

ブロック堤の部材波力の特性と流体力係数について

中村孝幸*・西平和彦**

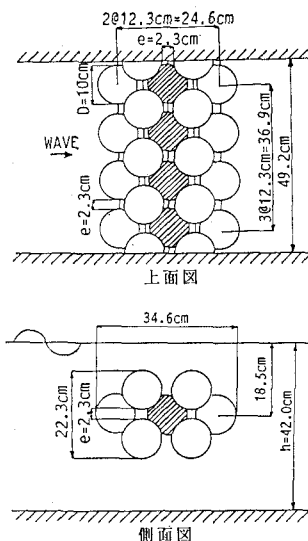
1. ま え が き

従来、ブロック堤による波変形の解析法としては、構成部材と流体とを平均化して、均質な透水層で近似する Sollitt・Cross (1972) の方法が著名である。この解析法は、部材形状やその配置などの情報を直接的に必要としない反面、近似した透水層の流体力学的な特性を表すため、構成部材の慣性係数や抵抗係数などの流体力係数の推定が必要になる。しかし、これら流体力係数の推定法は、従来十分に明らかにされていない(近藤・竹田, 1983)。この原因としては、ブロック堤のように、部材が密に組み合わせられたときの作用波力の特性が十分に知られていないことが挙げられる。

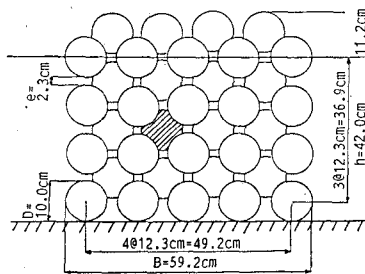
ここでは、ブロック堤体内での部材波力の干渉効果を究明するため、球を直線的に配置した球体列を基本にして、これを1基および複数基配列したときの作用波力の特性についてまず検討する。この際、波浪ポテンシャル理論に基づく解析法により、波力の干渉効果を水理実験結果と算定結果の比較から考察する。そして、このような検討に引き続き、球で構成されるブロック堤に対しても水理模型実験を行い、堤体内の球に作用する波力の特性を、上記の配列球の結果との相互比較により明らかにする。また、従来より指摘されてきている、堤体の水面付近に位置する部材と波面との衝突現象によるエネルギー逸散(中村ら, 1986; 中村・小野, 1988)の実態についても、実験的に検討する。

2. 実験装置および実験方法

模型堤体の構成部材には、従来より比較的良好に利用されている球を用いた。球には、軽量で波力測定が容易になる中実の発泡スチロール製のものを採用した。この際、球の直径 D は、20t 程度のブロックの 1/25 模型を想定して 10 cm とした。模型堤体は、この球を波峰方向に直径 10 mm のネジ棒で水平に4個連結した球列、および3個の球と2個の半球を水平に連結した球列の2



図—1 7列球の構造(球の総個数28個)



図—2 ブロック堤の模型(空隙率 $e=50\%$ 、球の総個数144個)

種類を基本単位として、これらを 図—1, 2 に代表例を示すように各種に組み合わせたものである。そして、これら列単位での球の外縁間隔および、以下に述べる各種の配列での上下および前後の球の外縁間隔は、2.3 cm に固定した。このような間隔にしたのは、ブロック堤に組み上げたとき、空隙率が現地のものと同様 50% になるようにするためである。また、水槽内には、ほぼ全長にわたり隔壁板を設け、一方の水路幅が上記した基本単位の球列と等しい長さとなるようにした。実験に用い

