

離岸潜堤の消波機構に関する一考察

田 渕 幹 修*・滝 川 清**

1. ま え が き

近年、海岸の多様な価値、例えば日常生活やレクリエーションの場として、あるいはその景観そのものの等の価値が高まりつつあり、また生態学上や水質保全上の海浜の役割の重要性も主張されている。しかし、このような海岸の価値と、防災を目的とした海岸構造物の存在は、平常時には必ずしも両立しない場合が多い。

最近はこの双方を両立させる海岸保全対策が、考えられつつあるが、例えば養浜工を砂浜がほとんど無い海岸や埋立地前面に実施するためには養浜法尻の止砂壁堤(法止工)と同時に荒天時に養浜砂が取られない程度まで来襲波を消波できる構造物をより沖合に設ける必要がある。あるいは単に護岸工等を小規模化したり、また水産土木の立場からは養殖漁場造成のために沖合の消波構造物が必要となる事も多い。

このような沖合における前衛消波構造物としては、透過防波堤や浮消波堤等が挙げられるが、視野の確保や景観上また、ある程度天端上水深を確保できると、ヨット等の海面レクリエーションやボート等の利便の上でも潜堤は優れた構造物といえる。本論文はこのような大水深の海域に設置する場合の潜堤を考え、これの消波特性について考察するものである。

潜堤の消波効果に関する研究は、比較的多く行なわれている^{1),2)}。これらは碎波による消波効果を期待した実験的研究が主で、従来は浅い水域に設置することを想定したものが多いが、最近大水深域での潜堤に関する研究も行なわれるようになった^{3),4)}。理論的研究としては、ポテンシャル接続法を不透過潜堤に適用した井島・佐々木(1971)の研究⁵⁾、同じく透過潜堤について調べた井島・田淵他(1972)の研究⁶⁾がある。

本論文では、天端上水深の大きい潜堤では重要となってくる非碎波の消波機構を、ポテンシャル接続法と有限要素法による計算によって調べる。まず、不透過潜堤および透過潜堤に関し、井島らによってすでに与えられている結果に潜堤法勾配の影響を追加計算してその消波効

果を考察し、さらに水中に水平板を置いて板上部の水面波と板下部の流れの間での位相差による干渉を利用し消波を行う水平式板干渉型潜堤を取り上げて消波効果を調べる。なお、この水平式板干渉型潜堤は、水平板型透過性防波堤として服部・松本(1977)⁷⁾により報告されているものと同じものである。

2. 潜堤のモデルと計算方法

非圧縮性流体の非回転運動で速度ポテンシャル Φ をもつ2次元の流体運動を考える。透過層領域ではその空隙率を ϵ 、附加質量係数を C_M 、一般には非線形である流体抵抗を線形化した等価線形抵抗係数を μ とする。

解析は一部の計算を除き線形解析、すなわち微小振幅波理論により、この時の基礎式は次の様である。(静水面上に x 軸、鉛直上方に z 軸をとる)。

連続方程式および運動方程式

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{1}{gV} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \mu V \Phi \right) + \frac{p}{\rho g} + z = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで

$$\frac{1}{V} = \frac{1}{\epsilon} (1 + (1 - \epsilon) C_M)$$

また、 g は重力の加速度、 ρ は流体の密度、 p は流体圧力である。

境界条件は、静水面からとった水位変動量を η とすると

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial t} &= \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=0} \\ \eta &= \frac{1}{gV} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \mu V \Phi \right) \Big|_{z=0} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

および水底など不透過な境界面で

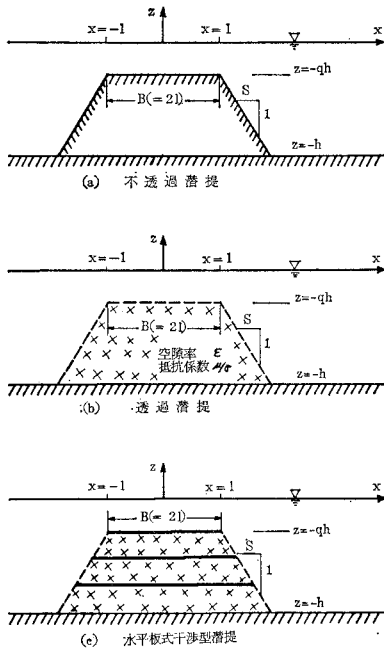
$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad (n; \text{外向き法線方向余弦}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

