

共振装置を設けた堤体列による波浪の制御効果について

中村 孝幸*・小野 正順**・長田 和久***

1. ま え が き

近年、わが国では沿岸海域の有効利用を目的として各種の沖合消波堤の開発が進められつつある。しかしながら、従来の研究においては、実際場で必要とされるような消波堤の平面的な配置に伴う波高分布の変動特性や消波効果を高めるための堤体の平面的な形状並びにその配列法について検討した例は少ない。

本研究は、複数の堤体を汀線方向に開口部を設けて配列する、いわゆる多列形式の沖合消波堤を対象として、より効果的な透過波の減勢が可能となる堤体の平面形状について究明するものである。この際、透過波の減勢機構としては、堤体構造物の平面形状に特有な波浪共振を生起せしめ、入射波のエネルギーをトラップする方法を採用した。そして、配列する堤体の平面形状としては、Valembis(1953)により提案されているような矩形の共振装置を設けたものおよび本研究で提案する半円弧状のそれを設けたものの2種類とし、これら共振装置内における波浪共振の発生条件やその共振モードの特性を堤体列による透過波の変動特性と併せて明らかにする。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

模型堤体の平面形状は、図-1, 2に示すものである。これらは、各々矩形堤体の両側面を掘込んで矩形の共振水域を設けた矩形共振装置型堤体（以下RR型堤体と称す）および半円弧形の共振水域を設けた半円弧共振装置型堤体（SCR型堤体と称す）である。なお、前者の矩形共振水域の奥行きと幅(W_w)との比は、Valembis(1953)のそれと同じ1:2にした。実験では、これらの堤体で構成される堤体列に直角入射波が作用する場合を想定して行った。すなわち、上記の堤体の1/2のものを製作し、これを図-1, 2中に示すように隣接する堤体の中心間距離 λ の1/2の水路幅をもつ長水路内に設置した。これは、鏡像原理に基づけば、このような長水路内の波変

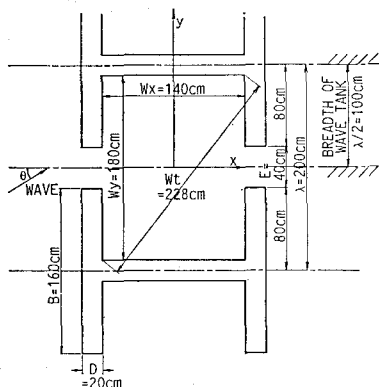


図-1 RR型堤体の平面形状

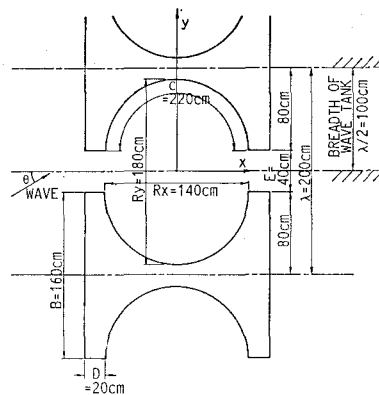


図-2 SCR型堤体の平面形状

形が、堤体間距離 λ で規則配列された堤体まわりのそれと同じになることから採用したものである。なお、本実験に用いた長水路の幅($=\lambda/2$)は1mで、想定した堤体列の開口率 α は20%となっている。

2.2 実験方法および波条件

上記のような堤体まわりの波変形は、堤体列方向における最低次の横波共振点($\lambda/L=1$, L : 波長)を境にして1次元的な波変形から2次元(平面)的なそれへと変化することが既に知られている(Ursell, 1951)。このため実験では、 $\lambda/L < 1$ の1次元的な波変形が生じる場合、

