

傾斜杭を想定した台形遊水室型防波堤の 消波機能と海水交換機能について

PERFORMANCE OF A JACKET-TYPE BREAKWATER WITH TRAPEZOIDAL
WATER CHAMBERS SUPPORTED BY INCLINED PILES

中村孝幸¹・河野徹²・浅川典敬³・大川大一⁴・高見慶一⁵
Takayuki NAKAMURA, Toru KOUNO, Noritaka ASAKAWA, Taichi OKAWA,
Keiichi TAKAMI

¹正会員 工博 愛媛大学大学院准教授 理工学研究科 (〒790-8577 松山市文京町3番)
²正会員 (財)災害科学研究所 研究員 (〒530-0005 大阪市北区中之島三丁目2-4大阪朝日ビル)
³正会員 工修 (財)漁港漁場漁村技術研究所 第1調査研究部長 (〒101-0047 千代田区内神田1-14-10)
⁴(財)漁港漁場漁村技術研究所 主任研究員 (〒101-0047 千代田区内神田1-14-10)
⁵学生会員 愛媛大学大学院 理工学研究科 (〒790-8577 松山市文京町3番)

For the economical construction of breakwaters in relatively deep sea ports, we have already proposed a jacket-type breakwater with water chambers consisting of more than two vertical walls and one submerged horizontal plate. In the practical application of pile supported breakwaters of this kind, inclined support piles are usually adopted because of economical points of view. In such a situation, the shape of the water chamber may become trapezoidal because of inclinations of support piles. In addition to the rectangular-shaped water chamber, the trapezoidal-shaped water chamber was used for a jacket type breakwater. Hydraulics performance of the breakwaters, such as reductions of transmitted waves and water exchange abilities etc., is examined experimentally and theoretically.

Key Words: Jacket-type breakwater, trapezoidal water chamber, wave transmission, wave reflection, water exchange

1. はじめに

既に著者ら(2007)は、大水深かつ軟弱地盤の海域において、波浪制御効果に優れ、しかも、海域の環境改善に有効な防波堤構造として図-1に示すようなジャケット式構造の遊水室型防波堤を提案し、その有効性を明らかにした。ただし、遊水室の形状は基本的な機能を検討するために矩形状の遊水室に限定した。この防波堤は、遊水室内で発生するピストンモード波面運動に伴う遊水室開口部からの渦流れの作用により、従来において多用されてきたカーテン型防波堤と比較すると、構造体の吃水深を1/2程度に浅く設定しても、同様の透過波の低減効果が得られることや、結果的に作用波力を大幅に低減できることなどを特長としている。また、図-2に示すような原理に基づき港内側の海水を港外側へ輸送する海水交換機能も合わせ持っている。

本研究は、大水深かつ軟弱地盤の海域での支持杭としてよく使用される傾斜杭(図-1を参照)を想定して、それに沿う様な構造で構築さ

れる台形断面の遊水室型堤体の波浪制御効果および海水交換機能を実験と中村・井出(1997)らの減衰波理論に基づく算定により明らかにする。この際、比較のため、従来の研究で使用されてきた矩形状の遊水室型防波堤についても検討を行い、台形断面に変更することの影響などについて考察した。

