

フィルター理論に基づく共振装置型堤体列の 波浪制御効果について

中村孝幸*・望月 仁**・仲子敏史***

1. まえがき

近年、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。本研究もこのような沖合消波堤の開発を目的とするもので、特に堤体内に設けた共振装置を利用して透過波を制御しようとするものである。このような方式による波浪制御効果については、既に Valembois による共振装置などを矩形堤体列に用いた中村らの研究 (1989, 1990a) があり、透過波の低減化に有効であることなどが報告されている。しかし、このような堤体列では、波周期による制御効果の変動が大きく、特定の周期条件下ではほとんど波が透過する場合もあるなどの欠点も知られている。また従来において、有効な共振装置の平面形状を見いだす手法は十分に確立されておらず、ほとんど試行錯誤的に検討されてきたのが実状である。近年、望月ら (1990) は、電気回路におけるフィルター理論を応用して、必要な周波数特性を持つ一様水路内での波浪フィルターの設計法を提案し、それをを用いた設計例なども示している。この波浪フィルターは、原理的には上述した共振装置の部類に属するものと考えられ、やはり装置により波エネルギーをトラップすることで透過波を低減するものと推定される。

本研究は、主にフィルター理論により設計された共振装置 (波浪フィルター) を矩形堤体列に適用したときの波浪制御効果について、理論及び実験の両面から明らかにしようとするものである。そして、反射波や共振装置内の波高についても減勢するため、この装置の内外壁を低反射構造にしたときの波浪制御効果の変動や効果的な低反射壁の配置法などについても検討するものである。

2. 波浪制御効果に関する理論的考察

2.1 解析法の概略

解析モデルおよび座標系は、図-1 に示すものである。解析では、一定水深 h の波動場中に、直立式の堤体構造物が一定間隔 λ で y 軸方向に規則的に配列されており、

これに平面波が直角入射するものとした。既に中村ら (1988) は、図-1 のような規則的に配列された直立式構造物まわりの波浪境界値問題の解析法をグリーン関数法に基づき明らかにしている。ここでも同様な解析法を用いて、規則的に配列された共振装置型堤体列まわりの波変形の算定を行った。

このような解析法によると、構造物の透過側において入射波と同方向に伝播する成分波 (直進行波成分) に加えて、これとは異なる方向に伝播する成分波 (斜波成分) も生じることが知られている。このような斜波成分の発生条件は、上記のような直角入射を想定すると $\lambda/L \geq 1$ (L : 入射波の波長) で与えられる。そして、 $\lambda/L = n$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) が成立するとき、第 n 次の横波共振点と呼ばれ、これより入射波の波長が短くなると第 n 次の斜波成分が発生する。既に中村ら (1990b) は、このような平面的な波変形が生じるときの波浪制御効果の評価法について示しており、ここでも同様な評価法を用いて共振装置

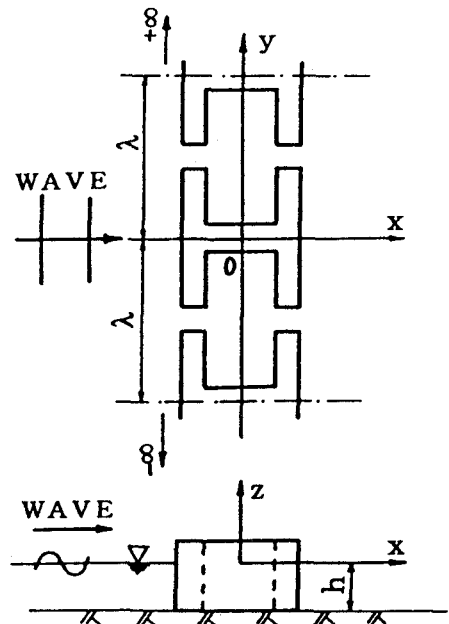


図-1 座標系および解析モデル

* 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部土木海洋工学科
 ** 工博 明星大学教授 情報学部電子情報工学科
 *** 山口県土木建築部

