

高い消波性能を有するジャケット式 遊水室型防波堤の開発

DEVELOPMENT OF A HIGHLY DISSIPATIVE JACKET-TYPE BREAKWATER WITH WATER CHAMBERS

中村孝幸¹・高須賀俊信²・河野徹³・林育寿⁴

Takayuki NAKAMURA, Toshinobu TAKASUKA, Toru KOUNO and Yasutoshi HAYASHI

¹正会員 工博 愛媛大学大学院理工学研究科 (〒790-8577 松山市文京町3番)

² 東京海上日動ファシリティーズ株式会社 (〒212-8554 川崎市幸区大宮町1310番地)

³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)

⁴学生会員 愛媛大学大学院理工学研究科 生産環境工学専攻 (〒790-8577 松山市文京町3番)

A jacket-type breakwater with water chambers was examined extensively to improve its wave control function. The water chamber type breakwater with a trapezoidal cross section was mainly discussed to allow the usage of inclined support piles for economical constructions. The two important dimensions of the water chamber have been examined experimentally and theoretically, such as an opening width under the front curtain wall and the overhung plate length extended from the water chamber base plate to the offshore. After these examinations, the most effective cross section of the water chamber was clarified for the case with the overhung plate. In order to check the water exchange function of the recommended cross section of the breakwater, the averaged mass transport velocity under the water chamber has been also examined experimentally.

Key Words : Jacket-type breakwater, water chamber, overhung horizontal plate, highly dissipative structure, piston mode wave resonance, water exchange

1. はじめに

既に著者らの中の一人¹⁾は、比較的大水深で海底地盤が軟弱な海域を対象にして、斜杭支持に有利な台形断面の遊水室型構造のジャケット式防波堤を新たに提案し、その有効性などを実験と理論により明らかにしてきた。この防波堤は、遊水室内のピストンモード波浪共振を利用することで強い渦流れを生起させ、波エネルギーの逸散や平均流の生成を可能にすること、また構造的に潮流などの流れを阻害しないことなどから海域環境にやさしい防波堤の一つと考えられる。

しかしながら、従来の遊水室型構造のジャケット式防波堤の研究では、波浪制御効果や海水交換能力に及ぼす遊水室開口長の影響が十分には検討されていない。また遊水室型構造のジャケット式防波堤において透過波の遮断効果を高めるためには、その低減機構を踏まえると、構造断面自体を大型化せざるを得ず、建設コストの増大を招きやすい。

本研究は、これに代わる代替案として、ジャケッ

ト式遊水室型防波堤において、その構造体下部の没水平板のみを沖合側に延長する張り出し板工法を新たに提案する。そして、上記した遊水室開口長と併せて張り出し長の波浪制御効果や海水交換能力に及ぼす影響を理論と実験により明らかにする。この際、比較のため、従来形式の台形遊水室型防波堤についても同様の検討を行い、断面変更に伴う消波機能および海水交換能力などを考察した。

2. 実験概要

(1) 実験水槽

実験水槽は、図-1 に示すような長さ 30 m、幅 1 m、高さ 1.25 m の二次元造波水槽を用いた。この水槽内には 1/30 勾配のスロープとそれに接続するように水平床が設置してある。水平床部には水路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を、もう一方で後述するように模型堤体を設置してその消波機能などを測定できるようにした。この

