

カーテン防波堤まわりのはく離流れと作用波力の特性について

中村孝幸*・久保達郎**・福島隆史***

1. まえがき

カーテン防波堤まわりには、従来から指摘されているように流れのはく離に伴う大規模な渦の発生が見られる。そして、このような非ポテンシャル的な流体现象の出現は、堤体まわりの流況並びに作用波力の予測を困難にしている不確定要素の1つとして指摘されてきている¹⁾。本研究は、こうした大規模渦の発生がカーテン防波堤まわりの流況並びに堤体に作用する波力、モーメント及び波圧分布にどのように影響しているのかを水理模型実験による実測結果と波浪ポテンシャル理論に基づく算定結果との比較の上で明らかにする。このような検討に引き続き、はく離流れの効果を理論的に検討できるようにするため、物体表面上の境界層を近似するのに適する表面渦度分布法と離散的な複数渦糸モデルを結合して、堤体まわりのはく離流れを考慮した流況の数値解析法について究明する。この際、渦モデルとしては、実在流体中の渦のように時間的に減衰するものを採用した。そして、はく離流れの算定結果と観測結果との比較により、本解析法の妥当性を検証するものである。

2. 実験装置および実験方法

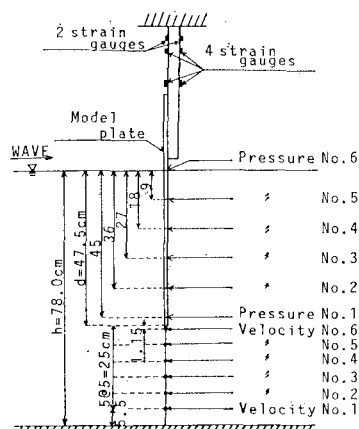
2.1 実験水槽および模型堤体

実験に用いた水槽は、長さ28 m、高さ1.25 m、幅1 mの2次元造波水槽で、その中には水路幅をほぼ2分するように隔壁板が設置してある。そして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が測定できるようにしてある。

模型堤体には、厚さ1.2 cmの防水ベニヤ板を用い、図一1に示すように上部固定式で支持した。

2.2 流況観測実験

流況観測は、堤体の下端部に設置した注射針より黒インクを流体中に注入する可視化法と蛍光塗料を含む比重1の液体粒子トレーサを用いる可視化法との両者を採用して行った。そして黒インクトレーサ法により堤体の下



図一1 模型堤体および波圧計、流速計の設置位置

端部よりの流れのはく離の状況及びその渦への巻き込み過程を、また液体粒子トレーサ法により発生渦の循環量を測定した。なお、観測は、VTRカメラ並びに16 mmシネカメラの両者による撮影を介して行った。

2.3 流速分布の測定法

図一1に示すように堤体下端部から水底までの間の位置の異なる6点について水平流速の測定を行った。この際、堤体下端部の境界層外縁付近の流速の測定(No. 6)には針流速計を用い、その他の点(No. 1~No. 5)については電磁流速計を用いた。

2.4 波圧分布及び波力、モーメントの測定法

波圧分布は、差圧計3台(No. 1~No. 3)及び面圧計3台(No. 4~No. 6)の計6台を図一1に示すように配置して行ない、これを堤体の前後面の各々について測定した。また波力及びモーメントは、図一1中に示す各々水平力の測定用歪ゲージ(4枚で構成)とモーメントの測定用歪ゲージ(2枚で構成)を用いて測定した。

2.5 実験条件

水深 h 及び堤体のきつ水 d は、図一1に示すように、それぞれ78 cm、47.5 cmと一定にした。作用せしめた波の周期 T は、1.27~3.35 secの範囲の5種類、入射波高 H は、5、15 cmの2種類である。

