

# 三重壁式カーテン防波堤の効果に及ぼす 入射角と内部隔壁の影響について

PERFORMANCE OF A TRIPLE-WALLED BREAKWATER WITH DIFFERENT  
DRAFT IN OBLIQUELY INCIDENT WAVES

中村孝幸<sup>1</sup>・中山哲巖<sup>2</sup>・久保田二郎<sup>3</sup>

Takayuki NAKAMURA, Akiyoshi NAKAYAMA and Jiro KUBOTA

<sup>1</sup>正会員 工博 愛媛大学工学部助教授 環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)  
<sup>2</sup>正会員 (独立)水産総合研究センター 水産工学研究所 水産土木工学部水理研究室長  
<sup>3</sup>学生会員 愛媛大学大学院 理工学研究科環境建設工学専攻 (〒790-8577 松山市文京町3)

We have proposed a triple-walled breakwater with different draft depths, which is supported by steel piles. It aims to reduce both transmitted and reflected waves for comparatively long waves such as swells. In this study, performance of such a breakwater in obliquely incident waves is examined experimentally and theoretically. Effect of partition or separation walls between the breakwater units on the performance is extensively examined. It is confirmed that the triple-walled breakwater is effective for obliquely incident waves in the same manner as the normal incidence. In oblique waves, however, the installation of partition walls is strongly recommended to reduce the reflected wave for comparatively long waves.

**Key Words:** Triple-walled breakwater, Support pile, Oblique wave, low reflection and transmission, Partition wall

## 1. はじめに

杭式防波堤であるカーテン防波堤は、軟弱地盤への建設が可能であることや、水面付近のみをカーテン壁で遮断することから効率よく透過波を低減できることおよび堤体下部を通しての海水交換機能を有するなどの利点を有する。また、透過波のみならず反射波の低減も可能な杭式防波堤として、異吃水の二重式カーテン防波堤などが提案されている。しかしながら、従来において対象海域は、主に比較的短周期の風波などが卓越する瀬戸内海など内海に限定されていた。

一方、著者ら<sup>2)</sup>は、うねりなど比較的長周期の波が卓越する海域に対しても波浪制御効果が期待できる杭式防波堤として、図-1に示す異吃水三重壁で構成されるカーテン防波堤を提案した。そして、その断面設定法や効果などを明らかにしてきた。この防波堤は、第一カーテン壁と第二カーテン壁および第二カーテン壁と第三カーテン壁で構成される2つの遊水室内でのピストンモード波浪共振を利用することで、広い周期帯に対して反射波エネルギーが逸散できる特徴を持つ。また、透過波の低減には、図-1に示すように遊水室下部に水平版を設けると効果的であることも判明している。

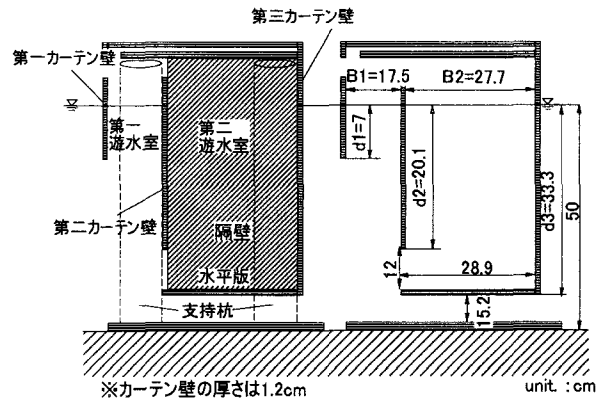


図-1 模型堤体の形状と寸法

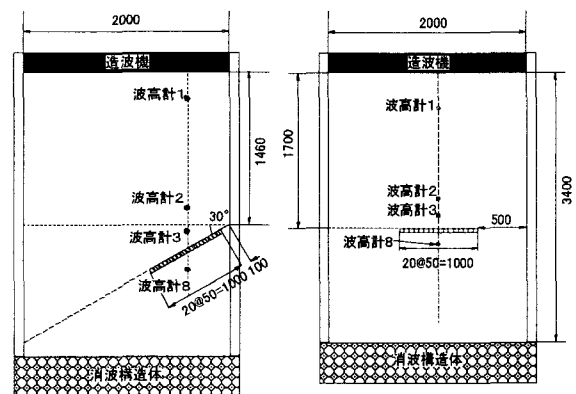


図-2 模型堤体の設置図(unit:cm)

