

# カーテンウォール型防波堤まわりの波変形と 作用波力に関する研究

中 村 孝 幸\*

## 1. ま え が き

カーテンウォール型防波堤による波変形や堤体に作用する波力は、従来解析法が明らかにされていなかったことから森平<sup>1)</sup>の研究に代表されるように主として実験的に検討されてきている。近年に到り、著者<sup>2)</sup>はカーテンウォール型防波堤のような薄肉物体まわりの波浪境界値問題の解法が合理的に行える2次波動場のグリーン関数を核関数とするわき出し分布法に基づく解析法について明らかにしている。しかしながら、実在流体中における堤体の下端部付近には、流れのはく離現象に伴う渦の発生があり、ポテンシャル理論に基づく上記解析法を用いてカーテンウォール型防波堤の水理学的な特性が予測しえるかどうかについては大きな疑問と言えよう。

このような観点より、本研究は、模型実験による測定結果との比較の上で上記解析法のカーテンウォール型防波堤への適用性について明らかにすることを主たる目的としている。そして予測手法の確立をはかるため、堤体の下端部より形成される後流渦の実態について把握するとともに渦現象の波変形並びに作用波力に及ぼす影響についても実験的に検討してみたものである。

## 2. 実験装置および実験方法

### 2.1 実験装置

実験に用いた水槽は、高さ 1.25 m、幅 1 m、長さ 28 m の 2 次元造波水槽で、一端にマルチパーパス型の造波機が、他端に消波のための砕石より成る 1/5 勾配の斜面が設置してある。そして水槽内には、ほぼその水路幅を 2 分するように隔壁板が設置してあり、一方の水路にのみ後述する模型堤体を設置し、他方の水路で入射波形の測定が行えるようにした (図-1 参照)。

模型堤体には、幅 49 cm、高さ 70 cm、厚さ 0.9 cm の鋼製板を用いた。そしてこの鋼製板を 図-1 に示すように波力計である正方角柱により上部固定の片持梁形式で支持した。波力計は、図中に示すように 4 枚の半導体ひずみゲージを角柱にはりつけたもので、上下部のモーメントの引算により、板に作用する水平力が測定できるよ

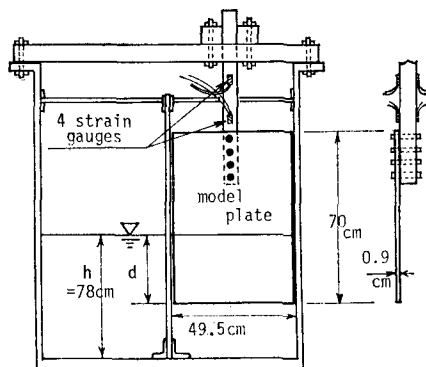


図-1 模型堤体および波力計の設置状況

うになっている。

流況観測は、板下端部に設置した注射針 (直径 0.3 mm) より黒インキを注入して、これをトレーサとして VTR カメラ並びに 16 mm シネカメラにより撮影し、拡大映写して解析した。

### 2.2 実験方法

模型堤体を単列および 2 列配置とした場合の両者について、i) 透過・反射率、ii) 作用波力・波圧、iii) 流況の各々を測定した。この際透過波および反射波の測定は、堤体近傍に出現する定常波の影響を避けるために堤体より 1 波長程度離れた地点において行っている。また反射率  $C_R$  については、この付近で波高計を移動させて最大波高  $H_{\max}$  をまず測定し、 $H_{\max} = H_R + H$  ( $H_R$ : 反射波高、 $H$ : 入射波高) の関係を利用して式 (1) により求めた。

$$C_R = (H_{\max} - H) / H \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで入射波高  $H$  としては、堤体の設置していない水路側での測定波高を採用した。また透過率  $C_T$  は、測定された透過波高  $H_T$  を用いて式 (2) により算出した。

$$C_T = H_T / H \quad \dots\dots\dots (2)$$

本研究で採用した実験条件を列挙すると以下のようになる。ここで  $h$ : 水深、 $d$ : 堤体のきつ水、 $l$ : 2 列堤体の中心間隔、 $T$ : 波の周期である。