* 正会員 工博 愛媛大学助教授 土木海洋工学科

** 学生会員 愛媛大学大学院 工学研究科

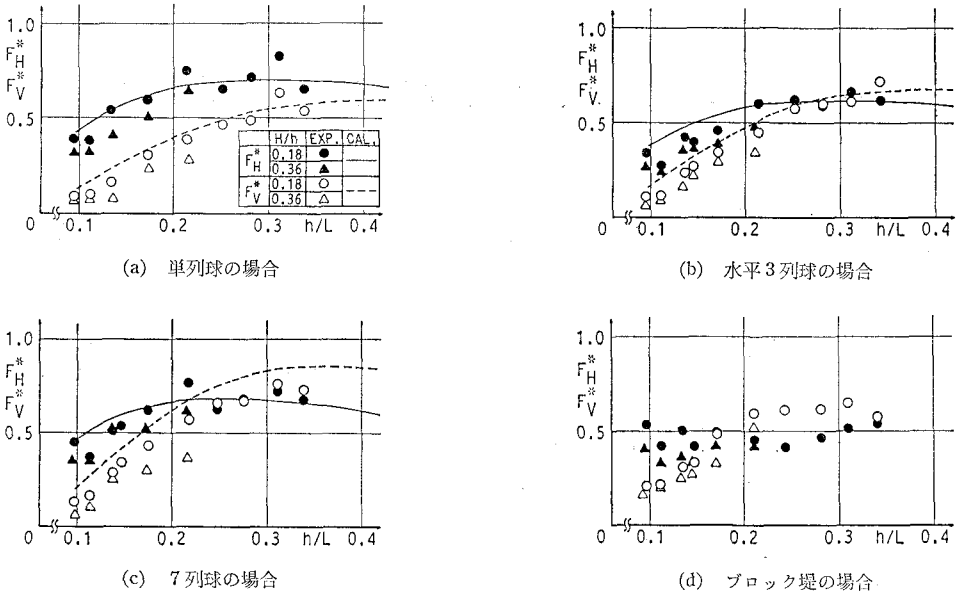


図-3 置部材波力の大きさ

た球の配置は、①単列球；波峰線と平行に球を水平1列に配置したもの、②水平3列球；単列球の前後に同様の球列を2組平行に配置したもの、③7列球；図-1に示すように3列球の上下に、3個の球と2個の半球から成る球列を4組千鳥に付加したもの、④ブロック堤；図-2に示すように7列球を多数組み合わせでブロック堤をモデル化したもの、⑤上部不透透ブロック堤；図-2の模型ブロック堤の水面付近に位置する球列を3段取り除き、代わりに不透透な矩形堤（吃水 5.5cm）で置換したものの5種類である。なお、単列球および3列球の水深方向における設置位置は、図-1に示す7列球の中央水平3列のそれと同じにしてある。

実験では、上記した①～⑤の模型堤体について、特定の水平1列の球4個分に作用する水平および鉛直波力を片持ち梁形式の波力計を用いて同時測定した。波力測定の対象にした球列は、7列球とブロック堤の場合、それぞれ図-1、2中に斜線で示す位置のものである。また、3列球の場合、その中央列について測定した。一方、波の変形が顕著なブロック堤の場合、モリソン式による波力の分離解析が可能となるように、波力測定の対象にしている球列の真上および真横の最狭部中央で、それぞれ水平および鉛直流速についても測定した。この際、流速計には、岩田・小山（1983）により紹介されている針流速計（針の直径 0.5mm）を用いた。模型堤体に作用せしめた入射波は、周期 T が 0.9～2.3sec の10種類、波高 H が 7.5、15cm の2種類（砕波する場合を除く）である。この際、設置水深 h は 42cm と一定にした。

3. 解析法の概略

ここで用いた解析法は、中村・野村（1990）による3次元物体の規則配列を想定したグリーン関数法に基づくものである。この解析法は、任意形状の対称物体が対象にできることや、グリーン関数に無限配列の影響が考慮されているため、配列ピッチ長の1/2の範囲内にある物体のみを取り扱って、規則配列された物体まわりの波浪ポテンシャル問題の解析が行えるなどの利点を有する。本研究では、この解析法を用いて、2.で述べた単列球、水平3列球、7列球について作用波力の算定を行った。

4. 構成部材に作用する波力の特性

(1) 部材波力の大きさ

図-3 (a)～(d) は、それぞれ 2. で述べた①～④の模型堤体の中の着目した特定の水平1列球に作用する極大水平、鉛直波力の測定結果を示す。図中では、球列の中の1個に作用する波力に換算すると共に次式で定義される無次元水平、鉛直波力 F_H^* 、 F_V^* で表示してある。

$$(F_H^*, F_V^*) = (F_H, F_V) / (\rho g R^2 H / 2) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 F_H 、 F_V ：それぞれ1個当りの球に作用する極大水平、鉛直波力、 ρ ：流体密度、 g ：重力加速度、 R ：球の半径である。

そして、図-3の各図では、横軸に周期に関する無次元量の浅水比 h/L (L ：波長) がとっており、波高の大小による差異についても検討できるように H/h をパラメータに示してある。また、図中には、3. で述べた理

論解析法による算定結果についても併せ示してある。

a) 水平波力 各図の F_H^* に着目すると (黒塗印および実線), その絶対値は, ブロック堤の場合を除き, 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. そして F_H^* は, 配列数が7列まででは, 水平3列球の場合が最小で, 7列球では単列球とほぼ同程度の大きさであることもわかる. これは, 7列球の場合, 上下にある球列の干渉効果により, 水平波力が増大することによる. また, 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を含め, 両者はほぼ一致していることがわかる.