の波浪制御効果について検討した。

a) rms 波高比：これは、空間的な変動を有する透過波および反射波の波高を表すためのもので、次式で示すようなそれぞれ透過波高 H_T および反射波高 H_R の配列方向における rms 値と入射波高 H との比 K_T, K_R で定義される。

$$K_T = \sqrt{\left\{ \int_0^{\lambda} H_T^2 dy / \lambda \right\}} / H, \quad K_R = \sqrt{\left\{ \int_0^{\lambda} H_R^2 dy / \lambda \right\}} / H \quad \dots\dots\dots (1)$$

なお、 K_T, K_R は、斜波成分の発生しない条件下 ($\lambda/L < 1$) で、従来の 1 次元的な波変形に関する指標である透過率および反射率にそれぞれ一致することを付記しておく。

b) 波向き成分波のエネルギー比：平面的な波変形を考えると重要となる波向き特性を表す量として、透過波および反射波の全エネルギー E_T, E_R に占める各波向き成分波のエネルギー (E_{Tn}, E_{Rn}) の比を用いる。

$$T_n = E_{Tn} / E_T, \quad R_n = E_{Rn} / E_R \quad (n=0, \pm 1, \pm 2, \dots, N \pm) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 T_n, R_n ：それぞれ透過、反射側の波向き別のエネルギー比で、 $n=0$ の時が直進行波成分、それ以外の時が斜波成分である。そして、 $n \geq 1$ の時が左斜波成分、 $n \leq -1$ の時が右斜波成分に対応する。

2.2 堤体の平面形状と波浪制御効果

既に望月ら (1990) は、電気的な等価回路理論による波浪フィルター (共振装置) の設計法について明らかにしている。これは、波浪フィルターによる波浪変形問題を等価な電気回路に置き換えて解析し、それに基づいて様々な周波数特性を有する波浪フィルターが設計できるというものである。この理論は、運河のような長水路を想定して、その一部に波浪フィルターを設けたときの問題に対して展開されており、厳密には、本研究のような波浪フィルターを設けた堤体列まわりの波浪問題とは異なる。しかしながら、長水路の側壁の鏡像効果を考えると、両問題にはある程度の類似性があるものと考えられる。ここでは、望月らの理論により設計された波浪フィルターを堤体列に適用してその波浪制御効果を理論的に検討してみた。

a) 堤体の平面形状：堤体の平面形状は、図-2, 3 に示すものである。図-2 は、矩形堤体の開口部に、波浪フィルターを 1 基設けたもの、また図-3 はそれを 2 基直列に配置したものである。このフィルターは、原寸で縦 20 m、横 14.5 m で縦横比は 1.41 である。両堤体とも最狭部での開口率は 22.5%、配列ピッチ長 λ は 44.5 m である。以下では、記述の簡略化のため、図-2 の堤体を H 型堤体、図-3 の堤体を E 型堤体と称することにす。

b) 直立壁の場合 (完全反射条件)

