.123$ ($T=1.0$ 秒), $W_0/L=0.0342$, $B/L=0.172$, $V=0.30$ では B/L はすべて、対応する B^*/L よりも大きいため、 $0^\circ \leq \theta \leq 48^\circ$ の範囲で K_r は $q=0.25, 0.50, 0.75$ と q が大きいほど小さくなる。

また、計算値と実験値はほぼ一致しており、本計算方法は検証されたと考える。

また、斜め入射の場合にも、計算に使用する抵抗係数は 2. (1) で述べた方法による $\mu_1/\sigma, \mu_2$ の値でよいことを示している。

(3) 有孔壁の場合の計算値と考察

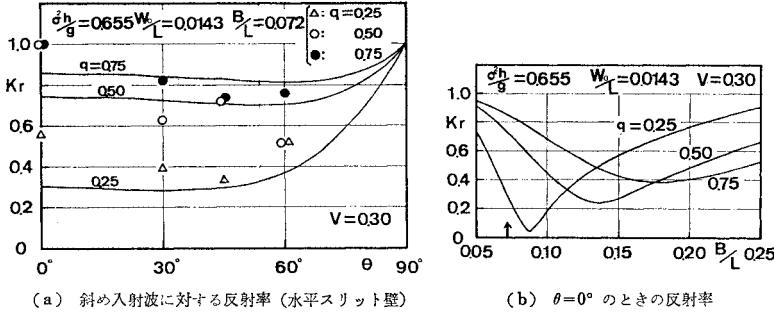
ここでは、有孔壁の場合の抵抗係数 (μ_1/σ は式 (5), μ_2 は 0) を用いた計算結果を示す。

a) 隔壁がある場合

図-21 は $q=1.0, \sigma^2h/g=1.0, W_0/L=0.03$ で入射角 θ が $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ のときの反射率を、 B/L を横軸として示したもので、それぞれの曲線は $V=0.10, 0.12,$

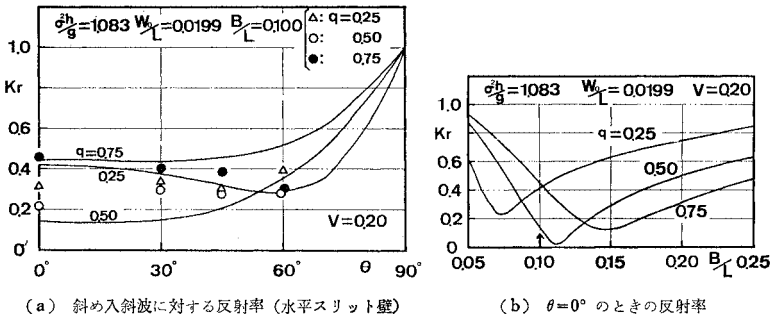
表-2 水平スリット壁の場合の μ_1/σ

0.40	1.012	0.678	0.836
0.30	1.175	0.955	0.785
0.20	1.456	1.043	0.746
$V/W_0/L$	0.0143	0.0199	0.0342



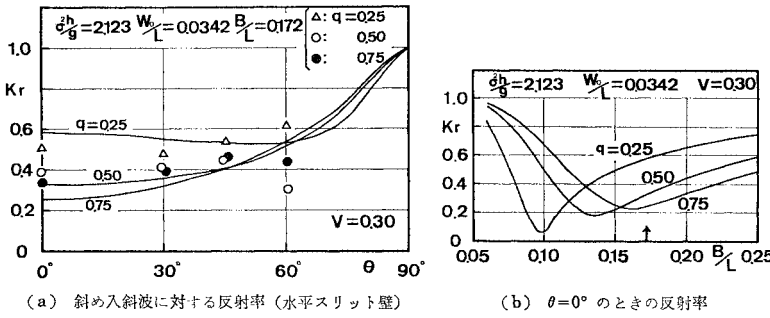
(a) 斜め入射波に対する反射率 (水平スリット壁) (b) $\theta=0^\circ$ のときの反射率