* 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 大阪大学助手 工学部土木工学科

*** 学生員 愛媛大学大学院 海洋工学専攻

堤体列による透過率 C_T 、反射率 C_R を測定した。一方、平面的な波変形が生じる $\lambda/L > 1$ の場合、堤体より 1 波長以上離れた領域で水槽幅方向への透過波高および合成反射波高の空間分布を測定した。なおこの場合、透過率に変わる量として、透過波高の水槽幅方向における r.m.s. 値と入射波高との比で定義される波高比の r.m.s. 値 K_T を求めた。本実験では、このような波変形の測定に加え、波浪共振モードを検討するため、共振水域内における波面形状についてもビデオカメラで撮影して観測した。

堤体に作用せしめた入射波の周期 T は、堤体まわりの横波共振および共振水域内の波浪共振を考慮して $T=0.80 \sim 2.59$ sec の範囲の 17 種類とした。この際入射波高 H は、5 cm のみとした。また、堤体の設置水深 h は、80 cm と一定にした。なお、上記の作用波の周期の条件は、横波共振の発生と密接な関係がある無次元量 λ/L で示すと 0.3~1.9 の範囲にある。

3. 共振特性に関する理論的検討

3.1 解析法の概略

本研究で用いた解析法は、既に著者ら(1988)が明らかにしている堤体構造物の無限配列を想定した Green 関数法に基づく数値解析法である。この解析法は、線形波浪ポテンシャル問題の解析法の一つで、任意平面形状の堤体で構成される堤体列に斜め入射波が作用する場合も取り扱えるなどより一般的なものとなっている。

3.2 透過率の変動特性と波浪共振の出現条件

既に Pullin ら(1984)は、V 字型平面形状の堤体構造物で構成される堤体列に直角入射波が作用する場合を検討し、堤体の平面形状に特有な波浪共振が発生すると透過率が極値(極大、極小)を示すことなどを報告している。ここでも上記の堤体列の透過率の変動特性から、波浪共振の出現条件を理論的に検討してみた。

a) 直角入射波が作用する場合

図-3, 4 は、この場合における各々 RR 型堤体列および SCR 型堤体列の透過率 C_T の算定結果を表す。横軸には、横波共振に関係する λ/L および図-1, 2 中に示す共振装置の各寸法と波長 L との比がとってある。また図中には、これらの共振装置型堤体の共振水域を埋め戻した矩形堤体列の C_T についても比較のため併せ示した。これらの図より、 C_T は両共振装置型堤体列共に $\lambda/L \approx 0.25$ と図中に示す No. 1~6 または No. 7 の条件下並びに $\lambda/L=1, 2$ で極値を示すことがわかる。そして共振装置型堤体列の透過率 C_T は、それが極小値を示す領域では、基本型の矩形堤体列の C_T に比較して十分に小さく、しかもそれが極大値を示すときでも高々矩形堤体列のものと同程度であることから、共振装置を設け

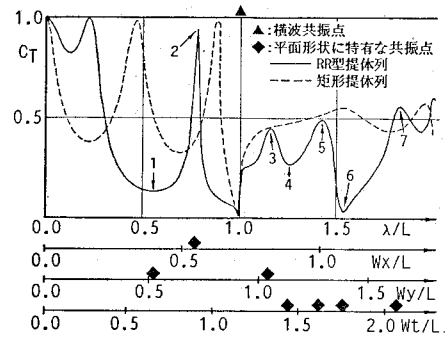


図-3 RR 型堤体列の透過率の変動特性 ($\theta=0^\circ$)

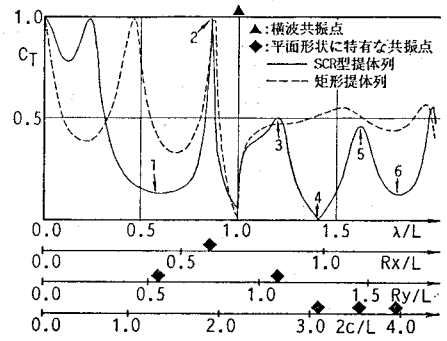


図-4 SCR 型堤体列の透過率の変動特性 ($\theta=0^\circ$)

