

遊水部をもつ直立消波構造物前面の水面変動特性について

奥 蘭 英 明*・阿 部 孝 行**

1. はし が き

遊水部をもつ直立消波構造物は断面寸法に対応した特定の波長の波に対しては消波効果が高く、これを岸壁や護岸として用いれば港内を静穏にすることができる。この種の消波構造物の研究は数多くなされており、断面寸法と反射率の関係はかなり明らかにされている¹⁾。

しかし、越波²⁾や繋留船の動揺^{3),4)}などを考える場合に重要となる消波構造物の前面波形については不明な点が多い。

そこで本研究では、遊水部をもつ有孔壁岸壁と一様透過壁防波堤について、長波近似理論と規則波実験により、堤体前面の水面変動特性を明らかにする。

2. 遊水部をもつ有孔壁岸壁

(1) 部分重複波の node 位置を示す式

図-1に示すような遊水部をもつ有孔壁岸壁において、有孔壁の壁厚を W_0 、空隙率を V 、遊水部幅を W_1 、全堤体幅を B 、水深 h での波長を L とし、原点 O を静水面上でかつ有孔壁前面にとり、長波近似理論を用いると、複素反射率 K は次式のように表わされる⁵⁾。

$$K = \frac{1 - \frac{1}{2}k W_0(\beta + i\alpha)(1 - e^{2ikW_1})}{1 + \frac{1}{2}k W_0(\beta + i\alpha)(1 - e^{-2ikW_1})} \cdot e^{-2ikW_1} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $\alpha = (1 + \mu_2)/V$ 、 $\beta = (\mu_1/\sigma)/V$ であり、 μ_1 、 μ_2 はそれぞれ流速および加速度に比例する抵抗の係数、 σ は角周波数、 k は波数である。

K の絶対値を K_r 、実数部を $R_e(K)$ 、虚数部を $I_m(K)$ 、偏角を ϵ で表わすと次式を得る。

$$\tan \epsilon = \frac{I_m(K)}{R_e(K)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$R_e(K) = \frac{\{\alpha k W_0 - \cot(k W_1)\}^2 + (\beta k W_0)^2 - 1}{\{\alpha k W_0 - \cot(k W_1)\}^2 + (\beta k W_0 + 1)^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

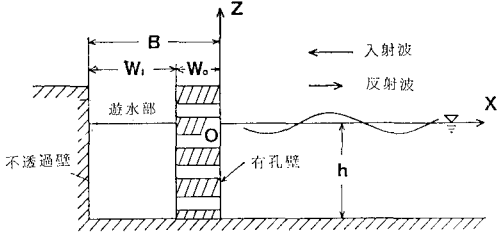


図-1 遊水部をもつ有孔壁岸壁

$$I_m(K) = \frac{2\{\alpha k W_0 \cot(k W_1)\}}{\{\alpha k W_0 - \cot(k W_1)\}^2 + (\beta k W_0 + 1)^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

有孔壁前面 ($x=0$) から node までの距離を x^* で表わすと、次の関係式が得られる。

$$x^*/L = \frac{\epsilon}{4\pi} + \frac{2n+1}{4} \quad \dots\dots\dots (5)$$

従って、 W_0/L 、 V 、 W_1/L および抵抗の係数 μ_1/σ 、 μ_2 が与えられれば、式(2)~(5)より有孔壁岸壁による部分重複波の node 位置がわかる。ただし、 $-\pi \leq \epsilon < \pi$ であり、 $n=0, 1, 2, \dots$ は、それぞれ有孔壁前面より沖に向かって第1, 第2, 第3, ... 番目の node を表わす。

(2) 実験装置および方法

実験は図-2のような長さ 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、水深を $h=50$ cm とし、周期 2.01 秒 (波長 $L=4.07$ m、 $\sigma^2 h/g=0.5$ 、 g は重力の加速度)、入射波高 $H_i=5.0$ cm の波について行った。

有孔壁としては、発泡スチロール板とベニヤ板に直径 4.8 cm の孔をあけたものを用い、壁厚を $W_0/h=0.1$ 、0.2、0.4、0.6、空隙率を $V=0.099$ 、0.159、0.198、