である。なお、流体のみの場合は上の各式で $\epsilon=1$ 、 $C_M=0$ 、 $\mu=0$ とおく。

以上の基礎式に基づき、解析手法としては主として有限要素法を用い一部ポテンシャル接続法によるが、これらの解法の詳細は参考文献 8)、9) および 5)、6) に示

* 正会員 熊本大学講師 工学部環境建設工学科

** 正会員 工修 熊本大学助手 工学部環境建設工学科



図—1 潜堤のモデル

されている。

計算の対象とする潜堤モデルとしては、図—1 に示すように不透過潜堤、透過潜堤および水平板式干渉型潜堤の3種をとりあげる。

なお、本計算では透過層の C_M は常に 0 とした。

3. 計算結果と考察

法勾配 $S=0$ の透過性潜堤の通過率 K_t は、ポテンシャル接続法で scattering wave の項を無視すると式 (5) で示される。ただし同式中 ν_0 は式 (6) で決められるところの潜堤上を進行する波の複素 wave number で、 $\nu_0 = k^{(r)} + ik^{(i)}$ とおくと実部 $k^{(r)}$ が wave number, 虚部 $k^{(i)}$ が減衰率を表わす。不透過潜堤では $\nu_0 = k'$ で、 k' は分散関係式 $\sigma^2 qh/g = k'qh \tanh k'qh$ を満足する wave number である。なお σ は入射波の角周波数 ($=2\pi/T$; T は周期) である。

$$K_t = [(\cos 2\nu_0 l + iR \sin 2\nu_0 l)^{-1}] \dots\dots\dots (5)$$

$$\begin{aligned} \gamma &= \nu_0 h (\beta \tanh q\nu_0 h + \tanh \bar{q}\nu_0 h) / (\beta \\ &\quad + \tanh q\nu_0 h \cdot \tanh \bar{q}\nu_0 h) \\ \gamma &= \sigma^2 h/g, \quad \bar{q} = 1-q, \quad \beta = (1-iV\mu/\sigma)/V \\ &\dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

ここで $R = (1 + \alpha^2)/2\alpha$, また $\lambda_0 = kh$, $\lambda_0' = \nu_0 h$ とおいて

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\lambda_0'}{\lambda_0} \left[1 - \left(1 - \frac{1}{\beta} \right) (\lambda_0' - \lambda_0 \tanh \lambda_0 \tanh q\lambda_0') \right. \\ &\quad \times (\lambda_0' \tanh \bar{q}\lambda_0 - \lambda_0 \tanh \bar{q}\lambda_0) / \{ \lambda_0' \tanh q\lambda_0 \\ &\quad \left. - \lambda_0 \tanh \lambda_0 + \lambda_0' \tanh \bar{q}\lambda_0 (\lambda_0') \} \right] \end{aligned}$$

$$- \lambda_0 \tanh \lambda_0 \tanh \lambda_0') \}$$

$$\approx \lambda_0' / \lambda_0 = (k^{(r)} + ik^{(i)}) / k \quad (\text{透過潜堤})$$

$$= k' / k \quad (\text{不透過潜堤})$$

式 (5) で R を実部と虚部に分けて $R = R_{(r)} + iR_{(i)}$ とすると

$$\begin{aligned} K_t &= \left\{ \frac{1}{2} (1 - R_{(r)}^2 - R_{(i)}^2) \cos 4k^{(r)}l - R_{(i)} \sin 4k^{(i)}l \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} (1 + R_{(r)}^2 + R_{(i)}^2) \cosh 4k^{(i)}l \right. \\ &\quad \left. + R_{(r)} \sinh 4k^{(i)}l \right\}^{-1/2} \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

