

# 透水性堤体に働く波力と堤体周りの流れに関する研究

寛 源 亮\*・山 崎 平 弥\*\*

## 1. ま え が き

港湾汚染の解決策の一つとして外海との海水交換を速やかに行うことが考えられる。港域を形成する防波堤に透水性を持たせれば、海水交換は可能となるが、防波機能が低下することが当然予想される。防波・透水という相反する要求を両者共に満足させる透水性堤体の建設は簡単な問題ではない。

本研究は主としてこの透水性堤体に作用する力について考察を行ったものである。模型実験により透水性堤体前面・後面における波と流れの特性を得て、これより堤体に作用する力を求めた。堤体に作用させる波と流れは風洞水槽により発生させ、地形としては海底に勾配をつけている。

## 2. 波動場における流体抵抗

海水中の物体例えば円柱等に作用する水平方向波力は一般に次式のモリソン公式で表示される。

$$dP = \frac{w_0}{2g} C_D |u| u \, dS + \frac{w_0}{g} C_M \dot{u} \, dV \quad \dots\dots(1)$$

ここに  $dP$  は鉛直単位長さ  $dz$  の部分に作用する水平波力、 $w_0$  は海水の単位容積重量、 $g$  は重力加速度、 $C_D$  は抗力係数、 $C_M$  は質量係数、 $dS$  は物体の  $dz$  部分の流れ方向に対する投影面積、 $dV$  は物体の  $dz$  部分の体積、 $u$  は波の運動による水平粒子速度、 $\dot{u}$  は波の運動による水平粒子加速度である。

抵抗係数  $C_D$ 、 $C_M$  の値に関しては、多くの研究がなされているけれども、それらはほとんど円柱等の単一構造物に作用する波力に関するものであり、ここで問題にしているような粒子群からなる透水性堤体に関するものはあまり見当たらない。

透水性堤体の場合 (1) 式における  $dS$ 、 $dV$  は単位幅について、空けき率  $E$ 、堤体厚  $B$  を用いて、

$$dS = (1-E) dz, \quad dV = (1-E) B dz \quad \dots\dots(2)$$

と表わせる。ここでは体積および面積空けき率を等しいと仮定している。

ここで用いている抗力係数は堤体構成単一粒子についてのものであり、透水性堤体などの多数粒子からなる場合は、隣接粒子の影響、粒子数等を考えた係数  $\lambda$  を導入し、 $\lambda C_D$  を透水性堤体の抗力係数と考える。

この抗力係数を用いると、透水性堤体の場合のモリソン公式は

$$dP = \frac{w_0}{2g} \lambda C_D |u| u \, dS + \frac{w_0}{g} C_M \dot{u} \, dV \quad \dots\dots(3)$$

となる。なお、抗力係数  $\lambda C_D$  については以降に詳しい検討を行う。

波圧の作用する深さは、戻り流れによる力を考えないことにすると水底の  $z = -h$  ではなく、海表面吹送流の影響する水深までとなる。この水深は流速分布の測定結果に基づいて  $z = -h/2$  とした。よって水位  $\eta$  から  $z = -h/2$  までが堤体に作用する波圧の範囲である。

次にこの式中の抵抗係数  $\lambda C_D$  および  $C_M$  について非定常運動一周期内的での時間的変動を考えてみる。一周期  $T$  を十分に微小な時間間隔  $\Delta t$  で分割し、この微小時間  $\Delta t$  の間で  $\lambda C_D(t)$ 、 $C_M(t)$  は変化しないと仮定し、(3)式を用いて時間  $t$  および  $(t+\Delta t)$  における算定式を連立方程式として解くことにより、次式からそれぞれの係数を算出できる。すなわち

$$\begin{cases} dP(t) = \lambda C_D(t) F_D(t) + C_M(t) F_I(t) \\ dP(t+\Delta t) = \lambda C_D(t) F_D(t+\Delta t) + C_M(t) F_I(t+\Delta t) \end{cases} \quad \dots\dots(4)$$

