

斜め入射波に対する透過性防波堤の水理特性解析

小島 治幸* ・ 宇都宮道明**・ 井島 武士***
吉田 明徳****・ 木原 力*****

1. はじめに

透過性防波堤の水理特性を理論的に解析する方法として、従来は垂直入射波に対する場合に限られていたが、昨年の海岸工学講演会で著者らは、斜め入射波にまで対応する解析的な算定方法を提案し数例の計算結果を示した¹⁾。しかし、その解析法の検証はされておらず、また壁体厚が波長に比べて薄い場合の結果のみを示したにとどまっている。そこで本研究は、水理模型実験による実測結果と算定結果との比較より解析法の妥当性を検証し、つぎに入射波長に対する相対的な壁体厚が比較的大きい場合の数値計算を試み水理特性に対する壁体厚や空隙率等の影響を明らかにするものである。さらに、この解析法を波力計算にまで拡張して透過性防波堤に作用する斜め入射波の波力の特性を解明する。

2. 算定方法の概略と波力表示式

解析法の概略と波力表示式の誘導について2列透過性壁体を対象として以下に示す。

図-1 に示すように座標軸をとり、水深 h の流体域に一樣な空隙を有する透過性防波堤がある場合、 x 軸と θ の角度をなして角周波数 $\sigma (=2\pi/T; T$ は周期)、振幅 a_0 の規則波が $-x$ 方向に進行する場合の流体運動は、非粘性、非圧縮性の完全流体の微小振幅波運動と仮定すると、次式で表される速度ポテンシャル $\Phi(x, y, z; t)$ が存在する。

$$\Phi(x, y, z; t) = ga_0/\sigma \cdot \phi(x, y, z) \cdot \exp(-i\sigma t) \dots (1)$$

ここに、 g は重力加速度、 $\phi(x, y, z)$ はラプラスの方程式を満足する無次元の関数（ポテンシャル関数）である。小島ら¹⁾の解析法にしたがい、図-1 のように仮想境界面 $AB, A'B'$ を設けてその内側領域のポテンシャル関数 ϕ は $x-z$ 平面の未知関数 $f(x, z)$ を用いて次式で表される。

$$\phi(x, y, z) = \exp(iky \sin \theta) f(x, z) \dots (2)$$

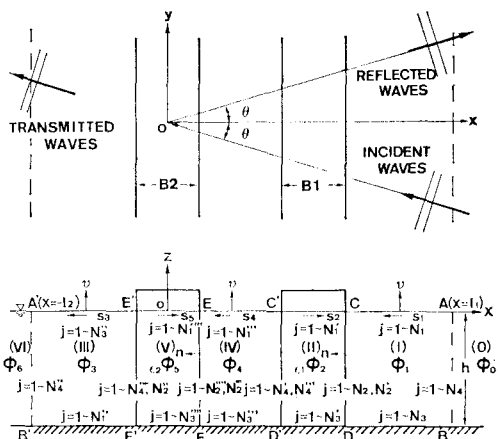


図-1 透過性防波堤モデルの流体域と座標系

ここで、 k は分散方程式を満たす入射波の波数である。また、堤体内の流体運動は抗力項を線形化した流速に比例する抵抗係数 μ_1 と加速度に比例する抵抗係数 μ_2 を導入して運動方程式を表わすことにより速度ポテンシャルに関する境界値問題に帰着させ、未知関数 $f(x, z)$ がヘルムホルツの方程式を満足するのでその特解である変形ベッセル関数をグリーン関数とする周辺積分法と事前に決められている抵抗係数を適用することによりこの問題を数値的に解くことができる。これより、各領域における未知関数 $f(x, z)$ と仮想境界面における通過率、反射率が求まる。