一方, (d) 図のブロック堤の場合に着目すると, F_H^* はほぼ0.5程度と一定であり, 上記の7列球までの結果に比較すると全体的に小さくなっている. しかし, 長周期の条件下では, 単列球や7列球の結果とほぼ同程度が多少上回る傾向が見られ, ブロック堤の内部では, 水平方向の流体運動が, 長周期の条件で増幅されているものと推測される.

b) 鉛直波力 各図の F_V^* に着目すると (白抜印および点線), 無次元鉛直波力は, 水平波力に比較してより顕著に長周期の条件で減少することや, その絶対値は, 配列数が増えると増加し, 7列球とブロック堤の場合で最大であることなどが認められる. 7列球までの実験結果と算定結果の比較を行うと, 定性的に両者は一致しているが, 配列数を増すと算定波力が実測波力を上回る傾向が認められる. また, 各配列球での水平波力と鉛直波力の大きさを比較すると, 配列数が増すほど, 鉛直波力は水平波力より卓越する傾向が強くなることなどもわかる. これは, 配列数が増すと, 特に短周期の条件下で反射波などの出現により堤体内での鉛直流体運動が増幅されることによるものと考えられる.

(2) 抗力と慣性力の大きさ

ここでは, 図-3 に示した各配列球に作用する水平, 鉛直波力の各々を, モリソン式を適用して抗力 F_D および慣性力 F_I に分離解析した. この際, 必要となる波力と流体速度, 加速度との時間位相関係は, 7列球までの堤体については, 隔壁板で分離したもう一方の水路で,

しかも堤体の真横で測定した水面変動の時間波形を基に, 微小振幅波理論から推定した. また, 反射波の影響が顕著なブロック堤の場合, 波力測定の対象にした球列の近傍で測定した針流速計による流速時間波形を基に推定した.

このような結果の代表例を水平波力の場合について示すが, 図-4 (a)~(c) で, それぞれ単列球, 7列球, ブロック堤の結果に相当する. 図中では, 図-3 に示した極大水平波力 F_H に占める抗力 F_{DH} および慣性力 F_{IH} の割合の h/L による変化を表す. これらの図より, 水平波力では, ほぼ慣性力が卓越することや, 抗力の占める割合は, 長周期の条件になるほど, また配列数が多くなるほど増加することなどが認められる.

一方, 図-5 (a), (b) は, 鉛直波力に占める抗力 F_{DV} および慣性力 F_{IV} の割合を, それぞれ7列球とブロック堤の場合について示す. これらの図より, 7列球の鉛直波力では, 水平波力と同様にほぼ慣性力が卓越するものの, ブロック堤の鉛直波力では, h/L の広い範囲にわたり抗力が慣性力と同程度の大きさになることなども認められる. この原因としては, ブロック堤のように多数の部材で構成される場合, 図-6 に示すように, 反射波の存在により堤体内で鉛直流体運動が増幅され, 部材まわりに渦流れが発生しやすくなることが挙げられる. なお, 図-6 は, ブロック堤体内での実測水平および鉛直流速 (u_B, v_B) を, 同鉛直位置での微小振幅進行波による算定水平および鉛直流速 (u, v) でそれぞれ無次元化して示すものである. そしてこの図より, ブロック堤体内では, 上記したように長周期の条件下で, 水平流体運動が増幅されることもわかる.

このように球で構成されるブロック堤では, 部材波力において, ほぼ慣性力が卓越するものの, 波のエネルギー逸散と密接な関係を有する抗力も有意な大きさで含まれ, ブロック堤による波変形を考える際に両流体力の効果が重要になるものと言える.

(3) 流体力係数

図-7, 8 は, 算定波力と実測波力との対応がほぼ確認された, 7列球までの球列に対する算定水平および鉛直波力に基づき求めた等価慣性係数 $\hat{C}_{MH}$, $\hat{C}_{MV}$ をそれ

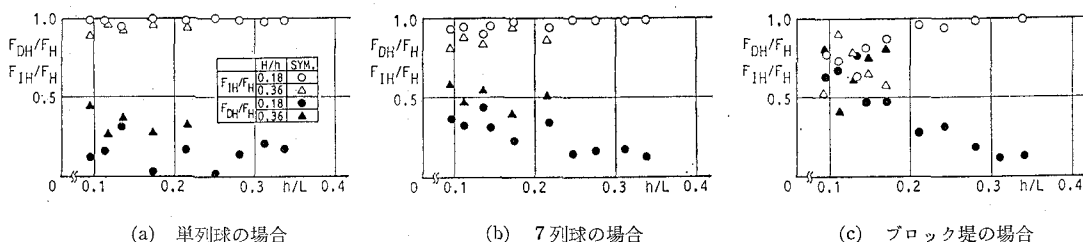
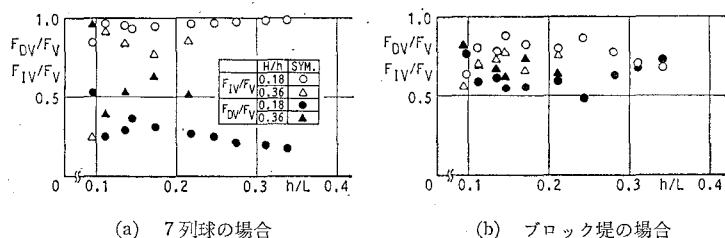


