

超長周期波の制御を目的とする大型共振装置の 組み合わせ効果について

EFFECTIVENESS OF COMBINED RESONATORS OF DIFFERENT SIZES FOR
VERY LONG WAVES

中村孝幸¹・飯干富広²

Takayuki NAKAMURA 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学生会員 愛媛大学大学院

In order to reduce very long waves in a harbor, a combination of two large-sized resonators with different effective ranges of wave frequency is proposed. In order to understand basic properties of the combined resonators, wave transmission characteristic through an infinite array of the combined resonators was first examined theoretically. As an alternative of a rectangular resonator, a detached caisson-type resonator was also adopted to reduce the construction cost. Finally, in order to check the performance of the combined resonators for very long waves, wave-sheltering effect by the resonator for a rectangular harbor model was theoretically examined for various wave period conditions, in which the combined resonators were installed at the harbor entrance.

Key Words : combined resonators, very long waves, harbor tranquility

1. 序論

近年, 大規模港湾等においては, 港内に侵入した長周期波による大型船舶の同調現象により, 係留索の切断や荷役作業の中断等の被害が見られ, その解決策が求められている. 従来において, 著者の一人¹⁾は, 波浪フィルタ理論に基づき設計した単一式の大型港口部共振装置の有効性を実験および理論算定により検討し, その遮断特性などを明らかにした. この工法は, 比較的長周期波の制御も可能で, 装置の設計も特定の条件を与えれば容易に行える利点をもつ.

本研究では, より広い有効周期帯を有する超長周期波用の防波施設の開発を目的とし, 異なる有効周期帯を有する港口部共振装置を直列に組み合わせる方法を提案する. そして, その有効性について従来の単一式の共振装置との比較から明らかにする.

2. 大型共振装置の設計方法

本研究では, 大型共振装置の設計に波浪フィルタ理論²⁾を用いた. 波浪フィルタ理論では, 式 (1) ~ (4) において, 設置水深 h , 装置の開口長 b_0 ,

制御対象とする有効周波数帯(減衰極周波数 f_∞ , 臨界周波数 f_c)を入力として, 図-1に示す大型共振装置の残りの寸法を算出するものである. この方法は, 共振装置の設計が容易に行える利点があり, その有効性も確認されている³⁾.

$$b_3 = \frac{mb_0}{\sqrt{2(1-m^2)}} \quad \dots (1)$$

$$l_2 = \frac{1}{\pi f_c} \sqrt{\frac{gh(1-m^2)}{2}} \quad \dots (2)$$

$$l_1 = \frac{m\sqrt{gh}}{2\pi f_c} \quad \dots (3)$$

$$m = \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f_\infty}\right)^2} \quad \dots (4)$$

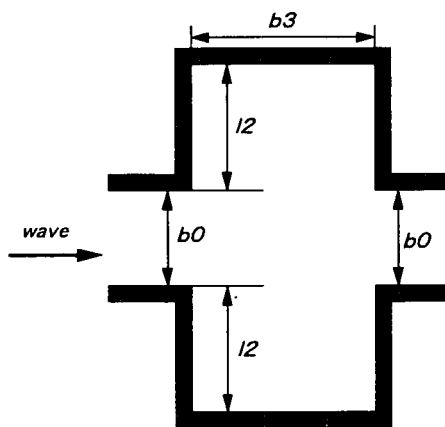


図-1 波浪フィルタ理論のモデル

表-1.(a) 大型共振装置#1の寸法

| Tc(sec) | Tinf(sec) | fc(Hz) | hinf(Hz) | fc/finf | bo(m) | m | l2(m) | b3(m) |
|---------|-----------|--------|----------|---------|-------|------|-------|-------|
| 80 | 43 | 0.013 | 0.0233 | 0.538 | 310 | 0.84 | 166 | 344 |

