

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

中村 孝幸*・奥 吉雄**・本多典久***

1. ま え が き

従来ブロック堤の消波効果に関する予測は、構成部材の小さな捨石堤などと同様に堤体内の固体部に作用する摩擦抵抗力の効果を重視した解析に基づき行われてきている。そして Sollitt ら¹⁾や Madsen²⁾ による従来の解析法では、ブロック堤をその固体部と空隙の流体部とで平均化して均質な透水層にモデル化するため堤体固体部の摩擦抵抗係数や慣性係数が事前に必要とされる。しかしながら、これら係数の水理学的な特性は、現在に到るまで十分に明らかにされておらず、特に慣性係数については全く未知であることから堤体の固体部に作用する慣性力の効果を見逃して波浪変形の解析が行われているのが一般である。

本研究は、ブロック堤の構成部材が大型化しつつある現状を踏まえ、波浪変形に及ぼす堤体固体部の流体力学的な慣性効果を重視する波浪ポテンシャル問題の解析法のブロック堤への適用性についてまず明らかにする。この際、従来において不確定なままとなっている慣性係数の実態についても示す。そしてブロック堤において重要となる波のエネルギー逸散の機構についても構成部材に作用する波力並びに堤体まわりの流体場に注目して究明しようとするものである。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

(1) 模型堤体：模型ブロック堤の断面の一例を図-1に示す。構成部材には、直径 $D=7.5$ cm、長さ $l=48$ cm の塩ビパイプを用い、これを図中に見られるように千鳥配置に規則的に配列した。図-1は空隙率 ε が 0.46 のもので本研究ではこれに加えて ε の異なる計 3 種類の堤体を用いた。表-1にこれら模型堤体の ε 、幅 B 、隣接円柱の中心間距離 l_0 、構成部材の総本数 N をまとめて示す。また図-2の模型堤体は、図-1のそれに比較して、水面付近にある部材と波面との衝突現象が生じないように水面付近より上側にある部材を取り除き不透透な

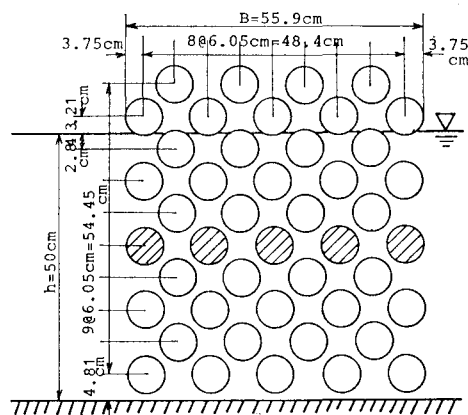


図-1 直立ブロック堤の模型の断面 ($\varepsilon=0.46$)

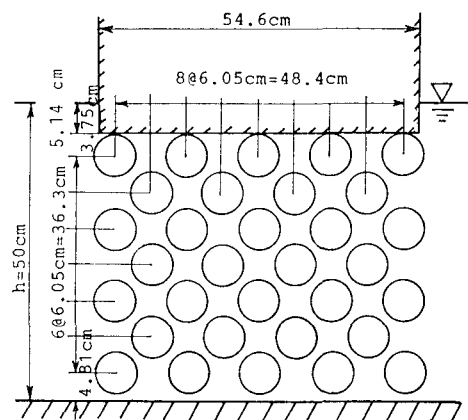


図-2 上部不透透ブロック堤の模型の断面

表-1 模型ブロック堤の諸元

ε	B (cm)	l_0 (cm)	N
0.36	52.3	7.9	50
0.46	55.9	8.6	45
0.68	55.2	11.2	28

矩形堤で置換したものである。

(2) 波力計：構造的には円柱を支持する正角柱の歪棒を片持梁形式で支持したもので、固定端付近の歪棒の

* 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部海洋工学科

** 正会員 工修 東亜エンジニアリング(株) 技術部

*** 日本海工(株)

4面にモーメント法によりパイプに作用する水平力、鉛直力が測定できるように歪ゲージがはりつけてある。本研究ではこの円柱波力計を計4台用いた。なお、波力計は、水槽をほぼ2分するように設けた隔壁板に固定した。

