

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

中 村 孝 幸*・小 野 塚 孝**

1. 序 論

従来、異形ブロック堤まわりの波変形の解析は、構成部材の小さな捨石堤などと同様に堤体を均質な透水層にモデル化して堤内における摩擦抵抗力の効果を重視する理論^{1),2)}に基づき行われてきている。しかしながら、異形ブロック堤の寸法は、大波浪に抵抗できるようにするため近年ますます大型化しつつあり、このような多孔質中における流れの理論が波動場中におけるブロック堤体内の流れの表現にそのまま適用できるかどうかについては大きな疑問と言えよう。また大型の部材で構成される異形ブロック堤の場合、従来無視されがちであった波変形に及ぼす堤体内固体部の流体力学的な慣性効果についても再検討すべき余地があるものと考えられる。事実、中村³⁾は水平円柱を構成部材とする直立ブロック堤を用いて部材に作用する慣性力が抗力に比較して卓越した大きさを示すことや波変形に対しても部材の流体力学的な慣性効果が重要となることなどを報告している。また、ブロック堤による波のエネルギー逸散機構の一つとして、水面付近に位置する部材と波面との衝突現象によるものの重要性についても指摘している。

本研究は、現地で用いられているような3次元的な異形ブロックを構成部材とする直立堤を対象にして、まず最初に従来あまり知られていない個々のブロックに作用する波力の特性について明らかにする。この際、反射・透過率などの堤体まわりの波変形についても従来のSollittら¹⁾の解析法による算定結果と比較の上で検討する。これに引き続き、ブロック堤による波のエネルギー逸散機構の特性を上記の部材波力の特性を踏まえて検討すると共に従来ほとんど知られていない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の実態についても明らかにする。

2. 実験装置および実験方法

2.1 模型堤体；実験に使用した異形ブロックは、日本テトラポッド(株)で製作されている20tテトラポッド

の1/25模型である。そして模型堤体としては、後述する整積堤と乱積堤の2種類を採用した。

a) 整積堤体；この堤体は部材波力の測定を容易にすることを目的として採用した。その概略図は図-1(a)、(b)に示すようにテトラポッドを各段2層積で規則的に配列したもので全体的にはこれを鉛直方向に6段積みにした。また両側壁には、これらの面に対する部材の配置が鏡像対称となるように外径4.8cmの塩ビパイプを付着した。なお、この堤体の空隙率 ε は、実際場のものに比較すると大きくほぼ62%である。

