

複列カーテン防波堤の堤内共振を利用した波浪制御法について

中 村 孝 幸*・森 田 知 志**

1. ま え が き

カーテン防波堤を単列配置とした場合の消波能力は、Wiegel¹⁾ や森平ら²⁾により報告されているように短周期波に対しては十分なものの外洋性の長周期波に対してはほとんど期待されず防波堤としての大きな欠点になっていた。近年に到り、著者らの中の一人³⁾はカーテン防波堤による消波のメカニズムの一つである堤体下端部での渦形成によるエネルギー逸散に着目し、このエネルギー逸散が主に透過波に影響することや長周期波になるほど増大することおよび堤体を複列化することによりほぼ倍増することなどを示している。本研究は、複列配置としたカーテン防波堤のエネルギー逸散効果の大きいことに着目して従来十分でなかった長周期波の減勢をめざそうとするもので、特に2堤体にはさまれた堤内水域の共振現象を利用した波浪減勢法について究明しようとするものである。この際、複列堤の堤体間隔に着目してその消波効果やエネルギー逸散および作用波力の実態を単列堤のそれらと比較して明らかにすると共に、予測手法の確立を目的に2次元波動場のGreen関数を核関数とするわき出し分布法⁴⁾による算定結果との比較を行ない、解析法の適用性についても明らかにした。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

実験は、高さ1.25m、幅1m、長さ28mの2次元造波水槽を用いて行った。水槽内には、その幅をほぼ2分するように隔壁板が設置してあり、一方の水路にのみ後述する複列カーテン防波堤の模型を設置し、他方の水路で入射波の測定が行えるようにしてある。模型堤体には、高さ70cm、幅49cm、厚さ0.9cmの鋼製板を2枚使用した。そして図-1に示すように各々の鋼製板を波力計である正方角柱により上部固定の片持梁形式で支持し、前列堤および後列堤として配置せしめた。波力計は図中に示すように4枚の歪ゲージを角柱にはりつけたもので、上下部のモーメントの差を検出して板に作用する

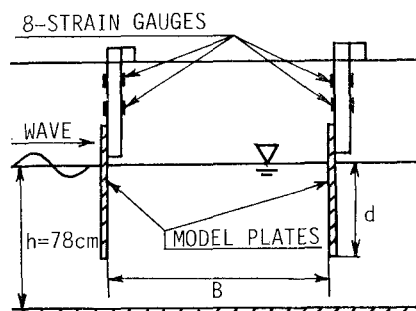


図-1 模型堤体の設置状況

水平力が測定できるようになっている。流況観測は、各々の堤体下端の edge 先端に設けた注射針より、トレーサーである黒インクを注入し、VTRカメラにより撮影して行った。

2.2 実験方法

実験は、後述する入射波（波高： H 、周期： T ）および堤体のきつ水 d の各条件の下に、堤体の内縁間隔 B を変化せしめて行ない、i) 堤体間における波高の空間分布、ii) 反射・透過率、iii) 作用波力、iv) 流況の各々を測定した。反射率 C_R については、波高計を移動させて最大波高 H_{max} をまず測定し、 $C_R = (H_{max} - H)/H$ より求めた。ここで H は、堤体を設置していない水路側での測定波高を用いた。また透過率 C_T は測定された透過波の波高 H_T を用いて $C_T = H_T/H$ より求めた。

本研究で採用した実験条件を以下に示す。水深 h は78cmと一定にした。 $d = 27.5\text{cm}$ 、 47.5cm の2種類。 $T = 1.1\text{sec} \sim 2.4\text{sec}$ の範囲の5種類。 $H = 5, 10, 15\text{cm}$ の3種類（ただし、碎波する場合を除く）。 $B = 25 \sim 310\text{cm}$ の範囲の7~12種類。

3. 算定方法

本研究で用いた解析法は、既に著者らの中の一人⁴⁾が明らかにしている2次元波動場のGreen関数を核関数とするわき出し分布法である。この解析法は、2堤体の間隔が小さくなっても厳密な波浪境界値問題の解法が行なえる利点をもつが、完全流体の理論に基づくため渦などの非ポテンシャル的な流体現象については考慮できな

* 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部海洋工学科

** 学生員 愛媛大学大学院 工学研究科

い。なお、数値解法に当り堤体の断面曲線を有限個の線素分 ΔS に分割する必要があるが、本研究では著者らの中の一人⁴⁾が明らかにしている規準、 $\Delta S/L \leq 0.03$ (L : 波長) を満足するように行ったことを付記しておく。

