

# 遊水室型浮防波堤の 消波効果と動揺特性に関する研究

## DYNAMICS AND PERFORMANCE OF A WATER-CHAMBER TYPE FLOATING BREAKWATER

中村孝幸<sup>1</sup>・武村尚徳<sup>2</sup>

Takayuki NAKAMURA and Naonori TAKEMURA

<sup>1</sup>正会員 工博 愛媛大学大学院 理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)

<sup>2</sup>学生会員 工修 愛媛大学大学院 理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)

In order to reduce comparatively long waves, like swells, a floating breakwater with a water chamber is newly proposed. The influence of piston mode wave resonance in the chamber on the floating body dynamics and wave energy dissipation is extensively examined. We have also examined the performance of a water-chamber type breakwater that is fixed at the water surface. It is intended to know the basic performance of the breakwater without body motions by waves. It is confirmed that the influence of body motions by waves is very strong on the performance of the breakwater. It is also seen that the piston mode wave motion in the chamber affects body dynamics and the dissipation of reflected waves.

*Key Words* : Water chamber, floating breakwater, performance, dynamics, water exchange

### 1. はじめに

水深が深い海域や海底地盤が軟弱な海域を対象として、来襲波浪に対する制御効果が高い防波堤を経済的に建設することは非常に困難な状況にあると考えられる。現在、そのような海域でよく使用されている防波堤形式は固定式であるカーテンウォール型の杭式防波堤や浮体式であるポンツーン形式の浮防波堤がある。しかしながらそれぞれの防波堤形式には、大規模構造になりやすいことや消波効果が不十分であるなど改善すべき点がいくつかある。

例えば、カーテンウォール型杭式防波堤では長周期波が作用する大水深海域の場合、カーテン壁の吃水深をほぼ海底付近まで延伸することが必要とされることが多く、受ける水平波力も増大するため杭径が大きくなるなど不経済な構造になりやすい。また、このとき反射波が高くなるなど副作用も大きい。

一方、ポンツーン形式の浮防波堤では主に堤体の流体力学的な慣性効果を利用して来襲波を反射させることで透過波を低減している。このため透過波が低減可能な周期条件下では、逆に反射波が増大することになり、設置以前よりも波高が大きくなることもある。またこのような形式の浮体式構造物ではうねりなど長周期の波に対す

る消波効果が期待できず、専ら比較的短周期の波に対する制御に用いられている。

既に著者ら<sup>1)</sup>はこのような大水深海域を対象にして、効果的かつ経済的な防波堤の建設を目的として、固定式である遊水室型断面のジャケット式防波堤を提案した。この防波堤は、上部に比較的浅吃水のカーテン版で構成される遊水室を持ち、その遊水室の下部に水平版を敷設した断面である。この防波堤の消波機構は、遊水室内のピストンモードの波面運動による動揺発散波を利用して、比較的長周期の波に対する透過波の制御効果を高める方式である。

本研究は、より大水深の海域を想定して同構造の浮体式構造物への展開とその有効性について検討を行った。この際、特に浮体式構造物に特有な波浪動揺による波浪制御効果への影響や遊水室内におけるピストンモード波面運動の動揺特性への影響などに着目した。

### 2. 実験装置および実験方法

#### (1) 模型堤体

ここでは、遊水室型防波堤を浮体式構造に展開するた

め、図-1 (a), (b)に示すように、遊水室型断面堤体の両側面に発泡スチロール製の矩形浮力体を設けた。そして、このような合成構造体の係留浮遊時の消波特性などを検討すると同時に、矩形浮力体の影響を知る目的から、構造体の固定時における消波特性などについても併せて検討した。

この模型防波堤の主要部の断面は、図-1 (a), (b)に示すように水平版を有する遊水室型構造で、内部がそれぞれ単一および2重遊水室としてある。後者は、異なる共振周期特性を有する第1, 2遊水室のピストンモード波浪共振を利用することで、比較的広い異なる波周期での波エネルギーの逸散の強化を目指している。