となる。上式は周期的振動項と非振動項より成るが、 $k^{(i)}l$ が大きい時は振動項は無視できて次式となる。

$$\begin{aligned} K_t &= \left\{ \frac{1}{2} (1 + R_{(r)}^2 + R_{(i)}^2) \cosh 4k^{(i)}l \right. \\ &\quad \left. + R_{(i)} \sinh 4k^{(i)}l \right\}^{-1/2} \\ &\approx \sqrt{2e^{-4k^{(i)}l} / (1 + R_{(r)}^2 + R_{(i)}^2 + 2R_{(i)})} \\ &\approx e^{-2k^{(i)}l} \quad (\because |R| \approx 1.0) \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

一方、空隙率が小さく、また抵抗係数が大きくなると $R_{(i)}$ および $k^{(i)}$ が 0 に近づいて通過率は大きくなり、かつ振動項が卓越するようになり、不透過潜堤では次式となる。

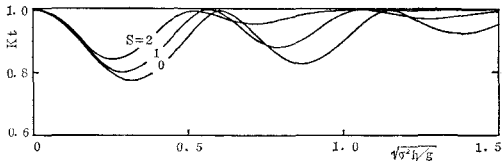
$$K_t = \sqrt{2} / \{ (1 - R_{(r)}^2) \cos 4k'l + (1 + R_{(r)}^2) \}^{1/2} \dots\dots (9)$$

これより、不透過潜堤では $\cos 4k'l = 1$ すなわち堤体幅が天端上の進行波の半波長およびその整数倍の時 $K_t = 1$ の完全通過で、 $\cos 4k'l = -1$ の時通過率は最小の極値をとる。

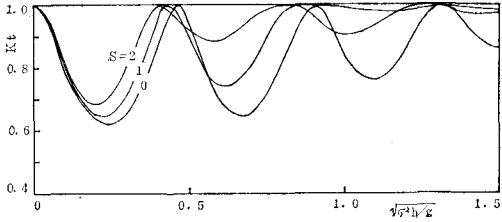
図—2 は不透過潜堤の通過率を示したものである。上述の特性が現われているが、これによると完全通過するのは堤体幅・波長比は 0.5 およびその整数倍よりやや小さい値をとっている。これは scattering wave の効果であると考えられる。堤体に法勾配をつけると堤体幅を広くしたのと同等の効果および、通過率を大きくする方向に作用し、また堤体幅を大きくしても振動周期が変化するのみである。 q は小さい程平均的通過率は小さくなるが、不透過潜堤の場合全体的に通過率は大きく、非碎波による消波効果は余り期待できない。

図—3 は透過性潜堤の通過率と反射率の計算例を示したものである。通過率の特性は式 (8) で定性的に示されるように、不透過潜堤にあった振動現象は反射率にわずかに現われるのみで、消波機構は主として透過層内のエネルギー損失による。これは反射率が小さい事からも推定できる。堤体の法勾配が大きくなると反射率・通過率ともに小さくなる。しかし、のり勾配の消波効果に対する寄与は透過層全体の容積の増加によるとみらるべきであろう。

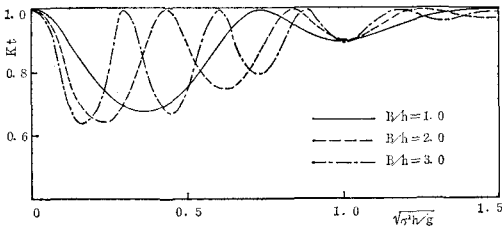
図—4 は式 (8) を用い、 $K_t = 0.5$ すなわち入射波の波



(a) 法勾配の効果 ($B/h=2.0$, $q=0.2$)



(b) 法勾配の効果 ($B/h=2.0$, $q=0.1$)



(c) 堤体幅の影響 ($q=0.1$, $S=1$)

図-2 不透潜堤の通過率 (K_t)

