

深層域での鉛直混合を促進するジャケット式 遊水室型海水交換防波堤について

DEVELOPMENT OF A JACKET-TYPE BREAKWATER WITH WATER CHAMBERS FOR VERTICAL MIXING IN DEEP SEA

中村孝幸¹・木田英之²・高須賀俊信³

Takayuki NAKAMURA, Hideyuki KIDA and Toshinobu TAKASUKA

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正会員 工修 大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

³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 water exchange breakwater with water chambers is newly developed. Especially mixing and diffusion functions between the sea surface and sea bottom regions by the wave interaction with the breakwater are major interest in this study. A new breakwater has two inclined curtain walls in front and rear, respectively, and also an inclined base plate at the bottom. The rear curtain wall connects to the base plate at the corner of a water chamber. In this study, in order to promote the vertical mixing function of the breakwater, location of the opening mouth connecting between the water chamber and the outer water region is examined experimentally. It is clarified that the gap spacing installed at the base plate near the front curtain wall is effective for exciting the vertical mixing under the breakwater body.

Key Words : Vertical mixing, jacket-type breakwater, water chamber, piston mode wave resonance, wave transmission, wave reflection, water exchange, deep sea area

1. はじめに

既に著者らの中の一人¹⁾は, 比較的大水深の海域において, 高い消波機能に加え, 外洋との海水交換機能を有するジャケット式の遊水室型防波堤を提案すると共に, その水理学的な機能などを明らかにしてきた。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して, 堤体前面の開口部より強いジェット流を吹き出し, 渦への巻き込みやシア効果により, 堤体下部において冲向きへの平均流を誘起する機能を持つ。

しかし, この堤体からの渦流れは, 遊水室開口部の冲向き水平あるいは上方向へ発達する傾向が強い。ため, 水底付近の平均流の生成には余り寄与しない状況にある。このため, 海水交換機能を有する防波堤ではあるが, 汚れが著しい底層付近の海水交換や鉛直混合は十分でなく, 魚類海面養殖の盛んな海域では必ずしも有効に作用しない可能性がある。

このため本研究では, 遊水室型防波堤により, 鉛直下向きに渦流れを発生させ, 大水深底層付近の鉛直混合を促進する防波堤について, 実験と理論に基づき検討する。この際, 比較のため, 従来形式の水

平版を有する台形遊水室型防波堤についても同様の検討を行い, 断面の変更に伴う消波機能や海水交換機能および渦流れを含む開口部ジェット流の流向特性などを考察した。

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 30m, 幅 1m, 高さ 1.2m 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あり, 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。

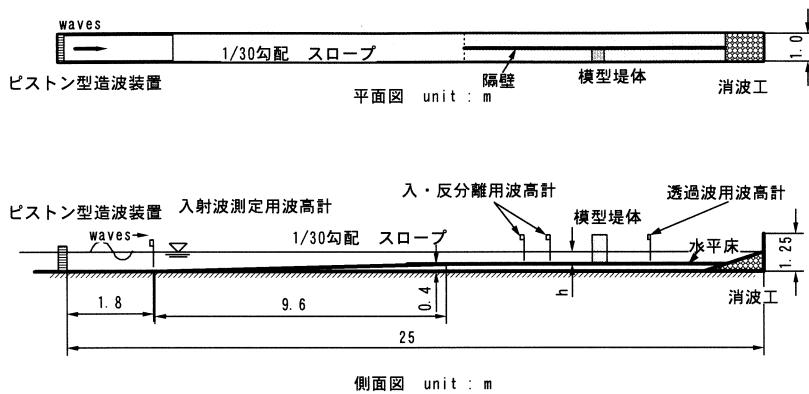


図-1 実験水槽および波高計設置位置

(2) 模型堤体

本実験で用いた 3 種類の模型堤体を図-2 に示す。これらの模型の縮尺は 1/32 程度を想定した。図中 (a) の模型堤体は、中村ら¹⁾の研究で用いられているものと同一である。この堤体は、傾斜杭で支持されることを前提としており、前後のカーテン壁は支持杭に平行に設置されることから台形断面の遊水室を構成するようにしてある。

