

ブロック堤体内のスラミング現象による エネルギー逸散に関する研究

中村 孝幸*・西 平和彦**・小野 修史***

1. ま え が き

ブロック堤による波変形を予測する上で、波と堤体との干渉過程で生じるエネルギー逸散が重要になる。従来このようなエネルギー逸散は、Sollitt ら (1972) の解析法に代表されるように、透水層内の流れを想定した抵抗則を準用して評価されてきている。しかし、ブロック堤の構成部材は、近年ますます大型化しつつあり、構成部材と空隙部の流体とを平均化して一様透水層に近似するような解析法がそのまま適用できるかどうか疑問視される。また大型部材で構成されるブロック堤では、堤体内での渦流れ等の発生によるエネルギー逸散のみならず、水面付近に位置する部材と波面との衝突現象（スラミング現象）によるそれも重要になることが実験的に指摘されてきている（中村ら、1986、1988、1991）。しかしながら、このようなエネルギー逸散の解析的な取り扱い方法は知られておらず、特に反射率の推定法については未解決なままとなっている。

ここでは、従来特に不明確なままとなっていた水面付近に位置する部材と波面とのスラミング現象によるエネルギー逸散に着目して、その実態を明らかにすると共に、その理論的な評価法についても衝撃波力の算定法などを勘案して提案する。このため、水平円柱を構成部材として、これを水面付近に1段平行配列および3段千鳥配列した比較的単純な構造物や、実際場でのブロック堤を想定した多数の円柱部材からなる構造物を対象にして水理模型実験を行い、スラミング現象によるエネルギー逸散の発生機構を考察すると共にその理論的な評価法の妥当性などを検討するものである。

2. 実験装置および実験方法

模型堤体の構成部材には、外径 $D=7.5\text{ cm}$ の水平円柱を用い、図-1 に示すように配置した。これら円柱間の最短中心距離は 9.3 cm に固定して、ブロック堤に組み上げたとき、空隙率 ε が現地のものとほぼ同じ 50%

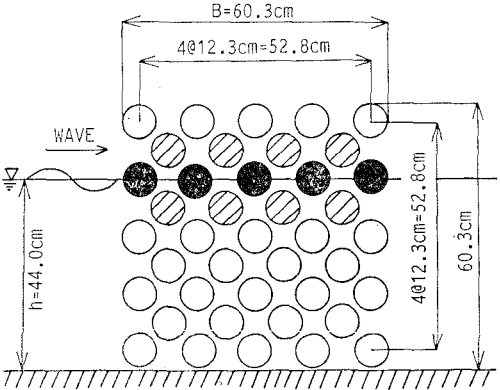


図-1 模型堤体の側面図（空隙率 $\varepsilon=50\%$ ）

になるようにした。実験に用いた円柱の配置は、①1段配列（図-1 の黒塗の円柱列）：円柱部材の中心が水面に一致するように1段に配列したもの、②3段配列（図-1 の黒塗および斜線の円柱列）：1段配列の上下に同様の円柱列を千鳥に付加したもの、③ブロック堤（図-1 の黒塗と斜線および白抜ききの円柱列）：円柱を多数組み合わせ合わせて矩形ブロック堤を模型化したものの3種類である。

実験では上記した①～③の模型堤体について、透過波および反射波の各々を同時に測定した。模型堤体に作用せしめた入射波は、周期 T が $0.9\sim 2.3\text{ sec}$ の10種類、波高 H が $7.5, 15\text{ cm}$ の2種類（碎波する場合を除く）である。なお、設置水深 h は 42 cm と一定にした。

3. 配列円柱の衝撃波力

水面が速度 w で上昇しているとき円柱に作用する衝撃波力 F_s は、円柱の付加質量の時間的な変化を考慮して次式で算定できる（Sarpkaya ら、1981）。

$$F_s = \frac{dM_A}{dt} w \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 F_s ：衝撃波力、 M_A ：付加質量、 w ：水面上昇速度である。

一方、スラミング係数 C_s を用いると衝撃波力 F_s は、式（2）のように表すことができる。

* 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部土木海洋工学科
** 学生員 愛媛大学大学院 工学研究科
*** (株)ウェスコ 技術部

$$F_s = \frac{1}{2} C_s \rho w^2 D \quad (w \geq 0) \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 C_s : スラミング係数、 ρ : 流体密度、 D : 円柱の直径である。ただし、 $w < 0$ のとき $F_s = 0$ である。