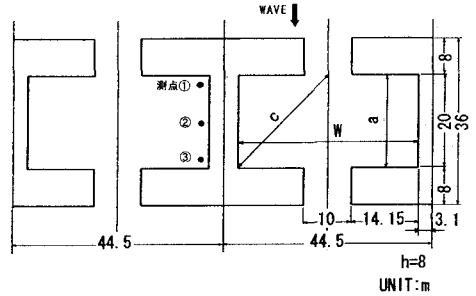


図-2 H 型堤体の平面形状および平面寸法

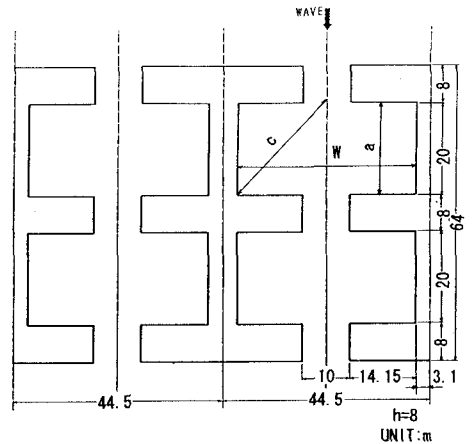


図-3 E 型堤体の平面形状および平面寸法

i) 透過波高の特性：図-4, 5 は、それぞれ H 型堤体列、E 型堤体列による透過側の rms 波高比 K_T の算定結果を、横軸に λ/L をとり示す。図中には、比較のため、それぞれの堤体の装置部分を埋め戻した矩形堤体列 (以下、埋め戻し堤体列と称す) による K_T の算定結果についても併せ示してある。図中で、◆印は横波共振点、▼印は後述する堤体形状に特有な共振点を示す。また、 T_{∞}, T_c はそれぞれ、電気的等価回路での減衰極周波数および減衰極周波数の条件に対応する周期条件を示す。ここで、減衰極周波数とは透過波が極小となる周波数を、減衰周波数とは透過波が減少しはじめる低周波側の周波数のことである。

これらの図より、 K_T は、H 型堤体列および E 型堤体列の両者共に、 λ/L が 0.5 から 0.9 付近までの比較的長周期の波に対して概略 0.2 以下となっており、極めて波の透過が少ないことがわかる。また各埋め戻し堤体列に比較すると、フィルター装置を設けることにより、 K_T は λ/L が 1 付近を除く 0.4 から 1.4 までの広い範囲でかなり低減できることも認められる。そして、この低減可能な周期帯は、フィルター理論での設計周期帯 (減衰周波数より高周波側) にほぼ対応しており、電気的等価回路

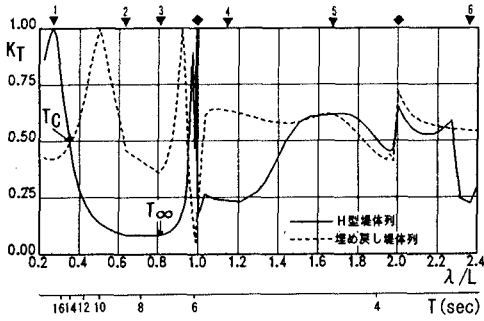


図-4 H型堤体の透過側の rms 波高比 K_T

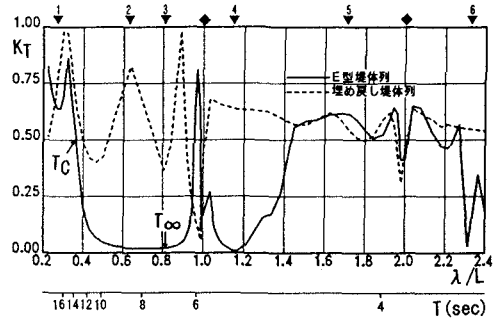


図-5 E型堤体の透過側の rms 波高比 K_T

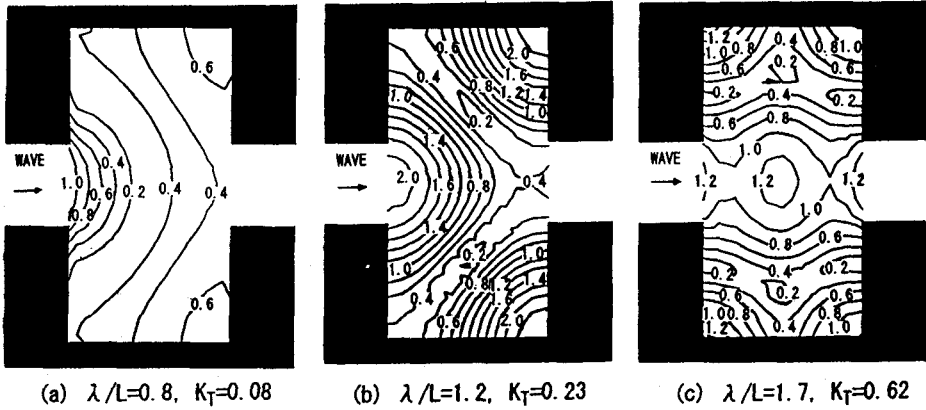


図-6 H型堤体内の波高分布

を用いた手法の有効性を示すものと言える。

H型およびE型堤体の結果を比較すると、E型では λ/L が 0.4 から 1.4 付近の K_T に見られるように、透過波高をより効果的に低減できることや周期による遮断特性がよりシャープであることがわかる。しかしながら、両堤体で制御可能な周期帯は、ほぼ同範囲と差異が見られない。