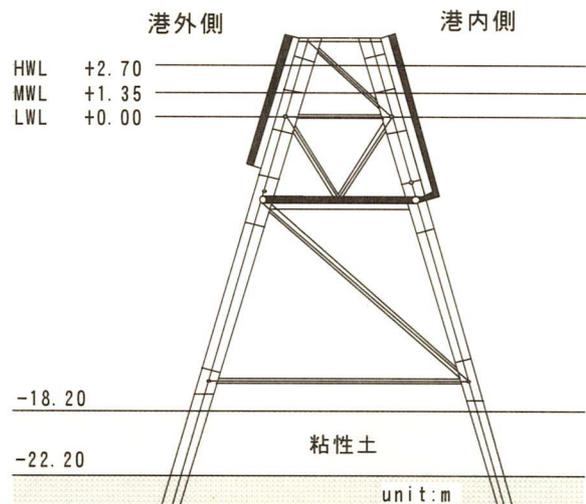


図-1 ジャケット式防波堤の例

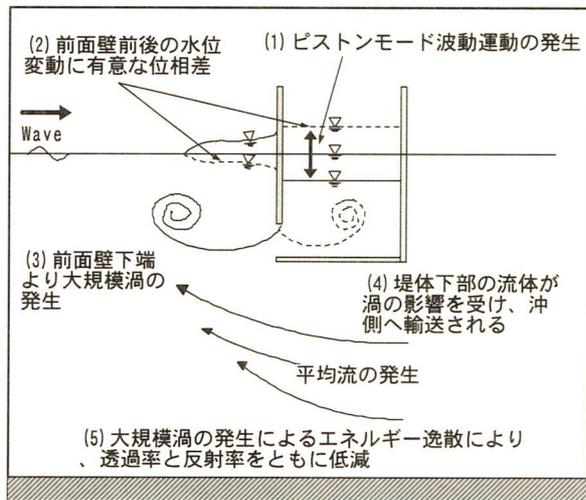


図-2 遊水室型防波堤の消波および平均流の生成機構

2. 実験装置および実験方法

(1) 模型堤体

実験では、図-3に示す (a) 台形遊水室型堤体と (b) 矩形遊水室型堤体の2種類を用いた。この際、模型スケールは現地の約1/32を想定した。また、矩形遊水室型堤体の断面寸法は、中村・高見ら(2007)の研究成果を参照して、反射波および透過波の低減効果が想定した消波対象波の条件に対して十分と判断されるように決定した。また、台形遊水室型堤体の断面は、水面下の遊水室部分の断面積が矩形のそれとほぼ対応するように設定した。このとき、台形遊水室の側壁の傾斜角は、杭の傾斜角と同じ15度とした。

(2) 実験水槽および測定装置

実験水槽は、長さ30m、幅1m、高さ1.2mの2次元造波水路を用いた。水槽内には、図-4に示すように1:30勾配のスロープと水平床を設けており、模型堤体は水平床上に設置した。また、水平床部には水槽幅をほぼ二分するように隔壁を設け、一方の水路で入射波が、もう一方の水路に模型堤体を設置して反射・透過波などが測定できるようにした。さらに水槽の終端には、ヘチマロンと捨石斜面で構成される消波工を設けた。このとき、消波工の構造は、捨石斜面の上側だけを隔壁で分断して下側は解放状態としており、平面的に回流できる構造として、沖向き方向に発生する平均流の妨げや平均水位の差が生じにくいようにした。

波変形の測定には、計5台の容量式波高計を用いた。このうち、2台をそれぞれ沖側と堤体横おける入射波の測定、2台を入・反射波の分離測定用、残りの1台を透過波の測定に充てた。

堤体下部を介しての平均輸送流量（海水交換

量)の測定には、ドップラー式流速計3台を図-3に示すように没水平板の下側の開口部に設置して流速測定を行い、それぞれの位置で測定された平均流速に代表長を乗じ、海水交換量を近似的に求めた。

(3) 実験条件

本実験は、図-3に示すように、台形型堤体では、高潮位(HWL)、平均潮位(MSL)、低潮位(LWL)の3種類、矩形型堤体は平均潮位(MSL)のみの条件で行った。周期 T は0.95~2.1sの間の10種類程度、波高 H は4cmと7.5cmの2種類を用いた。