より

$$\left. \begin{aligned} \lambda C_D(t) &= \frac{\begin{vmatrix} dP(t) & F_I(t) \\ dP(t+\Delta t) & F_I(t+\Delta t) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} F_D(t) & F_I(t) \\ F_D(t+\Delta t) & F_I(t+\Delta t) \end{vmatrix}} \\ C_M(t) &= \frac{\begin{vmatrix} F_D(t) & dP(t) \\ F_D(t+\Delta t) & dP(t+\Delta t) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} F_D(t) & F_I(t) \\ F_D(t+\Delta t) & F_I(t+\Delta t) \end{vmatrix}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(5)$$

となる。ここに、

$$F_D(t) = \frac{w_0}{2g} (1-E) |u(t)| u(t) \, dz \quad \dots\dots(6)$$

\* 正会員 神戸大学工学部

\*\* 正会員 神戸市港湾局

$$F_I(t) = -\frac{w_0}{g} (1-E) B \dot{u}(t) dz \dots\dots\dots (7)$$

である．実験では  $\Delta z$  に分割した水深ごとに (5) 式を用いて，各水深での抵抗係数の変化を調べている．

### 3. 実験方法

使用した実験装置は幅 13 cm，長さ 4.2 m，水路部水深 20 cm，風洞部高さ 10 cm の風洞水槽である．この水路部下流端には勾配  $S=1/11.5$  の斜面を設置して，水深が一様に減少するようにしている．設置した透水性堤体は粒径  $d=2$  cm のビーズ球を矩形堤体となるよう上下端を金網を用いて一定厚さに固定したものである．実験は砕波水深，堤体厚等の関係を調べるため，表一に示すように堤体設置を砕波直前位置と砕波以前の水深位置の 2 ケース，平均流速を 2 ケースおよび堤体厚としては 3 ケースについて行った．

表一 実験条件

| 風速 $V$ (m/sec) | 7.0, 10.0      |       |       |                |       |       |
|----------------|----------------|-------|-------|----------------|-------|-------|
| 粒子径 $d$ (cm)   | 2.0            |       |       |                |       |       |
| 堤体位置           | $F=200$ cm の位置 |       |       | $F=230$ cm の位置 |       |       |
| 堤体厚 $B$ (cm)   | 2.3            | 3.8   | 6.0   | 2.3            | 4.0   | 5.2   |
| 空けき率           | 0.547          | 0.471 | 0.486 | 0.547          | 0.523 | 0.499 |

まず堤体周りの波について，その前面での反射率を，Healy の方法に従って不完全重複波の包絡線を求めることにより得た．堤体前面から波高計を 0.5~1 cm 間隔に設置し，波高分布を求め振幅の最大・最小より算定した．一方，波の透過率は透過波高と堤体前面への入射波高の比から求めた．

堤体前後の流れは熱線流速計を用いて，堤体を設置した場合および堤体を取り除いた場合について水深方向の平均流速分布を測定し，これらの値を比較することによって流況の変化を考察した．

また流速の乱流成分よりこれまでと同様の手法<sup>1)</sup>を用いて，拡散係数を求め，前報で提案した拡散係数推定式との比較を行った．

モリソン式の各係数の波の一周期内での時間的変動を実験によって検討するためには，水位変動と水面下の流速を同時に測定する必要がある．そこで抵抗線式波高計と熱線流速計を平行に設置し，流速計の測定水深を変えながら波高と流速の時間変動を同時に測定した．得られたアナログデータはすべてデータレコーダに記録し，波高と流速の同一時間における時系列を数値化した．サンプリング間隔  $\Delta t$  は  $\Delta t=2$  msec とした．また分割水深幅  $\Delta z$  は 1 cm としている．