図-4 水平波力に占める抗力, 慣性力の大きさ



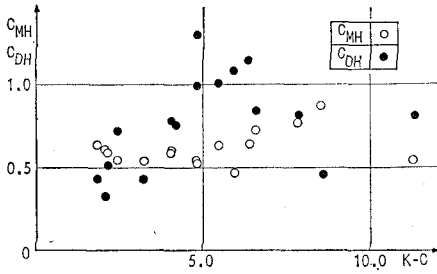


図-9 ブロック堤の抗力, 慣性係数

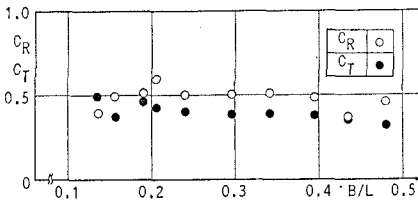


図-10 ブロック堤の透過, 反射率 ($H/h=0.18$)

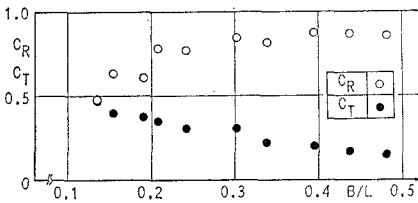


図-11 上部不透過堤の透過, 反射率 ($H/h=0.18$)

($=1-C_T^2-C_R^2$)を示す。この図より、ブロック堤の場合、 E_L はほぼ5割程度以上で、長周期の条件で多少小さくなることが認められる。そして、ブロック堤と上部不透過堤を比較すると、 $B/L > 0.2$ で大きな相違が見られ、上部不透過堤の場合、エネルギー逸散が格段に少なくなることが分かる。これは、上記したように、上部不透過堤の場合、水面付近での部材と波面との衝突現象が生じないことによるものと考えられる。一方、 $B/L < 0.2$ の長周期の条件の場合、両堤体形式の間で E_L に顕著な差異は見られず、これは、長周期の条件になると、鉛直方向の流体運動が減少し、水平方向のそれが卓越することから、水面付近の部材と波面との衝突現象も有意なものでなくなることによるものと推定される。そして、このような条件で現れるエネルギー逸散は、主にブ

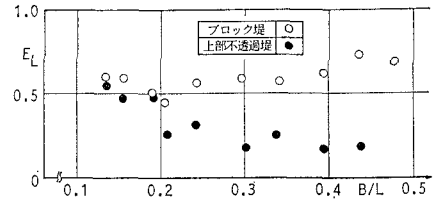


図-12 エネルギー逸散率 ($H/h=0.18$)

ロック堤内部での水平抗力によるものと考えられる。

6. 結 語

1) 球体列の組合せ数が増すと、水平、鉛直波力に占める抗力の割合は増加し、数多くの球体列で構成されるブロック堤の場合、抗力が慣性力を上回るときもある。しかし、慣性力は、全般的に抗力より卓越し、無視できない流体力である。

2) 水平1列球を1~7基程度組み合わせたときの水平、鉛直波力は、慣性力が卓越することから、ほぼポテンシャル理論により推定できる。

3) 水平1列球を複数基組み合わせた場合ならびにブロック堤のように多数基組み合わせた場合の等価慣性係数は、ほぼ1~2程度の範囲にある。

4) ブロック堤のエネルギー逸散は、長周期の条件を除くと、主に水面付近に位置する部材と波面との衝突現象により生じ、このエネルギー逸散は、特に反射波に影響する。

参 考 文 献

- 近藤俊郎・竹田英章 (1983): 消波構造物, 森北出版, pp. 88-94.
- 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.
- 岩田好一朗・小山裕文 (1983): 浅海域における水平粒子速度の簡便な算定式, 土木学会第38回年講概要集 (II), pp. 303-304.
- 中村孝幸・野村周吾 (1990): 規則配列された3次元物体まわりの波浪境界値問題の解析法, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 524-528.
- Sollitt, C. K. and Cross, R. H. (1972): Wave transmission through permeable breakwaters, Proc. of 13th ICCE, ASCE, pp. 1827-1846.