式(1)と式(2)を比較して、スラミング係数と付加質量の間には式(3)のような関係がある。

$$C_s = 2 \frac{dM_A}{dR_d} \frac{1}{\rho D} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 R_d : 円柱の没水深さ(円柱の没水部分の吃水である。

本研究では、ポテンシャル理論に基づく数値解析法(中村ら, 1983a)を用いて、円柱が水中に没水していく過程での付加質量を時々刻々求め、それらの時間変化より C_s を算定した。図-2 は、円柱1本のスラミング係数の厳密解(Kaplan ら, 1976)と数値解の比較を没水深さと直径の比 R_d/D の変化で示す。図より C_s は、数値解析法により精度よく推定できることがわかる。図-3 は、水面に円柱を5本等間隔に並べたときの中央の円柱の C_s を同様に R_d/D の変化で示す。図中では、配列間隔の効果についても検討できるように開口率 n (開口長/中心間距離) をパラメータにしてある。そして、比較のため単円柱の結果についても併せ示した。図より n が小さくなると、全体的に C_s の値が増大して作用時間が長くなることや単一円柱と異なり $R_d/D = 0.4$ 付近でピーク値を示すことなどが認められる。これは、隣接する部材の影響によるものと考えられる。次に、図-4 は実験で用いた3段千鳥配置した場合の中段の円柱の C_s を同様に R_d/D の変化で示す。この図より、 C_s は同じ開口率での1段配列の場合に比較して増大することや、上段あるいは下段の円柱が中段円柱と同時に没水する状況下でピーク値を示すことがわかる。これは、前述したように隣接する部材の影響がより強く現れることによるものと考えられる。

4. スラミング現象によるエネルギー逸散の評価法

(1) 水表面の境界条件の設定法

本研究では、部材形状やその配置を直接的に考慮して波変形の算定が行える、中村(1983b)による2次元波動場の Green 関数を核関数とするわきだし分布法を原則的に用いた。しかし、この解析法ではエネルギー逸散を考慮できない。このため、水面付近でのスラミング現象によるエネルギー逸散を考慮できるように部材間の水表面の境界条件をダンパー型のエネルギー吸収条件に修正した。この概要について以下説明する。

まず、水面付近に位置する部材と波面とのスラミング現象によるエネルギー逸散量は、衝撃力によりなされる仕事量と等価なものと仮定した。ただし、衝撃力は水面

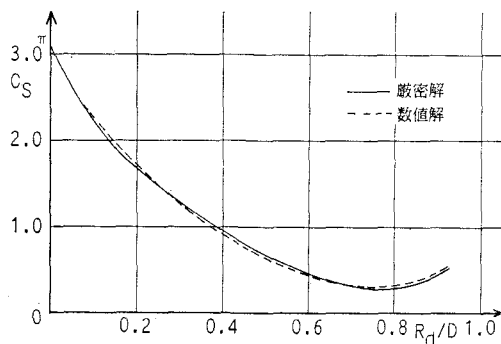


図-2 単円柱の C_s の厳密解と数値解の比較

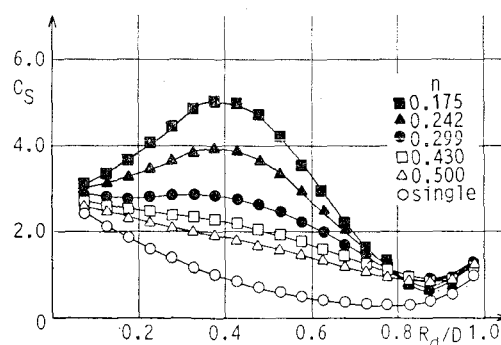


図-3 開口率による C_s の変動 (1段水平円柱列)

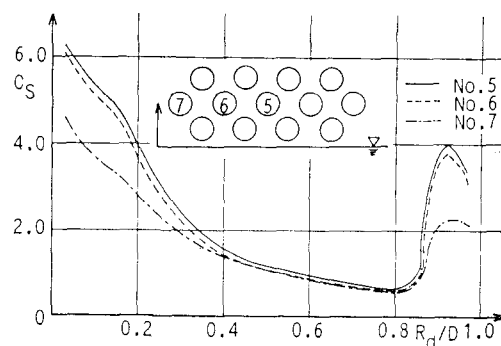


図-4 3段千鳥配列したときの中段の円柱列の C_s の変動

上昇時のみ作用するものとした。このエネルギー逸散を解析に考慮するため、図-5 に示すように、ブロック堤体内の構成部材間の水表面でこれと等価なエネルギー逸散が生じるように、水面上昇速度の2乗に比例する抵抗力 F_D をもつダンパーにモデル化した。このとき、水表面の圧力は大気圧とダンパーによる単位面積あたりにかかる抵抗力とつりあうことから、力学的境界条件は次式で示される。

$$\eta = -\frac{1}{g} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{F_D}{l} \right) \Big|_{z=0} \dots \dots \dots (4)$$