表-1.(b) 大型共振装置#2の寸法

| Tc(sec) | Tinf(sec) | fc(Hz) | hinf(Hz) | fc/finf | bo(m) | m | l2(m) | b3(m) |
|---------|-----------|--------|----------|---------|-------|------|-------|-------|
| 125 | 70 | 0.008 | 0.0143 | 0.56 | 520 | 0.83 | 270 | 544 |

そして、これらの式を用いて各寸法を決定する際には、物理的制約のため $2l_1 > b_3$ を満足するように設定する必要がある。

本研究では、大型共振装置#1の入力条件として、開口長 $b_0=310\text{m}$ 、有効周期帯 $43\text{s} \sim 80\text{s}$ 、水深 $h=30\text{m}$ 、大型共振装置#2の入力条件として、開口長 $b_0=520\text{m}$ 、有効周期帯 $70\text{s} \sim 125\text{s}$ 、水深 $h=30\text{m}$ を用いて異なる有効周期帯を有する2つの大型共振装置を設計した。表-1.(a), (b)に大型共振装置#1, #2の各寸法などを遮断特性と併せて示す。

3. 大型共振装置の効果

(1) 単一式共振装置

まず最初に、単一式共振装置の波浪制御効果を検討するため、図-2に示す矩形共振装置、平行堤共振装置を用いて理論算定と実験により検討した。これらの装置は、表-1.(a)の大型共振装置#1のものが採用してある。平行堤共振装置は、直角入射を仮定して矩形共振装置の岸沖方向壁を鏡像面と考えた時矩形共振装置より派生する形状で、連続配置においては、矩形共振装置と同様の波浪制御効果が確認されている¹⁾。以下では、これら共振装置の効果を理論的な面からも検討しており、その理論算定には一定水深を想定した鉛直線グリーン関数法¹⁾を用いた。

図-3は、直角入射 ($\theta = 0^\circ$) を想定した際の各港湾モデルにおける港内平均波高比(Kd)avを表

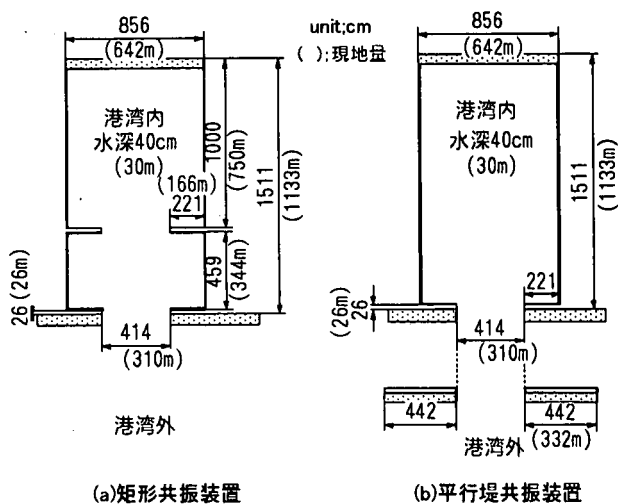


図-2 模型港湾(縮尺1/75)および現地換算量

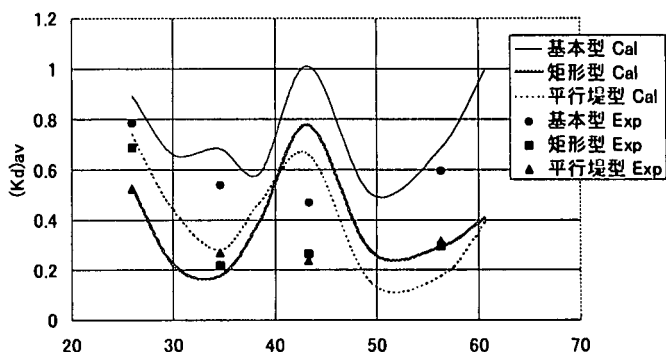


図-3 各港口形状の港内平均波高比の周期特性 ($\theta = 0^\circ$)