堤体の支持方法は、図-2 (a), (b)に示すように、鋼製

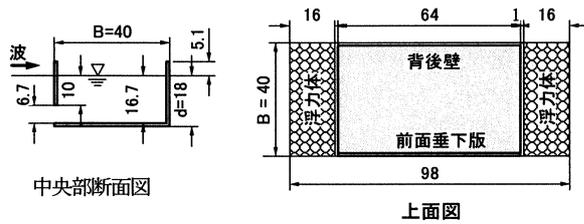


図-1 (a) 単一遊水室型構造

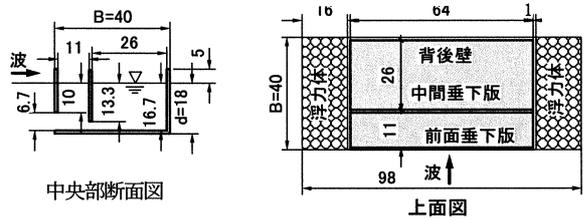


図-1 (b) 2重遊水室型構造

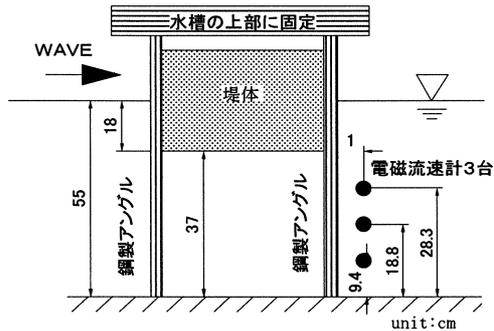


図-2 (a) 堤体の水面固定時の状況および流速計配置

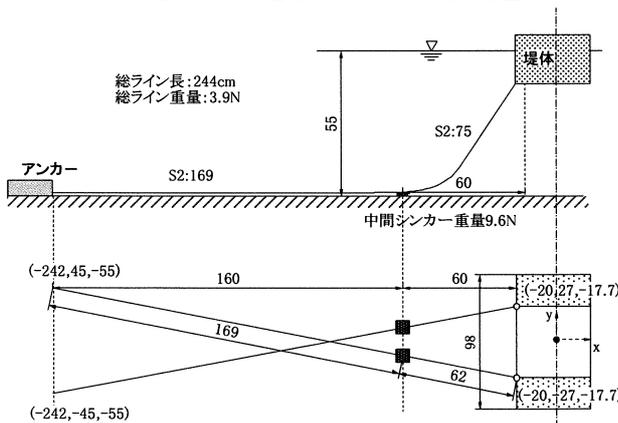


図-2 (b) 堤体の係留状況

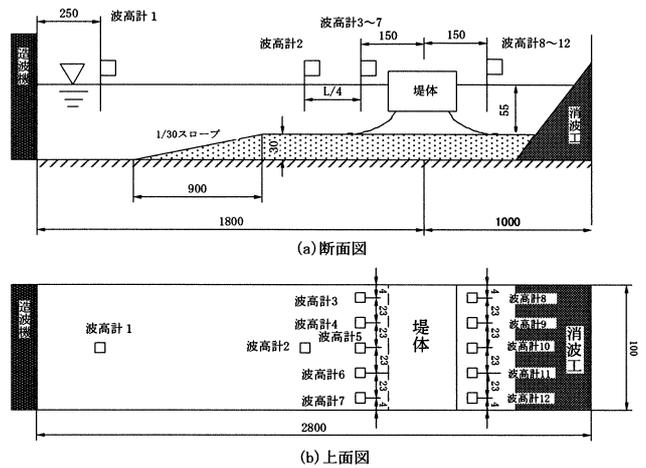


図-3 水槽および波高計の配置状況

柱による固定支持およびチェーンによる係留支持の2種類とした。固定支持は、鋼製アングルを堤体の4隅に設け、底部と水槽上部で剛に支持して実現した。この際、堤体の吃水深 $d$ は、チェーン係留支持のときとほぼ同じになるようにした。

## (2) 波変形および流速の測定

反射波および透過波の測定は、構造体が断面の異なる合成構造であることを考慮して、図-3に示すように水槽の幅方向に複数の波高計をほぼ等間隔の直線配置にして、これらの波高計による2乗平均波高値を抽出して、代表波高値とした。なお、反射波については、波向き別の成分波に分解した後に、さらに入射波の分離推定法を用いて分解した(中村ら<sup>2)</sup>)。