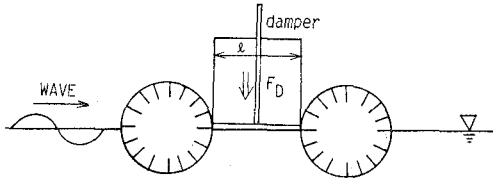


図-5 逸散を考慮した水表面の境界条件のモデル化

ここで、 Φ ：入射波と回折波を考慮した全速度ポテンシャル、 g ：重力加速度、 l ：構成部材間の自由表面の幅、 F_D ：幅 l のダンパーの抵抗力、 z ：静水面より上方にとった鉛直座標を示す。そして置換するダンパーは、衝撃波力を示す式(2)と同様に水面上昇時に上昇速度の2乗に比例し、下降時に0となるような強い非線形性を有する。このため線形理論での取り扱いが困難となるが、以下ではエネルギー的な等価性を重視して抵抗力 F_D をローレンツの等価仕事の原理に基づき線形化し、線形理論の枠内で近似的に解析を行った。このとき、抵抗力は次式の $(F_D)_E$ のように仮定したことになる。

$$(F_D)_E = C_f D \sigma \rho \omega D \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 σ ：角振動数 ($=2\pi/T$; T ：周期)、 C_f ：等価線形抵抗係数が次式で与えられる。

$$C_f = \frac{2}{3} \frac{C_s}{\pi} \frac{\dot{\omega}}{D \sigma} \quad \dots\dots\dots (6)$$

また、 $\dot{\omega}$ ：水面上昇速度の振幅を示す。そして $(F_D)_E$ は水面上昇および下降時の両者に対して作用するものとしてある。式(5)を式(4)の F_D に代入して水表面の運動学的な境界条件と結合すると、ブロック堤体内の水表面の境界条件として最終的に次式が導ける。

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\phi}{(g/\sigma^2) - if} \Big|_{z=0} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 ϕ ： Φ の複素振幅、 $i = \sqrt{-1}$ 、 f は次式で定義される量である。

$$f = C_f \left(\frac{D}{l} \right) D \quad \dots\dots\dots (8)$$

本解析では式(7)をブロック堤体内の水表面の境界条件として用いる。ここで、 $f=0$ とすると減衰を考慮しないときの水表面の境界条件に一致する。

(2) C_f の推定法

式(7)の境界条件を考慮して波変形の算定を行うには、 f すなわち C_f が必要になる。 C_f は、式(6)に示すように ϕ から求められる $\dot{\omega}$ を含んでおり、直接的に決定できない。ここでは、Sollitt ら (1972) により用いられているような繰返し計算法を採用して C_f を求めた。すなわち、 C_f の初期値を仮定して ϕ を求め、これを用いて再度 C_f を算出し、 C_f が十分な精度で収束するまで繰返し計算を行うものである。なお、 C_s には3.での結果が適用できるが、没水深さによる変化も