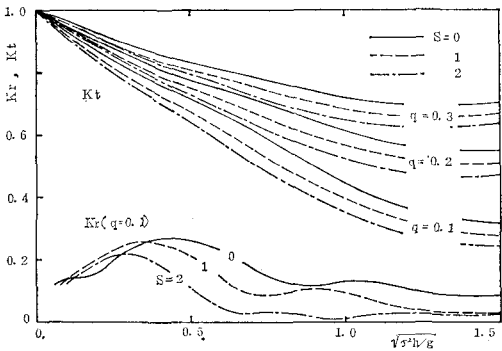


図-3 透過潜堤の通過率 (K_t) と反射率 (K_r)
($B/h=2.0$, $\mu/\sigma=1.0$, $\epsilon=0.5$)

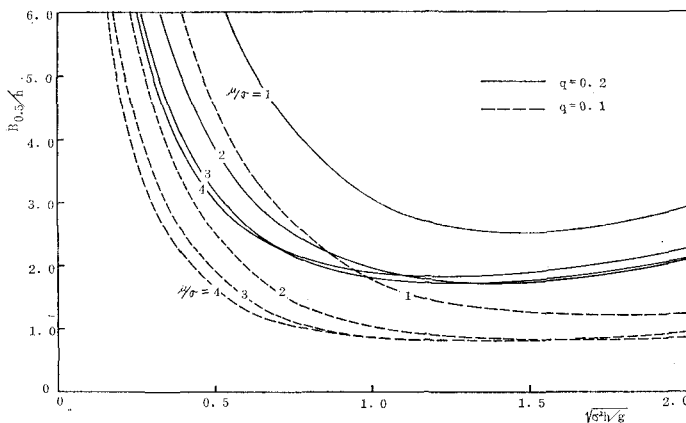
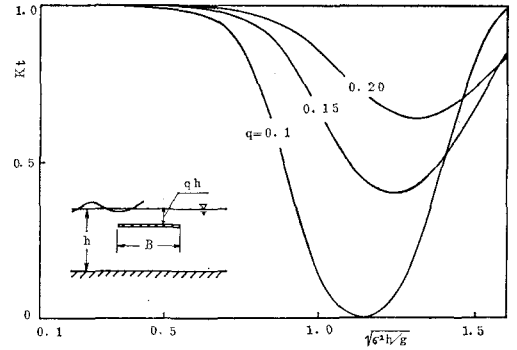
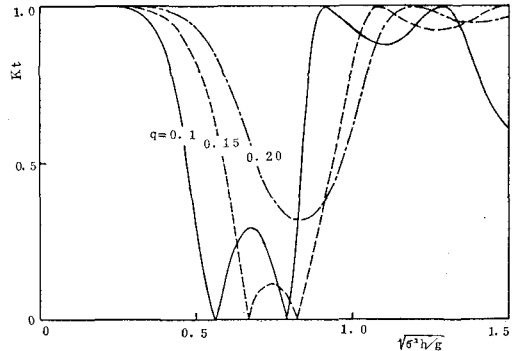


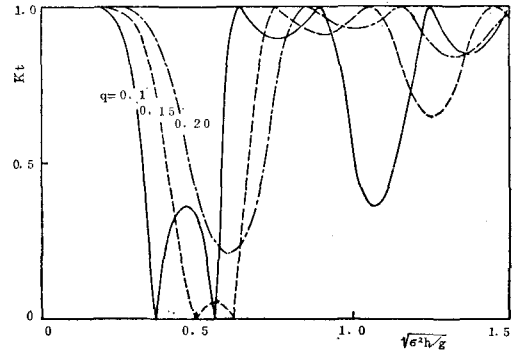
図-4 透過潜堤上での波高半減距離 ($\epsilon=0.5$)



(a) 天端上水深の効果 ($B/h=1.0$)



(b) 天端上水深の効果 ($B/h=2.0$)



(c) 天端上水深の効果 ($B/h=3.0$)

図-5 水平板式潜堤の通過率 (K_t)
(plate 1 枚, $\mu/\sigma=0$, $\epsilon=1.0$)