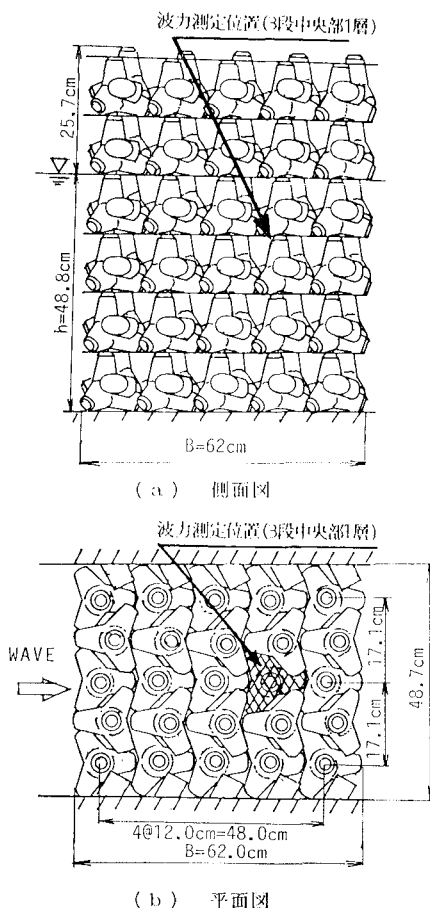


図-1 整積堤の模型

* 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 工学部海洋工学科

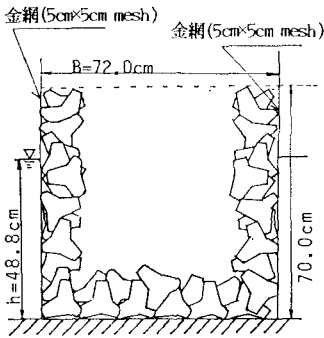


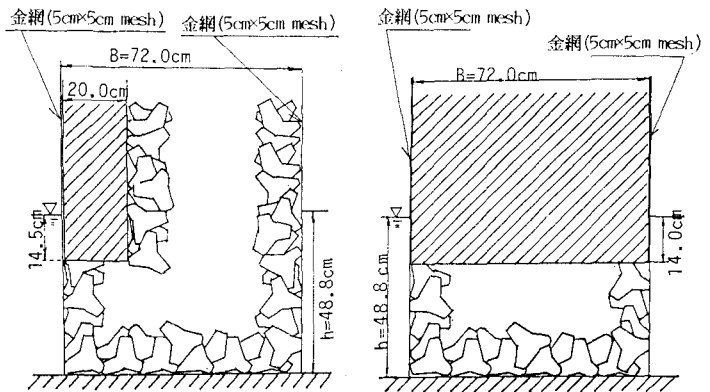
図-2 乱積堤の模型

b) 乱積堤体；上述の整積堤体は実際場のものに比較して空隙率が大きなことから現場の値 $\varepsilon=50\%$ を再現することを

目的として採用した。これは、図-2 に概略図を示すように異形ブロックを乱積みしたもので、堤体の全体的な安定性を維持するために堤体の前後面を金網により補強してある。

2.2 衝突現象を考慮した模型堤体；前述した水面付近に位置する部材と波面との衝突によるエネルギー逸散の実態を把握する目的から、水面付近の部材の一部および全部を不透過な矩形堤で置き換えた上部不透過型の堤体である。これらの模型堤体の概略図を乱積堤の場合について示すものが図-3 (a), (b) である。

2.3 波力計；構成部材の波力の測定には、図-4 に示すような鋼製角柱の水平、鉛直両面にモーメントの引算回路を構成するように各々4枚の歪ゲージを貼り付けたものを用いた。そしてこの歪棒の両端を相隣る二つのテトラポッドに埋め込んで連結し、一方を剛に固定して他方を片持梁形式に支持した。実験ではこの波力計を図-1 (b) 中の斜線を施したテトラポッド（3段目第1層に位置）に作用する水平、鉛直波力が同時に測定出来るように設定した。また本研究では、単体配置したテトラポッドに作用する波力についても測定した。この際、テトラポッドの鉛直位置や波向に対する方向等は、上記の群体中の場合と同様にしている。そしてこの場合、一辺2cmの鋼製角柱に上記の波力計の一方の端部のテトラポッドをはずして剛結したものである。なお、上記の



(a) 上部前面部不透過堤

(b) 上部全面不透過堤

図-3 上部不透過堤の模型

波力測定において歪棒に作用する波力は、テトラポッドのそれに比較して十分小さなものと仮定して無視している。

2.4 流速計；流速計は岩田⁴⁾により紹介されている片持梁形式の針流速計を用い、上述した波力測定用の部材の真横で、かつそれに隣接する部材との中間に針が鉛直下方を向くように設置して水平流速のみを測定した。なお、用いた針の直径は0.7mmである。

2.5 実験方法；実験には、幅1m、高さ1.25m、長さ28mの二次元造波水槽を用いた。水槽内には、この幅を二等分するように隔壁板を設置し、その一方の水路に堤体を設置した。そして上述の整積堤体に対し水平・鉛直波力および水平流速の測定を、またすべての模型堤体に対して反射波および透過波の測定を行った。なお、作用せしめた波条件は、波力測定には、入射波高 $H=7.5\text{ cm}$, 15.5 cm の2種類、周期 T は0.9~2.3秒の範囲の4種類、また反射波高、透過波高の測定には、同様に $H=7.5\text{ cm}$, 15.5 cm の2種類、周期 T は同範囲において6種類である。なお静水深はほぼ $h=49\text{ cm}$ と一定にした。

