

港内波浪静穏化のための波浪共振装置の 組み合わせ効果について

EFFECTIVENESS OF COMBINED RESONATORS FOR HARBOR TRANQUILITY

中村孝幸¹・中山哲巖²・時吉学³・飯干富広⁴

Takayuki NAKAMURA and Nobuo TAKAKI and Akiyoshi NAKAYAMA and Manabu TOKIYOSHI and Tomihiro IIBOSHI

¹正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)

²正会員 工修 (独)水産総合研究センター-水産工学研究所水理研究室長
(〒314-0421 茨城県鹿島郡波崎町海老台)

³正会員 復建調査設計株式会社(〒732-0052 広島市東区光町2-10-11)

⁴工修 日建工学株式会社 関東Division
(〒160-0023 東京都新宿区西新宿6丁目10-1日土地西新宿ビル17F)

In order to reduce waves height in the harbor for wide range of wave frequency, a combination of two resonators with different properties is proposed and examined. As an alternative of a rectangular resonator, a modified resonator with a single rectangular basin on one side and an open-ended parallel basin on the other side are newly proposed to decrease wave height in the resonator. To confirm the effectiveness of the combined resonators, numerical simulations and physical model tests are carried out for simplified harbor models, in which the combined resonators are installed at the harbor entrance.

Key Words : combined resonators, modified resonator, harbor tranquility, resonant basin flow field

1. 序論

港湾や漁港においては、通常波浪からうねり、そして長周期波の作用など厳しい波浪条件下にあることが多い。既に著者ら¹⁾は、港口部を直接的に外洋に向けて開くことができ、船は通すが波は遮断する波浪共振装置の港湾への適用性について検討してきた。その結果、波浪共振装置を港口部に設置することで効果的に港内を静穏化できるものの、うねりなど比較的長周期の波を対象にすると、通常波浪など短周期波に対して効果が十分でないなど有効周期帯が限定されることや装置内の波高が増大しやすいなどの欠点があることを示した。

そこで本研究は、まず有効周期帯の拡大を目的に、異なる2つの波浪共振装置を直列に組み合わせる組み合わせ型共振装置を提案し、その静穏化効果を理論と実験により検討する。この際、2つの波浪共振装置を組み合わせることで生じる相乗効果やそれに伴う副作用などの影響について単独形式の波浪共振装置との比較から明らかにする。また、装置内の波高の低減化を目的として半平行堤型共振装置を提案し、それによる波高低減化についても検討する。

2. 単独の共振装置の特性と装置内波高の低減化

(1) 矩形型共振装置の効果と特性

ここでは、波浪フィルタ理論²⁾に基づき基本となる矩形形状の波浪共振装置を設計した。表-1は、設計条件と併せてその結果を示すもので、波浪共振装置の諸寸法を遮断特性と併せて示す。なお、表中の T_c および T_{int} は、それぞれ臨界周期および減衰極周期を表し、残りの記号は共振装置の寸法に関する。

図-1は、この矩形共振装置の概略図および港口部への設置状況ならびに港湾平面モデルを示す。以下では、鉛直線グリーン関数法に基づく理論解析³⁾と平面波浪実験から、図-1に示す基本となる矩形型共振装置の効果と特性を装置を設けない原型港湾の結果と比較して検討した。

a) 港内の平均波高比

図-2は、港内平均波高比 (Kd)_{av} の算定結果および実験結果を示す。この図より、港口部に波浪共振装置を設置すると、波浪フィルタ理論で設定した有効周期帯よりも多少短周期側から港内側は有意に静穏化される傾向にある。しかし、一部で平均波高比が大きくなる周期帯が存在する。これは、港内湾奥よ

表-1 波浪共振装置の諸寸法

現地条件										
h(m)	b0(m)	Tc(sec)	Tinf(sec)	fc(Hz)	finf(Hz)	fc/finf	l2	b3(m)	b3/l2	
6.7	24.2	21.4	9.2	0.047	0.108	0.432	16.8	35.7	2.12	
実験条件(縮尺1/22)										
h(m)	b0(m)	Tc(sec)	Tinf(sec)	fc(Hz)	finf(Hz)	fc/finf	l2	b3(m)	b3/l2	
0.30	1.10	4.6	2.0	0.220	0.508	0.432	0.8	1.6	2.05	