遊水室型の防波堤では、遊水室内のピストンモードの波動運動を原動力として、前面垂下版の下端より強い渦流れが生起され、それに伴い冲向きの平均流の発生することが知られている<sup>3)</sup>。従来の遊水室型海水交換防波堤に比較すると、本研究では図-2に示すように、遊水室下部の開口部が十分に広いなどの相違点があるが、このような平均流の生成の有無について検討してみた。このため、図-2 (a)に代表的に示すように、遊水室底版下部より水底に到るまでの開口部をほぼ3等分するように電磁流速計を配置して、平均流速など測定した。

## 3. 堤体の水面固定時における結果

### (1) 反射・透過率

図-4, 5は、図-1 (a)に示す単一遊水室型構造の反射率 $C_r$ と透過率 $C_t$ の結果を示すもので、横軸には波周期に関する無次元量である、波長・堤体幅比 $L/B$ が採っている。図-6, 7は、図-1 (b)に示す2重遊水室型構造の結果を同様に示す。これらの図中には、入射波高 $H$ による相違についても識別できるようにしてある。

図中に示す理論算定結果は、中村・井出<sup>4)</sup>の減衰波理

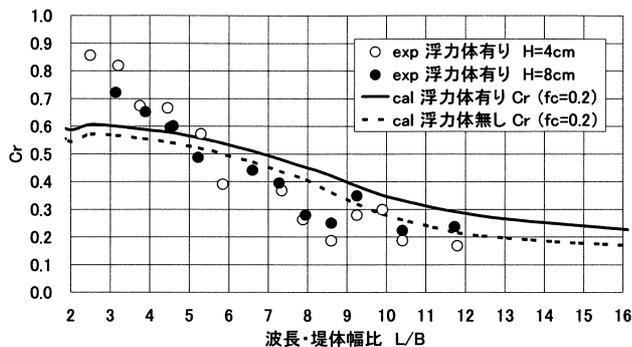


図-4 固定時の単一遊水室型堤体の反射率

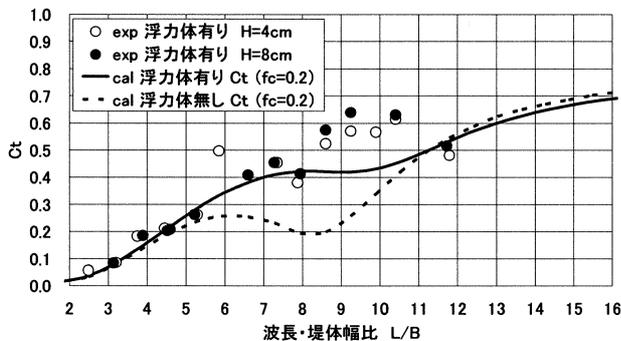


図-5 固定時の単一遊水室型堤体の透過率

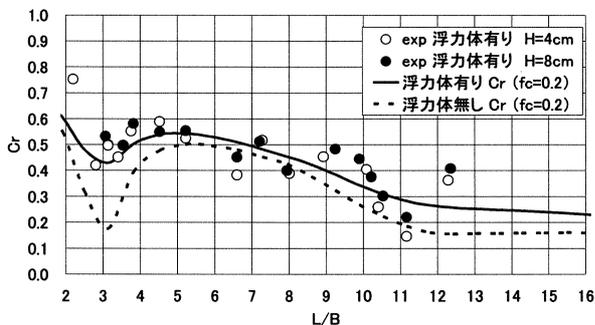


図-6 固定時の2重遊水室型堤体の反射率

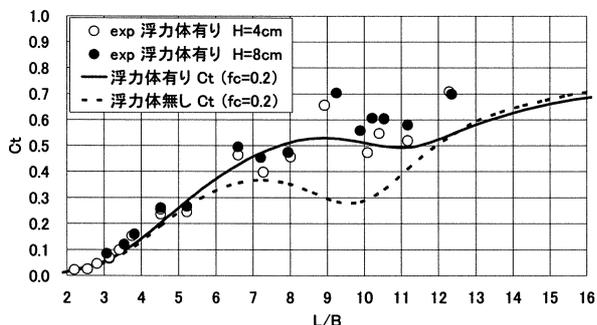


図-7 固定時の2重遊水室型堤体の透過率

論によるもので、ここでは断面が異なる合成構造体であることを考慮して、まず各断面を対象にして反射・透過率を求め、これらを各断面幅に応じてエネルギー合成することで最終的な反射・透過率として算定した。いわゆるストリップ法による算定結果に相当する。