ここで、壁体に作用する単位幅当りの流体動圧力を $p(x, z)\exp(-i\sigma t)$ とすると $p(x, z) = i\rho ga_0 f(x, z)$ より、前後の壁体にかかる水平波力 f_{x1} と f_{x2} および鉛直波力 f_{z1} と f_{z2} は次のように書くことができる。

$$\frac{f_{x1}}{\rho ga_0 h} = i \left\{ \int_{S_1} (-f_1) dz + \int_{S_4} f_4 dz \right\} \dots (3)$$

$$\frac{f_{x2}}{\rho ga_0 h} = i \left\{ \int_{S_4} (-f_4) dz + \int_{S_3} f_3 dz \right\} \dots (4)$$

$$\frac{f_{z1}}{\rho ga_0 h} = i \int_{S_2} f_2 dx \dots (5)$$

$$\frac{f_{z2}}{\rho ga_0 h} = i \int_{S_5} f_5 dx \dots (6)$$

これより、前後壁に作用する最大水平波力 (F_1, F_2) を完

* 正会員 Engr. 九州大学助手 工学部水工土木学科

** 工 修 福岡県土木部

*** 正会員 工 博 東和大学教授 工学部土木工学科

**** 正会員 工 博 九州大学助教授 工学部水工土木学科

***** 正会員 運輸省第四港湾建設局下関調査設計所所長

全重複波の波力 $[F_s = \rho g H h \{\tanh(kh)/kh\}]$; H は入射波の波高] で無次元化するとそれぞれ次式のように書ける。

$$\frac{F_1}{F_s} = \frac{\sum_{j=1}^{N_2} \{f_4(j) - f_1(j)\} \Delta s_j}{\tanh(kh)/kh} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{F_2}{F_s} = \frac{\sum_{j=1}^{N_2} \{f_3(j) - f_4(j)\} \Delta s_j}{2 \tanh(kh)/kh} \quad \dots\dots\dots (8)$$

上式において、 Δs_j は離散化された境界上の要素長を表わす。また、前後の壁体を一体とみなした場合の合成波力 (F_T) は、完全重複波の波力で無次元化すると次式で与えられる。

$$\frac{F_T}{F_s} = \frac{F_1 + F_2}{2 \tanh(kh)/kh} \quad \dots\dots\dots (9)$$

前列と後列の壁体に作用する波力の位相差 (ω) は

$$\omega = \text{Arg}(F_2) - \text{Arg}(F_1) \quad \dots\dots\dots (10)$$

で表わされる。

3. 水理模型実験の方法と条件

実験は、長さ 22 m、幅 9 m の平面水槽を使用し、水深を 35 cm の一定として波高 4 cm の波を相対水深 $h/L = 0.12 \sim 0.32$ の範囲で入射させ、一様透過性堤体と縦スリット壁体を対象とした水槽実験を行い通過率と反射率を求め、それらと理論値との比較より理論解析法の妥当性を検証した。実験ケースは、堤体を一様透過性堤体とした場合と、1列縦スリット壁体および2列縦スリット壁体とした場合の3ケースである。一様透過性堤体は、長さ 6 m、高さ 0.6 m、幅 0.22 m の金網のかごに直径 7.0 cm の軟式ボールをボールとボールの間隔が一様になるように入れたものを用い、上からの重石と鉄パイプにより所定の位置に堤体を固定した。このときの空隙率 (ϵ) は、44.4% となる。縦スリット壁体は、長さ 0.24 m、厚さ 0.06 m、高さ 0.6 m の柱状体を開口率(空隙率)が $\epsilon = 20\%$ になるように 0.06 m 間隔で並べることで長さ 6 m、壁厚 0.06 m、高さ 0.6 m の壁体とした。また、2列縦スリット壁体は、1列縦スリット壁体を 0.35 m 間隔で2列並べたもので、縦スリット式透過性ケーソン堤を想定した実験ケースである。

実験では、模型堤体をその中心が造波板から 9 m 離れた位置に設置し、堤体をその法線と入射波がなす角度を $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ と変えて実験を行った。入射波高、通過波高ともそれぞれ3本～4本の容量式波高計で計測して、それらの平均とした。反射率は、堤体のはば中間点の法線の上に2～4本の波高計を設置して、分離推定法およびヒーラーの方法の両者を用いて測定した。また、垂直入射の場合には、縦スリット壁体に作用する波力を、その壁体を構成する柱状体を固定する鋼棒の4