* 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部海洋工学科

** 学生員 愛媛大学大学院 工学研究科

*** (株)酒井鉄工

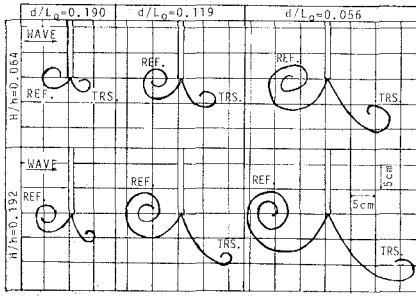


図-2 観測された渦パターンの概略図

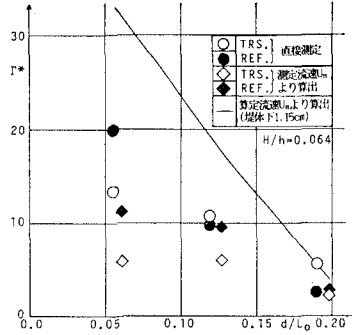


図-3 発生渦の循環量の周期による変化

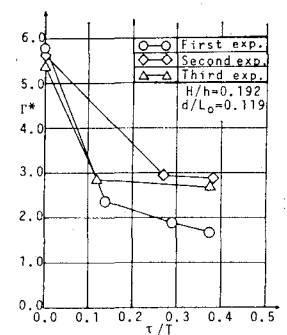


図-4 発生渦の循環量の時間的な変化

3. 堤体まわりの流況および波変形の特性

以下本研究で実測結果との比較に用いた算定結果は、著者らの中の1人²⁾が明らかとしている2次元波動場のグリーン関数を核関数とする置き出し分布法によるものである。なおこの解析法は波浪ポテンシャル理論に基づくもので、流れのはく離等の非ポテンシャル的な流体現象については考慮できないものであることを付記しておく。

3.1 堤体まわりの流況

図-2は、本研究で採用した実験条件下で波の1周期間に観測されたカーテン防波堤まわりの渦パターンの概略図を示すもので、左図より右図は波の周期が増大する場合の変化を、また上図より下図は入射波高が増大する場合の変化を表すものである。この図より、どの波条件の場合においても反射波側の渦(REF.)は、堤体下端部の真横で最大に成長し、透過波側の渦(TRS.)は、はく離流れの足を伴って右斜め下方に形成されるなどの特性が認められる。また、従来から指摘されているように²⁾波の周期及び波高の増大に伴ない、形成される渦の規模が増大するなどの特性も再確認できる。次に渦の強度の指標として、ここでは渦の循環量に着目し、これを実験的に測定してみた。本実験では、堤体の反射波側、透過波側水域の各々について最も渦が成長したと思われる時点での液体トレーサの移動速度に基づき、式(1)から循環量 Γ を推定してみた。

$$\Gamma = 2\pi r \bar{v} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに r は渦の核を含む近似円の半径で、 $\bar{v}$ はその円周上にある着目した複数のトレーサの平均円周速度である。図-3は、この測定結果の d/L_0 すなわち周期による変化を示すもので図中では式(2)で定義される無次元量 Γ^* で表わしてある。

$$\Gamma^* = \Gamma / (U_{\max}^2 T / 4) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに $U_{\max}$ は微小振幅波理論に基づく静止水面上の

水平流速の振幅である。また図中には、堤体下端に近いNo.6の流速計による流速値を境界層外縁の流速 U_B と仮定して式(3)により算出した Γ 及び同一の場所の波浪ポテンシャル理論による流速算定値を用いて求めた Γ (実線)についても併せ示した。

$$\Gamma = \frac{1}{2} \int_0^T U_B^2 dt \quad \dots\dots\dots (3)$$

この図から、渦の循環量はその規模と同様、波の周期に伴ない増加することが認められる。そして、実測結果と算定結果との対応をみてみると、 d/L_0 の大きな短周期波側で両者はほぼ一致しているものの長周期波側になると発生渦の影響をより強く受けるようになることから両者の差異は拡大するようになることなどがわかる。次に同様の実験において、渦の規模が最大に成長したと思われる時点からの循環量 Γ の時間的な変化を検討してみた。図-4は、 $T=1.6$ sec, $H=15$ cmの場合の反射波側の渦に関する結果を横軸に τ/T (τ :渦が最大に成長した時点からの時間)をとり示すものである。この図からわかるように、最大に成長した渦の循環量は時間と共に、はじめは急激に減少するがその後なだらかに減少していく様子が認められる。そしてこのような渦の減衰は、波動流のような往復流に対する流れのはく離に伴ない渦流れを解析する際に特に重要になるものと考えられる。