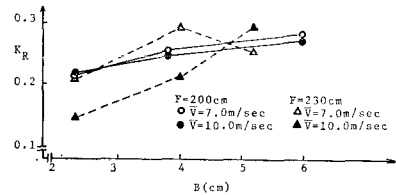
考えている水深における波圧は測定水位より Sainflou の簡略式により求める．一方，流速については本実験で

使用している熱線流速計が方向性をもたないため，流速が波の進向方向か逆方向か判断できない．このため水位が静水位以上ならば，流速は波の進行方向で正，静水位以下ならば流速は逆に負と考えて流速の数値を読むことにした．

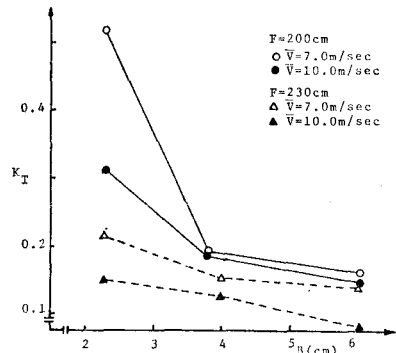
### 4. 実験結果と考察

#### (1) 波の反射率・透過率

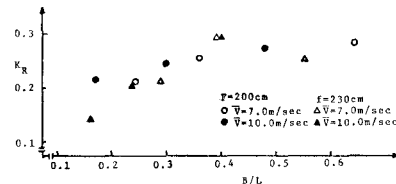
波の反射率  $K_R$ ，透過率  $K_T$  と堤体厚  $B$  の関係を図一1，2 に示す．これより反射率は堤体厚の増加により線形的に増大している．一方，透過率は逆に指数関数的に減少していることがわかる．また堤体厚  $B$  と入射波の波長  $L$  の比である相対堤体厚  $B/L$  と反射率  $K_R$  の関係を図一3 に示す．すなわち堤体厚  $B$  よりも相対堤体厚  $B/L$  の方が反射率と相関度が大きいと思われる．



図一1 反射率と堤体厚の関係



図一2 透過率と堤体厚の関係



図一3 反射率と相対堤体厚の関係

#### (2) 波のエネルギー分割

入射波エネルギーのうちで堤体によって消散するエネルギー率  $R_L$  を次式のように定義して考えてみる．

$$R_L = 1 - (H_R/H_I)^2 - (H_T/H_I)^2 \dots\dots\dots (8)$$

図一4 が示すように反射エネルギーはほぼ 6%，透過エネルギーは 5%，消散エネルギーは残りの約 90% と

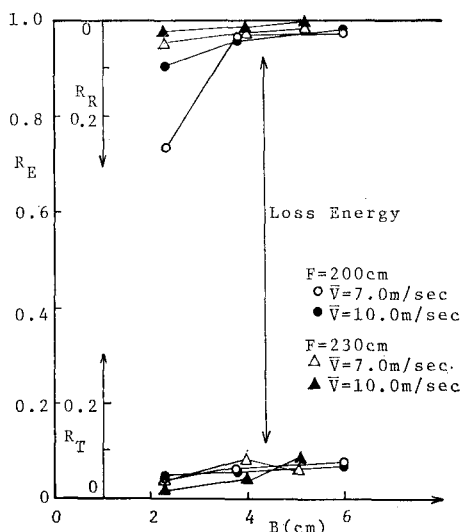


図-4 エネルギー分割と堤体厚の関係

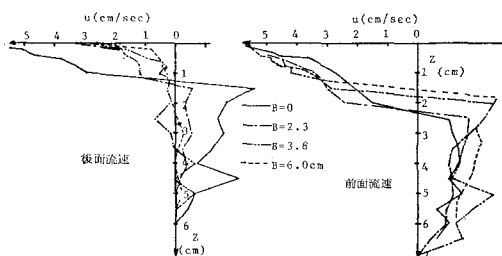
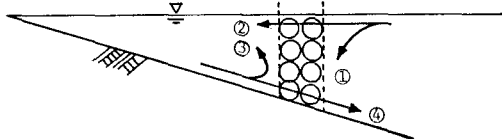
図-5 堤体前後の流速分布 (堤体位置  $F=200$  cm,  $\bar{V}=7$  m/sec)