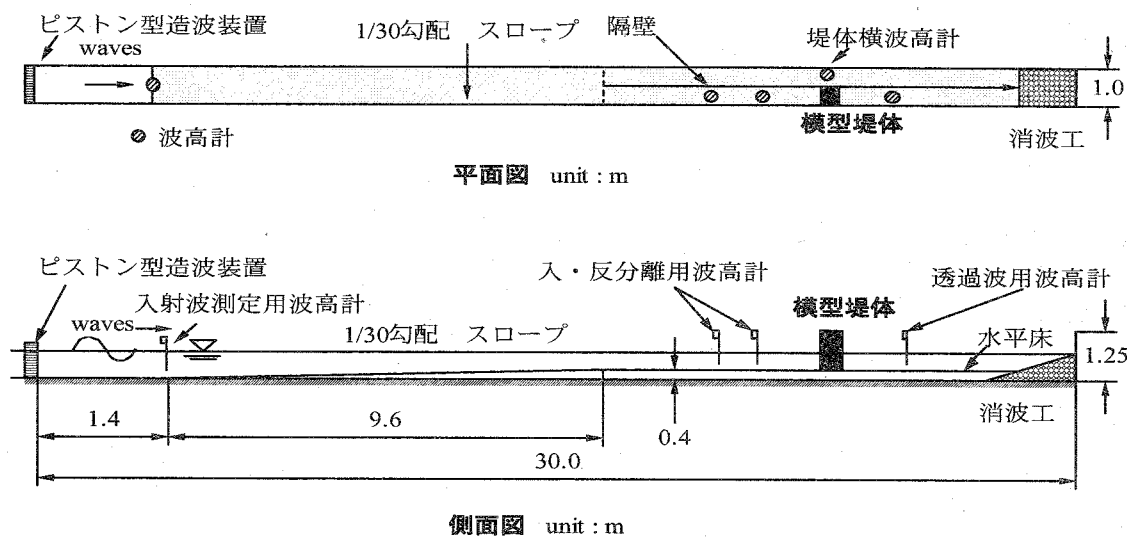
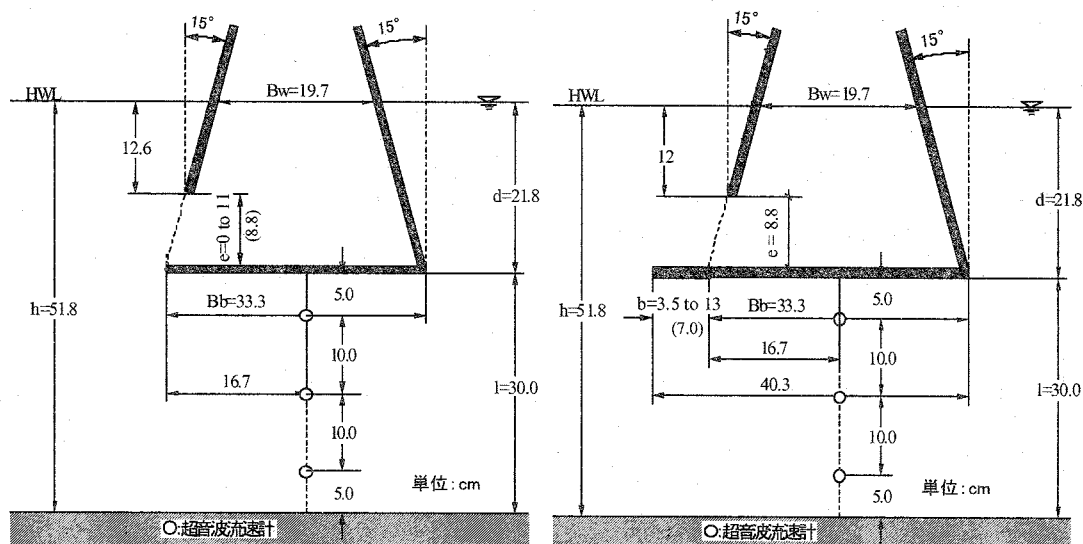


図-1 実験水槽および波高計設置位置



(a) 台形堤体の模型 ($S=1/44.4$)

(b) 底板延長型の堤体の模型 ($S=1/44.4$)

図-2 実験に用いた模型堤体

とき、平均流の発生による堤体前後での平均水位の変化がなるべく生じないように、水槽の終端部に設けた消波工の内部では、両水路間で通水性を維持した。また、水槽の前後端は、水槽の外側を回流できるように設けた管路で結合しており、平均流の発生による平均水位の変化が生じにくい構造とした。

(2) 模型堤体

実験に用いた模型堤体は、図-2 に示すもので、従来形式の(a)台形遊水室型防波堤、また従来形式の堤体に比較して透過波の低減効果が向上するように、従来構造と比較して没水平板を延長して張り出し部を設けた(b)底板延長型堤体の2種類である。このとき想定した模型の縮尺 S は、 $1/45$ 程度である。

本実験では、図-2 (a) に示す堤体断面において遊水室開口長 e を堤体全吃水深 d との比 e/d で $0 \sim 0.5$ の範囲内で6種類に変化させた。図-2 (b) に示す底板延長型では、遊水室開口長 e を $e/d=0.4$ に固定し