カ所にブリッジ回路をなすように張られた歪みゲージを用いて²⁾測定した。

4. 結果と考察

4.1 理論解析法の検証

図-2 は、一様透過性堤体の各入射角に対する通過率 $|K_t|$ および反射率 $|K_r|$ の理論値と測定値を横軸に相対水深 (h/L) と堤体厚と波長の比 (B/L) を取って図示したもので、同様に図-3 と図-4 は、それぞれ1列縦スリット壁体と2列縦スリット壁体の結果を示している。なお図-4 の2列縦スリット壁体の場合は、壁体間隔と波長の比 (D/L) を横軸としている。図中に示している計算に必要な抵抗係数は、二次元水路における垂直入射波の模型実験より得られた通過率、反射率と理論計算から得られるそれら算定値との偏差が最小となるとき係数値である³⁾。理論値と実測値を比較して理論解析の妥当性を検討すると、3ケースとも反射率の実験値はかなりのばらつきがみられ理論値と実験値を比較するのは難しいが、通過率に関しては算定値と実測値はよく一致している。特に、図-3, 4 の1列、2列縦スリット壁体のケースのように壁体厚が波長と比べて十分に小さい場合は、入射角が大きくなるにしたがい通過率が增大する傾向を模型実験でも得ることができた。また、一様透過性堤体のケースのように堤体幅が比較的大きい場合は、入射波長がある値より短くなると入射角の大きいときの通過率が角度の小さいときのそれよりも小さくなるという傾向が理論値および実測値で認められた。以上のことから、実験を行った範囲では、入射角が変わっても計算に必要な抵抗係数として垂直入射で決められた値を用いれば本解析法により斜め入射波に対する透過性防波堤の

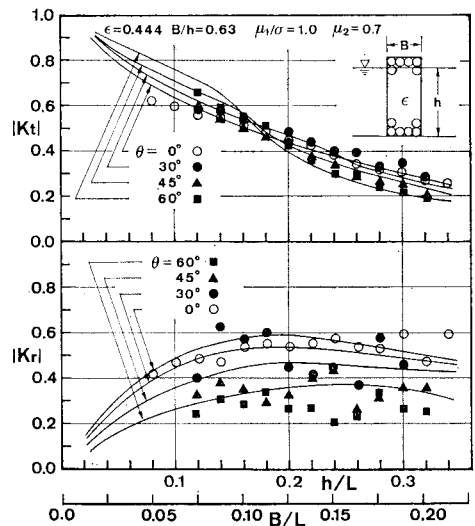


図-2 一様透過性堤体の通過率と反射率の理論値と実測値

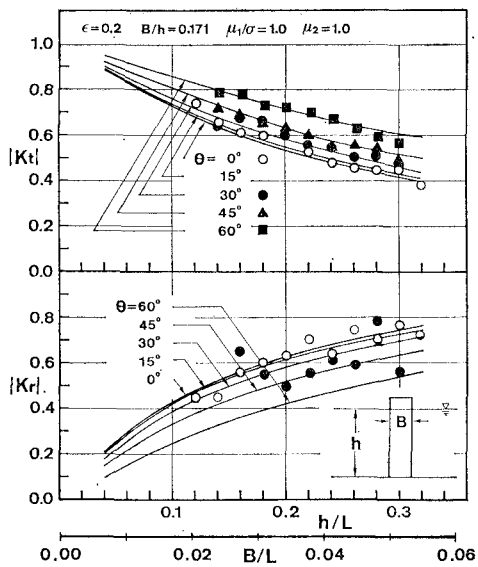


図-3 1列縦スリット壁体の通過率と反射率の理論値と実測値

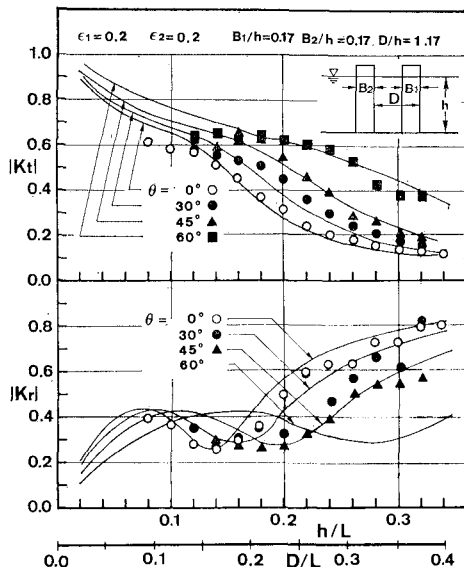


図-4 2列縦スリット壁体の通過率と反射率の理論値と実測値

水理特性に関して合理的な算定値が得られることがわかり、また縦スリット壁体を一様透過性壁体と仮定しても妥当な推定値が得られることが確認された。

4.2 数値計算結果

(1) 1列壁体における壁体厚と開口率の影響

開口率 $\varepsilon=0.2$ で壁体厚と水深の比 (B/h) が 0.686 の1列縦スリット壁体に対する通過率 $|K_t|$ 、反射率 $|K_r|$ とエネルギー損失係数 ($K_e=1-|K_r|^2-|K_t|^2$) および水平波力 F の各入射角における値を入射角 $\theta=0^\circ$ の時の値で除して規格化したもの (R_t , R_r と R_e , R_f) を図-5, 6 に示している。これらの図では、1に近い値をとる