2.2 実験方法

実験には、幅1m、高さ1.25m、長さ28mの2次元水槽を用い、この幅をほぼ2分するように隔壁板を設けて一方の水路にのみ上記の模型堤体を設置した。そして他の水路で入射波を測定した。透過率 C_T は、堤体の透過側で測定した透過波高を入射波高で除して求めた。また反射率 C_R は、堤体の反射側に設置した2台の波高計により合成波を測定し、これらを調和解析した後に入射波の高さで除して求めた。一方、円柱部材に作用する波力は、各空隙率の堤体についてほぼ水深を2分する鉛直位置にある水平一列分の全ての部材について水平、鉛直波力の両者を測定した。なお静水深 h は、50cmと一定にしている。実験に用いた波条件は、周期 T が0.9~2.3secの間の8種類、入射波高 H が7.5cmと15cm(破波する場合を除く)の2種類である。

3. 解析法

波浪ポテンシャル問題の解析法として既に著者らの中の一人が明らかにしている2次元波動場のグリーン関数を核関数とするわき出し分布法⁴⁾を用いた。そしてこの解析法に基づき、 C_T 、 C_R 並びに模型堤体内部の流速場並びに部材波力の算定を行った。実際計算に当り必要となる円柱の断面曲線の線素分への分割は、予備的な検討を経て12角形近似が最適と判断され、以下これを採用している。また本研究では、静止水面より上側に位置する部材の変形等に及ぼす影響を、近似的に考慮するため著者らの中の一人が提案している「平板置換モデル」⁵⁾を適用している。

4. 堤体まわりの波変形

図-3(a)~(c)は、表-1に示す3種類の模型堤体の透過率 C_T 、反射率 C_R に関する実験結果と上記の解析法による算定結果との比較を各空隙率ごとに示す。各図において横軸には、堤体幅 B と波長 L との比がとっており、入射波高の大小による区別もできるように H/h をパラメータにして表示してある。これらの図より、 C_T の実験値は ϵ が大きくなるほどまた B/L が小さくなるほど増加することが認められる。一方、 C_R の実験値は、 ϵ が大きくなるほど減少するものの B/L による変動はほとんど見られない。またこれら C_T 、 C_R に及ぼす波高の影響は顕著でないことなどもわかる。次にこれら実験

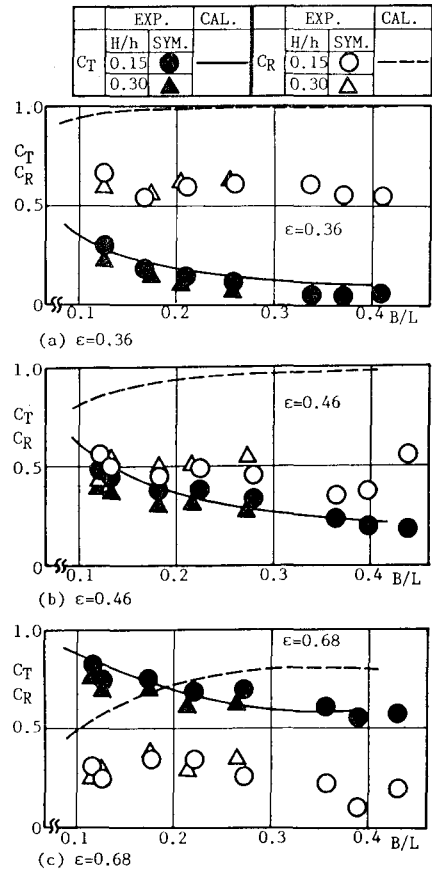


図-3 ブロック堤の C_T 、 C_R に関する比較

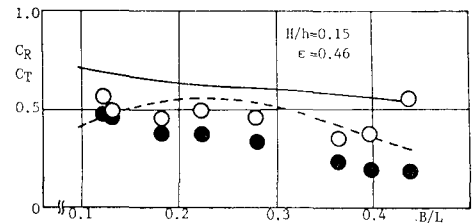


図-4 Sollitt らの解析法¹⁾による C_T 、 C_R の算定結果

結果と算定結果とを比較してみると、 C_T については ϵ や B/L の条件にかかわらず両者はほぼ一致しているものの、 C_R については算定値がいずれの ϵ の場合にも実験値を大きく上回っている。そしてその C_R に関する差異は、上記の解析法では考慮できない波のエネルギー逸散が実在流れでは生じていることによるものと考えられる。一方、図-4は堤体内の抵抗を重視する Sollitt ら¹⁾の解析法による算定結果の一例を示すものである。この際、抵抗力 $\vec{F}_d$ の表現式としては Madsen²⁾ と同様に式(1)が適用できるものとした。

$$\vec{F}_a = \alpha \epsilon \vec{q} + \beta \epsilon |\vec{q}| \vec{q} \dots \dots \dots (1)$$