3. 部材波力の特性

3.1 作用波力の時間波形；図-5 (a)~(c) は堤体内のテトラポッドに作用する水平、鉛直波力 (F_H , F_V), およびその真横における水平流速 U の時間波形を示すものである。ここで (a)~(c) は入射波の周期が短くなる場合の変化を表す。 F_H と U との位相関係に着目してみると、 F_H のピークは、各図共に水平流速 U がほぼ0に近く水平方向への流体加速度が極値を示す位相で現れていることが認められる。また長周期波側の条件の図 (a) の場合、 U のピーク時に F_H は比較的大きな値をもつものに対して、図 (b), (c) では F_H は、ほぼ0となっていることなどがわかる。そしてこのような

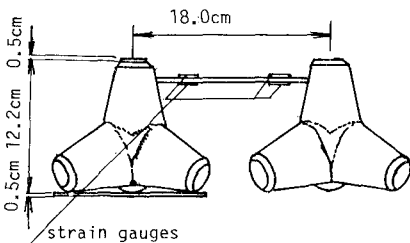


図-4 波力計

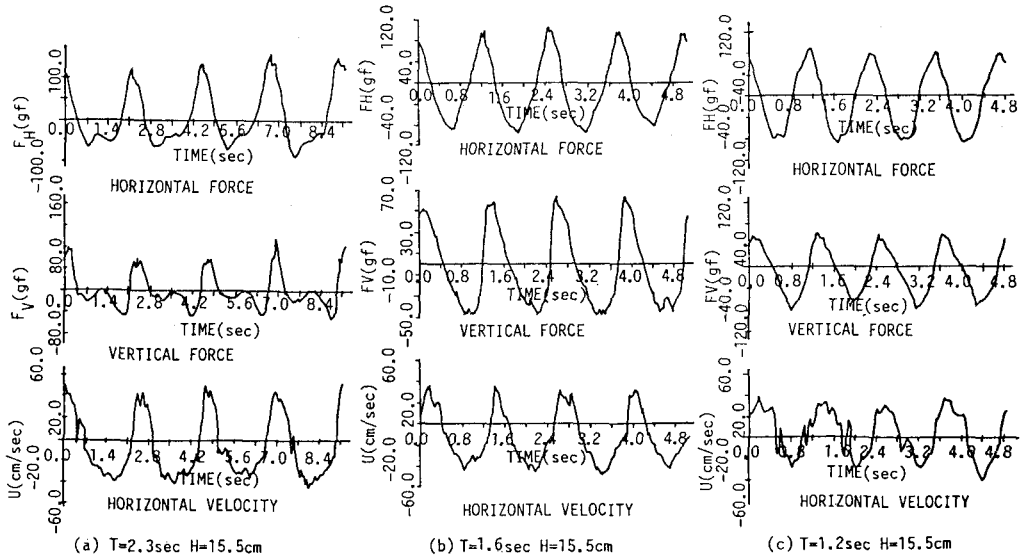


図-5 構成部材に作用する波力の時間波形(整積堤)

位相関係は、モリソン波力式を適用するなら、図(b)、(c)が慣性力が卓越する場合に、図(a)が抗力と慣性力とが混在する場合に各々現れるものと考えられる。一方、 F_V に着目すると円柱波力の揚力⁵⁾に類似して基本周波数の波力成分に倍周波数のそれが加ったような波形となっている。しかし図(b)、(c)では基本周波数の波力成分が卓越し、そのピークは F_H とほぼ 90° の位相差を持って現れている。そしてこの図(b)、(c)の場合、 F_V は F_H と同様に鉛直方向への流体加速度による慣性力が卓越した波形になっているものと推定される。

3.2 単体配置された部材に作用する波力との比較; 図-6は堤体内の部材に作用する水平波力 F_H と単体配置したテトラポッドに作用する水平波力 F_{HS} との比の B/L (B : 堤体幅, L : 波長)による変動を表わす。この図より F_H/F_{HS} はほぼ1以下で B/L が大きくなる短周期波側の条件になるほど減少することなどがわかる。そしてこのように減少する理由としては、短周期波になるほど透過波が減少することが挙げられる。

3.3 抗力と慣性力の大きさ; ここでは実測した水平流速、並びにモリソン波力式を適用してフーリエ平均法⁶⁾によりテトラポッドに作用する水平波力を抗力 F_D と慣性力 F_I に分離・解析してみた。また単体配置したテトラポッドについても同様の分離・解析を行った(F_{DS} , F_{IS})。図-7は、このように分離・解析した F_D と F_I および F_{DS} と F_{IS} との比の B/L による変動を入射波高をパラメータにとり示すものである。この図より、バラツキはあるもののテトラポッドに作用する波力は、単体配置時および群体配置時共にほぼ慣性力が抗力