あり、これについては全没水深にわたる平均値を代表量として用いた。

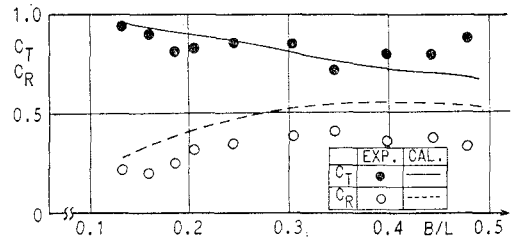
5. 各堤体による透過率および反射率

(1) 水面付近に固定された円柱列

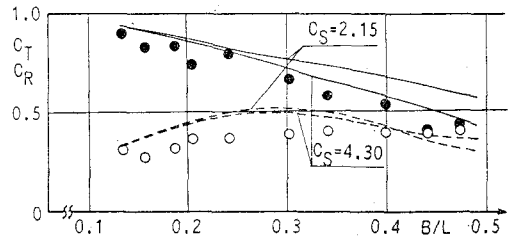
図-6(a)、(b)は、それぞれ1段配列および3段配列の透過率 C_T 、反射率 C_R に関する実験結果と4.で述べた境界条件を考慮した算定結果の比較を周期に関する無次元量 B/L (B ：堤体幅、 L ：波長) による変化で表す。これらの算定に用いた C_s の値は、1段配列の場合、図-3より求められる円柱5本の平均値1.72を用いた。一方、3段の場合、図-4に示すように、 C_s は没水深さによる変動が大きいので、円柱3本の平均値2.15とその2倍の値4.30の両者を代表値として採用してみた。これらの図の実験結果にまず着目すると、 C_T は短周期の条件になるほどまた部材の配列数が1段から3段配列へと増すほど減少することなどがわかる。一方 C_R は、長周期の条件になるほど減少することや、短周期の条件ではほぼ一定値を示すことなどが認められる。次に、算定結果に着目すると、 C_s の値を2.15、その2倍の4.30と増加すると、反射率にはあまり寄与せず、短周期の条件下で透過率が減少する傾向が見られる。実験結果と算定結果の比較を行うと、上述したような定性的な変動傾向はほぼ一致しているものの、定量的な一致度は十分でない場合も見られる。

(2) 円柱で構成されたブロック堤

図-7は、本実験で採用した空隙率 $\varepsilon=50\%$ のブロック堤の C_T 、 C_R の実験結果と算定結果を B/L によ



(a) 1段配列の場合



(b) 3段配列の場合

図-6 水面付近で固定された円柱列による透過・反射率 ($H/h=0.17$)

る変化で示す。このとき C_S の値は、3 段配列の C_S の平均値 2.15、その 2 倍の 4.30、1 段配列時の C_S の 3 倍に相当する 5.16 の 3 種類を用いて算定したが、ここでは代表例として $C_S=2.15, 5.16$ のときの結果を示す。まず実験結果に着目すると、 C_T は上記の結果と同様に短周期の条件になるほど減少することや、3 段配列までの結果と比較すると、 C_T は全体的に減少することなどがわかる。一方、 C_R は、ほぼ 0.5 程度で周期による変動はほとんど見られないことや 3 段配列の結果と比較すると、長周期の条件ではその絶対値は多少増大するものの、短周期の条件でほぼ同程度の値になっている。これは、 C_R が短周期の条件下で特に水面付近の部材との衝突現象に影響されることによるものと考えられる。次に、算定結果に着目すると、本研究で用いた C_S 値の範囲ではそれを大きくすると、短周期の条件下での C_T に特に影響することがわかる。次に、実験結果と算定結果を比較すると C_T, C_R の両者ともに定性的な傾向は一致しているが、水平流体運動の卓越する長周期の条件では、実験結果と算定結果の間に差異が見られる。

図-8(a), (b) は、中村ら (1986) によって行われた水平円柱を構成部材とするブロック堤の C_T, C_R の実験結果と本研究で提案したダンパーモデルによる算定結果の比較を示す。このとき C_S は、 $\epsilon=50\%$ の場合と同様に各ブロック堤の水面付近の円柱列に着目して、その円柱列 1 段分の C_S の平均値の 3 倍の値、すなわち、 $\epsilon=46\%$ のとき 5.16、 $\epsilon=68\%$ のとき 4.12 を採用した。図中には、中村ら (1986) による平板置換モデルを用いた波浪ポテンシャル理論による算定結果も併せ示した。これらの図より、平板置換モデルの算定結果と比較して、ダンパーモデルを用いることにより、 C_R は全体的に減少し、特に鉛直流体運動の卓越する短周期の条件下でその傾向が強くなることがわかる。そして、両解析法による算定結果と実験結果を比較すると、 C_T は平板置換モデルの方が定性的にも定量的にも一致度がよいが、 C_R については特に短周期の条件下でダンパーモデルによる結果の方が実験値とよく一致している。しかしながら、前述したように、ダンパーモデルにおいては、 C_S の値によって特に短周期側での C_T, C_R の値が変化しやすいため、 C_S の値を注意して選定する必要がある。