ときは入射角度 $\theta=0^\circ$ の垂直入射の結果に近いことを表しており、1より大きければ垂直入射の値よりも大きいことを、1より小さければ垂直入射の値よりも小さいことを意味している。通過率に関しては、壁体厚が波長に比べ十分に小さい場合には図-3でも示したように入射角が大きくなるにしたがって通過率は大きくなっていくが、壁体厚が相対的に有意になると、図-5に示すように $B/L=0.14$ 付近で入射角度が大きいたきの通過率は垂直入射の値よりも小さくなり入射角が大きいはどその減少が激しいという興味ある結果が得られた。また入射角が小さくなるにしたがい、 R_t が最大となる波長お

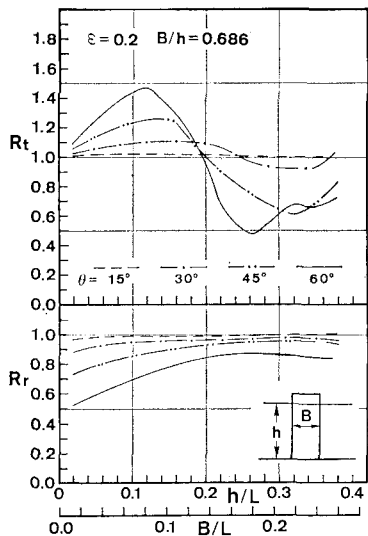


図-5 入射角に対する1列縦スリット壁体の R_t と R_r

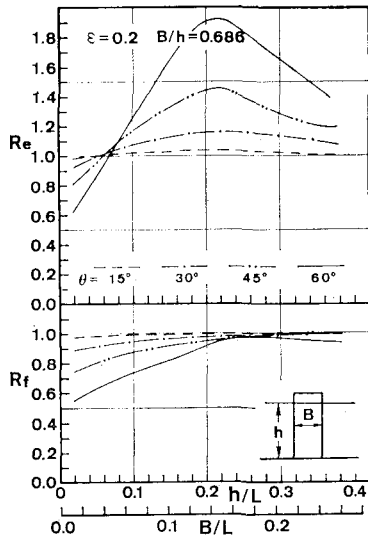
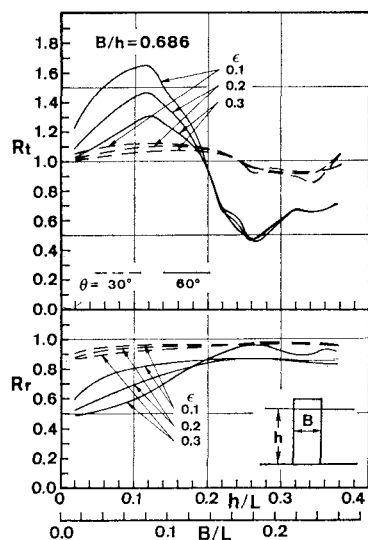
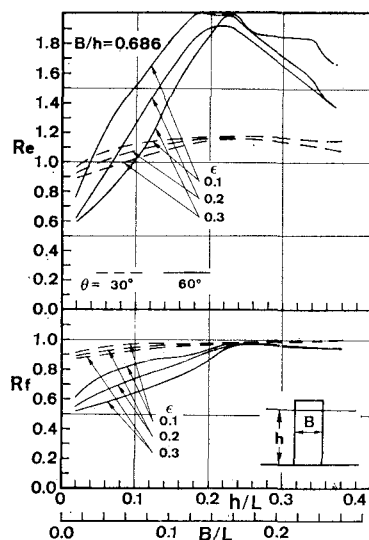