図中には、比較のため、側方浮力体がなく、全て遊水室型堤体としたときの算定結果についても示してある。なお、算定に必要な線形減衰係数 $f_c$ には、従来の成果<sup>5)</sup>を参照して原則的に $f_c=0.2$ を採用した。

最初に、これら2堤体の反射率の結果に着目すると、図-6に示す2重遊水室構造の場合に、 $L/B=3$ 付近の短周期側において反射率は有意に低下することが認められる。これは、2重遊水室構造の沖側第1遊水室においてピストンモード波浪共振が誘起され、反射波が減勢されることによる。この傾向は、理論算定結果でも確認できる。

次に、図-5、7の透過率を見ると、遊水室の数を増した効果はほとんど認められず、両堤体構造で同程度の値となっている。これら堤体の透過率の特性として、一旦 $L/B=10$ 付近で一定あるいは減少する傾向が認められる。この傾向は特に算定結果で明確であり、実験結果でもある程度確認できる。このような特性を示す理由としては、既に著者<sup>4)</sup>が報告しているように、遊水室内のピストンモード波面運動による動揺発散波の位相干渉によるものである。

側方浮力体がないときの透過率の算定結果を示す点線とそれがあるときの実線とを比較すると、両者の差は特に上記した位相干渉が有意に働く $L/B=7\sim 11$ の範囲で顕著である。そして、本研究のように矩形断面の側方浮力体の割合が全堤体長の3割程度を占めるような条件下では、その影響はかなり強く現れることが分かる。

図-8、9は、比較のため、遊水室型堤体の前面垂下版下部の開口部を閉じて、下部透過型の矩形断面堤体としたときの反射率と透過率の結果を示す。算定では、遊水室がなくエネルギー損失も少ないことから、線形抵抗係数 $f_c$ は0.15と小さな値を採用してある。

図-8と2重遊水室の反射率の結果である図-6を比較すると、反射率は特に $L/B$ の小さな短周期側で差異が大きく、多重遊水室構造とすることで反射波が有意に低減できることが分かる。