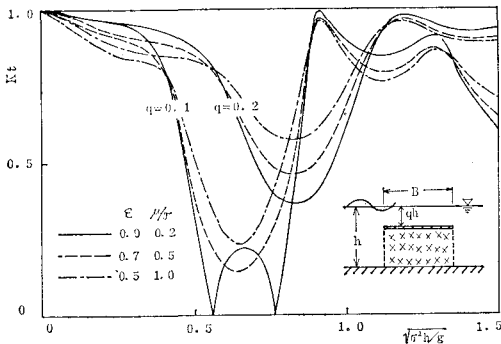
高が半減する距離を q および μ/σ をパラメーターとして示したものである。(例えば $K_t=0.25$ となる堤体幅を知りたい時は縦軸の数値を 2 倍するとよい)。この図より μ/σ は 2 程度以上が望ましい事が分るが (μ/σ が過大になりすぎると不透潜堤に近づき不都合である), ここで μ/σ の値は透過堤体の構造が決まると一義的に決まるものではなく、波の性質に依存していることを注意しておく必要がある。塩化ビニール管を使って立体格子構造を作り、これの抵抗を調べた結果¹⁰⁾によると、透過層内の断面平均流速

の振幅を u_0 、透過層構成材の代表径を d とするとき、 $u_0/\sigma d$ の値が 2 以上の時は $\mu/\sigma \propto \sqrt{u_0/\sigma d}$ で示され、 $u_0/\sigma d$ が 2 の時、 μ/σ は 1 前後の値をとる。透過層内の流速は波による水平流速に比例すると考えると $u_0 \propto \sigma H / \tanh kh$ (H は波高) より

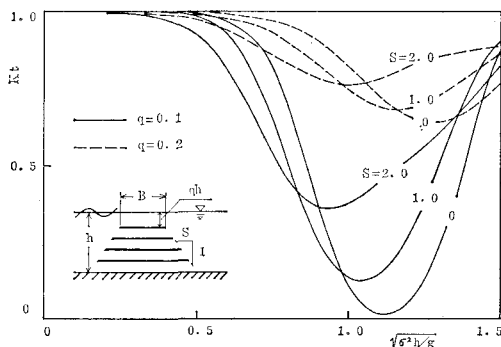
$$\mu/\sigma \propto \sqrt{H/d} \tanh kh \dots\dots\dots (10)$$

すなわち、 μ/σ は波高が大きいく程、また長波性の波ほど大きくなる。また μ/σ がほぼ 1 の値をとり、かつ上式が成立する下限の $u_0/\sigma d=2$ の値は、水粒子が透過層内の断面平均流速で動く時の移動距離が、透過層構成材の 2 倍である事を意味しているので、透過潜堤の構成材の 1 つの大きさが、波高に比較し得る大きさのものを考えると透過層はほぼ有利な抵抗係数を取る事になる。

図-5、図-6 に水平板式潜堤の通過率を示す。水平板下部の流体運動は水平板の入射波側と通過波側で位相差が無いのに対し、板上部の運動は水面波の位相速度で進む。このため、板上の水面波が板の両端で逆位相となる $B/L' \approx 0.5, 1.5, \dots$ (L' : 板上の波の波長) の時干渉が起り反射率が大きく、通過率は小さくなる。 B/h が大きく q が小さい時、 $K_t=0$ が 2 ケ所存在し K_t の曲線が折返しの状態になっているのは、板下部からのエネルギー伝達量が板上部のそれより大きい為である。なお、こ



(a) plate 下部の空隙率と抵抗係数の効果 (plate 1 枚, $B/h=2.0$)



(b) plate 枚数と法勾配の効果 (plate 4 枚, $B/h=1.0$, $\mu/\sigma=0$, $\epsilon=1.0$)

図-6 水平板式潜堤の通過率 (K_t)