しかしながら従来の研究は、主に断面2次元的な検討に限定されており、実際場で遭遇するような平面的な波浪制御効果については知られていない。本研究は、主に斜め入射波に対する三重壁式カーテン防波堤の反射・透過波の低減効果を理論と実験により明らかにする。この際、斜め入射波で問題になる、遊水室内のピストンモード波浪共振に及ぼす堤体ユニット間の隔壁の有無の影響やその消波効果に及ぼす影響などについても究明する。

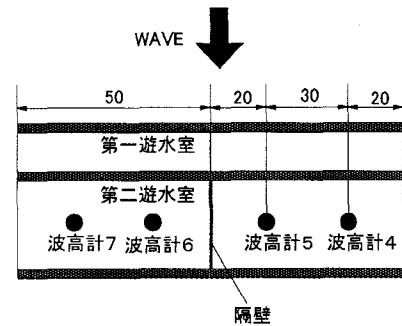


図-3 遊水室内への波高計設置図

## 2. 実験と理論算定法の概要

### (1) 実験水槽と実験装置

#### a) 実験水槽

実験に用いた水槽は、図-2に示す水産工学研究所の長さ34m、高さ1m、幅20mの3次元造波水槽である。この水槽の一端には多方向不規則波および任意方向への規則波が造波可能な造波機が、他端には端部からの再反射を防ぐために消波構造体が設置されている。

#### b) 堤体模型

実験では、図-1に示す杭式支持の模型堤体を用いた。このとき模型縮尺は1/30程度を想定した。この堤体では、二つの異なる幅・吃水の遊水室を持つことから、異なる周期条件でピストンモードの波浪共振が励起され、各遊水室前面のカーテン壁下部に強い渦が発生する。このため、広い周期帯で反射波を低減できる特徴がある。また、比較的長周期の波に対する透過波を低減するため、下部に水平版が設けてある。実験では合計20基の堤体模型を用い、直線状に配置した。なお、各カーテン壁の吃水深を入射波方向から見てd1、d2、d3とし、また遊水室幅をB1、B2として以下の説明を行う。

また、斜め入射の条件に対しては、反射・透過波の特性に及ぼす堤体ユニット間の隔壁の有無の影響が検討できるように、隔壁ありとなしの両堤体を用いて実験を行った。隔壁の設置状況は図-1左のとおりで、第二遊水室を堤体ユニットごとに分離するように設置している。

#### c) 波高計

反射波、透過波を測定するための波高計は、図-2のように堤体列の中央から、造波機に対して直角をなすような直線上に配置した。このとき、入・反射波の分離推定には、入射角と反射角が等しいことを仮定した推定法を用いた。また、遊水室内波高を測定するため、図-3のように隣り合った2つの堤体ユニットの第二遊水室内に2本ずつ波高計を設置した。

### (2) 実験方法

表-1 各 case の実験条件

case No.	1	2	3	4	5
水深h(cm)	50				
波高H(cm)	7				
周期T条件	0.6~1.8sまで0.1s刻みで測定、加えて2.0、2.2sの計15条件で統一				
入射角	30	15	0	15	30
隔壁	あり	あり	なし	なし	なし

平面実験での入射角 $\theta$ は、直角入射( $\theta=0^\circ$ )に加えて、これより $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 傾斜させた3条件とした。代表的な堤体配置状況を図-2に示す。図中の左は入射角 $30^\circ$ の斜め入射波の条件、図中の右は直角入射と入射角 $15^\circ$ の条件の堤体の配置状況に相当する。直角入射と入射角 $30^\circ$ の実験では、造波機から直角方向に波を作用させ、また入射角 $15^\circ$ のときには堤体模型に対し $15^\circ$ 傾斜させた斜め波を造波して実験を行った。

実験では、反射波および透過波の測定に加え、隔壁の影響を現象的に把握するため、ピストンモード波浪共振に及ぼす隔壁の有無の影響を実験的に検討した。具体的には、隔壁ありとなしの両堤体に対して、遊水室内の波高変動を複数のユニットにわたり測定することで、堤体配列方向における波面モードを観測した。