(1) 堤体を単列配置とした場合

$h = 78 \text{ cm}$ ,  $d = 27.5 \text{ cm}$  より 10 cm 毎に 57.5 cm ま

\* 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部海洋工学科

での4種類.  $H=5, 10, 15$  cm の3種類.  $T=0.9\sim 2.4$  sec の範囲の10種類 (ただし  $H=10, 15$  cm で碎波する場合を除く).

## (2) 堤体を2列配置とした場合

$h=78$  cm,  $d=27.5, 35$  cm の2種類.  $H=10$  cm,  $T=1.0\sim 2.4$  sec の範囲の8種類.

## 3. 算定方法

本研究で用いた解析法は, 既に著者<sup>2)</sup>が前年度の海岸工学講演会でその詳細を紹介した single source を基底関数とする2次元波動場の Green 関数の物体の断面曲線上への分布を考えるわき出し分布法である. この解析法は, 薄内部材を含む任意断面物体まわりの波浪ポテンシャル問題の解法が線形理論の範囲内で合理的に行える利点を有している. そしてこの解析法を実際に適用するに当り, 堤体の断面曲線の線素分  $\Delta S$  への分割には, 著者<sup>3)</sup>が一般の2次元物体の場合について見出した  $\Delta S < 0.03L$  ( $L$ : 波長) を満足するように行った. そして線素分の総数  $N$  としては,  $d=57.5$  cm の場合の  $N \leq 59$  の範囲のものを採用した.

## 4. 堤体まわりの波変形

### 4.1 透過・反射率

#### (1) 堤体を単列配置とした場合

図-2, 3 は  $d/h=0.353$  と固定した場合の  $C_R, C_T$  に関する実測結果と算定結果との比較を  $d/L_0$  ( $L_0$ : 沖波波長) を横軸にとり示すものである. そして図-2より図-3は, 入射波高が増大する場合の結果を表わしており, 図中には比較のため Wiegel<sup>4)</sup> の Power Transmission Theory による  $C_T$  の算定結果も付記してある. これらの図より,  $C_R$  の実測結果と算定結果とは入射波高の大小に関係なく定性的にも定量的にもよく一致していることが認められる. また  $C_T$  の算定結果は図-2に見られるように入射波高が小さくなる場合ほぼ実測結果と一致しているが, 入射波高が大きくなると両者の間の差異は増大しており, 特に  $d/L_0$  の小さな長周期波側でその傾向が顕著になっている.

図-4 は, 入射波高の条件を図-2と同一にしてきつ水を深くした場合の  $C_R, C_T$  について示す. そして, 図-2と図-4の比較から,  $C_R$  と  $C_T$  に関する算定結果と実測結果とは, きつ水に関係なく  $d/L_0$  による定性的な変動傾向はよく一致していることがわかる. また  $C_T$  については, その値が小さくなる  $d/L_0$  の大きな領域において定量的にもよく一致していることや  $C_R$  についてはきつ水が深くなると両者の間の定量的な差異が増大する傾向のあることなども認められる. なお上記の  $C_R, C_T$  に関する実測値と算定値との差異の原因としては, 算定結果において実在流体中で生じる堤体下端部付

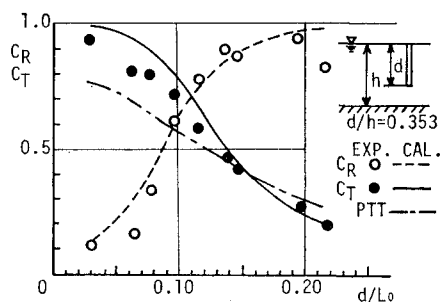


図-2 単列堤体の透過・反射率 ( $H/h=0.064$ )