図中 (b) の堤体は、上記 (a) の従来形式の堤体に比較して、遊水室開口部からのジェット流を鉛直下方に向けて、渦流れの影響が水底付近まで現れるようにと底板のみを傾斜させた構造に相当する。

また、図中 (c) の堤体は、遊水室開口部を傾斜底板側に移動して、しかも遊水室の没水断面を図中 (a) の堤体とほぼ同程度になるように遊水室幅を拡張した断面である。以下、これらの堤体をそれぞれ台形型、傾斜型、延長型と称することにしたい。

(3) 実験条件

本実験では、潮位変化の影響が検討できるように高潮位 (HWL)、平均潮位 (MSL)、低潮位 (LWL) に対応する 3 種類の水深を用いた。実験に用いた作用波は規則波で、周期 T が 0.95s~2.1s の範囲で 9 種類、波高 H は 4cm, 7.5cm の 2 種類とした。

(4) 実験方法

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、ないし 4 台設置して、平均流速の鉛直分布などが計測できるようにした。このとき、延長型の堤体に限っては、遊水室開口部にも電磁流速計を 1 台設置して交番流の流速振幅やその主方向などが測定できるようにした。

UNIT: cm 板圧: 1cm ト ●ドップラー流速計設置位置

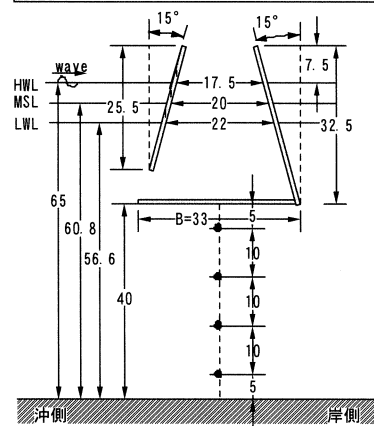


図-2 (a) 台形型堤体

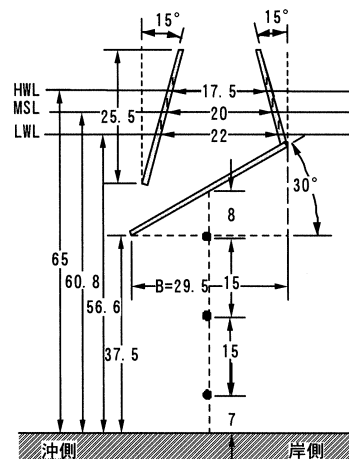


図-2 (b) 底板傾斜型堤体

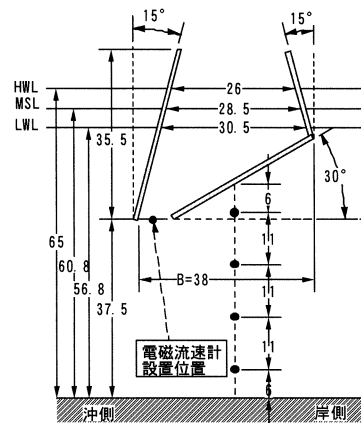


図-2 (c) 前面版延長型

図-2 実験堤体および流速計設置位置

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、従来の研究^{1), 4)}に準じて線形抵抗係数 $fc=0.2$ を台形型、傾斜型に用いた。一方、延

長型は各種の fc 値を採用した検討の結果、実験結果との対応がよいと判定された $fc=0.15$ を用いた。延長型堤体でより小さな抵抗係数となったのは、堤体前面の形状が開口部のない傾斜版であるため、波エネルギーの損失が小さくなったことによるものと考えている。