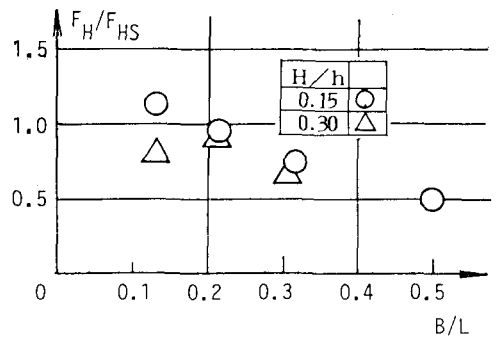


図-6 堤体内の部材波力と単体のそれとの比

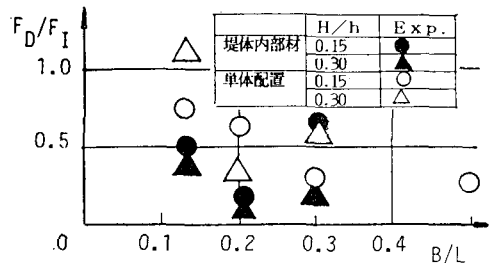
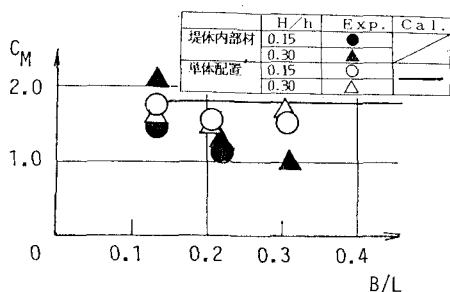


図-7 部材波力における抗力と慣性力の比

に比較して卓越しており、この卓越度は短周期波の場合ほど顕著になっている。そしてこのような事実は、従来のブロック堤による波変形の解析^{1),2)}で想定されているような堤体内固体部に作用する慣性力が摩擦抵抗抗力を含む抗力に比較して無視できるものとする仮定が必ずしも妥当でないことを示すものと言えよう。次に図-8は、卓越した大きさを示す慣性力を対象に、慣性係数 C_M を求めてみた。堤体内のテトラポッドの C_M は、1~2の

図-8 構成部材の慣性係数 C_M

範囲にあり、 B/L の小さな長周期波側で多少大きくなっている。そして単体配置した場合の C_M に比較するとその絶対値は小さくなっており堤体内では周囲にある部材の干渉効果により C_M が減少するものと考えられる。なお、上述の堤体内の C_M は、あくまでも隣接する部材との間の中央点における流体加速度を用いて定義した量であることを付記しておく。また同図中には、波浪ポテンシャル理論に基づき求めた単体配置のテトラポッドの等価慣性係数の結果についても併せ示した。なお、波浪ポテンシャル理論の解析法としては、3次元波動場の Green 関数を核関数とする置き出し分布法⁷⁾を用いた。そしてこの等価慣性係数は実測した単体配置の C_M より多少大きくなる傾向が認められるもののほぼ対応した結果となっており、上記の解析法を用いて慣性係数がほぼ推定できるものといえよう。

3.4 鉛直波力と水平波力の大きさ；図-8 は上述した F_V と F_H との比の B/L による変動を示す。図中には、単体配置とした場合についての実験結果および上記の波浪ポテンシャル理論による算定結果についても併せ示した。この図より堤体内および単体配置とした場合の両者について鉛直波力は B/L の大きくなる短周期波側で増大し、水平波力と同程度になることがわかる。そして、堤体内では、単体配置とした場合に比較して、反射波が大きくなる B/L の大きな短周期波側で上述の比が大きくなっていることも認められる。また単体配置とした場合、波浪ポテンシャル理論による波力比の算定結

