堤体下部に重量部を設けた二重遊水室型防波堤の消波機能と海水交換機能について

中村 孝幸¹・鍵本 慎太郎²・Firman Husain³

¹正会員 三省水工株式会社 技術顧問 (〒150-0045 東京都渋谷区神泉町1-2)

E-mail: t-nakamura@sanshosuiko.co.jp

²国土交通省中国地方整備局 宇部港湾・空港整備事務所(〒759-0204 宇部市大字妻崎開作32番地1)

E-mail: kagimoto.shintaro.h.08@cee.ehime-u.ac.jp

³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)

E-mail: firman.husain@cee.ehime-u.ac.jp

港内水排出方式の遊水室型海水交換防波堤について、常時波浪および暴浪時の両者に対して海水交換機能と反射波低減機能が發揮できるように、従来の単一遊水室構造に代わり二重遊水室構造を提案し、その有効性を実験と理論解析により明らかにした。この際、第2遊水室の下部港内側に水平版を取り付ける工法を採用することで、長周期側での反射波低減効果のみならず高い海水交換機能も發揮できることが判明した。また、実海域に二重遊水室構造の重力式堤体を採用するときに問題となりやすい耐波安定性の向上を目的として、堤体底部にコンクリート重量部を設ける構造断面を提案し、そのときの波浪制御効果や海水交換量についても明らかにした。この際、通水路の位置が高くなるため、通水路を港内側の底層部まで延長する構造形式の有効性についても検討を進めた。

Key Words: double-water-chamber type breakwater, piston mode wave resonance, reflection wave dissipater, water exchange functions, massive base

1. はじめに

港湾や漁港では、厳しい波浪条件下にある場合が多く、その対策として防波堤などの外郭施設が建設されてきた。このような外郭施設は、港内の静穏度を高める反面、港内水域の閉鎖性を高め、港湾内外の海水交換を阻害するなど、港内の水質汚濁の原因となりやすい。この対策として、既に著者ら¹⁾は、図-1に示す前面カーテン壁と水平版で構成される遊水室型海水交換防波堤を提案し、その反射波・透過波の低減効果や遊水室内のピストンモード波浪共振およびそれに伴う強い渦流れを利用して有意な平均流の生成が可能となることを明らかにした。また、図-2に示すような二重遊水室構造とすることで、単一遊水室構造に比較して反射波の減勢に有効な周期帯が拡大できることや、第2遊水室の下部後側に水平版（図-2中の点線）を設けることで、広い周期帯にわたり海水交換量が増大することなどを確認している。

本研究では、二重遊水室構造を採用することで、単一遊水室構造に比較して背後重量部が小規模になり、重力式構造として安定性が不十分になりやすいなどの懸念がある。このため、堤体底部に新たに重量部を付加するこ

とで安定性を高め、耐波性能の向上を図る工法について提案すると共にその影響について検討する。具体的には

図-1 単一遊水室型海水交換防波堤 (縮尺 S=1/13.5) unit:cm

図-2 二重遊水室型海水交換防波堤 (縮尺 S=1/13.5) unit:cm

図-3 実験水槽および波高計設置位置 unit:m

カーテン壁の吃水深などの変化による影響である。また、底部重量部を設けることで通水部位置が高くなるため、港内側底層水を港外へ排出することを目的として、堤体背後の港内底層部まで通水路を延長する構造形式の有効性についても明らかにする。

2. 実験概要

(1) 実験水槽

本実験では、図-3 に示す愛媛大学工学部の長さ 30 m、幅 1 m、高さ 1.25 m の 2 次元水槽を用いた。この水槽の一端にはピストン型造波装置が、他端には、再反射を防ぐためにヘチマロンよりなる消波工が設置してある。水路内には 1/30 勾配の不透過な斜面を設け、この背後には斜面に接続するように水平床が設置してある。また、平均流の発生により模型堤体の前後において水位差が生じないようにするため、通水性の高いヘチマロン消波工の下部から水平床と斜面床の床下を介して造波板前まで至る通水部を確保し、鉛直面内における循環流の生成を阻害しないようにした。