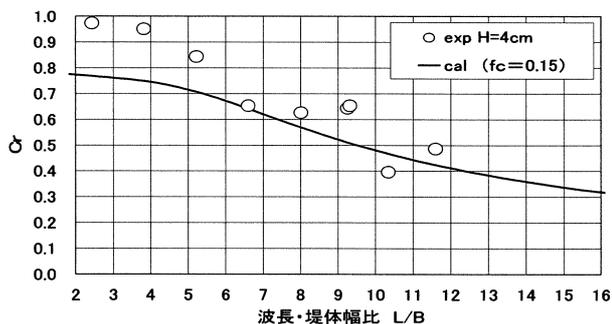


図-8 下部透過型矩形堤の反射率

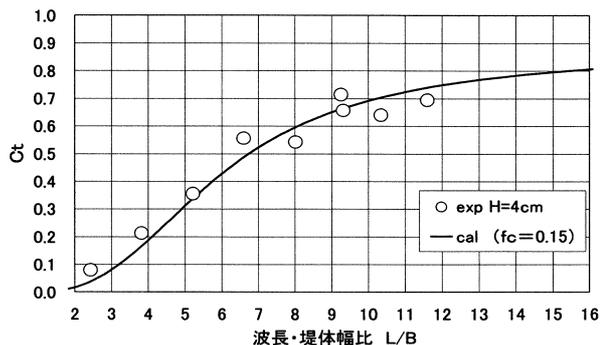


図-9 下部透過型矩形堤の透過率

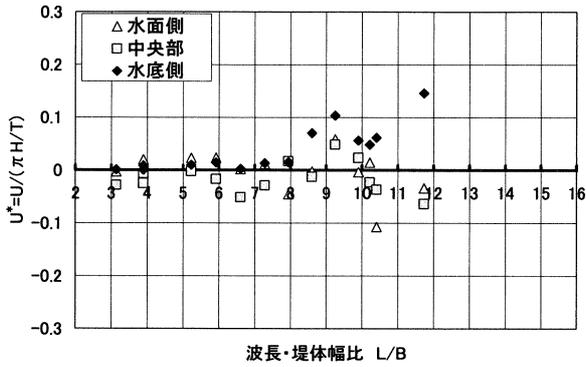


図-10 固定時における単一遊水室型堤体の下部透過部での平均流速U (H=8cm)

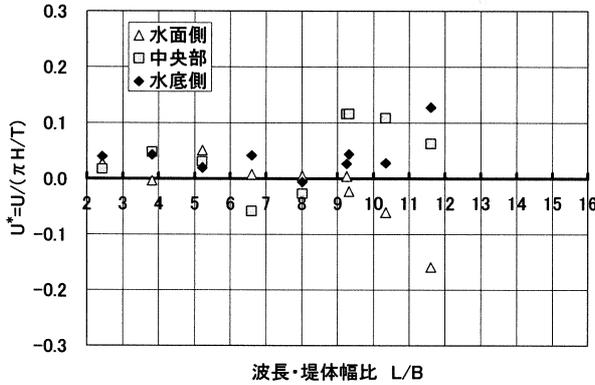


図-11 固定時における矩形堤の下部透過部での平均流速 (H=4cm)

透過率について同様に比較すると、やはり遊水室型構造とすることで、特に長周期側で透過波をある程度低減できることが認められる。

## (2) 平均流

図-10, 11は、それぞれ単一遊水室型堤体および矩形堤の下部透過部での各測点における水平流速の時間平均値の実験結果を波長・堤体幅比L/Bによる変化で示す。水平流速の時間平均値は、進行波による水表面での水平流速振幅に比例する $\pi H/T$ で除した無次元量で表示しており、正值が岸側へ向かう平均流速に相当する。

これらの図の比較から、下部透過型矩形堤の場合、ほぼ岸側へ向かう平均流が生じるのに対して、単一遊水室型堤体では、絶対値は小さいものの、透過部の中央付近ではほぼ沖側へ向かう平均流が発生することなどが認められる。このように平均流速に差異が現れるのは、単一遊水室型堤体では前面カーテン版の下部で強い渦流れが発生するためと考えられる。なお、2重遊水室型堤体の場合、遊水室が分断され、渦流れの発生も2箇所に分断されることから、生成される平均流としては弱くなることを確認している。