図-6 流況モデル

なりほとんどのエネルギーが堤体により消散させられることがわかる。

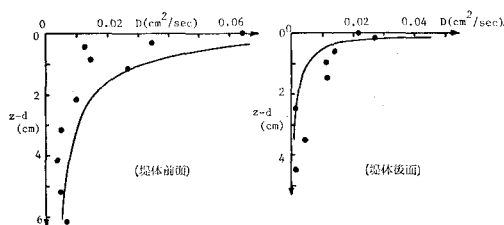
### (3) 流速分布

堤体厚を変化させた場合および堤体を取り除いた場合について堤体前後における流速分布を求めると図-5に示すようになる。堤体後面においては堤体の有無により大幅に流速の変化がみられる。堤体厚を増すにつれて上層流速は減少する。このため当然そのもとり流れも小さくなっている。前面では堤体厚の増加によって下層でのもとり流れが増大する傾向が見られた。本実験において流向は流れの中に含まれている微細なトレーサーにより判定している。堤体前後における流況の模式図を図-6に示す。堤体前面の上層流は下降流①、浸透流②に分割され堤体厚の増加とともに下降流①が卓越し、浸透

流②が減少する。また同時に戻り流れ④も減少し、堤体後面の上昇流③が増加する。すなわち堤体厚を増すと堤体の浸透流量は減少し、防波堤内外での海水交換上からは好ましくない。

### (4) 拡散係数

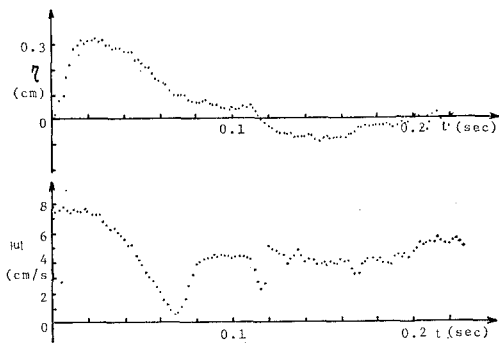
図-7に吹送距離  $F=200$  cm, 堤体厚  $B=2.3$  cm, 平均風速  $\bar{V}=10$  m/sec の場合の堤体前後の拡散係数分布を示す。これより堤内での拡散係数は、水深増加により急激に減少する。これは堤体により戻り流れが阻止され、水底では図-5の結果も合わせて、平均的な流れも乱れも堤体がない場合に比較して小さくなると考えられる。

図-7 拡散係数 (堤体位置  $F=200$  cm,  $B=2.3$  cm,  $\bar{V}=10$  m/sec)

また図-7には推定値も同時に示し、実験値と推定値は定量的にも一致し、前報の拡散係数推定式<sup>1)</sup>がほぼ妥当であると考えられる。

### (5) 抵抗係数

同時測定した水位と流速の時間変動の一例を図-8に示す。これより流速は水位とは別にかなり不規則な変動をしている。ただこの流速は流向を考えない流速で流れの大きさのみを示している。

図-8 水位  $\eta$  と流速  $|u|$ 

求めた抗力係数  $\lambda C_D$ , 質量係数  $C_M$  の実験結果を図-9に示す。これより抗力係数  $\lambda C_D$ , 質量係数  $C_M$  はかなり複雑な変化を示しているが  $\lambda C_D$  は  $10^1$  のオーダー,  $C_M$  は  $10^{-1}$  のオーダーである。