ここに $\vec{q}$ は堤体内の実質流速ベクトルである。そして α , β は抵抗係数で近藤⁶⁾による円柱立体格子の堤体に対する無次元抵抗係数 $\alpha_0=750$, $\beta_0=0.35$ を採用して求められる $\alpha=0.134$, $\beta=0.268$ が適用できるものとした。また慣性係数 C_M は従来と同様に 0 と仮定した。図—4 より, C_R の算定結果は実測結果とほぼ対応しているものの C_T については算定結果が実測結果よりかなり大きくなっていることがわかる。そしてこの傾向は、他の空隙率の堤体の場合にも確認されており, C_T を予測するに当っては 図—3 に示した算定結果の中に含まれている慣性力の効果を考慮した算定が必要になるものと言えよう。

5. 構成部材に作用する波力

5.1 実測結果と算定結果との比較

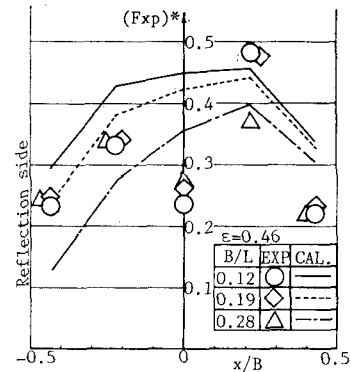
図—5, 6 は, $\epsilon=0.46$ の場合の 図—1 の斜線を施した水平一例の円柱部材に作用する各々水平波力 F_x , 鉛直波力 F_z の空間分布を示す。なお図中で波力は式 (2) で定義される無次元波力で表示してある。

$$F^* = F / (0.5 w H R l) \dots \dots \dots (2)$$

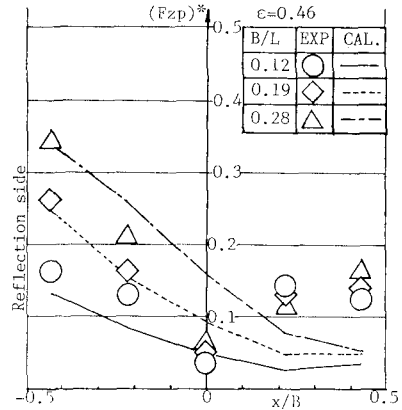
ここに w は流体の比重, R は円柱部材の半径, l は部材の長さである。横軸には, 円柱部材の中心位置の水平座標 x を B で無次元化した量とっており, 周期に関する変動も検討できるように B/L をパラメータにして表示してある。これらの図より, F_x の空間分布は, $x/B=0$ の点を除くと堤体の内側領域で大きくなるような分布になっており, ほぼ算定結果のそれと定性的に一致している。そして F_x の算定値は, B/L が小さく長周期波の条件になるほど増大する傾向が見られる。そして F_x は, 部材の位置によって定量的に十分でない場合もあるが上記の 3. の解析法を用いてほぼ予測され得るものと言えよう。一方 F_z の空間分布は, 反射波水域に接する位置で最大値を示し, 内側に向かうにつれ漸減する分布で算定結果のそれとほぼ一致している。また F_z は, B/L が小さく短周期波の条件になるほど増大することや反射波水域に接する部材では F_x よりも大きくなる場合もあることなどが認められる。そして F_z についてもポテンシャル理論に基づく解析法によりほぼ予測できるものと言えよう。

5.2 構成部材の慣性係数

構成部材の水平波力を対象に実測波力と算定波力との時間位相の関係を検討してみた。この一例を示すのが 図—7 で図中の斜線を施した部材についてのものである。またこの図には, 上記部材の上下の 2 点 A, B (図を間参照) での水平流速 u_p および水平加速度 $\dot{u}_p$ の算定時曲線についても付記してある。なお, 2 点 A, B での u_p

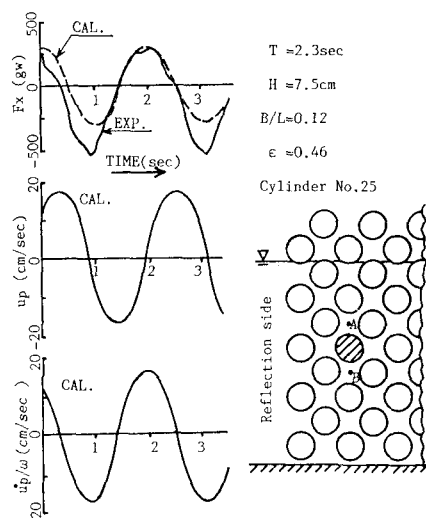


図—5 構成部材に作用する水平波力の空間分布 ($\epsilon=0.46$)