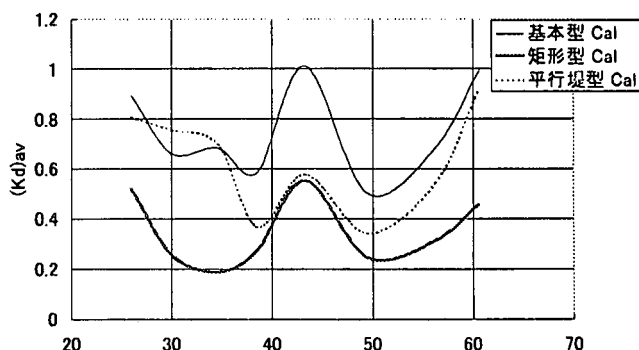


図-4 斜め入射波を作用させたときの各港口形状の港内平均波高比の周期特性 ($\theta = 30^\circ$)

す。この図より、港口部に矩形共振装置、平行堤共振装置を設けると、それのない基本港湾モデルの平均波高比に比較して、一部の周期帯を除き約5割程度低減できる。このことより、共振装置を設置することにより、比較的広い周期帯で長周期波が低減できることが分かる。

共振装置の有効周期帯に着目すると、波浪フィルタ理論での概略設計では有効周期帯 $T=43\text{s} \sim 80\text{s}$ と設定したが、実際の有効周期帯は、全体的に短周期側へと移行することが認められる。また、 $T=43\text{s}$ 付近では共振装置による遮断効果が見られなくなるが、この原因としては湾奥からの反射波が影響していることが著者の一人¹⁾により明らかにされ

ている。

図-4は、斜め入射($\theta = 30^\circ$)を想定した際の結果を示す。斜め入射波に対する平均波高比の周期特性の特徴としては、矩形型の共振装置では直角入射のときと同等かそれ以上の効果を示し、矩形共振装置の機能は入射角に依存しないことが分かる。しかしながら、平行堤共振装置は一部の周期において基本港湾モデルの平均波高比を上回るなど、斜め入射に対しては効果が低下することなど分かる。

(2) 規則的配列された組み合わせ型共振装置の効果

ここでは、組み合わせ型共振装置による港内静穏化効果を検討する前、その基本的な特性を調べてみる。具体的には、共振装置自体の遮蔽効果が検討できるように、共振装置を規則的に無限配列したモデルを想定して、それによる透過波の遮断特性を理論的に求めてみた。この理論解析法には、堤体の規則的配列を想定したポテンシャル理論⁵⁾に基づく方法を用いた。算定モデルでは、図-5に示すように、上記の#1, 2の共振装置が規則的に配列ピッチ長