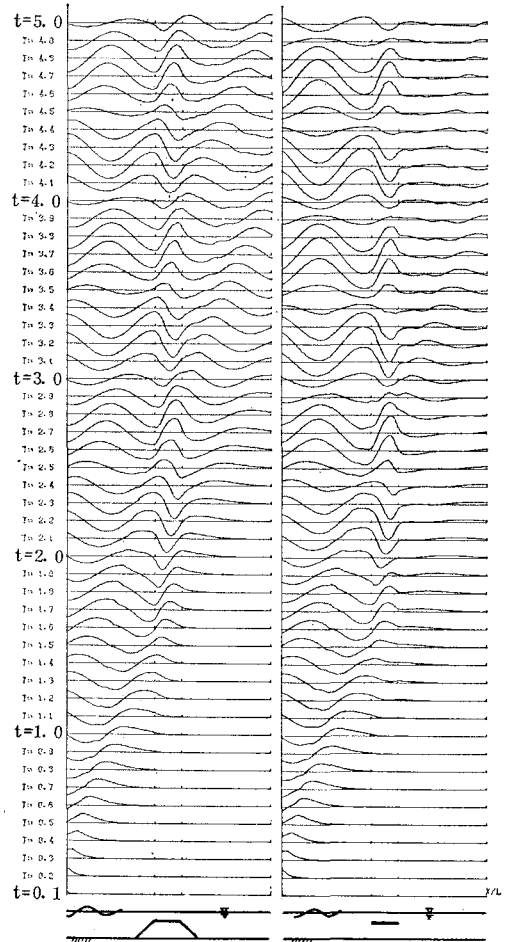


図-7 潜堤を越える波の水面変化 (左は不透過潜堤右は水平板式潜堤, $B/h=1.0$, $q=0.2$, $\sigma^2 h/g=0.36$, 入射波の波形勾配 $H_0/L_0=0.0005$)

の型の潜堤では、板下部の抵抗は小さくかつ空隙率は大きい方が消波効果も大きい。

図-7 は、潜堤付近の水面変動の時間変化を有限要素法非定常解析によって計算し示したものである。

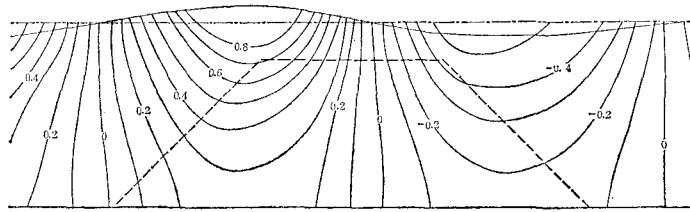
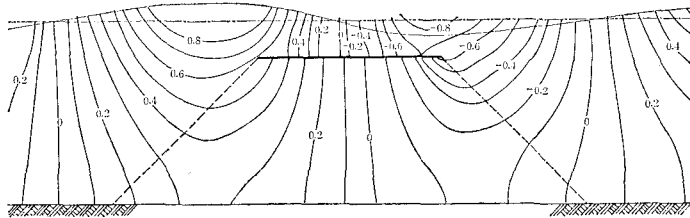
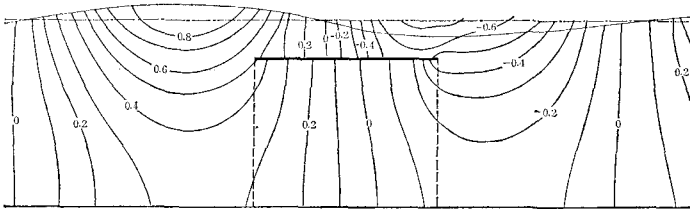
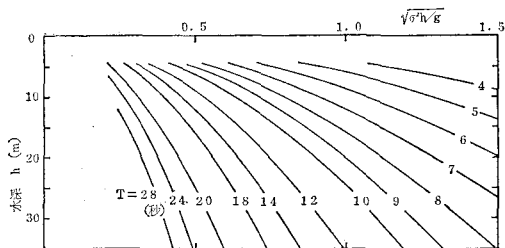
図-8 に波圧分布の計算例を示す。