### (3) 実験条件

入射角と隔壁の有無の条件を除き、水深、波高、周期の条件は、共通した一連の条件を用いた。各実験 case の条件を一括して表-1に示す。

### (4) 理論算定法

本研究では、中村・高木ら<sup>3)</sup>による、斜波中での減衰波理論を用いて各構造条件での波浪制御効果の算定を行った。ただし、理論では、隔壁があるときの算定は行えず、隔壁なしの条件に限定される。

この理論では、隅角部からの渦流れの発生等に起因するエネルギー逸散を近似的に考慮して、反射率等の算定が簡便に行える利点がある。算定では、中村・高木ら<sup>3)</sup>に習い、減衰波領域は波向きを考慮して第一、第三カーテン壁からそれぞれ沖向きおよび岸向きへ $L \sin \theta / 8$  ( $L$ :波長)までの範囲を、鉛直

方向には、水表面から水底までとした。また、等価線形抵抗係数  $f_c$  は、中村・神野ら<sup>4)</sup>により垂下版式反射波低減工に対して用いられている  $f_c=0.20$  を準用した。

### 3. 実験結果

#### (1) 入射角による消波効果の変化

##### a) 反射率

図-4, 5は、それぞれ $\theta=15^\circ$ ,  $30^\circ$ の斜め入射の条件下での反射率  $C_r$  を示す。このとき隔壁は設置しておらず、同条件下での減衰波理論による算定結果および比較のための直角入射に対する実験・算定結果も併せ示す。図中では、周期の無次元量として、波長堤体幅比  $L/B$  が用いてある。ここで、 $B$  は全堤体幅を示す。

入射角  $15^\circ$  の図-4に着目すると、理論算定では直角入射のときの反射率と比較してほとんど入射角の影響を受けず、わずかに極小反射率の現れる条件が斜波条件下で  $L/B$  の小さな短周期側に移行しているのがわかる。しかし、この傾向は実験結果ではより顕著に現れていて、極小反射率の移行が明確に見られる。

さらに、図-5に示す入射角  $30^\circ$  のときには、理論算定においても極小反射率の短周期側への移行は明確に見られるようになり、実験結果でも同様な傾向が認められる。実験結果と算定結果の差異は、斜め入射の条件よりもむしろ直角入射の条件のときに大きく、この原因としては隔壁がないことから遊水室内の配列方向における波高変動が生じやすいことなどによるものと考えられるが定かでない。

以上のこのことから、斜波条件になると、特に長周期側に現れる極小反射率に対応する周期条件が短周期側に移行することがわかる。これは、既に中村・高木ら<sup>3)</sup>により指摘されているように、入射角が増大すると、堤軸の垂直方向における波数成分が減少し、それに対応する見掛けの波長が増大することによる。

##### b) 透過率

図-6, 7は、隔壁なしの条件で入射角  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  のときの透過率  $C_t$  をそれぞれ示す。反射率の比較のときと同様に直角入射に対する結果も併せ示す。

理論算定結果に着目すると、透過率は入射角に伴い多少ながら増加する傾向が見られる。これは、やはり上記した見掛けの波長が増大する効果によると考えられる。

一方、実験結果に着目すると、透過率の絶対値にバラツキが見られるため、明確な傾向は見出し難いが、入射角  $30^\circ$  の結果に代表されるように、透過率に及ぼす入射角の影響は同様にほとんど認められない。

そして、透過率の絶対値は、実験・算定結果共に、

$L/B$  の大きな長周期側においても  $0.4$  以下と入射角に関係なく透過波が低減できることが分かる。

#### (2) 隔壁の影響

##### a) 反射率

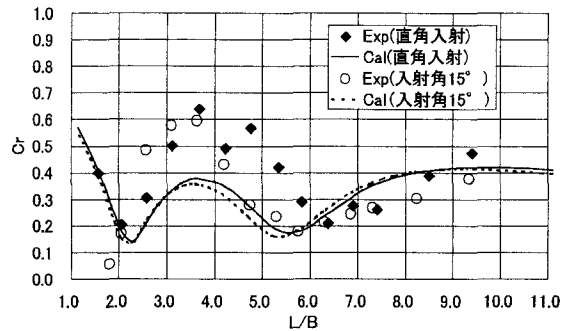


図-4 直角入射と入射角  $15^\circ$  のときの反射率の比較 ( $h=50\text{cm}$ ,  $H=7\text{cm}$ , 隔壁なし)