ii) 装置内の波高分布：表-1は、図-2, 3の各装置の平面寸法と波長との関係を示すもので、従来の研究(中村ら, 1990a)で指摘されているような波浪共振モードと密接な関係があると推定される条件を列挙してある。そして表中の1~6の数字は図-4, 5中の▼印上の数字に対応している。図-6(a)~(c)はそれぞれ図-3中のNo. 3, 4, 5の波条件下での装置内での波高分布を入射波高との比 K_D のコンターで示す。これらの図より、 K_T が小さくなるためには、図-6(a), (b)に見られるように、装置の透過側の開口部に節が形成されるようなモードになる必要があることや波浪フィルター装置ではこのようなモードが広い周期帯で持続することなどがわかる。なお、No. 1の波条件に対応する共振モードは、装置内の水域全体が同位相で上下する、いわゆるピストンモードと呼

表-1 装置の平面形状と共振点の関係

	λ/L	a/L	W/L	c/L	モードの概要
1	0.269	0.12	0.23	0.17	ピストンモード
2	0.639	0.29	0.55	0.40	W が1/2波長にほぼ等しい
3	0.807	0.36	0.69	0.50	c が1/2波長にほぼ等しい
4	1.168	0.52	1.01	0.73	a, W が1/2波長の整数倍
5	1.669	0.75	1.44	1.04	c が1/2波長の約2倍
6	2.314	1.04	1.99	1.44	a, W が1/2波長の整数倍

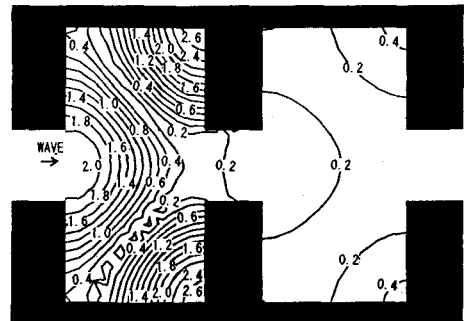


図-7 E型堤体内の波高分布
 $\lambda/L=1.2, K_T=0.01$

ばれるものに相当している。

次に、図-7は、E型堤体の装置内の波高分布の代表例を示すもので、波条件としては図-6(b)の場合に対応している。この図より、E型堤体では、反射側に位置する装置内のみで、H型堤体の場合とほぼ同様な波高変動が見られ、透過側に位置する装置内では波高変動のほとんどない静穏な水域になっていることが認められる。以上の検討より、波高の制御効果に関してE型堤体は、H型堤体より優れているものの、その差はわずかであり、しかも堤体内の共振モードからわかるように、直列配置された2つの共振水域が相乗して作用することは少なく、経済的な側面も考慮すると、H型堤体の方がより実現性のある構造物と言える。

c) 低反射工の効果：ここでは、装置の内外壁を低反射構造にしたときの波高制御効果をH型堤体を対象にして検討してみた。

低反射工の設置場所は、以下に示す4種類に変化させた。TYPE1：装置内の前後壁，TYPE2：装置内の後壁および反射側の外壁，TYPE3：装置内の側壁，TYPE4：装置の内壁の全てである。

図-8は、これら算定結果の代表例を示すもので、TYPE2の場合に相当する。図中ではrms波高比 K_T, K_R の λ/L による変化を表すもので、比較のため、低反射工無しの場合についても併せ示してある。ここで、算定に用いた低反射工の反射率は、周期にかかわらず0.6と一定にした。そして、低反射条件は壁面での部分吸収条件を近似的に考慮する方法を用いて実現せしめた。