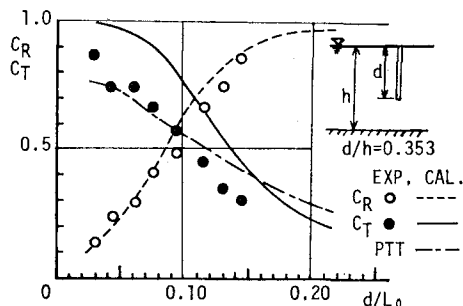


図-3 単列堤体の透過・反射率 ( $H/h=0.128$ )

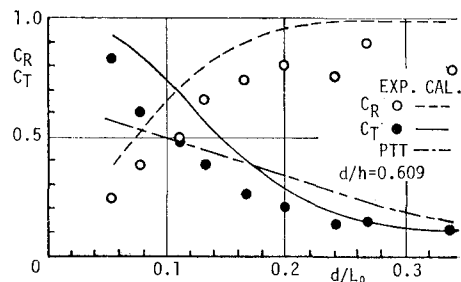


図-4 単列堤体の透過・反射率 ( $H/h=0.064$ )

近の渦等)に起因するエネルギー損失が考慮されていないことが挙げられる.

次に図-2より図-4中に示す PTT による  $C_T$  の算定結果と実測結果との比較を行ってみると,  $d/L_0$  の小さな長周期側では PTT による  $C_T$  の算定結果は, ほぼ実測結果と対応しているものの  $C_T$  が小さくなる短周期波側では図-4に見られるように実測値よりも大きな値を予測する傾向のあることがわかる.

#### (2) 堤体を2列配置とした場合

図-5 は, きつ水および入射波高の条件を図-3と同様にして堤体を2列配置とした場合の  $C_R, C_T$  に関する実測結果と算定結果との比較を示す. 図中には, 堤体間の流体場を死水域とみなして剛体に置換した, すなわち2列堤体の外縁距離と同じ長さを有する矩形堤体と仮定したときの  $C_T$  の算定結果についても付記してある. この図より,  $C_R$  の算定結果は, 多少の相違は見られるも

のほぼ実測結果と対応していることが認められる。一方  $C_T$  の実測結果は、2列堤体の場合の算定結果よりもむしろ矩形堤体の場合のそれによってよりよく説明され得ることがわかる。そしてこの事実は、本研究で行ったもう一つの実験ケースの場合にも確認されており、2列堤体の  $C_T$  の予測には、上記のような死水モデルが適用され得るものと考えられる。なお、矩形堤体を仮定して求めた  $C_R$  と2列堤体の  $C_R$  の測定結果との間には十分な対応が見られなかったことを確認しており、 $C_R$  の予測にあたっては上述したように2列堤体モデルが妥当と言えよう。また図-3と図-5の  $C_T$  に関する比較から堤体を2列配置とすることにより消波可能な波の範囲は長周期波側においてかなり拡大していることがわかる。

#### 4.2 波のエネルギー逸散

本研究では、堤体下端部に形成される渦等に起因されて生じる波のエネルギー逸散をあらわす指標として式(3)で定義されるエネルギー逸散率  $\varepsilon_w$  を実測結果に基づき求めてみた。