4. 堤体まわりの波変形

4.1 堤体間における波浪の共振現象

図-2は、周期 T ときつ水 d を固定して堤体間隔 B を変化させた時の堤体内の代表波高 H_f の変動の一例を示すもので、図中では入射波高 H と波長 L を用いた H_f/H と B/L との関係であらわしてある。ここで H_f は、前列堤の背面近傍における波高である。また入射波高の大小による相違が検討できるように H/h がパラメーターにとってある。この図より H_f/H の算定結果は B/L により波状的に変化しているのがわかる。このような B/L による H_f/H の変動傾向は堤体間での波浪共振によるものと考えられ、 $B/L=0.1$ 付近および 0.6 付近で生じる H_f/H の極大点は波浪共振点に対応するものと言えよう。そして以下 B (or B/L) を増加させるに伴ない出現する共振点を順次第1次共振点、第2次共振点・・・と呼ぶことにする。次に H_f/H の実測結果に着目すると定性的には上記の算定結果とほぼ一致しているものの定量的には特に共振点付近で実験値は算定値を大きく下回っていることが認められる。そしてこのよう

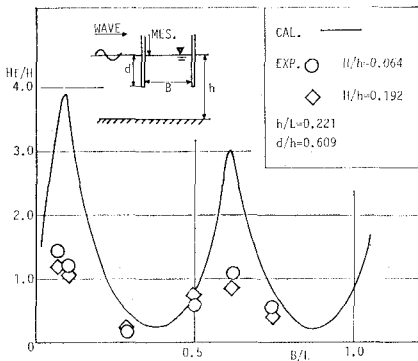


図-2 堤体間における波高の B/L による変化

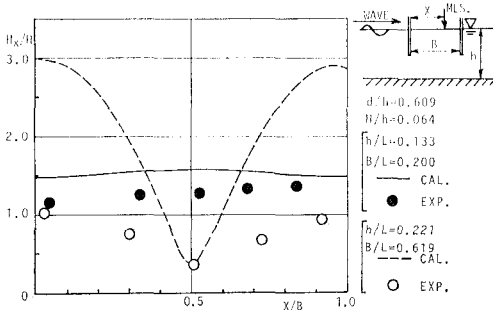


図-3 共振点下での堤内波高の空間分布

な実験値と算定値との定量的な相違は、後述する堤体下端部での渦等起因するエネルギー逸散によるものと考えられる。なお、上記の共振が出現する B/L の値は、 d/h および h/L によって変化することや、これら共振点に対応する B/L の値は理論的にはほぼ予測できることなどを確認している。図-3は、図-2中に見られたような第1次、第2次共振点付近の堤内水域における波高の空間分布の典型例を示す。図中、横軸には前列堤背面からの距離 X を B で無次元化したものがとってある。この図より第1次共振点では堤内波浪が空間的に一様に増幅される共振モードに、また第2次共振点では前、後列堤に腹が、これらの中間に節が出現する共振モードになっている。そしてこれらの共振モードに関する算定結果は、実測結果と定性的に一致していることが認められる。なお上記の第1次共振モードは透過堤に特有のものと考えられる。

4.2 反射・透過率

(1) 反射率 C_R : 図-4～図-6は、 C_R の算定結果と実測結果との比較を B/L との関係で示すもので、図-4より図-6へは入射波の周期を大きくした場合の変化を表わす。各図中には、単列カーテン防波堤による反射率 $(C_R)_S$ との比較が行えるようにこれについても付記してある。なお、 $(C_R)_S$ には実測結果との対応がほぼ確

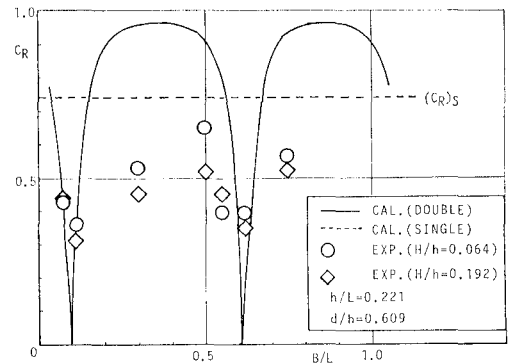


図-4 複列堤体の反射率 ($h/L=0.221$)