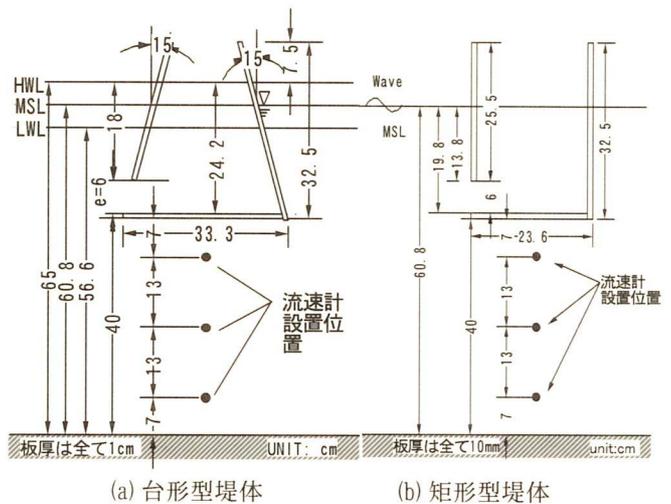


図-3 遊水室型防波堤の模型と流速計の設置位置

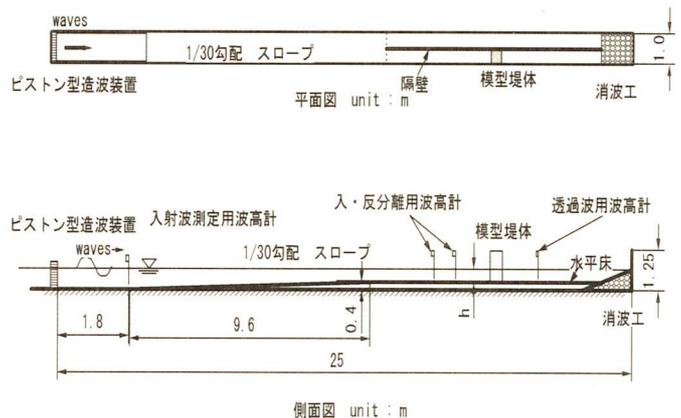


図-4 実験水槽および波高計設置位置

3. 消波機能

(1) 台形型堤体の消波機能

図-5、図-6は、台形型堤体の高潮位(HWL)、平均潮位(MSL)、低潮位(LWL)のときの透過率 C_t 、反射率 C_r を示す。周期を表す無次元パラメータには、 L_0/B_b (沖波波長底面幅比)を用いた。また、理論算定に用いた線形抵抗係数は従来³⁾の成果を参考にして、HWL、MSLでは $fc=0.2$ 、LWLでは $fc=0.3$ とした。

ここで、 LWL において f_c を高い値としたのは、潮位が低くなることによって、没水平板上の水深が浅くなり、エネルギー損失の顕著な碎波に類似した現象が起り易くなったことによる。

それぞれの潮位における透過率と反射率について比較すると、潮位が低くなるにつれて透過率は増大、反射率は逆に減少する傾向にある。これは、堤体の吃水深が浅くなることにより、堤体の下部を介しての透過波エネルギーが増大するためと考えられる。そして、 C_t 、 C_r の両者共に、 $L_o/Bb=7.0$ 付近で0.3以下となるなど、優れた消波機能を有することが分かる。これは、 $L_o/Bb=7.0$ 付近で、遊水室内におけるピストンモード波浪共振に伴う渦流れが最も強くなる周期帯に相当することが要因と考えられ

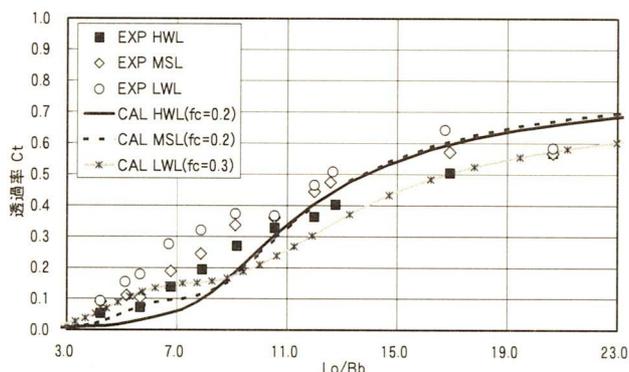


図-5 潮位変化の透過率 C_t への影響 ($H=7.5\text{cm}$)

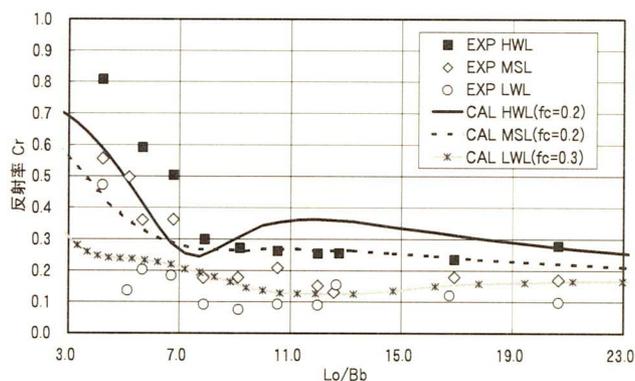


図-6 潮位変化の反射率 C_r への影響 ($H=7.5\text{cm}$)