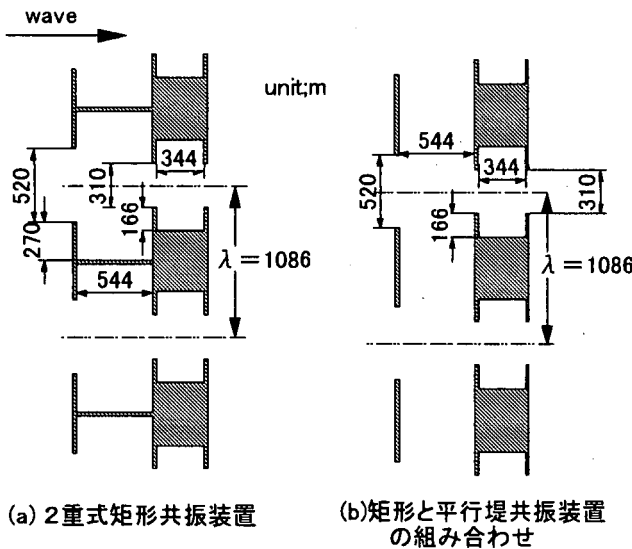


図-5 組み合わせ型港湾モデル

表-2 組み合わせ効果の検討に用いた算定CASE

| | | |
|---------------------|---------|-------------------|
| $\theta = 0^\circ$ | CASE1-1 | 基本港湾型(直角入射) |
| | CASE1-2 | 2重式矩形共振装置(直角入射) |
| | CASE1-3 | 矩形と平行堤組合せ型(直角入射) |
| | CASE1-4 | 矩形共振装置#1のみ(直角入射) |
| | CASE1-5 | 矩形共振装置#2のみ(直角入射) |
| | CASE1-6 | 平行堤共振装置#1のみ(直角入射) |
| | CASE1-7 | 平行堤共振装置#2のみ(直角入射) |
| $\theta = 30^\circ$ | CASE2-1 | 基本港湾型(斜め入射) |
| | CASE2-2 | 2重式矩形共振装置(斜め入射) |
| | CASE2-3 | 矩形と平行堤組合せ型(斜め入射) |
| | CASE2-4 | 矩形共振装置#1のみ(斜め入射) |
| | CASE2-5 | 矩形共振装置#2のみ(斜め入射) |
| | CASE2-6 | 平行堤共振装置#1のみ(斜め入射) |
| | CASE2-7 | 平行堤共振装置#2のみ(斜め入射) |

$\lambda = 1086\text{m}$ で配置されている場合を想定した。また、比較のため、開口長を310mとして、同様に配列ピッチ長 $\lambda = 1086\text{m}$ とする規則的配列された一文字堤に対する算定も行った。以下、この一文字堤モデルを基本型モデルと称する。

このような堤体列に対する透過波高の評価には、配列ピッチ長 λ にわたる透過波高のrms値と入射波高との比(K_T)rmsを用いた。算定では、一定水深30mを、また、堤体の内外壁は全て反射率 $Cr = 0.9$ とした。検討対象にした算定CASEを表-2に一括して示す。

図-6, 7は、それぞれ直角入射($\theta = 0^\circ$)のときの2重式矩形共振装置、矩形と平行堤共振装置の組み合わせ型に対する算定結果を示す。図中には、#2の共振装置を単独で設けた場合および基本型モデルに対する結果も併せ示す。これらの図より、2重式矩形共振装置、矩形と平行堤共振装置の組み合わせ型の両者ともに基本型モデルに比べ、表-1.(a), (b)に示す有効周期帯全域において透過波が低減されていることが分かる。また、#2共振装置を単独に設けた場合に比較すると、特に $T = 30 \sim 50\text{s}$ の短周期側における効果が改善されており、#1共振装置の設置効果によるといえる。このことより、異なる有効周期帯を有する共振装置を直列に組み合わせることで、より広い周期帯で長周期波の制御が可能になることが分かる。特に、両共振装置の有効周期帯が重なる周期 $T = 60 \sim 80\text{s}$ の範囲では、倍増効果により透過波高はより低くなる傾向が見られる。ただし、周期 $T = 100\text{s}$ 付近では、単独形式の

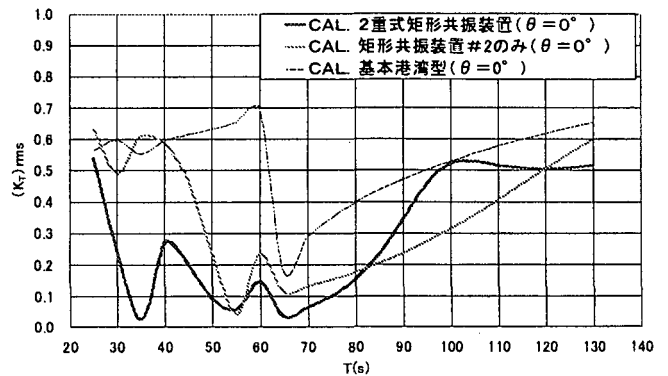


図-6 2重式矩形共振装置による遮断特性(直角入射 $\theta = 0^\circ$)