4. 堤体まわりの渦流れの特性と平均流

各堤体による渦の発生機構は、基本的には同じである。まず遊水室内でピストンモードの波動運動が発生し、前面壁前後の水位変動に有意な位相差が生じるようになる。このとき、遊水室開口部より上記の位相差に伴い大量の水塊が流出入して強い渦流れを発生させる。特に、遊水室の外側に流出するジェット流およびそれに伴い発生する渦は、堤体下部に冲向きの平均流を発生させ海水交換を可能にしている。しかし渦の形成特性やそれに伴う平均流の出現特性は、堤体形状により異なっている。このため、台形型、傾斜型、延長型の堤体形状別に図-3、図-4、図-5 にそれぞれの流況特性を図示すると共にそれらの概要を紹介する。

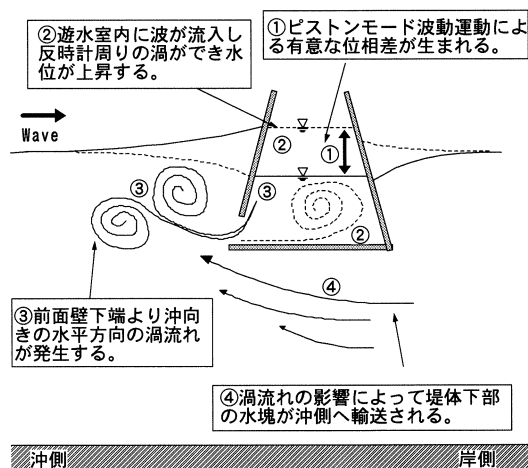


図-3 前面版延長型の平均流の生成機構

(1) 各堤体まわりの渦の形成特性

①押し波時：台形型と傾斜型では水塊が水平方向から没水平板に沿うように流入し遊水室内で半時計回りの渦を形成する。一方、延長型では鉛直下方向から前面版に沿うように水塊が上昇流入し、没水平板の開口部からの流れの剥離に起因する時計回りの渦が形成される。

②引き波時：台形型と傾斜型は堤体の沖側で水平方向にジェット流が放出されることで堤体の前面沖側に渦が形成される。一方、延長型では、沖側斜め下方向にジェット流が放出され、没水平板の開口部からの流れの剥離に伴い反時計回りの強い渦が形成される。この反時計回りの渦は、遊水室からの水塊を水底付近まで輸送する原動力となる。

そして、このような堤体形状による流況の相違は、開口部の設置位置によるものと考えられ、延長型の堤体のように鉛直下向きに開口部を設置することで、流況に大きな相違が出てくることが分かる。

③波周期による渦の形成特性：比較的短周期の条件下では、引き波時において、どの形状の堤体も前面版付近に時計回りの渦が形成される。しかし作用波の周期が長くなると、台形型と延長型の堤体では沖側において反時計回りの渦がより大きく成長して卓越した影響を示すようになるに対して、傾斜型で