(2) 実験条件

実験で用いた水深 h は、マウンド法先のそれを代表量として 49.5 cm, 50.3 cm, 60 cm の 3 種類に変化させた。これらは、後述する堤体底部の重量部高さ (9.6 cm) を勘案して設定した。作用波は規則波と不規則波の 2 種類とし、その周期 T は 0.9~2.8 s の範囲内で複数の条件 (不規則波では有義波周期 $T_{1/3}$) を採用した。このとき、入射波高 H は 6 cm, 12 cm の 2 種類 (不規則波では有義波高 $H_{1/3}$) とした。不規則波については、ブレットシュナイダー・光易型スペクトルを目標として造波した。

(3) 計測方法

本実験では、6 台の容量式波高計を図-3 に示すように設置して、各点での水位変動量を測定した。模型堤体の沖側には、入・反射波分離用に 2 台、その透過側に透過波測定用に 1 台、第 1・第 2 遊水室内の波高測定用に各 1 台を使用した。ここで、反射率については、合田ら²⁾によ

る入・反射波の分離推定法より求めた。透過率については、透過波測定用波高計による計測値を、別途に実施した入射波検定実験による堤体位置での測定波高値で除して求めた値とした。

また、海水交換機能の検討のため、2 台の電磁流速計を図-1, 2 に示すように設置した。これらは、第 2 遊水室内に 1 台、堤体下部に設けた通水部の中央に 1 台である。

3. 二重遊水室構造の採用による効果

最初に、単一遊水室構造と二重遊水室構造における波浪制御効果および海水交換機能について比較してみる。なお、これら堤体の断面は図-1, 2 に示すものである。

図-4, 5 は、 $H=6$ cm, 12 cm のときの反射率 C_r 、透過率 C_t の実験結果を、周期を表すパラメータとして L/B (波長と堤体幅の比) による変化で示す。図中には、中村・井出³⁾による減衰波理論に基づく算定結果についても併せ示す。理論算定では、等価線形抵抗係数 f_c が必要になるが、実験結果と比較して定量的な妥当性が確認された $f_c=0.35$ を用いた。

反射率 C_r の実験結果に着目すると、両構造とも算定結果と定性的、定量的にほぼ類似した特性を示すことが分

図-4 単一遊水室構造と二重遊水室構造の反射率の比較

図-5 単一遊水室構造と二重遊水室構造の透過率の比較

図-6 単一遊水室構造と二重遊水室構造の海水交換量の比較

かる。また、両構造とも L/B が1.8付近で極小値を示すことも実験結果から分かる。一方、単一遊水室構造では再度上昇して L/B が2.3付近で $Cr=0.6$ であるのに対し、二重遊水室構造では L/B が3.7付近で再び極小値を示し、 L/B の条件に関わらず全体的に0.6以下であることも確認される。このことから、二重遊水室構造とすることで反射波の減勢に有効な周期帯が大幅に拡大できることが確認され、二重遊水室構造にする有効性が認められる。

次に、透過率 Cr の実験結果に着目すると、両構造とも算定結果と定性的、定量的に一致することが分かる。また、長周期側では二重遊水室構造とすることで多少ながら高い値を示すことが確認される。ただし、 Cr は高くても0.4以下であり、背後重量物の波向き方向長を多少延長することで、有意に低減できるものと考えられる。

図-6は、 $H=6\text{ cm}$ 、 12 cm のときの海水交換量 Q^* の実験結果を L/B による変化で示す。このとき海水交換量は、波一周期当りの単位幅輸送流量を、進行波による半周期間の移動水塊量 $HL/2\pi$ で除した無次元量 Q^* で示す。ここでは、岸向きへの平均輸送流量を正と定義している。実験結果に着目すると、 $H=6\text{ cm}$ 、 12 cm の両波高条件共に、両構造とも L/B が2.5付近で Q^* が極大値を示すことが分かる。しかし、全周期帯にわたって、単一遊水室構造の方が Q^* の絶対値が大きく、冲向き方向へより強い平均流の発生が確認される。これは、二重遊水室構造では、第2遊水室のピストンモード波動運動が顕著になる条件下でピストン運動による水塊が岸沖方向にほぼ二分されて流出するため、結果的に冲向き方向への平均流が減少することによるものと推測される。