図-18



(a) 斜め入射波に対する反射率 (水平スリット壁) (b) $\theta=0^\circ$ のときの反射率

図-19



(a) 斜め入射波に対する反射率 (水平スリット壁) (b) $\theta=0^\circ$ のときの反射率

図-20

…、0.38 として計算したとき K_r^* が最も小さくなるものを示した。 $\theta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ のとき、 K_r^* が最も小さくなる V は、それぞれ 0.20, 0.18, 0.16, 0.12 で、 B^*/L は 0.150, 0.143, 0.135, 0.114 である。 また、このときの K_r^* はすべて 0.05 以下になる。

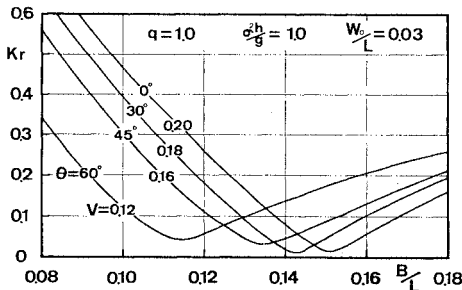


図-21 遊水部幅を変化したときの反射率 (基本型)

図-22 は同様に $q=0.4$ の場合で、このときも K_r^* はすべて 0.05 以下になる。そこで、 $W_0/L=0.03$ のときの、 K_r^* が最も小さくなる V と B^*/L を $\sigma^2 h/g=0.5$ と 1.5 の場合も含めて示すと表-3 のようになる (ただし、 K_r^* はすべて 0.05 以下であった)。

これより、入射角 θ が大きくなるに従って、空隙率と全堤体幅はともに小さくする必要があり、 $1.0 \geq q \geq 0.4, 0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ の範囲では堤体断面を適切に選べば反射率を十分小さくできることがわかる。

図-23, 24 は q がそれぞれ 1.0 と 0.4 のとき、 $\sigma^2 h/g=1.0, W_0/L=0.03$ で堤体断面を一定として入射角 θ を $0^\circ \sim 90^\circ$ と変化した場合の隔壁があるときの反射率である。 V と B/L は各図において θ が $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ のところで K_r がそれぞれ最も小さくなるような (表-3 で示した) 値とした。

図-23 の ($V=0.20, B/L=0.150$) の場合の反射率は $\theta=0^\circ$ で $K_r=0.01, \theta=35^\circ$ で $K_r=0.10, \theta=48^\circ$ で $K_r=0.20, \theta=70^\circ$ で $K_r=0.50$ と θ が大きくなるに従って、非常に緩やかに

大きくなる。 ($V=0.12, B/L=0.114$) の場合は $\theta=0^\circ$ の $K_r=0.29$ より $\theta=57^\circ$ の $K_r=0.01$ まで緩やかに小さくなり、その後は θ の増加とともに大きくなる。 図-24 の $q=0.4$ の場合も同様である。

b) 隔壁がない場合

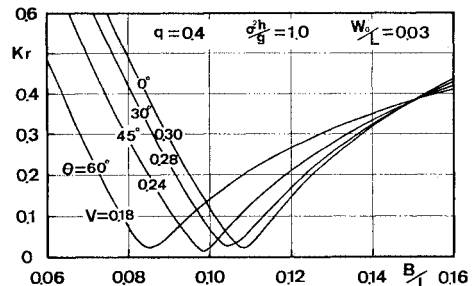


図-22 遊水部幅を変化したときの反射率 (糊式)

表-3 K_r^* が最も小さくなる V と B^*/L ($W_0/L=0.03$)

q	$\sigma^2 h/g$	θ	V	B^*/L	q	$\sigma^2 h/g$	θ	V	B^*/L
1.0	0.5	0°	0.20	0.153	0.4	0.5	0°	0.34	0.110
		30°	0.18	0.146			30°	0.30	0.105
		45°	0.14	0.127			45°	0.26	0.098
		60°	0.12	0.116			60°	0.20	0.086
1.0	1.0	0°	0.20	0.150	0.4	1.0	0°	0.30	0.108
		30°	0.18	0.143			30°	0.28	0.105
		45°	0.16	0.135			45°	0.24	0.098
		60°	0.12	0.114			60°	0.18	0.085
1.0	1.5	0°	0.20	0.150	0.4	1.5	0°	0.28	0.110
		30°	0.18	0.141			30°	0.24	0.104
		45°	0.16	0.132			45°	0.22	0.100
		60°	0.12	0.114			60°	0.16	0.087