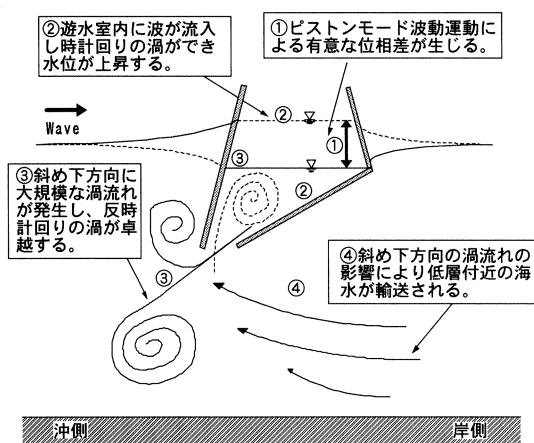


図-5 前面版延長型堤体の平均流の生成機構

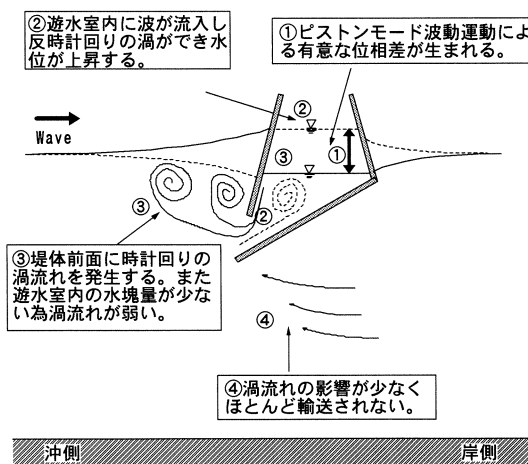


図-4 底板傾斜型堤体の平均流の生成機構

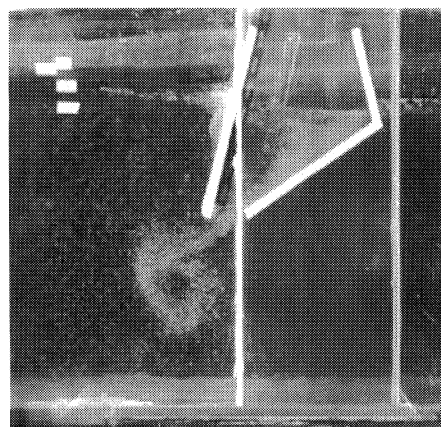


写真-1 前面版延長型堤体の流況
($H=4\text{cm}$, $T=1.5\text{s}$)

は変化なく、時計回りの渦が卓越する。このような周期特性による相違は、開口部付近の構造体形状の相違によるものと考えられる。

(2) 各堤体まわりの渦の形成特性

上記したような渦の形成特性に伴い、台形型、傾斜型の堤体では、特に堤体直下の水塊が冲向き方向に輸送されやすく、水面に近い範囲で冲向きへの平均流が現れる。これは、特に引き波時における遊水室からのジェット流と渦の移動特性による。

一方、延長型の堤体では、引き波時の渦が斜め下方向に発生・移動するため、堤体下部の水塊の場合に影響を与えると同時に、この渦の回転方向が反時計方向であるため、堤体下付近の水塊が沖側に輸送されやすく、沖側へ向かう平均流となる。写真-1は、延長型堤体の開口部における引き波時の流況を示す。この写真からもこのような流向特性が再確認できる。

5. 実験結果

(1) 底板傾斜型堤体の消波機能

図-6、7は傾斜型の堤体の高潮位(HWL)、平均潮位(MSL)、低潮位(LWL)のときの反射率Cr、透過率Ctを示す。図中では、周期の無次元パラメータとして波長Lと堤体の最大水面幅B(以下、堤体幅と称す)の比を用いた。また図中には減衰波理論による算定結果についても併せ示す。

各潮位における透過率と反射率を比較すると、潮位が低くなるほど反射率が低下するのに対して、透過率は増大する傾向にあることが認められる。これは堤体の吃水深が浅くなることにより、遊水室内のピストンモード波浪共振が短周期側で生じることになるため⁴⁾、反射率の極小値が短周期側に移行することによる。また、透過率が増大するのは、堤体下部を通しての透過波エネルギーが相対的に増大することによるものと考えられる。

そして、この堤体の反射率、透過率共にL/B=9付近で比較的低く抑えられており、優れた消波機能を有することが分かる。これはL/B=9付近で、遊水室内のピストンモード波浪共振に伴う渦流れが最も顕著になる周期帯であることによると考えられる。

(2) 前面版延長型堤体の消波機能

図-8、9は延長型の堤体の高潮位(HWL)、平均潮位(MSL)、低潮位(LWL)のときの反射率Cr、透過率Ctを示す。ここでも周期に関する無次元量は、同様にL/B(波長堤体幅比)を用いた。

透過率と反射率に及ぼす潮位変化の影響を見ると、傾斜型と同様に潮位が高いほど反射率は高く、透過率は低くなる傾向にあることが分かる。このとき、反射率は短周期側(L/B=4.0~7.0)において高くなる傾向である。これは遊水室の開口部を鉛直下向きにして前面版の吃水深を深くしたことによるものと考