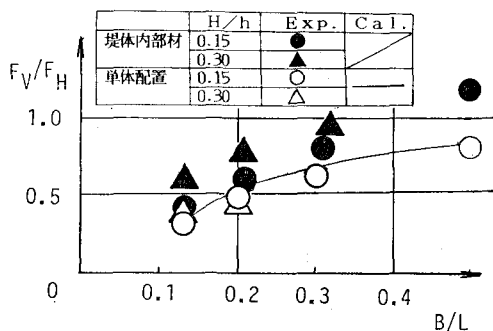


図-9 構成部材の鉛直波力と水平波力の比

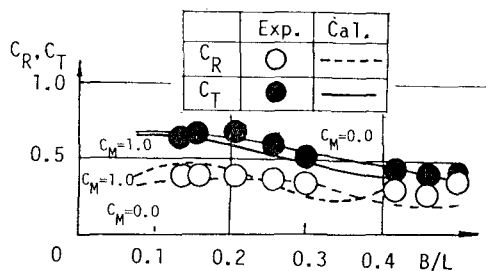
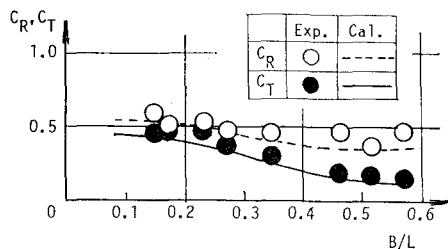
果は、実測結果とほぼ一致しておりテトラポッドのような複雑な形状物体の波力算定にも波浪ポテンシャル理論が適用できるものと言えよう。

4. ブロック堤まわりの波変形

図-10, 11 は、それぞれ整積堤および乱積堤の反射率 C_R 、透過率 C_T の B/L による変動を示す。これらの図中には、堤体内の摩擦抵抗力の結果を重視する Sollitt ら¹⁾の解析法による算定結果も併せて示した。なお算定の際、抵抗力 $\vec{F}_f$ の表現には Madsen²⁾と同様に式(1)が適用できるものとした。

$$\vec{F}_f = \alpha \varepsilon \vec{q} + \beta \varepsilon^2 \vec{q} |\vec{q}| \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $\vec{q}$ は堤体内実質流速のベクトル、 α 、 β は抵抗係数である。そして α 、 β には、近藤⁸⁾により示されているテトラポッドについての無次元抵抗係数 α_0 、 β_0 を適用して求められる値を採用した。また堤体内の部材に作用する慣性力は、従来の解析^{1), 2)}と同様に $C_M=0$ として無視した場合および $C_M=1.0$ とした場合（整積堤のみ）の両者を採用した。これらの図より、実測された C_T は B/L が減少して長周期波の条件になるほど増大するのに対して C_R は周期によらずほぼ一定値を示すことなどがわかる。次に実験結果と算定結果との比較を行ってみると $C_M=0$ とした場合の C_T 、 C_R の算定結果は整積堤および乱積堤の両者共に実験値とほぼ一致している。また整積堤の場合、 $C_M=1.0$ とした算定結果は、 $C_M=0$ とした結果に比較すると C_T は減少し、 C_R は B/L の変化により振動する傾向が認められる。そしてこのように $C_M=0$ として堤体内の構成部材に作用する波力の実態を無視した算定結果が実験結果とほぼ

図-10 整積堤の透過率 C_T および反射率 C_R ($H/h=0.15$)図-11 乱積堤の透過率 C_T および反射率 C_R ($H/h=0.15$)

一致することは大きな矛盾と言えよう。しかしながらこのような解析法による波変形の算定結果は用いる流体力係数の値に大きく依存するもので、作用する波力の実態をも正確に表わすような合理的な係数の選定が必要と考えられる。

5. 衝突現象によるエネルギー逸散

図-3 (a), (b) に示す上部不透過堤の C_R , C_T を図-12, 13 に示す。これらの図と図-11 との比較から、水面付近に位置する部材と波面との衝突現象を防ぐことにより特に C_R が増大することや、この傾向は B/L の大きな短周期波側の領域で顕著になることなどがわかる。また図-12 と図-13 との比較から、置換する上部不透過堤の長さが長いほど C_R は増加するものの両者の間に顕著な差異は認め難く、上述の衝突現象は主に堤体の前面部で生じていることが理解できよう。なお、4. で用いた従来の解析法に基づき上部不透過堤のブロック堤とすることにより反射波のみが大きく増大する理由を説明することは困難であり、上記の算定に用いた抵抗係数の中には摩擦抵抗力の効果のみならずこのような衝突現象による効果も含められているものと考えられる。次に図-14 は、異形ブロック堤および上部不透過堤