## 4. 堤体の係留浮遊時における結果

### (1) 反射・透過率

図-12, 13は単一遊水室型堤体の係留浮遊時にお

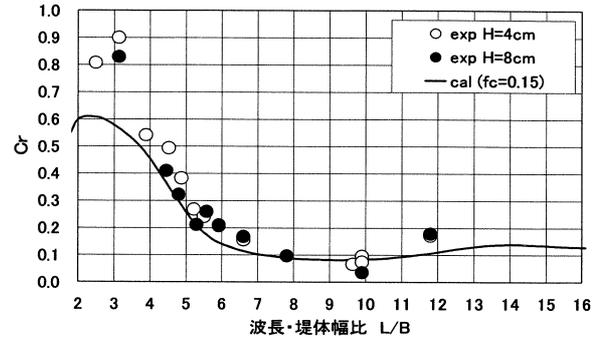


図-12 単一遊水室型浮体の反射率

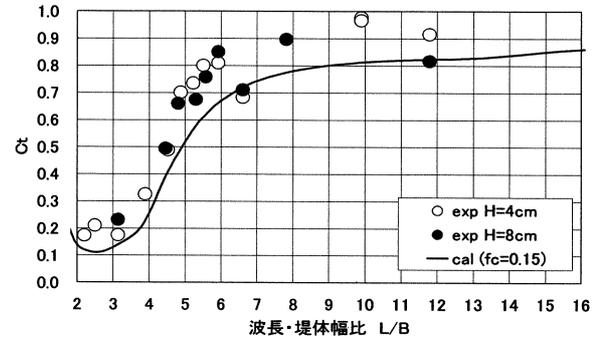


図-13 単一遊水室型浮体の透過率

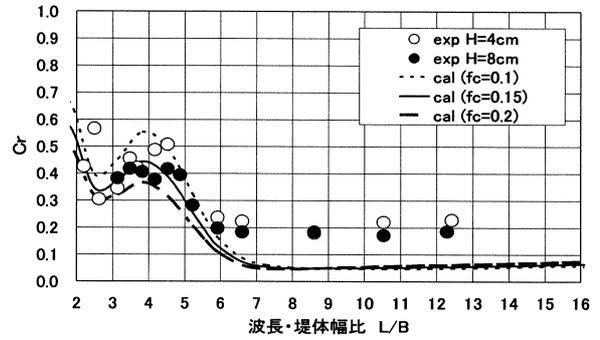


図-14 2重遊水室型浮体の反射率

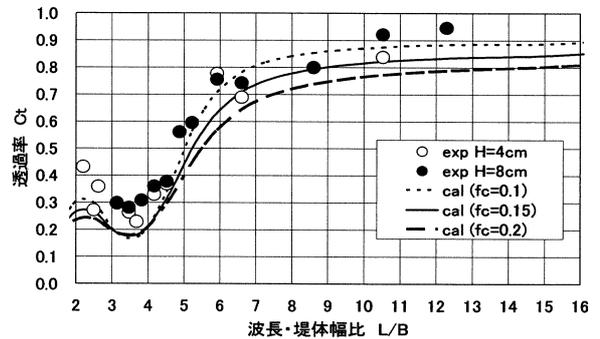


図-15 2重遊水室型浮体の透過率

ける反射・透過率の結果をそれぞれ示す。また、図-14, 15は、2重遊水室型堤体の結果を同様にして示す。これらの図中には、対応する理論算定結果についても併せ示すが、この際、線形抵抗係数 $f_c$ には、 $f_c=0.15$ と堤体固定時に比較して小さな値を用いた。これは、図-14, 15に検討例を示すように、 $f_c=0.1, 0.15, 0.2$ と変えた算定結果と実験結果との一致度を考慮して選定したものである。いずれにしても、堤体の係留浮遊時においては、波運動に抵抗する傾向が弱くなるため、結果

的に波エネルギー逸散量も低下することを反映する結果になったと考えられる。なお、係留浮遊時の理論算定においても、固定時と類似したストリップ法による近似解析法を用いて、反射・透過率および波浪動揺量を算出しており、ここに付記しておく。

まず、2つの構造形式の反射率を比較すると、固定時と同様に、L/Bの小さな短周期側で、2重遊水室構造とすることで反射波が低減されることが分かる。これはやはり、2重遊水室の前面側にある第1遊水室でのピストンモード波浪共振に起因するエネルギー逸散による影響と考えられる。

また、透過率についても、2重遊水室構造とすることでL/Bの大きな長周期側で多少ながら低下する傾向が見られる。ただし、対応する断面の固定時の結果である図-7と比較すると、チェーン係留支持とすることで透過率はかなり増大することが認められる。この傾向は、特に長周期側で顕著であり、固定時に部分的に確認できた、遊水室内のピストンモード波動運動による発散波の位相干渉による透過波の低減機構はほとんど作用せず、堤体の波浪動揺の影響の方がより強く現れることによると考えられる。

2重遊水室型構造の場合、L/B=3.5付近で一旦透過率が低下する傾向が見られ、これに付随して透過波を低減できる周期帯が若干ながらも長周期側に拡大されている。これは、後述するように回転動揺変位(Roll)が卓越する周期帯であり、この回転動揺によるエネルギー逸散の増加および動揺発散波の影響と考えられる。