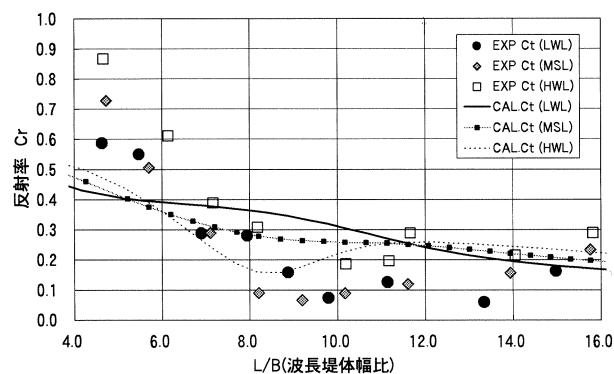


図-6 傾斜型の各潮位での反射率Cr (H=4cm)

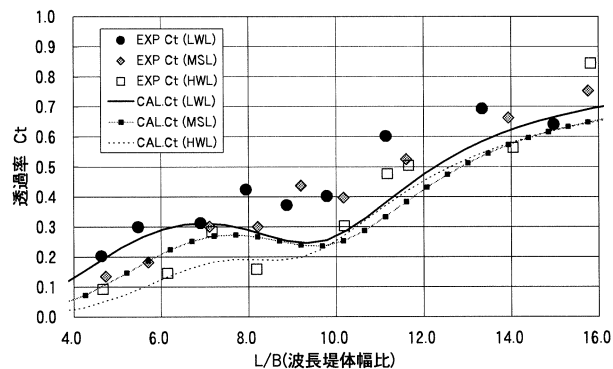


図-7 傾斜型の各潮位での透過率Ct (H=4cm)

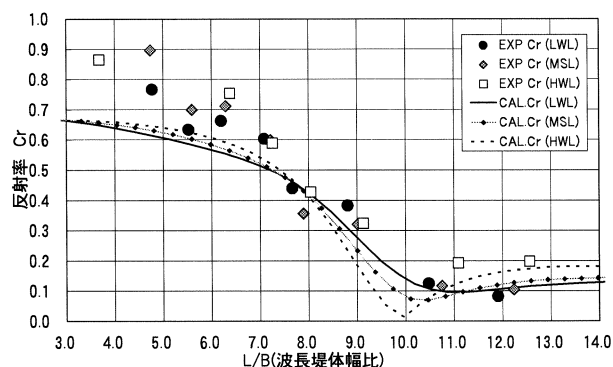


図-8 延長型の各潮位での反射率Cr (H=4cm)

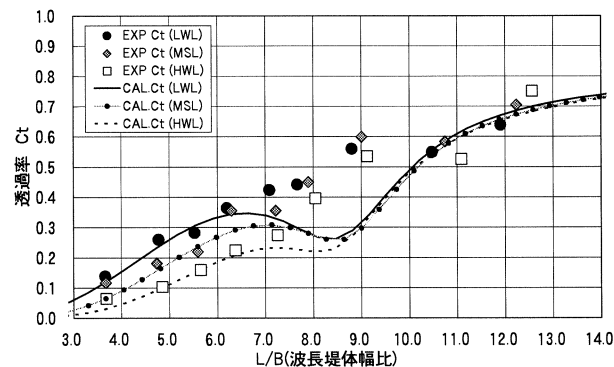


図-9 延長型の各潮位での透過率Ct (H=4cm)

えられる。

また中周期帯(L/B=7.0~9.0)において、透過率の実験結果が局所的に高くなり、算定結果に比較しても高い状況にある。この理由については明確でない

が、長周期側では実験結果と算定結果との一致度が見られることを踏まえると、水槽内での横波の影響、あるいは透過側水域での部分重複波の発生による影響ではないかと判断される。