b0:開口長, l2:共振水域長さ, b3:共振水域湾奥長

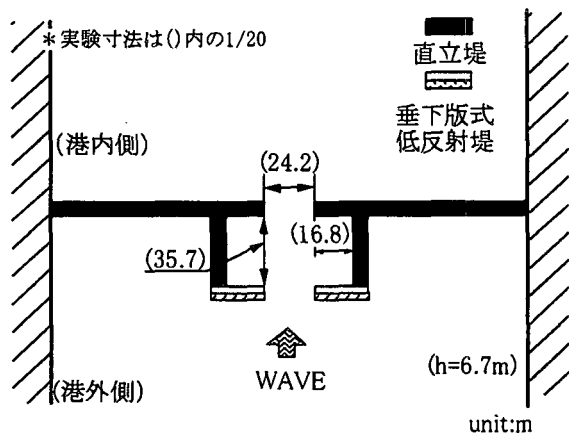


図-1 矩形型共振装置と平面配置状況

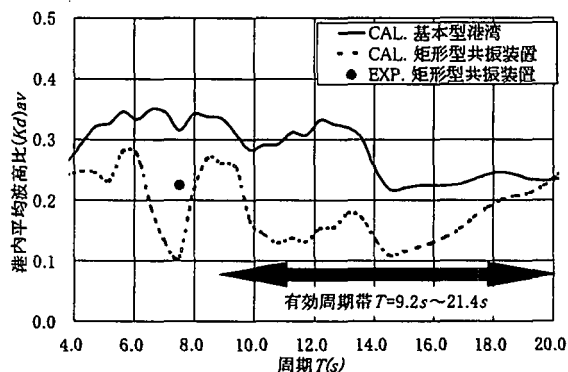


図-2 矩形型共振装置の港内静穏化効果の周期特性

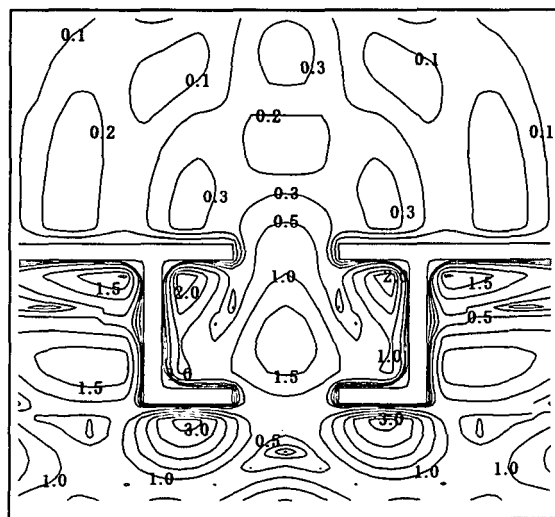


図-3 矩形型共振装置内の算定波高比の分布 (現地換算周期 $T=7.5s$)

りの反射波の影響によるものと考えられる。

b) 波浪共振装置内の波高分布

図-3は、現地換算周期 $T=7.5s$ のときの共振装置内の波高分布の算定結果を示す。この図より、港内の平均波高比(図-2参照)が十分に低減される周期帯の場合、装置内では卓越した重複波が形成され、平面的な腹・節モードが発生し、港内に伝わる波を低減していることがわかる。このように、矩形型共振装置では、港内は静穏化されるが、装置内において局所的な高波高が現れるという問題点が生じる。

(2) 半平行堤型共振装置の効果と特性

従来の研究で提案されている側壁を持たない平行堤型共振装置では、共振装置内が比較的穏やかなこと、しかしながら斜め入射に対して港内の静穏化効果が維持できないことなどが明らかにされている⁴⁾。そこで、斜め入射に対しても効果が維持できるように、図-4に示す片側に側壁を有する半平行堤型共振装置を新たに提案する。ここでは、共振装置内を一部垂下版式低反射堤とした。このため、平面波浪の理論解析を行う際、装置内の境界条件として反射率 Cr の値のみならず反射現象に伴う位相差 δ が必要になり、中村ら⁵⁾による減衰波理論に基づく断面2次元解析を用いて図-5に示す結果を事前に求めた。