て、水平板の張り出し長 b を模型堤体幅 Bb との比 b/Bb で $0.1 \sim 0.4$ の範囲内で4種類に変化させた。

これらの図中において、カッコ書きで示す、遊水室開口長 $e=8.8(\text{cm})$ と水平板張り出し長 $b=7.0(\text{cm})$ は、各種の実験的な試行の後に最終的に最も効果的な透過波・反射波の制御効果が確認された寸法に相当している。ここでは、海水交換量の測定実験にこの最終断面を用いた。

(3) 実験方法および実験条件

波変形の測定には、計5台の容量式波高計を用いた。この内2台は造波板に近い沖側と堤体横の別水路に設置して入射波の測定に用いた。また、模型堤体の沖側において入反射波の分離測定用に2台、透過波の測定用に1台を用いた。ここで反射率に関しては合田ら²⁾の入反射分離推定法を用いた。

海水交換量の推定に必要な流速測定は、図-2 中に示すように超音波式流速計を堤体下部に3台設置

して、時間平均流速の鉛直分布などが測定できるようにした。ここでは、主に水平方向流速に着目し、その時間平均流速に流速計の代表する区分長を乗じた後に各流速計について総和を行い、最終的な平均輸送流量を算出した。

実験では、水位条件として高潮位(HWL)に相当する $h=51.8\text{cm}$ に固定した。作用波は規則波に限定し、周期 $T=0.95\sim 2.1\text{s}$ の範囲で7種類に変化させた。このとき、作用波高 H は 10cm のみとした。

想定した現地海域の条件は、水深 $h=23\text{m}$ 、異常時波浪の条件が周期 $T=12\text{s}$ 、波高 $H=4.4\text{m}$ である。上述した図-2の模型堤体は、想定した海域条件の模型量に対して、透過率がほぼ0.3程度以下となるように設定したものである。

3. 理論算定法の概要

波浪制御効果の理論的な算定には、渦流れなどの発生による波のエネルギー逸散率を近似的に考慮する中村・井出³⁾の減衰波理論に基づく数値解析法を用いた。この時、構造体の周囲に設ける減衰波領域としては、堤体の前後に波長 L の60分の1の範囲とし、線形抵抗係数 fc には0.6を用いた。ただし、遊水室の開口部を閉じた台形堤体($e/d=0$)に対しては、開口部よりのジェット流およびその渦への巻き込み過程が見られないことから、 $fc=0.15$ と比較的低めの線形抵抗係数を用いた。なお、実際の算定では、各種の線形抵抗係数を用いた事前検討を行い、実験結果との整合性などを考慮して、これらの最終的な抵抗係数を採用している。

4. 波浪制御効果

(1) 張り出し部の有無の波浪制御効果への影響

図-3は、図-2に示す模型堤体で遊水室開口長の条件を $e/d=0.4$ と固定して、水平板張り出し部の有無の反射・透過率(Cr , Ct)への影響を実験的に検討した結果を示す。図中では、 Cr , Ct の周期による変化を示すもので、周期の無次元量として、波長 L

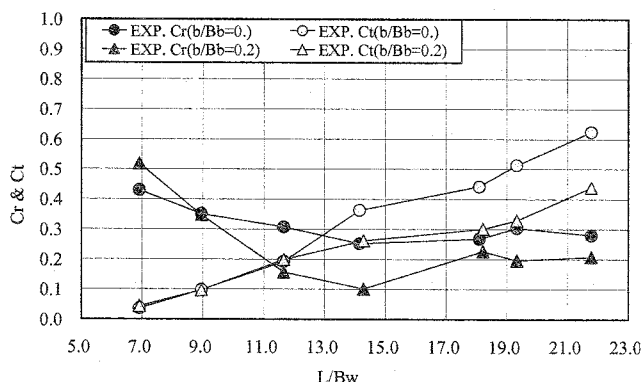


図-3 張り出し部の有無による反射・透過率への影響 ($e/d=0.4$, $H=10\text{cm}$)

と遊水室水面幅 Bw の比(以下、波長遊水室幅比 L/Bw と称す)を用いた。

この図より、遊水室下部の水平板を延長すると、反射率 Cr と透過率 Ct の両者は、 L/Bw の大きな長周期側において、減少することが認められる。特に長周期側で透過波が低減する理由としては、水平板を沖側へ延長すると、鉛直方向の流体運動が抑制されると同時に遊水室開口部より沖側へ発生するジェット流の勢いが増加するため、堤体下部を介して透過する波エネルギーが減少することによるものと考えられる。