4. 第2遊水室に設けた水平版の効果

長周期側での反射波の低減のために二重遊水室構造を採用すると、副作用として海水交換量が減少することが判明した。そこで、その対策工法として、図-2中の点線で示すように背後重量物の下部に水平版を後側に取り付

ける方法を提案する。これは、第2遊水室内でのピストンモード波浪共振による下降ジェット流の向きと強さを制御して、冲向き方向への平均流を強化する狙いである。

図-7～9は、第2遊水室の下部後側に水平版を設けた場合と設けていない場合の $H=6\text{ cm}$ 、 12 cm における反射率 Cr 、透過率 Cr の実験結果および算定結果、海水交換量 Q^* の実験結果を、それぞれ L/B による変化で示す。理論算定の線形抵抗係数 f_c は、先ほどと同様に全て0.35とした。

まず、反射率 Cr の実験結果に着目すると、両堤体は算定結果と定量的、定性的に概ね一致することが分かる。しかし、実験結果は、水平版を第2遊水室に設けることで、2番目の極小値が多少増加する傾向を示す。これは、

図-7 第2遊水室の水平版の反射率への影響

図-8 第2遊水室の水平版の透過率への影響

図-9 第2遊水室の水平版の海水交換量への影響

水平版を設置することで第2遊水室のピストンモード波動運動が抑制されることによるものと考えられる。すなわち、第2遊水室の下部に水平版を設けることで、第2遊水室からの水塊の出入が阻害され、長周期側での反射波低減効果が縮小したものと考えられる。しかし、異なる2つの波周期の条件下で極小反射率が現れるなど依然として有効な反射波の低減効果は認められる。

透過率 C_t の結果に着目すると、水平版の設置による顕著な影響は見られず、各堤体における実験結果と算定結果では、定性的、定量的にほぼ一致することが分かる。

一方、海水交換量 Q^* の実験結果に着目すると、波高条件に関わらず、水平版を後に設けると、水平版がない場合に比べ全体的に冲向き方向への Q^* が増加することが確認できる。これは、別途に実施した流況の観測実験によると、第2遊水室内で水位が上昇する際に時計回りの渦が形成され、水平版との干渉によって第1遊水室と同様に冲向き方向へのジェット流が発生することによる。そして、このジェット流は、中周期付近で最も勢いがあるため、 Q^* もこのとき極大値を示すようになるものと推測される。

5. 安定性向上のための底部重量部設置の影響

(1) 堤体下部重量部の設置による影響

二重遊水室構造とすることで、堤体重量が軽くなりやすく耐波安定性が懸念されるため、以下では安定性向上のために重量を増した断面形状について検討を行った。重量を増す工夫としては、図-10に示すような堤体底部に重量部を設ける構造形式を採用した。その際、第1カーテン壁の吃水深 d_1 の影響についても別途に検討した。

図-11～13は、 $H=6\text{ cm}$ の条件下で、それぞれ底部重量部がない場合およびある場合について、以下の3種類の堤体モデルに対する結果の比較を示す。

- 1) Type01：底部重量部なし、 $h=49.5\text{ cm}$ 、 $d_1=19.4\text{ cm}$
- 2) Type02：底部重量部あり、 $h=60.0\text{ cm}$ 、 $d_1=19.4\text{ cm}$
- 3) Type03：底部重量部あり、 $h=50.3\text{ cm}$ 、 $d_1=9.7\text{ cm}$