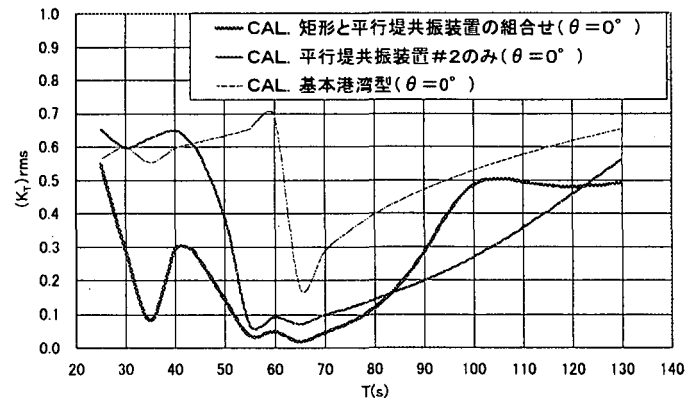


図-7 矩形と平行堤共振装置による遮断特性(直角入射 $\theta = 0^\circ$)

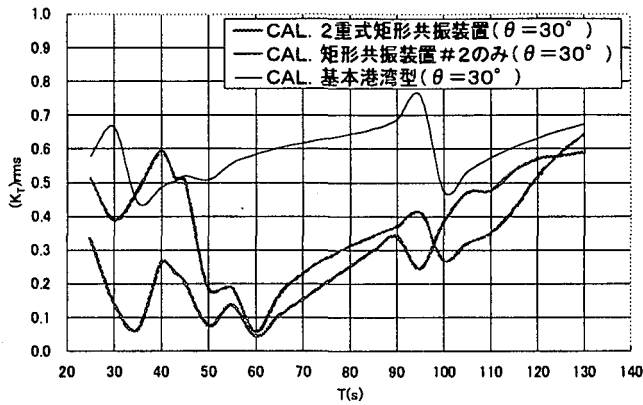


図-8 2重式矩形共振装置による遮断特性(斜め入射 $\theta=30^\circ$)

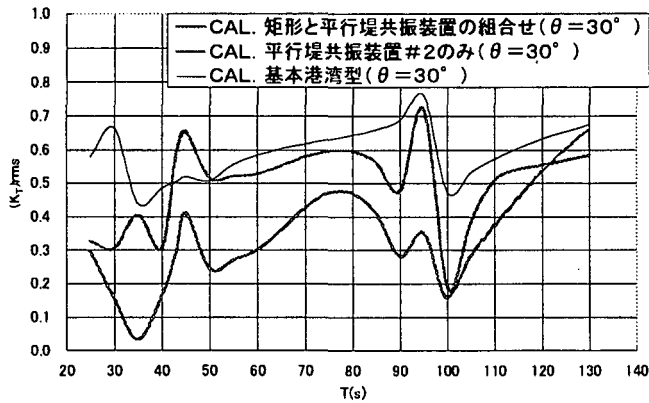


図-9 矩形と平行堤共振装置の組み合わせによる遮断特性(斜め入射 $\theta=30^\circ$)