以降では、垂下版式低反射堤を含む理論算定の場合、この図より得られる反射率 Cr 、反射波の位相差 δ を入力条件として用いる。

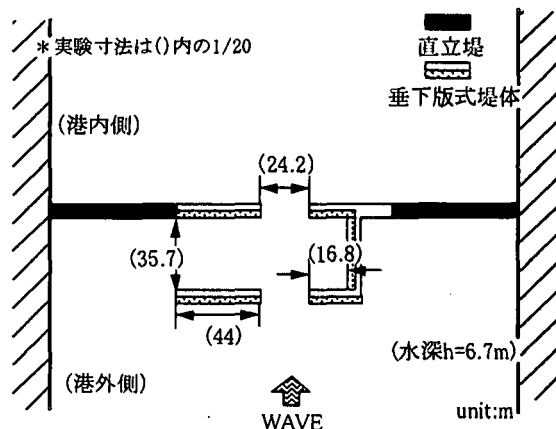


図-4 半平行堤型共振装置と平面配置状況

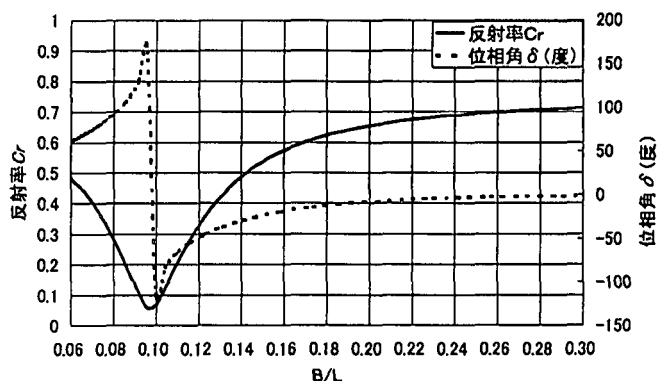


図-5 垂下版式低反射堤の反射率 Cr

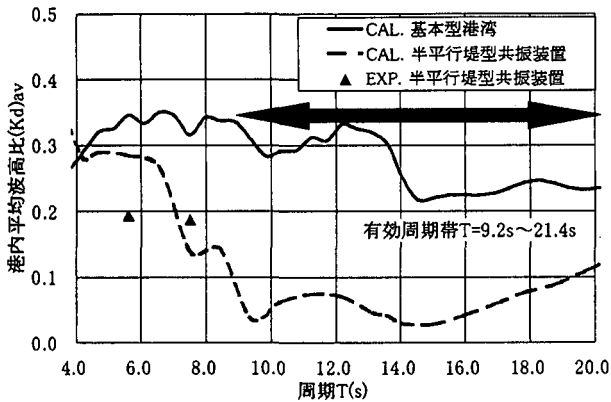


図-6 半平行堤型共振装置による港内静穏化効果の周期特性

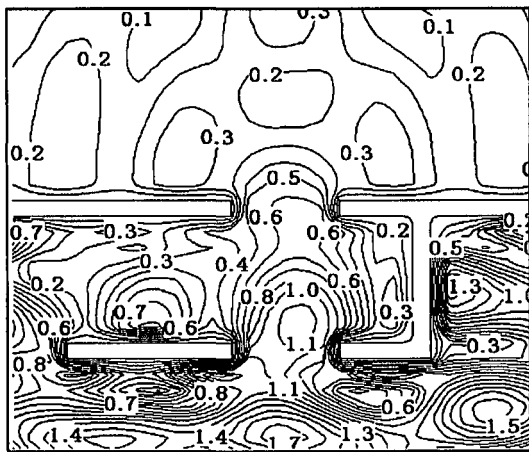


図-7 半平行堤型共振装置内の算定波高比の分布
(現地換算周期 $T=7.5$ s)

a) 港内平均波高比

図-6は、この場合の港内の平均波高比の実験結果および算定結果を示す。この図より、半平行堤型共振装置を設置することで、有効周期帯全域で効果的に港内が静穏化されていることがわかる。また、矩形型共振装置の結果(図-2参照)と比較すると、周期 $T=8$ s付近において港内の平均波高比が極大値を示す傾向も改善されており、より安定した静穏化効果が得られるといえよう。

b) 波浪共振装置内の波高分布

図-7は、現地換算周期 $T=7.5$ sのときの算定波高比の分布を示す。この図より、有効周期帯内であるが港湾の港口部入り口付近に多少高い波高が見られる。このような傾向を示す要因は、港湾境界からの反射波の位相遅れが影響を与えたことが考えられる。しかしながら、矩形型共振装置と比較して、卓越した腹節モードの波面形状は見られず、比較的穏やかな波高を示す傾向にある。