ることにより有意な波浪制御効果が期待できるものと考えられる。

i) 横波共振; これらの図中において C_T が, $\lambda/L=1, 2$ で極値を示すのは、上記の 2. で一部紹介したように堤体の配列方向に横波共振が発生することによるものである。このような横波共振の発生条件は、著者ら(1988)により明らかにされているように λ/L のみ関係するもので、斜波条件の場合を含め、次式で定義される。

$$\lambda/L = n/(1 \pm \sin \theta) \quad (n=1, 2, \dots) \dots\dots\dots (1)$$

ii) 堤体の平面形状に関係する波浪共振; 一方、これら図中の No. 1~6 または No. 7 の条件下では、いわゆる堤体の平面形状に特有な波浪共振が発生しているものと推測される。事実、RR 型堤体列の場合、図-3 中の No. 1~3 の極値は、第 2, 3 横軸上に◆印で示すように矩形共振装置で囲まれた水域の堤軸方向への長さ W_y あるいはその幅 W_x が半波長のほぼ整数倍となるときに一致し、装置内に 1 元的な重複波が形成される条件となっている。なお、この場合の残りの No. 4~7 の極値は、共振モードと併せて後述するように長方形湾内の共振と類似して W_x と W_y の両者に関係した長さや半波長との比で規定される共振に関係しているものと考えられる。

SCR 型堤体列の場合、RR 型堤体列のように明確で

はないが、図-4 中の No. 1~3 の極値は、第 2, 3 横軸に示すように楕円形水域の最大幅 R_x あるいは最大奥行き R_y と半波長との比がほぼ整数倍となるときに現れていることがわかる。そして、残り No. 4~6 の極値は、後述するように楕円形水域の周辺長と半波長との比で規定される波浪共振に伴うものと考えられる。以上のように、共振装置型堤体列のまわりには、横波共振と堤体の平面形状に関する波浪共振の両者が生じており、波浪制御効果を検討する上で注意する必要があるものと言えよう。

b) 斜め入射波が作用する場合

図-5, 6 は、各々図-3, 4 に比較して波の入射角 θ を 45° と斜波条件にした場合の透過率の算定結果を表す。まず、これらの図中に見られる C_T の極値の中で、平面形状に関係なく共通して現れる $\lambda/L \approx 0.6, 1.2, 1.8$ (図中の◆印) のものに着目すると、これらは、式 (1) で表される横波共振の発生条件に一致している。

一方、上記の横波共振点を除く、図中の No. ①~⑦あるいは⑧の C_T の極値に着目すると、これらは直角入射の条件の所で述べたような堤体の平面形状に関する波浪共振の出現に伴うものと推測される。そして、このような波浪共振の出現条件を、図-3, 4 の直角入射の場合と比較すると、 C_T の極値はほぼ同様の λ/L で現れており、変化していないことがわかる。ただ、斜波条件の図-5, 6 では、直角入射の場合に比べて、新たに $\lambda/L \approx 1$ の No. ③で C_T の極小値が出現する相違が見られる。これは、直角入射を受ける場合、 $\lambda/L=1$ で横波共振が発生することから、本来は斜波中の場合に見られるよう

な $\lambda/L \approx 1$ で発生すべき平面形状に特有な波浪共振が、横波共振の干渉を受けて明確に出現しなかったことによるものと考えられる。そして斜波条件の場合、このような横波共振と平面形状に特有な波浪共振との干渉は、図-5, 6 中の No. ①付近で見られる。以上の検討より、平面形状に関する波浪共振の出現条件は、それが横波共振の出現条件と近接する場合を除けば、作用波の入射角の影響をほとんど受けないものと結論される。