抵抗係数の変化を水深方向に求め、各水深での結果から波高の位相を合わせて波の各位相における各水深での

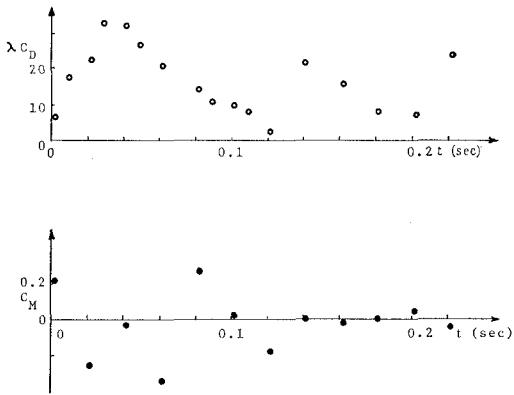


図-9 抗力係数と質量係数 (堤体位置  $F=230$  cm,  $B=2.3$  cm,  $\bar{V}=10$  m/sec,  $z=0.2$  cm)

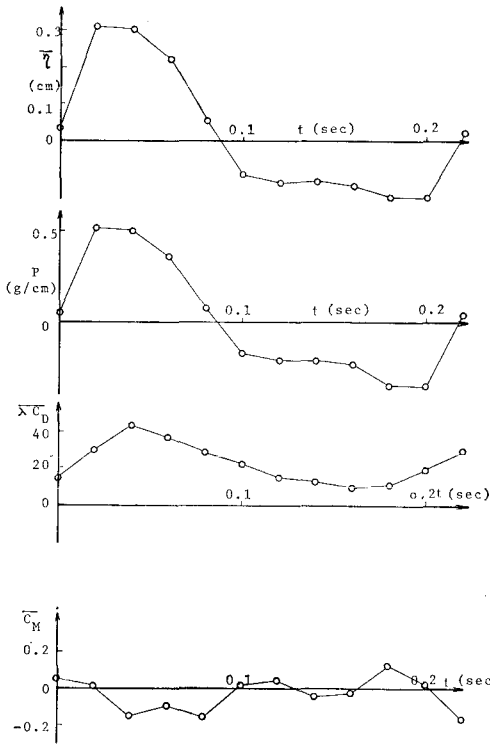


図-10 平均抗力係数と平均質量係数 (堤体位置  $F=230$  cm,  $B=5.2$  cm,  $\bar{V}=10$  m/sec)

波圧  $P$ , 抗力係数  $\lambda C_D$ , 質量係数  $C_M$  を求める。これより水深方向の平均抗力係数  $\lambda \bar{C}_D$  および平均質量係数  $\bar{C}_M$  を求めたのが 図-10 である。

一方、波動理論としては微小振幅波理論およびストークス波理論を用いて解析した。その結果を 図-11, 12 に示す。

実験、理論を比較すると抗力係数は、理論・実験とも  $10 \sim 40$  の値となりほぼ一致している。一方、質量係数  $C_M$  はかなりばらつきがあるが周期的に変化し、実験・