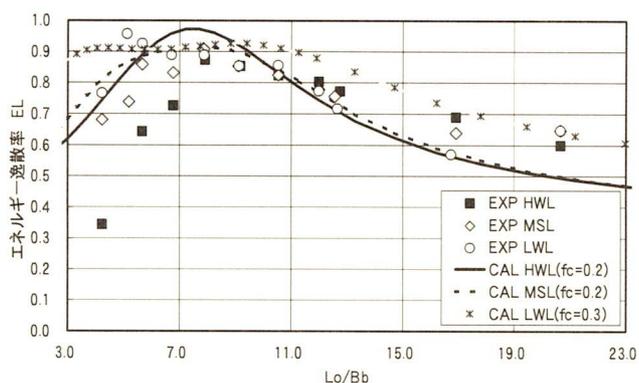


図-7 潮位変化のエネルギー逸散率 EL への影響 ($H=7.5\text{cm}$)

る。実験結果とは逆に、透過率の算定結果は、長周期側で LWL が最も低い結果となっているが、これは、 f_c を高い値にしたことによると考えられる。いずれにしても、 LWL の条件下では、透過・反射率の両者について、実験結果と一致するような理論算定は難しい状況にあり、今後の課題としたい。また、波高変化による影響は図示していないが、この影響については有意でないことを確認しており、ここに付記しておく。

図-7は、潮位による波エネルギー逸散率 EL の変化を示す。各潮位でのエネルギー逸散率を比較すると、実験結果と算定結果の両者共に低潮位(LWL)のとき最も広い周期帯で波エネルギーが逸散されることが確認される。特に短周期側においても高いエネルギー逸散率を示すのは、前面壁の吃水深が浅くなることで、開口部から波が入り込みやすくなり、短周期の波でも大規模な乱れが発生するためと考えられる。

(2) 矩形型堤体との比較

図-8、図-9は、平均潮位(MSL)の条件下での矩形遊水室と台形遊水室の堤体の透過率の比較を示す。各図において周期を表す無次元パラメータには、図-8では L/Bw (波長遊水室水面幅比)、図-9では L/Bav (波長平均幅比)を用いた。ここで、 Bav は水面下にある遊水室幅の平均値であり、台形遊水室の代表幅の一つとして採用した。

両堤体の C_t の実験結果を比較すると、波長と遊水室の水面幅比あるいは波長と遊水室の平均幅比のどちらを用いても大きな差異はないが、平均幅で定義される L/Bav を用いた方が、両堤体の結果の対応がよいことが認められる。このことから、台形型堤体の透過率の推定に当たっては、その平均幅を有する矩形型堤体の透過率の結果でほぼ代用できるものと言える。

図-10、図-11は、平均潮位(MSL)での上記した二堤体の反射率の比較について、やはり遊水室水面幅と断面平均幅の両者を用いて検討した結果である。すなわち、周期を表す無次元パラメータとして、図-10では L/Bw (波長遊水室水面幅比)、図-11では L/Bav (波長平均幅比)を用いた。両堤体の実験結果の対応性を比較すると、多少ではあるが遊水室水面幅を用いた L/Bw で整理する方が両結果の一致度がよいことが分かる。このことから、遊水室型堤体の反射率は、遊水室の水面幅により強く影響されるものと言えよう。ただし、上記してきた矩形型遊水室と台形型遊水室の堤体の消波機能の類似性は、あくまでも同一の吃水深でしかも同一の遊水室開口幅であることを前提としていることに注意していただきたい。

4. 海水交換機能

遊水室型防波堤は前述したように、海水交換機能を有している。本研究では、各堤体の下部を介して輸送される流量を次式で与えられるような無次元の海水交換量 Q^* で定義し、これにより比較検討を行う。

$$Q^* = Q / (HL / 2\pi) \quad (1)$$

ここで、 Q : 堤体の単位幅当り、波一周期当りの平均輸送流量、 H : 入射波高、 L : 波長 (堤体の設置水深に対応する波長) である。流量の無次元化に用いている、 $HL/2\pi$ は波運動による半周期間の移動水塊量に相当する。ここでは、冲向き方向の流量を負と定義した。

また、通水部の流速分布特性を明らかにするため、次式で示すような平均流速 U^* を用いる。ここでも、冲向き方向の流れを負と定義している。

$$U^* = U / \sqrt{gH} \quad (2)$$

ここで、 U : 時間平均流速、 g : 重力加速度である

(1) 台形型堤体の海水交換機能

図-12は、平均潮位 (MSL) のときの台形型堤体の海水交換量を Lo/Bb (沖波波長底面幅比) による変化で示す。海水交換量 Q^* は、全体的に負の値を示し、冲向き方向へ輸送されることが分かる。また、波高条件について比較すると、短周期側では波高の高いとき、 Q^* が増加傾向にある。これは、周期が短く波高が低い波では、遊水室内で強い渦が形成されず、遊水室開口部からのジェット流の流速が弱まるためと考えられる。