図—6 構成部材に作用する鉛直波力の空間分布 ($\epsilon=0.46$)

の位相差および $\dot{u}_p$ の位相差は無視できるほど小さなものであったことから, 図中にはこれら 2 点で平均化した u_p および $\dot{u}_p$ がプロットしてある。この図より, F_x の実測曲線は, 算定曲線とピークの出現位相が一致するなどほぼ同位関係にあることが認められる。また, F_x のピークは, $\dot{u}_p$ のピークの位相で生じており, F_a の発生が流体加速度に関係する慣性力によるものであることが理解されよう。したがって 図—1 のような多列円柱に対しても, 上述した u_p や $\dot{u}_p$ を用いるならば従来よく知られているモリソン式により F_x が表現できるものと言えよう。次にこのような検討から, u_p および $\dot{u}_p$ の算定結果をモリソン式に適用して実測した F_x を抗力 F_D と慣性力 F_I に分離してみた。図—5 に示した F_x を対象に F_D/F_I の比で表わすのが 図—8 である。この図より, 部材に作用する F_x において F_I が F_D に比較して大きく卓越していることやこの卓越度は B/L や部材の位置によっても多少異なることなどが認められる。そしてこのように F_I が卓越する事実から, 図—4 に示したような慣性力の効果は無視した波変形の解析は, 充分でない

図-7 F_x と堤内の流体速度および加速度との位相関係

ことが理解されよう。また図-9は、分離した F_I より求めた慣性係数 C_M の空間分布の一例を示す。なお図中には算定波力および上述した u_p の算定値を用いて求めた C_M の理論算定結果についても付記した。この図より、 C_M の実測値は、 B/L の大きな短周期波の条件の場合にばらつきが見られるものの空間的に平均するとほぼ2程度の値になっており、理論算定値に近い値となっている。図-10は表-1に示した各空隙率の堤体について求めた C_M の理論算定結果を図-9と同様にして示すもので、 $B/L=0.12$ の条件に限定してある。この図から、 C_M は、空隙率 ϵ が小さくなると増大し、 $\epsilon=0.36$ の場合で空間的に平均してほぼ3程度の値になることなどがわかる。そしてこのような ϵ による C_M の変動傾向は、実測結果においても確認されており、定量的にも各 ϵ について C_M の実測値と理論算定値とはほぼ一致していたことを付記しておく。

6. ブロック堤による波のエネルギー逸散

本研究では、図-3に示した C_R の算定結果と実測結果の差に影響しているものと考えられるブロック堤による波のエネルギー逸散の原因として i) 直立円柱の場合に観測されているような後流渦に伴う後流渦の発生現象によるものおよび ii) 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両者に着目して検討してみた。まず上記の i) については、各種の波条件の下に堤体内の各部材まわりの流況をトレーサー法およびタフト法を適用して観察したが、直立円柱の場合⁷⁾に報告されているような明確な後流渦は認められず、流れの逆転時を除けばタフトは円柱表面に沿っているなど明確な流れのはく離も観察されなかった。そしてこの観測結果は、