このように、本研究で提案したエネルギー逸散の評価モデルを用いて、比較的短周期の条件下での透過・反射率が概略的に推定できるものと考えられる。

6. エネルギー逸散率

図-9 は、代表例として 3 段配列時および $\epsilon=50\%$ のブロック堤による波のエネルギー逸散率 E_L ($=1-C_T^2$

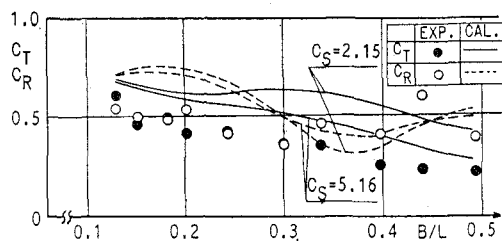
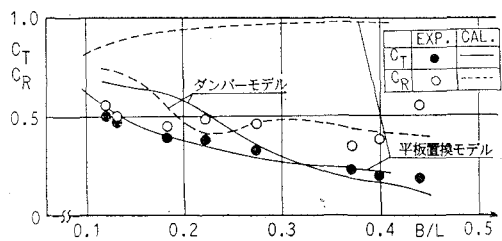
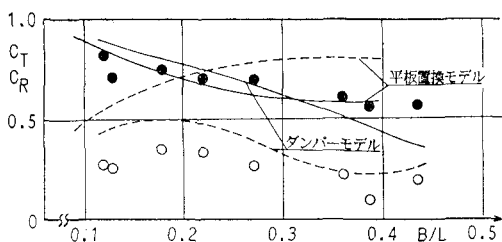


図-7 ブロック堤による透過・反射率 ($\epsilon=50\%$, $H/h=0.17$)



(a) $\epsilon=46\%$



(b) $\epsilon=68\%$

図-8 ブロック堤による透過・反射率 ($H/h=0.15$); 中村ら (1986) の結果との比較

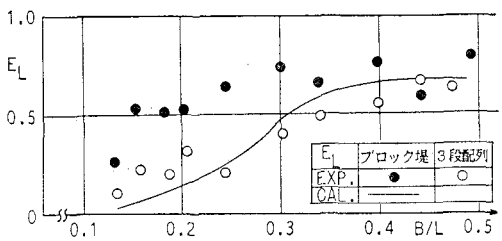


図-9 エネルギー逸散率 ($H/h=0.17$)

$-C_R^2$) の実験結果と算定結果の比較を示す。この図より、ブロック堤の E_L はほぼ 5 割程度以上で、長周期の条件になると多少減少するなどの傾向が認められる。そして、ブロック堤の E_L は 3 段配列のと比較すると、 $B/L < 0.3$ の長周期側では増加しているが、 $B/L > 0.3$ の短周期側ではほぼ同程度か多少上回る程度であることがわかる。さらに、実験結果と算定結果を比較すると短周期の条件では、両者ともよく一致しているが、長周期

の条件になると、算定値が実験値を下回るなどの差異が認められる。

このように、ブロック堤による波のエネルギー逸散は、鉛直流体運動の卓越する短周期の条件では、主に水面付近の部材と波面とのスラミング現象によって生じ、水平流体運動の卓越する長周期の条件では、主にブロック堤体内部での渦流れ等の発生により生じるものと推測できる。

7. 結 語

1) 水面付近に並列配置した円柱群のスラミング係数は、配列間隔を小さくすると増大することや、単円柱のそれと異なり、没水深さが直径の0.4付近でピーク値を有し、衝撃力の作用時間も長くなる。

2) 水面付近に位置する円柱部材と波面とのスラミング現象によるエネルギー逸散は、本研究で提案した理論解析モデルを用いてほぼ推定でき、この逸散量は比較的短周期の条件で大きくなる。

3) 水平円柱を水面付近に1段および3段に多列配置した場合やそれを短形断面のブロック堤に組み上げたときの透過・反射率は、水平流体運動が卓越する長周期波

の条件を除き、スラミング現象によるエネルギー逸散を考慮した本解析法によりほぼ推定できる。そしてこのエネルギー逸散は、特に反射率に影響する。

参 考 文 献

- 中村孝幸・川本浩二・藤田昌夫 (1983a): 棧橋に作用する衝撃揚圧力の減勢法に関する研究, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 342-346.
- 中村孝幸 (1983b): 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.
- 中村孝幸・奥 吉雄・本田典久 (1986): ブロック堤の消波効果に関する予測法とエネルギー逸散機構について, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 377-381.
- 中村孝幸・小野塚孝 (1988): 異形ブロック堤における部材波力の特性とエネルギー逸散機構について, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 712-716.
- 中村孝幸・西平和彦 (1991): ブロック堤の部材波力の特性と流体力係数について, 海岸工学論文集, 第38巻(2), pp. 581-585.
- Kaplan, P. and M. N. Silbert (1976): Impact Forces on Platform Horizontal Members in the Splash Zone. OTC Paper No. 2498, Houston, TX.
- Sarpkaya, T. and M. Isaacson (1981): Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures, pp. 366-371.
- Sollitt, C. K. and R. H. Cross (1972): Wave Transmission through Permeable Breakwaters, Proc. of 13th ICCE ASCE, pp. 1827-1846.