3.3 共振モード

a) 直角入射波が作用する場合

i) RR 型堤体列; 図-7 (a)~(c) は、この場合の矩形共振装置内での波高分布の代表例を示すものである。図中では、波高分布を入射波高との比 K_D のコンターで表すもので、図 (a)~(c) は、各々図-3 中の No. 2, 5, 6 での C_T が極値となる場合に対応している。これらの中の図 (a) では、共振装置の幅 W_x と半波長とがほぼ一致するときで、波高分布は主にこの幅方向(X方向)にのみ変動する1次元的な重複波が形成される場合のものとなっている。なお、図-3 中の No. 1, 3 で C_T が極値を示す条件下でも、波高変動の方向は異なるがほぼ図 (a) と同様に1次元的な波面形状の重複波が形成されることを確認している。次に図-3 中の No. 5, 6 に対応する図 (b), (c) に着目すると、これらの場合、重複波の腹や節が共振装置の隅角部付近に出現するなどいわゆる平面的な重複波が形成されていることがわかる。

これらの共振モードと図-3 の透過率 C_T の変動を比較してみると、図-7 (a), (b) のように共振装置の透過波側の開口部に重複波の腹が形成されるようなモードの場合、 C_T は大きく、逆に図 (c) のように同様の場所に節が形成されるモードの場合、 C_T は小さくなっていることがわかる。したがって、波浪共振の発生により、 C_T が極大となるか極小となるかは、装置内に現れる共振モードの相違によるもので特に装置の透過波側の開口部における波高変動と密接に関係するものと言えよう。

ii) SCR 型堤体列; この共振装置内の波高分布を RR 型堤体列の場合と同様にして示すのが 図-8 (a), (b) で各々図-4 中の No. 4, 5 の C_T の極値が現れる場合に対応している。これらの図から、両者共に楕円形水域の中央付近に腹が、またその周辺境界に沿って腹や節が交互に現れるなど平面的に複雑な重複波が形成されていることがわかる。そして、これらの条件下では、楕円形水域の周辺長が半波長のほぼ整数倍となっており、SCR 型堤体の共振発生条件を検討する上でこの周辺長が重要になるものと言えよう。

次に共振モードと C_T の関係を検討してみると、RR 型堤体列の場合と同様に装置の透過波側に節が形成される図-8 (a) のモードの場合に C_T が小さくなるなど、

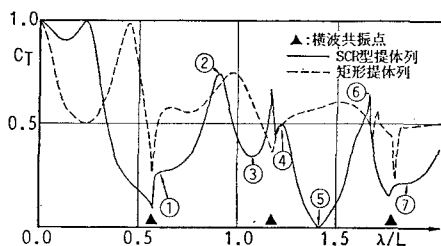


図-5 斜波中における RR 型堤体列の透過率 ($\theta=45^\circ$)

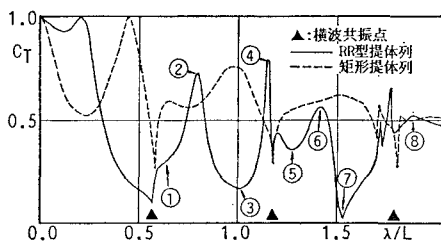
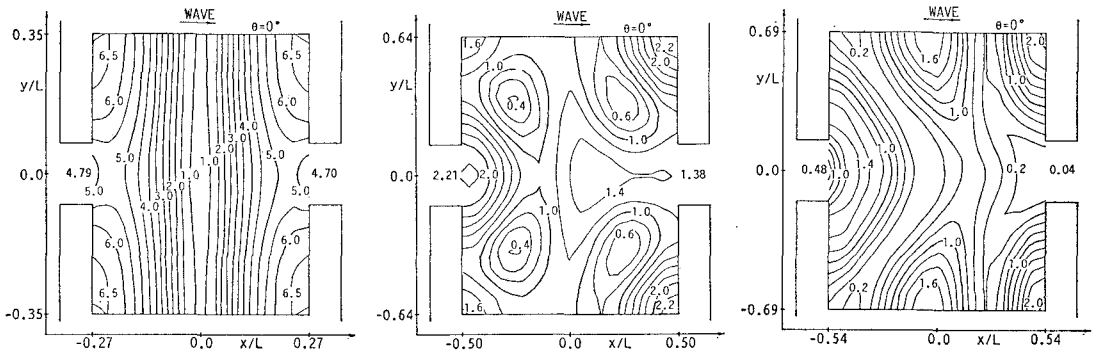
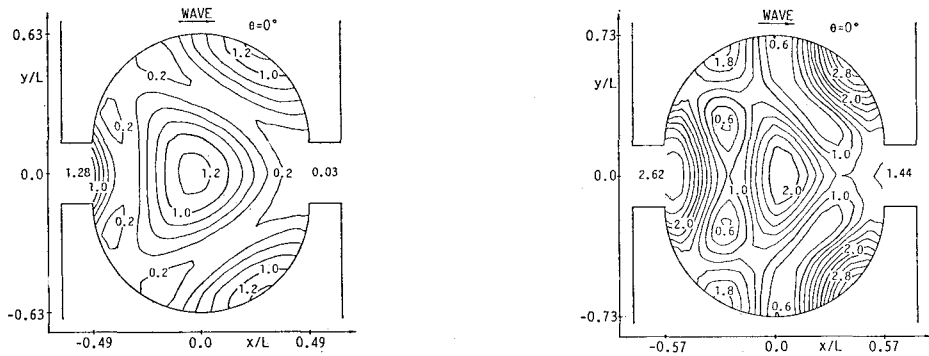