3.2 堤体下部の流速分布

堤体まわりに形成される渦が流況にどれほど影響しているのかを定量的に把握するため、堤体下端部から水底までの範囲の流速分布に着目してポテンシャル理論に基づく算定結果との比較の上で検討してみた。図-5、6は、これらの比較の代表例を示すもので測定位置と水深の比 z/h と各水平流速を水表面でのそれ $U_{\max}$ で無次元化した値との関係で表わすものである。なお図-5は、波の周期及び入射波高が小さな場合を、また図-6は、それらが大きな場合を表わしている。これらの図から、

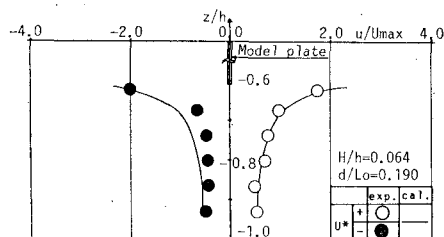


図-5 堤体下部の水平流速の空間分布 ($H/h=0.064$, $d/L_0=0.190$)

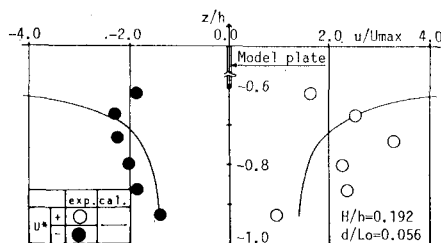


図-6 堤体下部の水平流速の空間分布 ($H/h=0.192$, $d/L_0=0.056$)

渦の規模及び循環量の小さな図-5の場合、実測された堤体下部の流速分布はポテンシャル理論による算定結果にほぼ一致するものの発生渦の規模等が大きくなる図-6の場合、両者の間に大きな差異が生じるようになることなどが認められる。

3.3 堤体まわりの波変形

図-7は波高が大きな場合の反射率 C_R と透過率 C_T に関する実測結果とポテンシャル理論に基づく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。この図より、 C_R と C_T に関する実測結果と算定結果の d/L_0 による変動傾向は定性的に一致していることがわかる。特に C_R については、 d/L_0 の小さな長周期波側において定量的にも一致している。しかしながら、 C_T については、はく離渦の規模の大きくなる長周期波側において両者の差異が増大する傾向が認められる。本研究では、 C_R , C_T に関する実測結果からエネルギー逸散率 $\varepsilon_w = 1 - C_R^2 - C_T^2$ を算出してみた。図-8は入射波高 $H=5, 15$ cm の場合の実測結果に基づく ε_w の値を d/L_0 を横軸にとり示すものである。この図より、 ε_w は波高の大小に関わらず d/L_0 の小さな長周期波側で大きくなり、渦の規模及び循環量の増大と密接に関連していることがわかる。