いずれにしても、前出の傾斜型堤体と比較して、反射率は全般的に高くなることや、局所的にであるが、透過率も多少高めになることなどが認められる。

(3) 堤体形状の消波機能の比較

図-10, 11 は、台形型、傾斜型、延長型の平均潮位 (MSL) における反射率 C_r 、透過率 C_t の結果を示す。このとき周期パラメータとしては、前出までのものと異なり、波長 L と遊水室の水線面幅 B_w の比 L/B_w を用いた。各堤体の水線面幅は、台形型、傾斜型、延長型のそれぞれに対して $B_w=20\text{cm}$, 20cm , 28.5cm である。

まず C_r の実験結果に着目すると短周期側で延長型の反射率が他に比べて高い傾向にある。また台形型、傾斜型の極小値は中周期付近で現れるのに対して延長型は長周期側に移行している。これらは延長型の前面版吃水深が他に比べて深いことや、それに伴い開口部設置位置を鉛直下向きにしたことが原因と考えられる。

次に C_t の実験結果に着目すると、台形型と傾斜型には有意な差異は見られないものの、延長型は他の形状に比べて全体的に高めであり、特に中周期の条件下でその傾向が顕著である。これは延長型特有の斜め下方向に渦が発生することが一つの要因と考えられる。特に前述したような、反時計回りの渦が堤体の下部に形成されることで透過率に多少なりとも影響を与えたと推定される。

図-12 は各堤体のエネルギー逸散率 EL を示す。ここでも周期パラメータとして L/B_w を用いた。どの堤体形状でも中間周期 ($L/B_w=10.0\sim14.0$) において、 EL は極大となり、遊水室の作用による渦流れなどの発生によるエネルギー逸散が顕著になることが確認できる。しかし、延長型の堤体では、短周期側では反射率が高く、中間周期以降は透過率が高い傾向にあるため、他の堤体に比べてエネルギー逸散率 EL が低くなるようである。

(4) 海水交換量および流速分布

図-13 は各堤体の無次元海水交換量 Q^* を周期パラメータの波長水面幅比 L/B_w による変化で示す。この無次元海水交換量 Q^* は、単位幅当りでかつ波の一周期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 ($=HL/2\pi$) で除した量に相当する。

この図より、無次元海水交換量 Q^* は、傾斜型の堤体で最も小さく、波運動に伴う海水交換が期待できないことが分かる。これは傾斜型の堤体について遊水室内の断面積が最小であることや遊水室開口部が堤体下部の水塊を吸引しにくい形状であることなどが要因と考えられる。

一方、延長型の堤体は、 $L/B_w=10.0\sim12.0$ (中間周

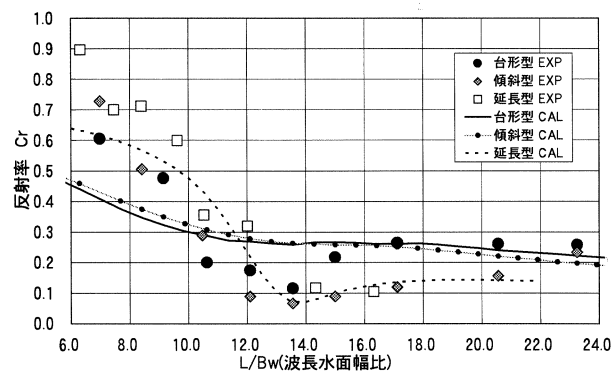


図-10 各堤体形状の反射率 C_r ($H=4\text{cm}$, MSL)