以上のことから、本研究で提案した半平行堤型共振装置は矩形型共振装置と比較して、装置内の局所的な高波高を抑制し、しかも港内を有意に静穏化できる防波施設といえる。しかし、遊水室型の垂下版式低反射堤のように作用波の周期による反射波の位

相遅れの変化が有意な堤体では、反射波の位相遅れが共振装置による静穏化効果に大きな影響を与えることもあり、位相遅れを適切に評価して設計する必要がある。

3. 装置内航路部の流速場

波浪共振装置内に生じる流速は、装置内を航行する船舶にとって重要になると考えられる。ここでは、図-8に示す波浪共振装置内の航路部に相当する位置での流速場を対象に実験及び理論算定を行った。

(1) 矩形型共振装置

図-9は、矩形型共振装置を港口部に設置したときの波高比と流速比の実験結果を示す。ここでは、微小振幅波理論に基づく入射波による相当水深位置 $Z=-10$ cmでの水平流速振幅 V_0 で無次元化を行った。この図より、共振装置内の航路部においては、波高

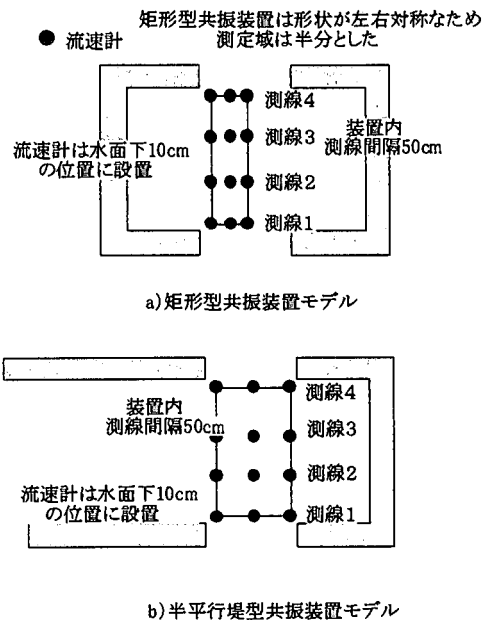


図-8 共振装置内の流速測定地点

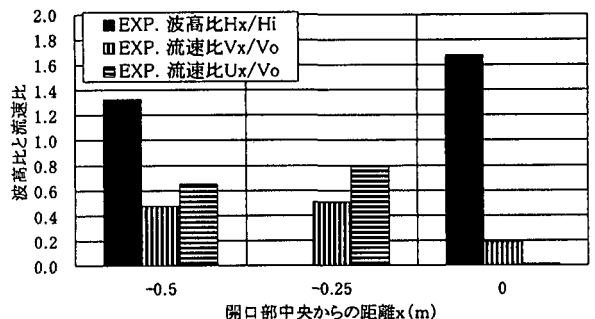


図-9 矩形型共振装置内の流速特性の実験結果(測線3)

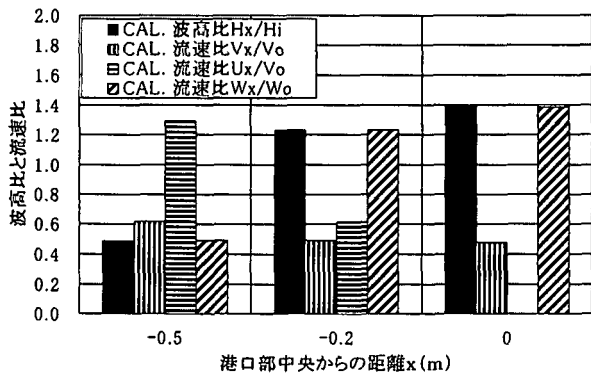


図-10 矩形型共振装置内の流速特性の算定結果(測線3)