4. 波圧分布および作用波力の特性

4.1 波圧分布

図-9, 10は、堤体前面側(左図)及び後面側(右図)の波圧分布の算定結果と実測結果との比較の代表例を示

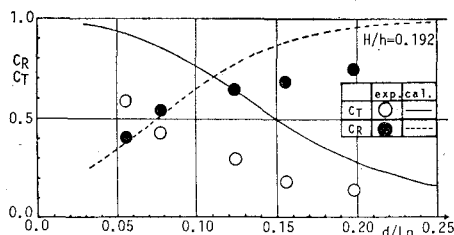


図-7 透過率 C_T , 反射率 C_R の周期による変化

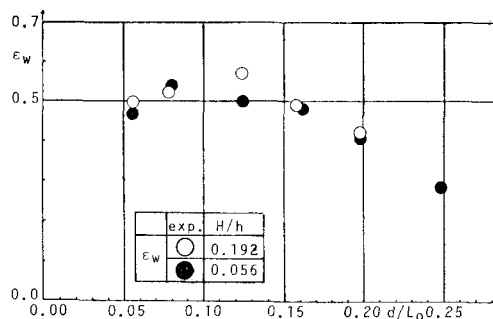


図-8 波のエネルギー逸散率 ε_w の周期による変化

すものである。図中において波圧 P は、式(4)で定義される無次元量 P^* で表示してある。

$$P^* = P / (\rho g H / 2) \quad (4)$$

ここに ρ : 流体密度, g : 重力加速度である。なお実測結果は、正圧、負圧の両者について示してある。これらの図より、周期、波高の小さな図-9の場合、波圧分布の実測結果は、堤体の前後面の両者について算定結果とほぼ一致していることが認められる。しかしながら、周期、波高が大きな図-10の場合、堤体の下部で波圧が増大してその分布がほぼ一様になるなど、ポテンシャル理論によるものとの差異が見られる。そして堤体の下部において特に波圧の負値が増大することは、流況の特性より明らかなように、堤体の真横に形成される反射波側の渦の成長に起因するものと考えられる。

4.2 水平波力

図-11は、波高が大きな場合の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式(5)で定義される無次元量 F^* と d/L_0 (L_0 : 沖波波長) との関係で表わすものである。

$$F^* = F / (\rho g H B d / 2) \quad (5)$$

ここに B は堤体の幅である。また図中の正值、負値は波の進行方向及び逆方向に作用する波力の実測値である。この図より、堤体に作用する水平波力は、全体的にポテンシャル理論による算定結果に比較して小さな値となっているのがわかる。しかしながら、長周期波側においてその正值が算定値を上回るように出現するようにな

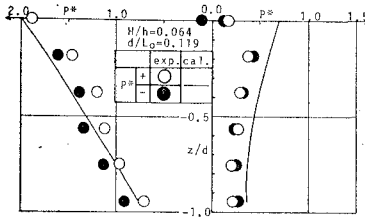


図-9 堤体前後面の波圧分布 ($H/h=0.064$, $d/L_0=0.119$)

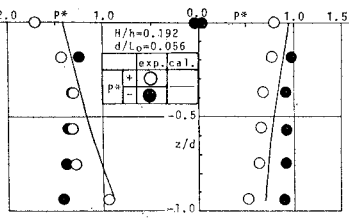


図-10 堤体前後面の波圧分布 ($H/h=0.192$, $d/L_0=0.056$)

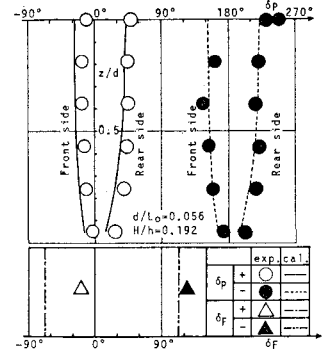


図-12 波圧、波力の入射波に対する位相差

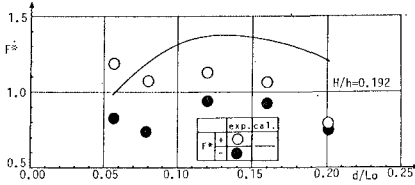


図-11 水平波力の周期による変化

ることも認められる。そしてこのように算定値を上回る理由を検討するため、波圧及び波力の正負ピークの出現位相 δ_P , δ_F (入射波を基準にした位相) を図-10, 11の場合について調べてみた。この結果を示すのが図-12で、波圧については堤体前後面の両者のものがプロットしてある。この図より、 δ_P の実測値は、前面側での算定値に比較して若干遅れて現れるもののほぼ一致しており、渦の発生が δ_P に及ぼす影響は小さなものと言える。そして正波力の δ_F は、算定値に比較して 45° 程度遅れて現れ、ほぼ前面側の波圧の正值の出現位相 δ_P に一致することなどが認められる。したがって、上記した実測波力が算定値を上回るようになるのは、図-10に示したように渦の発生に伴ない特に堤体の下部付近で波圧の絶対値が大きくなるのが直接的な原因と言える。