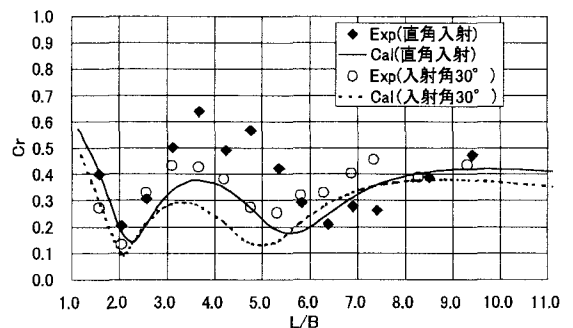


図-5 直角入射と入射角  $30^\circ$  のときの反射率の比較 ( $h=50\text{cm}$ ,  $H=7\text{cm}$ , 隔壁なし)

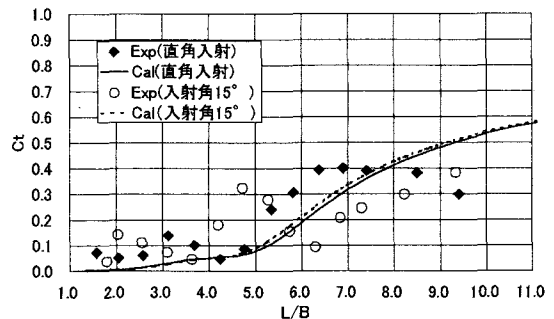


図-6 直角入射と入射角  $15^\circ$  のときの透過率の比較 ( $h=50\text{cm}$ ,  $H=7\text{cm}$ , 隔壁なし)

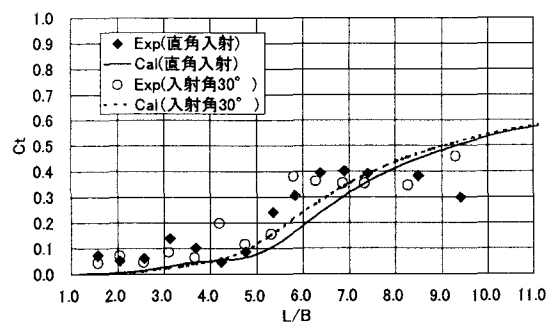


図-7 直角入射と入射角  $30^\circ$  のときの透過率の比較 ( $h=50\text{cm}$ ,  $H=7\text{cm}$ , 隔壁なし)

上記の隔壁のない条件下での検討から、斜波条件のときに異吃水三重式カーテン防波堤では長周期側に現れる極小反射率の出現条件が短周期側に移行することが判明した。このような傾向は、斜波条件下で反射波が低減できる周期帯を狭くすることになり、結果的に防波堤の効果を下げることになる。

ここでは、この対策として各堤体ユニットの間に隔壁を設けることでユニット間の水塊の移動を阻害し、ユニットで独立したピストンモードの波面運動が卓越するようにしてみた。

図-8, 9は、斜め入射波の条件のとき、各堤体ユニット間に隔壁があるときとないときの反射率の比較を示す。前述したが、減衰波理論による理論算定では隔壁を考慮することができないため、ここでは隔壁がない条件のときの理論算定結果のみを示している。

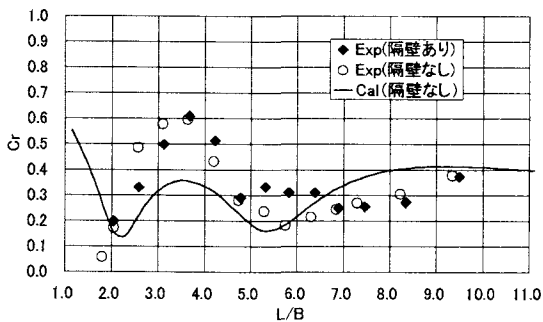


図-8 隔壁の有無の反射率への影響  
( $h=50\text{cm}$ ,  $H=7\text{cm}$ , 入射角  $15^\circ$ )