従って、台形遊水室の底板を沖側へ延長して張り出し部を設ける工法は、特に長周期側における透過波の低減など、波浪制御効果の改善に役立つものと言える。

以下では、より効果的な遊水室型断面を見出すため、水平板の張り出し長 b の影響をより詳細に検討すると共に、遊水室開口長 e の波浪制御効果への影響についても併せて検討してみた。

(2) 遊水室開口長 e の影響

図-4~7は、底板延長型の張り出し長 b を $b/Bb=0.2$ と固定して、遊水室開口長 e による反射・透過率(Cr , Ct)への影響を検討した結果を示す。図-4, 5は、反射率 Cr に関する実験結果および算定結果を分離して示す。また、図-6, 7は、透過率 Ct

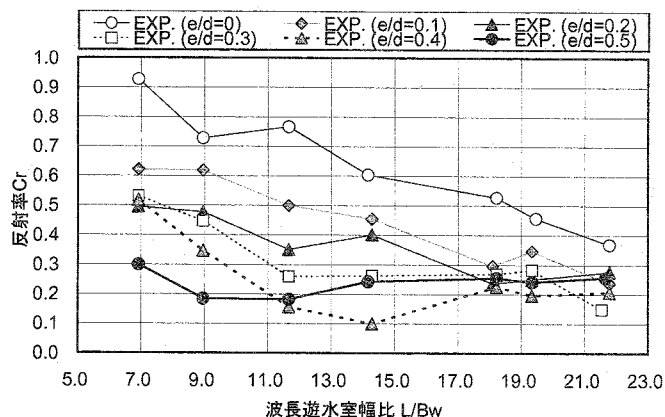


図-4 遊水室開口長 e の反射率への影響 (実験結果, $b/Bb=0.2$, $H=10\text{cm}$)

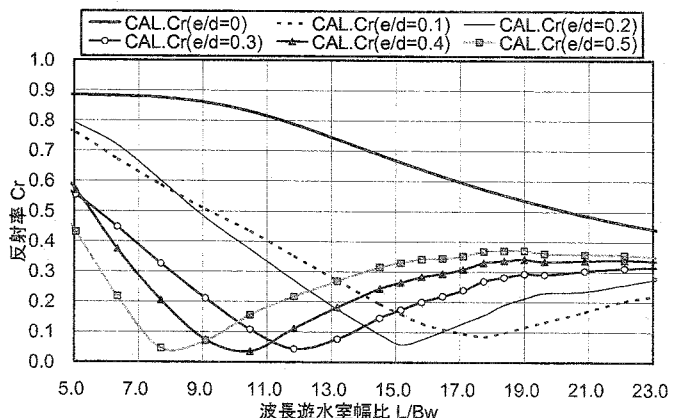


図-5 遊水室開口長 e の反射率への影響 (算定結果, $b/Bb=0.2$)

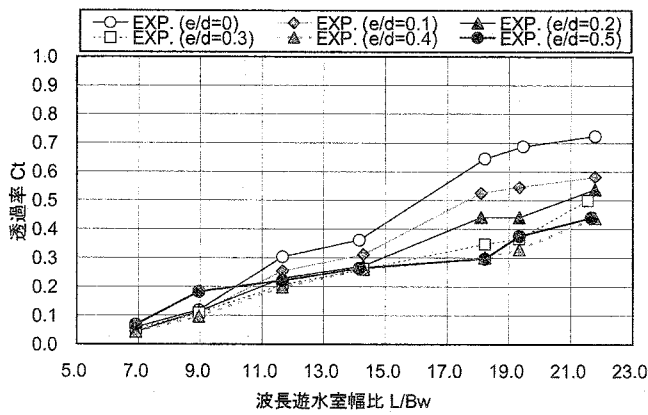


図-6 遊水室開口長 e の透過率への影響
(実験結果, $b/Bb=0.2$, $H=10\text{cm}$)

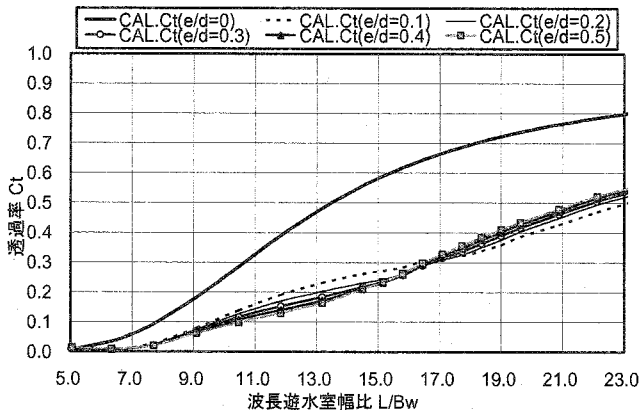


図-7 遊水室開口長 e の透過率への影響
(算定結果, $b/Bb=0.2$)