## (2) 波浪動揺量

図-16, 17は、係留浮遊時の単一遊水室型堤体の鉛直動揺量 $X$ と回転動揺量 $\theta$ をそれぞれ示す。図中では、鉛直動揺量はその両振幅を入射波高で除した無次元動揺量で、また回転動揺量はやはりその両振幅に堤体の吃水深 $d$ を乗じた後に入射波高で除した無次元量で表す。

また、図-18, 19は係留浮遊時の2重遊水室型堤体の結果を同様にして示す。

これら2つの構造形式の動揺変位を比較すると、回転変位に代表されるように、2重遊水室構造とすることで回転動揺量が卓越する周期条件が2箇所になるなど、動揺特性が変化することが認められる。これは、中間の垂下版を設けることにより作られる第1遊水室で生じるピストンモード波動運動による影響と考えられる。すなわちピストンモード波動運動により遊水室内の水塊が鉛直方向に動揺し、没水平版に負荷がかかり、回転動揺が誘発されたものと考えられる。そして、図-15の対応する堤体の透過率の結果において、透過率が一旦極小となるのは、この回転動揺が極大になる条件と一致している。

いずれにしても、回転動揺量を総合的に比較すると、2重遊水室型堤体の方が動揺量の絶対値が低くなることが確認できる。なお、両堤体においてL/B=5.9付近で回転動揺量が増大するのは、回転動揺の共振条件に相当するためである。

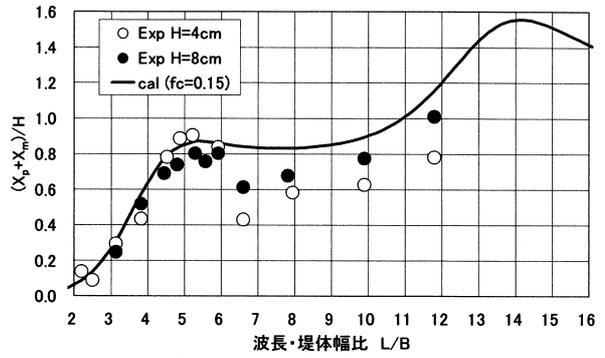


図-16 単一遊水室型浮体の鉛直動揺変位

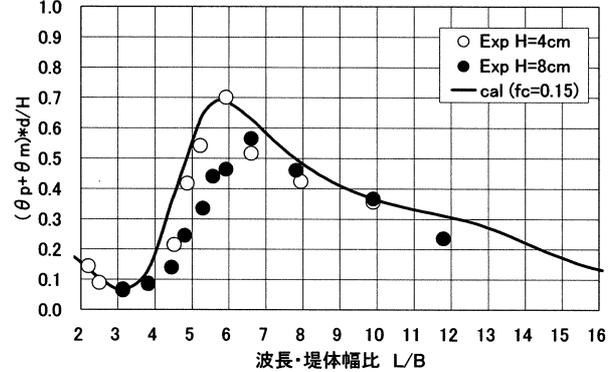


図-17 単一遊水室型浮体の回転動揺量(無次元回転動揺量)