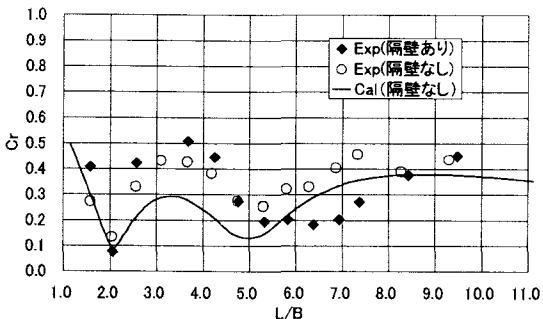


図-9 隔壁の有無の反射率への影響  
( $h=50\text{cm}$ ,  $H=7\text{cm}$ , 入射角  $30^\circ$ )

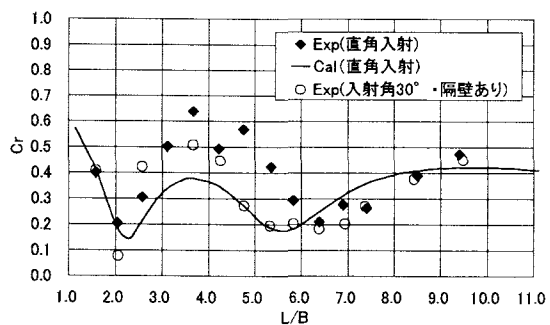


図-10 斜波条件と直角入射条件での反射率：隔壁ありのとき ( $h=50\text{cm}$ ,  $H=7\text{cm}$ )

図-8に示す入射角  $15^\circ$  のときの結果では明確でないが、入射角  $30^\circ$  のときの結果を示す図-9では、隔壁を設置することにより極小反射率を示す波長堤体幅比( $L/B$ )の条件が長周期側に移行するなど、ほぼ直角入射のときと同等の結果が得られることが分かる。このように、各堤体ユニット間に隔壁を設ける工法は、反射波低減の有効周期帯を拡大するのに効果的な方法と考えられる。

図-10は、隔壁ありのときの入射角  $30^\circ$  に対する反射率の結果と直角入射に対するそれとの比較を示す。図中に示す両結果との比較から、隔壁を設けると斜め入射の条件下でもほぼ直角入射のときと同等の反射波低減効果が得られることが再確認できる。そして、反射率の特性が入射角の影響を受けなくなる原因としては、隔壁の影響により各ユニットで独立したピストンモードの波面運動が卓越するためと考えられる。これについては、後述したい。

### b) 透過率

図-11, 12は、斜め入射の条件下で、各堤体ユニット間に隔壁があるときとないときの透過率の比較を示す。反射率のときと同様に、理論算定は隔壁がないときの結果のみを示す。

これらの図から、隔壁の有無による透過率の変化は見られず、透過波に及ぼす隔壁の影響はほとんどないことが分かる。これは隔壁が下部水平板上に設けられていることや透過波には上記したピストンモードの波面運動が関係しないことなどによると考えられる。

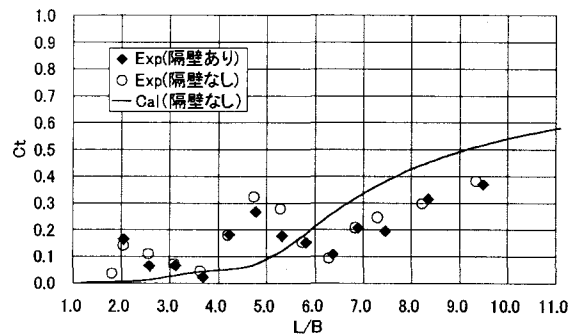


図-11 隔壁の有無の透過率への影響  
( $h=50\text{cm}$ ,  $H=7\text{cm}$ , 入射角  $15^\circ$ )

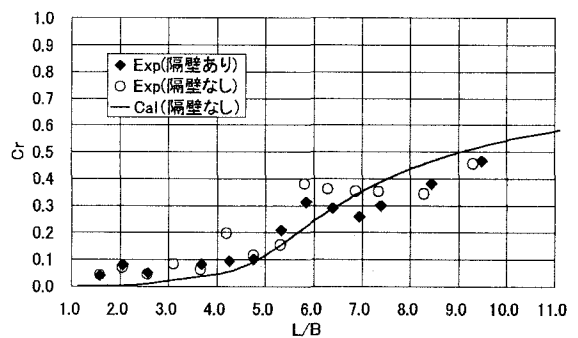


図-12 隔壁の有無の透過率への影響  
( $h=50\text{cm}$ ,  $H=7\text{cm}$ , 入射角  $30^\circ$ )