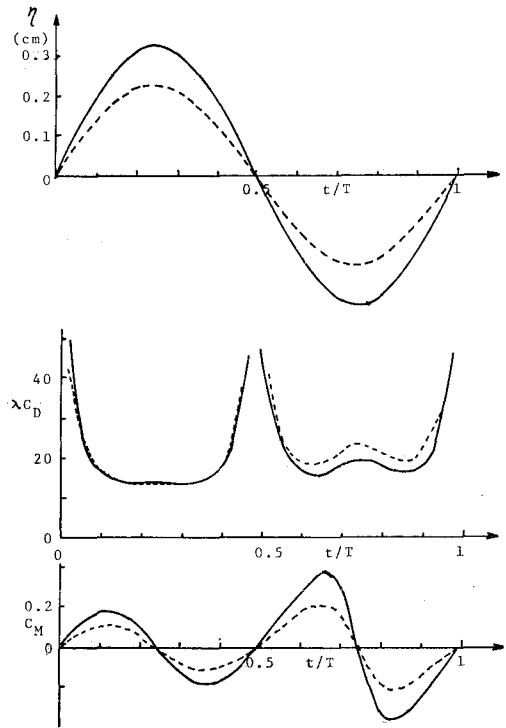


図-11 微小振幅波理論の結果

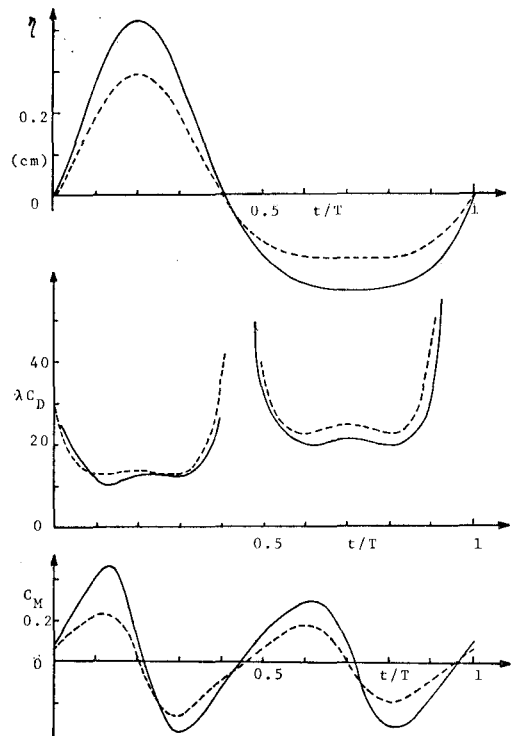


図-12 ストークス波理論の結果

理論とも大きさは  $10^{-1}$  のオーダーである。一周期にわたって平均すると実験、理論とも  $\bar{C}_{M \text{ mean}} \approx 0$  となる。

ここで考えた透水性堤体と円柱等の単一構造物における  $C_D$ ,  $C_M$  を比較すると、円柱では  $C_D \approx 1.0$ ,  $C_M \approx 2.0$  が用いられているが、透水性堤体では上記のように円柱等と比較して抗力項が慣性力項より卓越していることがわかる。

また抗力係数  $\lambda C_D$  について、別途定常流の場合について実験を行いその値を求め上記の得られた値と比較を行った。

#### (6) 透水層の抗力係数<sup>2)</sup>

堤体を石材ブロック等により構成するものと考え、定常流におけるこの堤体透水層の流体抵抗係数についても考えた。流れが定常流の場合の透水層内の流体力の釣合い関係は

$$-\frac{\partial h}{\partial l} - \frac{F_R}{\rho g E d A l} = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

と表わされる。ここに  $-\partial h/\partial l$  は動水勾配、 $dA$  は透水断面、 $dl$  は透水長、 $F_R$  は透水層構成材である粒子による抵抗力、 $E$  は空げき率である。この透水層の1個の粒子に働く抗力  $f_P$  を抗力係数  $C_D$  を用いて、

$$f_P = \epsilon C_D \beta d^2 \left( \frac{\rho v_R^2}{2} \right) \quad \dots\dots\dots (10)$$

と表わす。ここで係数  $\epsilon$  は隣接する粒子からの影響を表わすものであり、また  $\beta$  は粒子自身の形状係数、 $d$  は粒子の径、 $v_R$  は粒子に作用する実流速である。(9)式の力  $F_R$  は、透水層が  $N$  個の粒子から形成されるものに作用するとすると、 $F_R = N f_P$  と表わされる。ここに  $N = (1-E)dA l / \gamma d^3$  であるから、(9)、(10)式より

$$-\frac{\partial h}{\partial l} = \frac{(1-E)\beta \epsilon C_D}{\alpha^2 \gamma E^3} \frac{1}{d} \frac{v^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (11)$$

が得られる。ここで  $\alpha$  は流水面積の補正係数 ( $v = \alpha E v_R$ )、 $\gamma$  は粒子体積に関する形状係数、 $v$  は見掛けの流速である。