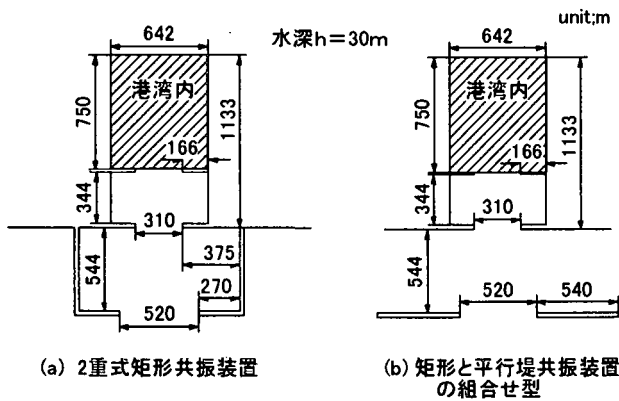


図-10 算定港湾モデル

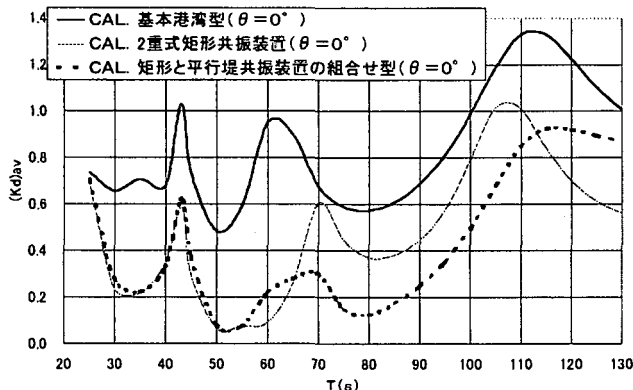


図-11 各形状による港内平均波高比の周期特性($\theta=0^\circ$)

場合よりも透過波高が増大するなどの副作用も見られ、これは両共振装置の干渉効果によるものと考えられる。

なお、これらの図で、周期 $T=65$ s 付近でいずれの堤体も一旦透過波高が極小値を示すが、これは配列堤体に特有な横波共振の影響によるもので、港口部に設置するような単独形式のときには現れにくい現象である。

次に斜め入射に関する検討を行う。図-8, 9は、入射角 $\theta=30^\circ$ のときの2重式矩形共振装置および矩形と平行堤共振装置の組み合わせ型に対する算定結果などを示す。斜め入射が作用するときにも、2重式矩形共振装置については基本的には直角入射と同様の効果が確認できる。しかしながら、矩形と平行堤共振装置の組み合わせ型では、直角入射のときよりも静穏化効果は劣る傾向が強く、特に、有効周期帯の中央付近において2重式矩形共振装置との違いが見られる。これは、外港側に設置される共振装置#2の形状の違いが影響しているといえる。

以上の検討より、2重式矩形共振装置は入射角に関係なく安定した透過波の遮断効果が期待でき、その有効周期帯もかなり広いことなどが確認された。

4. 港湾への適用性

ここでは、本研究で提案した2重式矩形共振装置および矩形と平行堤共振装置の組み合わせ型の2種類を港湾へ適用した際の港内静穏化効果について理論算定に基づき検討した。このとき対象にした港湾モデルを図-10に示す。この際、港湾内の反射率は長周期波を対象にすることから全て0.9とした。

(1) 港内平均波高比

図-11は、各港湾モデルに対し直角入射波($\theta=0^\circ$)が作用するときの港内平均波高比の周期特性を示す。ここで着目した港内とは、統一した比較が行えるように図-10中に斜線で示す内港側とした。

この図より、組み合わせ型共振装置を港口部に設置すると、有効周期帯全域で装置のない基本型港湾よりも低い港内平均波高比を示す。構造形式による

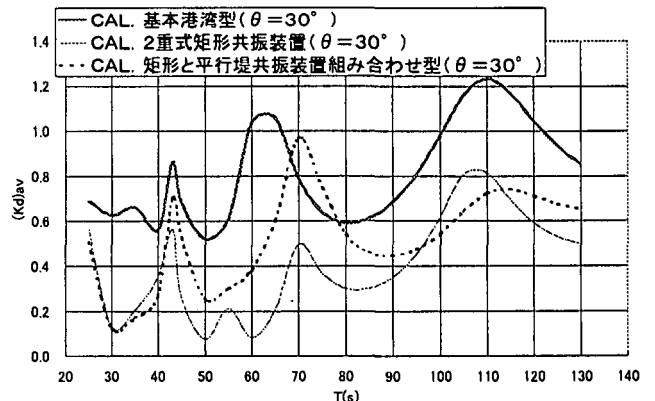


図-12 各形状の港内平均波高比の周期特性($\theta=30^\circ$)