に関する結果を同様にして示す。各図で、周期に関する無次元量は、図-3と同様に L/Bw (波長遊水室幅比) を用いた。

まず、図-4の反射率 Cr の実験結果に着目すると、遊水室開口長 e が大きくなるほど反射波が効果的に低減されており、 Cr の極小値も短周期側に移行する傾向が認められる。これは開口長が大きくなるほど前面版吃水深が浅くなり、遊水室の振動水塊量が少なくなることによる。そして、図-5に示す Cr の算定結果では、このような開口長の増加に伴う極小反射率の短周期側への移行が明確に確認できる。開口長に伴う Cr の定性的な変動傾向は実験結果と算定結果ではほぼ一致するが、定量的な一致度は不十分である。特に実験結果では開口長が小さくなると、 Cr の絶対値は順次増加する傾向にあり、算定結果とは傾向が異なる。これは、開口長が小さな条件下では、遊水室内外への水塊の出入が抑制されるようになり、結果的に遊水室開口部からのジェット流の勢いが弱くなることによるものと推測される。

次に、図-6の透過率 Ct の実験結果に着目すると、開口長が大きくなるほど透過波が低減され、特に長周期側 ($L/Bw=17\sim23$) でこの傾向が顕著になることが分かる。これは開口長が大きくなると遊水室内に水塊が出入しやすくなり、遊水室のピストンモード波面運動による発散波の影響が強く現れるようにな

るためと考えられる⁴⁾。事実、遊水室内の水面変動がそれほど大きくならない短周期側の条件で透過率 Ct には余り差異が認められない。また遊水室開口長 e を作用波高以上まで大きくしても、透過率 Ct には大きな変化は見られなくなることが分かる。

図-7に示す Ct の算定結果と図-6の実験結果を比較すると、やはり遊水室開口長が小さな条件、具体的には開口長が波高に対して比較的小さくなる条件下で定量的な一致度が不十分である。ただし、開口長が波高に対して比較的大きい条件 ($e/d=0.4, 0.5$) では、実験結果と算定結果との一致度は比較的良好で、実際場でも有用となるような開口長の条件では理論算定による予測が可能と考えられる。

以上の結果より、底板延長型堤体の遊水室開口長 e を波高と同程度まで大きくすると、高い波浪制御効果を期待できることなどが判明した。

(3) 張り出し長 b の影響

図-8~11は、遊水室開口長 e を波高程度 ($e/d=0.4$) と固定して、張り出し長 b の波浪制御効果への影響を検討した結果を示す。やはり判別しやすいように、実験結果と算定結果に分けて示す。

まず、図-8の反射率 Cr の実験結果に着目すると、張り出し長を長くすることで反射率 Cr は多少ながら低下する傾向が認められるが、その影響はそれほど顕著でない。また反射率 Cr の極小値が現れる周期条件も差異がほとんど見られない。そして、このような傾向は、図-9に示す算定結果からも同様に

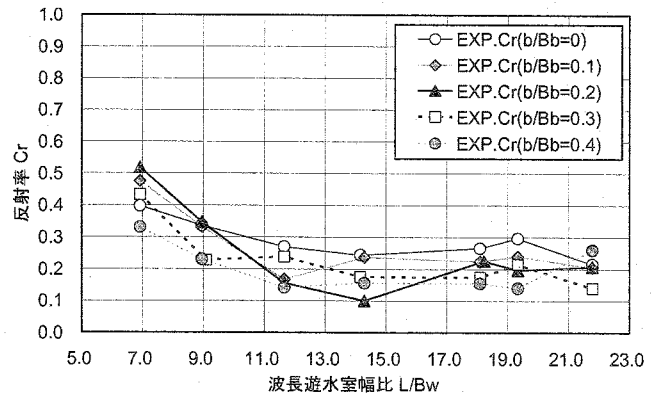


図-8 張り出し長 b の反射率への影響
(実験結果, $e/d=0.4$, $H=10\text{cm}$)