この図より、装置の反射側の外壁を低反射条件にすると、当然のことながら反射波を有効に低減できることや、装置内壁を低反射条件にすると透過波についてもピストンモードの発生する波条件および $\lambda/L > 1$ の短周期波に対して減勢効果が期待できることなどが認められる。

ここでは割愛するが、その他のTYPEの装置についても、透過波高の低減効果は、ほぼ図-8に示す程度であることが確認されており、その効果は低反射工の位置にあまり関係しないことなどが判明している。また、装置内の波高は、後述するように、低反射工を設けることにより有意に低減できるが、現れる波高分布は低反射工無しの場合とほぼ相似形であることも確認しており、ここに付記しておく。

3. H型堤体列に対する実験結果

3.1 実験装置及び実験方法

a) 実験装置：実験に用いた模型堤体は、前節での理論的検討に用いたH型堤体列のみとした。模型堤体の寸法は、図-2の現地堤体を1/44.5の縮尺で模型化したものを用いた。装置の内外壁の条件としては、低反射工無

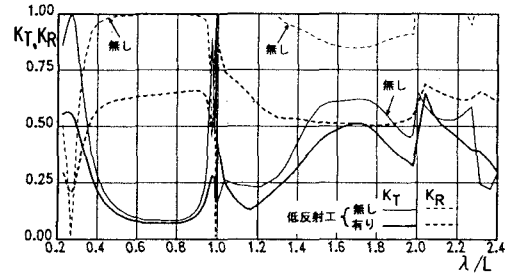


図-8 低反射工を有するH型堤体列 (TYPE 2) のrms波高比

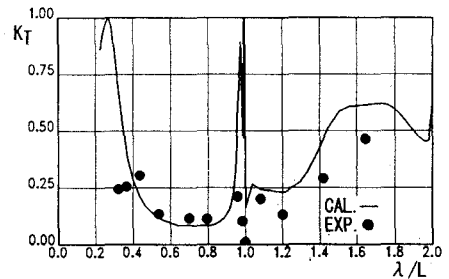


図-9 低反射工無しのときの K_T

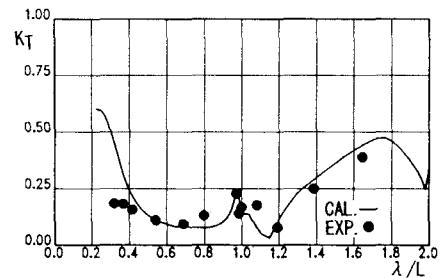


図-10 低反射工有り (TYPE 1) のときの K_T

しの場合に加えて、上記のTYPE 1, 2の計3種類を採用した。低反射工は、該当する不透過壁を取り除いた面に約2cmメッシュの金網を張り、その中に碎石を投入したもので代用した。このときの消波工幅はほぼ16cm程度である。

実験では、幅1mの長水路に各模型堤体列の1ユニット分を設置した。これは、水路側壁の鏡像効果により、長水路内での波変形が、規則的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。

b) 実験方法および実験条件：上記の2で述べたように、堤体列まわりの波高分布は、入射波の波長と配列ピッチ長により短峰性の2次元的な波変形になる場合もある。実験ではこのことを考慮して、水路幅方向に等間隔で計5台の波高計を設置してrms波高比や波向き特

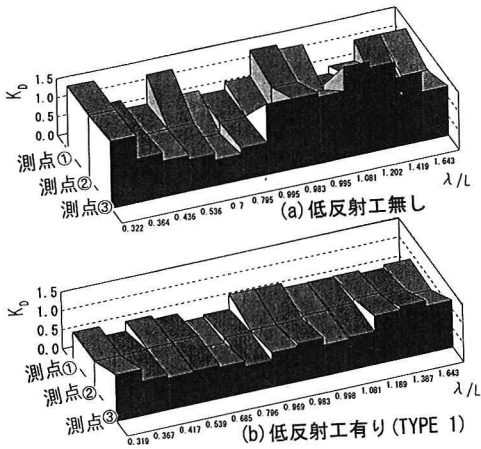


図-11 装置内の波高比

性を観測できるようにした。なお、各波向き成分波への分解には、中村ら (1990b) により提案されている方法を用いた。

実験時の水深 h は 18 cm と一定にした。また、模型堤体に作用せしめた入射波の周期 T は 0.66 sec から 2.4 sec ($0.32 \leq \lambda/L \leq 1.56$) の 13 種類とし、入射波の波高は約 4.5 cm 程度とした。