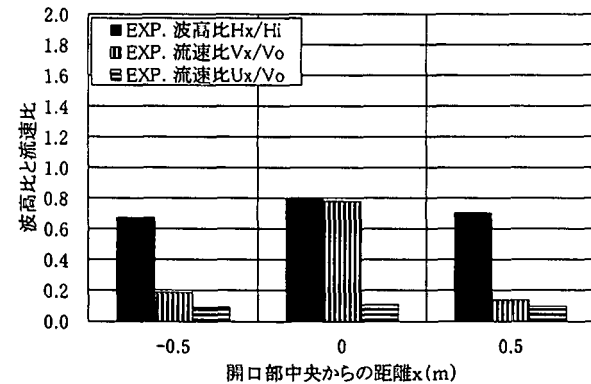


図-11 半平行堤型共振装置内の流速特性の実験結果(測線3)

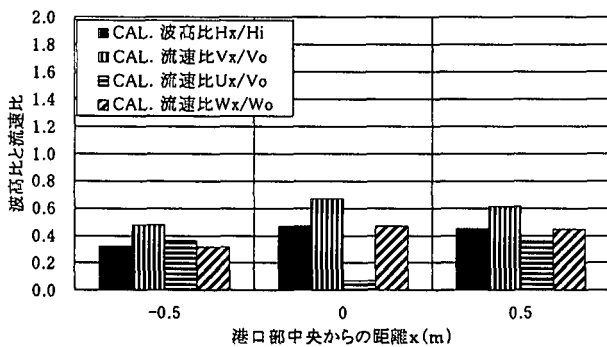


図-12 半平行堤型共振装置内の流速特性の算定結果(測線3)

比は最大で1.6程度の値を示す。これに対し、水平流速は、最大でも入射波により誘起される流速程度であることがわかる。特に、x方向(波向きと垂直方向)の流速 U_x は十分に小さなものであることが確認できる。

図-10は、このときの理論算定の結果を示す。この図より、鉛直方向の流速成分は波高比に依存する傾向を示し、水平方向流速に比べ大きな値を示すので、注意が必要といえる。

(2) 半平行堤型共振装置

図-11は、半平行堤型共振装置を港口部に設置したときの波高比と流速比の実験結果を示す。この図より、半平行堤型共振装置を設けた場合、共振装置内航路部に生じる水平流速は、矩形型共振装置の場合に比較すると多少大きくなるものの、最大でも入射波により誘起される流速程度であることが確認で

きる。

一方、図-12はこのときの理論算定による結果を示す。この図より、算定結果では装置内の波高比が矩形型共振装置に比べると小さくなる。そのため、波高に依存する鉛直方向の流速も小さくなり、最大でも入射波により誘起される流速程度の大きさであることがわかる。

以上のことより、共振装置内の航路部での流速は矩形型の場合、主に鉛直流速が卓越しやすいことや、半平行堤型に変更するとこの鉛直流速が有意に低減することが判明した。

4. 組み合わせ型共振装置の効果

ここでは、有効周期帯の拡大を目的に提案した組み合わせ型共振装置の効果、そして組み合わせることにより生じる干渉効果について検討を行う。組合せに用いる装置は、やはり波浪フィルタ理論により設計を行い、それを基本とした。表-2は、この結果を示すもので、共振装置の諸寸法と遮断特性を併せて示す。

(1) 組み合わせ効果の予備的検討

表-3に示す組み合わせを検討対象とし予備的検討を行う。図-13、14に組み合わせ型共振装置の港内平均波高比を単独形式の結果と併せて示す。この図より、有効周期帯が重なり合う部分では、相乗効果により静穏化効果は向上する傾向を示す。しかしながら、矩形型と矩形型の組み合わせでは、一部周期帯において干渉効果に伴う副作用の影響で静穏化効果が低下する。このように、組み合わせ型共振装置を用いる場合、2つの共振装置が干渉し合うことにより、相乗効果により静穏化効果が向上する場合もあるが、逆に副作用により悪影響を与える場合もあるので組み合わせには十分に注意が必要である。

以下では、予備的検討で最も有効周期帯全域で安定した静穏化効果が見られる、図-15に示す港外側に「半平行堤型共振装置」、港内側に「矩形型共振

表-2 波浪フィルタ理論による各共振装置の諸寸法

	現地スケール									
	h(m)	b0(m)	Tc(sec)	Tinf(sec)	fc(Hz)	finf(Hz)	fc/finf [1/2]	b3(m)	b3/l2	
共振装置#1	6.7	19.8	10.4	5.8	0.096	0.173	0.556	10.5	21.0	1.99
共振装置#2	6.7	24.2	21.4	9.2	0.047	0.108	0.432	16.8	35.7	2.12