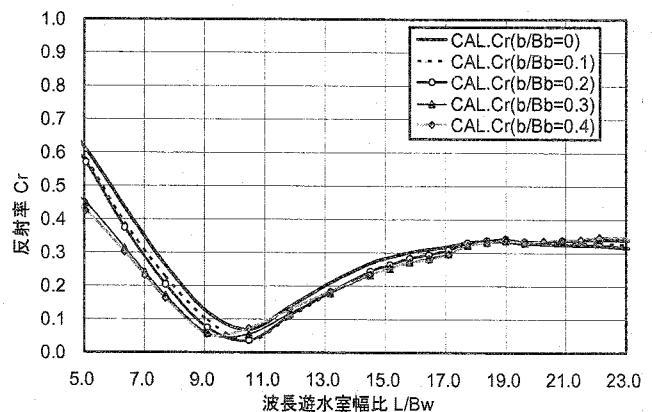


図-9 張り出し長 b の反射率への影響
(算定結果, $e/d=0.4$)

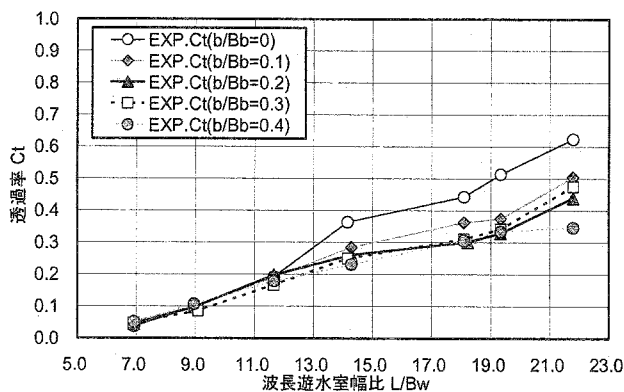


図-10 張り出し長 b の透過率 C_t への影響
(実験結果, $e/d=0.4$, $H=10\text{cm}$.)

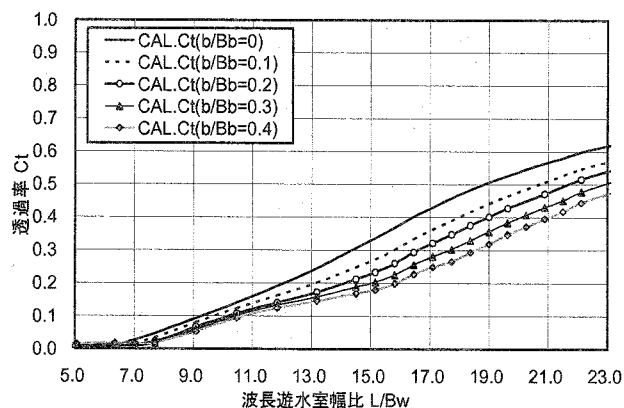


図-11 張り出し長 b の透過率 C_t への影響
(算定結果, $e/d=0.4$)

確認される。前述した遊水室開口長 e の反射率に及ぼす影響に比較すると、水平板の張り出し長の影響は有意でないと判定される。

次に、図-10, 11 の透過率 C_t の結果に着目すると、透過率 C_t は張り出し長 b を長くすると特に長周期側において低減されることが確認できる。これは上記したように、張り出し長を長くすると、鉛直方向の流体運動が抑制されることや遊水室開口部からのジェット流の強化によるものと考えられる。ただし、張り出し長 b を水平板の長さ Bb との比で 0.2 以上に長くしても、透過率の低減効果はそれほど顕著でないことも確認される。そして、このような底板張り出し長の透過率への影響は、図-11 に見られるように、理論的にもほぼ予測できることが分かる。

以上の検討から、長周期側での透過波の低減を目的として遊水室底板に張り出し部を設ける場合、その張り出し長は遊水室底板幅の 2 割程度までとすればよいことが判明した。

5. 堤体まわり流況および海水交換量

ここでは、張り出し部を設けることによる堤体近傍の流速場への影響を検討する。検討に用いた模型堤体は、上記までの検討で高い波浪制御効果が確認

された $e/d=0.4$, $b/Bd=0.2$ の底板延長型と、比較のための延長板のない台形型堤体の 2 種類を用いた。これらの模型堤体の断面諸量は図-2(a), (b)に示すもので、開口長 e と張り出し長 b についてはカッコ書きで示した量に相当する。