図-13は波高 $H=7.5\text{cm}$ 、 $Lo/Bb=5.7, 9.2, 16.9$ の波条件での台形遊水室型防波堤 (MSL) における平均流速 U^* の鉛直分布を示す。計測位置を表す無次元パラメータとしては z/l を用いた。 z は没水平板からの鉛直下向き距離、 l は通水部の鉛直方向の長さを示す。

流速の鉛直分布は、底面版から海底面へと離れるにつれて、冲向きの流速が弱まる傾向にある。ただし、 $Lo/Bb=16.9$ の条件の場合には、中央部の流速が微弱ではあるが岸向き方向に発生する結果となった。これは、長周期側では波の透過エネルギーが増大し、冲向き方向の流速が相殺されたことが原因と考えられる。

図-14、図-15は、それぞれ波高 $H=4\text{cm}, 7.5\text{cm}$ のときの潮位に伴う海水交換量の変化を示す。波高条件、潮位に関わらず、実験結果は全体的に負の値を示し、冲向きに輸送される結果となった。また、波高 $H=4\text{cm}$ の時は、全体的に LWL が他の潮位を上回る海水交換量を示す傾向にある。これは、 LWL は他の潮位と比較して波が遊水室内に入り込みやすく、大規

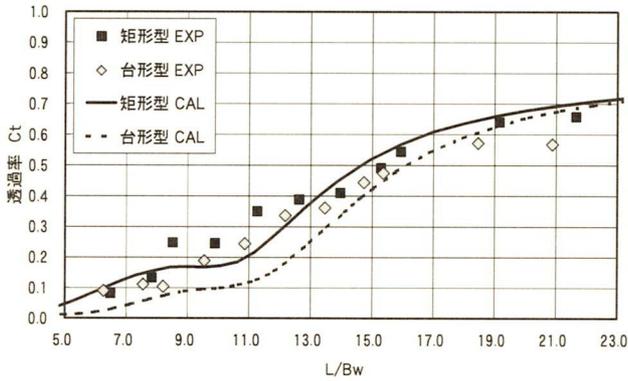


図-8 堤体形状変化の透過率 C_t への影響 ($H=7.5\text{cm}$)

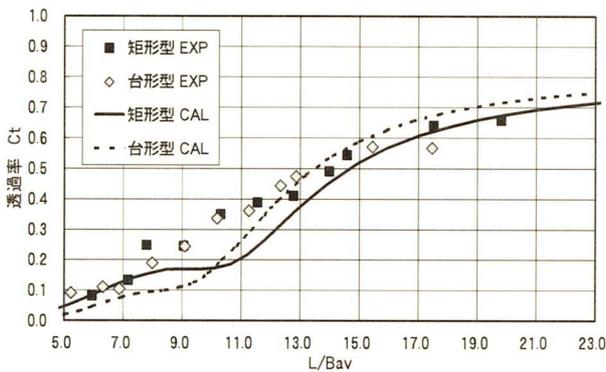


図-9 堤体形状変化の透過率 C_t への影響 ($H=7.5\text{cm}$)

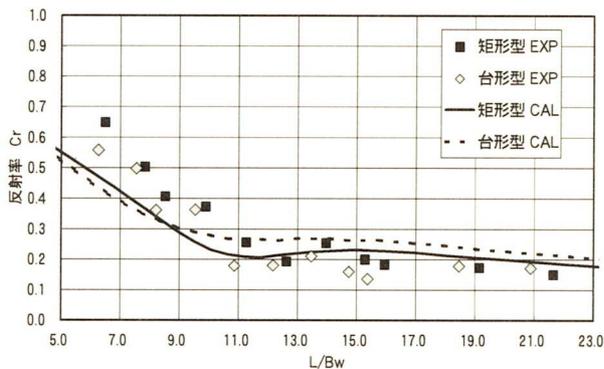


図-10 堤体形状変化の反射率 C_r への影響 ($H=7.5\text{cm}$)