$$\varepsilon_w = 1 - (C_R^2 + C_T^2) \quad \dots\dots\dots (3)$$

図-6は、入射波高を固定した場合の実測結果に基づく  $\varepsilon_w$  の値を  $h/L_0$  を横軸にとりきつ水をパラメーターにして示すものである。この図より、単列堤体の場合  $h/L_0$  の小さな長周期波側ではきつ水が深くなるほどエネルギー逸散の増大することがわかる。しかしながら、短周期波側では  $\varepsilon_w$  に及ぼすきつ水の効果は明確でない。そしてこの  $\varepsilon_w$  は、堤体下端部に形成された渦の規模に密接に関係していることが推測される。ここでは渦の循環強さが堤体下端部の流速  $u_e$  の2乗にほぼ比例することを利用して、 $u_e$  のきつ水による変化により  $\varepsilon_w$  の変化が説明され得るかを検討してみた。図-7は、上記ポテンシャル理論による  $u_e$  の  $d/h$  による変化を示すもので、パラメーターとして  $h/L_0$  がとってある。なお図中で  $u_e$  は、堤体のない場合の水表面における水平水粒子速度  $u_s$  で無次元化してある。この図から、 $u_e$  は、 $h/L_0$  の小さな長周期波の場合、きつ水が深くなるほど増大するが、短周期波の場合、 $d/h$  がある程度以上大きくなると逆に減少していることがわかる。そしてこの  $u_e$  の  $d/h$  による変動傾向は、図-6の各  $h/L_0$  についての  $\varepsilon_w$  の  $d/h$  による変化とほぼ対応しており、 $\varepsilon_w$  が  $u_e$  の大小に関係しているものと考えられる。

一方図-6中に示す2列堤体の  $\varepsilon_w$  に着目してみると、同じきつ水の条件の単列堤体の  $\varepsilon_w$  に比してほぼ2倍程度の大きさになっていることが認められる。これは、堤体数が2つになったことより渦形成等に基づくエネルギー損失効果が倍増したことによるものと考えられる。そして2列堤体の  $\varepsilon_w$  は、最大で80%にもなり、堤体数を増す工夫は消波効果を高める上で有効な方法と言えよう。

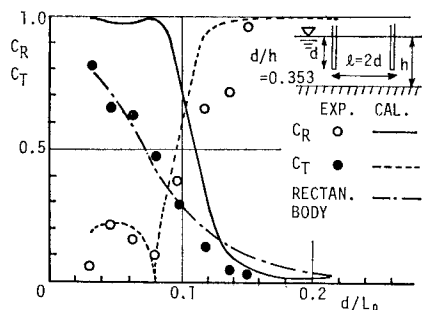


図-5 2列堤体の透過・反射率 ( $H/h=0.128$ )

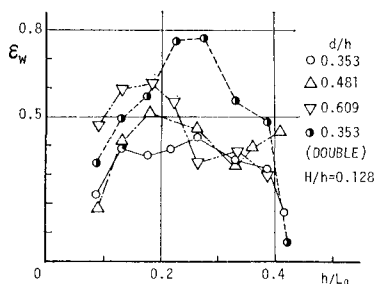


図-6 エネルギー逸散率  $\varepsilon_w$  の  $h/L_0$  による変化

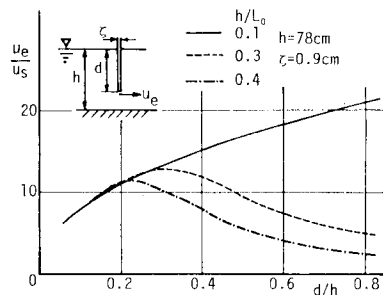


図-7 堤体下端部の水平流速の  $d/h$  による変化

### 5. 堤体に作用する波力

#### 5.1 堤体を単列配置とした場合

図-8より図-10は、単列堤体に作用する水平波力  $F$  に関する算定結果と実測結果との比較を  $d/L_0$  を横軸にとり示すものである。図中において  $F$  は、式(4)で定義される無次元波力  $F^*$  で表示してある。

$$F^* = F / (\rho g H B d / 2) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\rho$ : 流体密度、 $g$ : 重力加速度、 $B$ : 堤体の幅である。

また図中には、実測値の場合、波の進行方向に作用する波力と進行逆方向に作用する波力が区別して表示してある。そして、図-8より図-9はきつ水を固定して入射波高を大きくした場合の変化を、図-9より図-10は入射波高を固定してきつ水を深くした場合の変化をあらわしている。これらの図より、実測された水平波力は、