図-6 斜波中における SCR 型堤体列の透過率 ($\theta=45^\circ$)



(a) No. 2 の共振点の場合 ($\lambda/L=0.77$) (b) No. 5 の共振点の場合 ($\lambda/L=1.41$) (c) No. 6 の共振点の場合 ($\lambda/L=1.53$)

図-7 矩形共振装置内の共振モード ($\theta=0^\circ$)



(a) No. 4 の共振点の場合 ($\lambda/L=1.40$)

(b) No. 5 の共振点の場合 ($\lambda/L=1.62$)

図-8 半円弧共振装置内の共振モード ($\theta=0^\circ$)

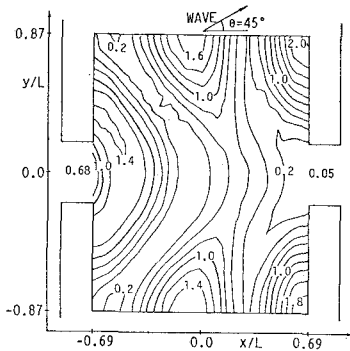


図-9 斜波中における型堤体内の共振モード
($\theta=45^\circ$, $\lambda/L=1.52$, No. ⑦の共振点)

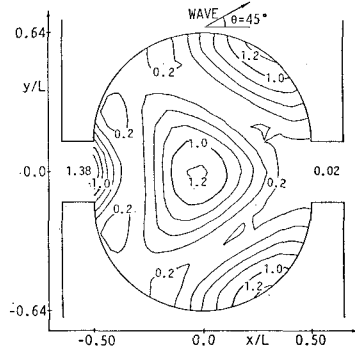


図-10 斜波中における SCR 型堤体内の共振モード
($\theta=45^\circ$, $\lambda/L=1.42$, No. ⑤の共振点)

RR 型堤体列の所で述べたような共振モードと C_T との関係が SCR 型堤体についても妥当であることが再確認される。

b) 斜め入射波が作用する場合

この条件下での共振装置内の波高分布を、RR 型および SCR 型堤体列の各々について一例づつ示すのが図-9, 10 で、各々図-7 (c), 図-8 (a) において波の入射

角 θ を 45° に変化させた場合の結果を表す。これらに対応する図の比較から、装置内に現れる波面形状はほぼ類似したものとなっており、波の入射角による共振モードの差異はほとんどないことがわかる。したがって、上述した共振の発生条件を含め、堤体の平面形状に関する波浪共振現象は、作用波の入射角に影響されないものと結論される。