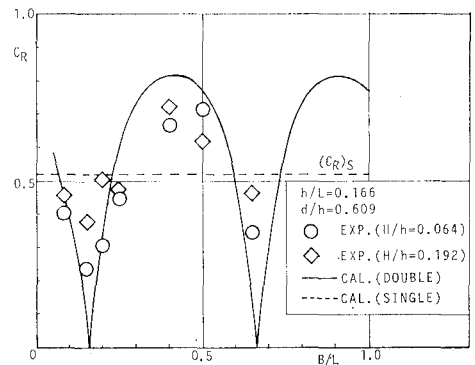
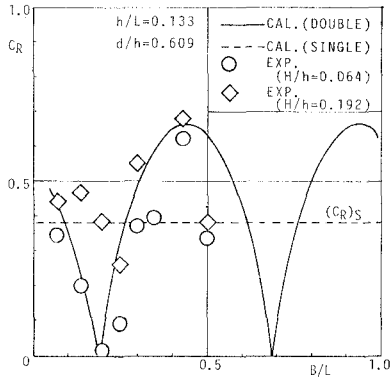
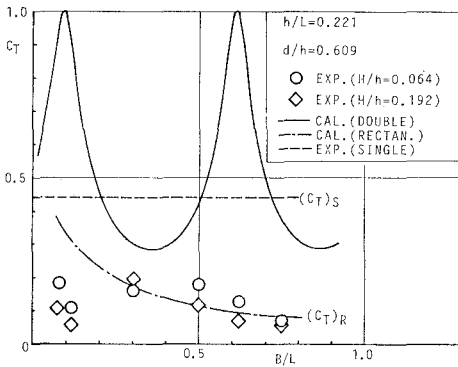
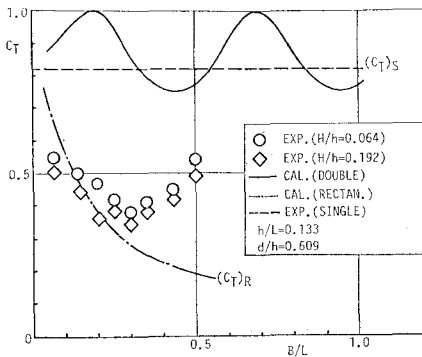


図-5 複列堤体の反射率 ($h/L=0.166$)

図-6 複列堤体の反射率 ($h/L=0.133$)図-7 複列堤体の透過率 ($h/L=0.221$)図-8 複列堤体の透過率 ($h/L=0.133$)

認されている³⁾上記 3. の算定法による値が採用してある。まずこれらの図の C_R の算定結果に着目してみると、 C_R は B/L により波状的な変動傾向を示し、極小点において $C_R=0$ となることなどがわかる。これは上述した堤内の共振現象によるものであり、 $C_R=0$ となる点は共振点に対応している。そして図-4 より図-6 へと長周期波になるほど非共振点における C_R の値は減少することや共振を示す B/L の値が大きい方へ移行していることなどが認められる。次にこれらの図の C_R の実測結果に着目してみると、算定結果と同様に共振点付近で極小値を示す波状的な変動傾向になっているものの入

射波高が大きくなる場合この傾向は明確でなくなっている。また定量的な比較を行ってみると、図-4 より図-6 へと長周期波になるほど、また入射波高が小さい場合ほど C_R の実測値と算定値との対応はよくなっており、図-6 の場合共振点を含めて両者はよく一致していることがわかる。一方 $(C_R)_S$ と上記 C_R との比較を行ってみると、図-5、図-6 に見られるように非共振点では $(C_R)_S < C_R$ 、共振点付近では $(C_R)_S > C_R$ の大小関係にあり、共振点付近では複列化することにより反射波を低減できるものと言えよう。

(2) 透過率 C_T : 図-7, 8 は、それぞれ図-4, 6 の場合に対応する C_T の実測結果と算定結果との比較を示す。図中には、著者らの中の一人³⁾による単列カーテン防波堤の透過率 $(C_T)_S$ の実測結果および死水モデルを仮定して 2 列堤体内の水域を剛体と仮定した矩形堤の透過率 $(C_T)_R$ の算定結果も比較のため付記してある。これらの図より複列堤の C_T の算定結果は、 C_R のそれと同様に B/L により波状的な変動を示し、共振点において極大値 $C_T=1.0$ となっている。そして非共振点では、より長周期の条件である図-8 の場合の方が図-7 の場合より C_T が大きくなっている。次に C_T の実測値に着目してみると、算定結果にみられるような C_T-B/L の変動関係は認め難く、 C_T の値も算定値に比較して特に共振点付近で大きく下回っている。そして C_T の実測値は、 B/L の小さな領域に限るならば矩形堤の $(C_T)_R$ にほぼ一致していることが認められる。本研究では、複列堤の C_T が矩形堤の $(C_T)_R$ で近似できる B の範囲を他の h/L , d/h の条件の場合を含めて検討している。その結果上記 B の範囲は h/L により多少異なるがほぼきつ水 d の 4 倍までとなっていることを確認しており、ここに付記しておく。次に複列堤の C_T の実測結果と単列堤のそれ $(C_T)_S$ との比較を行ってみると、複列堤の C_T は B/L により多少異なるが $(C_T)_S$ のほぼ 1/2 程度になっており、堤体を複列化することにより透過波を大きく減勢できることがわかる。