	実験スケール(縮尺1/22)									
	h(m)	b0(m)	Tc(sec)	Tinf(sec)	fc(Hz)	finf(Hz)	fc/finf [1/2]	b3(m)	b3/l2	
共振装置#1	0.30	0.90	2.2	1.2	0.451	0.812	0.556	0.5	1.0	2.02
共振装置#2	0.30	1.10	4.6	2.0	0.220	0.508	0.432	0.8	1.6	2.05

表-3 組み合わせ効果の予備的検討の対象CASE

	港外側		港内側	
	共振装置	共振装置	共振装置	共振装置
CASE1	矩形型共振装置	矩形型共振装置	平行堤型共振装置	半平行堤型共振装置
CASE2	平行堤型共振装置	矩形型共振装置	平行堤型共振装置	半平行堤型共振装置
CASE3	半平行堤型共振装置	矩形型共振装置	平行堤型共振装置	半平行堤型共振装置

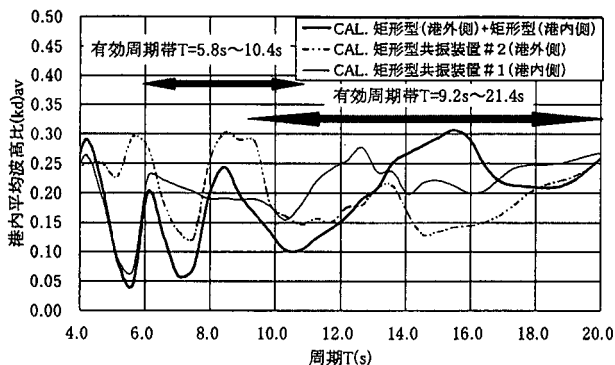


図-13 矩形型(港外侧)と矩形型(港内侧)の組み合わせによる港内平均波高比の周期特性

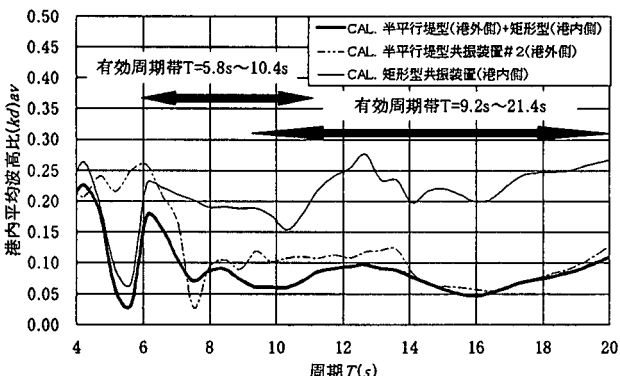


図-14 半平行堤型(港外侧)と矩形型(港内侧)の組み合わせによる港内平均波高比の周期特性

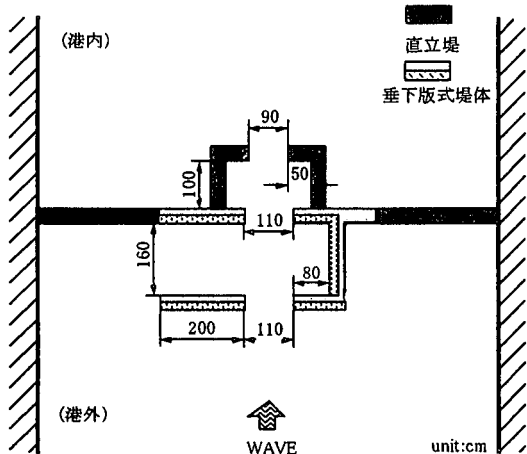


図-15 組み合わせ型共振装置の設置状況 (直角入射 $\theta = 0^\circ$)