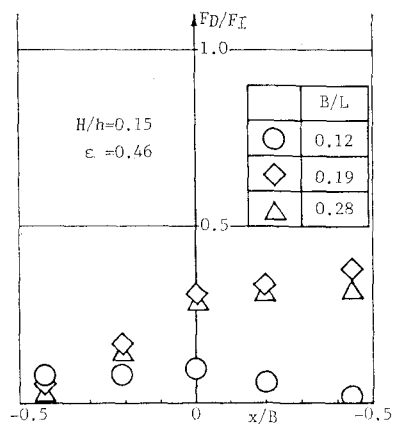


図-8 部材波力における抗力と慣性力との比

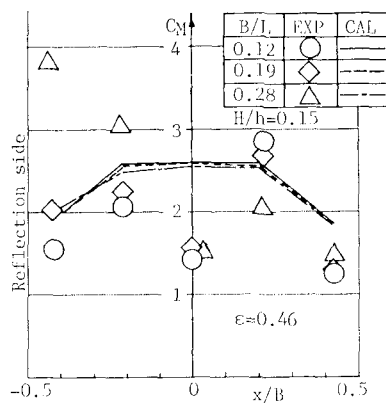
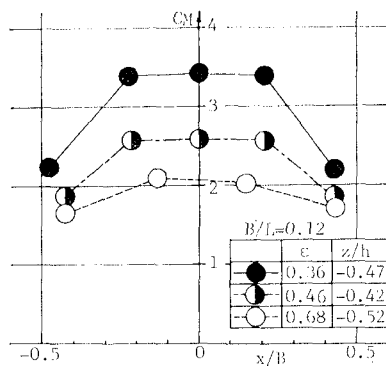
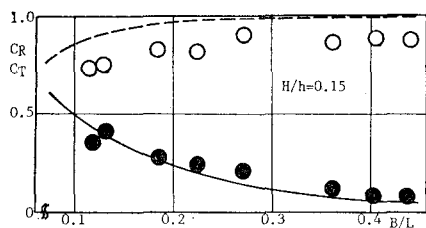
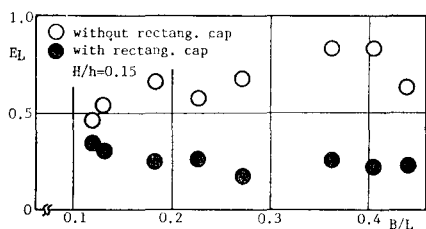
図-9 慣性係数 C_M に関する比較図-10 慣性係数 C_M の ϵ による変化 (理論算定結果)

図-8で示したように抗力がポテンシャル的な流体力である慣性力に比較して小さな量であった事実と合致している。一方、上記の ii) については、特に反射波側に位置する部材と波面との衝突に伴う流体塊の飛散などが観測されており、この衝突に伴うエネルギー逸散を定量的に評価するため前述の図-2の模型堤体を用いて波

図-11 上部不透過ブロック堤の C_T , C_R 図-12 波のエネルギー逸散率 E_L

変形の測定を行った。図-11は、この上部不透過ブロック堤の C_T , C_R を示すもので図中には上記の3.の解析法による算定結果についても付記した。そしてこの図と対応する堤体の C_T , C_R を示す図-3 (b) との比較から、矩形堤で置換することにより C_R は大きく増加し、ポテンシャル理論による C_R の算定値に近づくことがわかる。しかしながら、両図の C_T の比較を行うと矩形堤で置換した場合の方が多少小さくなる程度で顕著な差は見られない。したがって、図-1のようなブロック堤の場合、上述した ii) の衝突現象により波のエネルギー逸散が生じ、これは主として反射波の減勢に影響していることなどが理解されよう。またこれら2つの堤体のエネルギー逸散率 $E_L (=1-C_T^2-C_R^2)$ を図-12に示すが、これからも上部不透過堤の E_L が低減していることがわかる。

7. 結 語

1) 水平円柱を構成部材とする直立ブロック堤の透過率は、空隙率並びに波条件にかかわらずポテンシャル理論に基づく解析法によりほぼ予測できる。一方反射率はエネルギー逸散の影響を大きく受けることからポテンシャル理論に基づく予測は困難である。

2) ブロック堤による波のエネルギー逸散は、主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って生じる。そしてこの逸散が主として堤体固体部に作用する摩擦抵抗力によるものであるとする従来の仮定は必ずしも妥当でない。

3) ブロック堤による波浪の変形機構の主要なものの一つとして堤体固体部の流体力学的な慣性効果が挙げられる。そして構成部材の慣性係数は、空隙率や配置によって異なるが、これらの値はポテンシャル理論に基づく解析法によりほぼ予測できる。

参 考 文 献

- 1) Sollitt, C. K. and R. H. Cross: Wave transmission through permeable breakwaters, 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) Thornton, E. B. and R. J. Calhoun: Spectral resolution of breakwater reflected waves, Proc. of ASCE, Vol. 98, No. WW4, pp. 443~460, 1972.
- 4) 中村孝幸: 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, 1983.
- 5) 中村孝幸・小笠原重夫: ブロック堤まわりの波変形に及ぼす水面近傍の部材の効果について, 土木学会第40回年次学術講演会講演概要集第2部, pp. 581~582, 1985.
- 6) 近藤俊郎・竹田英章: 消波構造物, 森北出版, 1983.
- 7) 樫木 亨・中村孝幸・喜田 浩: 円柱に作用する規則波による揚力について, 第22回海岸工学講演会論文集, pp. 525~530, 1975.