図-6 入射角に対する1列縦スリット壁体の R_e と R_f

図-7 1列縦スリット壁体の開口率と R_r , R_t の関係図-8 1列縦スリット壁体の開口率と R_e , R_f の関係

よび $R_t=1.0$ となる波長が短い方へ移動していく。これらの傾向は、理論解析法を検証するために行った模型実験の結果(図-2)でも認められている。反射率に関しては、このような傾向はみられず、入射角度が大きくなればなるほど反射率は一様に小さくなり、 B/L が小さいほど角度による違いが大きい。エネルギー損失係数(R_e)は、相対的な壁体厚(B/L)が大きくなるにつれて増大して各入射角の通過率が垂直入射の通過率と等しくなる B/L の値付近で最大となり、入射角が大きくなるほど増加率が増大する傾向にある。また水平波力は、反射率の結果と同じ様な傾向を示し、入射角度の増加とともにその値は減少し、 $B/L=0.16$ 以上になると入射角の違いによる影響はほとんど見られなくなって1に漸近する。しかし、斜め波の通過率が垂直入射波のそれより小さくなる場所でも、斜め波の波力や反射率は垂直入射の値より大きくなることはなく、その分エネルギー損失が起きているものと思われる。

これらのことより、相対的な壁体厚がある大きさ以上にならないと、波が斜めから入射してくる時の壁体厚の見掛け上の増加にともなうエネルギーの減衰効果が現われてこないものと考えられる。即ち、相対的な壁厚が小さいときは入射角が大きいほど通過率が大きく逆に反射率は小さくなるが、相対壁厚が大きくなると、入射角が大きくなるにつれ波の透過性物体を通る距離が長くなることによりそこでのエネルギー損失が著しく増大するため、反射率の緩やかな増加にもかかわらず、入射角が大きくなるほど通過率が急激に減少し垂直入射の値よりも小さくなるものと思われる。従って、一様透過性の防波堤を設計する際、堤体厚の入射波長に対する相対的な長さが問題となり、堤体厚が波長の12~15%以下とな

る堤体の場合には、波が斜めから入射するときの方が垂直に入射するときよりも通過率が大きくなることが予想される。

図-7, 8 は、 $B/h=0.686$ の1列縦スリット壁体における開口率を $\epsilon=0.1, 0.2, 0.3$ と変えたときの R_t , R_r と R_e , R_f の $\theta=30^\circ, 60^\circ$ の計算結果を表している。開口率による影響は、定量的には当然のごとく、開口率が大きいほど入射角度による通過率の変化の度合いが小さく、逆に反射率の変化の度合いが大きいなどの傾向がみられるが、定性的には、 R_t が1よりも大きい値から小さい値に変わるところの相対壁厚 B/L や R_t が極大値を示す B/L などがどの場合もほぼ同じで開口率による相違はそれほど見られなかった。

(2) 2列壁体の水理特性

縦スリット式透過性ケーソン堤を想定して斜め入射波に対する2列縦スリット壁体の通過率と反射率を図-9に、前後壁に作用する波力(F_1, F_2)および2列壁体を一体構造と見なしたときの合成波力と前後壁の波力の位相差(F_T, ω)を図-10に示している。図中の●は、垂直入射波のときの水平波力の実測値を表している。これらの数値実験結果からまず言えることは、同じ開口率と壁体厚の1列壁体と比べ(図-3)、2列壁体の方が斜め入射波と垂直入射波との違いが大きく現れている。例えば、 $\theta=60^\circ$ と 0° を比べると1列壁体の場合は通過率、反射率ともほぼ一様に0.2程度の差であるのに対し、2列壁体だと通過率において最大で0.4、反射率では0.55程度と1列壁体の場合と比べ2倍以上の差となっている。