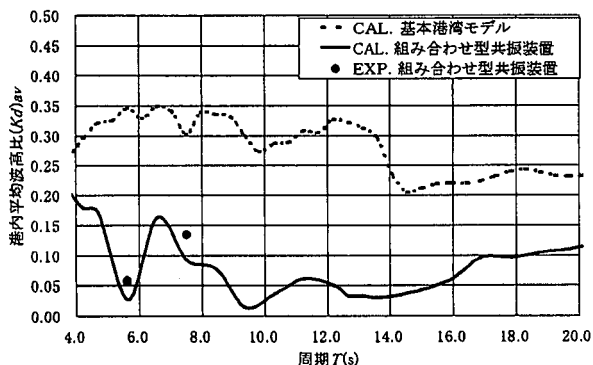


図-16 組み合わせ型共振装置の港内静穏化効果の周期特性

装置」を設けた組み合わせ型共振装置を対象に検討を進める。以下で記す組み合わせ型共振装置とはこの形状のこととする。

(2) 港内の平均波高比

図-16に組み合わせ型共振装置の港内平均波高比の実験結果および算定結果を示す。また、図中には比較のため単独形式で波浪共振装置を設置した場合の算定結果も併せて示す。この図より、単独形式の場合、有効周期帯内では有意に港内が静穏化されているが、有効周期帯外ではその効果は十分とはいえない。これに対し組み合わせ型共振装置では、単独形式では十分に効果が見られない周期帯においても静穏化効果が発揮されているのが確認できる。

このことから、異なる有効周期帯を有する2つの波浪共振装置を直列に組み合わせることで、単独形式の場合よりも有効周期帯を拡大できることが確認できる。

(3) 港内の波高分布

図-17は、現地換算周期 $T=5.6s$ 、直角入射 ($\theta = 0^\circ$) の条件下での算定結果を示す。ただし、平面スケールは模型値で表示してある。

この図より、港内では波高比が0.1程度と非常に小さく、十分に静穏化されていることがわかる。これは、港内側の波浪共振装置の有効周期帯内に相当することから、矩形型共振装置内で平面的な重複波が卓越し、岸側開口部付近に波高比が0.1程度となり、港内に伝播する波を効果的に遮断していることがわかる。

図-18は、このときの港内側での波高比の実験結果を示すもので、やはり十分な静穏化効果が再確認できる。

このように、直角入射の条件下では波浪共振装置が効果的に機能していることが確認できる

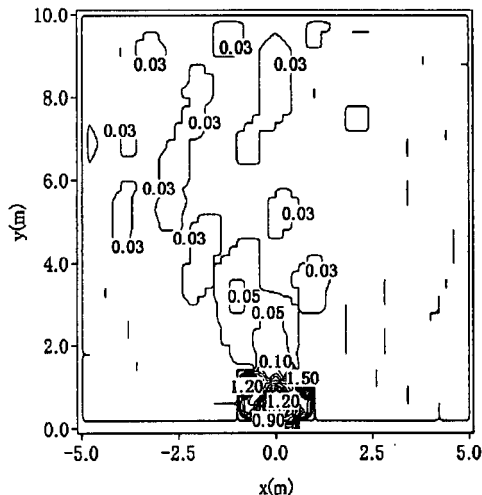


図-17 組合せ型共振装置のときの港口・港内波高比の算定結果 (直角入射, 現地換算周期 $T=5.6s$, 模型波周期 $T=1.2s$)

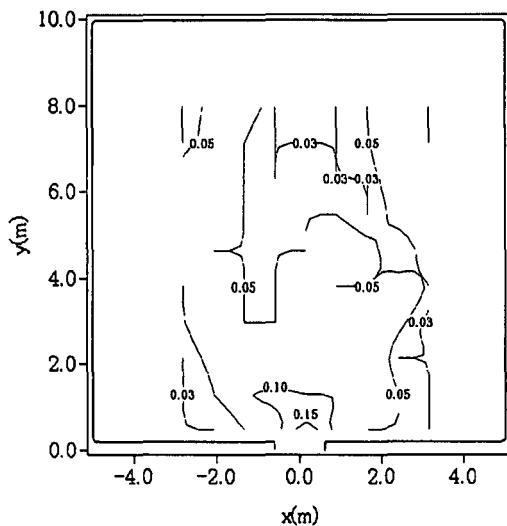


図-18 組み合わせ型共振装置のときの港内波高比の実験

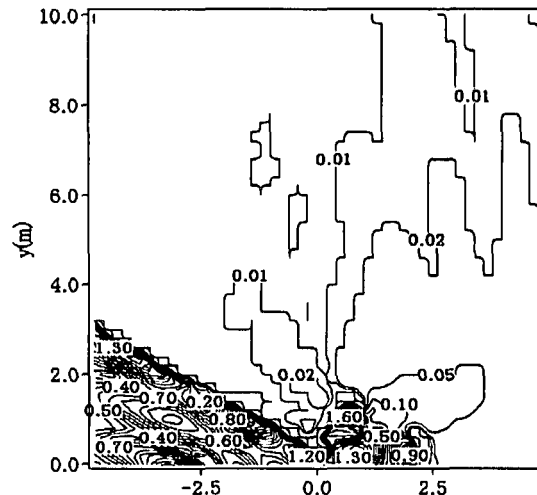


図-19 組み合わせ型共振装置のときの港口・港内波高比の算定結果
(30度入射, 現地換算周期 $T=5.6s$, 模型波周期 $T=1.2s$)