図-9 は、 K_t を示した図における横軸のパラメータ $\sqrt{\sigma^2 h/g}$ と波の周期 T および水深 h の関係を示したものである。

4. あとがき

今回の報告では、紙数の関係で当初予定した波の有限振幅性の効果、特に碎波については述べる事ができなかった。これの詳細については別の機会に発表する予定であるが、本報告の計算結果をみる上で特に注意すべき事項について触れ、あとがきに代える。

i) 不透過潜堤については既述したように非碎波の消波効果はほとんど期待できず、堤上碎波によって通過率

(a) 透過潜堤 ($S=1$, $\mu/\sigma=1.0$, $\epsilon=0.5$)(b) 水平板式潜堤 (plate 1 枚, $S=1$, $\mu/\sigma=1.0$, $\epsilon=0.5$)(c) 水平板式潜堤 (plate 1 枚, $S=0$, $\mu/\sigma=0.2$, $\epsilon=0.9$)図-8 波圧分布 $p/\rho g a_s$ ($B/h=1.0$, $q=0.2$, $\sigma^2 h/g=1.69$)図-9 パラメータ $\sqrt{\sigma^2 h/g}$ と波の周期 T , 水深 h の関係

は支配される。堤上における砕波が完了する為には、沖波波長を L_0 とするとき、 $0.3 \sim 0.5L_0$ 以上堤体幅を要する事となり、現実的には、長波は、砕波で散逸可能なエネルギーを完全に失なわないまま、通過する事が多い。

ii) 透過潜堤の場合は、波の有限振幅性は間接的に抵抗係数 μ/σ に取りこまれている事、また不透過潜堤に比し砕波が生じ難い事の理由で、本計算結果の適用範囲は広い。

iii) 水平板式潜堤では、干渉が生じる周波数域では水平板下部から流出した（供給された）流体が潜堤天端上を逆流し、波高の小さい波でも砕波を生じやすく、かつ砕波形態はほとんどが巻き波砕波で、狭い堤体幅でも有効なエネルギー損失を期待できる。しかしながら、このような砕波によるエネルギー損失は反射率の低減に寄与

する割合が大きく、通過率は砕波が生じて本計算による結果に近い。(通過波は高周波成分の発生により不規則波に近くなるので、実験での通過率の定義は $\sqrt{\eta^2}$ の比による)。干渉を生じない周波数域(高周波側)での砕波による消波特性は、不透過潜堤とほぼ同様である。

参考文献

- 1) 中村 充・白石英彦・佐々木泰雄: 潜堤による消波について, 第 13 回海講講演集, pp. 76~79, 1968.
- 2) 加藤重一・上林征男: ブロック積消波堤の消波効果について, 土木学会論文集, 第 165 号, pp. 23~30, 1969.
- 3) 永井莊七郎・小田一紀・倉田克彦: 大水深緩斜面拾石潜堤に関する研究, 第 22 回海講講演集, pp. 409~419, 1975.
- 4) 三浦 晃・遠藤茂勝: 潜堤の波高伝達特性について, 第 25 回海講講演集, pp. 293~296, 1978.
- 5) 井島武士・佐々木富雄: 潜堤の効果に関する理論的研究, 第 18 回海講講演集, pp. 141~147, 1971.
- 6) 井島武士・田淵幹修・湯村やす: 潜堤の効果に関する理論的研究 (2), 第 19 回海講講演集, pp. 177~183, 1971.
- 7) 服部昌太郎・松本文信: 水平板型透過性防波堤の水理特性, 第 24 回海講講演集, pp. 168~270, 1977.
- 8) 滝川 清・田淵幹修: 有限要素法による波動解析について, 第 25 回海講講演集, pp. 28~32, 1978.
- 9) 滝川 清・田淵幹修: 有限要素法による波動解析について (3)——透過性構造物への適用——, 昭和 53 年度土木学会西部支部研究発表会概要集, 1979.
- 10) 田淵幹修・滝川 清: 透過性構造物の流体抵抗について, 第 25 回海講講演集, pp. 402~406, 1978.