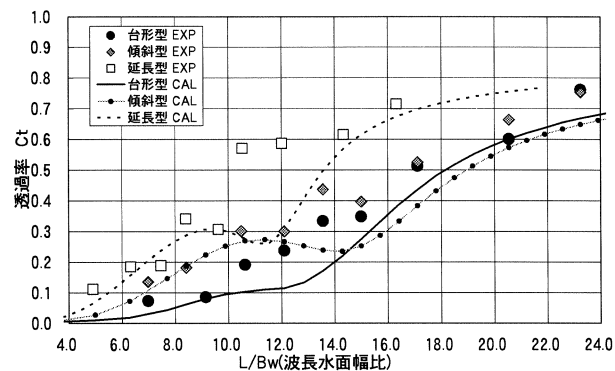


図-11 各堤体形状の透過率 C_t ($H=4\text{cm}$, MSL)

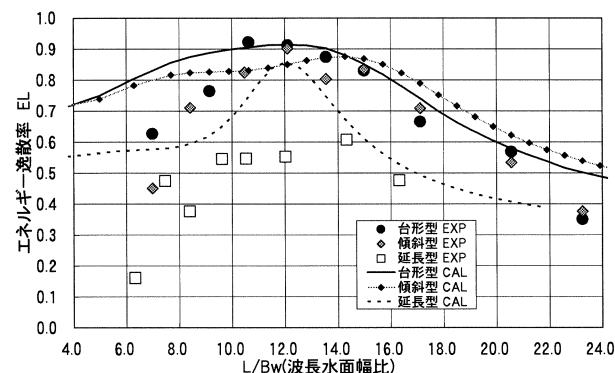


図-12 各堤体形状のエネルギー逸散率 EL ($H=4\text{cm}$, MSL)

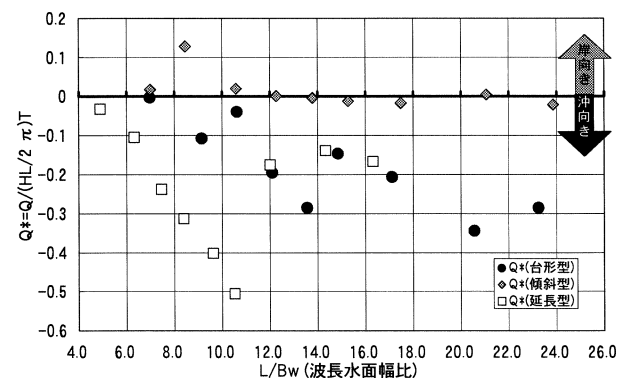


図-13 各堤体形状の海水交換量 Q^* ($H=4\text{cm}$, MSL)

期帯) の間で交換量が急激に変化する傾向が見られ、同時に従来の台形型の堤体の海水交換量より同程度もしくは高い値を示すなど、海水交換機能に優れる

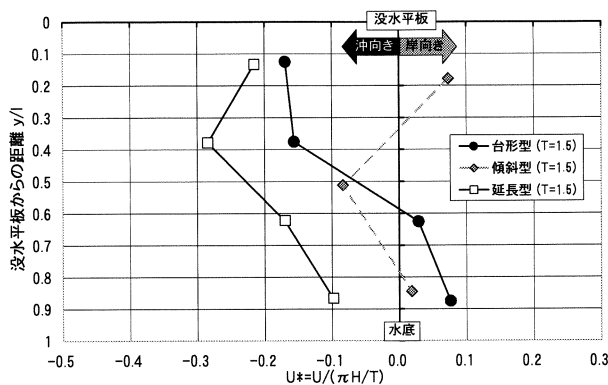


図-14 各堤体形状の堤体下部における流速分布 U^*
($H=4\text{cm}$, $T=1.5\text{s}$, MSL)

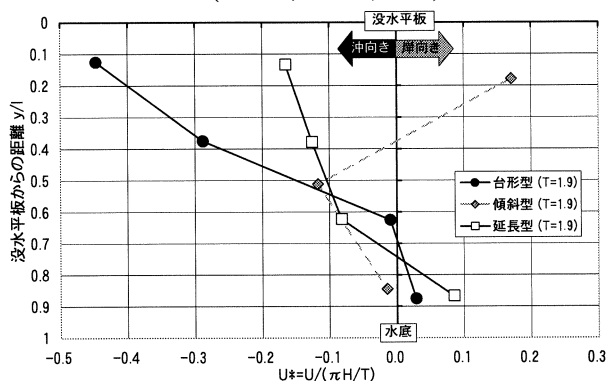


図-15 各堤体形状の堤体下部における流速分布 U^*
($H=4\text{cm}$, $T=1.9\text{s}$, MSL)