図-12 は、堤体下部の水平方向における時間平均流速の鉛直分布を示す。具体的には、堤体下部に設置した 3 台の超音波流速計により測定した水平流速の時間波形から求めた平均流速 U_x (10 波平均) の鉛直分布を示し、水面位置での波による水平流速振幅に比例する量 ($=\pi H/T$) で除した無次元流速 U_x^* を没水平板からの無次元距離 z/l (l : 底板と水底間の距離) の関数として示す。

この図より、堤体下部の平均流速の鉛直分布は、両堤体において、底板の直下で最大で水底に向かうにつれ減少する分布特性を示すことや、平均流速の絶対値についても差異が見られないなど、張り出し部の有無による影響をほとんど受けないことが分かる。このとき、水平方向の平均流速は、従来の研究で報告されているのと同様に港内側から沖向きへ発生することが再確認できる。

上記したように、底板延長型堤体は、台形型堤体に比較して、長周期側での透過波の制御効果に優れるなどの差異があるにも拘わらず、堤体下部の水平方向の平均流速の特性にはほとんど差異が見られず、不思議な現象と考えられる。この理由については明確でないが、底板延長型堤体では、遊水室開口部よりのジェット流の水平成分は強化されるものの、張り出し板の存在により堤体下部の水塊への影響は減少するため、結果的に同程度の平均流が生成されたものと推測される。

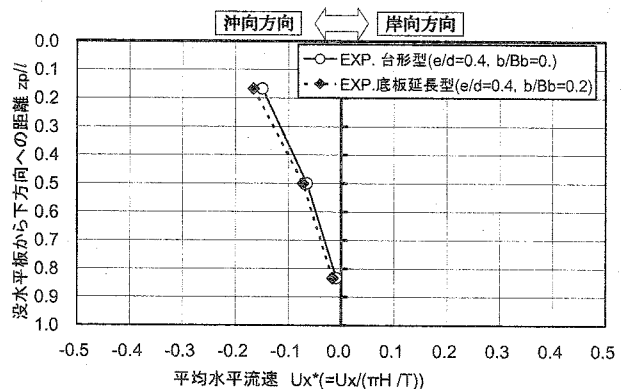


図-12 堤体下部の水平方向への平均流速の鉛直分布の比較 ($T=1.8\text{s}$, $H=10\text{cm}$, $L/Bw=18.1$)

図-13 は、各堤体による一波当たりの海水交換量 Q を波長遊水室幅比 L/Bw による変化で示す。図中では、波の一波あたりの平均輸送流量 Q を波運動による半周期間の移動水塊量 ($=HL/2\pi$) で除した無次元海水交換量 Q^* で示す。

この結果より、 Q^* は作用波の周期が長くなるにつれて増大することが分かる。これは両堤体ともに周期が長くなると、遊水室開口部よりのジェット流が強くなり、それに伴い形成される渦の規模も増大す

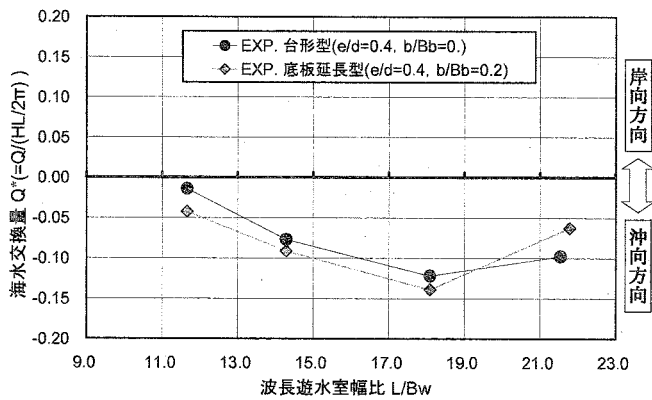


図-13 一波当たりの海水交換量 Q^* の比較

るためと考えられる。張り出し部の有無による影響に着目すると、両堤体による Q^* の差異は微小であり、その影響はほとんど認められない。

これは前述したように、遊水室開口部よりのジェット流の形成特性と張り出し板の作用によるものと考えられる。

図-14, 15 は、それぞれ台形型堤体と底板延長型堤体の沖側領域での平均流の流速ベクトル図を示す。この流速ベクトル図は、周期 $T=1.8$ s、波高 $H=10$ cm の条件下で観測されたもので、粒子トレーサによる流れの可視化を介して PIV 法により波 10 周期分にわたる平均流速ベクトルを算出した結果に相当する。