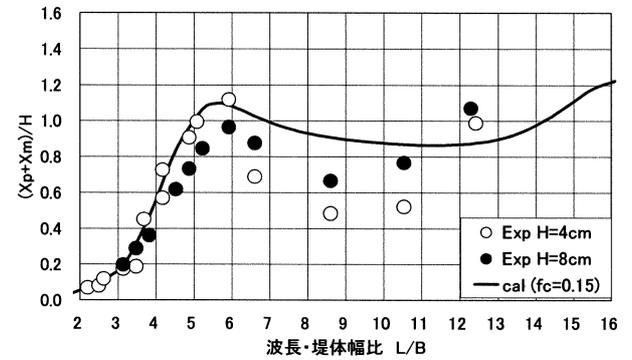


図-18 2重遊水室型浮体の鉛直動揺量

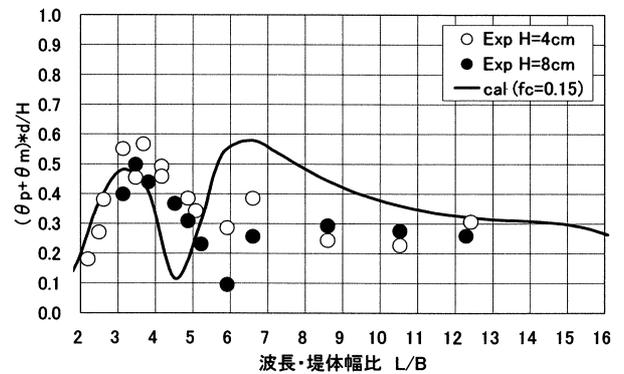


図-19 2重遊水室型浮体の回転動揺量

## (3) 平均流

図-20は、代表例として単一遊水室型堤体のときの堤体下部の各測点での平均流速の結果を示す。堤体固定時のときの図-10と比較すると、やはり全体的に沖側に向かう平均流が生起されているようであり、絶対量は増大する傾向が見られる。

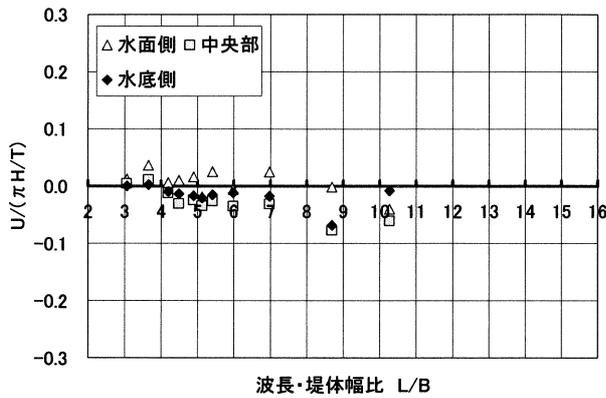


図-20 単一遊水室型浮体の各測点での平均流速 (H=8cm)

このような原因としては、堤体の動揺による影響と考えられる。特に堤体の回転動揺により、遊水室内の水塊が沖側へ排出されることが直接的な要因と推測される。

このような平均流の特性については、透過波のより効果的な低減法の開発を含めて、今後さらに進めていきたい。

#### 4. 結論

(1) 遊水室型防波堤の側方に浮力体を設ける構造は、浮力体を設けない構造に比較して、遊水室内のピストンモード波面運動による動揺発散波に基づく透過波の低減機構はある程度作用するものの、反射波・透過波の低減度合は劣るようになる。

(2) 浮体式構造物においても、その断面を遊水室型構造にすることで、ピストンモード波浪共振による波エネルギーの逸散効果が期待でき、特に短周期側での反射波を低減することができる。

(3) 遊水室型浮防波堤において、遊水室内を多重壁構造にすることで、動揺共振周期が変化することや回転動揺量が減少する場合もあるなど浮防波堤の動揺特性に影響する。

(4) 遊水室型構造の浮体式防波堤では、その仮想固定時において確認されたピストンモード波浪共振に起因する長周期側での透過波の低減効果はほとんど認められず、今後さらなる改良が必要である。

謝辞：本研究は、(財)災害科学研究所に設けた沿岸新技術研究会と(独立)水産総合研究センター水産工学研究所との共同研究による成果の一部である。ここに記して、ご協力頂いた関係各位に感謝の意を表する次第です。

#### 参考文献

- 1) 中村 孝幸・米島 幹雄・田中 潔：没水平版を有する遊水室型杭式防波堤による透過波の低減機構とその効果について、海岸工学論文集，第52巻，pp. 671～675，2005.
- 2) 中村孝幸・野村周吾・泉川学文・森田知志：直線配列された浮防波堤の波浪制御効果に関する研究，海洋開発論文集，第8巻，pp. 234～239，1992.
- 3) 中村孝幸・高木伸雄・中山哲巖・河野 徹：ピストンモード波浪共振を利用する低反射・低透過の海水交換型防波堤の開発，海岸工学論文集，第49巻，pp661～665，2002.
- 4) 中村孝幸・井手善彦：減衰波中における浮体の動揺理論とその適用性に関する研究，海岸工学論文集，第44巻，pp. 856-860，1997.
- 5) 中村孝幸・浅井威人：浮防波堤の消波効果に及ぼす遊水室型低反射工と没水平版の効果について，海洋開発論文集，第19巻，pp. 565～570，2003.