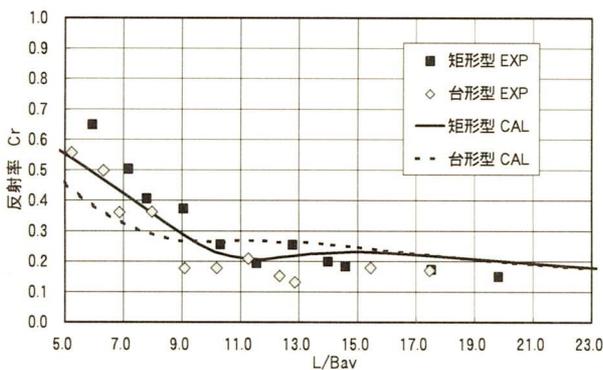


図-11 堤体形状変化の反射率 C_r への影響 ($H=7.5\text{cm}$)

模な渦が発生し、遊水室開口部から流出する沖向き方向へのジェット流の流速が強くなったためと考えられる。一方、 $H=7.5\text{cm}$ の時では、潮位による海水交換量の差異はほとんど見られない。

波高条件によって比較すると、 $H=4\text{cm}$ の時では中周期で Q^* が増加する傾向であるのに対して、 $H=7.5\text{cm}$ の時では、全体的に $Q^*=0.1\sim 0.4$ の間を推移している。これは、波高 4cm で短周期の場合では、遊水室内で大規模な渦が形成されにくく、ジェット流が弱いため Q^* は高い値とはならないが、周期の増大に伴い大規模な渦が形成されるようになり、ジェット流も強まり Q^* が増加するようになると推測される。しかし、これ以上に長周期の条件になると、透過エネルギーが増大し、ジェット流による沖向き方向の流速が相殺されてしまうため、 Q^* は低くなると推定される。このため、中周期側で Q^* が最も高くなると考えられる。

一方、波高 $H=7.5\text{cm}$ の時は、短周期条件においては、 $H=4\text{cm}$ の場合より高い値を示す傾向にある。これは、高波高であるため遊水室内に波運動による水塊が入り易く、ジェット流が強化されるためと考えられる。一方、中周期から長周期にかけては、波高が大きい場合に、無次元交換量が小さくなる傾向にあり、実質的な交換量は波高の $1/2$ 乗程度に比例することが示唆される。このような海水交換量の非線形性の影響については今後続く検討課題としたい。

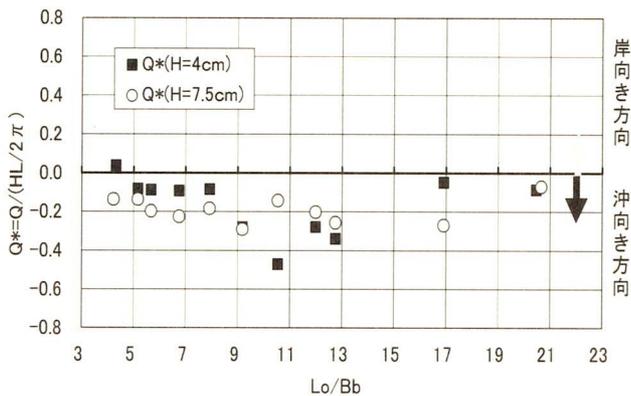


図-12 台形型堤体 (MSL) の海水交換量 Q^*

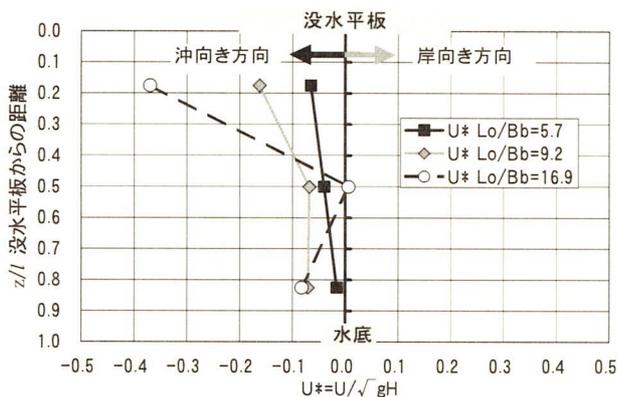


図-13 台形型堤体 (MSL) の流速分布

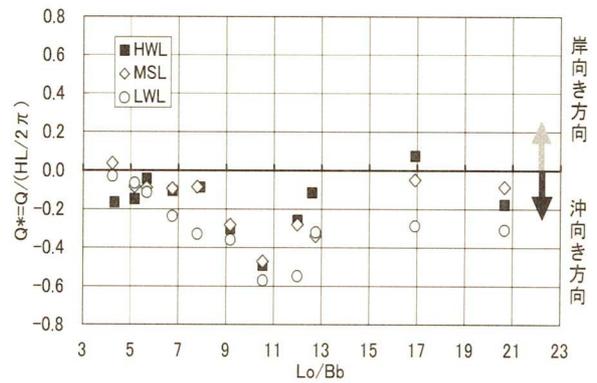


図-14 潮位変化の海水交換量 Q^* への影響 ($H=4\text{cm}$)