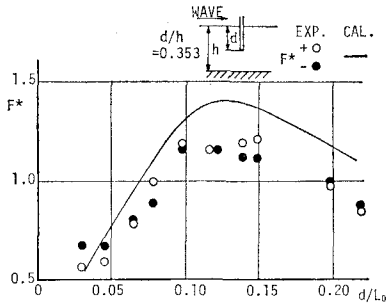


図-8 単列堤体に作用する水平波力 ( $H/h=0.064$ )

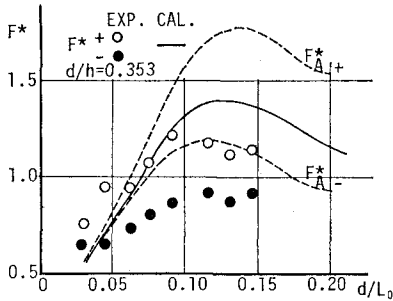


図-9 単列堤体に作用する水平波力 ( $H/h=0.128$ )

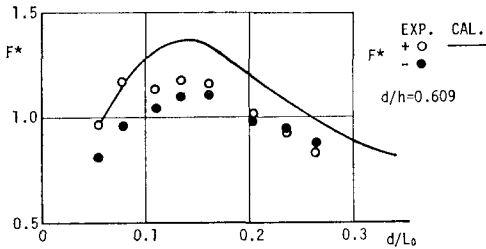


図-10 単列堤体に作用する水平波力 ( $H/h=0.128$ )

図-9 の例に見られるように入射波高が大きくて長周期波となる場合を除くならば解析的にほぼ予測され得ることがわかる。しかもほとんどの場合、算定波力は安全側の予測値を与えていることが認められる。そして入射波高が大きい場合に実測波力が予測値を上まわるように出現する理由としては、i) 堤体まわりの遡上現象に関する波の有限振幅性の効果および、ii) 堤体の下端部に形成される渦による効果の2つが挙げられよう。本研究では i) の効果を検討するため、波力算定のための波圧積分領域を変動水面までと拡張した手法により波力を算定してみた。しかしながら、この算定結果 ( $F^*$ ) の一例を図-9 中に示すように、上記 i) を考慮しても実測結果は説明され得ず、実測結果との差異は上記 ii) によるものと考えられる。

## 5.2 堤体を2列配置とした場合

この場合の実測結果と算定結果との比較を示すのが図-11 である。図中には、波の入射方向より見て前列

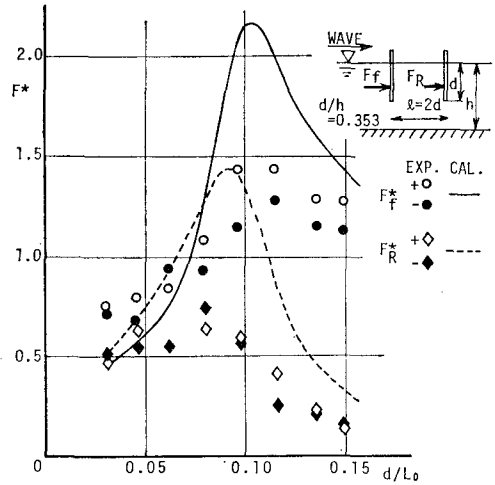


図-11 2列堤体に作用する水平波力 ( $H/h=0.128$ )

および後列の堤体に作用する波力 (各々  $F_f^*$ ,  $F_r^*$ ) が区別して表示してある。そして算定波力は、後列堤体および  $d/L_0$  の大きな領域における前列堤体についてはかなり安全側の予測値を与えているものの  $d/L_0$  の小さな領域における前列堤体については危険側の予測値となっていることなどが認められる。

## 6. 堤体まわりの流況

本研究で採用した実験条件下では、単列および2列堤体の両者ともに全ての場合について1堤体当たり1周期の間に堤体下端部より2つの渦の形成が確認された。それらは、各々波の半周期間に1つつそれぞれ堤体の波の反射波側 (No. 1 の渦と称す) および透過波側 (No. 2 の渦と称す) に形成されていた。図-12 は、単列堤体を対象に観測された渦パターンの概略図を示すもので堤体の左側および右側に各々上記 No. 1, 2 の渦を描いてある。そして図中 (a), (b) の (I) より (III) へは、各々入射波高、波の周期が増大する場合の渦パターンの