5. 堤体まわりの流況の算定法

5.1 算定法の概略

a) 解析モデル及び仮定：解析モデルとしては、一定水深 h の波動場中につき水 d の有限厚さのカーテン防波堤が固定されており、その下端部より波動運動に伴ない流れのはく離が生じる場合を考える。そして本解析法では、以下の仮定を設けている。(i) 堤体下端部よりとはく離するせん断層は離散的な渦糸モデルにより近似できる。(ii) はく離流れの出現により波は変形を受けず、流速場は波動運動とはく離せん断層を近似する渦糸群によるものとの線形重ね合わせで与えられる。(iii) 渦糸群に対する自由水表面の境界条件は、固定境界条件で置換できる。

b) 波動場中の渦糸の流れ関数：複数渦糸による物体

まわりの流れ関数は物体がないときの渦糸による流れ関数 Ψ_V と物体が置かれた場合にこの物体の境界条件を満足するように Ψ_V に付加すべき流れ関数 Ψ_R との線形和により求めることができる。流体中の任意点 (x, y) の Ψ_V は、仮定 (iii) の境界条件を満足するように Schwarz-Christoffel 変換を用いて式(6)で与えられる。

$$\Psi_V(x, y) = \sum_{k=1}^K \Gamma_k \cdot G_V(x, y; x_k, y_k) \quad \cdots \cdots (6)$$

ここに G_V は、式 (7) で与えられるものである。

$$G_V(x, y; x_k, y_k) = -[\log \{\cosh C(x - x_k) - \cos C(y - y_k)\} - \log \{\cosh C(x - x_k) + \cos C(y - y_k)\}] / 4\pi \quad \cdots \cdots (7)$$

また、 $C = \pi/h$, (x_k, y_k) は k 番目の渦糸の位置、 Γ_k はその渦糸の循環量である。一方、 Ψ_R は、 G_V を用いて式 (8) のように表わせる。

$$\Psi_R(x, y) = \int_S f(X, Y) \cdot G_V(x, y; X, Y) dS \quad \cdots \cdots (8)$$

ここに $f(X, Y)$ は、物体表面上の渦度分布関数で、物体の内側表面での接線方向速度が0になるという境界条件を用いて決定できる。

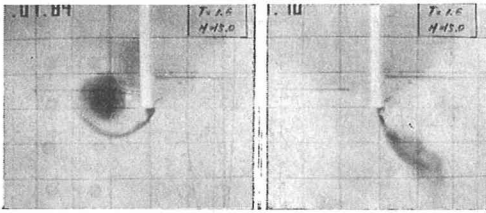
c) 渦糸の運動方程式： K 個の渦糸群の中の j 番目の渦糸に着目して、その運動方程式を導くと式 (9), (10) となる。

$$\frac{\partial x_j}{\partial t} = \frac{\partial (\Psi_V + \Psi_R)}{\partial y} \bigg|_{x=x_j, y=y_j} + u_w \quad (j=1, \dots, K) \quad \cdots \cdots (9)$$

$$\frac{\partial y_j}{\partial t} = \frac{-\partial (\Psi_V + \Psi_R)}{\partial x} \bigg|_{x=x_j, y=y_j} + v_w \quad (j=1, \dots, K) \quad \cdots \cdots (10)$$

ここに u_w, v_w は各々波動運動による水平、鉛直方向への誘起速度で、中村²⁾ による波浪ポテンシャル理論に基づく解析法を用いて求められる。

d) はく離流れの算定法：はく離流れは各時間ステップにおいて、式 (9), (10) の $2K$ 個の微分方程式を解



写真—1 渦パターンの観測結果 ($T=1.6$ sec, $H=15$ cm)

くことにより求められる。この際、渦糸の初期位置は、堤体下端部より境界層厚さだけ鉛直下方に離れた点を採用し、その循環量としては、発生位置に誘起される流速 U_B を用いて、式 (3) を離散化した $\Gamma = 0.5 \times U_B^2 \times \Delta t$ で与えられる量とした。なお、時間ステップは、波の周期等を考慮して $\Delta t = 0.03$ 秒を採用したことを付記しておく。