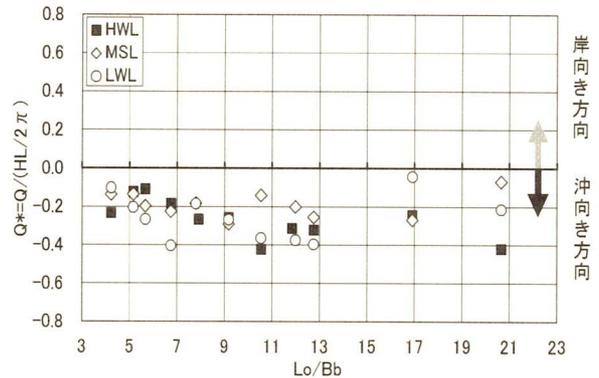


図-15 潮位変化の海水交換量 Q^* への影響 ($H=7.5\text{cm}$)

(2) 矩形型堤体との比較

図-16、図-17は、波高 $H=4\text{cm}$ 、 7.5cm での堤体形状変化の海水交換量 Q^* への影響を示す。周期を表す無次元パラメータは、両堤体の実験値の最も対応が良い L/Bav (波長遊水室平均幅比)を用いた。波高 $H=4\text{cm}$ での Q^* を比較すると、両堤体の実験結果には、ほとんど差異がない結果となった。また、波高 $H=7.5\text{cm}$ のときにおいても、両堤体に大きな差異は見られなかった。これは、海水交換量に最も影響を及ぼすと考えられる開口部からのジェット流の規模や流速は、遊水室内の水塊量に依存しているため、その水塊量の提示に適する Bav を代表長として用いことで、両堤体の差異がなくなったと推測される。

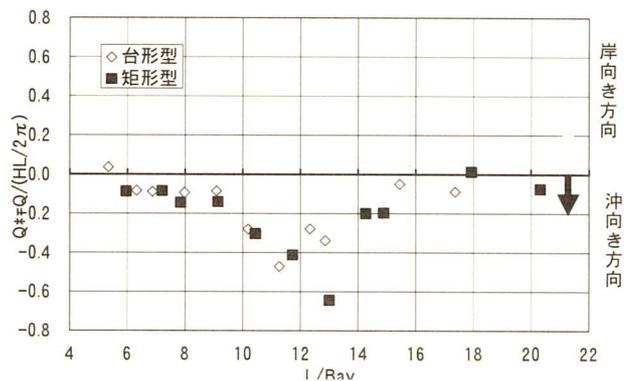


図-16 堤体形状変化の海水交換量 Q^* への影響 ($H=4\text{cm}$)

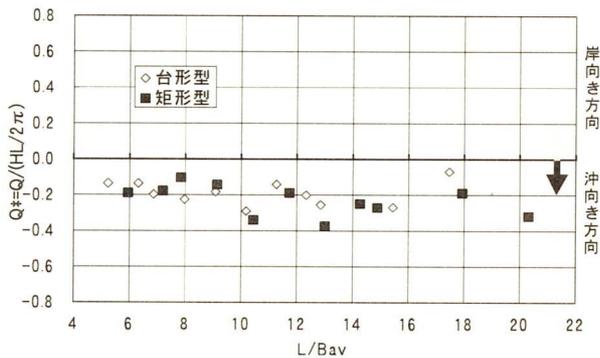


図-17 堤体形状変化の海水交換量 Q^* への影響 ($H=7.5\text{cm}$)

(3) 鉛直上昇流

前述したように、台形型堤体の渦は鉛直上方に発生することが、流況観測において確認されている。この観測結果の代表例を写真-1に示す。この写真に見られるように、概略的に台形遊水室の開口部付近の水底から鉛直上向きに上昇流が現れる例が頻りに観測されている。ただし、矩形型堤体では、上昇流の絶対値も弱いことや発生例も少ない傾向にあった。