図-14 に示す台形型堤体では、堤体の沖側の水底付近における平均流は岸向きから鉛直上向きに生成されることが分かる。これは遊水室開口部よりの渦流れが作用波の周期が長くなるにつれて、沖向き水平方向に強く放出されるため、それを補う補償流が水底付近に現れることの影響を受けたものと考えられる。ただし、平均流は遊水室開口部の真下では鉛直上方向に向かう傾向にあり、上記した沖側に向かう平均流の影響を受けることによるものである。

一方、図-15 に示す底板延長型堤体の構造体では、堤体沖側の水底付近の平均流は、台形型堤体と同様に岸向きから鉛直上方向に生成され、特に鉛直上方向への平均流が増加する傾向にあることが確認される。これは張り出し長 b を長くすることで、従来型よりも堤体下部への透過エネルギーが抑えられることや張り出し板の突端部に渦が形成されることによるものと考えられる。また流況の観測結果より、遊水室開口部よりの渦流れが台形型堤体では水平方向・沖向きに放出されるのに対して、底板延長型では比較的張り出し部の近傍に渦が生成されるなどの差異も確認されている。

6. 結語

(1) 台形断面のジャケット式遊水室型防波堤において、その没水平板を沖側方向に延長させると、反射率は短周期側で、透過率は長周期側で低下するなど波浪制御機能の改善効果が期待できる。このとき張り出し長は、経済性や作用波力の増大化を考慮して、

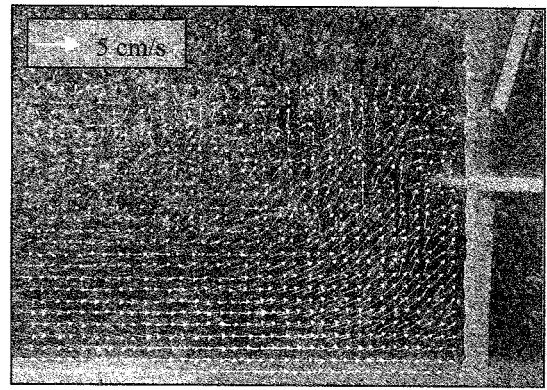


図-14 台形型堤体の開口部沖側の平均流特性
($T=1.8$ s, $H=10$ cm, $e/d=0.4$, $b/Bb=0.$)

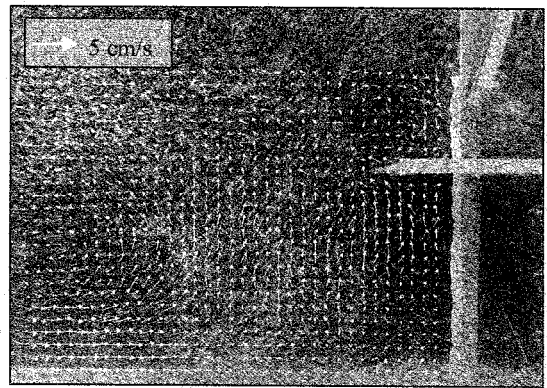


図-15 底板延長型堤体の開口部沖側の平均流特性
($T=1.8$ s, $H=10$ cm, $e/d=0.4$, $b/Bb=0.2$)

遊水室の底面幅の2割程度までとすればよい。

(2) 底板延長型堤体および台形型堤体の両者において、その遊水室開口長を作用波高と同程度まで大きくすると、反射波の低減機能が向上することや長周期側での透過波の低減効果が増大するなど、高い波浪制御効果が期待できる。

(3) 波浪制御機能を高めるため、ジャケット式遊水室型防波堤の開口長を拡大することや没水平板を沖側方向に延長するなどの改善工法を採用しても、堤体下部を介しての平均輸送流量には有意な差異は見られず、従来の台形型堤体と同様な海水交換機能が発揮できる。

参考文献

- 1) 中村孝幸・河野徹・浅川典敬・大川大一・高見慶一：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、海洋開発論文集，第24巻，pp.579-584，2008。
- 2) 合田良実，鈴木康生，岸良安治，菊池治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料，No.248，pp.3-24，1976。
- 3) 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。
- 4) 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，海工論文集，第52巻，pp.671-675，2005。