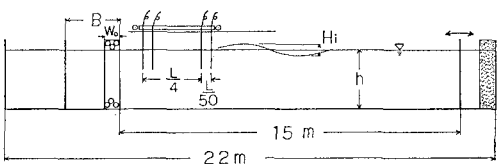


図-2 有孔壁岸壁の実験装置概略

* 正会員 工博 九州産業大学助教授 工学部土木工学科
** 正会員 九州産業大学副手 工学部土木工学科

0.247, 0.318, 0.382 とした。遊水部背後不透過壁には厚さ 2.5cm の合板を鋼材により固定したものをを用いた。

測定には容量式波高計を用い、 $L/4$ 離れた 2 本の波高計を 2 組、計 4 本で堤体前面の水面変動を $L/50$ 間隔で測定し、部分重複波の node 位置を求めた。

(3) 計算値および考察

図—3, 4 は式 (1)~(5) を用いて、有孔壁の壁厚と波長の比 W_0/L が 0.03 のとき、空隙率 $V=0.10, 0.12, \dots, 0.32$ に対する反射率 K_r と有孔壁前面から部分重複波の node 位置までの無次元距離 x^*/L を、全堤体幅と波長の比 B/L を横軸として示したものである。ただし、node 位置は $V=0.196, 0.198$ についても示し、計算に用いた抵抗の係数 μ_1/σ は有孔壁岸壁の反射率実験から得られた文献 6) の式 (5)、 μ_2 は 0 とした。

図—3 のように壁厚 W_0/L 、空隙率 V の有孔壁に対して、遊水部を特定の幅にすると反射率は最小となる。このときの全堤体幅と反射率をそれぞれ最適全堤体幅 B^*/L 、最小反射率 K_r^* と呼ぶことにすると、 W_0/L に対して、 $V=W_0/L+0.167$ とするとき、 K_r^* は最も小さくなることが実験的に示されている⁷⁾。($W_0/L=0.03$ では $V=0.197$ のとき $K_r^*=0$ と最も小さくなる。)

次に図—4 の node 位置をみると、空隙率が $V=0.197$

より大きい小さいかによって B/L に対する x^*/L の傾向が大きく異なることがわかる。

a) $V < W_0/L + 0.167$ のとき

x^*/L は遊水部幅が非常に狭いときは 0.75 よりやや小さい値であるが、 B/L が大きくなるに従って一度小さくなり、最適全堤体幅 B^*/L で $x^*/L=0.75$ となり、堤体前面はちょうど loop になる。その後、 x^*/L は一定値に近づく。特に、 B^*/L 付近では遊水部幅が広くなるに従って、node 位置は堤体からはなれて行く傾向にあることがわかる。また、空隙率が小さくなるに従って、 x^*/L は $V=0$ (不透過壁) の node 位置を示す図中の破線 ($x^*/L=0.75$) に漸近する。

b) $V > W_0/L + 0.167$ のとき

x^*/L は B/L の増加とともに小さくなり、遊水部幅が広くなるに従って node 位置は堤体に近づく傾向にあることがわかる。 B^*/L では $x^*/L=0.50$ となり、堤体前面はちょうど node になる。また、空隙率が大きくなるに従って、 x^*/L は $V=1.0$ (有孔壁がない場合) の node 位置を示す図中の一点鎖線 ($x^*/L=0.75-B/L$) に漸近する。

c) $V = W_0/L + 0.167$ のとき

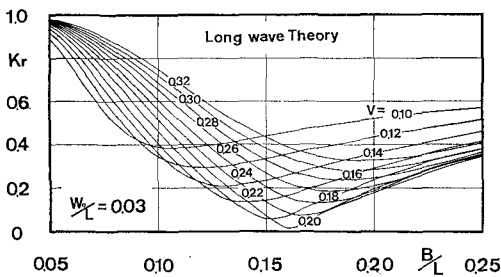
B^*/L では $K_r^*=0$ となり、反射波はなくなる。従って、node は存在しない。

なお、 x^*/L の計算値は $V < W_0/L + 0.167$ のときは $0.5 < x^*/L < 1.0$ 、 $V > W_0/L + 0.167$ のときは $0.25 < x^*/L < 0.75$ の範囲について示した。

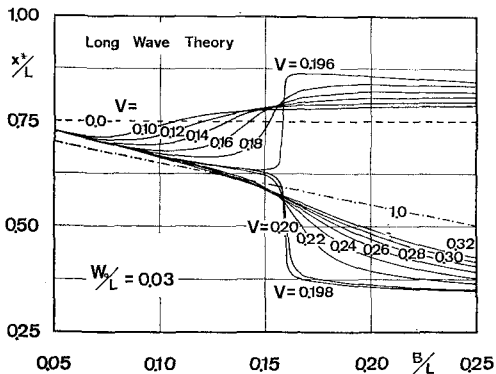
(4) 計算値と実験値の比較

図—5~8 は、有孔壁岸壁の実験による node 位置を、式 (5) より計算した x^*/L と比較したもので、 $\sigma^2 h/g$ は 0.5、有孔壁の壁厚と波長の比はそれぞれ $W_0/L=0.0124, 0.0246, 0.0493, 0.0737$ である。