5.2 渦糸の減衰

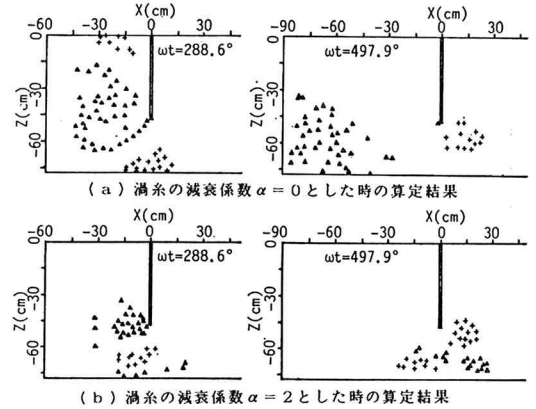
渦の減衰機構は別問題として、ここでは 3.1 で観測された実在流体中における渦の循環量の時間的な変動を考慮できる算定法を提案する。観測結果に基づき、本解析法では発生した個々の渦糸の循環量が指数関数的に減衰するものと仮定してみた。すなわち、無次元減衰係数 α を用いて式 (11) により各渦糸の循環量が減衰するものとした。

$$\Gamma_j = \hat{\Gamma}_j \exp(-\alpha \hat{t}_j / T) \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに $\hat{\Gamma}_j$ は渦糸の初期循環量を、また $\hat{t}_j$ は各渦糸が発生してから時間の時間を示す。

5.3 実測結果と算定結果との比較

本解析法では、減衰係数 α として 0, 1, 1.5, 2 の計 4 種類を採用し、各波条件について算定を行ない、実測された渦パターンの発達状況等に目して比較検討を行った。なお、実測された渦の循環量の時間変動を示す図—4 から推定される減衰係数 α は、1.5 程度であったことを付記しておく。写真—1 は、 $T=1.6$ sec, $H=15$ cm の条件の時に観測された流況で、左側が逆流時に形成される渦を、右側が順流時のそれを示す。また写真中の正方メッシュは一辺 5 cm である。そして、これに対応する波条件を用いて本解析法により算定した渦パターンの一例を示すのが、図—13 (a), (b) で (a) は $\alpha=0$ とした場合を、(b) は $\alpha=2$ とした場合の結果を各々示す。図中において + 印、 $\triangle$ 印はそれぞれ正負の循環をもつ渦糸を表わす。 $\alpha=0$ と 2 の場合の渦パターンの算定結果



図—13 はく離流れの算定結果

と観測結果との比較を行ってみると、順流時、逆流時にかかわらず $\alpha=2$ と渦糸の減衰を考慮した方が、履歴の古い渦が消え去った渦パターンを示すなど観測された渦パターンをよりよく再現できることなどがわかる。しかしながら、渦パターンの算定結果は、 α の値に関わらず観測された渦パターンの細部まで十分再現しているものとは言い難く、作用波力や底部洗掘などの流体力学的諸現象を対象として解析法の妥当性を今後さらに検討し、解析モデルの確立を計りたい。

6. 結 語

i) 堤体下端部付近に形成されるはく離渦の規模及びその循環量は、波の周期及び波高の増大に伴ない増加する。そして堤体下部の流速分布や堤体前後面の波圧分布は、短周期波側では、ほぼポテンシャル理論による算定結果に一致するが、透過率の高くなる長周期波側では、堤体下端部よりの流れのはく離の影響を強く受けるためポテンシャル理論によるものとの差異が大きくなる。

ii) 本研究で開発した数値解析法を用いて、カーテン防波堤の下端部付近よりの流れのはく離に伴う渦の形成過程がほぼ解析できる。そして渦糸の減衰を考慮する場合の方が、はく離渦のパターンなどをよりよく再現できることなどが判明した。

参 考 文 献

- 1) 中村孝幸：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，第 31 回海岸工学講演会論文集，pp. 512~516, 1984.
- 2) 中村孝幸：薄肉物体まわりの波浪境界値問題に関する研究，第 30 回海岸工学講演会論文集，pp. 410~414, 1983.