4.3 波のエネルギー逸散

これまで述べてきた堤内波高、 C_R , C_T に関する実測結果と算定結果との差異の原因としては、算定結果において実在流体中で生じる堤体下端部付近の渦等起因するエネルギー逸散が考慮されていないことが挙げられよう。本研究では、このエネルギー逸散をあらわす指標としてエネルギー逸散率 $E_d (=1-C_R^2-C_T^2)$ を実験的に求めた。図-9 は一例として図-4, 7 に対応する条件での E_d と B/L の関係を H/h をパラメーターにとり示すものである。図中には、カーテン防波堤を単列配置とした場合の $(E_d)_S$ ³⁾ も比較のため示した。この図から E_d は共振点付近の B/L において増加しており、その値

は 90% 近くにも達することや、 H/h が大きいほど E_d も増加していることなどがわかる。そしてこの E_d は、堤体下端部に形成される渦の規模に密接に関連していることが推測される。ここでは渦の循環強さが堤体下端部の流速の 2 乗にはほぼ比例することを利用して、前、後列堤の下端部での流速 U_f , U_r の B/L の変化により上記 E_d の変化が説明され得るかを検討してみた。図-10 は、上記算定法による U_f , U_r の B/L による変化を示すもので、図中で U_f , U_r は、堤体がない場合の水表面における水平水粒子速度 U_s で無次元化してある。この図から U_f , U_r の B/L に伴う波状的な変化が認められ、共振点付近の B/L の値において、 U_f , U_r は極大となっていることがわかる。これは図-8 に示した E_d の変動傾向にほぼ対応しており、 E_d は U_f , U_r の大小に関係しているものと言えよう。

4.4 堤体まわりの流況

本実験において、波の 1 周期の間に観測された堤体下端部で形成される渦の個数はほぼ 2 つであり、それらは各々堤体の波の反射波側 (No. 1 の渦と称す) と透過波側 (No. 2 の渦と称す) に形成されていた。図-11 は図-10 に対応する条件下で $H/h=0.192$ の場合に前列堤の下端部で観測された渦パターンの B/L による変化を模式的に示した図である。この図から波浪共振点付近の条件下において渦の規模は増大し、特に No. 2 の渦の規模の増大が著しいことが認められる。また後列堤の下端で観測された渦パターンも、渦の規模は前列堤のものに比べ小さくなっているものの、 B/L の変化に伴ない共振点付近でその規模は増大する傾向にあることを確認

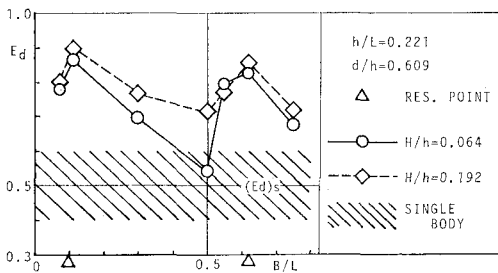


図-9 エネルギー逸散率の B/L による変化

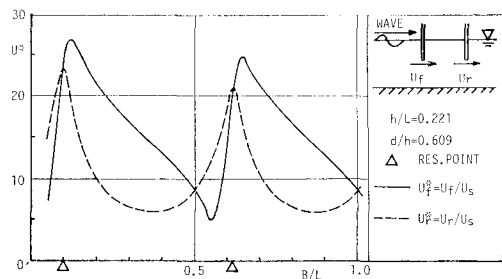


図-10 堤体下端部の水平流速の B/L による変化

B=40cm B/L=0.133	B=105.5cm B/L=0.299	T=1.60sec d=47.5cm H=15.0cm h/L=0.221 d/h=0.609 H/h=0.192
NO.1 NO.2	NO.1 NO.2	
B=175.9cm B/L=0.499	B=218.1cm B/L=0.619	B=263.8cm B/L=0.750
NO.1 NO.2	NO.1 NO.2	NO.1 NO.2

図-11 前列堤における渦パターンの B/L による変化

している。このような渦の規模の特性は既に述べたエネルギー逸散率の B/L による変動特性に一致しており、 E_d と渦の形成特性との間には密接な関連性のあることが指摘できる。