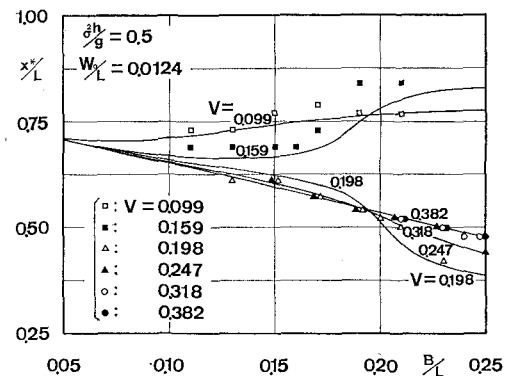
図—5, 6 の空隙率が $V=0.099, 0.159$ のときは、先に述べた (3)—a) の $V < W_0/L + 0.167$ の条件を満たす



図—3 有孔壁岸壁の反射率



図—4 有孔壁岸壁の node 位置



図—5 有孔壁岸壁の node 位置

ことになり、実験値の x^*/L は B/L の増加とともに大きくなる。逆に $V=0.198, 0.247, 0.318, 0.382$ では b) の $V > W_0/L + 0.167$ となり、 x^*/L は B/L の増加とともに小さくなる。次に、有孔壁が厚くなった図-7, 8 では、 $V=0.198$ は a) の傾向を示すことがわかる。

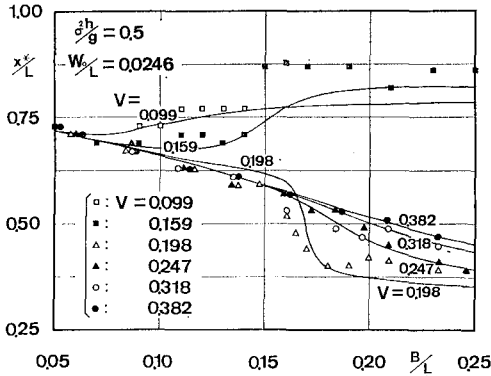


図-6 有孔壁岸壁の node 位置

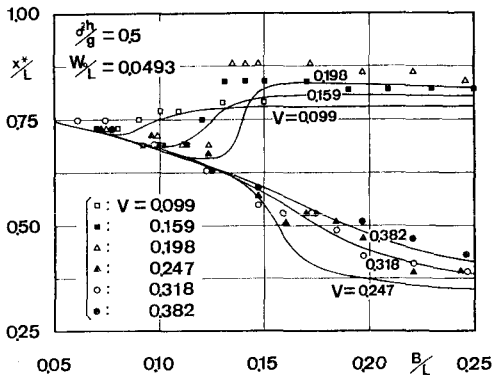


図-7 有孔壁岸壁の node 位置

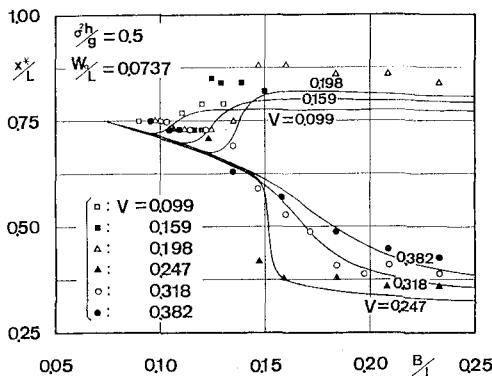


図-8 有孔壁岸壁の node 位置

なお、実験値の x^*/L はそれぞれ文献 8) の図-13~16 の反射率の実験値と対応するが、これも参照すると、 x^*/L は最適全堤幅 B^*/L のとき、a) の条件では $x^*/L \approx 0.75$, b) の条件では $x^*/L \approx 0.50$ となることが確認できた。

また、ここで示した実験値と計算値はほぼ一致しており、理論の検証ができたと考える。

3. 遊水部をもつ一様透過壁防波堤

(1) 実験装置および方法

実験は図-2と同様な長さ 18 m, 幅 40 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、水深を $h=50$ cm とし、周期 1.35 秒 (波長 $L=2.45$ m, $\sigma^2 h/g=1.10$), 入射波高 $H_i=3.5$ cm の波について行った。