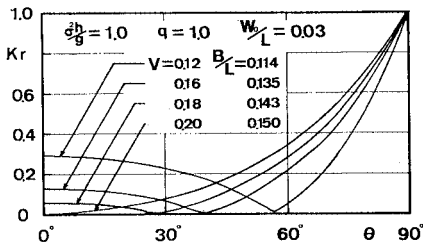


図-23 斜め入射波に対する反射率 (隔壁あり)

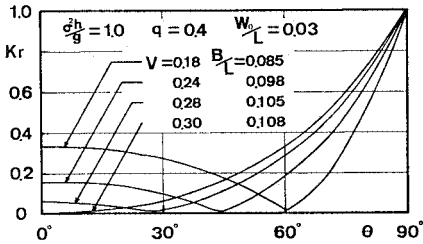


図-24 斜め入射波に対する反射率 (隔壁あり)

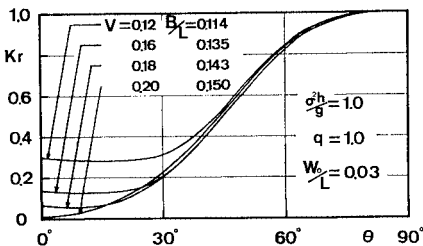


図-25 斜め入射波に対する反射率 (隔壁なし)

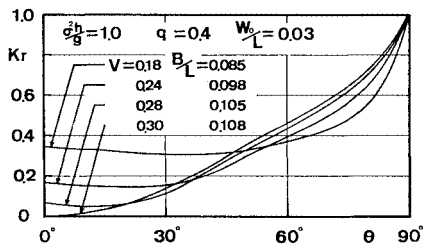


図-26 斜め入射波に対する反射率 (隔壁なし)

図-25, 26 は隔壁がない場合の反射率で、計算条件は図-23, 24 の隔壁がある場合とまったく同じである。

図-25 の $q=1.0$ の ($V=0.20, B/L=0.150$) の場合の反射率は $\theta=0^\circ$ では隔壁がある場合の値と同じく $K_r=0.01$ であるが、 $\theta=20^\circ$ で $K_r=0.10, \theta=28^\circ$ で $K_r=0.20, \theta=43^\circ$ で $K_r=0.50$ と θ が大きくなるに従って急激に大きくなる。 ($V=0.12, B/L=0.114$) の場合は $\theta=0^\circ$ で $K_r=0.29, \theta=25^\circ$ まではほぼ一定であるが、その後は ($V=0.20, B/L=0.150$) とほぼ同じ値になり、隔壁がある場合のような反射率の低下はみられない。

図-26 の $q=0.4$ の反射率は $q=1.0$ の場合と比較すると θ に対してやや緩やかに増加するが、 $q=0.4$ で隔壁がある場合と比較するとその変化は、はるかに急激である。また、隔壁がある場合のような、 $\theta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ における K_r の低下はみられない。

このほかの条件についても計算を行ったが、隔壁がない場合も斜め入射波に対して、 W_0/L と V および B/L を適切に選べば反射率が十分小さくなる場合もある。しかし、そのときは隔壁がある場合に比べて θ が大きいほど B/L は大きくなり、この傾向は q が大きいほど顕著になる。また、隔壁がない場合は、隔壁がある場合に比べて入射角の変化に対する反射率の変化は著しい。