次に, 図-19は, 斜め入射 ($\theta=30^\circ$) の条件下での波高比の算定結果を示す. また図-20は, このときの実験結果に相当する.

これらの図より, 港内側においては斜波条件下でも波高比が0.1程度とやはり十分に静穏化されていることがわかる. これは, 共振装置の制御効果に加え, 港外に設置した半平行堤型共振装置が有する側壁が入射してくる波を効果的に遮断することによる影響もあると考えられる.

以上のことから, 本研究で採用した組み合わせ型共振装置は, 入射角に依存することなく効果的に港内を静穏化し, しかも単独形式の場合よりもより広い有効周期帯を有するなど性能の優れた防波施設といえる. しかし, 建設コストの面では建設費が増大してしまうなどの問題点も残されている.

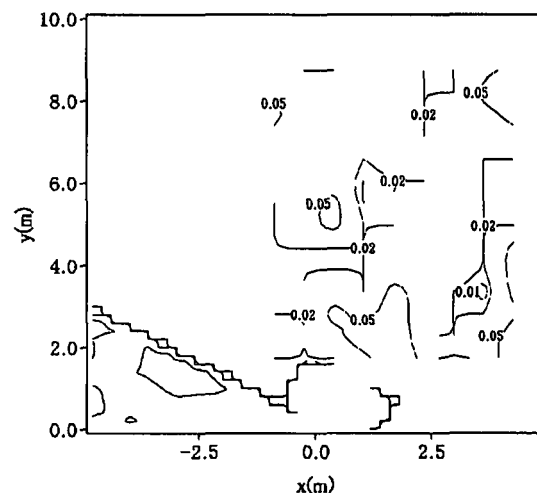


図-20 組み合わせ型共振装置のときの港内側波高比の実験結果
(30度入射, 現地換算周期 $T=5.6s$, 模型波周期 $T=1.2s$)

5. 結語

- (1) 本研究で新たに提案した半平行堤型共振装置は, 共振装置内の局所的な高波高を抑制すると同時に港内を有意に静穏化できる防波施設といえる.
- (2) 共振装置内の航路部では, 矩形型の場合, 鉛直方向の流速が水平方向の流速に比較して卓越しやすい. この鉛直方向流速は, 半平行堤型にすると平面的な重複波の形成が弱められるため有意に低減できる.
- (3) 2つの共振装置を直列に組み合わせる場合, それらが干渉し合うことで港内の静穏化効果が向上する周期帯や逆に低下する周期帯も現れることがあるので, 組み合わせに当たり十分に注意が必要である.
- (4) 本研究で検討した各種組み合わせ型共振装置の中で, 半平行堤型と矩形型の組み合わせは, 入射角に依存することなく効果を発揮することや, 単独形式よりも有効周期帯が拡大されるなど優れた効果を示す. しかしながら, 防波施設が大規模なものとなることから建設コストの面で更に検討する必要がある.

参考文献

- 1) 中村孝幸, 鈴木裕明, 森田和志: 港口部に設けた共振装置による港内波浪の静穏化効果について, 海岸工学論文集第42巻, pp. 746-750, 1995.
- 2) 望月仁: 波浪フィルタ理論, 日本音響学会誌46巻12号, pp. 998-1003, 1990.
- 3) 中村孝幸, 奥吉隆: 任意平面形状を有する堤体構造物まわりの波変形の解析法について, 海岸工学論文集第32巻, pp. 594-598, 1985.
- 4) 中村孝幸, 森田和志, 加藤孝輔: 港内波浪の静穏化のための港口部共振装置の有効性について, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 721-725, 1998.
- 5) 中村孝幸・井手善彦: 波の逸散現象を利用した隅角物体まわりの波変形と作用波力の算定法, 海洋開発論文集, 第13巻, pp. 177-182, 1997.