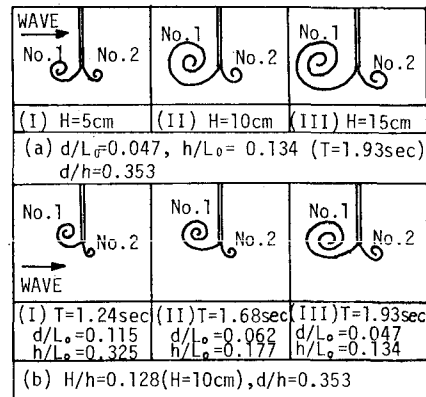


図-12 渦パターンの入射波高および周期による変化

変化をあらわす。そして図 (a), (b) に見られるように入射波高および周期の増大は, No. 1 の渦を著しく成長させる効果を有することなどが判明した。なお本実験では, 渦パターンに及ぼすきつ水の効果についても検討しているが,  $h/L_0=0.1$  程度の長周期波の場合きつ水が深くなると No. 1, 2 の渦ともにより大きく成長することなどを確認している。そして, 上述してきた渦の形成特性と 4.2 で示した  $\epsilon_w$  との関連性を検討してみると,  $\epsilon_w$  は長周期波側になるほどまたきつ水の深くなるほど増大することから, ほぼ渦の規模の増大に対応しており,  $\epsilon_w$  と渦の形成特性との間には密接な関連性のあることが指摘できる。しかしながら, 入射波高の大きい場合に波の進行方向に作用する水平波力の実測値がポテンシャル理論による算定値を上まわる原因については, 図-12 (a) に示したように波高の増大が主として反射波側に形成される No. 1 の渦の規模の増大を引き起すことから, 形成渦による効果とは考え難い。この原因については, 渦形成と作用波力との位相関係などの面から更に検討する必要がある, 今後続く課題としたい。

## 7. 結 語

i) 単列配置としたカーテンウォール型防波堤の透過率並びに反射率は, ポテンシャル理論に基づく解析法を用いてほぼ予測することができる。しかしながら, 透過率の大きくなる長周期波側の領域およびきつ水の深い場合については, 板下端部での渦形成現象に伴う逸散エネ

ルギーが増大することから, 実測結果と算定結果との対応は十分なものとは言えない。また堤体を2列配置とする方法は, 長周期波に対する消波効果を高める上で有効であり, その透過率は, 2列堤体の外縁距離と同じ長さを有する矩形堤体の透過率でほぼ近似され得る。

ii) 単列堤体に作用する水平波力は, 上記解析法に基づきほぼ予測することができる。しかしながら, 入射波高が大きくなる場合, 透過率の大きくなる長周期波側において実測波力は算定波力を上まわるようになり注意する必要がある。

最後に本研究を実施するに当たり, 実験および整理等に多大の御協力を載いた当時愛媛大学学生の松本幸輝君に感謝の意を表す。なお, 本研究は, 文部省科学研究費(励奨研究)による研究成果の一部であることを付記しておく。

## 参 考 文 献

- 1) 森平倫生・柿崎秀作・合田良実: 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, Vol. 13, No. 1, 1964.
- 2) 中村孝幸: 薄肉物体まわりの波浪境界値問題に関する解析法, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 410~414, 1983.
- 3) 中村孝幸・高橋和男・中山和典: わき出し分布法を用いた2次元物体まわりの波変形と流体力の解析法, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 462~466, 1982.
- 4) Wiegel, R. L.: Transmission of waves past a rigid vertical thin barrier, Proc. of ASCE, J. of Waterways and Harbors Division, Vol. 86, No. WW1, pp. 1~13, 1960.