4. 堤体列の波浪制御効果に関する実験的検討

図-11, 12は, 各々RR型堤体列およびSCR型堤体列による波変形に関する実験結果と算定結果との比較を λ/L による変動で表すものである。これらの図中では, 波変形を表す特性量として透過率 C_T , 反射率 C_R および堤体の透過波側における波高比のr.m.s.値 K_T が用いてある。なお, K_T は, 2.で述べたように平面的な波変形が生じる $\lambda/L > 1$ の条件下でのみ求めた。これらの図より, 両堤体列の C_T および K_T の算定結果は, $\lambda/L \approx 0.8$ 付近に現れる C_T の極大領域を除くと, 実験結果とほぼ一致していることがわかる。なお, $\lambda/L \approx 0.8$ 付近での相違の原因としては, この場合の装置内における波高増幅度が図-7(a)に見られるようになり大きいことから碎波や開口部における流れの剝離現象などの逸散効果をより強く受けるためと推定される。また C_R については, C_T や K_T の場合に比較すると算定結果と実験結果との一致度は劣るが, 概略的に両者は対応してい

るものと言えよう。

最後にRR型堤体列とSCR型堤体列の C_T および K_T の比較を行うと, $\lambda/L < 1$ では大差ないものとなっている。しかしながら, 平面的な波変形が生じる $\lambda/L > 1$ では, SCR型堤体列の方が, 波浪共振の出現に伴う K_T 値(または C_T 値)の極小領域がより広範囲にわたるため, RR型堤体列よりも波浪制御効果が優れていることがわかる。なお, このような優劣は, 3.3で明らかにした共振装置内に現れる共振モードの相違によるものである。そして, 共振装置型堤体の平面形状としては, その開口部の透過波側になるだけ重複波の節が形成されるようなものが望ましいと言えよう。

5. 結 語

i) 共振装置型堤体列の波浪制御効果およびその装置内における波浪共振の出現条件などは, 波浪ポテンシャル理論に基づく解析法を用いてほぼ予測することができる。

ii) 共振装置を設けた堤体列の透過率は, 装置の平面形状に特有な波浪共振が発生すると極値を示す。この際透過率が極小値を示すのは, 装置の透過波側の開口部に重複波の節が形成される共振モードの場合である。

iii) 共振装置の平面形状に特有な波浪共振の出現条件およびその共振モードは, 波の入射方向に影響されない。

iv) 半円弧共振装置型堤体列の波浪制御効果は, 矩形共振装置型堤体列のそれよりも優れており, これは装置内に現れる共振モードの相違によるものである。

参 考 文 献

- 中村孝幸・小野正順 (1988): 規則配列された沖合消波堤まわりの波浪共振の特性とその解析法, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 527~531.
- Pullin, D. I. and Joubert P. N. (1984): Behaviour of converging-channel breakwater; theory and experiment, J. of Fluid Mech., Vol. 141, pp. 123~138.
- Ursell, F. (1951): Trapping modes in the theory of surface waves, Proc. of Camb. Phi. Soc., Vol. 47, pp. 347~358.
- Valembois, J. (1953): Etude de l'action d'ouvrages resonants sur la propagation de la houle, Proc. Minnesota Int. Hyds. Conf., pp. 193~200.

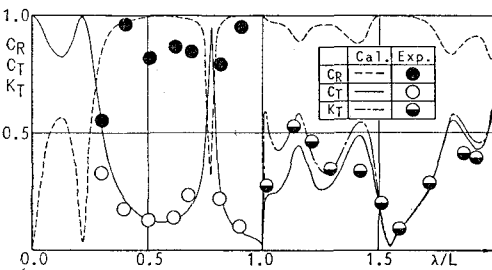


図-11 RR型堤体列による波変形に関する比較
($\theta=0^\circ$)

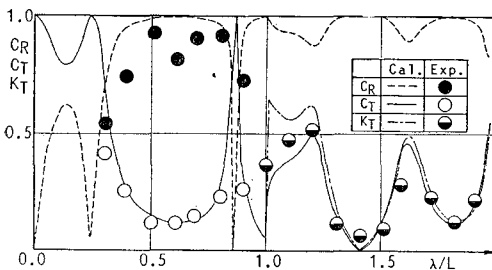


図-12 SCR型堤体列による波変形に関する比較
($\theta=0^\circ$)