5. 堤体に作用する波力

以下では水平波力に関する実測値と算定値との比較に当たり、式 (1) で定義される無次元波力 F^* を用いている。

$$F^* = F / (\rho g H B d / 2) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ρ : 流体密度、 g : 重力加速度、 B : 堤体の幅である。

図-12, 13 は、各々図-7, 8 の場合に対応する条件

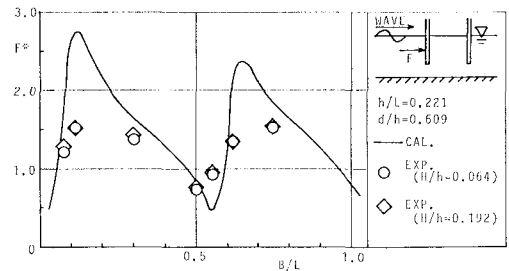


図-12 前列堤に作用する水平波力 ($h/L=0.221$)

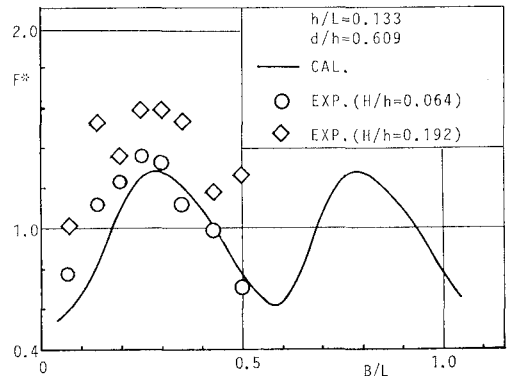


図-13 前列堤に作用する水平波力 ($h/L=0.133$)

下での前列堤に作用する水平波力 F_x^* の実測結果と算定結果との比較を示す。なお F_x^* の実測値には、より大きな値を示した波の進行方向に作用する波力のみが採用してある。また図中には入射波高の大小による差異が検討できるように H/h がパラメーターにとってある。これらの図に見られるように、 F_x^* の実測値は算定値と同様に B/L により波状的な変動を示しており、定性的に両者はほぼ一致していることがわかる。そして定量的な比較を行ってみると、図-12 の場合、波高の大小にかかわらず F_x^* の実測値は算定値を下回っている。一方、より長周期波の場合の結果を示す 図-13 では、波高の小さな場合 F_x^* の実測値と算定値とはほぼ一致しているものの波高の増大に伴ない実測値が算定値を上回るようになることなどが認められる。また、 F_x^* の極大値に着目すると短周期波側となる 図-12 の場合の方がより大きくなっていることなどがわかる。以上の検討より複列堤に作用する水平波力は 4. で明らかにした堤内波浪の共振現象の影響を大きく受けているものと言え、設計波力の算定に当っては十分注意する必要がある。なお、本研究では後列堤に作用する水平波力 F_x^* についても上記と同様の検討を行っているが、 F_x^* は F_x^* よりも小さくなることや F_x^* ほど B/L による変動が顕著でないことなどを確認している。

6. 結 語

i) 複列カーテン防波堤の堤体間距離 B と波長 L と

の比が特定の値に到ると堤内波浪の共振増幅現象の生じることが理論的にも実験的にも明らかとなった。

ii) 複列カーテン防波堤の反射率は、上記 i) の共振現象の影響を受けて B/L により波状的な変化を示し、この変動傾向は理論的にはほぼ予測することができる。一方、透過率は算定値との対応が十分でなく、特に波浪共振点付近で減勢を受け大きな差異がある。そしてこの透過率は、 B がきつ水の 4 倍までの範囲内にある場合、 B と同一の長さの矩形堤の透過率ではほぼ近似され得る。

iii) 複列カーテン防波堤による波のエネルギー逸散率は、上記共振現象の出現に伴ない増大し、最大で 90% にもなる。そしてこのエネルギー逸散の増大は波浪共振に伴ない堤体下端部に形成される渦の規模の増大化によるものであることやエネルギー逸散は主として透過波に影響することが明らかとなった。

参 考 文 献

- 1) Wiegel, R. L.: Transmission of waves past a rigid vertical thin barrier, Proc. of ASCE, J. of Waterways and Harbors Division, Vol. 86, No. WW1, pp. 1~13, 1960.
- 2) 森平倫生・柿崎秀作・合田良実: カーテン防波堤とその特性について、港湾技術研究所報告, Vol. 13, No. 1, 1964.
- 3) 中村孝幸: カーテンウォール型防波堤まわりの波変形と作用波力に関する研究, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 512~516, 1984.
- 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.