### (3) 遊水室内の水面変動

上記の検討から、堤体ユニット間に隔壁を設けると反射率の周期特性が変化することやその原因として遊水室内のピストンモードの波面運動が変化することなどを指摘した。ここでは、長周期側での極小反射率の出現に関係する第二遊水室内の水面変動に着目して、波面モードやその時系列的な特性を検討してみる。

図-13は、直角入射の条件下での第二遊水室内の水面変動の時系列を示す。ここで、波高計 No.4~7は、図-3に示す配置に相当しており、2つの隣

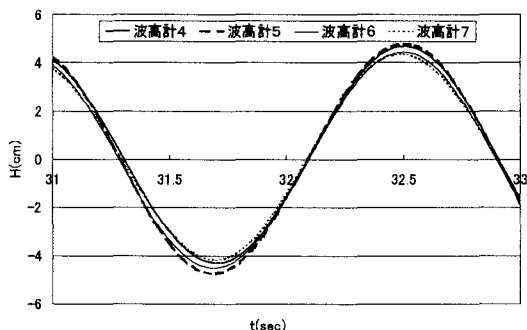


図-13 直角入射のときの遊水室内の水面変動 ( $h=50\text{cm}$ ,  $H=7\text{cm}$ ,  $T=1.6\text{s}$ )

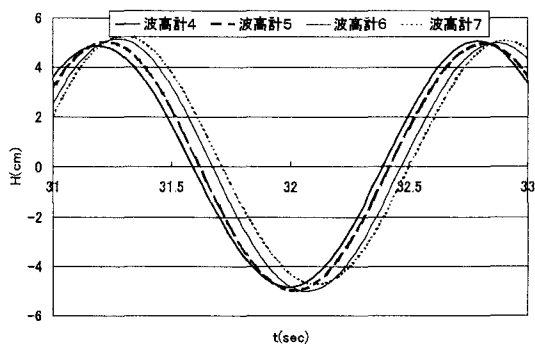


図-14 隔壁を設置しないときの遊水室内の水面変動 ( $h=50\text{cm}$ ,  $H=7\text{cm}$ ,  $T=1.6\text{s}$ , 入射角  $15^\circ$ )

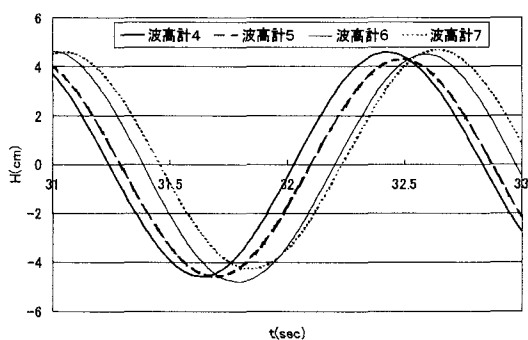


図-15 隔壁を設置しないときの遊水室内の水面変動 ( $h=50\text{cm}$ ,  $H=7\text{cm}$ ,  $T=1.6\text{s}$ , 入射角  $30^\circ$ )

り合うユニットでそれぞれ2本の波高計が配列方向の異なる位置に配置している。図-13~17はそれらの波高計によって測定された水面変動を時系列的に表したものである。

図-14, 15は、斜波条件で堤体ユニット間に隔壁を設置しないときの結果を同様にして示す。また、図-16, 17は隔壁を設置したときの結果に相当する。これらの図で、波条件は統一してあり、波周期 $T$ は、第二遊水室内でピストンモード波浪共振が卓越する $T=1.6\text{s}$ としてある。

直角入射のときの結果を示す図-13から、直角入射の条件では各波高計で測定した遊水室内の水面はほぼ同位相で変動しており、ピストンモードの波面運動がほぼ同時に出現することが確認できる。

一方、斜め入射で隔壁のない図-14, 15を見ると、遊水室内の水面変動は順次に位相ずれが生じ、ほぼ配列方向に正弦波動的な波面変動を示すことがわかる。そして入射角が増すと、各波高計位置での水面変動の位相差は大きくなることがわかる。これは隔壁がないため堤体ユニットの配列方向へ正弦波動的な波動運動が伝播することによる。このことより、隔壁がないときには、遊水室内のピストンモードの波動運動は、ユニットの配列方向に伝播する自由度があることから、水塊の移動はカーテン版の下部のみに限定されないことになり、カーテン下端部の水流も弱くなり、結果的に反射波低減も十分でなくな