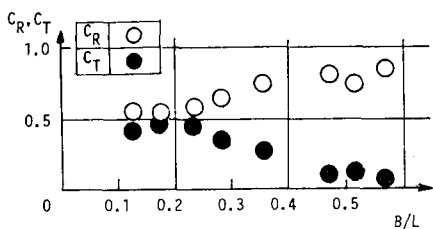


図-12 上部前面部不透過堤の C_T , C_R (乱積堤, $H/h=0.15$)

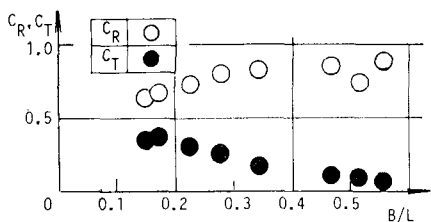


図-13 上部全面不透過堤の C_T , C_R (乱積堤, $H/h=0.15$)

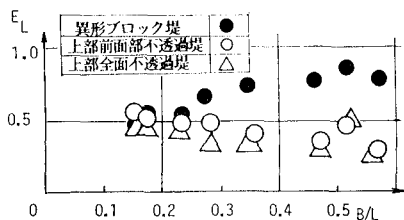


図-14 各堤体のエネルギー逸散率 E_L (乱積堤, $H/h=0.15$)

よる波のエネルギー逸散率 E_L を乱積堤の場合について示す。この図より、両堤体形式の E_L の差異は、長周期波側ではあまりないものの短周期波側で非常に大きくなっていることがわかる。そしてこのような E_L の差異が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と解釈でき、長周期波の場合を除きブロック堤まわりの反射波の減勢に大きく寄与していることが理解できよう。また上部前面部不透過堤と上部全面不透過堤の E_L の差異は、衝突現象が主に堤体前面部で生じることから小さなものとなっている。なお、長周期波側において衝突現象による E_L が低下するのは水面の上昇速度が小さくなることによるものと考えられる。

6. 結 語

- i) 異形ブロック堤の個々のブロックに作用する波力は、一般の波条件下においては慣性力が卓越する。そしてテトラポッドの慣性係数は、1～2程度の範囲にある。
- ii) 異形ブロック堤では水面付近に位置する部材と波面との衝突現象により堤体よりの反射波が大きく減勢される。
- iii) 上記の衝突現象によるエネルギー逸散は水面上昇速度が大きくなる波条件下で卓越して生じる。そしてその逸散率が総逸散率に占める割合は60%以上にもなる。

最後に本研究で使用した異形ブロック(テトラポッド)は、日本テトラポッド㈱の御好意により借用賜ったものであり、ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Sollitt, C. K. and Cross, R. H.: Wave transmission through permeable breakwater, Proc. of 13th ICCE, ASCE, pp. 1827~1846, 1972.
- 2) Madsen, O. S.: Wave transmission through porous structures, Proc. of ASCE, Vol. 100, No. WW3, pp. 169~188, 1974.
- 3) 中村孝幸・奥 吉雄・本多典久: 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, 1986.
- 4) 岩田好一郎・小山裕文: 浅海域における水平水粒子速度の簡便な算定式, 土木学会第38回年次学術講演会概要集(II), pp. 303~304, 1983.
- 5) Sawaragi, T., Nakamura, T. and H. Kita: Characteristics of lift forces on a circular cylinder in waves, Coastal Eng. in Japan, Vol. 19, pp. 59~71, 1976.
- 6) Keulegan, G. H. and Carpenter, L. H.: Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid, Journal of Res. of the National Bureau of Standards, Vol. 60, No. 5, pp. 423~440, 1958.
- 7) 中村孝幸・小野正順: 面対称性を有する3次元物体まわりの波浪ポテンシャル問題の解析法, 愛媛大学工学部紀要, 11巻, 3号, pp. 381~394, 1988.
- 8) 近藤一郎・竹田英章: 消波構造物, 森北出版, pp. 88~89, 1983.