差異は、短周期側では見られないが、長周期側では平行堤型共振装置との組み合わせの方が静穏化効果は高い傾向にある。そして、両組み合わせ共振装置共に、前出の配列形式の場合に見られないような平均波高が極大を示す周期条件が見られる。これは単一形式の共振装置の場合に指摘した、湾奥からの反射波が共振装置の内港側の港口部に腹を形成するなどして悪影響を及ぼすことによる。

図-12は、斜め入射($\theta=30^\circ$)が作用するときの結果を同様にして示す。斜め入射に関しては、組み合わせ形式による違いが見られ、矩形と平行堤共振装置の組み合わせ型の方は、港内静穏化効果が劣るようになるのに対し、2重式矩形共振装置では効果が向上している。これは、上記までの検討でも確認されているように外港側の平行堤共振装置の影響によるものである。

これらの傾向は、図-3、4で示した単一式共振装置を設けた場合のそれと酷似している。そして、図-11、12の周期 $T=30\text{ s} \sim 60\text{ s}$ の範囲の平均波高比に着目して、単一式共振装置と港内静穏効果の比較を行うと、直角入射の条件では、周期 $T=30\text{ s} \sim 40\text{ s}$ では両者にさほど大きな違いはない。しかし、 $T=50\text{ s} \sim 60\text{ s}$ では組み合わせ型共振装置の相乗効果が現れるため、平均波高比は0.1以下程度と半減する。そして、この傾向は、斜め入射の条件においても同様に確認される。

以上の検討より、組み合わせ型共振装置では、異なる有効周期帯を有する2つの共振装置の相乗効果により、単一式共振装置よりも広い周期帯で長周期波に対する港内静穏化効果が期待できる。しかしながら、その効果は組み合わせる共振装置の形状および遮断効果の特性や入射波の波向きなどにより異なることなどが判明した。

(2) 港内波高分布

図-13、14、15は、波周期 $T=55\text{ s}$ の直角入射の条件下での基本港湾、2重式矩形共振装置、矩形と平行堤共振装置の組み合わせ型のときの港内波高分布を示す。

これらの図より、基本型港湾においては、港内に腹・節モードの波が侵入し、港内静穏を乱していることが分かる。これに対し港口部に組み合わせ型共振装置を設置すると、港内側にはほとんど波が侵入することはなく、港内が効果的に静穏化される。また、組み合わせ型共振装置においては、内港側の共振装置内では非常に波高比が小さくなり、このことが港内の静穏化を促進する原因になっていることが再確認できる。

ただし、2重式矩形共振装置の場合には、特に港外側の共振装置内で高波高が出現する傾向が強く、注意する必要がある。そして、外港側の共振装置として平行堤型を用いると、航路部における高波高は有意に低減でき、実際場に適用しやすい防波施設と考えられる。

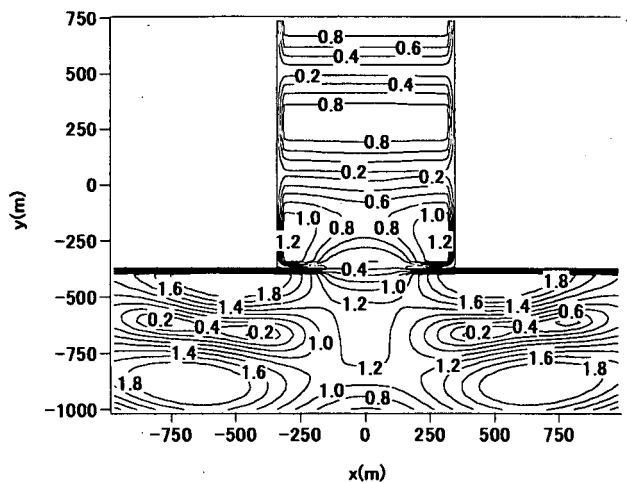


図-13 基本型港湾の平面波高分布の算定結果($T=55.0\text{ s}$)