図-10 底部重量部を設けた海水交換防波堤
(縮尺 $S=1/13.5$) unit:cm

これらの図中では、反射率 C_r 、透過率 C_t の実験結果および算定結果、海水交換量 Q^* の実験結果を、 L_0/B （沖波波長と堤体幅の比）による変化で示す。このとき、線形抵抗係数 f_c は上記と同様に0.35とした。

反射率 C_r の算定結果に着目すると、底部重量部を設け、第1カーテン壁の吃水深 d_1 を浅くしたType03の場合、2か所の極小値が現れる周期帯が、共に短周期側に移行することが分かる。これは、 d_1 が浅い場合、振動水塊量が他の2種類の堤体モデルに比べ減少し、各遊水室内でのピストンモード波浪共振の共振点が短周期側に移行するためである。また、 d_1 は同じでも底部重量部を設けると、第2極小値を示す周期帯が短周期側へ移行することが分かる。これは、底部重量部の設置の影響に

図-11 底部重量部設置による反射率への影響

図-12 底部重量部設置による透過率への影響

図-13 底部重量部設置による海水交換量への影響

より水深 h に対する不透過部の割合が増加したためと考えられる。

これらのことを勘案して、 Cr の結果に着目すると、全ての堤体モデルにおいて、実験結果と算定結果は定性的にほぼ一致することが確認される。しかし、中周期付近から長周期にかけて Type03 の場合、定量的な一致度が低下する。これは、 $d1$ が第 2 遊水室内でのピストンモード波浪共振の発生に強く関係していることや、他の 2 種類の堤体モデルよりも水平版上で形成される時計回りの渦の規模が大きくなることやそれによるエネルギー逸散が強く現れたことによるものと考えられる。

次に、透過率 Cr の実験結果に着目すると、全ての堤体モデルにおいて、算定結果と定性的、定量的にほぼ一致することが分かる。このことから、透過波は $d1$ に関係なく、制御可能であるといえる。

海水交換量 Q^* の実験結果に着目すると、全ての堤体モデルにおいて、安定した冲向き方向への平均流が発生していることが確認できる。しかし、Type03 の場合、極大値を示す周期帯が短周期側へ移行することが分かる。これは、 Cr と同様に、 $d1$ が浅いことで、振動水塊量が減少し、遊水室内でのピストンモード波浪共振の共振点が短周期側に移行することによるもので、このことにより、 Q^* の極大値を示す周期帯も短周期側へ移行したものと考えられる。つまり、 Q^* はピストンモード波浪共振と密接な関係にあることによる。

(2) 港内底層水の排出のための延長水路の効果

底部重量部を設けた堤体では、港内側の通水路付近の水塊を港外へ排出することは可能であるが、貧酸素水塊が問題視されている港内側底層水の排出は難しいと考えられる。ここでは、この対策として通水路を港内側の底層部まで延長させた図-14に示すような堤体を提案する。そして、この延長通水路が波浪制御効果や海水交換機能に与える影響について検討を行った。この際、水深 h は 60 cm の条件に固定した。

このときの結果を示すのが図-15～17であり、 $H=6$ cm のときの反射率 Cr 、透過率 Cr の実験結果および算定結果、海水交換量 Q^* の実験結果を、 $L/(Bw1+Bw2)$ (波長と遊水室幅の和の比)

図-14 港内側底層水の排出を目的とする
海水交換防波堤 (縮尺 S=1/13.5) unit:cm

室幅の和の比) による変化で示す。

反射率 Cr の実験結果に着目すると、両堤体とも算定結果と定量的、定性的に概ね一致し、通水路長に関わらず、同様の反射波低減効果を示すことが確認される。

透過率 Cr の実験結果に着目すると、両堤体とも算定結果と定性的、定量的に一致することが分かる。また、通水路を港内側の底層部へ延長することで、 Cr が 0.1 程度減少することが分かる。これは、通水路長を延長することで、通水路を通過する波のエネルギーが減少するためと考えられる。このことから、透過波の低減効果の面では、通水路長を伸ばすことは有効であるといえる。