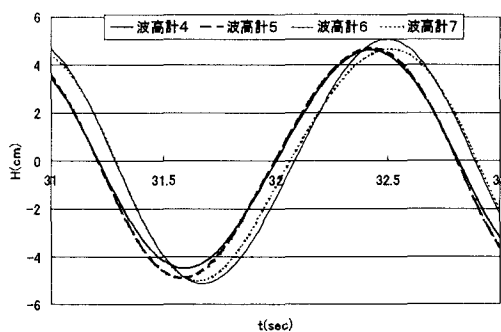


図-16 隔壁を設置したときの遊水室内の水面変動 ( $h=50\text{cm}$ ,  $H=7\text{cm}$ ,  $T=1.6\text{s}$ , 入射角  $15^\circ$ )

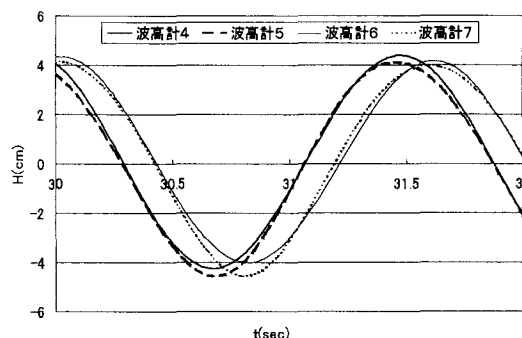


図-17 隔壁を設置したときの遊水室内の水面変動 ( $h=50\text{cm}$ ,  $H=7\text{cm}$ ,  $T=1.6\text{s}$ , 入射角  $30^\circ$ )

ると考えられる。

しかし、隔壁を設けた図-16, 17を見ると、同じユニット内で水面はほぼ同位相で変動している。これは各堤体ユニットの遊水室で独立したピストンモードの波面運動が出現することを示す。

このような遊水室内の波面モードの相違が、図-5に示すような反射率の相違の原因といえる。そして、斜め入射の条件下で長周期の波に対する反射波の低減効果を高めるには、堤体間に隔壁を設ける方がよいことが分かる。

#### 4. 結語

(1) 斜め入射波に対する異吃水三重壁式防波堤の反射波低減効果は、直角入射のときに比較して、極小反射率を示す波周期が短周期側に移行するなど低下する傾向にある。しかしながら、透過率については、入射角による影響をほとんど受けない。

(2) 異吃水三重壁式防波堤のユニット間に隔壁を設けると、斜め入射波に対する反射波低減効果を有意に改善することができる。一方、透過波については隔壁の有無の影響をほとんど受けない。

(3) 遊水室内の水面変動は、隔壁がないと、ユニットの配列方向に正弦波的な波動運動が伝播するのに対して、隔壁を設けると、同じユニット内でほぼ同位相で変化する断面2次元的なピストンモードに

近い波面運動が卓越するようになる。そして、このような遊水室内の波面モードの特性が、隔壁の有無による斜波条件下での反射波低減効果の相違に影響を及ぼすことなどが明らかになった。そして、斜め入射の条件下で反射波の低減周期帯を直角入射と同様に維持するには、堤体間に隔壁を設ける方がよいことが判明した。

#### 参考文献

- 1) 中村孝幸, 神川裕美, 河野 徹, 楨本一徳: 透過波と反射波の低減を可能にするカーテン防波堤の構造形式について, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp786-790, 1999.
- 2) 中村孝幸, 中山哲巖, 河野 徹, 久保田二郎: 有効周期帯拡大のための異吃水三重式カーテン防波堤の消波特性と断面設定法, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.661-665, 2003.
- 3) 中村孝幸, 高木伸雄, 中山哲巖, 河野徹, 菊地一郎: 減衰波理論に基づく斜波中の波浪境界値問題の解析法とその適用性について, 海岸工学論文集, 第48巻, pp781-785, 2001.
- 4) 中村孝幸, 神野充輝, 西川嘉明, 小野塚孝: 渦流れの増大現象を利用した垂下版式の反射波低減工について, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp797-800, 1999.