一方、ダルシー・ワイズバッハの式から、

$$-\frac{\partial h}{\partial l} = \zeta \frac{1}{d} \frac{v^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (12)$$

故に、透水層の抵抗係数  $\zeta$  は上式(11)との関係から透水層の1個の粒子の抗力係数  $C_D$  を用い、

$$\zeta = \frac{(1-E)\beta \epsilon C_D}{\alpha^2 \gamma E^3} \quad \dots\dots\dots (13)$$

と表現できる。透水層固相の粒子を球と仮定すると、粒子に関する係数  $\beta = \pi/4$ ,  $\gamma = \pi/6$  となり、さらに透水流速の補正係数  $\alpha = 1$  とおくと、

$$\zeta = \frac{3}{2} \frac{1-E}{E^3} \epsilon C_D \quad \dots\dots\dots (14)$$

となる。多数粒子からなる透水層の抵抗は、単一物体の抵抗、空げき率および隣接粒子からの影響係数によって表示される。すなわち透水層内の物体に作用する抵抗は影響係数  $\epsilon$  を導入して  $\epsilon C_D$  として表現できる。

定常流における透水実験は鉛直方向、水平方向の二つの透水試験装置を用いて行い抵抗係数  $\zeta$  を求め、これより  $R_e$  と  $\epsilon C_D$  の関係を求めた。

先に述べた透水性堤体に働く波力のモリソン式(3)とこの定常透水層理論とを比較すると、(3)式における係数  $\lambda$  は堤体全厚  $B$  に関するものであり、また(10)~(14)式に示す係数  $\epsilon$  は単位厚  $dl$  に関するものである。従って、この両者の関係は  $\lambda = C\epsilon$  となる。ただし、 $C = \frac{3}{2}(1-E)\frac{B}{d}$  である。表-1に示す不規則波実験に用いた堤体より上記係数  $C$  を求めると、 $C = 0.8 \sim 2.3$  となる。

透水性堤体の不規則波実験の値、流速  $U = 6 \text{ cm/sec}$ 、粒径  $d = 2 \text{ cm}$ 、動粘性係数  $\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{sec}$  を用いると  $R_e = 1.2 \times 10^3$  となり、そのときの  $\epsilon C_D$  は上記定常透水実験より約 40 となる。これより換算した  $\lambda C_D$  は 32~92 と得られる。§(5)で直接求めた不規則波実験による実測抗力係数と比較すると、定常透水試験の結果の方がやや大となっている。

## 5. あとがき

本研究は不規則波に対する透水性堤体の作用に関する基礎的実験であり、ここで得られた主要な結果は次の通りである。

(1) 透水性堤体に作用する波については、反射波エネルギー、透過波エネルギーに比較して消散エネルギーがかなり大きい。

(2) 流れについて、堤体のない場合は浅海域全体に循環流ができていて、海水交換が促進される。一方、堤体があると堤体前後にそれぞれ循環流ができ、堤体前後での海水交換が少なくなる。

(3) 波力については透水性堤体では、抗力係数として隣接する粒子からの影響を考えて、(3)式のように  $\lambda C_D$  を抗力係数と考える。また円柱等の単一構造物と比較して抗力項が慣性力項より卓越すると考えられる。

今後はさらに、堤体、材料形状と波浪、流速との関係をより明確にし、入射波に対して最適消散効果を持ち、海水交換も大きい透水性堤体について検討する必要がある。また抗力係数、質量係数についてもさらに定量的に考察すると同時に円柱等の単一構造物との相異についてその物理的意義等を考える必要があると考える。

## 参考文献

- 1) 筧 源亮・山崎平弥・菅野晴行：海浜海域の風波による拡散に関する実験的研究，第25回海講論文集，pp. 522, 1978.
- 2) 筧 源亮・山崎平弥：巨石透水層内の流れ特性について，第33回年次学術講演会，pp. 596~597, 1978.