海水交換量 Q^* に着目すると、いずれの堤体においても安定した冲向き方向への Q^* が確認される。しかし、

図-15 通水路延長による反射率への影響

図-16 通水路延長による透過率への影響

図-17 通水路延長による海水交換量への影響

図-18 規則波と不規則波の反射率における比較

通水路長を延長した堤体では、延長のない堤体に比べ Q^* の絶対値が多少減少することが分かる。これは、通水路の延長に伴い、摩擦損失や曲がり損失の影響を受け、冲向き方向への平均流が小さくなるためと考えられる。

次に、通水路を延長させた堤体に対する不規則波についての検討を行っていく。図-18は、 $H=6\text{cm}$ における規則波と不規則波の反射率 Cr の実験結果および算定結果を示す。両作用波とも実験結果と算定結果は定性的、定量的にほぼ一致することが分かる。また、規則波に比べ不規則波では、反射率の低減が非常に緩やかで、2か所で極小値が現れない。これは、不規則波の場合は様々な周期や波高の波が含まれており、全体的に平均化されることで、いずれの有義波の周期に対しても反射率に差が生じにくくなったためと考えられる。

また、海水交換量 Q^* の実験結果は、紙面の都合上、省略するが、不規則波における Q^* を求める過程で無次元化を行う際に、平均の波高と波長を用いると、規則波と同程度の海水交換量が見込めることが確認された。

6. まとめ

PERFORMANCE OF A DOUBLE-WATER-CHAMBER TYPE WATER EXCHANGE BREAKWATER WITH A MASSIVE BASE

Takayuki NAKAMURA, Shintaro KAGIMOTO and Firman HUSAIN

In order to expand the effective range of wave frequency of a water chamber type breakwater, a double-water-chamber structure was newly proposed, and examined experimentally and theoretically. It has an additional function, such as a water exchange function, to an ordinal breakwater function. It was clarified that both the functions of wave energy dissipation and water exchange can be retained by installing a horizontal plate partly at the lower end of the second water chamber. In order to improve the stability of the new breakwater against stormy waves, performance of a new measure, typically an addition of a massive base to the breakwater, has been examined. It was confirmed that both the functions of wave energy dissipation and water exchange are also retained for this new breakwater.

(1) 二重遊水室構造を採用することで、反射波は異なる2つの波周期の条件下で効果的に減勢される。結果として反射波の減勢に有効な周期帯が大幅に拡大され、長周期側でも有効な防波機能が発揮できる。

(2) 冲向き方向への海水交換量は二重遊水室構造とすると、単一遊水室構造に比べ全体的に低下する傾向にある。この対策として、第2遊水室の下部後側に水平版を設ける方法は、広い周期帯にわたり海水交換量が回復するなど有効な改善工法である。

(3) 二重遊水室構造において、耐波安定性の向上のため堤体底部にコンクリート重量部を設けると、海水交換用の通水路位置が水面に近くなることやカーテン壁の吃水深が浅くなるなどの変更を余儀なくされるが、波浪制御効果や海水交換機能はほとんど影響を受けない。ただし、カーテン壁の吃水深が浅くなることで、反射率の極小値を示す周期帯や海水交換量の極大値を示す周期帯が短周期側へ移行する傾向がある。

(4) 港内側の底層部の海水交換を目的に通水路を底層部まで延長する工法は、港内側底層水を港外へ効果的に排出することが可能になるなど有効であることが確認された。また、通水路の延長により、透過率が減少するなど効果も確認された。

本研究は、(財)災害科学研究所に設けた沿岸新技術研究会による研究成果の一部であり、ここに記して会員の皆様に深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) 中村孝幸, 中山哲蔵, 大村智宏, 榎本一徳, 兼貞透: 遊水室型海水交換防波堤の効果に及ぼす通水路構造と基礎マウンドの影響について, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.736-740, 2006.
- 2) 合田良実, 鈴木康正, 岸良安治, 菊池治: 不規則波における入・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: 波の逸散現象を考慮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.