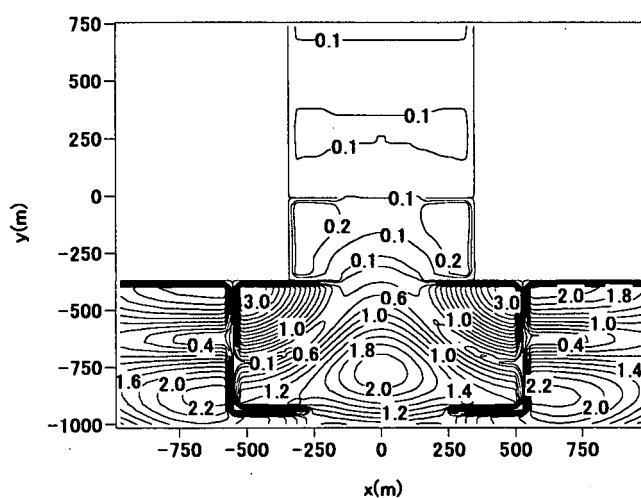


図-14 2重式矩形共振装置のの平面波高分布の算定結果($T=55.0\text{ s}$)

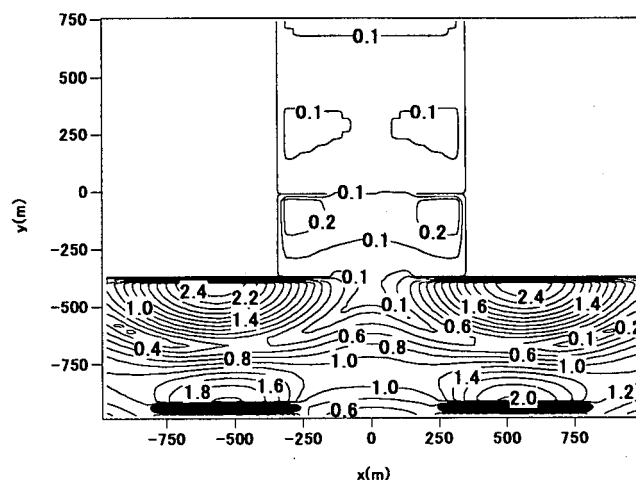


図-15 矩形と平行堤共振装置の組み合わせ型の平面波高分布の算定結果($T=55.0\text{ s}$)

5. 結語

(1) 波浪フィルタ理論により設計した共振装置は、矩形共振装置、平行堤共振装置ともに基本港湾に比べて有意に超長周期波を低減できる。この時、有効周期帯は波浪フィルタ理論で設定した条件よりも短周期側へ移行することや、湾奥よりの反射波の影響により港内平均波高が高くなる周期条件のあることなどが確認された。

(2) 有効周期帯の異なる2つの共振装置を直列に組み合わせると、より広い周期帯にわたり超長周期波の制御が可能になる。そして、両装置の相乗効果により、単一式の場合に比較して静穏化効果が向上する周期条件もあるが、逆に効果が低下する周期条件も見られ、組み合わせには注意を要する。

(3) 直列に共振装置を組み合わせるとき、直角入射波に対する2重式矩形共振装置、矩形と平行堤共振装置の組み合わせ型の効果の間にはそれほど有意な差は見られない。しかしながら、斜め入射波の条

件では、平行堤共振装置を組み合わせに用いると効果は低下する傾向にある。

参考文献

- 1) 中村孝幸, 森田和志, 竹本剛: 大型共振装置による矩形掘込み港湾での超長周期波の遮断特性について, 第48回海岸工学論文集, pp.776-780, 2001.
- 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, 國富將嗣: 長周期波制御のための外港型共振装置に関する研究, 海岸工学論文集第44巻, pp.716-720, 1997.
- 4) 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.
- 5) 中村孝幸, 小野正順: 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回海岸工学論文集, pp.527-531, 1988.