図-18は、平均潮位 (MSL) での動画解析によって得られた矩形型堤体と台形型堤体の鉛直上昇流速を L/Bav (波長平均幅比) による変化で示す。鉛直上昇流速 U^* は、全体的に台形型が上回っており、特に、ジェット流の作用が増大する長周期で、その差が顕

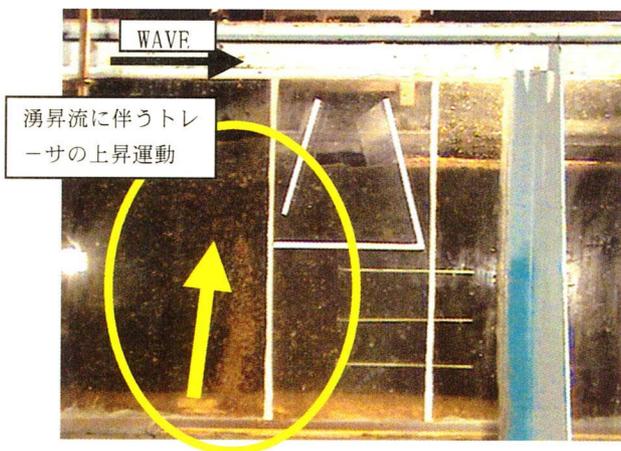


写真-1 台形遊水室型防波堤で観測された湧昇流
 $T=1.65\text{s}$, $H=7.5\text{cm}$

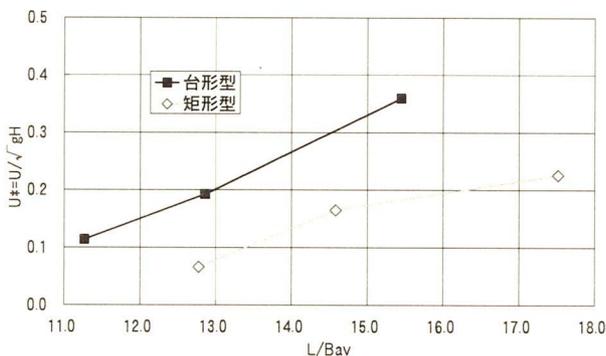


図-18 堤体形状変化の鉛直上昇流 U^* の影響 ($H=7.5\text{cm}$)

著に現れる。これは、台形型堤体の前面カーテン版が傾斜していることによって、波が遡上しやすくなり、発生した渦を鉛直上方に移動させていることが原因と推測される。

5. 結語

(1) 台形遊水室型堤体の透過率 C_t 、反射率 C_r は、ほぼ同没水断面積の矩形型堤体のそれらとほぼ等しく、遊水室の側壁を傾斜杭に沿うように15度程度傾斜させても、消波機能に及ぼす影響は小さい。

(2) 台形、矩形遊水室型堤体の透過率は、無次元パラメータとして、それぞれ波長と遊水室没水断面の平均幅の比 L/Bav を用いて整理すると、両堤体の結果の対応がよい。一方、反射率については、遊水室の水面幅を用いた L/Bw で整理すると、両堤体の結果の対応がよい。

(3) 遊水室の底版と水底間を介しての海水交換量は、台形型堤体においても、矩形型堤体と同様に港内から港外へ向かうように生じることや、水平方向の平均流速は遊水室の底版に近いところで冲向きに最大となることが確認された。

(4) 台形遊水室型堤体では、矩形遊水室型堤体に比較して、前面カーテン壁の傾斜により、遊水室開口部よりの渦が鉛直上方に形成されやすく、この特性によるものと推測される鉛直方向への湧昇流が現れやすいことが確認された。

謝辞

本実験は沿岸新技術研究会が開発した港内水排出型の海水交換防波堤の機能実験の成果の一部であり、本工法の検討にあたり、長崎県、(財) 漁港漁場漁村技術研究所、その他の多数の関係者に資料の提供など大変お世話になりました。ここに記して謝意を表する次第です。

参考文献

- 1) 中村孝幸・大村智宏・大井邦昭：渦流制御を利用する海水交換促進型防波堤の効果について、海講論文集、第50巻、pp. 806-810, 2003.
- 2) 中村孝幸・井出善彦：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
- 3) 中村孝幸・米島幹雄・田中潔：没水平板を有する遊水室型杭式防波堤による透過波の低減効果、海講論文集、第52巻、pp. 671-675, 2005.
- 4) 中村孝幸・高見慶一：ジャケット式遊水室型防波堤の水理特性と作用波力について、海講論文集、第54巻、pp. 876-880, 2007