つぎに2列壁体の興味ある特徴として、壁体間隔が波長の半分程度になると共振現象が生じ、各水理量はその

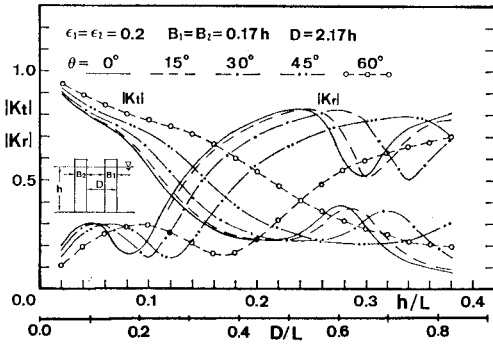


図-9 2列縦スリット壁体の通過率と反射率

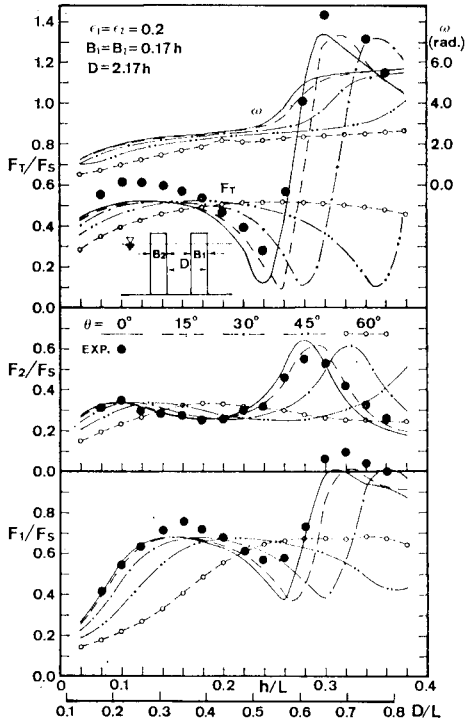


図-10 2列縦スリット壁体の水平波力と位相差

近傍で急変する。特に、前壁の波力と合成波力は共振点の直前で減少し、その直後で極大値を示すのに対し、後壁に作用する波力ではほぼ共振点で極大値を示す。2列壁体の水理量に関するこの様な周波数特性の変化は、波が斜めから入射して来ることにより、 x 軸に投影される波長が長くなる分だけ相対水深の大きい方へ引き延ばされたかたちとなり、通過率や水平波力が急激に変化する波長が短い方へ移る。従って、入射角度が大きいほど ($\theta > 45^\circ$) 水理特性の変化は緩やかで、特に2列壁体を一体構造と考えたときの合成水平波力 (F_T) は広い範囲

の波長に対して変化が少なく、しかも重複波の波力の50%以下となり、堤体の安定に対して好ましい条件となる。

5. まとめ

以上の研究より次のことを明らかにした。

(1) 入射波の相対水深を 0.12~0.32, 入射角度を $0^\circ \sim 60^\circ$ の範囲で行った模型実験によると、提案した解析法による水理特性の算定値は実測値とよく一致しており、本解析法が妥当な解を与えることが確認された。このときの計算に必要な抵抗係数は、入射角が変わっても垂直入射で決めた値を用いれば合理的な算定値が得られることがわかり、また縦スリット壁体を一樣透過性壁体と仮定しても妥当な理論値が得られることが確認された。

(2) 異形ブロックや石積みよりなる一樣透過性堤体に波が斜めから入射するときは、堤体幅が波長に比べて十分に小さい場合、入射角が大きくなるにしたがって通過率は大きくなり反射率は逆に小さくなるが、堤体幅を波長の15%より大きくすると入射角が大きいくほど逆に通過率が小さくなる。反射率や水平波力については、入射角が大きいくほどそれらの値は小さくなるが、堤体幅と波長の比が大きいところで入射角度による影響がなくなり垂直入射の値に漸近する。

(3) 2列の縦スリット壁よりなる透過性ケーソン堤の場合は、一般に壁体厚が波長に比べ非常に小さいので入射角による水理特性の変化が強く現れる傾向にあり、入射角が大きいくほど通過率は大きく、反射率は小さくなる。また、壁体間隔が波長の半分程度になると共振現象が生じ、その波長の近傍で波力等が急激な変化を示す。これらの水理特性の変化は、入射角度が大きくなるにしたがい波長の短いほうへ移動する。

最後に、本研究を遂行するに当たり、九州大学水工土木学科技官牛房幸光氏、大学院生の坂本圭君より水理実験に関して多大な協力を得た。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 小島治幸・吉田明徳・井島武士：斜め入射波に対する透過性防波堤の消波特性，第34回海岸工学講演会論文集，pp. 446~450, 1987.
- 2) 森平倫生・柿崎秀作・田口良実：カーテン防波堤とその特性について，港湾技術研究所報告，第3巻1号，pp. 1~27, 1964.
- 3) 小島治幸・井島武士・田口陽一・安永達朗：縦スリット式防波堤の水理特性の算定法に関する研究，第33回海岸工学講演会論文集，pp. 402~406, 1986.