したがって、遊水部をもつ直立消波構造物に斜め入射波が作用する場合には、隔壁が必要であることがわかる。

5. むすび

以上のように、遊水部をもつ直立消波構造物の透過壁が有孔壁の場合について検討したが、これをまとめると次のようになる。

(1) 垂直入射の場合

① $1.0 \geq q \geq 0.4, 0.3 \leq \sigma^2 h/g \leq 2.0$ の範囲では、有孔壁の壁厚と空隙率および全堤体幅を適切に選べば反射率を十分小さくできる。また、反射率を小さくするためには、遊水部内水深を浅くするに従って空隙率は大きく、全堤体幅は狭くする必要がある。

② $0.3 \leq \sigma^2 h/g \leq 2.0, 0.01 \leq W_0/L \leq 0.06, 0.10 \leq V \leq 0.38, B/L \leq 0.25$ の範囲において、基本型の場合は、 $W_0/L, V, B/L$ を一定値とするときの反射率は波長によってほとんど変化せず、反射率を最小にする空隙率と全堤体幅は W_0/L に対してそれぞれ、

$$V = W_0/L + 0.167$$

$$B^*/L = \tan^{-1}[(W_0/L + 0.167)/(2\pi W_0/L)]/2\pi + W_0/L$$

ではほぼ表わされる。

一方、柵式の場合は、 q , W_0/L , V , B/L を一定値とするときの反射率は波長によって変化し、 q , W_0/L の値に対して反射率を最小にする空隙率は波長が短くなるに従って小さくなる。この傾向は q が小さくなるほど顕著になる。

(2) 斜め入射の場合

① 反射率を小さくするためには隔壁が必要である。

② $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$, $1.0 \geq q \geq 0.4$, $0.3 \leq \sigma^2 h/g \leq 2.0$ の範囲では、堤体断面を適切に選べば反射率を十分小さくできる。また、反射率を小さくするためには、入射角 θ が大きくなるに従って、空隙率と全堤体幅はともに小さくする必要がある。

ここで検討した斜め入射波に対する反射率は、無限に長い消波護岸に対するものであるが、泊地の一部に消波護岸がある場合、実際には入射波の方向が不明なことが多いので、個々の場合について検討が必要となる。これは理論的に解析することができる⁸⁾。

入射波高に対して孔径が過大または過小の場合には消波効果が低下する傾向があり、孔径と入射波高の比が $d_0/H_i=0.5\sim 1.5$ 程度において最も有効であることが、2, 3 の実験で確かめられた。今後この点についてもさらに詳細に検討する予定である。

最後に、実験にあたって協力いただいた九州大学工学

部文部技官牛房幸光氏、ならびに当時学部学生であった土江明君（現五洋建設 K.K.）、鳥越正美君（現大学院）に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 井島武士・奥蘭英明：遊水部をもつ柵式直立消波構造物の理論解析と消波特性，土木学会論文報告集，第327号，pp. 87~97, 1982年11月。
- 2) Terrett, F.L., J.D.C. Osorio and G.H. Lean: Model Studies of a Perforated Breakwater, Proc. 11th Conf. on Coastal Eng., London, Vol. 2, pp. 1104~1120, 1968.
- 3) 井島武士・奥蘭英明・牛房幸光：遊水部をもつ護岸に作用する斜め入射波の反射率について，九大工学集報，第51巻，第3号，pp. 235~240, 1978年6月。
- 4) 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所：斜め入射波に対する直立消波構造物の消波特性実験報告，1981年9月。
- 5) 田淵幹修・滝川 清：透過性構造物の流体抵抗について，第25回海岸工学講演会論文集，pp. 402~406, 1978年11月。
- 6) 井島武士・吉田明德・北山 齊：斜め入射波に対する潜堤の反射効果に関する数値解析，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 418~422, 1982年10月。
- 7) 井島武士・周 宗仁・湯村やす：任意形状の透過および不透過防波堤による波の散乱，土木学会論文報告集，第225号，pp. 31~42, 1974年5月。
- 8) 井島武士・吉田明德・奥蘭英明・北山 齊：消波護岸を有する港湾内水面振動の数値解析，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 183~187, 1982年10月。

(1982.9.11・受付)