透過壁としては、金網の枠 ($W_0=17$ cm) に、直径 6.2 cm のプラスチック球をいれたものを用い、空隙率が $V=0.40, 0.50, 0.60$ となるように寸切ボルトにより調整した。

測定方法は有孔壁岸壁のときと同様であるが、水面変動は $L/48$ 間隔で測定し、Healy の方法により反射率も求めた。

(2) 反射率および node 位置の実験結果

図-9, 10 は、透過壁の壁厚と波長の比 W_0/L が 0.07 と一定で、全堤幅と波長の比 B/L を 0.13, 0.14, ..., 0.20 としたときの反射率 K_r と部分重複波の node 位置 x^*/L の実験結果を示したものである。

空隙率が $V=0.40$ では、 K_r は $B/L=0.15$ 付近で最小となるが、このときの x^*/L は 0.75 となり、透過壁前面のところは loop になる。また、 x^*/L の値は B/L の増加に伴って次第に大きくなる。

一方、 $V=0.50, 0.60$ の x^*/L は B/L の増加とともに小さくなり、最小の反射率のとき $x^*/L=0.50$, すな

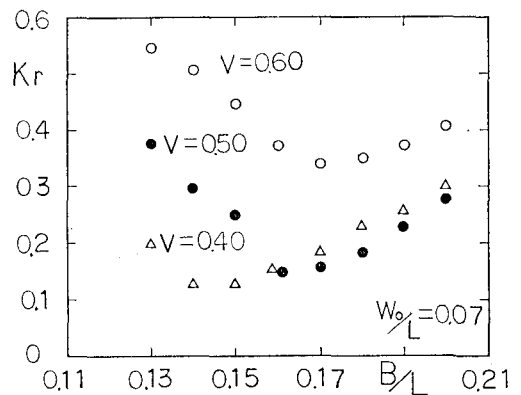


図-9 一様透過壁防波堤の反射率

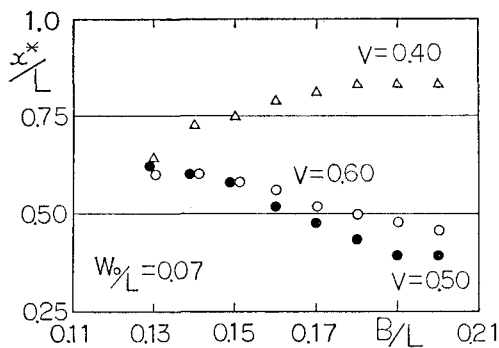


図-10 一樣透過壁防波堤の node 位置

わち透過壁前面のところは node になる。

以上のことは有孔壁岸壁の傾向とまったく同じである。

(3) 水面変動の計算値と実験値および考察

一樣透過壁防波堤の複素反射率 K は、原点を静水面上でかつ透過壁前面にとれば、有孔壁岸壁の式(1)と全く同じになる。そこで、水面波形 ζ は K を用いて次式のように表わされる。

$$\zeta(x, t) = a[e^{ikx} + K e^{-ikx}] \cdot e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 a は入射波の振幅である。

$W_0/L=0.07$, $V=0.60$, $B/L=0.17$ のときの水面波形 ζ/a の計算値を、 x/L を横軸として、 $\omega t=0^\circ, 30^\circ, \dots, 330^\circ$ について示すと図-11 のようになり、透過壁前面はほぼ node となるのが良くわかる。

ただし、計算に用いた流速および加速度に比例する抵抗の係数 μ_1/σ , μ_2 は実験より得られた反射率 K_r と node 位置 x^*/L より求めた⁹⁾。

図-12 は、 $W_0/L=0.07$ のときの式(6)による水面変動の絶対値 $|\zeta/a|$ と、 $L/48$ ごとに測定した実験値 (○印) を比較したものである。 $V=0.40$, $B/L=0.17$ では堤体前面はほぼ loop になる。 $V=0.50$, $B/L=0.17$ では K_r が 0.157 と小さいので $|\zeta/a|$ は 0.8~1.2 になる。 $V=0.60$, $B/L=0.15$ では遊水部幅が反射率を最小にする遊水部幅よりもやや狭いため、node 位置は $x/L=$