ことが確認できる。これは流況の観測結果より、台形型堤体では、遊水室からのジェット流は水平方向に放出されるのに対して、延長型は斜め下方向に放出されるため、堤体下部の流れにより強く影響するものと考えられる。また $L/B_w=14\sim16$ (長周期帯) では、中間周期帯に比べて透過率が上昇するため順次に海水交換量も減少するものと考えられる。

図-14, 15 は堤体下部の平均流速の分布特性を明らかにするため、測定した水平流速の時間波形から求めた平均流速 U の鉛直分布を二つの異なる波周期の条件について示す。図中では、この平均流速を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^* で表示してある。

これより台形型と延長型の堤体では、堤体の直下付近で沖向きの平均流が卓越し、水底付近になるとそれが弱まるか逆に岸側に向かう平均流になることが認められる。そして、延長型の堤体では、台形型に比較して、より短い周期条件下で沖向きへの平均流が卓越することも確認できる。なお、傾斜型については、平均流速の分布形状がく字形であるため、総海水交換量としては少なくなることが理解される。

(5) 延長型堤体の開口部における流速特性

図-16 は、延長型堤体の開口部に設置した電磁流速計による流速の測定結果を示す。ここでは水平方向は沖向き、鉛直方向は下向きを負と定義して、引き波時の水平・鉛直流速のピークを無次元化して示

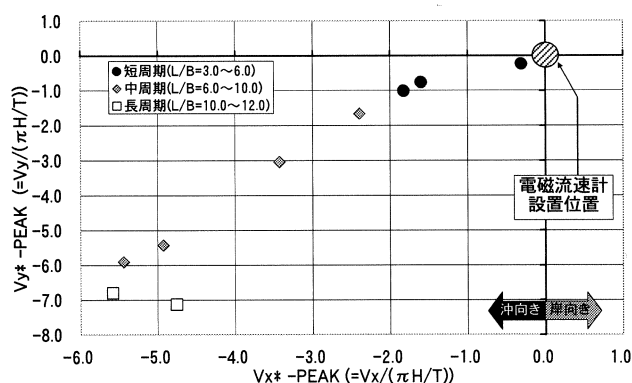


図-16 延長型の開口部ジェット流の特性
(引き波時, $H=4\text{cm}$, MSL)

す。波条件としては周期の大小に着目して区別した。

この図より、延長型堤体の開口部における流向と流速値を知ることができる。そして、波周期が長くなると、流速の絶対値が増大することや、その流向は水平を0度として、およそ30~45度程度の角度でジェット流を放出していることが認められる。この流向は、ほぼ傾斜底板の角度に等しく、ジェット流は底板に沿うように流出することが分かる。

6. 結論

- (1) 従来の台形型堤体と没水平板を傾斜させた底板傾斜型堤体では、消波機能に有意な差は見られず没水平板を傾斜させても消波機能に影響は少ない。しかし傾斜させたことで遊水室内の水塊量が減少するため、有意な海水交換量は期待できない。
- (2) 前面版延長型堤体は他の堤体に比べ吃水深が深いことから反射率 C_r は短周期側、透過率 C_t は中周期にかけて高くなる傾向を示す。また引き波時に遊水室内の開口部から流出するジェット流は、開口部が鉛直下方に向いていることおよび底板が傾斜しているため、水底方向に向かう反時計回りの強い渦を形成し、水底付近の鉛直混合に有効である。

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) 合田良美，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，海講論文集，第52巻，pp.671-675，2005。