3.2 実験結果と算定結果の比較

図-9 は、低反射工無しときの H 型堤体列の透過側の rms 波高比 K_T の実験結果と算定結果の比較を示す。また、図-10 は、共振装置内に低反射工を設けた場合 (TYPE 1) の結果を同様にして示すものである。なお、低反射工を設けた場合の算定には、低反射工よりの反射率が become 必要になるが、これについては、別途に実施した 2 次元実験により測定された反射率を採用した。これらの図より、低反射工無しときの横波共振点 ($\lambda/L=1$) 付近およびピストンモードの共振が現れる近傍を除けば、実験結果と算定結果はほぼ一致しており、上記 2 で紹介したような理論的考察は妥当なものと言えよう。そして、両図の比較から、低反射工を設けることにより、 K_T は若干低下するが、全体としては両者の間に大差ないことなどが再確認される。

図-11(a), (b) は、それぞれ低反射工無しおよび有り (TYPE 1) の場合の図-2 中に示す装置側壁近傍の測点 ①, ②, ③ での波高の λ/L による変化を示す。ここで波高値は、入射波高との比 K_p で表してある。これらの図から、低反射工を設けると、装置内の波高はそれがない場合に比べて有意に低減されることがわかる。このように装置内に低反射工を設けると、装置内の波高を低く保ったまま背後域の透過波高についても有効に制御することが可能と言えよう。

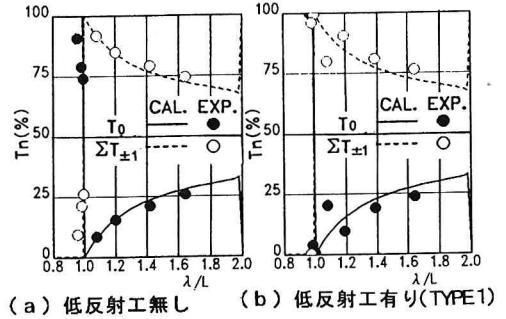


図-12 透過波の波向き特性

最後に、図-12(a), (b) は、それぞれ低反射工無しおよび有り (TYPE 1) のときの、透過波の波向き特性に関する実験結果と算定結果の比較を示す。これらの図より、各堤体条件下での波向き成分比は実験値と算定値でほぼ一致していることや堤内外壁を低反射構造にしても、波向き成分の構成比は変化しないことなどが確認できる。

4. 結 語

(1) フィルター理論により設計された共振装置型堤体列では、その設計周期帯に対して透過波を有効に低減することができる。そして、共振装置を 1 基設置した H 型堤体と 2 基直列に設置した E 型堤体では、後者の方が透過波の制御効果が優れている。

(2) フィルター理論に基づく共振装置型堤体では、その内外壁を低反射構造にしても透過波の制御効果はそれほど変化しないが、反射波や装置内の波高は効果的に低減できる。

(3) 低反射壁を設けた共振装置型堤体列による波浪制御効果は、壁面でのエネルギー吸収条件を考慮した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できる。

参 考 文 献

中村孝幸・小野正順 (1988): 規則配列された消波堤まわりの波浪共振の特性とその解析法, 第 35 回海岸工学論文集, pp. 527-531.
 中村孝幸・小野正順・長田和久 (1989): 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, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 484-488.
 中村孝幸・長田和久 (1990a): 各種平面形状を有する共振装置型堤体列の波浪制御効果について, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 529-533.
 中村孝幸・小野正順・長田和久 (1990b): 波向き特性を考慮した堤体列まわりの平面的な波変形の評価法について, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 534-538.
 望月 仁・安藤 繁・三橋 渉 (1990): 波浪周波数フィルタ, 電気学会論文誌 A, 110 A, pp. 493-500.