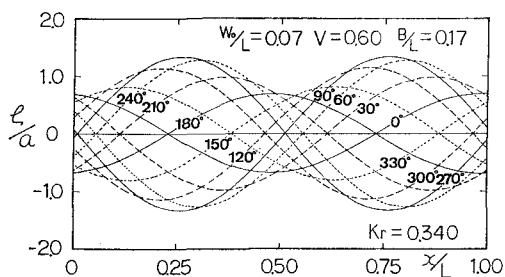


図-11 一樣透過壁防波堤の水面波形

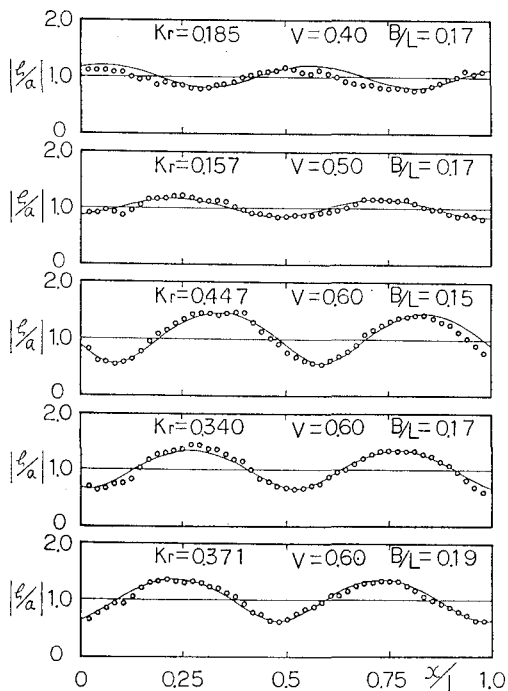


図-12 一樣透過壁防波堤の水面変動の絶対値

0.08, 0.58 にある (図-9, 10 参照)。また、loop となる $x/L=0.33, 0.83$ では K_r が 0.447 と大きいため水面は大きく変動する。 $V=0.60$ の $B/L=0.17$ と 0.19 では堤体前面はほぼ node になり、 $|\zeta/a|$ は 0.65 程度になる。また、いずれも計算値と実験値は良く一致している。

以上のように、遊水部をもつ一樣透過壁防波堤では、断面寸法と透過壁の空隙率を適切に選べば堤体前面の波高を小さくすることができる。

4. む す び

ここでは、遊水部をもつ有孔壁岸壁と一樣透過壁防波堤前面の水面変動特性について示したが、同様な結果が水平スリット壁岸壁の実験¹⁰⁾においても得られている。

以上のことより、次のように結論がまとめられる。

① 遊水部をもつ直立消波構造物の部分重複波の node 位置は透過壁の空隙率によって大きく影響され、その傾向は透過壁の空隙率が、反射率を最小にする (K_r^* を最小にする) 空隙率よりも大きい小さいかによって大きく異なる。

② K_r^* を最小にする空隙率よりもやや大きい空隙率にし、全堤体幅を最適全堤体幅 B^*/L にすれば、反射率はやや大きくなるが、堤体前面は node になり、水位の上下動が小さくなる。

また、次のようなことが考えられる。

③ 結論①により、遊水部をもつ直立消波構造物の反射率測定実験を行うとき、部分重複波の node 位置を測定すれば、使用した透過壁の空隙率が反射率を最小にする空隙率よりも大きい小さいかの予測ができる。

④ 結論②により、この種の構造物を防波堤や護岸として用いれば越波量の低減に有効であると予想される。

⑤ 遊水部をもつ消波岸壁では、図-3 に示したように、反射率がある値となる岸壁は、透過壁の壁厚と空隙率および遊水部幅の3つを適切に選ぶことにより、いくつも得られる。従って、たとえ反射率が同じ値であっても、岸壁形状が異なれば、岸壁前面の水面変動も異なるわけであるから、繫留船の動揺を考える場合には、この点も十分考慮する必要があると思われる。

参 考 文 献

1) たとえば、井島武士・奥蘭英明：遊水部をもつ棚式直立

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。

- 2) 山本正昭・西 裕司：越波の少ない低天端堤の開発，第31回海岸工学講演会論文集，pp. 537～541，1984。
- 3) 榎木 亨・久保雅義・京谷光高：荷役限界からみた港内静穏度に関する研究（第3報），第26回海岸工学講演会論文集，pp. 646～650，1979。
- 4) 清川哲志・平山彰彦：任意反射率岸壁前面の船体動揺特性，第31回海岸工学講演会論文集，pp. 476～480，1984。
- 5) 前出 1)。
- 6) 奥蘭英明・吉田明徳・井島武士：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，土木学会論文報告集，第335号，pp. 97～106，1983。
- 7) 前出 6)。
- 8) 前出 1)。
- 9) 井島武士・吉田明徳・奥蘭英明・北山 斉：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。
- 10) 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所：直立消波構造物の消波特性実験報告書，pp. 1～83，1982。